

А.А.ЧЕРНЫШЕВ

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРИБОРОВ  
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
МИКРОСХЕМ



А.А.ЧЕРНЫШЕВ



Таблица данных для построения плана контроля по методу однократной выборки. По заданным значениям приемочной вероятности безотказной работы  $P_2$ , риска заказчика  $\beta$ , приемочного числа  $C$  определяется объем выборки

$\beta$	$C$	$P$												$\beta$	$C$	$P$											
		0,999	0,995	0,99	0,97	0,95	0,93	0,91	0,9	0,8	0,7	0,6				0,999	0,995	0,99	0,97	0,95	0,93	0,91	0,9	0,8	0,7	0,6	
0,1	0	2301	459	229	76	45	32	24	22	10	7	5		0	1599	319	159	53	31	22	17	15	7	5	—		
	1	3288	776	388	128	76	54	42	37	18	11	8		1	2999	599	299	99	59	42	32	29	14	9	6		
	2	5320	1062	532	176	105	74	57	52	25	16	12		2	4279	855	427	142	84	60	46	42	20	13	10		
	3	6679	1834	668	221	132	94	72	65	32	20	15		3	5510	1102	551	183	109	78	60	54	26	17	13		
	4	7991	1596	798	265	158	112	87	78	38	25	18		4	6719	1343	671	223	133	95	73	66	32	21	15		
	5	9991	1853	927	308	182	130	101	91	44	29	21		5	7899	1579	789	262	157	111	86	78	88	25	18		
	6	10530	2104	1050	349	203	148	115	103	50	33	24		6	9070	1814	906	301	180	128	99	89	44	29	21		
	7	11768	2352	1175	390	234	166	129	116	56	37	27		7	10230	2046	1022	340	203	145	112	101	50	33	24		
	8	12992	2596	1296	431	258	183	142	128	62	41	30		8	11378	2274	1136	378	226	161	125	112	55	36	27		
	9	14203	2898	1418	471	281	200	156	139	68	45	33		9	12510	2502	1250	416	249	177	137	123	61	40	30		
	10	15403	3078	1537	513	306	218	168	152	74	48	36		0,2	10	13638	2726	1362	453	271	193	150	135	66	44	32	
	11	16595	3317	1657	551	330	235	182	163	80	53	38		11	14778	2954	1476	491	294	209	162	146	72	47	35		
	12	17778	3553	1775	592	353	252	195	175	86	56	41		12	15898	3178	1588	528	316	225	175	157	78	51	38		
	13	18955	3389	1893	632	377	268	209	187	92	60	44		13	17018	3402	1700	566	338	241	187	168	83	55	41		
	14	20125	4022	2009	671	400	285	220	198	98	64	47		14	18118	3622	1810	602	360	257	199	179	89	58	43		
	15	21289	4255	2126	708	424	301	235	211	104	68	50		15	19238	3846	1922	640	383	273	212	190	94	62	46		
	16	22448	4487	2241	746	446	318	247	227	109	72	53		16	20358	4070	2034	677	405	289	224	201	100	66	49		
	17	23602	4717	2357	786	470	335	259	234	115	75	56		17	21438	4286	2142	713	427	304	236	212	105	68	51		
	18	24753	4948	2472	824	492	350	273	245	121	79	58		18	22558	4510	2254	750	449	320	248	223	110	73	54		
	19	25899	5177	2587	862	518	367	285	256	127	82	61		19	23638	4726	2362	786	470	335	260	234	116	76	57		
	20	27041	5405	2700	898	540	383	297	268	132	86	64		20	24758	4950	2474	823	493	351	243	245	121	80	60		

А.А.ЧЕРНЫШЕВ

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРИБОРОВ  
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
МИКРОСХЕМ



МОСКВА  
«РАДИО И СВЯЗЬ»  
1988



Scan AAW

ББК 30.14  
Ч-49  
УДК 621.396.6

**Редакция литературы по электронной технике**

Рецензенты: доктор физ.-мат. наук Г. И. Епифанов  
доктор физ.-мат. наук А. П. Карацуба

**Чернышев А. А. Основы надежности полупроводнико-  
Ч-49 вых приборов и интегральных микросхем. — М.: Радио  
и связь, 1988. — 256 с.: ил.**

**ISBN 2-256-00042-X.**

В книге на основе современных физических представлений рассмотрены вопросы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Значительное внимание уделено влиянию различных технологических факторов и условий применения на надежность. Подробно рассмотрены дефекты, возникающие в исходных материалах, и механизмы отказов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Изложены методы обеспечения их надежной работы в различной радиоэлектронной аппаратуре.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся производством полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и их применением. Она будет полезна студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Ч 2403000000-011 42—88  
046(01)—88

**ББК 30.14**

**ISBN 5-256-00042-X**

© Издательство «Радио и связь», 1988



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В новой редакции Программы Коммунистической партии Советского Союза, утвержденной XXVII съездом, в разделе, посвященном ускорению научно-технического прогресса особо подчеркивается фундаментальное значение качества продукции. В этом разделе говорится: «В центр экономической политики партии и всей практической работы выдвигается задача всемерного повышения технического уровня и качества продукции. Советская продукция должна воплощать в себе последние достижения научной мысли, соответствовать самым высоким технико-экономическим, эстетическим и другим потребительским требованиям...»

Принятое ЦК КПСС и Советом Министров СССР в июне 1986 г. постановление «О мерах по коренному повышению качества продукции» направлено на практическую реализацию установок XXVII съезда КПСС. В Постановлении наряду с комплексом организационных, экономических и правовых мероприятий, направленных на повышение технического уровня и качества продукции, поставлена задача по осуществлению планомерного и непрерывного совершенствования квалификации рабочих и специалистов с целью обеспечения соответствия их профессиональной подготовки постоянно возрастающему уровню техники и технологии.

Предлагаемая книга, посвященная надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, по мнению автора, может оказаться полезной инженерно-техническим работникам при изучении вопросов качества, предусмотренного Постановлением. Книга основана на поставленном автором в Московском институте электронного машиностроения курсе «Физические основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем».

В гл. 1 рассмотрены основы теории надежности, терминология, некоторые законы распределения случайных величин.

В гл. 2, 3, 4 и 5 рассмотрены этапы жизненного цикла приборов и их связь с внешними факторами. Дана общая характеристика механических, климатических и радиационных воздействий, которым подвергаются приборы в процессе эксплуатации в аппаратуре.

С учетом специфики технологии производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем рассмотрению технологических факторов, воздействующих на приборы при их изготовлении и использовании в аппаратуре, посвящена гл. 6. В ней под-

робно изложены данные о дефектах, вносимых в структуру приборов на этапах жизненного цикла, и их влиянии на надежность приборов.

В гл. 8 рассматриваются типичные механизмы отказов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

В гл. 9, 10 и 11 изложены принципы и организации испытаний приборов, методы прогнозирования надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, а также организационные особенности обеспечения надежной работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в аппаратуре.

Приступая к написанию книги, автор отчетливо представлял себе все трудности, которые он встретит, пытаясь в ограниченном объеме осветить весьма обширный круг вопросов, связанных с избранной темой. В результате некоторые разделы книги изложены весьма сжато, а отдельные проблемы только упомянуты, так как имеется обширная литература, им посвященная.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БИС	—	большая интегральная микросхема
ВАХ	—	вольт-амперная характеристика
ГИС	—	гибридная интегральная микросхема
ЗУПВ	—	запоминающее устройство с произвольной выборкой
ИМС	—	интегральная микросхема (микросхема)
И <sup>2</sup> Л	—	инжекционная логика
КМОП/КНС-микросхема	—	комплементарная интегральная микросхема, выполненная по технологии металл-окисел-полупроводник на сапфировой подложке
КМОП ИМС	—	комплементарная интегральная микросхема, выполненная по технологии металл-окисел-полупроводник
МДП	—	структура металл-диэлектрик-полупроводник
МОП	—	структура металл-окисел-полупроводник
НИИ	—	научно-исследовательский институт
НТД	—	нормативно-техническая документация
ОКР	—	опытно-конструкторская разработка
ОТК	—	отдел технического контроля
ПТХ	—	переходная тепловая характеристика
СБИС	—	сверхбольшая интегральная микросхема
СЖР	—	сверхжесткое рентгеновское излучение
ТТЛ	—	транзисторно-транзисторная логика
ТТЛШ	—	транзисторно-транзисторная логика с диодами Шотки
ТУ	—	технические условия
ЭВМ	—	электронная вычислительная машина
ЭСЛ	—	эмиттерно-связанная логика

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

- $a$  — параметр формы в распределении Вейбулла
- $a_y$  — ускорение, вызываемого ударным воздействием
- $b$  — параметр масштаба в распределении Вейбулла; коэффициент трения в системе
- $C$  — нормирующий множитель в нормальном законе распределения
- $C$  — теплоемкость
- $c_0$  — удельная теплоемкость
- $C_0$  — поверхностная емкость
- $C$  — приемочное число отказов
- $c$  — скорость света
- $C_1$  — конструктивная константа
- $D$  — решающая функция в теории распознавания образов
- $d$  — диаметр ямки
- $d(t)$  — толщина интерметаллического слоя
- $E$  — напряженность электрического поля
- $E$  — модуль Юнга
- $E_a$  — энергия активации процесса
- $E_d$  — пороговая энергия образования междоузельных атомов
- $E_g$  — ширина запрещенной зоны
- $E_V$  — граница валентной зоны
- $F$  — внешняя сила, вызывающая вынужденные колебания
- $F_e$  — сила, возникающая при взаимодействии потока электронов с ионами металла в проводнике
- $F(t)$  — интегральная функция распределения наработки до отказа
- $F_z$  — сила, вызванная действием электрического поля на ионы металла в проводнике
- $f$  — сила трения
- $\hat{f}(t)$  — плотность распределения наработки до отказа
- $\hat{i}(t)$  — статистическое определение плотности распределения наработки до отказа
- $G(\omega)$  — спектральная плотность мощности шума
- $g$  — ускорение силы тяжести
- $h$  — глубина ямки
- $h_{21ф}$  — коэффициент передачи тока транзистора после облучения
- $I$  — поток частиц через единичную поверхность в единицу времени
- $I_0$  — ток насыщения через  $p$ - $n$  переход
- $I_B$  — базовый ток
- $I_{Г}$  — генерационно-рекомбинационная составляющая тока
- $I_e$  — поток электронов
- $I_d$  — диффузионная составляющая тока
- $I_{обр}$  — обратный ток через диод
- $I_{пр}$  — прямой ток через диод
- $I_{лр}$  — первичный фототок
- $\bar{i}^2_{ш}$  — среднее квадратическое значение шумового тока
- $J$  — плотность тока
- $K$  — константа, коэффициент масштабирования
- $K$  — коэффициент упругости
- $K_\rho$  — константа изменения удельного сопротивления при облучении
- $K_\tau$  — реакционная константа времени жизни носителей заряда

- $k$  — постоянная Больцмана
- $k_p$  — удельная скорость реакции
- $L$  — длина канала полевого транзистора; интенсивность светового излучения
- $L_n$  — диффузионная длина электронов
- $L_p$  — диффузионная длина дырок
- $L_\alpha$  — длина трека  $\alpha$ -частицы
- $l$  — длина образца
- $M[n]$  — математическое ожидание
- $m$  — масса твердого тела
- $N_d$  — число приборов в генеральной совокупности, имеющих скрытые дефекты
- $N(0)$  — число исправных приборов в выборке на момент времени  $t=0$
- $N(t)$  — число исправных приборов в выборке на момент времени  $t$
- $N(t+t_0)$  — число исправных приборов в выборке на момент времени  $t+t_0$
- $n$  — концентрация носителей заряда (электронов) в полупроводнике
- $n_i$  — собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике
- $n(t)$  — число приборов в выборке, отказавших на момент времени  $t$
- $n(t+t_0)$  — число приборов в выборке, отказавших на момент времени  $t+t_0$
- $P$  — электрическая мощность
- $P(Q)$  — вероятность приемки партии по выборке  $n$
- $P(t)$  — вероятность безотказной работы
- $\hat{P}(t)$  — статистическое определение вероятности безотказной работы
- $p$  — концентрация дырок в полупроводнике
- $P_\gamma$  — мощность дозы  $\gamma$ -излучения
- $Q$  — добротность колебательной системы
- $Q_{cr}$  — критический накопленный заряд
- $Q(t)$  — вероятность отказа
- $q$  — заряд диэлектрика
- $R_\square$  — поверхностное сопротивление
- $R_T$  — тепловое сопротивление
- $R_{TKC}$  — тепловое сопротивление корпус — среда
- $R_{ТПК}$  — тепловое сопротивление переход — кристаллодержатель
- $R_{ТФЛ}$  — тепловое сопротивление кристаллодержатель — фланец
- $r_B$  — активное сопротивление базы
- $r_K$  — активное сопротивление коллектора
- $r_E$  — активное сопротивление эмиттера
- $S$  — коэффициент масштабирования; крутизна стократворной характеристики
- $S_d$  — дополнительная характеристика объекта в теории распознавания образов
- $S_{p-n}$  — площадь  $p$ - $n$  перехода
- $S_\Phi$  — скорость поверхностной рекомбинации
- $s$  — площадь поперечного сечения
- $T$  — абсолютная температура
- $T$  — период колебаний
- $T_{кр}$  — температура кристалла
- $T_{p-n}$  — температура  $p$ - $n$  перехода
- $T_{окр}$  — температура окружающей среды
- $\bar{t}$  — средняя наработка до отказа
- $\hat{t}$  — статистическое определение средней наработки до отказа
- $t_p$  — временная прочность материала
- $t_\gamma$  — гамма-процентная наработка до отказа
- $u$  — переменная при преобразовании нормального закона распределения
- $U$  — изменение потенциала
- $U_B$  — падение напряжения на базовой области
- $U_D$  — полное падение напряжения на диоде



$U_D(T)$  — прямое падение напряжения на диоде после отжига  
 $U_D(\Phi)$  — прямое падение напряжения на диоде после облучения  
 $U_{пр}$  — напряжение на  $p-n$  переходе в прямом направлении  
 $U_m$  — напряжение питания после масштабирования  
 $U_{пор}$  — пороговое напряжение полевого транзистора  
 $U_{p-n}$  — падение напряжения на области пространственного заряда  
 $U_{ЭБ}$  — напряжение эмиттер — база  
 $\Delta U_{ЭБ}$  — приращение напряжения эмиттер — база  
 $U_0$  — исходное напряжение питания при масштабировании  
 $U_{ш}^2$  — среднее квадратическое значение напряжения теплового шума  
 $V(n)$  — коэффициент вариации  
 $V$  — объем материала  
 $v$  — линейная скорость перемещения  
 $w$  — толщина образца  
 $W_i$  — толщина области  $p-n$  перехода  
 $W_B$  — ширина базовой области  
 $X$  — основная характеристика объекта в теории распознавания образов  
 $X_m$  — максимальная амплитуда перемещения  
 $X_0$  — начальная максимальная амплитуда перемещения  
 $Y_n$  — максимальная амплитуда колебаний при ударе  
 $\omega$  — корень уравнения частот изгибных колебаний  
 $\alpha$  — риск изготовителя  
 $\alpha_n$  — удельная свободная поверхностная энергия  
 $\beta$  — риск заказчика  
 $\Gamma$  — коэффициент пропорциональности  
 $\gamma$  — значение вероятности при определении гамма-процентного ресурса  
 $\gamma_{ш}$  — коэффициент, характеризующий вид спектра шумов  
 $\delta$  — логарифмический декремент затухания  
 $\eta$  — относительное увеличение амплитуды ускорения при ударе  
 $\lambda(t)$  — интенсивность отказов  
 $\hat{\lambda}(t)$  — статистическое определение интенсивности отказов  
 $\lambda_T$  — удельная теплопроводность  
 $\mu$  — коэффициент Пуассона  
 $\rho$  — удельное сопротивление  
 $\sigma$  — плотность материала  
 $\sigma_P$  — техническая прочность материала  
 $\sigma(x)$  — среднее квадратическое отклонение случайной величины  
 $\sigma^2(x)$  — дисперсия случайной величины  $x$   
 $\tau$  — длительность ударного импульса  
 $B(\Phi)$  — время пролета неосновных носителей через базу после облучения  
 $\tau_\Phi$  — время жизни неосновных носителей после облучения  
 $\tau_0$  — начальное время жизни неосновных носителей  
 $\tau_T$  — тепловая постоянная нагрева  
 $\Phi_K$  — контактная разность потенциалов  
 $\Phi_T$  — тепловой потенциал  
 $\omega_0$  — собственная частота механических колебаний

## ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковая электроника — исключительно прогрессирующая область науки и техники. Уже в первом десятилетии с момента изобретения транзистора полупроводниковые приборы нашли широкое применение в самой разнообразной аппаратуре, основательно потеснив вакуумные лампы. Это было связано с их преимуществами перед последними, такими как малая потребляемая мощность, отсутствие цепей накала, миниатюрное конструктивное оформление, высокая механическая прочность и практически мгновенная готовность к работе, что позволило коренным образом изменить внешний облик и функциональные возможности аппаратуры. Существенно уменьшились ее габаритные размеры и энергоемкость. В частности, широкое распространение получили малогабаритные переносные радиоприемники, магнитофоны, телевизоры с батарейным питанием. Неизмеримо расширились возможности вычислительной техники: резко возросла вычислительная мощь и быстродействие ЭВМ при значительном снижении габаритных размеров и энергопотребления. Благодаря дискретным полупроводниковым приборам, аппаратура уверенно шагнула на борт самолета, ракеты, проникла в космос, все больше и больше воспринимая на себя функции управления процессами и различными объектами, являвшимися ранее безраздельной областью деятельности человека.

Дальнейшее развитие полупроводниковой электроники пошло по пути интеграции дискретных активных и пассивных элементов в одной гибридной или монолитной схеме. Этим было положено начало микроэлектронике, позволившей еще больше сократить габаритные размеры аппаратуры и значительно расширить ее функциональные возможности.

Наибольшее распространение в первую очередь получили цифровые (логические) интегральные микросхемы и схемы памяти, так как их схемотехника основывается на бистабильных переключаемых элементах, которые сравнительно легко реализуются в твердотельном исполнении. Сложнее оказалось положение дел с линейными схемами ввиду существенных ограничений, присущих монолитным интегральным микросхемам, обусловленных наличием паразитных связей через подложку, дефектностью исходных материалов, нестабильностью усилительных и шумовых характеристик активных элементов схемы, ограниченным диапазоном номиналов твердотельных резисторов, конденсаторов, а также отсутствием твердотельных индуктивностей.

Тем не менее за последнее время в аппаратуре, основанной на применении классической линейной схемотехники, наметилась устойчивая тенденция к переходу на цифровую обработку сигналов и использованию для этих целей цифровых интегральных микросхем. Это позволяет обойти препятствия, возникающие при создании линейных интегральных микросхем, в особенности схем большой и сверхбольшой степени интеграции и, кроме того, открывает пути к созданию более экономичной и помехоустойчивой аппаратуры.

Внедрение полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в радиоэлектронную аппаратуру проходило в условиях преодоления существенных трудностей. Одной из основных при этом была проблема обеспечения высокой надежности функционирования приборов в аппаратуре. Теоретически долговечность идеального полупроводникового прибора исчислялась несколькими сотнями лет. И такое прогнозирование следует считать обоснованным, так как оно базируется на том, что долговечность прибора, в котором отсутствуют движущиеся механические части и в качестве активной области используется твердый полупроводник, определяется в основном износостойкостью конструкционных материалов и скоростью деградационных физико-химических процессов, стимулируемых прохождением тока через прибор и факторами внешних воздействий. На практике столь многообещающие прогнозы не подтвердились. Реальные полупроводниковые приборы, пришедшие на смену лампам, имели сравнительно низкую долговечность и выходили из строя.

Возникновение проблемы надежности в электронике относят к началу пятидесятых годов, когда развитие техники привело к созданию сложной радиоэлектронной аппаратуры и передаче ей основных функций управления. В этот период специалисты столкнулись с очень частыми отказами аппаратуры и, в первую очередь, за счет ее схемотехнического несовершенства и некачественных элементов. Для преодоления создавшихся трудностей необходим был научно обоснованный подход к обеспечению высокой работоспособности различной аппаратуры и приборов в нее входящих. Этот подход и вылился в создание нового научного направления — науки о надежности.

В своем развитии теория и практика надежности прошли несколько этапов. На первом этапе систематизировались данные по отказам аппаратуры и комплектующих изделий, исследовались и определялись законы распределения отказов во времени, разрабатывалась единая терминология в области надежности, создавались методы расчета надежности аппаратуры и ее элементов, накапливался статистический материал о количественных показателях надежности.

На последующем этапе, характеризующемся более глубоким проникновением в суть надежности характеристик приборов, разрабатывались требования по надежности аппаратуры и приборов, формировались все более объективные и информативные

методы испытаний на надежность. В технологический процесс производства приборов вводился более детальный контроль промежуточных операций и выходной контроль готовых приборов перед отправкой потребителю. В производстве приборов все шире применялись статистические методы контроля, позволяющие своевременно корректировать технологический процесс с целью недопущения брака на заключительных операциях. В повседневную практику внедрялось изучение причин отказов приборов в аппаратуре с целью выработки корректирующих мероприятий по их устранению.

На современном этапе развития сложились и заняли прочные позиции фундаментальные направления теории надежности. Среди них в первую очередь следует указать на формирование математической теории надежности, явившейся исходным пунктом становления науки о надежности вообще. Развитие методов сбора и обработки статистических данных о надежности послужило основой формирования статистической теории надежности.

Обширные исследования в области физико-химических процессов, обуславливающих изменение физических и электрических параметров материалов и приборов, явились базой становления физической теории надежности. Формирование последнего направления в науке о надежности позволило от пассивного наблюдения статистических данных по надежности перейти к углубленному изучению причин возникновения отказов, выявлению механизмов деградации характеристик материалов и параметров приборов, к активному воздействию на технологические процессы и конструкцию приборов посредством научно обоснованных корректирующих действий.

Основные положения общей теории надежности являются фундаментом для разработки прикладных вопросов надежности в различных областях техники, в том числе и в полупроводниковой электронике.

Большой объем работ, направленных на повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, у нас в стране и за рубежом и достигнутые успехи в этой области обеспечивают в большинстве случаев функционирование приборов в эксплуатации с надежностью, характеризуемой интенсивностью отказов  $\lambda = 1 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  и менее. Однако постоянный рост сложности радиоэлектронной аппаратуры, расширение выполняемых ею управляющих функций выдвигают все более жесткие требования к комплектующим изделиям. Это в свою очередь стимулирует расширение фронта работ в области надежности и вызывает необходимость периодического обобщения получаемых результатов.

В настоящее время специалисты, занятые проблемами качества, располагают обширной литературой по различным аспектам надежности. К их услугам более 200 книг и сборников, не считая журнальных статей и публикаций, посвященных надежности различных технических устройств и аппаратуры. Во многих из

них в той или иной степени затрагиваются вопросы надежности полупроводниковых приборов и микросхем.

Анализ литературных данных позволяет проследить эволюцию в области надежности приборов, а также выявить степень разработанности отдельных направлений в области надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, их влияния друг на друга и взаимной увязки.

В наиболее ранних публикациях [65] проблема надежности полупроводниковых приборов только упоминается, однако уже на этой стадии обозначается тенденция к развитию физических исследований в области надежности. В переводных работах [66, 67] впервые публикуются обширные данные по надежности приборов различных классов.

В последующих изданиях рассматриваются либо статистические данные по надежности приборов, используемые при конструировании аппаратуры, либо методы испытаний полупроводниковых приборов и микросхем, отдельные механизмы отказов и некоторые физико-химические аспекты надежности приборов. В [68] впервые комплексно изложены организационные вопросы надежности приборов. Показано принципиальное различие между надежностью, определяемой при заводских, сдаточных испытаниях, и эксплуатационной надежностью приборов; сформулирован ряд основных требований к стабильности технологического процесса производства приборов, их конструкции, а также предложены рекомендации по созданию надежных радиоэлектронных схем, предусматривающие применение коэффициентов запаса по уровням токов, напряжений и мощности рассеяния. Наиболее полно конструктивные и физические аспекты надежности микросхем изложены в работах, опубликованных в 80-е годы [45, 46]. Однако исключительно динамичное развитие полупроводниковой электроники требует постоянного переосмысления уже сложившихся взглядов и обобщения новых данных по надежности приборов.

Наиболее характерными чертами современной полупроводниковой электроники являются рост сложности приборов и уменьшение геометрических размеров отдельных элементов полупроводниковых структур. Ежегодно сложность интегральных микросхем примерно удваивается и в настоящее время степень интеграции достигает нескольких сотен тысяч элементов на кристалле. Естественно рост степени интеграции вызывается ростом функциональной сложности интегральных микросхем. Если приборы первого поколения были аналогами логических ячеек или усилительных каскадов, выполненных на дискретных элементах, то современные большие и сверхбольшие интегральные микросхемы выполняют функции процессоров электронных вычислительных машин, блоков оперативной памяти и целой ЭВМ. В настоящее время широким фронтом ведутся работы по созданию на одной полупроводниковой пластине уже не отдельного радиотехнического устройства, а системы в целом.



Как уже говорилось выше, рост сложности приборов сопровождается уменьшением геометрических размеров элементов до 1 мкм и менее. Переход к субмикронным размерам, значительная функциональная сложность интегральных микросхем порождают и новые надежностные проблемы. В первую очередь они связаны с тем, что с усложнением приборов увеличивается число контролируемых параметров, по которым судят о качестве интегральных микросхем и правильности их функционирования. Это, в свою очередь, приводит к тому, что в ряде случаев исчерпывающие испытания с учетом всего разнообразия сочетаний параметров просто невозможно провести.

Уменьшение геометрических размеров элементов интегральных микросхем делает исключительно острой проблему качества исходных материалов и совершенства технологических процессов изготовления приборов. Дело в том, что исходный монокристаллический полупроводниковый материал, используемый для изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, не является бездефектным. Точечные и объемные нарушения кристаллической решетки возникают в монокристалле еще при его выращивании. На последующих операциях изготовления приборов эти нарушения дополняются другими дефектами различных частей полупроводниковой структуры. Уменьшение размеров элементов интегральных микросхем делает их весьма чувствительными к дефектам с размерами, приближающимися к атомным. В этих условиях становится исключительно важным знание дефектности исходных материалов, причин возникновения дефектов в процессе изготовления полупроводниковых структур, эволюции дефектов на последующих этапах жизненного цикла приборов и их влияния на надежность.

Кроме дефектов исходных материалов и несовершенств в структурах, возникающих в процессе выполнения различных операций технологического процесса изготовления приборов, исключительное значение приобретает чистота технологических сред, в том числе газообразных энергоносителей, воздушной среды в зоне обработки, деионизованной воды, химических реактивов. Так, если для микросхем малой и средней степени интеграции с линейными размерами элементов 2...4 мкм приемлемым был контроль посторонних частиц в средах с размерами до 0,3 мкм, то для больших и сверхбольших интегральных микросхем и многоэмиттерных транзисторов СВЧ-диапазона присутствие в технологических средах частиц с размерами 0,1 мкм становится опасным.

На современном этапе развития полупроводниковой электроники физические аспекты надежности приобретают первостепенное значение. Несмотря на то, что две традиционные наиболее важные задачи: определение фактической надежности приборов и повышение достигнутого уровня надежности сохраняют свою доминирующую роль, знание, почему тот или иной прибор не надежен, умение выработать и осуществить необходимые мероприятия по устранению причин ненадежности, становится все более

приоритетным. В этой связи еще большее значение приобретает исследование физики отказов.

Исследование физики отказов преследует следующие цели: посредством анализа отказавших приборов улучшать конструкцию приборов, если анализ проводится на стадии разработки; совершенствовать технологию в условиях производства приборов и оптимизировать правила применения приборов в условиях эксплуатации. Не менее важно раскрытие физики явлений, приводящих к отказам, познание механизмов отказов и формирование на этой основе их моделей, используемых при прогнозировании надежности.

Важно подчеркнуть принципиальное различие между видом отказа и механизмом отказа. Вид отказа — это очевидное событие, через которое проявляется неисправная работа прибора. Этим событием может быть, например, короткое замыкание или обрыв. В ряде случаев вид отказа из-за сложности интегральных микросхем вообще невозможно установить, не вскрывая прибора и детально не исследуя его структуру.

Механизм отказа — это сложный физико-химический процесс, протекающий в приборе под действием внутренних и внешних факторов.

С точки зрения надежности мало знать или установить вид отказа. Куда существеннее познать причины, приведшие к нему. Это главная цель анализа отказов.

Рост сложности приборов с уменьшенными размерами элементов приводит к появлению новых механизмов отказов, не свойственных менее сложным приборам с большими геометрическими размерами активных и пассивных областей.

Уменьшение размеров структурных элементов ИМС с сохранением их совместимости по уровням питающих напряжений, входных и выходных сигналов с традиционными приборами вызывает возрастание электрических полей, плотности токов в активных областях и тоководущих дорожках металлизации. Все это приводит к повышению мощности рассеяния, возрастанию температуры  $p-n$  переходов биполярных приборов и, в конечном счете, к снижению надежности. Дефекты в исходном материале, их перегруппировка и размножение при изготовлении приборов в условиях уменьшения геометрических размеров элементов делают объем полупроводника активным участником деградационных процессов, оказывающих существенное влияние на надежность приборов. Одна из главных проблем в этом случае связана с ростом токов утечки, вызывающих нестабильность работы как биполярных, так и полевых приборов, в частности схем памяти, в особенности во время восстановления информации. С объемными эффектами связаны и так называемые мягкие ошибки или сбои в микросхемах памяти, возникающие в результате воздействия  $\alpha$ -частиц, излучаемых радиоактивными элементами, содержащимися в материалах корпусов и конструктивных элементов приборов. С уменьшением размеров накопительных элементов памяти заряды, возникающие в

объеме полупроводника под воздействием  $\alpha$ -частиц, становятся сравнимыми с зарядами конденсаторов памяти, в результате чего схема становится неработоспособной.

В современных микросхемах толщина подзатворного окисла не превышает 20 нм. С ростом сложности приборов с одновременным уменьшением геометрических размеров элементов возможно уменьшение толщины окисла до 5 нм и менее. В этих условиях тонкий подзатворный окисел становится элементом, наиболее чувствительным к возрастанию электрического поля. Пробой тонкого подзатворного диэлектрика является в настоящее время одним из доминирующих отказов МДП-приборов. Наиболее распространенной моделью отказов приборов с тонким подзатворным диэлектриком является модель внутреннего пробоя, вызываемого ударной ионизацией. Однако в пленках двуокиси кремния тоньше 10 нм ударная ионизация возникнуть не может из-за малых длин пробега инжектированных в окисел электронов. В связи с тем, что пробой тонкого диэлектрика является доминирующим механизмом отказа в МДП-приборах, модель отказа нуждается в уточнении.

Применение окисной изоляции при многослойной металлизации приводит к повышению вероятности возникновения отказов из-за пробоя диэлектрика. Это происходит потому, что несмотря на большую толщину изолирующих слоев по сравнению с подзатворным диэлектриком, качество межслойной изоляции много ниже и главным образом из-за шероховатости поверхности металлических или поликремниевых дорожек. В местах сужения окисла и на остриях выступов весьма вероятно возникновение повышенных напряженностей электрического поля, что приводит к пробое диэлектрика.

Вызванное уменьшением размеров элементов возрастание электрического поля является причиной возникновения нового механизма отказов, связанного с инжекцией горячих электронов в подзатворный диэлектрик. (Горячие электроны образуются при лавинном пробое  $p$ - $n$  переходов, в области повышенного электрического поля вблизи стока МДП-структур с коротким каналом.) Инжекция и захват горячих носителей ответственны за деградацию коэффициента усиления биполярных транзисторов, сдвиг порогового напряжения и изменение проводимости канала полевых приборов.

Масштабирование интегральных микросхем налагает значительные ограничения на характеристики металлизации и контактов, размеры которых уменьшаются до 1 мкм<sup>2</sup> по площади и до 15 ... 20 нм по толщине.

Увеличение плотности тока и повышение температуры  $p$ - $n$  переходов усиливает процессы деградации контактов и металлизации за счет взаимодиффузии контактирующих материалов и электромиграции. Это значительно усложняет проблему выбора материала для металлизации. Наиболее распространенным материалом, используемым в настоящее время для создания контак-

тов и металлической разводки, является алюминий. Однако контактирующие кремний и алюминий имеют очень высокие коэффициенты взаимной диффузии. Даже при комнатной температуре кремний легко диффундирует в алюминий до концентрации предельной растворимости, равной приблизительно 1%. В свою очередь алюминий легко проникает в кремний. При этом диффузия идет неравномерно как по площади, так и по объему контактирующего кремния. Это связано с тем, что на поверхности полупроводника в районе контакта с металлом имеются островки двуокиси кремния, препятствующие проникновению алюминия. На границах контакта диффузия алюминия в кремний практически не ограничена. Это обстоятельство исключает возможность применения алюминия для создания контактов с глубиной залегания менее 1 мкм и стимулирует поиск других материалов, пригодных для создания стабильных контактов и металлизации в полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах.

Обнадеживающие результаты дает применение многослойной металлизации с использованием силицидов тугоплавких металлов. Так, например, для контакта с кремнием применяется силицид платины, на который наносится промежуточный слой из сплава титана с вольфрамом, создающий диффузионный барьер, препятствующий взаимодействию поверхностного алюминиевого слоя с силицидом платины и кремнием.

Уменьшение размеров элементов интегральных схем с обеспечением совместимости с традиционными приборами приводит к повышению плотности тока в дорожках металлизации, что в свою очередь значительно увеличивает вероятность возникновения процесса электромиграции, сопровождающегося переносом и накоплением металла у положительного электрода с одновременным образованием пустот у отрицательного электрода. Из-за неоднородности металлизации поток ионов металла неодинаков по длине проводника и по его сечению. В результате металл может накапливаться локально, образуя бугорки и выросты в виде нитей или усов. В свою очередь локальное накопление пустот, их объединение может привести к образованию поперечных трещин на металлизации. Все это вместе взятое формирует механизм развития отказов металлизации, приводящих к закорачиванию соседних дорожек поверхностной и многослойной металлизации. Поиск путей предотвращения электродиффузии идет по пути применения легирования алюминия медью, кремнием, магнием, титаном и другими примесями, которые, преимущественно локализуясь на границах зерен, препятствуют диффузии алюминия. Этой же цели служит и поиск путей создания металлической разводки в аморфном состоянии.

Коррозия металлизации одна из наиболее часто встречающихся проблем в полупроводниковой электронике. Она особенно остра в приборах, герметизированных в пластмассу, так как фактически пластмассовые корпуса не защищают приборы от проникновения влаги. Возрастание электрических полей в масштабиру-

ванных приборах увеличивает риск возникновения гальванической и электролитической коррозии металлизации. При первой — в процессе участвуют два металла; это, как правило, алюминий и золото в месте контакта алюминиевой разводки с золотой проводочкой. При второй — алюминий корродирует как на положительном, так и на отрицательном электроде. Катодной коррозии способствует избыток фосфора в фосфорсиликатном защитном стекле. Ионы хлора способствуют анодной коррозии. Наличие влаги во внутреннем объеме прибора значительно усиливает процесс электролитической коррозии.

Следует особо подчеркнуть, что изучение механизмов отказов приборов должно осуществляться с учетом не только внутренних физико-химических процессов, происходящих в них, но и всех условий окружающей среды и всех факторов внешних воздействий, которые во многих случаях играют доминирующую роль в развитии тех или иных процессов деградации параметров. При этом должны учитываться две существующих в настоящее время и продолжающих развиваться противоречивых тенденции в дальнейшем прогрессе в области полупроводниковой электроники и аппаратуры. Как было показано выше, развитие полупроводниковых приборов и микросхем идет по пути постоянного роста сложности с одновременной миниатюризацией, которые чреваты снижением механической и электрической прочности конструкции приборов. В то же время расширение диапазона применения полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в разнообразной аппаратуре выдвигает более жесткие требования по механическим вибрационным и ударным воздействиям, температурному диапазону, радиационной стойкости, влажности и т. д.

Разрешение противоречий этих двух тенденций может быть осуществлено только согласованными действиями в сферах разработки и производства приборов и в сфере применения их в различной аппаратуре. Например, миниатюризация полупроводниковых приборов и интегральных микросхем привела к тому, что они стали исключительно чувствительными к воздействию статического электричества, накапливающегося как на деталях приборов, так и на инструменте, оснастке, оборудовании, одежде операторов и т. д. Для предотвращения губительного воздействия статических зарядов, величина которых в ряде случаев способствует возникновению разности потенциалов в десятки и сотни киловольт, необходимы специальные меры защиты приборов как в условиях их производства, так и в условиях монтажа в аппаратуре и при последующей эксплуатации.

Анализ развития полупроводниковой электроники еще раз подтверждает справедливость вывода о том, что возможности, открывающиеся дальнейшей миниатюризацией приборов, могут быть в полной мере реализованы только при наличии системного подхода к обеспечению надежной работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в аппаратуре. Основой системы является положение, согласно которому надежность как свойство



приборов закладывается при их разработке и все дальнейшие действия при производстве приборов должны быть направлены на поддержание надежных свойств на том уровне, который был заложен при разработке. *Различные контрольные, отбраковочные, испытательные операции не улучшают надежности приборов.* Заложенный при разработке приборов уровень надежности проявляется при их применении в различной аппаратуре.

В сфере применения приборов исключительно важное значение играет специальная регламентация мер, обеспечивающих рациональное использование надежных свойств приборов. Комплекс таких мер начинается регламентацией правил выбора номенклатуры приборов при разработке аппаратуры, правил конструирования аппаратуры с учетом разброса параметров приборов и их температурной зависимости, а также с учетом соответствующих коэффициентов запасов, обеспечивающих облегченные режимы эксплуатации приборов.

Входной контроль приборов у изготовителя аппаратуры, регламентация правил обращения с приборами, эксплуатационные инструкции, определяющие оптимальный порядок эксплуатации аппаратуры потребителем, все это неотъемлемые составляющие единой системы обеспечения надежной работы приборов в аппаратуре.

Материальной основой всей системы является подсистема сбора данных о надежности и анализ отказов приборов на всех этапах их жизненного цикла. Согласованность всех составляющих системы обеспечения надежности, постоянное совершенствование организационных основ системы должно идти в ногу с прогрессом в области полупроводниковой электроники.

## ГЛАВА 1

### ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

#### 1.1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ

Вся промышленная продукция, в том числе полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы, характеризуется таким показателем, как *качество*, представляющим собой совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением [1]. Свойства продукции разделяют на простые и сложные.

*Надежность* является одним из фундаментальных сложных свойств продукции и определяется как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в данных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования [2].

Под объектами будем понимать полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы, называя их в дальнейшем для краткости приборами, в тех случаях, когда речь идет об общих свойствах этих изделий электронной техники. С точки зрения ремонтно-пригодности приборы относятся к неремонтируемым изделиям разового действия.

Очевидно, количественно выразить свойство прибора сохранять во времени в неизменном виде совокупность параметров в каких-либо единицах, как, например, при определении массы, объема, размеров, невозможно. Поэтому для количественной оценки надежности применяют вероятностные величины.

Применение вероятностного подхода к оценке надежности диктуется также и тем обстоятельством, что приборы должны выполнять свои функции при многофакторном воздействии режимов и условий применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования, сочетания которых носят случайный характер. Для описания конкретного прибора пользуются понятиями *исправного* и *работоспособного состояния*. Под исправным подразумевают состояние прибора, при котором он соответствует всем требованиям нормативной или конструкторской документации. Работоспособное состояние — такое, при котором все параметры характеризующие способность прибора выполнять заданные функции, соответствуют нормативно-технической или конструкторской документации, однако в приборе, способном выполнять свои ос-

новные функции, в данном состоянии могут быть повреждения, не влияющие на его электрические параметры, например нарушения маркировки, сколы, царапины или вмятины на корпусе.

Фундаментальным понятием в теории надежности является определение *отказа* как события, заключающегося в нарушении работоспособного состояния. При этом под нарушением работоспособного состояния понимается либо внезапное прекращение функционирования прибора, например из-за короткого замыкания или обрыва, либо значительное изменение электрических параметров, например усилительных свойств транзистора, в результате чего перестает работать схема, в которой он используется. Более подробно классификация отказов будет рассмотрена в последующих главах. Здесь же следует сказать, что для невозстанавливаемых объектов понятие отказа совпадает с предельным состоянием, т. е. состоянием объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо.

Характеристикой прибора, связанной с его эксплуатацией, является *наработка*, представляющая собой продолжительность или объем работы прибора. Нарботка измеряется в часах непрерывной или суммарной периодической работы прибора в электрическом режиме. Нарботку прибора в часах от начала эксплуатации до наступления предельного состояния называют *техническим ресурсом*. Календарная продолжительность от начала эксплуатации до наступления предельного состояния называется *сроком службы*.

Выше говорилось, что надежность является сложным свойством. Оно в зависимости от назначения прибора и условий его применения состоит из сочетаний таких свойств, как безотказность, долговечность и сохраняемость.

Под *безотказностью* понимают свойство прибора непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Из определения следует, что данное свойство отражает основное содержание надежности, так как главное назначение любого прибора, используемого по прямому назначению, — исправно выполнять предназначенные ему функции в течение определенного промежутка времени. Применительно к полупроводниковым приборам и микросхемам под безотказностью понимается способность непрерывно сохранять исходные параметры при использовании в выпрямительном, усилительном, переключательном и других режимах, обусловленных схемами и условиями эксплуатации.

В связи со значительной емкостью рассмотренного выше свойства его зачастую в зарубежной литературе и публикациях Международной электротехнической комиссии отождествляют с надежностью. Однако для полного описания надежности необходимо иметь и другие ее составляющие, такие как *долговечность*, представляющую собой свойство прибора сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания. Данное свойство ох-

ватывает ресурсные характеристики прибора и существенно дополняет понятие безотказности. И наконец, *сохраняемость*, как свойство прибора сохранять значения показателей безотказности и долговечности в течение и после хранения и транспортирования, замыкает основной перечень свойств, характеризующих надежность.

## 1.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Для количественной оценки надежности служат различные показатели. В качестве основного избрано *время безотказной работы прибора*. Это вызвано тем, что моменты отказов совокупности приборов случайным образом распределены во времени в силу того, что сами приборы имеют определенный разброс электрических параметров. Последний связан с неоднородностью исходных материалов и колебаниями технологических процессов их изготовления, приводящими к разбросу их внутренних геометрических размеров и физических характеристик. Кроме того, при эксплуатации приборов в составе аппаратуры, на них воздействуют самые различные сочетания внешних факторов. Все вместе взятое приводит к неоднозначности результатов, когда мы переходим к рассмотрению надежности характеристик отдельных приборов. Поэтому время безотказной работы прибора, или *наработка до отказа*, рассматриваются как непрерывные случайные величины, описываемые интегральной функцией распределения  $F(t)$ .

Основным показателем безотказности является *вероятность безотказной работы*, под которой понимается вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ прибора не возникает. Из определения следует, что конкретное численное значение вероятности безотказной работы прибора имеет смысл лишь тогда, когда оно поставлено в соответствие заданной наработке, в течение которой возможно возникновение отказа. В силу этого вероятность безотказной работы  $P(t)$  рассматривается в предположении, что в начальный момент времени исчисления заданной наработки прибор был работоспособен.

Вероятность безотказной работы определяется по формуле

$$P(t) = 1 - F(t). \quad (1.1)$$

В ряде случаев кроме показателя вероятности безотказной работы применяют показатель *вероятности отказа*, определяя его как вероятность того, что прибор откажет в течение заданного времени работы, будучи работоспособным в начальный момент времени. Вероятность отказа  $Q(t)$  определяется по формуле

$$Q(t) = F(t) = 1 - P(t). \quad (1.2)$$

В данном случае вероятность отказа  $Q(t)$  совпадает с интегральной функцией распределения наработки до отказа. Для описания мгновенных значений показателей надежности кроме интегральной функции распределения наработки до отказа применяет-

ся дифференциальная функция, или *плотность распределения наработки до отказа*, обозначаемая  $f(t)$  и определяемая по формуле

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = -\frac{d}{dt} P(t). \quad (1.3)$$

Другой дифференциальной характеристикой безотказности является *интенсивность отказов*  $\lambda(t)$ , под которой понимается условная плотность вероятности возникновения отказа прибора, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возникал. В соответствии с определением интенсивность отказов определяется плотностью вероятности, отнесенной к вероятности безотказной работы прибора на данный момент времени в соответствии с формулой  $\lambda(t) = f(t)/P(t)$ .

С учетом (1.1) и (1.3) получаем

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{d}{dt} P(t) = \frac{1}{1-F(t)} \frac{d}{dt} F(t). \quad (1.4)$$

Здесь необходимо указать на то обстоятельство, что интенсивность отказов как показатель безотказности применима только в случае невозстанавливаемых объектов, к которым относятся полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы. Безотказность различной радиоэлектронной аппаратуры, в подавляющем большинстве своем относящейся к восстанавливаемым объектам, характеризуется параметром *потока отказов*, представляющим собой отношение среднего числа отказов объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки.

Плотность вероятности и интенсивность отказов имеют размерность  $\text{ч}^{-1}$ , под которой подразумевается количество отказов за один час работы. Значения интенсивности отказов подавляющего большинства современных приборов в зависимости от условий эксплуатации лежат в пределах  $10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ . Поэтому для упрощения написания в переводной литературе [63] применяют другие единицы, такие, например, как фит. Один фит равен  $10^{-9} \text{ ч}^{-1}$ . Интенсивность отказов прибора, исчисляемая величиной  $10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ , будет равняться 10 фитам.

С использованием дифференциальных показателей формируются другие показатели безотказности, в частности *средняя наработка до отказа*  $\bar{t}$ , представляющая собой математическое ожидание наработки прибора до первого отказа:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} [1-F(t)] dt = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (1.5)$$

и гамма-процентная наработка до отказа  $t_{\gamma}$ , определяемая как наработка, в течение которой отказ прибора не возникает с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Этот показатель определяется из уравнения [2]



$$P(t_\gamma) = 1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (1.6)$$

Содержание последних двух терминов нуждается в дополнительных пояснениях.

При определении средней наработки до отказа учитываются все возможные значения наработки на интервале времени от 0 до  $\infty$ , в том числе много меньшие и существенно превосходящие среднее значение наработки. В силу этого обстоятельства среднее значение наработки, будучи жестко связанным с вероятностью безотказной работы, отражает сравнительно невысокий ее уровень. Например, для экспоненциального распределения средняя наработка до отказа соответствует значению вероятности безотказной работы, равному 0,37. Это означает, например, что при средней наработке того или иного прибора, равной 1000 ч, вероятность достижения наработки 1500 ч менее 0,37 и с ростом наработки по сравнению со средней наработкой вероятность безотказной работы уменьшается, достигая в пределе нулевого значения. С целью оценки наработки при приемлемом уровне безотказной работы и введено понятие гамма-процентной наработки. Так, для того же экспоненциального распределения гамма-процентная наработка при  $P(t_\gamma) = 0,9$  будет примерно в десять раз меньше, а при  $P(t_\gamma) = 0,99$  в сто раз меньше средней наработки до отказа. Это означает, что при средней наработке до отказа, равной 1000 ч, вероятность безотказной работы на уровне 0,99 обеспечивается только на первых 10 ч работы прибора. Или в партии из 100 приборов, работающих в идентичных условиях и характеризующихся средней наработкой до отказа 1000 ч, через 10 ч работы с вероятностью 0,99 останутся работоспособными 99 приборов, а через 100 ч — 90. И по прошествии 1000 ч — всего около 37 приборов будут работоспособными.

Показателями долговечности являются *средний ресурс* (математическое ожидание ресурса) и *гамма-процентный ресурс*. Последний представляет собой наработку, в течение которой прибор не достигает предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Соотношения между этими показателями такие же, как и между рассмотренными выше показателями безотказности.

Кроме того, к показателям долговечности относятся *средний срок службы* (математическое ожидание срока службы) и *гамма-процентный срок службы*, определяемый как календарная продолжительность эксплуатации прибора, в течение которой он достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Соотношения между ресурсом и сроком службы одного и того же типа приборов могут меняться в зависимости от интенсивности их эксплуатации. Например, ресурс приборов, равный 8000 ч, может быть использован в течение одного го-

да при эксплуатации в аппаратуре, работающей в непрерывном режиме, и в течение 10 лет и более — в аппаратуре периодического действия при среднем расходе ресурса 700 ... 800 ч·г<sup>-1</sup>.

Показателями сохраняемости являются *средний срок сохраняемости* (математическое ожидание срока сохраняемости) и *гамма-процентный срок сохраняемости*, определяемый как срок сохраняемости, достигаемый прибором с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Показатели долговечности и сохраняемости определяются по формулам, идентичным формулам, описывающим показатели безотказности.

При  $\gamma=100\%$  гамма-процентная наработка (ресурс, срок службы, срок сохраняемости) называются *установленной безотказной наработкой* (установленным ресурсом, установленным сроком сохраняемости): при  $\gamma=50\%$  гамма-процентная наработка (ресурс, срок службы, срок сохраняемости) называется *медианной наработкой* (ресурсом, сроком службы, сроком сохраняемости).

Основные составляющие и показатели надежности применительно к полупроводниковым приборам и интегральным микросхемам приведены на рис. 1.1.

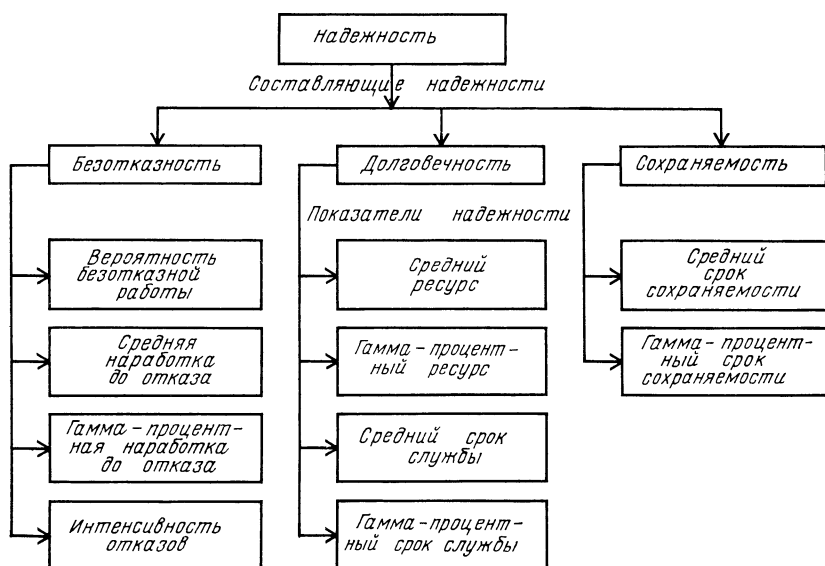


Рис. 1.1. Основные составляющие и показатели надежности

### 1.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Для установления функциональной взаимозависимости показателей надежности выразим вероятность безотказной работы через другие показатели. Используя выражение (1.3), запишем:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = - \frac{dP(t)}{P(t) dt}. \quad (1.7)$$

Интегрируя выражение (1.7) методом разделения переменных, разрешим его относительно  $P(t)$ :

$$\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t) dt; \ln [P(t)] = -\lambda(t) dt; \\ P(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (1.8)$$

Из выражения (1.8) следует, что основной показатель надежности — вероятность безотказной работы  $P(t)$  представляет собой экспоненциальную функцию, которая в интервале времени  $(0 \dots \infty)$  изменяется от 1 до 0.

Вероятность отказа  $Q(t)$ , отражающая событие, противоположное безотказной работе в том же интервале времени, изменяется от 0 до 1. Используя это обстоятельство, запишем:

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt \text{ при } t \rightarrow \infty Q(t) = \int_0^\infty f(t) dt = 1.$$

С учетом (1.2) выразим вероятность безотказной работы через плотность вероятности отказа  $f(t)$ :

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \\ = \int_0^\infty f(t) dt - \int_0^t f(t) dt = \int_t^\infty f(t) dt. \quad (1.9)$$

Вид зависимостей  $P(t)$  и  $Q(t)$  приведен на рис. 1.2. Из рисунка следует, что вероятность безотказной работы монотонно убывает с ростом наработки, а вероятность отказа возрастает. Таким образом, запас надежности, имеющийся у прибора на начальный момент времени  $t=0$ , постепенно расходуется, и при достаточно длительном времени эксплуатации прибор становится практически неработоспособным.

Функциональная связь между показателями надежности приведена в табл. 1.1. Используя функциональную зависимость между показателями, можно при известном одном из показателей надежности определить все остальные. Вместе с тем, следует сказать, что рассмотренные выше соотношения являются в определенном смысле математической абстракцией и на практике для вычисления надежностных показателей применены быть не мо-

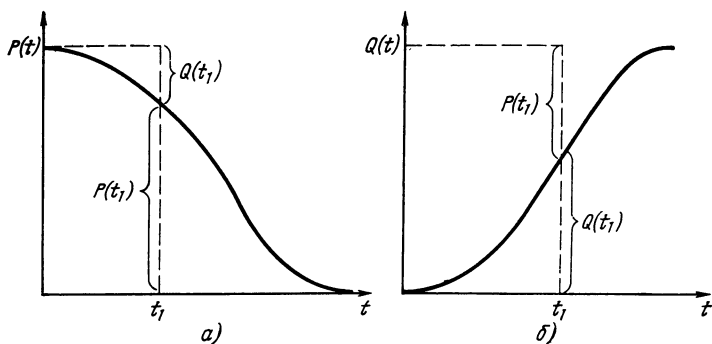


Рис. 1.2. Зависимость вероятности безотказной работы  $P(t)$  и вероятность отказа  $Q(t)$  от времени

гут, так как точные значения исходных величин, в частности интегральная функция распределения наработки приборов до отказа, нам не могут быть известны. Выходом из данного положения является использование статистических вероятностных характеристик, определяемых опытным путем. При этом делается допущение, что в опыте используются совершенно одинаковые события и испытания проводятся в идентичных условиях. Применительно к полупроводниковым приборам и микросхемам делается допущение о том, что все приборы, подвергающиеся испытаниям, имеют идентичные электрические параметры и физические характеристики и испытываются в одних и тех же режимах и условиях внеш-

Т а б л и ц а 1.1

Известная функция	Определяемая функция			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	—	$1 - P(t)$	$-\frac{d}{dt} [P(t)]$	$-\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{d}{dt} [P(t)]$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	—	$\frac{d}{dt} [Q(t)]$	$\frac{1}{1 - Q(t)} \cdot \frac{d}{dt} [Q(t)]$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(t) dt$	$\int_0^t f(t) dt$	—	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t) dt}$
$\lambda(t)$	$\exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) dt \right]$	$1 - \exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) dt \right]$	$\lambda(t) \exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) dt \right]$	—

них воздействий. Достоверность статистических вероятностных характеристик тем выше, чем большее число приборов использовано для проведения испытаний и чем больше длительность самих испытаний [3].

Для определения статистических вероятностных характеристик при расчете показателей надежности будем исходить из того, что в нашем распоряжении имеется партия из  $N$  приборов, которые подвергаются испытаниям в одинаковых условиях в течение времени  $t$  до отказа всех приборов в партии. Введем следующие обозначения:

$N(0)$  — число исправных приборов на начальный момент времени  $t=0$ ;

$n(t)$  — число приборов, отказавших на момент времени  $t$ ;

$n(t+t_0)$  — число приборов, отказавших к моменту времени  $t+t_0$ ;

$\Delta n(t, t_0) = n(t+t_0) - n(t)$  — число приборов, отказавших в интервале времени от  $t$  до  $t+t_0$ ;

$N(t)$  — число исправных приборов в момент времени  $t$ ;

$N(t+t_0)$  — число приборов, исправных в момент времени  $t+t_0$ .

Оговорим еще одно условие, согласно которому в процессе испытаний обеспечивается непрерывный контроль состояния приборов и фиксация моментов времени наступления отказов. С учетом принятых допущений основные показатели безотказности определяются следующим образом.

Вероятность безотказной работы  $\hat{P}(t_0)$  в интервале времени от 0 до  $t_0$  определяется как отношение числа приборов, безотказно проработавших до момента времени  $t_0$ , к числу приборов, исправных в начальный момент времени  $t=0$ :

$$\hat{P}(t_0) = \frac{N(t_0)}{N(0)} = \frac{N(0) - n(t_0)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t_0)}{N(0)}. \quad (1.10)$$

В ряде случаев необходимо определять вероятность безотказной работы в интервале времени от  $t$  до  $t+t_0$ , представляющую собой условную вероятность того, что случайное время работы прибора до отказа окажется больше величины  $t+t_0$  при условии, что прибор уже проработал безотказно до момента времени  $t$ :

$$P(t, t+t_0) = \frac{P(t+t_0)}{P(t)}. \quad (1.11)$$

По аналогии с (1.10) выражение (1.11) можно преобразовать к виду:

$$\hat{P}(t, t+t_0) = \frac{N(t+t_0)}{N(0)} \bigg/ \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{N(t+t_0)}{N(t)}. \quad (1.12)$$

Плотность распределения наработки до отказа  $\hat{f}(t)$  определим как отношение числа отказов в интервале времени  $(t, t+\Delta t)$  к

произведению числа исправных объектов в начальный момент времени  $t=0$  на длительность бесконечно малого интервала:

$$\hat{f}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(0) \cdot \Delta t} = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(0) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N(0) \cdot \Delta t} \quad (1.13)$$

при  $\Delta t \rightarrow 0$ .

В отличие от плотности распределения наработки до отказа интенсивность отказов  $\hat{\lambda}(t)$  определим как отношение числа отказов в интервале  $[t, t + \Delta t]$  к произведению числа исправных приборов в момент времени  $t$  на длительность бесконечно малого интервала времени  $\Delta t$ :

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \quad (1.14)$$

при  $\Delta t \rightarrow 0$ .

Следует иметь в виду, что отличие интенсивности отказов  $\hat{\lambda}(t)$  от плотности распределения наработки до отказа  $\hat{f}(t)$  заключается в том, что в первом случае расчет ведется относительно числа исправных приборов на момент времени  $t$ , в случае плотности распределения — на момент времени  $t=0$ .

Средняя наработка до отказа  $\hat{t}$  определяется как среднее арифметическое значений наработки всех приборов, участвовавших в испытании:

$$\hat{t} = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} t_i. \quad (1.15)$$

#### 1.4. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН, ИСПОЛЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Рассмотренные выше соотношения справедливы для любых типов невосстанавливаемых изделий, законы распределения показателей надежности которых заранее не известны. Однако применимость их для расчета показателей надежности полупроводниковых приборов и микросхем, а также для прогнозирования их поведения на длительный период, ограничена. Это связано с тем, что полупроводниковые приборы и микросхемы имеют сравнительно высокую надежность и отказы приборов являются весьма редкими событиями. Поэтому, чтобы получить достаточно достоверную информацию для проведения расчетов показателей надежности, необходимо проводить длительные испытания: в течение десятков и сотен тысяч часов. Кроме того, отсутствие данных о законах распределения отказов не позволяет распространять результаты расчетов показателей надежности за пределы времени испытаний и прогнозировать надежность приборов на длительный период. Указанные обстоятельства вызывают необходимость получаемые в результате испытаний распределения наработки до отказа аппроксимировать эмпирическими математическими выражениями

либо использовать для описания экспериментальных данных известные законы распределения случайных величин, под которыми понимается соответствие между возможными значениями случайных величин и их вероятностями [4, 5].

Для описания дискретных случайных величин наибольшее распространение получили распределения по биномиальному закону и по закону Пуассона.

Биномиальный закон распределения характеризует вероятность появления события  $A$   $n$  в  $m$  независимых испытаниях. Если вероятность появления события  $A$  в одном опыте равна  $p$ , соответственно вероятность его не появления равна  $1-p=q$ , а число независимых испытаний равно  $m$ , то вероятность появления события  $A$   $n$  раз в серии  $m$  испытаний  $p^n_m$  может быть представлена математической формулой биномиального закона распределения следующим образом:

$$P^n_m = C^n_m p^n (1-p)^{m-n}, \quad (1.16)$$

где  $C^n_m$  — число сочетаний  $m$  по  $n$ , равное

$$C^n_m = \frac{m!}{n! (m-n)!}. \quad (1.17)$$

Биномиальным закон назван потому, что правую часть равенства (1.16) можно рассматривать как общий член разложения бинома Ньютона:

$$(p+q)^m = C^0_m \cdot p^m + C^{m-1}_m \cdot p^{m-1} + \dots + C^0_m q^m. \quad (1.18)$$

Приведем основные характеристики биномиального закона распределения:

математическое ожидание

$$M[n] = pm; \quad (1.19)$$

дисперсия

$$\sigma^2(n) = M[n]q = pmq; \quad (1.20)$$

среднее квадратическое отклонение

$$\sigma(n) = \sqrt{M[n]q}; \quad (1.21)$$

коэффициент вариации

$$V(n) = \frac{\sqrt{M[n]q}}{pm}. \quad (1.22)$$

Биномиальный закон распределения применяется при статистическом контроле при ограниченной информации о свойствах приборов, которые необходимо расклассифицировать на годные и дефектные.

Распределение по закону Пуассона обычно применяется для определения вероятности появления заданного числа независимых и несовместных событий на заданном интервале времени. Вероятность возникновения события  $A$  не менее чем  $n$  раз в интерва-

ле времени  $\tau$  по закону Пуассона определяется следующим образом:

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \exp(-\lambda\tau). \quad (1.23)$$

При этом  $n$  может принимать только целочисленные значения. Основные характеристики распределения следующие:

математическое ожидание

$$M[n] = \lambda\tau; \quad (1.24)$$

дисперсия

$$\sigma^2(n) = \lambda\tau; \quad (1.25)$$

среднее квадратическое отклонение

$$\sigma(n) = \sqrt{\lambda\tau}; \quad (1.26)$$

коэффициент вариации

$$V(n) = 1/\sqrt{\lambda\tau}. \quad (1.27)$$

Характерным признаком распределения Пуассона является равенство математического ожидания и дисперсии. Это свойство используется для проверки степени соответствия исследуемого распределения распределению Пуассона.

Распределение Пуассона является предельным случаем биномиального распределения при неограниченном возрастании числа испытаний  $m$ , когда вероятность  $q$  стремится к нулю, а математическое ожидание числа событий  $M[n]$  остается постоянным. Применение распределения Пуассона справедливо, начиная с  $q=0,1$  и менее. В связи с тем, что вероятность безотказной работы полупроводниковых приборов и микросхем много больше 0,9, распределение Пуассона может быть применено для формирования планов контроля надежности приборов. Примеры построения таких планов будут рассмотрены в соответствующих разделах.

В связи с тем, что основной показатель безотказности — наработка до отказа — является непрерывной случайной величиной, необходимо рассмотреть наиболее распространенные законы распределения непрерывных случайных величин.

**Нормальный закон распределения (часто называемый законом Гаусса).** В наиболее общем виде этот закон называют предельным в силу того, что к нему приближаются другие законы распределения непрерывных случайных величин и даже сочетания этих законов при определенных часто встречающихся на практике условиях. В частности, биномиальное распределение при достаточно больших значениях математического ожидания исследуемой случайной величины очень близко к нормальному. При нормальном распределении случайная величина может принимать любые значения в интервале от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Распределение случайной величины всегда подчиняется нормальному закону, если она зависит от большого числа однородных по своему воздействию



вию факторов, причем влияние каждого из них по сравнению со всей их совокупностью незначительно.

В общем случае выражение для плотности распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(t) \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(t - M[t])^2}{2\sigma^2(t)} \right\}, \quad (1.28)$$

где  $\sigma(t)$  — среднее квадратическое отклонение наработки до отказа;  $M[t]$  — математическое ожидание наработки до отказа (средняя наработка до отказа).

Поскольку возможные значения случайной наработки до отказа могут быть только положительными, мы должны рассматривать наработку в усеченном интервале времени  $0, +\infty$  и использовать так называемое усеченное нормальное распределение, при котором:

$$\bar{f}(t) = C f(t), \quad (1.29)$$

где  $\bar{f}(t)$  — плотность усеченного распределения;  $C$  — нормирующий множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой плотности распределения равна 1:

$$C = \frac{1}{\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt}. \quad (1.30)$$

Можно показать [69], что во всем интервале возможных значений наработки при соотношении  $M[t]/\sigma(t) > 2$ , что обычно и имеет место на практике, коэффициент  $C$  весьма незначительно отличается от 1, в связи с чем необходимость учета усечения, связанного с ограничением интервала, отпадает.

Кривая нормального распределения имеет колоколообразный вид, симметричный относительно центра рассеяния в точке  $M[t] = \bar{t}$ . Если изменять положение центра рассеяния, т. е. изменить величину  $M[t]$ , не изменяя среднего квадратического отклонения, то кривая распределения будет смещаться вдоль оси времени без изменения своей формы (рис. 1.3, а). Параметр  $\sigma(t)$  характеризует форму кривой распределения. Наибольшая ордината кривой распределения, равная  $[\sigma(t) \sqrt{2\pi}]^{-1}$ , обратно пропорциональна  $\sigma(t)$ , вследствие чего, чем больше расстояние (больше

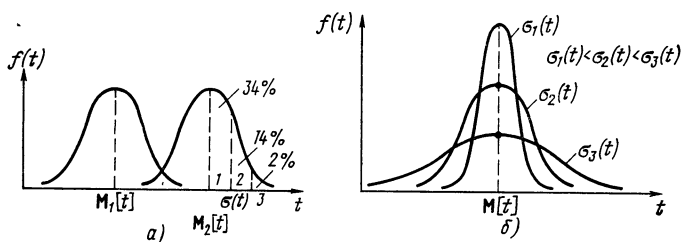


Рис. 1.3. Плотность вероятности при нормальном законе распределения

$\sigma(t)$ ), тем меньше  $f(t)$ . Поскольку площадь под кривой распределения должна всегда оставаться равной единице, увеличение  $\sigma(t)$  приводит к трансформации кривой и растягиванию ее вдоль оси абсцисс с одновременным уменьшением по абсолютному значению наибольшей ординаты (рис. 1.3,б).

Расчеты показывают, что вероятность нахождения значения нормально распределенной величины в интервале  $l$  длиной  $\sigma(t)$ , расположенном вправо от центра рассеяния, равна 34% и в интервалах 2 и 3 той же длины соответственно 14 и 2% (рис. 1.3,а). Аналогичные значения вероятности получаются и в случае расположения интервалов длиной  $\sigma(t)$  влево от центра рассеяния в силу симметричности кривой распределения. Это позволяет сделать вывод о том, что примерно 50% возможных отклонений нормально распределенной случайной величины от ее математического ожидания укладываются на участке длиной  $3\sigma(t)$  по одну сторону от центра рассеяния и 50% значений отклонения укладываются на участке  $3\sigma(t)$  по другую сторону. Другими словами, при нормальном распределении весь возможный разброс значений случайной величины практически заключен в интервале

$$M[t] - 3\sigma(t) \leq t \leq M[t] + 3\sigma(t).$$

Используя выражения (1.9) и (1.28), найдем вероятность безотказной работы при нормальном распределении:

$$P(t) = \frac{1}{\sigma(t) \cdot \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp \left\{ -\frac{[t - M[t]]^2}{2\sigma^2(t)} \right\} dt. \quad (1.31)$$

Это выражение непосредственно не может быть применено для расчетов показателей надежности. Преобразуем выражение его, введя новую переменную  $u = \frac{t - \bar{t}}{\sigma(t)}$ :

$$P(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{\infty} \exp \left( -\frac{u^2}{2} \right) du. \quad (1.32)$$

Используя свойства функции Лапласа, можно записать:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u \exp \left( -\frac{u^2}{2} \right) du + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{\infty} \exp \left( -\frac{u^2}{2} \right) du = \frac{1}{2}.$$

В полученном выражении второй член совпадает с выражением (1.32), а первый представляет собой функцию нормированной и центрированной случайной величины  $u - \phi(u)$ , задаваемую таблично. В результате получим пригодное для расчетов выражение для вероятности безотказной работы:

$$P(t) = \frac{1}{2} - \phi \left[ \left( \frac{t - \bar{t}}{\sigma(t)} \right) \right]. \quad (1.33)$$

Используя выражение (1.33) и соотношения, приведенные в табл. 1.1, можно вычислить все необходимые показатели надежности. Рассмотренное распределение чаще всего используется для

описания отказов, вызываемых постепенным изменением параметров приборов, а также при оценке надежности элементов на стадии старения. Кроме того, нормальному закону, как правило, подчиняются распределения электрических параметров полупроводниковых приборов и микросхем.

В ряде случаев для представления распределения показателей надежности приборов на начальном этапе эксплуатации используют логарифмически нормальное распределение, при котором логарифм случайной величины подчиняется нормальному закону распределения. В этом случае выражение для плотности вероятности имеет вид:

$$f(t) = \frac{\lg e}{t \sigma(z) \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[z - M(z)]^2}{2 \sigma^2(z)} \right\}, \quad (1.34)$$

где  $z$  — десятичный логарифм исследуемой случайной величины (в данном случае логарифм случайной наработки до отказа);  $M(z)$  — математическое ожидание логарифма наработки до отказа;  $\sigma(z)$  — среднее квадратическое отклонение величины  $z$ .

По аналогии с (1.33) вероятность безотказной работы при логарифмически нормальном распределении определяется следующим выражением:

$$P(t) = \frac{1}{2} - \Phi \left[ \left( \frac{z - M(z)}{\sigma(z)} \right) \right]. \quad (1.35)$$

Для описания показателей надежности полупроводниковых приборов и микросхем на начальном этапе эксплуатации часто используется распределение Вейбулла—Гнеденко, характеризуемое двумя параметрами: параметром масштаба  $a$  и параметром формы  $b$ . Показатели надежности определяются с использованием следующих выражений:

вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp \left( -\frac{t^b}{a} \right); \quad (1.36)$$

плотность вероятности отказов

$$f(t) = \frac{b}{a} t^{b-1} \exp \left( -\frac{t^b}{a} \right); \quad (1.37)$$

интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} t^{b-1}. \quad (1.38)$$

Особенностью этого распределения является то, что с изменением параметра формы  $b$  изменяется и характер зависимости показателей надежности от времени. Так, например, при  $b < 1$  интенсивность отказов будет монотонно убывающей функцией, при  $b > 1$  — монотонно возрастающей. Данное свойство распределения позволяет соответствующим подбором параметров  $a$  и  $b$  обеспечить хорошее совпадение результатов опытных данных с аналитическими выражениями показателей распределения.

Наибольшую популярность и широкое применение в теории и практике надежности нашло так называемое экспоненциальное распределение. Его специфической особенностью является постоянство интенсивности отказов. Выражения для показателей надежности можно получить, используя уравнение (1.8), положив в нем  $\lambda = \text{const}$ :

$$P(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right] = \exp [-\lambda t]. \quad (1.39)$$

Для случаев, когда  $\lambda t < 0,1$ , можно использовать упрощенное выражение для  $P(t)$ , разложив выражение (1.39) в степенной ряд и взяв два первых члена разложения:

$$P(t) = 1 + \frac{-\lambda t}{1!} + \dots \approx 1 - \lambda t. \quad (1.40)$$

Вероятность наступления отказа

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda t); \quad (1.41)$$

плотность вероятности отказов

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \lambda \exp(-\lambda t); \quad (1.42)$$

средняя наработка до отказа

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.43)$$

Экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла — Гнеденко и реализуется при  $b=1$  (см. выражение (1.36)). Другой его особенностью является то, что показатели надежности на данный момент времени не зависят от предыстории эксплуатации прибора, если до этого момента времени отказов не происходило. В этом можно убедиться, определив вероятность безотказной работы на интервале времени  $\Delta t$ , для чего рассмотрим два последовательных момента времени  $t$  и  $t + \Delta t$ . При условии, что в момент времени  $t$  прибор находился в работоспособном состоянии по аналогии с выражением (1.11) для условной вероятности запишем:

$$\begin{aligned} P(\Delta t) &= \frac{P(0, t + \Delta t)}{P(0, t)} = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} = \exp[-\lambda(t + \Delta t)] / \exp(-\lambda t) = \\ &= \exp(-\lambda \Delta t). \end{aligned} \quad (1.44)$$

Из полученного выражения следует, что вероятность безотказной работы прибора при экспоненциальном распределении в интервале времени  $\Delta t$  не зависит от предыдущей наработки  $t$ , а определяется длиной интервала  $\Delta t$ . Это означает, что в каком бы месте числовой оси мы не выбрали временной интервал  $\Delta t$ , если к его началу отказов приборов не наблюдалось, то показатели надежности останутся такими же, какими они были на начальный момент времени  $t=0$ .

Рассмотренная особенность распределения говорит о том, что оно может быть применено к изделиям, которым практически не свойственно существенное изменение параметров из-за процессов старения и износа. Отказы таких приборов происходят внезапно вследствие наличия скрытых дефектов.

Определим гамма-процентную наработку до отказа при экспоненциальном распределении. Используя (1.6) и (1.39), получим

$$P(t_\gamma) = \exp(-\lambda t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}. \quad (1.45)$$

Отсюда находим

$$t_\gamma = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right).$$

С учетом (1.43) окончательно получим

$$t_\gamma = \bar{t} \ln\left(\frac{100}{\gamma}\right). \quad (1.46)$$

Таким образом, мы получили выражение, связывающее среднюю наработку до отказа  $\bar{t}$  и гамма-процентную наработку  $t_\gamma$ . Выше мы уже говорили о соотношении этих двух показателей. Рассмотрим его несколько подробнее.

Положим  $\gamma = 90\%$ . Это означает, что не менее 90% приборов из рассматриваемой нами совокупности должны безотказно работать в течение времени  $t_\gamma$ , или, что то же самое, вероятность безотказной работы совокупности приборов в течение времени  $t_\gamma$  должна быть не ниже 0,9. С учетом заданных условий из выражения (1.46) получим

$$t_{90} = \bar{t} \ln \frac{100}{90} = 0,105 \bar{t}.$$

При вероятности безотказной работы 0,99 ( $\gamma = 99\%$ )  $t_{99} = 0,01 \bar{t}$ ; при вероятности 0,999 ( $\gamma = 99,9\%$ )  $t_{99,9} = 0,001 \bar{t}$ .

Полученный результат показывает, что гамма-процентная наработка при  $\gamma = 90\%$  составляет всего примерно 0,1 от средней наработки до отказа. С ростом требований по вероятности безотказной работы, т. е. с добавлением каждой девятки после запятой (что является обычным требованием в настоящее время) гамма-процентная наработка уменьшается на порядок. При вероятности безотказной работы 0,999 гамма-процентная наработка составляет одну тысячную долю от средней наработки до отказа.

Поясним рассмотренное выше примером. Допустим, что мы имеем дело с аппаратурой, построенной на идентичных приборах, имеющих интенсивность отказов  $10^{-7}$  ч $^{-1}$ . В случае экспоненциального распределения средняя наработка до отказа из расчета на один прибор составит  $10^7$  ч. При этом гамма-процентная наработка прибора, например, при  $\gamma = 99,9\%$ , или, что то же самое, время безотказной работы при вероятности 0,999, составит согласно (1.46) весьма внушительную цифру  $10^4$  ч, или почти один год и два месяца.

В современной аппаратуре, как правило, используются десятки, тысячи и даже сотни тысяч активных приборов и других комплектующих изделий. Надежность аппаратуры определяется показателями надежности входящих в нее элементов, поэтому вероятность безотказной работы аппаратуры  $P_A$  как сложное событие равна произведению вероятности безотказной работы  $P$ , всех элементов в нее входящих:  $P_A = P_{э1} P_{э2} \dots P_{эn}$ . Предположим, что время безотказной работы каждого элемента, примененного в аппаратуре, подчиняется экспоненциальному распределению. Тогда вероятность безотказной работы аппаратуры определим из выражения

$$P_A = P_{э1} \cdot P_{э2} \cdot \dots \cdot P_{эn} = \exp(-\lambda_1) \exp(-\lambda_2) \dots \exp(-\lambda_n) = \exp(-\lambda),$$

где  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$  — интенсивность отказов аппаратуры, равная сумме интенсивностей отказов отдельных ее элементов или произведению числа элементов на интенсивность отказа одного элемента, если они идентичны.

Для относительно несложной аппаратуры, построенной с использованием 1000 однотипных активных приборов, имеющих интенсивность отказов  $10^{-7}$  ч<sup>-1</sup>, показатели надежности приведены в табл. 1.2.

Из таблицы следует, что аппаратура, построенная на элементах, обладающих сравнительно высокой надежностью, характеризующей средней наработкой до отказа, равной  $10^{-7}$  ч, имеет весьма скромные показатели безотказности. Так, ресурс, обеспечивающий безотказную работу при вероятности 0,9, равен 1000 ч, а более высокие показатели безотказности при вероятности 0,999 обеспечиваются только в течение 10 ч. Конечно, аппаратуре с такими показателями надежности не могут быть доверены ответ-

Т а б л и ц а 1.2

Исходные данные и показатели надежности	Расчетные формулы	Число элементов и значения показателей надежности
Количество элементов $n$ в аппаратуре, шт.	—	1000
Интенсивность отказов одного элемента $\lambda$ , ч <sup>-1</sup>	—	$10^{-7}$
Средняя наработка элемента до отказа $\bar{t}_э$ , ч	$\bar{t}_э = \lambda^{-1}$	$10^7$
Интенсивность отказов аппаратуры $\lambda$ , ч <sup>-1</sup>	$\lambda = n \lambda_э$	$10^{-4}$
Средняя наработка до отказа аппаратуры $\bar{t}$ , ч	$\bar{t} = \lambda^{-1}$	$10^4$
Гамма-процентный ресурс аппаратуры, ч, при:		
$\gamma_1 = 90\%$	$t_{\gamma_1} = 0,01\bar{t}$	$10^3$
$\gamma_2 = 99\%$	$t_{\gamma_2} = 0,01\bar{t}$	$10^2$
$\gamma_3 = 99,9\%$	$t_{\gamma_3} = 0,001\bar{t}$	10

ственные функции по управлению процессами и объектами. Попытка без принятия специальных мер на той же основе создать более сложную аппаратуру с использованием многих десятков тысяч элементов обречена на провал. Можно с высокой достоверностью заранее сказать, что такая аппаратура не будет работоспособной.

Известны многие пути повышения надежности аппаратуры. Они сосредоточены в основном в двух направлениях. Первое из них охватывает схмотехнические и системные методы, в том числе использование приборов в аппаратуре в облегченных электрических и тепловых режимах, поэлементное, поблочное и аппаратное резервирование.

Второе направление связано с повышением надежности комплектов элементов и в первую очередь полупроводниковых приборов и микросхем. В настоящее время есть все основания считать второе направление главным, так как уровень современной технологии производства приборов, прецизионность специального технологического оборудования, обеспечивающего высокую стабильность и воспроизводимость технологических процессов дают возможность существенно приблизиться к теоретическим предельным электрическим и надежностным характеристикам приборов.

Однако кардинальным решением данной проблемы является увеличение степени интеграции микросхем с одновременным повышением их надежности. Это дает значительный эффект по меньшей мере в трех направлениях. Во-первых, за счет роста степени интеграции микросхем резко снижается количество элементов в аппаратуре. Это, в свою очередь, приводит к сокращению числа межэлементных соединений в блоках аппаратуры. И наконец, сосредоточение в одной интегральной микросхеме функций многих элементов, традиционно выполнявшихся дискретно, позволяет оптимизировать схмотехнику и топологию микросхемы, способствует повышению ее надежности.

Графическое изображение зависимости показателей надежности от времени для рассмотренных распределений приведено на рис. 1.4.

Представляет определенный интерес сравнение показателей надежности нормального и экспоненциального распределений при одном и том же значении средней наработки до отказа. Графическая зависимость вероятности безотказной работы для этих двух распределений приведена на рис. 1.5.

Из рассмотрения данных зависимостей следует, что вероятность безотказной работы при экспоненциальном распределении с течением времени уменьшается быстрее, чем при нормальном. По достижении момента времени, равного средней наработке до отказа, при экспоненциальном распределении вероятность безотказной работы будет равна 0,37, а при нормальном распределении — 0,5. Это говорит о том, что приборы, случайное время безотказной работы которых подчиняется нормальному распределению в ин-

Вид распределения	Показатели надежности			
	$f(t)$	$Q(t)$	$P(t)$	$\lambda(t)$
Экспоненциальное				
Вейбул-ла				
Нормальное				

Рис. 1.4. Зависимость показателей надежности от времени для различных законов распределения

тервале времени  $(0, \bar{t})$ , имеют более высокие показатели надежности, чем приборы с экспоненциальным распределением.

Заштрихованный участок рисунка протяженностью  $0,1\bar{t}$  представляет собой промежуток времени, охватывающий 90%-й гам-

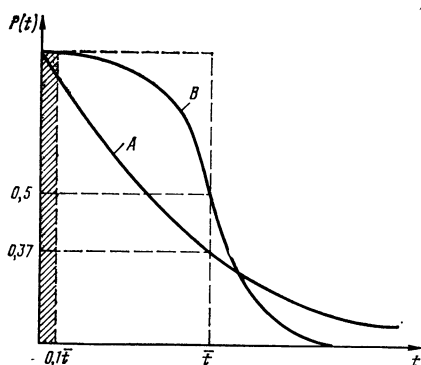


Рис. 1.5. Зависимость вероятности безотказной работы от времени:

А — экспоненциальное распределение; В — нормальное распределение

ма-ресурс для экспоненциального распределения, в пределах которого исходя из современных требований обеспечивается фактически минимальный уровень вероятности безотказной работы. С ростом требований по вероятности безотказной работы, что равнозначно увеличению  $\gamma$ , например до 99 или 99,9%, заштрихованный участок сокращается до  $0,001\bar{t}$  и имеет весьма незначительную протяженность по сравнению со средней наработкой до отказа. Различие между законами распределе-



ния на столь незначительном интервале времени становится несущественным. Этим оправдано применение экспоненциального закона распределения как наиболее простого для описания показателей надежности приборов при вероятности безотказной работы 0,95 и выше.

На этой основе построены действующие государственные стандарты, регламентирующие общие требования по надежности и методы испытаний, а также общие технические условия на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы [6]. В них, в частности, принята постоянная интенсивность отказов в течение наработки, что соответствует экспоненциальному распределению.

В качестве показателей безотказности регламентируется наработка от 200 до 25 000 ч и более при интенсивности отказов в пределах  $10^{-4} \dots 10^{-10} \text{ ч}^{-1}$ . Конкретные показатели наработки и интенсивности в зависимости от назначения приборов указываются в технических условиях.

## ГЛАВА 2

### ВИДЫ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

#### 2.1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРИБОРОВ И ИХ СВЯЗЬ С ВНЕШНИМИ ФАКТОРАМИ

Выше говорилось о том, что надежность характеризуется приборами определяются широким спектром самых разнообразных факторов. В этой связи целесообразно проследить так называемый жизненный цикл прибора от момента возникновения идеи о его создании до эксплуатации в аппаратуре, выделяя основные факторы, доминирующие в течение отдельных периодов цикла, называемых этапами. Следует сразу же оговориться, что само понятие жизненный цикл прибора и отдельные его этапы — категории весьма условные. Однако введение их позволяет в общих чертах представить основные тенденции влияния внешних факторов на параметры прибора и его надежность характеристики.

Существование прибора начинается с формирования технических требований на него (рис. 2.1). Факторами, определяющими этот этап, являются в первую очередь потребности совершенствования той или иной аппаратуры, компетентность специалистов, эксплуатирующих и разрабатывающих ее, их способность правильно определить, что модернизация аппаратуры в нужном направлении может быть осуществлена и создание нового прибора необходимо.

Наиболее важен этап разработки прибора. Успех разработки определяется состоянием фундаментальных теоретических знаний, которые могут быть положены в основу конструирования прибора, степенью обобщения опыта аналогичных разработок, теоретическими положениями и научными достижениями смежных технических направлений, уровнем оборудования, находящегося в

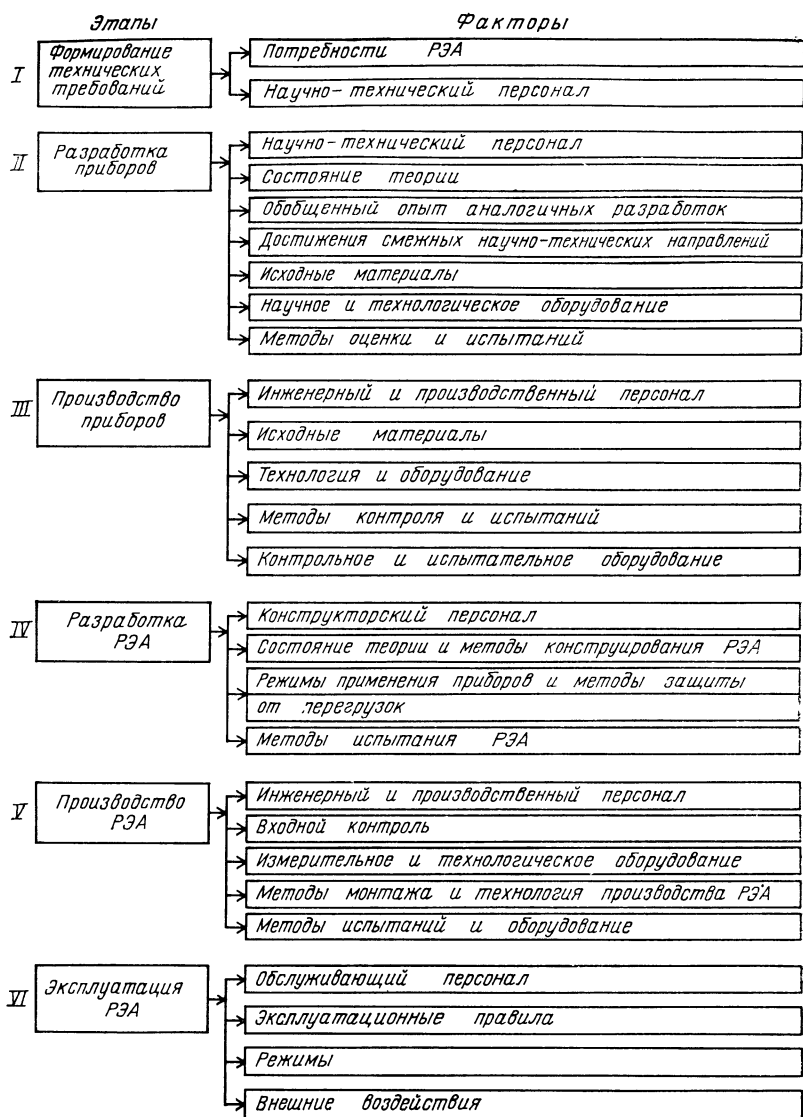


Рис. 2.1. Этапы жизненного цикла приборов

распоряжении разработчиков, качеством исходных материалов и, естественно, квалификацией и творческой интуицией научно-технического персонала. Наиболее важным этот этап является потому, что здесь наряду с основными физическими и электрическими параметрами закладываются надежностные характеристики прибора, определяющие его дальнейшую судьбу. На всех после-

дующих этапах жизненного цикла уже невозможно предпринять какие-либо действия, улучшающие заложенные при разработке надежностные характеристики. Всякие корректирующие конструктивные воздействия, по сути дела, не что иное, как новая разработка, вызванная тем, что какие-либо из факторов, определяющих этот этап, не были реализованы в полном объеме.

На этапе производства реализуются все параметры, в том числе надежностные характеристики, заложенные при разработке. Этап этот определяют исходные материалы, совершенство технологии и оборудования, методы и оборудование контроля и квалификация инженерного и производственного персонала. Высшим достижением этапа производства может быть получение надежных характеристик прибора, заложенных при разработке. С окончанием этапа производства прибор появляется на свет. Безотказная работа прибора в течение срока службы в значительной степени определяется этапом разработки радиоэлектронной аппаратуры. От правильности выбора перечня приборов, на которых конструируется аппаратура, режимов их работы, используемых методов защиты от всевозможных перегрузок зависит дальнейший успех функционирования аппаратуры и безотказность примененных в ней приборов.

При производстве радиоэлектронной аппаратуры реализуются надежностные характеристики, заложенные при ее разработке и соответственно сохраняются надежностные характеристики приборов. Здесь очень важно подчеркнуть, что характеристики приборов в лучшем случае сохраняются. В действительности уже при проведении входного контроля у потребителя начинается расходование ресурса приборов. В той или иной степени ресурс расходуется во время термо- и электротренировок, в процессе формовки выводов и монтажа, при испытаниях радиоэлектронной аппаратуры перед отправкой потребителю. На этом этапе в результате неправильного обращения приборы могут быть полностью или частично выведены из строя. Наиболее опасны частичные повреждения в виде скрытых дефектов, которые могут быть выявлены только на последующих этапах жизненного цикла прибора.

Заключительным в жизненном цикле прибора является этап эксплуатации в составе радиоэлектронной аппаратуры. Это главный период в жизненном цикле, так как на этом этапе прибор выполняет функции по основному своему назначению. Определяющими факторами при этом являются режимы и эксплуатационные правила. Если все предыдущие этапы прошли в оптимальных условиях, режимы использования применены такие, что ресурс прибора расходуется экономно, а эксплуатационные правила разработаны и соблюдаются с должной тщательностью, высокая надежность функционирования прибора в составе аппаратуры будет обеспечена.

## 2.2. ФАКТОРЫ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

На этапе эксплуатации в явном виде проявляется комплекс факторов с обобщенным названием «внешние воздействия». Строго говоря, эти факторы учитываются на всех этапах жизненного цикла прибора, начиная с момента формирования требований на прибор и кончая испытаниями аппаратуры на предмет пригодности ее к использованию по назначению. Однако весь комплекс внешних воздействий проявляется во всей своей полноте и во всем своем многообразии только на этапе эксплуатации.

Анализ всех видов внешних воздействий показывает, что все они по физическим признакам могут быть разделены на два основных класса (рис. 2.2):

воздействия, вызывающие немедленную ответную реакцию прибора. К ним относятся различные виды излучений, механические, тепловые и электрические нагрузки и т. д.;

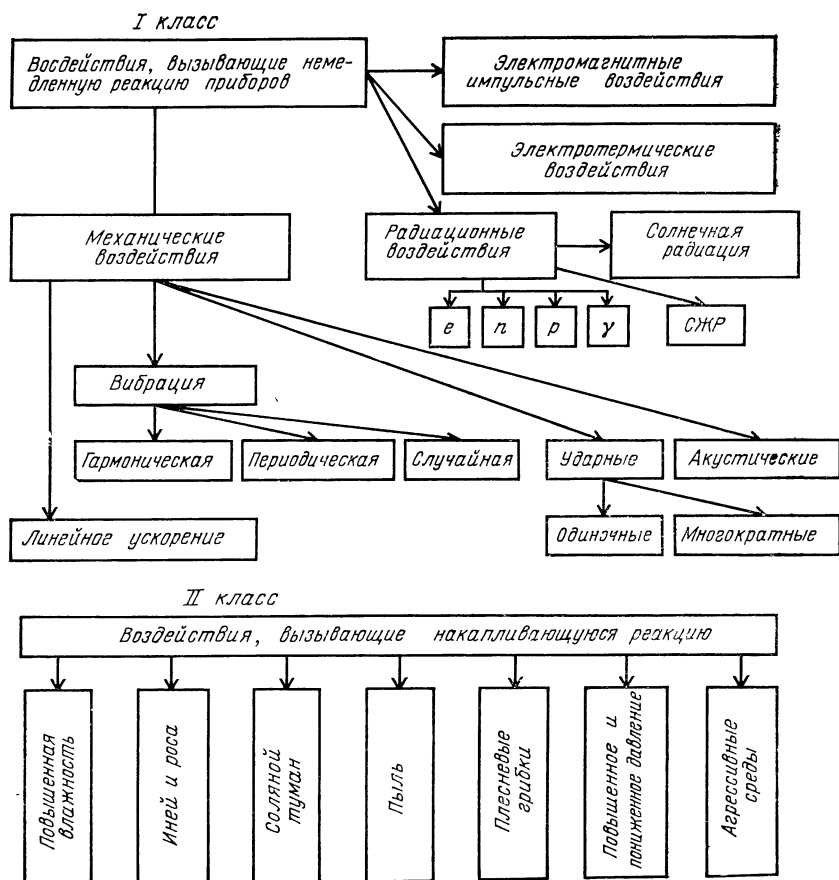


Рис. 2.2. Классификация видов воздействий

воздействия, вызывающие накапливающуюся реакцию прибора.

К последнему классу относятся различные климатические факторы, такие как влажность, соляной туман, агрессивные среды, плесневые грибки и т. д. Они не вызывают мгновенных изменений характеристик приборов и не оказывают непосредственного влияния на их электрофизические параметры. Однако при длительном нахождении приборов в условиях повышенной влажности или агрессивных сред постепенно ухудшаются прочностные характеристики приборов, нарушается их герметичность. Окружающая среда получает доступ к активным областям приборов, в результате чего постепенно изменяются их электрические параметры, что, в конечном счете, приводит к потере работоспособности и отказам.

Для оценки способности противостоять внешним воздействиям применяют следующие характеристики приборов:

*прочность*, т. е. способность приборов выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах допусков после воздействия того или иного внешнего фактора или их комплекса;

*устойчивость*, т. е. способность приборов функционировать и сохранять свои параметры, установленные в НТД, во время и после того или иного внешнего воздействия.

Таким образом, говоря о прочности прибора, мы предполагаем сохранение его работоспособности после воздействия. При этом вполне возможно, что при действии данного фактора происходила временная потеря работоспособности прибора.

Устойчивость же — более широкое понятие. Оно предполагает сохранение приборами работоспособности и в процессе и после внешнего воздействия.

В связи с тем, что полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы должны надежно функционировать в составе аппаратуры в условиях воздействия различных внешних факторов, к ним предъявляются различные требования по устойчивости, которые отражаются в НТД. Примеры требований к интегральным схемам по устойчивости приведены ниже:

#### 1. Требования по устойчивости к механическим факторам

	Группы эксплуатации	
	I	II
Синусоидальная вибрация:		
диапазон частот, Гц . . . . .	1 ... 3000	1 ... 5000
амплитуда ускорения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ . . . . .	200	400
Механический удар многократного действия:		
пиковое ударное ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ . . . . .	1500	1500
длительность ударного импульса, мс . . . . .	1 ... 3	1 ... 3
Механический удар однократного действия:		
пиковое ударное ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ . . . . .	10 000	10 000
длительность ударного импульса, мс . . . . .	0,2 ... 1	0,2 ... 1
Линейное ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ . . . . .	2000	5000

## 2. Требования по устойчивости к климатическим факторам

	I	II
Температура окружающей среды, °С	—60 ... +125	—60 ... +125
Относительная влажность при +35°С без конденсации влаги, %	98	98
Повышенное давление окружающей среды, кПа	294	294
Пониженное давление окружающей среды, 10 <sup>-4</sup> Па	1,33	1,33

Интегральные микросхемы и полупроводниковые приборы должны надежно функционировать:

- а) в различных газовых средах, таких как: инертные газы; смесь азота и воздуха в любых соотношениях; смесь газов, включающих: кислород до 50 %, углекислый газ до 3 %, гелий до 1 %, азот до 40 %;
- б) в условиях постоянных магнитных полей с напряженностью поля до 8000 А·м<sup>-1</sup>;
- в) в импульсных магнитных полях с частотой 50, 400, 500 Гц и напряженностью магнитного поля 80 А·м<sup>-1</sup>;
- г) при воздействии электромагнитного импульса с напряженностью электрического поля до 100 кВ·м<sup>-1</sup>;
- д) при воздействии акустических шумов до 130 дБ в диапазоне частот от 50 до 10 000 Гц.

### 2.3. ФАКТОРЫ, СВЯЗАННЫЕ С НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИМ И ОБСЛУЖИВАЮЩИМ ПЕРСОНАЛОМ

Все этапы жизненного цикла приборов в той или иной степени связаны с деятельностью человека. В связи с этим существенное значение имеет субъективный фактор в обеспечении надежности приборов. На этапах формирования технических требований и разработки приборов от эрудиции, квалификации и таланта разработчиков в значительной степени зависит успех дела в создании прибора с необходимыми электрическими и надежностными характеристиками. Следует особо подчеркнуть, что в разработке участвует широкий круг специалистов, в том числе математики, физики, схемотехники, химики, металлурги, механики, прибористы и др. Объединение всех специалистов единой целью представляет собой задачу исключительной сложности, так как от их взаимодействия, квалификации, умения найти компромиссные решения во взаимоисключающих ситуациях в подавляющей степени зависит качество создаваемого прибора.

В производственном процессе приборов также занято множество различных специалистов высокой квалификации. Большой набор прецизионных операций, таких как посадка кристаллов, разварка выводов, контроль требует от операторов особой внимательности и точности в выполнении технологических приемов. Однако постоянное напряжение и сосредоточенность особенно при работе с микроскопами приводит к значительной утомляемости оператора и, как следствие, к некачественному выполнению операции, что заканчивается браком или скрытым дефектом, который может быть выявлен только при эксплуатации прибора в аппаратуре.

На этапах разработки и производства аппаратуры от конструктора требуются глубокие знания возможностей полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, особенностей их применения и принципов защиты от всевозможных перегрузок, умение добиваться необходимых характеристик аппаратуры не за счет выжимания предельных характеристик от приборов, а в первую очередь посредством схмотехнических решений. Производственный персонал должен быть глубоко осведомлен в вопросах возможных повреждений, наносимых прибору в технологическом процессе изготовления аппаратуры, при отклонении от установленных правил. Такие повреждения могут произойти на входном контроле при несоблюдении режимов измерений, при формовании выводов, пайке, сварке и т. д. В приборах также могут возникнуть скрытые дефекты, снижающие их надежные характеристики.

На этапе эксплуатации многое зависит от неукоснительного соблюдения правил обращения с аппаратурой и квалификации обслуживающего персонала. Особо следует обратить внимание на своевременность и качество профилактических осмотров и ремонтов. В литературе имеются указания на то, что в ряде случаев количество отказов аппаратуры и приборов увеличивается с ростом частоты осмотров и ремонтов. Эта нежелательная зависимость связана с квалификацией ремонтного персонала и объясняется тем, что при неосторожном обращении с аппаратурой в процессе ремонта выводятся из строя бывшие до этого в исправном состоянии приборы (в частности, как будет показано выше, легко могут быть повреждены МОП-приборы при работе с незаземленным инструментом).

В последнее время наметилась твердая тенденция к существенному сокращению субъективного фактора в жизненном цикле приборов. Это обеспечивается широкой автоматизацией процессов, в которых ранее безраздельно властвовал человек. Например, в недалеком прошлом создание транзистора и первых интегральных микросхем было полностью в руках отдельных специалистов, и их качество определялось квалификацией и творческой интуицией этих специалистов. В настоящее время разработка современного транзистора или микросхемы немыслима без использования машинного проектирования. Это объясняется, с одной стороны, громадным прогрессом в вычислительной технике и, с другой стороны, значительной сложностью современных приборов. Субъективный человеческий фактор перемещается в более высокие сферы. Сейчас интеллект человека в области разработок приборов направлен на более глубокое познание фундаментальных законов природы, на которых основывается принцип работы приборов, совершенствование их физических и математических моделей и создание алгоритмов и программного обеспечения для автоматизированного машинного проектирования. Современные методы и техника проектирования позволяют проиграть на ЭВМ множество вариантов приборов, начиная от формирования требований и кончая их функционированием в различных условиях внешних воздействий. Все это дает возможность наряду с резким сокращением сроков разработки существенно уменьшить количество ошибок при проектировании и, следовательно, повысить качество и надежные характеристики разрабатываемых приборов. Субъективный фактор снижен существенно и в части передачи накопленных знаний в области разработки от одного поколения разработчиков другому.

При прежнем индивидуальном методе творчества накопленный опыт мог быть передан при непосредственном общении разработчиков, а также через публикации, если они существовали и были достаточно информативны. При от-

существованию необходимого контакта и благожелательных взаимоотношений новому поколению разработчиков необходимо было бы все начинать сначала путем проб и ошибок. В современных условиях положительный опыт в виде программ и банка данных абстрагирован от разработчика. Он становится доступным для каждого, кто в нем нуждается, независимо от желания авторов. При этом он совершенствуется в результате широкого применения многократно без потери информации, как это было зачастую до внедрения машинного проектирования.

В области производства приборов автоматизация технологических процессов также существенно снижает отрицательное воздействие персонала. При этом автоматизация идет по пути автоматизированного выбора оптимального технологического процесса, автоматического поддержания технологического режима на оборудовании и автоматического выполнения наиболее сложных и прецизионных операций, таких как фотолитография, имплантация, монтаж и разварка выводов, герметизация и испытания. В меньшей степени автоматизированы контрольные операции и, в частности, контроль внешнего вида. В области разработки аппаратуры, ее изготовления и эксплуатации автоматизацией затронуты отдельные процессы и воздействие персонала остается еще весьма существенным фактором в деле обеспечения надежной работы приборов в аппаратуре.

## 2.4. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

Рассмотрим прежде всего конструктивно-технологические факторы, оказывающие непосредственное воздействие на надежность характеристик приборов. Принципиальной особенностью конструкции полупроводниковых приборов и интегральных схем является то, что полупроводниковый кристалл, в котором осуществляется перенос носителей заряда от одной активной области к другой, находится в неравновесном состоянии. Оно создается за счет неравномерного распределения примесей, многослойных структур, поверхностей раздела между слоями, контактных областей. Неравновесное состояние кристалла само по себе является источником нежелательных процессов «упорядочения». В условиях же интенсивного воздействия электрических и тепловых полей эти процессы значительно усиливаются, результатом чего, как правило, является изменение электрических и надежности характеристик прибора.

Другим конструктивным фактором является непрерывный рост сложности микросхем и полупроводниковых приборов. Если первое поколение ИМС представляло собой набор относительно простых электронных схем типа триггера или операционного усилителя, насчитывавших в своем составе от 10 до 100 эквивалентных дискретных компонентов, то современные большие и сверхбольшие микросхемы со степенью интеграции в десятки и сотни тысяч элементов на кристалле представляют собой сложные электронные устройства, такие как микропроцессоры, блоки памяти со всеми схемами обрaмления и т. д. Существенно усложняются и дискретные полупроводниковые приборы.



В частности, современный СВЧ-транзистор, состоящий из нескольких сотен, а в ряде случаев и тысяч элементарных транзисторов с цепями согласования и сложения мощности, по своей сложности и прецизионности изготовления не уступает любой цифровой БИС и СБИС. Однако вместе с ростом сложности приборов происходит существенный перенос надежностных проблем из сферы схемотехники аппаратуры в сферу конструирования микросхем и полупроводниковых приборов. Возьмем, например, проблему контактов. При построении схемы, состоящей из 100 000 дискретных транзисторов, размещенных на плате совместно с пассивными элементами, разработчику и изготовителю потребовалось бы обеспечить по меньшей мере миллион надежных контактов. При воплощении этого устройства в виде интегральной микросхемы вся проблема контактов и межэлементных соединений переходит в сферу ИМС, а разработчик электронного устройства будет иметь дело в худшем случае с сотней контактов в виде выводов корпуса микросхемы. Режимы работы отдельных дискретных элементов электронного устройства становятся принадлежностью интегральной микросхемы и уходит из-под ответственности разработчика аппаратуры. При этом следует подчеркнуть, что обеспечение оптимального режима каждого элемента ИМС становится исключительно сложной проблемой из-за их недоступности для подстройки извне и может быть достигнуто только посредством точного расчета геометрических размеров и физических параметров активных структур и их реализации при изготовлении. Минимальное регулирование режимов частично возможно только за счет вариации уровней питания и отвода тепла.

Дальнейшее повышение сложности и степени интеграции полупроводниковых интегральных микросхем наталкивается на ряд существенных трудностей, возникающих в силу действия ряда противоречивых факторов. Под повышением степени интеграции микросхем подразумевается увеличение числа функциональных элементов, объединенных в одно неразделимое целое. Естественно предположить, что интегральная микросхема повышенной степени интеграции может быть реализована с использованием полупроводникового кристалла, имеющего большую площадь, чем схемы с меньшей степенью интеграции. Однако в условиях современного производства увеличение интеграции за счет неограниченного роста размеров полупроводникового кристалла невозможно, так как дефектность его поверхности и объема не позволяют получить приемлемое количество годных структур. Существенные трудности при работе с кристаллами большой площади возникают в технологическом процессе из-за ограничений, связанных, например, с равномерностью освещения при фотолитографии, прецизионностью процессов диффузии, имплантации и т. д. Но, пожалуй, самой главной схемотехнической проблемой является протяженность электрических соединений элементов в кристалле большой площади и связанное с ней быстроедействие.

Разветвленная сеть межэлементных соединений на кристалле

большой площади резко увеличивает задержку прохождения сигналов от элемента к элементу схемы и тем самым существенно снижает ее быстродействие.

Современная методология повышения степени интеграции микросхем основывается на оптимальном сочетании тенденций увеличения площади полупроводникового кристалла с одновременным уменьшением геометрических размеров элементов интегральных микросхем. Однако уменьшение размеров элементов также связано с определенными ограничениями. Это прежде всего разрешающая способность технологических процессов, доступных современному производству. Среди них в первую очередь следует упомянуть фотолитографические операции, позволяющие с переходом в ультрафиолетовую область спектра источников света получать линии размером до 1 мкм. Дальнейшее уменьшение размеров требует применения рентгеновской, электронной и ионной литографии.

При уменьшении размеров элементов микросхем еще большее значение приобретает дефектность объема и поверхности полупроводникового кристалла. При этом решающее значение приобретают не только количество дефектов, но и их размеры, так как с уменьшением геометрии полупроводниковых структур для них становятся опасными дефекты протяженностью 0,1 мкм и менее, т. е. такие дефекты, которые в обычных условиях в расчет не принимались.

Однако основные проблемы при решении вопросов повышения степени интеграции за счет уменьшения размеров элементов представляют физические ограничения. Согласно современным теоретическим представлениям на этапе освоения размеров в интервале 0,1...1 мкм предполагается сохранение транзисторного эффекта, так как линейные размеры полупроводниковых структур остаются большими, чем длины, характерные для физики полупроводников: радиус боровской орбиты электронов на примесных уровнях, длина волны де Бройля для тепловых электронов и дырок, длина экранирования Дебая, длины свободного пробега электронов и дырок. К такому выводу приводит рассмотрение предельных значений физико-технических параметров, полученных

Т а б л и ц а 2.1

Название параметра интегрального логического элемента	Значение параметра	
	достигнутое	предельное
Максимальный логический перепад, В	0,5	0,2
Минимальный размер полупроводниковой структуры, мкм	1	0,1
Минимальное значение полного времени задержки на вентиль, пс	100	1
Минимальное значение коэффициента качества, фДж	100	0,3
Максимальная степень интеграции, эл·см <sup>-2</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>

рядом авторов [72, 73, 74] и приведенных в табл. 2.1. Анализ данных таблиц показывает, что достигнутый уровень значений большинства параметров может быть улучшен на несколько порядков, прежде чем подойдет к предельному.

Следует указать, что повышение степени интеграции за счет уменьшения геометрических размеров не может быть получено посредством их произвольного измерения. Для этой цели существуют специальные методы *масштабирования*, которые призваны обеспечить физическое подобие элементов интегральных микросхем с уменьшенными размерами элементам уже существующих микросхем с обычными размерами. Это необходимо для того, чтобы все физические закономерности и аналитические выражения, применяющиеся для проектирования традиционных интегральных микросхем сохранили свою применимость и для расчета микросхем с уменьшенными размерами.

Другой, не менее важной целью масштабирования является обеспечение совместимости по уровням сигналов и питающим напряжениям микросхем с уменьшенными размерами со схемами в обычном исполнении, широко применяемыми в настоящее время в различной аппаратуре.

В настоящее время в международной практике применяется несколько методов масштабирования, суть которых становится понятной из рассмотрения табл. 2.2. При масштабировании с сохранением неизменными электрического поля или напряжения питания выбирается коэффициент масштабирования  $K > 1$ , с использованием которого уменьшаются геометрические размеры полупроводниковых структур, а также изменяются их основные электрические и физические характеристики. При использовании этих методов возникает несколько надежных проблем. В частности, при сохранении неизменным электрического поля плотность тока в металлизации возрастает в  $K$  раз, что увеличивает опасность электромиграции ионов металла (весьма распространенного механизма отказов, о котором ниже будет сказано подробнее). Кроме того, увеличиваются электрические поля в объеме полупроводника и в особенности в подзатворном окисле, так как встроенный потенциал в окисле и объеме полупроводника не поддается масштабированию. Указанные эффекты усиливаются, когда при-

Т а б л и ц а 2.2

Параметры приборов	Методы масштабирования		
	Неизменное электрическое поле	Неизменное напряжение питания	Обобщенный метод масштабирования
Геометрические размеры	$1/K$	$1/K$	$1/S$
Концентрация легирующей примеси	$K$	$K$	$S^2/K$
Напряжение питания	$1/K$	$1$	$1/K$
Электрическое поле в канале	$1$	$K$	$S/K$
Электрический ток	$1/K$	$K$	$S/K^2$
Мощность рассеяния	$1/K^2$	$K$	$S/K^3$
Временные параметры	$1/K$	$1/K^2$	$1$
Произведение быстродействия на мощность рассеяния	$1/K^3$	$1/K$	$1/SK^2$
Линейное сопротивление	$K$	$K$	$S$
Плотность тока	$K$	$K^3$	$S^3/K^3$

меняется метод масштабирования, обеспечивающий постоянное напряжение питания. В этом случае электрическое поле в канале растет в  $K$  раз, а плотность тока в  $K^2$  раз. Одновременно растет удельная мощность рассеяния на  $p$ - $n$  переходе, повышается его температура со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В ряде случаев применяется обобщенный метод масштабирования, при котором геометрические размеры масштабируются с коэффициентом  $S$ , а напряжения питания — с коэффициентом  $K$ , тогда электрические поля масштабируются с коэффициентом  $S/K$  и возрастают только в случае  $S > K$ .

Таким образом, современный этап микроминиатюризации с масштабированием выявил новые конструктивные факторы, имеющие прямое отношение к надежностным характеристикам приборов, так как повышение сложности структур с уменьшением размеров приводит к росту электрических полей, плотности тока, температуры  $p$ - $n$  переходов. Все это вместе взятое ставит вопросы обеспечения надежной работы приборов в разряд особо сложных проблем, требующих самого пристального внимания [7].

## ГЛАВА 3

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

#### 3.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ В СОСТАВЕ АППАРАТУРЫ

Современная радиоэлектронная аппаратура различного назначения при эксплуатации и транспортировке обычно подвергается динамическим воздействиям: вибрации, ударным и линейным перегрузкам, влиянию акустических шумов, частотные и амплитудные диапазоны которых весьма широки. Эти воздействия передаются на элементы аппаратуры, вызывая нарушение нормального режима работы и механические повреждения элементов. В последнее время опасность механических повреждений увеличилась из-за постоянного обогащения акустического спектра подвижных объектов высокочастотными составляющими, которые, более эффективно воздействуя на физико-механические свойства материалов, изменяют рабочие характеристики аппаратуры.

При работе двигательных установок, а также при движении с большими скоростями в атмосфере выделяется значительное количество механической энергии. Например, мощность акустических нагрузок, генерируемых двигателями современного реактивного самолета, доходит до сотен киловатт, а суммарные мощности акустических нагрузок, возникающих при работе двигателей космических ракет, достигли сотен мегаватт. Шумы реактивной струи и пульсаций обтекания создают у поверхности летательных аппаратов уровни переменных давлений порядка 170 ... 190 дБ с расширением частотного диапазона вибрационного воздействия до 5000 Гц.

К аппаратуре, предназначенной для использования в нестационарных условиях подвижных объектов, выдвинуты новые повышенные требования, такие как стойкость к хаотической вибрации и виброудару, а также удароустойчивость при уровнях ускорений до  $80\,000\text{--}120\,000\text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ .

Применение новых технологических процессов изготовления приборов и радиоэлектронной аппаратуры выдвинуло проблему устойчивости к воздействию ультразвука.

На рис. 3.1 в обобщенном виде представлены диапазоны ударных, вибрационных и акустических воздействий, которым подвергаются полупроводниковые приборы в составе современной аппаратуры различного назначения.

Нормативно-техническая документация содержит требования по следующим видам механических нагрузок:

вибрационным (на фиксированной частоте и в диапазоне частот);

ударным (многократные и одиночные);

линейным;

акустическим шумам.

Динамика роста требований по механическим нагрузкам представлена в табл. 3.1.

Анализ таблицы показывает, что требования к приборам по механическим нагрузкам за последние годы существенно возросли. Так, по частотному диапазону вибрационных воздействий за 25 лет требования возросли почти на порядок, по линейным нагрузкам и одиночным ударам — более чем в 13...20 раз.

Следует подчеркнуть, что на основе изложенных выше требований формируются как испытательные режимы в условиях

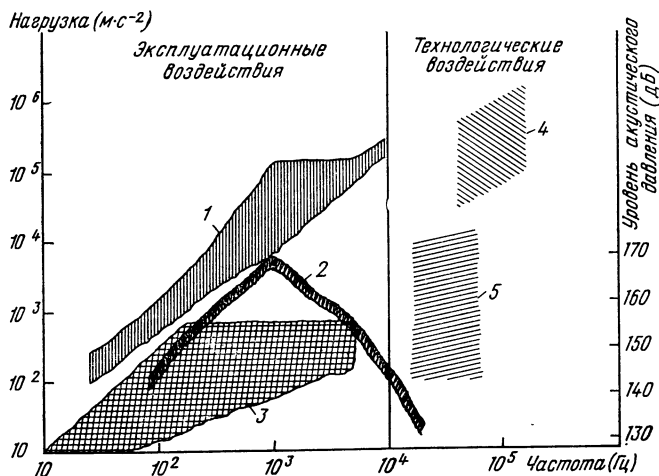


Рис. 3.1. Уровни вибрационных и акустических воздействий, которым подвергаются приборы в составе аппаратуры и при производстве:

1 — ударная вибрация; 2 — акустический шум; 3 — вибрация; 4 — ультразвуковая сварка; 5 — ультразвуковая очистка (пайка)

производства приборов и аппаратуры, так и эксплуатационные режимы в полевых условиях с уровнями нагрузок, равными принимаемым при испытательных режимах. Следовательно, устойчивость приборов к механическим нагрузкам высоких уровней должна быть обеспечена на протяжении всего их срока службы.

### 3.2. РЕАКЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

Под действием механических нагрузок в элементах конструкции приборов возникают динамические и статические деформации, сопровождающиеся сложными колебательными процессами, так как корпусные и активные элементы прибора представляют собой своего рода колебательную систему, состоящую из балок, стержней с различными видами закреплений концов, нагруженных сосредоточенной и распределенной массой.

Следует подчеркнуть различие процессов механического воздействия ударно-вибрационных нагрузок и акустических шумов.

В первом случае механическое воздействие на прибор передается элементам его конструкции через точки крепления в аппаратуре. Поэтому нагрузка в данном случае обладает определенной направленностью, в результате которой элементы конструкции в зависимости от их положения относительно направления ударно-вибрационного воздействия, будут подвергаться различной степени нагружения. Кроме того, элементы конструкции в местах крепления приборов служат своего рода демпфирующими устройствами, ослабляющими воздействие источника вибрации на остальные конструктивные элементы прибора.

В случае акустических шумов механическим воздействиям подвергаются в равной степени все элементы без каких-либо ослаблений. Поэтому воздействие акустических шумов при прочих равных условиях представляют наибольшую опасность для приборов.

Проанализируем механизмы реакции отдельных конструктивных элементов прибора на механические воздействия.

*Реакция корпуса*, обусловленная его деформацией за счет вибраций или акустических воздействий, проявляется в виде:

- знакопеременных механических напряжений в элементах корпуса;

- деформации сопряженных с корпусом элементов внутренней арматуры и полупроводникового кристалла;

- изменения диэлектрических свойств и удельного сопротивления материала, накопления статического заряда на изоляционных элементах корпуса;

- деградации конструкции корпуса (в результате усталостных явлений в материале).

*Реакция внутренней арматуры*, обусловленная деформацией корпуса прибора, проявляется в виде:

- знакопеременных механических напряжений в элементах;

- механических колебаний элементов;

- деформации полупроводникового кристалла в местах его соединения с элементами внутренней арматуры;

- деградации конструкции элементов внутренней арматуры (за счет усталости, разрушения, отслаивания).

Таблица 3.1

Виды воздействий	Уровень требований			
	1960 г.	1965 г.	1970 г.	1980...1985 гг.
Вибрация, Гц	5...600	5...1000	5...2500	5...5000
Ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	75	100	150	400
Линейное ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	250	750	1500	5000
Одиночный удар, ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	750	1500	5000	10 000
Множественный удар, ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	400	500	700	1500
Акустический шум, дБ	—	—	—	165

*Реакция активного элемента*, обусловленная деформацией корпуса прибора и сопряженных с ним элементов внутренней арматуры, проявляется в виде:

знакопеременных механических напряжений на элементах структуры *p-n* перехода и полупроводникового кристалла;

деформации проводящих элементов на поверхности полупроводникового кристалла, отслаивания и обрыва проводников;

деформации переходного слоя между активным элементом и основанием, отрыва кристалла от кристаллодержателя;

деградации активного элемента прибора, растрескивания и разрушения кристалла.

Одновременно с реакцией механического характера возможно возрастание уровня электрических шумов за счет токов, наводимых на колеблющихся элементах, и «размытие» вольт-амперной характеристики *p-n* переходов из-за тензочувствительности полупроводникового кристалла.

### 3.3. ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ. РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Выше говорилось о том, что в процессе эксплуатации приборы подвергаются вибрационным воздействиям различной степени жесткости. В результате действия вибрации в конструктивных элементах приборов возникают колебания, интенсивность которых зависит как от конструкции приборов, так и от вида вибрационного воздействия [8, 9].

При кратковременных вибрационных воздействиях конструктивные элементы приборов могут рассматриваться как колебательные системы, в которых происходят свободные колебания, определяемые собственной частотой

$$\omega_0 = \sqrt{K/m}, \quad (3.1)$$

где  $m$  — масса колеблющегося элемента;  $K$  — коэффициент упругости элемента, представляющий собой коэффициент пропорциональности между восстанавливающей силой, возникающей в системе при свободных колебаниях и перемещением  $x$ , на которое смещается элемент относительно положения равновесия.

В реальных колебательных системах всегда присутствует трение, и, следовательно, колебания постепенно затухают. Наиболее распространенным случаем является система, в которой сила тре-

ния пропорциональна линейной скорости колеблющегося элемента, т. е.

$$f = -bv = -b \frac{dx}{dt}, \quad (3.2)$$

где  $f$  — сила трения;  $b$  — коэффициент пропорциональности;  $v$  — линейная скорость перемещения элемента.

С учетом принятого выше, уравнение движения элемента будет иметь следующий вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + Kx = 0, \quad (3.3)$$

где  $m \frac{d^2 x}{dt^2}$  — сила, действующая в системе в результате движения элемента с массой  $m$ ,  $Kx$  — восстанавливающая сила, определяемая упругими свойствами системы.

Известно [8], что если справедлива зависимость (3.2) и трение достаточно мало, колебания элемента незначительно отличаются от гармонических и смещение колеблющегося элемента происходит по следующему закону:

$$x = X \exp \left( -\frac{b}{2m} t \right) \cos \omega t, \quad (3.4)$$

где  $X$  — начальная амплитуда колебания,  $b/2m = \alpha$  — показатель затухания,  $\omega$  — угловая частота затухающих колебаний.

Если трение мало (т. е.  $\alpha \ll \omega_0^2$ ), то изменением «периода» затухающих колебаний вполне можно пренебречь и считать, что  $\omega \approx \omega_0 = \sqrt{K/m}$ . Значение двух последовательных амплитуд колебаний элемента  $X_1$  и  $X_2$  мы получим, подставив в выражение (3.4) значения  $t=0$  и  $t=T$ . Отношение

$$\frac{X_1}{X_2} = e^{\alpha T} \quad (3.5)$$

есть величина постоянная. Натуральный логарифм этого постоянного отношения

$$\delta = \ln \frac{X_1}{X_2} \quad (3.6)$$

называется логарифмическим декрементом затухания. Показатель затухания  $\alpha$  характеризует затухание колебаний за единицу времени, а логарифмический декремент  $\delta$  — затухание колебаний за период.

Разложив выражение (3.5) в степенной ряд:

$$\frac{X_1}{X_2} = e^{\delta} = 1 + \delta + \dots, \quad (3.7)$$

и ограничиваясь двумя первыми членами этого ряда, получим

$$\frac{X_1 - X_2}{X_2} \approx \delta. \quad (3.8)$$



Таким образом, если затухание мало, то логарифмический декремент затухания представляет собой относительное уменьшение амплитуды колебаний за один период.

В случае воздействия на конструктивные элементы прибора изменяющейся по величине внешней силы эти элементы будут совершать вынужденные колебания, характер которых в той или иной мере будет повторять характер изменения внешней силы.

Уравнение движения колеблющегося элемента при воздействии синусоидальной вибрации имеет следующий вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + Kx = F, \quad (3.9)$$

где  $F = F_0 \sin \omega t$  — внешняя сила, вызывающая вынужденные колебания;  $\omega$  — частота изменения внешней силы.

Вынужденные колебания элемента происходят по гармоническому закону с частотой, равной частоте внешней силы

$$x = X \sin (\omega t + \varphi), \quad (3.10)$$

где  $\varphi$  — сдвиг фаз вынужденных колебаний.

Совместное решение уравнений (3.9) и (3.10) позволяет определить амплитуду вынужденных колебаний элементов:

$$X = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}}. \quad (3.11)$$

Выясним, как ведет себя амплитуда вынужденных колебаний элемента при частотах внешнего воздействия  $\omega$ , близких и далеких от  $\omega_0$ , в случае, когда затухание колебаний невелико, т. е.  $\alpha \ll \omega$ .

При  $\omega \ll \omega_0$  под корнем выражения (3.11) главенствует член  $(\omega_0^2 - \omega^2)^2$  и

$$X_0 \approx \frac{F_0}{m\omega_0^2} = \frac{F_0}{K}. \quad (3.12)$$

Таким образом, амплитуда вынужденных колебаний в этом случае оказывается равной статистическому смещению, которое вызвала бы постоянная сила  $F_0$ .

Когда частота внешнего воздействия приближается к частоте собственных колебаний элемента  $\omega_0$ , член  $(\omega_0^2 - \omega^2)^2$  в подкоренном выражении уменьшается, в результате чего  $X$  возрастает и проходит через максимум вблизи значения  $\omega = \omega_0$ . Приближенное значение этого максимума равно

$$X_{\text{макс}} \approx \frac{F_0}{2\alpha m \omega_0} = \frac{F_0}{(2\alpha/\omega_0) m \omega_0^2} = \frac{F_0}{(\delta/\pi) K}. \quad (3.13)$$

При дальнейшем возрастании  $\omega$  снова начинает играть роль член  $(\omega_0^2 - \omega^2)^2$  под корнем в выражении (3.11) и амплитуда колебаний начинает убывать. При  $\omega \gg \omega_0$

$$X_\infty \approx \frac{F_0}{m \omega^2}. \quad (3.14)$$

При увеличении частоты внешней силы амплитуда вынужденных колебаний стремится к нулю. Используя выражение (3.12) и (3.13), найдем зависимость максимальной амплитуды вынужденных колебаний  $X_{\text{макс}}$  от логарифмического декремента затухания:

$$\frac{X_{\text{макс}}}{X_0} = \frac{\pi}{\delta} \quad (3.15)$$

Если  $\delta$  мало по сравнению с единицей, то наибольшая амплитуда вынужденных колебаний во много раз превышает статическое отклонение  $X_0$ .

Возрастание амплитуды вынужденных колебаний в области, где  $\omega$  близко к  $\omega_0$ , называется явлением резонанса. Отношение

$$\frac{X_{\text{макс}}}{X_0} = \frac{\pi}{\delta} = \frac{\pi}{\alpha T} = \frac{2\pi}{bT} = \frac{m\omega}{b} = Q \quad (3.16)$$

называют добротностью колебательной системы.

Соотношения амплитуд вынужденных колебаний при различных значениях добротности и частоты гармонической вибрации приведены на рис. 3.2.

Из рисунка следует, что при частотах вынужденных колебаний много меньших и много больших собственной частоты колебаний амплитуда перемещения колеблющегося элемента равна амплитуде статического перемещения под действием вынуждающей силы  $F_0$ . При частотах, близких к собственным частотам элементов прибора, амплитуда перемещения резко возрастает и тем больше, чем больше добротность системы. При этом в соответствии с выражением (3.16) добротность прямо пропорциональна массе колеблющегося элемента и обратно пропорциональна коэффициенту трения. Следовательно, при необходимости подавления явления резонанса следует уменьшать массу элементов конструкции приборов и применять демпфирование для увеличения коэффициента трения в системе.

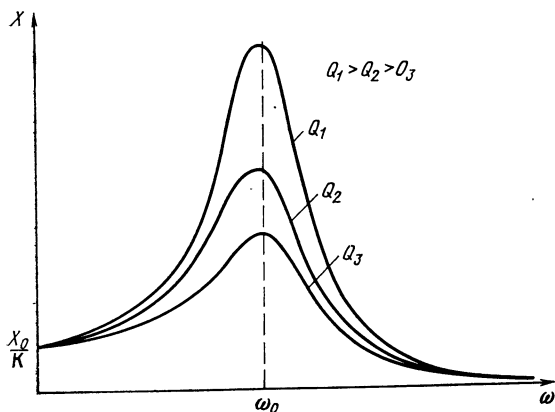


Рис. 3.2. Зависимость максимальной амплитуды вынужденных колебаний от добротности

### 3.4. УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Понятие ударного воздействия обычно связывают с однократным взаимодействием твердых тел, сопровождающимся мгновенным выделением значительной энергии в малом пространстве. В реальных системах всегда действуют конечные силы в течение относительно короткого интервала времени и взаимодействие двух соударяющихся тел связано с процессом их деформации вблизи точки прикосновения и распространением волны сжатия внутри этих тел [11].

Ударные воздействия на полупроводниковые приборы и микросхемы возникают при транспортировке, при использовании приборов в составе бортовых радиотехнических устройств и космических объектов. Следует подчеркнуть, что приборы не подвергаются непосредственному влиянию удара в месте соприкосновения соударяющихся тел, а воспринимают выделяющуюся при этом энергию через упругие связи конструктивных элементов аппаратуры. Характерной особенностью ударного взаимодействия является то, что тело реагирует на удар во время воздействия и после него.

Ударное воздействие принято характеризовать импульсом возбуждения, представляющим собой изменение во времени ударного ускорения (рис. 3.3). Импульс возбуждения характеризуется максимальным ускорением  $A$  и длительностью  $\tau$ . При ударе элементы конструкции корпусов приборов совершают колебания, форма и характер которых зависит от физических параметров приборов и формы импульса возбуждения.

Особенность колебательного процесса конструктивных элементов состоит в том, что в процессе удара они совершают вынужденные, а после удара — свободные колебания.

Для наглядности рассмотрения колебательных процессов представим конструктивные элементы прибора в виде простейших колебательных систем, имеющих собственную частоту свободных колебаний  $\omega_i$  и состоящих из сосредоточенной массы  $m_i$  и упругого элемента в виде пружины с жесткостью  $K_i$  (рис. 3.4).

При однократном ударном воздействии в конструктивных элементах прибора возможны три режима колебаний — баллистический, квазистатический и квазирезонансный. Возникновение того или иного режима определяется соотношением между длительностью импульса возбуждения  $\tau$  и периодом собственных колебаний конструктивного элемента  $T_i$ :

$$z = 2 \frac{\tau}{T_i} = \frac{\omega \tau}{\pi} \quad (3.17)$$

*Баллистический режим* имеет место при  $z \ll 1$ , когда конструктивный элемент имеет сравнительно большую массу при малом коэффициенте упругости. В этом случае за время действия импульса возбуждения элемент практически не перемещается и вся энергия ударного воздействия затрачивается на его сжатие. По

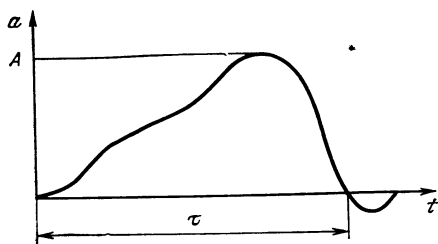


Рис. 3.3. Импульс возбуждения

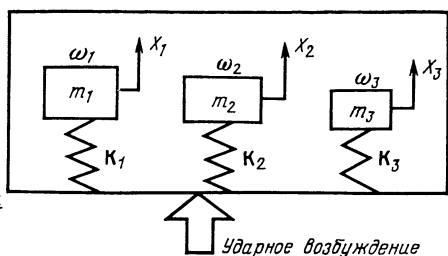


Рис. 3.4. Корпус прибора, содержащий конструктивные элементы в виде колебательных систем:

$x$  — смещение элемента относительно фиксированной системы координат

окончании импульса возбуждения элемент движется по закону свободных колебаний с амплитудой ускорения обратно пропорциональной частоте свободных колебаний. При этом максимальное перемещение элемента не зависит от формы кривой импульса возбуждения.

*Квазистатический режим* возникает при  $z \gg 1$  в системе, обладающей малой массой и достаточно большой жесткостью. В этом режиме перемещение массы системы и ее ускорение во время удара практически совпадают с перемещением и ускорением импульса возбуждения. Ослабления нагрузки на систему не происходит, а деформация упругого элемента и внутренние усилия в нем ничтожны.

Квазистатический режим характеризуется незначительным искажением формы кривой ударного импульса, вызываемым наложением на него колебаний системы с собственной частотой  $\omega_i$ . Перемещение массы элемента не зависит от формы ударного импульса. По окончании ударного воздействия система колеблется с собственной частотой  $\omega_i$ .

*Квазирезонансный режим* имеет место при  $z \approx 1$ . Во время действия импульса возбуждения вследствие резонансных явлений происходит увеличение амплитуды перемещения массы элемента по сравнению с ударным перемещением. Увеличение амплитуды перемещения до установившегося значения происходит и в процессе свободных колебаний системы после окончания ударного воздействия. Степень увеличения перемещения определяется коэффициентом усиления  $\eta$ , значение которого в зависимости от формы импульса возбуждения лежит в пределах 1,2—2.

При воздействии пилообразного импульса возбуждения коэффициент усиления равен 1,2. При синусоидальном — 1,8. Наибольшее увеличение амплитуды перемещения возникает при воздействии трапецеидального импульса, при котором коэффициент усиления  $\eta = 2$ .

Примеры колебательных процессов, соответствующих элементарным системам рис. 3.4, приведены на рис. 3.5. Колебательные

процессы на этом рисунке представлены кривыми изменения ускорения, возникающего в элементарной системе во время приложения импульса и после его окончания.

Реакцию системы на воздействие ударного импульса принято характеризовать величиной максимального ускорения  $a_{\text{макс}}$ , возникающего в системе. Положительное максимальное ускорение, возникающее в системе во время действия ударного импульса обозначают  $+I$ , отрицательное  $-I$  и называют *начальной реакцией системы*. Положительное и отрицательное максимальные ускорения, возникающие в системе после окончания ударного импульса, называют *остаточной реакцией* и обозначают соответственно  $+R$  и  $-R$ .

На рис. 3.5,а представелн баллистический режим системы, реакция которой достигает максимума после окончания импульса возбуждения. В случае квазирезонансного режима (рис. 3.5,б) начальная реакция системы на удар достигает максимума во время действия импульса возбуждения и сохраняется на том же уровне после его окончания. При квазистатическом режиме (рис. 3.5,в) начальная реакция системы равна максимальному ускорению импульса возбуждения. По окончании ударного импульса максимальное ускорение уменьшается до уровня остаточной реакции, величина которой определяется собственными параметрами системы.

Реальные конструкции современных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем могут быть представлены в виде сочетания бесконечного множества элементарных систем, каждая из которых обладает собственной реакцией на воздействие удара. В результате наложения реакций отдельных элементарных систем может быть получен частотный спектр максимальных ускорений, возникающих в конструкции прибора в результате ударного воздействия. Пример частотного спектра приведен на рис. 3.6.

Здесь сплошной линией обозначена начальная реакция конструкции во время удара и прерывистой линией — остаточная

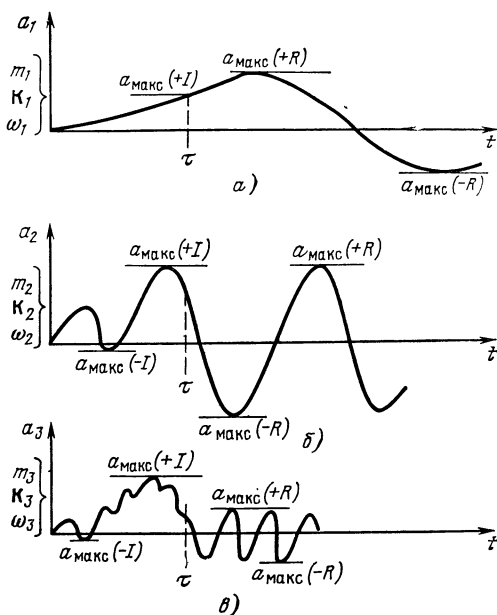


Рис. 3.5. Реакция систем с различными параметрами на воздействие ударного импульса (импульс возбуждения) длительность  $\tau$

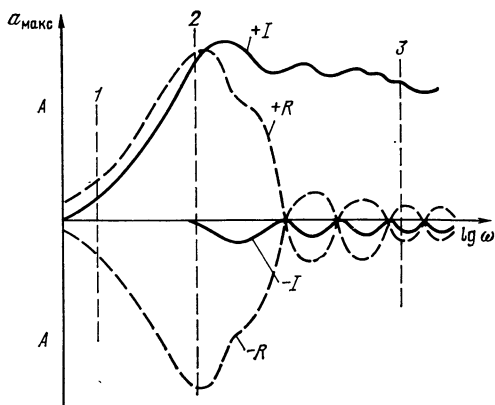


Рис. 3.6. Частотный спектр максимальных ускорений (реакций) конструкции прибора, состоящей из множества элементарных колебательных систем:

$A$  — амплитуда ускорения импульса возбуждения; 1 — баллистический режим при собственной частоте  $\omega_1$ ; 2 — резонансный режим при собственной частоте системы  $\omega_2$ ; 3 — квазистатический режим при собственной частоте системы  $\omega_3$

реакция. Частотный спектр начальных реакций не симметричен относительно оси абсцисс, это связано с тем, что при ударных воздей-

ствиях мы имеем дело с однонаправленными одиночными импульсами. Остаточная реакция возникает в результате свободных колебаний системы после удара. Поэтому частотный спектр остаточных реакций симметричен относительно оси абсцисс.

Максимальные ускорения, возникающие в элементах конструкции прибора в результате ударного воздействия, определяют в большинстве случаев максимальные механические напряжения в точках крепления элементов и максимальное относительное смещение подвижных частей конструкции, таких как внутренние и внешние выводы, траверсы, кристаллодержатели.

Для оценки пригодности того или иного прибора в условиях ударных нагрузок определенного вида могут быть использованы нормализованные частотные спектры максимальных ускорений, возникающих в конструкциях в результате ударных воздействий, которые называются *максимальным откликом* или *общим спектром удара* [11]. Для построения общих спектров удара для импульса данной формы применяются координатные шкалы, выраженные в относительных единицах, вследствие чего общий спектр удара становится действительным для ударов такой же формы любой длительности и амплитуды ускорения.

На рис. 3.7 представлен общий спектр удара для трапецеидального импульса возбуждения. По оси абсцисс отложены произведения частот колебаний элементов конструкции на длительность импульса  $\omega t$ , а по оси ординат — отношение максимального ускорения элемента к амплитуде ускорения ударного импульса  $a_{\text{макс}}/A$ .

В связи с тем, что отрицательная начальная реакция системы на удар много меньше положительной, а остаточная реакция симметрична относительно оси абсцисс, на рис. 3.7 представлена только положительная часть общего спектра удара. Сплошной линией на рис. 3.7 обозначена начальная реакция конструкции или начальный максимальный отклик на ударное воздействие, пунктирной линией — остаточный максимальный отклик.

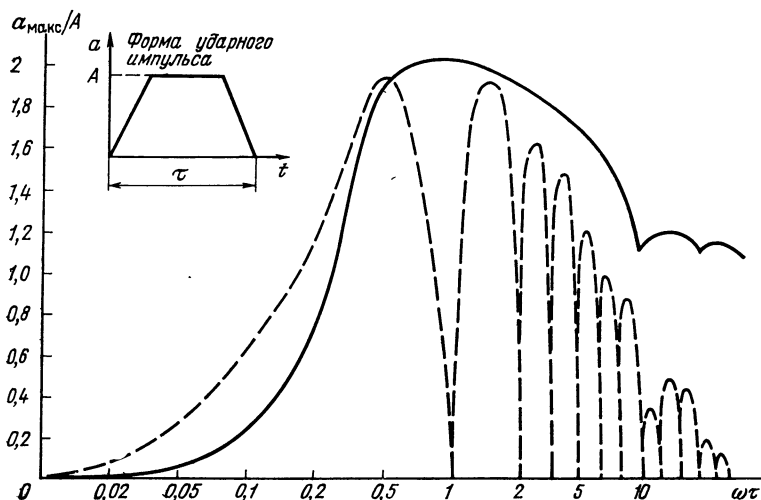


Рис. 3.7. Общий спектр удара

Рассмотрение общего спектра удара (см. рис. 3.7) позволяет сделать следующие выводы:

на начальном участке спектра при  $\omega_1\tau \leq 0,02$  элементы конструкции с собственными частотами колебаний, близкими к  $\omega_1$  при заданной длительности импульса возбуждения  $\tau$ , практически не испытывают ударной нагрузки во время удара и совершают незначительные колебания с ускорениями порядка 0,1 А после окончания ударного импульса;

участок спектра в диапазоне  $0,02 \leq \omega_2\tau \leq 0,2$  характеризует элементы конструкции с собственными частотами, близкими к  $\omega_2$ , имеющие практически одинаковую начальную и остаточную реакции на ударное воздействие;

элементы конструкции с характеристиками, лежащими в пределах участка спектра с координатами  $0,2 \leq \omega_3\tau \leq 10$ , в процессе удара и после него совершают колебания со значительным увеличением амплитуды ускорений (до двух раз) по сравнению с амплитудой ускорения ударного импульса;

на участке спектра при  $\omega_4\tau \geq 10$  элементы конструкции в процессе удара испытывают ускорения, равные ускорению ударного импульса. Остаточная реакция на удар таких элементов незначительна.

Задаваясь длительностью ударного импульса, по общему спектру удара можно оценить поведение того или иного элемента конструкции, если известна его собственная частота свободных колебаний. Например, при длительности ударного импульса в 1 мс первый из рассмотренных выше случаев будет распространяться на элементы с собственной частотой  $\omega_1 = 0,02/10^{-3} = 20$  Гц, второй случай — на элементы с частотой до  $\omega_2 = 0,2/10^{-3} = 200$  Гц и тре-

тий случай на элементы с частотой  $\omega_3 = 10/10^{-3} = 10\,000$  Гц. Элементы с частотой собственных колебаний  $\omega_0 > 10^4$  Гц практически не имеют остаточной реакции на ударное воздействие.

Общие спектры удара рассчитаны для импульсов синусоидальной и пилообразной формы [11]. Сравнение спектров показывает, что трапецеидальный ударный импульс оказывает наиболее жесткое воздействие на конструктивные элементы.

В заключение данного раздела сформулируем основные рекомендации по обеспечению надежной работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем при механических воздействиях.

1. При разработке необходимо проводить расчет конструкции приборов на прочность и устойчивость к механическим воздействиям.

2. Для достижения устойчивости к вибрационным воздействиям необходимо параметры конструктивных элементов выбирать таким образом, чтобы собственные частоты колебаний этих элементов лежали за пределами допустимого диапазона частот эксплуатации, тем самым исключая возможность возникновения резонансных явлений при вибрационных воздействиях. Для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем рекомендуется диапазон частот выше 5 кГц.

3. Для снижения добротности колебательных систем конструктивных элементов необходимо применять демпфирование в виде вязких наполнителей.

4. Для обеспечения устойчивости к ударным воздействиям необходимо выбирать конструктивные элементы с параметрами, имеющими более высокие собственные частоты, сводя ударные воздействия к квазистатическому режиму. В отдельных случаях, когда приборы используются в условиях низкочастотного диапазона вибраций, баллистический режим оказывается наиболее благоприятным.

### **3.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ И РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

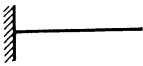
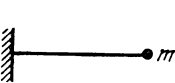
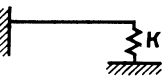
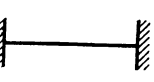
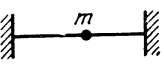
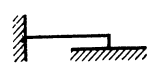
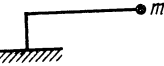
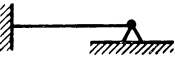
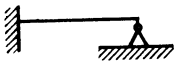
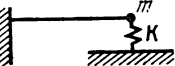
Конструктивные элементы полупроводниковых приборов, с точки зрения их реакции на вибрационные и ударные воздействия, можно изобразить в виде простой системы масс, пружин и демпферов. Ее эквивалентная механическая модель представляет собой демпфированную линейную упруго-массовую систему с соответствующими значениями собственной резонансной частоты и добротности.

Анализ конструкций полупроводниковых приборов и интегральных микросхем показывает, что большинство их конструктивных элементов могут рассматриваться как балки (стержни), рамы и пластины с различными условиями закрепления. С этих позиций конструктивные элементы могут быть разбиты на четыре группы:

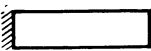
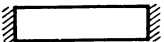
стержневые элементы с одним или двумя закрепленными концами. Это внешние выводы приборов, траверсы, внутренние электроды, соединяющие полупроводниковый кристалл с траверсой;



Таблица 3.2

Вид механической модели	Краткая характеристика механической модели	Наименование элемента конструкции
1 	Стержень с односторонней заделкой	Внешние и внутренние выводы приборов
2 	Стержень с односторонней заделкой, нагруженный массой $m$	Внутренние выводы приборов с учетом массы электродного вывода
3 	Упруго опертый стержень с односторонней заделкой	Внутренние выводы приборов с учетом жесткости электродного вывода
4 	Стержень с двусторонней заделкой	Электродные выводы транзисторов и диодов
5 	Стержень с двусторонней заделкой, нагруженный массой $m$	Электродные выводы с учетом массы
6 	Угловая рама с двусторонней заделкой	Электродные выводы с изгибом
7 	Г-образный стержень с односторонней заделкой, нагруженный массой $m$	Внутренний вывод транзистора с учетом массы электродных выводов
8 	Стержень с шарнирно опертым и заделанным концами	Электродный вывод транзисторов
9 	Угловая рама с шарнирно опертым и заделанным концами	Электродный вывод прибора с учетом изгиба
10 	Упруго опертый стержень с односторонней заделкой, нагруженный массой $m$	Внутренние выводы приборов при учете массы и жесткости электродных выводов

Окончание табл. 3.2

Вид механической модели	Краткая характеристика механической модели	Наименование элемента конструкции
11 	Прямоугольная пластина с односторонней заделкой	Держатель кристалла
12 	Прямоугольная пластина с двусторонней заделкой	Держатель кристалла

круглые пластины, закрепленные по контуру. К этой группе относятся элементы типа фланцев. Закрепление за край фланца является наиболее распространенным видом жесткого крепления полупроводниковых приборов;

квадратные пластины, закрепленные по контуру или поверхности. К данной группе элементов относятся полупроводниковые кристаллы транзисторов, а также все типы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем с закреплением кристалла по всей поверхности;

прямоугольные пластины, закрепленные по одной или двум сторонам. К этой группе элементов относятся держатели полупроводникового кристалла транзисторов.

С использованием классификации по приведенным выше группам разработаны механические модели основных конструктивных элементов приборов, примеры которых приведены в табл. 3.2 [12].

Наиболее распространенным видом механической модели является стержень с одно- или двусторонней заделкой. При разработке моделей дополнительные конструкции элементов учитывались как соответствующие нагрузки или реакции со стороны элементов, присоединенных к стержням. Нагрузки на схемах изображены в виде сосредоточенных масс, а реакции — в виде пружин. В большинстве случаев рассматривается одновременное действие тех и других факторов. Например, соединение внутреннего вывода с электродным выводом рассматривается как фактор, оказывающий воздействие на частоту траверсы за счет массы электродного вывода и его жесткости.

Заделка стержней в большинстве случаев принимается абсолютно жесткой. В отдельных случаях допускается наличие почти шарнирной связи электродного вывода с полупроводниковым кристаллом.

В конструкторских чертежах на полупроводниковые приборы допускают некоторую свободу при выборе конфигурации электродного вывода. Для учета этого обстоятельства при расчетах резонансных свойств принимаются две предельные модели конструктивного исполнения: прямой стержень с двусторонней заделкой и уголкового рама. Для дна произвольность конфигурации амортизирующей петли электродного вывода учитывается посредством соответствующего удлинения стержня.

Приведенные механические модели используются для расчета резонансных характеристик конструктивных элементов полупроводниковых приборов. Методики расчета резонансных характеристик и перегрузок, возникающих в элементах конструкций приборов при вибрационных и ударных воздействиях, подроб-

но изложены в изданиях, специально посвященных этому вопросу [9, 10, 53]. К ним из-за ограниченного объема книги в случае необходимости рекомендуется обратиться читателю.

## ГЛАВА 4

### КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И АГРЕССИВНЫЕ СРЕДЫ

#### 4.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН

Климатические факторы, такие как влажность, повышенные и пониженные температуры, солнечная радиация, плесневые грибки, иней, роса, соляные туманы и другие, в комплексе характеризуют условия окружающей среды, в которой эксплуатируется аппаратура, построенная с использованием полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Степень жесткости воздействия климатических факторов в значительной степени определяется климатическими и географическими зонами, в которых эксплуатируется аппаратура.

По установленному в СССР климатическому районированию весь земной шар делится на 7 макроклиматических районов: очень холодный, холодный, умеренный, тропический влажный, тропический сухой, умеренно холодный морской, тропический морской [13].

К очень холодному макроклиматическому району отнесена Антарктида. Средняя отрицательная температура в этом районе достигает  $-60^{\circ}\text{C}$ . В центральном районе Антарктиды (станция «Восток») зафиксирован абсолютный минимум температуры, равный  $-88,3^{\circ}\text{C}$ . Особенностью данного района является сочетание низких температур со штормовыми ветрами. Число дней в году со скоростью ветра более 25 м/с в этом районе достигает 70.

Большая часть территории Советского Союза и Канады, вся территория Аляски и Гренландии расположены в холодном климатическом районе, характеризующемся максимальной отрицательной температурой  $-54^{\circ}\text{C}$  и максимальной положительной температурой  $+31^{\circ}\text{C}$ . Относительная влажность в этом районе при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  и выше редко превышает 80%. Характерной особенностью холодного района является высокая прозрачность атмосферы и, как следствие, повышенный уровень ионизации воздуха. Последнее обстоятельство способствует накоплению статических зарядов на поверхности аппаратуры и на корпусах приборов. Для холодного района характерно также выпадение инея и образование обледенения на корпусах аппаратуры, эксплуатируемой в полевых условиях.

В умеренном климатическом районе расположены часть территории СССР, большая часть Европы, Соединенные Штаты Америки, Южная оконечность Южной Америки. Максимальная отрицательная температура в этом районе достигает  $-41^{\circ}\text{C}$ , при максимальной положительной температуре  $+43^{\circ}\text{C}$ . Главная черта данного района заключается в комплексности воздействия различных ес-

тественных факторов окружающей среды, усиливаемых агрессивными загрязнениями воздушных и водных пространств, являющихся результатом активной деятельности человека.

Влажный тропический район расположен вблизи экватора. К нему относится большая часть Центральной и Южной Америки, средняя часть Африки, юг Индии, часть Юго-Восточной Азии, Индонезия. Этот район характеризуется тем, что непрерывно длительное время (12 часов в сутки и более) наблюдается сочетание высокой (раной 80% и выше) относительной влажности и температуры (равной 20° С или выше). Средняя минимальная температура для этого района составляет +1° С, а средняя максимальная +45° С.

Дополнительными характеристиками данного района являются ливневые дожди, конденсация влаги, интенсивное солнечное излучение. За год выпадает более 1300 мм осадков. Для района характерны обильные росы. В некоторых местностях данного района обильная конденсация влаги имеет место в течение 200 дней в году.

Характерным для прибрежных районов и островов данной зоны является наличие высокого содержания соли в атмосфере, что в сочетании с высокой относительной влажностью и высокой температурой создает исключительно благоприятные условия для интенсивной коррозии металлов. Процессы коррозии ускоряются интенсивным ультрафиолетовым излучением и агрессивными выделениями быстро размножающихся бактерий и плесневых грибов.

К району с сухим тропическим климатом относятся северная часть Африки, центральная Австралия, Аравийский полуостров, часть Северной Америки. Данный район характеризуется высокими значениями температуры (до +55° С) при низких значениях влажности воздуха. Средняя максимальная температура выше +40° С. Характерной особенностью района является интенсивное солнечное излучение. Вместе с тем, колебания температуры воздуха в течение суток здесь значительно выше, чем в районе с умеренным климатом. Существенной особенностью климата данного района является высокое содержание песка и пыли в воздухе, особенно во время песчаных и пыльных бурь и вихрей. Песок и пыль могут оказывать абразивные и химические воздействия на приборы вследствие наличия агрессивных примесей на поверхности песчинок.

Умеренно холодный морской район включает в себя моря, океаны и прибрежные территории, расположенные севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты. Остальная часть морей, океанов и прибрежной территории относится к тропическому морскому району. Особенностью климата данных районов является аккумулирующее действие морей и океанов из-за большой теплоемкости воды. В связи с этим годовые колебания температуры в этих районах значительно ниже, чем в глубине материка. В умеренно холодном морском районе средняя минимальная температура —30° С; средняя максимальная температура +40° С. В тропическом морском районе эти значения соответственно составляют —1 и +45° С.

Климат морских районов отличается высокой коррозионной агрессивностью атмосферы из-за постоянно высокой влажности (около 80%) и высокой концентрации хлоридов. Особенно высока концентрация хлоридов в непосредственной близости от уреза воды.

Использование приборов в составе бортовой аппаратуры самолетов, ракет, космических объектов расширило диапазон внеш-

них воздействий, которым могут подвергаться полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы. Комплекс факторов, определяемых температурой, давлением и влажностью в верхних слоях атмосферы значительно отличается от условий, существующих на земле. Многочисленные наблюдения показывают, что атмосфера земли имеет весьма сложное строение, основные черты которого определяются, в первую очередь, особенностями вертикального распределения температуры.

В самой нижней части атмосферы — тропосфере, где происходит интенсивное турбулентное перемешивание воздуха, температура убывает с увеличением высоты со скоростью в среднем  $6^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Высота тропосферы изменяется от 8...10 км в полярных широтах до 16...18 км у экватора. В связи с тем, что плотность воздуха быстро убывает с высотой, в тропосфере сосредоточено около 80% всей массы атмосферы.

Над тропосферой расположен переходной слой — тропопауза с температурой  $-80 \dots -50^{\circ}\text{C}$ , выше которой начинается стратосфера. В нижней части стратосферы уменьшение температуры с увеличением высоты прекращается и температура остается приблизительно постоянной до высоты 25 км. Затем температура начинает возрастать, достигая значения  $0^{\circ}\text{C}$  на уровне стратопаузы, расположенной на высоте около 55 км.

Слой атмосферы, находящийся на высоте от 55 до 80 км, где вновь происходит понижение температуры с ростом высоты, получил название мезосферы. Над ней находится переходный слой — мезопауза, выше которой располагается термосфера, где температура увеличиваясь с высотой, достигает очень больших значений (более  $700^{\circ}\text{C}$ ). Далее на высоте 2000 км находится экзосфера, откуда атмосферные газы рассеиваются в мировое пространство за счет диссипации и где происходит постепенный переход от атмосферы к межпланетному пространству.

Состав воздуха, как и температура, меняется с высотой, что приводит к изменению плотности и давления. При подъеме на первые 1000 м в пределах тропосферы давление убывает на 1 мм рт. ст. каждые 10 м. Дальнейшее увеличение высоты приводит к убыванию давления в геометрической прогрессии. С увеличением высоты резко уменьшается содержание паров воды в атмосфере. Так, на высоте 15 км относительная влажность не превышает 8%. В результате изменения указанных физико-химических параметров атмосферы, меняются и ее электрофизические характеристики, такие как теплопроводность, диэлектрическая проницаемость и удельное объемное сопротивление.

В космической технике большое влияние на работоспособность приборов оказывают так называемые термовакуумные факторы. Они включают глубокий вакуум, лучевые тепловые потоки, невесомость.

Глубокий вакуум и невесомость способствуют тепловым перегрузкам, возникающим в результате снижения способности приборов рассеивать мощность за счет отсутствия конвективных по-

токов газов. Источником лучевых тепловых потоков является Солнце. Плотность потока солнечного излучения на поверхности Земли равна в среднем  $1400 \text{ Вт/м}^2$ . Следует отметить, что полупроводниковые приборы и микросхемы в составе аппаратуры не предназначены для функционирования в высотных слоях атмосферы или открытого космоса без специальных мер защиты, герметизации и поддержания оптимального режима нагрузок. Однако во многих случаях при применении в наземной и бортовой аппаратуре приборы могут подвергаться весьма жестким воздействиям факторов окружающей среды, в том числе при транспортировке, хранении в неотапливаемых помещениях и в полевых условиях. Все это говорит о том, что климатические факторы, вызывающие как было показано, в основном накапливающуюся реакцию в приборах, должны исследоваться и учитываться при рассмотрении всех этапов жизненного цикла полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

#### **4.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОНИЖЕННЫХ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Воздействие внешних пониженных и повышенных температур на приборы связано с сезонными и суточными изменениями температуры окружающей среды. Внешние температурные факторы могут действовать как самостоятельно при хранении и транспортировке приборов, так и в сочетании с тепловым режимом аппаратуры, построенной на полупроводниковых приборах и микросхемах.

Наиболее благоприятные условия для приборов складываются при стационарном температурном воздействии в условиях установившегося режима эксплуатации или хранения, когда приборы длительное время находятся в относительно неизменных температурных условиях, не превышающих по степени жесткости воздействия оптимальных условий, рекомендуемых нормативно-технической документацией. В ряде случаев приборы подвергаются периодическим и аperiodическим температурным воздействиям.

Периодические температурные воздействия возникают при повторно-кратковременных включениях аппаратуры, суточных изменениях температуры, при недлительном, но интенсивном облучении солнечной радиацией.

Аperiodические температурные воздействия вызываются единичными, но достаточно интенсивными действиями тепла и холода на приборы, например при переносе аппаратуры и приборов из теплых помещений в холодные, при аварийных ситуациях, таких как разгерметизация отсеков самолетов или космических объектов.

Реакция полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на стационарное тепловое воздействие связана с температурной зависимостью их электрических параметров. Если режимы применения приборов выбраны правильно, грамотно сконструирована аппаратура, то изменения электрических параметров при-

боров при температурном воздействии будут находиться в допустимых пределах, не вызывая отказов аппаратуры. Вместе с тем длительная эксплуатация приборов при повышенных температурах приводит к старению исходных конструктивных материалов.

При длительной эксплуатации при высоких рабочих температурах многие современные материалы, выполненные на органической основе, стекло и керамика претерпевают структурные изменения. У сплавов с высоким электрическим сопротивлением всегда нелинейно меняется проводимость. При высоких температурах становится нелинейным коэффициент температурного расширения. Диэлектрические потери и диэлектрическая проницаемость материалов с повышением температуры, как правило, увеличиваются. Тепловое старение материалов ускоряется при воздействии солнечной радиации, особенно за счет ультрафиолетовой составляющей излучения; старению способствуют электрические поля и механические нагрузки. Периодические и аperiodические температурные воздействия создают локальные тепловые и механические перегрузки подобные тем, которые возникают при термоциклировании. Локальные механические напряжения способствуют образованию микротрещин, их росту и объединению, что приводит к отрыву внутренних соединений, разрыву швов в местах спаев разнородных материалов и потере герметизации корпусов приборов. Длительное воздействие отрицательных температур способствует увеличению хрупкости металлических и пластмассовых конструкций, снижению их стойкости к вибрационным воздействиям.

#### 4.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОСТИ

Воздействие влажности на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы связано с адсорбцией воды, содержащейся в окружающей атмосфере, на поверхности корпуса и выводов прибора. Вода является весьма активным химическим соединением. Она легко взаимодействует с жидкостями, газами, твердыми веществами. Вода является активным катализатором, многие химические реакции существенно ускоряются в присутствии незначительного количества воды. Влага в атмосфере содержится в парообразном состоянии и в виде растворов солей и кислот. Осаждаясь на поверхности корпусов приборов, влага образует пленку электролита. Возникающие при этом химические реакции ускоряются воздействием света, электрических полей. Коррозия металлических элементов корпусов приборов приводит к снижению их механической прочности. Объемная коррозия, связанная с проникновением влаги в поры и микротрещины, приводит к нарушению герметичности корпусов приборов.

Интенсивность физических и химических процессов, обуславливающих воздействие влаги на приборы, связана не только с активностью воды как растворителя и катализатора, но и ее способностью смачивать те или иные материалы и проникать в них. Исследования показывают, что с повышением температуры способность воды к смачиванию поверхности и к проникновению в поры материалов, в микротрещины в местах спаев разнородных материалов увеличивается. При повышении температуры от 20 до 80°С вязкость воды уменьшает-

ся почти в три раза, а поверхностное натяжение — более чем в два раза. Более чем в 3 раза увеличивается коэффициент самодиффузии. С повышением температуры значительно возрастают способность воды к растворению различных элементов и ее химическая активность.

Длительное воздействие влаги на полимерные материалы, применяемые для герметизации полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, приводит к изменению их физико-химических характеристик. При объемном поглощении влаги изменяются механические и прочностные свойства пластических материалов и конечным результатом воздействия является нарушение герметичности пластмассовых корпусов и проникновение влаги во внутреннюю полость прибора.

В зависимости от содержания водяных паров в окружающей атмосфере и температуры окружающей среды влага может проявляться в виде тумана, инея и росы. Воздействия влаги в данных агрегатных состояниях могут быть весьма интенсивными. Поэтому в реальных условиях эксплуатации не следует допускать непосредственного контакта приборов с влагой в виде тумана, инея и росы.

#### **4.4. ВОЗДЕЙСТВИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ПЫЛЕВЫХ ВЗВЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ**

В условиях влажного тропического климата значительную опасность для приборов представляют плесневые грибки, обладающие исключительно высокой способностью к размножению. В процессе жизнедеятельности грибковые образования, развиваясь на корпусных деталях приборов, выделяют лимонную, уксусную, щавелевую кислоту, другие биологически активные соединения.

Плесневые грибки поражают даже такие материалы, как стекло, которое не является питательной средой для них. Под действием биологически активных веществ, выделяемых грибами, изменяются электрические характеристики герметизирующих пластмасс, повышается их хрупкость, резко возрастает влагопроницаемость. Под действием выделяемых грибами кислот и щелочей активизируется коррозия корпусных деталей и выводов приборов. Активность плесневых грибов значительно возрастает при повышенных температурах и влажности, а также в условиях воздействия солнечной радиации.

В районах с морским климатом существенное значение приобретает воздействие соли, содержащейся в атмосфере (соляной туман). Процессы, протекающие в приборах в условиях соляного тумана, являются разновидностью атмосферной коррозии, имеющей электрохимический механизм.

Содержащиеся в атмосферном воздухе пылевые взвеси в виде мельчайших частиц, оседая на металлических деталях приборов, могут быть причиной их отказов. В пыли различных материалов содержатся углекислые, хлористые и сернокислые соли и другие соединения, которые, оседая на приборах и поглощая влагу из окружающего воздуха, ускоряют коррозию их металлических деталей. С пылью переносятся и споры плесневых грибов. Попадая



на приборы, они усиливают корродирующее воздействие пылевых частиц. Кроме коррозионного воздействия, увлажненный налет пыли на поверхности приборов может вызвать поверхностные токи утечки и пробой воздушного промежутка между выводами корпуса, находящимися под высоким электрическим потенциалом. На лакокрасочных покрытиях корпусов увлажненная пыль вызывает медленную химическую реакцию, приводящую к потере изоляционных свойств покрытий. Песчаная пыль при обдуве приборов воздушной струей оказывает абразивное воздействие на корпусные детали, в результате которого нарушаются поверхностные изоляционные покрытия и облегчается коррозия металлических деталей.

#### 4.5. ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОНИЖЕННОГО И ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Использование полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в составе бортовой аппаратуры авиационных и космических объектов в ряде случаев происходит в условиях пониженных и повышенных давлений.

При воздействии на приборы пониженного атмосферного давления возникают отказы, обусловленные ухудшением отвода тепла за счет снижения конвекции, а также возникновением значительных механических напряжений в корпусных деталях за счет разности давления внутри и снаружи корпуса. Ухудшение отвода тепла может привести к перегреву активной структуры прибора, возникновению тепловой неустойчивости и тепловому пробое. Кроме того, с понижением атмосферного давления уменьшается электрическая прочность воздуха. При определенных условиях в воздушном промежутке между выводами приборов, находящихся под напряжением, может возникнуть коронный разряд, вызывающий в свою очередь сбой или отказ аппаратуры. Коронный разряд приводит к ионизации окружающей атмосферы и образованию химически активных ионов и радикалов. В условиях повышенной влажности коронный пробой сопровождается образованием агрессивных соединений, которые, адсорбируясь на корпусных деталях, ускоряют процессы коррозии и выход из строя приборов. Повышенное атмосферное давление оказывает в первую очередь механическое воздействие на конструктивные элементы приборов, способное привести к повреждению корпуса прибора и нарушению его герметичности.

В заключение следует сказать, что рассмотренные выше факторы действуют, как правило, в комплексе, усиливая друг друга или создавая благоприятные условия для преимущественного развития того или иного механизма отказа. Уместно указать и на то, что внешние факторы действуют в сочетании с электрическими и тепловыми режимами, в условиях которых приборы используются в аппаратуре. Последние также действуют ускоряюще на развитие дефектообразования в конструктивных элементах приборов, вызывая ускорение деградиационных процессов в них. Кроме того, внешние факторы действуют одновременно на все элементы аппаратуры. Вполне вероятны случаи, когда быстрее выйдут из строя или изменяют свои параметры такие элементы, как резисторы, конденсаторы, проводники и изоляционные покрытия.

Выход из строя или значительное изменение электрофизических параметров этих элементов может нарушить режим питания полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, вызывая их перегрузку и отказ.

Все вышесказанное свидетельствует о необходимости принятия специальных мер по защите приборов от внешних воздействий с целью создания им оптимальных условий для функционирования в аппаратуре по прямому назначению и обеспечения тем самым их высокой надежности.

## ГЛАВА 5

### РАДИАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

#### 5.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАДИАЦИИ

Радиационные воздействия способны вызвать как немедленную (мгновенную), так и накапливающуюся реакцию полупроводниковых приборов и микросхем. Среди существующих различных видов излучений наибольшую опасность для приборов представляют мощные электромагнитные излучения и частицы высоких энергий [14, 15, 70].

Все излучения, распространяющиеся в вакууме со скоростью света, называются *электромагнитными*. Полный спектр электромагнитных излучений охватывает очень широкий диапазон длин волн: от десятков тысяч метров до тысячных долей нанометра.

Особо сильное воздействие на приборы оказывают рентгеновское излучение и гамма-лучи. Электромагнитное излучение в диапазоне длин волн  $10^{-9} \dots 10^{-12}$  м называют *рентгеновским*. Оно бывает двух типов: характеристическое, возникающее в результате переходов электронов, находящихся на внешних орбитах тяжелых и средних атомов, на вакантные уровни внутренних оболочек, и тормозное, связанное с торможением быстрых электронов при их движении в веществе. *Гамма-лучи* возникают при ядерных реакциях и при переходе ядер из возбужденного состояния в невозбужденное. Для количественного описания рентгеновского и гамма-излучений применяются такие физические величины, как доза и мощность излучения.

Источники и уровни радиации описываются *экспозиционной дозой излучения*, представляющей собой количество излучения, создающее посредством ионизации в одном килограмме сухого атмосферного воздуха заряд, равный одному кулону каждого знака. В качестве единицы экспозиционной дозы принята физическая величина, называемая кулон на килограмм (Кл/кг).

Для описания интенсивности излучения применяется физическая величина, называемая *мощностью экспозиционной дозы*, представляющая собой приращение экспозиционной дозы в единицу времени. Единица измерения — ампер на килограмм (А/кг) —

равняется мощности излучения, передающего сухому атмосферному воздуху дозу излучения в 1 Кл/кг за 1 с.

В ряде случаев для описания экспозиционной дозы применяется внесистемная единица, называемая рентген, равная  $2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг, а для описания интенсивности излучения — рентген в секунду (Р/с).

Эффективность излучения, зависящая от параметров источника излучения, особенностей облучаемого объекта и его массы, характеризуется *поглощенной дозой излучения*, которой называется физическая величина, равная отношению средней энергии, переданной излучением веществу в элементарном объеме к массе вещества в этом объеме. Единица поглощенной дозы — грей — равна поглощенной дозе излучения, соответствующей энергии излучения любого вида в 1 Дж, переданной облученному веществу массой 1 кг (1 Гр = 1 Дж/кг).

*Мощность поглощенной дозы* характеризует интенсивность передачи энергии излучения веществу и представляет собой физическую величину, определяемую приращением поглощенной дозы за единицу времени. Единицей мощности поглощенной дозы является грей в секунду (Гр/с), равный мощности поглощенной дозы облучения, при которой за время 1 с облученным веществом поглощается доза излучения 1 Дж/кг.

Для описания поглощенной дозы излучения и мощности поглощенной дозы допускается применение внесистемных единиц, называемых рад и соответственно рад в секунду (рад/с); 1 рад = 0,01 Гр.

Наиболее эффективное воздействие на приборы оказывают заряженные частицы, такие как  $\alpha$ -частицы (ядра гелия), протоны (ядра водорода),  $\beta$ -частицы (электроны) с энергией более 10 кэВ, а также нейтральные частицы — нейтроны, обладающие высокой проникающей способностью. По уровню энергии принято делить нейтроны на медленные или тепловые, обладающие энергией около 0,025 кэВ, и быстрые с энергией более 10 кэВ.

Для количественного описания высокоэнергетических частиц применяются такие физические величины, как поток и плотность потока ионизирующих частиц. *Потоком ионизирующих частиц* называется физическая величина, равная числу частиц, падающих на данную поверхность в единицу времени. Единицей потока частиц является секунда в минус первой степени ( $\text{с}^{-1}$ ), равная потоку ионизирующих частиц, при котором через данную поверхность за 1 с проходит одна частица.

*Плотностью потока ионизирующих частиц* называется физическая величина, равная отношению потока ионизирующих частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы. Единицей плотности потока является секунда в минус первой степени на метр в минус второй степени, равная плотности равномерного потока ионизирующих частиц, при которой через поверхность 1 м<sup>2</sup>, перпендикулярной к потоку, за 1 с проходит одна ионизирующая частица.

В современной практике широкое распространение получила внесистемная единица, называемая *интегральным потоком частиц*, представляющая собой произведение плотности потока на время экспозиции и имеющая размерность метр в минус второй степени ( $\text{м}^{-2}$ ).

Источники радиационных излучений могут быть естественными и искусственными. Космическое излучение, солнечная радиация и радиационные пояса Земли являются основными естественными источниками радиационных излучений. Галактическое космическое излучение состоит в основном из ядер легких химических элементов и протонов с энергией, достигающей 100 МэВ и более. Однако плотность потока частиц галактического излучения очень низка ( $10^{-4} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ ), вследствие чего воздействием этого источника излучения можно пренебречь.

Солнечная радиация или солнечное космическое излучение состоит в основном из протонов с энергиями от 10 МэВ до 50 ГэВ, имеющих плотность потока частиц  $10^5 \dots 10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ . С периодичностью, равной примерно 10 годам, плотность потока частиц возрастает в десятки и сотни раз в результате солнечных вспышек.

Захваченные магнитным полем Земли, пришедшие из космоса электроны и протоны образуют радиационные пояса Земли. Внешний пояс находится на расстоянии около 16 000 км, состоит в основном из электронов с энергией порядка 20 ... 200 кэВ и характеризуется плотностью потока частиц  $10^7 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ . Внутренний пояс располагается на расстоянии около 3500 км от поверхности Земли и состоит в основном из протонов, имеющих энергию порядка 40 МэВ при плотности потока частиц до  $10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ . При возрастании солнечной активности плотности потоков частиц увеличиваются на несколько порядков. Реальная поглощенная доза, получаемая объектами при прохождении радиационных поясов Земли в течение 5 лет функционирования на геостационарной синхронной орбите, составляет  $5 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^5$  рад по кремнию, что эквивалентно воздействию интегрального потока электронов  $5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$  с энергией электронов порядка 1 МэВ.

К искусственным источникам излучения относят ядерный взрыв и ядерные источники энергии. Действие ядерного взрыва на приборы сводится к воздействию потока нейтронов и гамма-излучения длительностью порядка 50 ... 100 нс. В зависимости от мощности и вида ядерного заряда, расстояния до эпицентра взрыва от места расположения приборов дозы нейтронного и гамма-излучения могут варьироваться в широких пределах. Так, интегральный поток нейтронов в ряде случаев достигает  $10^{19} \text{ м}^{-2}$ , а экспозиционная доза гамма-излучения — до  $10^6 \text{ Р}$  при мощности дозы до  $10^{13} \text{ Р/с}$  [16].

Энергетические ядерные установки также являются источниками нейтронного и гамма-излучения. Дозы излучения при применении специальной защиты могут быть существенно ниже, чем при ядерном взрыве. Однако при длительной эксплуатации приборов в составе аппаратуры, расположенной в непосредственной

близости от таких установок, экспозиционные дозы могут быть соизмеримы с дозами, получаемыми при ядерных взрывах, а в отдельных случаях превышать их.

## 5.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Движение заряженных частиц большой энергии в веществе сопровождается ее потерей, затрачиваемой почти полностью на возбуждение связанных электронов [14].

Энергия свободного электрона может быть любой, если он оказывается вне атома, или приобретает определенные дискретные значения, если он не отрывается от атома, а лишь переходит в возбужденное состояние. Потери энергии, идущие на ионизацию в газах принято называть ионизационными. В твердых телах, например в полупроводниках и диэлектриках, по аналогии с газами имеет место внутренняя ионизация, которая соответствует переходу валентных электронов в зону проводимости. Образовавшиеся таким образом избыточные электроны и дырки свободны лишь в пределах кристалла. Электроны с энергией до 10 МэВ при прохождении через вещество теряют ее в основном на возбуждение атомов. Средняя энергия ионизации при облучении электронами составляет в кремнии 3,6 эВ, в арсениде галлия — 7,2 эВ, в германии — 2,86 эВ.

При взаимодействии гамма-излучения с веществом имеют место в основном три механизма его поглощения и рассеяния: фотоэффект, комптон-эффект и образование электронно-позитронных пар. При *фотоэффекте* квант гамма-излучения, взаимодействуя с одним из электронов оболочки атома, полностью передает ему энергию и выбивает его за пределы атома. Вылетающий электрон обладает энергией, равной разности энергии поглощенного кванта гамма-излучения и энергии связи электрона в атоме. В результате происходит образование вакантного состояния на соответствующем энергетическом уровне электронной оболочки. На этот вакантный уровень может перейти электрон с более высокого энергетического уровня с испусканием характеристического излучения. Таким образом, при фотоэффекте гамма-квант исчезает, а его энергия расходуется на выбивание из атомов фотоэлектронов и образование характеристического излучения.

*Комптонское рассеяние* гамма-квантов имеет место в том случае, если энергия квантов гамма-излучения, взаимодействующего с веществом, намного превышает энергию связи электрона в атоме. При комптоновском рассеянии происходит упругое взаимодействие гамма-кванта и электрона. При этом гамма-квант теряет часть энергии и изменяет направление движения. Энергия, переданная электрону, расходуется на отрыв от атома и придание ему скорости (кинетической энергии). В кремнии вследствие комптон-эффекта происходит основное поглощение гамма-квантов с энергией от 50 кэВ до 15 МэВ.

При взаимодействии гамма-кванта с кулоновским полем ядра проявляется эффект образования электронно-позитронных пар. В результате такого взаимодействия гамма-квант полностью теряет энергию, при этом образуется пара частиц позитрон—электрон. Поэтому данный эффект может наблюдаться при энергии гамма-квантов, превышающей суммарную энергию покоя электрона и позитрона, равную 1,02 МэВ. Эффект образования позитронно-электронных пар в кремнии играет существенную роль при воздействии гамма-квантов с энергией свыше 15 МэВ.

В результате ионизации под действием излучения концентрация неосновных носителей в полупроводнике возрастает на несколько порядков (в  $10^6$  раз и более). Электрический ток, обусловленный ионизацией, по направлению совпадает с током насыщения  $p$ - $n$  перехода. В реальных биполярных полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах ионизирующее излучение мощностью дозы около  $10^{10}$  рад·с<sup>-1</sup> может вызвать ионизационные токи в несколько ампер. Эти токи в приборах приводят к перераспределению потенциалов, к перегреву и тепловому пробоем обратносмещенных  $p$ - $n$  переходов.

Помимо эффектов ионизации в твердых телах под действием высокоэнергетических частиц возникают радиационные дефекты, под которыми понимают более или менее устойчивые нарушения структуры, возникающие в кристаллах под действием частиц высоких энергий. Теория дефектообразования в твердом теле при воздействии высокоэнергетических частиц основывается на предположении о наличии двух процессов. Первичный процесс заключается в том, что воздействующая высокоэнергетическая частица, передавая атому твердого тела энергию, превышающую пороговую энергию  $E_d \approx 25 \dots 30$  эВ (для кристаллов с энергией связи атомов около 10 эВ), выбивает его из узла кристаллической решетки. При этом образуется относительно устойчивый точечный дефект: вакансия — междоузельный атом (пара Френкеля).

Вторичный процесс представляет собой взаимодействие выбитого из узла кристаллической решетки атома с соседними. Он может развиваться при наличии у выбитого атома достаточной энергии для выбивания из узла решетки вторичного атома. Этот процесс может перейти в каскад соударений, сопровождающийся образованием в кристаллической решетке разупорядоченных областей — кластеров. Области повреждений достигают размеров порядка 5...50 нм с концентрацией дефектов около  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

Разупорядоченные области в полупроводнике образуются при воздействии протонов,  $\alpha$ -частиц и электронов с энергиями в десятки миллионов электрон-вольт, а также при воздействии быстрых нейтронов, обладающих большой проникающей способностью.

Разупорядоченные области сохраняют полупроводниковые свойства после очень высоких доз облучения. Например, в германии  $n$ -типа эти области имеют проводимость  $p$ -типа, а в кремнии  $n$ - и  $p$ -типов — собственную. Предполагается, что разупорядоченные области содержат большое число дефектов, образующих

в запрещенной зоне полупроводника глубокие энергетические уровни, которые становятся заряженными при захвате подвижных носителей из окружающего неповрежденного материала. Это приводит к формированию области пространственного заряда и потенциального барьера на границе разупорядоченной области; высота последнего определяется глубиной залегания энергетических уровней дефектов в разупорядоченной области, их концентрацией и концентрацией легирующей примеси в неповрежденном материале.

Рассмотрим на микроскопическом уровне основные типы радиационных дефектов в кремнии и арсениде галлия, которые являются наиболее распространенными материалами, используемыми в производстве полупроводниковых приборов.

Прежде всего следует отметить, что в настоящее время наиболее полно исследованы радиационные дефекты в кремнии. Причина такого положения состоит в том, что эксперименты по электронному парамагнитному резонансу, систематически выполненные на кремнии, позволили получить детальные модели дефектов на микроскопическом уровне. Эти исследования привели к идентификации ряда вакансионных дефектов и пар вакансия плюс примесь. Ниже приведены основные типы радиационных дефектов, возникающих в кремнии при воздействии быстрых электронов или гамма-излучения.

**Моновакансия.** Это один из основных наиболее подвижных радиационных дефектов. Вакансия может находиться в четырех зарядовых состояниях:

$V^+$  — положительная вакансия;

$V^-$ ,  $V^=$  — одно и дважды отрицательная вакансия;

$V^0$  — нейтральная вакансия.

Зарядовое состояние вакансии сильно влияет на энергию ее миграции. Вакансия в состоянии  $V^0$  отжигается в  $p$ -Si при  $T = 150 \dots 180$  К, а энергия ее миграции составляет  $(0,33 \pm 0,03)$  эВ. В то же время в состоянии  $V^=$  в низкоомном  $n$ -Si вакансии отжигаются при  $T = 60 \dots 80$  К.

**Комплекс вакансия—кислород (А-центр).** В кристаллах  $n$ -типа с концентрацией кислорода  $10^{17} \dots 10^{18}$  см $^{-3}$  основным дефектом является А-центр. Ему принадлежит акцепторный уровень  $E_c = 0,17$  эВ. Кислород связывает две из четырех связей вакансии. Спиновый резонанс и акцепторные свойства А-центра обусловлены захватом неспаренного электрона на молекулярную связь между двумя оставшимися атомами кремния, окружающими вакансию.

Энергия атомной переориентации А-центра составляет 0,4 эВ, и этот процесс в принципе может идти при комнатной температуре. А-центры относительно стабильны. Они отжигаются при температурах выше 570 К с энергией активации отжига 1,3 эВ.

**Комплекс вакансия — атом донора V группы, например фосфора (Е-центр).** Этот дефект обнаруживается в кремнии с малым содержанием кислорода  $N_0 \leq 10^{16}$  см $^{-3}$  при концентрации доноров  $N_D > 10^{15}$  см $^{-3}$  или в кремнии с  $N_0 \approx 10^{17} \dots 10^{18}$  см $^{-3}$  при  $N_D >$

$>10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Исследования влияния одноосного сжатия показали, что существует атомная и электронная переориентация этого центра. Энергия электронной переориентации составляет 0,06 эВ и соответствует энергии перескока электрона между тремя эквивалентными, но разно ориентированными конфигурациями дефекта относительно одного и того же направления. Атомная переориентация, заключающаяся в обмене местами атомов Si и вакансии, характеризуется значительно большей энергией активации —  $(0,93 \pm 0,05)$  эВ. Процесс отжига *E*-центров, который происходит в диапазоне температур 400 ... 425 К, заключается в миграции их без развала до места взаимодействия с другим типом дефекта, в результате чего *E*-центр уничтожается.

**Вакансия—акцепторная примесь.** Комплексы вакансии — акцепторная примесь III группы (Al, B, Ga), наблюдается в кремний *p*-типа. Однако четкой связи этих дефектов с энергетическими уровнями, обнаруженными в запрещенной зоне облученных кристаллов кремния, в настоящее время не установлено. Предполагается, что уровень  $E_v + 0,45$  эВ принадлежит комплексу вакансии—бор.

**Дивакансия.** Они образуются и как первичные дефекты в акте соударения быстрой частицы с атомами кремния и как вторичные дефекты в результате спаривания двух моновакансий. Дивакансии существуют в следующих зарядовых состояниях:

$VV^0$  — дивакансия нейтральная;

$VV^-$  — дивакансия отрицательная;

$VV=$  — дивакансия дважды отрицательная.

Энергия миграции дивакансии равна 1,3 эВ, энергия диссоциации 1,6 эВ. Отжигаются дивакансии в диапазоне температур 500 ... 550 К.

**К-центр.** Окончательно природа этого дефекта, энергетический уровень которого расположен выше валентной зоны на 0,30 ... 0,35 эВ, не установлена. Имеются предположения, что этот дефект соответствует комплексу междоузельный атом кремния — кислород или двойному *A*-центру. Термическая устойчивость *K*-центров близка к *A*-центрам — они отжигаются в области температур 550 ... 600 К.

В арсениде галлия, подвергнутом облучению, спектр энергетических уровней радиационного происхождения весьма сложен. Это связано с тем, что в монокристаллическом GaAs имеются две подрешетки, поэтому в результате смещений и замещений в ней могут образовываться первичные радиационные нарушения восьми типов: два нарушения типа вакансий, четыре — типа междоузлий (междоузельный галлий в подрешетке Ga или As и два замещения [70]). К настоящему времени в арсениде галлия надежно не идентифицирован ни один из радиационных дефектов. Все это осложняет описание их влияния на свойства кристаллов. Образующиеся при облучении в GaAs глубокие и мелкие энергетические уровни проявляются как доноры или акцепторы. Характерно, что сечения образования эффективных доноров в *p*-GaAs



и эффективных акцепторов в  $n$ -GaAs приблизительно одинаковы. Весьма вероятна активация химических примесей при облучении GaAs, в частности переходы примесных атомов из электрически неактивного состояния в междоузлия на место вакансий.

Экспериментально установлено, что при облучении электронами активируется остаточный кислород, в результате чего возрастает концентрация дефектов, образующих энергетический уровень в запрещенной зоне  $E_c - 0,65$  эВ. Кристаллы, легированные медью, при нейтронном облучении меняют тип проводимости вследствие возрастания концентрации активного компонента меди. При облучении GaAs нейтронами возможно образование разупорядоченных областей, имеющих размеры до 200 ... 250 нм, предполагается, что эти области представляют собой металлическую фазу.

Радиационные дефекты в арсениде галлия отжигаются в две стадии. На первой стадии в диапазоне температур отжига 490 ... 510 К, возможно, отжигаются дефекты, представляющие собой комплексы примесь — междоузельный атом, на второй стадии в

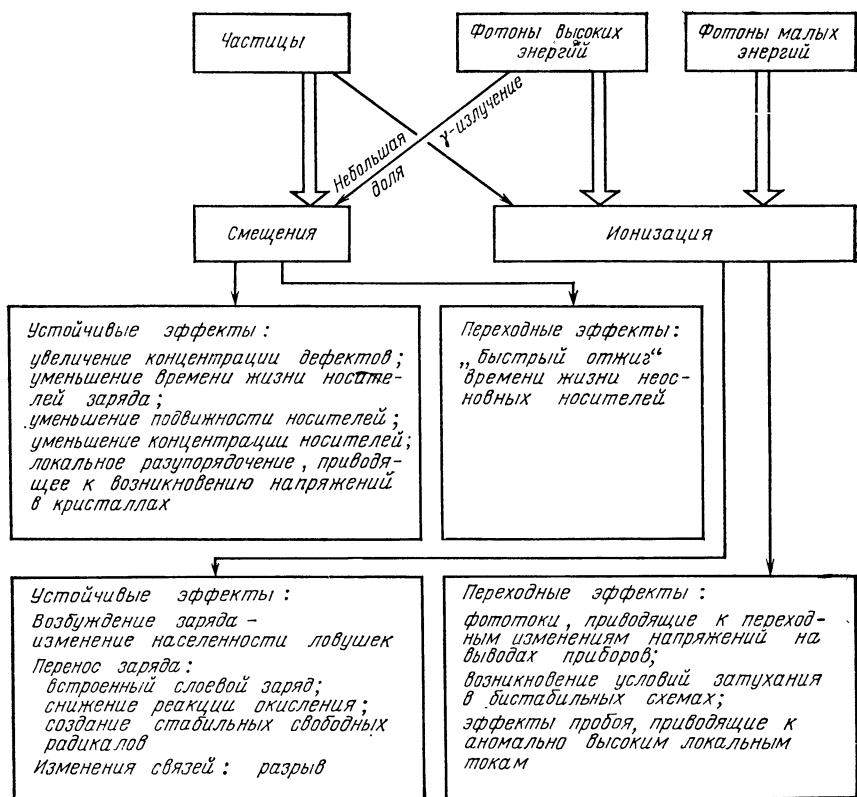


Рис. 5.1. Классификация радиационных эффектов

диапазоне температур 670...870 К отжигаются простейшие дефекты и скопления дефектов.

Первичные точечные дефекты, комплексы и локальные разупорядочения приводят к расширению кристаллической решетки и возникновению напряжений. Фотоны высоких и низких энергий, кроме ионизации, вызывают и устойчивые эффекты, такие как возбуждение заряда за счет изменения населенности ловушек, перенос заряда, изменение связей. Подробно классификация радиационных эффектов в твердых телах представлена на рис. 5.1.

Рассмотренные дефекты оказывают значительное влияние на электрофизические характеристики исходного полупроводникового материала, такие как время жизни неосновных носителей заряда  $\tau$ , удельное сопротивление  $\rho$ , концентрация неосновных носителей заряда  $n$ , подвижность  $\mu$ . Кратко рассмотрим зависимость указанных параметров от облучения.

*Время жизни неосновных носителей заряда* является важнейшей характеристикой полупроводниковых материалов, применяемых для изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. В связи с тем, что время жизни неосновных носителей определяется скоростью объемной рекомбинации на ловушках и локальных центрах, эффективность рекомбинации и соответственно время жизни зависят как от концентрации ловушек, так и от вероятности захвата неосновных носителей рекомбинационными центрами. Радиационные дефекты, образующие в запрещенной зоне полупроводника локальные энергетические уровни, представляют собой эффективные центры рекомбинации. Вследствие этого время жизни неосновных носителей весьма чувствительно к воздействию облучения.

Эмпирическое соотношение, подтвержденное экспериментально в широком диапазоне доз облучения, дает следующую количественную характеристику изменения времени жизни неосновных носителей  $\tau$  от интегрального потока излучения:

$$1/\tau_{\Phi} = 1/\tau_0 + \Phi K_{\tau}, \quad (5.1)$$

где  $\tau_{\Phi}$  — время жизни неосновных носителей после облучения;  $\tau_0$  — время жизни неосновных носителей до облучения;  $K_{\tau}$  — радиационная константа времени жизни неосновных носителей, зависящая от удельного сопротивления исходного материала, природы излучения и скорости введения радиационных дефектов;  $\Phi$  — интегральный поток излучения.

Из выражения (5.1) следует, что с ростом интегрального потока излучения время жизни неосновных носителей монотонно убывает.

Радиационные дефекты в исходных полупроводниковых материалах обуславливают уменьшение концентрации свободных носителей заряда, которая в кремнии по мере роста дозы облучения приближается к собственной. Экспериментально показано, что если при облучении вводится преимущественно один энергетический уровень, то концентрация основных носителей заряда изме-

няется в зависимости от интегрального потока облучения в широком диапазоне доз по экспоненциальному закону:

$$n_{\Phi} = n_0 \exp(-a_n \Phi), \quad (5.2)$$

где  $n_{\Phi}$  — концентрация электронов после облучения;  $n_0$  — концентрация электронов до облучения;  $a_n$  — постоянный коэффициент, связанный с начальной скоростью удаления носителей.

Подвижность неосновных носителей заряда в полупроводниках определяется рассеянием на тепловых колебаниях решетки, ионах примесей, дислокациях и других несовершенствах кристаллов. Радиационные дефекты, как правило, вызывают уменьшение подвижности. При нейтронном и протонном облучении изменение подвижности более резкое, что объясняется преобладающим вкладом (особенно при низких температурах) рассеяния на разупорядоченных областях. Эти области из-за наличия потенциального барьера на их границе более эффективно блокируют потоки свободных носителей заряда.

Удельное сопротивление (удельная проводимость) полупроводника связано известным выражением с исходными характеристиками материала:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p), \quad (5.3)$$

где соответственно  $\sigma$ ,  $\rho$  — удельные проводимость и сопротивление;  $n$ ,  $p$  — концентрации электронов и дырок;  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  — подвижности электронов и дырок;  $q$  — заряд электрона.

В связи с тем, что радиационные дефекты типа центров захвата при облучении способствуют уменьшению концентрации основных носителей заряда вплоть до собственной, дефекты, действующие как центры рассеяния, снижают подвижность основных носителей, а разупорядоченные области уменьшают эффективную площадь поперечного сечения полупроводника на пути прохождения тока, все эти процессы в соответствии с выражением (5.3) приводят к росту удельного сопротивления полупроводника. Экспериментально установлена экспоненциальная зависимость удельного сопротивления полупроводниковых материалов  $n$ - и  $p$ -типов от интегрального потока излучения:

$$\rho_{\Phi} = \rho_0 \exp(K_{\rho} \cdot \Phi), \quad (5.4)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho_{\Phi}$  — соответственно удельное сопротивление полупроводника до и после облучения;  $K_{\rho}$  — радиационная константа удельного сопротивления полупроводника, равная для материала  $n$ -типа  $1/(K_n \cdot n_0^{0.77})$  и  $1/(K_p \cdot p_0^{0.77})$  для материала  $p$ -типа.

Выражение (5.4) получено при допущении, что изменение удельного сопротивления кремния в основном обусловлено изменением концентрации носителей заряда и справедливо для материала  $n$ -типа в интервале  $5 \cdot 10^{13} < n_0 < 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при  $K_n = 387$  и для материала  $p$ -типа в интервале  $10^{14} < p_0 < 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при  $K_p = 444$ .

### 5.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Результатом изменения электрофизических параметров исходного полупроводника при воздействии облучения является изменение электрических параметров приборов. Кратко рассмотрим изменение параметров полупроводниковых приборов на основе  $p$ - $n$  перехода. При этом для выявления качественной картины изменений в допустимых пределах упростим математические выражения, описывающие параметры приборов.

**Диоды.** Основными характеристиками являются: прямое падение напряжения, обратный ток и обратное пробивное напряжение.

Полное падение напряжения в прямом направлении можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$U_{\text{д}} = U_{pn} + U_{\text{б}}, \quad (5.5)$$

где  $U_{\text{д}}$  — полное падение напряжения на диоде;  $U_{pn}$  — падение напряжения на области пространственного заряда;  $U_{\text{б}}$  — падение напряжения в объеме базовой области.

Кратко рассмотрим обе составляющие в отдельности, выразив их через параметры исходного материала и параметры прибора. Используя известное выражение для прямой ветви вольт-амперной характеристики диода, можно записать

$$U_{pn} = \frac{mkT}{q} \left( \ln \frac{I_{np}}{A} + B \ln \tau \right), \quad (5.6)$$

где  $m$  — коэффициент, изменяющийся в пределах от 1 до 2;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $I_{np}$  — прямой ток через диод;  $A$  и  $B$  — коэффициенты, практически не зависящие от облучения.

Из выражения (5.6) следует, что падение напряжения на области пространственного заряда в основном определяется одним радиационно-зависимым параметром — временем жизни неосновных носителей  $\tau$ ; с уменьшением времени жизни с ростом интегрального потока облучения падение напряжения на области пространственного заряда для одного и того же значения прямого тока уменьшается.

Составляющая прямого падения напряжения  $U_{\text{б}}$  при отсутствии модуляции проводимости в основном определяется удельным сопротивлением базовой области:

$$U_{\text{б}} = f(\rho_{\text{б}}). \quad (5.7)$$

В связи с тем, что удельное сопротивление исходного материала с ростом интегрального потока облучения увеличивается, составляющая прямого падения напряжения на базовой области будет возрастать. Таким образом, в связи с тем, что изменения составляющих прямого падения напряжения при облучении  $\Delta(U_{pn})_{\Phi}$  и  $\Delta(U_{\text{б}})_{\Phi}$  имеют разные знаки, на начальном участке вольт-амперной характеристики, когда приложенное напряжение в основном

падает на области пространственного заряда, суммарное прямое падение напряжения с ростом интегрального потока облучения уменьшается (рис. 5.2). При определенном значении прямого тока  $I_A$ , абсолютные значения изменений составляющих прямого падения напряжения равны.

При этом полное прямое падение напряжения на диоде с ростом интегрального потока облучения остается неизменным. Однако в целом прямая ветвь вольт-амперной характеристики кремниевых диодов под действием облучения подвергается значительной трансформации. С ростом интегрального потока облучения  $U_{np}$  и дифференциальное сопротивление в прямом направлении монотонно увеличиваются за счет экспоненциального роста удельного сопротивления базовой области. При высоких уровнях облучения почти полностью исчезают выпрямительные свойства диода.

Обратный ток диода в основном состоит из двух компонентов:

$$I_{\text{ОБР}} = I_d + I_r, \quad (5.8)$$

где  $I_d$  — диффузионная составляющая, обусловленная термогенерацией носителей в базовой области;  $I_r$  — генерационно-рекомбинационная составляющая, обусловлена термогенерацией носителей в обедненном слое  $p$ - $n$  перехода.

В общем виде  $I_d$  может быть выражена следующей зависимостью:

$$I_d = A_1 \frac{n_i^2}{n_n} + B_1 \frac{n_i^2}{P_p}, \quad (5.9)$$

где  $A_1$ ,  $B_1$  — сомножители, содержащие различные электрофизические характеристики исходного материала, слабо зависящие от излучения;  $n_i$  — собственная концентрация носителей в полупроводнике.

В связи с тем, что концентрация носителей в полупроводнике экспоненциально убывает с ростом интегрального потока излучения, зависимость диффузионной составляющей обратного тока от потока также экспоненциальная:

$$I_d \sim e^{\Phi}. \quad (5.10)$$

Генерационно-рекомбинационная составляющая  $I_r$  в основном определяется временем жизни неосновных носителей заряда:

$$I_r = \frac{A_2 n_i}{B_2 \tau}, \quad (5.11)$$

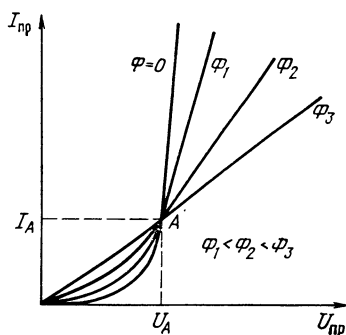


Рис. 5.2. Изменение прямой ветви вольт-амперной характеристики при воздействии облучения

где  $A_2$ ,  $B_2$  — коэффициенты, практически не зависящие от излучения.

Из выражения (5.11) следует, что  $I_T$  линейно возрастает с ростом интегрального потока излучения, так как согласно выражению (5.1) время жизни носителей обратно пропорционально интегральному потоку излучения.

У германиевых диодов генерационно-рекомбинационная составляющая обратного тока пренебрежимо мала по сравнению с диффузионной, в то время как у кремниевых диодов диффузионная составляющая примерно в  $10^3$  раз больше генерационно-рекомбинационной. Вследствие этого при прочих равных условиях обратный ток германиевых диодов с ростом интегрального потока излучения изменяется более резко, чем у кремниевых диодов.

Обратное пробивное напряжение диодов, в основном, определяется концентрацией основных носителей или удельным сопротивлением исходного материала:

$$U_{\text{обр. проб}} \sim \rho^z, \quad (5.12)$$

где  $z$  — показатель степени, зависящий от характера пробоя. В связи с ростом удельного сопротивления при облучении обратное пробивное напряжение также возрастает, однако из-за роста обратного тока обратная ветвь вольт-амперной характеристики становится более пологой.

**Биполярные транзисторы.** Все вышерассмотренное справедливо для биполярных транзисторов. Однако наряду с параметрами, определяемыми структурой  $p$ - $n$  перехода, основной характеристикой транзистора являются его усилительные свойства. В общем виде зависимость коэффициента передачи тока от электрофизических параметров, изменяющихся под действием излучения, может быть представлена следующим выражением:

$$h_{21E\Phi} = f(\tau_{\Phi}, t_{B\Phi}, S_{\Phi}), \quad (5.13)$$

где  $h_{21E\Phi}$  — коэффициент передачи эмиттерного тока;  $t_B$  — время пролета носителей через базу;  $S$  — скорость поверхностной рекомбинации.

В связи с тем, что основные электрофизические параметры транзистора — время жизни неосновных носителей  $\tau$ , время пролета носителей через базу  $t_B$ , скорость поверхностной рекомбинации  $S$  — изменяются под действием облучения, при этом время жизни в изменении усилительных свойств транзисторов играет доминирующее значение, коэффициент передачи тока  $h_{21E}$  с ростом интегрального потока излучения уменьшается. Скорость изменения усилительных свойств и характер зависимости изменения  $h_{21E}$  от интегрального потока излучения в значительной степени определяются конструктивными особенностями транзисторов, электрическими режимами их работы и видом излучения.

**Полевые транзисторы.** В полевых транзисторах с  $p$ - $n$  переходом параметры приборов определяются состоянием канала между стоком и истоком, основной характеристикой которого является

проводимость или концентрация основных носителей. В связи с тем, что при облучении концентрация основных носителей уменьшается, снижается максимальный ток между истоком и стоком, уменьшается напряжение отсечки. В полевых транзисторах на основе структуры металл—диэлектрик—полупроводник существенную роль играют изменения, возникающие в затворном диэлектрике и на границе диэлектрик—полупроводник. Под действием излучения в объеме затворного диэлектрика накапливается, как правило, положительный заряд, величина которого и место образования зависит от потока излучения, величины и полярности приложенного напряжения. На поверхности раздела диэлектрик—полупроводник под действием излучения возрастает концентрация поверхностных состояний. Это вызывает увеличение порогового напряжения транзистора, уменьшение крутизны стокзатворной характеристики. За счет образования дефектов в диэлектрике входное сопротивление транзистора уменьшается пропорционально корню квадратному из значения интегрального потока излучения.

**Интегральные микросхемы.** Известно, что они представляют собой функционально законченные схмотехнические блоки в гибридном или монолитном исполнении, активные элементы которых выполнены на основе  $p-n$  переходов или МДП-структур. Поэтому все вышерассмотренные эффекты в диодах, полевых и биполярных транзисторах присущи интегральным микросхемам. Однако процессы в них под воздействием излучения значительно сложнее и определяются не только изменениями характеристик исходных материалов, диодных и транзисторных структур, но и, в значительной степени, топологией интегральной микросхемы, ее схмотехническим назначением и выходными параметрами.

Основными активными элементами биполярных интегральных микросхем являются транзисторы и диоды, выполненные на основе  $p-n$  переходов. С ростом потока излучения, как было показано выше, уменьшаются коэффициенты усиления и передачи тока эмиттера, возрастает обратный ток коллектора. Облучение вызывает рост дифференциального сопротивления диодов в прямом направлении, увеличение прямого падения напряжения и токов утечки. Вследствие этих изменений нарушается нормальная работа всей микросхемы: снижается помехоустойчивость, ухудшаются шумовые и переключательные характеристики, сужается диапазон устойчивой работы при изменении напряжений питания и т. д.

В интегральных микросхемах на основе МОП-транзисторов ионизирующее излучение (вследствие накопления, как правило, положительного заряда в диэлектрике) вызывает сдвиг порогового напряжения и уменьшение крутизны характеристики транзисторов по затвору. Результатом воздействия является изменение уровней нуля и единицы в цифровых интегральных микросхемах, неустойчивая работа переключающих элементов и снижение помехоустойчивости.

Мощные импульсы гамма-квантов и заряженных частиц вызывают возникновение больших ионизационных токов в активных областях интегральных микросхем и цепях связи. В результате возможны значительные перегрузки с возникновением электрического и теплового пробоя  $p$ - $n$  переходов и изолирующих областей. Накопление ионизованных примесей на поверхности приборов вызывает инверсию приповерхностных областей полупроводника, которая в свою очередь приводит к сбоям в работе микросхем и выходу их из строя.

Сравнение переходных радиационных эффектов в интегральных микросхемах и в схемах на дискретных компонентах показывает, что наиболее значительные изменения параметров ИМС обусловлены ионизационными эффектами. В монолитных микросхемах с изоляцией  $p$ - $n$  переходами обычно возникают большие фототоки, чем в аналогичных схемах на дискретных компонентах, причем основной вклад в суммарный фототок вносит подложка, которая с созданными на ней  $p$ - $n$  переходами образует паразитные диодные и транзисторные элементы. Влияние указанных паразитных элементов полностью устраняется при использовании диэлектрической изоляции подложки и тонкопленочных резисторов для предотвращения необратимых отказов приборов при высоких уровнях излучений из-за протекания в резисторах избыточных токов. Остаточные радиационные эффекты, как в схемах на дискретных компонентах, так и в микросхемах вызывают деградацию параметров активных элементов, особенно коэффициента усиления транзисторов, что обусловлено, как правило, эффектами смещения. Однако деградацию коэффициента усиления можно снизить, уменьшая ширину базы, как это, например, предусмотрено планарно-эпитаксиальной технологией, или разрабатывая схемы с минимальным разветвлением по выходу, что снижает требования к коэффициенту усиления выходного транзистора микросхемы. Кроме того, в микросхемах в меньшей степени, чем в дискретных приборах проявляются поверхностные эффекты, так как в процессе производства ИМС используется тщательно контролируемая защитная окисная изоляция и уменьшенная геометрия элементов схем. Помимо этого, разброс параметров транзисторов в микросхемах меньше, чем у дискретных приборов, что также сказывается на радиационной стойкости.

Таким образом, в сравнении со схемами на дискретных компонентах интегральные микросхемы обладают более высокой радиационной стойкостью по отношению к остаточным радиационным эффектам и менее устойчивы к воздействию импульсного ионизирующего излучения. Как было показано выше, воздействие потока быстрых нейтронов на полупроводники приводит к уменьшению подвижности и концентрации основных носителей, а также снижению времени жизни неосновных носителей, что в свою очередь вызывает уменьшение коэффициента передачи базового тока, рост токов утечки и напряжения насыщения биполярного транзистора, а также изменение обратного напряжения диода и



емкости  $p$ - $n$  перехода. Изменение параметров компонентов микросхем влияет на их статические и динамические характеристики.

Анализ показывает [16], что биполярные микросхемы, изготовленные на основе методов двойной диффузии, могут функционировать, сохраняя свои первоначальные характеристики, при уровне потока нейтронов порядка  $5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ . В МОП-схемах ток в канале обусловлен основными носителями, поэтому заметные изменения их характеристик проявляются при более высоких уровнях облучения порядка  $10^{19} \text{ м}^{-2}$ . Наиболее перспективными с точки зрения устойчивости к воздействию потока нейтронов в ТТЛ-технологии являются ТТЛШ-схемы. Среди биполярных схем наиболее радиационно стойкие ЭСЛ-схемы. Аналоговые интегральные микросхемы могут быть очень чувствительными к воздействию нейтронов, так как в них используются горизонтальные  $p$ - $n$ - $p$  транзисторы и транзисторы с большим коэффициентом усиления, цепи с низкими рабочими токами и т. п., поэтому диапазон отказов этих схем лежит в пределах от  $1 \cdot 10^{16}$  до  $1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$ .

Непрерывное ионизирующее излучение приводит к увеличению токов утечки в биполярных транзисторах, особенно рассчитанных на малые рабочие токи (например, у аналоговых микросхем) и имеющих большие площади переходов. Токи утечки могут достигать значений, при которых происходит отказ биполярных микросхем уже при уровнях доз облучения порядка  $10^5$  рад.

Цифровые ТТЛ-, И<sup>2</sup>Л- и ЭСЛ-микросхемы во многих случаях нормально функционируют при дозах  $10^7$  рад. Экспериментальные данные показывают, что радиационная стойкость И<sup>2</sup>Л- и ТТЛ-микросхем соответствует  $10^6$  рад, а у ЭСЛ-схем достигает  $5 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^7$  рад.

Влияние общей дозы облучения на МОП-приборы более значительно, так как в функционировании указанных схем существенную роль играют поверхностные эффекты, а ионизирующее излучение приводит к увеличению заряда на поверхности кристалла. При этом в МОП-транзисторах наблюдается значительное изменение порогового напряжения. Кроме того, может произойти инверсия активных областей кристалла под поверхностью окисла. Наиболее чувствительны к общей дозе облучения  $n$ -канальные МОП-микросхемы, так как у них наименьшее допустимое пороговое напряжение. При этом для микропроцессоров, статических и динамических ЗУПВ отказы возникают в диапазоне  $7 \cdot 10^2 \dots 7 \cdot 10^3$  рад. Экспериментально установлено, что для динамического ЗУПВ емкостью 4К бит основным видом отказов при уровнях порядка  $3,5 \cdot 10^3$  рад является «залипание» декодеров в состоянии логической 1, которое вызвано изменением порогового напряжения сверх допустимого значения. Аналогичные эффекты наблюдаются в КМОП ИМС. В последние годы широко распространение получили микросхемы с алюминиевым затвором, которые выдерживают дозу  $10^5$  рад. Такие КМОП-вентили БИС более устойчивы к воздействию радиации, чем вентили с поликремниевым затвором, а последние более устойчивы, чем  $n$ -канальные

МОП-микросхемы. КМОП/КНС-микросхемы характеризуются повышенной радиационной стойкостью, что объясняется нечувствительностью диэлектрической подложки (сапфира) к облучению и малой площадью кремниевых  $p$ - $n$  переходов.

Импульсное воздействие ионизирующего излучения приводит к появлению фототока в любом обратносмещенном  $p$ - $n$  переходе, например в коллекторном переходе биполярного транзистора или в  $p$ - $n$  переходах, используемых для изоляции стандартных биполярных микросхем. Величина этого фототока зависит от мощности дозы излучения и может достигать значений, достаточных для изменения состояния логической 1 на логический 0 в цифровых микросхемах.

В момент импульсного воздействия в  $p$ - $n$  переходе образуются избыточные неосновные носители. В результате этого возникает импульс тока, который является преобладающим радиационным эффектом при данном виде излучения. Амплитуда первичного фототока через переход пропорциональна его площади и мощности дозы облучения:

$$I_{pp} = qq_0 P_v S (W_t + L_n + L_p), \quad (5.14)$$

где  $I_{pp}$  — первичный фототок;  $q_0$  — фактор ионизации, равный для кремния  $4,3 \cdot 10^{13}$  см<sup>3</sup> рад<sup>-1</sup>;  $P_v$  — мощность дозы;  $S$  — площадь перехода;  $W_t$  — толщина обедненной области  $p$ - $n$  перехода;  $L_n$ ,  $L_p$  — диффузионная длина неосновных носителей в  $n$ - и  $p$ -областях соответственно.

В транзисторных структурах интегральных микросхем первичный фоток  $p$ - $n$  перехода коллектор—база может стать причиной возникновения вторичного фототока. Первичный фототок является результатом диффузии неосновных носителей из коллектора в базовую область транзистора. Эти носители, достигнув базы, становятся основными, и, если нет их утечки, то они увеличивают потенциал базы (в  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторе). При включении транзистора по схеме с общим эмиттером это может привести к открыванию транзистора, и, следовательно, к усилению коллекторного тока. Возникший таким образом коллекторный ток и определяет-ся как вторичный фототок.

Импульсные фототоки, возникающие при воздействии импульсного ионизирующего излучения, могут вызвать явление, получившее название радиационного защелкивания и наблюдаемое в тех микросхемах, в которых может иметь место тиристорный эффект или вторичный пробой. Это явление объясняется наличием в ИМС четырехслойных  $p$ - $n$ - $p$ - $n$ - или  $n$ - $p$ - $n$ - $p$ -структур. Облучение в этом случае перебрасывает микросхему в открытое состояние, в котором она находится до отключения питания или выхода схемы из строя. Подробнее это явление будет рассмотрено в гл. 8.

Явление защелкивания не наблюдается в цифровых и аналоговых биполярных интегральных микросхемах, которые изготовлены с помощью двойной диффузии на эпитаксиальных пленках. Его порог зависит от мощности дозы, ширины импульса радиа-

ции и температуры, при которой облучается испытываемая схема. В схемах ТТЛ повышенной устойчивости защелкивание устраняется за счет диэлектрической изоляции подложки или путем радиационной отбраковки.

В И<sup>2</sup>Л-микросхемах защелкивание устраняется использованием низкого питающего напряжения. В МОП-технологии отказы этого типа имеют место только в КМОП-микросхемах, в которых применяется изоляция *p-n* переходами. В *n*-МОП-микросхемах отсутствует четвертый *p-n* переход, необходимый для появления тиристорного эффекта, вызывающего защелкивание. В КМОП/КНС-микросхемах защелкивание устраняется благодаря сапфировой подложке.

Порог устойчивости к воздействию импульсного гамма-излучения зависит от технологии интегральных микросхем. Для ТТЛ-микросхем малой и средней степени интеграции порог устойчивости охватывает диапазон  $10^7 \dots 10^9$  рад·с<sup>-1</sup>.

Наиболее высокой радиационной стойкостью обладают ЭСЛ-микросхемы, так как в их технологии используются высокочастотные транзисторы, работающие в линейном (ненасыщенном) режиме при больших рабочих токах. Диапазон устойчивости ЭСЛ-микросхем при импульсном облучении лежит в пределах  $1 \cdot 10^8 \dots 6 \cdot 10^8$  рад·с<sup>-1</sup>. Отказы типа защелкивания не наблюдаются. Поэтому, если требуется повышенное быстроедействие, а требования к потребляемой мощности не очень жесткие, то для построения аппаратуры целесообразно использовать ЭСЛ-микросхемы.

## ГЛАВА 6

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

#### 6.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

При рассмотрении жизненного цикла полупроводниковых приборов и интегральных микросхем указывалось на то, что на всех его этапах приборы подвергаются воздействию технологического процесса с использованием разнообразного оборудования и при участии персонала различной квалификации. При этом воздействие оказывается как на отдельные конструкционные и основные материалы, в которых формируются активные области прибора, так и на весь прибор в целом.

До недавнего времени дискретные приборы — диоды и транзисторы — изготавливались с использованием сплавной, спавно-диффузионной и диффузионной технологий.

В сплавных приборах с одной стороны или с двух сторон полупроводникового кристалла вплавляются электроды, образующие в процессе сплавления рекристаллизованный слой кремния, легированный материалом электрода или содержащейся в нем примесью. Для кремния *n*-типа в качестве электродного материала используется алюминий, для кремния *p*-типа — олово, легированное фосфором. Основой диффузионной технологии является процесс создания активных областей полупроводникового прибора за счет диффузии примеси в твердой фазе. Промежуточным вариантом является сплавно-диффузионная технология, при которой электродные сплавы загружаются в специально вытравленные в полупроводниковом кристалле канавки и сплавление совмещается с диффузией примеси в объем полупроводника, за счет чего и формируются активные области полупроводниковых приборов.

Большинство современных диодов и транзисторов, а также все монолитные интегральные микросхемы изготавливаются с использованием планарной технологии и ее разновидностей. Изготавливаемые по этой технологии приборы назвали планарными потому, что все *p-n* переходы, контактные области, металлическая разводка сосредоточены на одной поверхности кристалла, называемой рабочей.

Технологический цикл современного процесса изготовления планарных транзисторов включает до 250 различных операций, а для изготовления интегральной микросхемы средней сложности таких операций требуется 1500 и более [17, 18].

В процессе изготовления исходные материалы, конструктивные элементы и приборы обрабатываются в различных агрессивных средах и, кроме того, подвергаются интенсивным механическим и тепловым воздействиям (до 1200 °C и более при операциях окисления и диффузии). В результате формируются заданные свойства и параметры приборов и вместе с этим усиливаются или усугубляются несовершенства, имевшиеся в исходных материалах и конструктивных элементах, а также вносятся новые несовершенства и дефекты, которые прямо или косвенно влияют на выходные параметры приборов и на их надежность характеристики.

В связи с вышеизложенным целесообразно рассмотреть некоторые виды несовершенств и дефектов, возникающих при проведении наиболее важных операций технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Среди них рассмотрим следующие операции:

изготовление и обработка монокристаллов и получение пластин;

шлифовка и полировка пластин;

эпитаксиальное наращивание слоев;

фотолитография;

изготовление омических контактов и металлизация;

разделение пластин на кристаллы (скрайбирование);

посадка кристаллов на кристаллодержатель и присоединение внутренних выводов;  
герметизация.

## 6.2. ОБРАБОТКА ИСХОДНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛА

Известно, что исходными материалами для получения активных областей полупроводниковых структур являются монокристаллические полупроводники; среди них важнейшим и наиболее распространенным является кремний, общее потребление которого в мире составляет около 3000 т в год. В течение последних 30 лет наибольшее распространение при изготовлении монокристаллического кремния получил метод Чохральского, с помощью которого в настоящее время изготавливается около 90% всего потребляемого монокристаллического кремния.

При рассмотрении теоретических основ полупроводниковой электроники исходят из предположения абсолютного совершенства исходного монокристаллического полупроводника. Реальные монокристаллические слитки кремния, получаемые в настоящее время выращиванием из расплава по методу Чохральского или методом бестигельной зонной плавки, содержат самые разнообразные несовершенства и дефекты. Исследования показали, что взаимодействие дефектов между собой и их влияние на электрофизические параметры полупроводника столь противоречивы и сложны, что зачастую невозможно однозначно сформулировать технические требования к качеству исходного материала, так как связь между свойствами материала и характеристиками приборов во многих случаях имеет стохастический характер. Выявить корреляционную связь между свойствами исходного полупроводника и параметрами приборов можно лишь в результате статистического анализа больших объемов информации и экспериментальных данных, полученных в процессе исследований и промышленного производства материалов и приборов.

В соответствии с принятой классификацией в монокристаллическом кремнии, используемом для производства полупроводниковых приборов, различают следующие виды дефектов:

точечные — в виде атомов замещения и междоузельных атомов примеси, междоузельных атомов кислорода, атомов замещения углерода, вакансий и междоузельных атомов кремния;

линейные одномерные — в виде краевых дислокаций и дислокационных петель;

двумерные — такие как дефекты упаковки, границы зерен и двойниковых кристаллов;

объемные — представляющие собой микроскопические области, плотность, химическая структура и электрические свойства которых резко отличаются от свойств матрицы кристалла.

Рассмотренные выше дефекты не находятся в изоляции. В зависимости от внешних условий и степени совершенства монокрис-

талла они взаимодействуют между собою, образуя комплексы и объемные разупорядоченные области.

В кристаллах, получаемых методом Чохральского и бестигельной зонной плавкой в промышленных условиях, присутствуют собственные точечные дефекты в виде междоузельных атомов кремния и вакансий с концентрацией порядка  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , которые при охлаждении кристалла после выращивания образуют частицы плотной кремниевой фазы (*B*-дефекты) и скопления вакансий (*D*-дефекты). Примеси в кристаллах кремния делят условно на три группы:

фоновые примеси неметаллов в концентрациях, близких к пределу растворимости, такими примесями являются кислород, углерод, азот;

фоновые быстродиффундирующие примеси металлов, в том числе железа, меди, золота, кобальта, никеля, хрома;

легирующие примеси, которыми в зависимости от типа проводимости могут быть бор, фосфор, сурьма, мышьяк, алюминий, галлий.

Кристаллы вытягиваются из расплава, находящегося в кварцевом тигле при температуре  $1420^\circ \text{C}$ . Исходным сырьем является поликристаллический кремний, легированный примесью в зависимости от требуемого типа проводимости с концентрацией, задаваемой необходимым уровнем удельного сопротивления. Одновременно с полезной легирующей примесью в исходном поликремнии присутствуют быстродиффундирующие фоновые примеси тяжелых металлов, имеющих концентрацию порядка  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

В процессе вытягивания монокристалла легирующие и фоновые примеси переходят из расплава в кристалл и в случае идеального роста они должны были бы равномерно распределяться по всему объему монокристалла, не претерпевая перераспределения, при его охлаждении, так как концентрация этих примесей много ниже предела растворимости в кремнии при комнатных температурах.

Особо следует остановиться на роли таких фоновых примесей в кремнии, как кислород и углерод. В расплаве исходного материала при получении монокристаллов кремния эти два элемента присутствуют в концентрации, превышающей предел растворимости в кремнии при комнатной температуре. Кислород и углерод в достаточно высоких концентрациях содержатся в исходном поликремнии и при выращивании монокристаллов по методу Чохральского. Углерод дополнительно поступает из графитовых деталей, а расплав исходного кремния постоянно обогащается кислородом и углеродом за счет растворения кварцевого тигля и из газового наполнения ростовой камеры.

Под действием вертикальных конвекционных потоков в расплаве верхняя часть монокристалла оказывается более обогащенной кислородом и углеродом по сравнению со средней и нижней частями. В связи с тем, что за счет высокого совершенства структуры затравки и прецизионности поддержания режима вытягивания дислокации в кристалле практически отсутствуют, бездислокационные монокристаллы при последующем охлаждении до температуры около  $1100^\circ \text{C}$  оказываются пересыщенными междоузельными атомами кремния, вакансиями, атомами кислорода и углерода из-за отсутствия дислокаций, являющихся местом

стока точечных дефектов. Вакансии и междоузельные атомы образуют скопления в монокристалле, называемые кластерами. При этом в связи с флуктуациями скорости вытягивания относительно оптимального режима, при понижении скорости роста образуются преимущественно междоузельные атомы и соответственно *В*-кластеры, а при повышении скорости вытягивания — вакансии и *Д*-кластеры. Из-за этого механизма образования кластеров монокристаллы кремния имеют так называемую полосчатую структуру, ответственную за разброс удельного сопротивления как по длине кристалла, так и в радиальном направлении. В дальнейшем, при температуре около 1000° С, на основе кластеров образуются дислокационные петли и дефекты упаковки, на которых осуществляется преципитация кислорода, углерода и комплексов SiO<sub>х</sub> и SiC. Повышенное содержание углерода облегчает образование кислородно-кремниевых комплексов и их преципитацию на кластерах, дислокационных петлях и дефектах упаковки. При температуре 400... 450° С кислородно-кремниевые комплексы формируются в термодоноры, интенсивность образования которых существенно возрастает при повышенной концентрации углерода [19].

Рассмотренная выше динамика преобразования дефектов в процессе роста кристаллов кремния по методу Чохральского приведена в табл. 6.1 [20].

Таким образом, реальные монокристаллы кремния, поступающие на дальнейшую обработку для изготовления полупроводни-

Т а б л и ц а 6.1

Температура, °С	Состояние кристалла и дефектов	Примечание
1420	Расплав исходного кремния, легирующие и фоновые примеси растворены	Концентрация кислорода и углерода $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
1100	Монокристалл. Пересыщенный твердый раствор кислорода, углерода, междоузельных атомов, вакансий	
1000	Монокристалл. Избыточные вакансии и междоузельные атомы образуют кластеры, дислокационные петли и дефекты упаковки	Плотность дефектов $2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$
900	Монокристалл. Комплексы SiO <sub>х</sub> , SiC образуют преципитаты на дислокационных петлях и дефектах упаковки	При концентрации углерода $10^{17} \text{ см}^{-3}$ плотность преципитатов $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
800	Монокристалл. Усиление преципитации комплексов	—
700	Монокристалл. Образование локальных областей из окисла кремния	—
400	Монокристалл. Образование термодоноров из кислородно-кремниевых комплексов	—

ковых приборов и интегральных микросхем, содержат определенное количество несовершенств в виде *кластеров, преципитатных комплексов и микроскопических диэлектрических областей окиси кремния*. Несовершенства неравномерно распределены по кристаллу. При термической обработке на них оседают легирующие и фоновые примеси, образуя так называемые *спирлевые дефекты*.

В результате существования несовершенств в монокристаллах кремния, используемых в настоящее время, разброс удельного сопротивления по длине слитка в ряде случаев достигает 50%, а в радиальном направлении до 15% и более. Преципитаты кислородных и углеродных комплексов ответственны за снижение времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии до 10...50 мс.

Неоднородное распределение дефектов в кристалле приводит к локальным флуктуациям концентрации легирующих и фоновых примесей и соответственно к флуктуации электрического потенциала в объеме кристалла. В приборах, изготовленных из кремния с такой дефектностью, возможны микроплазменные пробои *p-n* переходов и деградация порогового напряжения и характеристик канала полевых транзисторов.

Дислокационные петли и дефекты упаковки, как правило, способствуют увеличению обратных токов и снижению пробивного напряжения *p-n* переходов. Кроме того, дислокации существенно способствуют увеличению низкочастотных шумов транзисторов.

Осаждение примесей металлов на дефектах вызывает появление на обратной ветви вольт-амперных характеристик *p-n* переходов участка так называемого мягкого пробоя, а в ряде случаев и закорачивание *p-n* перехода.

Неоднородность электрических свойств монокристаллов является одним из основных источников снижения процента выхода годных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. И если в условиях современного уровня полупроводниковой электроники, когда размеры полупроводникового кристалла не превышают одного квадратного сантиметра, еще можно обеспечить приемлемый процент выхода годных при использовании монокристаллов с достигнутой в настоящее время дефектностью, то при переходе к конструированию микроэлементных интегральных устройств на целой пластине годные приборы с использованием таких монокристаллов получить практически не удастся.

Одним из путей борьбы с дефектностью и фоновыми примесями является метод получения монокристаллов кремния посредством бестигельной зонной плавки, который позволяет снизить концентрацию кислорода до  $10^{16}$  1/см<sup>3</sup>, в результате чего улучшает однородность удельного сопротивления и возрастает время жизни неосновных носителей заряда до 100 ... 300 мс.

Весьма перспективен метод легирования исходных слитков кремния с использованием эффекта радиационных превращений при облучении тепловыми нейтронами. В кристаллах, полученных таким образом, удается снизить разброс по удельному сопротивлению до 5% [15].



Многообещающие результаты сулит разработка и внедрение модифицированного метода Чохральского, когда рост кристалла происходит при воздействии поперечного или продольного магнитного поля, позволяющего существенно повысить однородность монокристаллов и значительно снизить их дефектность за счет подавления конвекционных потоков в расплаве. При последующей обработке слитки подвергаются обдирке для придания им цилиндрической формы и обеспечения заданного размера по диаметру.

Часть слитка по его образующей удаляется для создания на пластинах одинаково ориентированного базового среза. В процессе обдирки и создания базового среза на поверхности слитка образуются микротрещины и микровыколы, которые в свою очередь являются источниками дислокаций, распространяющихся в объеме слитка.

### **6.3. ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН**

Специфической особенностью современного производства подавляющего большинства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем является групповая технология создания активных полупроводниковых структур на одной полупроводниковой пластине. Наибольшее распространение в настоящее время имеют пластины диаметром 76...125 мм, толщиной от 300 до 700 мкм. Современные тенденции развития производства свидетельствуют о том, что рост диаметра пластин будет продолжаться и к 1990 году в широкую практику войдут пластины диаметром 150...200 мм, что откроет дополнительные возможности для повышения производительности, улучшения технико-экономических характеристик технологического процесса производства приборов, но вместе с тем вызовет дополнительные трудности при получении пластин, существенно усложнит их обработку и обращение с ними.

Наиболее распространенным способом изготовления пластин является резка слитков дисками с внутренней режущей кромкой, армированной алмазным порошком (рис. 6.1). При этом в результате взаимодействия режущей кромки диска и материала слитка на поверхности пластины образуется нарушенный слой толщиной порядка 50...60 мкм (рис. 6.2), состоящий из нескольких участков.

У поверхности пластины образуется рельефный участок толщиной порядка 1...3 мкм, представляющий собой сильно разупорядоченный слой из смеси отдельных частиц материала различных размеров. За ним следует трещиноватый слой толщиной порядка 10...30 мкм, состоящий из кристаллических блоков, трещин и дислокационных сеток различной конфигурации. На границе между трещиноватым участком и ненарушенным монокристаллом образуется зона упругих деформаций толщиной до 5 мкм. Между рассмотренными слоями нет четких границ. Они как бы размыты по глубине, но их контуры в определенной степени повторяют

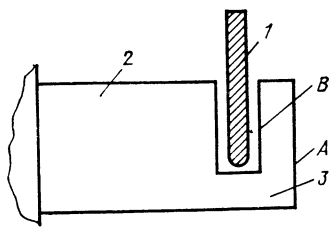


Рис. 6.1. Схема резки слитка на пластины:

1 — отрезной диск; 2 — слиток; 3 — пластина; А — наружная поверхность пластины; В — внутренняя поверхность пластины

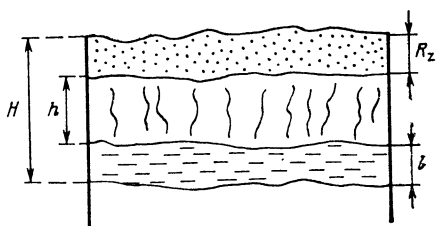


Рис. 6.2. Структура нарушенного слоя:

H — нарушенный слой,  $R_z$  — рельефный слой; h — трещиноватый слой; l — слой упругой деформации

профиль предыдущего слоя. При резке пластин степень и глубина разрушений внутренней поверхности (поверхность В на рис. 6.1) значительно превосходит разрушения, возникающие на внешней поверхности пластины (поверхность А). Как предполагают, это происходит потому, что при резке внешняя поверхность подвергается сжимающему усилию, а внутренняя — растягивающему. В связи с большей степенью разрушения внутренней поверхности в нарушенном слое в результате действия эффекта Тваймана возникают расклинивающие усилия, изгибающие пластину [17].

Глубина трещин в нарушенном слое и плотность их распределения по поверхности пластины не одинакова. Исследования показали (см. рис. 6.1, 6.3), что плотность распределения трещин и их глубина максимальны в области входа отрезного диска в монокристалл.

По мере врезания диска плотность трещин уменьшается, спадая к середине пластины до минимума. Это связано с тем, что при входе диска в монокристалл усилия, связанные с его осевыми колебаниями, воспринимаются небольшой площадью пластины. Поэтому нагрузка на единицу поверхности отрезаемой пластины весьма велика, что приводит к образованию множества глубоких трещин.

При дальнейшем движении диска площадь контакта с монокристаллом возрастает, нагрузка на единицу поверхности уменьшается и плотность дефекта снижается.

После разрезания слитка на пластины, последние шлифуются связанным или свободным абразивом до заданных тол-

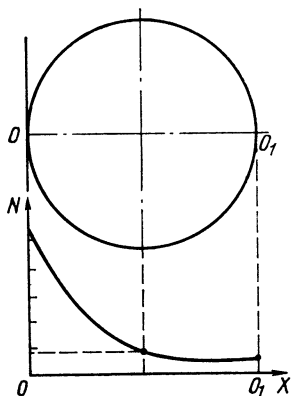


Рис. 6.3. Плотность распределения трещин на пластине после резки:

x — направление резки; O — точка входа диска в слиток;  $O_1$  — точка выхода; N — плотность трещин

щины в плоскопараллельности. В процессе шлифовки на поверхностях пластины также образуется нарушенный слой, по составу идентичный вышерассмотренному, но несколько меньшего размера по глубине. После шлифовки пластины полируются для удаления нарушенного слоя. Наибольшее распространение получила химико-динамическая полировка, в процессе которой происходит травление поверхности кислотным или щелочным травителем и удаление с поверхности продуктов травления мелкодисперсным абразивом, взвешенным в травителе.

При механической обработке пластин последние закрепляются различными способами на специальных головках. Наиболее распространен способ приклейки пластин с применением смеси воска и канифоли. При наличии в составе клеящего вещества твердых частиц на рабочей поверхности пластины образуются ямки (рис. 6.4). Приклеенная пластина под действием специального груза и сил сцепления с держателем деформируется из-за наличия твердых частиц в клее. В процессе обработки необходимый слой материала удаляется и поверхность пластины становится плоской. После снятия с держателя упруго деформированная при приклеивании пластина возвращается в первоначальное состояние, вследствие чего на ее полированной поверхности появляются ямки.

Дефект типа «пологая ямка» — один из самых распространенных. Ямки представляют собой локальные углубления на поверхности пластины различной глубины и формы. Под диаметром ямки  $d$  (рис. 6.5,а) понимается максимальный размер деформированного участка плоскости, а под глубиной  $h$  — расстояние от поверхности пластины до самой низкой точки ямки.

В зависимости от условий образования ямки могут иметь различную конфигурацию. Примеры некоторых видов ямок показаны на рис. 6.5. В местах расположения ямок с обеих сторон пластины образуются дислокационные розетки с повышенной плотностью дислокаций в центральной части от  $3 \cdot 10^5$  до  $1,1 \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup>.

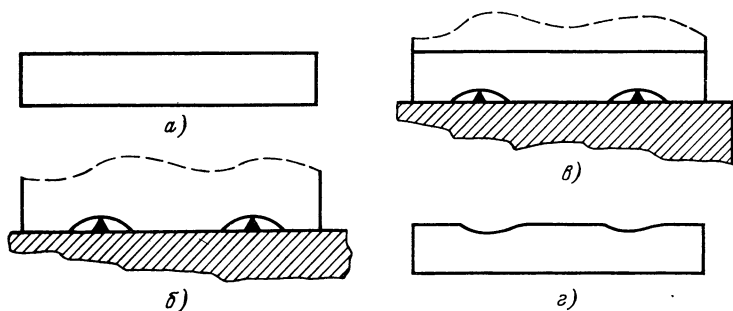


Рис. 6.4. Динамика образования ямок:

а — пластина до наклейки; б — деформация пластины после наклейки из-за наличия твердых частиц в клее; в — шлифовка пластины (Пунктирной линией обозначен удаляемый слой); г — пластина после шлифовки и отклейки от держателя

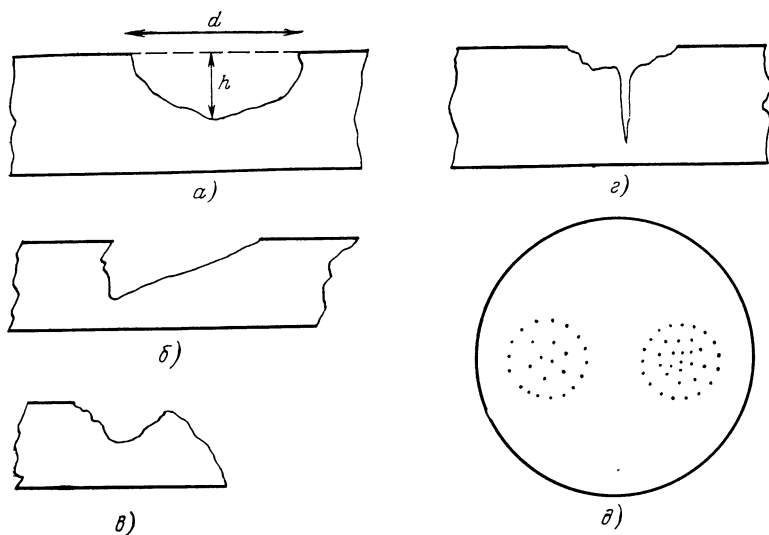


Рис. 6.5. Виды ямок на поверхности пластины:

*a* — симметричная ямка; *b* — асимметричная ямка; *в* — ямка на краю пластины; *г* — ямка с микротрещиной; *д* — розетки дислокаций

Исследования показали, что при соотношениях  $h/d$ , превышающих  $6 \cdot 10^{-4}$ , на дне ямки образуются микротрещины (рис. 6.5, *г*), которые при последующей обработке могут развиваться из-за нагрева, вибрации и т. д.

Наличие дислокаций в обработанной пластине приводит к несовершенствам и дефектам при последующей обработке. В частности, они способствуют росту и размножению дислокаций в эпитаксиальных слоях, выращенных на таких пластинах. Скопление дислокаций в пологих ямках приводит к искажению диффузионных профилей в местах их расположения. Экспериментальная зависимость брака структур от плотности дислокаций в пластинах, в процентах, показана на рис. 6.6. Из рисунка следует, что только

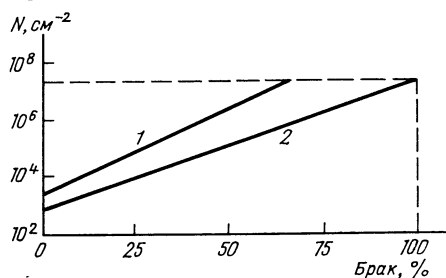


Рис. 6.6. Зависимость брака от плотности дислокаций:

1 — микросхемы малой и средней степени интеграции; 2 — микросхемы большой степени интеграции

за счет дислокаций на уровне  $10^4 \text{ см}^{-2}$  от 25 до 40 % структур микросхем уходит в брак.

Дефекты типа пологая ямка приводят к искажению геометрии структур, получаемых при последующих операциях. Так, при проекционном экспонировании слоя фоторезиста в процессе фотолитографии ямка на поверхности пластины способствует увеличению ширины засвечиваемого участка за счет многократного отражения све-

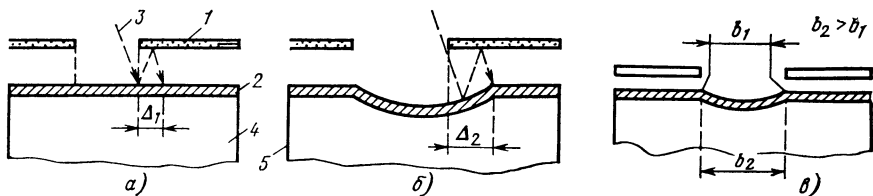


Рис. 6.7. Искажение геометрии структуры из-за пологих ямок при фотолитографии:

*а, б* — проекционное фотоэкспонирование пластины с ямкой; *в* — дифракция лучей при контактном экспонировании пластины с ямкой; *1* — фотошаблон; *2* — фоторезистор; *3* — световой поток; *4* — пластина с плоской поверхностью; *5* — пластина с ямкой на поверхности;  $\Delta_1$ ;  $\Delta_2$  — увеличение размера элемента на пластине за счет многократного отражения света

та в промежутке пластина — фотошаблон (рис. 6.7, *а*). При контактном экспонировании (рис. 6.7, *б*) увеличение участка засветки происходит за счет дифракции света на элементах фотошаблона.

Расчеты показывают, что изменение размеров элементов рисунка на пластине за счет дефектов типа «пологая ямка» лежит в пределах 0,1 ... 0,2 мкм, что становится весьма ощутимым при переходе к интегральным микросхемам с субмикронными размерами элементов.

Выше говорилось о том, что для удаления нарушенного слоя пластины подвергаются полировке. Однако существующие методы обработки не позволяют добиться абсолютного совершенства поверхности пластины. После полировки на поверхности остаются локальные нарушения, возникающие из-за воздействия абразивных материалов при шлифовке или случайных частиц при полировке. Перечислим некоторые из этих нарушений.

**Макроцарапины** — представляют собой протяженные узкие углубления, возникающие в результате срезающего действия абразивных частиц, сопровождающегося хрупким разрушением близлежащих областей кремния. При избирательном травлении макроцарапины проявляются в виде плоскостонных фигур травления. Форма фигур травления зависит от ориентации поверхности пластины и состава селективного травителя (рис. 6.8).

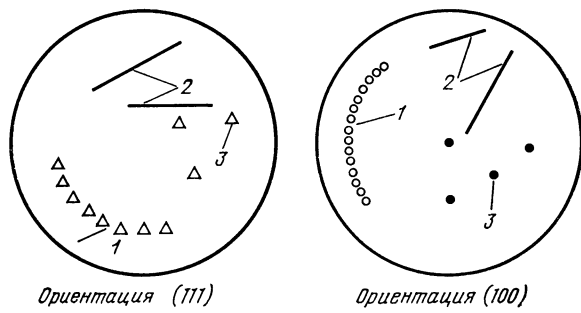


Рис. 6.8. Фигуры селективного травления на поверхности полированных пластин кремния ориентации (111) и (100): *1* — макротрещины; *2* — микротрещины; *3* — микровыколы

**Микроцарапины** — протяженные узкие углубления на поверхности пластины, возникающие в результате срезающего действия абразивных частиц, не сопровождающегося хрупким разрушением окружающего объема материала. При избирательном травлении микроцарапины проявляются в виде плоской однородной канавки. Вид микроцарапин не зависит от ориентации пластины и состава травителя.

**Микровыколы** — дефекты поверхности, возникающие при полировке пластин как результат скалывания кремния под воздействием острых краев частиц абразива, сопровождающегося локальным хрупким разрушением поверхности пластины. Микровыколы обнаруживаются при избирательном травлении в виде небольших скоплений или отдельных плоских фигур травления. Вид фигур зависит от ориентации поверхности и состава травителя.

К пластинам кремния, подготовленным для проведения последующих операций, согласно техническим условиям, предъявляются следующие требования:

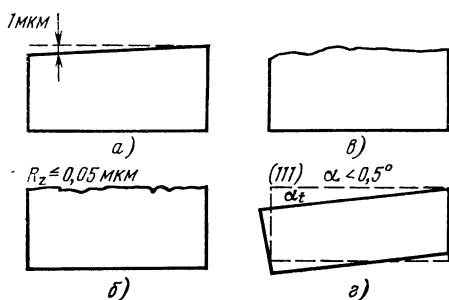
после обработки должна быть обеспечена плоскопараллельность поверхностей пластины не хуже  $\pm 1$  мкм (рис. 6.9,а);

шероховатость рабочей поверхности пластины до 0,05 мкм (рис. 6.9,б); не допускается неплоскостность пластины и завалы по краям (рис. 6.9,в);

поверхность пластины должна быть ориентирована параллельно плоскости (111) или (100) с точностью не хуже  $0,5^\circ$  (рис. 6.9,г);

плотность ямок на рабочей поверхности пластины не должна быть выше  $0,3 \text{ см}^{-2}$ , плотность микровыколов — не более  $0,6 \text{ см}^{-2}$ . Допускается наличие макротрещин общей длиной не более 0,3 диаметра пластины, микроцарапина — общей длиной не более 1,5 диаметра пластины, краевых сколов глубиной и длиной не более 1,5 мм. Для пластин диаметром 100 мм допускается прогиб не более 25 мкм.

Однако эти требования, зафиксированные в действующей нормативно-технической документации, являются в определенной степени компромиссом между возможностями современных методов получения и обработки пластин и требованиями технологического процесса изготовления приборов. Существенное снижение дефектности как объема пластин, так и ее поверхности — веление времени. Оно диктуется ростом сложности полупроводниковых приборов и степени интеграции, сопровождающихся значительным снижением разме-



размера. Оно диктуется ростом сложности полупроводниковых приборов и степени интеграции, сопровождающихся значительным снижением разме-

Рис. 6.9. Параметры поверхности и ориентации пластины:

а — плоскопараллельность; б — шероховатость; в — плоскостность и завал на краю; г — ориентация

ров элементов, приближающихся к размерам структурных и поверхностных дефектов и несовершенств пластин, используемых в современном производстве. Инженерный поиск новых методов обработки и создания бездефектных пластин — одно из главных направлений во всем комплексе мер обеспечения качества и надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Одним из таких методов, основанных на рассмотренных выше преобразованиях и взаимодействии дефектов, является управляемый процесс геттерирования точечных дефектов в кремнии. Доминирует физическое геттерирование, основанное на наличии пассивных несовершенств в кристалле, которые служат стоком для междоузельных атомов, вакансий и фоновых примесей, имеющих значительную подвижность. Для осуществления этого механизма, называемого внутренним геттерированием, несовершенства преднамеренно создаются в объеме кристалла. Одной из разновидностей таких несовершенств являются кластеры и преципитаты на них кислорода. Процесс геттерирования в этом случае заключается в нагреве пластин до температуры, при которой кластеры, комплексы и преципитаты кислорода диссоциируют на точечные дефекты. При этом часть точечных дефектов и кислорода диффундирует к поверхности, захватывается ею и испаряется. Другая часть диффундирует внутрь объема пластины, где при охлаждении снова образуются кластеры, преципитаты кислорода и другие протяженные дефекты, на которых оседают остаточные точечные дефекты, имеющиеся в полупроводнике. В результате этого процесса в приповерхностной области пластины создается область глубиной в несколько микрометров, свободная от точечных и структурных дефектов и фоновых примесей, пригодная для создания совершенных активных структур полупроводниковых приборов. В данном случае присутствие кислорода в кремнии играет положительную роль. Однако при использовании этого метода необходимо очень тщательно подбирать температурные и временные режимы обработки для того, чтобы избежать образования кластеров и преципитатов кислорода в приповерхностной области пластины.

В методах внешнего геттерирования для создания стоков точечных дефектов используется диффузия примесей с нерабочей стороны пластины, в частности диффузия фосфора, при которой создается сетка дислокаций несоответствия, воспринимающая на себя несовершенства из объема пластины. Перспективно также создание дефектов на нерабочей стороне пластины посредством механической шлифовки, пескоструйной обработки, ионной имплантации и лазерной обработки. Все эти методы нуждаются в тщательной отработке режимов и дозировки для того, чтобы обеспечить необходимую эффективность и воспроизводимость результатов.

#### 6.4. ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Все усилия по созданию бездефектных монокристаллов и пластин исходного материала могут быть сведены на нет, если не обеспечить нужной чистоты поверхности пластин. Поэтому вопросам очистки поверхности посвящен специальный параграф. Следует указать, что поверхность очищается многократно в процессе изготовления приборов [21].

Идеальной в технологическом отношении следует считать поверхность, имеющую высокую степень структурного совершенства, стабильную во времени и соответствующую следующим требованиям:

распределение поверхностного электрического потенциала должно быть оптимальным для каждого конкретного типа прибора и не должно изменяться во времени с изменением внешних условий;

плотность поверхностных состояний должна быть близкой к теоретической, что в свою очередь обеспечит низкую скорость поверхностной рекомбинации и соответственно стабильность временных характеристик приборов и их высокую надежность;

на поверхности должны отсутствовать примеси, изменяющие ее электрические и физические параметры, нарушающие адгезию наносимых слоев и способствующих возникновению в них структурных несовершенств и дефектов.

Основные источники загрязнений поверхности пластин приведены в табл. 6.2.

Анализ данных таблицы показывает, что производственный персонал является главным поставщиком загрязнений. И это не удивительно. Каждую минуту кожный покров человека и органы его дыхания выделяют в окружающее пространство более 6000 микрочастиц органического происхождения.

Загрязнения поверхности подразделяются на несколько типов. В первую очередь это *ионные загрязнения*, попадающие на пластину после ее обработки в водных растворах, содержащих соеди-

нения, диссоциированные на ионы. Например, широко применяемые растворы плавиковой кислоты и щелочей могут загрязнять поверхность ионами щелочных металлов и фтора. Другой вид загрязнений, называемых **атомарными**, в основном представлен атомами тяжелых металлов, таких как железо, медь, золото, серебро. Их происхождение чаще всего связано с восстановле-

Таблица 6.2

Наименование источника загрязнений	Относительный объем загрязнений, %
Воздушная среда производственных помещений	5...10
Технологические жидкости и газы	5...10
Технологический процесс	20...30
Оборудование	30...30
Производственный персонал	30...40



нием металлов из растворов, а также с процессами напыления и фотолитографии.

Различные масла, смолы, воск, остатки фоторезиста, органические растворители относятся к *молекулярным загрязнениям*. Они остаются на поверхности пластин в результате неполной очистки в процессе выполнения технологических операций, попадают из воздушной среды во время обдува пластин инертными газами, так как последние, проходя по магистралям и оборудованию, насыщаются различными примесями, находящимися в них. Осевшие ионы, атомы, молекулы и микрочастицы загрязнений весьма прочно удерживаются на поверхности. При этом возможны два механизма адсорбции.

**Физическая адсорбция.** В этом случае адсорбированные вещества удерживаются на поверхности в результате действия сил кулоновского взаимодействия между их молекулами и атомами кремния. Данный процесс протекает сравнительно быстро и обратимо с образованием нескольких монослоев адсорбированного вещества. Здесь следует заметить, что чем меньше размеры частиц, тем больше силы сцепления их с поверхностью пластины. Например, кварцевая частица на поверхности стекла размером в 100 мкм имеет силу сцепления с поверхностью, в 500 раз превосходящую ее массу, частицы размером в 1 мкм имеют силу сцепления, в 50 000 раз превосходящую их массу. А сила сцепления с поверхностью частицы размером в 0,1 мкм уже более чем в 500 миллионов раз превосходит ее массу. Приведенные данные говорят о том, что чем меньше частицы, тем труднее они удаляются с поверхности.

**Химическая адсорбция (хемосорбция).** В этом случае адсорбированные вещества вступают в химическую реакцию с поверхностными атомами кремния и образуют устойчивые химические связи. При этом на поверхности кремния образуется, как правило, только один монослой и процесс необратим.

Для паров воды справедливы оба механизма. При этом посредством хемосорбции образуются монослой, необратимо связанные с поверхностью кремния, с последующей физической адсорбцией на них подвижных слоев. Наиболее активными элементами, участвующими в хемосорбции являются кислород, озон, хлор, которые захватывают электроны и создают на поверхности кремния отрицательный заряд, способствуя тем самым обеднению носителями прилегающих областей монокристалла кремния *n*-типа. Адсорбция паров воды, спирта или ацетона способствует созданию положительного заряда на поверхности кремния.

В планарной технологии особенно опасна адсорбция на поверхности кремния ионов натрия и фтора. Ионы натрия обладают высокой подвижностью в двуокиси кремния, в результате чего нарушается стабильность ее электрофизических характеристик в приборах с окисной изоляцией. Активные ионы фтора в процессе наращивания окисного слоя на кремнии, замещая кислород, создают локальные дефекты в защитной окисной пленке. Значительные де-

фекты образуют различные металлы, адсорбированные на поверхности кремния. Так, ионы меди, адсорбированные на поверхности кристалла, вызывают увеличение обратных токов в *p-n* переходах, ускоряют деградационные процессы в приборах, приводящие к отказам.

Все это свидетельствует о необходимости тщательной очистки и предохранения от загрязнений поверхности пластин, подготовленных для проведения последующих технологических процессов. В связи с повышением степени интеграции с одновременным уменьшением размеров элементов интегральных микросхем возникает необходимость критической оценки существующих методов очистки поверхности и требований к степени загрязненности пластин, а также уровню содержания посторонних примесей в технологических средах, растворителях и деионизованной воде, применяемых для очистки. В частности, уменьшение размеров элементов микросхем приводит к тому, что посторонние частицы размером 0,1 мкм уже способны оказать отрицательное влияние на параметры и соответственно на надежность приборов. В действующей же документации оговариваются ограничительные требования на частицы с размерами 0,3 ... 0,5 мкм и выше.

На этот же уровень частиц настроен и технологический процесс, оборудование, системы фильтров и приборы контроля. Таким образом, дальнейший прогресс в микроэлектронике делает насущной проблему совершенствования методов очистки и контроля загрязнений поверхности пластин.

#### 6.5. ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ

Эпитаксиальное наращивание представляет собой один из важнейших процессов в планарной технологии приборов, при котором в определенных условиях на заранее подготовленную подложку наращивается монокристаллический слой полупроводника с заданными свойствами. Процесс выращивания монокристаллической пленки на подложке того же состава (кремниевая пленка на кремнии) называется *гомозпитаксией* или *автоэпитаксией*.

Выращивание монокристаллической пленки на подложке другого состава (кремниевая пленка на сапфировой подложке) называется *гетерозпитаксией*.

В зависимости от назначения эпитаксиальные пленки могут отличаться от подложки степенью легирования или удельным сопротивлением (например, низкоомная пленка на высокоомной подложке, и наоборот). Кроме того, пленки и подложки могут отличаться типом проводимости. Эпитаксиальные пленки могут выращиваться как на всей поверхности подложки, так и локально. Особенностью эпитаксиального процесса является то, что выращенная монокристаллическая пленка повторяет морфологию подложки и ее качество существенно зависит от чистоты и дефектности поверхности и приповерхностных областей подложки. В

эпитаксиальных слоях при последующих операциях формируются активные области полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Поэтому к совершенству пленки предъявляются особые требования.

Основными дефектами, возникающими в эпитаксиальных слоях при их создании, являются дислокации и дефекты упаковки [22]. Главными причинами возникновения дислокаций в эпитаксиальном слое являются дислокации в кремниевой пластине, на поверхности которой он создается, — дислокации в нем являются продолжением дислокаций в подложке. Кроме того, из-за несоответствия кристаллических решеток подложки и выращиваемого слоя вследствие разной степени легирования на поверхности их раздела возникают значительные напряжения, приводящие к пластической деформации близлежащего объема выращенного слоя и образованию дополнительных дислокаций. Таким образом, при эпитаксиальном наращивании происходит как бы размножение дислокаций, имевшихся в подложке.

Различные загрязнения на поверхности кремниевой пластины приводят к образованию в процессе роста эпитаксиальной пленки двумерных и многомерных дефектов, в частности дефектов упаковки, возникающих в результате нарушения закономерного чередования атомных слоев кристаллической решетки относительно ориентированной плоскости роста. Форма дефектов упаковки зависит от кристаллографической ориентации эпитаксиального слоя. При селективном травлении дефекты упаковки в слое, ориентированном в плоскости (111), проявляются в виде равносторонних треугольников, незамкнутых треугольников, отдельных прямых линий или более сложных фигур, представляющих собой наложение друг на друга нескольких треугольников. При ориентации подложки в плоскости (100) дефекты упаковки проявляются в виде квадратов.

Крупные дефекты на поверхности подложки (царапины, микровыколы, остатки окисной пленки и др.) являются местами зарождения более крупных дефектов роста, таких как пустоты или ямки, бугорки в виде пирамид и трипирамид и даже локальных поликристаллических областей.

В настоящее время наибольшее распространение получили эпитаксиальные структуры с толщиной эпитаксиального слоя 5 ... 15 мкм.

Нормативно-технической документацией предъявляются следующие требования по дефектности этих структур:

плотность дислокаций в эпитаксиальном слое должна быть не более  $5 \cdot 10^3 \dots 10^4 \text{ см}^{-2}$ ;

плотность дефектов упаковки — не более  $5 \cdot 10^2 \dots 10^3 \text{ см}^{-2}$ ;

плотность дефектов роста типа бугорков — не более  $0,5 \text{ см}^{-2}$ ;

плотность ямок — не более одной на  $\text{см}^{-2}$ ;

дефекты роста типа трипирамид не допускаются;

На поверхности пленки не должно быть трещин, рисок суммарной длиной более диаметра структуры, сколов, загибов и завалов на расстоянии более 2 мм от края.

С повышением степени интеграции при уменьшении размеров элементов схем до 1 мкм и менее приведенные выше требования к эпитаксиальным пленкам уже не могут обеспечить устойчивого технологического процесса, приемлемого процента выхода годных приборов и необходимой их надежности при эксплуатации. В частности, при достижении степени интеграции порядка  $10^5$  элементов на кристалле должна быть обеспечена практически совершенная структура эпитаксиальных пленок, при которой допустимо иметь не более одной дислокации на квадратный сантиметр. Повышение требований к совершенству эпитаксиальных структур выдвигает на передний план проблему разработки и внедрения новых методов получения монокристаллических пленок. В этой связи весьма перспективны разработка и промышленное освоение методов молекулярной эпитаксии.

#### 6.6. ЗАЩИТНЫЕ И МАСКИРУЮЩИЕ ОКИСНЫЕ СЛОИ НА КРЕМНИИ

В планарной технологии слои двуокиси кремния имеют исключительно важное значение. Они применяются для разделения отдельных структур друг от друга в интегральных микросхемах, для изоляции проводящих слоев от кремниевой подложки, для создания многоуровневой разводки, как маскирующие покрытия при проведении процессов фотолитографии и диффузии. Поэтому очевидно, что качество пленок двуокиси кремния во многом определяет совершенство и надежность характеристики полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, изготавливаемых по планарной технологии.

Слои  $\text{SiO}_2$ , создаваемые на поверхности кремния, по своему составу близки к аморфному плавленному кварцу и имеют плотность около  $2,2 \text{ г/см}^3$ , удельное сопротивление порядка  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , диэлектрическую постоянную при комнатной температуре 3 ... 4, диэлектрическую прочность в пределах  $10^6 \dots 10^7 \text{ В/см}$ , коэффициент термического расширения  $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . В процессе создания в них возникают различного рода дефекты атомного размера, такие как недостаток или избыток ионов кислорода в составе тетраэдров аморфной структуры двуокиси кремния, посторонние примеси, ненасыщенные связи на границе раздела двуокись кремния — кремний.

Рассмотренные выше несовершенства поверхности кремниевых подложек являются источниками более крупных дефектов в слое окисла, таких как поры или каналы и микротрещины. Дефекты на поверхности подложки и загрязнения могут стать центрами кристаллизации, на которых двуокись кремния растет в кристаллическом состоянии с решеткой типа кристобалита.

Одной из причин образования дефектов в двуокиси кремния являются механические напряжения, возникающие из-за несоответ-

ствия термических коэффициентов расширения кремния и двуокиси кремния. Учитывая особо важную роль изолирующих и пассивирующих слоев, используемых в виде технологических масок в процессе изготовления приборов и в качестве разделительных и пассивирующих защитных конструктивных элементов интегральных микросхем, рассмотрим динамику формирования диэлектрических слоев более подробно [23, 24].

Образование окисной пленки на поверхности кремниевой пластины происходит в результате взаимодействия влажного или сухого кислорода с кремнием при атмосферном или пониженном давлении. В первый момент взаимодействия образуются монокристаллические слои двуокиси кремния. Впоследствии окислитель диффундирует сквозь уже созданные слои двуокиси кремния, достигает поверхности пластины и только после этого вступает с кремнием в реакцию окисления. При этом образующаяся пленка  $\text{SiO}_2$  примерно в два раза превышает объем кремния, вступившего в реакцию окисления. В процессе окисления (рис. 6.10) поверхность взаимодействия кремний — двуокись кремния перемещается внутрь объема пластины, а внешняя поверхность пленки двуокиси кремния поднимается вверх. В процессе роста окисла все неровности поверхности пластины повторяются окисной пленкой, углубления и впадины на пластине заполняются двуокисью кремния и постепенно поверхность раздела кремний — двуокись кремния выравнивается, более гладкой становится и внешняя поверхность окисной пленки. Однако вместе с неровностями окисная пленка поглощает все дефекты, загрязнения и примеси, находившиеся на поверхности и в объеме пластины, участвующем в окислительном процессе.

Пленки двуокиси кремния, выращенные при атмосферном давлении, испытывают напряжение растяжения, которое сохраняется в диапазоне от комнатной температуры до  $+1000^\circ\text{C}$ , имея максимум при  $+700^\circ\text{C}$ . Пленки, полученные при пониженном давлении, при комнатной температуре испытывают напряжение сжатия, которое с нагревом после достижения температуры  $+1000^\circ\text{C}$  переходит в напряжение растяжения. Из-за действия напряжений сжатия или растяжения в окисле и прилегающем объеме кремния образуются многочисленные дислокации, еще больше способствующие образованию гранулированной структуры окисла. Дефекты, возникающие в окисной пленке при ее создании и дальнейшей эксплуатации, могут быть объединены в две основные группы:

- локализованные дефекты структуры и состава;
- химические и физические нелокализованные дефекты.

Рассмотрим специфику данных групп дефектов. К первой группе дефектов относятся: пустоты, пятна тонкого диэлектрика, частичные и сквозные поры, бугорки. Пустоты и поры получаются за счет образования и прорыва пузырьков газа через окисел (механизм образования сквозных дефектов будет рассмотрен ниже). Неровности топографического рисунка подложки также могут быть причиной дефектов в окисной пленке. В частности, на поверхности острых кромок подложки образуются пятна тонкого диэлектрика, на крутых ступеньках и в углах их основания возникают разрывы

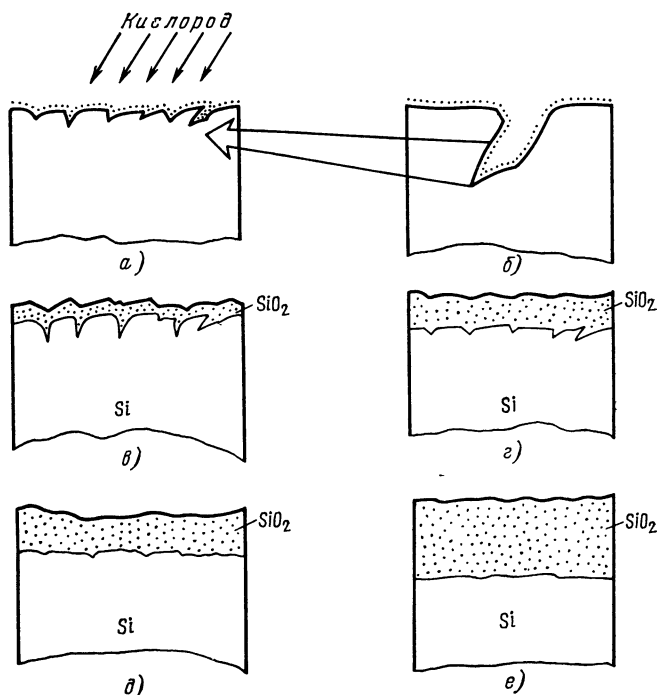


Рис. 6.10. Диаграмма роста окисной пленки на кремнии:

*а* — начальное состояние; *б* — углубление на поверхности кремния с осажденными загрязнениями; *в*, *г*, *д*, *е* — последовательность стадий наращивания окисной пленки с распространением ее вглубь и вверх с выравниванием поверхности

окисла, как правило, приводящие к коротким замыканиям в элементах интегральных микросхем.

Химические и физические нелокализованные дефекты заключаются в отклонении состава пленки от стехиометрического, неправильном соотношении компонентов, присутствии дополнительных компонентов в двойных или многокомпонентных материалах, загрязнении поверхности пленки, приводящем к появлению поверхностной проводимости.

Отклонение от стехиометрического состава вызывает появление аномальной толщины пленки, ухудшает адгезию, увеличивает механические напряжения в пленках, приводит к повышенной гигроскопичности. Уже это становится причиной изменения таких свойств, как коэффициент термического расширения, объемное и поверхностное сопротивление, диэлектрическая прочность и др. В частности, остаточные механические напряжения приводят к образованию трещин в диэлектрических пленках.

В связи с тем, что сквозные дефекты имеют наибольшую опасность, представляется целесообразным подробнее рассмотреть механизм их образования:

1. На поверхности кремниевой пластины после ее подготовки к окислению остаются 2...3 монослоя различных газов ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ), при высокотемпературном нанесении пленки концентрация газов может стать достаточной для образования пузырьков; диффузия отдельных пузырьков к поверхности растущей пленки приводит к образованию сквозных длинных пор.

2. Структурные несовершенства, в частности линейные дислокации, служат стоками атомов легирующей и неконтролируемых примесей, в первую очередь натрия, калия, меди. Вследствие того, что скорость диффузии по дислокациям на несколько порядков превышает скорость диффузии в ненарушенном объеме кристалла, концентрация атомов в примесном облаке на дефекте достигает величины, при которой давление паров будет достаточным для прорыва окисной пленки. Через образовавшуюся пору происходит испарение примесных атомов. Дислокация может переместиться в другое место, и вокруг нее возникнет новое примесное облако, приводящее к образованию еще одной поры. Этот процесс возможен при окислении или другой термической обработке. Чем выше концентрация легирующей и неконтролируемых примесей, тем выше плотность пор.

3. На несовершенствах поверхности пластины, в местах скопления фоновых примесей, таких как натрий, калий, кальций при термическом окислении образуются участки окисла в кристаллическом состоянии. В результате локальных напряжений на участках с кристаллической структурой образуются микротрещины, а по их периферии скопления пор размером 0,05...0,25 мкм.

4. Увеличению дефектности окисной пленки способствуют процессы фотолитографии. Степень дефектности зависит от состояния поверхности окисла, свойств фоторезиста, наличия микроотверстий в пленке фоторезиста. Микропоры в окисной пленке при фотолитографии возникают в результате травления через поры в фоторезисте, через неоднородные участки фоторезиста и т. д. Пористость окисной пленки за счет фотолитографии может увеличиваться в 10...15 раз.

5. Влияют на пористость пленки  $SiO_2$  и микроорганизмы, содержащиеся в деионизированной воде (табл. 6.3).

В ряде случаев микропоры в диэлектрической защитной пленке образуются по периметру металлизации из-за тонкого слоя фоторезиста на краю шин, что приводит к образованию пор при последующих операциях с фоторезистом и травлении окисла.

Не меньше неприятностей при изготовлении интегральных микросхем и их эксплуатации доставляют кристаллические дефекты в окисных пленках. Стимулируют процесс кристаллизации аморфной пленки примеси, снижающие температуру кристаллизации кварца. Это примеси металлов и их окислы, влага, точечные центры кристаллизации.

Т а б л и ц а 6.3

Концентрация микрофлоры, особей/л	Пористость, пор/см <sup>2</sup>	Концентрация микрофлоры, особей/л	Пористость, пор/см <sup>2</sup>
$1 \cdot 10^2$	0,6	$9 \cdot 10^7$	18,0
$9 \cdot 10^3$	4,9	$9 \cdot 10^9$	18,5
$9 \cdot 10^5$	12,7		

Если кремний окисляется при  $T \approx 900 \dots 1200^\circ \text{C}$  и быстро охлаждается ( $600^\circ \text{C}/\text{мин}$ ), то  $\text{SiO}_2$  кристаллизуется в  $\beta$ -кristобалит, а при медленном охлаждении ( $20^\circ \text{C}/\text{мин}$ ) в  $\alpha$ -кristобалит. Это связано с тем, что при  $T \approx 200 \dots 270^\circ \text{C}$  происходит переход  $\beta$ -структуры в  $\alpha$  (при быстром охлаждении такой переход не успевает произойти). При этом сокращается объем кристаллизовавшихся пятен примерно на 2...5%, что приводит к растрескиванию участка кристаллизации.

Аморфные пленки  $\text{SiO}_2$  со временем подвержены расстекловыванию. Этот процесс идет преимущественно в окнах в окисле, в зонах скрайбирования, вдоль царапин на пластине, т. е. рост дефектов начинается от поверхности пластины. Размеры кристаллизованных участков расстеклованного окисла около 1,0...1,5 мкм. Эти участки в аморфном  $\text{SiO}_2$  окружены областью напряжений, размеры которой превышают размеры кристаллитов в 6...7 раз.

Кристаллизация приводит к более низким скоростям травления закристаллизовавшихся участков по сравнению с аморфным окислом, что способствует неполному удалению окисла в местах травления, кроме того, в районе расстеклованных участков возникают механические напряжения, приводящие к растрескиванию маскирующего  $\text{SiO}_2$  и к возникновению дополнительных дислокаций в примыкающих участках кремния. Большое содержание расстеклованных участков в  $\text{SiO}_2$  приводит к снижению пробивного напряжения диэлектрической пленки.

В ряде случаев в местах укола, удара, примесного загрязнения или локального нагрева возникает ускоренная кристаллизация, получившая название взрывной или ударной. Для кристаллизации обычного типа свойственна огранная форма отдельных кристаллов. В случае же ударной кристаллизации образуются кристаллы кольцевой формы, располагающиеся в виде концентрических окружностей вокруг центра кристаллизации.

В заключение этого параграфа необходимо указать на процесс перераспределения примеси в кремнии при образовании окисной пленки. При термическом окислении в кремнии вблизи поверхности раздела с окисной пленкой образуется либо обедненный, либо обогащенный примесью слой благодаря уходу части примеси в образующийся окисел, или наоборот, благодаря накоплению примеси в приповерхностном слое кремния. Обоеднение или насыщение приповерхностного слоя кремния определяется коэффициентом сегрегации примеси в кремнии и окисле. При коэффициенте сегрегации  $K < 1$  приповерхностная область кремния обедняется примесью, а при  $K > 1$  — обогащается. Из-за перераспределения примеси у поверхности кремниевой пластины с окисной пленкой может образоваться слой с типом проводимости, противоположным типу проводимости исходного кремния. Так, если легирующими примесями являются бор с  $K < 1$  и фосфор с коэффициентом  $K > 1$  и исходный кремний имеет проводимость  $p$ -типа, то при окислении приповерхностная область обогащается фосфором и обедняется бором, что может вызвать образование



инверсного слоя *n*-типа, называемого приповерхностным каналом. Наличие таких областей искажает взаимодействие активных структур полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, способствует росту токов утечки, а в ряде случаев приводит к закорачиванию *p-n* переходов.

## 6.7. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

С помощью процесса фотолитографии в планарной технологии создается геометрия планарного прибора, формируются его активные области, контакты, соединения. Операции фотолитографии при изготовлении приборов многократно повторяются, в связи с чем из-за несовершенств, присущих фотолитографическому процессу, вероятность внесения дефектов в приборы, изготавливаемые с его использованием, очень велика. Исследования видов брака приборов, изготавливаемых по планарной технологии, показывают, что 80% и более дефектных структур на пластине получаются из-за несовершенства процесса фотолитографии и в первую очередь из-за дефектов фотошаблонов.

Наиболее распространенными дефектами фотошаблонов являются проколы и царапины на непрозрачных участках и островки эмульсии или металла на прозрачных. Широкое распространение в технологическом процессе получили металлизированные фотошаблоны, обладающие стойкостью к износу на 2...3 порядка большей, чем эмульсионные. Однако они имеют более высокую плотность дефектов, допустимые пределы которых в настоящее время лежат в диапазоне 0,01...0,1 см<sup>-2</sup>.

Для локальной защиты поверхности пластин при фотолитографии применяются специальные фоторезисты, в тонких слоях которых из-за химического несовершенства и механических включений имеются области с повышенной скоростью растворения, что при последующей обработке приводит к возникновению дефектов и проколов в слое фоторезиста. Механизм образования дефектов в фоторезисте показан на рис. 6.11.

Суть его заключается в том, что через сквозные проколы в фотошаблоне при экспонировании засвечиваются локальные области в фоторезисте, нанесенном на пластину. Одновременно из-за наличия островков металлизации или эмульсии на прозрачной части фотошаблона затеняются локальные области фоторезиста. При последующих операциях задубливания и растворения незакрепленных участков фоторезиста в рисунке, оставшемся на подложке, образуются сквозные проколы в местах, подвергнутых засветке через прокол в фотошаблоне, и островки задубленного фоторезиста в местах, затененных островками эмульсии на прозрачной части фотошаблона. Сквозные и несквозные проколы в фоторезисте могут образоваться и за счет удаления включений и повышенной скорости растворения несовершенств, имеющих в фоторезисте.

Наличие дефектов в слое фоторезиста приводит к возникновению дефектов в слое двуокиси кремния, при травлении последней для создания окон, используемых при формировании активных

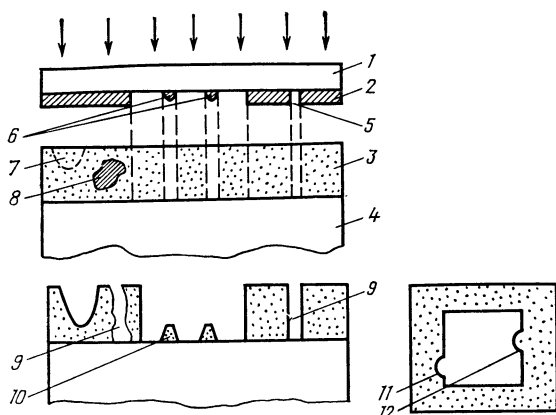


Рис. 6.11. Механизм образования дефектов в фоторезисторе:

1 — стеклянная подложка шаблона; 2 — металлизация; 3 — фоторезист; 4 — подложка; 5 — прокол в металлизации; 6 — островки металлизации на прозрачной части шаблона; 7, 8 — несовершенства и механические включения в фоторезисте; 9 — прокол в фоторезисте; 10 — островки фоторезиста; 11 — вырыв в фоторезисте; 12 — выступ в фоторезисте

областей полупроводниковых приборов и металлических контактов к ним. Дефекты в фоторезисте в виде проколов, островков фоторезиста, вырывов и выступов в том же виде повторяются в слое окисла.

Наряду с рассмотренными выше дефектами фотолитографии часто возникает дефект, называемый клином травления окисного слоя.

Клин в окисном слое образуется при создании окон в двуокиси кремния посредством химического травления через окна в фоторезисте. Этот дефект (рис. 6.12) возникает на границе между слоем фоторезиста и слоем окисла из-за бокового подтравливания двуокиси кремния по микротрещинам в фоторезисте и из-за отслаивания фоторезиста по границам окна. При негативном фоторезисте размер клина  $K$  достигает 1 ... 2 мкм при толщине окисного слоя 0,7 ... 0,8 мкм. При позитивном фоторезисте размер клина меньше и достигает 0,3 ... 0,4 мкм при той же толщине двуокиси кремния. Этот вид дефекта в дальнейшем влияет на качество диффузионного процесса.

В ряде случаев на качество процессов фотолитографии влияют неровности пленки фоторезиста. Основными факторами, обуславливающими этот вид дефекта, могут быть чрезмерная густота фоторезиста, низкая скорость вращения центрифуги, с помощью которой наносится фоторезист, отклонение поверхности столика центрифуги от горизонтальной плоскости. Неровности пленки фо-

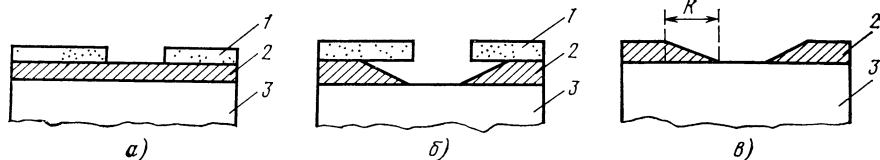


Рис. 6.12. Схема образования клина в окисной пленке:

а — структура до травления; б — травление двуокиси кремния и образование клина; в — структура после удаления фоторезиста;  $K$  — размер клина; 1 — фоторезист; 2 — слой двуокиси кремния; 3 — подложка

торезиста приводят к некачественному выполнению контактной печати при экспонировании и искажению рисунка в фоторезисте при последующей обработке.

В случаях, когда неоптимально подобраны режимы экспозиции и проявления, возникают дефекты в виде неровностей края изображения фоторезиста. Мельчайшие неровности края в виде периодических выступов и впадин могут появляться также из-за наличия в фоторезисте субполимерных частиц размером 0,3... 0,5 мкм. Более крупные дефекты в виде выступов и вырывов образуются из-за некачественных фотошаблонов (рис. 6.11). Наиболее часто этот вид дефектов возникает при использовании металлизированных фотошаблонов, имеющих зубчатые края элементов изображения.

В связи с рассеянием света, проходящего через фотошаблон при экспонировании, возникает размытие по краю изображения, вследствие чего после проявления образуется ореол, который приводит к искажению геометрических размеров элементов интегральных микросхем и полупроводниковых приборов.

#### **6.8. ДЕФЕКТЫ В ПРИБОРАХ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ (ДИФФУЗИЯ, ИМПЛАНТАЦИЯ)**

Посредством диффузии и имплантации в планарных полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах создаются активные области необходимой конфигурации. Геометрические размеры этих областей определяют, в частности, электрические свойства полупроводниковых структур, поэтому рассмотренные выше дефекты в слое окисла при проведении процессов фотолитографии становятся причинами искажения конфигурации структур, что в конечном счете приводит к ухудшению электрических параметров.

Так, микроканалы и проколы в окисле становятся причиной образования непредусмотренных топологией локальных легированных областей в полупроводниковой пластине (рис. 6.13,а). Островки окисла на поверхности кремния в окнах, вытравленных в окисле, искажают профили легированных областей при диффузии (рис. 6.13,б). Неровности края окисла, в том числе выступы и вырывы, приводят к искажению боковых вертикальных границ легированных областей, а при проведении диффузии примеси клин на профиле окна в окисле приводит к увеличению геометрических размеров легированной области из-за повышенной проницаемости участка окисла в месте расположения клина (рис. 6.13,в).

Известно, что элементы III и V группы образуют в кремнии твердые растворы замещения и диффундируют на основе вакансионного механизма, располагаясь в узлах решетки. Другие элементы (I, II, VI, VII, VIII группы) образуют твердые растворы внедрения и занимают места в междоузлиях. Дефекты типа фоновых примесей в исходной пластине кремния или эпитаксиальном слое вызывают локальные деформации кристаллической решетки, уменьшая энергию связи атомов между собой, что увели-

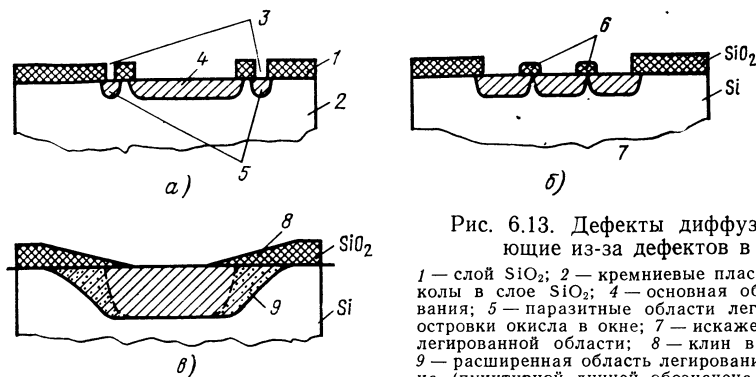


Рис. 6.13. Дефекты диффузии, возникающие из-за дефектов в окисле:

1 — слой  $\text{SiO}_2$ ; 2 — кремниевые пластины; 3 — проколы в слое  $\text{SiO}_2$ ; 4 — основная область легирования; 5 — паразитные области легирования; 6 — островки окисла в окне; 7 — искаженный профиль легированной области; 8 — клин в окне окисла; 9 — расширенная область легирования за счет клина (пунктирной линией обозначена область легирования при отсутствии клина)

чивает вероятность образования вакансий. Это приводит к увеличению скорости диффузии основной легирующей примеси в местах скопления неконтролируемых примесей. Такими скоплениями, как было показано выше, являются свирлевые дефекты и кластеры.

Дислокации также способствуют ускорению диффузии в местах их расположения. Таким образом, неконтролируемые примеси и дислокации способствуют искажению профиля легированных областей и соответственно ухудшению электрических характеристик полупроводниковых структур.

Атомы таких металлов, как Cu, Au, Fe имеют высокую растворимость и подвижность в кремнии при повышенных температурах. Диффундируя по дислокациям, проходящим через легированные области, эти металлы конденсируются на них при охлаждении полупроводниковой структуры. При этом в областях  $p$ - $n$  переходов могут образоваться проводящие металлические каналы, что приводит к возрастанию обратных токов и искажению обратной ветви вольт-амперной характеристики.

Диффузия примеси при высокой поверхностной концентрации приводит к значительным искажениям кристаллической решетки и образованию внутренних напряжений. Например, атомы бора, имея большие, чем у кремния атомные радиусы за счет сжатия решетки кремния, создают напряжения порядка  $6 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$ , достаточные для пластической деформации и генерации дислокаций. Таким образом, к дефектам типа дислокаций в исходной пластине кремния и эпитаксиальной структуре добавляются дислокации, возникающие в процессе диффузии. В частности, о размножении дислокаций свидетельствует эффект вытеснения или прогиба коллекторного  $p$ - $n$  перехода под эмиттером в  $n$ - $p$ - $n$ -структуре (рис. 6.14). Предполагается, что во время диффузии для образования эмиттерной области генерируется большое количество дислокаций, движущихся перед фронтом диффузии, создавая повышенную концентрацию вакансий. Последние способствуют возникновению ускоренной направленной диффузии примеси в базовую область

под коллектором, вследствие чего искажается профиль коллекторного  $p$ - $n$  перехода. Эффект эмиттерного вытеснения приводит к снижению напряжения пробоя коллекторного  $p$ - $n$  перехода.

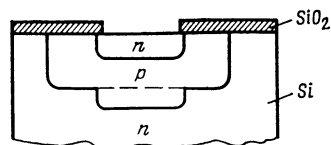


Рис. 6.14. Эффект эмиттерного вытеснения и образования области прогиба коллектора

Под *ионной имплантацией* понимают использование управляемых электрическими и магнитными полями направленных потоков заряженных атомных частиц с энергиями от нескольких килоэлектрон-вольт до нескольких мегаэлектрон-вольт, бомбардирующих твердое тело для изменения его структурных, электрофизических и физико-химических свойств [18]. Метод ионной имплантации является основным в планарной технологии, сочетающей загонку примеси в виде дозированного количества ионов и диффузионную разгонку. Совмещение ионной имплантации с планарной технологией облегчается применением тех же легирующих примесей и веществ для их получения, что и при диффузии, тех же процессов маскирования и фотолитографии. Основные преимущества ионной имплантации состоят в точном контроле полного количества внедренной примеси и высокой однородности легирования по поверхности пластины.

Процесс ионного легирования сопровождается образованием в полупроводниковом кристалле радиационных дефектов, подобных рассмотренным в гл. 5. По мере имплантации ионов примеси в полупроводниковую пластину в ней идет накопление радиационных дефектов. Когда плотность ионов, внедренных на единицу поверхности, превосходит критическую, называемую дозой аморфизации, на поверхности пластины образуется сплошной аморфный слой. При облучении фосфором аморфные зоны в кремнии появляются при дозе  $7,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Аморфные зоны не образуются, если облучение ведется при низких температурах, когда миграция точечных дефектов незначительна. Критическая концентрация вакансий, которую надо накопить в кластере, чтобы он стал аморфным, составляет  $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Экспериментально установлено, что аморфизация кристалла полупроводника наступает при условии, если нарушается хотя бы одна тетраэдрическая связь у 40% атомов решетки.

При облучении кремния ионами бора или фосфора с дозами выше  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  соответственно количество аморфных областей в кристалле уменьшается, происходит восстановление кристаллической структуры полупроводника с образованием поликристалла. Это явление связано с заполнением примесными атомами кластеров, образовавшихся в полупроводнике при имплантации ионов примеси. Дальнейшая ионная бомбардировка сообщает образовавшимся дефектам энергию, необходимую для перестройки и распада, в результате чего аморфная фаза кристаллизуется при температуре имплантации.

Для восстановления кристаллической решетки полупроводника, нарушенной при ионной имплантации, пластины с образованными в них структурами подвергаются отжигу, в процессе которого вместе с восстановлением кристаллической решетки происходит электрическая активация внедренной примеси, так как нагрев пластины способствует переходу внедренных атомов в узловые положения, где они проявляют донорные или акцепторные свойства. Об электрической ак-

тивности легирующей примеси, внедренной в полупроводник, судят по величине поверхностной концентрации носителей заряда. В хорошо отожженных кристаллах поверхностная концентрация носителей заряда должна быть близка к концентрации внедренной примеси. Поэтому очень важно выбрать оптимальный режим отжига, чтобы обеспечить максимальную активацию примеси и избежать так называемого отрицательного отжига, характерного для слоев кремния, легированных бором.

Этот эффект связан с уходом атомов бора из узлов кристаллической решетки при нагреве. Явление имеет двойную природу: распад твердого раствора бора в кремнии, сопровождающийся осаждением бора на дислокациях и вытеснение бора из узлов кристаллической решетки атомами кремния, появляющимися в междоузлиях в результате распада сложных дефектов.

## 6.9. МЕТАЛЛИЗАЦИЯ И КОНТАКТЫ

Металлизация в планарных приборах предназначена для создания невыпрямляющего, с низким переходным сопротивлением контакта к активным областям полупроводниковой структуры, осуществления межэлементных соединений интегральной микросхемы на кристалле и образования поверхностных контактных площадок для присоединения внутренних выводов. Наряду с определенными электрическими свойствами контакты и металлизация должны быть механически прочными и стабильными в течение всего жизненного цикла прибора в широком диапазоне изменений внешних воздействий. Наибольшее распространение в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем получил алюминий из-за высокой теплопроводности, низкого удельного сопротивления, высокой пластичности и достаточно хорошей адгезии к кремнию и двуокиси кремния.

К дефектам металлизации относятся *разнотолщинность* и *поперечные царапины*, способные привести к повышению плотности тока в наиболее тонких дорожках разводки, локальному перегреву и росту вероятности разрыва металлизации. Загрязнения на поверхности пластины ухудшают адгезию металлической пленки, что может привести к *отслаиванию металлизации* и *обрывам металлических дорожек* при механических нагрузках.

Особо опасным местом в полупроводниковой структуре является металлизация на ступеньках окисла (рис. 6.15). При напылении вследствие резкого изменения ориентации центров кристаллизации металлическая пленка на ступеньках осаждается неравномерно [25]. В зависимости от соотношения ширины окна, высоты ступеньки и угла, под которым поток напыляемого материала направляется к поверхности подложки, толщина стенки составляет от 15 до 35% от толщины плоской части металлизации. Из-за дефекта затенения в

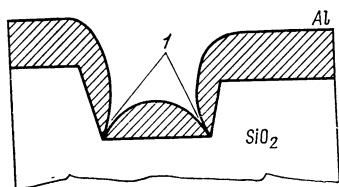


Рис. 6.15. Металлизация на ступеньке окисла:

1 — места концентрации напряжений и образования микротрещин

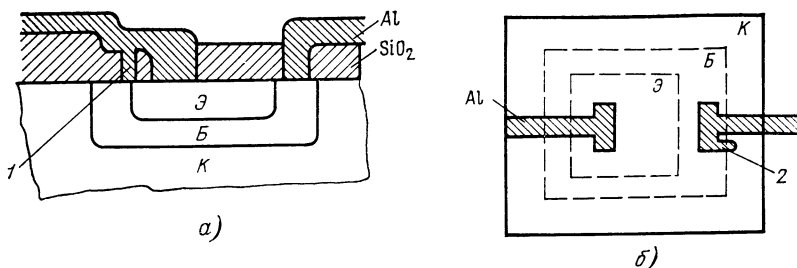


Рис. 6.16. Дефекты металлизации из-за дефектов окисла и вызванные ими отказы:

Э — эмиттер; Б — база; К — коллектор;

1 — прокол; 2 — вырыв;

**а** — короткое замыкание между эмиттером и базой в результате прокола в слое  $\text{SiO}_2$ ; **б** — короткое замыкание между базой и коллектором из-за вырыва в слое  $\text{SiO}_2$

углах ступеньки образуются места с более тонким покрытием, имеющие повышенный уровень механических напряжений, в результате действия которых в них могут образовываться *микротрещины*. При последующей эксплуатации микротрещины, постепенно разрастаясь и объединяясь, приводят к *обрывам металлизации*.

Дефекты в окисле в виде микротрещин, проколов, неровностей края окисла, таких как вырывы, при осаждении металлических пленок на его поверхности могут приводить к коротким замыканиям активных областей в полупроводниковом кристалле и к закорачиванию проводников при многослойной металлизации (рис. 6.16). В случае несквозных трещин и проколов в слое окисла дефекты металлизации проявляются при последующей эксплуатации приборов в аппаратуре.

## 6.10. РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ

Разделение полупроводниковой пластины на кристаллы осуществляется после того, как на ней с применением рассмотренных выше процессов полностью сформированы и проверены структуры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Существует несколько методов разделения пластин на кристаллы. Наибольшее распространение получили скрайбирование алмазным резцом, лазерное скрайбирование и глубокое надрезание алмазными кругами.

*При скрайбировании алмазным резцом* на поверхности пластины в двух взаимно перпендикулярных направлениях наносится сетка параллельных царапин глубиной до 10 мкм, по которым впоследствии при прокатывании между резиновыми валиками она разделяется на кристаллы.

*При лазерном скрайбировании* линии разлома образуются в результате испарения кремния в местах локального разогрева лазерным лучом поверхности пластины.

*При разделении алмазными кругами* происходит глубокое надрезание пластин по линиям деления с глубиной реза до 50 мкм.

Таблица 6.4

Метод разделения	Скорость реза, мм/с	Характеристика реза, мкм			
		Глубина	Ширина	Ширина зоны сколов	Ширина зоны на- рушения структуры и напря- жений
Алмазное скрайбирование	60	5...15	10...15	40...50	250...300
Лазерное скрайбирование	100	40	15...20	—	150
Надрезание алмазными дисками	70	50	30	40...50	80...100

При всех вышеперечисленных способах разделения пластина в местах обработки инструментом подвергается механическим воздействиям, приводящим к деформации и разрушению полупроводникового материала в местах надреза и прилегающих областях. В результате скрайбирования по периметру кристалла образуются сколы, микротрещины и зоны деформации.

Некоторые характеристики реза приведены в табл. 6.4.

Из таблицы следует, что наименее с точки зрения образования дефектов, является метод алмазного скрайбирования, при котором образуются большие зоны сколов, разрушений структуры и напряжений в объеме полупроводника. При лазерном скрайбировании зона сколов не образуется, однако поверхность пластины может быть загрязнена продуктами испарения материалов, образующихся при разделении. Нарушения в исходном материале по периметру кристалла приводят к отслаиванию окисла и металлизации и увеличению плотности дислокаций в пограничных областях, что может вызвать частичное ухудшение характеристик активных областей кристалла или полный выход их из строя.

### 6.11. СБОРКА ПРИБОРОВ И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ

Процесс сборки предусматривает посадку кристалла полупроводника на кристаллодержатель и присоединение внутренних выводов к контактным площадкам на полупроводниковой структуре и внешним выводам. Посадка кристалла на кристаллодержатель должна обеспечить надежный механический, электрический и тепловой контакт с основанием корпуса. Наибольшее распространение в настоящее время получило присоединение кристалла к кристаллодержателю посредством эвтектического сплавления через специальные прокладки. Весьма перспективна также посадка на специальный электропроводящий или непроводящий клей.

Основными дефектами, возникающими при посадке кристалла на кристаллодержатель, являются неполное контактирование поверхностей кристалла и основания корпуса и механические напряжения, возникающие в кристалле из-за несоответствия термических коэффициентов расширения материала корпуса и полупроводника. Неполное контактирование снижает механическую проч-



ность прибора и ухудшает условия отвода тепла вследствие увеличения теплового сопротивления в месте соединения кристалла с основанием корпуса. Напряжения в приконтактной области кристалла приводят к образованию в ней микротрещин, которые со временем могут привести к отказу прибора.

Наибольшее распространение в технологии производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в настоящее время имеют внутренние выводы из золотой или алюминиевой проволоки толщиной от 20 до 50 мкм. Присоединение проволоки к контактными площадкам производится термокомпрессией и ультразвуковой сваркой.

Дефектами межэлементных соединений являются *непрочность приварки выводов* к контактными площадкам на кристалле и к внешним выводам, *разнотолщинность проволочных выводов*, что может способствовать локальному перегреву вывода в местах с меньшей площадью сечения. Дефектом также может быть *неправильный выбор натяжения вывода*. В случае чрезмерного натяжения возможен обрыв вывода при повышении температуры конструктивных элементов прибора. При монтаже выводов со значительным провисанием возможны кратковременные замыкания соседних проводников при воздействии вибрации и ударных нагрузок.

Герметизация является заключительной сборочной операцией и предназначена для изоляции полупроводниковой структуры от воздействий внешней среды. Широкое распространение в настоящее время получили методы герметизации в металlostеклянные, металлокерамические, стеклянные и пластмассовые корпуса. Основным дефектом герметизации является негерметичность корпусов, которая зависит в первую очередь от *влагопроницаемости* материалов, применяемых для их изготовления [26].

В частности, получившие широкое распространение эпоксидная, фенольная и силиконовая пластмассы сами по себе не дают полной изоляции внутренней полости прибора от проникновения влаги извне.

Молекулы воды при температуре  $+60^{\circ}\text{C}$  имеют коэффициент диффузии в пластмассе порядка  $10^{-7}\text{ см}^2/\text{с}$ . При толщине пластмассовой оболочки в один миллиметр относительная влажность на защищенной такой оболочкой поверхности достигнет 70% через 100 ч пребывания в среде с относительной влажностью 95%. Другой причиной негерметичности является *проницаемость швов и спаев* различных деталей металlostеклянных и металлокерамических корпусов и мест ввода в них внешних выводов.

Течи в корпусах измеряются в миллиметрах ртутного столба, литр в секунду (мм. рт. ст.·л/с). Если течь составляет 1 мм рт. ст.·л/с., то в объеме, равном одному литру, откачанном до высокого вакуума, давление в течение 1 с возрастает на 1 мм рт. ст. По интенсивности натекания течи принято делить на малые, средние и большие. Размеры течей, соответствующих принятому делению, представлены в табл. 6.5.

Т а б л и ц а 6.5

Вид течи	Размер течи, мм рт. ст./с	Диаметр микроотверстия при длине 1 мм, мкм
Малая	$10^{-15} \dots 10^{-9}$	0,1
Средняя	$10^{-9} \dots 10^{-5}$	1
Большая	$10^{-5} \dots 10^{-3}$	100

Недавно проведенные исследования [27] показали, что значительное количество влаги в герметичный корпус поступает вместе с исходными деталями в результате ее адсорбции на их поверхности и абсорбции в объеме клеевого или защитного полимерного материала. Предварительный прогрев исходных деталей перед герметизацией существенно снижает содержание влаги в объеме герметизированного корпуса.

Другими дефектами, возникающими при герметизации в пластмассу, являются микротрещины в конструкционных деталях корпусов и во внутренних выводах, которые могут появиться в них из-за усадочных явлений при полимеризации пластмассы. Механические напряжения, возникающие при этом, могут привести к обрывам внутренних выводов и повреждению приборов.

## ГЛАВА 7

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ АППАРАТУРЫ

#### 7.1. ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРИБОРОВ

До поступления в составе аппаратуры потребителю полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы подвергаются воздействию специфических факторов, связанных с технологическим процессом изготовления аппаратуры. Первой операцией, с которой начинается это воздействие, является входной контроль приборов у потребителя перед поступлением их на сборку аппаратуры. Отечественный и зарубежный опыт изготовления аппаратуры самого разнообразного назначения показал, что несмотря на большое количество контрольных процедур при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, входной контроль приборов у изготовителя аппаратуры необходим, так как он позволяет осуществить проверку пригодности приборов для последующего использования в аппаратуре и исключить из дальнейшего технологического цикла приборы, не соответствующие

техническим требованиям. Необходимость входного контроля диктуется и экономическими соображениями. Так, если принять стоимость входного контроля одного прибора за единицу, то стоимость замены неисправного прибора в печатной плате возрастает в 5 ... 10 раз, в аппаратуре при ее испытании в 100 раз и в аппаратуре, эксплуатируемой у потребителя, более чем в 1000 раз [28]. Кроме того, входной контроль позволяет значительно повысить оперативность связи между изготовителем приборов и потребителем, так как он является первым источником информации о качестве и надежности приборов в сфере эксплуатации. Придавая особую важность входному контролю, отечественные аппаратные заводы и зарубежные фирмы создают специальные цепи и центры входного контроля всех поступающих в производство аппаратуры комплектующих изделий и в первую очередь полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Будучи первым барьером, позволяющим не допускать для дальнейшего использования приборы, не соответствующие техническим требованиям, входной контроль при неправильной его организации может явиться и источником скрытых повреждений приборов. Поэтому главное и первостепенное требование к входному контролю — это обеспечение безопасного прохождения через него приборов, что достигается путем тщательной отработки методик входного контроля, основанных главным образом на неразрушающих методах проверки электрических и конструктивных параметров приборов.

Для осуществления контроля применяется аттестованное измерительное и испытательное оборудование. Персонал, допущенный к его обслуживанию, должен иметь высокую квалификацию. Наибольший эффект дает автоматизация контроля, позволяющая исключить из процедуры контроля оператора и тем самым исключить из этого процесса такие субъективные факторы, как утомляемость, невнимательность, отступления от последовательности контроля по вине оператора. Автоматизация процесса контроля позволяет одновременно вести обработку результатов и осуществлять хранение всего массива информации в памяти вычислительной машины.

Входной контроль должен быть объективным и достоверным. Объективность и достоверность нужны в одинаковой степени и изготовителю аппаратуры и изготовителю приборов. Объективность достигается применением при проведении входного контроля методик и контрольной аппаратуры идентичных применяемым изготовителем приборов. Достоверность обеспечивается тщательностью соблюдения процедуры контроля и недопущением смешивания приборов разных партий и сроков изготовления. Это особенно важно для выяснения истинных причин возникновения производственного брака, так как технологический процесс изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем носит групповой характер, при котором партия приборов подвергается обработке в одинаковых условиях. Поэтому исключительно важно проследить дальнейшее поведение приборов, содержащихся именно в данной партии, так как условия ее изготовления известны и при обнаружении на входном контроле у потребителя некачественных приборов легче установить, какие отклонения в технологическом процессе привели к этому.

В ряде случаев входной контроль приборов совмещают с тренировкой под электрическими и тепловыми нагрузками. Введение тренировок объясняется стремлением исключить из поступившей потребителю партии приборов потенциально ненадежные, со скрытыми дефектами, не обнаруживаемыми доступными методами контроля. В большинстве случаев тренировку проводят в режимах, идентичных реальным режимам эксплуатации приборов в аппаратуре. Иногда электрический режим совмещают с воздействием повышенных температур, чтобы ускорить процесс деградации дефектных приборов.

Кроме тепловых воздействий применяют и другие ускоряющие факторы, такие как облучение небольшими дозами электронного и гамма-излучения. Возникающие при этом ионизационные эффекты [29] ускоряют образование инверсионных слоев при наличии загрязнений на поверхности, вызывают увеличение токов утечки, возрастание шумов и снижение усилительных свойств приборов, имеющих скрытые дефекты. Привлекательной стороной таких воздействий являются минимальные временные затраты. Вместе с тем следует специально подчеркнуть, что выбор тренировочных режимов должен предваряться глубокими и комплексными исследованиями, дающими возможность достаточно аргументированно полагать, что избранные режимы тренировок не вносят дополнительных дефектов в структуру прибора и не ведут к расходованию его ресурса.

В зависимости от результатов контроля однотипных приборов за длительный период входной контроль может быть выборочным и сплошным. При выборочном контроле формируется случайная выборка по методологии, действующей у изготовителя приборов.

Взаимодействие между изготовителем приборов и потребителем в процессе входного контроля регламентируется и регулируется предъявлением рекламаций и возвращением изготовителю приборов, не соответствующих техническим условиям. Изготовитель вправе перепроверить зарекламированные приборы и установить истинные причины их несоответствия требованиям нормативно-технической документации. По результатам анализа составляются и реализуются мероприятия по совершенствованию технологического процесса. О их содержании и внедрении потребитель приборов ставится в известность.

Сведения о рекламациях в результате входного контроля у потребителя представляют исключительную ценность для изготовителя приборов, так как уровень рекламаций является довольно чувствительным измерителем стабильности процессов изготовления приборов и их качества. Дело в том, что наличие определенной доли потенциально ненадежных приборов со скрытыми дефектами в составе поставляемой потребителю партии является неизбежным. Это связано с тем, что предприятие-изготовитель ведет выборочный контроль на основе соответствующих планов контроля. Построение этих планов основывается на допущении наличия в партии готовых приборов определенной доли дефектов, соответствующей минимальному уровню надежности, согласованному с потребителем. В силу того, что доля дефектных приборов жестко связана с уровнем надежности, количество зарекламированных

приборов на входном контроле и является дополнительным измерителем стабильности технологического процесса изготовления приборов. Колебание уровня рекламаций свидетельствует о нестабильности технологического процесса у изготовителя приборов и несовершенстве его выходного контроля. Нормальной тенденцией уровня рекламации на входном контроле является его постоянное снижение.

## **7.2. ПОДГОТОВКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ К МОНТАЖУ В АППАРАТУРЕ И ОСОБЕННОСТИ МОНТАЖА**

подавляющее большинство современной аппаратуры имеет блочную конструкцию. Основные узлы аппаратуры выполняются в виде двусторонних или многослойных печатных плат, монтируемых с помощью многоконтактных разъемов и плоских кабелей на одной несущей плате, выполняющей одновременно роль схемы соединений.

Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы вместе с другими активными и пассивными элементами монтируются на печатной плате, как правило, с использованием сквозных металлизированных отверстий, имеющих электрический контакт как с проводниками, нанесенными на поверхностях двусторонней печатной платы, так и с промежуточными проводящими слоями, лежащими внутри многослойной печатной платы.

Широкое распространение в настоящее время получили автоматизированные методы монтажа приборов на печатной плате. Организация сборки может основываться на двух методах. В первом для монтажа используются специальные катушки, на которых намотаны однотипные приборы, вклеенные в бумажную ленту. Интегральные микросхемы с двухрядным расположением выводов в этом случае помещаются в специальные пеналы. При использовании второго метода полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы после предварительной сортировки на группы вместе со всеми остальными навесными элементами помещаются в специальные кассеты в порядке очередности сборки. И в том и в другом случае перед монтажом в печатную плату специальным инструментом, имеющимся в автомате сборки, производится обрубка и формовка выводов приборов.

Формирующий инструмент, применяемый для этой цели, должен быть сконструирован таким образом, чтобы при изгибе выводов не подвергалось деформации место спая вывода со стеклянным изолятором корпуса и тем самым не нарушалась его герметичность. Крепление приборов на печатной плате осуществляется вставлением выводов приборов в металлизированные отверстия с последующей групповой пайкой оловянным припоем при температуре около  $260^{\circ}\text{C}$ . Автоматическая набивка печатных плат выдвигает повышенные требования к качеству рихтовки и формовки выводов и точности изготовления печатных плат. При несовпадении

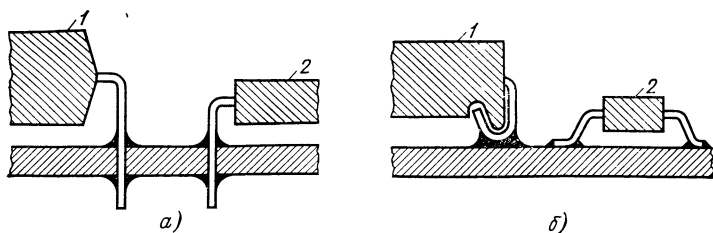


Рис. 7.1. Методы монтажа элементов на печатную плату:

*а* — монтаж на плату с помощью металлизированных отверстий; *б* — поверхностный монтаж на печатную плату; 1 — интегральная микросхема; 2 — резистор

отверстий на печатной плате с расположением и конфигурацией выводов прибора возможно его повреждение при монтаже.

Дальнейшая миниатюризация аппаратуры вызвала к жизни новый метод монтажа, при котором полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы и другие компоненты крепятся к покрытым припоем контактными площадкам, расположенным на поверхности печатных плат [30]. Новый метод монтажа обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с широко применяемыми в настоящее время методами (рис. 7.1). В первую очередь следует указать на существенный выигрыш в надежности. При действующих методах монтажа большой проблемой является надежность контакта металлизированных отверстий с контактными площадками на поверхности печатных плат и с металлической разводкой промежуточных слоев.

Много забот доставляет непропай или «холодные пайки» выводов в металлизированных отверстиях. При поверхностном монтаже эта проблема отсутствует. Кроме того, поверхностный монтаж позволяет значительно увеличить плотность расположения компонентов на плате как за счет применения компонентов в «чиповом» исполнении в микрокорпусах, так и за счет двустороннего монтажа. При поверхностном монтаже практически отсутствует возможность повреждения приборов, так как корпуса приборов, поступающих на поверхностный монтаж, имеют конструкцию выводов, не требующую предварительной формовки. Поверхностный монтаж способствует улучшению частотных характеристик и повышению быстродействия аппаратуры. За счет уменьшения длины выводов и межэлементных соединений уменьшаются паразитные емкости и индуктивности монтажа, что в свою очередь приводит к увеличению быстродействия схем и повышению их помехоустойчивости.

### 7.3. РАСПОЛОЖЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В БЛОКАХ АППАРАТУРЫ

Рациональное размещение полупроводниковых приборов и интегральных микросхем имеет большое значение в обеспечении их устойчивой работы в аппаратуре. Температурная зависимость

электрических параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем общеизвестна. Для обеспечения стабильной работы аппаратуры разработчики схем предусматривают соответствующую компенсацию ухода параметров приборов при повышении температуры. Однако, если разместить приборы вблизи силовых блоков с интенсивным тепловыделением, все усилия разработчиков по компенсации температурного ухода параметров будут напрасными. Большое значение для устойчивости работы схем имеет стабилизация питания. Наряду со специальными схемотехническими решениями стабилизация может быть существенно повышена за счет выполнения шин питания и земли с минимальным сопротивлением. Это достигается за счет максимально возможного увеличения ширины проводников. Кроме того, расположение шин питания и земли в разных слоях одна над другой повышает входную емкость цепи питания, улучшая тем самым фильтрацию пульсаций.

Огромные усилия разработчиков интегральных микросхем затрачиваются на повышение их быстродействия. Это достигается посредством уменьшения, в частности, геометрических размеров активных областей полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, сокращением длины внутрисхемных связей. В результате значительно усложняется технологический процесс изготовления приборов, резко возрастают затраты производства. В связи с этим при монтаже аппаратуры должны быть приняты специальные меры по сохранению достигнутого быстродействия. Для этой цели интегральные микросхемы повышенной степени интеграции должны как можно ближе располагаться к разъемам и шине земли. Повышению быстродействия и помехоустойчивости способствует подключение неиспользуемых выводов к постоянному потенциалу, так как это позволяет избежать перезарядки емкости разомкнутой структуры эмиттера относительно неиспользуемых выводов схемы и снизить задержку сигнала. Для блокирования высокочастотных пульсаций необходимо применять безындуктивные конденсаторы и устанавливать их следует как можно ближе к микросхемам на той же стороне платы.

Для снижения внутрисхемных перекрестных помех сигнальные проводники и линии связи между приборами должны быть возможно короткими и при расположении в разных слоях печатной платы пересекаться под углом 45 или 90°.

При индивидуальной пайке или сварке выводов интегральных микросхем необходимо применять инструмент, имеющий потенциал, отличающийся от потенциала шины земли не более чем на 3 В.

При ремонте аппаратуры и контроле интегральных микросхем замену приборов необходимо проводить при отключенном источнике питания, а пайку выводов начинать с выводов питания и земли.

Интегральные схемы на МОП-структурных и полевые транзисторы особо чувствительны к воздействию статического электриче-

ства, вероятность накопления которого на корпусах приборов и интегральных микросхем весьма велика. Учитывая специфику этого фактора внешних воздействий, представляется целесообразным подробнее рассмотреть его природу и механизм воздействия на приборы.

#### **7.4. ВОЗДЕЙСТВИЕ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, МОНТАЖА И ЭКСПЛУАТАЦИИ В АППАРАТУРЕ**

Воздействие статического электричества — самостоятельная проблема в полупроводниковой электронике. Его воздействию полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы подвергаются на всех этапах жизненного цикла. По данным американской печати [31] в среднем электронная промышленность США ежегодно теряет от 10 до 18% продукции в результате повреждения статическим электричеством. Ежегодно затраты на восстановление и ремонт аппаратуры и дополнительное обслуживание в результате выхода из строя поврежденных статическим электричеством полупроводниковых приборов и интегральных микросхем составляют около 10 млрд. долларов. Важно подчеркнуть, что выход приборов из строя в сферах их производства, производства аппаратуры и ее эксплуатации равновероятен. Поэтому вопросам защиты приборов от воздействия статического электричества должно уделяться внимание на всех стадиях жизненного цикла приборов.

Источниками статического электричества являются:

- электрический заряд, накапливающийся на одежде и теле оператора;

- внутренняя отделка чистых комнат и оборудование, используемое в них для изготовления интегральных микросхем и полупроводниковых приборов;

- электрическое поле, создаваемое оборудованием, находящимся под напряжением, вызывающее накопление статических зарядов в полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах, помещенных в такое поле;

- диэлектрические слои полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, накапливающие статический заряд в результате трения об оснастку при их обработке;

- технологические среды, в которых производится обработка активных структур и готовых приборов.

Последний эффект наблюдается при обработке фреоном полупроводниковых структур и готовых приборов, смонтированных на платах [32]. Заряд в этом случае накапливается в результате ионизации и пробоя воздушного промежутка между изолированной крышкой корпуса и поверхностью кристалла.

В схемах памяти с ультрафиолетовым стиранием накопленный статический заряд на поверхности кристалла вызывает потерю



информации в разрядной шине и запись ложной информации в словарной шине. Состояние отказа сохраняется в течение 30 дней и более и может быть устранено только посредством стирания ложной информации при облучении ультрафиолетовым излучением.

Независимо от характера статического электричества большинство конструктивных элементов интегральных микросхем и полупроводниковых приборов чувствительны к мощности рассеяния, связанной с протеканием разрядного тока, вызванного статическим электричеством. Такими элементами являются структуры на основе *p-n* переходов и металлизация. Для этих элементов существенны длительность, амплитуда и форма импульса разрядного тока, при определенном сочетании которых происходит электрический пробой разрядного промежутка с переходом в тепловой пробой, вызывающий проплавление *p-n* перехода и перегорание металлизации. Тонкий подзатворный окисел в МОП-структурах, конденсаторы в линейных гибридных микросхемах, места пересечений металлических дорожек при многослойной разводке чувствительны к электрическому полю и отказывают из-за наступления диэлектрического пробоя.

В табл. 7.1 приведены обобщенные данные по уровням потенциалов, образующихся в результате накопления статического электричества, и критической разности потенциалов на выводах приборов различных конструкций. Анализ данных таблицы показывает, что практически все типы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем могут быть выведены из строя разрядом статического электричества, так как уровни потенциалов, возникающих на одежде оператора, на корпусе приборов в аппаратуре вследствие накопления статических зарядов во много раз превосходят критические значения разности потенциалов, характеризующие устойчивость приборов.

Для защиты от действия статических зарядов применяются встроенные в приборы предохранительные устройства в виде ох-

Т а б л и ц а 7.1

Место накопления статического заряда и тип прибора	Потенциал, создаваемый статическим зарядом, кВ	Критическая разность потенциалов, В
Оператор на полу из пластика	5	—
Оператор на кафельном полу	25	—
Оператор на ковровой дорожке	15	—
Оператор на деревянном полу	0,8	—
ИМС в пластмассовом корпусе	4...20	—
ИМС в аппаратуре без экрана	6...20	—
МОП-ИМС	—	10...200
КМОП-ИМС	—	250...2000
ТТЛ ИМС с ДШ	—	250...300
ЭСЛ ИМС	—	500
Биполярный транзистор	—	250...300
Тиристор	—	700...1000

ранных колец, разрядников и стабилитронов. Наиболее чувствительные к статическим зарядам приборы транспортируются со специальными шунтирующими колодками на выводах.

Для нейтрализации накапливающихся зарядов на теле оператора применяются проводящая обувь, проводящие коврики и дорожки. При работе оператора за монтажным столом применяются заземленные браслеты, а операторы, выполняющие работу, связанную с постоянным перемещением, заземляются специальными проводящими полосками, соприкасающимися с проводящим полом. Плоские поверхности монтажных столов должны быть проводящими и иметь заземление с сопротивлением порядка 1 кОм.

Для исключения накопления статических зарядов на оборудовании, оснастке и рабочих местах, в которых из-за применения различных изоляционных прокладок заземление невозможно, применяется периодический обдув ионизованным воздухом.

При монтаже полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в печатные платы для защиты от воздействия статических зарядов должны заземляться движущиеся конвейеры, монтажный инструмент. Для предотвращения повреждения статическими зарядами приборов при непосредственном монтаже на плату последняя должна иметь временное заземление с помощью специальных колодок.

В аппаратуре полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы должны защищаться от воздействия высоких электрических полей, вызывающих накопление статических зарядов, специальными проводящими экранами [33].

## **7.5. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ПРИБОРЫ В СОСТАВЕ АППАРАТУРЫ**

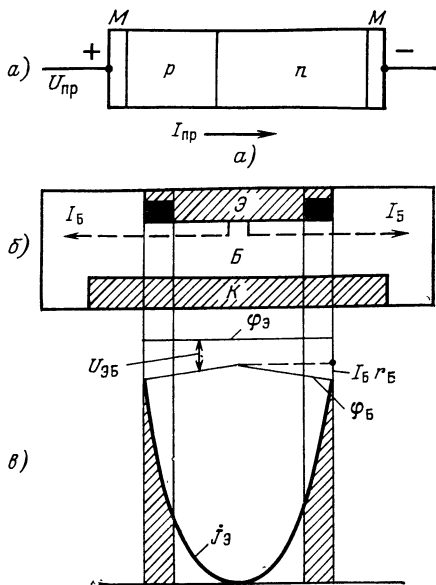
Данный вид воздействий органически связан с самой природой полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, так как их функционирование как активных элементов определяется прохождением через них электрического тока с выделением джоулева тепла. При этом следует иметь в виду, что все основные параметры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в той или иной степени зависят от температуры, что, в свою очередь, сказывается на надежностных характеристиках.

Рассмотрим процесс выделения тепла в диодной структуре при прохождении через нее прямого тока  $I_{пр}$  под воздействием приложенного напряжения  $U_{пр}$  (рис. 7.2,а).

Допустим, что удельное сопротивление  $n$ -области структуры много больше удельного сопротивления  $p$ -области, следовательно, практически весь ток через  $p$ - $n$  переход обеспечивается дырками [34]. При приложении к переходу напряжения в прямом направлении происходит инжекция дырок из  $p$ -области в  $n$ -область с преодолением потенциального барьера в области пространственного заряда. В связи с тем, что в инжекции участвуют высокоэнергетические дырки, получившие энергию в  $p$ -области за счет

Рис. 7.2. Эффекты, связанные с прохождением тока через  $p$ - $n$  переход:

$a$  — прохождение тока через диодную структуру;  $b$  — эффект вытеснения тока к периферии эмиттера в транзисторе;  $в$  — распределение плотности тока эмиттера по структуре транзистора;  $M$  — металлический контакт;  $\mathcal{E}$  — эмиттер;  $B$  — база;  $K$  — коллектор;  $I_B$  — базовый ток;  $\Phi_{\mathcal{E}}$  — потенциал эмиттера;  $U_{\mathcal{E}B}$  — напряжение база — эмиттер;  $I_{B\mathcal{E}}$  — падение напряжения в базе при прохождении базового тока,  $r_B$  — сопротивление базы;  $\Phi_B$  — потенциал базы;  $j$  — плотность тока эмиттера



поглощения тепловой энергии,  $p$ -область охлаждается.

В  $n$ -области дырки диффундируют в среднем на расстояние, равное диффузионной длине  $L_p$  от  $p$ - $n$  перехода и рекомбинируют с электронами, выделяя в каждом акте рекомбинации энергию, приблизительно

равную ширине запрещенной зоны полупроводника  $E_g$ . Эта энергия тратится, в основном, на разогрев полупроводника в месте рекомбинации.

Исчезновение электрона из зоны проводимости вызывает появление нового электрона, вошедшего в полупроводник из области металлического контакта к  $n$ -области, преодолевая потенциальный барьер высотой примерно  $E_g - \varphi_n$  ( $\varphi_n$  — контактная разность потенциалов). Для преодоления этого барьера электрон поглощает тепловую энергию в приконтактной области. Следовательно, с уходом электрона приконтактная область охлаждается. Суммарное тепло, уносимое дырками, инжектируемыми через  $p$ - $n$  переход, и электронами со стороны контакта к  $n$ -области, равно энергии, затрачиваемой в единицу времени источником, смещающим  $p$ - $n$  переход в прямом направлении и создающим ток  $I_{пр}$ .

Рассматриваемая тепловая мощность, как и в случае обычного проводника, пропорциональна произведению тока на разность потенциалов. Однако в случае  $p$ - $n$  перехода имеют место два принципиальных отличия. Первое отличие состоит в том, что тепло выделяется неравномерно в объеме полупроводника, по которому протекает ток. Количество выделяемого тепла пропорционально количеству рекомбинирующих в данной области носителей заряда. Второе отличие состоит в том, что кроме источника тепла, создаваемого внешним напряжением смещения, появляются дополнительные источники тепла. Первый из них —  $p$ -область  $p$ - $n$  перехода, где дырки поглощают тепловую энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера  $p$ - $n$  перехода при инжекции в  $n$ -область. Второй возникает на металлическом контакте к  $n$ -об-

ласти и, наконец, третий источник тепла локализуется в  $n$ -области в местах рекомбинации носителей заряда. Расположение рассмотренных выше источников зависит от конструкции приборов.

В диодах на основе  $p$ - $n$  перехода с тонкой базой, в которых диффузионная длина неосновных носителей заряда превышает ширину базы, рекомбинация носителей происходит в основном на металлическом контакте. В таких диодах при прохождении прямого тока охлаждается  $p$ -область и разогревается тонкий слой  $n$ -области, прилегающей к металлическому контакту. В диоде, смещенном в обратном направлении, все приложенное напряжение падает на  $p$ - $n$  переходе, поэтому выделение тепла, в основном, происходит в области пространственного заряда и тонких, прилегающих к нему по обе стороны, слоях полупроводника. При больших значениях обратных напряжений (несколько сотен вольт) даже при сравнительно небольших величинах обратных токов происходит существенный разогрев полупроводниковой структуры.

В транзисторе, работающем в активном режиме и режиме насыщения, мы имеем дело с несколькими источниками тепла. В активном режиме коллекторный переход смещен в обратном направлении, и в этом случае возникает источник тепла в плоскости коллекторного перехода, аналогичный источнику в обратносмещенном диоде с той только разницей, что коллекторный ток значительно превышает ток обратносмещенного  $p$ - $n$  перехода в диоде и, следовательно, данный источник тепла существенно превосходит по мощности все другие источники, возникающие в транзисторе.

В режиме насыщения через эмиттерный переход транзистора протекает ток в прямом направлении, на коллекторном переходе внешнего смещения нет (при малом токе) или он смещен несколько в прямом направлении. При условии, что диффузионная длина неосновных носителей превышает ширину базы, картина выделения тепла аналогична случаю диода с тонкой базой. На эмиттерном переходе происходит поглощение тепла носителями заряда, инжектируемыми в базу. Подавляющая часть носителей заряда достигает коллекторного перехода. При рекомбинации носителей заряда в области коллектора выделяется значительное тепло. В режиме насыщения через базу транзистора протекает базовый ток достаточно большой величины. На распределенном омическом сопротивлении базовой области протекающий ток выделяет определенное количество тепла. Кроме того, в области базы происходит рекомбинация небольшой доли инжектированных носителей заряда. Выделяющаяся при рекомбинации энергия образует источник тепла, равномерно распределенный по объему.

Неравномерность распределения тепла в транзисторных структурах усугубляется известным эффектом вытеснения тока к периферии эмиттера, характерное для мощных транзисторов. Суть этого эффекта заключается в следующем (рис. 7.2,б). При работе транзистора в активном режиме базовый ток  $I_B$ , протекая парал-

лельно плоскостям эмиттера и коллектора, создает падение напряжения на сопротивлении базы  $r_B$ , которое добавляется к прямому смещению, приложенному к эмиттерному переходу. Так как поверхность эмиттера может рассматриваться эквипотенциальной, то потенциал базы в результате протекания базового тока уменьшается от центра эмиттера к его периферийным частям. Соответственно  $U_{ЭБ}$  будет минимальна в центре и максимальна на краях эмиттера. Со значительно большей неравномерностью будет распределена плотность тока по эмиттеру, так как она экспоненциально зависит от напряжения между эмиттером и базой  $U_{ЭБ}$ :

$$j_{Э} \sim \exp \left( \frac{U_{ЭБ}}{\varphi_T} \right). \quad (7.1)$$

В выражении (7.1)  $\varphi_T$  — тепловой потенциал, равный при комнатной температуре приблизительно 0,025 В. Если падение потенциала вдоль базы превышает 2  $\varphi_T$ , то, используя соотношение (7.1), легко убедиться, что плотности тока в центре и на периферии эмиттера различаются на порядок и более, т. е. фактически весь ток эмиттера обусловлен его периферийной частью (на рис. 7.2,б она условно зачернена). Картина распределения плотности тока эмиттера повторяется и на коллекторном переходе. Следовательно, область коллекторного перехода из-за рассмотренного выше эффекта разогревается проходящим током неравномерно.

Для того чтобы избежать эффекта вытеснения тока или существенно снизить его влияние, уменьшают размеры эмиттера настолько, чтобы падение напряжения в базовой области под эмиттером  $I_B r_B$  было меньше  $\varphi_T$ . В случае планарных транзисторов эмиттер выполняется в виде многополосковой и гребенчатой структуры, у которой ширина каждой полоски достаточно мала (т. е.  $I_B r_B < \varphi_T$ ), а суммарная ширина достаточно велика, чтобы обеспечить необходимый уровень эмиттерного тока.

При рассмотрении тепловых явлений в полупроводниковых приборах следует учесть и другие специфические свойства полупроводников, в том числе температурную зависимость теплопроводности и электропроводности полупроводника, т. е. рост электропроводности с ростом температуры с одновременным уменьшением теплопроводности. Неоднородность разогрева полупроводника и температурная зависимость электропроводности и теплопроводности способствуют локализации или шнурованию тока в полупроводниковых приборах.

При более интенсивном разогреве какого-либо участка полупроводника относительно соседних областей структуры его сопротивление падает, что приводит к возрастанию плотности тока на данном участке, и следовательно, к дополнительному его разогреву. В связи с тем, что с ростом температуры уменьшается теплопроводность полупроводника на этом участке, т. е. ухудшается отвод тепла, происходит дополнительный рост температуры участка. Рассмотренный процесс продолжается либо до наступления равновесия, при котором линии тока, в основном, сосредотачива-

ются в участке с наименьшим сопротивлением, либо при отсутствии ограничения возрастанию тока во внешней цепи в месте локализации повышенной плотности тока происходит необратимый тепловой пробой с разрушением прибора.

Выше говорилось о том, что надежность свойства полупроводниковых приборов существенно зависят от температуры активных областей, в частности от температуры  $p-n$  переходов. Известно [35], что интенсивность отказов кремниевых приборов экспоненциально зависит от температуры  $p-n$  перехода и при ее изменении от 20 до 120°С интенсивность отказов увеличивается в 20...30 раз или приблизительно удваивается при повышении температуры на каждые 10°С.

С целью обеспечения надежной работы полупроводниковых приборов в аппаратуре в нормативно-технической документации установлены ограничения на предельно допустимые температуры  $p-n$  перехода. Для германиевых приборов предельно допустимая температура  $p-n$  перехода составляет +90°С, для кремниевых +150°С. Оговариваются также предельно допустимые диапазоны температур окружающей среды. Для германиевых приборов —60...+70°С, для кремниевых приборов —60...120°С.

Таким образом, для контроля допустимых режимов применения приборов необходимо знать температуру  $p-n$  переходов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Однако непосредственное измерение температуры  $p-n$  перехода практически невозможно, поэтому ее можно рассчитать, используя следующее выражение:

$$T_{p-n} - T_{окр} = R_T P, \quad (7.2)$$

где  $T_{p-n}$  — температура  $p-n$  перехода;  $T_{окр}$  — температура окружающей среды;  $R_T$  — тепловое сопротивление прибора;  $P$  — мощность, рассеиваемая в приборе.

Тепловое сопротивление прибора определяется его физическими и конструктивными параметрами и может быть приблизительно оценено исходя из следующего соотношения:

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{l}{S}, \quad (7.3)$$

где  $\lambda$  — удельная теплопроводность материала;  $l$  и  $S$  — соответственно длина и площадь поперечного сечения материала, через который протекает тепловой поток.

Так как в приборе может быть выделено много слоев, каждому из которых присущи свои специфические физические параметры, тепловое сопротивление прибора в целом представляет собой сумму тепловых сопротивлений его отдельных участков. Обычно полное тепловое сопротивление разбивают на два слагаемых:  $R_{ТПК}$  — тепловое сопротивление на участке переход — корпус;  $R_{ТКС}$  — тепловое сопротивление на участке корпус — среда.

Первое слагаемое определяется физическими и конструктивными параметрами прибора. Второе — материалом и конструк-

цией теплоотвода или радиатора, а также условиями охлаждения в окружающей среде.

В зависимости от конструкции приборов значения их тепловых сопротивлений лежат в следующих пределах, °С/Вт:

Маломощные приборы . . . . .	600 ... 800
Приборы средней мощности . . . . .	50 ... 150
Мощные приборы . . . . .	1 ... 5

Рассматривая воздействие тепловых и электрических нагрузок на полупроводниковые приборы, необходимо иметь в виду, что прибор в конкретных условиях работает в системе прибор-окружающая среда. Тепловой баланс в системе прибор-окружающая среда устанавливается через некоторое время после подачи напряжения. В момент подачи напряжения температура  $p$ - $n$  перехода равна температуре окружающей среды. С течением времени температура перехода постепенно повышается до установившегося значения. Тепловая инерционность прибора обычно характеризуется тепловой постоянной времени нагревания  $\tau_T$ . Переходный процесс изменения температуры  $p$ - $n$  перехода описывается экспонентой

$$\Delta T(t) = \Delta T(\infty) (1 - e^{-t/\tau_T}), \quad (7.4)$$

где  $\tau_T = \mathcal{C} R_T$  — тепловая постоянная прибора;  $\mathcal{C} = c_0 \sigma V$  — теплоемкость слоя;  $c_0$  — удельная теплоемкость;  $\sigma$  — плотность материала;  $V$  — объем слоя.

Для различных участков прибора время установления постоянной температуры различно и зависит от конструктивных особенностей участков и теплоемкости материала. Так, например:

$\tau_T$ $p$ - $n$ перехода . . . . .	15 ... 20 мс
$\tau_T$ прибора . . . . .	4 ... 8 с
$\tau_T$ прибора с теплоотводом . . . . .	100 ... 200 с

Тепловые и электрические воздействия на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы являются основными факторами, определяющими надежность приборов. Для обеспечения высокой надежности необходимо тщательно выбирать режимы, исключающие перегрузку отдельных областей приборов. Существенное значение в обеспечении надежности приборов играют специ-

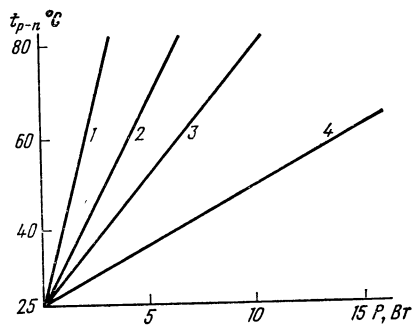


Рис. 7.3. Типовая зависимость температуры  $p$ - $n$  перехода от рассеиваемой мощности при различных условиях охлаждения:

1 — прибор без теплоотвода; 2 — теплоотвод — пластина  $60 \times 60$  мм; 3 — теплоотвод штырьковый  $60 \times 60 \times 34$  мм; 4 — теплоотвод штырьковый  $60 \times 60 \times 34$  мм плюс принудительное воздушное охлаждение со скоростью обдува 2 м/с

альные меры их принудительного охлаждения и применение теплоотводов. На рис. 7.3 приведены зависимости температуры перехода от рассеиваемой мощности при различных условиях охлаждения. Из рисунка следует, что посредством применения теплоотводов с естественным и принудительным охлаждением можно при прочих равных условиях существенно снизить температуру активных областей прибора и тем самым повысить надежность его работы.

В настоящее время в аппаратуре применяются различные конструкции теплоотводов: пластинчатые, оребренные, штыревые, петельно-проволочные и другие, каждая из которых для определенных условий эксплуатации является оптимальной [36]. Существуют два способа расчета теплового режима приборов с теплоотводом. При первом задается рассеиваемая мощность, температура корпуса или  $p-n$  перехода и температура окружающей среды. Температура  $p-n$  перехода избирается такой, чтобы обеспечить необходимый уровень надежности прибора. При заданных начальных условиях рассчитываются геометрические размеры теплоотвода, по которым выбирается материал и конфигурация теплоотвода. Второй метод, применяемый в качестве поверочного, состоит в том, что по заданным геометрическим размерам теплоотвода, температуре окружающей среды и температуре  $p-n$  перехода определяется допустимая мощность рассеяния при эксплуатации прибора с теплоотводом.

В современном технологическом процессе изготовления аппаратуры широкое применение для герметизации печатных плат и целых блоков аппаратуры получили различные лаки, эпоксидные смолы и другие компаунды. Наиболее часто в качестве герметика используется пенополиуретан, который обеспечивает повышенную механическую прочность аппаратуры и устойчивость к воздействию климатических факторов. Этот герметик обладает высокими электрическими свойствами и малой плотностью. Однако герметизация затрудняет отвод тепла, что может привести к повышению температуры отдельных элементов до значений, превышающих допустимые. Поэтому условия герметизации должны быть учтены при тепловом расчете режимов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

## ГЛАВА 8

### ВИДЫ И МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

#### 8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ

Содержание предыдущих глав позволяет обоснованно сделать вывод, что реальная полупроводниковая структура, являющаяся основным активным элементом любого полупроводникового прибора и интегральной микросхемы, в которой происходят сложнейшие электронные процессы, весьма далека от идеальной.



Как было показано выше, внесение различных несовершенств и дефектов в полупроводниковую структуру начинается с исходных материалов и продолжается практически на каждом этапе технологического процесса. Условно дефекты в зависимости от размеров и возможности обнаружения в производственных условиях делят на грубые, или макроскопические, и мелкие, или микроскопические, которые зачастую еще называют случайными. Конструктивные элементы, полупроводниковые структуры и готовые приборы, содержащие грубые дефекты, в результате межоперационного и выходного контроля удаляются из дальнейшего технологического процесса и из партий готовых приборов как технологический брак. При этом степень «чистоты» готовых приборов от грубых дефектов определяется отлаженностью и стабильностью технологического процесса и чувствительностью контрольного оборудования или его способностью либо непосредственно наблюдать грубые дефекты, либо давать возможность объективно судить об их наличии или отсутствии по косвенным признакам, связанным с электрофизическими параметрами конструктивных элементов, полупроводниковых структур и готовых приборов.

Однако большинство микроскопических несовершенств и дефектов не поддаются контролю и присутствие их в приборах неизбежно. Поэтому мы должны рассматривать каждый прибор как объект, находящийся в неравновесном состоянии из-за присутствующих в нем микроскопических дефектов и несовершенств. Последние в свою очередь случайным образом распределены в генеральной совокупности приборов.

Каждый из дефектов или несовершенств вносит свой вклад в деградационные процессы, происходящие в приборе, которые в итоге приводят к изменению его выходных электрофизических параметров. При этом возможны благоприятные и неблагоприятные сочетания несовершенств и дефектов. В первом случае деградационные процессы протекают медленно и изменения электрофизических параметров приборов незначительны. Во втором случае в составе дефектов могут быть значительные несовершенства, причем сочетание их таково, что происходит усиление эффектов воздействия отдельных дефектов на деградационные процессы. Итогом неблагоприятного сочетания дефектов и несовершенств является быстрая деградация параметров приборов.

На процесс взаимодействия несовершенств в приборе накладывается процесс возникновения в нем дефектов и несовершенств в период эксплуатации в результате старения конструктивных материалов.

Внешние воздействия, в особенности тепловые и электрические нагрузки, ускоряют взаимодействие и генерацию дефектов. В итоге все эти процессы приводят к отказу приборов.

Обобщенная кривая зависимости интенсивности отказов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем от времени эксплуатации, приведенная на рис. 8.1, является отражением

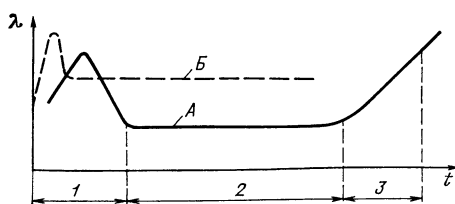


Рис. 8.1. Кривая интенсивности отказов:

А — при нормальном режиме эксплуатации; Б — при повышенном режиме эксплуатации;  
1 — участок приработки приборов; 2 — участок нормальной работы приборов; 3 — участок старения

процессов, рассмотренных выше. На кривой имеются три характерных участка.

Участок 1 продолжительностью 10 ... 500 ч (в зависимости от конструкции прибора) получил в литературе название участка приработки. На этом участке интенсивность отказов с течением времени возрастает, достигает максимума и затем уменьшается до установившегося значения. В этот период отказывают приборы с неблагоприятным сочетанием дефектов и несовершенств. Возможно, дефекты способны объединяться и перестраиваться, в результате чего число отказов приборов в единицу времени возрастает. На этой ветви кривой интенсивности отказов функция распределения отказов хорошо описывается распределением Вейбулла при значении коэффициента формы  $b > 1$ . На спадающей ветви кривой интенсивности отказов количество приборов с неблагоприятным сочетанием несовершенств в составе генеральной совокупности уменьшается, поэтому уменьшается и количество отказов в единицу времени. На этом участке также справедливо распределение Вейбулла с коэффициентом  $b < 1$ .

Участок 2 называют участком нормальной работы приборов. На протяжении всего участка интенсивность отказов приборов постоянна и для описания характеристик надежности справедливо экспоненциальное распределение. Предполагается, что после выхода из строя образцов со значительными несовершенствами и неблагоприятным сочетанием дефектов на участке приработки в генеральной совокупности остаются приборы с относительно однородным распределением дефектов и несовершенств. В результате односторонние действия дефектов вместе с отрицательными факторами внешних воздействий, приводящими в совокупности к отказам, весьма редки. Длительный опыт эксплуатации полупроводниковых приборов показал, что в действительности интенсивность отказов на участке нормальной работы не остается постоянной, а постепенно уменьшается. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что и на этом участке из общего состава приборов в результате отказов исключаются приборы с относительно крупными дефектами и неблагоприятным их сочетанием. Остающиеся исправными приборы имеют более мелкие дефекты и, следовательно, меньшую склонность к отказам.

На участке 3 наблюдается резкое возрастание интенсивности отказов. Это происходит из-за усталостных явлений в конструкционных материалах и наступления стадии износа приборов. Однако

данная стадия у полупроводниковых приборов только предполагается, так как на практике ни для одного из имеющихся типов приборов, эксплуатирующихся в нормальных условиях, этот участок не наблюдался. На этом участке справедливо нормальное распределение отказов.

Увеличение жесткости режима эксплуатации вызывает смещение кривой интенсивности отказов вверх по оси ординат и влево по оси абсцисс (кривая *Б* на рис. 8.1). Это связано с тем, что более жесткий режим эксплуатации ускоряет выход из строя приборов на участке приработки и время приработки сокращается. Кроме этого, более жесткий режим эксплуатации вызывает возрастание интенсивности отказов на всех участках кривой.

Наличие участка приработки на обобщенной кривой распределения интенсивности отказов еще раз подтверждает присутствие в приборах, прошедших выходной контроль, определенного количества образцов с относительно крупными дефектами не распознанными межоперационными и заключительными контрольными операциями. Наличие такой фракции приборов в генеральной совокупности представляет существенное неудобство для изготовителей аппаратуры, так как, будучи вмонтированными в соответствующие блоки, они приведут к ранним отказам аппаратуры. Выход из данного положения может быть найден двумя путями. Первый из них состоит в повышении действенности контроля, который позволил бы исключить из совокупности приборов все экземпляры с относительно крупными дефектами и тем самым получить однородную продукцию, содержащую несовершенства, неразличимые имеющейся в распоряжении современного производства контрольной аппаратурой. Однако этот путь может быть реализован на практике только в разумных пределах, так как он связан с резким повышением требований к исходным материалам с применением очень сложной и малопроизводительной контрольной аппаратуры, а также с существенным усложнением технологического процесса. Исключительная сложность осуществления этого пути приводит к значительным материальным затратам, вследствие чего производство приборов становится экономически нецелесообразным.

Второй путь основан на использовании подвижности участка приработки под воздействием нагрузки. Это свойство и принято за основу в применяющихся в настоящее время методах тренировки приборов перед монтажом в аппаратуре. Подвергая приборы воздействию повышенных нагрузок, не опасных для изделий, не имеющих скрытых значительных дефектов, можно за короткий срок добиться наступления отказов потенциально ненадежных приборов и тем самым исключить из кривой распределения начальный участок приработки.

На этом же принципе основаны так называемые отбраковочные и ускоренные испытания, принципы проведения которых и порядок выбора режима будут рассмотрены в последующих разделах.

Классификация отказов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем показывает (рис. 8.2), что подавляющее число отказов происходит из-за дефектов металлизации и контактов, дефектов посадки кристаллов и разварки внутренних выводов, а также из-за изменения электрических характеристик приборов, за которые ответственна активная область полупроводниковой структуры. Данное обстоятельство указывает на необходимость подробнее рассмотреть причины, вызывающие перечисленные выше виды отказов.

Но прежде чем перейти к рассмотрению этих причин, необходимо еще раз вернуться к определению понятия отказа и рассмотреть связанную с ним терминологию.

Известно, что любой невосстанавливаемый технический объект, в нашем случае полупроводниковый прибор или интегральная микросхема, в период жизненного цикла может находиться в одном из трех состояний: *исправном, работоспособном и неисправном* (рис. 8.3). Переход из одного состояния в другое осуществляется через посредство таких событий, как повреждение и отказ. Например, в результате повреждения прибор из исправного состояния переходит с сохранением работоспособности в неисправное состояние, эквивалентное работоспособному, так как несмотря на повреждение прибор способен выполнять свои функции по прямому назначению. В результате события, называемого отказом, прибор из исправного и работоспособного состояния переходит в неработоспособное состояние, находясь в котором он становится непригодным для дальнейшего использования (см. § 1.1, гл. 1).

В зависимости от условий возникновения, характера отказа и причин, приводящих к неработоспособному состоянию, понятие отказа имеет множество разнообразных оттенков, которые представляются целесообразным рассмотреть подробнее.

Прежде всего следует указать на то, что по характеру наступления отказы принято делить на постепенные и внезапные. Под постепенными понимают отказы, характеризующиеся постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров прибора.

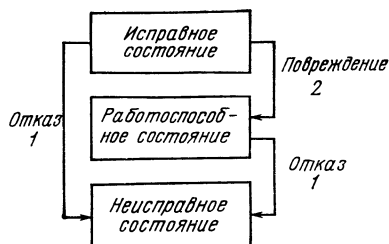
*Постепенное изменение (отказы) электрических параметров полупроводниковых приборов и интеграль-*



Рис. 8.2. Распределение отказов приборов по причинам, их вызывающим

Рис. 8.3. Схема взаимодействия состояний прибора и событий типа отказ и повреждение:

1 — переход прибора из исправного и работоспособного состояний в неисправное в результате отказа; 2 — переход прибора из исправного состояния в работоспособное в результате повреждения



ных микросхем predetermined самой природой этих изделий. Дело в том, что активные области полупроводниковой структуры, контактные соединения, пассивные элементы создаются в результате неравномерного распределения примесей в полупроводниковом кристалле, применения слоистых структур с резко отличающимися физическими характеристиками. Указанные особенности в сочетании с микроскопическими дефектами и несовершенствами превращают прибор в неравновесную систему, в которой неизбежны процессы упорядочения, ускоряемые воздействием тепловых и электрических режимов. Конечным результатом этих процессов является постепенное изменение электрических параметров приборов. Возможность изменения параметров и пределы этих изменений учитываются критериями отказа. В случае постепенных отказов критериями отказов являются указываемые в технической документации предельные значения изменений параметров, после достижения которых прибор считается отказавшим. Предельные изменения параметров приборов принимаются в расчет при конструировании аппаратуры, с тем чтобы исключить чувствительность ее выходных характеристик к этим изменениям.

В качестве примеров можно указать постепенные отказы приборов, происходящие в результате возрастания обратных токов  $p$ - $n$  переходов за счет токов утечек, уменьшения коэффициента усиления транзисторов, возрастания прямого падения напряжения диодов, изменения уровня нуля или единицы цифровых интегральных микросхем, или порогового напряжения МДП-приборов.

*Внезапные отказы* характеризуются скачкообразным изменением одного или нескольких параметров прибора. Причинами внезапных отказов могут быть как естественные постепенные изменения в физической структуре прибора, которые при определенных условиях приобретают лавинообразный характер, приводящий к отказу, так и условия применения прибора в аппаратуре. При использовании прибора в электрическом режиме в его структуре могут возникать микроповреждения в результате локальных флуктуаций плотности тока и перегревов, которые, накапливаясь, при очередной неконтролируемой кратковременной перегрузке приводят к внезапному отказу. Характерными примерами внезапных отказов являются короткие замыкания и обрывы в структуре прибора. Короткие замыкания возникают в результате пробоя диэлектрических изолирующих слоев или проплавления  $p$ - $n$  переходов, вызываемых перегрузками. За коротким замыка-

нием, как правило, следует обрыв, так как в местах пробоя резко возрастает плотность тока, происходит значительный разогрев обрзовавшейся проводящей перемычки и ее перегорание.

Отказы приборов, возникающие в результате процессов, происходящих в их внутренней структуре, называют *независимыми*. Однако весьма часты случаи, когда приборы повреждаются в результате выхода из строя предохранителей цепей защиты от перегрузок, пассивных ограничительных элементов. Отказы приборов по указанным причинам называют *зависимыми*.

При рассмотрении причин выхода из строя полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в аппаратуре необходимо установить степень зависимости отказа приборов от отказов других элементов. Это очень важно в интересах выбора мер устранения последующих отказов.

Особо сложным является распознавание так называемых *перемежающихся* отказов, или многократно возникающих самоустраняющихся отказов одного и того же характера. Простейшим примером таких отказов являются сбои, возникающие в приборах из-за наличия в объеме герметичного корпуса проводящих частиц, способных создавать кратковременные замыкания между внутренними выводами и отдельными токопроводящими дорожками.

При анализе отказов весьма важно установить этап жизненного цикла прибора, явившийся первопричиной возникновения отказов. В этой связи различают *конструкционные отказы*, происходящие в результате ошибок и нарушений правил и норм конструирования в период разработки. При обнаружении такого отказа должны быть приняты соответствующие меры по доработке конструкции прибора, исключающие появление подобных отказов в последующих партиях приборов.

Под *производственными отказами* понимают отказы, возникающие в результате несовершенства процесса изготовления приборов, или нарушений технологии.

Весьма широкий диапазон охватывают так называемые *эксплуатационные отказы*. Причинами, вызывающими этот класс отказов, могут быть неправильная оценка возможностей приборов при их выборе для создания аппаратуры, ошибки при ее конструировании. В результате приборы могут подвергаться перегрузкам в аппаратуре и преждевременно выходить из строя. При производстве аппаратуры приборы могут повреждаться в процессе входного контроля из-за неправильного выбора режимов измерений и испытаний, при монтаже в аппаратуру из-за перегрузочных технологических режимов сборки. Наибольшее количество отказов приборов происходит в период использования аппаратуры у потребителей из-за нарушений установленных правил эксплуатации, неблагоприятных воздействий окружающей среды.

Рассмотренные выше термины нашли свое отражение в Государственных стандартах и нормативно-технической документации и являются обязательными при классификации отказов.

На практике используют и другие негостированные термины, придающие ту или иную окраску общепринятым определениям.

Например, широкое распространение получил термин *систематический отказ*. Под этим термином понимается многократно повторяющийся отказ, обусловленный дефектами конструкции изделия, нарушением технологического процесса его изготовления, низким качеством исходных материалов, ошибками в эксплуатации. Такие отказы проявляются, как правило, на участке 1 кривой интенсивности отказов (см. рис. 8.1), а также на участке 3 с соответствующим ускорением наступления износных отказов во времени. На участке 2 систематические отказы могут выявляться в результате повторяющихся нарушений условий эксплуатации и ошибочных действий необученного персонала. Снижение числа систематических отказов или полное их исключение в последующих партиях приборов после осуществления корректирующих мероприятий свидетельствует об эффективности последних.

Существенным при рассмотрении отказов является определение количественных или качественных признаков отказов. Признаки, позволяющие установить факт нарушения исправного или работоспособного состояний, называются *критериями отказа*.

Для постепенных отказов, которые в технической литературе нередко называют *параметрическими* или *деградационными отказами*, критериями являются уровни изменения электрических параметров, выше или ниже которых прибор согласно технической документации считается вышедшим из строя.

Возможные варианты изменения параметров во времени приведены на рис. 8.4.

На рис. 8.4,а представлена совокупность приборов, у которых основной параметр  $Y$ , определяющий надежность, изменяется во времени монотонно. Состояние отказа наступает в момент пересечения кривой  $Y(t)$  допустимой границы значения параметра  $Y$ . Моменты пересечения границ — критериев отказов являются величинами случайными. Их функция распределения зависит от выбора уровня значений параметра — критерия отказа, функции распределения самого параметра и закономерности изменения этого параметра во времени.

На рис. 8.4,б представлена немонотонная зависимость изменения параметра  $Y$  во времени. В этом случае исследуемый прибор в отдельные промежутки времени рассматривается как исправный, так как параметр  $Y$ , характеризующий надежность прибора, находится в допустимых пределах. В другие промежутки времени, когда параметр  $Y$  выходит за границы-критерии отказа, прибор рассматривается как отказавший. Такая ситуация возможна при перемежающихся отказах, в частности при воздействии ионизирующих излучений на транзисторы, когда наблюдаются случаи возрастания и последующего снижения их усилительных свойств.

На рис. 8.4,в представлено изменение во времени параметра  $Y$  совокупности приборов. На момент времени  $t=0$  плотность вероятности распределения параметра  $f(Y)$  лежит в допустимых пределах. С течением времени центр распределения смещается вниз. И, начиная с момента  $t_1$ , в составе совокупности приборов появляются экземпляры со значениями параметра  $Y$ , выходящими за пределы,

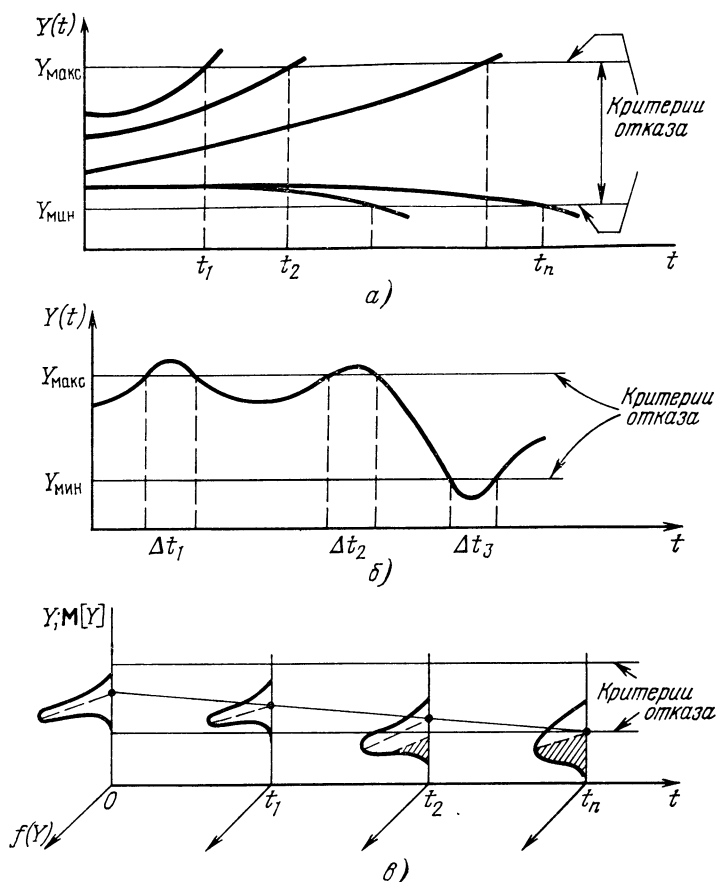


Рис. 8.4. Изменение параметров приборов во времени и постепенные отказы:  
 $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  — промежутки неработоспособности

ограниченные критериями отказа. В дальнейшем центр распределения все больше смещается к границе допустимых значений параметра  $Y$  и вероятность отказа приборов возрастает.

## 8.2. ПОНЯТИЕ МЕХАНИЗМА ОТКАЗОВ

В практике надежности используются два традиционных пути, в направлении которых сосредотачиваются усилия производителей и потребителей полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Один из них направлен на измерение фактической надежности приборов с целью получения достоверных данных, необходимых для расчета надежностных характеристик аппаратуры. Однако этот путь требует существенных экономических затрат, которые значительно возрастают с увеличением надежности приборов, не давая возможности полностью удовлетворить разработчиков аппаратуры исчерпывающими сведениями о надежности



приборов из-за бесконечного разнообразия условий применения и необходимости сбора и обработки огромного объема информации по результатам эксплуатации аппаратуры и длительных испытаний приборов. Существенно важным аспектом является определение возможности распространения результатов обработки полученной информации о количественных показателях надежности на приборы, которые за период эксплуатации их предшественников неизбежно претерпели значительные конструкционные изменения.

В настоящее время в силу исключительно высокого динамизма в области полупроводниковой электроники все большее предпочтение отдается второму пути, связанному с совершенствованием приборов, повышением их надежности. Знание, почему тот или иной прибор надежен или ненадежен, своевременная разработка и принятие необходимых мер по увеличению его надежности куда важнее, чем знание действительного уровня его надежностных характеристик. Это обстоятельство вызвало к жизни такие направления в надежности, как физическая надежность, физика механизмов отказов, которые направлены на изучение механизмов отказов, на разработку методов внесения коррекции в приборы и методов контроля действенности вносимых изменений и совершенств.

В условиях роста сложности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем изучение физических процессов механизмов отказов имеет, по крайней мере, две цели. Первая из них — посредством анализа отказавших приборов познавать вызывающие их причины, улучшать на этой основе технологию изготовления приборов и осуществлять мероприятия по совершенствованию правильности их применения. Вторая цель — через раскрытие и познание физических явлений, приводящих к отказам, совершенствовать существующие и создавать новые модели надежности приборов, используемые для контроля надежности разрабатываемых приборов и для прогнозирования надежности приборов, находящихся в серийном производстве.

Важно подчеркнуть различие между видами и механизмами отказов. Вид отказа — это очевидное событие, через которое проявляется неисправная работа прибора. Этим событием может быть, например, потеря усилительных свойств, короткое замыкание или обрыв. В ряде случаев вид отказа без исследования внутренней структуры прибора невозможно установить. В данном случае мы имеем дело с так называемым функциональным отказом. *Механизм отказа* — это физико-химический процесс, ведущий к отказу. С точки зрения надежности недостаточно знать или установить, с каким видом отказа мы имеем дело. Куда существеннее познать причины, приведшие к отказу. Это главная цель анализа отказов.

В полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах с идеальной структурой физико-химические процессы при нормальной эксплуатации должны протекать с очень малыми скоростями, вследствие того, что активные области находятся в нейтральной среде, изолированной герметичным корпусом от внеш-

них агрессивных воздействий, а режимы применения обеспечивают незначительный перегрев структуры.

Изложенные выше обстоятельства в свое время послужили основой для предположения исключительно высокой долговечности полупроводниковых приборов, исчисляемой сотнями лет. Высказанное предположение в определенной степени находит свое подтверждение в том, что усталостные явления и износные отказы в полупроводниковых приборах до настоящего времени не наблюдались. Однако наличие в структуре приборов различных дефектов и несовершенств, существенно ускоряющих физико-химические процессы в них при воздействии электромагнитных и тепловых полей и механических нагрузок, дают основание, как это было показано выше, рассматривать реальные полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы как термодинамически неустойчивые системы, содержащие дефекты и несовершенства.

Многочисленные исследования отказов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в результате деградации их электрофизических параметров под действием температуры [46, 54] показали справедливость применения так называемого *активационного комплекса* для описания деградационных процессов. Это понятие впервые было введено шведским ученым С. А. Аррениусом в теории скоростей химических реакций в растворах, согласно которой зависимость константы скорости химической реакции от абсолютной температуры описывается следующим выражением:

$$k_p = A \exp(-E_a/kT), \quad (8.1)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $A$  — коэффициент, характеризующий общее количество столкновений взаимодействующих реагентов;  $E_a$  — энергия активации процесса.

Помимо химических реакций широкий круг физико-химических процессов, связанных с изменением концентрации вещества в результате перемещения частиц и их взаимодействия (например, диффузия примесей в объеме и на поверхности полупроводника, перемещение точечных, линейных и объемных дефектов) удовлетворяет основным законам этой теории. Аналогия деградационных процессов химическим реакциям позволяет моделировать температурную зависимость надежностных характеристик приборов в экспоненциальной функции:

$$X(T) = K_x \exp(-E_a/kT), \quad (8.2)$$

где  $X(T)$  — один из показателей надежности, например интенсивность отказов, наработка до отказа, гамма-процентный ресурс;  $K_x$  — коэффициент, характеризующий конструкцию прибора, технологический процесс изготовления прибора.

Выражение (8.2) не может быть непосредственно использовано для вычислений показателей надежности, так как коэффициенты  $K_x$ , как правило, не известны. Однако построив в полулогарифмическом масштабе зависимость

$$\ln X(t) = f(T^{-1}) \quad (8.3)$$

по ее характеру можно судить о механизмах, вызывающих возникновение отказов приборов, а по ее наклону определить энергию активации деградационного процесса и его идентификацию.

Некоторые значения энергий активации, эВ, процессов, наблюдающихся в интегральных микросхемах [46], приведены ниже:

Самодиффузия:		
в Al	. . . . .	1,4
в Si	. . . . .	4,8
Диффузия:		
Al в Si	. . . . .	3,5
Na в SiO <sub>2</sub>	. . . . .	1,39
Электродиффузия в Al		0,5 ... 0,7
Формирование интерметаллических соединений Au—Al		0,87 ... 1,1

Трудности применения модели Аррениуса заключается в том, что диапазон энергий активации большинства деградационных процессов, присущих полупроводниковым приборам и интегральным микросхемам, лежит в узкой области (менее 4 эВ), поэтому точность экспериментальных методов, применяемых при определении параметров уравнения Аррениуса, должна быть достаточно высокой.

Рассмотрим некоторые механизмы отказов, характерные для наиболее распространенных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, и, в первую очередь, обратим внимание на механизмы отказов металлизации и контактов.

### 8.3. МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭЛЕКТРОМИГРАЦИИ

Внутренние межэлементные соединения активных структур современных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем выполняются путем нанесения алюминиевой пленки толщиной около 1 мкм на поверхность кристалла с последующей фотолитографией в соответствии с топологией разводки. С ростом сложности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем возрастает как протяженность разводки, так и площадь поверхности кристалла, занимаемая ею. В настоящее время в среднем она достигает 50% и по мере возрастания степени интеграции увеличивается, приводя к тому, что разработчики больших и сверхбольших интегральных микросхем вынуждены переходить на многоуровневую разводку, для того чтобы реализовать принятую топологию активных областей кристалла.

Металлическая пленка, нанесенная на поверхность готовой микросхемы, находится в неодинаковых условиях. В контактных окнах она взаимодействует с монокристаллическим кремнием *p*- или *n*-типов с различной степенью легирования, на остальной поверхности она контактирует с двуокисью кремния как в плоскости поверхности схемы, так и на ступеньках окисла. Неизбежна деформация металлической пленки на неровностях поверхности схемы и в местах приварки проволочных контактов. В процессе эксплуатации полупроводниковых приборов и интегральных микросхем металлическая разводка в меньшей степени, чем актив-

ные области полупроводниковой структуры, подвергается токовым и тепловым нагрузкам. Все это создает благоприятные условия для протекания различных процессов деградации металлической разводки, приводящих к изменению ее первоначальных свойств, и в ряде случаев к внезапным отказам.

Явление электродиффузии или электромиграции [37, 38, 39] заключается в том, что в металлических проводниках в определенных условиях при прохождении постоянного тока большой плотности (около  $10^6$  А·см<sup>-2</sup>) наблюдается перенос материала проводника из района отрицательного контакта к положительному. Модель этого явления представлена на рис. 8.5. Суть его заключается в следующем. При приложении электрического поля  $E$  к проводнику в нем возникает поток электронов  $I_e$ , направленный навстречу электрическому полю. Положительно заряженные ионы металла в этих условиях испытывают воздействие двух сил. Одна из них  $F_z$  возникает под действием электрического поля, стремясь переместить ионы по направлению поля. Происхождение второй силы  $F_e$  связано с взаимодействием потока электронов с ионами металла, она направлена навстречу электрическому полю. При достаточно большой плотности тока возникают условия, когда  $F_e > F_z$  и ионы металла начинают перемещаться из области контакта  $M_2^-$ , находящегося под отрицательным потенциалом, в область положительного контакта  $M_2^+$  (рис. 8.5,а). В результате этого в области отрицательного контакта (рис. 8.5,б) создаются обедненные участки и пустоты, а в районе положительного контакта происходит накопление металла, в отдельных местах образуются бугорки, вырастают металлические «усы» и «метелки». Неоднородный нагрев проводника ( $T_1 > T_2$ ) ускоряет процесс переноса.

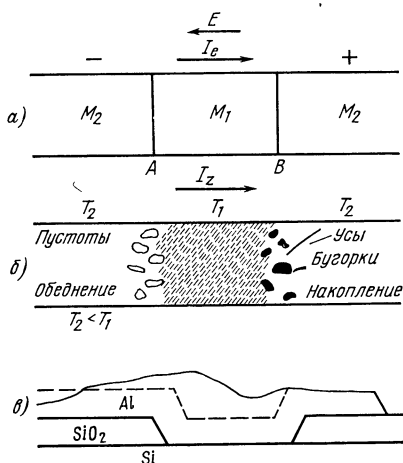


Рис. 8.5. Модель электродиффузии ионов алюминия в пленочном проводнике:

а — металлическая разводка на поверхности полупроводниковой пластины; б — образование дефектов в результате электродиффузии; в — изменение контакта Al—Si из-за электродиффузии

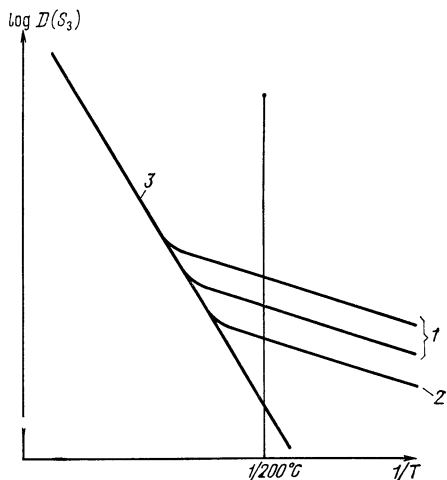


Рис. 8.6. Температурная зависимость коэффициента диффузии ионов металла в проводнике:

$D$  — коэффициент диффузии;  $S_3$  — площадь зерен; 1 — мелкозернистая структура; 2 — крупнозернистая структура; 3 — монокристалл

Конечным результатом процесса может быть значительное уменьшение сечения проводника в области отрицательного контакта (рис. 8.5,в) вплоть до наступления разрыва пленки.

Исследования температурной зависимости электродиффузии в металлических тонких пленках показали наличие двух механизмов переноса вещества в пленочных проводниках (рис. 8.6). Тонкие проводящие пленки, в том числе алюминиевые, представляют собой поликристаллическую структуру. При относительно низких температурах (до  $+200^{\circ}\text{C}$ ) в пленках перенос вещества происходит вдоль границ зерен (кривые 1, 2).

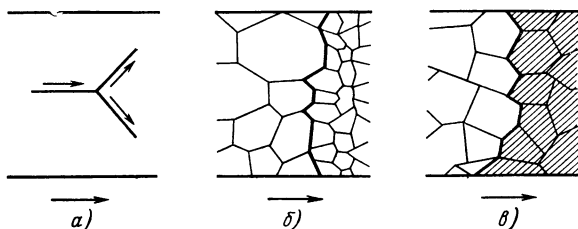
Объемная диффузия при низких температурах значительно меньше, так как протяженность границ зерен существенно больше размеров самих кристаллов. При этом энергия активации диффузии вдоль границ зерен существенно ниже ( $0,5 \dots 0,7$  эВ) по сравнению с энергией активации процесса объемной диффузии (около 1,4 эВ). Интенсивность диффузии в мелкокристаллических структурах (кривая 1) существенно выше, чем в крупнокристаллических (кривая 2), вследствие того, что суммарная протяженность границ зерен в мелкокристаллической пленке много больше, чем в крупнозернистой. С ростом температуры увеличивается коэффициент объемной диффузии и перенос вещества происходит преимущественно по объему поликристалла (кривая 3).

Изучение процесса формирования пустот вследствие электродиффузии в тонкопленочных алюминиевых проводниках показывает большую неоднородность границ зерен. Наиболее вероятные пустоты образуются вблизи точек соприкосновения трех зерен (см. рис. 8.7,а), так как при направлении потока электронов слева направо движение ионов металла более вероятно вдоль двух границ зерен направо, чем вдоль одной границы налево. Для проводящих дорожек равного поперечного сечения перенос вещества происходит интенсивнее в тех местах, где более густая сеть границ зерен, т. е. в местах с более мелкой структурой (рис. 8.7,б). Поэтому в этих местах имеется повышенная вероятность возникновения пустот, объединение их с образованием сквозных трещин.

Изменение ориентации зерен (заштрихованная область на рис. 8.7,в) также способствует изменению скорости переноса вещества и образованию пустот и трещин. Это может иметь место при изменении структуры или состава подложки, на которую нанесена металлическая пленка. В алюминиевых пленках на монокристаллическом кремнии обнаруживается тенденция к образованию структуры, близкой к монокристаллической, в то время как на двуокиси кремния образуется более разупорядоченная пленка,

Рис. 8.7. Схематическое представление структур, которые могут приводить к появлению отказов вследствие электродиффузии:

а — стык границ трех зерен;  
б — изменение размеров зерен;  
в — изменение ориентации пленки



близкая к аморфной. На границе таких областей с большой вероятностью образуются трещины. Подобная же ситуация создается на ступеньке окисла. При этом следует заметить, здесь действуют два процесса, способствующих образованию разрыва токоведущей дорожки. Первый из них обусловлен изменением ориентации зерен на плоской поверхности проводящей пленки и на вертикальной стенке ступеньки, второй процесс связан с уменьшением поперечного сечения проводящей пленки на ступеньке окисла. Последнее вызывает возрастание плотности тока и скорости переноса вещества.

Однако несмотря на то, что исследованию процессов электромиграции посвящено большое количество работ, до настоящего времени приемлемой теоретической модели процесса создать пока не удалось. Дело, по-видимому, в том, что слишком много факторов участвуют в формировании процесса переноса вещества в реальных пленочных структурах, и детальный учет их влияния на современном уровне знаний не представляется возможным. Качественная же картина, рассмотренная выше, может быть дополнена следующим. Явление электропереноса вещества в тонких металлических пленках наблюдается при прохождении постоянного или пульсирующего тока. Ускорению электродиффузии способствуют дефекты металлической пленки в виде царапин, посторонних включений, сужений металлических дорожек, неравномерности по толщине пленки. Все эти факторы создают градиенты плотности тока и температуры, вследствие чего и ускоряется электродиффузия, конечным результатом которой является отказ прибора из-за разрыва металлизации.

Среднюю наработку до отказа из-за обрыва металлизации, вызванной электродиффузией, определяют из следующего выражения [39]:

$$\bar{T} = KJ^{-n} \exp(A_a/kT), \quad (8.4)$$

где  $K$  — константа, зависящая от материала пленки, ее структуры и геометрии;  $J$  — плотность тока,  $A \cdot cm^{-2}$ ;  $n$  — показатель степени, равный 1, когда отказы преимущественно определяются структурой пленки. В случае, когда в формировании отказа доминирующее значение приобретает градиент температуры  $n=3$ ;  $E_a$  — энергия активации процесса электродиффузии, равная 0,5...0,7 эВ. При повышенных плотностях тока верхнее значение для энергии активации предпочтительнее.

В заключение сформулируем некоторые рекомендации по снижению электродиффузии в металлизации.

Прежде всего необходимы меры по снижению плотности тока, проходящего по металлическим дорожкам. Это может быть достигнуто как за счет выбора режима, так и за счет увеличения поперечного сечения проводника, которое предпочтительнее осуществлять, увеличивая ширину дорожек. Положительный эффект оказывают защитные покрытия на проводящих дорожках в виде различных стекол. Препятствуя образованию бугорков и усов, диэлектрические покрытия способствуют снижению вероятности отказа за счет электродиффузии. Существенное внимание должно

быть уделено качеству самой металлизации. Предпочтительны крупнозернистые пленки с ориентацией зерен, способствующей снижению эффекта электродиффузии.

Идеальным решением проблемы исключения электродиффузии было бы создание монокристаллических или аморфных проводящих пленок. Возможность создания металлизации с аморфной структурой более реальна [40]. Например, сплавы никеля с ниобием, молибденом, вольфрамом при определенных условиях образуют аморфные структуры. Основным препятствием к использованию этих сплавов в качестве исходных материалов для металлизации является относительно высокое удельное сопротивление пленок. Однако очень низкие коэффициенты диффузии примесей в таких сплавах уже сейчас делают перспективным их применение в качестве барьерного слоя, препятствующего проникновению кремния в межэлементные соединения при многослойной металлизации.

#### 8.4. МЕХАНИЗМЫ КОРРОЗИИ И ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Проникновение влаги в герметизированный корпус, адсорбция ее на поверхности металлизации через поры и трещины в защитных покрытиях, а также наличие ионных загрязнений на поверхности кристалла способствуют возникновению коррозии металлизации, носящей, как правило, электрохимический характер [41, 42]. При достижении относительной влажности внутри корпуса около 60% создаются благоприятные условия для адсорбирования на поверхности кристалла достаточного количества влаги, обеспечавающего высокую электролитическую проводимость.

Выше было показано, что при производстве приборов имеется большое количество источников загрязнения поверхности кристалла ионами примеси. В первую очередь это загрязнения, попадающие в результате обработки пластин. Далее, это атмосфера, в которой проводится герметизация, конструкционные детали корпуса, клеевые составы, применяемые для посадки кристалла и пластмасса, используемая для герметизации приборов.

Наиболее опасными для алюминия являются ионы натрия, калия и хлора. Из-за амфотерности алюминий может корродировать как в кислой, так и в щелочной среде. Как правило, в большей степени подвергаются коррозии металлические электроды, находящиеся под отрицательным потенциалом (катодная коррозия). Они разрушаются под действием положительно заряженных ионов. Такому же воздействию подвергаются положительно заряженные электроды, взаимодействуя с отрицательными ионами. Однако скорость коррозии положительно заряженных участков ниже, так как на них одновременно с коррозией идет активный процесс образования слоя окиси алюминия, препятствующий дальнейшему его разрушению. При наличии на поверхности кристалла ионов хлора коррозия положительных участков металлизации значительно ускоряется вследствие большой проникающей способности ионов хлора сквозь толстую пленку окиси алюминия.

Скорость коррозии существенно зависит от напряжения, подаваемого на схему. Разность потенциалов 5 В и более достаточна для того, чтобы возникла интенсивная коррозия. Скорость коррозии зависит также от расстояния между электродами, температуры окружающей среды и концентрации ионов примеси на поверхности кристалла. Анализ отказов, возникших в результате коррозии, показывает, что последняя возникает и развивается в первую очередь на границах зерен с образованием сплошных микротрещин, приводящих к обрыву металлизации. Применение фосфорсиликатного стекла с повышенным содержанием фосфора значительно увеличивает коррозию, так как избыточный фосфор, взаимодействуя с водой, образует фосфорную кислоту, которая усиливает коррозию металлизации. Снижение весовой концентрации фосфора в фосфорсиликатном стекле, контактирующем с алюминиевой металлизацией до 5%, увеличивает среднюю наработку до отказа из-за коррозии более чем на три порядка.

Параллельно с механизмами электродиффузии и электрохимической коррозии действует механизм деградации металлических пленок, связанный с окислением алюминия, что ведет к увеличению омического сопротивления токоведущих дорожек. Механизм отказа в этом случае состоит во взаимодействии кислорода с поверхностью зерен в объеме материала. В результате роста окисной пленки на поверхности проводящих дорожек и образования окисных межзеренных прослоек уменьшается объем и эффективное поперечное сечение проводника и, как следствие, увеличивается удельное сопротивление материала. Ухудшение условий прохождения электрического тока по токоведущим дорожкам нарушает температурный режим прибора, приводя к локальным перегревам, усилению электродиффузии и росту вероятности отказа за счет обрыва металлизации.

Кроме того, локальный перегрев токоведущих дорожек способствует укрупнению зерен поликристаллической структуры материала за счет слияния соседних зерен и разрастания их до поперечного размера дорожки [43]. В этих условиях происходит разрыв или отслаивание металлизации из-за больших растягивающих усилий, возникающих в местах разрастания зерен. Действие данного механизма отказов может быть существенно ослаблено за счет снижения плотности тока, протекающего по токоведущим дорожкам, а также добавлением в металлизацию специальных примесей, например иттрия до 1%, повышающих температуру рекристаллизации.

## 8.5. МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ КОНТАКТОВ

Выше указывалось, что в конструкции полупроводниковых приборов и интегральных микросхем широко применяется алюминиевая разводка для создания межэлементных соединений на кристалле и золотая и алюминиевая проволока для создания внутренних соединений между контактными площадками на кристалле и корпусе прибора.

Присоединение внутренних выводов из золотой проволоки к контактными площадкам на кристалле осуществляется термокомпрессионной сваркой при температуре подложки порядка 300°С. В про-



цессе термокомпрессии происходит взаимная диффузия свариваемых металлов, в результате чего и создается прочное соединение в месте контакта. Однако одновременно с диффузией в месте контакта алюминий и золото вступают в химическую реакцию с образованием интерметаллических соединений или интерметаллидов [44, 45, 46]. В зависимости от температуры, давления, концентрации золота и алюминия в месте их контакта могут образоваться следующие соединения:  $\text{AuAl}_2$ ,  $\text{AuAl}$ ,  $\text{Au}_2\text{Al}$ ,  $\text{Au}_5\text{Al}_3$ ,  $\text{Au}_4\text{Al}$ , отличающиеся существенно по

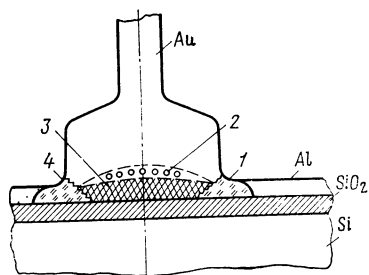


Рис. 8.8. Структура термокомпрессионного контакта

Al—Au

1 —  $\text{Au}_2\text{Al}$ ; 2 —  $\text{Au}_4\text{Al}$ ; 3 —  $\text{Au}_5\text{Al}_3$ ; 4 — микротрещины

удельному сопротивлению, коэффициенту термического расширения и твердости. При температурах выше  $300^\circ\text{C}$  образуется чрезвычайно пористое соединение  $\text{AuAl}_2$ , называемое *пургурной чумой*. Эта разновидность интерметаллида наиболее опасна при формировании термокомпрессионного соединения. На рис. 8.8 представлена структура контакта золотой проволоки с алюминиевой контактной площадкой. Из рисунка следует, что весь контактный объем состоит из различных модификаций интерметаллидов, распространяющихся на всю глубину алюминиевой пленки. По периметру контакта из-за различия в коэффициентах термического расширения интерметаллических фаз образуются микротрещины.

Рассмотрим кинетику роста интерметаллических соединений в контактах [46]. Поскольку основой этих процессов является взаимная объемная диффузия металлов, можно предположить, что толщина слоя интерметаллидов  $d(t)$  растет со временем по параболическому закону:

$$d(t) = K \sqrt{t}, \quad (8.5)$$

где  $K$  — постоянная скорости роста фаз, зависящая от коэффициентов взаимной диффузии контактирующих металлов и свойств образующихся соединений. Энергия активации процесса образования интерметаллических фаз лежит в пределах  $0,69 \dots 1,0$  эВ. С ростом температуры скорость образования интерметаллидов резко увеличивается и при температуре  $430^\circ\text{C}$  достигает  $2,5 \dots 5$   $\text{мкм} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

Процесс понижения прочности металлического контакта за счет образования интерметаллических соединений усугубляется эффектом Киркендалла, суть которого заключается в том, что при контакте различных металлов в месте контакта происходит взаимная диффузия металлов по междоузлиям или вакансиям. При этом в результате различия коэффициентов диффузии в металле с большим коэффициентом диффузии образуются пустоты. В случае контакта золото-алюминий золото имеет больший коэффициент диффузии в алюминий, поэтому на стороне золота образуются пустоты.

Таким образом процессы образования слоя интерметаллидов, пустот и трещин по периметру контакта снижают его прочность, повышают контактное сопротивление, что в конечном счете приводит к постепенному или внезапному отказу контакта, т. е. к его обрыву.

Постепенные отказы, связанные с рассмотренным выше механизмом, выражаются в следующем: из-за роста контактного сопротивления снижается быстродействие интегральных микросхем, растет напряжение насыщения транзисторов в импульсном режиме, растет общее полное сопротивление интегральных микросхем.

Внезапные отказы происходят из-за обрыва контакта при механических нагрузках вследствие повышенной хрупкости контактного соединения. Кроме того, из-за сильного разогрева контакта в местах скопления пустот и трещин возможно перегорание контакта при повышенных плотностях тока.

## **8.6. НЕКОТОРЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ В МЕЖЭЛЕМЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРЕМНИЯ**

В настоящее время широкое применение в конструировании интегральных микросхем с многоуровневой разводкой получили межэлементные соединения на основе поликремния. Наибольшее распространение разводка из поликристаллического кремния получила в МДП-структурах, где замена металлического затвора на поликремниевый позволила существенно повысить качество и быстродействие микросхем за счет так называемого эффекта самосовмещения затвора с областями стока и истока. Суть самосовмещения заключается в том, что сформированный на островке подзатворного окисла поликремниевый затвор является маской при выполнении процесса диффузии в области стока и истока через окна в окисле. Вследствие эффекта самосовмещения обеспечивается точное расположение затвора относительно краев областей стока и истока с незначительным перекрытием за счет продольной диффузии легирующей примеси при создании диффузионных областей стока и истока. Однако при создании одноуровневой и, в особенности, многоуровневой разводки с использованием поликремния возникает ряд специфических эффектов, приводящих к отказам полупроводниковых структур [47, 48]. Механизмы формирования отказов в многослойных структурах из поликремния заключаются в следующем.

Как уже было сказано, исходной структурой, на основе которой создается интегральная микросхема с многоуровневой разводкой, является кремниевая подложка с нанесенными слоями подзатворного и полевого окисла и сформированными затворами и межэлементными соединениями из поликремния (рис. 8.9,а). В результате неоднородности процессов травления боковые стенки поликремниевых затворов имеют определенный наклон, а подзатворный диэлектрик из-за подтравки утоплен под слоем поликремния. Следующей операцией при создании многослойной разводки является процесс выращивания окисного слоя, разделяющего проводящие

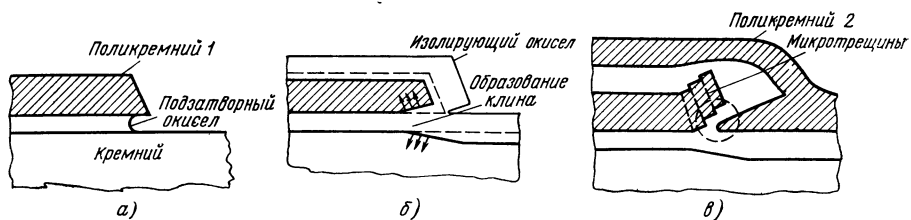


Рис. 8.9. Механизмы отказа многоуровневой поликремниевой разводки: а — исходная структура; б — промежуточный этап наращивания изолирующего окисла; в — двухуровневая поликремниевая разводка. (Пунктирной окружностью показано слабое место)

слои. При окислении происходит углубление окисного слоя в объеме поликремниевого затвора и разводки, а также наращивание внешнего слоя окисла. Одновременно окисление поликремния происходит и на оголенном участке подтравы с углублением окисла в объем кремниевой подложки (рис. 8.9,б,в).

В результате этого процесса на вертикальной стенке поликремния создается нависающий слой двуокси кремния, а в районе подтравы подзатворного окисла образуется внедренный под поликремний окисный клин, в месте залегания которого возникают значительные растягивающие напряжения, приводящие к поднятию нижнего края поликремния с одновременным горизонтальным сдвигом за счет сдвига отдельных микроблоков. Последующий слой поликремния расположится на поверхности изолирующей двуокси кремния с заполнением полости под нависшим краем (рис. 8.9,в). В полученной структуре образуется слабое место, обозначенное на рисунке пунктирной окружностью. В этом месте возможно образование трещин, а соседние проводящие дорожки из поликремния разделены очень тонким слоем окисла, что чревато возникновением пробоя, который приведет к закорачиванию токоведущих дорожек и к выходу из строя всей полупроводниковой структуры.

Рассмотренный механизм полностью определяется конструктивными параметрами и технологическими характеристиками прибора. Посредством оптимального выбора толщины подзатворного окисла, степени легирования поликремния и режима нанесения промежуточного окисного слоя можно добиться результата, при котором до минимума уменьшаются подтрав, образование нависающего окисла на краю поликремниевой дорожки и связанные с этим деформация, образование трещин и слабых мест в районе соприкосновения проводящих слоев.

## 8.7. МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУР

Специфической особенностью планарных приборов является то, что их активные и пассивные компоненты формируются в виде многослойных структур с различными электрофизическими свойствами [49]. Наиболее существенное свойство таких структур —

локализация неконтролируемого заряда в объемах слоев структур и на поверхности их раздела. Величина этих зарядов и их стабильность во многом определяют надежность полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, изготавливаемых по планарной технологии. Схема распределения локализованных зарядов в структуре монокристаллический кремний — двуокись кремния приведена на рис. 8.10 [49].

Здесь представлены:

заряды на поверхности раздела системы кремний — двуокись кремния *A*;

заряды в приповерхностной области двуокиси кремния *B*;

заряды в объеме двуокиси кремния *B*;

заряды на поверхности пленки двуокиси *Г*.

Наличие зарядов на поверхности раздела системы  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  обусловлено тем, что кристаллическая решетка кремния у поверхности раздела обрывается и поверхностные атомы имеют ненасыщенные электронные связи, образующие донорные и акцепторные уровни в запрещенной зоне кремния. Концентрация таких уровней на свободной поверхности кремния лежит в пределах  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . При выращивании на поверхности кремния пленки  $\text{SiO}_2$  плотность поверхностных состояний уменьшается и достигает  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . С изменением положения уровня Ферми заряд, локализующийся на поверхностных энергетических уровнях очень быстро изменяется по величине. Поэтому эти поверхностные состояния и заряды, локализующиеся на них, называют *быстрыми*.

У самой границы двуокиси кремния с кремнием на расстоянии порядка 20 нм в глубь пленки двуокиси кремния располагается фиксированный заряд с плотностью порядка  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Природа этого заряда связана с механизмом образования окисной пленки на поверхности монокристаллического кремния. В процессе окисления кремния на его поверхности образуются монослой  $\text{SiO}_2$  и в дальнейшем реакция окисления кремния идет под этими слоями. При этом для вступления в реакцию атомы кислорода проникают через образовавшиеся окисные слои. Поэтому атомы кремния оказываются в избытке в приповерх-

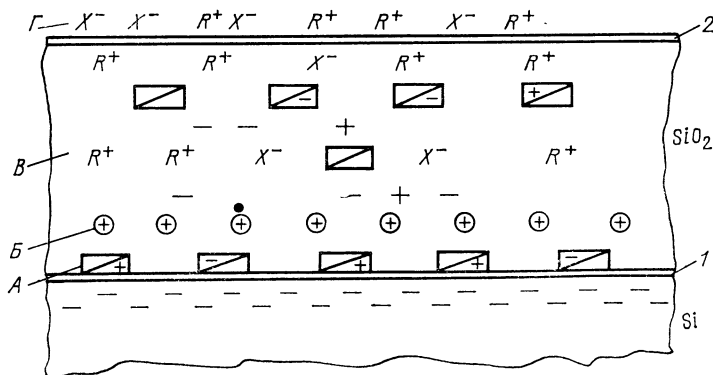


Рис. 8.10. Структура зарядовых состояний в слое оксида на кремнии:

1 — граница раздела кремний—двуокись кремния; 2 — поверхность оксида;  $\pm$  — электроны и дырки;  $\square$  — ловушки электронов и дырок;  $R^+ X^-$  — положительные и отрицательные ионы примесей, загрязнений;  $\oplus$  — ионизированные атомы избыточного кремния в окисле

ностных слоях  $\text{SiO}_2$ . Они, имея незаполненные связи, и создают дополнительный фиксированный заряд, не зависящий от внешних электрических полей и температуры. Поэтому этот вид зарядов носит название *медленных*.

Кратко рассмотрим роль локализации этих зарядов.

Рассмотренные выше структурные дефекты в окисной пленке могут быть местами локализации и одновременно источниками неконтролируемых зарядов в ней. Основные источники таких зарядов: кислородные вакансии в структуре  $\text{SiO}_2$ , ионы водорода, ионы металлов и в особенности высокоподвижные ионы натрия (которые создают преимущественно положительный заряд в слое двуокиси кремния). Все эти заряды под действием электрических полей могут перемещаться в слое двуокиси кремния по направлению к границе раздела с кремнием и обратно. Концентрация зарядов может существенно меняться в зависимости от обработки структур в различных средах при изготовлении. Значительные изменения в местоположении зарядов и их концентрации происходят при эксплуатации приборов (в том числе, в условиях радиационных воздействий).

Образование поверхностных зарядов связано с различными загрязнениями, адсорбированными на поверхности слоя двуокиси кремния. Их особенностью является высокая подвижность, позволяющая зарядам перемещаться на большие расстояния по поверхности окисла под действием приложенного напряжения. При повышении температуры активных областей прибора и окружающей среды в результате десорбции загрязнений концентрация поверхностных зарядов может изменяться в значительных пределах.

Все рассмотренные выше заряды, взаимодействуя с зарядами активных областей полупроводниковых структур, искажают конфигурацию  $p$ - $n$  переходов, вызывают образование инверсионных слоев, что в конечном счете приводит к нестабильности электрических параметров приборов, к постепенным и внезапным отказам.

Рассмотрим структуру с  $p$ - $n$  переходом, защищенную окисной пленкой (рис. 8.11,а). Предположим, что заряды (в данном слу-

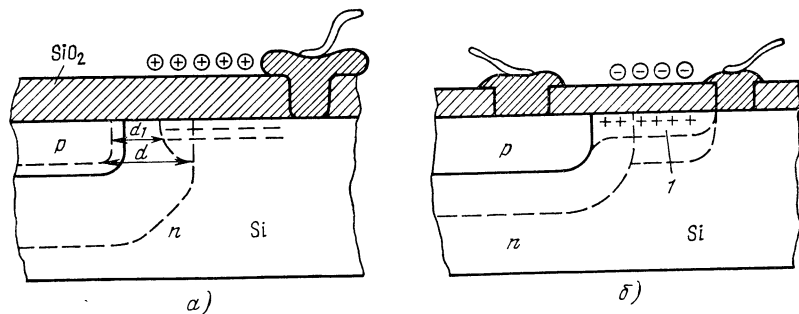


Рис. 8.11. Взаимодействие зарядов на поверхности окисла с зарядами в активных областях полупроводниковой структуры:

$d$  — ширина  $p$ - $n$  перехода;  $\oplus$  — положительный заряд в окисле; — — электроны у поверхности кремния;  $\ominus$  — отрицательный заряд в окисле; + — дырки у поверхности кремния;  $l$  — инверсный  $p$ -слой

чае положительные) в основном сосредоточены на поверхности окисла у одного из внешних выводов. Избыточный положительный заряд на поверхности способствует обогащению носителями слоя полупроводника под окисной пленкой.

Локальное увеличение концентрации электронов приводит к уменьшению ширины  $p$ - $n$  перехода в месте с повышенной концентрацией носителей. В структуре с обогащенной носителями приповерхностной областью при приложении обратного напряжения возрастает напряженность электрического поля в месте сужения  $p$ - $n$  перехода, что приводит к росту обратного тока через  $p$ - $n$  переход и поверхностному пробую.

В случае накопления отрицательных зарядов на поверхности окисла (рис. 8.11,б) приповерхностная область полупроводника обогащается дырками. В зависимости от величины заряда в окисле и ряда других факторов обогащение приповерхностной области полупроводника дырками может быть столь значительным, что наступит инверсия проводимости полупроводника. Область, непосредственно примыкающая к  $p$ - $n$  переходу, приобретает дырочную проводимость. В связи с этим площадь  $p$ - $n$  перехода существенно увеличится, что в режиме обратного смещения приводит к значительному росту обратного тока и снижению пробивного напряжения. В случае распространения инверсионного слоя до места расположения омического контакта происходит закорачивание  $p$ - $n$  перехода через инверсионный канал.

Размеры инверсионных слоев и скорость их образования зависят от величины приложенного к электродам напряжения и скорости перемещения ионов по поверхности окисла [50]. Изменение потенциала в различных точках поверхности окисла во времени определяется выражением

$$U = U_3 \operatorname{erfc} \frac{x}{2} \sqrt{\frac{R_0 C_0}{t}}, \quad (8.6)$$

где  $t$  — время;  $x$  — расстояние до электрода;  $U_3$  — приложенное напряжение;  $R_0$  — поверхностное сопротивление окисла;  $C_0$  — поверхностная емкость;  $\operatorname{erfc}$  — функция дополнения интеграла ошибок до единицы.

Динамика образования инверсионного слоя вследствие накопления и перемещения зарядов на поверхности окисла показана на рис. 8.12. Скорость образования инверсионных слоев возрастает с ростом температуры и влажности. Энергия активации процесса лежит в пределах 0,5 ... 1,0 эВ.

Перераспределение зарядов в окисле и на его поверхности зависит от знака напряжения, приложенного к полупроводниковой структуре. На рис. 8.13 представлена динамика перераспределения зарядов и их взаимодействие с полупроводниковой структурой.

В отсутствие электрического поля заряды в окисле расположены произвольно (рис. 8.13,а). При приложении напряжения смещения к электродам полупроводниковой структуры электрическое

поле в  $p$ - $n$  переходе способствует разделению подвижных зарядов в окисле. Положительные заряды сосредотачиваются над  $p$ -областью у положительного электрода (рис. 8.13,б). В результате над  $p$ - и  $n$ -областями образуются локальные участки с инверсной проводимостью и полупроводниковая диодная структура шунтируется у поверхности встречно включенным паразитным  $p$ - $n$  переходом (рис. 8.13,в). Данный механизм ответственен за нестабильность обратных токов  $p$ - $n$  переходов во времени. При значительной инверсии приповерхностных областей диодной структуры возможна потеря выпрямляющих свойств  $p$ - $n$  перехода.

Подвижные заряды, находящиеся в объеме окисла также влияют на стабильность характеристик приборов. Предполагается, что в нейтральном состоянии структуры ионы загрязнений, являющиеся носителями зарядов, равномерно распределены в объеме окисла. Под действием этих зарядов в приповерхностном слое кремния индуцируется заряд, противоположный по знаку заряду в окисле. Индуцированный заряд компенсирует заряд в окисле и поэтому пороговое напряжение структуры не изменяется. В  $p$ -канальных структурах при приложении отрицательного напряжения положительные ионы загрязнений перемещаются под действием электри-

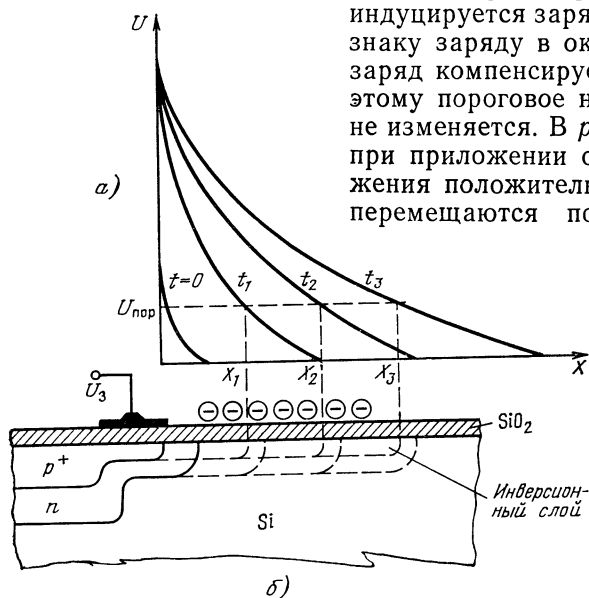


Рис. 8.12. Динамика образования инверсионного слоя:

а — распределение потенциала по поверхности во времени; б — образование инверсионного слоя из-за накопления зарядов на поверхности;  $U_{пор}$  — пороговое напряжение

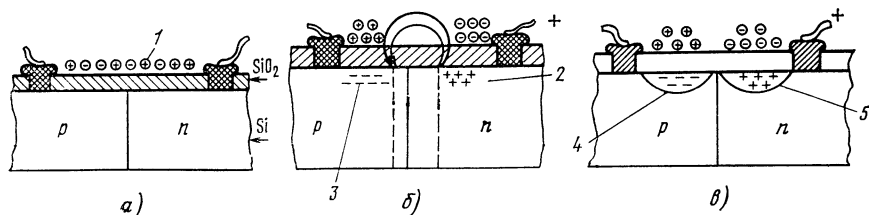


Рис. 8.13. Динамика перераспределения зарядов в окисле под воздействием электрического поля и образование инверсионных слоев:

1 — заряды на поверхности окисла; 2, 3 — дырки и электроны в приповерхностной области кремния; 4, 5 — инверсионные слои  $p$ - и  $n$ -типа у поверхности кремния

ческого поля к верхней плоскости затвора, что приводит к уменьшению индуцированного заряда в кремнии и, следовательно, к ослаблению его компенсирующего воздействия. Окончательным результатом этого процесса является накопление положительных зарядов под затвором и снижение порогового напряжения.

В  $n$ -канальных структурах, при положительном смещении ионы загрязнений движутся к поверхности раздела системы кремний—двуокись кремния. Из-за накопления заряда у поверхности раздела происходит увеличение индуцированного заряда в приповерхностной области кремния. За счет этого снижается пороговое напряжение структуры. Продольная составляющая электрического поля в  $p$ -структуре направлена в сторону от затвора, что способствует уходу ионов за пределы подзатворной области и, значит, снижению чувствительности  $p$ -канальной структуры к накоплению зарядов под затвором. В  $n$ -канальной структуре продольное электрическое поле направлено к затвору, что способствует притоку ионов из участков, прилегающих к подзатворной области. Вследствие этого пороговое напряжение в  $n$ -канальной структуре изменяется значительно, чем в  $p$ -канальной.

#### 8.8. МЕХАНИЗМ ПРОБОЯ В ТОНКОМ ОКИСЛЕ И ЭФФЕКТ ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ

В современных МДП-структурах толщина подзатворного окисла достигла 20 нм и менее. При дальнейшем масштабировании приборов с длиной канала до 0,25 мкм толщина подзатворного окисла, по-видимому, достигнет 5 нм, что приведет к резкому возрастанию электрического поля в диэлектрике до уровня, при котором наступит внутренний пробой. Для окисных тонких пленок толщиной около 10 нм предельное напряжение пробоя составляет 8...10 мВ [51, 52]. Наиболее распространенной моделью внутреннего пробоя является модель ударной ионизации — рекомбинации. Суть ее заключается в следующем.

Под действием электрического поля свободный электрон при движении в окисле достаточной толщины на длине свободного пробега успевает получить энергию для ударной ионизации атомов матрицы и создания электронно-дырочных пар. Вследствие большей подвижности электроны опережают в движении дырки, оставляя позади себя облако положительно заряженных носителей заряда, которое создает дополнительное ускоряющее поле на пути следующей порции электронов. Таким образом, в системе ударной ионизации появляется положительная обратная связь, способствующая лавинному размножению носителей и наступлению состояния пробоя. Большая вероятность возникновения такой же ситуации в системах многослойной металлизации. Толщина слоев изоляции в этих системах существенно больше, чем толщина подзатворного диэлектрика. Однако качество этих слоев много ниже главным образом из-за неровностей поверхности металлических и поликремниевых дорожек. Поэтому в местах сужений диэлектрических слоев и на остриях выступов могут возникать повышенные напряженности электрического поля, приводящие к пробоям.



Следующим физическим механизмом, вызываемым ростом электрического поля в тонких диэлектрических слоях и приборах при масштабировании, является механизм инжекции горячих электронов из кремния в окисный слой. Горячие электроны — это высокоэнергетические носители, образующиеся при лавинном пробое  $p$ - $n$  перехода или в области повышенного электрического поля вблизи стока МДП-транзистора с коротким каналом.

Инжекция и захват горячих носителей ответственны за деградацию коэффициента усиления биполярных транзисторов. Для МДП-транзисторов при масштабировании их геометрических размеров до 1 мкм и менее захват горячих носителей является определяющим фактором, имеющим фундаментальное значение в деле обеспечения стабильности работы приборов.

Инжекция горячих носителей может идти несколькими путями, в том числе за счет возникновения горячих электронов в канале и в объеме полупроводника. Горячие электроны в канале — это электроны, идущие от истока к стоку. В режиме насыщения в  $n$ -канальном МДП-транзисторе создается большое электрическое поле вблизи стока. Под его воздействием электроны при прохождении от истока к стоку приобретают значительную энергию. В результате рассеяния на атомах решетки создается поток электронов со случайным распределением скоростей, содержащий определенную долю электронов, способных преодолеть потенциальный барьер на границе раздела системы кремний — двуокись кремния и проникнуть в подзатворный окисел. Установлено, что ток горячих носителей имеет экспоненциальную зависимость от напряжения на затворе.

Электрическое поле в окисле противодействует инжекции горячих электронов, поэтому горячие электроны сосредотачиваются в непосредственной близости к точке перекрытия канала, расположенного у стока. При низких температурах эффект инжекции горячих электронов значительно выше, так как рассеяние на колебаниях решетки снижается.

Другим источником горячих электронов является термогенерация носителей в объеме полупроводника. Электроны подложки  $p$ -типа ускоряются положительным напряжением на затворе, перемещаясь в пределах обедненной области, преодолевают потенциальный барьер на границе раздела системы кремний — двуокись кремния.

Третьим источником горячих электронов может быть ударная ионизация и генерация электронно-дырочных пар. Если ударная ионизация происходит в результате действия электронов в канале, то в этом случае наиболее вероятна инжекция в окисел дырок, движущихся по направлению электрического поля. С другой стороны, электронно-дырочные пары генерируются дырочным током подложки и ускоренные электроны могут инжектироваться в окисел так же, как и электроны, возникающие при термогенерации.

При инжекции горячих электронов в подзатворный окисел в среднем один из  $10^5$  инжектированных электронов захватывается на ловушках. Остальной поток горячих электронов достигает затвора и собирается на нем. В связи с тем, что в основном горячие электроны возникают около стока, наиболее чувствительной характеристикой к этому механизму отказа является обратная ветвь вольт-амперной характеристики транзистора за счет увеличения порогового напряжения. В частности, в  $n$ -канальных МДП-прибо-

рах это проявляется в виде значительного положительного сдвига обратной ветви вольт-амперной характеристики.

Одновременно с изменением порогового напряжения под действием горячих электронов происходит деградация проводимости канала, которая вызывается неоднородным распределением ловушек в окисле, захвативших электроны, или образованием новых заряженных состояний на поверхности раздела системы кремний—двуокись кремния.

### 8.9. МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ И ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

Выше было показано, что реакция приборов на механические нагрузки определяется прочностными и резонансными параметрами их конструктивных элементов, характеризующимися собственной резонансной частотой колебаний  $\omega_0$ , максимальной амплитудой колебаний в условиях резонанса  $X_m = f(F_0, Q, K)$ , технической прочностью материала конструкции  $\sigma_p$ , определяющей максимальное напряжение, при котором наступает его разрушение.

Повреждение конструктивных элементов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем при механических воздействиях может произойти при нагрузках, вызывающих напряжения, превышающие техническую прочность материалов. Такое повреждение может произойти при воздействии вибрации и удара, особенно в условиях резонанса. Однако повреждение конструктивных элементов может наступить при циклических нагружениях, когда напряжения в элементах не превышают технической прочности материалов конструкции. Например, поломка внешних выводов корпусов приборов при многократных изгибах происходит в результате накопления повреждений, так как при одиночном изгибе предел технической прочности материала вывода не превышает.

Для случая статической нагрузки до недавнего времени общепринятые классические представления о процессах разрушения материалов при механических нагрузках исходили из положения о том, что при напряжениях, меньших предела упругости, пластическая деформация не развивается и разрушение тела, подвергающегося механической нагрузке, происходит мгновенно при напряжениях, достигающих предела прочности.

В последнее время широкое распространение получил другой подход [54, 55], согласно которому разрушение материала рассматривается как постепенный кинетический термоактивационный процесс, возникающий в материале с момента приложения к нему нагрузки меньше критической и развивающийся в нем во времени с накоплением дефектов вплоть до разрушения. Время  $t_p$ , необходимое для развития процесса разрушения от момента нагружения тела до наступления разрыва, называется *временной прочностью или долговечностью материала*. Многочисленными экспериментальными исследованиями для многих твердых тел подтверждена следующая

математическая зависимость среднего времени до разрушения  $t_p$  от приложенного напряжения  $\sigma$  и температуры  $T$ :

$$t_p(\sigma, T) = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}, \quad (8.7)$$

где  $\tau_0$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  — постоянные величины, зависящие от природы и структуры материала, физическая сущность которых станет ясной из последующего изложения;  $k$  — постоянная Больцмана.

Логарифмируя выражение (8.7), получим

$$\ln t_p = \ln \tau_0 + \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}. \quad (8.8)$$

На рис. 8.14 представлена зависимость  $\ln t_p$  от  $\sigma$ . Из рисунка следует, что эта зависимость  $t_p = f(\sigma, T)$  в избранных координатах выражается прямыми линиями, сходящимися в одной точке при значениях  $\tau_0 \approx 10^{-12} \dots 10^{-13}$  с. Для этой точки справедливо равенство  $\gamma\sigma = U_0$ .

С ростом температуры временная прочность уменьшается, и тем сильнее, чем выше температура. Эксперименты показали, что рассмотренная зависимость справедлива практически для всех материалов. При этом установлено, что для металлов  $U_0$  по порядку величины хорошо совпадает с энергией сублимации, а для полимеров — с энергией термической деструкции,  $\tau_0$  же близка к периоду тепловых колебаний атомов в твердых телах.

Полученные данные дают основание представить физический механизм этого процесса следующим образом. Атомы твердого тела совершают колебания с периодом  $\tau_0 \approx 10^{-12} \dots 10^{-13}$  с.

Под действием тепловых флуктуаций время от времени происходит разрыв химических связей. Вероятность этого зависит от энергии активации  $U$  и температуры  $T$ . В отсутствие внешнего напряжения  $\sigma$  энергия, необходимая для разрыва связей, очевидно, равна энергии самой связи. Поэтому высота активационного барьера  $U_0$ , полученная из опытов по механическому разрушению твердых тел, оказалась равной теплоте сублимации для металлов и энергии термической деструкции для полимеров.

Напряжение  $\sigma$ , созданное в теле, уменьшает высоту активационного барьера на величину  $\gamma\sigma$ , тем самым увеличивает вероятность разрыва этих связей, а следовательно, и число их в единице объема. Образование субмикроскопических областей с разорванными связями и их слияние друг с другом приводит к зарождению и развитию трещин. Рассмотрим динамику развития трещин, предложенную Гриффитсом [55].

Возьмем образец в форме тонкой прямоугольной пластины  $A \times B$ , к которому приложено растягивающее напряжение  $\sigma$  (рис. 8.15, а). Плотность упругой

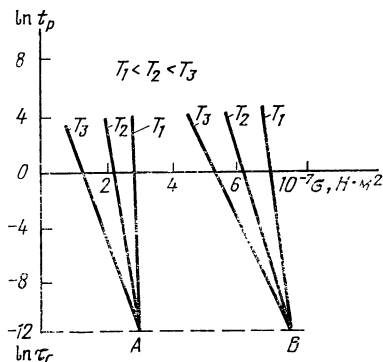


Рис. 8.14. Зависимость временной прочности материалов А и В от напряжения растяжения при различных температурах

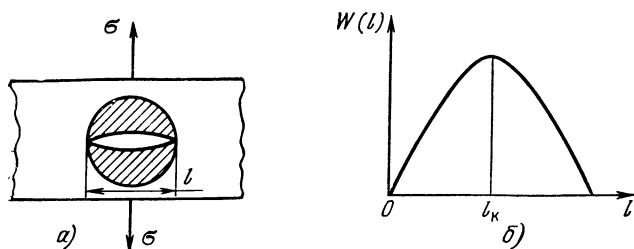


Рис. 8.15. Динамика образования микротрещины в образце, подвергающемся растяжению

энергии в нем равна  $\sigma^2/(2E)$ , где  $E$  — модуль упругости. Предположим, что в образце образовалась микротрещина длиной  $l$ , простирающаяся на всю его толщину. Появление трещины приводит к образованию в образце свободной поверхности  $S_{\text{своб}} \approx 2la$  и к увеличению его энергии на величину

$$\Delta U_1 = 2la\alpha, \quad (8.9)$$

где  $\alpha$  — удельная свободная поверхностная энергия образца.

С другой стороны, образец при возникновении трещины разгружается от упругих напряжений в объеме  $\Delta V \approx l^2a$  на величину

$$\Delta U_2 = l^2a \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (8.10)$$

Общее изменение энергии образца, связанное с возникновением в нем трещины,

$$W(l) = 2la\alpha - l^2a \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (8.11)$$

График зависимости (8.11) имеет вид кривой с максимумом (рис. 8.15, б). Приравняв нулю производную  $\frac{dW(l)}{dl}$  и обозначая через  $l_k$  длину трещины, соответствующую этому состоянию, получим

$$\frac{dW(l)}{dl} = 2a\alpha - l_k \frac{\sigma^2}{E} = 0, \quad l_k = \frac{2a\alpha}{\sigma^2}. \quad (8.12)$$

Из рис. 8.15 следует, что внутренняя энергия образца при растяжении увеличивается до достижения критической длины микротрещины  $l_k$ . После чего рост микротрещины происходит самопроизвольно, приводя к разрушению образца. Из (8.9) следует, что чем выше растягивающее напряжение  $\sigma$ , тем сильнее понижается активационный барьер  $U_0 = \gamma\sigma$ , тем быстрее микротрещины в образце достигают критической длины. Реальные значения  $l_k$  для металлов лежат в пределах единиц микрометров.

## 8.10. НЕКОТОРЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ ПРИ РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Механизмы развития отказов, связанные с ионизационными эффектами и накоплением необратимых дефектов в объеме полупроводникового кристалла, фактически были рассмотрены в гл. 5. Однако изложенный выше материал нуждается в следующих дополнениях.

В настоящее время принято оценивать радиационную стойкость приборов по степени изменения основных электрических па-

Рис. 8.16. Изохронный отжиг диодных структур после нейтронного облучения

раметров при определенном интегральном потоке излучения с установлением границ, в пределах которых прибор считается годным для дальнейшей эксплуатации после радиационного воздействия. При высоких интенсивностях излучения допустимая доза облучения может быть достигнута за достаточно короткое время. При

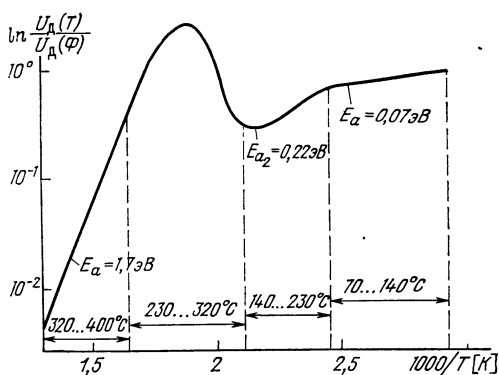
дальнейшей эксплуатации прибора в обычных условиях предполагается, что он полностью сохраняет свою работоспособность. Однако на самом деле к дефектам и несовершенствам, внесенным в приборы при их изготовлении, добавились радиационные дефекты, вследствие чего термодинамическая неустойчивость прибора возросла. Радиационные дефекты, взаимодействуя между собой и с имевшимися в приборах несовершенствами, способствуют возникновению неблагоприятных ситуаций, приводящих к отказам. Возможность перестройки дефектов подтверждается экспериментами по их отжигу. На рис. 8.16 представлена кривая восстановления прямого падения напряжения при изохронном отжиге диодной структуры, подвергшейся нейтронному облучению [56]. Кривая построена в полулогарифмическом масштабе. По оси ординат отложен логарифм величины относительного восстановления прямого падения напряжения диодной структуры, по оси абсцисс значения абсолютной температуры отжига.

Из рисунка следует, что кривая восстановления прямого падения напряжения состоит из прямолинейных участков с различным наклоном. Кинетику восстановления прямого падения напряжения на этих участках можно представить экспоненциальной зависимостью вида

$$\frac{U_D(T)}{U_D(\Phi)} = K_1 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (8.13)$$

где  $U_D(T)$  — прямое падение напряжения диода после отжига при температуре  $T$ ;  $U_D(\Phi)$  — прямое падение напряжения диода после облучения;  $K_1$  — конструктивная константа;  $E_a$  — энергия активации отжига дефектов в данном диапазоне температур. Как видно из рис. 8.16, с ростом температуры отжига энергия активации возрастает, что свидетельствует об отжиге более крупных дефектов.

Однако немонотонный ход кривой восстановления свидетельствует о том, что в процессе отжига дефекты перестраиваются, воз-



можно, объединяются, в результате чего прямое падение напряжения не уменьшается, а наоборот, увеличивается.

Подобная ситуация возможна при эксплуатации приборов после облучения дозой, при которой прибор считается исправным. Флуктуации в режимах применения могут вызвать перестройку дефектов и наступление отказа значительно быстрее, чем это могло быть в приборах, не подвергавшихся облучению.

В 1978 г. в интегральных микросхемах памяти большой емкости (более 4 Кбит) было обнаружено явление, названное «мягкой ошибкой» или сбоем, которое заключается в изменении состояния элементов памяти без образования устойчивых дефектов в структуре прибора [57, 58]. При этом состояние элемента памяти (1 или 0) восстанавливается в динамическом ЗУ при очередном цикле регенерации и в статическом ЗУ при перезаписи информации. Было показано, что вероятность возникновения сбоя в данной ячейке не зависит от предыдущего состояния ячейки, т. е. от того, возникал или нет сбой в данной ячейке ранее, что говорит о том, что в элементе, в котором возник сбой, остаточные дефекты после восстановления информации отсутствуют.

В настоящее время установлено, что более 90% сбоев, типа «мягкая ошибка» в устройствах памяти относительно большой емкости вызываются  $\alpha$ -частицами (ядрами гелия). Оказалось, что в керамических деталях корпусов, пластмассе, стекле, золоте может содержаться определенное количество радиоактивных элементов, таких как:  $U_{238}$ ,  $U_{235}$ ,  $Th_{232}$ ,  $Zr_{91}$ , способных в результате  $\alpha$ -распада излучать  $\alpha$ -частицы с интенсивностью от 0,004 до 45 см<sup>-2</sup>·ч с энергией около 8...9 МэВ.

При такой энергии  $\alpha$ -частицы, взаимодействуя с кремнием, входят в материал со скоростью  $v_{\alpha} \geq 0,05c$  ( $c$  — скорость света). Имея достаточно большую длину свободного пробега, они проникают на всю глубину активных областей полупроводниковой структуры. Взаимодействуя с атомами кристаллической решетки кремния,  $\alpha$ -частицы теряют энергию на единице длины пробега примерно со скоростью  $\frac{dE}{dx} \approx 150 \frac{\text{кэВ}}{\text{мкм}}$  с образованием в среднем одной пары электрон-дырка на каждые 3,6 эВ потерянной энергии.

Электронно-дырочные пары генерируются вдоль трека  $\alpha$ -частицы на расстоянии 2...3 мкм. В течение нескольких пикосекунд генерируется около  $2,5 \cdot 10^6$  электронно-дырочных пар.

Предложена следующая физическая модель механизма возникновения сбоев в интегральных микросхемах памяти большой емкости на МДП-структурах (рис. 8.17).

Согласно этой модели ячейки памяти МДП ЗУ могут быть представлены потенциальными ямами, находящимися под шинами записи и считывания, которые в состоянии логического 0 заполнены электронами, а в состоянии логической 1 — пусты.

При попадании в элемент памяти  $\alpha$ -частицы в нем генерируются электронно-дырочные пары. При этом электроны захватываются потенциальной ямой, а

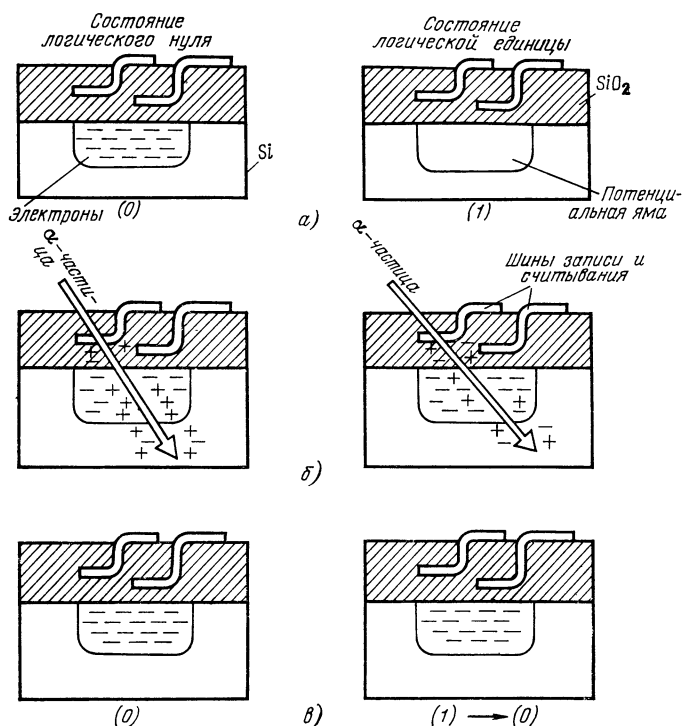


Рис. 8.17. Механизм возникновения «мягкой ошибки» в элементах памяти:  
 а — элемент памяти с записью 0 и 1; б — воздействие  $\alpha$ -частицы на элементы памяти; в — элемент из состояния 1 переключится в состояние 0

дырки диффундируют вглубь кристалла и рекомбинируют в объеме и на тыловом контакте. При этом в элементе памяти в состоянии 0 ничего не произойдет, так как он уже был заполнен электронами. В элементе памяти в состоянии 1 электроны отсутствовали. При определенной энергии  $\alpha$ -частицы в элементе генерируется достаточное количество электронов для переключения его в состояние логического нуля. Таким образом, сформировалась мягкая ошибка, которая может быть воспринята при выборке информации из этой ячейки в промежутках между регенерациями.

Исследования показали, что частота появления сбоев и чувствительность элементов памяти к воздействию  $\alpha$ -частиц зависят от величины заряда, накапливаемого в элементах памяти, при записи информации.

В зависимости от размеров элементов и режимов работы в них для обеспечения переключения в состояние 0 или 1 должны накапливаться заряды, содержащие от 300 000 до 3 000 000 электронов или от 50 до 500 фКл. Величина такого заряда называется критической и обозначается  $Q_{кр}$ . Исследования показали, что при размерах ячеек, обеспечивающих накопление заряда с числом

электронов, превышающим значение порядка  $2,5 \cdot 10^6$ , мягкие ошибки практически не возникают. При числе электронов в ячейке порядка 50 000 и менее появляется почти 100%-ная вероятность сбоя даже при потоке частиц  $\Phi_\alpha \approx 0,01 \text{ см}^{-2} \cdot \text{ч}$ . При этом для ЗУ емкостью 64 Кбит при  $Q_{\text{кр}} < 50 \text{ фКл}$  сбои доминируют в ячейках памяти, при  $Q_{\text{кр}} > 50 \text{ фКл}$  — в разрядных шинах.

Следует отметить, что с ростом степени интеграции микросхем памяти геометрические размеры элементов схем уменьшаются до микронных и менее, что в свою очередь ведет к снижению заряда, накапливаемого в элементах памяти при записи информации. Последнее обстоятельство вносит определенные ограничения в уменьшение геометрических размеров приборов и требует применения специальных мер по очистке исходных материалов от радиоактивных примесей, защите активных областей полупроводниковых структур.

В биполярных транзисторах и интегральных микросхемах воздействие  $\alpha$ -частиц приводит к возникновению в  $p$ - $n$  переходах высоких уровней ионизационных токов, связанных с тем, что концентрация неравновесных электронно-дырочных пар, создаваемых вдоль трека  $\alpha$ -частицы, лежит в пределах  $10^{18} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , что намного превышает типичные значения концентрации основных носителей в эпитаксиальных слоях и подложке. Неравновесное распределение зарядов при ионизации способствует образованию нестационарных электрических полей, влияющих на процесс собирания неравновесных носителей заряда  $p$ - $n$  перехода [59]. Этот механизм получил название эффекта образования воронки заряда (рис. 8.18). Суть этого механизма заключается в следующем.

При пересечении треком  $\alpha$ -частицы  $p$ - $n$  перехода заряд, генерируемый в области трека, компенсирует пространственный заряд  $p$ - $n$  перехода на участке, пересеканом треком (рис. 8.18, а, б). Приложенное к  $p$ - $n$  переходу напряжение  $U_0$  падает на эффективной длине трека  $L_\alpha$  с соответствующим искажением эквипотенциальных линий в виде воронки (рис. 8.18, в). Под действием электрического

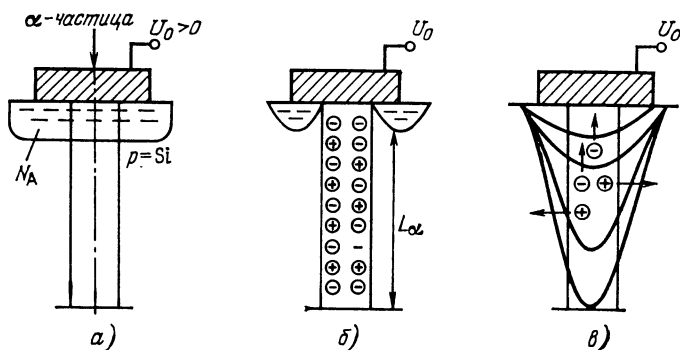


Рис. 8.18. Эффект образования воронки заряда:

а — образование трека под воздействием  $\alpha$ -частицы; б — компенсация пространственного заряда  $p$ - $n$  перехода; в — движение неравновесных носителей под действием нестационарного электрического поля



поля в воронке начинают протекать процессы пространственного разделения электронов и дырок. За счет выталкивающего электрического поля основные носители заряда выбрасываются в подложку в радиальном направлении. Неосновные носители под действием продольной составляющей электрического поля  $E_c = U_0/L_{\alpha}$  устремляются к поверхности  $p$ - $n$  перехода. Особенностью биполярных интегральных микросхем и комплементарных МДП-структур является наличие в них паразитных  $n$ - $p$ - $p$ - (тиристорных) структур. Ионизационные токи, возникающие в  $p$ - $n$  переходах, под действием высокоэнергетических частиц в определенных условиях приводят к эффекту защелкивания, при котором паразитный тиристор, имеющийся в схеме, переключается в проводящее состояние. В результате действия эффекта защелкивания схема прекращает функционировать по прямому назначению.

Для восстановления работоспособности схемы необходимо отключать питание, чтобы привести паразитную тиристорную структуру в первоначальное состояние. В худшем случае тиристорная структура шунтирует источник питания, в результате чего возникает значительная перегрузка по току, что чревато тепловым пробоем и отказом схемы.

Комплементарные схемы на основе МДП-технологии наиболее чувствительны к эффекту защелкивания, так как в логической МДП-ячейке с предохранительными диодами потенциально имеется две  $p$ - $n$ - $p$ -структуры, способные под действием избыточного ионизационного тока переключаться в проводящее состояние (рис. 8.19). Одна из них формируется  $p^+$ -областью охранного диода, подложкой, областью  $p$ -кармана и истоком  $n$ -канального транзистора. Другая тиристорная структура образуется истоком  $p$ -канального транзистора,  $n$ -подложкой,  $p$ -карманом и истоком  $n$ -канального транзистора.

Наиболее эффективными методами борьбы с возникновением мягких ошибок и эффектом защелкивания тиристорных структур являются конструктивно-технологические. Так, применение окисной изоляции, сапфировых и других диэлектрических подложек для создания интегральных микросхем с гальванически развязанными активными структурами препятствует образованию паразитных тиристоров и исключению эффекта защелкивания при воздействии  $\alpha$ -частиц и других ионизирующих излучений. Технологические методы, уменьшающие величину ионизационных токов, основаны на применении мер, способствующих уменьшению объемов, в которых генерируются и собираются избыточные носители. Это достигается применением встроенного электрического поля, препятствующего движению электронов к накопительному конденсатору в ячейке памяти. Встроенное поле образу-

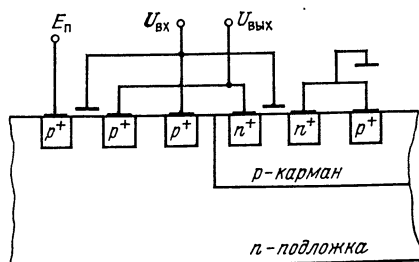


Рис. 8.19. Базовая ячейка комплементарной логической схемы

ется при создании в глубине структуры скрытого слоя с повышенной концентрацией примеси [60]. Этой же цели служат сетки скрытых слоев, создаваемых имплантацией в кремниевой подложке. При наличии контакта к скрытым слоям собирающиеся на них электроны отводятся на землю или в источник питания. В случае плавающей сетки собираемые на них избыточные электроны рассредоточиваются на большой площади, поэтому заряд, локализуемый в том или том узле запоминания, не достигает критической величины. Положительный результат дает применение исходных пластин с использованием эффекта внутреннего геттерирования, при котором у поверхности пластины образуется зона, свободная от несовершенств. В этой зоне формируются активные области полупроводниковой структуры. Посредством специальной обработки все дефекты перемещаются в глубь пластины, в результате чего резко снижается объемное время жизни неравновесных носителей. Подобная структура пластины способствует быстрому рассасыванию ионизационных токов, тем самым резкому снижению вероятности возникновения мягкой ошибки [61].

## ГЛАВА 9

### ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ И СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ

#### 9.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИБОРОВ

Выше было показано, что технологический процесс изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем состоит из множества операций. Большинство из них представляет собой очень тонкие и сложные физико-химические процессы обработки исходного полупроводника на атомно-молекулярном уровне. Неизбежное наличие несовершенств и дефектов материалов, в большинстве своем не поддающихся входному контролю, перегруппировка дефектов и возникновение новых при выполнении большого разнообразия промежуточных операций придают технологическому процессу изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем вероятностно-статистический характер.

Получение на заключительных операциях приемлемого процента выхода годных приборов требует того, чтобы вероятность качественной обработки элементов прибора на промежуточных операциях была близка к единице. В противном случае вероятностей изготовления годного прибора, равная произведению вероятностей качественной обработки на промежуточных операциях (при большом числе операций), будет практически равняться нулю.

Требование высокой вероятности качественной обработки на промежуточных операциях обеспечивается точностью поддержания технологических режимов на оптимальном уровне и контролем

результатов обработки на каждой операции. В результате контроля из полуфабрикатов удаляются элементы с явно выраженными дефектами. Тем самым обеспечивается поступление на следующую операцию 100% годных изделий. Соответствующему контролю подвергаются и полностью изготовленные приборы. Однако в процессе этого контроля количественные характеристики надежности не выявляются. Общий объем информации о качестве и надежности готовых изделий можно получить следующими способами:

проведением специальных испытаний изделий в процессе производства и в составе аппаратуры на соответствие требованиям нормативно-технической документации, в том числе и требованиям по надежности. Для осуществления испытаний необходима разработка методов и средств испытаний, обеспечивающих высокую достоверность результатов и объективное отражение надежности свойств изделий;

точной фиксацией условий и внешних воздействий при производстве и эксплуатации приборов в составе аппаратуры и изучением процессов воздействия этих условий на их надежностные характеристики. Особую важность в данном случае представляет распознавание отказов, классификация их по видам и определение их связи с теми или иными внешними факторами;

изучением процессов и явлений, протекающих в исходных материалах, конструктивных элементах и готовых приборах в целом при воздействии различных внешних факторов. Результатом изучения является распознавание механизмов развития отказов и выработка корректирующих мероприятий конструктивного и технологического плана и специальных мер защиты от воздействий внешних факторов.

Таким образом, входной контроль материалов, межоперационный контроль полуфабрикатов и сборочных единиц, контроль готовых приборов направлены на поддержание стабильности всего технологического процесса их изготовления, обеспечивающего поставку потребителям приборов, обладающих определенным уровнем качества. Испытания в процессе производства, тщательное изучение поведения в процессе эксплуатации направлены на подтверждение заданного уровня качества и надежности приборов и на совершенствование их конструкции и технологического процесса изготовления.

## **9.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ**

Испытания по их последствиям делятся на разрушающие и не разрушающие. При разрушающих испытаниях приборы не сохраняют неизменными своих качественных характеристик. В результате этих испытаний имеет место либо полная потеря свойств или физическое разрушение прибора (испытания на хранение, грибоустойчивость, радиационную стойкость и др.), или частичное ухудшение качества, или частичное расходование ресурса (испытания

на механическую прочность и устойчивость, на долговечность, тепло, влагу, термоциклирование и т. д.).

При неразрушающих испытаниях не происходит изменения качества, параметров и характеристик прибора. Данные испытания позволяют по косвенным (вторичным) признакам обнаруживать скрытые дефекты либо такие особенности прибора, которые влекут за собой потенциальную ненадежность изделий.

Приведем некоторые термины и определения, изложенные в ГОСТ 16504—74 «Качество продукции, контроль и испытания», которые нам понадобятся при дальнейшем изложении данного раздела.

<i>Испытания</i>	— экспериментальное определение количественных свойств объектов.
<i>Метод испытаний</i>	— совокупность правил применения определенных принципов для осуществления испытаний.
<i>План испытаний</i>	— правила, устанавливающие объем выборки или пробы, порядок проведения испытаний и критерии их прекращения.
<i>Система испытаний</i>	— совокупность средств испытаний и исполнителей, взаимодействующих с объектами испытаний по программе и правилам, установленным соответствующими документами.

Для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем соответствующими отраслевыми стандартами установлена система испытаний, приведенная на рис. 9.1.

Система испытаний представлена совокупностью категорий испытаний, отличающихся по целям, объему и периодичности проведения. Каждой категории испытаний соответствует набор проверок электрических параметров, внешнего вида, герметичности, механических и других свойств приборов. Перечень проверок и ис-

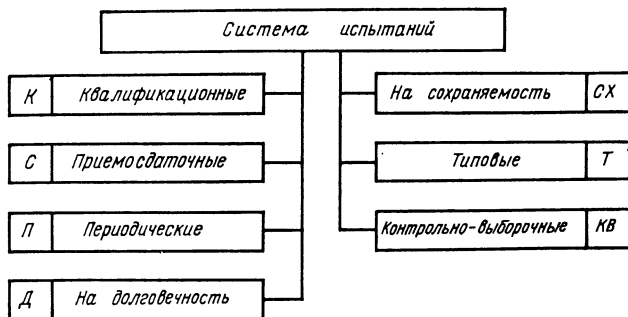


Рис. 9.1. Система испытаний полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

пытаний оговаривается в общих и частных технических условиях на приборы.

Рассмотрим некоторые особенности категорий испытаний, входящих в систему, и порядок их проведения.

При определении качества готовых изделий, а также изделий, подвергающихся испытаниям, применяют *контроль по альтернативному признаку*, при котором каждую проверенную единицу продукции по качественному признаку относят к категории годных или дефектных, а последующее решение о контролируемой совокупности принимают в зависимости от числа обнаруженных в выборке или пробе дефектных единиц продукции или числа дефектов, приходящихся на определенное число единиц продукции.

В зависимости от объема проверяемых изделий, их сложности и назначения применяется выборочный и сплошной контроль.

*Выборочный контроль* — контроль, при котором решение о качестве контролируемой продукции принимается по результатам проверки одной или нескольких выборок из партии или потока продукции.

Выборочный контроль применяется в следующих случаях:

большой объем выпускаемой продукции и непрерывное производство;

высокая стоимость и сложность испытаний;

большая продолжительность проведения испытаний;

применяемые методы контроля являются разрушающими;

при испытаниях происходит значительное расходование ресурса приборов.

Для проведения испытаний случайную или представительную выборку комплектует комиссия. Перед испытаниями проводят контроль электрических параметров, после чего выборка подвергается всем группам разовых испытаний. Результаты считаются положительными, если получены удовлетворительные испытания по всем разовым испытаниям.

*Сплошной контроль*. При этом виде контроля проверке и испытаниям подвергается вся продукция. Такому виду контроля подвергаются приборы, выпускаемые малыми партиями. Кроме того, все приборы подвергаются сплошному контролю по параметрам, определяющим классификационные признаки продукции.

*Квалификационные испытания* — категория К — проводятся с целью оценки готовности производства к выпуску изделий данного типа. Испытания проводят специальные комиссии, назначаемые для приемки установочной партии или серии по специальной программе.

В программу входят проверки внешнего вида и маркировки, электрических параметров, теплоустойчивости, холодоустойчивости, ударной и вибрационной прочности и устойчивости, влагоустойчивости, наработку в течение 500 и 10 000 ч. Кроме того, проверяются конструктивные параметры, такие как геометрические и присоединительные размеры и другие.

Результаты квалификационных испытаний считаются неудовлетворительными, если получены отрицательные результаты хотя бы по одной группе испытаний. В этом случае службы технического контроля и надежности проводят анализ причин отказов, принимают меры по их устранению.

После выполнения мероприятий по улучшению качества приборов проводят новые квалификационные испытания по сокращенной программе, утверждаемой комиссией по приемке установочной партии.

*Приемо-сдаточные испытания* — категория С — проводятся с целью контроля качества каждой изготовленной партии приборов. Испытания проводятся службами технического контроля. При выборочном контроле из каждой партии формируется случайная выборка, количество приборов в которой должно обеспечить проведение всех групп испытаний, присущих данной категории. При получении в процессе испытаний отрицательных результатов по какой-либо группе проверку изделий по другим группам прекращают.

Партию считают выдержавшей испытания, если она выдержала испытания по всем группам, входящим в состав этой категории.

При выборочном контроле приемка может осуществляться по планам нормального и облегченного контроля. Если в 10 последовательно предъявленных и принятых партиях не обнаружено ни одного дефектного изделия в выборке при испытаниях по всем группам (это означает, что в партиях число дефектных приборов много ниже допустимого уровня), то переходят на облегченный контроль, при котором испытания по некоторым группам контроля не проводятся. Если при облегченном контроле из 10 партий 2 были возвращены изготовителю, снова переходят на нормальный контроль. В случае, если из 10 предъявленных партий 3...5 партий возвращаются из-за несоответствия техническим требованиям, приемку полностью останавливают.

Приемку возобновляют после анализа причин появления дефектов и принятия мер по их устранению.

*Периодические испытания* — категория П — проводятся с целью периодического контроля качества приборов и проверки стабильности технологического процесса их производства. Они проводятся ОТК с охватом большинства групп испытаний, предусмотренных категорией К, в строки, регламентируемые специальными графиками с периодичностью 1, 2, 3...6 месяцев, а также при перерывах производства на строки, превышающие сроки периодичности.

При получении неудовлетворительных результатов испытаний отгрузки готовой продукции приостанавливают и проводят анализ дефектов. Если будет установлено, что дефекты связаны с качеством изделий, то все ранее принятые и неотгруженные потребителю изделия возвращаются цеху-изготовителю.

*Типовые испытания* — категория Т — проводит служба технического контроля тогда, когда в прибор внесены конструктивные

или технологические изменения. Набор групп испытаний определяют в зависимости от степени возможного влияния вносимых изменений на качество приборов. Испытания проводят по специальной программе. Оценку приемлемости предлагаемых изменений проводят по соответствию результатов испытаний требованиям нормативно-технической документации и по сравнению с результатами испытаний приборов текущего выпуска.

Изменения в прибор вносятся только после получения положительных результатов испытаний категории Т.

*Контрольно-выборочные* испытания — категория КВ — проводятся головными НИИ по данному виду продукции с целью определения соответствия изделий серийного производства полному объему требований, установленных в нормативно-технической документации. Испытания проводятся по специальной программе, предусматривающей внесение необходимых изменений в технологический процесс в случае обнаружения отклонений от нормативно-технической документации.

*Испытания на долговечность* — категория Д — и *на сохранность* — категории СХ — проводятся для подтверждения установленных в нормативно-технической документации минимальной наработки и срока сохранности.

### **9.3. ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ. ОПЕРАТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА**

В рассмотренном выше комплексе испытаний электрические испытания на надежность имеют первостепенное значение. Они же являются наиболее трудоемкими и дорогостоящими. Поэтому существующие методы составления планов контроля и испытаний направлены на то, чтобы обеспечить приемлемые достоверность и оперативность испытаний в сочетании с экономической целесообразностью.

Рассмотрим один из методов составления плана контроля, основанный на испытаниях случайной выборки по альтернативному признаку [62]. Составление плана опирается на следующие положения:

1. В составе генеральной совокупности находится определенная доля явно дефектных изделий, которые откажут при проведении испытаний.

2. Из генеральной совокупности отбирается случайная выборка, которая впоследствии подвергается испытаниям. Величина выборки, с одной стороны, должна быть достаточной для обеспечения достоверности испытаний, с другой стороны, она не должна быть экономически обременительной.

3. Время испытаний (если они проходят во времени) в сочетании с величиной выборки должно обеспечивать максимальную оперативность получения результатов.

Таким образом, при определении методологии планирования испытаний необходимо найти компромиссное решение при наличии

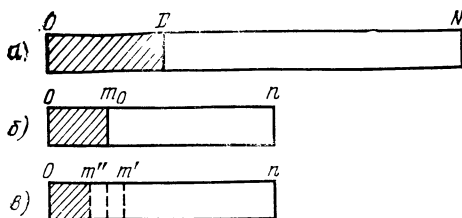


Рис. 9.2. Испытание генеральной совокупности приборов:

$a$  — партия приборов с числом дефектных приборов  $D$ ;  $б$  — выборка из  $n$  приборов с оптимальным числом дефектных  $m_0$ ;  $m'$ ,  $m''$  — возможные граничные отклонения числа дефектных приборов в выборке

многих противоречивых факторов. Рассмотрим некоторую генеральную совокупность приборов, предъявленную в виде партии, состоящей из  $N$  изделий. Предположим, что в составе партии имеется  $D$  приборов со скрытыми дефектами, приводящими к отказам во времени испытаний (рис. 9.2).

При постановке на испытания всей партии приборов вероятность отказов в процессе испытаний можно определить из соотношения

$$Q_{\text{оп}} = D/N. \quad (9.1)$$

При выборочном контроле из партии делается случайная выборка, которая является отображением партии по своему составу, т. е. в составе выборки из  $n$  приборов будет находиться  $m$  дефектных приборов. При этом  $m$  — величина случайная, колеблющаяся относительно среднего значения  $m_0$  с размахом от  $m'$  до  $m''$ . В связи с чем при проведении испытаний выборки приборов возможны следующие исходы в виде вероятности отказа:

$$\begin{aligned} Q_0 &= m_0/n; \\ Q_m &= m'/n; \\ Q &= m''/n. \end{aligned} \quad (9.2)$$

Из рассмотренных трех случаев нас будут интересовать первые два, так как третий случай определяет благоприятный исход.

Если при построении плана контроля мы примем число дефектных приборов  $m_0$  в выборке за оптимальный уровень, при котором должна осуществляться приемка продукции (чему соответствует вероятность отказа  $Q_0 = m_0/n$ ), а уровень  $m'$ , которому соответствует  $Q_m = m'/n$ , будем рассматривать как предельный случай приемки, при превышении которого партия будет признана не соответствующей ТУ, то тем самым мы определим границы, в пределах которых действует принятый план контроля.

В технических условиях обычно записывают объем выборки  $n$  и приемочное число  $C$  возможных отказов при испытаниях или дефектных приборов. Требования к величинам  $n$  и  $C$  таковы, что они при установленной экономической целесообразности плана контроля должны обеспечить приемлемую достоверность испытаний, которая выражается в риске изготовителя и риске заказчика.

*Риском изготовителя*  $\alpha$  принято называть вероятность того, что его годная продукция из-за применения выборочного контроля может быть забракована.



*Риском заказчика  $\beta$*  называют вероятность того, что продукция, не соответствующая техническим условиям, будет принята как годная.

Математически эти показатели записываются следующим образом:

$$\alpha = \text{Вер} (m > C \text{ при } Q \leq Q_0); \quad (9.3a)$$

$$\beta = \text{Вер} (m \leq C \text{ при } Q \geq Q_m). \quad (9.3б)$$

Запись (9.3a) означает, что продукция в виде генеральной совокупности имеет в своем составе количество дефектных приборов  $D$ , не превышающее значение, оговоренное в ТУ. Это при благоприятных условиях формирования выборки должно обеспечить наличие в ней числа дефектных приборов, не превышающего  $m_0$ , что соответствует вероятности отказа  $Q = Q_0$ . Однако из-за случайности процесса формирования выборки имеется определенная вероятность получить в ней  $m > m' = C$ , тем самым привести всю партию к забракованию.

Запись (9.3б) дает обратную картину, когда число дефектных приборов в генеральной совокупности  $D$  превышает значение, установленное в ТУ и в выборке должна быть представлена доля дефектных приборов, удовлетворяющих соотношению  $m > m' = C$ , однако в силу случайности процесса отбора выборки может оказаться, что  $m \leq C$  и дефектная партия в этом случае принимается как годная.

Задача построения оптимального плана контроля — обеспечить, с одной стороны, равенство риска заказчика и изготовителя, т. е.  $\alpha = \beta$ , а с другой стороны, по возможности, сделать их достаточно малыми величинами и тем самым существенно снизить риск забракования годных партий приборов и риск приемки партий, не соответствующих техническим условиям.

Обозначим через  $P(Q)$  вероятность приемки партии по выборке  $n$  при приемочном числе отказов  $C$ , тогда ее математическое выражение можно записать следующим образом:

$$P(Q) = \text{Вер} (m \leq C). \quad (9.4)$$

Кривая зависимости  $P$  от  $Q$  называется *оперативной характеристикой* данного метода контроля.

С учетом (9.3) выражения для рисков изготовителя и заказчика будут иметь следующий вид:

$$\alpha = 1 - P(Q_0); \quad (9.5a)$$

$$\beta = P(Q_m). \quad (9.5б)$$

Пример оперативной характеристики представлен на рис. 9.3, где по оси абсцисс отложены значения вероятности отказа приборов  $Q$  при испытаниях. Величина  $Q_m$ , соответствующая предельному числу дефектных приборов в выборке  $m'$ , определяет уровень надежности, на котором осуществляется контроль надежности в производстве, или минимальный уровень надежности данных изделий, приемлемый для заказчика. (В нормативно-технической документации

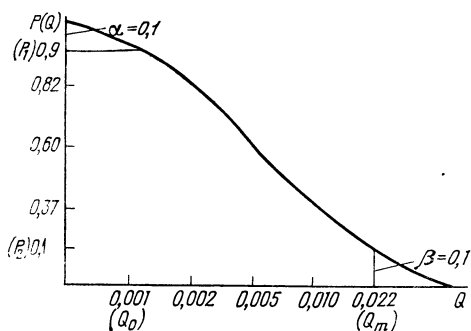


Рис. 9.3. Оперативная характеристика при плане контроля:  
 $\alpha = \beta = 0.1$ ;  $n = 100$ ;  $C = 0$

большинстве случаев положительный исход испытаний изделий и сдача продукции. Этот же уровень определяет риск изготовителя  $\alpha$  (выражение 9.5а). Из оперативной кривой, кроме того, следует, что для нормальной сдачи продукции, контролируемой на уровне  $Q_m$  по принятому плану контроля, фактическое значение надежности должно быть существенно выше. Разница между уровнями надежности  $P_1$  и  $P_2$  определяется величиной выборки  $n$  и приемочным числом  $C$ , являющимися параметрами оперативной характеристики.

Исходя из вышеизложенного, задача построения плана контроля формируется следующим образом.

Задаются величины  $Q_0$ ,  $Q_m$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и время испытаний  $t_n$  на основе которых определяются приемлемые значения  $n$  и  $C$ . Для задания величин  $Q_0$  и  $Q_m$  необходимо определить допустимое число дефектных приборов  $m$  в выборке  $n$ . Для этого могут быть использованы гипергеометрическое, биномиальное распределения, а также же распределение Пуассона.

Для случая, когда  $Q_0$  и  $Q_m < 0.1$ , можно использовать распределение Пуассона, согласно которому вероятность получить ровно  $m$  отказов за время испытаний определяется по следующей формуле:

$$P_m = \frac{1}{m!} \cdot a^m \cdot e^{-a}, \quad (9.6)$$

где  $a = n \cdot Q$ ;  $Q = 1 - P(t_n)$ ;  $P(t_n)$  — вероятность безотказной работы за время испытаний  $t_n$ .

Рассмотрим предельный случай, когда по условиям контроля не допускаются отказы в процессе испытаний, т. е.  $m = C = 0$ . Используя выражение (9.6), получим

$$P_{(0)} = e^{-nQ}. \quad (9.7)$$

Из выражений (9.7) и (9.5) определим риски изготовителя и заказчика:

$$\alpha = 1 - e^{-nQ_0}; \quad (9.8a)$$

$$\beta = e^{-nQ_m}. \quad (9.8b)$$

этот уровень обозначается  $P_2$ ). Одновременно этот уровень определяет вероятность сдачи продукции при числе дефектных приборов в выборке, удовлетворяющем неравенству  $m \geq m' = C$ , т. е. риск заказчика. Из рис. 9.3 следует, что вероятность сдачи продукции на уровне  $P(Q_m)$  весьма мала.

Величина  $Q_0$ , соответствующая оптимальному числу дефектных приборов в выборке  $m_0$ , определяет оптимальный уровень надежности (обозначаемый в НТД  $P_1$ ), при котором обеспечивается в боль-

С учетом малых значений  $\alpha$  ( $\alpha \leq 0,1$ ) выражение для риска изготовителя с достаточной степенью точности можно заменить первыми двумя членами разложения в степенной ряд экспоненциального слагаемого:

$$\alpha = 1 - (1 - n Q_0) = n Q_0. \quad (9.9)$$

Откуда определим объем выборки:

$$n = \alpha / Q_0. \quad (9.10)$$

Используя выражения (9.7) — (9.10), определим численные значения  $n$ ,  $Q_0$ ,  $Q_m$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  для некоторых планов контроля.

1. Задано:  $C=0$ ,  $\alpha=0,1$ . Определить величину выборки  $n$ .

Используя выражение (9.10) и задаваясь значениями  $Q_0$ , определим для каждого из них величину выборки  $n$ . Результаты вычислений приведены в табл. 9.1.

Т а б л и ц а 9.1

$Q_0$	0,01	0,001	0,0001	0,00001
$n$	10	100	1000	10 000

Из таблицы следует, что чем выше оптимальный уровень надежности, или чем меньше число дефектных приборов в генеральной совокупности, тем больше должна быть выборка, чтобы обеспечить заданный уровень риска изготовителя.

2. Задано  $C=0$ ,  $\alpha=0,1$ ,  $Q_0=0,001$ ,  $n=100$ . Найти риск заказчика при различных значениях  $Q_m$ .

Используя выражение (9.86), вычислим значения  $\beta$  при различных уровнях  $Q_m$ . Результаты вычислений приведены в табл. 9.2.

Т а б л и ц а 9.2

$Q_m$	0,002	0,005	0,010	0,022
$\beta$	0,82	0,60	0,37	0,1
$\frac{Q_m}{Q_0}$	2	5	10	22

По данным табл. 9.1 и 9.2 построена оперативная характеристика (см. рис. 9.3) при следующих исходных данных:  $\alpha=\beta=0,1$ ;  $Q_m=0,022$ ;  $Q_0=0,001$ ;  $n=100$ ;  $C=0$ .

Из анализа данных табл. 9.1 и 9.2 и рис. 9.3 следует, что если задан уровень качества данной продукции  $Q_m$ , обеспечивающий

принятый риск заказчика (в нашем случае  $\beta=0,1$ ), то для уверенного стабильного производства с риском  $\alpha$  (в нашем случае  $\alpha=0,1$ ) фактический уровень качества продукции  $Q_0$  должен быть много выше, чем уровень, заданный заказчиком. В нашем случае число дефектных приборов в партии должно быть в 22 раза ниже по сравнению с уровнем дефектности, принятым заказчиком.

Семейства оперативных характеристик для различных значений выборки  $n$  и приемочного числа  $C$  приведены на рис. 9.4, а зависимость числа приборов в выборке от контролируемого уровня надежности  $P_2$  и приемочного числа  $C$  — на рис. 9.5.

Анализ данных рис. 9.4 и 9.5 показывает, что число приборов в выборке, подвергаемой испытаниям, растет с ростом контролируемого уровня надежности и приемочного числа  $C$  (рис. 9.5). Поэтому план контроля с приемочным числом  $C=0$  требует минимальной выборки  $n$  и в этом смысле может считаться наиболее экономичным с точки зрения затрат на испытания. Однако этот план предусматривает максимальные затраты на производство приборов, так как его осуществление связано с необходимостью обеспечения более высокого качества приборов по сравнению с требованиями заказчика из-за наибольшего разрыва между уровнем контроля  $Q_m$  и уровнем качества в производстве  $Q'_0$  (см. рис. 9.4). С ростом приемочного числа  $C$  и числа приборов в выборке  $n$  уровень качества в производстве  $Q_0$  приближается к уровню контроля. И в предельном случае сплошного контроля, когда выборкой становится вся партия или генеральная совокупность  $N$ , а приемочное число  $C$  становится равным допустимому числу дефектных приборов  $D$ , уровни качества в производстве и уровень контроля совпадают.

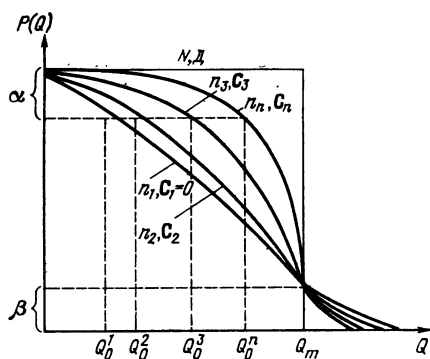


Рис. 9.4. Семейство оперативных характеристик при различных сочетаниях  $n$  и  $C$ :

$n_1 < n_2 < n_3 < n_n$ ;  $C_1 < C_2 < C_3 < C_n$ ;  $Q^1_0, Q^2_0, Q^3_0, Q^n_0$  — уровни качества изделий в производстве, соответствующие данным сочетаниям  $n$  и  $C$

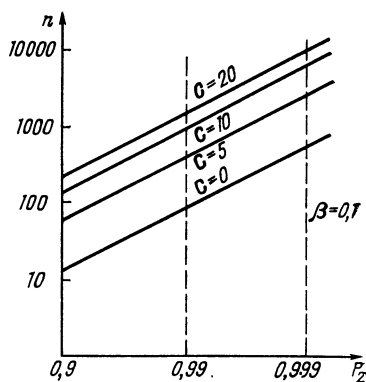


Рис. 9.5. Зависимость числа приборов в выборке от контролируемого уровня надежности  $P_2$  и приемочного числа  $C$

На основе рассмотренных выше принципов построены ГОСТ и ОСТ, регламентирующие порядок проведения испытаний на надежность.

В заключение этого параграфа следует еще раз подчеркнуть, что планы контроля надежности строятся с предпочтением соблюдения интересов потребителя. Изготовитель приборов для устойчивой сдачи очередных партий приборов потребителю должен поддерживать фактическое значение надежности приборов на более высоком уровне, чем это требуется условиями поставки. Другими словами, изготовитель должен обеспечивать значительный запас надежности по сравнению с уровнем, оговоренным потребителем. При этом условия поставки стимулируют увеличение этого запаса за счет облегчения условий контроля при устойчивой сдаче продукции потребителю. Облегченные планы контроля снижают затраты на проверку и испытания приборов, тем самым способствуют повышению рентабельности производства. Существенный запас по надежности выгоден и потребителю приборов, так как он облегчает входной контроль, а в ряде случаев позволяет избежать дорогостоящей тренировки приборов при повышенных тепловых и электрических режимах.

#### 9.4. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ИСПЫТАНИЯ

В рассмотренной выше системе испытаний готовых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем главным образом применяются разрушающие воздействия, после которых подвергнутые испытаниям изделия не подлежат поставке потребителю. Наряду с разрушающими широкое распространение получили неразрушающие методы контроля и испытаний, применяемые для контроля изделий в процессе их разработки, изготовления и применения. Наибольшее распространение в настоящее время получили следующие методы неразрушающих испытаний:

*Оптический метод.* Он основан на эффектах взаимодействия различных спектров светового излучения (инфракрасного, ультрафиолетового, видимого) с исследуемым объектом. Здесь используются эффекты поляризации, поглощения, интерференции и рассеяния света на неоднородностях.

*Радиационный метод.* Он основан на взаимодействии ионизирующих излучений и частиц высоких энергий с контролируемым объектом и базируется на «просвечивании» исследуемого объекта с непосредственной или последующей регистрацией теневого изображения на фотопленке, флуоресцирующем или телевизионном экране.

*Тепловой метод.* Он основан на регистрации тепловых полей или температуры контролируемого объекта. Разновидностью этого метода является тепловой контактный метод, при котором используются термочувствительные краски, термобумага, жидкие кристаллы, наносимые на поверхность исследуемого объекта, либо термопары, специальные термометры, имеющие тепловой контакт

с объектами измерения. В тепловых методах испытаний используются также различные термозависимые параметры приборов, например прямое падение напряжения на  $p$ - $n$  переходе или обратный ток.

При неконтактных методах регистрации тепловых полей используются собственное видимое инфракрасное и ультрафиолетовое излучение объекта, нагретого за счет внешних или внутренних источников энергии.

*Метод растровой электронной микроскопии* основан на регистрации в амплитудном, яркостном или цветовом виде на экране электронно-лучевой трубки результатов взаимодействия сфокусированного первичного электронного луча в режиме сканирования с веществом исследуемого объекта или со связанными с ним электромагнитными полями. Регистрация результатов взаимодействия основывается на вторичной электронной эмиссии, электронной оже-спектроскопии, эффектах поглощения и отражения электронов.

*Электрофизический метод* основан на исследовании закономерностей изменений электрофизических характеристик и параметров приборов и интегральных микросхем, например вольт-амперных характеристик  $p$ - $n$  переходов, их характерных участков, определяющих надежностные характеристики приборов в целом.

Ниже рассмотрены некоторые электрофизические методы контроля и испытаний полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

#### **9.5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ПО ШУМОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

Собственные шумы полупроводниковых приборов в зависимости от спектральных характеристик и физической природы их возникновения подразделяют на тепловые, дробовые и низкочастотные или избыточные. Кратко рассмотрим особенности указанных видов шумов.

*Тепловой шум* существует в любом проводнике и полупроводнике. Он вызывается хаотическим тепловым движением носителей заряда в объеме полупроводника. Среднее квадратическое значение напряжения теплового шума определяется по формуле Найквиста:

$$\bar{U}_{\text{ш}}^2 = 4 k T R \Delta f, \quad (9.11)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $R$  — активное внутреннее сопротивление прибора;  $\Delta f$  — эквивалентная шумовая полоса частот.

*Дробовой шум* возникает вследствие флуктуации концентрации носителей зарядов за счет случайности процесса генерации и рекомбинации. В литературе такой шум еще называют *генерационно-рекомбинационным*. В полупроводниковых приборах ток, протекающий через  $p$ - $n$  переход из-за случайного изменения концент-

рации носителей зарядов, испытывает флуктуации. При малых плотностях тока, когда взаимодействием носителей заряда можно пренебречь и представить каждое пересечение носителем потенциального барьера как независимое случайное событие, среднее квадратическое значение шумового тока может быть определено по формуле Шотки:

$$\overline{i_{\text{ш}}^2} = 2 q I \Delta f, \quad (9.12)$$

где  $q$  — заряд электрона;  $I$  — ток, протекающий через  $p$ - $n$  переход.

В транзисторах дробовой шум возникает как в эмиттерном, так и в коллекторном переходах. В этом случае среднее квадратическое напряжение можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} \overline{U_{\text{Э}}^2} &= 2 q r_{\text{Э}}^2 (I_{\text{Э}} + I_{\text{ЭВ0}}) \Delta f; \\ \overline{U_{\text{К}}^2} &= 2 q r_{\text{К}}^2 I_{\text{КВ0}} \Delta f, \end{aligned} \quad (9.13)$$

где  $r_{\text{Э}}$  и  $r_{\text{К}}$  — активные сопротивления эмиттера и коллектора соответственно.

Частотную зависимость уровня шумов принято характеризовать спектральной плотностью мощности шума, под которой понимают отношение мгновенной мощности процесса возникновения шума  $dP$  в интервале частот к приращению ширины интервала частот  $d\omega$ :

$$G(\omega) = \frac{dP}{d\omega}. \quad (9.14)$$

Общая мощность процесса равна сумме мощностей, заключенных в элементарных участках диапазона частот

$$P = \int_0^{\infty} G(\omega) d\omega. \quad (9.15)$$

Спектральная плотность мощности шума, выраженная как функция частоты, называется *энергетическим спектром*. Энергетический спектр зависит от источников флуктуации, а также от полосы пропускания цепей, через которые проходит сигнал. В частности, при  $G(\omega) = \text{const}$  имеем так называемый *белый шум*.

Экспериментально спектральная плотность определяется как

$$G(f) = \frac{\overline{U_{\text{ш}}^2}}{\Delta f} \quad \text{или} \quad G(f) = \frac{i_{\text{ш}}^2}{\Delta f}, \quad (9.16)$$

где  $\Delta f = f_2 - f_1$  при  $\Delta f \ll \frac{f_1 + f_2}{2}$ .

Спектральная плотность мощности теплового и дробового шумов не зависит от частоты, поэтому эти два вида шумов относят к шумам с белым спектром. Кроме того, эти два вида шумов прямо не связаны с дефектами приборов и не содержат дополнительной информации о потенциальной надежности полупроводниковых приборов.

Наибольший интерес представляют *низкочастотные шумы*, причиной которых являются различного рода дефекты в структурах приборов. В литературе нет единой терминологии для этого вида шума. По аналогии с шумами вакуумных ламп эти шумы называют: фликкер-шумы, шумы мерцания, избыточные шумы, низкочастотные шумы.

Наибольшее распространение получило название «низкочастотные шумы», под которым понимаются шумы, спектральная плотность мощности которых пропорциональна  $1/f^\gamma$ , где  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий вид спектра.

Экспериментальные исследования показали, что первоисточниками шумов  $1/f$  являются медленные состояния вблизи поверхности раздела полупроводника и защитных слоев в окисной пленке и на ее поверхности. Флуктуации плотности поверхностных состояний вызывает изменение пространственного заряда в обедненной области вблизи поверхности и, как следствие, изменяют потенциальный барьер, что в свою очередь влечет за собой изменение тока через  $p$ - $n$  переход.

Различные объемные неоднородности (примеси, дислокации, микротрещины), являясь центрами захвата, также сильно влияют на прохождение тока через  $p$ - $n$  переход. Особенно резко сказываются уровни захвата носителей в области пространственного заряда, расположенные вблизи середины запрещенной зоны. В отсутствие поля они нейтральны и не участвуют в захвате носителей. При наличии поля (обратного смещения) уровни ионизируются, в результате изменяются пространственный заряд в области  $p$ - $n$  перехода и потенциальный барьер. Это сказывается на токе через  $p$ - $n$  переход в виде его модуляции. Учитывая, что время захвата и освобождения носителей на центрах захвата довольно велико, модуляция проявляется в виде низкочастотного шума. При смещении  $p$ - $n$  перехода в прямом направлении в работу вступает механизм генерации-рекомбинации в объеме, что также создает низкочастотный шум.

В результате медленных процессов диффузии должны происходить выравнивание концентрации примеси в области  $p$ - $n$  перехода, расширение перехода и диффузия примеси по дислокациям, что может привести к возрастанию шумов. Таким образом, возрастание шумов — признак деградации активных областей полупроводниковой структуры, могущей привести к полному отказу.

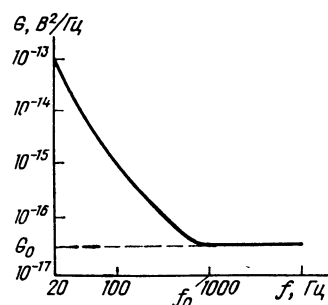
Контакты и их качество могут также являться причинами низкочастотных шумов. Каждый контакт может быть представлен как совокупность микроточек соприкосновения двух разнородных контактирующих материалов, из которых часть может быть замкнута, а часть разомкнута. Во времени число разомкнутых микроточек меняется случайно, что приводит к флуктуации тока через весь контакт. По возрастанию шума в контактах можно судить о приближении их разрушения.

Экспериментальная зависимость спектральной плотности мощности шумов представлена на рис. 9.6. Из рисунка следует, что с



Рис. 9.6. Зависимость спектральной плотности мощности шумов от частоты:

$f_0$  — частота насыщения шумов;  $G_0$  — уровень мощности насыщения шумов



ростом частоты спектральная плотность мощности шумов уменьшается и при определенной частоте  $f_0$  становится постоянной и равной некоторой величине  $G_0$ . Значения частоты  $f_0$  лежат в пределах единиц килогерц. Исходя из рис. 9.6 зависимость  $G(f)$  может быть представлена в следующем виде:

$$G(f) = \begin{cases} G_0 \left( \frac{f_0}{f} \right)^{\gamma_{\text{ш}}} & \text{при } f < f_0; \\ G_0 & \text{при } f > f_0. \end{cases} \quad (9.17)$$

Из этой зависимости можно получить выражение для коэффициента  $\gamma_{\text{ш}}$ :

$$\gamma_{\text{ш}} = \frac{\lg \frac{G(f)}{G_0}}{\lg \frac{f_0}{f}}. \quad (9.18)$$

Таким образом, шумовыми характеристиками полупроводниковых приборов могут быть приняты величины  $G_0$ ,  $f_0$ ,  $\gamma_{\text{ш}}$ . Определив  $G_0$  и  $f_0$ , можно рассчитать коэффициент  $\gamma_{\text{ш}}$  и построить зависимость  $G(f)$ .

Усредненные экспериментальные значения шумовых параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем приведены ниже.

При  $f=20$  Гц для ГИМС —  $G_0=6 \cdot 10^{-15} \dots 10^{-14}$  В<sup>2</sup>/Гц, для ИМС —  $G_0=10^{-17} \dots 1,5 \cdot 10^{-6}$  В<sup>2</sup>/Гц.

В диапазоне 20 ... 8000 Гц для интегральных микросхем справедлива зависимость  $G(f)=G_0(f_0/f)^{\gamma_{\text{ш}}}$ , значения  $\gamma_{\text{ш}}$  лежат в пределах 0,9 ... 1,8. Для маломощных транзисторов типа П416, МП16 — значения  $\gamma_{\text{ш}}$  лежат в пределах 1,318 ... 1,368; 1,39 ... 1,45 соответственно.

Кроме низкочастотного в интегральных микросхемах и полупроводниковых приборах наблюдается *импульсный (взрывной) шум*. Предполагается, что этот вид шума имеет микроплазменную и дислокационную природу. Взрывной шум проявляется в виде импульсов с постоянной амплитудой. С ростом приложенного напряжения амплитуда импульсов растет до определенного значения, после чего увеличивается длительность импульсов и частота их следования. Длительность импульсов лежит в пределах 2 ... 200 мс, амплитуда достигает 1 мВ.

Общие рекомендации по использованию шумовых параметров для повышения надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем могут быть сформулированы следующим образом:

1. Коэффициент шума или спектральная плотность шума коррелирует с коэффициентом усиления. Коэффициент корреляции приблизительно равен 0,6. Следовательно, исключая из партии приборы с повышенными шумовыми характеристиками, мы повышаем стабильность партии приборов по коэффициенту усиления.

2. Шумовые параметры транзисторов коррелируют с пробивными свойствами приборов. Уровень шумов некачественных транзисторов в предпробойной области возрастает. Исключение транзисторов с повышенными шумами в предпробойной области стабилизирует партию по пробивному напряжению.

3. Повышенные контактные шумы свидетельствуют об уровне качества контактов, о дефектах в месте соединения контактирующих металлов и кристалла. Отбраковка приборов с повышенными шумами повышает механическую прочность полупроводниковых приборов и их стойкость к тепловым нагрузкам.

#### 9.6. КОНТРОЛЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР ПО РЕКОМБИНАЦИОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

При прямом смещении  $p$ - $n$  перехода происходит инжекция, основные носители заряда частично или полностью рекомбинируют в объеме кристалла. Подавляющая часть рекомбинирующих носителей отдает кристаллу энергию в виде тепловых колебаний решетки. Некоторая доля носителей рекомбинирует при переходе из зоны проводимости в валентную с испусканием энергии в виде кванта света с длиной волны  $\lambda = hc/E_g$ , где  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света;  $E_g$  — ширина запрещенной зоны.

Для кремния длина волны рекомбинационного излучения порядка 1 мкм, для германия около 1,7 мкм. Его интенсивность характеризуется вольт-люксовой характеристикой, аналогичной по структуре вольт-амперной характеристике  $p$ - $n$  перехода:

$$\begin{aligned} L &= A_0 \left( e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right), \\ I &= I_0 \left( e^{\frac{U}{\Phi_T}} - 1 \right), \end{aligned} \quad (9.19)$$

где  $A_0$  — конструктивная постоянная. Взяв отношение выражений для интенсивности излучения и прямого тока через  $p$ - $n$  переход, получим

$$\frac{L}{I} = \frac{A_0}{I_0} \quad \text{или} \quad L = I \frac{A_0}{I_0}, \quad (9.20)$$

т. е. интенсивность рекомбинационного излучения имеет линейную зависимость от прямого тока через  $p$ - $n$  переход.

Регистрируя рекомбинационное излучение с помощью фотоэлектронного умножителя, можно наблюдать поле распределения

рекомбинационного излучения по кристаллу и выявить места локализации тока по повышенному уровню интенсивности излучения. Разрешающая способность метода по линейным размерам лежит в пределах  $1 \dots 1,5$  мкм по минимальной мощности излучения в пределах  $10^{-8} \dots 10^{-10}$  Вт.

### 9.7. КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕХОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

При подаче на полупроводниковую структуру активного режима тепловое равновесие на  $p$ - $n$  переходе из-за инерционности теплопереноса наступает не мгновенно, поэтому температура  $p$ - $n$  перехода достигает установившегося значения в течение промежутка времени, определяемого тепловым сопротивлением и теплоемкостью конструктивных элементов прибора. Изменение температуры  $p$ - $n$  перехода во времени при подаче на прибор ступеньки

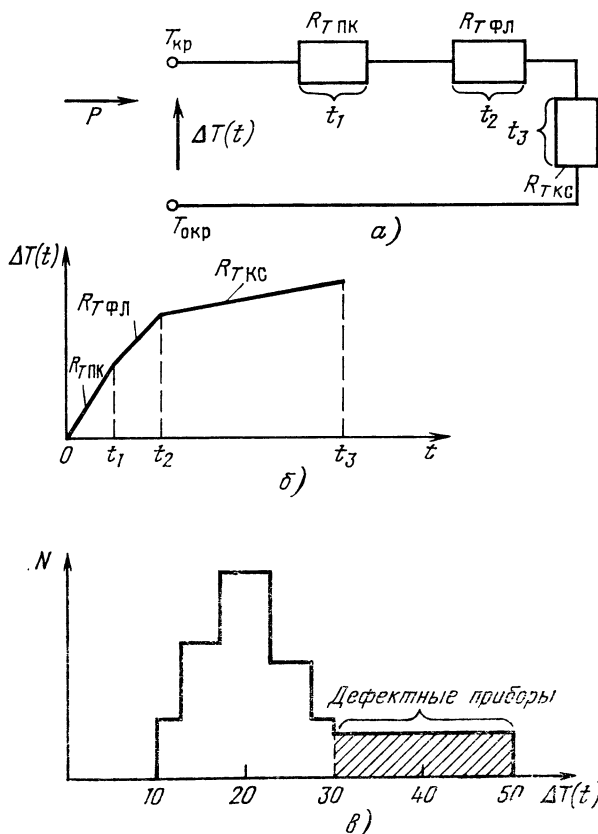


Рис. 9.7. Контроль тепловых параметров:

**а** — тепловая модель структуры; **б** — переходная тепловая характеристика структуры; **в** — гистограмма распределения партии  $N$  приборов по уровню перегрева

(импульса) мощности принято называть *переходной тепловой характеристикой*. Графическое изображение ПТХ полупроводниковой структуры, состоящей из трех основных элементов, представлено на рис. 9.7,б. Процесс разогрева полупроводниковой структуры при подаче ступеньки мощности может быть представлен следующим образом.

На первом этапе разогревается кристалл от *p-n* перехода до его внешней плоскости, примыкающей к кристаллодержателю. Время разогрева  $t_1$  и температура *p-n* перехода на этом этапе определяются тепловым сопротивлением между *p-n* переходом и кристаллодержателем  $R_{T\text{ПК}}$ . На следующем этапе происходит разогрев контактной области кристалла с кристаллодержателем и всего тела кристаллодержателя или фланца. Время разогрева  $t_2$  и дальнейший рост температуры структуры определяются тепловым сопротивлением контактной области и фланца  $R_{T\text{ФЛ}}$ . Дальнейший разогрев продолжается до наступления теплового равновесия между корпусом прибора и окружающей средой и определяется тепловым сопротивлением корпус—среда  $R_{T\text{КС}}$ .

Общий перегрев кристалла  $\Delta T(t)$  относительно температуры окружающей среды  $T_{\text{окр}}$  определяется следующим выражением:

$$\Delta T(t) = T_{\text{кр}} - T_{\text{окр}} = P(R_{T\text{ПК}} + R_{T\text{ФЛ}} + R_{T\text{КС}}), \quad (9.21)$$

где  $P$  — разогревающая мощность.

В рассмотренной структуре процесса первые два этапа несут информацию о тепловых сопротивлениях кристалла и переходной области между кристаллом и кристаллодержателем, т. е. о качестве напайки или приклейки кристалла на держатель. Поэтому, подавая на структуру импульс разогревающей мощности длительностью, не превышающей суммарное время разогрева на первых двух этапах  $t_i \geq t_1 + t_2$ , получим перегрев кристалла  $\Delta T_i$  относительно окружающей среды за счет внутренних тепловых сопротивлений структуры. По уровню перегрева можно определить качество напайки кристалла на кристаллодержатель. Для регистрации переходных тепловых характеристик и определения температуры перегрева применяются инфракрасные радиометры. По результатам измерения температуры перегрева строятся гистограммы распределения полупроводниковых структур по уровню перегрева (рис. 9.7,в). Удаляя из распределения структуры со значительным перегревом по сравнению со средним уровнем, можно существенно повысить надежность приборов, изготовленных из проверенных структур [34].

## 9.8. УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Надежность современных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в зависимости от условий эксплуатации оценивается по уровням интенсивности отказов в пределах  $10^{-7} \dots 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$ . Перспективные требования по надежности приборов, предназначенных для использования в аппаратуре космических объектов длительного существования, в необслуживаемых радио-

релейных линиях, трансатлантических кабелях телефонной и телеграфной связи достигают по интенсивности отказов величины порядка  $10^{-10}$  ч<sup>-1</sup>. Подтверждение столь высоких значений надежности прямыми испытаниями практически невозможно. Рассмотрим такой пример.

Предположим, нам необходимо провести испытания для подтверждения того, что данные приборы имеют интенсивность отказов не более  $10^{-9}$  ч<sup>-1</sup>. Это означает, что приборы имеют среднюю наработку до отказа  $10^9$  ч или около 1,3 миллиона лет.

Для обеспечения приемлемой достоверности результатов испытаний необходимо провести достаточное количество опытов. В нашем случае количество опытов определяется количеством приборочасов или произведением числа приборов, поставленных на испытание  $N$  на количество часов испытаний  $t$ . В данном случае необходимо иметь, по крайней мере,  $10^9$  приборочасов с получением за время испытаний не более одного отказа. Возможные соотношения количества приборов и продолжительности сведены в табл. 9.3.

Данные табл. 9.3 свидетельствуют о том, что прямые испытания приборов для подтверждения требуемой надежности экономически не выгодны, так как требуют огромных затрат оборудования, приборов и энергоресурсов. Одним из выходов из создавшегося положения является применение ускоренных испытаний и методов прогнозирования надежности приборов. Ускоренные испытания рассматриваются как разновидность физического моделирования, позволяющего оценить надежность приборов при сжатом масштабе времени. В качестве ускоряющих факторов, способствующих выявлению потенциально слабых, дефектных мест в приборах используются следующие повышенные нагрузки: тепловое воздействие, механические воздействия в виде линейных ускорений, ударов и вибрационных нагрузок, влажность, давление окружающей среды, электрическая нагрузка.

Выбор ускоряющих факторов и их интенсивность в каждом конкретном случае должен базироваться на следующих принципах:

1. Определение ускоряющих факторов должно основываться на знании закономерности воздействия различных видов нагрузки на скрытые дефекты в приборах. Желательно знать степень ускорения и иметь твердую уверенность в том, что интенсивность воздействия стабильна в заданных условиях и тем самым обеспечивается воспроизводимость результатов.

2. При воздействии ускоряющих факторов физические процессы, возбуждаемые ими, должны быть теми же, что и при обычной эксплуатации, т. е. в ускоренных и в обычных условиях типы отказов

Т а б л и ц а 9.3

Число приборов	Длительность испытаний, ч (г)
1 000	$10^9$ (130)
10 000	$10^8$ (13)
100 000	$10^7$ (1,3)

должны быть одни и те же. С энергетической точки зрения это означает, что энергия активации механизмов отказов, стимулируемых ускоряющими факторами, не изменяется.

3. Условия ускоряющих факторов должны быть такими, чтобы после их окончания была возможность проанализировать отказавшие приборы для установления причин отказов.

Некоторые виды ускоряющих факторов и дефекты, выявляемые ими, приведены в табл. 9.4.

Наибольший эффект дают ускоренные испытания в электрическом режиме при повышенных температурах. При этом в ряде случаев выбирают повышенные температуры в сочетании с обратным смещением. Обычно при выборе режима таких испытаний исходят из закона Аррениуса, записывая его для интенсивности отказов в следующей форме:

$$\lambda(T) = K_{\lambda} \exp \left( -\frac{E_a}{kT} \right). \quad (9.22)$$

Построив зависимость (9.22) в полулогарифмическом масштабе, можно определить энергию активации дефектов  $E_a$ , вызывающих отказы, а по форме кривой судить о стабильности механизма, ответственного за данный вид отказов. Примеры возможных вариантов зависимостей интенсивности отказов приборов от уровня тепловой и электрической нагрузки приведены на рис. 9.8.

Для проведения ускоренных испытаний выбирается диапазон нагрузки с постоянной энергией активации дефектов. В приведенных примерах приемлемые диапазоны нагрузок лежат в пределах заштрихованной части рисунков. Выбор данных уровней нагрузки связан с тем, что за отказы, возникающие в приборах, ответственные дефекты, активируемые нагрузкой, близкой к нагрузке, испытываемой приборами в реальной эксплуатации. При повышении

Т а б л и ц а 9.4

Дефекты	Линейные нагрузки	Удар	Вибрация	Повышенное давление	Влага	Термоциклы	Повышенные температуры	Повышенные температуры	Электрический режим
Дефекты корпуса	+	+	+	+	+	+	—	—	+
Наличие посторонних частиц	+	+	+	—	—	—	—	—	—
Несоответственность спаев	—	—	—	—	—	+	+	+	—
Нарушение герметизации	—	+	+	+	+	+	+	+	—
Наличие посторонних газов	—	—	—	—	—	—	—	—	+
Несовершенство $p$ - $n$ перехода	—	—	—	—	—	+	+	+	+
Несовершенство защиты перехода	—	—	—	—	+	+	+	+	+
Микротрещины	+	+	+	—	+	+	+	+	+

Примечание: + означает возможность выявления указанного дефекта.

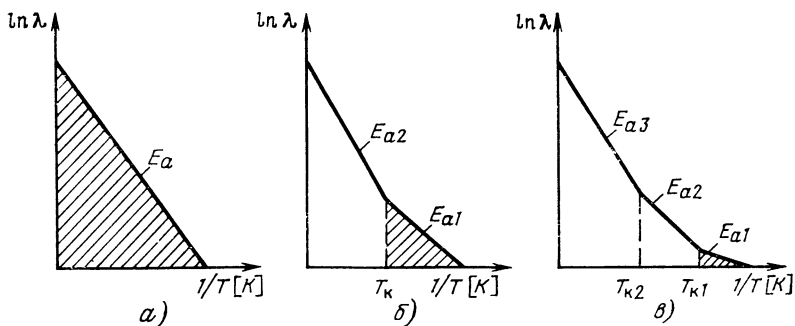


Рис. 9.8. Зависимость интенсивности отказов и энергии активации дефектов от уровня нагрузки:

**а** — в диапазоне нагрузки действует один вид дефекта с энергией активации  $E_a$ ; **б** — в диапазоне нагрузки два вида дефектов с разными энергиями активации; **в** — в диапазоне нагрузки три вида дефектов;  $T_k$  — критическая температура активации дефекта

нагрузки активируются дефекты, которые в обычных условиях остаются нейтральными и не влияют на надежность приборов.

Условия ускоренных испытаний для конкретного вида приборов формируются на большом статистическом материале, получаемом при длительных испытаниях в широком диапазоне температур. По результатам испытаний строится в двойном логарифмическом масштабе семейство характеристик зависимости средней наработки до отказа (что идентично времени испытания) от температуры при соответствующем электрическом смещении [63]. Пример такого семейства характеристик показан на рис. 9.9.

Исходя из предположения, что в пределах диапазона температур  $+300 \dots +125^\circ\text{C}$  действуют одни и те же механизмы отказов, делается вывод о том, что испытания при  $+300^\circ\text{C}$  в течение 10 ч (точка  $A'$ ) идентичны по своему воздействию испытаниям в течение  $10^5$  ч при температуре  $+125^\circ\text{C}$  (точка  $B'$ ). Беря отношение среднего времени наработки до отказа при  $+125^\circ\text{C}$  к среднему времени наработки при  $+300^\circ\text{C}$ , получим коэффициент ускорения для данного вида испытаний. В нашем случае он равен  $10^4$ . Во столько раз сокращается время испытаний при выборе данного конкретного режима ускорения.

С увеличением продолжительности ускоренных испытаний при  $+300^\circ\text{C}$  характеристика смещается вправо в сторону больших значений времени испытаний. В частности, ускорен-

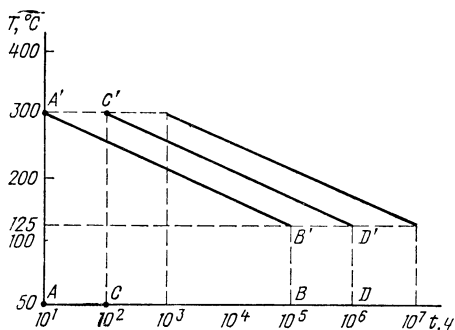


Рис. 9.9. Семейство характеристик ускоренных испытаний при повышенных температурах с приложением обратного смещения

ные испытания при  $+300^{\circ}\text{C}$  в течение 100 ч будут эквивалентны испытаниям при  $+125^{\circ}\text{C}$  в течение 130 лет (точки  $C'$ ,  $D'$ ). Смещение характеристик в сторону больших значений времени испытаний свидетельствует о значительном повышении надежности приборов относительно первоначального уровня (точки  $A'$ ,  $B'$ ).

## 9.9. ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРИБОРОВ

Для диагностики дефектов полупроводниковых структур весьма перспективно использование жидких кристаллов, наносимых на их поверхность [79].

*Жидкими кристаллами* называют вещества, которые при определенной температуре находятся в состоянии промежуточном между структурой жидкости и кристалла. Жидкие кристаллы могут образовывать только вещества с сильно вытянутыми негибкими молекулами. Такие молекулы-стержни всегда стремятся расположиться вдоль одного направления, т. е. в определенной степени упорядоченно. С ростом температуры упорядоченность уменьшается и в конце концов полностью исчезает. Диапазон температур, в пределах которого существует жидкокристаллическое состояние, составляет обычно несколько десятков градусов. Вещества в жидкокристаллической фазе обладают анизотропией физических свойств и текучестью, сравнимой с текучестью обычной жидкости.

Жидкие кристаллы, полученные плавлением твердого вещества, называют термотропными и разделяют на три класса: нематический, холестерический и смектический. Молекулы таких веществ в жидкокристаллической фазе ориентированы вдоль одного направления не строго, в их ориентации имеются флуктуации. Это приводит к большой оптической микронеоднородности среды, благодаря чему рассеяние света типичными жидкими кристаллами примерно в  $10^6$  раз больше, чем обычными изотропными кристаллами. Во внешнем электрическом поле молекулы жидких кристаллов стремятся выстроиться вдоль или поперек направления поля в зависимости от того, в каком направлении их поляризуемость выше, и пропускание света резко возрастает.

В жидких кристаллах с холестерической фазой молекулы представляют собой слегка закрученные стержни, укладывающиеся друг относительно друга в спиральные структуры. Структура холестерика периодична вдоль оси спирали, что приводит к брегговскому отражению света на длине волны, равной шагу спирали, деленному на показатель преломления света в данном веществе. С помощью внешнего электрического поля можно изменять шаг спирали, поворачивать ее ось и переводить кристалл из холестерической фазы в нематическую. Шаг спирали, а следовательно, длина волны брегговского отражения изменяются под действием температуры. Это позволяет применять холестерик для визуального наблюдения горячих точек в микросхемах.



Очень чувствительны к тепловым и механическим воздействиям жидкие кристаллы в смектической фазе, в которой молекулы вещества распределены слоями с четко определенным периодом. Смектики более упорядочены, чем нематики, и для данного вещества смектическая фаза возникает всегда при более низкой температуре, чем нематическая.

Рассмотренные выше свойства жидких кристаллов позволяют использовать их для экспрессного контроля качества полупроводниковых структур и анализа отказов приборов.

При контроле качества структур и диагностике дефектов воздействия электрических или тепловых полей рассматриваются как возмущающие факторы, переводящие жидкие кристаллы в изотропное состояние. Так, например, термооптический эффект, сопровождающийся изменением цвета и светопропускания кристалла, вызывается тепловыми нагрузками. Электрические поля приводят к возникновению эффекта динамического рассеяния света, связанного с турбулентным движением молекул нематика. Эффект деформации вертикально ориентированной фазы или *B*-эффект является следствием искажения первоначальной ориентации молекул в жидком кристалле.

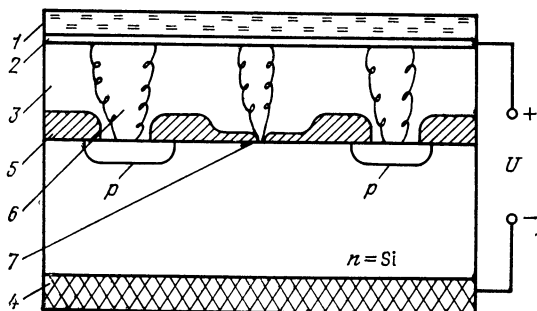
При осуществлении контроля полупроводниковых структур на поверхности последней создается плоская жидкокristаллическая ячейка (рис. 9.10), состоящая из покровного стекла 1, подвергнутого специальной обработке с целью получения нужного микро-рельефа, задающего направление ориентации молекул ЖК с нанесенным на его внутреннюю поверхность прозрачным электродом 2 из  $\text{SnO}_2$ .

Стекло помещается на полупроводниковую структуру, покрывающую тонким слоем (обычно не более 100 мкм) жидкого кристалла 3.

При подаче смещения на структуру с жидкокristаллической ячейкой в местах с дефектами окисла и в области *p-n* переходов, где протекают токи порядка  $3 \cdot 10^{-2} \text{ А/м}^2$ , возникает турбулентное движение молекул, которое четко наблюдается с помощью оптического микроскопа. Изучение картины турбулентности позволяет выявить такие дефекты полупроводниковых структур, как вырывы и проколы тонкого слоя окисла МДП-приборов, искажения гео-

Рис. 9.10. Контроль полупроводниковой структуры с использованием жидкокristаллической ячейки:

1 — покровное стекло; 2 — прозрачный металлический электрод; 3 — жидкий кристалл; 4 — металлический электрод; 5 — двуокись кремния; 6 — турбулентный поток молекул; 7 — прокол в окисной пленке



метрии  $p$ - $n$  переходов, обрывы и короткие замыкания металлической разводки. Линейное разрешение методики контроля ограничено размерами турбулентных вихрей в слое жидкого кристалла и составляет несколько микрон.

Для более детального исследования геометрии  $p$ - $n$  переходов используется методика, основанная на  $B$ -эффекте, в соответствии с которой на поверхности контролируемой структуры формируется жидкокристаллическая ячейка с покрывным стеклом без прозрачного металлического электрода.

Контроль структуры производится с помощью поляризационного оптического микроскопа в скрещенных поляризаторах. В исходном состоянии гомеотропно ориентированные молекулы жидкого кристалла не изменяют состояния поляризации проходящего через него света. Поэтому в скрещенных поляризаторах однородно ориентированный жидкий кристалл будет казаться темным. При подаче обратного смещения на  $p$ - $n$  переход (рис. 9.11) происходит локальное изменение ориентации молекул жидкого кристалла.

На границе  $p$ - $n$  перехода вертикальная компонента электрического поля стремится к нулю, и направление ориентирования молекул здесь не меняется. Области отклонения молекул по обе стороны от границы легирования примерно соответствуют зонам повышенной напряженности электрического поля на поверхности  $p$ - $n$  перехода, поэтому в скрещенных поляризаторах симметричный  $p$ - $n$  переход будет иметь вид светлых двойных линий, равноотстоящих от границы легирования. О плохом качестве  $p$ - $n$  переходов свидетельствуют прерывность, разнотолщинность или смещение линий высвечивания, изменение расстояний между ними. Линейное разрешение методики с использованием  $B$ -эффекта лежит в пределах 1 мкм.

Для исследования тепловых полей используется термооптический эффект, при котором нематический жидкий кристалл наносится непосредственно на поверхность исследуемого прибора, находящегося в рабочем режиме. Наблюдения проводятся с использованием оптического микроскопа в скрещенных поляризаторах. Если температура поверхности структуры ниже температуры просветления жидкого кристалла, то в скрещенных поляризаторах эта поверхность будет казаться освещенной. В области с температу-

ратурой, превышающей точку просветления, жидкий кристалл перейдет в изотропное состояние, вследствие чего они будут казаться темными. Граница темной области будет представлять со-

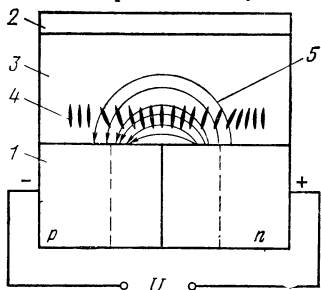


Рис. 9.11. Контроль полупроводниковой структуры с использованием  $B$ -эффекта:  
1 — полупроводниковая структура; 2 — покрывное стекло; 3 — жидкий кристалл; 4 — молекулы жидкого кристалла; 5 — электрическое поле

бой изотерму, соответствующую точке просветления. Линейное разрешение данной методики лежит в пределах 5... 10 мкм.

При использовании холестерических жидких кристаллов неоднородное распределение температуры по поверхности полупроводниковой структуры определяется по изменению цвета наносимого на нее тонкого слоя жидкого кристалла. Линейное разрешение этого метода составляет около 10 мкм, температурное — 0,1°C.

## ГЛАВА 10

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИБОРОВ И ДИАГНОСТИКА

#### 10.1. ПОНЯТИЕ О МЕТОДЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Как уже говорилось, оценка показателей надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем путем прямых испытаний с ростом сложности приборов становится все более затруднительной, так как требует значительных экономических и временных затрат. Оперативность получения информации о надежности приборов из сферы эксплуатации столь низка, что она пригодна главным образом для определения причин отказов и принятия мер к их устранению путем коррекции конструкции и технологических процессов изготовления. В этой связи все более актуальным становится применение специальных методов прогнозирования надежности приборов.

Под прогнозированием надежности в настоящее время в технической литературе понимается специальный круг задач по предсказанию или косвенной оценке надежности приборов с определенной степенью достоверности, обоснованной теоретически и подтвержденной на практике. В этой связи большой интерес представляет так называемый метод распознавания образов, который, несмотря на достаточно глубокую разработанность его математического аппарата, не нашел широкого применения при прогнозировании надежности изделий электронной техники и, в частности, полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [64]. Основными причинами такого положения, по-видимому, являются следующие обстоятельства.

Во-первых, метод распознавания образов основывается на прогнозируемых показателях, не связанных непосредственно с физическими характеристиками изделий и с воздействующими на них факторами. И во-вторых, постоянное совершенствование технологии и конструкции приборов непрерывно меняет базу, на которой основывается прогноз, делая ее непригодной для распространения на изделия последующих за прогнозом выпусков. Однако для особо сложных полупроводниковых приборов, больших и сверхбольших интегральных микросхем, прямые испытания которых весьма

дороги, этот метод перспективен. Рассмотрим основные его положения.

*Распознавание образов* — научное направление, связанное с разработкой принципов и построением систем, предназначенных для определения принадлежности данного объекта к одному из заранее выделенных классов объектов.

Под *образом* понимают наименование области в пространстве признаков, в которой отображается множество объектов или явлений материального мира, выделенное в соответствии с определенной целью. В зависимости от цели мы можем выбрать разные области в этих признаковых пространствах, в результате чего одна и та же пара объектов может быть отнесена как к одному и тому же, так и к различным объектам. В геометрической интерпретации под образом понимается область в  $n$ -мерном выборочном пространстве, вдоль координатных осей которого отложены значения параметров. Описание этой области называют *эталоном*.

Под *объектом* в распознавании образов понимают различные предметы, явления, процессы, ситуации, сигналы. Каждый объект описывается совокупностью основных характеристик (признаков, свойств):  $X(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ , где  $x_i$  — есть  $i$ -я координата вектора  $X$ , которая определяет значения  $i$ -й характеристики объекта. Отдельные объекты в составе образа называют *реализациями*.

В  $n$ -мерном выборочном пространстве может быть выделен целый перечень фиксированных областей-образов, называемый *алфавитом образов* или объектов распознавания  $S$ .

В любой задаче распознавания число элементов алфавита конечно, но не менее двух.

Объект в  $n$ -мерном пространстве будет полностью определен, если будут указаны его характеристики — основная  $X(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ , представляющая собой совокупность его параметров, и дополнительная  $S$ , определяющая его отношение к тому или иному образу.

Набор заранее расклассифицированных объектов, т. е. таких, у которых известны характеристики  $X$  и  $S$ , называется *обучающей выборкой*. Те объекты, у которых характеристика  $S$  неизвестна, образуют *контрольную выборку*. Обучающая выборка используется для обнаружения закономерных связей между значениями характеристик  $X$  и  $S$ .

Одна из основных задач распознавания образов — выбор *правил или решающей функции*  $D$ , в соответствии с которым по значению контрольной реализации  $X$  устанавливается ее принадлежность к одному из образов, т. е. указываются «наиболее правдоподобные» значения характеристики  $S$  для данного  $X$ .

Выбор решающей функции  $D$  требует произвести так, чтобы стойкость процедуры распознавания необходимых распознающих устройств, их эксплуатации и стоимость потерь, связанных с ошибками распознавания, были минимальными.

Примером задачи распознавания образов этого типа может служить задача различения нефтеносных и водоносных пластов

по косвенным геофизическим данным. По этим характеристикам сравнительно легко обнаружить пласты, насыщенные жидкостью. Значительно сложнее определить, наполнены они нефтью или водой. Требуется найти правило использования информации, содержащейся в геофизических характеристиках для отнесения каждого насыщенного жидкостью пласта к одному из двух классов — водоносному или нефтеносному. При решении этой задачи в обучающую выборку включают геофизические данные вскрытых пластов.

Успех в решении задачи распознавания образов зависит в значительной мере от того, насколько удачно выбраны признаки  $X$ . Исходный набор характеристик часто бывает очень большим. В то же время приемлемое правило должно быть основано на использовании небольшого числа наиболее важных признаков, позволяющих отличить один образ от другого. Поэтому проблема: выбора информативных признаков — важнейшая составная часть проблемы распознавания образов.

В основной задаче распознавания образов о построении решающей функции  $D$  используются закономерные связи между характеристиками  $X$  и  $S$ , обнаруживаемые на обучающей выборке, и некоторые дополнительные априорные предположения. Например:

характеристики  $X$  для реализации образов представляют собой случайные выборки из генеральной совокупности с нормальным распределением;

реализации одного образа расположены компактно, т. е. сгруппированы так, что могут быть выделены в некоторую область;

признаки в наборе  $X$  независимы.

В основной задаче распознавания образов применяются главным образом два метода: статистический и детерминистский.

При статистическом методе решение основывается на том предположении, что известны распределения образов в генеральной совокупности, и они подчиняются известным теоретическим распределениям типа нормального и др.

Детерминистский метод основан на том, что распределение генеральной совокупности принимается таким, каким оно представлено в обучающей выборке с какими угодно сложными решающими функциями. Важно, чтобы обучающая выборка распознавалась безошибочно. Примеры представления объектов в соответствии с рассмотренными выше методами представлены на рис. 10.1.

Предположим, имеется набор двух классов элементов, расположенных на числовой оси так, как это показано на рис. 10.1,а. Для использования статистического метода описание этих классов элементов может быть осуществлено (рис. 10.1,б) с применением закона равномерной плотности (кривая 1) или нормального распределения (кривая 2). На рис. 10.1,в показано представление этих же классов элементов значительно более сложными распределениями, более детально описывающими эти классы. Такое описание применяется в детерминистском методе.

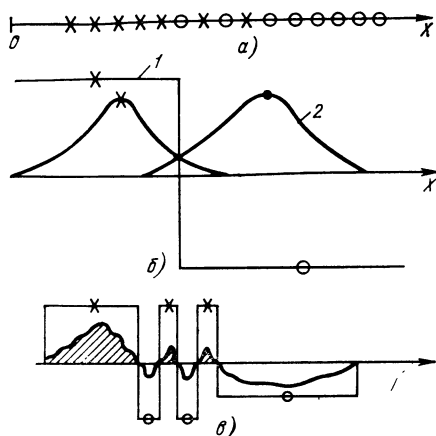


Рис. 10.1. Статистическое (б) и детерминистское (а) представление элементов 2-х классов:

x — класс A; o — класс B; а — расположение классов на числовой оси

Порядок действий при применении методов распознавания образов следующий:

1. Определение и контроль наиболее информативных признаков. Если признаки статистически независимы, то процедура отбора сводится к их упорядочению по убыванию количества обеспечиваемой ими информации при прогнозировании,

важной для каждого признака в отдельности. В случае зависимых признаков необходимо выявить их корреляционные связи, и оптимальный набор выбирать путем последовательного прибавления признаков и оценки информации, которую он добавляет.

2. Объекты, характеризуемые набором признаков, необходимо классифицировать по образам на основе алфавита образов  $S$ .

3. Избрать решающее правило  $D$ , с помощью которого произвести классификацию объектов.

Математически задача классификации может быть сформулирована с помощью разделяющей функции

$$D_i(X) - D_j(X) = 0, \quad (10.1)$$

где  $D_i$ ,  $D_j$  — решающие функции для данного класса образов, которые на границе образа максимальны. В двумерном случае, т. е. при числе образов  $m=2$ , разделение образов на классы представлено на рис. 10.2,а. Если классы определенным образом группируются относительно своих центров распределения, то отыскание границы разделения сводится к отысканию этих центров распределения  $a$ ,  $b$  и определения кратчайшего расстояния между ними (отрезок  $a$ ,  $b$ ). Линия, проведенная через середину этого отрезка

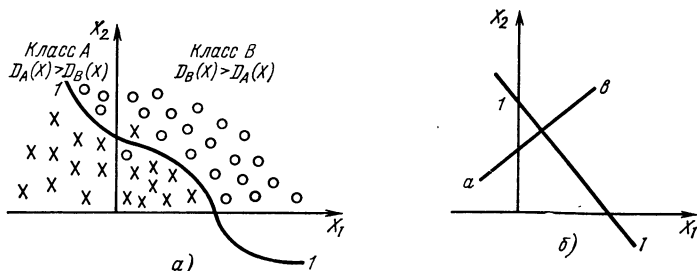


Рис. 10.2. Разделение образов на классы:

A, B — распознаваемые классы. Линия 1, 1 — проекция разделяющей гиперплоскости; a, b — центры группирования объектов

перпендикулярно к нему, будет проекцией гиперплоскости, разделяющей классы  $A$  и  $B$  (рис. 10.2,б) и удовлетворяющей решающему правилу (10.2). Фактически действия или алгоритм прогнозирования по методу распознавания образов сводятся к тому, что на основе определенной обработки информации на момент времени  $t=0$  необходимо дать прогноз уровня надежности на время  $t_n$ .

Порядок работы следующий:

1. Из совокупности приборов отбирается обучающая выборка.  
2. Приборы выборки испытываются на надежность в течение времени  $t_n$ .

3. Для каждого прибора в обучающей выборке определяется действительное время безотказной работы  $t_i$ .

4. В зависимости от соотношения  $t_i$  и  $t_n$  приборы разделяются на классы: класс  $A \rightarrow t_i \geq t_n$ , класс  $B \rightarrow t_i < t_n$ .

На основе оценки начальных параметров на момент времени  $t=0$  и полученных результатов испытаний выбирается решающее правило. На основе решающего правила каждый прибор генеральной совокупности прогнозируется на долговечность с отнесением к классу  $A$  или классу  $B$ . После индивидуального прогнозирования часть приборов из генеральной совокупности может быть предъявлена на экзамен и испытана.

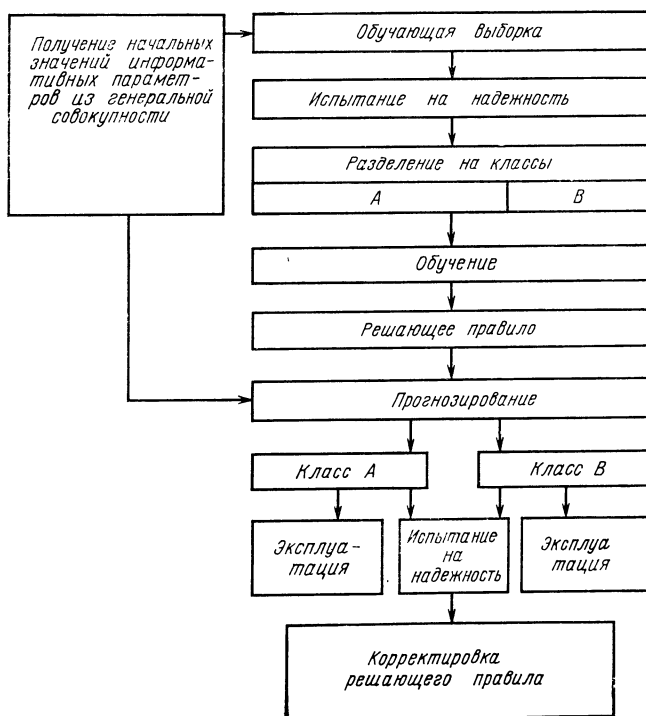


Рис. 10.3. Алгоритм распознавания

По результатам испытаний может быть откорректировано решающее правило.

Можно усложнить процедуру прогноза, включив в состав информации данные о замерах параметров на начальный и промежуточный моменты времени. Дополнительно могут быть использованы данные из эксплуатации приборов в реальных условиях.

Алгоритм прогнозирования представлен на рис. 10.3.

## 10.2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПО ВИДУ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотренные в гл. 9 методы неразрушающих испытаний могут быть в определенной степени основой для выбора информативных параметров при прогнозировании посредством методов распознавания образов. Пригодными для этой цели могут быть и электрофизические методы.

Наиболее наглядным среди электрофизических методов является электропараметрический, основанный на исследовании вольт-амперных характеристик. При этом для оценки качества используются как количественные, так и качественные признаки. И в том и в другом случае используются отличия ВАХ от идеальной.

Рассмотрим принципы использования качественных признаков прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики  $p-n$  перехода (рис. 10.4). В качестве эталона для сравнения выбирается прямая ветвь ВАХ  $p-n$  перехода, имеющая два различных участка. Первый (1) участок — начальный, характеризующийся очень медленным нарастанием тока с ростом напряжения до определенного значения, после которого происходит резкое возрастание тока при незначительном (в пределах десятых долей вольта) изме-

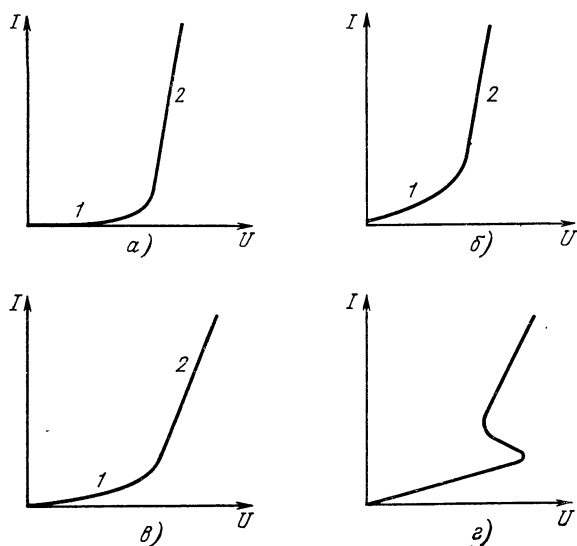


Рис. 10.4. Дефекты прямой ветви вольт-амперной характеристики:

$a$  — эталонная характеристика;  $б$  — дефект на участке 1;  $в$  — дефект на участке 2 из-за дефектов контактов;  $г$  — дефект из-за паразитного  $p-n$  перехода



нении напряжения. Это свойство характеризует второй (2) участок вольт-амперной характеристики (рис. 10.4,а).

Рассмотрим некоторые виды дефектов прямой ветви вольт-амперной характеристики. На рис. 10.4,б показан дефект, связанный со значительным нарастанием тока на первом участке. Данный дефект обусловлен наличием каналов утечки из-за загрязнений на поверхности кристалла, замыканием металлизации с областью  $p$ - $n$  перехода через поры в окисной пленке. Все это приводит к частичному шунтированию  $p$ - $n$  перехода и почти линейному нарастанию тока на начальном участке.

На рис. 10.4,в показано замедленное нарастание тока на втором участке вольт-амперной характеристики. Данный эффект свидетельствует о некачественной структуре контактных областей, из-за чего возникает значительное последовательное сопротивление в структуре  $p$ - $n$  перехода и характеристика его искажается.

На рис. 10.4,г представлен дефект в виде участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, что свидетельствует о наличии паразитного  $p$ - $n$  перехода, включенного последовательно с основным  $p$ - $n$  переходом. Паразитный  $p$ - $n$  переход возникает из-за неоднородности распределения примеси в базовой области полупроводниковой структуры, а также из-за некачественной структуры омических контактов, в связи с чем им присущ эффект выпрямления.

Для прогнозирования по обратной ветви в качестве эталона выбирается обратная ветвь вольт-амперной характеристики, близкая к идеальной и состоящая из двух участков, на первом из которых обратный ток почти не зависит от приложенного к  $p$ - $n$  переходу обратного напряжения, вплоть до наступления пробоя. На втором участке наступает резкое возрастание тока и характеристика имеет очень малое дифференциальное сопротивление (рис. 10.5,а). На рис. 10.5,б показан дефект первого (1) участка обратной ветви, выражающийся в наличии существенного возрастания тока с приложением обратного напряжения с последующим появлением участка насыщения. Дефект свидетельствует о наличии сквозного канала, шунтирующего  $p$ - $n$  переход. При определенном напряжении суммарный обратный ток превосходит ток через канал и появляется участок насыщения.

На рис. 10.5,в показана «убегающая» вольт-амперная характеристика, возникающая при увеличении напряжения развертки осциллографа. Подобный вид дефекта свидетельствует о наличии обогащенного слоя вблизи  $p$ - $n$  перехода.

На рис. 10.5,г показано ступенчатое изменение первого (1) участка обратной ветви, свидетельствующее о возникновении сквозного канала между электродами прибора при напряжении, большем некоторой пороговой величины.

На рис. 10.5,д показан случай постепенного возрастания обратного тока без достижения участка пробоя (2). Данный эффект свидетельствует о наличии ненасыщающегося канала между электродами прибора.

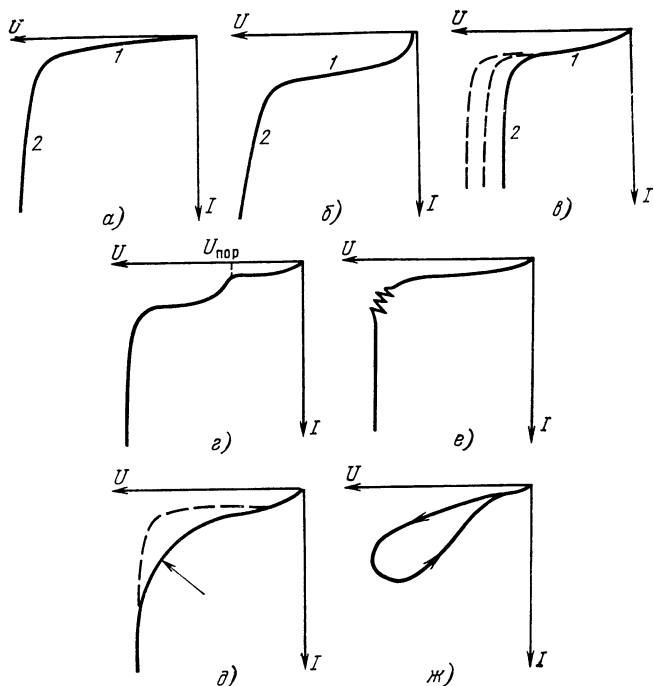


Рис. 10.5. Дефекты обратной ветви вольт-амперной характеристики:

а — эталонная характеристика; б — наличие проводящего канала между электродами; в — «убегающая» характеристика; г — возникновение канала при  $U_{\text{пор}}$ ; е — нестабильный участок пробоя; д — «мягкая» характеристика; ж — «петля» на характеристике

На рис. 10.5,е представлена обратная ветвь с нестабильным участком в области пробоя, что свидетельствует о наличии микротрещин в кристалле, пересекающих  $p-n$  переход. На рис. 10.5,ж представлен дефект обратной ветви в виде «петли», свидетельствующий о наличии влаги на поверхности структуры или загрязнений, молекулы которых способны поляризоваться. При постепенном снижении обратного напряжения из-за токов утечки на характеристике появляется гистерезисная петля.

Исключение из генеральной совокупности приборов с рассмотренными выше дефектами способствует существенному снижению интенсивности отказов приборов при их эксплуатации.

Использование первой и второй производных обратной ветви вольт-амперной характеристики дает возможность выявить более мелкие дефекты структуры  $p-n$  перехода [75]. На рис. 10.6 представлены несколько случаев выявления дефектов с помощью вторых производных обратной ветви ВАХ. В первом случае показан эталонный  $p-n$  переход, вторая производная обратной ветви вольт-амперной характеристики которого имеет достаточно большую амплитуду и незначительное размытие по оси напряжения. Во втором случае амплитуда второй производной существенно меньше и характеристика растянута по оси напряжений. Рассмотренный

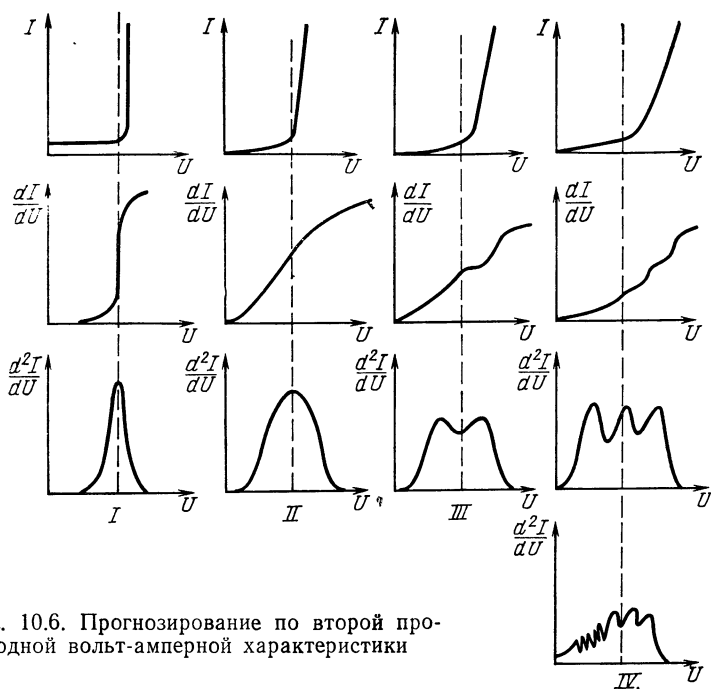


Рис. 10.6. Прогнозирование по второй производной вольт-амперной характеристики

вид характеристики свидетельствует о наличии локальных участков с повышенным тепловым сопротивлением и о неравномерном пробое структуры  $p$ - $n$  перехода. В третьем случае показана характеристика с двумя максимумами на графике второй производной. Данный дефект говорит о неоднородности  $p$ - $n$  перехода и о наличии двух мест локализации пробоя. В четвертом случае представлены характеристики  $p$ - $n$  переходов с большим числом локальных мест пробоя и с участками образования микроплазмы.

Приведенные примеры показывают, что вторая производная обратной ветви ВАХ значительно информативнее, чем просто обратная ветвь и ее первая производная.

Таким образом, выявление связей аномальных отклонений конфигурации вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$  переходов с внутренними дефектами полупроводниковой структуры позволяет получить наглядную и достоверную информацию о качестве приборов. Процентное содержание приборов с аномальными характеристиками в составе партии позволяет судить о степени отработанности конструкции и технологического процесса. Исключение приборов с аномальными характеристиками из генеральной совокупности приборов позволяет значительно поднять уровень надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, поставляемых потребителю.

И наконец, установление связи отклонений от нормы вольт-амперных характеристик приборов с дефектами структуры поз-

воляет выработать корректирующие воздействия на их конструкцию и технологический процесс изготовления, направленные на исключение этих дефектов структуры. В данном случае контроль вольт-амперных характеристик может использоваться как экспресс-метод определения действенности корректирующих воздействий. Отсутствие или снижение количества приборов с аномальными характеристиками свидетельствует об эффективности принимаемых мер.

### 10.3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПО $m$ -ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Выше говорилось, что вольт-амперные характеристики могут использоваться для оценки приборов по количественным признакам. Количественные критерии оценки выбираются на основе статистической обработки результатов измерений ВАХ достаточно большого числа однотипных приборов. Выбор информативных параметров, пригодных для количественной оценки надежности приборов основывается на анализе специфических свойств вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$  перехода в прямом направлении.

Теоретически прямая ветвь вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$  перехода выражается экспоненциальной функцией вида:

$$I_{np} = I_0 \left( \exp \frac{U_{p-n}}{\varphi_T} - 1 \right), \quad (10.2)$$

где  $I_0$  — тепловой ток или обратный ток насыщения;  $\varphi_T$  — тепловой потенциал.

Если построить ВАХ, используя выражение (10.2) в полулогарифмическом масштабе, то получим прямую линию с коэффициентом наклона, равным 1. Однако реальные характеристики  $p$ - $n$  перехода состоят из нескольких участков с разными коэффициентами наклона (рис. 10.7).

На начальном участке необходимо учитывать два компонента в составе прямого тока через  $p$ - $n$  переход: генерационно-рекомбинационную и диффузионную составляющие. Генерационно-рекомбинационная составляющая определяется следующим выражением:

$$I_r \approx A \exp \left( \frac{U}{2 \varphi_T} \right). \quad (10.3)$$

Эта зависимость в полулогарифмическом масштабе представляет собой прямую с коэффициентом наклона 1/2. У германиевых приборов на начальном участке диффузионная составляющая существенно превышает генерационно-рекомбинационную, поэтому ха-

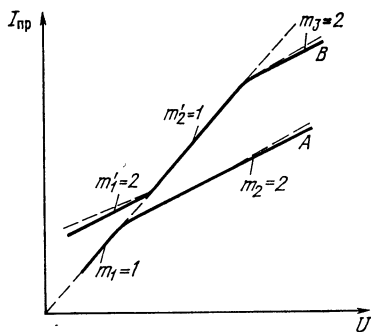


Рис. 10.7. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики германиевых и кремниевых приборов

характеристика имеет коэффициент наклона 1. У кремниевых приборов, наоборот, на начальном участке существенную роль играет ток генерации и рекомбинации, поэтому характеристика имеет коэффициент наклона, равный  $1/2$ . С ростом напряжения на  $p$ - $n$  переходе у кремниевых приборов преимущественную роль начинают играть диффузионные составляющие и наклон характеристики становится равным 1. При дальнейшем росте напряжения в его распределении существенную роль начинает играть сопротивление базовой области и выражение для вольт-амперной характеристики примет следующий вид:

$$I_{np} = I_0 \left( e^{\frac{U_{p-n} - I r_B}{\Phi_T}} - 1 \right), \quad (10.4)$$

где  $U_{p-n}$  — падение напряжения непосредственно на  $p$ - $n$  переходе,  $r_B$  — активное сопротивление базовой области.

На характеристике появляется так называемый «омический» участок и наклон ее как у германиевых, так и у кремниевых приборов изменяется до  $1/2$  и более. В общем виде характеристика имеет следующий вид:

$$I_{np} \approx I_0 e^{\frac{U}{m \Phi_T}}, \quad (10.5)$$

где  $m$  — коэффициент наклона характеристики в полулогарифмическом масштабе, или, как принято его называть,  $m$ -характеристика. Величина коэффициента  $m$  зависит от совершенства структуры  $p$ - $n$  перехода, базовой области и омических контактов. По степени отклонения значения коэффициента  $m$  от теоретического для разных диапазонов токов можно судить о качестве приборов. На этом принципе основан метод контроля приборов по  $m$ -характеристикам.

Согласно этому методу прибор контролируется посредст-

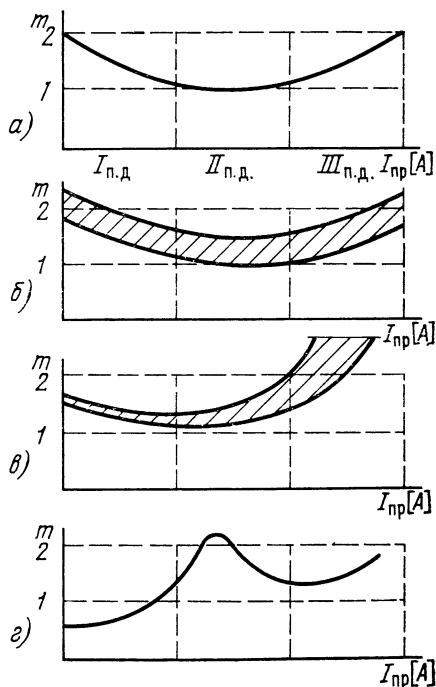


Рис. 10.8.  $m$ -характеристики партии кремниевых приборов:

а — идеализированная характеристика; б — характеристика партии годных приборов; в — характеристика приборов с некачественными контактами; г — характеристика приборов с большими токами утечки

вом регистрации тока через него в 17 дискретных точках в следующих поддиапазонах:

I (малые уровни тока)	1·10 <sup>-10</sup> ... 1·10 <sup>-7</sup> А
II (средние уровни тока)	3·10 <sup>-7</sup> ... 1·10 <sup>-4</sup> А
III (большие уровни тока)	3·10 <sup>-4</sup> ... 1·10 <sup>-2</sup> А

По результатам измерений строятся  $m$ -характеристики и сравниваются с идеализированной характеристикой (рис. 10.8,а), согласно которой у совершенной полупроводниковой кремниевой структуры в поддиапазоне I коэффициент  $m$  изменяется в пределах от 2 до 1, в поддиапазоне II неизменен и равен 1, в поддиапазоне III изменяется от 1 до 2.

Характеристики реальных приборов имеют определенный разброс. Устанавливая пределы этого разброса, можно регулировать качество приборов (рис. 10.8,б). По отклонению  $m$ -характеристики партии приборов от идеализированной можно оценить стабильность технологического процесса и на основе полученных данных судить о возможных дефектах в полупроводниковых структурах. В частности, резкое возрастание  $m$ -характеристики (рис. 10.8,в) свидетельствует о дефектах в контактных соединениях, а наличие максимума  $m$ -характеристики — о значительных токах утечки.

#### 10.4. ДИАГНОСТИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ПОМОЩЬЮ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР

Функциональная сложность интегральных микросхем и малые размеры их элементов затрудняют, а в ряде случаев делают невозможным изучение механизмов отказов и вызывающих их дефектов. По мере роста степени интеграции микросхем эти трудности становятся непреодолимыми. Поэтому для диагностики отказов, анализа причин брака и деградации параметров ИМС широко используются тестовые структуры, т. е. специально сконструированные отдельные элементы интегральных микросхем, параметры которых дают возможность судить о качестве выполнения того или иного технологического процесса и, в совокупности, о годности всей микросхемы и качестве ее конструкции. В ряде случаев тестовые структуры выполняются в виде специализированных микросхем достаточно высокой степени сложности.

На тестовых модулях проводят контроль точности совмещения фотошаблонов при проведении фотолитографических процессов, исследуют влияние механических напряжений на элементы ИМС, проверяют целостность и качество выполнения металлической и поликремниевой разводки и контактов, определяют сопротивление изоляции, распределение заряда в окисле и т. д. На биполярных тестовых кристаллах измеряют до 30 различных параметров, начиная от толщины окисла, контактных сопротивлений и кончая параметрами диффузионных и имплантированных областей.

В качестве примера на рис. 10.9 показана крестообразная тестовая структура, применяемая для контроля правильности фор-

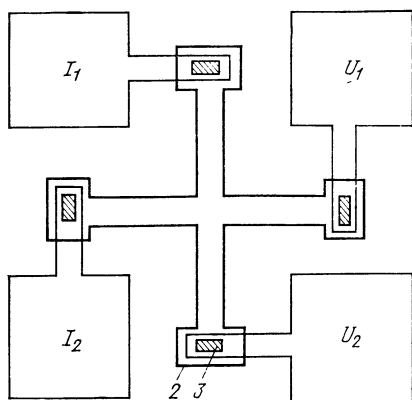


Рис. 10.9. Крестообразная тестовая структура для контроля поверхностного сопротивления легированного слоя:

1 — контактные металлизированные площадки; 2 — легированный слой; 3 — контактные окна

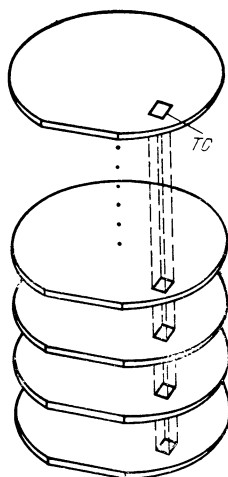


Рис. 10.10. Набор пластин из одного слитка для изготовления тестовых структур:

ТС — тестовая структура

мирования легированных слоев. На рисунке жирной линией обозначен профиль легированного слоя, свойства которого исследуются с помощью металлизированных токовых ( $I_1$ ,  $I_2$ ) и потенциальных ( $U_1$ ,  $U_2$ ) контактных площадок, соединенных с легированным слоем через контактные окна в поверхностной окисной пленке (заштрихованные участки на рис. 10.9). О качестве легированного слоя судят по уровню поверхностного сопротивления  $R_p$ , определяемого из соотношения

$$R_p = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{\Delta U}{I}, \quad (10.6)$$

где  $I$  — ток, протекающий через токовые контакты;  $\Delta U$  — падение напряжения, измеряемое с помощью потенциальных контактов.

Достоинством крестообразных структур является простота исполнения, нечувствительность результатов измерений к изменению размеров фотошаблонов и уходу размеров структуры при фотолитографии.

Тестовые структуры изготавливаются на отдельных технологических пластинах, сопровождающих каждую партию. В этом случае имеется возможность производить оценку однородности параметров интегральных микросхем в пределах пластины и партии пластин, подвергающихся обработке одновременно. В других случаях тестовые структуры встраиваются в различные места пластины с реальными ИМС. По результатам контроля ТС в этом случае ведется сортировка пластин и партий микросхем.

В ряде случаев одновременно используются тестовые структуры на технологических пластинах и встроенные в пластины с кристаллами интегральных микросхем. Это дает возможность наиболее полно провести контроль стабильности технологического процесса и качества пластин с интегральными структурами.

Информация, получаемая с помощью тестовых структур, может быть использована для построения автоматизированных систем управления качеством интегральных микросхем [76, 77]. Основой построения таких систем являются данные о качестве ТС контрольных партий пластин, изготовленных из одного слитка (рис. 10.10). Пронумерованные по вертикали пластины подвергаются необходимой обработке для получения тестовых структур избранной конфигурации. Готовые структуры на пластинах проверяются, по результатам составляются карты распределения годных и бракованных ТС на каждой пластине. Пример такой карты приведен на рис. 10.11. Здесь светлыми квадратами обозначены годные, а темными — неисправные ТС. Заштрихованными квадратами обозначены стандартные места расположения тестовых структур на пластинах с реальными структурами ИМС.

На основе карт распределения ТС по пластинам составляется карта распределения тестовых структур по слитку исходного полупроводникового монокристалла. На рис. 10.12 представлены данные о тестовых структурах, изготовленных на 35 пластинах. Темными квадратами обозначены участки пластин, на которых получены неисправные тестовые структуры. На основе статистической обработки данных рис. 10.12 может быть составлена карта распределения среднего значения годных тестовых структур по слит-

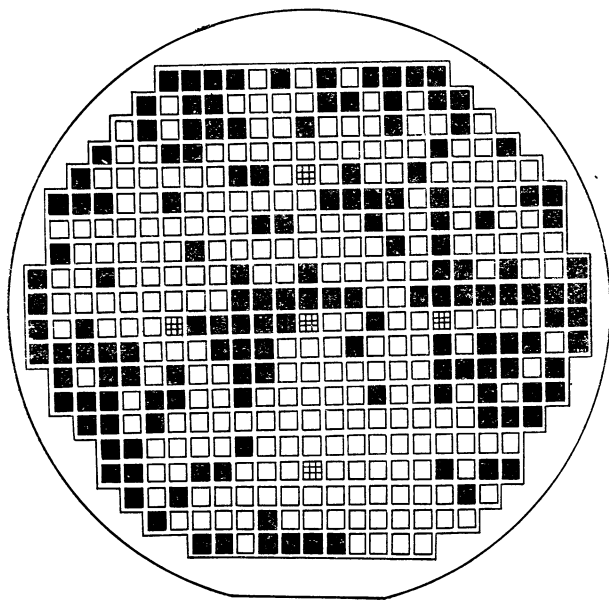


Рис. 10.11. Карта распределения годных и бракованных тестовых структур по пластине



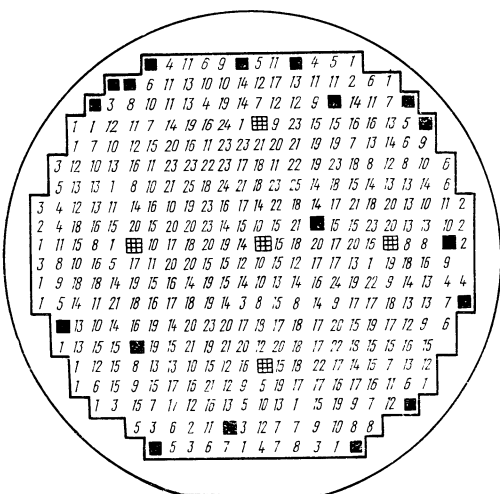


Рис. 10.12. Обобщенная карта распределения годных и бракованных тестовых структур на 35 пластинах

ская обработка результатов измерений позволяет оперативно реагировать на отклонения в технологическом процессе посредством выработки корректирующих мероприятий, обеспечивающих получение приемлемого выхода годных структур интегральных микросхем.

ку. На рис. 10.13 представлена такая карта. Здесь незаштрихованная часть рисунка определяет области, в которых число годных ТС превышает среднее арифметическое значение по всем пластинам, а заштрихованная пунктирными линиями часть рисунка — области с количеством годных структур ниже среднего арифметического значения. По распределению годных структур можно судить о локализации дефектов как на пластине, так и в слитке исходного монокристалла. Автоматизация контроля параметров ТС и статистиче-

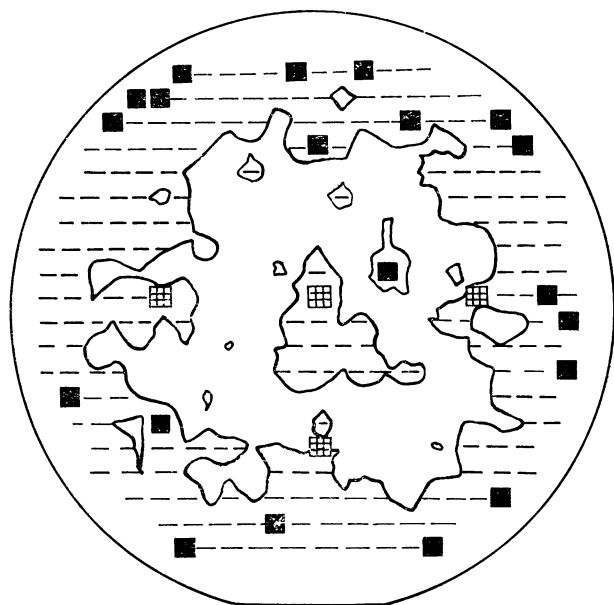


Рис. 10.13. Распределение годных тестовых структур по площади пластин и по объему монокристалла

Широкое применение ТС находят для изучения механизмов отказов приборов и прогнозирования их надежности [78]. Тестовые структуры изготавливаются в виде отдельных конструктивных элементов, герметизируются в стандартные корпуса и испытываются в различных условиях внешних воздействий. При проведении этих испытаний определяются механизмы отказов, энергии активации процессов деградации отдельных конструктивных элементов и количественные характеристики надежности тестовых структур. На основе этих данных строятся модели надежности интегральных микросхем, состоящих из идентичных конструктивных элементов, и прогнозируется их надежность.

Таким образом, тестовые структуры весьма эффективны при разработке интегральных микросхем, так как дают возможность посредством моделирования отдельных конструктивных элементов и их всестороннего исследования выбрать наиболее оптимальный вариант ИМС.

В процессе серийного производства тестовые структуры позволяют оперативно контролировать технологический процесс, определять причины, вызывающие брак, и вырабатывать эффективные меры по борьбе с ним. Для каждой базовой технологии целесообразно иметь специальный набор ТС, позволяющий исследовать влияние всех существующих конструктивных факторов на элементы микросхем. К тестовым структурам могут быть применены различные методы ускоренных испытаний на надежность, так как подобные испытания больших и сверхбольших интегральных микросхем практически невозможны из-за крайней сложности интерпретации результатов.

## **ГЛАВА 11**

### **ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В АППАРАТУРЕ**

#### **11.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В АППАРАТУРЕ**

В гл. 1 обращалось внимание на то, что надежность как сложное свойство прибора является одной из наиболее важных составляющих качества. Рассмотрим более подробно соотношение этих двух характеристик приборов.

По определению качество любого изделия представляет собой совокупность свойств, сформированных исходя из потребности на это изделие. Таким образом, составляющие качества формируются с учетом требований той области, для применения в которой

данное изделие предназначено. Изменяются условия применения, изменяются соответственно и требования к качеству изделия. Таким образом, качественные характеристики изделия не возникают сами по себе, а формируются на основе объективных потребностей той или иной отрасли техники.

Для конкретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем их качественные характеристики, такие как конструктивное исполнение, электрические параметры, лимитная цена, надежность формируются на стадии оформления технического задания на разработку, уточняются в процессе разработки и затем фиксируются в нормативно-технической документации.

На последующих этапах жизненного цикла приборов конструктивное исполнение, электрические параметры, зафиксированные в технических условиях, остаются неизменными, если прибор не подвергался модернизации. В определенной степени остаются неизменными расход материалов, процент выхода годных, трудоемкость и другие составляющие, определяющие лимитную цену. В связи с этим в системе управления качеством нет необходимости предусматривать специальные мероприятия по поддержанию на должном уровне рассмотренных фиксированных составляющих качества.

Поэтому, чтобы судить об уровне качества того или иного прибора, достаточно заглянуть в технические условия или паспорт на него, убедиться в том, что его электрические параметры соответствуют современным требованиям, конструктивные характеристики выполнены в точном соответствии с общепринятыми правилами, а экономические показатели вполне конкурентоспособны, чтобы сделать заключение о высоком качестве данного прибора.

Положение дел усложняется, когда мы обращаемся к надежным составляющим качества, которые отражают способность прибора сохранять электрические, конструктивные и механические параметры неизменными в течение срока службы в условиях воздействия различных режимов и факторов окружающей среды. Эту способность недостаточно записать в технические условия. Ее надо подтвердить как испытаниями в процессе производства, так и длительной эксплуатацией в различной аппаратуре. В связи с этим входной контроль исходных материалов, межоперационный контроль в технологическом процессе, выходной контроль готовых приборов и вообще вся система управления качеством со всеми ее организационными и технологическими мероприятиями по целевому назначению, направлены на обеспечение реализации надежных составляющих качества приборов, поставляемых потребителю. Кроме того, для обеспечения рационального использования надежных характеристик приборов в аппаратуре, как будет показано ниже, нужны специальные организационные и технические меры, объединяемые в систему управления надежностью, которая охватывает практически все этапы жизненного цикла прибора, в том числе и за пределами сферы производства приборов, т. е. в сфере разработки, производства и эксплуатации

аппаратуры. И если надежностные характеристики прибора выступают как соподчиненная составляющая часть в общем понятии качества приборов, то в области обеспечения надежности происходит изменение ранжировки соподчиненности. Система управления надежностью оказывается, по существу, рангом выше по сравнению с системой управления качеством приборов, так как имеет более широкую область распространения.

В настоящее время в промышленной практике действует несколько систем управления качеством продукции [31].

В американской полупроводниковой промышленности широкое распространение получила система, основанная на комплексе отбраковочных процедур. При выпуске приборов коммерческого назначения принята трехзвенная система взаимодействия: изготовитель — поставщик — потребитель. В качестве изготовителя выступает предприятие, выпускающее определенную номенклатуру приборов. Процесс изготовления включает в себя входной контроль исходных материалов и межоперационный контроль полуфабрикатов. Предприятие-изготовитель приборов непосредственной связи с потребителями не имеет. Готовая продукция от изготовителя поступает поставщику. Последний оснащен всем арсеналом измерительного и испытательного оборудования, необходимого для контроля и сортировки готовых приборов, а также для проведения различных отбраковочных испытаний.

Процедура отбраковочных испытаний включает набор повышенных температурных, токовых и механических нагрузок, ускоряющих действие механизмов отказов в приборах с неблагоприятным сочетанием дефектов. Тем самым предполагается, что из совокупности приборов в процессе отбраковочных испытаний в результате наступления отказов удаляются потенциально ненадежные экземпляры. Оставшиеся годные приборы после стандартных процедур сплошного или выборочного выходного контроля поставляются потребителю. Таким образом, потребитель, взаимодействуя с поставщиком, фактически имеет дело с обезличенной продукцией. При необходимости он может получить исчерпывающие сведения по контролю и испытаниям приборов, для того чтобы убедиться, что приборы удовлетворяют испытательным режимам. В ряде случаев потребитель может выдвинуть дополнительные требования, соответствие которым проверяется также посредством контрольных и испытательных процедур. Таким образом, гарантией качества приборов являются положительные результаты испытаний. На этом этапе кончается ответственность поставщика и далее потребитель распоряжается приборами по своему усмотрению.

В японской промышленности утвердился принципиально иной подход к построению системы управления качеством полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Система в той или иной степени затрагивает практически все этапы жизненного цикла приборов. Особо тщательно вопросы надежности рассматриваются в период разработки приборов. На этой стадии учитываются дефектность исходных материалов, конструктивные особенности аналогичных приборов, их слабые места, технологические возможности будущих предприятий-изготовителей. Перед постановкой на производство приборы тщательно испытываются, проводится детальный анализ отказавших приборов. Вновь разработанные приборы с невыясненными механизмами отказов и без принятия

мер коррекции по исключению или снижению действия таких механизмов в производство не принимаются.

Большое внимание уделяется обработке и поддержанию стабильности технологического процесса. Как правило, контроль стабильности технологических режимов осуществляется автоматически с периодической проверкой состояния режимов оператором. Производственный персонал систематически проходит обучение, программа которого главным образом направлена на обеспечение качества приборов на всех операциях. Операторы на всех переходах технологического процесса осуществляют самоконтроль и несут персональную ответственность за качество работы на данной конкретной операции.

Выходной контроль готовых приборов регламентирован определенным набором испытаний. Однако перечень и методика испытаний по инициативе изготовителя при необходимости может изменяться и дополняться. Изготовитель, как правило, имеет неформальное взаимодействие с потребителем приборов с целью получения исчерпывающей информации о надежности изготавливаемых им приборов из сферы эксплуатации. Это взаимодействие позволяет оперативно воздействовать на конструкцию и технологический процесс изготовления приборов с целью предотвращения отказов в аппаратуре потребителя.

Таким образом, методология управления качеством приборов, принятая в японской промышленности, шире охватывает этапы жизненного цикла приборов. В ее орбиту вовлечена на уровне неформального получения информации и сфера эксплуатации приборов. Благодаря тщательной регламентации всех мероприятий, включенных в систему управления качеством, высокой дисциплине всех исполнителей, вовлеченных в нее, наличию информационной обратной связи из сферы эксплуатации данная система имеет значительные преимущества по сравнению с американской.

В отечественной промышленности сложилась система управления качеством приборов, которой присущи практически все основные черты рассмотренных систем. Однако имеется весьма важное обстоятельство, которое предопределяет характер построения системы и ее содержание. Это обстоятельство заключается в том, что юридическая ответственность изготовителя за качество и надежность приборов не кончается на стадии проведения выходного контроля и испытаний. В соответствии с законодательно установленными правилами изготовитель несет ответственность за качество приборов в течение всего срока службы, в условиях, регламентированных технической документацией. Эта принципиальная особенность взаимодействия изготовителя и потребителя приборов предопределяет характер построения системы обеспечения надежной работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в аппаратуре.

## **11.2. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В АППАРАТУРЕ**

Содержание определения надежности как свойства объекта, рассмотренное выше, и принцип ответственности изготовителя за приборы в процессе эксплуатации формируют концепцию непре-

рывной цепи действий, обеспечивающих надежное функционирование приборов, в соответствии с которыми надежные характеристики полупроводниковых приборов и интегральных микросхем формулируются на стадии разработки технического задания, закладываются при проведении опытно-конструкторской разработки, реализуются в производстве на основе стабильных, отработанных технологических процессов и далее рационально используются, вернее сказать, расходуются при эксплуатации в аппаратуре.

Исходя из методологии системного анализа, полупроводниковый прибор или интегральная микросхема могут рассматриваться как замкнутая система, взаимодействующая с окружающей средой. Под окружающей средой понимается комплекс условий того или иного этапа жизненного цикла прибора. При этом в комплекс условий включаются все возможные факторы, воздействующие на прибор, в том числе различные виды нагрузок, электрические и тепловые режимы эксплуатации, технологические факторы производственного процесса приборов и аппаратуры, квалификация производственного персонала, искусство конструкторов приборов и аппаратуры, степень разработанности теории полупроводниковых приборов и схемотехники, качество исходных материалов и т. д.

В соответствии с определением надежность является свойством конкретного прибора, которое в зависимости от условий окружающей среды может получить те или иные количественные реализации. Прослеживая этапы жизненного цикла полупроводникового прибора, легко убедиться в том, что с переходом от этапа к этапу количество факторов, воздействующих на прибор, увеличивается. При этом после действия факторов предыдущего этапа происходит как бы накопление комплекса воздействий и нарастание жесткости воздействия окружающей среды.

Например, в процессе разработки прибор находится, можно сказать, в идеализированных условиях. На этом этапе тщательно выбираются исходные материалы. Все переходы и операции лабораторного изготовления малых партий приборов выполняются с точным соблюдением всех предписаний. Измерения параметров проводятся с использованием приборов высокой точности и с достаточной степенью избыточности. Все усилия высококвалифицированных специалистов, занятых на всех операциях, подчинены одной цели — достичь наилучших параметров и характеристик прибора, заданных техническим заданием на разработку.

С переходом на этап серийного производства условия существования прибора изменяются. Исходные материалы, применяемые в больших количествах при производстве приборов, имеют, как правило, значительный разброс параметров. При выполнении операций изготовления прибора точность соблюдения всех предписаний и тщательность контроля вступают в противоречие с требованиями по производительности и экономики. Оптимальное решение, как правило, является компромиссом между этими противоречиями, в результате чего загромождаются требования к операциям изготовления прибора, контроль проводится в отдельных точках

технологического процесса, измерения выполняются на высокопроизводительном, но менее точном оборудовании по принципу «годен — не годен». Производственный персонал имеет невысокую квалификацию в смысле глубины понимания физических процессов технологического цикла. Усилия персонала направлены в первую очередь на выполнение плановых заданий.

Таким образом, с точки зрения реализации надежностных характеристик, с переходом на этап производства прибор оказывается в более жестких условиях окружающей среды, которые могут усугубляться последствием факторов этапа разработки, например такими, как неполное знание разработчиком закономерностей деградации характеристик исходных материалов в процессе технологической обработки и последующей эксплуатации в составе прибора. В результате значения надежностных характеристик приборов на этапе производства могут оказаться ниже значений, заявленных при разработке.

Проследившая далее условия окружающей среды, легко убедиться, что при переходе от этапа к этапу в жизненном цикле прибора количество воздействующих на прибор факторов возрастает, увеличивается и степень жесткости их влияния. С ростом степени жесткости интенсифицируются физико-химические процессы в приборе, быстрее расходуются его ресурсные возможности, в результате чего снижаются надежностные характеристики прибора. Точно так же степенями жесткости можно ранжировать такие факторы, как состояние теории, положенной в основу конструирования приборов, совершенство материалов, точность технологического и измерительного оборудования, компетенция производственного персонала и т. д.

На основе проведенных выше рассуждений мы можем сделать заключение о том, что надежность приборов  $P$  функционально зависит от жесткости условий окружающей среды:

$$P = f(C), \quad (11.1)$$

где  $C$  — жесткость окружающей среды, представляющая собой комплексный параметр, зависящий от совокупности всех факторов ( $X_1 \dots X_n$ ), влияющих на прибор в процессе его жизненного цикла.

Схематическое изображение зависимости (11.1) представлено на рис. 11.1. Прежде чем рассматривать характерные точки на кривой, сделаем несколько общих замечаний о ее форме.

Обосновывая эту зависимость мы исходим из положения, что надежность уменьшается с ростом жесткости условий окружающей среды. Данное положение очевидно, оно подтверждается всей логикой событий и всем опытом использования самой разнообразной продукции. Отсюда делается вывод о монотонности кривой (11.1). На этом же положении может быть основано заключение о том, что кривая не может иметь максимумов и нарушений монотонности в виде всплесков, так как это противоречило бы отправной позиции, согласно которой надежность убывает с увеличением жесткости условий окружающей среды. По этой же причине кривая



Рис. 11.1. Зависимость надежности от жесткости условий окружающей среды:

$C_0$  — теоретический уровень жесткости окружающей среды;  $C_p$  — уровень жесткости, закладываемый при разработке;  $C_n$  — производственный уровень жесткости;  $C_{ту}$  — уровень жесткости, максимально допустимый по ТУ;  $C_{ип}$  — уровень жесткости производственных испытаний

не может иметь и минимумов или провалов. Скорее всего она может просто оборваться в момент наступления массовых внезапных отказов, когда будут превышены предельно допустимые режимы эксплуатации приборов.

Рассмотрим характерные точки, соответствующие различным состояниям зависимости (11.1). При этом каждому состоянию соотносится комплекс факторов окружающей среды, определяющий ее степень жесткости и соответственно определяющий уровень надежности в данной точке.

Состояние  $A(P_0, C_0)$  соответствует начальному, теоретически возможному уровню надежности прибора. Это наивысший уровень, который может быть получен при реализации идеальной физической модели прибора, основанной на бездефектной структуре и совершенных исходных материалах.

В связи с тем, что при проектировании реализуется физическая модель прибора с определенной степенью приближения к идеальной (исходные материалы не обладают абсолютным совершенством и чистотой, а технологический процесс имеет определенные колебания) надежность разрабатываемого прибора будет ниже теоретической и описывается состоянием  $B(P_p, C_p)$ . Оно определяется комплексом факторов  $C_p$  и обеспечивает достижение уровня надежности при разработке  $P_p$ . Разность уровней  $\Delta P_1 = P_0 - P_p$ , с одной стороны, характеризует в определенной степени качество проектирования, с другой стороны, — это резерв разработчика. Совершенствуя модель прибора, методы проектирования, материалы и технологию, конструктор имеет возможность повышать уровень надежности, закладываемый при разработке.

Состояние  $B(P_n, C_n)$  характеризует условия производства. Уровень надежности в производстве ниже, чем уровень, полученный при разработке, если не использованы все потенциальные возможности, заложенные в приборе при разработке. Разность  $\Delta P_2 =$



$=P_p - P_n$  характеризует степень отработанности технологического процесса и представляет собой резерв производства в части повышения надежности прибора посредством отработки технологического процесса, применения современного автоматизированного оборудования и высококачественных материалов. Колебание условий производства отражается на уровне надежности, на что указывает состояние  $\Gamma(P'_n, C'_n)$ . Размах колебания уровня надежности характеризуется величиной  $\Delta P_n = P_n - P'_n$ . Разработкой специальных мероприятий и их внедрением изменяют условия  $C'_n$ , добиваясь их оптимального сочетания, чем ликвидируется разность уровней надежности  $P_n$  и  $P'_n$ .

Система управления качеством в производстве приборов имеет своей основной целью не допустить колебаний технологического процесса и тем самым обеспечить стабильность уровня надежности  $P_n$ .

Состояние  $D(P_{ту}, C_{ту})$  относится к минимальному уровню надежности, который может быть обеспечен при предельно допустимых условиях функционирования прибора, установленных техническими условиями. За пределами этого уровня эксплуатация приборов не разрешается и не гарантируется.

Состояние  $E(P_{ип}, C_{ип})$  характеризует минимальный уровень надежности, на котором контролируется производство. При этом, как указывалось выше, план контроля выбирается таким образом, чтобы при экономически целесообразных затратах на испытания достоверность соответствия надежности продукции уровню  $P_{ип}$  была максимальной. В частном случае данное состояние может характеризоваться минимальным значением вероятности безотказной работы прибора  $P_2$ , по которому производят контроль уровня производства при испытаниях приборов в максимально допустимом электрическом режиме и максимальной положительной температуре окружающей среды. Данный уровень надежности в литературе ошибочно называют производственной, ошибочно полагая, что это надежность, которой обладают приборы, отгружаемые потребителю и ее надо принимать как исходную при расчетах надежности аппаратуры. На самом деле этот в определенной степени условный уровень (см. § 9.3) характеризует только экономическую сторону плана контроля, стабильность производственного процесса, и не более. Математическая модель, на основе которой построен выбор этого уровня, как было показано выше, предусматривает необходимость иметь надежность приборов существенно выше него, чтобы обеспечить уверенную сдачу готовых приборов потребителю. В зависимости от критериев надежности и жесткости окружающей среды  $P_{ип}$  может находиться как в области гарантированной надежности, так и за ее пределами. В последнем случае условия окружающей среды или испытательные режимы превышают по жесткости предельные, разрешенные техническими условиями для применения в эксплуатации.

Рассмотренные состояния ограничивают несколько характерных областей под кривой  $P=f(C)$ .

Состояния *A* и *B* ограничивают область, обозначенную цифрой 1. Эта область, в которой должны быть сосредоточены усилия разработчиков с целью максимального приближения к теоретическому уровню надежности  $P_0$ . При этом без изменения не может оставаться и сам теоретический уровень. За счет использования новых физических явлений и углубленных теоретических изысканий он должен возрастать, стимулируя сдвиг всей кривой  $P=f(C)$  вверх.

Область 2, ограниченная состояниями *B* и *B*, является сферой приложения усилий производителей приборов, которые должны быть направлены на сокращение разрыва между состояниями *B* и *B*. Это достигается за счет более детального исследования исходных материалов, уточнения технических требований к ним, за счет совершенствования входного контроля, технологических процессов, повышения их управляемости и объективности путем максимального исключения человеческого фактора из процесса. Одновременно со сближением уровней *B* и *B* эти же факторы способствуют уменьшению крутизны спада кривой надежности, уменьшая размах колебаний уровня  $P_n$  при воздействии дестабилизирующих факторов.

Состояния *B* и *D* ограничивают область гарантированной надежности 3, в пределах которой в зависимости от условий эксплуатации могут быть реализованы гарантированные уровни надежности, заложенные при разработке и реализованные в производстве, от максимального  $P_n$  до минимального уровня  $P_{ту}$ , регламентированного предельно допустимыми режимами эксплуатации.

Область 4 лежит за пределами области гарантированной надежности. В этой области приборы подвергаются повышенным нагрузкам, вследствие чего их надежность ниже минимального уровня и в предельном состоянии приближается к нулю.

Приведенный выше анализ позволяет сделать ряд практических выводов.

При формировании требований по надежности на вновь разрабатываемые приборы необходимо учитывать весь комплекс вопросов, связанных с состоянием теории, требованиями радиоэлектронной аппаратуры, состоянием производства материалов и реальными возможностями производства приборов. Некомплексный подход на этом этапе приводит к существенному разрыву между теоретическим уровнем надежности и уровнями надежности в разработке и производстве. Система управления качеством на этом этапе призвана обеспечить минимальный разрыв между этими уровнями.

Зачастую бытует мнение, что любой прибор, длительное время выпускаемый серийно и широко применяемый в аппаратуре, путем введения дополнительного жесткого контроля, отбора и отбраковочных операций можно сделать существенно более надежным, не затрагивая его конструкции. Это мнение в корне ошибочное. Проведенное выше рассмотрение убедительно показывает, что максимально достижимым уровнем надежности может быть только уровень, заложенный при разработке. Никакими дополнительными тренировочными, отбраковочными мерами в производстве

и эксплуатации этот уровень превысить нельзя. Применение же конструктивных уточнений, изменений и дополнений, по существу, является новой разработкой. Повышение надежности за счет изменения конструкции означает, что в результате новой разработки заложен новый, повышенный уровень надежности. Поэтому основная задача системы управления качеством — поддержание на достигнутом уровне надежности приборов в производстве, недопущение и своевременное предотвращение колебания и снижения этого уровня. Разность уровней надежности, заложенного при разработке и полученного при освоении в производстве, должна быть определена и известна изготовителю. Сокращение этого различия — стимул для совершенствования производства и еще одна из главных задач системы управления качеством.

При применении в различной аппаратуре приборы функционируют в условиях бесконечного многообразия режимов и внешних воздействий. И в каждом конкретном случае надежность, достигнутая в производстве, будет проявляться в тех или иных количественных реализациях. Количественные показатели надежности приборов в составе аппаратуры принято называть эксплуатационной надежностью. При этом следует подчеркнуть, что понятие эксплуатационная надежность состоит, по меньшей мере, из двух составляющих. Первая из них представляет собой отражение уровня надежности приборов, достигнутого в производстве. Вторая составляющая определяется уровнем проектирования аппаратуры с использованием полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, отработанностью технологического процесса производства аппаратуры и ее условиями эксплуатации у потребителя.

Основными задачами системы управления качеством и надежностью в условиях эксплуатации являются выявление указанных выше двух составляющих, разработка методов исключаящих или, по крайней мере, снижающих до минимума влияние второй из них на общий уровень эксплуатационной надежности. Указанные мероприятия должны обеспечить преимущественное содержание в составе эксплуатационной надежности составляющей, определяемой надежностью, достигнутой в производстве приборов.

Следующей задачей системы управления надежностью является обеспечение нахождения уровня эксплуатационной надежности в пределах области гарантированной надежности, как можно ближе к уровню  $R_n$ . Это достигается установлением облегченных тепловых и электрических режимов применения полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Рассмотренные выше положения являются основой для построения системы обеспечения надежной работы приборов в аппаратуре.

Структурная схема системы, приведенная на рис. 11.2, включает элементы *Разработка*, *Производство*, *Эксплуатация*, отражающие основные этапы жизненного цикла прибора. Элемент *Применение* включен в систему с целью реализации принципа непрерывности действий по надежности и принципа ответственности изготовителя за уровень надежности на всех этапах жизненного цик-

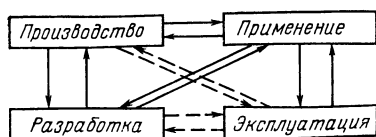


Рис. 11.2. Структурная схема системы обеспечения надежной работы приборов в аппаратуре

ла приборов. Элемент *Применение* выступает в данной системе как орган, регулирующий взаимодействие трех других ее составляющих.

По своим основным свойствам система относится к открытым системам, так как имеется свободный обмен информацией с окружающей средой, в качестве которой здесь могут рассматриваться сфера потребления бытовой аппаратуры, сложные научно-исследовательские комплексы, автоматизированные системы управления и т. д.

По способу построения она относится к централизованным системам. Элемент *Применение* — центральный в системе, он играет роль регулятора в ее динамическом функционировании.

Система обладает совместимостью с окружающей средой и способностью к оптимизации. Данное свойство отражает то обстоятельство, что требования по надежности формулируются исходя из возможных условий окружающей среды и реализуются на основе оптимального сочетания свойств всех звеньев системы.

Система обладает целостностью, так как изменение в одном элементе вызывает соответствующую реакцию в других ее составляющих.

Система является вероятностной, так как поступление внешних воздействий в нее нерегулярное, статистически распределенное во времени. В этом смысле система относится к разряду очень сложных систем с элементами случайности, не поддающихся математической формализации.

Система обладает иерархией построения и системой связей. Связи между элементом *Применение* и другими элементами, а также между элементами *Разработка* и *Производство* (на рис. 11.2 они обозначены сплошной линией) являются связями первого порядка или функционально необходимыми связями.

Связи с элементом *Эксплуатация* (пунктирные линии) являются дополнительными или связями второго порядка.

Элемент *Применение* в системе функционирует на основе следующих главных принципов:

принадлежность к области создания и производства приборов с одновременным обслуживанием области эксплуатации;

доступность для него информации по вопросам надежности приборов во всех элементах системы;

обязательность регулирующих воздействий со стороны элемента *Применение* для всех других элементов системы.

Регулирующее воздействие на прибор с целью оптимизации его надежностных характеристик и рационализации их использования сказываются на всех этапах жизненного цикла прибора. Они осуществляются через связи первого порядка посредством:

создания методических документов обязательного характера;

испытательных проверок и экспертизы, контроля технологического процесса, контроля правильности применения и эксплуатации в аппаратуре;

запретительных предписаний;

исследования характеристик приборов, условий их эксплуатации и разработки руководств, рекомендаций и справочных данных.

Рассмотрим минимальный перечень регламентирующих условий, с помощью которых осуществляется воздействие на надежные характеристики приборов на всех этапах жизненного цикла.

**Разработка технических требований на прибор.** Для его осуществления необходимо иметь:

общие технические требования и общие технические условия на приборы, отражающие особенности будущей эксплуатации в аппаратуре;

параметрические ряды, регламентирующие технические требования на параметры и конструкцию прибора.

**Разработка прибора.** Дополнительно к условиям первого этапа необходимо иметь:

данные об особенностях применения в аппаратуре;

перспективную потребность в приборах;

стандартизованные терминологию, параметры, методы измерений и испытаний, конструктивное оформление;

данные по надежности аналогов.

**Производство приборов.** Регулирующие воздействия на этом этапе осуществляются посредством:

технических условий на приборы;

системы контроля качества и испытаний;

методов анализа отказов приборов и рекламаций по качеству приборов.

**Проектирование аппаратуры.** Данный этап регламентируют:

справочные данные по приборам и их надежности;

ограничительные перечни приборов;

руководства по применению;

данные по надежности аналогичной аппаратуры.

**Производство аппаратуры.** Обязательными условиями для данного этапа являются:

методики входного контроля приборов;

методики защиты приборов от воздействия технологических факторов при изготовлении аппаратуры;

методики защиты приборов от воздействия внешних факторов;

методики экспертизы аппаратуры.

**Эксплуатация аппаратуры.** Данный этап обслуживается:

инструкциями по эксплуатации;

методами регламентных проверок;

методами контроля правильности применения приборов в аппаратуре;

системой сбора данных по надежности приборов.

Все перечисленные условия, влияющие на надежность, реализуются в соответствующей нормативно-технической документации в виде государственных и отраслевых стандартов, руководств, методик, технологических карт и других руководящих документов, имеющих отраслевое, межотраслевое и общегосударственное значения.

Функционирование системы осуществляется соответствующими подразделениями, организуемыми в сферах разработки и производства приборов и в сфере эксплуатации аппаратуры.

### **11.3. ОРГАНИЗАЦИЯ СБОРА ДАННЫХ ПО НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Совершенно очевидно, что информация по надежности на всех этапах жизненного цикла приборов является обязательной, без нее невозможно построить устойчиво функционирующую систему управления надежностью. Несмотря на разнообразие воздействующих факторов на различных этапах жизненного цикла, потоки информации, циркулирующие в системе, должны иметь общую основу и удовлетворять ряду требований, имеющих принципиальное значение.

В первую очередь информация должна быть *достоверной*. Необходимость этого требования можно подтвердить несколькими примерами. Положим, что мы имеем дело с информацией о результатах того или иного испытания или комплекса испытаний. Анализируя информацию, мы должны быть полностью уверены, что она получена на выборке приборов, являющейся как в количественном, так и в качественном отношении представительной. В случае целого комплекса испытаний на одной и той же выборке последовательность их должна быть такой, чтобы предыдущее испытание не влияло на результаты последующих. Кроме того, должна быть полная уверенность в том, что в процессе испытаний приборы изменили свои параметры или отказали не в результате отказа испытательной аппаратуры или флуктуации испытательных режимов. При получении информации из сферы эксплуатации должно быть достоверно известно место ее возникновения. Например, приборы с данными о их несоответствии нормативно-технической документации, полученные от потребителя после проведения им входного контроля, не должны содержать приборов, вышедших из строя при сборке и наладке аппаратуры во время ее изготовления. Другой пример, информация о надежности приборов, поступающая из сферы изготовления аппаратуры, будет достоверной тогда, когда она дифференцирована по видам аппаратуры или еще лучше по операциям ее изготовления.

Достоверность информации необходима для того, чтобы точно установить при последующем анализе причины несоответствия приборов нормативно-технической документации и причины отказов.

Информация о надежности приборов должна обладать *необходимой полнотой*. Это требование существенно дополняет предыдущее, так как для того чтобы установить механизм отказа и его связь с причинами, его породившими, недостаточно одной констатации возникновения отказа и знания места его локализации. При анализе полученной информации требуются данные о состоянии аппаратуры в момент отказа, об условиях окружающей среды, о режимах использования прибора, средствах защиты от перегрузок, о состоянии соседних узлов и блоков и степени их влияния на данный прибор. Набор необходимых сведений, определяющий полноту информации, регламентируется соответствующими формами сообщений и должен неукоснительно соблюдаться.

Другими непреложными требованиями к информации являются *своевременность, регулярность и непрерывность*. Направленный и непрерывный поток информации необходим для своевременного выбора корректирующих воздействий в системе управления надежностью и оперативного вмешательства в ход разработки или технологический процесс изготовления приборов или аппаратуры.

Исключительно широкие масштабы применения полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и связанные с этим огромные объемы информационных потоков, в том числе и по надежности приборов, выдвигают новые требования к информации: она должна быть пригодной для *автоматизированного поиска, обработки и передачи данных с использованием электронно-вычислительных машин*. Обеспечение рассмотренных выше требований и призвана осуществить система сбора данных по надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Основными целями системы являются:

- выявление ненадежных приборов на всех этапах их жизненного цикла;

- определение факторов, ускоряющих или вызывающих отказы как в процессе производства приборов и аппаратуры, так и при ее эксплуатации;

- определение слабых мест в конструкции приборов;

- выработка необходимых данных для определения корректирующих воздействий на всех этапах жизненного цикла приборов;

- разработка рекомендаций по оптимальным режимам применения приборов;

- обоснование перспективных требований по надежности приборов;

- определение количественных показателей надежности приборов.

На последней цели остановимся несколько подробнее, так как количественные показатели надежности приборов, наряду с механизмами отказов, мероприятиями по их предупреждению имеют первостепенные значения и являются одной из самых важных целей системы. Количественные показатели надежности в первую очередь необходимы для выбора приборов при конструировании аппаратуры и для расчета ее надежности, кроме того, они необходимы для сравнения

идентичных классов приборов, а также служат фундаментом для выработки требований на новые разработки.

До недавнего времени разработчики аппаратуры для расчета надежности требовали представления данных о надежности приборов от их изготовителей, пытаясь ориентироваться на показатели, применяемые в производстве в качестве контрольных уровней. Выше уже говорилось о том, что эти довольно низкие по величине уровни не характеризуют фактической надежности приборов и применяются только для контроля стабильности технологического процесса. Проводимые в производстве приборов испытания на надежность для набора статистики также не могут быть основой для расчета надежности аппаратуры, так как проводятся в типовых испытательных режимах, не отражающих всего многообразия условий применения.

В настоящее время после длительных дискуссий доминирует точка зрения, закрепленная нормативными актами, согласно которой *количественная информация о надежности получается в сфере эксплуатации приборов в составе аппаратуры*. И это совершенно справедливо. Сфера эксплуатации является неисчерпаемым и наиболее объективным источником информации о надежности приборов. Но для того чтобы информация была пригодна для расчетов надежности она должна быть соответствующим образом ранжирована. Во-первых, информация должна быть классифицирована по типам аппаратуры с одинаковыми режимами применения приборов, например преимущественно с импульсным или усилительным режимом работы, при циклических или непрерывных нагрузках и т. д. При этом информация должна быть не усредненной, как это зачастую делается, например по дискретным транзисторам, по цифровым или линейным микросхемам. Информация должна быть привязана к конкретному типу прибора и сопровождать его в течение всего периода выпуска и применения.

Система имеет несколько источников информации. На этапе разработки — это промежуточные испытания и квалификационные испытания при приемке нового прибора государственной комиссией. На этапе производства приборов — это межоперационный контроль полуфабрикатов, активных структур и сборочных единиц, а также выходной контроль готовой продукции. Основным содержанием информации на этапах разработки и производства приборов являются дефекты, возникающие в полуфабрикатах при выполнении технологических операций, технологический брак готовых приборов и отказы при испытаниях на выходном контроле готовой продукции.

Источниками информации в сфере эксплуатации являются входной контроль приборов перед монтажом в аппаратуру, сборка, регулировка и испытание аппаратуры. Главным содержанием информации из этих источников также являются отказы и несоответствие параметров приборов нормативно-технической документации.

*Основным источником количественных показателей надежности приборов является эксплуатация аппаратуры у потребителя.*

Нормативно-технической документацией установлены формы и сроки представления информации о надежности приборов из всех источников системы.



Организация потоков информации, ее распределение и переработка в системе обеспечения надежной работы приборов в аппаратуре является обязанностью центрального элемента системы.

#### **11.4. ОРГАНИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Выше было показано, что основным массивом потоков информации о надежности приборов на всех этапах жизненного цикла являются сведения об отказах. Поэтому анализ отказов имеет исключительно важное значение в системе управления надежностью. Основными целями анализа является классификация отказов, определение причин, их вызывающих, раскрытие механизмов отказов и разработка технических и организационных мероприятий по предотвращению отказов.

*Классификация отказов на этапе разработки и производства приборов* имеет своей целью определение факторов, имеющих доминирующее значение в формировании причин отказов. Такими факторами могут быть конструктивные недоработки, дефекты материалов, нарушения технологического режима и установленных процедур контроля и испытаний. В результате классификации выявляются причины отказов с отнесением их к разрядам организационных и технических. Для устранения организационных причин совершенствуется технологический процесс, уточняются процедуры контроля и самоконтроля операторов, процедуры испытаний. Для устранения технических причин необходимо изучение механизмов отказов с целью выработки технических мероприятий по ослаблению или полному исключению их действия.

Значительно сложнее анализ отказов, поступающих из сферы *разработки, производства и эксплуатации аппаратуры*. В этом случае первоначальной целью анализа является выявление причин, связанных с особенностями разработки, производства и эксплуатации аппаратуры. Такими причинами могут быть:

- неправильный выбор приборов и режимов их работы при конструировании аппаратуры;

- неэффективные меры защиты приборов при перегрузках;

- превышение измерительных и испытательных режимов при проведении входного контроля приборов;

- неблагоприятные факторы в процессе монтажа, регулировки и испытаний аппаратуры;

- ошибки в эксплуатационных правилах при использовании аппаратуры у потребителя;

- ошибки обслуживающего персонала при эксплуатации аппаратуры;

- непредвиденные перегрузки в результате воздействия на аппаратуру факторов окружающей среды.

Информация об отказах приборов по причинам, связанным с разработкой, производством и эксплуатацией аппаратуры, анализируется изготовителем приборов совместно с представителями

сферы эксплуатации с целью выработки технических и организационных мероприятий по их устранению. В этом случае отказы, не связанные со сферой разработки и производства приборов, из количественных показателей надежности приборов исключаются. Данная категория отказов учитывается при определении количественных показателей аппаратуры. Отказы приборов, возникшие в сфере эксплуатации, но вызванные причинами, связанными с разработкой и производством приборов, анализируются по алгоритму, принятому в сфере производства приборов.

Особое внимание при анализе отказов уделяется категории систематических или повторяющихся отказов. Как уже говорилось, эта категория отказов вызывается неслучайным сочетанием неблагоприятных факторов, и поэтому причины, их вызывающие, должны быть обязательно выявлены и устранены.

Методика анализа отказов предусматривает ряд последовательных действий, направленных на выявление причин и механизмов отказов.

В первую очередь, должен быть проведен тщательный анализ условий возникновения отказа, в особенности, если он произошел в сфере эксплуатации. При этом детально изучаются карты рабочих режимов. При необходимости проводится натурное моделирование условий отказа. В особо сложных случаях начальный этап анализа отказа осуществляется на месте его возникновения. Изъятие прибора из аппаратуры производится с участием представителя завода-изготовителя приборов.

После внешнего визуального и инструментального осмотра отказавшего прибора и измерения электрических параметров производится вскрытие корпуса и инструментальный контроль внутренних деталей прибора. Для инструментального контроля используются оптические и растровые электронные микроскопы, рентгеновские и инфракрасные микроскопы. Для углубленного анализа структурных элементов удаляют защитные покрытия, производится последовательное стравливание слоев и изготавливаются шлифы. Все полученные результаты документируются с изготовлением микрофотографий. При необходимости проводится химический и элементарный анализ.

Анализ отказавших приборов проводится специальными лабораториями анализа отказов, оснащенными всем необходимым измерительным и аналитическим оборудованием.

## **11.5. КОНТРОЛЬ ПРАВИЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В АППАРАТУРЕ**

Система обеспечения надежной работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в аппаратуре кроме сбора и анализа информации о надежности, выработки необходимых мероприятий по ее повышению за счет совершенствования конструкции и технологического процесса изготовления предполагает и ак-

тивные меры по устранению вызывающих отказы факторов, действующих в сфере эксплуатации. Контроль правильности применения является активным средством предотвращения отказов приборов в аппаратуре. Необходимость и полезность такого контроля связана с тем, что номенклатура полупроводниковых приборов и интегральных микросхем ежегодно значительно увеличивается с одновременным расширением конструктивных модификаций и функциональных разновидностей приборов. Высокими темпами расширяются и области применения, что вовлекает в процесс разработки аппаратуры все более значительные конструкторские кадры, в ряде случаев не имеющие достаточного опыта разработки аппаратуры с использованием современных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Контроль осуществляют компетентные организации изготовителей приборов посредством экспертизы новых разработок аппаратуры, предназначенной для массового выпуска. Особенно важна такая экспертиза, например, для аппаратуры связи, бытовой аппаратуры, в частности такой, как телевизионные приемники. Такая аппаратура, как правило, насыщена блоками, работающими в достаточно жестких режимах. Кроме того, в ней слаботочные низковольтные блоки соседствуют со схемами, в которых рассеиваются большие уровни мощности, и с высоковольтными узлами, такими как схемы питания кинескопов. Все это требует тщательного расчета режима работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, экранировки их от воздействия помех, вызываемых высоковольтными поверхностными пробоями, и защиты от перегрузок.

Помимо экспертизы новых разработок проверке на предмет правильности применения приборов может быть подвергнута любая аппаратура, находящаяся в эксплуатации у потребителя. Особенно важно подвергнуть такому контролю аппаратуру, в которой в течение определенного промежутка времени происходят систематические отказы приборов.

В ряде случаев при экспертизе достаточно сложной аппаратуры не удается с полной достоверностью определить правильность выбора всех режимов и оптимальность применения приборов. Выходом из этого положения может быть *контрольная эксплуатация аппаратуры*. Эта процедура предусматривает обследование приборов перед установкой в аппаратуре, ее монтаж под наблюдением специалистов и эксплуатацию в заранее оговоренных условиях с периодическим замером ее выходных параметров и электрических характеристик приборов.

Контрольная эксплуатация позволяет сделать окончательный вывод о правильности применения приборов. При возникновении отказов в условиях контрольной эксплуатации достоверность установления истинных причин, их вызывающих, значительно возрастает. Контроль правильности применения дополняется ограничительными перечнями приборов, рекомендуемых для применения в некоторых наиболее важных типах аппаратуры.

Своего рода контроль за правильностью применения осуществляется посредством *введения процедуры согласования* с изготовителем приборов режимов применения, не оговоренных в технических условиях. Наличие такой процедуры оправдано тем, что изготовитель гарантирует работоспособность приборов только в условиях, разрешенных технической документацией. За пределами этих условий изготовитель не несет ответственности. Вместе с тем не все многообразие режимов можно предусмотреть в технических условиях. Поэтому расширение областей применения приборов за счет новых сочетаний нагрузок возможно и даже желательно. Но процедура согласования нужна по той причине, что возможность применения в новом режиме тщательно обосновывается потребителем. При согласовании этот режим повторно проверяется компетентными организациями изготовителя приборов при необходимости с применением натурального или машинного моделирования. Таким образом, такая двойная проверка новых условий применения и последующее наблюдение за приборами в течение достаточно длительного срока позволяют в значительной степени снизить риск ошибочного выбора режима.

#### **11.6. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы на всех этапах жизненного цикла неоднократно подвергаются контролю. Приборы, параметры которых соответствуют норме, а их функционирование осуществляется в соответствии с заданным алгоритмом, считаются исправными. Те же приборы, у которых один или несколько электрических параметров не соответствуют норме, а их функционирование не совпадает с заданным алгоритмом, оцениваются как неисправные.

При малых размерах элементов БИС имеют сверхвысокое быстродействие. Их рабочая частота функционирования превышает 100 МГц. В этих условиях контроль кристаллов БИС на пластине возможен только с помощью встроенных средств самодиагностирования и буферных средств связи кристалла БИС с внешними средствами контроля.

Рост степени интеграции ведет также к тому, что проектируемые СБИС в ряде случаев представляют собой функционально законченные системы. При этом проблемы обеспечения системной надежности должны решаться на самых ранних этапах жизненного цикла ИМС (на этапе проектирования) во взаимосвязи с проблемами их контролепригодности. Поэтому при проектировании СБИС функциональные, надежные и диагностические требования необходимо рассматривать совместно.

Обеспечение требуемой надежности СБИС при определенных условиях эксплуатации включает ряд процедур: анализ внутренней надежности БИС, ограниченной различными видами и механизмами отказов, связанными с процессами проектирования и про-

изводства; анализ отказоустойчивости БИС, т. е. способности системы, реализованной в полупроводниковом кристалле, исправлять ошибки и неоднозначности результатов функционирования, вызванные различными видами отказов. Отказоустойчивость основана на информационной или аппаратной избыточности. Она обеспечивается за счет встроенных средств обнаружения и исправления ошибок.

Общим требованием, принимаемым в расчет при оценке функциональных и надежных свойств БИС и СБИС, является контролепригодность. Ее повышение должно производиться с учетом того обстоятельства, что при определенных условиях рост контролепригодности может привести к ухудшению функциональных и надежных характеристик схемы. Так, в частности, повышение контролепригодности требует увеличения количества элементов и размеров полупроводникового кристалла, что в конечном счете снижает процент выхода годных и надежность ИМС. В противоположность этому повышение отказоустойчивости посредством структурной избыточности может вызвать существенные трудности при тестировании схем.

Методология организации технического диагностирования БИС и СБИС определяется комплексом следующих взаимосвязанных методов и средств:

- методами моделирования неисправностей и построения тестов;
- методами построения испытательных программ для контрольно-измерительного оборудования;
- методами диагностирования с помощью тестовых структур;
- методами формирования контролепригодной архитектуры изделий;
- встроенными средствами контроля;
- техническими средствами контроля.

Для объективного анализа и повышения контролепригодности БИС необходимы количественные показатели их оценки. В настоящее время используются показатели управляемости, наблюдаемости и тестируемости.

*Показатели управляемости* — это аналитические оценки затрат на установление конкретного узла микросхемы в заданное состояние 0 или 1 за счет подачи входных сигналов на ее внешние выводы. Различают показатели комбинационной и последовательной управляемости. Первый показатель оценивается числом узлов исправной схемы, которые необходимо установить в заданное состояние для перевода анализируемого узла в состояние 0 или 1. Второй показатель вычисляется как минимальное число состояний, которое должна поменять исправная микросхема до того, как в данном узле можно будет получить нужное состояние 0 или 1.

*Показатели наблюдаемости* определяются числом узлов, которые необходимо установить в известное состояние, чтобы наблюдать на выходе исправной схемы состояние конкретного узла. В этом случае также различают показатели комбинационной и последовательной наблюдаемости. Комбинационная наблюдаемость

характеризуется минимальным числом узлов, через которые должно передаваться состояние данного узла, чтобы достичь выхода, где его можно наблюдать. Последовательная наблюдаемость характеризуется минимальным числом состояний схемы, через которые она должна пройти, чтобы иметь возможность определить состояние данного узла на выходе схемы. Показатели наблюдаемости вычисляются на основе оценок показателей управляемости узлов, через которые сигнал данного узла будет передаваться на выход схемы.

*Показатель тестируемости* или тест-наблюдаемости оценивается через количество узлов, состояние которых необходимо установить или комбинационно, или последовательно, для того чтобы наблюдать состояние активизированного узла на выходе исправной схемы.

Основным методом определения состояния интегральных микросхем является тестовое диагностирование [80], включающее все разновидности функционального контроля. Основой диагностирования является тестовая программа (тест), представляющая собой совокупность входных и выходных наборов и эталонных реакций, обеспечивающих проверку функционирования ИМС.

*Входной набор* (тестовый набор) — это совокупность сигналов на входных контактах проверяемой ИМС, отражающих логические состояния (0 и 1) в заданном интервале времени, предназначенная для проверки функционирования отдельных логических элементов и соединений между ними.

*Выходной набор* — совокупность сигналов (логических состояний) на выходных контактах ИМС в заданном промежутке контроля, являющаяся ее реакцией на входной набор сигналов.

*Эталонная реакция* — совокупность сигналов (логических состояний) на выходных контактах микросхемы, соответствующая истинному выходному набору исправной ИМС в заданном промежутке контроля.

Для БИС вид контрольных испытаний определяется следующими основными критериями: сложностью внутренней структуры микросхемы, целями контроля, этапами жизненного цикла изделия.

К основным видам контроля ИМС относятся: параметрический контроль статических и динамических параметров; функциональный контроль, базирующийся на проверке правильности выходной реакции на входные тестовые воздействия. Этот вид контроля имеет следующие разновидности:

а) функционально-статический, при котором проверка правильности выходных реакций осуществляется с тактовой частотой, много меньшей максимально допустимой. Поэтому зачастую этот метод называют низкочастотным функциональным контролем;

б) функционально-динамический, проводимый на заданной для данного типа ИМС частоте;

в) совмещенный, когда для проверки ИМС используются все перечисленные виды контроля в различных сочетаниях.

Для ИМС малой и средней степеней интеграции основным видом контроля является параметрический. Программа и условия параметрической проверки логических элементов ИМС выбираются таким образом, что правильность их логического функционирования определяется одновременно с измерением статических и динамических параметров путем сравнения результатов с таблицей истинности ИМС. При этом следует подчеркнуть, что для схем малой и средней степеней интеграции такой вид контроля обеспечивает достаточно высокую достоверность и проблем в области надежного функционирования ИМС после контроля практически не возникает. Положение существенно усложняется, когда мы имеем дело с ИМС большой и сверхбольшой степеней интеграции, к которым относятся специальные логические схемы, микропроцессоры, схемы памяти и др. Для этих схем основным видом проверки является функциональный контроль и его разновидности, базирующийся на тесте, содержащем последовательность входных наборов и ожидаемых выходных логических реакций. Количество входных наборов и ожидаемых выходных логических реакций. Количество входных наборов для конкретных БИС в зависимости от особенностей их логической структуры может составлять десятки, сотни и тысячи. Конечным результатом тестирования при функциональном контроле является определение исправности БИС, т. е. отнесение ее к разряду годных или негодных. Однако в ряде случаев может быть поставлена задача определения причин неисправности БИС и поиска дефектных элементов схемы. В этом случае функциональный контроль становится диагностическим.

Программа диагностического контроля исключительно сложна. Для ее выполнения требуются большие аппаратно-программные ресурсы. Поэтому диагностический контроль применяется для тестирования отдельных видов программируемых логических структур, когда имеется возможность с большой достоверностью локализовать дефекты в структуре БИС и откорректировать технологический процесс ее изготовления.

Совмещенный контроль характеризуется совокупностью испытаний ИМС, при которых используются все виды контроля и их различные сочетания. Так, при испытаниях логических микросхем используются параметрический статический и динамический виды контроля в сочетании с функциональным статическим. При тестировании БИС ОЗУ, микропроцессоров частично используется параметрический статический контроль и, в основном, функциональные статический и динамический с целью как проверки по принципу «годен — не годен», так и диагностики дефектов.

При проведении параметрического контроля проверяются статические и динамические электрические параметры ИМС, для чего используются:

метод непосредственной оценки, или контроль электрических параметров по измерительным приборам. При осуществлении этого метода на входы проверяемой микросхемы подаются сигналы от специального источника, а на выходных выводах измеряются

значения электрических параметров ИМС, такие как ток, напряжение (статические параметры), характеристики импульса (динамические параметры). Результаты измерений получают либо непосредственно по показаниям приборов, либо расчетным путем; метод сравнения с эталоном. При использовании этого метода электрические параметры проверяемой ИМС сравниваются с эталонной мерой либо с параметрами предварительно отобранной эталонной микросхемы;

Метод замещения. При этом методе проверяемая ИМС подключается к образцовому устройству вместо такой же исправной микросхемы. По выходным электрическим параметрам образцового устройства или по общему его функционированию судят о соответствии проверяемой микросхемы установленным требованиям.

При проведении параметрического контроля должен быть соблюден ряд специфических условий. Так, в случае проверки статических параметров ИМС режим микросхемы должен быть установленным, т. е. переходные процессы, возникшие под воздействием входных сигналов, к началу контроля должны закончиться. Динамические же параметры ИМС, характеризующие ее быстродействие, контролируются во время переходного процесса, при этом измеряемые временные параметры определяются заданными уровнями на фронтах входных и выходных сигналов.

С целью приближения условий измерений к эксплуатационным проверка параметров микросхем в статическом и динамическом режимах должна проводиться с применением нагрузок, соответствующих реальным, или их эквивалентов.

Основные измеряемые и режимные параметры для ИМС следующие:

$U^{0(1)}_{\text{вх}}$  — входное напряжение логического 0 (1);

$U^{0(1)}_{\text{пор}}$  — пороговое напряжение логического 0 (1);

$U^{0(1)}_{\text{вых}}$  — выходное напряжение логического 0 (1);

$I^{0(1)}_{\text{вх}}$  — входной ток при логическом 0 (1) на входе;

$I^{0(1)}_{\text{вых}}$  — выходной ток при логическом 0 (1) на выходе;

$I^{0(1)}_{\text{пот}}$  — ток потребления при логическом 0 (1) на входе;

$t^{01(10)}_{\text{зд}}$  — время задержки выключения (включения);

$t^{01(10)}_{\text{зд.р}}$  — время задержки распространения сигнала при выключении (включении);

$t_{\text{зд.р}}$  — среднее время задержки распространения сигналов.

Функциональный контроль основывается на использовании различных способов генерации входных требуемых воздействий и анализа выходных откликов.

Широко распространен способ автоматической генерации программируемых входных воздействий, при котором тестовая программа, записанная на машинном носителе, реализуется измерительным устройством с записью результатов контроля и выводом на индикатор. В ряде случаев при контроле используется генерация двоичных кодов, при котором осуществляется последовательный перебор двоичных комбинаций сигналов на входах про-



веряемой ИМС. Разновидностью этого способа является генерация псевдослучайных кодов, для чего используется специально запрограммированный генератор случайных сигналов. Одним из кодов, широко применяемых при таком способе, является код Грея («бегущие» 1 или 0).

В последнее время для контроля, в первую очередь ИМС памяти, широко применяется алгоритмическая генерация кодов, основанная на описании работы ИМС при помощи алгоритма, по которому ЭВМ вычисляет входные наборы и подает на входы проверяемой ИМС необходимую тестовую последовательность.

Для осуществления функционального контроля необходимо, как уже было сказано выше, иметь заранее подготовленные требуемые реакции проверяемой ИМС на входные тестовые последовательности, судить о ее годности. Способы подготовки требуемых реакций следующие.

Программируемые требуемые реакции подготавливаются на основе тестовой таблицы проверяемой ИМС. Так же, как и входные воздействия, они записываются на носители программы и по тактам считываются в устройство анализа выходной реакции проверяемой микросхемы. При генерации требуемых реакций с эталона используется полностью исправная эталонная ИМС, аналогичная проверяемой. При этом обе микросхемы — эталонная и проверяемая — получают одни и те же входные воздействия. Наиболее сложный метод создания требуемых реакций ИМС основывается на алгоритмической генерации, при которой по заданному алгоритму ЭВМ в составе контрольного устройства формирует не только входные коды, но и ответные, требуемые реакции, которые используются для сравнения с реальными реакциями контролируемой ИМС.

Заключительной операцией при функциональном контроле является анализ выходных реакций, при котором сравниваются выходные сигналы на выходах ИМС с требуемыми реакциями и делается заключение об ее исправности.

При организации анализа выходных реакций на основе много-разрядного сравнения информация, получаемая в каждом такте на выходах проверяемых ИМС, сравнивается с требуемой в много-разрядной схеме сравнения. Результат сравнения по каждому выходу («годен — не годен») записывается в память и выводится на индикатор.

В ряде случаев используется метод подсчета переключений выходных сигналов из одного состояния в другое в процессе прохождения теста. Если известно количество переключений по каждому выходу за время проверки, то с помощью программируемых счетчиков их число фиксируется и служит основанием для определения работоспособности контролируемой ИМС.

Если использовать для регистрации выходных сигналов сумматоры с циклическим переносом или накапливающие сумматоры, то для каждой проверяемой ИМС можно получить какое-то число в двоичной форме, характерное лишь для данного типа

ИМС. Этот результат называют контрольной суммой, сравнивая ее с результатом контроля эталона, судят о годности проверяемой ИМС.

Недавно при функциональном контроле стал использоваться так называемый *сигнатурный анализ*. Данный метод основан на известной в технике цифровой связи методике контроля информации с помощью циклических избыточных кодов, при которой получаемая на выходе контролируемой ИМС двоичная информация произвольной длины сжимается в фиксированное значение, имеющее обычно четыре шестнадцатеричных разряда, называемое сигнатурой. Сигнатура с высокой достоверностью соответствует проверяемой последовательности. Отличие последовательности сигналов от истинной хотя бы на 1 бит дает в результате другую сигнатуру. Аппаратно анализатор сигнатур может быть построен на основе последовательного сдвигового регистра с внутренними обратными связями от нескольких определенным образом выбранных разрядов, содержимое которых суммируется по модулю 2 с поступающими побитно на вход составляющими входной последовательности сигналов. После прохождения всей последовательности информация, оставшаяся в регистре сдвига, и является сигнатурой.

В настоящее время все большее распространение получают сверхбольшие интегральные микросхемы, которые вообще могут не поддаваться тестированию. В связи с этим активные структуры ИМС должны разрабатываться так, чтобы обеспечить возможность самотестирования без участия какого-либо внешнего оборудования и программных средств. Самодиагностирование БИС является естественным развитием структурного подхода к проектированию тестопригодных схем. Сочетание встроенных средств контролепригодности, например сквозного сдвигового регистра для сканирования состояний, генератора псевдослучайных тест-кодов, регистра сигнатурного анализа, позволяет реализовать самотестирование кристаллов со структурами и самих микросхем.

#### **11.7. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Исследования показывают, что с ростом количества элементов на кристалле БИС надежность вентилях и элементов памяти увеличивается. В частности, интенсивность отказов на вентиль или бит уменьшается на 1...2 порядка, если сложность схемы возрастает на 2...3 порядка. Следовательно, выигрыш в надежности становится основным стимулом повышения степени интеграции СБИС. Однако достигается это не простым наращиванием количества элементов в схеме, а введением в нее встроенных средств отказоустойчивости. Методы обеспечения отказоустойчивости основываются на *аппаратной* или *информационной избыточности*, которая в обычных условиях не нужна для нормального функционирования ИМС. Информационная избыточность основана на кодах

для обнаружения и исправления ошибок (коды с контролем четности и коды Хэмминга соответственно).

Аппаратная избыточность может состоять в дублировании схемных функций за счет резервных элементов или введении дополнительных схем для таких диагностических функций, как сравнение или декодирование. Само по себе обнаружение ошибок, эквивалентное самодиагностированию в рабочем режиме, не обеспечивает отказоустойчивости. Она достигается путем маскирования ошибочного результата перед его передачей в следующий узел схемы. Такое маскирование может быть достигнуто арифметической коррекцией ошибки либо изоляцией неисправной схемы и включением вместо нее правильно работающего узла.

Информационные средства обеспечения отказоустойчивости в настоящее время используются для ИМС памяти. Например, для 16- и 32-разрядных матриц памяти добавление всего шести и семи дополнительных разрядов соответственно позволяет с помощью кода Хэмминга исправлять одиночные и обнаруживать двойные ошибки.

Аппаратное обеспечение отказоустойчивости обеспечивается за счет внутрисхемного резервирования отдельных, наиболее ответственных узлов микросхемы. Рассмотрим существующие методы резервирования более подробно.

Любой метод резервирования основан на принципе избыточности. Это означает, что наряду с основными элементами и узлами электронного устройства (в нашем случае интегральной микросхемы), выполняющими предназначенные им функции, должны быть предусмотрены резервные элементы, которые не являются функционально необходимыми, а предназначены для замены соответствующих основных узлов в случае их отказа.

По способу включения резерва различают *резервирование замещением* и *постоянное резервирование*.

При первом способе схема проектируется таким образом, что при появлении отказа элемента она перестраивается и восстанавливает свою работоспособность путем замещения отказавшего элемента резервным. В этом случае в архитектуре схемы должны быть предусмотрены переключательные элементы, обеспечивающие отключение поврежденного узла и присоединение резервного.

При постоянном резервировании дублирующие элементы присоединены к основным в течение всего времени работы и находятся в одинаковом с ними рабочем режиме. Схема с постоянным резервированием должна быть спроектирована таким образом, чтобы отказ одного и даже нескольких резервных элементов не влиял на режим ее работы.

Перечисленные виды резервирования относятся к схемной избыточности, называемой структурным резервированием, которое достигается существенным усложнением топологии интегральной микросхемы.

Для контроля и оценки эффективности структурного резервирования используют структурные модели надежности, представ-

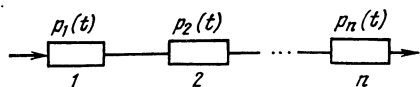


Рис. 11.3. Последовательная модель надежности:

1, 2, ...,  $n$  — элементы модели;  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ , ...,  $p_n(t)$  — вероятности безотказной работы элементов модели

ляющие собой графическое изображение микросхемы с выделением основных ее элементов по функциональному признаку. При этом основные элементы и их связи выделяются так, чтобы отказы любого из них были независимы и не предопределяли отказов остальных элементов. Простейшими универсальными моделями надежности являются последовательные и параллельные схемы соединений из независимых элементов.

*Последовательная модель надежности* представляет собой систему, состоящую из двух и более функциональных элементов, соединенных последовательно. Отличительной особенностью такой модели является условие работоспособности, суть которого состоит в том, что система остается работоспособной, если все элементы модели исправны. При выходе из строя хотя бы одного элемента система переходит в неисправное состояние.

На основании теоремы умножения вероятностей независимых событий формулируется правило: *вероятность безотказной работы последовательной модели надежности равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных ее элементов.*

Простейшая последовательная модель надежности, состоящая из  $n$  элементов, представлена на рис. 11.3. Вероятности безотказной работы элементов модели обозначены соответственно  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ , ...,  $p_n(t)$ . С учетом этого вероятность безотказной работы модели

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (11.2)$$

а вероятность появления в ней отказа

$$Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_i(t). \quad (11.3)$$

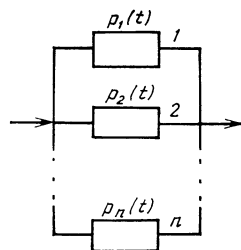
При условии, что модель состоит из одинаковых элементов, имеющих равные вероятности безотказной работы  $p_i(t) = p_k(t)$ , выражения (11.2), (11.3) соответственно преобразуются к виду:

$$P_c(t) = p_k^n(t); \quad Q_c(t) = 1 - p_k^n(t).$$

Параллельная модель надежности отображает систему, состоящую из двух и более независимых функциональных элементов, соединенных параллельно. Условие работоспособности модели состоит в том, что система остается работоспособной, если хотя бы один из элементов находится в исправном состоянии. На основании этого свойства с использованием теоремы умножения вероятностей независимых событий формулируется правило: *вероятность отказа параллельной модели надежности равна произведению вероятности отказа отдельных ее элементов.*

Рис. 11.4. Параллельная модель надежности:

1, 2, ...,  $n$  — элементы модели;  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ , ...,  $p_n(t)$  — вероятности безотказной работы элементов модели



Структурная схема параллельной модели надежности, состоящей из  $m$  элементов, представлена на рис. 11.4. Здесь обозначения  $p_1(t)$ , ...,  $p_m(t)$  имеют тот же смысл, что и в последовательной модели надежности. С учетом сформулированного правила вероятность отказа  $Q_c(t)$  и вероятность безотказной работы  $P_c(t)$  параллельной модели надежности определим из следующих выражений:

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^m [1 - p_i(t)]; \quad (11.4)$$

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - p_i(t)]. \quad (11.5)$$

В случае одинаковой вероятности безотказной работы всех элементов параллельной модели, т. е. при  $p_i(t) = p_k(t)$ , выражения (11.4), (11.5) примут следующий вид:

$$P_c(t) = 1 - [1 - p_k(t)]^m; \quad (11.6)$$

$$Q_c(t) = [1 - p_k(t)]^m. \quad (11.7)$$

Рассмотренные модели являются основой для построения методов резервирования, осуществляемых применением общего, раздельного или смешанного соединений резервных элементов. Общее резервирование состоит в резервировании всех схемы в целом.

Раздельное резервирование обеспечивает дублирование отдельных узлов схемы, ее элементов и внутриэлементных связей. При смешанном резервировании в схеме дублируются как отдельные узлы, так и некоторые элементы в этих узлах. Рассмотрим более подробно общее и раздельное резервирование по элементам.

Общее резервирование (рис. 11.5) благодаря простоте реализации давно применяется в конструировании радиоэлектронной аппаратуры, однако раздельное резервирование (рис. 11.6) более эффективно.

Из сравнения упрощенных схем резервирования (см. рис. 11.5, 11.6), состоящих из одинакового количества основных и резервных элементов, обладающих одинаковой надежностью, следует, что для отказа схемы, представленной на рис. 11.5, достаточно, чтобы одновременно в основной и в каждой резервной цепях отказал любой один элемент. Для отказа схемы, приведенной на рис. 11.6, необходимо, чтобы вслед за отказом какого-либо основного узла отказали все дублирующие его элементы. Вероятность такого события, безусловно, будет меньше. Надежность схемы с резервированием определяется числом резервных элементов  $m$ ,

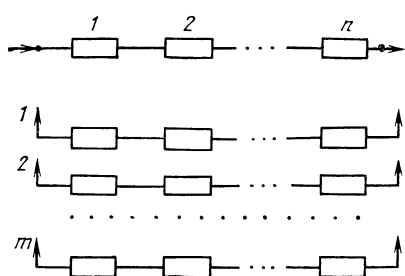


Рис. 11.5. Схема общего резервирования:

$n$  — количество элементов в основной цепи и в цепи резервирования;  $m$  — кратность резервирования

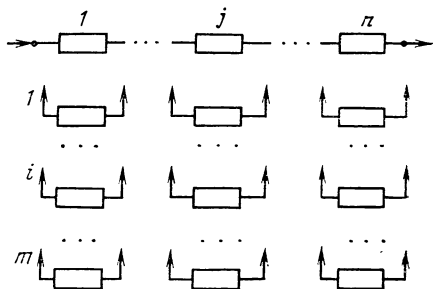


Рис. 11.6. Схема раздельного резервирования:

$n$  — количество элементов в основной цепи;  $m$  — кратность резервирования

приходящихся на один рабочий узел. Это число называют *кратностью резервирования*. Произведем количественную оценку вероятности безотказной работы обоих методов резервирования.

Схема с общим резервированием (см. рис. 11.5) будет нормально функционировать при сохранении в работоспособном состоянии хотя бы одной из цепей. Вероятность отказа такой системы определяется на основе теоремы умножения вероятностей отказа отдельных цепей:

$$Q_{об}(t) = \prod_{i=1}^{m+1} q_i(t), \quad (11.8)$$

где  $Q_{об}(t)$  — вероятность отказа схемы с общим резервированием;  $q_i(t)$  — вероятность отказа отдельных цепей, каждая из которых состоит из  $n$  элементов;  $m$  — кратность резервирования.

Вероятность безотказной работы схемы с общим резервированием

$$P_{об}(t) = 1 - Q_{об}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} [1 - p_i(t)], \quad (11.9)$$

где  $p_i(t)$  — вероятность безотказной работы  $i$ -й цепи.

Вероятность безотказной работы  $i$ -й цепи, состоящей из  $n$  элементов, определяем, используя теорему умножения вероятностей:

$$p_i(t) = \prod_{j=1}^n p_{ij}(t), \quad (11.10)$$

где  $p_{ij}(t)$  — вероятность безотказной работы  $j$ -го элемента  $i$ -й цепи. Используя равенство (11.10), преобразуем выражение (11.9) к виду

$$P_{об}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} [1 - \prod_{j=1}^n p_{ij}(t)]. \quad (11.11)$$

Для схемы с раздельным резервированием, используя уравнение (11.9), определяем вероятность безотказной работы отдельных элементов с резервированием. Тогда выражение для общей

вероятности безотказной работы схемы с отдельным резервированием будет иметь следующий вид:

$$P_{\text{раз}}(t) = \prod_{j=1}^n \left\{ 1 - \prod_{i=1}^{m+1} [1 - p_{ij}(t)] \right\}. \quad (11.12)$$

Для случая, когда все элементы одинаковы по надежности и каждая из цепей схемы с общим резервированием состоит из  $n$  последовательно включенных элементов, выражение для вероятности безотказной работы схемы с общим резервированием преобразуется к виду

$$P_{\text{об}}(t) = 1 - [1 - p^n(t)]^{m+1}, \quad (11.13)$$

где  $p(t)$  — вероятность безотказной работы отдельного элемента.

Для схемы с отдельным резервированием с учетом идентичных предыдущему условий получим

$$P_{\text{раз}}(t) = \{1 - [1 - p(t)]^{m+1}\}^n. \quad (11.14)$$

В реальных схемах может быть использовано смешанное резервирование, при котором отдельные элементы и узлы имеют как раздельное, так и общее резервирование (рис. 11.7). В этом случае для определения эффективности резервирования и расчета надежности модели  $P_{\text{ср}}(t)$  необходимо выделить в схеме участки с одинаковыми методами резервирования и определить надежность каждого из них, после чего в зависимости от характера укрупненной модели, сведенной к последовательному или параллельному соединению элементов, определить надежность моделируемой схемы с учетом всех примененных в ней методов резервирования.

Определим эффективность общего и раздельного методов резервирования, для чего преобразуем выражения (11.13) и (11.14), используя следующее соотношение:  $p(t) = 1 - q(t)$ , где  $p(t)$  — вероятность отказа отдельного элемента в рассматриваемой схеме. Подставив данное соотношение в выражения (11.13) и (11.14), окончательно получим:

$$P_{\text{об}}(t) = 1 - \{1 - [1 - q(t)]^n\}^{m+1}; \quad (11.15)$$

$$P_{\text{раз}}(t) = [1 - q^{m+1}(t)]^n. \quad (11.16)$$

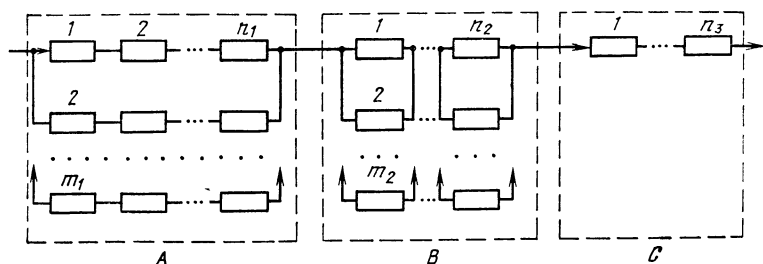


Рис. 11.7. Смешанное резервирование:

1, ...,  $n$  — элементы схемы;  $m$  — кратность резервирования;  $A$  — узел с общим резервированием;  $B$  — узел с раздельным резервированием;  $C$  — узел без резервирования

В связи с тем, что вероятность безотказной работы отдельных элементов интегральной микросхемы  $p_i(t)$  близка к единице, а вероятность отказов  $q_i(t)$  соответственно очень мала, разложим выражения (11.15) и (11.16) в ряды по степеням  $n$  и, пренебрегая членами с  $q$  в степени выше первой, получим упрощенные формулы для определения  $P_{об}(t)$  и  $P_{раз}(t)$ . С учетом сказанного можем записать

$$[1 - q(t)]^n \approx 1 - nq(t). \quad (11.17)$$

Используя (11.17), выражения (11.15) и (11.16) преобразуем к виду:

$$P_{об}(t) = 1 - [nq(t)]^{m+1}; \quad Q_{об}(t) = [nq(t)]^{m+1}; \quad (11.18)$$

$$P_{раз}(t) = 1 - nq^{m+1}(t); \quad Q_{раз}(t) = nq^{m+1}(t), \quad (11.19)$$

где  $Q_{раз}$  — вероятность отказа схемы с раздельным резервированием.

Отношение вероятности отказа схемы с общим резервированием к вероятности отказа схемы с раздельным резервированием

$$Q_{об}(t)/Q_{раз}(t) = n^m \quad (11.20)$$

показывает, что раздельное резервирование в  $n^m$  раз эффективнее общего.

Задаваясь конкретными значениями  $p(t)$ ,  $n$  и  $m$ , проведем сравнение эффективности кратности общего и раздельного методов резервирования [81].

На рис. 11.8 представлены графики зависимости вероятности безотказной работы схемы с общим и раздельным резервированием от последовательно включенных элементов  $n$ , имеющих надежность  $p(t) = 0,9$ , при различных кратностях резервирования  $m$ .

Из графика следует, что общее резервирование при больших значениях  $n$  недостаточно эффективно и с увеличением кратности резервирования вероятность безотказной работы такой схемы изменяется очень незначительно,

в то время как раздельное резервирование даже при кратности  $m=2$  существенно повышает вероятность

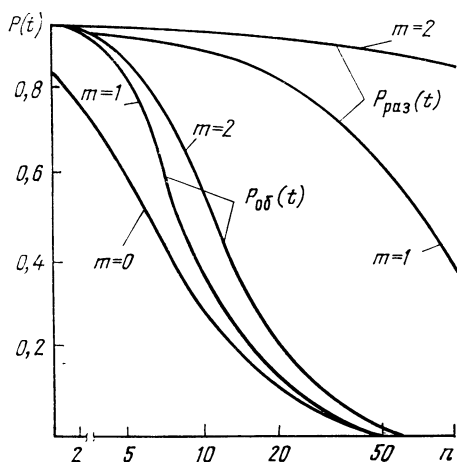


Рис. 11.8. Зависимость вероятности безотказной работы схемы от числа последовательно включенных элементов при различных кратностях и методах резервирования:

$n$  — число элементов в схеме;  $m$  — кратность резервирования;  $P_{об}(t)$  — вероятность безотказной работы при общем резервировании;  $P_{раз}(t)$  — вероятность безотказной работы при раздельном резервировании



безотказной работы схемы. Преимущество отдельного резервирования возрастает с увеличением числа резервируемых элементов  $n$  и кратности резервирования  $m$ .

Кроме рассмотренных выше методов широкое распространение получило так называемое *мажоритарное резервирование*, которое является одной из разновидностей структурной избыточности схем. Оно главным образом может иметь распространение при проектировании логических ИМС. Выбор количества резервных элементов в схеме основывается на фундаментальном положении теории отказоустойчивости кодирования, согласно которому отказоустойчивая схема будет функционировать исправно при одновременном отказе в  $t$  элементах, если она состоит из  $d$  элементов. При этом  $d$  и  $t$  связаны следующим соотношением:

$$d = 2t + 1. \quad (11.21)$$

Из выражения (11.21) следует, что в схеме с мажоритарным резервированием должно быть нечетное число элементов (минимум три), на которые подаются сигналы в двоичном коде (0 или 1). С выходов этих элементов сигналы поступают на вход мажоритарного органа, назначение которого состоит в выделении из группы сигналов безошибочного сигнала. Мажоритарный элемент выдает сигналы на входы последующих элементов схемы только в том случае, если на его вход поступили аналогичные сигналы от большинства идентичных элементов, подключенных к его входу, т. е. выходной сигнал всегда принимает значение, равное значению большинства входных сигналов. Таким образом, мажоритарный элемент реализует закон большинства или мажоритарный закон.

Наибольшее распространение получили мажоритарные элементы, реализующие «голосование» два из трех. Выполняются они обычно из набора логических элементов И и ИЛИ. Структура простейшей схемы с мажоритарным резервированием приведена на рис. 11.9. Здесь элементы 1, 2, 3 узла А выполняют одинаковые функции и имеют вероятность безотказной работы соответственно  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $p_3(t)$ . Узел В, состоящий из логических элементов И и ИЛИ, является мажоритарным элементом, осуществляющим функцию голосования. Обозначим вероятность безотказной работы мажоритарного элемента  $p_p(t)$ .

Все возможные состояния схемы с мажоритарным резервированием сведем в таблицу истинности (табл. 11.1) [82]. Состояния отказа и работоспособности обозначим соответственно символами 0 и 1.

Предположив вероятность отказа мажоритарного элемента  $p_p(t) = 1$  и с учетом таблицы истинности, можем определить вероятность безотказной работы схемы с мажоритарным элементом  $P_m(t)$  из следующего выражения:

$$P_m(t) = p_2(t)p_3(t)q_1(t) + p_1(t)p_2(t)p_3(t) + p_1(t)p_2(t)q_3(t) + p_1(t)p_3(t)q_2(t), \quad (11.22)$$

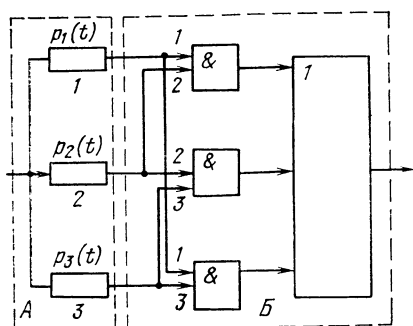


Рис. 11.9. Мажоритарное резервирование:

А — узел схемы с элементами 1, 2, 3, выполняющими одинаковые функции; Б — мажоритарный элемент, состоящий из схем И и ИЛИ

Таблица 11.1

$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$	$p_p(t)$
0	1	1	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	0	0	0
1	1	0	1
1	0	1	1

где  $q_1(t), \dots, q_3(t)$  — вероятность отказа идентичных элементов 1, 2, 3.

При написании выражения (11.22) мы принимали во внимание только те строки таблицы истинности, в которых  $p_p(t) = 1$ . Учитывая, что элементы 1, 2, 3 идентичны, мы можем положить, что  $p_1(t) = p_2(t) = p_3(t) = p(t)$  и  $q_1(t) = q_2(t) = q_3(t) = q(t)$ . С учетом этого допущения выражение (11.22) преобразуем следующим образом:

$$P_m(t) = p^2(t) [3 - 2p(t)]. \quad (11.23)$$

Предположим вероятность безотказной работы элемента  $p(t) = 0,99$  и определим вероятность безотказной работы схемы с мажоритарным резервированием при трех идентичных элементах в схеме. Используя (11.23), получаем

$$P_m(t) = 0,99^2 (3 - 2 \cdot 0,99) = 0,9996.$$

Таким образом, с помощью мажоритарного резервирования надежность схемы увеличилась более чем на порядок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Далеко не все разнообразие приборов на основе *p-n* переходов и не все аспекты надежности нашли отражение в предлагаемой читателю книге. В частности, ввиду специфики не рассматривались полупроводниковые лазеры, светодиоды и оптоэлектронные интегральные микросхемы, у которых весьма перспективное будущее. Так замена электрической связи на оптическую в интегральных микросхемах открывает широкие возможности в повышении их быстродействия, помехозащищенности и радиационной стойкости. Это связано с тем, что при современном уровне степени интеграции практически достигнуты предельные значения быстродействия за счет оптимизации электрических соединений между активными элементами БИС и СБИС. Для характерных размеров полупроводникового кристалла  $10 \times 10$  мм средняя длина линии электрической связи может быть принята равной 10 мм. При ширине в 1 мкм омическое сопротивление такой линии достигает  $10^3$  Ом, а паразитная емкость  $c_n \approx 2 \cdot 10^{-12}$  Ф, что соответствует времени задержки сигнала, равному порядку 2 нс. Таким образом, никакие топологические и схемные ухищрения при формировании активных элементов не позволят преодолеть частотный барьер  $10^9$  Гц, если не будут приняты кардинальные меры по замене в интегральных микросхемах электрической связи на какую-либо другую, в частности на оптическую. В оптоэлектронных полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах практически снимается такая проблема, как коррозия металлизации, электромиграция в металлической разводке, что существенно должно способствовать повышению надежности приборов. Целесообразно обратить внимание на возможность значительного повышения надежности и электрофизических характеристик приборов, которые открываются в связи с последними достижениями в области создания высокотемпературных сверхпроводников [83].

После получения в 1985—1986 гг. в Цюрихском филиале фирмы IBM керамических соединений на основе бария, лантана, меди и кислорода, обладающих свойствами сверхпроводимости при 28 К, исследования в этой области нарастали лавинообразно. При замене лантана другим редкоземельным элементом — иттрием — сверхпроводимость керамики наступает уже при температуре жидкого азота. Если будут найдены приемлемые технологические методы нанесения тонких пленок высокотемпературной сверхпроводящей керамики, то это откроет новые пути в осуществлении из таких пленок электрических соединений в полупроводниковых при-

борах и ИМС. При этом будет обеспечен выигрыш в надежности по крайней мере в двух направлениях. Во-первых, электрические соединения будут практически без потерь, снимается проблема электромиграции. Во-вторых, функционирование при азотных температурах существенно упростит отвод тепловой энергии от активных областей полупроводниковых структур и, кроме того, обеспечит значительное замедление деградационных процессов в них. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что от использования явления высокотемпературной сверхпроводимости надежность только выиграет.

Выше говорилось, что рост сложности приборов и степени их интеграции, совершенствование технологических процессов и другие факторы ведут к росту надежности. Однако здесь возникает новая проблема, заключающаяся в том, что для высоконадежных приборов практически нереально получение необходимой информации, чтобы подтвердить их надежность путем натурных испытаний. В связи с этим перспективным для такого класса приборов является применение априорного исследования возможных деградационных процессов в элементах изделий в целях управления надежностью на основе создания соответствующего этим процессам банка моделей отказов, а также дальнейшее развитие метода «физики отказов» и возникающего в связи с этим нового методологического направления теории надежности — *методологии физико-статистической имитации*. Сущность этого направления состоит в замене метода натурных статистических испытаний приборов имитацией их на ЭВМ с помощью специально созданных моделей [84].

Реализация возможностей методологии надежностных имитационных систем состоит из нескольких этапов:

- анализа объекта исследований;
- создания внешнего математического обеспечения моделей и макромоделей отказов приборов и их элементов;
- создания внутреннего математического обеспечения — алгоритмов и программ имитации на ЭВМ статистических испытаний с моделями и макромоделями отказов приборов и их элементов;
- проведения на ЭВМ имитации статистических испытаний;
- расчета и прогнозирования количественных показателей надежности изучаемых приборов и их элементов по результатам имитационных (машинных) испытаний;
- разработки рекомендаций по управлению надежностью изучаемых приборов.

Надежностные имитационные системы характеризуются специфическими условиями эффективного применения, а также определенными ограничениями.

Достаточным условием их эффективного применения является требование устойчивости моделей отказов изучаемых изделий. Этому требованию удовлетворяют ИМС, в структуре которых грубые дефекты отсутствуют и за отказы ответственны в основном деградационные процессы.

Необходимым условием применимости и эффективности надежных имитационных систем является экономичность алгоритмов и программ машинных испытаний, сводящаяся к требованию, в соответствии с которым длительность машинных испытаний была бы меньше среднего времени между сбоями и отказами ЭВМ. Последняя позволяет исключить влияние сбоев и отказов ЭВМ на результаты имитации статистических испытаний.

Рассмотренный метод получает все большее распространение в производстве микросхем средней и большой степеней интеграции. На конкретных БИС, физико-статистические модели отказов которых достаточно хорошо разработаны, машинное время для проведения имитации статистических испытаний микросхем не превышает 1,5 ч. Кроме того, знание функций распределения аргументов, получаемых на тестовых структурах и рабочих кристаллах, обеспечивает реальную возможность управления надежностными свойствами, начиная с этапов проектирования и изготовления ИМС вследствие эффекта «наследственности» деградационных процессов и дефектов, характерных для каждой базовой технологии. Управление осуществляется разработкой критериев пооперационного и выходного контроля, методов диагностики, требований к технологическому и контрольно-измерительному оборудованию, к режимам работы и условиям эксплуатации. Таким образом, методология физико-статистического имитационного направления теории надежности обладает всеми возможностями для создания надежно ориентированных САПР и АСУТП, разработки эффективных методов входного и выходного контроля, оптимизации всех этапов жизненного цикла ИМС с целью повышения их технико-экономической эффективности.

Аналогичная проблема возникает при производстве специализированных ИМС, которые выпускаются очень малыми партиями, имеют самые разнообразные конструкции и поэтому по своей природе не позволяют собрать большую статистическую базу, которая применяется для прогнозирования надежности стандартных ИМС.

Диапазон использования заказных микросхем расширяется, поэтому прогнозы надежности нельзя строить на долгосрочных оценках характеристик какого-либо одного изделия. В связи с этим возникает необходимость оценивать надежность на уровне пластин. Таким образом, ставится задача прогнозировать надежность с помощью тестовых структур, определяя степень влияния реальных структур на пластине на уровень надежности готовой ИМС.

В работе [85], которая раскрывает одну из модификаций имитационного метода, предполагается исследовать шесть типовых причин отказа:

- пробой диэлектрика и его зависимость от времени;
- электромиграцию в металлических линиях и контактах;
- эффект горячих электронов;
- дрейф ионов;
- нестабильность  $p$ - $n$  переходов и границ металл — диэлектрик;

радиационную стойкость окислов по отношению к полной дозе излучения.

Этим перечнем охватываются основные причины и механизмы отказов, наблюдаемые в настоящее время. Естественно предположить, что по мере развития метода физики отказов диапазон охвата механизмов отказов и соответствующих им моделей будет расширяться. Однако наряду с техническими проблемами дальнейшего повышения надежности приборов не менее важную роль играют и организационные аспекты в управлении надежностью. И эта проблема в настоящее время перешла в разряд задач государственной важности [86].

В постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по коренному повышению качества продукции» на основе опыта передовых предприятий, объединений, областей и республик сформулирована целостная программа деятельности в этой области. Она предполагает овладение всеми руководителями — от министра до мастера — современными требованиями к разработке и производству высококачественной продукции, намечает формы конкретного участия всех специалистов, операторов и рабочих в деле всемерного повышения уровня выпускаемой продукции и выполнения работ.

Создание специального органа вневедомственного контроля — *Государственной приемки* продукции — в объединениях и на предприятиях промышленности, подчиняющегося Главному управлению Госстандарта СССР, — одно из кардинальных организационных мероприятий в борьбе за качество продукции.

Обязанности Госприемки очень широки. Важнейшая — вневедомственный контроль за качеством продукции на любой стадии изготовления. Приемка призвана осуществить проверку соблюдения государственных стандартов и технических условий на производстве, строго следить за проведением мероприятий по улучшению качества продукции, за выполнением относящихся к этой сфере решений государственных органов, участвовать в государственной аттестации продукции.

Руководителю Госприемки дано право не принимать продукцию при несоответствии ее параметров установленным требованиям или приостанавливать ее отгрузку.

Работа органов Госприемки складывается из двух частей. Первая — непосредственная приемка продукции на основе установления ее соответствия государственным стандартам, техническим условиям, другой документации. Причем это соответствие должно быть подтверждено испытаниями, близкими к реальным условиям эксплуатации. Вторая — контроль деятельности предприятия по вопросам качества, важнейшим звеном которой является входной контроль исходных материалов и комплектующих изделий. Далее — контроль конструкторской и технологической документации, проверка адекватности ей реального технологического процесса, контроль экспериментальной базы, непосредственных поверочных

испытаний, метрологического обеспечения, а также деятельности ОТК.

На входном контроле проверяется соответствие нормативным документам всех материалов и покупных изделий. При обнаружении несоответствия Госприемка совместно с ОТК как непосредственный представитель государственной власти предъявляет свои претензии поставщику. Исключительно важным моментом на этом этапе является оперативность реакции поставщика, которая стимулируется тем, что, если у поставщика имеются органы Госприемки, они немедленно примут меры к прекращению производства бракованной продукции. Если у поставщика соответствующих органов нет, то к решению проблемы подключаются территориальные звенья другого подразделения Госстандарта СССР — организации Госназора. Последние устанавливают на этом предприятии особый режим приемки, который будет действовать до тех пор, пока выпуск продукции надлежащего качества не будет налажен.

При контроле конструкции прибора производится оценка конструкторской документации предприятия на соответствие нормативным документам, прежде всего государственным стандартам.

При необходимости представители Госприемки имеют право принять решение о пересмотре документации.

Далее контролю подвергается технологическая документация, которая должна строго увязываться с конструкторской. Что касается самого технологического процесса производства приборов, то главное здесь для Госприемки — подтверждение его полного соответствия существующей на этот счет документации. Последние три этапа контроля определяют уровень соблюдения технологической дисциплины.

Важный объект внимания Госприемки — экспериментально-испытательная база предприятия-изготовителя приборов. По своему техническому уровню она должна давать объективную возможность подтверждения реализации требований нормативно-технической документации в готовом приборе.

Особой заботой Госприемки является контроль средств измерения, используемых на производстве. Без современных, своевременно поверенных и исправных средств измерений и контроля параметров приборов, материалов и комплектующих изделий ведение производства качественной продукции невозможно. Поэтому средствам измерений Госприемка уделяет самое пристальное внимание.

В современных условиях расширения экономических связей с зарубежными странами проблема качества и надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем приобретает еще большую остроту. Для активного обмена высококачественной продукцией с другими странами нужен объективный механизм или организация оценки качества этой продукции. За основу такого механизма может быть принята *Международная система сертификации изделий электронной техники* (МСС ИЭТ), функционирую-

щая в составе Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) с 1977 г.

Конкретное назначение МСС ИЭТ, действующей в соответствии с Уставом МЭК и под ее эгидой, заключается в том, чтобы способствовать международной торговле сертификационными изделиями электронной техники [87]. Это достигается четким определением процедур сертификации и осуществлением их на практике таким образом, чтобы изделия, изготовленные в соответствии с требованиями применяемых технических условий в одной стране-участнице, были одинаково приемлемы во всех других странах-участницах без необходимости проведения дальнейших испытаний.

Коротко рассмотрим организационную структуру системы.

Согласно основным правилам сертификации вся ответственность за функционирование системы возложена на Руководящий комитет по сертификации (РКС), который является комитетом МЭК и в своей работе подотчетен Совету МЭК. В состав РКС входят делегации от каждой страны-участницы, назначаемой национальной головной организацией. В настоящее время в РКС представлены 24 страны — члены Международной Электротехнической Комиссии, включая все развитые капиталистические страны. Советский Союз вступил в систему сертификации в 1983 г. со статусом полноправного члена.

РКС учреждает Комитет по координации деятельности Национальных служб надзора (ККН) и определяет его состав и сферу деятельности. ККН несет ответственность за осуществление надзора за единообразным применением странами-участницами системы Правил процедуры в части сертификации.

В соответствии с Основными правилами национальной организации, учрежденной в стране-участнице Системы с целью координации работ по сертификации изделий электронной техники, должен быть Национальный комитет МЭК или организация, признаваемая полномочной Национальным комитетом МЭК. Она должна, главным образом, осуществлять следующие функции:

национальной головной организации, уполномоченной правительством выступать в качестве руководящей организации по деятельности Системы на национальном уровне и осуществлять представительство своей страны в Системе;

национальной организации по стандартизации, которая разрабатывает и издает национальные стандарты и другие связанные с Системой руководящие документы;

национальной службы надзора, осуществляющей контроль за соблюдением принятого в Системе порядка сертификации и правильностью использования в стране знака и сертификата соответствия требованиям Системы. В системе Национальной службы надзора должны быть предусмотрены независимые испытательные лаборатории, оснащенные необходимым оборудованием для проведения испытаний изделий, представляемых на сертификацию и специальные службы поверки для контроля образцовых средств



измерений испытательных лабораторий и осуществления метрологического обеспечения в Национальной системе сертификации.

В Советском Союзе функции Головной организации возложены на Госстандарт СССР и его структурные подразделения.

Национальная служба надзора осуществляет аттестацию предприятий-изготовителей приборов, независимых поставщиков-распределителей и независимых испытательных лабораторий. Сама же Национальная служба надзора аттестуется Координационным Комитетом надзора, для этого она должна подтвердить свои полномочия осуществлять независимую политику в области сертификации, в соответствии с требованиями Системы располагать опытным и технически компетентным персоналом для проведения надзора и контроля на должном уровне, а также иметь необходимое оснащение для осуществления поверочных испытаний и всех стандартных измерений, проводимых как в ходе технологического процесса, так и на выходном контроле готовых приборов.

Наиболее трудоемкой частью функционирования Системы является аттестация предприятий-изготовителей. При этом контролю и аттестации подвергаются руководящая нормативно-техническая документация, технологический процесс и оснащенность его специальным технологическим оборудованием, система контроля качества продукции от входного контроля исходных материалов и покупных изделий до выходного контроля готовой продукции с подробным протоколированием результатов контроля и испытаний.

По результатам аттестации предприятию-изготовителю выдается свидетельство на право сертификации аттестованных приборов с присвоением соответствующего знака сертификата. Для осуществления независимого контроля за выпуском аттестованных приборов назначается главный контролер предприятия-изготовителя. Он несет персональную ответственность за использование знака или сертификата соответствия.

ККН перед аттестацией Национальной службой надзора организует инспекционную проверку на месте системы Национальной службы надзора с посещением независимых испытательных лабораторий, поставщиков-распределителей и некоторых предприятий-изготовителей, претендующих на получение права сертификации.

Основой функционирования Международной системы сертификации изделий электронной техники является комплекс стандартов и технических условий, принятых в МЭК, включающих следующие типы документов:

- основополагающие технические условия;
- общие технические условия;
- групповые технические условия;
- форму технических условий на изделия конкретных типов;
- технические условия на законченные приборы.

Наряду с другими вопросами основополагающие технические условия могут включать:

основные методы испытаний на воздействие внешних факторов (например, Публикация 68 МЭК);

планы выборочного контроля (например, Публикация 410 МЭК);

порядок организации контроля по партиям и периодического контроля (например, Публикация 419 МЭК);

единицы физических величин системы СИ (например, стандарт ИСО 1000);

ряды предпочтительных величин (например, Публикация 63 МЭК);

требования к нанесению опознавательных обозначений, маркировке, указанию даты выпуска и т. д.

Разработка технических условий всех рангов находится в компетенции Технических комитетов МЭК. В частности, Технический комитет МЭК «Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы» разработал общие технические условия на дискретные полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы, которые выпущены в виде Публикации 747-10 в ранге Стандарта МЭК. При этом следует указать, что разработке этого Стандарта предшествовал длительный этап работы по созданию более 50 публикаций, регламентирующих вопросы терминологии, методов измерений и испытаний, конструктивного оформления и системы параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, правил приемки и надежности. Таким образом, в пределах Международной Электротехнической Комиссии создана необходимая база для обеспечения требуемого современными условиями уровня качества и надежности как основной составляющей качества полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Принятие стандартов МЭК в качестве национальных стандартов, Государственная приемка в сочетании с активным участием в Международной системе сертификации позволят в кратчайший срок вывести надежность характеристики отечественных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на уровень передовых мировых достижений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 15467—70. Качество продукции. Термины и определения.
2. ГОСТ 27.002—83. Надежность в технике. Термины и определения.
3. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. — М.: Сов. радио, 1975. — 472 с.
4. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965. — 524 с.
5. Базовский И. Надежность. Теория и практика: Пер. с англ./Под ред. Б. Р. Левина. — М.: Мир, 1965. — 373 с.
6. ГОСТ 25359—82. Изделия электронной техники. Общие требования по надежности и методы испытаний.
7. Fausto Fantini. Reliability Problem With VLSI//Microelectronics and Reliability. — 1984. — Vol. 24, N 2. — P. 275—296.
8. Хайкин С. Э. Физические основы механики. — М.: Физматгиз, 1963. — 772 с.
9. Карпушин В. Б. Виброшумы радиоаппаратуры. — М.: Сов. радио, 1977. — 320 с.
10. Причины, механизмы отказов и надежность полупроводниковых приборов при механических воздействиях./В. В. Ведерников, Н. Н. Горюнов, Э. Г. Павлович, А. А. Чернышев. — М.: Знание, 1977. — 52 с.
11. МЭК. Публикация 68—2—27. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Ч. 2. Испытания.  $E_a$ : удар.
12. Chernishev A. A., Ivanov V. I., Vedernikov V. V. Resonance Characteristics of Semiconductor Mechanical Components//Microelectronics and Reliability. — 1972. — Vol. 11. — P. 525—536.
13. ГОСТ 16350—80. Климат СССР. Районирование и статические параметры климатических факторов для технических целей.
14. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. — М.: Физматгиз, 1969. — 263 с.
15. Коршунов Ф. П., Гатальский Г. В., Иванов Г. М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. — Минск: Наука и техника, 1978. — 232 с.
16. Радиационная стойкость интегральных схем, применяемых в специализированных ЭВМ/А. А. Чернышев, О. Н. Голотюк, Ю. А. Попов и др.//Зарубежная электронная техника. — 1984. — Вып. 8. — С. 87—123.
17. Мазель Е. З., Пресс Ф. П. Планарная технология кремниевых приборов. — М.: Энергия, 1974. — 384 с.
18. Курнасов А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высшая школа, 1979. — 367 с.
19. Бузыкин А. Н., Королев Е. А. Последние достижения в области получения монокристаллов кремния//Зарубежная электронная техника. — 1985. — Вып. 2. — С. 68—107.
20. Robert V. Swaroop. Advances in Silicon Technology for the Semiconductor Industry//Solid State Technology. — 1983. — N 6. — P. 111—114, N 7. — P. 97—101.
21. Шуляковский А. Е., Сотсков Б. С., Иванов В. И. Процессы отмытки кремниевых подложек в производстве полупроводниковых приборов//Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — 1984. — Вып. 2 (1016). — 72 с.
22. Полянский А. М. Кремниевые эпитаксиальные пленки//Обзоры по электронной технике. Сер. 6. Материалы. — 1984. — Вып. 9 (843). — 40 с.
23. Abdel-Khalek Mohamed Zakzouk. The Dependence of the  $\text{SiO}_2$  Defect Density on Both the Applied Electric Field and the Oxide Thickness//J. of Electro-

- chemical Society. — 1979. — Vol. 126, N 10. — P. 1771—1779.
24. **Jataka Joriume.** Deformation of Silicon Wafers by Thermal Oxidation//Solid-State Science and Technology. — 1982. — Vol. 129, N 9. — P. 2076—2081.
25. **Blech J. A.** Step Coverage by Vapor Deposited Thin Aluminium Film//Solid-State Technology. — 1983. — N 12. — P. 123—125.
26. **Контроль интегральных схем на герметичность по большим и средним течам/В. Н. Хадыкин, С. Н. Пляскина, А. И. Лукашов и др.**//Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. — 1976. — Вып. 15 (427). — 45 с.
27. **Теверовский А. А., Епифанов Г. И., Константинов А. А.** Надежность полупроводниковых приборов, герметизированных в пластмассу/Обзоры по электронной технике. — Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — 1979. — Вып. 10 (661). — 47 с.
28. **Сотсков Б. С.** Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. — М.: Высшая школа, 1970. — 270 с.
29. **Радиационная отбраковка полупроводниковых приборов и интегральных схем/А. А. Чернышев, В. В. Ведерников, А. П. Галеев и др.**//Зарубежная электронная техника. — 1979. — Вып. 5 (200). — С. 3—25.
30. **Джерри Лаймен.** Монтаж на поверхность меняет облик печатных плат//Электроника. — 1984. — № 3. — С. 22—39.
31. **Левашов И. П.** Организация контроля качества микросистемных устройств//Радиоэлектроника. (Состояние и тенденции развития). — М.: 1983. — С. 1—10.
32. **Woods M. H., Gear G.** A New Electrostatic Discharge Failure Mode. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium//1978. — P. 248—254.
33. **Mc Ateer O. J.** Electrostatic Damage in Hybride Assemblies. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium//1978. — P. 241—247.
34. **Конструкции корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов./А. Н. Годов, Н. Н. Горюнов, В. С. Громов и др.** — М.: Энергия, 1976. — 120 с.
35. **Бердичевский Б. Е.** Вопросы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры при разработке. — М.: Сов. радио, 1977. — 384 с.
36. **Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники/А. А. Чернышев, В. И. Иванов, А. И. Аксенов, Д. Н. Глушкова.** — М.: Энергия, 1980. — 216 с.
37. **Д'Орль Ф.** Электродиффузия и отказы в электронике. — ТИИЭР. — 1972. Т. 62, № 2. — С. 1409—1418.
38. **Von Staszewski G. M., Walsow de Recca N. E.** Electromigration Mechanism in Aluminum Conductors//Solid-State Electronics. — 1980. — Vol. 23. — P. 481—488.
39. **Danso K. A., Tullios L.** Thin-Film Metalization, Studies and Device Lifetime Prediction Using Al—Si and Al—Cu—Si Conductor Test Bars//Microelectronics and Reliability. — 1981. — Vol. 21, N 4. — P. 513—527.
40. **Nicolet M., Suni I., Finetti M.** Amorphous Metallic Alloys in Semiconductor Contact Metalization//Solid-State Technology. — 1983. — N 12. — P. 129—133.
41. **Nguyen T. H., Foley R. T.** The Cemical Nature of Aluminum Corrosion.//J. of the Electrochemical Society. — 1980. — Vol. 127, N 12. — P. 2563—2566.
42. **Zerner J., Eldridge J. M.** Effect of Several Parameters on the Corrosion Rates of Al Conductors in Integrated Circuits//J. of the Electrochemical Society. — 1982. — Vol. 129, N 10. — P. 2270—2273.
43. **Снитовский Ю. П.** Отказы дискретных транзисторов, вызванные рекристаллизацией алюминиевой металлизации//Электронная техника. Сер. 8. — 1979. — Вып. 4 (74). — С. 38—41.
44. **Александрян И. Т., Вернер В. Д., Григорашвили Ю. Т.** Модели диффузионных отказов термокомпрессионных соединений интегральных схем//Электронная техника. — Сер. 8. — 1979. — Вып. 4 (74). — С. 3—12.
45. **Ефимов И. Е., Кальман И. Г., Мартынов В. И.** Надежность твердых интегральных схем. — М.: Изд. стандартов, 1979. — 217 с.
46. **Физические основы надежности интегральных схем/Под ред. Ю. Г. Миллера.** — М.: Сов. радио, 1976. — 320 с.
47. **Sunami H., Koyanagi M., Hashimoto N.** Intermediate Oxide Formation in

- Double — Polysilicon Gate MOS Structure//J. of Electrochemical Society. — 1980. — Vol. 127, N 11. — P. 2499—2505.
48. Brown D. K., Hu S. M., Morrissey J. M. Flaws in Sidewall Oxides Grown on Polysilicon Gate//J. of Electrochemical Society. — 1982. — Vol. 129, N 5. — P. 1084—1089.
  49. Горюнов Н. Н. Свойства полупроводниковых приборов при длительной работе и хранения. — М.: Энергия, 1970. — 104 с.
  50. Edwards D. G. Testing for MOS IC. Failure Modes//IEEE Transactions. — 1982. — Vol. R-31, N 1. — P. 9—17.
  51. Fantini F. Reliability Problems With VLSI//Microelectronics and Reliability. — 1984. — Vol. 24, N 2. — P. 275—296.
  52. Reliability Effects on MOS Transistors Due to Hot-Carrier Injection/K. Chen, S. A. Saller, I. A. Groves, D. A. Scott//IEEE Transactions. — 1985. — Vol. ED-32, N 2. — P. 386—393.
  53. Напряжения и деформации в элементах микросхем/В. С. Сергеев, О. А. Кузнецов, Н. П. Захаров, В. А. Летягин. — М.: Радио и связь, 1987. — 92 с.
  54. Меламедов И. М. Физические основы надежности. — Л.: Энергия, 1970. — 152 с.
  55. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. — М.: Высшая школа, 1977. — 288 с.
  56. Сирота Н. Н., Чернышев А. А., Коршунов Ф. П. Отжиг радиационных дефектов в кремниевых диодах, облученных быстрыми нейтронами.//Тр. ин-та физики твердого тела и полупроводников АН БССР. — 1982. — С. 33—39.
  57. May T. C., Woods M. H. Alpha-Particle-Induced Soft Errors in Dynamic Memories//IEEE Transactions on Electron Devices. — 1979. — Vol. ED-26, N 1. — P. 377—387.
  58. A Soft Error Rate Model for MOS Dynamic RAM'S/Tojabe T., Shinoda T., Aoki M., Kowamoto H. and all//IEEE Transactions on Electron Devices. — Vol. ED-29, N 4. — P. 732—737.
  59. Переходные ионизационные эффекты в цифровых интегральных микросхемах./Е. Р. Аствацатурян, А. В. Раткин, П. К. Скоробогатов, А. И. Чумаков//Зарубежная электронная техника. — 1983. — Вып. 9 (267). — С. 36—71.
  60. Sai-Halasz G. A., Wordeman M. R., Dennard R. H. Alpha-Particle-Induces Soft Error Rate in VLSI Circuits//IEEE Transactions on Electron Devices. — 1982. — Vol. ED-29, N 4. — P. 725—731.
  61. Comparison of Intrinsic Gettering and Epitaxial Wafers in Terms of Soft Error Endurance and Other Characteristics of 64K Bit Dynamic RAM/H. Iwai, H. Otsuka, Y. Matsumoto and all//IEEE Transactions. — 1984. — Vol. ED-21, N 9. — P. 1149—1151.
  62. Шор Я. Б. Прикладные вопросы теории надежности. — М.: Всесоюз. об-во «Знание», — 1966. — Вып. IX. — 25 с.
  63. Peck D. S., Zierdt C. H. Testing Techniques That Assure Reliable Semiconductor Devices//Bell Laboratories Record. — 1971. — P. 305—309.
  64. Загоруйко Н. Г. Методы распознавания и их применение. — М.: Сов. радио, 1972. — 208 с.
  65. Маслов А. А. Электронные полупроводниковые приборы. — М.: Энергоиздат, 1960. — 183 с.
  66. Надежность полупроводниковых устройств: Пер. с англ./Под общ. ред. А. А. Маслова. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963. — 425 с.
  67. Обеспечение надежности полупроводниковых устройств: Пер. с англ./Под общей ред. А. А. Савиной. — М.: Мир, 1964. — 464 с.
  68. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. — М.: Сов. радио, 1963. — 655 с.
  69. Дружинин Г. В. Основы надежности устройств автоматики. — Л.: Энергия, 1964. — 319 с.
  70. Коршунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. — Минск: Наука и техника, 1986. — 253 с.
  71. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. — М.: Энергия, 1977. — 671 с.

72. Валиев К. А. Проблемы создания элементной базы сверхвысокой степени интеграции для ЭВМ//Микроэлектроника. — 1980. — Т. 9. — Вып. 7. — С. 483—490.
73. Физические ограничения минимальных размеров элементов современной микроэлектроники./Ю. В. Гуляев, В. Б. Сандомирский, А. А. Суханов, Ю. Я. Ткач//Успехи физических наук. — 1984. — Т. 144. — Вып. 3. — С. 475—495.
74. Кокин А. А. Об основных физических ограничениях для элементов интегральных схем//Микроэлектроника. — 1980. — Т. 9. — Вып. 6. — С. 491—497.
75. Воронков И. Е., Ходкевич А. Д., Ходкевич С. П. Исследование неоднородности лавинного пробоя  $p$ - $n$  переходов с помощью производных их вольт-амперных характеристик//Электронная техника. — Сер. 1. — 1977. — № 8. — С. 33—44.
76. Perloff D. S., Wahl F. E., et al. Microelectronic Test Chips in Integrated Circuit Manufacturing//Solid-State Technology. — 1981. — N 9. — P. 75—80.
77. Mallory C. Z., Perloff D. S., et al. Spatial Yield Analysis in Integrated Circuit Manufacturing//Solid-State Technology. — 1983, N 11. — P. 121—127.
78. Теверовский А. А., Омаров Б. Ш., Гутник Д. И. Исследование влагостойкости микросхем в пластмассовых корпусах с помощью тестовых структур//Электронная техника. Сер. 8. — 1986. — Вып. 1 (118). — С. 46—54.
79. Рубцов А. Е., Невская Г. Е. Методы жидких кристаллов в контроле интегральных схем//Обзоры по электронной технике. Сер. 8. — 1986. — Вып. 1 (1160). — 47 с.
80. Тестовое диагностирование логических структур/В. А. Пелипейко, И. А. Ануцин, В. К. Жуляков и др.; Под ред. В. А. Пелипейко. — Рига: Знание, 1986. — 262 с.
81. Шишенок Н. А., Репкин В. Ф., Барвинский Л. Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники/Под ред. Н. А. Шишонка. — М.: Сов. радио, 1964. — 550 с.
82. Яншин А. А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА. — М.: Радио и связь, 1983. — 312 с.
83. Нагеле Т. Новые достижения в области сверхпроводников. — Электроника. — 1987. — Т. 60, № 2. — С. 10, 11.
84. Алексанян И. Т., Бабенко Е. Н. Управление надежностью БИС на основе надежных имитационных систем. — Электронная промышленность. — 1987. — Вып. 3 (161). — С. 31—34.
85. Уоллер Л. Разработка средств и методик испытаний специализированных ИС на надежность. — Электроника. — 1987. — Т. 60, № 1. — С. 6, 7.
86. Мигачев Б. С. Главная забота — качество. — Коммунист. — 1987, № 1. — С. 24—28.
87. Публикация QC001001-1981. Основные правила системы сертификации электронной техники МЭК (МСС ИЭТ).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Список сокращений . . . . .	5
Список условных обозначений физических величин . . . . .	6
Введение . . . . .	9

### Глава 1

#### ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Термины и определения в области надежности . . . . .	19
1.2. Показатели надежности . . . . .	21
1.3. Математическое представление показателей надежности . . . . .	25
1.4. Некоторые законы распределения случайных величин, используемые в теории надежности . . . . .	28

### Глава 2

#### ВИДЫ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

2.1. Основные этапы жизненного цикла приборов и их связь с внешними факторами . . . . .	39
2.2. Факторы внешних воздействий . . . . .	42
2.3. Факторы, связанные с научно-техническим и обслуживающим персоналом . . . . .	44
2.4. Конструктивно-технологические факторы . . . . .	46

### Глава 3

#### МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.1. Общая характеристика механических воздействий на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы в составе аппаратуры . . . . .	50
3.2. Реакция конструктивных элементов приборов на механические нагрузки . . . . .	52
3.3. Влияние вибрационных воздействий. Резонансные характеристики . . . . .	53
3.4. Ударные воздействия и их характеристики . . . . .	57
3.5. Механические модели конструктивных элементов приборов и резонансные характеристики . . . . .	62

### Глава 4

#### КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И АГРЕССИВНЫЕ СРЕДЫ

4.1. Общая характеристика климатических факторов и климатических зон . . . . .	65
4.2. Воздействие пониженных и повышенных температур . . . . .	68
4.3. Воздействие влажности . . . . .	69
4.4. Воздействие биологической среды и пылевых взвесей в атмосфере . . . . .	70
4.5. Воздействие пониженного и повышенного давления . . . . .	71

### Глава 5

#### РАДИАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

5.1. Общая характеристика различных видов радиации . . . . .	72
5.2. Воздействие проникающей радиации на электрофизические параметры исходных материалов . . . . .	75

5.3. Воздействие излучения на параметры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем . . . . .	82
---	----

## Глава 6

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

6.1. Общая характеристика технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем . . . . .	89
6.2. Обработка исходного полупроводникового материала . . . . .	91
6.3. Получение и обработка полупроводниковых пластин . . . . .	95
6.4. Очистка поверхности пластин от загрязнений . . . . .	102
6.5. Эпитаксиальное наращивание монокристаллических слоев . . . . .	104
6.6. Защитные и маскирующие окисные слои на кремнии . . . . .	106
6.7. Фотолитография . . . . .	111
6.8. Дефекты в приборах, возникающие при формировании активных областей (диффузия, имплантация) . . . . .	113
6.9. Металлизация и контакты . . . . .	116
6.10. Разделение пластин на кристаллы . . . . .	117
6.11. Сборка приборов и герметизация . . . . .	118

## Глава 7

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ АППАРАТУРЫ

7.1. Входной контроль полупроводниковых приборов и интегральных микросхем при изготовлении аппаратуры . . . . .	120
7.2. Подготовка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем к монтажу в аппаратуре и особенности монтажа . . . . .	123
7.3. Расположение полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в блоках аппаратуры . . . . .	124
7.4. Воздействие статического электричества на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации в аппаратуре . . . . .	126
7.5. Воздействие тепловых и электрических режимов на приборы в составе аппаратуры . . . . .	128

## Глава 8

### ВИДЫ И МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

8.1. Классификация отказов . . . . .	134
8.2. Понятие механизма отказов . . . . .	142
8.3. Механизмы отказов металлизации в результате электромиграции . . . . .	145
8.4. Механизмы коррозии и окисления металлизации . . . . .	149
8.5. Механизмы отказов контактов . . . . .	150
8.6. Некоторые механизмы отказов в межэлементных соединениях на основе поликремния . . . . .	152
8.7. Механизмы отказов планарных структур . . . . .	153
8.8. Механизм пробоя в тонком окисле и эффект горячих носителей . . . . .	158
8.9. Механизмы отказов в результате действия ударных и вибрационных нагрузок . . . . .	160
8.10. Некоторые механизмы отказов при радиационных воздействиях . . . . .	162



## Глава 9

### ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ И СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ

9.1. Основные принципы контроля качества приборов . . . . .	168
9.2. Классификация испытаний . . . . .	169
9.3. Планирование испытаний на надежность. Оперативная характеристика	173
9.4. Неразрушающие испытания . . . . .	179
9.5. Контроль качества полупроводниковых приборов и интегральных микросхем по шумовым характеристикам . . . . .	180
9.6. Контроль полупроводниковых структур по рекомбинационному излучению . . . . .	184
9.7. Контроль тепловых параметров с использованием переходных тепловых характеристик . . . . .	185
9.8. Ускоренные испытания . . . . .	186
9.9. Применение жидких кристаллов для контроля приборов . . . . .	190

## Глава 10

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИБОРОВ И ДИАГНОСТИКА

10.1. Понятие о методе распознавания образов . . . . .	193
10.2. Прогнозирование надежности по виду вольт-амперных характеристик	198
10.3. Прогнозирование надежности по $t$ -характеристикам . . . . .	202
10.4. Диагностика интегральных микросхем с помощью тестовых структур	204

## Глава 11

### ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В АППАРАТУРЕ

11.1. Основные принципы обеспечения надежной работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в аппаратуре . . . . .	208
11.2. Система обеспечения надежной работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в аппаратуре . . . . .	211
11.3. Организация сбора данных по надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем . . . . .	220
11.4. Организация анализа отказов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем . . . . .	223
11.5. Контроль правильности применения полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в аппаратуре . . . . .	224
11.6. Некоторые аспекты организации контроля параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем . . . . .	226
11.7. Пути повышения отказоустойчивости интегральных микросхем . . . . .	232
Заключение . . . . .	241
Список литературы . . . . .	249

Производственное издание

**ЧЕРНЫШЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ  
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Заведующий редакцией Ю. Н. Рыс ев  
Редактор Н. Н. Кузнецова  
Художественный редактор Н. С. Шеин  
Технический редактор И. Л. Ткаченко  
Корректор Л. А. Буданцева

**ИБ № 1461**

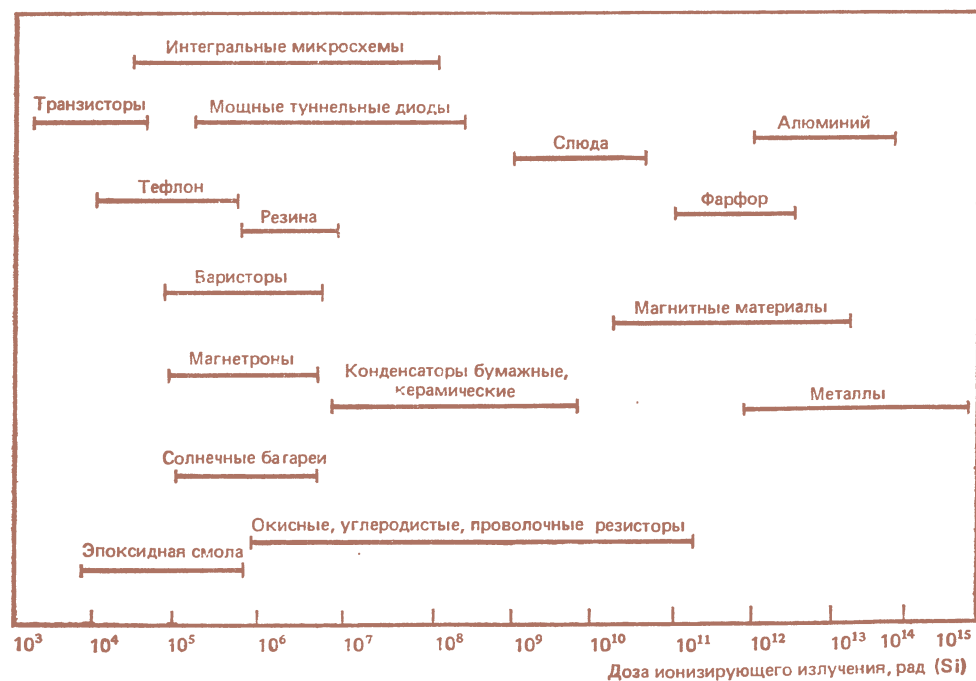
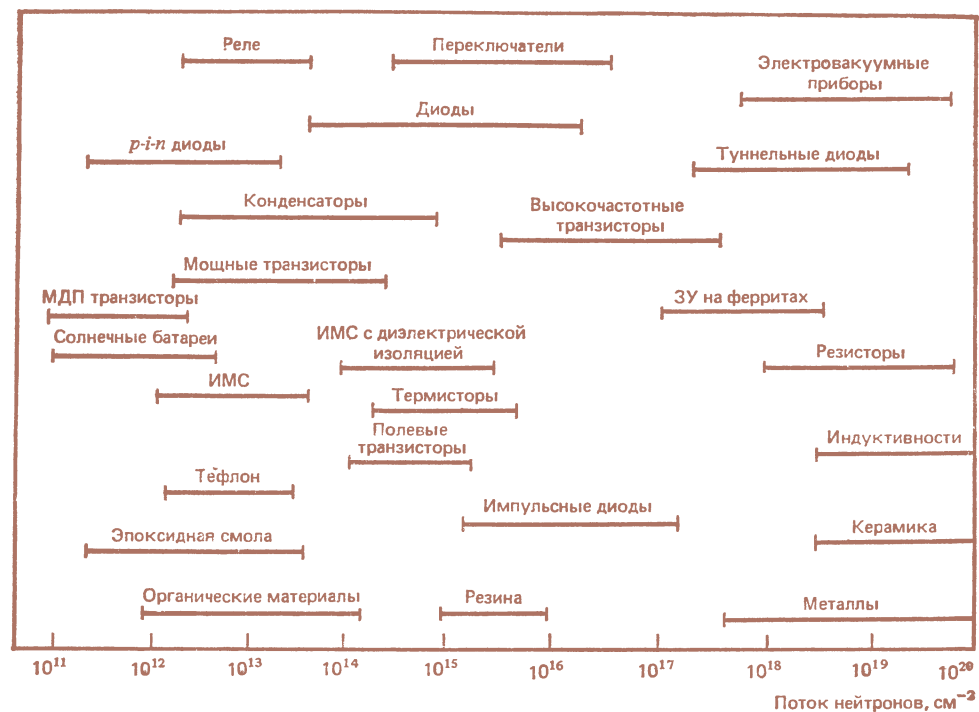
---

Сдано в набор 15.05.87	Подписано в печать 13.01.88	Т-05020
Формат 60×90/16	Бумага тип. № 2	Гарнитура литературная
Усл. печ. л. 16,0	Усл. кр.-отт. 16,25	Уч.-изд. л. 17,06
Изд. № 21684	Зак. № 103	Цена 1 р. 20 к.
Тираж 30 000 экз.		
Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 693		

---

Типография № 5 ВГО «Союзучетиздат». 101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

Радиационная стойкость материалов и приборов [16]



Интенсивность отказов ИМС памяти при нормальных условиях эксплуатации

Информационная емкость ИМС, Кбит	Интенсивность отказов, ч <sup>-1</sup>	
	перемежающихся	полных
1	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$
4	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$
16	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
64	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$

Время начала различных деградационных процессов в КМОП ИМС при импульсном облучении [70]

Процесс	Время	Мощность дозы, рад/с
“Защелкивание”	100 ... 400	$(2 \dots 4) \cdot 10^9$
Вторичный фототок	50	$(2 \dots 3) \cdot 10^9$
Разрушение	440 мкс	После “защелкивания”
Пробой входных диодов	200	$2 \cdot 10^9$

Сбои (мягкие ошибки) в статических и динамических МОП БИС ЗУ [70]

Технология	Информационная емкость, Кбит	Тип частиц	Энергия частиц, МэВ	Сечение сбоев, см <sup>2</sup> *
<i>n</i> -МОП	4	<i>p</i>	4,2	$4 \cdot 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-6}$
	16	<i>p</i>	4,2	$2 \cdot 10^{-6}$
	64	<i>n</i>	14,0	$2,5 \cdot 10^{-6}$
КМОП	1	<i>p, n</i>	50 ... 30	0
	1	Ar	210	$(3 \dots 9) \cdot 10^{-3}$
КМОП/КНС	1	<i>p, n</i>	50 ... 30	0
	4	Ar	170	$1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-6}$

\* Сечение сбоев — отношение числа сбоев к интегральному потоку частиц, их вызвавших

