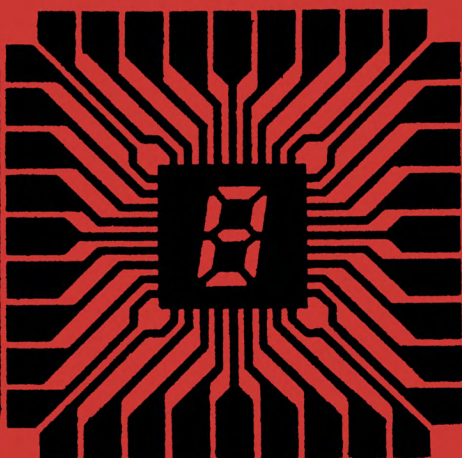




Массовая  
библиотека  
инженера

**Электроника**



Н.Ф.Ковтонюк  
Е.Н.Сальников

**Фото-  
чувствительные  
МДП-приборы  
для  
преобразования  
изображений**

**Издательство «Радио и связь»**

Н.Ф.Ковтонюк  
Е.Н.Сальников

**Фото-  
чувствительные  
МДП-приборы  
для  
преобразования  
изображений**



МОСКВА  
«РАДИО И СВЯЗЬ»  
1990



ББК 32.852  
К 56  
УДК 621.383.5

Редакционная коллегия

*С. С. Булгаков (отв. редактор), М. А. Бедревский, Ю. И. Борзаков, Г. Г. Горбунова, Л. Г. Дубицкий, В. И. Иванов, И. В. Лебедев, В. М. Ломакин, Ю. Р. Носов, Ю. Н. Рысев, В. Н. Сretenский (зам. отв. редактора), В. П. Терехов, В. Н. Уласюк, В. А. Шахнов*

Рецензенты: Ю. Р. Носов, А. В. Парфенов

Редакция литературы по электронике

**Ковтонюк Н. Ф., Сальников Е. Н.**

К 56 **Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображений.** — М.: Радио и связь, 1990.—160 с.: ил. — (Массовая библиотека инженера «Электроника»). ISBN 5-256-00735-1.

Изложены результаты исследований электронных процессов в МДП-структурах и разработки фоточувствительных приборов на их основе. Особое внимание уделено структурам из высокоомных полупроводников и преобразователям изображений на их основе. Рассмотрены вопросы технологии и конструирования преобразователей изображений на структурах с распределенными параметрами, а также матричных формирователей сигналов изображений. Приводятся сведения о характеристиках приборов и рекомендации по применению приборов в информационных системах.

Для инженерно-технических работников, занимающихся полупроводниковыми приборами и оптической обработкой информации.

К  $\frac{2302030500-023}{046(01)-90}$  85-90

ББК 32.852

Производственное издание

Массовая библиотека инженера «Электроника»

Ковтонюк Николай Филиппович,  
Сальников Евгений Николаевич

### **ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МДП-ПРИБОРЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Заведующий редакцией Ю. Н. Рысев Редактор Н. Н. Кузнецова  
Обложка художника А. С. Дзудцева. Художественный редактор Н. С. Шенин.  
Технический редактор А. Н. Золотарева. Корректор А. К. Акименкова.

**ИБ № 1793**

---

Сдано в набор 14.07.89	Подписано в печать 20.11.89		
Т-16397	Формат 60×90 <sup>1/16</sup>	Бумага тип. № 1	Гарнитура литературная
Печать высокая	Усл. печ. л. 10,0	Усл. кр.-отт. 10,25	Уч.-изд. л. 11,67
Тираж 8750 экз	Изд. № 22343	Зак. № 66	Цена 60 к.
Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693			

---

Типография издательства «Радио и связь». 101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

ISBN 5-256-00735-1

© Ковтонюк Н. Ф., Сальников Е. Н., 1990

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие оптоэлектроники и оптических средств приема, передачи и обработки изображений вызывает необходимость создания систем оптической обработки информации, элементная база которых может выполнять с изображениями функциональные преобразования в реальном масштабе времени. Наиболее существенные результаты в решении этой проблемы достигнуты с использованием фоточувствительных структур металл — диэлектрик — полупроводник (МДП). На этих структурах созданы матричные формирователи сигналов изображений, пространственно-временные модуляторы света (ПВМС), преобразователи и усилители изображений, устройства оптической памяти и др. Значительный интерес представляют МДП-структуры на основе высокоомных полупроводников для построения приборов с распределенными параметрами.

Вопросы исследования фотоэлектронных процессов в МДП-структурах и разработки на их основе различных приборов рассматривались в ряде книг (см., например, [1—6]). Развитие работ в этой области происходит очень быстро, и к настоящему времени накопилось много новых результатов, которые целесообразно обобщить в едином источнике. Данная книга посвящена такому обобщению.

Основное внимание уделяется построению приборов для преобразования и обработки информации в виде изображений, а также приборам, предназначенным для формирования сигналов изображений. Кроме МДП-структур для формирования изображений эффективно используются структуры с барьерами Шотки, SPRITE-приемники, пироэлектрические приемники и др. Для того чтобы читатель смог в целом оценить состояние разработок формирователей сигналов изображения, в книге приводится материал по упомянутым устройствам, хотя они и не относятся к классу МДП-приборов.

Первые две главы книги посвящены основным вопросам кинетики фотоэлектронных процессов в МДП-структурах, а также общим вопросам технологии изготовления МДП-структур и методам пооперационного контроля их качества. В остальных главах рассматриваются различные типы преобразователей изображений и формирователей сигналов изображений, а также радиоэлектронные устройства на их основе.

## Глава 1

### ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МДП-ПРИБОРОВ

#### 1.1. КИНЕТИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МДП-СТРУКТУРАХ ИЗ ВЫСОКООМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Структура металл — диэлектрик — полупроводник представляет собой конденсатор, одной из обкладок которого служит металлический электрод, а другой — полупроводник.

При приложении к структуре электрического напряжения равновесные носители заряда отводятся полем из объема полупроводника к его поверхности и там накапливаются, экранируя объем полупроводника, что приводит к образованию области пространственного заряда (ОПЗ) и изгибу энергетических уровней. Если к металлическому электроду приложить потенциал одной полярности с основными носителями полупроводника, то в его приповерхностной области образуется обедненный слой. Компенсация заряда металлического электрода для полупроводника  $p$ -типа осуществляется отрицательными зарядами акцепторов. С ростом напряжения в компенсации заряда принимают участие не только ионизированные примеси, но и образованные в области обеднения неосновные носители (электроны), которые перемещаются к границе раздела диэлектрик — полупроводник (Д—П), собираясь в инверсионном слое. В результате образования инверсионного слоя концентрация носителей заряда становится достаточной для возникновения поверхностной электропроводности (эффект поля).

Поверхностная концентрация носителей на границе раздела Д—П определяется из выражения, вытекающего из статистики Максвелла:

$$n_s = n_0 \exp(+q\phi_s/kT) = n_i \exp(+q\psi_s/kT), \quad (1.1)$$

где  $n_0$  — равновесная концентрация электронов в объеме полупроводника;  $n_i$  — собственная концентрация носителей в полупроводнике;  $\phi_s$  — поверхностный потенциал;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура;  $q$  — заряд электрона;  $\psi_s$  — электростатический потенциал.

Решив уравнение Пуассона, можно определить плотность заряда в инверсионном слое [1]:

$$\rho_s = \frac{-q \epsilon_0 \epsilon_{II} E_s^2}{2 kT} \cdot \frac{1}{\left[ \frac{q E_s x}{2 kT} + 1 \right]^2}, \quad (1.2)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\epsilon_n$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $E_s$  — напряженность поля на границе раздела Д—П.

Из выражения (1.2) определяется поверхностная концентрация носителей ( $x=0$ ), а толщина инверсионного слоя является параметром длины затухания поля:

$$n_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_n E_s^2}{2 k T}; \quad (1.3)$$

$$L_s = \frac{k T}{q E_s}. \quad (1.4)$$

В состоянии равновесия при наличии внешнего поля концентрация носителей и толщина инверсионного слоя не зависят от механизма образования свободных зарядов и примесного состава полупроводника.

Однако выражения (1.3) и (1.4) справедливы при напряженности поля  $E_s < (2\epsilon_0 \epsilon_n k T N_c)^{1/2}$ , где  $N_c$  — плотность состояний в области проводимости. При больших значениях напряженности поля распределение Максвелла необходимо заменять распределением Ферми и уравнение (1.1) приобретает более сложный вид.

Из выражения (1.4) получаем, что при  $T=300$  К и  $E_s=10^5$  В/см толщина инверсионного слоя  $L_s \approx 10^{-6}$  см, т. е. весьма мала, и поэтому при образовании инверсионных слоев толщина ОПЗ определяется в основном слоем обеднения.

В отличие от обычного конденсатора, емкость МДП-структур определяется не только геометрическими размерами структуры, толщиной диэлектрика и его диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_d$ , но и емкостью ОПЗ, емкостью и сопротивлением, связанными с состоянием границы раздела Д—П. На рис. 1.1 представлена эквивалентная схема структуры в состоянии обеднения [2].

Простейший анализ рассматривает емкость МДП-структуры как две последовательно соединенные емкости диэлектрика и обедненного слоя.

В момент включения напряжение распределяется в соответствии с геометрическими емкостями слоев. В случае симметричной структуры МДПДМ расчет разности потенциалов на слоях и поля в них проводится с помощью выражений:

$$U_0 = E_n L_n + 2 E_d^r L_d; \quad (1.5)$$

$$\epsilon_0 \epsilon_n E = -q N_s + \epsilon_0 \epsilon_d E_d, \quad (1.6)$$

где  $N_s$  — поверхностная плотность зарядов.

Если начальная концентрация носителей  $n_0$  в полупроводнике недостаточна для экранирования приложенного напряжения, то в объеме полупроводника возникает обедненный слой толщиной  $L_{об}$ :

$$L_{об} = \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon_n U_0}{q n_0} \right)^{1/2}. \quad (1.7)$$

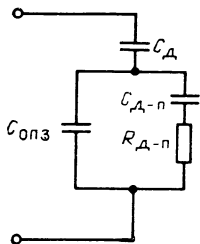


Рис. 1.1. Эквивалентная схема МДП-структуры:

$C_{\text{опз}}$  — емкость области пространственного заряда полупроводника;  $C_{\text{д-п}}$  и  $R_{\text{д-п}}$  — емкость и сопротивление, обусловленные электронными состояниями границы раздела диэлектрик — полупроводник,  $C_{\text{д}}$  — емкость диэлектрика

Если обедненная область распространяется на всю толщину полупроводника  $L_{\text{об}} > L_{\text{п}}$  (высокоомный кристалл), то приложенное к структуре напряжение практически распределяется на полупроводнике  $U_0 = U_{\text{п}}$ . В этом случае процесс зарядки емкости диэлектрика  $C_{\text{д}}$  происходит через сопротивление полупроводника, которое определяется скоростью межзонной генерации электронно-дырочных пар. То есть в результате нарушения генерационно-рекомбинационного равновесия в системе протекает генерационный ток до тех пор, пока напряженность поля в полупроводнике не станет равной нулю, в результате чего установится равновесное распределение носителей в объеме.

Для высокоомных полупроводников скорость изменения числа носителей заряда в приповерхностной области определяется из уравнения непрерывности, которое без учета диффузии, рекомбинации и объема заряда принимает вид

$$\frac{dn}{dt} = G_0 - \frac{n}{t_{\text{др}}}, \quad (1.8)$$

где  $G_0 = n_0/\tau$  — скорость термогенерации;  $\tau$  — время жизни носителей;  $t_{\text{др}} = L_{\text{п}}/\mu E$  — время дрейфа носителей через кристалл;  $\mu$  — подвижность носителей.

Используя соотношения (1.5), (1.6) и (1.8), можно определять временные зависимости поля в полупроводнике  $E(t)$  и плотности поверхностного заряда  $\sigma(t)$  из системы уравнений:

$$\left\{ \frac{1}{\mu} \frac{d\sigma}{dt} = q G_0 - \frac{\sigma E_{\text{п}}}{L_{\text{п}}}; \quad (1.9) \right.$$

$$\left. \beta \frac{dE_{\text{п}}}{dt} = \gamma \frac{dU_0}{dt} - \sigma E_{\text{п}}, \quad (1.10) \right.$$

где  $\beta = \epsilon_0 \epsilon_{\text{п}} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{д}} L_{\text{п}}}{2 L_{\text{д}}}$ ;

$$\gamma = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{д}}}{2 L_{\text{д}}} - C_0;$$

$C_0$  — начальная емкость структуры.

В зависимости от напряженности поля  $E$  в полупроводнике имеются два характерных участка экранирования:

$$E_{\text{п}} > E_{\text{нас}} \text{ и } E_{\text{п}} < E_{\text{нас}},$$

где  $E_{\text{нас}}$  — напряженность поля, выше которой дрейфовая скорость остается постоянной ( $U_{\text{др}} = L_{\text{п}}/t_{\text{др}} = \text{const}$ ). То есть при  $E_{\text{п}} > E_{\text{нас}}$  устанавливается стационарный режим ( $dn/dt = 0$ ). Тогда

из уравнения (1.8) концентрация носителей в полупроводнике равна

$$n_{ст} = G_0 t_{др} \quad (1.11)$$

и уравнение (1.10) примет вид

$$\beta \frac{dE_{п}}{dt} = -q G_0 L_{п}, \quad (1.12)$$

откуда

$$E_{п}(t) = E_0 - \frac{q G_0 L_{п} t}{\beta}, \quad (1.13)$$

где  $E_0$  — напряженность поля в полупроводнике в начальный момент времени.

Таким образом, в интервале полей  $E_{п} > E_{нас}$  поле в объеме полупроводника линейно уменьшается со временем.

При  $E_{п} < E_{нас}$  поле в полупроводнике изменяется во времени в соответствии с выражением [1]:

$$E_{п}(t) = \frac{E_0}{C} \sqrt{\frac{B}{2\pi}} \exp\left[-\frac{Bt^2}{2}\right], \quad (1.14)$$

где  $C = \frac{\mu E_0}{L_{п}} + \frac{\sigma_{ст}}{\beta}$ ;  $B = \frac{q \mu G_0}{\beta}$  — приведенные коэффициенты.

Из выражений (1.13) и (1.14) видно, что вначале поле уменьшается со временем линейно, а затем при  $t = \beta E_0 / (q G_0 L_{п})$  — по закону  $\exp(-Bt^2/2)$ . Для реальных примесных полупроводников момент затухания поля по экспоненциальному закону соответствует условию  $L_{об} = L_{п}$ .

Таким образом, в нестационарном режиме работы в МДП-структурах возникают переходные процессы, характеризующиеся высокоомным состоянием полупроводника. Это обстоятельство позволяет создавать ПВМС типа МДП-электрооптический материал (МДП—ЭОМ), работающие в динамическом режиме и позволяющие проводить оптическую обработку информации в реальном масштабе времени.

## 1.2. КЛАССИЧЕСКИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МДП-ПРИБОРЫ

Описанный выше эффект поля — управление поверхностной проводимостью под действием внешнего поля — используется в МДП-фоторезисторах и МДП-фототранзисторах, в которых поверхностная проводимость модулируется под влиянием освещения (фотопроводимость) [2]. В МДП-фототранзисторах используется увеличение поверхностной фотопроводимости только инверсионных слоев — канала между истоком и стоком, который отпирается при подаче напряжения на затвор. В МДП-фоторезисторах используется увеличение фотопроводимости приповерхностных слоев любого типа (обогащения, обеднения или инверсии), причем фотопроводимость ОПЗ может суммироваться с объемной фотопро-



водимостью. Вместо управляющего электрода тип проводимости может задаваться значением и знаком встроенного заряда в диэлектрике.

**Фотоконденсаторы на МДП-структурах.** По способу регистрации сигнала МДП-фотоконденсаторы делятся на три группы: непосредственная регистрация изменения емкости при освещении (фотоварикапы), измерение конденсаторной фотоЭДС и регистрация тока дозарядки емкости структуры [7].

В основе работы фотоварикапов лежит эффект изменения емкости структуры под действием света. Причиной изменения емкости является уменьшение ширины ОПЗ за счет увеличения числа носителей заряда при освещении.

Максимальная емкость структуры определяется емкостью диэлектрика  $C_d = \epsilon_0 \epsilon_d / L_d$ , а минимальная — емкостью ОПЗ  $C_{опз} = \epsilon_0 \epsilon_{опз} / L_{опз}$  [1, 2]. Фоточувствительность варикапов повышается при увеличении коэффициента перекрытия  $K = C_d / C_{опз}$ , т. е. при уменьшении толщины диэлектрика, при которой токи утечки пренебрежимо малы.

**Режим измерения конденсаторной фотоЭДС.** Рассмотрим МДП-конденсатор, который заряжен до напряжения такого уровня и знака, что поверхность полупроводника находится в состоянии слабой инверсии. При освещении конденсатора со стороны прозрачного электрода светом из области собственного поглощения полупроводника емкость МДП-структуры изменяется. В режиме холостого хода заряд конденсатора остается неизменным и освещение приводит к изменению напряжения на электродах МДП-структуры.

Оценим конденсаторную фотоЭДС. Пусть напряжение на обкладках МДП-конденсатора  $U_g$ , тогда

$$U_g = \frac{Q}{C_d} + \Phi_s, \quad (1.15)$$

где  $Q$  — заряд МДП-конденсатора. Поскольку

$$Q = qNL_{опз} + Q_p, \quad (1.16)$$

где  $N$  — концентрация легирующей примеси в полупроводнике;  $Q_p$  — заряд неосновных носителей, то

$$\Phi_s = - \frac{qN}{2\epsilon_0\epsilon_{п}}. \quad (1.17)$$

Так как в режиме холостого хода заряд системы остается постоянным, т. е.  $\Delta Q = 0$ , то

$$\Delta U_g = \Delta \Phi_s = - \frac{qNL_{опз}}{\epsilon_0\epsilon_{п}} \Delta L_{опз} \quad (1.18)$$

и конденсаторная фотоЭДС для длительностей импульса освещения  $t \ll \tau$  ( $\tau$  — время жизни неосновных носителей) равна

$$\Delta U_g = \frac{q \Delta Q_p L_{опз}}{\epsilon_0 \epsilon_{п}} = \frac{q I t}{C_{опз}}, \quad (1.19)$$

где  $I$  — поток электронно-дырочных пар, создаваемых в объеме полупроводника светом в единицу времени;  $t$  — время действия импульса освещения.

Из соотношения (1.19) видно, что для повышения чувствительности МДП-фотоприемника в режиме измерения конденсаторной фотоЭДС следует уменьшать емкость слоя ОПЗ, что можно достигнуть повышением напряжения смещения и применением полупроводника с возможно более низким уровнем легирования. Для устранения эффектов насыщения при высоких уровнях освещенности следует максимально увеличивать емкость диэлектрика, поскольку максимальная емкость структуры равна  $C_d$ . Обнаружительная способность в МДП-фотоприемниках в режиме измерения конденсаторной фотоЭДС достигает  $D^* = 10^{13} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{ см}$ , что сопоставимо с  $D^*$  лучших современных кремниевых приемников других типов. Однако в работе МДП-фотоприемников, работающих в таком режиме, имеется существенный недостаток — низкое быстродействие  $\epsilon \geq 10^{-3} \text{ с}$ . Это связано с тем, что режим работы является интегрирующим  $\Delta U_g \sim t$ , в то же время обеспечение режима холостого хода требует применения максимально высокого сопротивления нагрузки во входной цепи усилителя, что ограничивает быстродействие величиной  $RC$ .

**Режим регистрации тока дозарядки.** В этом режиме напряжение на МДП-конденсаторе определяется внешним источником, а изменение под действием света емкости МДП-структуры вызывает протекание тока дозарядки через сопротивление нагрузки. Поскольку емкость МДП-структуры в этом режиме включена последовательно с сопротивлением нагрузки, то она ограничивает полосу частот регистрируемых сигналов снизу и быстродействие МДП-фотоприемника значительно выше, чем в предыдущем случае.

Главным преимуществом режима регистрации тока дозарядки является возможность усиления фотосигнала, обладающего эффектом самостабилизации.

При приложении к МДП-структуре переменного во времени смещения  $U_g(t)$  плотность тока через диэлектрик (ток смещения определяется хорошо известным выражением) определяется из уравнения

$$j = j_{\text{см}} = \frac{\epsilon_d \epsilon_0}{L_d} \frac{dU_d}{dt} = \frac{dQ}{dt}, \quad (1.20)$$

где  $U_d = Q/C_d$  — падение напряжения на диэлектрике. Используя (1.15), получаем

$$j = C_d \left( \frac{dU_d}{dt} - \frac{d\varphi_s}{dt} \right). \quad (1.21)$$

Если поверхностный потенциал достигает напряжения лавинного пробоя в полупроводнике

$$\varphi_{s \text{ пр}} \approx 60 \left( \frac{E_g}{1,1} \right)^{3/2} \left( \frac{N}{10^{16}} \right)^{-3/4},$$

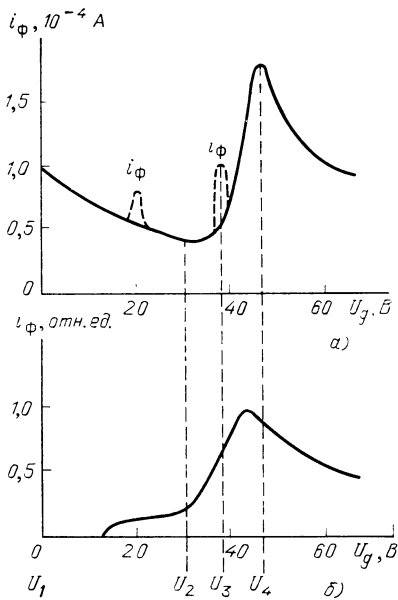


Рис. 1.2. Зависимости тока дозарядки МДП-структуры (а) и амплитуды фототока (б) от приложенного напряжения

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны, эВ;  $N$  — в  $\text{см}^{-3}$ , то неосновные носители, появляющиеся в процессе ударной ионизации, приводят к дополнительной экранировке внешнего поля  $dQ_p/dt = j_{\text{лав}}(t)$ , где  $j_{\text{лав}}(t)$  — плотность лавинного тока. При достижении условия  $Q_p \geq qNL_{\text{опз}}$  поверхностный потенциал практически перестает зависеть от внешнего смещения, а значит, и от времени:  $d\phi_s/dt = 0$ .

Тогда из (1.20) и (1.21) при линейно меняющемся напряжении  $U_g = at$  получим

$$j = C_d \alpha = j_{\text{лав}} \quad (1.22)$$

Последнее означает, что лавинный ток не зависит от внешнего смещения, это выгодно отличает МДП-фотоприемники от традиционных лавинных фотодиодов. Интересной особенностью режима лавинного умножения в МДП-структурах является подавление микроплазм — областей с существенно большей, чем в среднем по площади, скоростью ударной ионизации. Такое подавление обусловлено тем, что любое превышение средней скорости лавинной генерации носителей заряда в какой-либо локальной области МДП-структуры приводит к большей экранировке электрического поля в этой области и подавляет генерацию. Такой механизм отрицательной обратной связи приводит к устойчивому лавинному процессу.

Экспериментальные данные режима регистрации тока дозарядки приведены на рис. 1.2. Участок  $U_2 - U_1$  соответствует росту толщины области обеднения у поверхности полупроводника, участок  $U_3 - U_2$  — лавинному умножению фотоносителей и образованию инверсионного слоя. Чувствительность максимальна в узком интервале импульса напряжения смещения, соответствующем процессу лавинного нарастания тока.

Время высокой фоточувствительности определяется временем накопления заряда неосновных носителей, сравнимого с зарядом области обеднения, и по порядку величины равно

$$t_n \approx \frac{\Phi_s \text{ пр}}{\alpha} \cdot \frac{C_{\text{опз пр}}}{C_d} \quad (1.23)$$

где  $C_{\text{опз пр}}$  — емкость слоя ОПЗ при  $\phi_s = \phi_s \text{ пр}$ . При  $L_d = 10^{-5}$  см

$N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $\alpha = 10^5 \text{ В/с}$ ,  $t_n \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ , что в несколько раз меньше полной длительности импульса напряжения  $t_n$ :

$$\frac{t_n}{t_n} \approx \frac{C_{\text{ОПЗ пр}}/C_d}{1 + C_{\text{ОПЗ пр}}/C_d} \approx \frac{C_{\text{ОПЗ пр}}}{C_d}, \quad (1.24)$$

так как  $C_{\text{ОПЗ пр}}/C_d \ll 1$ .

Таким образом, режим регистрации тока дозарядки является импульсным, и так как большую часть времени импульса смещения фотоприемник обладает низкой чувствительностью, то оптический сигнал и импульс развертки напряжения необходимо синхронизировать.

### 1.3. ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МДП-СТРУКТУРЫ СО СКВОЗНЫМ ТОКОМ

Необходимым условием функционирования рассмотренных выше фоточувствительных МДП-приборов является отсутствие сквозного тока через диэлектрик.

Наличие сквозного тока коренным образом изменяет свойства МДП-структур и приводит к новым фотоэлектрическим эффектам, связанным с неравновесным состоянием приповерхностной области полупроводника, позволяющим создавать новые типы фотоприемников.

**Режим неравновесного обеднения в МДП-диодах.** В отличие от МДП-структур без токов утечки, в МДП-диодах наличие оттока неосновных носителей заряда через диэлектрик препятствует образованию инверсионного слоя (рис. 1.3). Это приводит к образованию стационарного состояния в приповерхностной области, характеризующегося равенством потока неосновных носителей заряда к поверхности, формирующего инверсионный слой, и потока утечки через диэлектрик, разрушающего инверсионный слой. То есть наступает неравновесное обеднение — при данном уровне поверхностного потенциала поверхностная концентрация неосновных носителей заряда в МДП-диоде существенно меньше, чем в классической МДП-структуре. Когда механизмом тока утечки через диэлектрик является туннелирование дырок из полупроводника в металл, поверхностная концентрация дырок определяется из выражения

$$p_s = \frac{I + I_{\text{диф}}}{v_{\text{диф}}(1 + I_{\text{тун}}^0/I_{\text{диф}})} \exp(-Y_s), \quad (1.25)$$

где  $I$  — поток электронно-дырочных пар, генерированных светом в ОПЗ в единицу времени; диффузионный поток  $I_{\text{диф}} = p_0 v_{\text{диф}}$ ;  $v_{\text{диф}} = D_p/L_p$ ;  $D_p$  — коэффициент диффузии;  $L_p$  — диффузионная длина дырок;  $I_{\text{тун}}^0 = 1/4 \bar{D}_p v_p p_0 \exp(-Y_s)$  — туннельный поток дырок через диэлектрик, соответствующий равновесной их концентрации для данного поверхностного потенциала  $\varphi_s = Y_s kT/q$  ( $\bar{D}_p$  — проницаемость туннельного барьера;  $v_p$  — тепловая скорость дырок);  $Y_s$  — безразмерный электростатический потенциал.

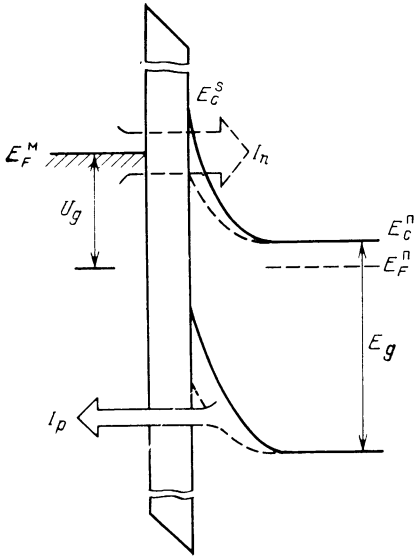


Рис. 1.3. Зонная диаграмма МДП-диода с тонким диэлектриком: — — — положение краев зон полупроводника при освещении,  $I_n$  — ток основных носителей,  $I_p$  — ток неосновных носителей;  $E_F^M$  — уровень Ферми в металле,  $E_C^П$  — энергия зоны проводимости полупроводника,  $E_F^П$  — уровень Ферми в полупроводнике,  $U_g$  — напряжение, приложенное к металлическому затвору

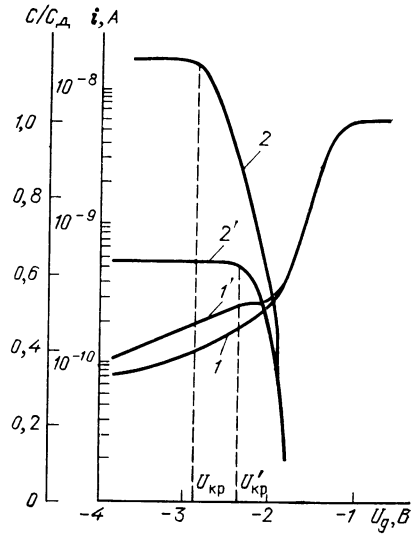


Рис. 1.4. Вольт-фарадные характеристики ( $I, I'$ ) и обратные ветви ( $2, 2'$ ) вольт-амперных характеристик МДП-диодов:

$1, 2$  — в темноте,  $1', 2'$  — при освещении монохроматическим светом  $\lambda = 0,93$  мкм

Из (1.25) видно, что при низких проникаемостях барьера  $\bar{D}_p \rightarrow 0$  в отсутствие освещения  $p_s = p_0 \exp(-Y_s)$ , т. е. поверхностная концентрация дырок растет с увеличением поверхностного потенциала, как в классических МДП-структурах. При заданном значении  $\bar{D}_p$  с ростом  $Y_s$ , определяемом смещением на затворе, наступает ситуация, когда поверхностная концентрация носителей не зависит от  $Y_s$ . Условие насыщения определяется выражением

$$\frac{1}{4} \frac{v_p}{v_{\text{диф}}} \bar{D}_p \exp(-Y_s) \gg 1. \quad (1.26)$$

В результате уравнение (1.25) принимает вид

$$p_s = \frac{I}{0,25 v_p \bar{D}_p} + \frac{v_{\text{диф}} p_0}{0,25 v_p \bar{D}_p}. \quad (1.27)$$

Дальнейшее увеличение напряжения на затворе не вызывает увеличения заряда инверсионного слоя, а следовательно, и увеличения экранирования внешнего поля и приводит к распространению ОПЗ в объем полупроводника. Таким образом, зависимость емкости МДП-диода от смещения в режиме неравновесного обеднения определяется ростом ширины ОПЗ с напряжением на за-

творе  $U_g$ . Ток дырок также не зависит от напряжения на затворе и определяется процессами тепловой, а в случае освещения — световой генераций (эффект накопления).

На рис. 1.4 приведены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) и обратные ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) МДП-диодов, иллюстрирующие особенности режима неравновесного обеднения. Из рисунка видно, что до некоторого напряжения  $U_g = U_{кр}$  зависимости емкости от напряжения аналогичны наблюдаемым в МДП-конденсаторах. Однако при  $U_g > U_{кр}$  насыщение на кривой  $C(U_g)$  не наблюдается — образуется слой неравновесного обеднения. При освещении структур (кривая  $I'$ ) увеличение скорости генерации неосновных носителей приводит к образованию инверсионного слоя и насыщенного  $C(U_g)$ , а неравновесное обеднение наступает при более высоких напряжениях смещения. Характерной особенностью приведенных зависимостей является совпадение напряжений, при которых наблюдаются неравновесное обеднение и насыщение обратного тока ВАХ. Обратные ветви ВАХ, так же как и ВФХ, состоят из двух участков. На начальном участке практически все приложенное напряжение падает на диэлектрике и ток через структуру ограничивается током утечки через диэлектрик. На участке насыщения ( $U_g > U_{кр}$ ) приложенное напряжение падает на ОПЗ и ток ограничивается подтоком носителей к поверхности полупроводника.

Вышеизложенное рассмотрение справедливо, если начальный поверхностный изгиб зон  $\varphi_s^0$  соответствует сильному обеднению и ток основных носителей зарядов пренебрежительно мал — он пропорционален  $\exp(-\varphi_s^0)$ .

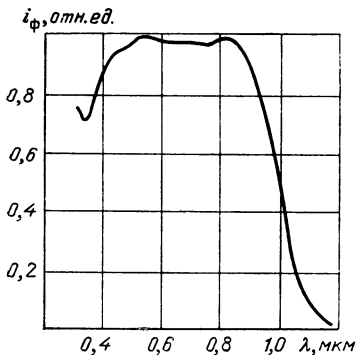
Фоточувствительные МДП-диоды с начальным изгибом зон, соответствующим сильному обеднению, называются диодами на неосновных носителях заряда.

В зависимости от толщины диэлектрика в некотором интервале обратных смещений фоточувствительность МДП-диодов на неосновных носителях заряда не уступает фотодиодам с  $p$ - $n$ -переходом или барьером Шотки. Как и в барьерах Шотки, в МДП-диодах пространственное совмещение областей разделения фотоносителей и поверхностной рекомбинации приводит к расширению диапазона фоточувствительности в коротковолновую область спектра.

На рис. 1.5 показана зависимость фотоотклика МДП-диода на основе кремния от длины волны света [8], из которой видно, что, в отличие от традиционных кремниевых фотодиодов с  $p$ - $n$  переходами, область спектральной чувствительности охватывает диапазон до 0,3 мкм при квантовой эффективности не менее 0,7.

Из-за простоты конструкции МДП-диоды более технологичны по сравнению с гомо- $p$ - $n$ -переходами, в которых для подавления поверхностной рекомбинации приходится идти на ряд технологических ухищрений.

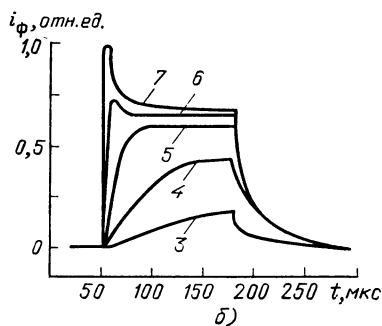
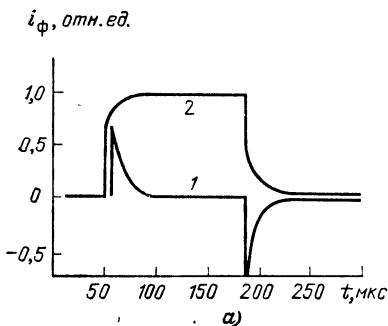
Плотность темнового тока  $j_t$  в режиме неравновесного обеднения, определяющая их пороговую фоточувствительность, соответствует величинам, полученным



←  
Рис. 1.5. Зависимость фотоотклика кремниевого МДП-диода от длины волны света

Рис. 1.6. Кинетика фотоотклика МДП-диода из GaAs на неосновных носителях заряда (а) и из Si на основных носителях заряда (б) при освещении прямоугольным импульсом света  $\lambda=0,93$  мкм:

1 — обратное смещение  $U_g=0$ ; 2 —  $U_g=$   
 $=3,6$  В, 3... 7 — осциллограммы фотоотклика при возрастании интенсивности засветки от 3 к 7



на лучших диодах с  $p$ - $n$ -переходами,  $j_T=5 \cdot 10^{-11}$  А·см $^{-2}$  при напряжениях смещения 10 В [9]. Кинетика фотоответа МДП-диодов на неосновных носителях заряда исследуется в работах [10—12]. Постоянная времени фотоотклика определяется теми же факторами, что и в  $p$ - $n$ -переходах (пролет ОПЗ, диффузия,  $RC$ ), что подтверждается рис. 1.6 (кривая 2) [12], из которого видно, что при напряжении на затворе, соответствующем неравновесному обеднению, имеет место неискаженная передача импульса света с длительностью фронтов не менее 50 мкс. В отсутствие обратного смещения, когда ток утечки через диэлектрик мал и уже нельзя пренебречь рекомбинационным током, как и в классических МДП-структурах, наблюдается дифференцирование импульса фототока (рис. 1.6, а, кривая 1).

При  $C_d/C_{опз} \gg 1$  емкость структуры определяется емкостью ОПЗ, а последняя может быть сделана в структурах с низким уровнем легирования достаточно малой. Это означает, что быстродействие МДП-диодов может не уступать фотодиодам с  $p$ - $n$ -переходом.

**Фоточувствительные МДП-диоды на основных носителях заряда.** Если при некотором напряжении обратного смещения уровень Ферми в металле  $E_F^M$  поднимется над краем зоны проводимости на поверхности полупроводника  $E_c^s$ , то плотность туннельного тока основных носителей заряда  $j_n$  превысит  $j_p$ , что может привести к эффекту внутреннего усиления фотосигнала. Коэффициент усиления определяется из выражения [13]

$$M = 1 + \frac{v_n \bar{D}_n}{v_p \bar{D}_p} N_c \frac{q^2}{kT} \frac{\epsilon_{п}}{\epsilon_0 \epsilon_d} L_d^2, \quad (1.28)$$

где  $N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости полупроводника.

Для кремниевых МДП-диодов при  $\bar{D}_n = \bar{D}_p = 10^{-13}$ ,  $L_d = 2 \cdot 10^{-7}$  см коэффициент усиления  $M \approx 100$  [13].

Важно отметить, что реализация режима неравновесного обеднения — необходимое, но недостаточное условие для эффекта усиления. Так, если при нулевом внешнем смещении начальный изгиб зон  $\varphi_s^0$  соответствует сильному обеднению, то режим неравновесного обеднения при достаточно большом внешнем смещении получить в принципе можно, но насыщение концентрации неосновных носителей заряда  $p_s$  может произойти до того, как выполнится условие  $E_{F^m} = E_{c^s} (j_n \geq j_p)$ . Дальнейшее увеличение напряжения на затворе приведет лишь к росту  $\varphi_s$ , т. е. падение напряжения на диэлектрике изменяться не будет. Уровень Ферми в металле  $E_{F^m}$  и край зоны проводимости на поверхности полупроводника  $E_{c^s}$  будут смещаться совместно, и усиления получить нельзя. В случае слабого обеднения и обогащающего изгиба зон реализация эффекта усиления более вероятна.

В отличие от режима лавинного умножения, коэффициент усиления фототока не зависит от внешнего смещения.

Кинетика фототока в МДП-диодах с усилением фототока существенно отличается от кинетики, наблюдаемой в структурах на неосновных носителях. Из принципа работы МДП-диода следует, что необходимым условием для усиления фототока является перераспределение под действием света внешнего напряжения между полупроводником и диэлектриком, приводящее к росту напряжения на диэлектрике. Это перераспределение становится существенным, когда накопленный заряд неосновных носителей  $Q_p$ , генерированных светом, становится сравним с зарядом слоя обеднения  $qNL_{об}$ . Для данного светового потока время накопления заряда

$$t_n = \frac{NL_{об}}{I} . \quad (1.29)$$

Для характерных значений  $N \approx 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $L_{об} \approx 1$  мкм ( $U \approx 10$  В),  $t_n = 1$  с при световых потоках  $I \approx 10^{12}$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ . Зависимость постоянной времени фототока  $\tau$  от интенсивности освещения отличает кинетику фототока МДП-диодов с усилением на основных носителях от кинетики фототока МДП-диодов на неосновных носителях. С ростом интенсивности освещения наблюдается уменьшение  $\tau$ . (При  $I \approx 10^{15}$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$   $\tau$  составляет  $5 \cdot 10^{-2}$  с.)

**Фотопереключатели.** Работу МДП-переключателя (МДП- $n-p^+$ , рис. 1.7) можно представить следующим образом [14]:

а) начальное состояние с высоким сопротивлением соответствует режиму неравновесного обеднения приповерхностной области, так как образованию инверсионного слоя препятствует ток утечки через диэлектрик. Ток в этом состоянии — это ток термогенерации в ОПЗ; практически все внешнее приложенное напря-



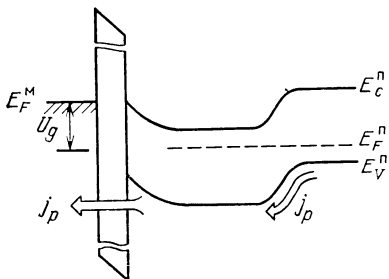


Рис. 1.7. Зонная диаграмма МДП-переклювателя

ласть обеднения соприкасается с областью  $n-p^+$ -перехода. Дальнейшее увеличение  $U_{\text{пор}}$  смещает  $n-p^+$ -переход в прямом направлении. Инжектированные из  $n-p^+$ -перехода неосновные носители — дырки — накапливаются у поверхности полупроводника, создавая перераспределение напряжения и увеличение электрического поля в диэлектрике, что вызывает инжекцию электронов из металла в полупроводник. Ток электронов проходит через  $n-p^+$ -переход, увеличивая инжекцию дырок. Таким образом замыкается внутренняя цепь положительной обратной связи по току, приводя к переключению МДП-диода.

С этой точки зрения снижение  $U_{\text{пор}}$  при инжекции дырок из базового электрода или за счет световой генерации связано с уменьшением тока инжекции  $n-p^+$ -перехода, необходимого для переключения. На этом эффекте основано практическое применение МДП-переклювателей.

В цифровых оптических линиях связи фотоприемные устройства представляют собой фотоприемник (фотодиод или фотосопротивление), сопряженный, как правило, с быстродействующим усилителем-ограничителем. МДП-переклюватели позволяют совмещать в одном элементе оптический детектор и пороговый переключатель. МДП-переклюватель может быть использован в цифровых оптических системах со скоростью передачи информации 2 Мбит/с и вероятностью ошибки  $10^{-9}$  на бит; при этом время выключения составляет менее  $2,5 \cdot 10^{-7}$  с, время включения меньше  $10^{-7}$  с, требуемый уровень оптической мощности 3,5 мВт.

При использовании МДП-переклювателя в качестве элемента памяти с оптическим управлением достигается более высокое быстродействие (цикл запись — считывание  $\tau \approx 10^{-7}$  с) и стабильность при многократных переключениях (частота 200 кГц, время работы — более 100 ч).

#### 1.4. ЛАВИННЫЕ МДП-ФОТОДИОДЫ

Как отмечалось в § 1.2, особенностью процесса лавинного умножения фотоносителей в приповерхностной области МДП-конденсатора является подавление микроплазм, приводящее к устойчивому лавинному процессу. Такой эффект может быть реализован и в лавинном МДП-диоде [15], т. е. возможна ситуация, когда при достижении режима неравновесного обеднения поверх-

жение падает на приповерхностном слое ОПЗ;

б) конечное состояние с низким сопротивлением — это состояние с инверсионным слоем у поверхности (режим ограничения тока диэлектриком), поддерживаемое инжекцией неосновных носителей из  $n-p^+$ -перехода;

в) переключение из начального в конечное состояние происходит при пороговом напряжении  $U_{\text{пор}}$ , когда поверхностная об-

ностный потенциал в МДП-диоде достигает напряжения лавинного пробоя. При этом, с одной стороны, возникающие в процессе ударной ионизации носители экранируют внешнее поле и препятствуют флуктуациям в нем по площади структуры (устраняют микроплазмы), а с другой — ток утечки разрушает образующийся за счет накопления носителей заряда инверсионный слой. Динамическое равновесие процессов накопления и утечки поверхностного заряда может при определенных условиях обеспечить стационарный процесс лавинного умножения фототока.

Для снижения напряжения лавинного пробоя приповерхностная область кремниевого лавинного МДП-фотодиода легируется до более высокого уровня, чем объем (отношение концентраций  $10^3$ ), и при достижении напряжения лавинного пробоя ОПЗ охватывает всю толщину подложки. В результате достигаются низкие рабочие смещения  $U \approx 10$  В и высокое быстродействие, ограниченное  $RC \sim 10^{-8}$  с приемника площадью  $1 \text{ см}^2$ .

Приведенные на рис. 1.8 данные позволяют оценить пороговую чувствительность МДП-лавинного диода в предположении, что шум определяется только дробовым шумом темнового тока [16]:

$$P_{\text{пор}} = \frac{(2qI_T)^{1/2}}{S_i}, \quad (1.30)$$

где  $I_T$  — значение темнового тока утечки;  $S_i$  — ампер-ваттная чувствительность. Оценка дает  $P_{\text{пор}} = 10^{-13}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ .

В лавинных МДП-диодах наблюдается и управляемый светом эффект переключения, подобный описанному в § 1.3 для структур МДП с  $p$ - $n$ -переходом. Освещение при определенном обратном смещении вызывает переключение структуры в состояние с высокой проводимостью, которое сохраняется после выключения освещения. Суть эффекта состоит в том, что ударная ионизация горячими электронами, инжектированными из металла в полупроводник, обеспечивает положительную обратную связь, поставляя необходимое количество основных носителей заряда к поверхности для сохранения структуры в инвертированном состоянии с высокой проводимостью, то есть инжекция из  $p$ - $n$ -перехода в МДП- $p$ - $n$ -переключателях заменяется инжекцией за счет лавинного умножения. Удельная оптическая мощность, необходимая для переключения, составляет в эксперименте около  $10^{-6}$  Вт/см $^2$  при напряжении на затворе  $U_g = 3$  В.

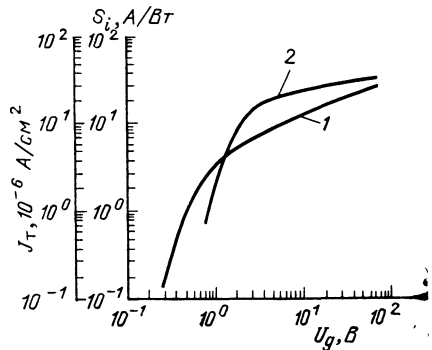


Рис. 1.8. Зависимость фото чувствительности  $S_i$  и плотности темнового тока  $J_T$  МДП-диода с лавинным размножением фотоносителей от напряжения на затворе  $U_g$ : 1 — темновой ток, 2 — фото чувствительность

Из рассмотренных типов МДП-фотоприемников, с точки зрения практического применения, наиболее перспективны кремниевые лавинные МДП-диоды. Для расширения спектрального диапазона чувствительности разрабатывают технологии получения и исследуют фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе других материалов, в особенности полупроводников  $A^{III}B^V$ . Перспективным в этом направлении является использование в качестве диэлектрика широкозонного полупроводникового материала, согласованного по постоянной решетки с материалом подложки.

### 1.5. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ РЕВЕРСИВНЫЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ МДП-СТРУКТУР

Разработка ЭВМ нового поколения предусматривает создание запоминающих устройств (ЗУ), в которых запись информации осуществляется с повышенной скоростью и плотностью. Имеющиеся оптические диски памяти емкостью 1 Гбайт не позволяют осуществлять многократную запись и стирание информации, а время выборки информации таких ЗУ составляет сотни миллисекунд.

Развитие технологии получения монокристаллических слоев Si на аморфной подложке позволяет создавать новую среду для оптоэлектронного ЗУ на базе планарных МДПДП-структур с полной диэлектрической изоляцией ячеек, что дает возможность записывать информацию с плотностью более  $10^7$  бит/см и энергией для записи одного бита информации около  $2 \cdot 10^{-13}$  Дж [17].

Указанная структура получается на основе рекристаллизованного кремния по следующим стадиям. На пластине Si термическим окислением выращивается слой  $SiO_2$  толщиной 1 мкм, поверх которого осаждается поликристаллический Si толщиной 0,5 мкм. Затем с помощью методов планарной технологии с использованием плазмохимического травления формируются островки поликристаллического Si. Перед кристаллизацией поликремния структура покрывается слоями  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$ . Рекристаллизация проводится методом зонной плавки, после чего слои  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$  удаляются и на поверхности формируется структура металл — нитрид кремния — двуокись кремния — полупроводник (МНОП). Ячейка матрицы изображена на рис. 1.9. Зазор между электродами составляет до 4 мкм.

Для переключения структуры к ней прикладывается импульсное напряжение. В зависимости от полярности напряжения происходит запись или стирание информации. Под одним из электродов образуется неравновесная ОПЗ, на которой падает основная часть приложенного напряжения. При воздействии на структуру управляющего света с энергией кванта в области собственного поглощения полупроводника процесс релаксации ОПЗ ускоряется за счет генерации электронно-дырочных пар. При этом напряжение на диэлектрике возрастает и при достижении поро-

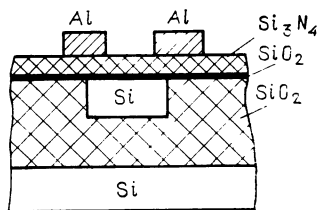


Рис. 1.9. Поперечный разрез структуры с полностью изолированной областью рекристаллизованного кремния:

толщина слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $d=50$  нм, толщина слоя  $\text{SiO}_2$   $d=2,5$  нм

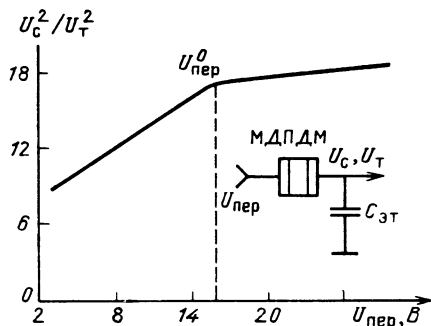


Рис. 1.10. Зависимость отношения квадратов сигналов падения напряжений на эталонной емкости  $C_{эт}$  для структуры в случае неравновесного обеднения ( $U_T$ ) и при полной релаксации ОПЗ под действием света ( $U_c$ ) от амплитуды импульса напряжения  $U_{пер}$  при  $C_{эт} \gg C_{стp}$

говой амплитуды электроны (или дырки) туннелируют в слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и захватываются на ловушки в его объеме.

Неравновесная ОПЗ образуется во всех ячейках структуры, а переключение — только в освещенных ячейках.

Структура МДПДМ как элемент памяти характеризуется величиной захваченного на ловушки в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  заряда по соответствующему изменению напряжения плоских зон  $U_{FB}$ . Последнее определяется по изменению сигнала фототока.

Для оптимизации режима работы и оценки предельных характеристик структуры необходимо знать концентрацию легирующей примеси в Si, для чего вычисляется отношение квадратов напряжений  $U_c^2/U_T^2$ , измеряемых на эталонной емкости (рис. 1.10) при неравновесном обеднении ( $U_T$ ) и при полной релаксации ОПЗ под действием света ( $U_c$ ) в зависимости от амплитуды импульса переключения  $U_{пер}$ .

Это отношение пропорционально отношению  $(L_{опз}/2L_d)^2$ . Из рис. 1.10 видно, что при увеличении  $U_{пер}$  значение  $U_c^2/U_T^2$  линейно растет и при достижении  $U_{пер}^0=16$  В (когда ОПЗ достигает противоположного электрода) практически остается постоянным, напряжение  $U_{пер}^0=16$  В соответствует концентрации легирующей примеси  $N_i \approx 1,2 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ .

На рис. 1.11,а показана зависимость  $U_{FB}$  от длительности переключающего импульса. Экстраполяция изменения  $U_{FB}$  к нулю в случае неосвещенной структуры дает значение времени релаксации ОПЗ  $\tau_{рел}$ . Используя формулу  $\tau \approx \tau_{рел} n_i / 2N_i$ , можно оценить время жизни неосновных носителей в кремнии. При  $\tau_{рел} \approx 2 \cdot 10^{-2}$  с  $\tau \approx 10^{-7}$  с, что на три порядка меньше, чем в объемном кремнии, но достаточно для работоспособности МДПДМ-структуры как элемента памяти.

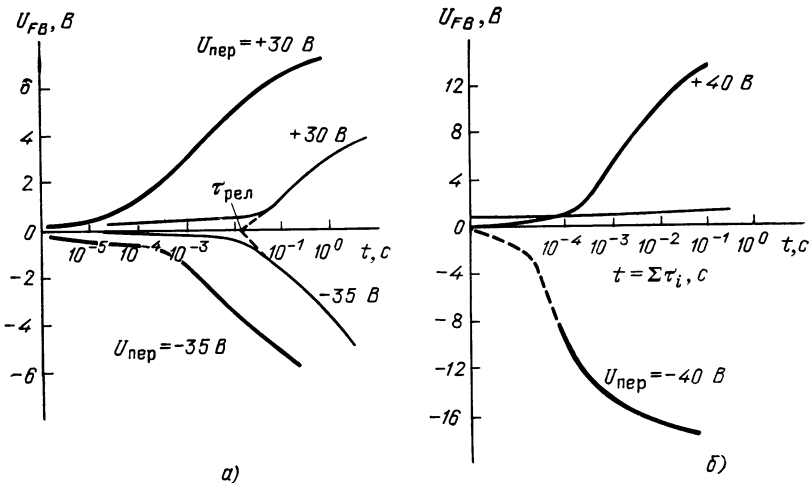


Рис. 1.11. Зависимость напряжения плоских зон  $U_{FB}$  от длительности переключающего импульса напряжения:

а) — освещена вся структура; — структура затемнена; б) — при переключении одной освещенной ячейки; — напряжение на соседней неосвещенной ячейке;  $\tau_i = 100$  мкс — длительность единичного импульса переключения

На рис. 1.11,б представлена временная характеристика переключения отдельной ячейки размером  $10 \times 10$  мкм с зазором между электродами 5 мкм при освещении светом. Постоянное значение  $U_{FB}$  неосвещенной ячейки говорит о хорошей изоляции между ячейками. Уменьшение размеров ячейки ограничено возможностью фокусировки светового луча — 1 мкм, что позволяет записывать информацию с плотностью более  $10^7$  бит/см<sup>2</sup>.

При определении энергии, необходимой для записи одного бита информации, исходя из того, что эффективное туннелирование носителей из Si через барьер SiO<sub>2</sub> в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> начинается при полях в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, равных  $4 \cdot 10^6$  В/см.

Для этого на границе Si—SiO<sub>2</sub> необходимо накопить заряд  $\sigma \approx 2,5 \cdot 10^{-6}$  Кл·см<sup>-2</sup>. При фоточувствительности 0,12 А/Вт для записи информации потребуется плотность энергии  $2 \cdot 10^{-7}$  Дж/мм<sup>2</sup>. Следовательно, для записи одного бита информации в ячейке размером  $3 \times 3$  мкм и площадью электрода 1 мкм<sup>2</sup> требуется энергия  $2 \cdot 10^{-13}$  Дж.

## Глава 2

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МДП-ПРИБОРОВ

#### 2.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТРУКТУРАМ

В настоящее время разработано большое количество технологических процессов изготовления МДП-приборов на основе различных полупроводников и диэлектриков. Рассмотрим наиболее

типичные способы изготовления и методы постадийного контроля качества многослойных МДП-структур.

В процессе разработки конструкции и технологии изготовления фоточувствительных МДП-приборов исследуют зависимости параметров прибора от конструктивных и технологических факторов и вырабатывают на основе исследований технические требования.

При выборе материала необходимо исходить из того, что полупроводниковый слой МДП-структуры должен обеспечивать требуемый диапазон спектральной чувствительности, высокую разрешающую способность прибора.

Разрешающая способность определяется в основном диффузионной длиной растекания носителей в полупроводнике (выбирают полупроводники с минимальной длиной диффузии). Кроме того, материал полупроводника должен обладать стабильными по времени электрофизическими характеристиками и быть стойким к воздействию внешней среды (влаги, температуры), а также агрессивных сред, применяемых в технологии изготовления МДП-структур. В ряду известных структурных модификаций полупроводниковых материалов (аморфный, поликристаллический, монокристаллический) наибольшей временной стабильностью обладают монокристаллические полупроводники.

При получении полупроводника в него вводят компенсирующие примеси, что приводит к захвату на примесные центры носителей определенного знака и, следовательно, к подавлению процесса биполярной диффузии. При этом обеспечиваемая материалом разрешающая способность определяется монополярной диффузией, затухающей на длине Дебая в 1... 5 мкм, что соизмеримо с разрешающей способностью фотографических материалов.

В основе выбора технологии изготовления полупроводникового материала лежит корреляция между его электрофизическими свойствами и структурными дефектами. Последние могут быть вызваны как собственными точечными дефектами (СТД), так и примесной неоднородностью, термическими напряжениями, вносимыми в процессе выращивания кристалла. Так, в МДП-преобразователях дислокационные дефекты типа малоугловых границ (МУГ) оказывают существенное влияние на возникновение пространственных шумов в преобразованном изображении. В результате возникает необходимость получения полупроводника с минимальной плотностью дислокаций.

В технологии создания совершенных по структуре эпитаксиальных слоев полупроводника критерием пригодности материала подложки также служит дислокационная структура. Это связано с тем, что нарастающий эпитаксиальный слой наследует дефекты структуры подложки: скопления, связанные с выделением второй фазы; линии скольжения; МУГ [18]. Для улучшения электрофизических свойств полупроводника, связанных с интегральным по толщине влиянием его дислокационных дефектов, толщина слоя полупроводника должна быть минимально допустимой. Ограни-

чение по толщине может быть вызвано требованиями механической прочности и условием согласования с толщинами других слоев, например в структуре МДП — жидкий кристалл (МДП — ЖК) — с толщиной слоя ЖК. Это также позволяет повысить разрешающую способность прибора.

Основные параметры фоточувствительных МДП-приборов, работающих в динамическом режиме, определяют электрофизические свойства границы раздела диэлектрик — полупроводник (Д—П). Это обусловлено наличием в реальных условиях ловушек — состояний на границе раздела Д—П (быстрых) и в объеме диэлектрика (медленных), которые захватывают свободные носители зарядов и тем самым оказывают сильное влияние на кинетику эффекта поля [1]. Медленные состояния чувствительны к воздействию окружающей среды (влаги, температура), быстрые — к качеству обработки поверхности полупроводника, типу диэлектрика и способу его нанесения. Критерием получения границы раздела Д—П с высокими характеристиками является минимизация плотности поверхностных состояний ( $N_s \approx 10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ).

Качество обработки поверхности полупроводника предъявляет требования как к механической, так и к химической обработкам поверхности.

Целью шлифовки и полировки является получение минимально допустимого, равномерного по толщине слоя полупроводника с максимально гладкой (шероховатость по 14-му классу) и оптически чистой (класс чистоты поверхности Р II) поверхностью. При этом процесс обработки должен обеспечить минимальный нарушенный слой, вносящий свой вклад в образование на границе раздела Д—П ловушек и изменяющий емкостные соотношения между ОПЗ и диэлектриком.

Химическая очистка помимо удаления загрязнений с поверхности, ухудшающей адгезию слоя диэлектрика, позволяет удалить адсорбированные на поверхности полупроводника примеси, которые за счет миграции вызывают нестабильность свойств границы раздела Д—П.

Основные требования к диэлектрическим пленкам: высокая электрическая прочность ( $E_{пр} \geq 10^6 \text{ В/см}$ ), для достижения которой необходимо изготовление пленок, не имеющих сквозных пор; большая относительная диэлектрическая проницаемость, необходимая для достижения повышенных времен накопления; высокие прозрачность и стойкость к воздействию окружающей среды.

В фоточувствительных МДП-приборах для повышения отношения сигнал-шум необходимо уменьшать толщину слоя диэлектрика [2], не снижая электрическую прочность.

В качестве металлической обкладки МДП-конденсатора используются электропроводящие прозрачные покрытия (ЭППП), которые должны обладать высокими прозрачностью (коэффициент пропускания — не менее 90%) и электропроводностью (по-

верхностное сопротивление  $R_s$  — не более 100 Ом/□) и адгезией к подложке.

Технология получения многослойной МДП-структуры в виде механически прочного узла определяется как функциональными назначениями приборов, так и техническими возможностями. Но во всех случаях, будь то химическое осаждение, вакуумное или ионно-плазменное нанесение слоев или применение монокристалла полупроводника, необходимо наличие подложки, которая, внося механическую прочность в конструкцию, не должна ухудшать свойства слоев, определяемых требованиями к ним.

Наиболее важными свойствами подложек (как стеклянных, так и полупроводниковых) являются характер поверхности, химический состав, стабильность, теплопроводность.

По типу материала подложка должна быть прозрачной в рабочей для МДП-структуры области спектра и согласованной по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР) с материалом контактируемого слоя.

С технологической точки зрения (плоскопараллельность, плоскостность, шероховатость, чистота поверхности) подложка должна способствовать выполнению требований, предъявляемых к слоям структуры.

С точки зрения надежности подложка должна быть инертной во взаимодействии с агрессивными средами в процессе изготовления МДП-прибора, а также с внешней средой в процессе эксплуатации.

Кроме общих требований, указанных выше, существуют специальные, относящиеся к определенному типу МДП-приборов, которые по своему функциональному назначению имеют заданные конструкцию и технологию изготовления.

## 2.2. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОДЛОЖЕК

Как было отмечено в § 2.1, главной задачей механической обработки в технологии изготовления фоточувствительных МДП-приборов является получение подложек необходимых размеров, формы, профиля с требуемым качеством поверхности.

К качеству поверхности подложек предъявляются жесткие требования:

плоскопараллельность или отклонение от равномерности по толщине не хуже чем 0,2 мкм;

отклонение поверхности от плоскости или неплоскостность не хуже  $(0,1 \dots 0,5)N$  и  $0,05\Delta N$ ;

глубина рельефа поверхности не более 0,025 ... 0,05 мкм, что соответствует 14-му классу шероховатости (ГОСТ 2789—73);

чистота обрабатываемой поверхности должна соответствовать классу Р II (ГОСТ 11141—84).

Одним из основных требований к механической обработке полупроводниковых пластин является минимальная глубина нарушенного слоя.



При разработке технологии необходимо учитывать факторы, влияющие на качество обработки поверхности подложек: способ обработки; режим обработки; температуру, влажность и запыленность окружающей среды.

**Виды, режимы и оборудование для механической обработки.** Механическую обработку оптических поверхностей можно разделить на обработку свободным и закрепленным абразивами. Использование закрепленного абразива не позволяет получить высокую плоскостность обрабатываемых поверхностей. Поэтому поверхности МДП-приборов обрабатывают свободным абразивом, зерна которого в процессе перекачивания производят микроудары, вызывающие в приповерхностном слое материала трещины. Микрообъемы, окруженные этими трещинами, отделяются, в результате чего происходит удаление заданного припуска. Так как глубину нарушенного слоя в основном определяет зернистость абразива, то процесс обработки производится с постепенным ее уменьшением, что приводит к уменьшению нарушенного слоя и длительности последующей полировки. Режим обработки определяется вращением шлифовальника (полировальника) и его давлением на обрабатываемую поверхность.

При переходе от грубой к точной обработке уменьшается ее интенсивность, т. е. чем точнее необходимо получить обрабатываемую поверхность, тем меньше должны быть обороты шпинделя и давление шлифовальника (полировальника) на обрабатываемую поверхность.

Важное значение при выборе режимов обработки имеет тип применяемого оборудования. Предварительная шлифовка может производиться на станках типа ОС-350, имеющих частоту вращения шпинделя более 200 об/мин. Окончательная шлифовка и полировка производится на шлифовально-доводочном станке типа 4ПД-200 (ЗШП-350М), позволяющем плавно регулировать частоту вращения шпинделя от 0 до 100 об/мин и давление на обрабатываемую поверхность от 0 до  $2 \cdot 10^6$  Па. Окончательная доводка может осуществляться на доводочном станке типа СД-120 с ножным приводом вращения шпинделя.

В качестве материала рабочей поверхности полировальника могут использоваться ткань (замша, сукно) и пеканифольные смолы. Применение тканевых основ не позволяет получить высокую плоскостность поверхности — завал на краях может достигать 2...3 мкм, и поэтому обработка такими полировальниками осуществляется для неотчетливых деталей.

Прецизионная полировка производится смоляными полировальниками [19]. Формообразование поверхности в процессе обработки осуществляется в результате применения определенных настройки и режимов обработки, а также локальной подрезки рабочей поверхности смолы, что приводит к изменению площади контакта поверхностей смолы и подложки, а следовательно, к изменению интенсивности износа.

Так как вязкость полировальных и наклеечных смол зависит от температуры и влажности окружающей среды, то их исполь-

зование выдвигает жесткие требования по стабилизации указанных параметров.

**Шлифовка и полировка стеклянных подложек.** Шлифовка подложек выполняется последовательно водными суспензиями абразивных порошков М28, М20, М10, М7. В результате такой обработки достигается неплоскостность не хуже  $\pm 4N$ , что контролируется лекальной линейкой. Наличие царапин допустимо лишь в пределах половины толщины слоя припуска, оставляемого на полировку, до 10 мкм. В качестве шлифовальника используются латунные (алюминиевые) диски.

Полировка подложек состоит из двух этапов, выполняемых водной суспензией полирита:

удаление шлифованного рельефного слоя, равного 4...6 мкм, так называемая операция устранения «матового цвета» до появления блеска;

получение заданных значений  $N$  и  $\Delta N$ , или, как принято называть в производстве эту операцию, подгонка цвета (интерференционной картины). В процессе этого этапа удаляется трещиноватый слой порядка 10...15 мкм, образованный в результате шлифовки.

**Шлифовка и полировка полупроводниковых пластин.** Способ механической обработки полупроводниковых пластин определяется требованиями, предъявляемыми к МДП-структуре (см. § 3.1). Для получения тонкого слоя полупроводника (20...30 мкм) используется односторонняя обработка исходных толстых пластин (0,4...1,0 мм) с последующей приклейкой их оптическим клеем (например, ОК-72ФТ) на подготовленные стеклянные подложки. Затем производится обработка второй стороны полупроводника в составе склейки.

Шлифовка пластин проводится теми же микропорошками и в той же последовательности, что и шлифовка стеклянных подложек. Полировка осуществляется водными суспензиями алмазных порошков АСМ3/2 и АСМ1/0 до заданных значений  $N$  и  $\Delta N$ .

Для устранения остаточных механических напряжений следует снимать одинаковые припуски с каждой из сторон пластины. В результате алмазной полировки остается нарушенный слой глубиной до 1 мкм, причем на поверхности полупроводника присутствует «алмазный фон» — сетка микроцарапин, устранить которую можно химико-механической полировкой.

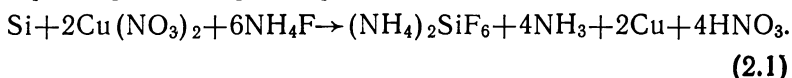
**Химико-механическая полировка (ХМП).** Суть ХМП заключается в совместном воздействии на поверхность полупроводниковой пластины химически активной среды, содержащей те или иные щелочные и кислотные растворы в зависимости от типа полупроводника и механических частиц аморфных субмикронных дисперсных порошков  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  [20].

В ряде случаев используется безабразивная ХМП, при которой механическое воздействие осуществляется с помощью мягкого полировальника.

В результате химического взаимодействия происходит растривание поверхности полупроводника и абразивные зерна удаляют уже разрыхленный поверхностный слой. Толщина снимаемого слоя определяется глубиной и характером нарушенного слоя от предшествующей стадии обработки.

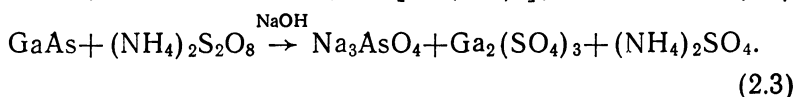
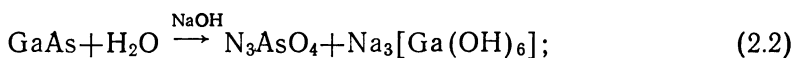
Абразивные суспензии для полирования Si содержат азотно-кислую медь  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  и фтористый аммоний  $\text{NH}_4\text{F}$ . Вследствие большей активности Si на его поверхности из раствора осаждается слой Cu, а ионы Si переходят в раствор.

Суммарная реакция растворения Si записывается в виде

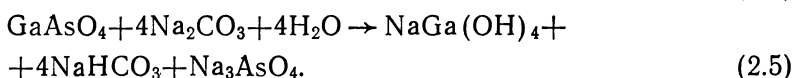
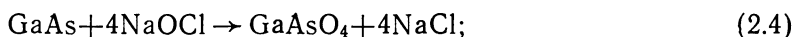


Слой Cu удаляется механически, на обнаженную поверхность Si вновь осаждается Cu и Si продолжает растворяться.

В отличие от Si, для ХМП GaAs в качестве химически активной среды используются окислители  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ,  $\text{NaOCl}$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{I}_2$  и др. На поверхности GaAs могут протекать следующие реакции:



Для обработки подложек GaAs различных ориентаций используется ХМП в растворах гипохлорита натрия с добавками NaOH или  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ :



При оптимальных режимах ХМП в растворах гипохлорита позволяет получить толщину нарушенного слоя менее 0,5 мкм.

### 2.3. ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК

Как было отмечено в § 2.1, от физико-химического состояния поверхности полупроводника зависят электрофизические свойства границы раздела Д—П, определяющие параметры МДП-прибора. Причем способ очистки влияет на качество состояния поверхности. В [21] приведены исследования зависимости свойств границы раздела арсенид галлия — диэлектрик от способа обработки поверхности полупроводника. На рис. 2.1 показаны вольт-фарадные характеристики структур GaAs—GaN—SiO<sub>2</sub>·Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, поверхности полупроводников которых очищены различными способами. Каждому способу очистки предшествовала предварительная подготовка, включающая в себя кипячение в толуоле, ацетоне и

последующее кипячение в изопропиловом спирте. Как видно из рисунка, наилучшие свойства границы раздела получают при электрохимическом травлении, а также при комбинированной обработке.

При изготовлении многослойных МДП-структур методом тонкопленочной технологии от степени загрязненности стеклянных и полупроводниковых подложек зависит структурная однородность наносимых пленок и их адгезия к подложкам [22]. Это связано с тем, что в процессе образования пленки размер критических зародышей зависит от степени загрязнения поверхности подложки. Кроме того, над загрязненными участками может быть большая сорбционная емкость загрязнений. В результате химического разложения и десорбции посторонних частиц при нагреве в процессе нанесения пленки над загрязненными участками подложки создается повышенное давление, которое препятствует осаждению атомов испаряемого материала.

Для правильного выбора способа очистки и оптимизации ее технологии необходимо предусмотреть природу загрязнений, которые можно классифицировать следующим образом:

- механические — остатки абразивного порошка, полировальной смолы, пылеобразные частицы из окружающей среды;
- неорганические — соли, попадающие на поверхность извне или образующиеся в результате разрушения поверхности;
- органические (полярные и неполярные) — жиры, масла, загрязнения от рук оператора, примеси химических реактивов;
- химические — ионные, атомные — особенно критичные для полупроводниковых поверхностей.

Частицы пыли и порошков удаляют с помощью беличьей кисточки, а также обдувом, протиркой тканью, смоченной растворителем. Более рациональна промывка в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ), стимулированная ультразвуком.

Солевые загрязнения удаляют растворением в воде (особенно при повышенной температуре). Наибольшую трудность вызывает обезжиривание поверхности. Так как многие типы жировых загрязнений хорошо растворяются в органических растворителях, то для их удаления можно использовать промывку в соответствующих реактивах. Однако это приводит к большому расходу горючих и токсичных веществ.

Достаточно эффективен метод «мокрого сжигания» в водных растворах перекиси водорода и в ее смесях с муравьиной кислотой или аммиаком. Однако более безопасна обработка подложек

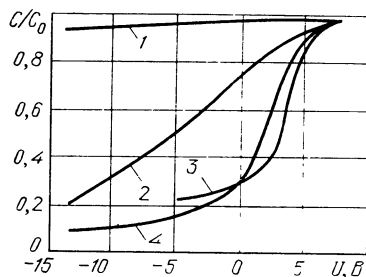


Рис. 2.1. Вольт-фарадные характеристики  $\text{GaAs-GaN-SiO}_2 \times \text{Y}_2\text{O}_3$  структур:

1 — без химической обработки; 2 — с химической обработкой в травителе  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 1$  в течение 30 с; 3 — с химической обработкой и газовым травлением 5%  $\text{HCl}$  в токе азота; 4 — с электрохимической обработкой в растворе 0,25 КОН, плотность тока 0,6 А/см<sup>2</sup> и  $f = 100 \dots 300$  Гц

в перекисно-аммиачной смеси, которая при нагреве интенсивно окисляет органические вещества. Если окисление оказывается неполным, то они превращаются в водорастворимые соединения и удаляются с поверхности. Этому способствует щелочная реакция очищающей среды, обусловленная присутствием в растворе гидроксида аммония. Одновременно происходит и ионная очистка — ионы металла переходят в состояние с высшей степенью окисления с последующим образованием комплексных соединений с аммиаком и их десорбции. Наиболее распространенные соотношения 30%-ной перекиси водорода, 25%-ного раствора аммиака и воды — 1 : 1 : 4, 1 : 1 : 6.

При очистке поверхностей главное внимание следует уделить чистоте самих реактивов и воды. В полупроводниковом производстве применяется дистиллированная и деионизованная вода. Дистиллированная вода используется для предварительной отмывки. Деионизованная вода обладает более высоким качеством, для оценки которого служат следующие параметры: удельное сопротивление (не менее 18,0 МОм·см), окисляемость, которая фактически характеризует загрязнение воды органическими примесями ( $O_2$  не более 1,0 мг/л), содержание кремнекислот (не более 0,01 мг/л). Дополнительно определяются количество сухого остатка и значение  $pH$  (6,5 ... 7,0) [23].

В [24] предлагается следующий технологический процесс очистки стеклянных подложек, обеспечивающий достаточную степень чистоты:

1. Очистка от механических загрязнений в водном растворе ПАВ при воздействии ультразвука. На этой операции происходит также предварительное удаление жировых загрязнений.

2. Химическое финишное обезжиривание в перекисно-аммиачной среде при температуре 60 °С.

3. Удаление солевых растворимых соединений в горячей деионизованной воде.

4. Центрифугирование и сушка подложек в нагретом обеспыленном воздухе.

В [25] приведен такой пример технологии очистки кремневых подложек.

1. Многократное кипячение в органических растворителях.

2. Кипячение в азотной кислоте.

3. Ультразвуковая обработка в смеси серной кислоты с ацетоном (1 : 1).

4. Промывка проточной деионизованной водой.

5. Сушка на центрифуге.

**Контроль чистоты поверхности подложек.** Так как существующие способы очистки не позволяют получать абсолютно чистую поверхность, то для получения воспроизводимых результатов принятой технологии важно контролировать степень чистоты.

Из многочисленных методов контроля органических загрязнений на поверхности подложек наибольшее применение нашел метод контроля угла смачива-

ния (угол между смоченной поверхностью пластины и мениском в точках их пересечения). Чем меньше на поверхности загрязнений, тем он меньше. Однако этот метод контроля дает большой разброс значений, так как каплю формируют на поверхности в газовой атмосфере, примесный состав которой надежно не контролируется [26]. В [27] исследуется возможность уменьшения разброса значений угла смачивания, с целью чего капля диэтилового эфира формируется на контролируемой поверхности в среде деионизованной воды. Выбор жидкостей обусловлен их ограниченным смешиванием, и образующийся угол смачивания достаточен для измерений.

В [28] на основе измерения рассеяния света разработан коэффициент дефектности — отношение рассеяния света пленкой, нанесенной на загрязненную подложку после облучения ее импульсной лампой, к рассеянию света чистой подложкой. В результате эксперимента наибольший коэффициент дефектности имеет пленка, нанесенная на подложку со следами жира.

**Химико-динамическое полирование (ХДП)** производится после механической обработки подложек и очистки их поверхностей. Целью ХДП является удаление нарушенного слоя, механических напряжений, вносимых механической обработкой, а также удаление с поверхности посторонних включений, загрязнений, оставшихся после очистки при обязательном сохранении плоскопараллельности и плоскостности подложек.

Сущность ХДП заключается в химическом полировании в гидродинамических условиях вращающейся подложки при строго ламинарном движении потока травителя вдоль ее поверхности. На качество ХДП оказывает влияние качество предшествующей обработки. Так, нарушение режимов поэтапного снятия припуска при шлифовке и полировке будет проявляться в процессе ХДП в виде рисок, царапин, алмазного фона на поверхности. Остатки органических и неорганических загрязнений ухудшают смачиваемость подложки травителем, что снижает их химическую активность.

По природе окисляющих агентов и растворителей травители можно разделить на кислотные (окислители  $\text{HN}_3\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  и др.; среды — водные растворы кислот  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), щелочные (окислители  $\text{H}_2\text{O}_2$ , галогены, гипохлорит и гипобромит натрия, среды — водные растворы  $\text{KOH}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$  и др.), растворы галогенов ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{I}_2$ ) в воде, в органических и других кислотах, в органических растворителях. Так, для  $\text{Si}$  подложек предлагается травитель



для  $\text{GaAs}$  —  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  с соотношением компонентов от 3 : 1 : 1 до 30 : 1 : 1 [20].

Продолжительность травления определяется глубиной нарушенного слоя и скоростью полирования. В [28] при ХДП-пластин  $\text{GaP}$  в щелочном растворе феррицианида калия время травления  $\Delta t$  определяется формулой:

$$\Delta t = - \frac{m_0 \Delta h}{m_1 v_0} \ln \left( 1 - \frac{m_1}{m_0} \right), \quad (2.6)$$

где  $v_0$  — начальная скорость травления, мкм/мин;  $m_i$  — масса полупроводника, которая уже растворена, г;  $m_0$  — максимальная масса полупроводника, которая может раствориться в данном объеме травителя, г;  $\Delta h$  — толщина удаляемого слоя материала, мкм.

Для уменьшения употребления дорогостоящих жидких очищающих средств, сокращения технологического цикла и улучшения условий труда в качестве финишной очистки подложек используются ионно-плазменные и плазмохимические процессы [20]. Так, при получении эпитаксиальных слоев методом вакуумной эпитаксии используется ионная очистка, в процессе которой бомбардировка подложек ионами инертных газов вызывает распыление поверхностных слоев вместе с остаточными загрязнениями. Причем с целью устранения радиационных дефектов, которые сопровождают ионную очистку, одновременно производится и термообработка в вакууме.

Плазмохимическая очистка происходит при химическом взаимодействии с ионами и радикалами активных газов с образованием летучих соединений.

#### 2.4. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК

Электропроводящие прозрачные пленки (ЭППП) являются важными элементами фоточувствительных МДП-приемников. Основные требования, предъявляемые к ЭППП, — максимальные прозрачность и электропроводимость при достаточной механической прочности и высокой адгезии к подложкам.

Основная трудность в технологии изготовления ЭППП — необходимость сочетания двух противоречащих свойств твердых тел: прозрачности, присущей диэлектрикам и широкозонным полупроводникам, и электропроводимости, которая характерна для сильно поглощающих свет материалов.

Проводящие тонкие окисные пленки, такие как  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ , предпочтительнее, чем металлические, так как обладают высокими твердостью и адгезией к различным подложкам, устойчивостью к действию агрессивных сред, прозрачностью в видимой области спектра и высокой электропроводимостью.

Методы получения тонких ЭППП делят на группы [29]. Первая включает в себя химические реакции, протекающие на поверхности подложки, вторая — методы испарения в вакууме и катодное распыление, третья — методы, использующие ионные лучи.

Химические методы получения ЭППП многочисленны и разнообразны, так как используют большое число пленкообразующих веществ, различных по химическому составу и физико-химическим свойствам. Они привлекательны, так как не требуют сложного оборудования, просты и производительны. Наиболее качественные пленки, удовлетворяющие высоким требованиям по чи-

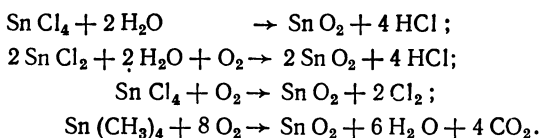
стоте, стехиометрии состава и совершенству структуры, изготавливаются методом химического осаждения из газовой фазы. Получаемые ЭППП практически лишены пор, обладают высокой механической прочностью и хорошей адгезией к подложкам из многих материалов.

Сущность метода заключается в том, что в реакционную камеру (рис. 2.2), в которой расположена нагретая подложка, подается газовая смесь, состоящая из компонентов, необходимых для получения пленки. При контакте с нагретой подложкой происходят термораспад молекул исходных веществ и взаимодействие продуктов распада, в результате чего на поверхности подложки образуется пленка.

Основными компонентами газовой смеси являются соединения металла (олова, индия), окислитель (кислород, вода и перекись водорода), легирующая добавка и газ-носитель (азот, аргон).

Производное олова переводится в газообразное состояние при низких температурах (до 373 К) в случае использования металлоорганических соединений (МОС) олова или при более высоких температурах, когда используется  $\text{SnCl}_4$ .

Процесс химического осаждения на примере пленки  $\text{SnO}_2$  можно представить уравнениями [30]:



Изменяя условия осаждения, подбирая исходные соединения и применяя легирование, можно получать удельное сопротивление пленки  $\text{SnO}_2$  от  $1,5 \cdot 10^{-3}$  до  $2,5 \cdot 10^{-5}$  Ом·см.

Процесс химического осаждения состоит из доставки реагентов к поверхности, удаления продуктов реакции с поверхности и реакции на поверхности. Соотношение скоростей этих процес-

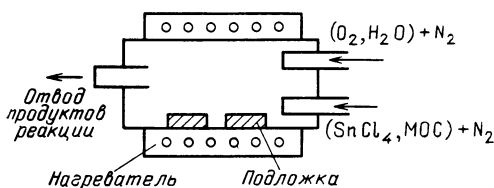


Рис. 2.2. Схема получения проводящего покрытия

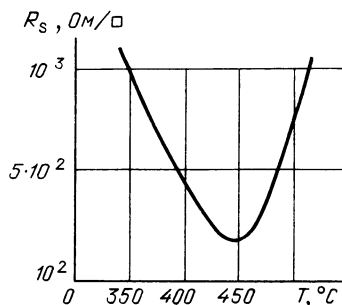


Рис. 2.3. Зависимость поверхностного сопротивления пленки  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  толщиной 300 нм, полученной методом химического осаждения из газовой фазы от температуры подложки



сов влияет на равномерность осаждения пленки, а следовательно, и на однородность ее структуры. Когда скорость подачи реагентов больше скорости реакции, то градиент концентрации в направлении, перпендикулярном поверхности подложки, мал. В этом случае процесс осаждения определяется скоростью реакции, и однородность получаемых покрытий выше. Такие условия реализуются уменьшением давления в реакторе.

С увеличением температуры подложки возникает значительный градиент концентрации исходных компонентов и появляется вероятность возникновения поверхностных неоднородностей. Температура подложки оказывает существенное влияние на электрические свойства пленки. На рис. 2.3 показана зависимость поверхностного сопротивления  $R_s$  пленки  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  от температуры подложки [30].

В [31] приведена таблица электрофизических параметров ЭППП, полученных химическим осаждением из газовой фазы. При высоких электрооптических свойствах эти пленки обладают недостатком — их получают при нагревании подложки до температуры 670 К и более, что приводит к ухудшению плоскостности подложек, изготовленных из стекла с низкой температурой размягчения [32]. Для снижения температуры осаждения используется активация газовой фазы путем воздействия плазмы. Хотя плазменно-пиролитический метод и позволяет осаждать пленки при пониженных температурах, вплоть до комнатной, но свойства получаемых пленок по механической прочности и оптическим характеристикам уступают свойствам пленок, полученных с нагреванием подложки.

Среди методов физического осаждения в последнее время наиболее широкое распространение получило катодное распыление. Энергия, необходимая для отрыва атомов от наносимого вещества, выделяется в результате бомбардировки катода ионами газоразрядной плазмы.

Для получения пленок с заданными свойствами, их стабилизации необходимо оптимизировать технологический процесс — определить допустимые интервалы изменений температуры подложки, парциального давления кислорода и скорости нанесения пленки.

В [33] исследованы параметры напыления ЭППП из оксидов индия и олова различной толщины и их влияние на электрооптические свойства пленок. Для получения пленок  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  толщиной 25 ... 150 нм с  $R_s = 40 \dots 100 \text{ Ом}/\square$  они частично окисляются, а для покрытий толщиной 150 ... 500 нм и  $R_s = 10 \text{ Ом}/\square$  подвергаются полному окислению.

Частично окисленные покрытия изготавливаются методом реактивного распыления в среде смеси аргона и кислорода. Для получения пленки используется металлическая мишень из сплава  $\text{In—Sn}$  (атомная доля Sn в сплаве 5%). Процесс напыления происходит при давлении 0,2 ... 2 Па.

Для того чтобы после нагрева напыленных пленок получить низкое удельное сопротивление  $\rho$ , необходимо устанавливать по возможности большее парциальное давление кислорода, т. е. чем выше скорость потока кислорода в процессе распыления, тем выше доля кристаллического окисла в конденсированной нагретой пленке. Низкие скорости потока приводят к образованию аморфных состояний, которые могут быть переведены в проводящий окисел только при очень высоких температурах.

На рис. 2.4 показана зависимость  $\rho$  напыленных слоев  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  от скорости потока кислорода. Для получения  $\rho$  меньше  $10^{-3}$  Ом·см необходимы ток разряда  $I_p = 3,6$  А и скорость прохождения кислорода более 80 мл/мин, что соответствует смеси аргон — кислород 2 : 1.

Частично окисленные покрытия достигают требуемого значения  $R_s$  только после нагрева. На рис. 2.5 приведена температурная зависимость  $R_s$  пленок  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  толщиной 25 нм при нагреве в течение 30 мин. Минимум  $R_s$  наблюдается при температуре 220 ... 300° С. Нагревание свыше 300° С приводит к повторному подъему  $R_s$ .

Оптические характеристики пленки  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  представлены на рис. 2.6. Нагревание пленки до 450° С в течение 30 мин повышает коэффициент пропускания с 78 до 90%.

Полностью окисленные пленки  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  толщиной 150 ... 500 нм изготавливаются при нереактивном или частично реактивном режиме работы с применением тока ВЧ (13,5 МГц).

Известно, что адгезия окисных покрытий зависит от толщины окисла. При напылении покрытия до 500 нм во избежание его отставания от подложек последние должны предварительно нагреваться до температуры 300° С.

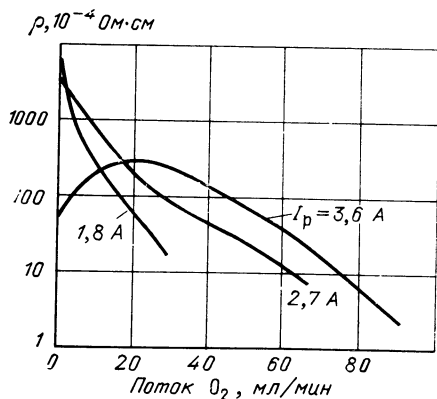


Рис. 2.4. Зависимость удельного сопротивления пленки  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  от скорости потока  $O_2$

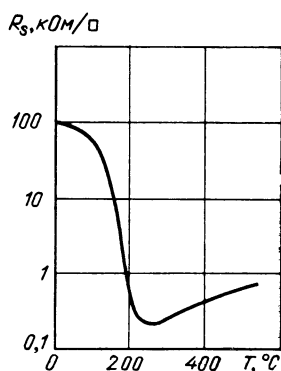


Рис. 2.5. Зависимость поверхностного сопротивления пленки  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  толщиной 25 нм от температуры при нагревании в воздухе в течение 30 мин.

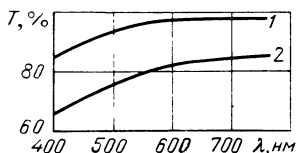


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента пропускания пленки  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  толщиной 25 нм от длины волны и температурной обработки: 1 — после нагрева  $450^\circ\text{C}$  в течение 30 мин, 2 — после напыления пленки

Оптические свойства полностью окисленных пленок идентичны свойствам нагретых частично окисленных.

В [34] исследуется влияние температуры подложки и парциального давления  $\text{O}_2$  на электрооптические свойства пленок  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ , полученных ВЧ-распылением. В качестве мишени используется горячепрессованный порошковый материал  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$  (Молярная доля  $\text{SnO}_2$  в материале 9%). Парциальное давление ( $P_{\text{O}_2}$ ) изменяется от  $1,0 \cdot 10^{-3}$  до 0,1 Па при постоянном давлении аргоно-кислородной смеси (1,1 Па). Пленки были получены распылением на подложки комнатной температуры и на подложки, нагретые до температуры  $300^\circ\text{C}$ .

На рис. 2.7 показаны зависимости удельной проводимости полученных пленок от величины  $P_{\text{O}_2}$ . При сильной зависимости проводимости от  $P_{\text{O}_2}$ , ее абсолютное значение выше у пленок, нанесенных на нагретую подложку. Изменение проводимости в основном связано с изменением концентрации свободных носителей. Зависимость холловской подвижности менее выражена и практически не зависит от температуры подложки.

Об оптической однородности пленок можно судить по зависимостям показателей преломления верхней поверхности  $n_1$  и границы раздела пленка — подложка  $n_2$  от  $P_{\text{O}_2}$  (рис. 2.8). При уменьшении  $P_{\text{O}_2}$  показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  имеют тенденцию к снижению для обеих партий изделий. При повышении парциального давления кислорода  $n_2$  достигает постоянной величины примерно 2,05 и не зависит от температуры подложки. Аналогичные данные получены для тонких пленок чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$  и для монокристаллов  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

Поведение  $n_1$  различно в двух партиях. Для партии нагретых подложек при низких давлениях кислорода хотя  $n_1$  и ниже  $n_2$ , но

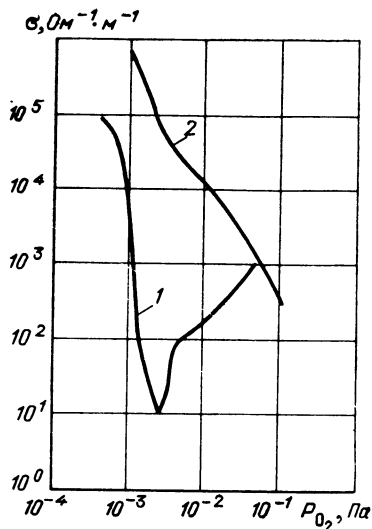


Рис. 2.7. Зависимости удельной проводимости пленки  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (молярная концентрация  $\text{SnO}_2$  в материале 9%) от парциального давления кислорода  $P_{\text{O}_2}$ .

1 — полученной на подложке при комнатной температуре; 2 — нагретой до  $300^\circ\text{C}$

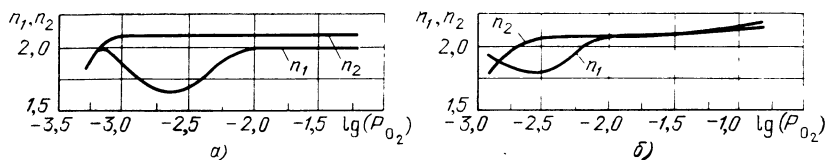


Рис. 2.8 Зависимость показателя преломления пленки  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ , полученной на подложке при комнатной температуре (а) и нагретой до  $300^\circ\text{C}$  (б), от парциального давления кислорода:

$n_1$  — показатель преломления верхней поверхности пленки;  $n_2$  — границы раздела «пленка — подложка»

разница не такая значительная, как при комнатной температуре. При повышении  $P_{\text{O}_2}$  показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  становятся одинаковыми.

Рассеяние света на поверхности пленки определяется ее шероховатостью. Пленки, распыленные на нагретые подложки, получаются более гладкими.

В работе [29] исследуется влияние соотношения количества распыленных  $\text{In}$  и  $\text{Sn}$  на удельное сопротивление и прозрачность пленок  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ , полученных ВЧ-распылением. При концентрации  $\text{Sn}$  в диапазоне  $10 \dots 50\%$   $\rho$  достигает минимального значения  $10^{-5}$  Ом·см, а прозрачность пленки толщиной  $0,5$  мкм составляет  $80\%$ . В [35] прозрачность пленки  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  увеличивается до  $90\%$  с увеличением концентрации  $\text{In}_2\text{O}_3$  до  $91\%$ .

Снижение удельного сопротивления достигается отжигом окисных пленок в потоке водорода, аргона или на воздухе с последующим охлаждением. В пленках, обработанных в водороде при температуре  $633$  К, падение сопротивления имеет более быстрый характер, чем в аргоне. Результаты обработки на воздухе показаны на рис. 2.9. При увеличении температуры от  $673$  до  $873$  К сопротивление пленки проходит через максимум. Такое поведение объясняется тем, что в низкотемпературной области скорость увеличения сопротивления определяется скоростью диффузии кислорода. Падение сопротивления в высокотемпературной области связано с равновесной концентрацией кислорода в пленке.

Применение ионных пучков для нанесения окисных пленок позволяет получить плотно упакованные пленки контролируемой толщины. В [36] ионным пучком, полученным с помощью дуоплазматрона, были изготовлены пленки  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  из порошковой мишени при  $P_{\text{O}_2} = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па и температуре подложки  $620 \dots 670$  К.

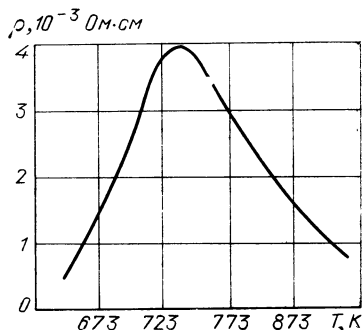


Рис 2.9. Влияние температурной обработки на воздухе пленки  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  на ее удельное сопротивление

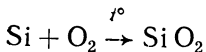
## 2.5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ Si

Как было отмечено в § 2.1, к диэлектрическим пленкам, используемым для создания МДП-структур, предъявляются требования высокой электрической прочности, удельного сопротивления, механической прочности и отсутствия дефектов. Наиболее подходящим материалом по этим признакам, удовлетворяющим требованиям планарной технологии и нашедшим широкое применение в промышленности, является  $\text{SiO}_2$  [1].

Диэлектрические пленки получают методами, аналогичными описанным в § 2.4. Наибольшее применение получили: химическое осаждение из паровой фазы, термическое окисление, анодирование, электронно-лучевое испарение, резистивное напыление в атмосфере кислорода, метод ионно-плазменного распыления.

С точки зрения возможности создания совершенной границы раздела Д—П наиболее перспективным является получение  $\text{SiO}_2$  на поверхности Si методом его термического окисления, с помощью которого можно получить границу раздела Si— $\text{SiO}_2$  с плотностью поверхностных состояний  $N_s$  менее  $10^{10} \text{ см}^{-2}$  [25].

Образование пленки окисла в атмосфере кислорода описывается реакцией



и происходит в три последовательных этапа:

поступление кислорода в уже выращенный окисел;

диффузия кислорода сквозь окисел;

реакция кислорода с кремнием на поверхности раздела, при которой образуется  $\text{SiO}_2$ .

На конечное зарядовое состояние границы раздела Si— $\text{SiO}_2$  помимо качества предварительной очистки поверхности полупроводника оказывают влияние чистота условий процесса окисления, режим термического окисления (температура окисления, скорость охлаждения, время окисления).

На рис. 2.10 приведены кинетические зависимости изменения заряда в окисле при термическом окислении во влажном и сухом кислороде от времени и температуры [37]. Окислы, полученные во влажном кислороде, обладают большим зарядом и меньшей плотностью поверхностных состояний.

Большое влияние на качество диэлектрика оказывает диффузия примесей из стенок реактора, т. е. чистота кварцевых реакторов в значительной степени определяет содержание быстродиффундирующих примесей в полупроводниковых структурах, способствующих росту заряда на границе раздела Si— $\text{SiO}_2$ . Применение кварцевых труб с двойными стенками позволяет существенно снизить концентрацию загрязнений в реакторе. Однако содержание ионов натрия велико, поэтому для получения высококачественных диэлектрических слоев перед процессом окисления и после его

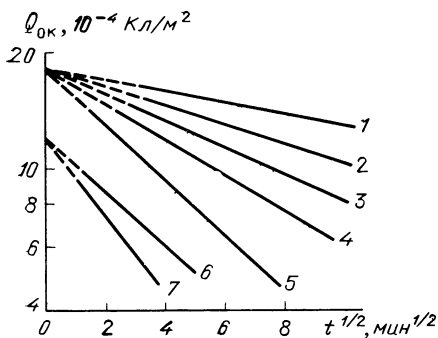


Рис. 2.10. Кинетические зависимости изменения заряда  $Q_{ок}$  в процессе окисления в сухом (2, 4), влажном (1, 3, 5) кислороде и отжига в аргоне (6, 7) от времени:

1 — при температуре 950 °С; 2, 7 — 1100 °С; 3 — 1050 °С; 4, 5 — 1200 °С; 6 — 1000 °С

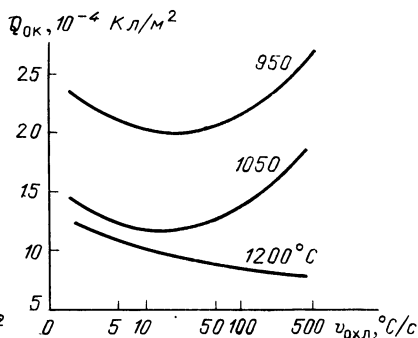


Рис. 2.11. Влияние скорости охлаждения  $v_{охл}$  и температуры окисления во влажном кислороде на заряд  $Q_{ок}$

окончания реактор длительное время продувают газообразным HCl.

Улучшению электрофизических свойств системы Si—SiO<sub>2</sub> способствует термическое окисление в хлорсодержащих средах. Добавление 0,1... 6% хлора и его соединений в окислительную атмосферу приводит к уменьшению зарядов и дефектов в окисле, снижению  $N_s$ , повышению пробивного напряжения МДП-структур, что обусловлено пассивирующим действием хлора, входящего в состав окисла [38].

Кроме улучшения свойств окисла при «хлорном» окислении происходит и улучшение свойств кремния: увеличение времени жизни носителей, уменьшение количества и размеров дефектов упаковки. Такое улучшение параметров кремния связано с нейтрализацией нежелательного влияния примесей щелочных, переходных и тяжелых металлов, которые, взаимодействуя с хлором, удаляются в виде летучих соединений или превращаются в нейтральные комплексы, не влияющие на характеристику приборов.

Наряду с созданием технологических условий, исключаящих загрязнение диэлектрика легкодиффундирующими примесями, используется метод гетерирования примесей с переводом их в электрически неактивное состояние путем захвата на ловушки на границе двух диэлектриков. Так, использование фосфоросодержащих стекол (ФСС) в качестве пассивирующих покрытий снижает эффективный заряд в системе Si—SiO<sub>2</sub> и повышает стабильность диэлектрика [38].

На свойства получаемой пленки SiO<sub>2</sub> существенное влияние оказывает и режим охлаждения. На рис. 2.11 представлены зависимости заряда в окисле от изменения скорости охлаждения во влажном кислороде при различной температуре окисления [37]. Монотонное увеличение заряда со снижением скорости охлажде-

ния окисла, выращенного при температуре  $1200^{\circ}\text{C}$ , означает полную релаксацию структурных механических напряжений при данной температуре.

Формирование определенных электрофизических свойств системы  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  объясняется генерацией и перераспределением кислородных вакансий и пор в окисле, которые происходят в процессе термического окисления под действием высоких температур и релаксации внутренних механических напряжений. Возникновение пор является следствием генерации и накопления кислородных вакансий и последующего распада их твердого раствора. Причем химическая обработка и атмосфера на начальном этапе окисления задают концентрацию центров распада, температура окисления — концентрацию вакансий и количество пор, а скорость охлаждения — конечную концентрацию и средний размер пор. Так, при повышении температуры окисления в пленке образуется меньшее количество крупных пор, а с уменьшением скорости охлаждения увеличивается средний размер пор и уменьшается их общее количество.

Для создания границы раздела  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  с заданными характеристиками (величина встроенного заряда и плотность поверхностных состояний), а следовательно и фоточувствительного МДП-прибора с требуемыми параметрами, необходимо исследовать границу раздела: ширину переходной области; ее структуру; дефекты, возникающие при образовании границы раздела в зависимости от условий ее образования.

Для физико-химического анализа поверхности твердого тела используются методы ионной и электронной спектроскопии (ИЭС), основанные на изучении взаимодействия поверхностных атомов с первичным пучком частиц путем исследования вторичного пучка частиц, излучаемых или отражаемых поверхностным слоем. В настоящее время применяется целый ряд методов ИЭС: масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ), электронная оже-спектроскопия (ЭОС), рентгеновская и ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС и УФЭС), резерфордское обратное рассеяние (РОР) и др. [39].

Одним из наиболее удобных методов исследования границы раздела  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  является метод ионно-оптической спектрометрии (МИОС). Это прямой метод определения элементного состава твердого тела. Он может успешно использоваться для определения состава и количества примесей в твердых телах, изучения профилей распределения имплантированных и диффузионных примесей в различных материалах, контроля состояния и химического состава поверхности; МИОС является разрушающим методом и дает возможность проводить послойный анализ.

Наиболее ценную информацию о химической связи на поверхности дает метод РФЭС, который состоит в получении фотоэлектронных спектров поверхности энергораспределения фотоэлектронов, эмитируемых образцом при облучении его потоком монохроматического рентгеновского излучения. При исследовании стехиометрии окисных пленок по этапам окисления наблюдается корреляция между данными МИОС и РФЭС: в термически выращенных пленках с изменением толщины наблюдаются отклонения распределения заряда между кремнием и кислородом по сравнению с распределением заряда в стехиометрической двуокиси кремния в пределах 10...20% в сторону избыточного процент-

ного содержания кремния, в результате чего можно утверждать, что пленка окисла, термически выращенная на поверхности Si, имеет многослойную структуру, соответствующую  $\text{SiO}_x$ , где  $x < 2$  (в [39] принимает значения 0,5; 1 и 1,5).

Слоистость структуры окисла аналогична наличию на поверхности сложного диэлектрика, что приводит к значительному изменению спектра ловушечных уровней, накоплению заряда в диэлектрике и появлению нестабильности электрофизических характеристик МДП-структур при повышении напряженности электрического поля. Поэтому наиболее предпочтителен для МДП-приборов, работающих при высоких напряженностях электрического поля, термический окисел, полученный в сухом кислороде, обладающий наиболее однородным составом.

## 2.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$

Несмотря на повышенный интерес разработчиков полупроводниковых приборов к широкозонным полупроводниковым соединениям  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , создание на их основе высококачественных МДП-приборов проблематично. Это связано прежде всего с технологическими трудностями получения совершенной границы раздела Д—П (хотя бы с плотностью поверхностных состояний, соответствующей границе раздела Si— $\text{SiO}_2$ ).

Окисление бинарных полупроводников — значительно более сложный процесс, чем окисление кремния. Высокотемпературные методы получения диэлектрических пленок, используемые в кремниевой технологии, для бинарных полупроводников  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  использоваться не могут из-за летучести элементов V группы при высоких температурах, нарушения состава диэлектрика и его низких диэлектрических качеств. Поэтому особую актуальность приобретают исследование химических процессов, протекающих на поверхности  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , и разработка на его основе оптимальных низкотемпературных технологических процессов получения диэлектрических покрытий.

Глубокое изучение химической природы поверхностных состояний на поверхности Si, выявление механизмов их образования позволили найти способы их нейтрализации. Так, правильное толкование природы высокой плотности состояний на поверхности кремния ( $10^{-14}$  см<sup>-2</sup>), как оборванных связей Si, позволило разработать способ пассивации, замыкания связей — термическое окисление Si в «сухом» кислороде, в результате которого плотность состояний снижается на четыре порядка.

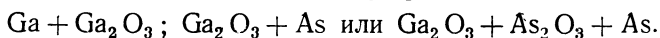
Доказательство того, что подвижный заряд обусловлен ионами щелочных металлов (в основном Na), а положительный встроенный заряд — однократно либо двукратно ионизированными атомами Si в тонком окисном слое, прилегающем к полупроводнику, позволило нейтрализовать указанные дефекты путем окисления полупроводника в присутствии хлора. Высокотемпературное «хлорное» окисление позволяет удалить натрий с поверхности полупроводника в виде летучего хлорида и нейтрализовать ионы кремния (см. § 2.5).



В [40] проведен термодинамический анализ фазового состава систем  $A^{III}B^V$  — кислород для «тонких» (около 2 нм) и «толстых» оксидных слоев (около 100 нм), полученных и термическим, и анодным окислением. Распределение фаз по толщине оксидной пленки на GaAs зависит от соотношения As : Ga.

Особый интерес представляет химия тонких (около 2 нм) оксидных пленок, самопроизвольно возникающих на поверхности GaAs, InAs, InSb после различных химических обработок, так как при нанесении на поверхность бинарного полупроводника чужеродных диэлектриков (например,  $SiO_2$  или  $Si_3N_4$ ) все равно происходит окисление поверхности и параметры электронных приборов будут зависеть от состава и строения тонких оксидных пленок [40].

Согласно данным термодинамического расчета на границе с полупроводником существуют две стабильные фазы:  $A + A_2O_3$  при избытке на поверхности элемента A или  $B + A_2O_3$  при избытке элемента B. Для GaAs согласно [40] имеет место сочетание

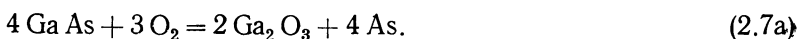


Из-за высокой скорости окисления элементов III группы в условиях комнатной атмосферы на поверхности возможно полное превращение избыточного элемента A в его полуторный оксид и состав поверхности представляет собой  $A_2O_3 + AB$ . При дальнейшем окислении полупроводника путем прямого термодинамически выгодного процесса окисления полупроводника кислородом



на его поверхности возникает элемент V группы и состав пленки становится сочетанием  $A_2O_3 + B + AB$ .

Реакция образования As на поверхности GaAs по типу (2.7) имеет вид



В подтверждение термодинамических расчетов с помощью ионной и электронной спектроскопии обнаружено появление на границе раздела полупроводник — окисел металлоидов V группы: мышьяка в арсенидах и сурьмы в антимонидах, существенно ухудшающих параметры МДП-структур [39].

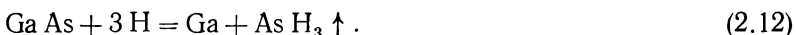
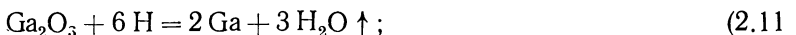
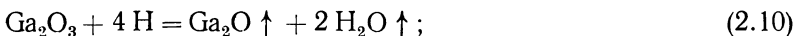
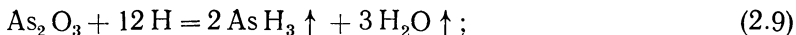
Высокочувствительными электрохимическими методами фазового анализа удалось установить, что в состав оксидных пленок входят три равновесные фазы:  $A_2O_3 + B_2O_3 + B$ , причем в тонких пленках всегда образуется элемент V группы с концентрацией  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$  [40], который обуславливает на поверхности высокую плотность состояний, повышенную скорость рекомбинации неравновесных носителей и большую утечку токов.

Таким образом, несмотря на высокие диэлектрические свойства собственных оксидных пленок толщиной около 100 нм,  $\rho = 10^{14} \dots 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ,  $E_{пр} \geq 10^6 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ , система  $A^{III}B^V$  не позволяет получить высоких характеристик приборов. Кроме того, собствен-

ные оксидные пленки легко растворяются даже в слабых кислотах.

Одним из решений указанной проблемы является полное удаление тонких оксидных пленок с последующей пассивацией поверхности, т. е. связыванием свободного элемента III группы в его нитрид.

Обработка поверхности полупроводника проводится в плазме водорода. Так как плазма состоит на 60% из атомарного водорода, то возможно протекание восстановительных процессов, которые для GaAs имеют вид:



В связи с протеканием процессов (2.11) и (2.12) необходима дополнительная обработка поверхности в плазме азота с целью образования широкозонного соединения GaN ( $\Delta E = 3,5$  эВ).

После восстановления и нитридации наносятся диэлектрические пленки, не содержащие кислорода, так как его наличие в газообразной среде приведет к окислению поверхности полупроводника.

В качестве диэлектрика предлагается нитрид кремния, получаемый из смеси моносилана и аммиака. Во избежание образования водяных паров в результате взаимодействия со стенками реакционной камеры необходимо покрывать внутренние стенки реактора диэлектриками, не содержащими кислорода.

Использование в качестве диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$  имеет свои недостатки, так как кремний может легировать поверхность GaAs и создавать в запрещенной зоне полупроводника два мелких уровня: донорный с  $\Delta E \approx 0,006$  эВ и акцепторный с  $\Delta E \approx 0,06$  эВ.

Кроме того, использование кремний-элементоорганических соединений в качестве исходных веществ для получения диэлектриков обуславливает возможность легирования поверхности  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  как кремнием, так и углеродом. Так, углерод создает в GaAs акцепторный уровень с  $\Delta E \approx 0,019$  эВ.

Наиболее перспективными диэлектриками являются нитриды, содержащие изовалентные анионы и катионы, например GaN, которые дают сравнительно низкую плотность поверхностных состояний (см. § 2.3) [21].

## 2.7. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МДП-СТРУКТУР С ЖИДКИМИ КРИСТАЛЛАМИ

Структура МДП-ЖК — это преобразователь изображения типа МДПДМ, состоящий из фоточувствительной (МДП) и светомодулирующей (ЖК) частей.

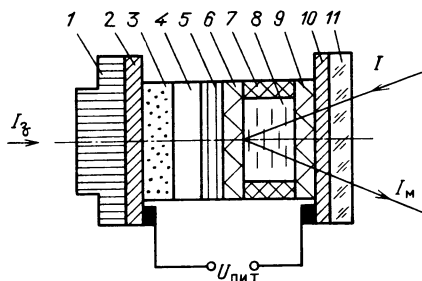


Рис. 2.12. Конструкция структуры МДП-ЖК:

1 — ВОП; 2, 10 — прозрачный электрод  $\text{In}_2\text{O}_3$ ; 3 — оптический клей; 4 — полупроводниковая пластина; 5 — диэлектрическое зеркало; 6, 9 — ориентирующее покрытие; 7 — диэлектрическая прокладка; 8 — ЖК; 11 — стеклянная подложка

Конструктивно МДП-структура формируется на входной стеклянной подложке со стороны нанесенного на нее прозрачного электрода. Светомодулирующая часть представляет собой ЖК-ячейку (ЖКЯ), опорными стенками которой являются поверхности пластины полупроводника МДП-структуры и выходной стеклянной подложке со стороны прозрачного электрода (рис. 2.12).

В результате такой конструкции технология изготовления структуры МДП-ЖК, схема которой изображена на рис. 2.13, имеет ряд особенностей.

**Формирование МДП-структуры.** При использовании в качестве слоя полупроводника монокристаллической пластины для формирования МДП-структуры на стеклянной подложке применяют оптический клей, который может выполнять роль диэлектрика [41].

Неразборная конструкция структуры предусматривает приклейку полупроводниковой пластины к подложке полированной и очищенной стороной, а обработка второй стороны пластины осуществляется в составе склейки. Такой способ обработки позволяет получить слой полупроводника толщиной до 20 мкм без ущерба для его механической прочности.

Для стабилизации поверхностных свойств полупроводника, а также для создания более совершенной границы раздела Д—П перед приклейкой на полупроводниковую пластину целесообразно нанести тонкую диэлектрическую пленку (например,  $\text{SiO}_2$ ).

Авторами книги разработана технология изготовления МДП-структуры, где клей в качестве слоя диэлектрика не используется. На полированную сторону полупроводниковой пластины вакуумным способом последовательно наносят диэлектрический слой  $\text{SiO}_2$  и слой прозрачного электрода  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Изготовленную таким образом МДП-структуру приклеивают к стеклянной подложке со слоем  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Электрический контакт между двумя ЭППП осуществляется с помощью капли токопроводящего клея (например, ТПК-1), нанесенной по периферии площади полупроводниковой пластины. Этим достигается соединение структуры с генератором питания.

При обязательном выполнении требований, предъявляемых к диэлектрическим слоям (см. § 2.1), к оптическому клею предъявляются и технологические требования, которые позволяют свести к минимуму деформации склеенного узла (склейки) при последующей термической и механической обработке.

К таким требованиям относятся:

минимальная способность к деформации соединяемых деталей в процессе склеивания;

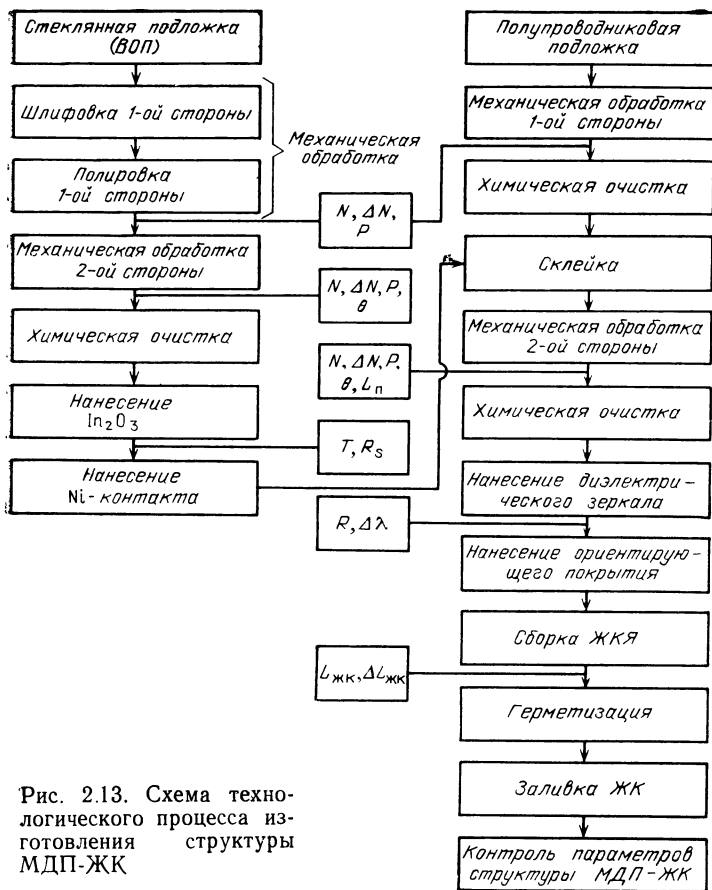


Рис. 2.13. Схема технологического процесса изготовления структуры МДП-ЖК

механическая прочность;  
химическая устойчивость и влагостойкость;  
стойкость к температурным воздействиям в процессе изготовления и эксплуатации.

Близость показателей преломления клея и соединяемых деталей (особенно с показателем преломления монокристалла).

Когда склеиваемые детали имеют различные физико-механические свойства (например, разные величины ТКЛР), то при изменении температуры в процессе склеивания они имеют различные напряжения. Так, при остывании склейки возникает напряженное состояние, которое не снимается дополнительными термообработками. Распределение напряжения зависит от того, как формируется склеивающий слой в результате полимеризации (усадка). На рис. 2.14 показано распределение напряжений, вызываемых усадкой клея ОК-72 ФТ, из которого видно, что этот клей вызывает отрицательные напряжения в склеиваемых деталях, неравномерно сжимая их в процессе полимеризации [42, 43]. Увеличе-

ние содержания пластификатора (вератона) приводит к уменьшению напряжений. Под действием напряжений в склеенной МДП-структуре происходит деформация тонкого слоя полупроводника; при последующей механической обработке в составе склейки толщина полупроводника получается неравномерной, что приводит к разбросу параметров структуры МДП-ЖК по рабочей площади. В общем виде отклонение поверхности склеиваемых деталей от плоскости в результате приклейки и охлаждения до определенной температуры определяется сложным выражением, представленным в [43].

Требования к механической прочности обусловлены необходимостью последующих шлифовки и полировки полупроводниковой пластины в составе склейки.

Недостаточная химическая устойчивость и низкая влагостойкость применяемого клея приводят к появлению расклеенных участков на поверхностях деталей, что недопустимо. Расклейки по контуру полупроводниковой пластины могут возникать при протирке и промывке склеек в растворителях. То есть применение оптического клея при формировании МДП-структуры накладывает ограничение на способы очистки поверхности полупроводника перед операцией нанесения диэлектрического зеркала.

Возможны расклейки при воздействии на клеевой шов влаги. Эпоксидные смолы относительно стойки к гидролизу, и основной причиной снижения прочности склейки является нарушение адгезии клея к подложке в результате внедрения молекул воды между клеем и подложкой. Влагостойкость клея ОК-72 ФТ зависит от содержания вератона. С увеличением содержания вератона количество расклеек в процессе эксплуатации уменьшается.

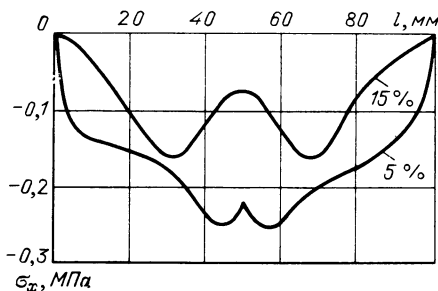


Рис. 2.14. Зависимость распределения напряжений, вызываемых усадкой клея ОК-72 ФТ вдоль склейки слоя образца, от содержания пластификатора

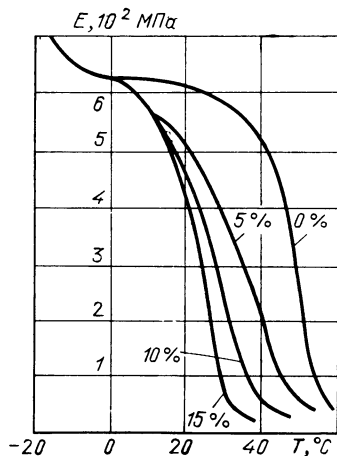


Рис. 2.15. Температурная зависимость модуля упругости клея ОК-72 ФТ с различным содержанием вератона

Стойкость к температурным воздействиям определяется температурной зависимостью физико-механических характеристик клея, вызывающей напряженность и деформацию склеек. На рис. 2.15 изображена температурная зависимость модуля упругости клея ОК-72 ФТ с различным содержанием вератона [42].

В технологии изготовления МДП-структур на основе монокристалла GaAs на подложке из стекла К-8 или на волоконно-оптической пластине (ВОП) наиболее подходит по своим характеристикам клей ОК-72 ФТ: вязкость 0,35 ... 0,50 Па·с; показатель преломления  $n=1,578 \dots 1,582$ ; минимальная усадка 3,6%; интервал рабочих температур  $-170 \dots 130^\circ\text{C}$ . Этот клей не вызывает заметной деформации склеенных деталей после нагрева до  $+80^\circ\text{C}$  [19], что обуславливает потребность в низкотемпературной технологии последующих операций: очистки поверхности полупроводника, нанесения диэлектрического зеркала, ориентирующего покрытия, а также накладывает ограничения на температурный режим герметизации ЖКЯ.

Для устранения указанных недостатков технологического процесса формирования МДП-структуры актуальна разработка бесклеевого способа соединения монокристалла GaAs со стеклянной подложкой или ВОП.

Привлекательный метод глубокого оптического контакта [19] в силу ряда технологических трудностей на практике не реализуется. Для создания бесклеевого соединения методом термокомпрессионной сварки необходимо подобрать материал стеклянной подложки [44]. Наиболее близкую дилатометрическую кривую к GaAs (ориентация  $\langle 100 \rangle$ ) имеет боросиликатное стекло марки А-54 (рис. 2.16). На рис. 2.17 приведен режим термообработки соединения GaAs со стеклянной подложкой и ВОП, обеспечивающий минимальные напряжения сжатия в полупроводнике. Ступенчатый режим отжига после термокомпрессионной сварки необходим для соединения GaAs с ВОП, так как позволяет последовательно снять напряжения, возникшие в жиле и оболочке.

МДП-структура формируется последовательным нанесением на полупроводник перед термокомпрессионной сваркой слоев  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ . Для вывода

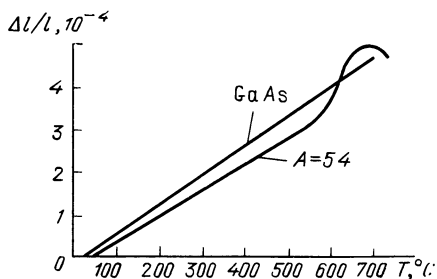


Рис. 2.16. Зависимости относительно удлинения GaAs и стекла А-54 от температуры

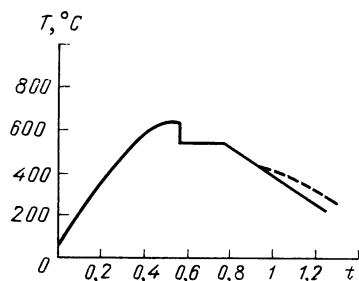


Рис. 2.17. Режим термообработки соединения GaAs со стеклом (—) и ВОП (-----)

электрода стравливают периферийные участки GaAs и SiO<sub>2</sub> сернокислым травителем и плазмохимической обработкой соответственно.

Характеристики полученной таким способом структуры МДП-ЖК при толщине полупроводника 50 мкм (толщина слоя ЖК-654 10 мкм) имеют следующие значения: разрешающая способность 15 мм<sup>-1</sup>, чувствительность 10<sup>-4</sup> Вт/см<sup>2</sup>, τ<sub>вкл</sub> = 4 · 10<sup>-2</sup> с и τ<sub>выкл</sub> = 3 · 10<sup>-1</sup> с.

Важно отметить, что исключение из МДП-структуры клеевого слоя позволяет повысить оптическую однородность на 20 ... 30%.

**Изготовление диэлектрических зеркал.** Для обеспечения высоких характеристик преобразователя изображения по чувствительности, разрешающей способности, дифракционной эффективности необходимо предотвратить засветку полупроводника считывающим излучением. Поэтому в конструкции структуры МДП-ЖК (см. рис. 2.12) вводится диэлектрическое зеркало. Оно представляет собой интерференционный отражающий фильтр на заданную длину волны считывающего света λ<sub>сч</sub> и состоит из чередующихся слоев толщиной λ<sub>сч</sub>/4 с высоким и низким показателями преломления. Причем максимальные коэффициенты отражения и ширина спектральной области зависят от соотношения показателей преломления и числа слоев.

В качестве материала для диэлектрических зеркал, отражающих в спектральной области 0,43 ... 0,9 мкм, широкое применение нашли тугоплавкие окислы ZrO<sub>2</sub>, ThO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>. Покрытия на их основе обладают высокой механической прочностью, влагостойкостью, термостойкостью и имеют коэффициент отражения в зависимости от числа слоев до 99,8%.

Из указанных пленкообразующих окислов наибольшей разницей в показателях преломления обладают слои SiO<sub>2</sub> (n = 1,45 ... 1,46) и TiO<sub>2</sub> (n = 2,4) [19], что позволяет при малом количестве слоев получать зеркальные покрытия с высоким коэффициентом отражения. Кроме того, при использовании слоя SiO<sub>2</sub> оптической толщиной λ<sub>сч</sub>/2 в качестве защитного слоя зеркального покрытия повышаются его механическая прочность и химическая стойкость, а значит, стабильность оптических характеристик.

Для выполнения требований низкотемпературной технологии диэлектрическое зеркало наносят методом термического или электронно-лучевого испарения при нагреве подложки до температуры не выше 80° С.

Известно, что критерием качества диэлектрического зеркала может быть показатель преломления составляющих его слоев, на который оказывают влияние параметры процесса испарения:

$$n = f(T_{\text{п}}; P_{\text{ост}}; v_{\text{н}}; P_{\text{O}_2}),$$

где T<sub>п</sub> — температура подложки; P<sub>ост</sub> — остаточное давление в камере; v<sub>н</sub> — скорость напыления; P<sub>O<sub>2</sub></sub> — парциальное давление кислорода.

На рис. 2.18 представлен спектр пропускания шестнадцатислойного зеркала SiO<sub>2</sub>—TiO<sub>2</sub> (T = 80° С; P<sub>ост</sub> ≤ 1,33 · 10<sup>-2</sup> Па;

$v_{\text{H}}^{\text{SiO}_2} = 10 \text{ \AA}/\text{с}$ ;  $v_{\text{H}}^{\text{TiO}_2} = 2 \text{ \AA}/\text{с}$ ;  $P_{\text{O}_2} = (6 \dots 8) \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ . Коэффициент отражения равен  $R = 99,6\%$ , а относительная полуширина составляет  $\Delta\lambda_{0,5}/\lambda_{\text{сч}} = 0,26$ .

Структура зеркала имеет следующий вид:

16 НВНВ... НВНВ2Н, где Н — слой  $\text{SiO}_2$  толщиной  $\lambda_{\text{сч}}/4$ ;

В — слой  $\text{TiO}_2$  толщиной  $\lambda_{\text{сч}}/4$ .

С целью предотвращения растекания заряда на границе раздела Д—П первым наносится слой  $\text{SiO}_2$ , имеющий большее значение поверхностного сопротивления  $R_s$ .

В работе [45] значение поверхностного сопротивления слоя диэлектрического зеркала в Ом/□

$$R_s \geq 2 \rho_{\text{ЖК}} L_{\text{ЖК}}/a^2, \quad (2.13)$$

где  $\rho_{\text{ЖК}}$  — удельное сопротивление ЖК, Ом·см;  $L_{\text{ЖК}}$  — толщина ЖК, см;  $a$  — предельный разрешающий элемент, см.

В [45] представлена возможность реализации зеркального покрытия Si— $\text{SiO}_2$ . Большое различие в показателях преломления ( $n_{\text{Si}} = 4,0$ ;  $n_{\text{SiO}_2} = 1,45$ ) способствует высокому коэффициенту отражения ( $R > 90\%$ ) при использовании 12...14 слоев. Кроме того, применение слоев Si в зеркале позволяет осуществить максимальную светоблокировку мощного считывающего излучения.

Трудность создания совершенной границы раздела П—Д в устройствах на основе МДП-структур с полупроводниками  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  (см. § 2.6) обуславливает необходимость исследования влияния конструкторско-технологических факторов на параметры структуры МДП-ЖК.

В [46] исследуется влияние состояния границы раздела полупроводник — диэлектрическое зеркало в структуре МДП-ЖК с монокристаллическим GaAs на ее динамические характеристики.

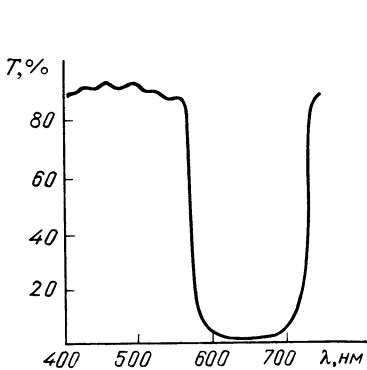


Рис. 2.18 Спектр пропускания шестнадцатислойного зеркала  $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2$

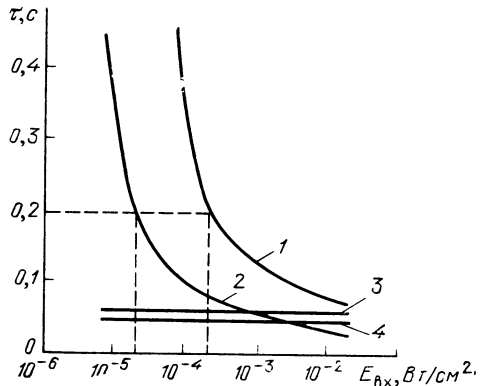


Рис. 2.19. Зависимость быстродействия структуры МДП-ЖК от освещенности:

1, 3 — времена включения и выключения электрооптического отклика; 2, 4 — времена включения и выключения при наличии промежуточного слоя



При высоких уровнях интенсивности записывающего света время включения электрооптического отклика ПВМС может быть значительно меньше времени выключения. Наличие диэлектрического зеркала, представляющего собой шестнадцатислойное покрытие  $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2$ , снижает быстродействие ПВМС в основном за счет увеличения времени включения отклика, и при освещенности  $E_{\text{вх}}=10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> оно достигает 0,2 с (рис. 2.19). То есть время включения ограничивает работу ПВМС в реальном масштабе времени при довольно высоких уровнях освещенности.

Контрольные измерения временных характеристик ПВМС без диэлектрического зеркала на поверхности полупроводника показывают, что времена включения и выключения отклика не ограничивают быстродействия модулятора. Исследование вольт-фарадных характеристик структур  $\text{GaAs—SiO}_2\text{—TiO}_2$  показывает, что состояние границы раздела полупроводник — диэлектрическое зеркало характеризуется высокой плотностью ловушек  $N_f=10^{13}$  см<sup>-2</sup> при напряжении плоских зон  $U_{\text{FB}}=20 \dots 30$  В. Это означает, что на накопление заряда, необходимого для включения электрооптического отклика, требуется затратить больше времени при той же записывающей освещенности.

Улучшение границы раздела  $\text{GaAs—}$  диэлектрическое зеркало достигается нанесением на полупроводник промежуточного слоя  $\text{CdTe}$  толщиной 1,5 ... 2 мкм, являющегося одновременно светоблокирующим слоем для оптической изоляции полупроводника от прошедшего через диэлектрическое зеркало считывающего света. Кривая 2 зависимости  $\tau_{\text{вкл}}=f(E_{\text{вх}})$  на рис. 2.19 показывает, что быстродействие структуры МДП-ЖК с промежуточным слоем  $\text{CdTe}$  увеличивается на порядок благодаря тому, что слой  $\text{CdTe}$  защищает полупроводник от нежелательного влияния встроенного в диэлектрическом зеркале заряда на изгиб зон  $\text{GaAs}$ .

**Изготовление ЖКЯ.** Качество таких параметров преобразователя, как контраст преобразованного изображения, разрешающая способность, их равномерность по площади, во многом зависит от технологических факторов: толщины ЖК слоя, плоскопараллельности, плоскостности, упорядоченности молекул ЖК в исходном состоянии, наличия газовых пузырей и других включений. Если плоскостность определяется качеством механической обработки опорных поверхностей ЖКЯ, то остальные характеристики зависят от качества сборки.

Технология сборки предусматривает выбор материала, создание опорных поверхностей с однородной ориентацией молекул ЖК, получение плоскопараллельного воздушного зазора заданной толщины, заливку в этот зазор ЖК и герметизацию ЖКЯ по периметру.

Одним из основных требований при выборе материалов для ЖКЯ является инертность к ним ЖК в процессе изготовления и эксплуатации. Практически все ЖК материалы инертны к стеклу, проводящим покрытиям ( $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}_2$ ), ориентирующим пленкам

из монооксида и оксида кремния, монооксида германия, герметизирующим материалам на основе стеклофриты и стеклоцементов, металлическим припоям. Применение герметиков и ориентирующих слоев из органических материалов (поливиниловые спирты, полиамиды, эпоксидные клеи) из-за их частичного физико-химического взаимодействия с ЖК ограничено [47], так как в процессе эксплуатации ЖКЯ вызывает падение контраста, разориентацию ЖК, рост потребляемых токов. Поэтому при разработке технологии необходимо проведение типовых испытаний.

**Ориентация ЖК.** В структурах МДП-ЖК возможно использование разных классов ЖК (нематических, холестерических, смектических, ферроэлектрических) с разными типами электрооптических эффектов (полевые эффекты, динамическое рассеяние, эффект «гость — хозяин» и др.). Технологические приемы изготовления ЖКЯ для каждого класса ЖК несколько отличны [48, 49]. Ниже рассмотрим технологию изготовления ЖКЯ из нематических ЖК.

Для придания слою ЖК определенных электрооптических свойств его молекулярная структура должна быть упорядочена в исходном состоянии гомогенно (планарно) или гомеотропно. Так, при использовании нематических ЖК с положительной диэлектрической анизотропией исходная ориентация директора, соответствующая S-эффекту, должна быть гомогенной (длинные оси молекул ЖК параллельны друг другу и лежат в плоскости слоя).

Имеется несколько способов создания ориентирующей поверхности. Среди них выделяются лучшим ориентированием ЖК такие, в которых применяются промежуточные слои органических и неорганических веществ — механическое натирание и вакуумное напыление под углом к поверхности (косое напыление).

При механическом натирании исходный материал (раствор поливинилового спирта ПВС при полиимидного лака ПАК-1) наносится на опорные поверхности подложек центрифугированием с последующей термической обработкой и механической натиркой капроновой щеткой [48, 50, 51]. Концентрация материала в растворе, а также скорость вращения щетки и подачи обрабатываемой подложки определяются экспериментально. В результате натирки на полимерной пленке образуется микрорельеф в виде бороздок, который обеспечивает надежную ориентацию молекул ЖК в заданном направлении.

Качество ориентации ЖК при таком способе зависит от физико-химического состояния поверхности подложек. Наличие дефектов в виде царапин, сколов, загрязнений приводит к ухудшению адгезии ориентирующей пленки. Вследствие этого при натирке происходит частичное ее разрушение. Для устранения этого недостатка увеличивают толщину ориентирующего слоя, повышая концентрацию пленкообразующих растворов или используя в качестве подслоя оксид кремния, которая улучшает адгезию ориентирующего покрытия [51].

При использовании ПВС или ПАК-1 возможна регенерация подложек при наличии брака на какой-либо операции изготовления ЖКЯ.

Перспективным материалом для ориентирующего слоя являются пленки  $\text{SiO}_2$ , так как они исключают появление на поверхности подложек ионов щелочных металлов, которые взаимодействуют с ЖК, нарушая его ориентацию.

Более воспроизводимой способностью ориентации молекул ЖК по сравнению с натиркой обладает способ косоугольного напыления тонких пленок ( $\text{SiO}$ ,  $\text{GeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и др.), полученных термическим или электронно-лучевым осаждением.

При падении пучка атомов на подложки под углом вначале процесса конденсации структура образующейся пленки мелкодисперсна и не упорядочена. Наличие градиента концентрации налетающих частиц распыляемого материала и взаимное затенение островков приводит к анизотропии их роста и образованию столбчатой структуры, ориентированной по направлению напыления. Наличие на поверхности косоугольно напыленных пленок относительно однородной текстуры объясняет выравнивание в том же направлении молекул ЖК.

Основное влияние на структуру пленок оказывают угол напыления, скорость осаждения и температура подложки.

Между углами роста текстуры  $\theta$  различных материалов и углом напыления  $\varphi$  (угол между молекулярным пучком и нормалью к подложке) существует зависимость. При напылении  $\text{TiO}_2$  под углом  $\varphi$ , большим  $83^\circ$ , получается столбчатая структура с  $\theta$ , равным  $45^\circ$ – $50^\circ$  [52].

Угол наклона директора ЖК к подложке всегда превышает  $\theta$  на разные значения. В [53] при напылении пленок  $\text{GeO}$  под углом к поверхности, равным  $5^\circ$ – $8^\circ$ , угол директора ЖК составляет  $20^\circ$ – $25^\circ$ .

Сложный характер анизотропно-упругого взаимодействия ЖК с поверхностью и процессов формирования текстуры поверхности наблюдается при напылении под углом  $\varphi$ , меньшим  $65^\circ$ . Уменьшение угла напыления  $\varphi$  приводит к возрастанию плотности потока частиц испаряемого материала, что приводит к повышению концентрации осаждаемых частиц, а следовательно, и формированию пленок с более плотной мелкозернистой структурой. В [54] при косоугольном напылении  $\text{SiO}_2$  при  $\varphi=60^\circ$  ширина каналов столбчатой структуры равна  $20 \text{ \AA}$ , а ширина столбиков —  $60 \text{ \AA}$ , тогда как при  $\varphi=83^\circ$  каналы занимают большую площадь подложки.

Увеличение концентрации зародышей усиливает взаимодействие между ними, направленное на снижение свободной поверхностной энергии, что приводит к взаимной ориентации зародышей. Наличие ориентационного взаимодействия способствует образованию кристаллами цепочек, вытянутых в направлении, перпендикулярном направлению их главной оси, что и определяет ориентацию молекул ЖК перпендикулярно направлению напыления.

На рис. 2.20 показана зависимость угла роста текстуры  $\theta$  от скорости конденсации  $v_k$ , давления остаточных газов  $P_{\text{ост}}$  и температуры подложки на пленках молибдена, полученных при  $\varphi=45^\circ$ .

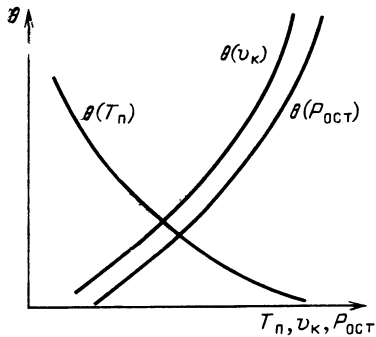


Рис. 2.20. Зависимость угла роста текстуры от скорости конденсации  $\nu_k$ , давления остаточных газов  $P_{ост}$  и температуры подложки  $T_n$

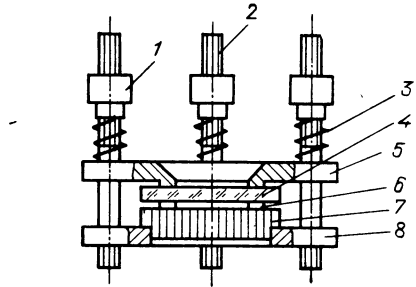


Рис. 2.21. Приспособление для сборки ЖКЯ структуры МДП-ЖК:

1 — прижимная гайка; 2 — шпилька; 3 — пружина, 4 — стеклянная подложка; 5 — крышка с отверстием для визуального контроля; 6 — диэлектрическая прокладка; 7 — ВОП; 8 — основание

При углах напыления, меньших  $25^\circ$ , наблюдается резкое ослабление градиента концентрации налетающих частиц, приводящее к хаотичной ориентации роста кристаллитов. Ориентация такими пленками слоев ЖК не наблюдается.

В последнее время широкое применение получило двойное напыление  $\text{SiO}_2$  под углом к поверхности, заключающееся в том, что ближайший к подложке слой наносится под большим углом к поверхности, а покровный слой — под относительно малым, составляющим прямой угол с плоскостью напыления первого слоя.

Помимо надежной ориентации молекул ЖК, к достоинству такого напыления можно отнести слабую зависимость процесса роста пленок от химического и структурного состояний подложки, что важно для получения одинаковых структурных характеристик пленок, напыленных на диэлектрическое зеркало ( $\text{SiO}_2$ ) МДПД-структуры и электропроводящее покрытие  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  выходной стеклянной подложки [52, 53].

**Создание равномерного зазора.** Помимо параметров ЖК на электрооптические характеристики ЖКЯ оказывают влияние толщина и равномерность слоя ЖК по площади ячейки, которые определяются воздушным зазором между опорными поверхностями.

Требуемая толщина зазора получается с помощью калиброванных прокладок. Для создания зазора толщиной 5...10 мкм в технологии изготовления структуры МДП-ЖК используются фторопластовые прокладки. Способность фторопласта к деформации позволяет регулировать плоскопараллельность зазора и одновременно визуально контролировать ее интерференционным методом. Приспособление для сборки изображено на рис. 2.21.

Для получения зазора толщиной 1...5 мкм применяют вакуумное напыление  $\text{SiO}$  на опорную поверхность стеклянной подложки. При этом невозможно регулировать зазор, а равномерность диэлектрической прокладки по толщине определяется возможно-

стями вакуумной технологии. Более технологична организация планетарного вращения подложки. Фиксация полученного зазора осуществляется с помощью клея-герметика на основе эпоксидной смолы.

**Герметизация ЖКЯ.** Герметизацию ЖКЯ проводят для предохранения ЖК от загрязнений, предотвращения образования газовых пузырей, которые ухудшают качество преобразованного изображения при взаимодействии ЖК с окружающей средой в процессе хранения и эксплуатации. Процесс герметизации состоит из двух этапов.

Вначале, до заливки ЖК в ячейку, клеем-герметиком обмазывают ячейку по периметру (заливочное отверстие остается нетронутым).

После заливки ЖК герметизируют заливочное отверстие. Применение для герметизации эпоксидной смолы обусловлено требованиями низкотемпературной технологии (например, герметизация ячейки стеклофритой осуществляется при температуре 470 ... 500° С, а эпоксидной смолой — при 60° С). Если при обмазывании ячейки по периметру эпоксидной смолой ЖК контактирует с ней после завершения процесса полимеризации и их взаимодействие не наблюдается, то при герметизации заливочного отверстия вопрос ограничения взаимодействия с ЖК усложняется.

Организация вокруг отверстий пленочной системы Fe—Ni—Au [29] с последующей пайкой для данной конструкции структуры МДП-ЖК не технологична. Наиболее приемлем способ герметизации с помощью промежуточной пробки, вставляемой в заливочное отверстие, из материала, инертного к ЖК, с последующей обмазкой клеем-герметиком.

**Заполнение ЖК ячейки.** На оптические параметры приборов существенное влияние оказывает качество заполнения жидким кристаллом тонкого (не более 10 мкм) внутриэлектродного зазора ячейки, которое определяется отсутствием газовых пузырей, разводов и других дефектов.

Существуют различные способы введения ЖК в ячейку. В [55] проведен сравнительный анализ этих способов.

Наиболее простым является капельный способ. Для его осуществления на противоположных сторонах прокладки ячейки имеются два отверстия. На одно из них наносится капля ЖК, которая за счет капиллярных сил затягивается в зазор, вытесняя воздух в противоположное отверстие. Несмотря на простоту, капельный способ не исключает наличия газовых пузырей в зазоре ячейки.

Модернизацией капельного способа является принудительное, с помощью шприца, заполнение зазора ячейки ЖК, который герметично заполняет торцевое отверстие стеклянной пластины ячейки. Время заполнения можно уменьшить повышением давления или уменьшением вязкости ЖК. Но существенное повышение давления может привести к разгерметизации соединения шприца с заливочным отверстием. Уменьшение вязкости ЖК осуществляется повышением его температуры. Однако превышение температуры ЖК на 10 ... 15° С над температурой перехода в изотропное состояние ускоряет «старение» ЖК.

Наиболее перспективен с точки зрения производительности и качества заполнения зазора ячейки вакуумный способ, который отличается практически отсутствием газовых пузырей в межэлектродном зазоре ячейки. Суть способа заключается в следующем.

На подготовительном этапе размещают ванну с ЖК и ячейку заливочным отверстием вниз в вакуумной камере (рис. 2.22). После достижения определенного вакуума ЖК подводится к заливочному отверстию, затем в камеру вводится воздух для «запрессовывания» ЖК в ячейку.

На рис. 2.23 представлено изменение давления в камере заполнения ячейки от времени. Отрезок  $AC$  характеризует процесс обезгаживания ЖК и ячейки. Причем время откачки  $t_1$  (отрезок  $AB$ ) вакуумной системы до 10 Па определяется только параметрами установки и не зависит от газовыделения в системе. Время откачки  $t_2$  (отрезок  $BC$ ) до остаточного давления примерно 1,3 Па определяется в основном суммарным газовыделением, которое зависит от конструкции обезгаживаемой ячейки, площади поверхности ЖК и его состава. Для конкретного сочетания типа ЖК и конструкции оснастки заполнения зазора ячейки эта величина находится экспериментально.

Время откачки из объема ячейки, у которой ориентирующие слои, прокладка и клей-герметик изготовлены из неорганических материалов (монооксид кремния), мало по сравнению с  $t$ . Однако для ячеек с ориентантом или прокладкой и клеем-герметиком органического происхождения газовыделение внутренних поверхностей ячейки ощутимо, и точка  $D$  отрезка  $AD$ , характеризующего время  $t_{я}$ , будет соответствовать давлению ниже, чем в точке  $C$ .

Продолжительность напуска атмосферы (отрезки  $CE$  и  $ED$ ) определяется конструктивными особенностями вакуумной установки.

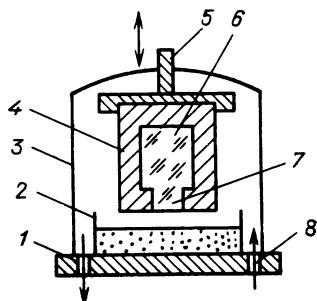


Рис. 2.22. Схема камеры для заполнения ЖК вакуумным способом:

1 — патрубок к вакуумному насосу; 2 — ванна с ЖК-материалом; 3 — вакуумный колпак; 4 — герметик; 5 — держатель с возвратно-поступательным механизмом; 6 — ЖКЯ; 7 — отверстие для заполнения; 8 — нагнетатель

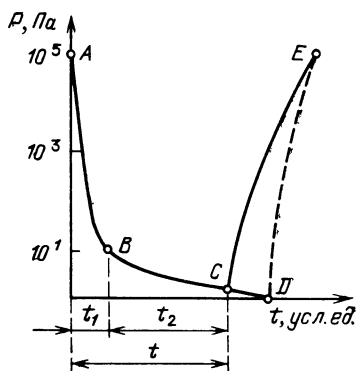


Рис. 2.23. Изменение давления от времени в камере заполнения ЖКЯ

При заполнении ячеек нередки случаи ориентации ЖК не по микрорельефу ориентирующих слоев, а по движущемуся фронту потока ЖК. Устранить этот недостаток без ухудшения качества и надежности прибора можно, если при заполнении ЖК нагреть на 5 ... 10° С выше температуры его перехода в изотропное состояние. В результате реализуется максимально однородная ориентация.

## Глава 3

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СТРУКТУРОЙ МДП-ЖК

#### 3.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Интенсивное развитие оптических методов обработки больших массивов информации, имеющих матричную структуру, требует создания устройств, способных многократно преобразовывать входную информацию на оптическую когерентную несущую, по спектру, усиливать по яркости и выполнять математические операции в реальном масштабе времени.

Такие устройства называются пространственно-временными модуляторами света (ПВМС).

В настоящее время разрабатываются разновидности ПВМС, различающиеся по виду поля, изменяющего параметры модулирующей среды (МС); виду управляющих сигналов; виду модуляционной характеристики; способу управления; способу считывания; типу модулирующей среды; эффектам, используемым для пространственной модуляции и др.

Ниже представлена классификация ПВМС по виду управления, типу модулирующей среды и виду пространственной структуры.

Управление может осуществляться электрическим полем, светом и электронным лучом. В качестве модулирующей среды используются электролюминесцентные материалы, электрооптическая керамика, сегнетоэлектрики, термопластики, ЖК и др.

Наряду с дискретной пространственной структурой, характерной для фоточувствительных матриц, широкое распространение получили ПВМС с более технологичной непрерывной адресующей частью, которая формируется однородным слоем фоточувствительного материала.

Широкими функциональными возможностями обладают оптически управляемые ПВМС, способные параллельно преобразовывать весь массив информации за время одного переключения МС, что обеспечивает максимальную производительность обработки. В настоящее время широко используются твердотельные структуры типа фотополупроводник-МС (ФП-МС): «фототитус», «феррик», «квотитус», «феррикон»,  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -рутиконы, а также структуры на основе электрооптических кристаллов с собственной фотопроводимостью (например,  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ) — ПРОМ, ПРИЗ [5].

Наибольший интерес представляет собой структура ФП-ЖК, обладающая более высокими чувствительностью, технологичностью и простотой в эксплуатации. Кроме того, благодаря низким значениям управляющего напряжения ЖК модуляторы этого типа потребляют мало энергии. В общем случае ПВМС типа ФП-ЖК представляет собой многослойную структуру (см. рис. 2.12), в которой между двумя прозрачными электродами, подключенными к источнику внешнего напряжения, расположены слои ФП и ЖК. Толщина последнего задается калиброванной прокладкой. Принцип действия данного ПВМС заключается в следующем.

Напряжение питания, приложенное к прозрачным электродам, распределяется между слоями ФП и ЖК. Сопротивления этих слоев в отсутствие записывающей засветки выбираются такими, чтобы приложенное напряжение в основном падало на ФП, не вызывая изменения исходной ориентации молекул ЖК ( $R_{\text{п}} > R_{\text{жк}}$ ). Записывающий свет изменяет проводимость ФП, в результате чего происходит перераспределение напряжения между слоями ФП и ЖК. Это приводит к формированию на слое ЖК потенциального рельефа, соответствующего распределению освещенности ФП, под действием которого в слое ЖК возникает тот или иной электрооптический эффект, изменяющий его оптические свойства. Прошедший через слой ЖК считывающий поток излучения модулируется в соответствии с изменением оптических свойств ЖК.

**Основные параметры ПВМС.** Эффективность применения ПВМС в системах оптической обработки информации определяется их назначением в конкретной системе. Однако можно сформулировать общие требования к основным параметрам ПВМС в системах записи, обработки и отображения информации:

1. Эффективность преобразования оптического сигнала ( $\eta = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$ , где  $I_{\text{вх}}$  и  $I_{\text{вых}}$  — интенсивности входного и выходного оптических сигналов ПВМС) при максимальном оптическом контрасте на выходе ПВМС.

2. Чувствительность к управляющему свету. Чувствительность определяется мощностью или энергией записывающего излучения на единицу фоточувствительной площади прибора, необходимой для достижения требуемой глубины модуляции выходного сигнала. При этом различают: пороговую чувствительность — интенсивность записывающего излучения, при котором приложенное к слою ЖК напряжение равно пороговому  $U_{\text{жк}} = U_{\text{пор}}$ , под действием которого начинается модуляция считывающего излучения (пропускание структуры составляет уровень 0,1 от максимального); чувствительность, соответствующую полному контрасту; интенсивность, при которой пропускание достигает уровня 0,9.

Высокая чувствительность обеспечивает заданные выходные параметры ПВМС, а также позволяет уменьшить энергетические затраты на осуществление рабочих циклов запись — хранение — считывание — стирание информации.



3. Передача пространственной информации, т. е. обеспечение высокой разрешающей способности.

Разрешающая способность определяет количество информации на единицу площади устройства, которая передается из канала записи в канал считывания ПВМС без искажения и является основной характеристикой информационного содержания преобразованных сигналов.

Более общей характеристикой системы регистрации и преобразования изображений является ее информационная емкость  $H$  [56]:

$$H = N \lg_2 m, \quad (3.1)$$

где  $N$  — число элементов изображения;  $m$  — число градаций яркости в элементе.

При  $m=2$ , когда различаются только черные и белые элементы (например, штриховые тест-миры), выражение (3.1) принимает вид  $H=N$ , т. е. вычисление информационной емкости сводится к подсчету элементов в изображении, а разрешающая способность определяется как предельное число разрешаемых элементов на всей апертуре прибора ( $N=XYR^2$ , где  $X$  и  $Y$  — размеры изображения,  $R$  — разрешающая способность).

4. Контраст и динамический диапазон определяют количество информации, передаваемое одним элементом изображения (при  $N=1$  выражение (3.1) принимает вид  $H=\lg_2 m$ ).

Контраст определяется из выражения

$$K = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}), \quad (3.2)$$

где  $I_{max}$  и  $I_{min}$  — максимальная и минимальная интенсивности электрооптического отклика модулятора.

Динамический диапазон определяется числом различаемых уровней яркости в изображении (уровнем интенсивности излучения). Способность ПВМС передавать полутонные изображения характеризуется количеством передаваемых градаций по шкале серости с шагом  $\Delta \lg I = 0,15$  ( $I$  — интенсивность промодулированного света). Количество передаваемых полутонов определяется из модуляционной характеристики и определяется из выражения

$$m = \frac{\lg I_{сч}^{0,9} - \lg I_{сч}^{0,1}}{\Delta \lg I}, \quad (3.3)$$

где  $I_{сч}^{0,1}$  и  $I_{сч}^{0,9}$  — интенсивности считывающего излучения по уровням 0,1 и 0,9 от максимального значения;  $\Delta \lg I = 0,15$ .

Динамический диапазон преобразования изображения ограничивается высоким уровнем шумов и нелинейностью модуляционной характеристики ПВМС.

5. Однородность изображения, описывающая разброс рабочих характеристик по апертуре прибора. (В жидкокристаллических ПВМС однородность соответствует отклонению в несколько процентов.)

6. Быстродействие оптических переключений, обеспечивающее необходимую скорость ввода-вывода информации.

Быстродействие ПВМС характеризуется временем включения и выключения электрооптического отклика и определяется совокупностью свойств жидкого кристалла и фоточувствительной части; инерционностью электрооптического отклика ЖК-слоя, фотоответа ФП и инерционностью, обусловленной перераспределением зарядов в структуре.

Времена включения  $\tau_{\text{вкл}}$  и выключения  $\tau_{\text{выкл}}$  реакции ЖК на воздействие электрического поля определяются вязкоупругими свойствами ЖК ( $\tau_{\text{вкл}} \geq 10^{-3}$  с,  $\tau_{\text{выкл}} \geq 10^{-2}$  с). В структуре МДП-ЖК  $\tau_{\text{выкл}}$  ограничивается процессами релаксации зарядового состояния на «ловушках» в МДП-части ПВМС, ухудшая тем самым его быстродействие.

При использовании ПВМС в устройствах, сопряженных в ЭЛТ телевизионной системы, необходимо быстродействие не менее  $4 \cdot 10^{-2}$  с (частота смены кадров более 25 Гц).

Помимо указанных выше требований необходимы отсутствие усталостных свойств за определенное время эксплуатации (более  $10^4$  ч) и высокие эксплуатационные качества, не связанные с передачей информации: малые габаритные размеры, малое энергопотребление, удобство в эксплуатации.

Выбор того или иного ПВМС определяется рабочими характеристиками, которые он должен обеспечить, работая в конкретной оптической системе. Так, ПВМС для обработки аналоговых сигналов должен иметь линейные зависимости изменения оптических свойств от уровня управляющего сигнала, что позволяет обеспечить многоградационную передачу изображений с высокими пространственным разрешением и однородностью по его апертуре. При использовании ПВМС для записи информации в голографические системы (например, голографический архив) необходимо учитывать возможные фазовые искажения передаваемой информации, которые модулятор может внести в систему. Кроме того, к ПВМС, используемым в голографических системах, предъявляются высокие требования по чувствительности и разрешающей способности.

**Выбор параметров фоточувствительной части и ЖК.** Из вышесказанного следует, что характеристики ПВМС определяются свойствами как ФП, так и ЖК. Для работоспособности структуры необходимо согласование сопротивлений слоев ФП и ЖК. Так как удельное сопротивление ЖК  $\rho \approx 10^{10}$  Ом·см, то при выборе ФП следует учитывать не только требования, указанные в § 2.1, но и удельное сопротивление.

Успехи в этом направлении достигнуты при использовании в качестве ФП аморфных полупроводников.

В работе [57] используются халькогенидные стеклообразные фотополупроводники (ХСП) системы As—Se с  $\rho = 10^{13}$  Ом·см. Достоинством этого материала является высокий квантовый выход. Варьируя состав ХСП, можно в широ-

жих пределах изменять его спектральную чувствительность и сопротивление, что позволяет оптимизировать режим работы ПВМС. Как и другие аморфные полупроводники, ХСП обладает высокой равномерностью фотоэлектрических и оптических свойств, что обеспечивает низкий пространственный шум в ПВМС. Пространственно-временной модулятор света на основе ХСП-ЖК, работающий на постоянном напряжении, обладает пороговой чувствительностью  $10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> в синей области спектра и имеет способность передавать восемь градаций шкалы серости (при плотности входной засветки  $1,5 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>).

Недостатком модулятора на основе ХСП является относительно низкое быстродействие ( $\tau_{\text{вкл}} \approx 10^{-2} \dots 10^{-1}$  с,  $\tau_{\text{выкл}} = 10^{-1} \dots 1$  с), что не позволяет преобразовывать информацию в реальном масштабе времени.

С целью расширения класса применяемых ФП, чувствительных в ближней ИК-области спектра, вместо фоторезистивного слоя используется МДП-структура. Модулятор такого типа представляет собой симметричную структуру МДПДМ, где в качестве второго слоя диэлектрика используется ЖК.

Как было отмечено в гл. 1, в динамическом режиме работы МДП-структуры при воздействии на нее как импульсного, так и синусоидального напряжений питания возникают переходные процессы, характеризующиеся высокоомным состоянием слоя полупроводника ( $10^9 \dots 10^{10}$  Ом·см) в течение времени  $t = \epsilon_{\text{д}} \epsilon_0 E_{\text{д}} / (qGL_{\text{п}})$ . В результате выполняется условие согласования  $R_{\text{п}} = 1/\omega C_{\text{п}} > R_{\text{ЖК}} = 1/\omega C_{\text{ЖК}}$  (в данном случае согласование слоев происходит по емкостям).

Реализация пространственно-временных модуляторов света МДП-ЖК на основе Si ( $\rho = 10^4$  Ом·см) и GaAs ( $\rho = 10^8$  Ом·см) позволила расширить область спектральной чувствительности до 1,1 мкм, повысить пороговую чувствительность до  $10^{-9}$  Дж/см<sup>2</sup> при достаточно высоком быстродействии — до  $10^{-2}$  с (100 Гц). Такие параметры прибора позволяют производить обработку телевизионных изображений.

В зависимости от функциональных требований, предъявляемых к жидкокристаллическим модуляторам, используется тот или иной класс ЖК с определенными электрооптическими эффектами, подробно описанными в работах [49, 58].

Полевые или ориентационные эффекты (S-, В- и твист-эффекты) реализуются в нематических ЖК (НЖК) и заключаются в стремлении ансамбля молекул занять положение с минимальной энергией. Ориентирующее действие поля обусловлено анизотропией диэлектрической проницаемости  $\Delta\epsilon$  и сопровождается преодолением сил упругости в НЖК.

Электрогидродинамический эффект динамического рассеяния света (ДР) наблюдается в НЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией  $\Delta\epsilon < 0$  и сопровождается турбулентным движением оптических неоднородностей. Динамическое рассеяние с памятью (ДРП) реализуется в холестерических ЖК (ХЖК) с исходной планарной текстурой и  $\Delta\epsilon < 0$ . Время памяти зависит от отношения толщины ЖКЯ  $d$  к шагу спирали  $P_0$ :  $t = A \exp(Bd/P_0)$

$P_0$ ), где  $A$  и  $B$  — константы, и может составлять несколько месяцев.

Эффект холестерико-нематического фазового перехода (ХНП) происходит в ХЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  и заключается в замене под действием электрического поля сильнорассеивающей (конфокальной) текстуры холестерической фазы на прозрачную гомеотропную нематическую. Поле, при котором осуществляется ХНП, определяется из выражения [58]

$$E_{\text{пор}} = \frac{\pi^2}{P_0} \left( \frac{K_{22}}{\Delta\epsilon} \right)^{1/2}, \quad (3.4)$$

где  $K_{22}$  — постоянная Франка для твист-структуры. Благодаря крутой пороговой характеристике ХНП обладают гистерезисом, в результате которого возможно запоминание изображения релаксационного типа.

В смектических ЖК (СЖК), прозрачных в исходном состоянии, электрическое поле вызывает рассеяние света. При проецировании изображения на слой ФП запись информации осуществляется за счет электрогидродинамической неустойчивости, сохраняющейся длительное время (до 2 лет) после снятия электрического напряжения.

Следует отметить, что с помощью эффектов ДР, ДРП и ХНП осуществляется амплитудная модуляция света, в то время как для ЖК с полевыми эффектами фазовая модуляция преобразуется в амплитудную с помощью системы скрещенных поляризаторов.

В зависимости от конкретного применения ПВМС требования к ЖКМ определяют целый комплекс свойств, важнейшими из которых являются: пороговое напряжение  $U_{\text{пор}}$ , крутизна ВКХ, времена переключения. Эти свойства определяются физическими параметрами ЖК: значениями диэлектрической проницаемости и оптической анизотропии, знаком и величиной диэлектрической анизотропии, вязкоупругими константами, которые в свою очередь зависят от молекулярной структуры ЖК-соединений. Требования к эксплуатации ПВМС определяют такие свойства ЖК, как интервал рабочих температур, устойчивость к воздействию излучения, химическая и термическая стабильность. Всем этим требованиям могут удовлетворять только многокомпонентные смеси ЖК эвтектического или близкого к нему состава, в котором каждый из компонентов несет определенную функциональную нагрузку. При этом физические характеристики ЖК определяются не только свойствами молекул составляющих веществ, но и их молекулярным взаимодействием.

В работе [59] теоретически и экспериментально исследована электрооптика НЖК в пространственно неоднородном электрическом поле, созданном в структуре ФП-ЖК. Благодаря полученным зависимостям электрооптического отклика (S- и V-эффекты) от диэлектрической и упругой анизотропий, флексоэлектрических модулей ЖК, поверхностной поляризации и энергии связи ЖК с под-

ложкой появилась возможность определить параметры ЖК, при которых достигаются максимальные чувствительность и диапазон разрешаемых пространственных частот.

Для исходной гомеотропной ориентации ЖК максимальная чувствительность достигается при следующих случаях:

значение энергии связи ЖК — подложка  $W$  минимальна;

диэлектрическая анизотропия ЖК  $\Delta\epsilon$  положительна и максимальна;

коэффициенты упругости поперечного  $K_{11}$  и продольного  $K_{33}$  изгибов минимальны при возможно большем отношении  $K_{33}/K_{11}$ ;

флексозлектрические модули ЖК ( $e_{11} + e_{33}$ ) и поверхностная поляризация  $m_p$  максимальны и положительны.

Максимальный диапазон пространственных частот достигается при следующих параметрах:

энергия связи ЖК — подложка определяется из неравенства  $a_w = WL_{\text{ЖК}}/K_{33} \geq 5$ , где  $L_{\text{ЖК}}$  — толщина слоя ЖК;

диэлектрическая анизотропия минимальна;

$K_{11}$  и отношение модулей упругости  $K_{33}/K_{11}$  минимальны;

$m_p$  и  $e_{11} + e_{33}$  максимальны и положительны.

В случае исходной планарной ориентации ЖК вышеприведенные выводы остаются в силе при условии замены

$$K_{11} \rightleftharpoons K_{33}; \epsilon_{\perp} \rightleftharpoons \epsilon_{\parallel}; \Delta\epsilon \rightarrow -\Delta\epsilon; e_{11} \rightleftharpoons e_{33}.$$

Однако в этом случае поверхностная поляризация отсутствует ( $m_p = 0$ ) и изменения энергии связи ЖК — подложка ограничены.

Важно отметить, что требования к физическим параметрам ЖК противоречат друг другу (кроме последнего), поэтому  $W$ ,  $K_{33}$  и  $K_{11}$ ,  $\Delta\epsilon$  необходимо определять из достижения компромисса между чувствительностью и пространственным разрешением структуры в каждом конкретном случае.

### 3.2. СВОЙСТВА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ МДП-ЖК

Наибольшее практическое применение для пространственно-временной модуляции света в системах обработки и отображения информации находит S-эффект в тонких слоях НЖК [5]. Этот эффект наблюдается в НЖК с положительной диэлектрической анизотропией  $\Delta\epsilon > 0$  при планарной исходной ориентации. При воздействии на слой ЖК напряжения, превышающего пороговое  $U_{\text{пор}} = (4\pi^3 K_{11}/\Delta\epsilon)^{1/2}$  [60], молекулы поворачиваются по направлению поля от начального положения на угол  $\theta$ . Слой ЖК при этом испытывает деформацию, которая называется S-деформацией. Динамика процесса переориентации молекул определяется из условия равенства диэлектрического, упругого и вязкостного моментов [61].

В исходном состоянии слой НЖК по отношению к свету обладает максимальной оптической анизотропией:

$$\Delta n = n_e - n_o = n_{\parallel} - n_{\perp}, \quad (3.5)$$

где  $n_o$  и  $n_e$  — коэффициенты преломления обыкновенного и не-

обыкновенного лучей соответственно. С ростом напряжения в результате переориентации молекул происходит уменьшение двулучепреломления, наблюдаемое по изменению фазы или поляризации светового потока, распространяющегося перпендикулярно слою ЖК. При этом коэффициент преломления для обыкновенного луча остается неизменным, а для необыкновенного — уменьшается, стремясь к  $n_o$ . Значение  $n_e$  связано с углом ориентации  $\theta(z)$  по направлению поля следующим соотношением [49]:

$$n_e(z) = \frac{n_{\perp} n_{\parallel}}{[n_{\perp}^2 \cos^2 \theta(z) + n_{\parallel}^2 \sin^2 \theta(z)]^{1/2}}, \quad (3.6)$$

а разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами для света с длиной волны  $\lambda$  находится интегрированием по толщине слоя  $L_{\text{ЖК}}$  [49]:

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{L_{\text{ЖК}}} [n_e(z) - n_o] dz. \quad (3.7)$$

Значение анизотропии ЖК, используемых в структурах МДП, составляет 0,2 ... 0,4, поэтому при толщинах слоя ЖК 10 ... 20 мкм фаза света изменяется соответственно на (4 ... 12) $\pi$ .

Интенсивность света, проходящего через ячейку НЖК, зависит от угла  $\beta$  между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора [49]:

$$I = I_0 \sin^2 2\beta \sin^2(\Delta \Phi/2), \quad (3.8)$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего на слой ЖК линейно-поляризованного света.

Из выражений (3.6) — (3.8) следует, что внешнее электрическое поле изменяет направление директора, которое обуславливает изменение  $\Delta n$  и  $\Delta \Phi$ . Изменение разности фаз приводит к осциллирующей зависимости оптического пропускания слоя ЖК, помещаемого в скрещенных поляризаторах (рис. 3.1). Максимально возможное число экстремумов на электрооптической кривой можно оценить по формуле [62]

$$n = 2 L_{\text{ЖК}} \Delta n / \lambda. \quad (3.9)$$

Максимальный размах осцилляций (экстремумы вольт-контрастной характеристики) согласно выражению (3.8) соответствуют углу  $\beta = 45^\circ$ . Включение и выключение поля приводят к переориентации молекул и соответствующему изменению фазовой задержки. При напряженности поля  $E$ , достаточной для полного поворота молекул на угол  $\theta = \pi/2$ , слой ЖК становится изотропным для света и двулучепреломление исчезает.

Процесс переориентации молекул ЖК имеет пороговый характер. Резкое изменение интенсивности света при напряжении, превышающем пороговое, связано с неустойчивостью положения молекул в слое при  $U_{\text{ЖК}} = U_{\text{пор}}$ , когда происходит неоднородная переориентация молекул, вызывающая нарушение монокристалличности слоя и сопровождающаяся рассеянием света.

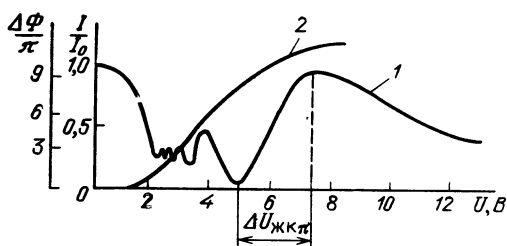


Рис. 3.1. Вольт-контрастная характеристика нематического жидкого кристалла толщиной  $L_{\text{жк}}=10$  мкм,  $S$ —эффект (1) и зависимость фазовой задержки от напряжения (2)

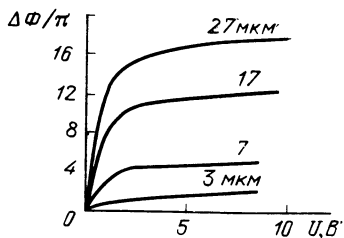


Рис. 3.2. Зависимость фазовой задержки света ( $\lambda=632$  нм) от приложенного напряжения ( $f=1$  кГц) для ЖК ячеек различных толщин

Осциллирующий характер электрооптической характеристики позволяет выбрать тот или иной участок между соседними локальными экстремумами, определяя позитивный или негативный режим работы структуры МДП-ЖК. Однако при определении знака контраста необходимо учитывать поляризационно-оптический эффект перефокусировки [5], заключающийся в том, что при неизменном положении отображающего объектива на оптической оси наблюдаются два резких, преобразованных ПВМС изображения, одно из которых является негативным, а другое — позитивным. Причем положение этих изображений меняется при изменении напряжения на структуре и входной засветки.

На рис. 3.2 приведены зависимости фазовой задержки света от приложенного к слою ЖК напряжения для разных толщин ЖКЯ [62]. Снижение крутизны начального участка кривой  $\frac{1}{\pi} \Delta\Phi(U_{\text{ЖК}})$  в тонких слоях ЖК связано с увеличением роли упругих сил, действующих со стороны ориентирующих поверхностей, и приводит к росту интервалов между экстремумами  $\Delta U$  и уменьшению крутизны квазилинейных участков электрооптической характеристики между экстремумами. То есть для передачи полутоновых изображений необходимо изготавливать ПВМС с тонкими слоями ЖК.

Быстродействие слоя ЖК характеризуется временами оптического переключения — временем переориентации молекул по полю при подаче напряжения и временем возврата молекул ЖК в исходное состояние.

Времена полной переориентации молекул ( $\theta=90^\circ$ ) в используемых ЖК составляют единицы секунд. Наибольшие потери времени приходятся на предпороговую область, когда силы поверхностного сцепления наиболее велики. При достижении напряжением порогового значения преобладают силы межмолекулярного взаимодействия и скорость отслеживания изменения внешнего поля молекулами ЖК увеличивается. Так как рабочим участком ЖК в структуре МДП-ЖК является один из склонов вольт-контрастной характеристики, рабочее время переключения оказывается существенно меньше полного времени переключения.

Под временем включения  $\tau_{\text{вкл}}$  понимается время оптического переключения, соответствующее увеличению фазовой задержки на  $\pi$ , относительно первоначального положения. Аналогично  $\tau_{\text{выкл}}$  соответствует времени уменьшения фазовой задержки на  $\pi$ .

Значения  $\tau_{\text{вкл}}$  и  $\tau_{\text{выкл}}$  оказываются разными для различных участков вольт-контрастной характеристики, уменьшаясь при увеличении  $U_{\text{ЖК}}$ . Так как время включения существенно меньше (на порядок и больше) времени выключения, то быстроедействие или инерционность слоя ЖК, равная  $\tau_{\text{выкл}}$ , и будет определять быстроедействие ПВМС.

Экспериментальные исследования S-эффекта используемых в настоящее время ЖК показывают, что среднее время включения составляет сотни микросекунд, а время выключения — около 20 мс [63].

Для уменьшения времени включения используется следующий метод. На слой ЖК подается напряжение смещения, значение которого соответствует, например, одному из минимумов пропускания света. Затем подается импульс напряжения большой амплитуды (около 100 В) с длительностью, при которой молекулы ЖК успевают развернуться лишь на небольшой угол, соответствующий максимуму пропускания света  $U_{\text{ЖК}} + \Delta U_{\pi}$ . Такой режим работы позволяет уменьшить  $\tau_{\text{вкл}}$  на 2...3 порядка.

Использование метода двухчастотного управления частичной переориентацией молекул ЖК, сущность которого заключается в уменьшении релаксации молекул при изменении знака диэлектрической анизотропии, позволяет уменьшить  $\tau_{\text{выкл}}$  в (600...30 000) раз [61]. В данном случае на слой ЖК подается радиопульс с высокой частотой заполнения, при которой происходит изменение знака диэлектрической анизотропии, а релаксация молекул в исходное положение происходит под действием не только упругого, но и диэлектрического момента.

Для создания быстродействующих ПВМС весьма перспективными электрооптические эффекты в сегнетоэлектрических ЖК — хиральных смектиках  $C^*$ , рассмотренных в работах [49, 58, 64].

Легирование смектических ЖК хиральными примесями приводит к тому, что у молекул исчезают центр инверсии и плоскость зеркальной симметрии, а остается лишь двойная поворотная ось, параллельная плоскости смектических слоев и перпендикулярная длинным молекулярным осям. В такой системе наряду с упорядочением длинных осей молекул их поперечные диполи выстраиваются вдоль смектического слоя в направлении, перпендикулярном плоскости наклона этих молекул. В этом случае спонтанная поляризация  $P_c$  в слое будет являться следствием ориентационного упорядочения, обусловленного асимметрией заторможенности вращения хиральных молекул вокруг их длинных осей.

В объеме хирального смектика  $C^*$  помимо понижения симметрии в слое происходит поворот директора от слоя к слою в нормальном направлении с образованием подобно холестеричу спиральной структуры с шагом  $P_0 = 2\pi d/\alpha$ , где  $d$  — толщина слоя;



$\alpha$  — угол, характеризующий поворот молекул в двух соседних слоях.

Наряду с вращением осей молекул поворачивается и направление спонтанной поляризации, и при  $P_0 \ll d$  суммарная поляризация равна нулю. При взаимодействии внешнего электрического поля

$$E_{\text{пор}} = \frac{\pi^4 K_{22}}{4 P_0 P_c}$$

спираль раскручивается и образуется однородная полярная структура, обладающая сегнетоэлектрическими свойствами. Так как взаимодействие с постоянными диполями гораздо эффективнее взаимодействия с индуцированными диполями, значение  $E_{\text{пор}}$  как минимум на порядок меньше соответствующего поля в холестериках. Зависимость направления закрутки директора ЖК от знака электрического поля характеризует линейность ориентационного электрооптического эффекта в смектиках  $S^*$ .

Время раскрутки спирали, а следовательно и время электрооптического отклика, определяется выражением

$$\tau \approx \frac{\gamma}{P_c E_{\text{пор}}},$$

где  $\gamma$  — вязкость материала, и может достигать 100 нс при комнатной температуре. Однако скорость переключения ЖК ограничивается максимально допустимой рассеиваемой мощностью и составляет при  $d=1$  мкм около  $1,2 \cdot 10^{-5}$  с при комнатной и  $5 \cdot 10^{-7}$  с при повышенной температурах.

Рассмотрение оптических свойств смектика  $S^*$  подробно изложено в [64]. Если при нормальном падении линейно-поляризованного света на ЖК (образец расположен между двумя скрещенными поляризаторами) оптические оси ЖК лежат в плоскости, параллельной плоскости поляризации одного из поляридов, то оптические свойства смектика  $S^*$  аналогичны ХЖК. Интенсивность прошедшего через ячейку света будет изменяться в соответствии с формулой (3.8), где  $\beta=2\theta$ ,  $\theta$  — угол наклона молекул относительно оси спирали.

Максимальная прозрачность ЖК наблюдается при  $\theta=22,5^\circ$  и при  $\Delta nd=\lambda/2$ .

Для достижения высокого быстродействия и низкого управляющего напряжения необходимо повышать значение  $P_c$  с учетом расширения интервала рабочих температур.

Исследования, проведенные в работе [65], показывают, что  $P_c$ , индуцированная хиральной примесью в смектике  $S$ , примерно пропорциональна концентрации примеси, углу наклона молекул  $\theta$ , жесткости молекулярного скелета примеси. Повышению  $P_c$  способствует также оптимальное соотношение длин молекул смектика  $S$  и примеси.

С учетом этих факторов удалось получить высокое значение  $P_c=2,2 \cdot 10^{-8}$  Кл·см<sup>-2</sup>. Такое значение  $P_c$  было получено при

температуре  $-4^{\circ}\text{C}$ . В результате  $\tau_{\text{пер}}$  директора в ЖКЯ толщиной 8 мкм при смене полярности управляющего напряжения амплитудой 50 В составило менее  $2 \cdot 10^{-3}$  с, что недостижимо при такой температуре в НЖК.

Важно отметить, что увеличение концентрации хиральной примеси эффективно до определенного (для каждого материала своего) значения, после которого наблюдается сильное уменьшение угла  $\theta$ , вызывающее падение значений эффективного дипольного момента и  $P_c$ . Так, для смеси смектика С ЖК-1246 с хиральной примесью ЖК-1239 максимум  $P_c$  соответствует массовой концентрации 14%.

Угол наклона молекул  $\theta$  в смектике  $C^*$ , имеющем фазовый переход  $A-C^*$ , с уменьшением температуры плавно увеличивается, достигая насыщения. Температурная зависимость поляризации при этом описывается таким же законом, как и для изменения  $\theta$  [66]:

$$P_c(T) = P_c^0 (T_c - T)^\alpha,$$

где  $P_c^0$  — константа;  $T_c$  — температура фазового перехода  $A-C^*$ ;  $T$  — температура измерений;  $\alpha \approx 0,5$ .

В случае фазового перехода  $Ch-C^*$  спонтанная поляризация  $P_c$  возрастает быстрее и достигает большего значения из-за ее структурного и вращательного усреднения [66].

Реализация таких свойств сегнетоэлектрических смектиков  $C^*$ , как большая скорость переключения, высокий контраст, низкое напряжение переключения, бистабильность, сдерживается ограниченным количеством ЖК материалов, обладающих высоким значением  $P_c$  и широким интервалом рабочих температур. Однако варьирование типа и концентрации хиральных добавок приводит к целенаправленному изменению значений спонтанной поляризации, угла наклона, вязкости ЖК.

Высокие функциональные свойства ЖК активизируют разработки устройств на их основе. В работе [67] описаны бистабильные приборы на основе смектика  $C^*$ , выполняющие различные логические операции, ПВМС, осуществляющие обработку двумерных массивов информации в оптических компьютерных системах.

В [68, 69] сделана попытка реализации свойств сегнетоэлектрических СЖК в ПВМС типа ФП-ЖК. Так, в [69] изготовленная структура обладает чувствительностью  $3 \cdot 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup> и временем электрооптического отклика  $\tau_{\text{вкл}} \approx \tau_{\text{выкл}} \approx 5 \cdot 10^{-4}$  с. Причем разрешающая способность составляет 70 пар лин./мм.

### 3.3. Контраст и разрешающая способность структуры МДП-ЖК

При решении задачи повышения контраста исходно мало-контрастных изображений условиями эффективного использования ПВМС типа МДП-ЖК являются выбор и стабилизация поло-

жения рабочей точки прибора относительно порогового напряжения ЖК [70].

Напряжение на слое ЖК, вызывающее электрооптический отклик структуры на засветку полупроводника, можно охарактеризовать выражением

$$U_{\text{ЖК}} = U_{\text{ЖК}}^0 + \Delta U_{\text{ЖК}} = U_{\text{ЖК}}^0 + S I_s, \quad (3.10)$$

где  $U_{\text{ЖК}}^0$  — напряжение на слое ЖК в отсутствие засветки, определяемое геометрическими соотношениями слоев;  $I_s$  — интенсивность записывающего светового потока;  $S$  — коэффициент, определяющий вольт-ваттную чувствительность преобразования в структуре.

Начальный уровень пропускания слоя ЖК — рабочую точку прибора — задает значение  $U_{\text{ЖК}}^0$ . В соответствии с положением рабочей точки и диапазоном изменения интенсивности записываемого изображения ПВСМ может работать в режимах: передачи изображения с ограничением по уровню интенсивности снизу; квазилинейной передачи изображений; квазилинейной передачи с последующим насыщением; комбинированном.

В наиболее важном для повышения контраста режиме передачи изображений с ограничением по уровню интенсивности снизу рабочая точка лежит на вольт-контрастной характеристике ниже точки порогового напряжения  $U_{\text{ЖК}}^0 < U_{\text{пор}}$ .

Преобразование изображений в этом случае производится по закону

$$I_{\text{вых}} = \begin{cases} I_{\text{сч}} T_{\text{min}}, & \text{при } I_s \leq \frac{U_{\text{пор}} - U_{\text{ЖК}}^0}{S}; \\ I_{\text{сч}} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) (S I_s - U_{\text{пор}}) \times \\ \times (U_{\text{н}} - U_{\text{пор}})^{-1} + I_{\text{сч}} T_{\text{min}}, & \\ \text{при } (U_{\text{пор}} - U_{\text{ЖК}}^0) / S < I_s < \\ < (U_{\text{н}} - U_{\text{ЖК}}^0) / S, \end{cases} \quad (3.11)$$

где  $I_{\text{сч}}$  — интенсивность считывающего потока света;  $T_{\text{max}}$  и  $T_{\text{min}}$  — соответственно максимальное и минимальное значения пропускания света слоем ЖК.

Если яркость исходного изображения содержит постоянный фон, на который наложена некоторая изменяющаяся составляющая

$$I_s(x, y) = I_s^{\text{пост}} + \tilde{I}(x, y), \quad (3.12)$$

то соответствующим выбором положения рабочей точки можно добиться подавления постоянной составляющей и квазилинейной передачи изменяющейся части:

$$U_{\text{ЖК}}^0 \approx U_{\text{пор}} - S I_s^{\text{пост}}. \quad (3.13)$$

При этом контраст на входе определяется выражением

$$K_{вх} = (I_3^{пост} + \tilde{I}_3^{max}) / (I_3^{пост} + \tilde{I}_3^{min}), \quad (3.14)$$

и если  $I_3^{min} = 0$ ,  $I_3^{max} = \Delta I_3^{пост}$ ,  $\Delta \ll 1$ , то  $K_{вх} \approx 1 + \Delta$ .

Контраст преобразованного изображения определяется выражением

$$\begin{aligned} K_{вых} &= \frac{T_{min} + (T_{max} - T_{min})(U_n - U_{пор})^{-1} S \Delta I_3^{пост}}{T_{min}} = \\ &= 1 + \beta \frac{S \Delta I_3^{пост}}{T_{min}}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

С учетом (3.13) получаем

$$K_{вых} = 1 + \frac{\beta \Delta (U_{пор} - U_{ЖК}^0)}{T_{min}} \leq 1 + \frac{\beta \Delta}{T_{min}} U_{пор}. \quad (3.16)$$

В реальном ПВМС типа МДП-ЖК, работающего на S-эффекте (или гибридном эффекте), при  $T_{max} \approx 1$ ;  $T_{min} \approx 0,01$ ;  $U_{пор} = 3 \dots 5$  В;  $U_n - U_{пор} \approx 1$  В

$$K_{вых}^{max} \approx \beta \Delta U_{пор} / T_{min} \approx 500 \Delta, \quad (3.17)$$

т. е. при исходном контрасте 1,01 : 1 ( $\Delta \approx 0,01$ ) происходит его усиление в 500 раз.

Однако такой режим работы структуры МДП-ЖК обладает существенным недостатком — необходимостью жесткой стабилизации положения рабочей точки, так как в результате отклонения положения рабочей точки от  $U_{пор}$  резко изменяется контраст преобразованного изображения.

Причинами, вызывающими отклонение напряжения на слое ЖК от положения рабочей точки, могут быть:

нестабильность во времени источника напряжения питания; геометрические отклонения от заданных размеров толщин слоев ФП и ЖК;

пространственная неоднородность электрофизических параметров ФП и ЖК;

температурная зависимость электрофизических параметров слоев структуры;

статистические временные изменения полных сопротивлений слоев.

При допущении ухудшения контраста преобразованного изображения на 50% флуктуации напряжения питания не должны превышать 0,1 ... 0,3 В; отклонения толщин слоя ФП — не более 0,3 мкм, а слоя ЖК — 0,03 мкм (неплоскостность опорных поверхностей ЖКЯ должна быть не хуже 0,1N); точность поддержания температуры ПВМС должна быть порядка 0,1 ... 1°С [70].

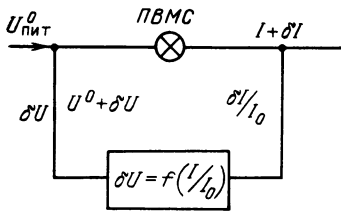


Рис. 3.3. Структурная схема регулирования рабочей точки ПВМС

Особенного внимания к себе требует температурный дрейф, вызывающий изменения как геометрических (из-за разности ТКЛР слоев), так и электрооптических свойств слоев ФП и ЖК. Влияние температуры на полупроводник сказывается в изменениях равновесной концентрации носителей и темнового генерационного тока. Повышение температуры уменьшает вязкость и упругость ЖК и в то же время

уменьшает анизотропию показателей преломления, что приводит к уменьшению глубины модуляции света в ЖК, а следовательно, и ослаблению контраста преобразуемого изображения. Изменение температуры влияет также на диэлектрическую анизотропию ЖК и как следствие на чувствительность прибора.

Для снижения изменений напряжения на слое ЖК из-за изменения  $\epsilon_{жк}$  и перераспределения напряжения между слоями структуры необходимо выбирать ЖК с минимальным  $U_{пор}$ , а геометрические и другие параметры слоев таким образом, чтобы получить минимальное отношение  $U_{жк}/U_{пит}$ .

Расширить температурный диапазон режима повышения контраста изображений ПВМС с пороговой переходной характеристикой можно с помощью обратной оптико-электрической связи между уровнями оптического пропускания и напряжения питания. Это позволяет через вольт-контрастную характеристику ЖК определять уровень пропускания и в условиях изменения температуры поддерживать его заданный уровень.

Структурная схема регулирования рабочей точки (рис. 3.3) описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} I/I_0 = \varphi(U_{жк}) = \varphi(p U_{пит}); \\ U_{пит} = U^0_{пит} + f(I/I_0), \end{cases} \quad (3.18)$$

$$U_{пит} = U^0_{пит} + f(I/I_0), \quad (3.19)$$

где  $0 < p < 1$ ;  $U^0_{пит}$  — неизменная часть напряжения питания;  $\varphi(U_{жк})$  — передаточная функция слоя ЖК (вольт-контрастная характеристика);  $f(I/I_0)$  — передаточная функция цепи обратной связи.

При изменении оптического пропускания ПВМС  $\delta I/I_0$  решение системы уравнений (3.18), (3.19) дает выражение, связывающее крутизны передаточных функций петли обратной связи и вольт-контрастной характеристики слоя ЖК:

$$f'(I/I_0) \varphi'(p U_{пит}) p = 1. \quad (3.20)$$

Численная оценка уравнения (3.20) показывает, что при относительном изменении интенсивности света, прошедшего через ПВМС в пределах изменения контраста, в 2 раза, регулирующая схема должна изменить напряжение питания структуры на 0,1 В (для двист-эффекта).

**Преобразование изображения с максимальной разрешающей способностью.** Одно из основных критериев качества преобразованного ПВМС изображения — его разрешающая способность (РС), которая определяется с помощью функции передачи модуляции (ФПМ).

Измеряется ФПМ по проекционной или голографической методике. Проекционная методика заключается в проецировании на вход ПВМС штриховой тест-миры (или тест-решетки) с переменной по площади плотностью штрихов. Голографическая методика предусматривает формирование во входной плоскости ПВМС с помощью интерферометра Майкельсона интерференционной картины — дифракционной решетки с периодом, определяемым углом наклона подвижного зеркала интерферометра.

Оптическую информацию, записанную в модуляторе, можно считать как поляризационно-оптическим, так и дифракционным методами.

При считывании поляризационно-оптическим методом одним из основных параметров ПВМС является его амплитудное пропускание, которое зависит от пространственной частоты записываемого сигнала и определяется частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ).

При дифракционном методе считывания, когда считываемая информация с помощью фурье-объектива формируется в частотной плоскости в виде пространственного спектра, определяется дифракционная эффективность  $\eta$  как отношение интенсивности считываемого света в первом дифракционном порядке к интенсивности света в падающем пучке при различных пространственных частотах входного сигнала.

С целью достижения максимальной разрешающей способности в работах [6, 45] проанализированы физические процессы, происходящие в структуре МДП-ЖК, что позволило выявить:

1. Ограничения РС, возникающие из-за конечных глубин резкости, формирующей изображение оптической системы, и поглощения света, несущего записываемое изображение.

2. В случае формирования структуры на ВОП

- ограничение собственной РС ВОП;

- смазывание изображения на границе раздела ВОП — полупроводник.

3. Электростатическое провисание поля в поперечном направлении в полупроводнике и слое ЖК.

4. Растекание носителей заряда при их дрейфе в объеме полупроводника.

5. Растекание заряда на границе П — Д (полупроводник — диэлектрическое зеркало).

6. Растекание заряда в многослойной структуре диэлектрического зеркала.

7. Упругая деформация слоя ЖК.

В случае слабого поглощения записываемого света в полупроводнике, когда глубина проникновения света  $l$  больше толщины полупроводника  $L_n$ , оптимальна наводка оптической системы на резкость в середине полупроводниковой пластины. Заряды порождаются светом по всей толщине полупроводника, и размер пре-

образованного изображения точечного объекта  $\Delta r$  определяется выражением

$$\Delta r \approx \frac{L_n}{2n \sqrt{1 + (f'/D)^2 - 1/n^2}} \quad (3.21)$$

где  $n$  — показатель преломления полупроводника;  $f'/D$  — относительное отверстие оптической системы формирования изображения.

При  $n=2$ ;  $f'/D=2$ ;  $L_n=200$  мкм  $\Delta r=25$  мкм и разрешающая способность ограничена значением  $40 \text{ мм}^{-1}$ .

В условиях сильного поглощения  $l \ll L_n$  и 90% поглощенной энергии приходится на тонкий приповерхностный слой полупроводника толщиной  $2l$ , резкое входное изображение проецируется на переднюю поверхность полупроводника и  $\Delta r$  определяется из уравнения

$$\Delta r \approx \frac{l}{n \sqrt{1 + (f'/D)^2 - 1/n^2}} \quad (3.22)$$

При использовании оптики с  $(f'/D) < 1$  разрешающая способность практически не зависит от относительного отверстия и ограничивается величинами  $n/L_n$  и  $n/2l$ .

Применение ВОП позволяет отказаться от проекционной оптической системы формирования входного изображения, которая вносит большие энергетические потери. Кроме того, при стыковке ПВМС с ЭЛТ с помощью ВОП получается надежная и компактная конструкция. Однако предел разрешения прошедшего через ВОП изображения ограничен размером волокна и составляет 6 ... 10 мкм.

В МДП-ЖК структуре, сформированной на ВОП с помощью оптического клея, записываемый свет, выходя из ВОП, проходит зазор между ВОП и полупроводником. Ухудшение разрешения в этом слое определяется выражением

$$\Delta r \approx \frac{n_{\text{ВОП}}}{n_{\text{кл}}} \cdot \frac{L_{\text{кл}}}{2F_{\text{ВОП}}} \quad (3.23)$$

где  $n_{\text{ВОП}}$  и  $n_{\text{кл}}$  — показатели преломления волокна ВОП и оптического клея;  $L_{\text{кл}}$  — толщина зазора;  $F_{\text{ВОП}}$  — показатель ВОП. При  $L_{\text{кл}}=1$  мкм значение  $\Delta r$  пренебрежимо мало ( $\Delta r < 2$  мкм).

При экспозиции полупроводника ПВМС рожденные пары электрон — дырка разделяются в электрическом поле и накапливаются на противоположных границах полупроводника, образуя электростатическое поле. Силовые линии этого поля провисают, создавая неоднородность размером  $\Delta r$ . Для полупроводника и ЖК значение  $\Delta r$  различно, так как определяется толщиной и диэлектрической проницаемостью слоя. При этом разрешающая способность определяется в основном провисанием поля в слое ЖК. Поэтому верхний предел толщины слоя ЖК ограничен искажениями электрического поля носителей зарядов полупроводника.

Растекание носителей заряда при их дрейфе в обедненной области полупроводника к границе раздела П—Д определяется выражением

$$n(r, \tau) \sim \exp(-r^2/4 D_n \tau), \quad (3.24)$$

где  $n(r, \tau)$  — концентрация носителей заряда;  $D_n$  — коэффициент диффузии;  $\tau$  — время растекания, определяемое дрейфом носителей через кристалл;  $r$  — радиус растекания.

Растекание носителей в этом случае определяется из выражения для длины диффузии

$$\Delta r \approx 2 L_n (kT/qU)^{1/2}$$

и при  $kT/q=0,03$  В,  $U=30$  В и  $L_n=200$  мкм  $\Delta r$  составляет 12 мкм.

Наибольшее влияние на разрешающую способность оказывает процесс растекания носителей заряда, накопленных на границе раздела П—Д. Свободному растеканию носителей на границе П—Д препятствуют поверхностные состояния (ловушки), а также потенциальный рельеф, созданный встроенным зарядом диэлектрического слоя, носящий случайный характер. Для организации заданного потенциального рельефа можно использовать на поверхности полупроводника решетку, выполненную в виде прозрачного электрода или вытравленную в полупроводнике на определенную глубину.

В [45] на поверхности полупроводника имплантирована сетка из микродиодов для фокусировки неосновных носителей зарядов, а также для создания потенциальных ям, ограничивающих поперечное растекание заряда. При создании сетки микродиодов с разрешающей способностью 150 лин./мм растекание ограничивается значением  $\Delta r=6$  мкм.

При локальном возбуждении слоя ЖК его упругая деформация приводит к тому, что в процесс переориентации вовлекаются не только молекулы ЖК, находящиеся в области повышенного электрического поля, но лежащие вне его. Причем равенство электрической и упругой энергии обуславливает зависимость разрешающей способности от значения  $\Delta \epsilon$ . С уменьшением  $\Delta \epsilon$  значение разрешающей способности увеличивается.

#### 3.4. ВЛИЯНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СЛОЯ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ СТРУКТУРАМИ МДП-ЖК

Качество изображения определяется не только контрастом и количеством разрешаемых элементов, но и распределением этих характеристик по рабочей площади (см. § 3.1). Однородность преобразованного изображения зависит как от распределения по апертуре оптических и электрофизических свойств слоев структуры, так и от конструктивно-технологических факторов, обуслов-



ленных необходимостью создания плоскопараллельной многослойной структуры.

Серьезным препятствием на пути получения высококачественных ПВМС с большой апертурой является несовершенство выращиваемых монокристаллов полупроводников: дислокации, примесные неоднородности, собственные точечные дефекты (СТД) структуры и их скопления.

Монокристаллы больших диаметров выращиваются в основном методом Чохральского. Причинами образования дислокаций в монокристаллах являются термические напряжения, обусловленные неоднородным распределением температур в слитке. Значение термоупругих напряжений в монокристаллах Si, GaAs, InSb, выращиваемых в реальных условиях, составляет  $(10^5 \dots 10^6)$  Па. Причем в поперечном сечении растущего кристалла напряжения максимальны у поверхности. С увеличением диаметра монокристаллов уровень термоупругих напряжений возрастает. Значение и распределение термоупругих напряжений по длине растущего кристалла определяются характером теплообмена кристалла с окружающей средой.

Экспериментальные значения критических напряжений образования дислокаций  $[\tau]_{кр}$  для Si составляют  $(60 \dots 150) \cdot 10^{-4}$  Па, а для GaAs —  $(7 \dots 10) \cdot 10^{-4}$  Па. Низкое значение критического напряжения образования дислокаций в GaAs подтверждает практическую сложность задачи получения (в отличие от Si) бездислокационных монокристаллов GaAs (с плотностью дислокаций, не превышающей  $10^3 \text{ см}^{-2}$ ). Плотность дислокаций в реальных монокристаллах GaAs составляет  $10^4 \dots 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

Основная причина неоднородности монокристаллов по электрофизическим свойствам — неравномерное распределение легирующих примесей в объеме монокристалла. Введение легирующих примесей оказывает существенное влияние на дислокационную структуру монокристаллов полупроводника. Неравномерное распределение примеси в объеме слитка является источником возникновения внутренних напряжений, в результате которых в кристалле происходит дополнительная генерация дислокаций. В свою очередь дислокации существенно влияют на характер распределения примесей в объеме кристалла.

Собственные точечные дефекты часто выступают в роли основных остаточных дефектных центров, определяя параметры полупроводниковых материалов. Важнейшими СТД являются вакансии и междоузельные атомы, а также комплексы, образующиеся в результате взаимодействия этих дефектов между собой или с атомами остаточных и легирующих примесей. В элементарных полупроводниках основной источник СТД — тепловые колебания атомов кристаллической решетки при выращивании монокристалла, в бинарных полупроводниковых соединениях — отклонения состава от стехиометрического в пределах области гомогенности. Поддержание требуемого состава расплава наталкивается на большие трудности, связанные с летучестью одного из компонентов соединения (в GaAs мышьяк). В результате кристалл растет из расплава, обогащенного одним из компонентов и возникающие при этом неоднородности обуславливают соответствующую неоднородность распределения СТД в кристалле.

Присутствующие в кристалле дислокации являются эффективными внутренними стоками для подвижных СТД. Взаимодействие дислокаций с СТД пред-

ствляется одной из причин неоднородного распределения последних в объеме монокристалла. Содержание СТД в монокристаллах GaAs достигает  $10^{18} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

В работах [72, 73] проводятся исследования влияния дислокаций на формирование свойств слаболегированного полуизолирующего GaAs. Неоднородности свойств кристалла коррелируют с распределением в его объеме дислокаций, так как на последних происходят сток и рекомбинация СТД. В результате вокруг дислокаций образуются протяженные области с измененными структурой и физическими свойствами, причем области с более высокой плотностью дислокаций обогащаются мышьяком и становятся менее «вакансионными».

Дислокации, образующиеся в процессе выращивания при различных температурах, вносят различный вклад в формирование неоднородности свойств материала.

На рис. 3.4 представлены радиальные распределения плотности дислокаций, фототока (*a*) и удельного сопротивления, концентрации и подвижности электронов (*б*) для пластины GaAs, содержащей только «высокотемпературные» дислокации, образовавшиеся при температурах, близких к температуре плавления кристалла ( $1100^\circ \text{C}$ ). Из рис. 3.4 видно, что увеличение  $N_d$  приводит к возрастанию фототока, концентрации и подвижности электронов и уменьшению удельного сопротивления.

Отсутствие заметного вклада «низкотемпературных» (менее  $1000^\circ \text{C}$ ) дислокаций в формирование неоднородности свойств GaAs иллюстрируется рис. 3.5. Несмотря на то, что суммарная плотность дислокаций в центре увеличена за счет образования в процессе выращивания центрального скопления низкотемпературных дислокаций, распределение фототока в этом кристалле отве-

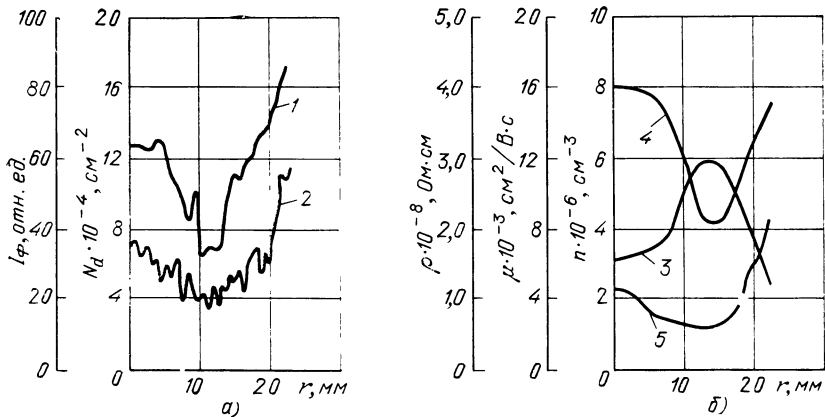


Рис. 3.4. Радиальные распределения в направлении  $\langle 110 \rangle$  фототока 1 и плотности дислокаций 2 (*a*), а также удельного сопротивления 3, концентрации 4 и подвижности 5 электронов (*б*) для пластины, содержащей только «высокотемпературные» дислокации

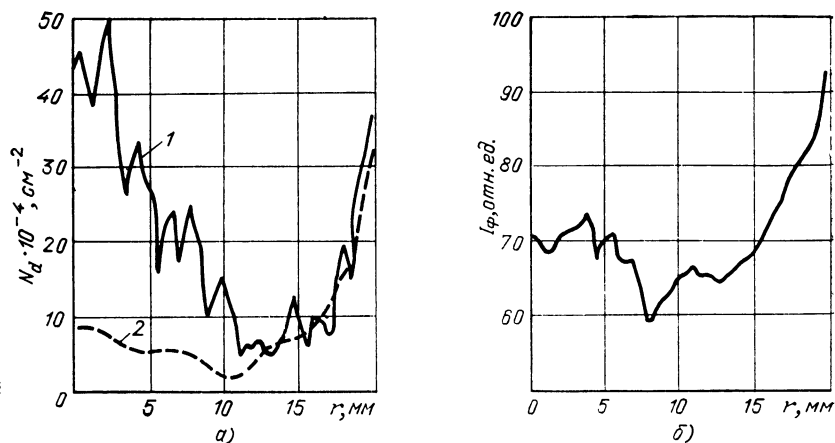


Рис. 3.5. Радиальные распределения в направлении  $\langle 110 \rangle$  суммарной плотности дислокаций 1, плотности «высокотемпературных» дислокаций 2 (а) и фототока для пластины с центральным скоплением «низкотемпературных» дислокаций (б)

чает распределению только «высокотемпературных» ростовых дислокаций. Таким образом, условием получения монокристаллических полупроводниковых пластин с однородным распределением электрофизических параметров может быть не только понижение плотности дислокаций до  $10^{-3} \text{ см}^{-2}$ , но и понижение доли «высокотемпературных» дислокаций. Допустима и достаточна высокая плотность «высокотемпературных» дислокаций, но с равномерным их распределением по поперечному сечению слитка.

**Контроль неоднородности GaAs.** В настоящее время исследование микро- и макро-неоднородностей полупроводниковых материалов — распределения глубоких уровней и плотности дислокаций — обычно осуществляется с помощью химического травления, измерения токов утечек, анализа фото- и катодолюминесценции и оптического излучения.

В [74] описан фотоэлектрический метод неразрушающего контроля полупроводниковых пластин, который заключается в регистрации распределения фотоотклика при сканировании пластины лазерным зондом с длиной волны, соответствующей области примесного поглощения.

Для измерения используется автоматизированная установка лазерного сканирования с перестраиваемым лазером ЛГ-126 ( $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$  и  $1,15 \text{ мкм}$ ) [75]. В режиме сканирования результаты измерений фототока записываются в память ЭВМ. В режиме считывания информация после обработки выводится на экран видеоконтрольного устройства (ВКУ).

Контакты к обеим сторонам пластины GaAs создаются в специальной кювете с помощью нейтрального электролита. В результате получается структура с двумя включенными навстречу друг другу поверхностными барьерами. При подаче внешнего напряжения смещения фотоответ определяется барьерными

фототокама и током фотопроводимости в объеме пластины, причем соотношение этих компонентов зависит от  $\lambda_{\text{вэл}}$ , приложенного напряжения, поверхностных и объемных свойств исследуемой структуры.

При длине волны зондирующего излучения  $\lambda = 1,15$  мкм в фотоответном изображении пластины из слитка, выращенного по методу Чохральского, присутствует зернистая или ячеистая неоднородность с характерным размером 100 ... 150 мкм. Отсутствие ячеистой неоднородности на длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм указывает на ее связь с объемными свойствами материала. По сходству ячеистой неоднородности фотоответного изображения с ячеистой структурой распределения ямок травления определяется связь неоднородности фотоответного изображения с дислокационной структурой полупроводника. Сравнительный анализ распределения фототока и ямок травления показывает, что дислокационные стенки и линии, влияющие на фототок, находятся в объеме пластины в разных плоскостях.

Как было отмечено выше, дислокации, с одной стороны, являются центрами рекомбинации, с другой — служат геттерами для примесей и дефектов, т. е. очищают от них область в несколько десятков микрометров вокруг себя, определяя различный уровень сигнала фотоответа в соответствии с зернистым изображением (областями с разным значением контраста).

В [76] описывается неразрушающий метод визуализации структурной неоднородности высокоомных полупроводниковых монокристаллов с использованием синтезатора псевдоцветных изображений. Возможность применения этого метода обуславливается тем, что при работе структуры МДП-ЖК независимо от передаваемого изображения в считывающем световом пучке, отраженном от поверхности полупроводника, присутствует наряду с основным скрытое, артефактное изображение, связанное с неоднородностью апертуры МДП-ЖК. Причем сопоставление фрагментов артефактных изображений с картиной избирательного химического травления полупроводникового материала показывает корреляцию между этим изображением и дефектами кристаллической структуры. Используя эффект перефокусировки изображений, формируемых структурами МДП-ЖК [5], можно перестраивать оптическую систему и получать разделенные в пространстве артефактное и передаваемое изображения.

Реализация указанного метода заключается в организации оптической схемы синтезатора псевдоцветных изображений [5], предназначенной для преобразования слабоконтрастных черно-белых изображений в псевдоцветное с последующей спектральной селекцией полученных псевдоцветных изображений для усиления и выделения интересующих наблюдателя фрагментов.

Для формирования картин дефектности полупроводниковых пластин используется жидкокристаллическая ячейка (ЖКЯ), изготовленная в виде кюветы из прозрачных стеклянных пластин, на внутренние стороны которых нанесены ЭППП  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$ . Ана-

лизируемая полупроводниковая пластина помещается в ЖКЯ, заполненную жидким кристаллом.

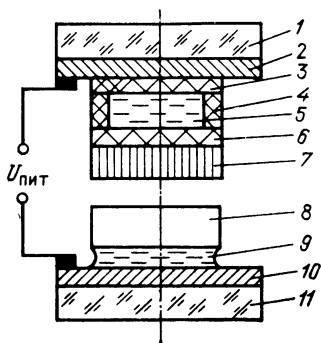
При использовании полевого S-эффекта в НЖК на одну из сторон полупроводниковой пластины наносится ориентирующее покрытие. Таким образом получается МДПДМ-структура, в которой в качестве диэлектрических слоев используется ЖК, а формирование картины неоднородности полупроводникового материала происходит по тому же принципу, что и преобразование изображений с помощью ПВМС в системах оптической обработки информации.

На прозрачные электроды ЖКЯ подается импульсное или синусоидальное напряжение питания. Параметры напряжения питания выбираются экспериментально для каждого конкретного образца, т. е. с учетом геометрических размеров пластины и свойств полупроводникового материала. Однако для получения качественной картины дефектности необходимо не только выбирать параметры напряжения питания структуры, но и создавать равномерные по апертуре слои ЖК толщиной, согласованной с толщиной полупроводниковой пластины (2... 10 мкм). Указанные требования ограничивают применение ЖКЯ такой конструкции для оперативного контроля структурной неоднородности полупроводниковых пластин.

Более технологична конструкция ЖКЯ, изображенная на рис. 3.6. Исследуемая полупроводниковая пластина контактным методом механически зажимается между входной стеклянной подложкой с прозрачным электродом и нанесенным на нее слоем ЖК и ЖКЯ, сформированной на металловолоконной пластине, по микропроводникам которой на светомодулирующий слой ЖК передается сформированный на поверхности полупроводника зарядовый рельеф.

Такая конструкция ЖКЯ позволяет оперативно контролировать полупроводниковые пластины различной толщины и габаритных размеров. Особенно перспективно применение такого метода контроля полупроводниковых пластин при механической обработке второй стороны полупроводниковой пластины в составе склейки с ВОП МДП-структуры (см. § 2.7), так как позволяет целенаправленно уменьшать толщину полупроводника для уменьшения объемных структурных дефектов монокристалла.

При работе оптической схемы синтезатора псевдоцветных изображений важен выбор диапазонов длин волн записывающего и считывающего световых



При работе оптической схемы синтезатора псевдоцветных изображений важен выбор диапазонов длин волн записывающего и считывающего световых

Рис. 3.6. Конструкция ЖКЯ для контроля дефектов структуры полупроводниковой пластины:

1, 11 — стеклянная подложка; 2, 10 — прозрачный электрод; 3, 6 — ориентирующий слой; 4 — прокладка; 5, 9 — ЖК; 7 — металловолоконная пластина; 8 — полупроводник

потоков. Это связано с оптическими свойствами и особенностями функциональной неоднородности исследуемых полупроводниковых материалов, в частности с положением края собственного поглощения и наличием в запрещенной зоне энергетических уровней, связанных с электрически активными центрами, образующими ОПЗ. на структурных дефектах в монокристаллах. Использование полихроматических пучков света записи и считывания с набором длин волн, соответствующих собственному поглощению полупроводника, существенно снижает контраст выявляемых картин неоднородности. Избавиться от этого нежелательного эффекта можно с помощью спектральной селекции световых потоков посредством применения соответствующего цветного фильтра.

Предпочтительнее визуализировать артефактное изображение белым поляризованным светом. В этом случае возможен такой выбор режима питания структуры, при котором максимум интенсивности одной длины волны на выходе структуры будет соответствовать минимуму другой и, наоборот, что позволяет получить на экране псевдоцветное изображение со сменой цветовой гаммы при измерении режима питания.

Основной визуализации псевдоцветных изображений неоднородности полупроводникового материала с помощью МДП-ЖК-структур является зависимость показателя преломления слоя ЖК от длины волны проходящего света, интенсивность которого определяется из известного выражения (см. § 3.2).

При считывании белым светом модуляционная характеристика ЖКЯ может быть представлена в виде суперпозиции соответствующих характеристик вида (3.8) для каждой длины волны, т. е. каждому значению  $\Delta\Phi$  соответствует свое определенное распределение интенсивности по длинам волн. Это справедливо в предположении, что  $\Delta n$  не зависит от  $\lambda$ . Однако в общем случае показатель преломления ЖК зависит от длины волны света и, как правило, увеличивается по мере уменьшения  $\lambda$  [77]. Учет этой зависимости приводит к увеличению различия между числом осцилляций на модуляционной характеристике слоя ЖК в зависимости от длины световой волны.

При визуальном наблюдении глаз реагирует не только на суммарную интенсивность прошедшего через модулятор света, но и на его спектральный состав. Любое изменение исходного распределения интенсивности по длинам волн воспринимается как окрашивание наблюдаемой картины в определенный цвет.

При визуализации артефактных изображений можно выделить в данном псевдоцветном изображении длины волны (диапазона длин волн), для которой рабочая точка, определяемая режимом питания структуры (см. § 3.3) и интенсивностью светового пучка, окажется на участке наибольшей крутизны характеристики (см. § 3.3), что позволяет усилить слабоконтрастные детали.

Псевдоцветные артефактные изображения получают следующим образом. Выбором параметров напряжения питания формируют и визуализируют изображение функциональной неоднородно-

сти полупроводника с любой цветовой гаммой. Варьируя режимы питания структуры подбирают цветосочетания для своеобразного «оконтуривания» представляющих интерес деталей изображения и дополнительно осуществляют селекцию этих деталей по яркости. Для усиления контраста артефактного изображения проводят спектральную селекцию записывающего и считывающего световых потоков — в оптическую схему визуализации вводят светофильтры с полосой пропускания, позволяющей выделить в полупроводниковом материале поглощение, свойственное локализованным состояниям. Для идентификации и анализа картины структурных неоднородностей материала необходимо ее пространственно отделить от картины механических нарушений (царапины, сколы), что возможно благодаря эффекту перефокусировки, состоящему в смещении плоскостей формирования изображения при изменении напряжения на слое ЖК.

Проведенный контроль высокоомных пластин GaAs толщиной 200 мкм по данной методике с использованием ЖКЯ на основе ЖК-654 с  $U_{\text{пит}} \approx 20$  В,  $f = 100$  кГц и светофильтров ОС-13 или ЖЗС-18 (с полосой пропускания в ИК-области) позволили выявить неоднородность типа зернистой структуры с минимальным размером области около 20 мкм, а также крестообразные образования, связанные с характерным распределением дислокационных стенок в монокристаллах арсенида галлия, и другие дефекты, линейные размеры которых больше разрешающей способности структуры.

### 3.5. СТРУКТУРЫ МДП-ЖК НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

В последние годы в электронной технике проявляется повышенный интерес к созданию фотоэлектрических преобразователей на основе гидрогенизированного аморфного кремния a-Si:H, обладающего характеристиками хорошего полупроводника при низкой стоимости и простоте изготовления тонкопленочных структур a-Si:H.

Одной из основных областей применения a-Si:H является солнечная энергетика, так как коэффициент оптического поглощения  $\alpha$  видимого света у a-Si:H более чем на порядок превышает  $\alpha$  кристаллического Si (толщина оптического поглощения в a-Si:H составляет 0,5...1 мкм), а ширина запрещенной зоны лучше стыкуется с положением энергетического максимума в спектре солнечного излучения.

Пленки a-Si:H в зависимости от условий получения имеют темновое удельное сопротивление  $\rho = 10^7 \dots 10^{10}$  Ом·см, ширину запрещенной зоны 1,5...1,8 эВ, коэффициент поглощения в видимой области спектра  $\alpha = 10^4 \dots 10^5$  см<sup>-1</sup> [71]. Благодаря резкому (по отношению к аморфному кремнию) снижению плотности локализованных состояний в запрещенной зоне (до  $10^{16} \dots 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), являющихся основными рекомбинационными центрами, у

$a\text{-Si:H}$  вполне приемлемое значение подвижности неосновных носителей зарядов  $\mu \approx 1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , в результате чего время жизни  $\tau \approx 10^{-3} \dots 10^{-7} \text{ с}$ , а диффузионная длина  $L_D \approx 0,2 \text{ мкм}$  [78].

Перечисленные характеристики  $a\text{-Si:H}$  открывают перспективу создания многослойных тонкопленочных структур типа ФП-ЖК или МДП-ЖК с высокими чувствительностью в видимой области спектра и быстродействием, обеспечивающих отличное качество преобразованных изображений. В работе [79] представлены данные о ПВМС на основе  $a\text{-Si}$ , чувствительного в диапазоне длин волн  $0,5 \dots 1,5 \text{ мкм}$ , с чрезвычайно малой инерционностью  $\tau_{\text{вкл}} = 10^{-5} \text{ с}$ . Использование  $a\text{-Si:H}$  предполагает создание ПВМС с улучшенными характеристиками. Кроме того, появляется возможность исключения из конструкции прибора слоя оптического клея, накладывающего температурные ограничения на технологию изготовления и эффективность работы структуры (см. § 2.7).

Структурные и электронные свойства пленок  $a\text{-Si:H}$  (ширина запрещенной зоны, перенос заряда, оптическое поглощение и др.) чувствительны к условиям осаждения аморфных пленок, которые в свою очередь определяют содержание водорода в структуре материала и природу химических связей Si с H. К настоящему времени разработано несколько методов получения пленок  $a\text{-Si:H}$ : разложение силана в плазме тлеющего разряда, реактивное ВЧ-распыление в атмосфере, содержащей водород, ионно-лучевое осаждение, химическое осаждение из паровой фазы силанов высших порядков типа  $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$ , где  $n \geq 2$ , и др. [80].

Метод плазменного осаждения является наиболее распространенным для  $a\text{-Si:H}$ . Тлеющий разряд создается обычно в атмосфере газовой смеси  $\text{SiH}_4$  с аргоном или водородом при давлениях  $0,1 \dots 1,0 \text{ Па}$ .

Для поддержания плазмы используются как постоянное, так и ВЧ электрические поля. Скорость роста слоев составляет  $1,5 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$  и возрастает с увеличением содержания  $\text{SiH}_4$  в газовой фазе. Легирование пленок осуществляется введением в газовую фазу гидридов бора, фторида бора ( $p$ -тип) или фосфина, арсина ( $n$ -тип).

Минимальная плотность локализованных состояний достигается при температурах осаждения  $250 \dots 300^\circ \text{С}$ . От условий осаждения пленки, таких как температура подложки, тип разряда, мощность разряда, давление  $\text{SiH}_4$ , расход  $\text{SiH}_4$ , прежде всего зависит концентрация H в структуре  $a\text{-Si:H}$  (в пределах  $5 \dots 50\%$ ). Температура подложки влияет на процесс термического разложения радикалов на поверхности растущей пленки и, как правило, с повышением температуры подложки содержание H уменьшается. Причем пленки, полученные при температурах подложки ниже  $200^\circ \text{С}$ , обладают плохими электронными свойствами, так как содержат дигидридные и тригидридные группы, являющиеся центрами рекомбинации.



При нагревании пленок  $a\text{-Si:H}$  до температур, превышающих температуру нанесения (более  $350^\circ\text{C}$ ), происходит диффузия водорода из материала, увеличивающая плотность оборванных связей.

При повышении мощности ВЧ-поля наблюдается увеличение скорости осаждения, которое приводит к замедлению термического разложения радикалов  $\text{SiH}_4$  на поверхности пленки, уменьшению десорбции молекулярных комплексов под действием частиц плазмы, в результате чего концентрация  $\text{H}$  в аморфном материале увеличивается. Скорость осаждения можно увеличить и отрицательным смещением, приложенным к подложке (ВЧ-плазма). С возрастанием давления  $\text{SiH}_4$  концентрация  $\text{H}$  в пленке  $a\text{-Si:H}$  уменьшается.

Количество водорода и природа химических связей с атомами  $\text{Si}$  в аморфном кремнии определяют оптические, электрические и фотоэлектрические свойства пленок. На рис. 3.7 представлена зависимость оптической ширины запрещенной зоны  $E_{\text{опт}}$  от концентрации  $\text{H}$  в  $a\text{-Si:H}$  [80].

Так как  $E_{\text{опт}}$  определяется концентрацией  $\text{H}$  в  $\text{Si-H}$ -связях, то это указывает на присутствие в пленке  $a\text{-Si:H}$  различных структурных конфигураций:  $\text{SiH}$ -,  $\text{SiH}_2$ -,  $(\text{SiH}_2)_n$ -групп. В определении ширины запрещенной зоны  $a\text{-Si:H}$  преобладающую роль играют одиночные связи  $\text{SiH}$ . Уменьшение температуры подложки способствует возрастанию содержания водорода в пленке, в результате чего край валентной зоны смещается вниз, а следовательно, возрастает  $E_{\text{опт}}$ .

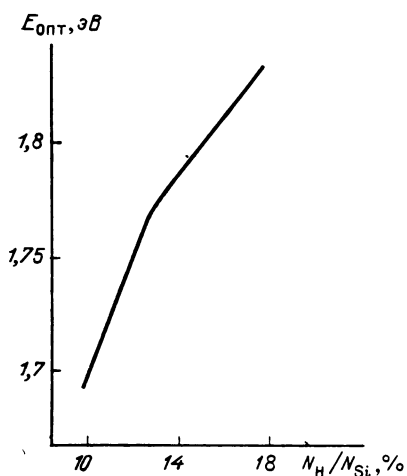


Рис. 3.7. Зависимость оптической ширины запрещенной зоны от концентрации  $\text{H}$  в пленке  $a\text{-Si:H}$

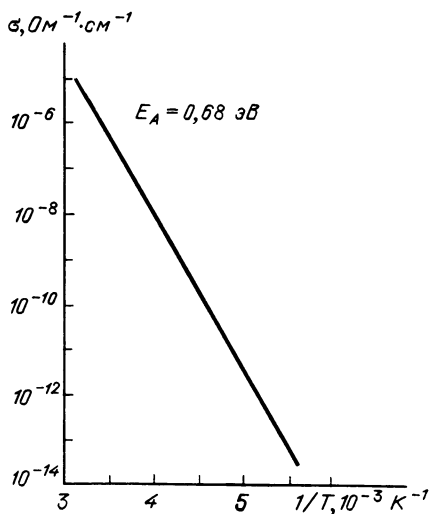


Рис. 3.8. Зависимость темновой проводимости пленки  $a\text{-Si:H}$  от обратной температуры

В области низких энергий фотонов, где  $\alpha < 10^2 \text{ см}^{-1}$ , аморфные полупроводники имеют экспоненциальный хвост поглощения, а в коротковолновой области спектра  $\alpha$  изменяется по закону

$$\alpha = B (h\nu - E_{\text{опт}})^2 / h\nu, \quad (3.25)$$

где  $B$  — константа.

Как было отмечено в § 3.1, важное значение для эффективной работы ПВМС имеют удельное сопротивление и фотопроводимость полупроводника.

Температурная зависимость темновой проводимости пленки a-Si:H может быть представлена формулой [78]

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3.26)$$

где  $E_a = E_c - E_F = 0,2 \dots 0,8$  эВ для нелегированного a-Si:H.

На рис. 3.8 представлена зависимость темновой проводимости пленки a-Si:H от обратной температуры. При экспозиции на свету в пленках a-Si:H могут происходить большие обратимые изменения как в темновом сопротивлении, так и в фотопроводимости.

Существенное значение для применения пленок a-Si:H в технике имеют вопросы их термической стабильности и деградации при повышенных температурах, обусловленные выделением водорода и кристаллизацией материала. С повышением температуры отжига от 200 до 700°С толщина пленок сначала возрастает на 5%, проходит через максимум при температуре 350°С и затем падает на 20%. При 700°С пленки становятся поликристаллическими. Эти изменения вызваны уходом H из SiH<sub>2</sub> до температуры 350°С и уменьшением плотности аморфного кремния. После 350°С происходит перестройка структуры аморфного кремния с увеличением плотности вследствие выделения H из SiH и других конфигураций, а также кристаллизации Si. Таким образом, пленки a-Si:H термостабильны до температуры 350°С.

В работе [81] приводятся результаты исследований характеристик ПВМС на основе a-Si:H и их сравнение с устройствами на высокоомном GaAs. Исследуемые структуры изготавливаются по традиционной конструкции на основе пленки a-Si:H толщиной 3 мкм с  $\rho = 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и слоя ЖК-654 толщиной 5... 10 мкм. Характеристики ПВМС приведены в табл. 3.1.

Среди полученных результатов необходимо отметить возможность обеспечения постоянства спектральной характеристики  $K = f(\lambda)$  в диапазоне длин волн записывающего света 650... 700 нм соответствующим подбором режимов питания структуры.

Временные характеристики ПВМС с a-Si:H также зависят от режимов питания. Варьирование амплитуды и частоты напряжения питания приводит к изменению времен включения и выключения в диапазоне  $5 \cdot 10^{-3} \dots 0,2$  с. Причем быстроедействие структур ограничивается не инерционностью ЖК, а либо процессами, происходящими в полупроводнике, либо инерционностью,

Таблица 3.1

Параметры ПВМС	Тип ФП	
	a-Si : H	GaAs
Пороговая чувствительность, Вт/см <sup>2</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>
Область спектральной чувствительности, нм	550...800	550...1000
Время включения, 10 <sup>-3</sup> с	5...200	10...50
Время выключения, 10 <sup>-3</sup> с	5...200	10...50
Дифракционная эффективность $\eta$ , %, при $\nu=30$ мм <sup>-1</sup>	2	4

обусловленной перераспределением зарядов в структуре МДП-ЖК. Так как для аморфных пленок a-Si : H время жизни электронов существенно зависит от условий получения слоев, то модуляторы, изготовленные при различных условиях, могут иметь большой разброс значений быстродействия.

Более низкое значение дифракционной эффективности ПВМС на основе a-Si : H объясняется неоптимальными согласованием емкостных сопротивлений слоев a-Si : H и ЖК и выбором режимов работы структуры. При синхронизации синусоидального напряжения питания и импульсной внешней засветки (см. § 3.6) значение дифракционной эффективности для ПВМС на основе a-Si : H толщиной 3 мкм и слоя ЖК-654 толщиной 5 мкм составляет 6%, а при толщине слоя ЖК 1,5 мкм — 12%, причем  $\tau_{\text{вкл}} \approx \tau_{\text{выкл}} \approx 10^{-3}$  с.

Таким образом, по основным характеристикам: чувствительности, быстродействию, дифракционной эффективности — ПВМС на основе аморфных пленок a-Si : H сравнимы с устройствами на основе GaAs при существенном снижении трудоемкости их изготовления.

### 3.6. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПВМС

Для достижения высоких параметров ПВМС наряду с оптимизацией конструкции и технологического процесса его изготовления существенную роль играет выбор режимов работы модуляторов. В практике преобразования изображения, как правило, используется непрерывное синусоидальное напряжение питания с непрерывной или импульсной управляющей засветкой, не синхронизированной с напряжением питания.

В работе [82] показана возможность воздействия на глубину модуляции оптического отклика слоя ЖК ПВМС (структура МДП-ЖК) управляющими импульсами света малой длительности, синхронизированными с импульсами напряжения, но разной задержки. Глубина модуляции оптического отклика под действием одного светового импульса возрастает с уменьшением времени задержки.

При засветке ПВМС пакетом световых импульсов в течение действия импульса напряжения в силу интегрирующих свойств МДП-части и инерционности ЖК наблюдается интегральный оптический отклик, глубина модуляции которого зависит от частоты следования световых импульсов. Посредством синхронизации световых импульсов с пакетом однополярных импульсов напряжения возможна компенсация действия фона и термогенерации [83].

В течение действия импульса напряжения осуществляются накопление и захват поверхностными состояниями зарядов, созданных полезным сигналом, фоном и термогенерацией. В промежутке между импульсами напряжения (в отсутствие внешней засветки) имеет место только генерация фоном и теплом, которая благодаря противоположному знаку поляризации поля компенсирует захваченный заряд.

Если в течение промежутка времени между импульсами число зарядов, созданных фоном и теплом, совпадает с числом зарядов на ловушках, созданных в течение импульса, то возможна полная компенсация их действия и в системе остается только заряд, созданный полезным сигналом.

При воздействии пакета импульсов действие фона и термогенерации компенсируется, а полезный сигнал суммируется. С увеличением числа импульсов пакета полезный сигнал нарастает до заполнения потенциальной ямы.

Характеристики пространственной модуляции света в структурах МДП-ЖК при питании синусоидальным напряжением и постоянной засветке существенно зависят от параметров управляющих сигналов. В [84] показано, что МДП-структура некоторую часть полупериода находится в проводящем состоянии и не является фоточувствительной. Длительность обедненного состояния составляет лишь часть полупериода от 0,01 до 0,8 (рис. 3.9) и за-

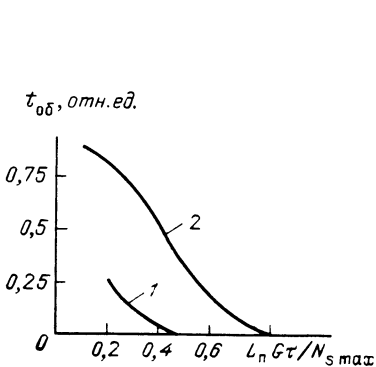


Рис. 3.9. Зависимость длительности обедненного состояния в структуре МДП-ЖК с полупроводником толщиной 200 мкм и ЖК толщиной 10 мкм от параметров  $L_n G \tau / N_s \max$ : 1 — при частоте напряжения питания 10 кГц; 2 — при частоте 30 кГц

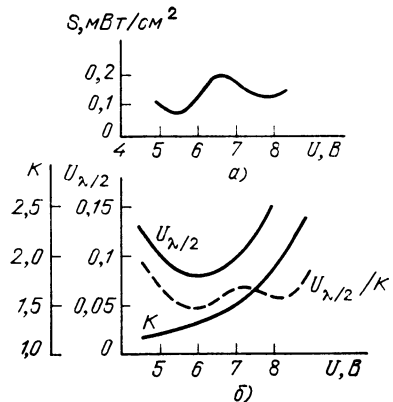


Рис. 3.10. Зависимость переключательной интенсивности света  $S$  структуры МДП-ЖК на основе кремния и  $S$ -эффекта в ЖК (а) и зависимость полуволнового напряжения ЖК  $U_{\lambda/2}$  от коэффициента перекрытия  $K$  структуры МДП (б) от напряжения на структуре

висит от параметров структуры и напряжения питания. Неполностью обедненное состояние объясняется тем, что в моменты прохождения напряжения питания через нулевое значение носители не успевают рекомбинировать и накапливаются в полупроводнике.

Повышение доли обедненного состояния в полупериоде напряжения достигается при уменьшении скорости генерации носителей, повышении частоты и амплитуды напряжения питания. Максимальная чувствительность структуры соответствует частоте напряжения питания, равной  $f_0 = 1/\tau$  (в этом случае коэффициент перекрытия  $K$  фотоварактора имеет максимальное значение). При увеличении длительности полупериода генерация носителей успевает компенсировать рост напряженности электрического поля в объеме полупроводника и доля обедненного состояния фотоварактора уменьшается. При частотах напряжения питания  $f_{\text{пит}} > f_0$  из-за непропорционально медленного возрастания времени нахождения структуры в обедненном состоянии при увеличении частоты ее чувствительность падает, так как требуется все большая интенсивность записывающего света, способная за полупериод создать число носителей, необходимое для зарядки емкости  $C_{\text{жк}}$  до необходимого напряжения.

На рис. 3.10 представлена зависимость переключающей интенсивности света от действующего значения синусоидального напряжения для структуры МДП-ЖК, использующего S-эффект. Поведение чувствительности структуры в первом приближении прямо пропорционально изменению отношения коэффициента перекрытия  $K$  к полуволновому напряжению ЖК  $U_{\lambda/2}$ . Первый максимум чувствительности соответствует достижению области максимальной крутизны модуляции света в ЖК в зависимости от напряжения.

Согласование оптимальных режимов работ МДП-части и слоя ЖК достигается применением ЖК с более высоким  $U_{\text{пор}}$ . Тогда при малых напряжениях МДП-структура еще не будет обеднена, а ЖК будет находиться в подпороговом состоянии. При повышении напряжения одновременно достигаются максимальное значение  $K$  и минимальное значение  $U_{\lambda/2}$ , в результате время чувствительности увеличивается и уменьшается значение переключающей интенсивности. Для ПВМС на основе высокоомного Si энергия переключения оптического отклика составляет  $1,5 \cdot 10^{-8}$  Дж/см<sup>2</sup>, а для ПВМС на основе GaAs —  $10^{-9}$  Дж/см<sup>2</sup>.

В состоянии обеднения в полупроводнике присутствует сильное электрическое поле, в результате которого дрейф носителей заряда преобладает над диффузионными процессами (см. гл. 1). Остальное время полупериода напряжения питания диффузионные процессы превалируют над дрейфовыми, и разрешающая способность (РС) структуры в значительной степени определяется диффузионной длиной носителей в полупроводнике  $L_D = (D\tau)^{1/2}$ . На рис. 3.11 представлена зависимость РС от длительности обедненного состояния  $t_{\text{об}}$ .

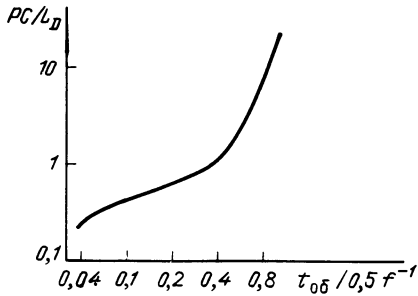


Рис. 3.11. Зависимость разрешающей способности от длительности обедненного состояния для структур на основе кремния

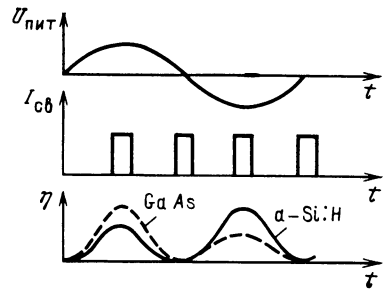


Рис. 3.12. Эпюры дифракционной эффективности  $\eta$  ПВМС на основе a—Si:H и GaAs, напряжения питания  $U_{\text{пит}}$  и управляющих световых импульсов  $I_{\text{св}}$

При малых частотах питания поле в полупроводнике быстро экранируется и накопленные носители растекаются, ухудшая РС. С повышением частоты увеличивается доля обедненного состояния (см. выше) в полупериоде напряжения, а следовательно, повышается РС (при  $f_{\text{пит}} \geq f_0$ , когда  $2t_{\text{об}}/T = \text{const}$ , РС практически не изменяется).

При условии достаточного обеднения полупроводника в структурах МДП-ЖК на основе GaAs РС достигает 100 лин./мм (если запись и считывание осуществляются со стороны слоя ЖК).

В работе [85] исследуется формирование электрооптического отклика ПВМС на основе GaAs и a-Si:H с нематическим ЖК-654 при синхронизации синусоидального напряжения питания и импульсной внешней засветки. Критерием качества работы ПВМС выбрана дифракционная эффективность преобразованного изображения, измеряемая по проекционной методике (в качестве входного изображения используется тестовая дифракционная решетка с разрешением  $\nu = 15 \text{ мм}^{-1}$ ).

На рис. 3.12 приведена зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  ПВМС от фазовой задержки светового импульса относительно синусоидального напряжения питания модулятора при равенстве их частот:  $f_{\text{св}} = f_{\text{пит}}$ . Зависимость  $\eta(t_3)$  имеет в течение одного периода синусоидального напряжения два максимума и два минимума. Положение максимального значения  $\eta$  соответствует совпадению положения светового импульса с максимумом абсолютного значения синусоидального напряжения, а положение минимальных значений — совпадению положения светового импульса с моментом изменения полярности напряжения.

Экстремальные значения  $\eta$  зависят от вида ФП и частоты напряжения питания ( $f_{\text{св}} = f_{\text{пит}}$ ) (рис. 3.13). Для ПВМС на основе GaAs электрооптический отклик имеет большее значение при совпадении положения светового импульса с положительным полупериодом напряжения питания, а для ПВМС на основе a-Si:H

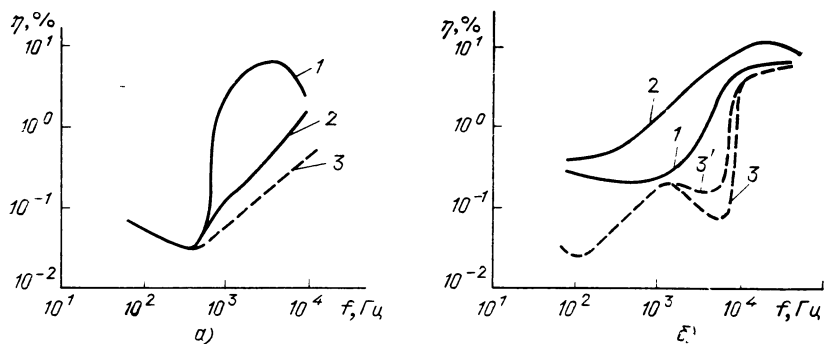


Рис. 3.13. Зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  от частоты напряжения питания  $f_{\text{пит}}$  для структуры на основе GaAs (а) и a-Si:H (б): положение импульса засветки соответствует положительному (1) и отрицательному (2) полупериодам напряжения питания, нулевому значению напряжения питания при смене полярности с положительной на отрицательную (3') и наоборот (3)

наблюдается обратная ситуация. Различие значений  $\eta$  при разной полярности напряжения питания обуславливается типом основных носителей заряда в ФП — электронов для GaAs и дырок для a-Si:H. Другая причина такого различия может состоять в наличии поверхностных центров захвата (ловушек) на границе раздела ФП — диэлектрического зеркала.

Использование диэлектрического зеркала в ПВМС накладывает дополнительные ограничения на применение структуры МДП-ЖК. Наличие гетероперехода полупроводник — диэлектрик (П—Д) сопряжено с формированием области объемного заряда на ловушках гетерограницы. В результате этого значение  $\eta$  структуры на основе a-Si:H в диапазоне частот напряжения питания  $(1,4 \dots 10) \cdot 10^3$  Гц больше, когда полярность напряжения изменяется с положительной на отрицательную, чем при обратной смене полярности напряжения (рис. 3.13,б).

Характерное уменьшение значения  $\eta$  на частотах  $f_{\text{пит}} = 10^5$  Гц также объясняется накоплением заряда на границе раздела П—Д в освещенных областях при проецировании входного изображения и значительном уменьшении динамического диапазона ПВМС.

При частотах  $f_{\text{пит}} = 20$  Гц для ПВМС на основе a-Si:H и  $f_{\text{пит}} = 50$  Гц для ПВМС на основе GaAs в случае постоянной входной засветки или больших значениях напряжения питания  $\eta$  стремится к нулю. В этом случае электрические поля, сформированные на границе раздела П—Д носителями заряда разного знака, за период напряжения питания противоположны по знаку и при усреднении за период напряжение смещения близко к нулю. (Усреднение возможно благодаря тому, что для пространственно неоднородного поля периориентация слоя ЖК определяется не только значением, но и направлением электрического поля.)

Рассогласование внешней засветки и напряжения питания приводит к уменьшению дифракционной эффективности в 6 раз.

Уменьшение значения  $\eta$  обусловлено тем, что при увеличении  $\Delta f = f_{\text{пит}} - f_{\text{св}}$  за время светового импульса успевает смениться несколько, периодов напряжения питания, что приводит к накоплению носителей заряда на границе раздела П—Д и сужению динамического диапазона фоточувствительной части ПВМС.

### 3.7. АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ СТРУКТУРЫ МДП-ЖК

Для оптимизации режимов работы ПВМС по определенному критерию качества преобразованного изображения практический интерес представляет автоматическая настройка как процесс, не зависящий от квалификации оператора.

Для осуществления автоматической настройки необходимо разработать алгоритм на основе уточненной модели структуры МДП-ЖК. Чтобы получить такую модель, рассмотрим характер изменения напряжения на слое ЖК. С этой целью воспользуемся эквивалентной электрической схемой структуры МДП-ЖК (рис. 3.14), составленной с учетом ее конструктивных особенностей.

В реальных структурах имеется ограничение максимального значения рабочей частоты напряжения питания. Постоянная времени нарастания поля в полупроводнике, определяемая выражением

$$\tau = R_{\text{п}} C_{\text{д}} = \frac{U_{\text{пит}} C_{\text{д}}}{q G_0 L_{\text{п}} S},$$

ограничивается поверхностным сопротивлением  $R_{\text{с}}$  полупроводника. Максимальное значение рабочей частоты будет определяться выражением

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2 \tau_{\text{min}}} \approx \frac{1}{2 R_{\text{с}} C_{\text{ЖК}}}. \quad (3.27)$$

и при  $R_{\text{с}} = 10^3$  Ом;  $C_{\text{ЖК}} = 1,5 \cdot 10^{-9}$  Ф;  $S = 1$  см<sup>2</sup> составляет 300 кГц. Кроме того, на высоких частотах слои структуры шунтируются ее геометрической емкостью.

Общая емкость структуры, с учетом того что диэлектрическое зеркало состоит из чередующихся слоев SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub>, определяется в соответствии с указанной схемой выражением

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{L_{\text{ЖК}}/\epsilon_{\text{ЖК}} + L_{\text{SiO}_2}/\epsilon_{\text{SiO}_2} + L_{\text{TiO}_2}/\epsilon_{\text{TiO}_2} + L_{\text{п}}/\epsilon_{\text{п}} + L_{\text{кл}}/\epsilon_{\text{кл}}}. \quad (3.28)$$

При  $L_{\text{ЖК}} = 10^{-3}$  см;  $L_{\text{SiO}_2} \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$  см;  $L_{\text{TiO}_2} \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$  см;  $L_{\text{п}} = 10^{-2}$  см;  $L_{\text{кл}} \approx 4 \cdot 10^{-4}$  см;  $\epsilon_{\text{ЖК}} \approx 17$ ;  $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 4$ ;  $\epsilon_{\text{TiO}_2} = 70$ ;  $\epsilon_{\text{п}} = 11$ ;  $\epsilon_{\text{кл}} = 4$  и  $S = 1$  см<sup>2</sup> значение  $C$  составляет примерно 80 пФ. Так как емкость слоя ЖК для приведенных значений составляет 1500 пФ, то напряжение, падающее на нем согласно формуле

$$U_{\text{ЖК}} = U_{\text{пит}} C/C_{\text{ЖК}}, \quad (3.29)$$

определяется выражением  $U_{\text{ЖК}} = 0,05 U_{\text{пит}}$ .



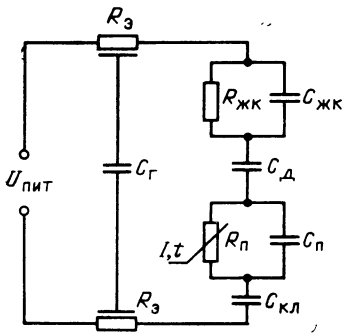


Рис. 3.14. Эквивалентная электрическая схема структуры МДП-ЖК:

$R_3$  — сопротивление прозрачных электродов;  $C_Г$  — геометрическая конструктивная емкость;  $R_{ЖК}$  и  $C_{ЖК}$  — сопротивление и емкость слоя ЖК;  $C_д$  — емкость диэлектрического зеркала и ориентирующих покрытий;  $R_п$  и  $C_п$  — сопротивление и емкость полупроводника;  $C_{кл}$  — емкость клеевого слоя

В соответствии с формулами (3.28) и (3.29) напряжение на слое ЖК в течение времени, когда  $E > E_{нас}$  (когда  $L_{об} > L_п$ ), линейно зависит от питающего напряжения. Интенсивность считывающего света при этом будет изменяться в соответствии с кривой вольт-контрастной характеристики (см. рис. 3.1).

Максимальное рабочее напряжение  $U_{ЖК}$  составляет примерно 7 В, поэтому максимальное значение напряжения питания  $U_{пит}^{max} = U_{ЖК} C_{ЖК} / C = 140$  В. Минимальное рабочее напряжение определяется значением пороговой чувствительности и для  $U_{пор} = 1$  В составляет  $U_{пит}^{min} = U_{пор} C_{ЖК} / C = 20$  В, т. е. диапазон возможных значений напряжения питания равен 20 ... 140 В и может изменяться в зависимости от геометрии и электрофизических параметров слоев МДП-ЖК.

Исследования характера изменения напряжения на слое ЖК в переменном электрическом поле показывают, что поверхностная плотность зарядов на границе раздела П — Д образуется в течение действия каждого импульса напряжения питания за счет количества зарядов, существовавших в полупроводнике до подачи напряжения  $N_s^0$ , термогенерации  $N_s^τ$  и фотогенерации  $N_s^φ$ :

$$N_s = N_s^0 + N_s^τ + N_s^φ = n_0 L_п + G_0 L_п t_и + G_φ L_п t_и, \quad (3.30)$$

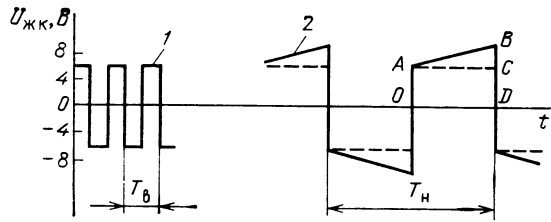
где  $t_и$  — длительность импульса напряжения питания;  $G_0$  и  $G_φ$  — скорости тепловой и фотогенерации. При отсутствии внешней подсветки, когда  $G_φ = 0$ , поверхностная плотность заряда в уравнении (3.30) определяется первыми двумя членами, причем вклад второго члена зависит от длительности импульса питания  $t_и$ .

При малых значениях  $t_и$  форма напряжения на слое ЖК практически повторяет форму питающего напряжения, а масштаб определяется отношением  $C/C_{ЖК}$ . При уменьшении частоты напряжения питания (увеличении  $t_и$ ) напряжение на слое ЖК начинает увеличиваться (см. рис. 3.15) до частоты, примерно равной  $1/(2τ)$ , ниже которой увеличение  $U_{ЖК}$  будет ограничиваться скоростью рекомбинации. Численно прирост напряжения, обусловленный термогенерацией, равен площади треугольника ABC.

Максимальное значение  $t_и$  можно оценить исходя из 10%-ного увеличения пропускания света слоем ЖК для последнего склона вольт-контрастной характеристики (см. рис. 3.1). Так как начальной точке  $U_{ЖК} = 5$  В при высокой частоте питания соответ-

Рис. 3.15. Форма напряжения, падающего на слое ЖК, при питании переменным напряжением прямоугольной формы:

1 — на высокой частоте ( $1/T_в$ );  
2 — на низкой частоте ( $1/T_н$ )



ствует  $U_{пит} \approx 100$  В, а увеличение пропускания на 10% соответствует изменению напряжения на слое ЖК  $\Delta U_{ЖК} \approx 0,2$  В, то исходя из выражения

$$U_{ЖК} = (CU_{пит} + q G_0 L_n t_n + q n_i L_n) / C_{ЖК} \quad (3.31)$$

с учетом малого значения третьего члена получаем

$$t_n^{max} = \frac{\Delta U_{ЖК} C_{ЖК}}{q G_0 L_n}, \quad (3.32)$$

где  $\Delta U_{ЖК}$  — напряжение на слое ЖК в конце импульса  $t_n$ .

Для  $C_{ЖК} = 1500$  пФ;  $G_0 = 10^{13}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>;  $L_n = 10^{-2}$  см;  $\Delta U_{ЖК} = 0,4$  В получаем  $t_n^{max} \approx 3 \cdot 10^{-2}$  с, что соизмеримо с  $\tau = 10^{-3}$  с.

Эффективное значение напряжения  $U_{ЖК}$  численно равно площади импульса  $OABD$  (см. рис. 3.15), которая состоит из площади прямоугольника формируемая за счет перераспределения напряжения по слоям структуры в момент подачи напряжения, а площадь треугольника, как было отмечено выше, — за счет генерации носителей заряда в объеме полупроводника, в данном случае — за счет термогенерации.

При воздействии на структуру записывающего и считывающего света (проникающего сквозь диэлектрическое зеркало) площадь треугольника  $ABC$  будет увеличиваться. На рис. 3.16 приведена форма напряжения на слое ЖК при значении термогенерации, сравнимой со значением фотогенерации.

При слабой освещенности структуры ( $G_\phi < 10^{14}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>) крутизна нарастания напряжения на слое ЖК увеличивается пропорционально  $G_\phi$  и  $G_0$ :

$$\Delta U_{ЖК} = q (G_\phi + G_0) L_n t_n / C_{ЖК}. \quad (3.33)$$

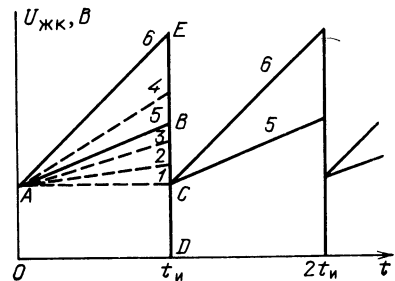


Рис. 3.16. Модуль напряжения, падающего на слое ЖК, и его составляющие:

1 — составляющая напряжения, обусловленная геометрией и электрофизическими параметрами слоев; 2 — температурная составляющая; 3 — составляющая, обусловленная воздействием считывающего света; 4 — полезная составляющая, обусловленная фотогенерацией носителей в освещенных участках; 5 и 6 — суммарные составляющие, соответствующие темным и светлым участкам регистрируемого изображения

Минимальное значение  $G_{\Phi}^{min}$ , при котором осуществляется модуляция слоя ЖК, соответствующая максимальному изменению контраста формируемого изображения, определяется площадью треугольника  $AEB$ .

Максимально возможное значение напряжения на слое ЖК в режиме экранирования определяется из выражения

$$U_{ЖК}^{max} = \frac{U_0}{1 + C_{ЖК}/C_d + C_{ЖК}/C_{кл}} = \frac{(I_{\Phi} + I_{\tau} + I_{д.з}) t_n^{max}}{C_{ЖК}}, \quad (3.34)$$

где  $U_0$  — напряжение, падающее на слое полупроводника в момент подачи напряжения;  $I_{\Phi}$ ,  $I_{\tau}$  и  $I_{д.з}$  — протекающие через структуру токи, обусловленные соответственно полезной фотогенерацией, термогенерацией и фотогенерацией за счет проникновения считывающего света сквозь диэлектрическое зеркало.

Прирост напряжения на слое ЖК, обеспечивающий изменение фазовой задержки на  $\pi$ ,

$$\Delta U_{ЖК \pi} = I_{\Phi} t_n^{max} / C_{ЖК}. \quad (3.35)$$

При совместном решении (3.34) и (3.35) относительно  $t_n^{max}$  и с учетом того, что площадь  $AEB$  равна разности площадей  $AEC$  и  $ABC$ , получаем

$$t_n^{max} = \frac{(U_{ЖК}^{max} - \Delta U_{ЖК \pi}) C_{ЖК}}{q(G_0 + G_{д.з}) L_{\pi}} \quad (3.36)$$

Для  $U_{ЖК}^{max} = 25$  В;  $C_{ЖК} = 1500$  пФ;  $L_{\pi} = 10^{-2}$  см;  $\Delta U_{ЖК \pi} = 2$  В;  $G_0 = 10^{13}$  см $^{-3}$ ·с $^{-1}$ ;  $G_{д.з} = 10^{14}$  см $^{-3}$ ·с $^{-1}$  значение  $t_n^{max}$  составляет 0,1 с. Таким образом, минимальная рабочая частота напряжения питания составляет  $1/(2 \cdot t_n^{max}) = 5$  Гц.

С помощью приведенных выражений можно оценить fotocувствительность структуры, представив ее как отношение энергии переключения оптического отклика к единице времени:

$$A = E / t_n^{max}, \quad (3.37)$$

где  $E = \gamma h \nu N \Phi_s = \gamma h \nu C_{ЖК} \Delta U_{ЖК} / q$  [60];  $\gamma$  — коэффициент внутреннего фотоэффекта.

Для значений  $C_{ЖК} = 1,5 \cdot 10^{-9}$  Ф;  $h \nu = 10^{-19}$  Дж;  $\gamma \approx 1$ ;  $\Delta U_{ЖК} \approx 1$  В и  $t_n^{max} = 0,1$  с получаем интенсивность переключения  $10^{-8}$  Дж·с $^{-1}$ .

Уточненную модель структуры МДП-ЖК можно получить, аппроксимируя зависимость фазовой задержки  $\Delta \Phi$  уравнением соответствующего порядка  $\Delta \Phi = \varphi(\Delta U_{ЖК})$  и подставляя полученную функцию в (3.8) с учетом выражений (3.33) и (3.37). Так, при аппроксимации зависимости  $\Delta \Phi = \varphi(\Delta U_{ЖК})$  прямой линией вида  $y = kx$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности, получаем

$$I = I_0 \sin^2 2\beta \cdot \sin^2 k \left[ \frac{C}{C_{ЖК}} U_{пит} + \frac{q L_{\pi} (G_0 + G_{д.з} + G_{\Phi})}{2 f_{пит} C_{ЖК}} \right]. \quad (3.38)$$

Из полученной формулы видно, что с помощью соответствующего выбора параметров напряжения питания при заданных конструкции, электрофизических свойствах слоев структуры и фиксированных уровнях внешней засветки можно достигнуть оптимального режима работы структуры.

В качестве критерия оптимальности могут быть выбраны максимальные РС, дифракционная эффективность, отношение сигнал-шум, коэффициент передачи контраста или групповой критерий — например, максимальные фоточувствительность и быстродействие, необходимые для работы с ЭЛТ.

Выбором амплитуды напряжения питания можно установить рабочую точку ПВМС на соответствующий начальный участок склона вольт-контрастной характеристики ЖК (самый темный или светлый участок считываемого изображения). Выбором частоты  $f_{\text{пит}}$  можно обеспечить работу модулятора на всем протяжении склона ВКХ от начального участка, при этом конечный участок будет соответствовать самому светлому (темному) участку считываемого изображения. Вид склона (левый или правый) будет определять знак контраста.

По частоте, амплитуде напряжения питания и уровню освещенности можно определить ширину экстремумов контраста формируемого изображения, что особенно необходимо для выбора параметров системы автоматического управления режимами работы ПВМС.

Так как изображение может быть сформировано ПВМС при различных сочетаниях параметров напряжения питания, то критерии качества преобразованного изображения (например, максимальный контраст) в дискретных точках пространства сочетаний амплитуды и частоты напряжения питания, уровня яркости и контрастности входного изображения достигают максимальных значений. Относительные значения этих локальных экстремумов оказываются разными, поэтому задача настройки режимов работы ПВМС как многопараметрического и многоэкстремального объекта управления сводится к отысканию максимального из локальных — глобального — экстремума.

Если параметры, от которых зависит состояние объекта управления, представить в виде  $n$ -мерного вектора  $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , то задача поиска глобального экстремума показателя качества  $Q(\bar{X})$  состояния объекта управления сводится к поиску максимального из локальных экстремумов  $Q^*(\bar{X}^*)$ :

$$Q^{**}(\bar{X}^{**}) \rightarrow \max_{\bar{X} \in B} Q^*(\bar{X}^*),$$

где  $\bar{X}^*$  и  $\bar{X}^{**}$  —  $n$ -мерные векторы входных параметров  $x_i$ , соответствующие локальному и глобальному экстремумам;  $B$  — множество допустимых значений векторов  $\bar{X}$ , удовлетворяющих заданным условиям.

Для решения конкретной задачи глобальной оптимизации можно воспользоваться различными методами поисковой оптимизации

ции [86—89], которые, несмотря на большое количество, подразделяются на два класса: детерминированные методы поиска глобального экстремума и стохастические. Критерием такого разделения является число параметров, от которых зависит качество состояния объекта управления.

Простейшим детерминированным методом поиска глобального экстремума является сканирование. Наиболее легко он реализуется для однопараметрического многоэкстремального объекта при стабильности во время настройки остальных параметров объекта.

С увеличением числа параметров возрастают временные затраты согласно выражению

$$t_{\text{общ}} = \Delta t \prod_{k=1}^n N_k,$$

где  $\Delta t$  — интервал дискретизации;  $N_k$  — число воздействий, необходимых для отыскания максимального значения одномерной функции с заданной точностью на интервале  $\pm \Delta x_k$  при фиксированных значениях остальных параметров.

Применительно к ПВМС типа МДП-ЖК при условии несущественного изменения интенсивности входного излучения метод сканирования осуществляется по двум варьируемым параметрам: амплитуде и частоте напряжения питания.

Алгоритм отыскания глобального экстремума методом сканирования записывается в виде

$$f_{i+1}, U_j = f_i, U_j + \Delta,$$

где  $\Delta$  — конечное множество допустимых состояний;  $f$  и  $U$  — частота и амплитуда напряжения питания объекта управления, образующие вектор параметров  $\bar{X}$ .

Алгоритм формирования памяти изменяется следующим образом:

$$Q_{i+1}^n = \begin{cases} Q_{i+1}^n, & \text{если } Q(f_{i+1}, U_j) \geq Q_i^n; \\ Q_i, & \text{если } Q(f_{i+1}, U_j) < Q_i^n, \end{cases}$$

где индекс  $n$  обозначает содержимое памяти. Смысл этого выражения заключается в том, что в память записывается лишь то текущее значение показателя качества  $Q(\bar{X}_i)$ , которое больше хранимого на предыдущих шагах поиска.

После перебора всех состояний объекта в памяти остается значение глобального экстремума:

$$Q^{**}(f^{**}, U^{**}) = \max_{i, j=1,2,\dots,N} \{Q(f_i, U_j)\}.$$

Функциональная электрическая схема устройства автоматической двухпараметрической глобальной оптимизации режимов работы структуры приведена на рис. 3.17.

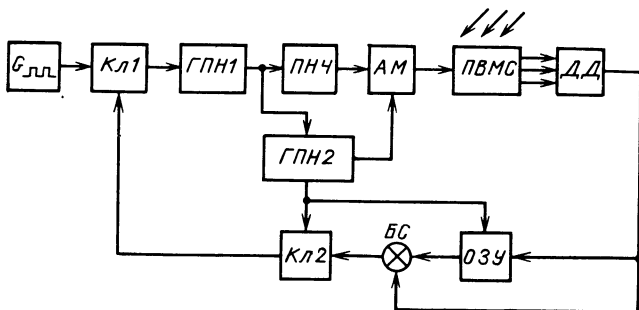


Рис. 3.17. Функциональная схема глобального оптимизатора:

Г — генератор тактовых импульсов; Кл — ключи; ГПН — генераторы пилообразного напряжения; ПНЧ — преобразователь напряжения в частоту; АМ — амплитудный модулятор; ДД — оптический дифференциальный датчик; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство; БС — блок сравнения

На первом этапе производится сканирование параметров напряжения питания — частоты и амплитуды. Изменение частоты достигается применением преобразователя напряжения в частоту (ПНЧ), который управляется первым генератором пилообразного ступенчато возрастающего напряжения (ГПН1). Изменение амплитуды питающего напряжения достигается с помощью амплитудного модулятора (АМ) — усилителя с дискретно управляемым с помощью второго генератора пилообразного напряжения (ГПН2) коэффициентом передачи.

Состояние качества объекта настройки (ПВМС) контролируется с помощью оптических дифференциальных датчиков (ДД) при регистрации ПВМС статического входного изображения. При динамическом изменении входного изображения в качестве ДД используется приемник изображения типа ПЗС и качество получаемой картины оценивается в результате статистической обработки.

В оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) заносятся экстремальные значения показателя качества при условии, что записываемое значение состояний объекта  $Q^*(\bar{X}^*)$  больше предыдущего, которое автоматически при этом стирается. По окончании изучения всех возможных состояний  $Q(\bar{X})$  в ОЗУ будет записано глобальное значение показателя качества  $Q^{**}(\bar{X}^{**})$ . На этом первый этап сканирования заканчивается, а на втором выходе ГПН2 формируется сигнал, который переводит второй ключ Кл2 в замкнутое состояние.

Второй этап сканирования протекает аналогично первому. При повторном попадании в точку  $\bar{X}^{**}$  плоскости варьируемых параметров  $f$  и  $U$  блок сравнения (БС) вырабатывает сигнал, который размыкает первый ключ Кл1, в результате чего сканирование прекращается, т. е. осуществляется автоматическая настройка объекта на глобальный экстремум.

### 3.8. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРОВ НА СТРУКТУРАХ МДП-ЖК

**Система автоматической фокусировки съемочных аппаратов.** При анализе нестационарных изображений объектов необходимо учитывать изменения условий формирования и передачи изображения. Это требует применения перестраиваемой, адаптивной оптической системы. Так в решении проблемы распознавания образов большую роль играет автоматизация процесса фокусировки оптических систем, которая включает в себя анализ поступающей от объекта информации и получение управляющего сигнала, с помощью которого система автоматически устанавливается в положение, обеспечивающее резкое изображение объекта.

Важное значение имеет разработка оптических методов и устройств анализа нестационарных изображений при решении задач автоматической фокусировки объективов съемочных аппаратов. Сложность этой задачи обуславливается малыми габаритными размерами фотокиноаппаратуры, ее ограниченной энергоемкостью, различным уровнем освещенности снимаемых объектов.

В основе требований к характеристикам системы автоматической фокусировки (САФ) лежит величина фокусировочного перемещения, которую определяет глубина резкости изображаемого пространства  $\Delta P$  [90]:

$$\Delta P = 2P_{\text{п}} P_{\text{з}} n_{\text{г}} d_{\text{доп}} / f'^2, \quad (3.39)$$

где  $P_{\text{п}}$  и  $P_{\text{з}}$  — передняя и задняя границы резко изображаемого пространства;  $n_{\text{г}}$  — необходимое значение диафрагмы, обеспечивающее заданную  $\Delta P$ ;  $d_{\text{доп}}$  — допустимый кружок нерезкости;  $f'$  — фокусное расстояние объектива.

По принципу действия САФ объективов съемочных аппаратов можно разделить на системы, основанные на анализе резкости изображения и системы измерения расстояния до объекта. Наибольшее распространение получили САФ, основанные на измерении расстояния до объекта съемки с помощью внутрибазового дальномера со сканированием пространства предметов. Один из вариантов оптической схемы САФ представлен на рис. 3.18.

Два изображения объекта 1 формируются при помощи подвижного 2 и неподвижного 3 зеркал на входную плоскость фоточувствительных матриц 4, сигналы с выходов которых сравниваются в электронном блоке (на рисунке не показан). В процессе сравнения вырабатывается корреляционный сигнал.

Недостатками такой системы являются: необходимость применения прецизионной оптики и механики, необходимость разнесения базы, увеличивающего габаритные размеры системы (в противном случае ухудшается точность работы САФ). Кроме того, использование матричных приемных устройств дает возможность осуществить корреляционный анализ оптических изображений только в электронном тракте. Для повышения точности определе-

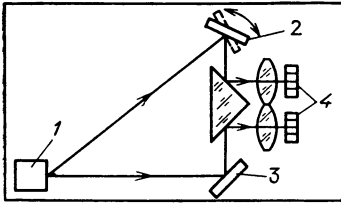


Рис. 3.18. Оптическая схема САФ

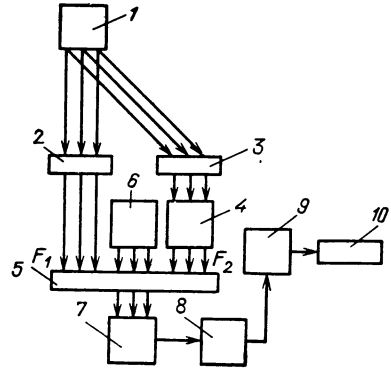


Рис. 3.19. Диоптрическая схема регистрации  $R_{max}$ :

1 — объект; 2, 3 — устройства формирования изображений объекта; 4 — оптическое сканирующее устройство; 5 — узел оптического сравнения; 6 — источник считывающего излучения; 7 — приемник считывающего излучения; 8 — устройство формирования управляющего сигнала; 9 — привод; 10 — фокусирующая оптическая система

ния корреляционного максимума необходимо увеличивать количество фотоприемных элементов в матрице, что приводит к существенному усложнению электронной схемы САФ.

Устранить указанные недостатки позволяет метод, основанный на непосредственном сравнении оптических изображений, сформированных в каналах системы путем их оптического вычитания или сложения. Указанный метод реализуется с помощью оптически управляемых ПВМС.

**Разработка оптических систем анализа изображений и методов формирования управляющих сигналов.** Для осуществления автоматической фокусировки необходимо: сформировать оптические изображения в каналах системы; взаимно сориентировать изображения; определить момент совпадения сравниваемых изображений и сформировать управляющие сигналы в цепь привода перемещения объектива. Обобщенная структурная схема алгоритма работы системы анализа изображений и формирования управляющих сигналов САФ с использованием оптического коррелятора приведена в [91].

Наиболее сложен этап отождествления сравниваемых изображений, включающий в себя ввод оптической информации в каналы системы, формирование изображений во входной плоскости ПВМС, прямое и инверсное преобразования изображения, оптическое сканирование и сложение изображений.

Определение взаимного смещения двумерных изображений  $F_1(x, y)$  и  $F_2(x, y)$  сводится к определению максимума функции корреляции [92]:

$$K(\xi, \eta) = \iint_s F_1(x, y) F_2(x - \xi, y - \eta) dx dy, \quad (3.40)$$



где  $S$  — площадь интегрирования;  $\xi, \eta$  — параметры трансляции;  $x, y$  — геометрические координаты осей.

Требуемую точность выполнения алгоритма, т. е. вычисления функции  $K(\xi, \eta)$ , можно обеспечить в случае равенства и постоянства масштабов сравниваемых изображений, средней интенсивности и диапазона контрастов. Так как на точность отождествления сравниваемых изображений оказывают влияние шумы фоточувствительных слоев ПВМС, необходимо повысить отношение сигнал-шум. Поэтому целесообразно производить сравнение изображений, у которых наблюдается инверсия контрастов [93]. Тогда корреляционная функция прямого  $F_1(x, y)$  и инверсного  $\bar{F}_2(x-\xi, y-\eta)$  изображений будет иметь вид [94]

$$K^*(\xi, \eta) = \iint_S F_1(x, y) \bar{F}_2(x-\xi, y-\eta) dx dy. \quad (3.41)$$

Модуляторы типа «свет—свет» могут использоваться как в диоптрических (на просвет), так и в катоптрических (на отражение) схемах регистрации корреляционного сигнала. Система автоматической фокусировки, разработанная по диоптрической схеме, представлена на рис. 3.19 [91].

С помощью устройства 2 неподвижное изображение  $F_1$ , снимаемое с объекта 1, формируется в плоскости установки узла оптического сравнения (ПВМС) 5. Второе, подвижное, изображение  $F_2$  с помощью устройства 3 проецируется в плоскость установки устройства 5 с помощью сканирующего устройства 4. Поток считывающего излучения, сформированный источником 6, регистрируется приемником 7, устройство 8 формирует управляющий сигнал, который поступает в систему управления перемещением объекта 9, 10.

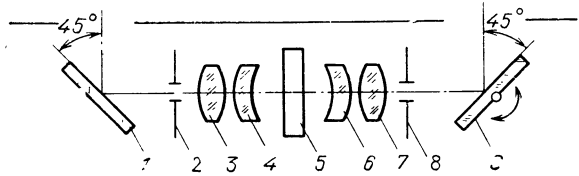
Для увеличения отношения сигнал-шум, как было отмечено выше, целесообразно сравнивать прямое изображение с изображением, у которого предварительно инверсно преобразован контраст. В результате повышается эффективность сравнения изображений и обеспечивается инвариантность к искажениям, вводимым системой.

Для исключения влияния несовпадения изображений, формируемых в каналах САФ, на процесс определения максимума функции  $K(\xi, \eta)$  или  $K^*(\xi, \eta)$  осуществляются центрирование и нормирование функций  $F_1(x, y)$  и  $F_2(x-\xi, y-\eta)$  или  $\bar{F}_2(x-\xi, y-\eta)$ . В этом случае функция корреляции изображений двух координат примет вид [95]

$$R(\xi, \eta) = \left[ \iint_S \hat{F}_1(x, y) \cdot \hat{F}_2(x-\xi, y-\eta) dx dy \right] / \left[ \left( \iint_S \hat{F}_1^2(x, y) dx dy \right) \left( \iint_S \hat{F}_2^2(x-\xi, y-\eta) dx dy \right) \right]^{1/2}, \quad (3.42)$$

где  $\hat{F}_1(x, y) = F_1(x, y) - \frac{1}{S} \iint_S F_1(x, y) dx dy$  и  $\hat{F}_2(x-\xi, y-\eta) =$

Рис. 3.20. Оптическая схема коррелятора САФ:  
 1 — неподвижное зеркало;  
 2, 8 — диафрагмы; 3, 4, 6, 7 — оптические системы;  
 5 — ПВМС; 9 — подвижное зеркало



$= F_2(x-\xi, y-\eta) - \frac{1}{S} \iint_S F_2(x, y) dx dy$  — центрированные и нормированные значения функций  $F_1(x, y)$  и  $F_2(x-\xi, y-\eta)$  коррелируемых изображений;  $S$  — площадь поля анализа.

Если представить изображения объекта в виде элементов гильбертова пространства, то функция корреляции определяется как квадрат расстояния между соответствующими элементами пространства:

$$D_2(\xi, \eta) = [\iint_S |F_1(x, y) - F_2(x - \xi, y - \eta)|^2 dx dy]^{1/2}. \quad (3.43)$$

В этом случае должно выполняться равенство

$$[\iint_S |F_1(x, y)|^2 dx dy]^{1/2} = [\iint_S |F_2(x, y)|^2 dx dy]^{1/2} = \text{const}, \quad (3.44)$$

Сопоставление выражений (3.40) и (3.42) с учетом (3.44) указывает на эквивалентность функций корреляции, причем максимум  $K(\xi, \eta)$  соответствует минимум  $D^2(\xi, \eta)$ .

На рис. 3.20 изображена оптическая схема коррелятора САФ с ПВМС, построенная по диоптрической схеме регистрации. Особенностью этой схемы является формирование изображений объекта на противоположных (входной и выходной) плоскостях ПВМС, работающего на пропускание. Одно изображение является неподвижным, а второе перемещается в плоскости фоточувствительного слоя.

Методы и средства анализа изображений, разработанные для САФ объектива съемочных аппаратов, применимы и в других приборах.

На рис. 3.21 представлена оптическая схема устройства для автоматического обнаружения неоднородностей в изображениях аэрофотонегативов. В качестве преобразователя изображения используется ПВМС на основе структуры МДП-ЖК.

При возникновении неоднородностей, например темных пятен в плоскости объекта, освещенность светлых участков фоточувствительного материала ПВМС увеличивается, а темных — уменьшается при неизменном интегральном потоке, поддерживаемом следящей системой 4, 5, 1. Увеличение освещенности светлых участков не вызовет изменения оптических свойств слоя ЖК ПВМС, так как переориентация осей молекул уже произошла при более низком значении освещенности. На участках, где наблюдается уменьшение освещенности, уровень прикладываемого напряжения уменьшается, что приводит в результате воздействия вязкоупругих сил ЖК к исходной ориентации молекул.

Изменение оптической плотности ЖК регистрируется фотоприемником 4, установленным в тракте считывающего излучения. Сигналы с выхода фото-

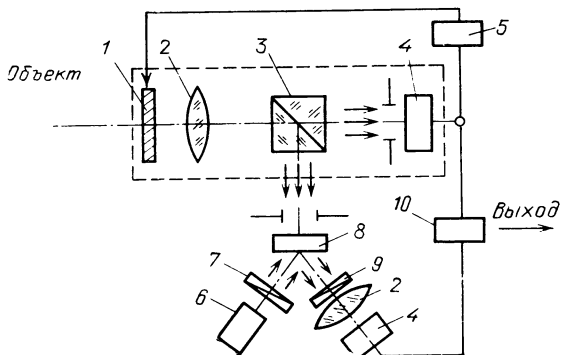


Рис. 3.21. Оптическая схема устройства для обнаружения неоднородностей в изображениях объектов:

1 — регулируемый светофильтр; 2 — линза; 3 — призма-куб; 4 — фотоприемник; 5 — пороговый элемент; 6 — источник считывающего излучения; 7 — поляризатор; 8 — ПВМС; 9 — анализатор; 10 — компаратор

приемников 4 поступают в схему сравнения 10, сигнал разности которой является выходным сигналом устройства.

На рис. 3.22 приведена схема устройства (фоторепродукционного аппарата) для реставрации слабоконтрастных и угасших документов. Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) 5 может перемещаться в плоскости, перпендикулярной оптической оси аппарата. Фотокатод ЭОП сопряжен с фокальной плоскостью фотокамеры. Основной блок светофильтров (СФ) 17—19 содержит набор широкополосных светофильтров, выделяющих основные цвета видимого спектра, а также инфракрасные и ультрафиолетовые волны. Вспомогательные блоки содержат набор узкополосных светофильтров, причем спектральные диапазоны светофильтров обоих блоков совпадают.

При выборе режима работы перед объективом перемещается основной блок СФ и с помощью ПВМС системой анализа изображения фиксируется положение, которому соответствует максимальное значение отношения сигнал-шум. Затем эта операция осуществляется со вспомогательным блоком.

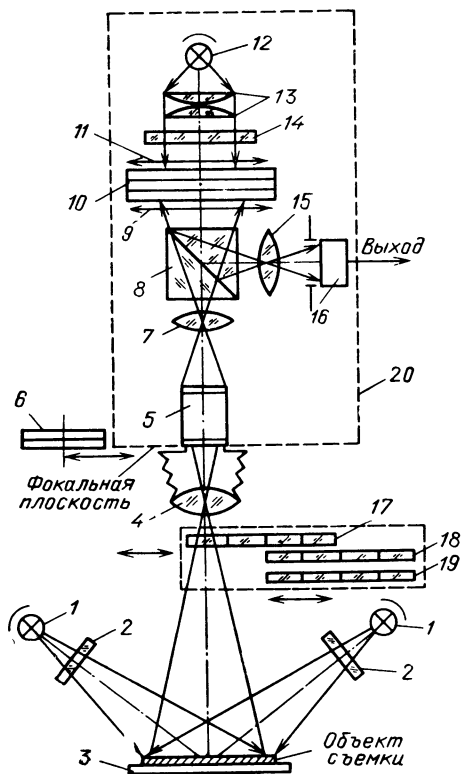


Рис. 3.22. Оптическая схема устройства для реставрации слабоконтрастных и угасших документов:

1, 12 — источники излучения; 2, 14 — светофильтры; 3 — экран; 4, 7, 15 — объективы; 5 — ЭОП; 6 — камера; 8 — светодетектор; 9 — анализатор; 10 — ПВМС; 11 — поляризатор; 13 — конденсор; 16 — фотоприемник; 17—19 — блок светофильтров; 20 — блок анализа изображений

В исходном состоянии, в случае равномерной яркости экрана ЭОП 5, достаточной для получения на фоточувствительном слое ПВМС (МДП-ЖК) 10 уровня освещенности, превышающего пороговый, удельное сопротивление фоточувствительного слоя малое. Приложенное к ПВМС переменное напряжение вызывает поворот плоскости поляризации ЖК, в результате чего свет от источника 12 на фотоприемник 16 не поступает.

В случае появления на экране ЭОП участков меньшей яркости, характеризующих возникновение неоднородности изображения (например, появление текста), на фоточувствительном слое ПВМС появляются неосвещенные участки. Эти участки отличаются от остальной площади фоточувствительного слоя высоким удельным сопротивлением, поэтому разворот плоскости поляризации ЖК, ограниченного этими участками, отсутствует. Свет от источника 12, пройдя преобразователь 10, поступит на фотоприемник 16. Сигнал с выхода 16 поступает в схему управления и сигнализации. Использование блока светофильтров 17—19 с системой регистрации резкости изображения позволяет улучшить качество фотореставрации.

**Проекция фотографических изображений на большой экран.** Перспективным направлением использования МДП-ЖК структур является создание устройств отображения информации коллективного пользования — для проекции на большой экран как телевизионных, так и фотографических изображений [96].

Устройство проекции телевизионных изображений и диапозитивов строится по традиционной диаскопической схеме (диапроектор), а для проекции фотографических изображений — по эпископической схеме (эпипроектор), причем в обоих случаях происходит промежуточное преобразование изображения оптически управляемым ПВМС.

В проекторе телевизионных изображений при записи информации с экрана ЭЛТ, т. е. в условиях возбуждения структуры МДП-ЖК короткими световыми импульсами, важно знать их динамические характеристики.

В работе [97] экспериментально исследуются зависимости электрооптического отклика модулятора от параметров световых импульсов, сформированных ЭЛТ. В качестве ПВМС используется структура МДП-ЖК на основе GaAs и ЖК-654 (10 мкм) с временем включения  $\tau_{\text{вкл}} = 10^{-2}$  с при интенсивности записывающего света  $I_3 = 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>.

При длительности импульсов записи, намного меньшей времени включения ( $\tau_{\text{и}} \ll \tau_{\text{вкл}}$ ) отклик ПВМС падает с ростом скважности  $Q$ . Так при  $\tau_{\text{и}} = (0,2 \dots 0,5) \cdot 10^{-6}$  с и  $Q = 10$  отклик ПВМС составляет 0,07 от максимального значения, а при  $Q = 100$  практически отсутствует. То есть при реализации режима  $Q \gg 1$  необходимо выбирать люминофор ЭЛТ с большим временем послесвечения  $\tau_{\text{и}}$ . Значение  $\tau_{\text{и}} = 0,7 \cdot 10^{-3}$  с достигается при длительности импульсов подсвета  $\tau_{\text{и.п}} = 0,5 \cdot 10^{-6}$  с, но при этом снижается интенсивность излучения люминофора до значения  $I_3 = 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>.

При времени регенерации подсвета  $T_p = 2 \cdot 10^{-3}$  с достигается полное включение ПВМС. С ростом  $T_p$  отклик ПВМС падает и

при  $T_p = 2 \cdot 10^{-2}$  с составляет 0,2 от максимального значения. При  $T_p = 2 \cdot 10^{-3}$  с  $\tau_{вкл}$  составляет  $3 \cdot 10^{-2}$  с, а при  $T_p = 2 \cdot 10^{-2}$  с  $\tau_{вкл} = 1,2 \cdot 10^{-1}$  с.

Таким образом, для увеличения объема записываемой на ПВМС информации при сохранении эффективности его работы необходимо увеличивать либо время послесвечения ЭЛТ, либо время выключения ПВМС. Для достижения максимально возможного отклика ПВМС  $\tau_i$  может быть меньше  $\tau_{вкл}$ . Запись при этом достигается при нескольких циклах регенерации информации на ЭЛТ.

В эпипроекторе (рис. 3.23) [98] входное изображение в виде непрозрачных текстового, графического материала или фотоснимка 1 освещается лампой накаливания 2 и с помощью объектива 3 формируется на входной плоскости фотоприемной части ПВМС 4. В отличие от диапроектора, тракт записи которого работает на просвет, в эпипроекторе для создания во входной плоскости ПВМС заданной освещенности ( $E$ ), определяемой его чувствительностью, требуются большие энергетические затраты. Так для получения  $E = 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> требуется мощность осветительной лампы порядка 200 ... 300 Вт.

Для преобразования изображения также используется ПВМС на базе GaAs и нематического ЖК, работающего на S-эффекте. Полученный с помощью ЖК-ячейки фазовый контраст преобразованного изображения считывается поляризованным белым светом с помощью источника излучения 5, конденсора 6, скрещенных поляризаторов 7, 11 и проецируется объективом 10 на большой экран 12.

Здесь ПВМС выступает как в роли преобразователя черно-белого изображения в псевдоцветное, так и в роли усилителя яркости входного изображения.

Преобразование черно-белого изображения в псевдоцветное осуществляется за счет зависимости показателя преломления ЖК от длины волны считывающего излучения [49]. В результате каждому уровню серой шкалы во входном изображении соответствует свой цвет в выходном и не видимые глазу полутона фотоснимка выделяются на псевдоцветном изображении. Такое распозна-

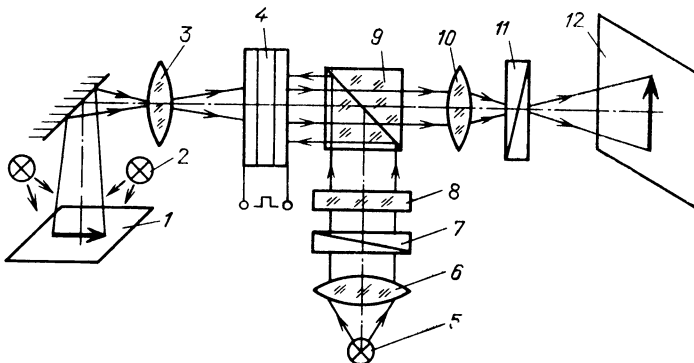


Рис. 3.23. Оптическая схема эпипроектора псевдоцветных изображений:

1 — фотоснимок; 2 — осветитель; 3 — объектив; 4 — ПВМС; 5 — источник считывающего излучения; 6 — конденсор; 7 — поляризатор; 8 — светофильтр; 9 — призма-куб; 10 — объектив; 11 — анализатор; 12 — экран

вание фотографических изображений актуально при обработке аэрофотоснимков, а также в медицине для выявления патологических изменений в сфотографированных внутренних органах человеческого организма.

Для получения требуемой освещенности изображения в плоскости экрана необходимо усиление яркости входного изображения, что можно осуществить повышением мощности источника считывающего излучения. Но такой способ усиления имеет ряд недостатков.

Как известно, в конструкции ПВМС, работающего на отражение, для развязки записывающего и считывающего излучений предусмотрено диэлектрическое зеркало. При считывании белым светом необходимо широкополосное зеркало, охватывающее весь видимый диапазон спектра. Так как широкополосные диэлектрические зеркала имеют коэффициент отражения не более 0,96, то часть считывающего излучения проходит через зеркало, смазывая сформированный на границе раздела полупроводник — диэлектрик потенциальный рельеф, тем самым резко ухудшая разрешение преобразованного изображения.

Устранить этот недостаток позволяет использование светоблокирующего слоя (например, CdTe), поглощающего прошедшее сквозь зеркало излучение.

Для проекции изображения на экран размером  $2 \times 2 \text{ м}^2$  и более с освещенностью, необходимой для нормальной работы в условиях фоновое освещения помещения, требуется повышать мощность источника считывающего излучения до 1500 Вт, что вызывает нагрев ЖК-ячейки, в результате которого ПВМС теряет свою работоспособность (температура просветления ЖК-654 равна  $66^\circ \text{C}$ ). Кроме того, при высоком температурном воздействии нарушается герметичность ячейки и в рабочем поле слоя ЖК появляются газовые пузыри, приводящие к выходу из строя ПВМС, а следовательно, эпипроектора. Устранить перегрев можно применением тепловых фильтров и принудительного охлаждения ПВМС, но эти мероприятия требуют существенного усложнения конструкции проектора.

Наиболее эффективным решением вопроса тепловой развязки является использование в считывающем тракте проектора квантового усилителя яркости [99]. На рис 3.24 представлена оптическая схема такого устройства, принцип действия которого заключается в следующем.

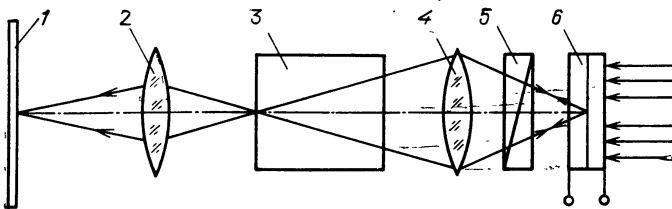


Рис. 3.24. Оптическая схема проектора с квантовым усилителем яркости

Слабое спонтанное излучение из одного конца трубки квантового усилителя 3 через объектив 4 и поляризатор 5 проходит через слой ЖК ПВМС 6. После отражения от диэлектрического зеркала промодулированное считывающее излучение поступает обратно на вход усилителя в виде амплитудной картиннки благодаря повторному прохождению через поляризатор 5.

При прохождении через квантовый усилитель изображение усиливается в  $10^4$  раза и с помощью объектива 2 проецируется на экран 1.

При использовании квантового усилителя типа УЛ-101 на длине волны  $\lambda=0,51$  мкм формируется изображение площадью  $10 \text{ м}^2$ , наблюдаемое в нормально освещенном помещении. При этом мощность выходящего из усилителя излучения составляет  $0,5 \text{ Вт}$  при мощности света опроса ЖКЯ  $10^{-3} \text{ Вт}$ .

Для увеличения мощности выходного светового потока, несущего информацию об изображении, в схему проектора с квантовым усилителем целесообразно ввести кольцевой оптический канал (рис. 3.25) [100]. Считывающий световой поток из квантового усилителя 3 формируется в параллельный световой поток с помощью коллиматора, имеющего входную линзу 4, выходную линзу 7 и пространственный фильтр 5, и направляется на ЖКЯ ПВМС 9. Съем записываемой на ПВМС информации осуществляется с ЭЛТ 10. Промодулированный световой поток подается с помощью зеркала 11 в фурие-объектив 8 и далее с помощью зеркала 6 направляется на тыльную непрозрачную и неотражающую поверхность пространственного фильтра 5, размеры которого таковы, что фильтруют составляющую излучения нулевого порядка и пропускает модулированную составляющую. Тем самым уменьшается уровень шума преобразованного изображения, обусловленный спонтанным излучением опроса квантового усилителя. Усиленное в 3 изображение проецируется с помощью объектива 2 на экран 1.

**Управление распределением интенсивности лазерного излучения.** В [101] представлены результаты использования ПВМС в ка-

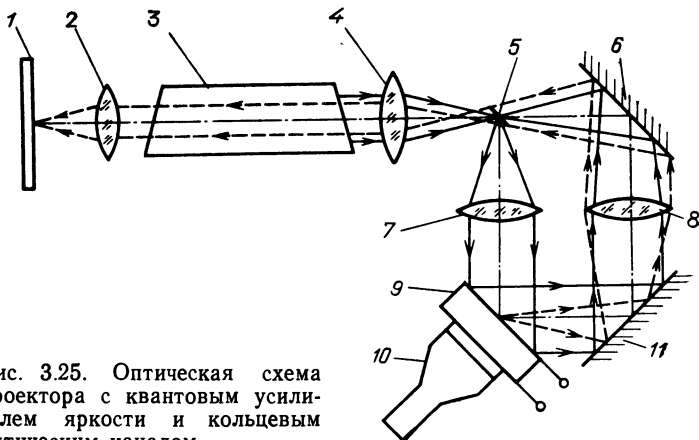


Рис. 3.25. Оптическая схема проектора с квантовым усилителем яркости и кольцевым оптическим каналом

честве модуляторов лазерного излучения при внутрирезонаторном считывании информации с одновременным усилением яркости изображений (до  $10^6$  раз) и контраста малоконтрастных изображений.

На рис. 3.26 представлена оптическая схема лазера на красителе с сопряженным резонатором: ПВМС на основе холестерико-нематического перехода (ХНП) располагается внутри резонатора вблизи селективного зеркала 4. Запись изображения диафрагмы 2 осуществляется с помощью линзы 3 на длине волны  $\lambda_3=0,44$  мкм генерации лазера 1. Импульсная накачка осуществляется на длине волны  $\lambda_n=0,53$  мкм с частотой следования импульсов ( $\tau_n=20$  нс)  $f_{сл}=1$  Гц. В результате на выходном зеркале 7 резонатора наблюдается изображение на длине волны генерации (для красителя № 430 максимум спектра люминесценции соответствует длине волны  $\lambda=0,63$  мкм), т. е. имеет место преобразование когерентного изображения в когерентное.

Недостатком этого устройства является ограничение контраста преобразованного изображения (20 : 1) мощным шумовым излучением люминесценции молекул красителя, обусловленного как большими неактивными потерями в резонаторе, так и соизмеримостью времени пролета светом резонатора с длительностью импульса накачки и временем жизни возбужденного состояния красителя, в результате чего мала эффективность энергосъема активной среды и большинство молекул высвечиваются спонтанно.

Лучшие результаты по контрасту ( $10^3$ ) преобразованного изображения получаются при использовании твердотельного лазера на АИГ:  $Nd^{3+}$  (рис. 3.27), так как в этом случае суперлюминесценция вносит значительно меньший вклад в яркость фона ( $\tau_{АИГ} \gg \tau_{кр}$ ;  $\sigma_{АИГ} \ll \sigma_{кр}$ ). Ограничение контраста обусловлено в основном неравномерностью пропускания модулятора в отсутствие засветки.

В сопряженном резонаторе вместо линз используются сферические зеркала. В качестве модулятора применяется ПВМС на

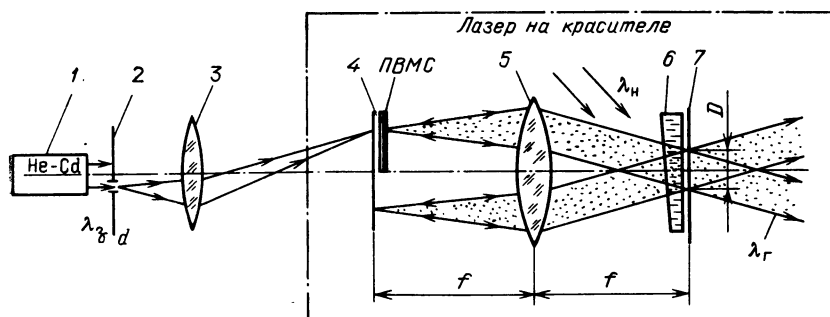


Рис. 3.26. Оптическая схема лазера на красителе с сопряженным резонатором: 1 — лазер; 2 — диафрагма; 3 — объектив; 4, 7 — зеркала резонатора; 5 — линза; 6 — краситель № 430



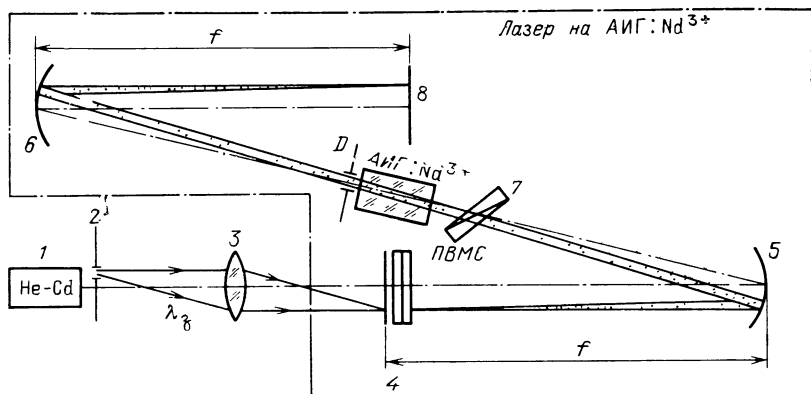


Рис. 3.27. Оптическая схема лазера на АИГ:  $\text{Nd}^{3+}$  с сопряженным резонатором: 1 — лазер; 2 — диафрагма; 3 — объектив; 4 — глухое зеркало резонатора; 5, 6 — сферические зеркала резонатора; 7 — поляризатор; 8 — выходное зеркало резонатора

основе электрооптического эффекта в нематическом ЖК [79]. Режим питания ПВМС выбирается таким образом, что в отсутствие записывающего света порог генерации не достигается. Экспозиция записывающего света  $10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup> уменьшает потери, вносимые модулятором, и приводит к возникновению генерации засвеченной области.

С целью контроля записанного на ПВМС изображения на длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм в резонатор помещаются поляризатор и соответствующее селективное зеркало.

Важно отметить особенности модуляционного отклика ПВМС при импульсной записи и считывании информации. Через некоторое время после начала экспозиции наблюдается максимум дифракционной эффективности  $\eta_{\text{max}}$ , связанный с нестационарным характером процессов записи, причем значение  $\eta_{\text{max}}$  может превышать значение стационарной дифракционной эффективности в 5 .. 100 раз.

Так как  $\eta_{\text{max}}$  достигается на всех пространственных частотах одновременно, то при согласовании считывающего излучения можно добиться существенного улучшения модуляционных характеристик ПВМС типа МДП-ЖК.

**Кодирование линий равного уровня яркости.** В процессе обработки оптических изображений — при автоматизированной реставрации зашумленных документов, фотометрических исследованиях — актуален вопрос выделения полезной информации на фоне помех и представления изображения в виде линий равного уровня яркости (ЛРУЯ).

Обработка изображений с помощью устройств «Титус» и «Фототитус» позволяет выполнять операции ограничения изображений по уровню яркости в реальном масштабе времени, но низкие значения чувствительности и разрешающей способности этих устройств ограничивают их практическое применение [102].

В [103] показана возможность эффективной обработки аналоговых сигналов — улучшения качества оптического изображения и выделения ЛРУЯ структурой ФП-ЖК на основе ZnSe и НЖК (S-эффект).

Выделение полезной информации из фона случайных помех и кодирование ЛРУЯ осуществляется на установке, оптическая схема которой изображена на рис. 3.28. Входное изображение объекта 3 с помощью записывающего светового потока от осветителя 1 с синим фильтром 2 проецируется объективом 4 через призму Глана — Томпсона 7 на структуру ФП-ЖК 8, установленную перед анализатором 9. Считывание преобразованного изображения осуществляется с помощью осветителя 5, красного фильтра 6. Объектив 10 формирует преобразованное изображение в плоскости регистрации 11.

Процесс выделения полезной информации из фона помех иллюстрируется рис. 3.29, на котором изображены модуляционная характеристика структуры (рис. 3.29,а), исходные оптические сигналы разного уровня с фоновыми помехами (рис. 3.29,б) и результаты реставрации изображения (рис. 3.29,в). Из рисунка видно, что в зависимости от интенсивности управляющего светового потока  $I_y$  могут быть получены различные изображения объекта (штриховое изображение), имеющего явно выраженный фон между штрихами одинаковой яркости. При интенсивности  $I_y^2$  происходит выравнивание интенсивностей фона и полезного сигнала, а при  $I_y^1$  происходит отстройка от уровня фоновых помех, т. е. реставрация изображения.

Выделение ЛРУЯ осуществляется поворотом анализатора 9 (на рис. 3.28) на угол  $\varphi = 45^\circ + K \cdot 90^\circ$ , где  $K = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ , что приводит к изменению модуляционной характеристики и кодированию входного изображения в виде ЛРУЯ (рис. 3.30). Причем

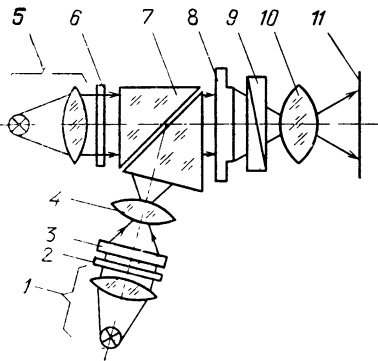


Рис. 3.28. Оптическая схема для выделения информации на фоне случайных помех и кодирования ЛРУЯ

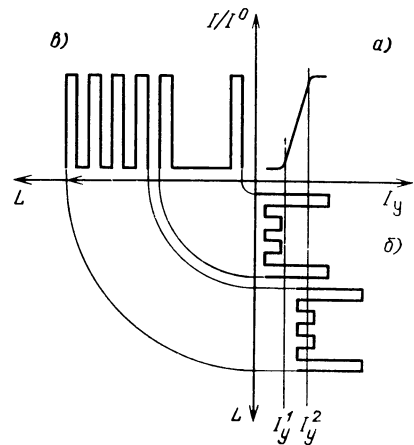


Рис. 3.29. Выделение полезной информации из исходного оптического сигнала на структуре ФП-ЖК:

$L$  — пространственный параметр

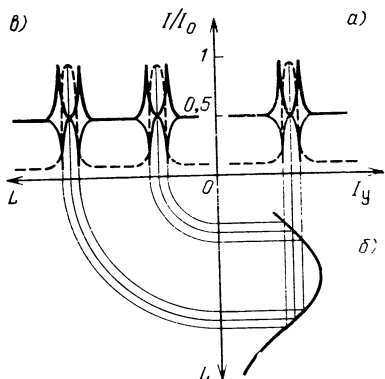


Рис. 3.30. Преобразование входного оптического сигнала на структуре ФП-ЖК:

— в скрещенных поляризаторах (анализатор под углом  $90^\circ$ ); — анализатор под углом  $45^\circ$ ; — анализатор под углом  $135^\circ$

много раз превышает диапазон яркостей для галогенсеребряных материалов). Этот метод позволяет проводить исследования сечения лазерного луча, получить спектры Фурье обрабатываемых изображений. В последних двух методах процесс кодирования носит нелинейный характер, так как зависимость чувствительности структуры от напряжения и характеристика включения электрооптического отклика нелинейны.

## Глава 4

### ФОРМИРОВАНИЕ ВИДЕОСИГНАЛОВ ЦВЕТНЫХ ТЕЛЕКАМЕР МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ МАТРИЦАМИ НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

С разработкой приборов с зарядовой связью (ПЗС) появилась возможность создания многоэлементных фоточувствительных матриц телевизионного типа, отличающихся высокими плотностью упаковки (более  $350\,000$  эл./см<sup>2</sup>) и отношением сигнал-шум (более 60 дБ) [104]. Разновидность ПЗС — приборы с зарядовой инжекцией — позволяют создавать фоточувствительные матрицы, в которых возможна координатная адресация к отдельным фоточувствительным элементам [105].

Благодаря этим достижениям телевизионные системы, в которых чувствительным элементом служит формирователь видеосигнала (ФВС) на ПЗС, успешно конкурируют с телевизионными системами на электронно-лучевых трубках (ЭЛТ) по ряду параметров (надежность, потребляемая мощность, отсутствие прожигания

S-эффект, наблюдаемый в планарно-ориентированных слоях НЖК, обеспечивает получение значений  $\Delta n$ , равных  $0,15 \dots 0,3$ , что позволяет выделять одновременно несколько ЛРУЯ.

Выделение ЛРУЯ может осуществляться либо изменением уровня яркости управляющего светового потока, либо изменением напряжения питания, либо дискретной регистрацией положения ЛРУЯ в процессе включения электрооптического отклика структуры. Особенно интересен первый метод, так как позволяет проводить фотометрические исследования распределения интенсивности в изображениях с большим диапазоном яркостей (во

при световых перегрузках). В последние годы резко возросло количество разработок малогабаритных цветных телекамер с ФВС на ПЗС [106]. Если первые цветные камеры строились по двух- или трехматричной схеме, то в современных изображение преобразуется с помощью одной ПЗС-матрицы и совмещенного с ней цветоделительного фильтра. Такая конструкция камер обуславливает специальные требования к ФВС: высокую чувствительность в синей области спектра; высокую эффективность переноса заряда, не приводящую к смешению цветов; подавление растекания заряда, которое возникает в результате переполнения зарядовой емкости элементов накопления при высоких уровнях засветки (блуминг).

По способу организации ФВС на ПЗС подразделяются на три класса: матрицы с переносом кадра, строчно-кадровые матрицы и матрицы со строчной адресацией (рис. 4.1).

Матрицы с переносом кадра (рис. 4.1,а) состоят из вертикальных, расположенных вплотную, регистров переноса и горизонтального выходного регистра. Причем матрица разделена по вертикали на две секции: накопления и памяти. Во время обратного хода по кадру информация из секции накопления сдвигается в секцию памяти, а затем построчно выводится с помощью горизонтального регистра в течение следующего полукadra.

В строчно-кадровых матрицах (рис. 4.1,б) фоточувствительные элементы расположены между закрытыми от света вертикальными регистрами переноса. Во время обратного хода по кадру накопленная световая информация сбрасывается в вертикальные регистры, а по окончании кадрового гашения происходит ее построчный вывод с помощью горизонтального выходного регистра.

В фотодиодных матрицах (рис. 4.1,в) со строчной адресацией сигналы с вертикальных считывающих шин передаются в горизонтальный выходной регистр и с его помощью выводятся во внеш-

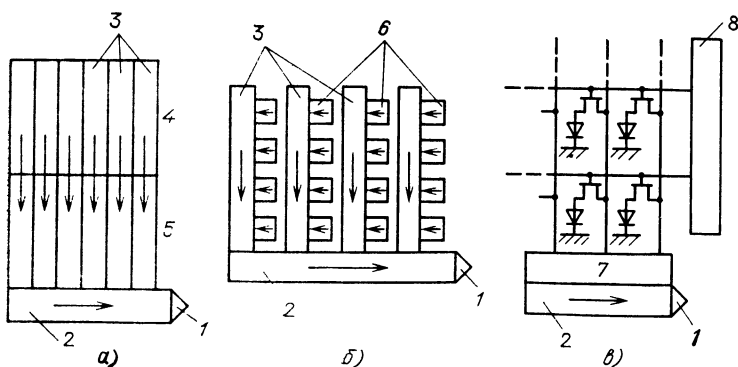


Рис. 4.1. Способы организации ПЗС-матриц:

а — матрица с кадровым переносом; б — строчно-кадровая матрица; в — матрица со строчной адресацией;  
 1 — выходное устройство; 2 — выходной горизонтальный регистр; 3 — вертикальные ПЗС-регистры; 4 — секция накопления; 5 — секция памяти; 6 — фоточувствительные элементы; 7 — устройство стыковки; 8 — вертикальное сканирующее устройство

ную цепь. Для последовательного выбора строк фотодиодов, подключаемых к вертикальным шинам, применяется вертикальное сканирующее устройство на МДП-транзисторах.

#### 4.1. МАТРИЦЫ С ПЕРЕНОСОМ КАДРА

Главной трудностью при создании матрицы для цветного телевидения является низкая чувствительность в синей части спектра традиционных матриц с поликремниевыми затворами. Сильное поглощение излучения с длиной волны менее 500 нм в поликремниевых затворах приводит к потере информации о синей компоненте цветности.

Для преодоления этой трудности предлагается ПЗС-структура с узким каналом (рис. 4.2). Затворы, изготовленные из поликремния, состоят из широкой части (18 мкм), под которой хранится информационный заряд, и узкой барьерной части с шириной канала 3 мкм. Под влиянием эффекта узкого канала пороговое напряжение здесь оказывается на 4... 5 В больше, чем в хранящей части. Благодаря полученной асимметрии потенциала становится возможным двухфазный режим управления прибором; при этом барьер возникает только благодаря геометрической форме затворов. Такая форма затворов позволяет решить и другую важнейшую задачу: в каждой ячейке остаются участки, не закрытые поликремнием и, следовательно, чувствительные к синей части спектра. При площади фоточувствительного окна, свободного от поликремния, занимающей 27% площади ячейки, чувствительность матрицы на длине волны 450 нм составляет 40% от максимальной чувствительности ( $\lambda = 650$  нм).

Прибор изготавливается на подложке из кремния  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением 10... 20 Ом·см по обычной двухслойной поликремниевой технологии.

Проблема блуминга решается за счет того, что во время накопления на затворы вертикальных регистров подается напряжение —12 В, при котором поверхность барьерных областей с узким каналом оказывается в состоянии аккумуляции, и проводимость канала практически отсутствует.

Для получения цветного изображения на стеклянной подложке формируются полосковые фильтры красного, зеленого и голубого цветов. Подложка с фильтрами наклеивается на матрицу так, чтобы каждый вертикальный регистр ФВС был закрыт полоской своего цвета. Для ослабления смешения цветов стоп-каналы ПЗС закрываются полупрозрачными экранами.

Проблема повышения чувствительности к коротковолновому излучению может быть решена и другим путем: организацией освещения с обратной стороны подложки. Подложка при этом ставится до толщины 20 мкм. Такой способ обеспечивает высокую чувствительность в синей области спектра: квантовая эффективность при длине волны 400 нм составляет около 50% максимальной (при 600 нм).

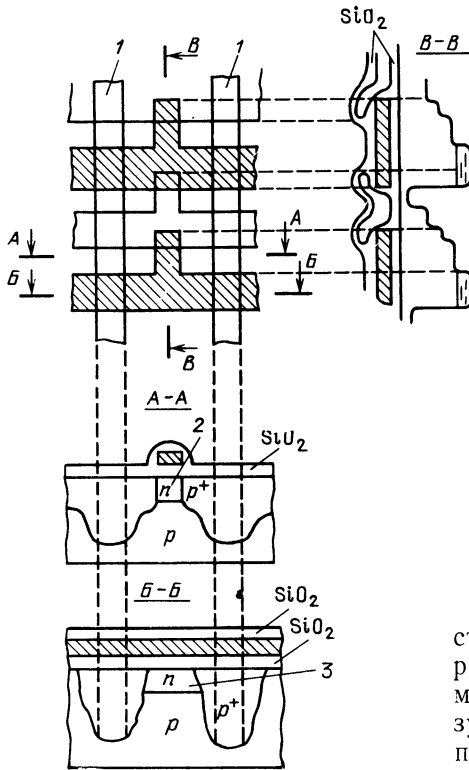


Рис. 4.2. Структура одного столбца матрицы с узкоканальными областями фирмы Sony:  
1 — стоп-каналы; 2 — барьерная область;  
3 — область хранения

зывается свободное от поликремния окно, занимающее до 24% площади ячейки, обеспечивающее чувствительность в коротковолновой области спектра (32% от максимальной). Области стоп-каналов расположены вдоль вертикальных затворов и имеют выступы, препятствующие переносу зарядовых пакетов поочередно то слева, то справа от центрального окна. Заряд протекает по змееобразной траектории.

Подобная структура имеет ряд существенных достоинств. Это очень простая топология слоев поликремния (причем слоев всего два) и полноценное чересстрочное разложение, как и в любой четырехфазной структуре. Кроме того, поскольку стоп-канальные области, разделяющие соседние столбцы, покрыты поликремниевыми затворами, то смешение цветов между каналами оказывается незначительным.

Участки вертикальных затворов, под которыми хранятся зарядовые пакеты, имеют малую ширину. Под влиянием эффекта уз-

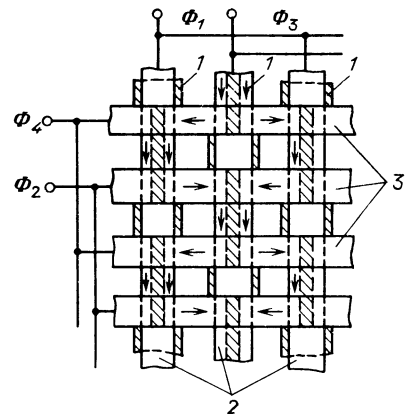


Рис. 4.3. Топология матрицы фирмы Sanyo с пересекающимися затворами: Стрелки указывают путь переноса заряда; 1 — стоп-каналы; 2 — первый слой поликремния; 3 — второй слой поликремния;  $\Phi_1$ — $\Phi_4$  — фазы структуры

На рис. 4.3 представлена конструкция секции накопления матрицы с пересекающимися затворами. Два слоя поликремния образуют четырехфазную структуру, причем затворы фаз  $\Phi_1$  и  $\Phi_3$ , выполненные в первом слое поликремния, расположены вертикально, а затворы фаз  $\Phi_2$  и  $\Phi_4$  во втором слое — горизонтально. При такой топологии в центре фоточувствительной ячейки ока-

кого канала потенциал под этими участками может заметно возрастать. С целью устранения нестабильности потенциала в области открытого кремния, приводящей к заметной неэффективности переноса заряда по вертикали, проводится легирование этих участков бором для того, чтобы сравнять их потенциал с потенциалом подложки.

На светочувствительную секцию наклеивается система полосковых вертикальных фильтров желтого, зеленого, голубого цветов. Использование дополнительных цветов (желтого и голубого) повышает разрешающую способность камеры по горизонтали, так как в каждом столбце присутствует зеленая составляющая, которая определяет ширину полосы яркостного сигнала.

В приборах с  $p$ -карманом конструкция матрицы имеет трехфазную организацию с тремя слоями поликремниевых затворов. Для увеличения чувствительности в синей области спектра в секции накопления применена затворная структура. В результате формируется открытое окно, занимающее 40% площади ячейки. Регистры расположены один под другим и разделены разрешающими затворами.

Тактовая частота регистров в три раза меньше, чем при одном регистре, в результате чего возрастает эффективность переноса заряда, кроме того, в каждом регистре оказывается сигнал одного цвета и цвета не смешиваются из-за неэффективности переноса в горизонтальном регистре.

Наличие на подложке из  $n$ -кремния обратномещенного  $p$ -кармана приводит к тому, что электроны, генерированные глубже средней части  $p$ -кармана, стекают в подложку. В результате повышается разрешающая способность, уменьшается темновой ток и снижается избыточная чувствительность к красному и инфракрасному излучениям, так как оно генерирует носители глубоко под поверхностью кремния. Для устранения блуминга под действием световых перегрузок используется рекомбинация носителей на поверхностных состояниях посредством соответствующей организации тактовой диаграммы управляющих сигналов.

В основе принципа действия приборов с виртуальной фазой лежит возможность двухфазных ПЗС-регистров со скрытым каналом и имплантированными барьерами функционировать в «однофазном» режиме, если на одну из фаз подать постоянное смещение. Если заменить постоянно смещенный поликремниевый затвор  $p$ - $n$ -переходом, заземлив его  $p$ -электрод, то полученная структура при соответствующем уровне легирования будет работать аналогично. Такой затвор, электрически связанный с подложкой, называется виртуальной фазой.

Достоинством прибора этого типа является низкое значение темновых токов, так как вся фоточувствительная поверхность оказывается заполненной дырками, в результате чего практически исчезает поверхностная составляющая темнового тока. Борьба с блумингом осуществляется аналогично тому, как это делается в матрице с  $p$ -карманом.

Для воспроизведения цветных фотографических негативов разработана матрица с двумя выходными регистрами. Фоточувствительная часть имеет обычную четырехфазную организацию, заряд из которой распределяется по двум параллельным двухфазным горизонтальным регистрам. В результате использования двух регистров появляется возможность получить шаг по горизонтали 12 мкм, не применяя третьего слоя поликремния. Заряд считывается с помощью выходного устройства, которое содержит плавающую диффузионную область и двухкаскадный истоковый повторитель.

Несмотря на то, что вся фоточувствительная область закрыта поликремневыми затворами, чувствительность на длине волны 450 нм составляет 40% максимальной. Такой результат получается благодаря использованию тонкого слоя поликремния (170 нм), а также подбору толщин слоев окисла и поликремния, который позволяет получить эффект просветления.

При разработке ФВС для цветных телекамер имеет место тенденция к увеличению числа элементов, так как наложение цветных фильтров ухудшает разрешающую способность прибора. Эта задача решается, если выводить сигнал в нескольких параллельных регистрах, что позволяет снизить тактовую частоту регистров, уменьшить шаг по горизонтали и ослабить смешение цветов при горизонтальном переносе. Одновременно уменьшаются габаритные размеры кристалла и его фоточувствительной секции (диагональ секции накопления равна 7,5 мм, а размер кристалла составляет  $7,02 \times 9,42$  мм с количеством элементов по горизонтали до 780). Наиболее перспективное решение вопроса повышения чувствительности в синей области спектра заключается в использовании тонких слоев поликремния для затворной системы.

Проблема блуминга в матрицах с кадровым переносом решается путем рекомбинации излишних носителей на поверхности. Лучшее подавление световых перегрузок осуществляется с помощью диффузионных стоков антиблуминга, расположенных между каналами переноса.

При быстром переносе информации из секции накопления в секцию памяти происходит паразитная засветка изображения, в результате чего возможно искажение информации. Для предотвращения этого недостатка повышается частота переноса изображений из одной секции в другую. Этому способствует уменьшение площади прибора, а следовательно, и емкости фаз.

## 4.2. МАТРИЦЫ СО СТРОЧНО-КАДРОВОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

В матрицах со строчно-кадровой организацией вертикальные регистры переноса и элементы накопления световой информации представляют собой разные конструктивные решения. Благодаря этому в качестве накопительного элемента могут быть использованы различные фотоприемники (МДП-структура, фотодиод, фо-



торезистор), а регистры переноса зарядов могут экранироваться от света записи, в результате чего устраняется смешение цветов.

При разработке матриц со строчно-кадровой организацией наряду с борьбой против блуминга необходимо решать проблему смазывания изображения вследствие попадания в вертикальные регистры носителей, генерированных в глубине подложки и неуправляемо диффундирующих.

На рис. 4.4 изображена структура ячейки матрицы с двумя  $p$ -карманами прибора и объемным антиблумингом, в которую входят фотодиод, два затвора ПЗС-регистра и область передающего затвора. Роль передающего затвора выполняет та часть затвора ПЗС, которая выступает за край скрытого канала. Фотодиод находится в слаболегированном мелком  $p$ -кармане  $1PW$ , остальная часть ячейки — в более сильно легированном глубоком  $p$ -кармане  $2PW$ . Концентрация в кармане  $1PW$  определяется условием полного его обеднения при небольшом обратном смещении на  $n$ -подложке относительно заземленного  $p$ -кармана. Карман  $2PW$  в обычном режиме работы не обеднен.

Режим работы фаз вертикального регистра выбирается следующим образом (рис. 4.5). Затворы фаз  $\Phi_{B1}$  и  $\Phi_{B3}$ , которые одновременно выполняют роль передающих затворов, контролирующих передачу заряда из фотодиода в регистр, управляются трехуровневым напряжением (с уровнями  $U_H$ ,  $U_M$ ,  $U_L$ ). Затворы фаз вертикального регистра  $\Phi_{B2}$  и  $\Phi_{B4}$  управляются напряжением с двумя уровнями  $U_M$  и  $U_L$ . Уровень  $U_H$  устанавливается таким, чтобы слить накопленный заряд из фотодиода через область передающего затвора, который при этом оказывается открытым. Разница между  $U_M$  и  $U_L$  выбирается такой, чтобы обеспечить нормальную работу вертикального регистра и достаточную зарядовую емкость, сохраняя закрытым передающий затвор. Расположение импульсов  $U_{II}$

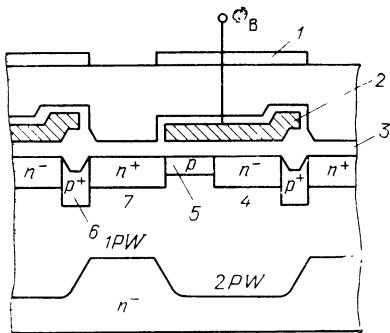


Рис. 4.4. Структура ячейки фотодиодной матрицы с двумя  $p$ -карманами:

1 — непрозрачный экран; 2 — поликремний; 3 —  $\text{SiO}_2$ ; 4 — канал ПЗС-регистра; 5 — область передающего затвора; 6 — стоп-канал; 7 — фотодиод

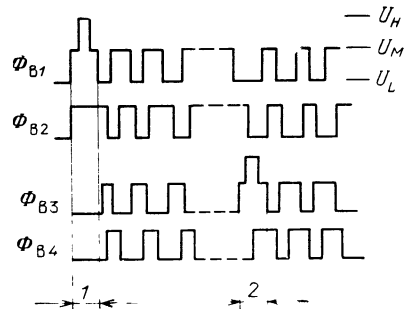


Рис. 4.5. Тактовые диаграммы вертикальных ПЗС-регистров матрицы с двумя  $p$ -каналами:

1 — прямой ход; 2 — обратный ход

на временной диаграмме обеспечивает чересстрочное считывание сигнала.

На рис. 4.6, где показаны профили потенциала под фотодиодом в отсутствие переполнения для двух предельных значений уровня сигнала,  $n$ -подложка обратнo смещена на величину  $U_{\text{подл}}$  относительно заземленного кармана  $2PW$ , так что карман  $1PW$  полностью обеднен.

При считывании сигнального заряда в вертикальном регистре в  $n$ -области фотодиода устанавливается потенциал  $\varphi_H$ , равный потенциалу в канале под передающим затвором при уровне напряжения  $U_H$  на затворе  $\Phi_B$ . В этот момент профиль потенциала соответствует кривой 5. Затем по мере накопления сигнального заряда потенциал фотодиода уменьшается. При достаточно сильном освещении распределение потенциала станет соответствовать кривой 4. По достижении этого момента профиль потенциала перестанет меняться, так как все избыточные носители будут теперь сливаться через барьер  $\varphi_B$  в подложку. Следовательно, если  $U_{\text{подл}}$  выбрано таким образом, что  $\varphi_B$  (соответствующий минимальному потенциалу в кармане  $1PW$  на кривой 4) больше, чем  $\varphi_M$  (потенциал в канале под передающим затвором при уровне напряжения  $U_M$  на затворе  $\Phi_B$ ), то весь избыточный заряд будет стекать в подложку до того, как он начнет переливаться в вертикальный регистр. Это означает, что блуминг полностью подавляется.

Прибор изготавливается на подложке из кремния  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением 20 ... 30 Ом·см по двухслойной поликремниевой технологии.

Уровень смазывания в предлагаемой конструкции составляет 0,05% благодаря тому, что носители, генерированные в глубине

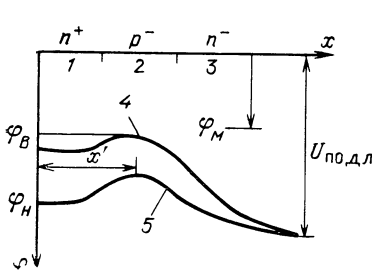


Рис. 4.6 Распределение потенциала  $\varphi$  по глубине  $x$  в фотодиоде матрицы с двумя  $p$ -карманами:

1 — фотодиод; 2 — карман  $1PW$ ; 3 — подложка; 4 — профиль потенциала при полной потенциальной яме; 5 — профиль потенциала при пустой потенциальной яме;  $x'$  — глубина потенциального максимума

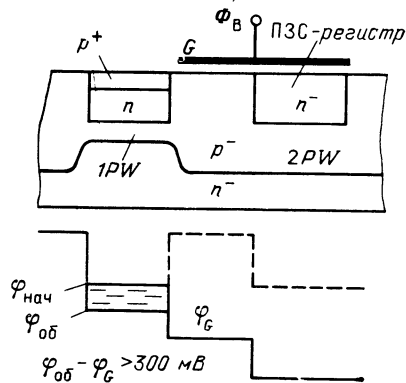


Рис. 4.7 Ячейка матрицы с двумя  $p$ -карманами с фотодиодной  $p^+-n$ -структурой и распределение потенциала в ячейке:

— — распределение потенциала при закрытой фазе  $\Phi_B$

подложки, не могут диффундировать в ПЗС-регистр из-за обратного смещения, приложенного между подложкой и  $p$ -карманом. Объемный сток улучшает также спектральную характеристику прибора, поскольку уменьшается эффективная толщина фоточувствительного слоя. Резко падает чувствительность в близкой ИК-области, и спектральная характеристика приближается к кривой видности, имея максимум на длине волны 550 нм. Темновой ток прибора не превышает 0,2 нА. Динамический диапазон прибора составляет 72 дБ.

Из-за низкой проводимости канала в области передающего затвора в подпороговом режиме матрицы с фотодиодным накоплением обладают некоторой инерционностью. Для устранения этого эффекта необходимо использовать фотодиод со структурой  $p^+-n-p^-$  (рис. 4.7). Концентрация примеси в  $n$ -области подбирается таким образом, что полное ее обеднение при считывании наступает раньше, чем переход в подпороговый режим переноса. В результате резко сокращается время полного перетекания заряда в вертикальный ПЗС-регистр.

Введение  $p^+$ -слоя на поверхности  $n$ -области приводит к значительному увеличению зарядовой емкости фотодиода, поскольку появляется дополнительный  $p^+-n$ -переход, включенный параллельно  $n-p$ -переходу фотодиода. Кроме того,  $p^+$ -слой изолирует сигнальный заряд от поверхности, предотвращая взаимодействие с поверхностными ловушками. Подавляется также поверхностная генерация, от которой зависит темновой ток.

Созданная матрица имеет число элементов  $768 \times 490$ , размеры ячейки  $11,5 \times 13,5$  мкм.

Для повышения фоточувствительности на матрице используется интересный способ увеличения апертуры. Поскольку большая часть ячейки закрыта непрозрачным алюминиевым экраном и фоточувствительная часть составляет лишь около 40% площади, на поверхности прибора формируется массив полуцилиндрических линз, фокусирующих свет на фотодиоды. Линзы получают путем оплавления длинных узких полосок фоторезиста. В результате эффективная апертура возрастает до 80 %.

Малый шаг по горизонтали достигнут благодаря использованию чрезвычайно узкого вертикального регистра (3 мкм). Для увеличения зарядовой емкости скрытый канал сделан мелким (0,5 мкм).

Разрешающая способность прибора 560 ТВ линий по горизонтали. Чувствительность 0,068 мкА/мкВт, динамический диапазон 68 дБ. Уровень насыщения прибора определяется зарядовой емкостью регистра, вмещающего  $1,3 \cdot 10^5$  электронов.

Для подавления смазывания изображения, наблюдаемого при работе матрицы, представленной на рис. 4.4, разработан прибор с тремя типами  $p$ -карманов. Отличие состоит в том, что  $p$ -карман  $2PW$  сделан ненамного глубже, чем  $1PW$ , в результате чего при работе прибора обедняются оба кармана. Обеднение кармана  $2PW$  препятствует диффузии фотогенерированных носителей в верти-

кальные регистры, уменьшая смазывание изображения. Мелкий  $p$ -карман позволяет также сократить размер ячейки благодаря малой боковой «разгонке» примеси. Для нормального функционирования выходного устройства сформирован глубокий  $p$ -карман  $3PW$ .

Плавающая диффузионная область и последний элемент горизонтального регистра соединены проводящей диффузионной  $n^+$ -областью, чтобы преодолеть влияние потенциального барьера на границе двух  $p$ -карманов  $2PW$  и  $3PW$ . В результате уровень смазывания на длине волны 550 нм достигает 73 дБ.

Эффективным способом получения большой зарядовой емкости фото диода является режим накопления поля. Суть его состоит в том, что в конце каждого полукадра происходит считывание информации не с каждой второй строки (как при обычном кадровом накоплении), а со всех строк накопительных элементов; соответственно изменена и тактовая диаграмма вертикальных регистров — заряды с каждых двух соседних строк складываются, оказываясь в одной потенциальной яме, после чего начинается перенос в горизонтальный регистр. Для чересстрочного разложения в разных полукадрах объединяют разные пары строк аналогично матрицам с переносом кадра.

Так как в регистре складываются заряды с двух фото диодов, то это эквивалентно удвоению зарядовой емкости элемента накопления. Поскольку время накопления информации в каждом элементе сокращается вдвое, то уменьшается инерционность изображения.

Цветные фильтры наносятся непосредственно на поверхность матрицы, закрывая лишь фоточувствительную область над фото диодом. Важно отметить, что режим накопления поля определяет и систему цветокодирования, которая состоит из прозрачных желтого и голубого фильтров. В каждой ячейке содержится зеленая составляющая, определяющая ширину полосы яркостного сигнала, что обеспечивает высокую разрешающую способность такого способа.

Для устранения смазывания изображения в строчно-кадровых матрицах используются высокоомные подложки и  $p$ -карман, в котором располагается регистр. Высокое сопротивление подложки приводит к росту глубины обедненного слоя под накопительным затвором и тем самым уменьшает число носителей, неуправляемо диффундирующих в соседние регистры. При изменении удельного сопротивления подложки с 12 до 120 Ом·см смазывание уменьшается в 5 раз. Однако использование высокоомного кремния сопряжено с определенными трудностями. В кремнии с высокой концентрацией кислорода, выращенном по методу Чохральского, при низкотемпературных обработках повышается концентрация донорных центров, т. е. возникают кислородные «термодоноры». На кремнии, выращенном методом зонной плавки, такой эффект не наблюдается, но пластины из этого материала имеют низкую механическую прочность. Способ получения кремния из расплава в

магнитном поле обеспечивает контролируемое распределение кислорода и подавляет возникновение «термодоноров».

Помимо использования высокоомной подложки для устранения смазывания используется расположение вертикального регистра в *p*-кармане.

Наличие *p*<sup>+</sup>-*p*-перехода между карманом и подложкой приводит к появлению потенциального барьера для электронов, диффундирующих из подложки. Кроме того, обедненный слой, окружающий область скрытого канала вертикального регистра, становится тоньше, что уменьшает смазывание изображения. В результате достигается уровень смазывания 0,01% сигнала насыщения.

С целью повышения чувствительности разработан прибор с гетеропереходными фотодиодами, в которых вся поверхность матрицы покрыта тонкой фоточувствительной пленкой, а сама строчно-кадровая матрица, в которую свет не попадает, служит только для считывания и вывода фотогенерированного в пленке заряда. Поскольку в ячейке можно сократить размеры накопительной области и исключить сток антиблуминга (блуминг подавляется в фоточувствительной пленке), то увеличивается плотность расположения элементов. Спектральная характеристика прибора в этом случае определяется свойствами гетероперехода как фотоприемника.

Весьма удобным фотопроводящим материалом для «двухэтажного» ФВС является гидрогенизированный аморфный кремний (*a-Si:H*) с высоким сопротивлением. Прибор представляет собой фотодиодную матрицу с двухфазным горизонтальным и четырехфазными вертикальными регистрами со скрытым каналом. Роль разрешающего затвора выполняет затвор фазы регистра. К недостатку прибора относится остаточное изображение, обусловленное использованием в качестве фоточувствительного элемента высокоомного резистивного слоя.

Для повышения разрешающей способности фотоприемные элементы необходимо располагать в шахматном порядке. При этом вертикальные регистры имеют обычную прямоугольную топологию.

На каждый фоточувствительный элемент приходится один бит регистра, что позволяет с целью сокращения размера ячейки регистра сделать трехфазным с тремя слоями поликремния. При такой организации матрицы все сигнальные заряды с каждого элемента считываются в каждом полукадре, т. е. прибор работает в режиме накопления поля.

Достоинством ФВС с нанесенным на поверхность фоточувствительным слоем является его большая апертура, которая обеспечивает эффективное подавление муарового эффекта. К недостаткам относятся инерционность изображения и возможность прожигания фоточувствительного слоя.

Итак, при проектировании строчно-кадровых матриц наряду со стремлением уменьшить их габаритные размеры и одновременно увеличить число элементов (размеры фоточувствительной области 8,55×6,37 мм при количестве элементов 768×490) решаются проб-

лемы блуминга и смазывания изображения, инерционности и повышения чувствительности. В качестве антиблуминга наиболее широко используется конструкция с  $p$ -карманом. Одним из способов борьбы со смазыванием изображения является создание возле регистров электрического поля, которое отталкивает неуправляемо диффундирующие носители. В результате уровень смазывания доведен до 0,01% сигнала в освещенной части.

Для устранения инерционности, характерной для работы матриц при малых уровнях освещенности, создается дополнительная  $p^+$ -область на поверхности фотодиода, что приводит к увеличению зарядовой емкости накопителя и снижению темновых токов. «Кадровая» инерционность, обусловленная чересстрочным считыванием информации, устраняется организацией режима накопления поля, что приводит к другому способу выделения цветов в камере.

Улучшение чувствительности достигается созданием ФВС, в которых фотопреобразование происходит в пленках, нанесенных на поверхность матрицы, хотя в этом случае возникают проблемы инерционности и надежности прибора.

### 4.3. МАТРИЦЫ СО СТРОЧНОЙ АДРЕСАЦИЕЙ

Матрицы со строчной адресацией представляет собой комбинацию накопителя на основе МДП-транзисторов с горизонтальным выходным ПЗС-регистром (см. рис. 4.1,б). Такие структуры сочетают в себе достоинства транзисторных ФВС- и ПЗС-формирователей видеосигнала. Они напоминают фотодиодные строчно-кадровые матрицы, у которых вертикальные регистры заменены проводящими шинами считывания, а сброс накопления информации с фотодиодов в вертикальные шины идет построчно. Во время строчного обратного хода вертикальное сканирующее устройство на МДП-транзисторах выбирает определенную строку, заряд считывается в вертикальные шины и передается в горизонтальный регистр. За время прямого хода по строке сигнал выводится во внешнюю цепь.

При такой организации необходимо обеспечить быстрое и эффективное считывание малого заряда с вертикальной шины большой емкости в ячейку горизонтального регистра. Для решения этой задачи между фоточувствительной матрицей и регистром вводится специальное согласующее устройство, которое в значительной степени определяет качество работы прибора.

На рис. 4.8 представлена фотодиодная матрица с инвертирующим усилением. Ее работа организована следующим образом. В момент начала строчного обратного хода заряд, накопившийся на вертикальных шинах, сбрасывается через управляющий затвор  $A$  в стоковые области. Эта процедура существенно уменьшает блуминг и смазывание изображения. Затем сигнальный заряд считывается с  $A$ -строк фотодиодов в трехфазный ПЗС-регистр. В регистре считанный заряд сдвигается на один бит, после чего считывается информация с  $B$ -строк.

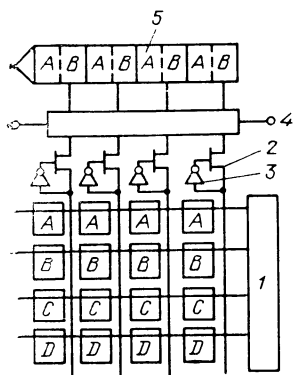


Рис. 4.8. Фотодиодная матрица со строчной адресацией и инвертирующими усилителями фирмы Hitachi:

1 — вертикальное сканирующее устройство; 2 — передающий затвор; 3 — инвертирующий усилитель; 4 — управляющий затвор; 5 — горизонтальный ПЗС-регистр

Во время прямого хода заряды с рядов *A* и *B* одновременно выводятся с помощью регистра со скрытым каналом с тактовой частотой 14 МГц. В следующем полукадре считываются строки *B* и *C* (режим накопления поля).

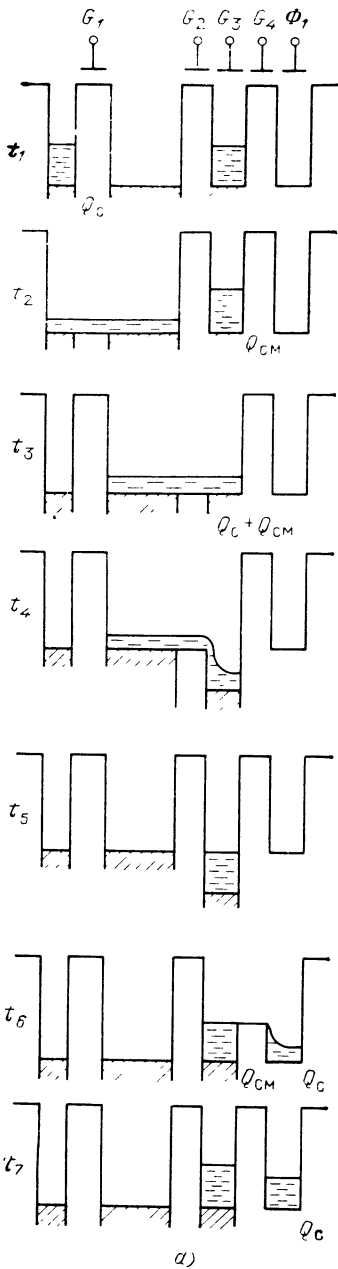
Проблема считывания с шины большой емкости решается благодаря использованию инвертирующего усилителя на двух МДП-транзисторах. Такой усилитель создает петлю обратной связи в цепи считывания информационного заряда. Чем больше заряд, который попадает на шину считывания, тем сильнее открывается передающий затвор 2, через который заряд передается в ПЗС-регистр. Инвертор 3 усиливает в *G* раз изменения потенциала вертикальной шины. Это приводит к тому, что эффективная емкость снижается в  $(1+G)$  раз:  $C_{вэф} = C_{в}/(1+G)$ . В результате резко увеличивается эффективность передачи заряда в регистр. Она превышает 98% и не зависит от считываемого сигнала.

Прибор изготавливается на *n*-подложке. Для подавления блиннга и смазывания используется *p*-карман. Кристалл размерами 10,0×8,5 мм содержит 385×492 элемента. Цветное изображение получается с помощью системы мозаичных фильтров: зеленого, голубого, желтого и прозрачного. При наличии фильтров чувствительность прибора составляет 17 нА/лк.

Проблема считывания заряда с длинной вертикальной шины может решаться и с помощью специального устройства подкачки заряда. Основное его назначение состоит в том, чтобы перед каждым циклом считывания сигнала с вертикальной шины добавить к малому сигнальному заряду  $Q_c$  большой постоянный заряд смещения  $Q_{см}$ . Поскольку эффективность перетекания заряда чрезвычайно быстро падает с уменьшением разности потенциалов между шиной и каналом передающего затвора, то, увеличив общее количество заряда, удается резко поднять эффективность переноса. При этом заряд смещения  $Q_{см}$  не попадает в горизонтальный регистр, где его присутствие могло бы сильно снизить динамический диапазон. Общая структура такого прибора не отличается от приведенной на рис. 4.1,б.

Устройство подкачки заряда состоит из двух передающих затворов  $G_2$  и  $G_4$  и расположенной между ними плавающей диффузионной области, служащей источником заряда смещения. Плавающая диффузионная область управляется затвором  $G_3$ , который расположен над ней и связан с ней емкостной связью.

Процесс считывания заряда в регистр происходит следующим образом (рис. 4.9). В момент  $t_1$  сигнальный заряд хранится в фо-



годиоде. В момент  $t_2$  произошел выбор данной строки и через открывшийся разрешающий затвор  $G_1$  сигнальный заряд попадает в вертикальную шину. В момент  $t_3$  затвор  $G_1$  уже закрылся, а открывшийся затвор  $G_2$  приводит к инжекции заряда смещения в вертикальную шину.

В момент  $t_4$  в плавающей диффузионной области образуется потенциальная яма за счет емкостной наводки, созданной скачком потенциала на затворе  $G_3$ . В потенциальную яму стекает заряд  $Q_c + Q_{см}$  с вертикальной шины. В момент  $t_5$  закрывшийся затвор  $G_2$  изолирует вертикальную шину от потенциальной ямы, в которой хранятся заряды  $Q_c$  и  $Q_{см}$ . В момент  $t_6$  снижается глубина потенциальной ямы из-за скачка потенциала на затворе  $G_3$  и через открывшийся затвор  $G_4$  сигнальный заряд стекает под фазу  $\Phi_1$  горизонтального ПЗС-

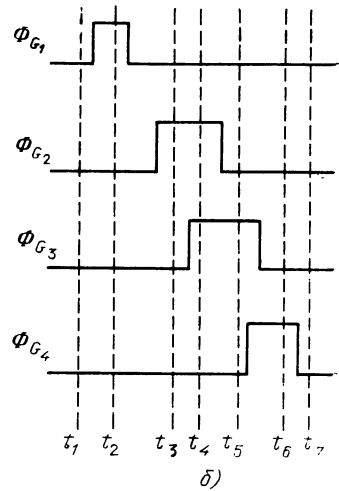


Рис. 4.9. Работа матрицы с подкачкой заряда фирмы Matsushita:  
 а — потенциальные диаграммы в различные моменты; б — тактовые диаграммы управляющих напряжений



регистра. Заряд смещения остается при этом в потенциальной яме и будет использован в следующем цикле считывания; в момент  $t_7$  затвор  $G_4$  закрыт и все устройство возвращается в исходное состояние.

Эффективность переноса заряда из фотодиода в вертикальную шину превышает 99%, поскольку емкость шины более чем в 150 раз превышает емкость фотодиода.

Для борьбы с блумингом все активные элементы расположены в  $p$ -карманах. При этом фоточувствительные элементы находятся в  $p$ -области с малой концентрацией примеси, так что в рабочем режиме  $p$ -область полностью обедняется. Горизонтальный регистр со скрытым каналом и схема подкачки заряда расположены в другом  $p$ -кармане с более высокой концентрацией, электрически изолированном от первого. В третьем  $p$ -кармане размещается вертикальное сканирующее устройство. Электрическая изоляция всех трех карманов друг от друга снижает взаимные емкостные наводки.

Для снижения частоты тактирования, а следовательно, эффективности передачи заряда в горизонтальных ПЗС-регистрах матрицы имеют два выходных горизонтальных регистра. Один из них располагается сверху, а другой — снизу от массива фотодиодов. В нижний регистр считываются сигналы с четных вертикальных шин, а в верхний — с нечетных. Такое решение возможно благодаря ненаправленному характеру распространения заряда в вертикальных шинах.

Матрицы со строчной адресацией технологически и топологически проще, чем строчно-кадровые матрицы, в результате чего достигается высокая плотность упаковки элементов и уменьшаются габаритные размеры (размеры фоточувствительной области составляют  $6,63 \times 4,85$  мм с количеством элементов  $510 \times 485$ ). Фотодиодный элемент накопления обеспечивает хорошую чувствительность в синей области спектра.

Найдено решение главной проблемы при разработке приборов этого класса — эффективной передачи заряда с вертикальных шин матрицы в горизонтальный регистр. Сочетание принципа подкачки заряда с использованием инвертирующего усилителя обеспечивает высокие быстродействие и эффективность переноса заряда.

Блуминг и смазывание изображения подавляются с помощью вертикальных строк переполнения. Заслуживает внимание и предварительный сброс паразитного заряда с вертикальных шин перед считыванием информационного сигнала.

## Глава 5

### ДРУГИЕ ВИДЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

#### 5.1. ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ МАТРИЦАМИ НА ДИОДАХ ШОТКИ С ПЗС СЧИТЫВАНИЕМ

При разработке формирователей сигналов изображений с применением многоэлементных фоточувствительных матриц чувствительность отдельных элементов в матрице неравномерна, что вызывает геометрический шум [107]. При регистрации ИК-излучения в наземных условиях высокий уровень фонового шума (более  $10^{17}$  фотонов/см<sup>2</sup>·с для  $\lambda=10$  мкм) определяет низкий уровень контраста около 1% (при перепаде температуры на поверхности объекта наблюдения в 1 К), т. е. проблема геометрического шума встает особенно остро.

Практически свободны от этого недостатка матрицы, в которых фоточувствительные элементы образованы диодами с барьером Шотки, а преобразование излучения в электрический сигнал происходит за счет внутренней фотоэмиссии на границе металл — полупроводник. Особенно высокие параметры достигнуты при считывании сигнала с матриц на диодах Шотки с помощью ПЗС.

Таким образом удается решить проблему построения твердотельных формирователей сигналов изображений в ИК-области спектра.

**Преобразование излучения в диодах Шотки.** В барьере Шотки в зависимости от соотношения между значениями работы выхода электрона в металле  $\Phi_M$  и в полупроводнике  $\Phi_P$  электроны в результате внутренней эмиссии могут переходить из металла в полупроводник (при  $\Phi_M < \Phi_P$ ) или наоборот (при  $\Phi_M > \Phi_P$ ) до наступления термодинамического равновесия и совпадения уровней Ферми по обе стороны контакта.

На рис. 5.1 приведена энергетическая диаграмма контакта металла с полупроводником *n*-типа при  $\Phi_M > \Phi_P$ .

При соприкосновении часть электронов из полупроводника переходит в металл, вблизи контакта в полупроводнике образуется обедненный приконтактный слой, возникает область пространственного заряда нескомпенсированных положительных ионов доноров, электрическое поле которых препятствует дальнейшим переходам электронов из полупроводника в металл, зоны искривляются вверх на величину равновесного поверхностного потенциала  $q\varphi_s$ . Если пренебречь ролью поверхностных состояний, то ве-

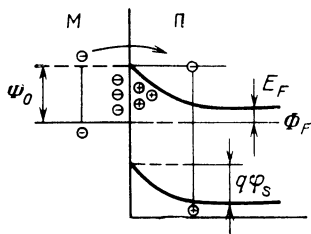


Рис. 5.1. Энергетическая диаграмма контакта металла с полупроводником *n*-типа после установления равновесия

личина  $q\varphi_s$  равна контактной разности потенциалов  $q\varphi_s = \Phi_m - \Phi_n$ .

При поглощении фотона в металле, если возбужденный электрон окажется на высоком энергетическом уровне, достаточном для преодоления потенциального барьера на границе металла с полупроводником, происходит внутренняя фотоэмиссия электрона из металла в полупроводник. Кинетическая энергия возбужденного электрона должна быть больше высоты барьера  $\Phi_0$ , равной (см. рис. 5.1)  $\Phi_0 = q\varphi_s + E_F$ , где  $E_F$  — энергетическое расстояние между уровнем Ферми и дном зоны проводимости полупроводника. Другими словами, высота барьера равна разности между работой выхода металла и электронным сродством полупроводника. Длинноволновую границу фотоэффекта при электронных переходах такого типа подбором соответствующих материалов можно сдвинуть в ИК-область спектра.

Для исключения влияния поверхностных состояний на высоту потенциального барьера  $\Phi_0$  и тем самым на фотоэлектрические свойства приемников ИК-излучения на основе диодов Шоттки последние изготавливают из кремния с металлами, которые вступают с ним в химическую реакцию с образованием силицидов, имеющих металлическую проводимость (например, палладий и платина). В этом случае барьер Шоттки возникает на границе раздела кремний — силицид металла. Преимуществом такого барьера является отсутствие влияния на его свойства поверхностных дефектов, окислов и загрязнений на поверхности кремния. Подбором необходимого материала можно обеспечить такую высоту барьера, которая определяет чувствительность приемника в требуемом диапазоне ИК-спектра (табл. 5.1).

Длинноволновая граница фотоэффекта  $\lambda_0$  связана с высотой потенциального барьера  $\Phi_0$  известным выражением

$$\lambda_0 = \frac{1,24}{\Phi_0}, \quad (5.1)$$

непосредственно следующим из равенства  $h\nu_0 = \Phi_0$ , где  $\lambda_0$  измеряется в микрометрах,  $\Phi_0$  — в электрон-вольтах, а  $h\nu_0$  — энергия кванта, соответствующего  $\lambda_0$ .

Таблица 5.1

**Высота барьера Шоттки на границе кремния с силицидами некоторых металлов**

Силицид	$\Phi_0$ , эВ	$\lambda_0$ , мкм	Силицид	$\Phi_0$ , эВ	$\lambda_0$ , мкм
TiSi <sub>2</sub>	0,52	2,4	Pd <sub>2</sub> Si	0,34	3,6
WSi <sub>2</sub>	0,47	2,64	Pt <sub>2</sub> Si	0,35	3,65
NiSi	0,46	2,7	PtSi	0,19...0,2	6,0
			IrSi	≤ 0,18	≥ 7,0

Спектральная зависимость квантового выхода  $Y$  внутренней фотоэмиссии из металла в полупроводник в диодах Шотки может быть описана уточненной формулой Фаулера:

$$Y = C \frac{(h\nu - h\nu_0)^2}{h\nu}, \quad (5.2)$$

где  $C$  — коэффициент квантовой фотоэмиссии, абсолютная величина которого зависит от геометрических, оптических и электрических параметров детектора.

Следует подчеркнуть, что, в отличие от традиционных приемников ИК-излучения, основанных на внутреннем фотоэффекте (фоторезисторы или  $p$ - $n$ -фотодиоды), квантовый выход которых не зависит от энергии кванта при энергии больше порогового значения и близок к единице, у приемников на диодах Шотки квантовый выход монотонно увеличивается с энергией кванта при энергиях, превышающих пороговые.

Основными процессами при детектировании излучения (приемниками на диодах Шотки) являются поглощение в слое силицида и внутренняя фотоэмиссия носителей из металла в полупроводник, поэтому коэффициент  $C$ , а значит, квантовый выход и фоточувствительность этих диодов, определяются в основном электронными и оптическими процессами в силициде металла, а не в полупроводнике. Кроме того, существенно, что фотосигнал связан с эмиссией основных носителей тока в полупроводник через потенциальный барьер. Поэтому фоточувствительность диодов Шотки в первом приближении не зависит от таких параметров полупроводника, как степень легирования и уровень компенсации примесей, а также от времени жизни неосновных носителей тока. То есть исключаются основные причины, вызывающие неравномерность чувствительности в многоэлементных матрицах, главной из которых в матрицах на диодах Шотки является разброс геометрических размеров чувствительных элементов.

Для приемников на диодах Шотки существенны два механизма шума: дробовой, вызванный флуктуациями тока термоэлектронной эмиссии через барьер, и фоновый, связанный с флуктуациями числа фотоэлектронов, возбужденных падающим на приемник фоновым излучением.

Температурная зависимость тока темновой термоэлектронной эмиссии описывается формулой Ричардсона

$$I_T = SA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_0}{kT}\right), \quad (5.3)$$

где  $T$  — температура детектора в кельвинах;  $q$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $A^*$  — постоянная Ричардсона (ее теоретическое значение для эмиссии дырок в кремний равно  $32 \text{ A} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ );  $S$  — площадь детектора. При понижении температуры уменьшаются среднее значение тока термоэлектронной эмиссии и его флуктуации. При некоторой достаточно низкой температуре преобладает фоновый шум. Условием преобладания фоново-

го шума над другими источниками шумов в фотодиодах Шотки является выполнение соотношения

$$R_0 S \gg \frac{2kT}{q^2 Y(\lambda) Q_{\Phi}(\lambda)}, \quad (5.4)$$

где  $R_0$  и  $S$  — соответственно темновое сопротивление (Ом) и площадь ( $\text{см}^2$ ) детектора;  $Q_{\Phi}(\lambda)$  — плотность фонового потока фотонов ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) на длине волны  $\lambda < \lambda_0$ ;  $Y(\lambda)$  — квантовый выход детектора на этой длине волны.

При условии

$$R_0 = \left. \frac{\partial I}{\partial U} \right|_{U=0} = \frac{kT}{qA^*T^2} \exp\left(-\frac{q\Phi_0}{kT}\right) \quad (5.5)$$

выражение (5.4) при интегрировании по всем длинам волн принимает вид

$$\frac{kT}{qA^*T^2} \exp\left(-\frac{q\Phi_0}{kT}\right) \gg \frac{2kT}{q^2 \int_0^{\lambda_0} Y(\lambda) Q_{\Phi}(\lambda) d\lambda}. \quad (5.6)$$

Неравенство (5.6) определяет температуру выхода приемника на режим ограничения фоном (ОФ) в зависимости от длинноволновой границы фоточувствительности. Из рис. 5.2 видно, что по оптимальным рабочим температурам (температурам выхода на режим ОФ) приемники на диодах Шотки значительно уступают обычным фотонным приемникам на узкозонных полупроводниках, для которых в окне 3... 5 мкм они достижимы с помощью термо-

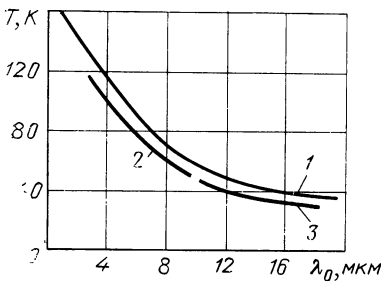


Рис. 5.2. Расчетные зависимости температуры выхода приемников на диодах Шотки в режим ОФ от длинноволновой границы фоточувствительности  $\lambda_0$  при различной интенсивности фонового излучения, когда фоновое излучение падает на чувствительный элемент в пределах полусферы и в спектральном интервале от 0 до  $\lambda_0$  (1), в угле  $30^\circ$  и  $\Delta\lambda = 3 \dots 5$  мкм (2) и в угле  $30^\circ$  и  $\Delta\lambda = 8 \dots 14$  мкм (3)

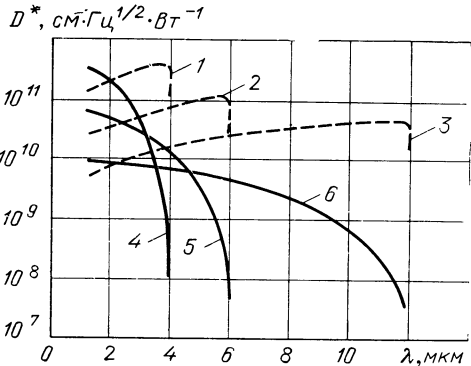


Рис. 5.3. Спектральная зависимость приведенной обнаружительной способности фоторезисторов (1...3) и фотодиодов Шотки (4...6) при  $\Phi_0$ , равных 0,1 эВ (3, 6), 0,2 эВ (2, 5) и 0,3 эВ (1, 4)

электрических холодильников (150 ... 190 К), а в окне 8 ... 14 мкм близки к температуре жидкого азота (около 80 К) [108]. То есть для получения наивысшей чувствительности в окне прозрачности атмосферы их длинноволновая граница чувствительности должна быть больше, чем у обычного фотодиода. Поэтому в качестве рабочей температуры приемников на диодах Шотки для окна пропускания 3 ... 5 мкм следует принять 80 К, а для окна 8 ... 14 мкм  $T \leq 40$  К.

При работе фотодиода Шотки в режиме ОФ его шум определяется интенсивностью фонового излучения. Как и для обычных фоторезисторов или фотодиодов, среднее квадратическое значение фонового шума зависит от средней интенсивности фонового потока, падающего на приемник:

$$\sqrt{\Delta n_{ш}^2} = \int_{\nu_0}^{\infty} Y(\nu) \overline{Q_{\Phi}(\nu)} d\nu, \quad (5.7)$$

где  $\overline{Q_{\Phi}(\nu)}$  — средняя плотность потока фотонов с частотой  $\nu$  фонового излучения, падающего на чувствительный элемент, и  $\nu_0 = \Phi_0/h$ .

На рис. 5.3 приведены спектральные зависимости обнаружительной способности для фоторезисторов и фотодиодов Шотки при  $C = 10\%/\text{эВ}$  и  $T_{\Phi} = 290$  К, из которых видно, что по сравнению с обычными приемниками фотодиоды Шотки имеют значительно меньшие величины  $D^*(\lambda)$  при длинах волн, близких к длинноволновой границе. Для повышения их обнаружительной способности уменьшают интенсивность фонового облучения чувствительного элемента, ограничивая апертуру падающего фонового потока охлаждаемыми диафрагмами или фильтрами необходимого рабочего спектрального интервала. Абсолютная интегральная обнаружительная способность, так же как и спектральная, у приемников на диодах Шотки намного меньше, чем у обычных фотонных приемников (рис. 5.4). Отличается также и их зависимость от положения длинноволновой границы fotocувствительности: если для обычных приемников сдвиг  $\lambda_0$  за длинноволновую границу окна пропускания излучения сигнала в лучшем случае не снижает обнаружительной способности, то для приемников на диодах Шотки максимальная интегральная обнаружительная способность достигается только в том случае, когда  $\lambda_0$  больше, чем длинноволновая граница соответствующего окна пропускания. Эта особенность определяется тем, что увеличение длинноволновой границы приводит к росту квантовой эффективности в заданном интервале длин волн (5.2). Таким образом, в приемниках на диодах Шотки обнаружительная способность в окнах прозрачности атмосферы теоретически может быть увеличена использованием материалов, обеспечивающих меньшую высоту потенциального барьера, и снижением температуры охлаждения чувствительного элемента.

Преимущество традиционных фотонных приемников излучения перед диодами Шотки по предельной чувствительности справедливо лишь для приемников «мгновенного» действия. При работе приемного устройства с накоплением сигнала в режиме ОФ

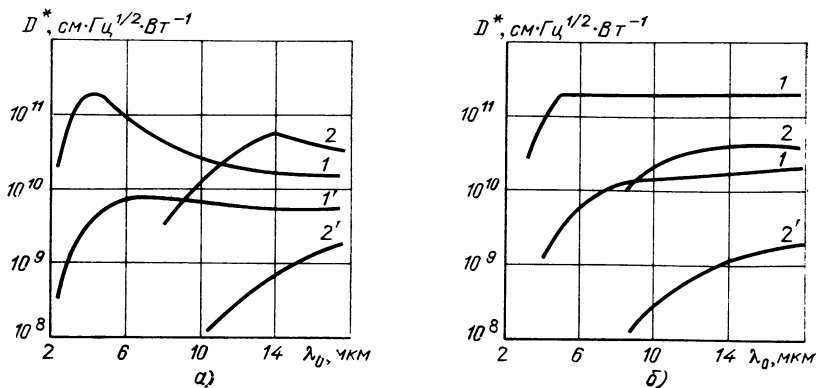


Рис. 5.4. Зависимость интегральной величины  $D^*$  ( $\Delta\lambda$ ) от положения длинноволновой границы fotocувствительности диодов Шоттки ( $1'$ ,  $2'$ ) и  $p$ - $n$ -фотодиодов ( $1$ ,  $2$ ) в окне прозрачности  $\Delta\lambda=3 \dots 5$  мкм ( $1$ ,  $1'$ ) и  $\Delta\lambda=8 \dots 14$  мкм ( $2$ ,  $2'$ ), когда фоновое излучение падает во всем интервале длин волн  $0 \dots \lambda_0$  мкм ( $a$ ) и в окнах  $\Delta\lambda$  ( $b$ )

отношение сигнал-шум определяется квадратным корнем из произведения времени накопления сигнала  $T_n$  и квантовой эффективности  $\eta$ . Поэтому для диода Шоттки малое значение квантового выхода при работе в режиме накопления заряда может быть скомпенсировано увеличением времени накопления сигнала. В многоэлементных приемниках со считывающим ПЗС-устройством величина  $T_n$  в основном определяется ограниченной емкостью потенциальных ям ПЗС-регистра. При работе в условиях приземного фона приемники с квантовой эффективностью, близкой к единице, из-за переполнения потенциальных ям ПЗС-регистра считывания не могут обеспечить время накопления сигнала более  $10^{-4}$  с для окна  $3 \dots 5$  мкм и  $10^{-5}$  с для окна  $8 \dots 14$  мкм, т. е. много меньше длительности телевизионного кадра. Поэтому при использовании матрицы диодов Шоттки в несканлирующих приемных устройствах, работающих в телевизионном стандарте, вполне осуществима компенсация малого значения квантового выхода большим временем накопления сигнала ( $T_n \approx 4 \cdot 10^{-2}$  с). Для обеспечения такой компенсации должно выполняться соотношение

$$T_n p-n \eta = T_{n \text{ ПЗС}} Y. \quad (5.8)$$

Максимальное время накопления сигнала, которое может быть реализовано в системе, определяется очевидным равенством:

$$T_n^{\text{max}} = \frac{n_0}{\int_0^{\lambda_0} Y(\lambda) Q_{\Phi}(\lambda) d\lambda}, \quad (5.9)$$

где  $n_0$  — максимальная емкость ямы ПЗС-регистра, и зависит от длинноволновой границы fotocувствительности. Для Шотки-детекторов потенциальная яма с плотностью электронов  $n_0 = 10^{12}$

см<sup>-2</sup> заполняется фоновым излучением при температуре  $T_{\Phi} = 290$  К за 0,1 с при работе приемника в окне 3...5 мкм и за 10<sup>-2</sup> с при работе в окне 8...14 мкм. Время накопления сигнала для приемников на диодах Шоттки в 10<sup>2</sup>...10<sup>3</sup> раз больше, чем для обычных фотонных приемников излучения, и, следовательно, выполняется соотношение (5.8). Возможность компенсации малого значения квантового выхода диодов Шоттки большим значением времени накопления в режиме накопления сигнала физически достаточно очевидна, поскольку, как и для обычных приемников, число накопленных носителей, а значит, и шум, равный квадратному корню из этого числа, в обоих случаях равно  $n_0$  и определяется емкостью потенциальной ямы ПЗС-регистра.

Накопленный фоточувствительным элементом под действием излучения сигнал

$$n_s = S_{\text{пр}} T_{\text{н}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) Q_s(\lambda) d\lambda, \quad (5.10)$$

где  $S_{\text{пр}}$  — площадь фоточувствительного элемента;  $Q_s(\lambda)$  — спектральная плотность потока фотонов сигнального излучения, падающего на чувствительный элемент;  $\lambda_1$ — $\lambda_2$  — спектральная область, в которой регистрируется излучение сигнала.

Среднее квадратическое значение фонового шума определяется квадратным корнем из числа накопленных электронов, вызванных излучением фона:

$$n_{\text{ш}} = \left( S_{\text{пр}} T_{\text{н}} \int_0^{\lambda_0} \eta(\lambda) \overline{Q_{\Phi}(\lambda)} d\lambda \right)^{1/2}. \quad (5.11)$$

Пороговая плотность потока сигнального излучения, соответствующая отношению сигнал-шум на выходе фоточувствительного элемента, равному единице

$$E_{\text{пор}} = \frac{\left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{hc}{\lambda} Q_s(\lambda) d\lambda \right] \left[ \int_0^{\lambda_0} \eta(\lambda) \overline{Q_{\Phi}(\lambda)} d\lambda \right]^{1/2}}{(T_{\text{н}} S_{\text{пр}})^{1/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) Q_s(\lambda) d\lambda}. \quad (5.12)$$

Для максимального времени накопления  $T_{\text{н}}^{\text{max}}$  (5.9) пороговая облученность рассчитывается по формуле

$$E_{\text{пор}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{hc}{\lambda} Q_s(\lambda) d\lambda n_0^{1/2}}{S_{\text{пр}}^{1/2} T_{\text{н}}^{\text{max}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) Q_s(\lambda) d\lambda}; \quad (5.13)$$

при этом для простоты считают, что площади чувствительного элемента и ячейки, в которой накапливается заряд, равны. Из рассчитанных по уравнению (5.13) зависимостей (рис. 5.5) видно, что в системах с приемниками на диодах Шоттки можно получить



те же значения пороговой облученности, что и с обычными *p-n*-фотодиодами.

Диод Шотки, работающий в режиме ОФ и накопления заряда, по существу является приемником не с низкой чувствительностью, а инерционным, причем «инерционным» такова, что допускает применение в несканирующих приемных системах с длительностью кадра, близкой к телевизионной. Основным его недостатком, обусловленным особым видом спектральной чувствительности, является необходимость охлаждения до более низких рабочих температур, чем обычных фоторезисторов или *p-n*-фотодиодов, работающих в том же спектральном диапазоне. Тем не менее в окне прозрачности атмосферы 3...5 мкм диоды Шотки имеют вполне приемлемые рабочие температуры (около 80 К).

**Матричные фотоприемники.** Параметры многоэлементных приемников ИК-излучения на диодах Шотки зависят как от характеристик самого фоточувствительного элемента, так и от устройства и режима работы матрицы. Обеспечить повышение квантовой эффективности диодов Шотки в рабочем диапазоне длин волн можно, увеличив длинноволновую границу фоточувствительности, которая определяется высотой барьера Шотки. Последняя же, как указывалось выше, зависит от работы выхода металла и электронного средства полупроводника. Например,  $\Phi_0$  на границе кремния с PtSi составляет 0,27 эВ, что соответствует длинноволновой границе фоточувствительности 4,6 мкм.

Для уменьшения эффективной высоты барьера Шотки его делают более тонким (в направлении, перпендикулярном поверхности перехода), создавая условия для туннелирования через него

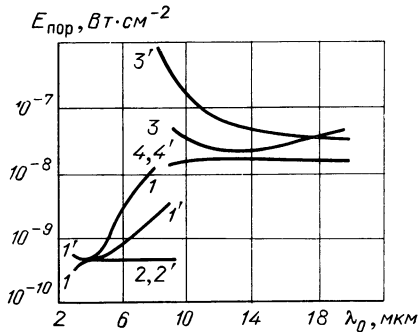


Рис. 5.5. Зависимость пороговой облученности приемников на диодах Шотки ( $1'-4'$ ) и *p-n*-фотодиодов ( $1-4$ ) от длинноволновой границы фоточувствительности при максимальном времени накопления в атмосферном окне,  $\Delta\lambda=3 \dots 5$  мкм ( $1, 1'$  и  $2$  и  $2'$ ),  $\Delta\lambda=8 \dots 14$  мкм ( $3, 3'$  и  $4$  и  $4'$ ), когда фоновое излучение падает на приемник в области  $0 \dots \lambda_0$  мкм ( $1, 1', 3$  и  $3'$ ) и только в окне  $\Delta\lambda$  ( $2, 2', 4$  и  $4'$ ), температура фона 290 К

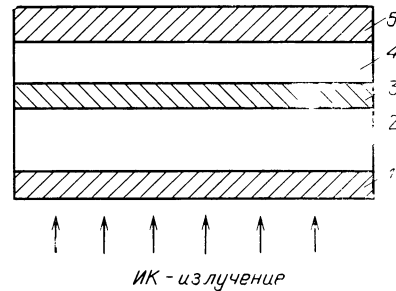


Рис. 5.6. Структура фотоувствительного слоя диода Шотки в виде «оптической полости»:

1 — просветляющее покрытие; 2 — кремниевая подложка *p*-типа; 3 — пленка силицида; 4 — диэлектрик; 5 — алюминий

фотовозбужденных носителей. Облегчению туннелирования фотоносителей способствует дополнительное легирование кремния тонким слоем ионов вблизи границы раздела металл — полупроводник. Легирующий слой должен иметь тот же тип проводимости, что и материал подложки, а доза легирующих ионов должна обеспечивать заметное понижение высоты барьера. Например, легирование галлием позволяет понизить высоту барьера PtSi с 0,267 до 0,223 эВ и соответственно сдвинуть длинноволновую границу fotocувствительности с 4,6 до 5,5 мкм. Увеличение длинноволновой границы всего на 20% приводит к росту квантовой эффективности диода в 5,6 ... 9,1 раза в диапазоне 3,4 ... 4,2 мкм.

Значительно увеличить квантовую эффективность диода Шоттки можно также, изготовив fotocувствительный элемент в виде «оптической полости» с тонким слоем силицида (рис. 5.6). Коэффициент квантовой фотоэмиссии  $S$  растет благодаря увеличению оптического поглощения за счет многократного отражения лучей в «полости», образованной алюминиевым зеркальным и просветляющим слоями, и эффективности внутренней фотоэмиссии горячих дырок из тонкого слоя силицида в кремниевую подложку за счет их многократного отражения на границах разделах силицид—диэлектрик и силицид — полупроводник.

Возрастание значения  $S$  можно учесть введением коэффициента усиления  $G$ , равного отношению вероятностей эмиссии в тонком  $P_T(h\nu)$  и толстом  $P(h\nu)$  слоях силицида:

$$G = \frac{P_T(h\nu)}{P(h\nu)}. \quad (5.14)$$

С точки зрения физических процессов ясно, что коэффициент  $G$  тем выше, чем больше число возможных отражений  $n$  горячей дырки от поверхности раздела силицид — диэлектрик или силицид — кремний ( $G \sim n$ ). Если предположить, что при каждом переотражении энергия горячей дырки сохраняется, угол отражения некоррелирован с углом падения, а рассеяние энергии дырки при столкновениях с фононами и отражениях на границах пленки силицида можно описать средней длиной рассеяния энергии горячим носителем  $L$  (в направлении, перпендикулярном поверхности слоя), то число возможных переотражений  $n$  зависит от энергии горячей дырки  $E$ , толщины слоя силицида  $d$  и величины  $L$ :

$$E \exp\left(-\frac{2nd}{L}\right) = \Phi_0. \quad (5.15)$$

Из (5.15) видно, что  $G$  должен увеличиваться с ростом отношения  $\frac{L}{d}$ , причем эта зависимость должна быть различной для разных энергий фотонов. Максимальная величина  $G$  соответствует случаю, когда все горячие фотоносители эмитируются в кремниевую подложку, т. е.  $P_T(h\nu) = 1$ . Таким образом,

$$G_{max} = \frac{1}{P(h\nu)}. \quad (5.16)$$

Степень поглощения излучения в «оптической полости» fotocувствительной структуры диода Шоттки зависит от толщины

слоя силицида, а также от толщины и материала диэлектрика. Это означает, что, подобрав оптимальную толщину и материал слоя диэлектрика, можно значительно увеличить поглощение излучения в слое силицида и тем самым квантовый выход фотоэмиссии диодов Шотки. Как видно из рис. 5.7, максимального значения квантовый выход достигает при толщине слоя силицида, равной  $1/8$  обратной величины его коэффициента поглощения. Оптимизация PtSi-приемников позволяет повысить чувствительность на данной длине волны в 20 ... 30 раз (за счет увеличения оптического поглощения повышается в 3,5 раза, а за счет увеличения коэффициента усиления  $G$  в 9,2 раза).

На рис. 5.8 показаны температурные зависимости темнового тока термоэлектронной эмиссии Pd<sub>2</sub>Si- и PtSi-приемников Шотки, рассчитанные по формуле (5.3) при значениях энергии активации 0,199 и 0,378 эВ соответственно.

**Считывание матриц Шотки с помощью ПЗС.** Для осуществления первичной обработки фотосигнала приемников Шотки, состоящей в поэлементном считывании и выводе на общий выход, используются ПЗС-регистры с поверхностным или скрытым каналом.

В приемниках Шотки со сдвиговым ПЗС-регистром структура может работать в двух режимах — с вычитанием и без вычитания фонового сигнала. В режиме, при котором фоновый сигнал не вычитается, каналы сброса не используются (к ним прикладывается отрицательный потенциал). Когда к электроду первой фазы сдвигового регистра приложен высокий потенциал и под ним образована потенциальная яма, на затвор считывания подается положительный потенциал, создающий под электродом затвора и на плавающей диффузионной области канала считывания потенциал  $\varphi_a$  (рис. 5.9). Заряд, накопившийся к этому моменту в области барьера Шотки, переходит в более глубокую потенциальную яму под электродом первой фазы считывающего регистра. После

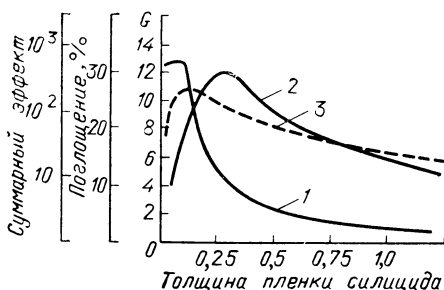


Рис. 5.7. Зависимость коэффициента усиления эмиссии  $G$  (1), интенсивности поглощения (2) и суммарного эффекта, выраженного произведением этих величин (3), от толщины слоя PtSi (в единицах, обратных коэффициенту поглощения) фотодиода Шотки

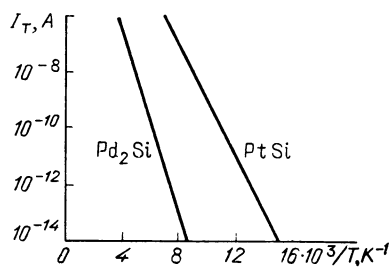


Рис. 5.8. Температурные зависимости темнового тока термоэлектронной эмиссии PtSi- и Pd<sub>2</sub>Si-диодов Шотки

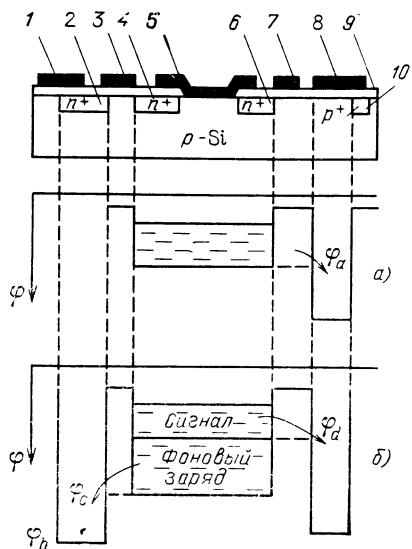


Рис. 5.9. Схема, поясняющая работу фотодиода Шотки в режиме без вычитания фонового сигнала (а) и с вычитанием фонового сигнала (б):

1 — шина сброса, 2 — канал сброса; 3 — затвор сброса; 4 — диффузионная область канала сброса, 5 — электрод фотодиода Шотки, 6 — диффузионная область канала считывания; 7 — затвор считывания, 8 — первая фаза ПЗС-регистра; 9 — окисел; 10 — стоп-канал

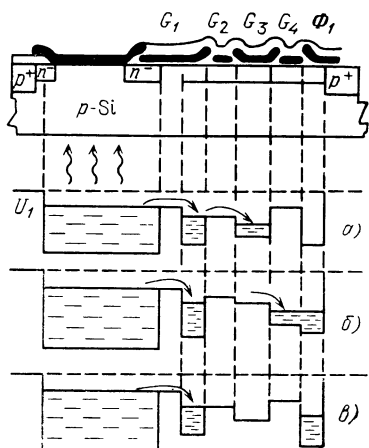


Рис. 5.10. Схема соединения фотодиода Шотки с входом ПЗС-регистра по методу прямой инжекции

прекращения считывающего импульса на затворе считывания этот заряд, представляющий собой сигнальный пакет, передается обычным путем на выходное устройство сдвигового регистра для формирования видеосигнала. После считывания сигнального заряда металлический электрод диода Шотки устанавливается под плавающим потенциалом  $\varphi_a$  и на нем происходит накопление сигнального заряда, который будет считан аналогичным способом в следующем кадре. При таком методе считывания в потенциальную яму сдвигового регистра передается весь заряд, накопленный фоточувствительным элементом как за счет оптического возбуждения излучением от регистрируемого объекта, так и за счет возбуждения фоновым излучением (и тепловой генерации).

В режиме с вычитанием фонового сигнала в качестве сигнального заряда используется разностный сигнал между накопленным ячейкой зарядом и зарядом, обусловленным облучением фонового излучения. Такое вычитание постоянного фонового сигнала осуществляется с помощью канала сброса (см. рис. 5.9), к шине которого прикладывается высокий положительный потенциал, образующий под шиной сброса потенциальную яму глубиной  $\varphi_b$ . В конце каждого кадра к затвору сброса прикладывается импульс

сброса, устанавливающий потенциалы диффузионных областей каналов сброса и считывания, а также фоточувствительной области барьера Шотки равными  $\varphi_c$ . При этом весь заряд, накопленный фоточувствительной областью, переносится в потенциальную яму под шиной сброса и удаляется. Фотодиод Шотки заряжается до плавающего потенциала  $\varphi_c$  и тем самым подготавливается для накопления заряда в течение следующего кадра. Перед подачей импульса сброса в конце времени интегрирования сигнала на затвор считывания подается импульс считывания, устанавливающий поверхностный потенциал под затвором, равным  $\varphi_d$ . Заряд, который накоплен в потенциальной яме под барьером Шотки, выше этого уровня и перетекает в потенциальную яму под электродом сдвигового регистра. Выбором потенциала  $\varphi_d$  можно обеспечить такие условия, чтобы в считывающий регистр для образования видеосигнала передавался только тот заряд, который несет информацию об изменении регистрируемого излучения по отношению к среднему уровню фонового потока. Оставшийся постоянный фоновый заряд удаляется после прекращения импульса считывания путем открывания затвора сброса, как было описано выше. Таким образом, удается, во-первых, значительно повысить контраст изображения и, во-вторых, более полно использовать ограниченную емкость фаз сдвигового регистра для обеспечения большего динамического диапазона приемного устройства.

С точки зрения обеспечения наибольшей равномерности чувствительности предпочтительнее режим считывания без вычитания фонового сигнала. Неравномерность сигнала может быть вызвана неоднородностью пленки окисла по толщине и плотности заряда в окисле, а также неоднородностью концентрации легирующей примеси в полупроводнике, что приводит к разбросу емкостей отдельных элементов и поверхностных потенциалов под затворами. В режиме без вычитания фона выставление исходного значения плавающего потенциала чувствительного элемента и считывание потенциала после накопления сигнального заряда, в отличие от режима с вычитанием фона, происходят с помощью одного и того же затвора. Отличие в уровнях устанавливаемого плавающего потенциала между разными ячейками не приводит к разбросу по уровню считываемого сигнала, поскольку последний определяется лишь разностью потенциалов до и после накопления заряда.

Могут использоваться и другие схемы считывания сигнала, например прямой инжекции (рис. 5.10), когда фоточувствительный элемент непосредственно связан с истоком эффективного МОП-транзистора. С помощью затвора  $G_1$  с поверхностным каналом на фотодиоде Шотки поддерживается некоторое отрицательное напряжение  $U_1$ . Во время накопления оптического сигнала заряд, генерируемый регистрируемым излучением, собирается в потенциальной яме под электродом  $G_3$  с скрытым каналом. По завершении накопления открывается затвор  $G_4$  и накопленный заряд передается под электрод первой фазы  $\Phi_1$  сдвигового ПЗС-регистра. После передачи накопленного заряда в ПЗС-регистр за-

твор  $G_4$  закрывается, на электрод  $G_3$  подается потенциал накопления и ячейка подготовлена к накоплению сигнала в следующем кадре. Особенностью данной схемы является исключение шумов, вызванных периодическим переключением напряжения на диоде Шотки, который все время находится под одним и тем же напряжением. Это напряжение можно подобрать таким образом, чтобы минимизировать токи утечки диода и увеличить его чувствительность. Кроме того, в такой схеме емкость, ограничивающая время накопления сигнала, определяется не емкостью диода Шотки, а большей емкостью считывающей ПЗС-структуры.

Использование преломляющих пластин на входе многоэлементного приемника позволяет исключить «мертвые зоны», увеличить коэффициент заполнения и тем самым повысить чувствительность матриц почти в 2 раза.

К настоящему времени уже созданы матрицы для окна прозрачности 3... 5 мкм с числом элементов, приближающимся к телевизионному растру ( $256 \times 256$ ). Наименьшая полученная высота барьера Шотки в этих матрицах составляет 0,19 эВ, что соответствует длинноволновой границе фоточувствительности 6,5 мкм [107].

Таким образом, многоэлементные приемники с накоплением оптического сигнала на диодах Шотки по предельной чувствительности ( $4 \cdot 10^4$  электрона на 1 К) не уступают обычным приемникам излучения с чувствительными элементами из InSb или HgCdTe. Кроме того, они сравнительно дешевы и допускают использование практически удобных холодильных устройств (80 К).

## 5.2. ИНФРАКРАСНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ SPRITE-ПРИЕМНИКОВ

Предъявляемые к ИК-приемным системам требования высоких отношения сигнал-шум и пространственного разрешения приводят к необходимости, с одной стороны, увеличения площади чувствительной поверхности приемника, а с другой — применения многоэлементного приемника с высокой плотностью упаковки отдельных элементов малого размера. Использование фотоприемных матриц на основе ПЗС- и ПЗИ-структур позволяет существенно улучшить параметры ИК-систем, но решить проблему упрощения электронной схемы управления, системы охлаждения и технологии изготовления дискретных многоэлементных приемников с большим числом контактов и межконтактных соединений не удастся. Значительно упрощаются эти проблемы в SPRITE-приемниках [109].

SPRITE-приемник — это фоторезистор с тремя электрическими контактами, выполняющий вместе с единственным усилителем функции нескольких элементов многоэлементного приемника с дискретными элементами с соответствующими схемами усиления и одновременно функцию суммирования сигнала отдельных элементов. Такое совмещение функций позволяет упростить электронные сервисные

схемы, упростить и удешевить технологию изготовления, а также снизить требования к системам охлаждения. Все это приводит к улучшению габаритно-массовых характеристик приемных систем, снижению их стоимости и повышению надежности.

В отличие от ПЗИ- и ПЗС-структур в SPRITE-приемнике обработка зарядового пакета происходит в монолитной структуре. Малое число контактов и межконтактных соединений и простота электронных схем обслуживания позволяют при формировании двумерной матрицы существенно повысить плотность упаковки отдельных ее элементов и получить матрицы с очень большой суммарной чувствительной площадью приемника. По сравнению с обычным фоторезистом SPRITE-приемник имеет большую абсолютную чувствительность, что очень важно для фоторезисторов из низкоомных твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$ ; высокая вольт-амперная чувствительность облегчает его согласование с малощумящим предварительным усилителем. Благодаря суммированию сигнала отдельных элементов упрощается решение сложной задачи выравнивания чувствительности и постоянной составляющей сигнала отдельных элементов. SPRITE-приемники по сравнению с дискретными многоэлементными, работающими на основе накопления фотоносителей в потенциальных ямах, имеют более высокие пороговые характеристики, так как в них не переполняются потенциальные ямы, что ограничивает максимально допустимое время накопления сигнала. Это ограничение особенно существенно для приемников на диапазон длин волн 8...14 мкм, где высок уровень фонового излучения. Так как принцип действия SPRITE-приемников основан на собственном фотоэффекте в полупроводниках, они могут работать при более высокой температуре, чем фоторезисторы на основе примесного фотоэффекта. Так, в диапазоне длин волн 3...5 мкм рабочая температура 190 К достигается с помощью термоэлектрических охлаждающих устройств, а в диапазоне 8...14 мкм температура 77 К также достаточно легко получается с помощью различных систем охлаждения.

Недостатком SPRITE-приемника является то, что он сможет работать только в системах с оптико-механическим узлом сканирования, причем чем выше скорость сканирования изображения по чувствительной поверхности приемного элемента, тем более очевидны преимущества такого приемника перед другими.

**Конструкция и принцип действия SPRITE-приемников.** SPRITE-приемник представляет собой полосу фотопроводящего полупроводникового материала (обычно твердого раствора  $Cd_xHg_{1-x}Te$  или антимонида индия  $InSb$ ), в которой подбором напряженности электрического поля достигается совпадение дрейфовой скорости фотоносителей и скорости перемещения изображения по поверхности этого фоторезистора. В этом случае время интегрирования приемником оптического сигнала равно времени жизни фотоносителей в полупроводнике  $\tau$ , а не времени, приходящемуся на один элемент разложения  $\tau_0$ . Следовательно, в быстро-

действующих сканирующих системах сигнал в приемнике увеличивается в  $\tau/\tau_0$  раз, а отношение сигнал-шум — в  $(\tau/\tau_0)^{1/2}$  раз. Приемник можно представить в виде некоторой монолитной системы, в которой непосредственно в фоточувствительной полоске осуществляются временная задержка и суммирование сигналов при последовательном сканировании изображения по строке элементов (рис. 5.11).

Теоретический расчет и эксперимент показывают, что предельная обнаружительная способность приемника эквивалентна суммарной предельной обнаружительной способности линейки дискретных фоторезистивных приемников, работающих в режиме ограничения фоном, при числе элементов в линейке  $N_{\text{эпв}} = 2\tau/\tau_0$ . Отсюда следует, что SPRITE-приемник проявляет высокую обнаружительную способность только в быстродействующих системах с большой скоростью съема информации  $v = 1/\tau_0$ , когда произведение  $\tau v \gg 1$ .

Так как в системе с SPRITE-приемником пространственное разрешение по направлению сканирования определяется не его геометрическими размерами, а диффузионной длиной неосновных носителей заряда в материале чувствительной полоски, то для его повышения следует уменьшать время дрейфа или длину полоски фоторезистора. Но при этом уменьшается также и время интегрирования сигнала.

В SPRITE-приемнике изогнутой формы (рис. 5.12) носители тока дрейфуют под влиянием электрического поля по более длинной, изогнутой траектории. Электрическое поле в фоторезисторе подбирается таким образом, чтобы совпадали эффективная скорость дрейфа в направлении сканирования и скорость сканирования изображения. Эффективная диффузионная длина в направлении сканирования уменьшается и становится равной  $w/y$ .

Так как обнаружительная способность SPRITE-приемников увеличивается с ростом скорости съема информации, то в системах на их основе может быть получено тепловое изображение телевизионного стандарта. Однако реализация такой системы затруднена необходимостью использования в системе оптико-механического узла сканирования. Практические ограничения на скорость вращения оптического элемента и допустимую мощность двигателя узла оптико-механического сканирования не позволяют использовать один приемник. Например, при мощности двигателя 10 Вт и вращении зеркальной призмы в воздухе

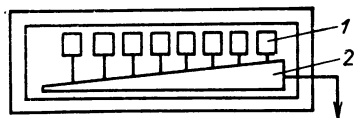


Рис. 5.11. Организация временной задержки и суммирования сигналов в SPRITE-приемнике:

1 — предусилители; 2 — устройство временной задержки

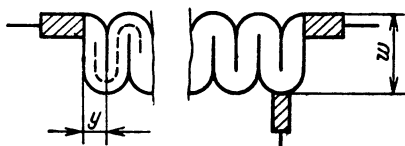


Рис. 5.12. SPRITE-приемник специальной формы с уменьшенной эффективной диффузионной длиной



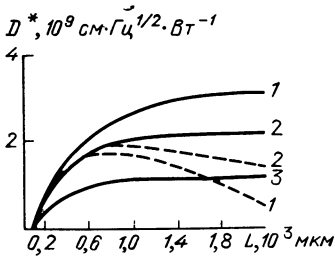


Рис. 5.13. Расчетные зависимости значений  $D^*$  (500 К) от длины восьмиэлементного SPRITE-приемника при скорости сканирования  $300 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  (1),  $200 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  (2) и  $100 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  (3) с учетом конечной теплопроводности между чувствительным элементом и охлаждающей жидкостью (—) и без учета этой величины (---)

ходит в полоске длиной 600 мкм, при большей скорости сканирования ( $300 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) — примерно 1500 мкм. Этот результат подтверждает вытекающий из теоретических зависимостей вывод, что чем больше скорость сканирования  $v_s$ , тем больше должна быть величина  $L$  для обеспечения одинаковой величины интегрирования сигнала в полоске фоторезистора. С учетом нагрева для обеспечения максимальной величины  $D^*$  при всех скоростях сканирования должны быть использованы полоски фоторезистора меньшей длины. То есть в противоречии с теоретическими выводами при нагреве за счет джоулева тепла величина  $D^*$  достигает больших значений при меньшей скорости сканирования ( $200 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ). Таким образом, рассеивание джоулева тепла лимитирует максимальную длину SPRITE-приемника.

Аналогично допустимая рассеиваемая мощность определяет максимальное число приемников, которое может быть использо-

для обеспечения телевизионного стандарта требуется применять восемь приемников [109].

Помимо необходимой скорости сканирования изображения по поверхности приемника следует обеспечить и соответствующую скорость дрейфа импульса возбуждения (электрическое поле необходимой напряженности) в объеме фоторезистора. С ростом электрического поля увеличивается рассеиваемая образцом мощность и, следовательно, его температура, а отношение сигнал-шум падает.

На рис. 5.13 приведены расчетные зависимости величины  $D^*$  для SPRITE-приемников на  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  от длины приемника  $L$  и скорости сканирования  $v_s$  при  $T=500 \text{ К}$ . Из рисунка видно, что без учета нагрева при малой скорости сканирования ( $100 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) полное интегрирование сигнала проис-

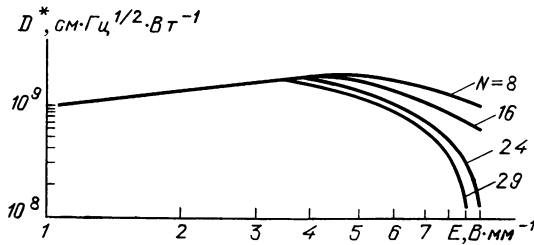
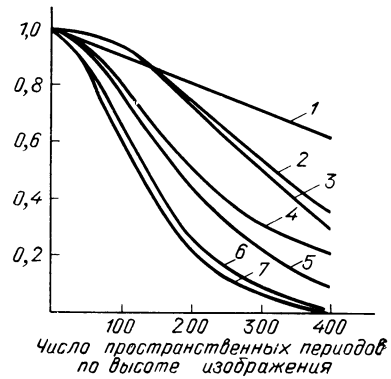


Рис. 5.14. Расчетные зависимости значений  $D^*$  (500 К) от напряженности электрического поля для SPRITE-приемников с различным числом элементов ( $N=8, 16, 24, 29$ ): длина приемника 780 мкм

**Рис. 5.15.** Функции передачи модуляции (ФПМ) гипотетической тепловизионной системы:

1, 2 — электронных схем; 3 — дисплея; 4 — приемника с учетом только эффекта диффузионного размытия импульса возбуждения; 5 — с учетом этого эффекта совместно с усреднением на длине считывающего контакта; 6, 7 — суммарные с учетом ФПМ приемника



вано в криостате заданной конструкции. Из рис. 5.14 видно, что обнаружительная способность падает при напряженности поля свыше  $4 \text{ В} \cdot \text{мм}^{-1}$ , причем тем быстрее, чем больше число приемников в матрице. Если увеличить длину приемника, то снижение обнаружительной способности начинается при еще меньших полях. Таким образом, рассеиваемая мощность и условия отвода тепла от чувствительного элемента определяют оптимальные характеристики конструкции и режим работы SPRITE-приемника.

В тепловизионной системе качество теплового изображения определяется способностью передачи различных пространственных частот оптического или электрического сигнала ее составными частями: оптикой, приемником, схемами электронного обрамления, устройством отображения.

На рис. 5.15 приведены функции передачи модуляции (ФПМ) некоторой гипотетической тепловизионной системы. Ее основными компонентами являются:

оптическая система с дифракционным пределом разрешения;

SPRITE-приемник, для которого длина амбиполярной диффузии составляет  $25 \text{ мкм}$  и длина считывающего контакта  $50 \text{ мкм}$ ; телевизионный дисплей, для которого форма светового пятна описывается гауссовской кривой и ФПМ падает до 5% при пространственной частоте, равной 750 периодам на ширину изображения.

Как видно из рис. 5.15, качество теплового изображения определяется эффектами усреднения сигналов высоких пространственных частот приемником. Это обусловлено рассогласованием скоростей сканирования изображения по поверхности приемного элемента и дрейфа неосновных носителей тока, расплыванием пакета фотоносителей во время его дрейфа к считывающему контакту за счет диффузионных процессов и усредняющим эффектом считывающего контакта с конечным размером  $l$ .

Эффект несовпадения скоростей существует только тогда, когда они различаются более чем на 5%. Диффузионное усреднение сигналов высоких пространственных частот при  $L/v_s \gg \tau$ , а также усреднение за счет конечного размера считывающего контакта описывается ФПМ вида [110]

$$\text{ФПМ} = (1 + v_n^2 L_a^2)^{-1} \frac{2 \sin(v_n l/2)}{v_n l}, \quad (5.17)$$

где  $\nu_{\Pi}$  — пространственная частота изображения;  $L_a$  — длина амбиполярной диффузии;  $l$  — размер считывающего контакта.

Из приведенного выражения видно, что для повышения пространственного разрешения приемных систем следует уменьшать длину считывающего контакта. В этом случае пространственное разрешение будет определяться только диффузионным расплыванием фотоносителей; обнаружительная способность не изменится, поскольку  $D^*$  не зависит от величины  $l$ .

На высоких частотах уменьшается не только чувствительность приемника, но и генерационно-рекомбинационный шум, который может быть описан простой эмпирической формулой, хорошо согласующейся с экспериментальными результатами при  $L \gg v_s \tau$ :

$$U_{\text{ш}}(\nu_{\Pi}) = U_{\text{ш}}(0) \left[ 1 + \left( \frac{2\nu_{\Pi} L_a}{v_s} \right)^2 \right]^{-1/2} \left[ \frac{\sin(\pi\nu_{\Pi} l/v_s)}{\pi\nu_{\Pi} l/v_s} \right]^{1/2}, \quad (5.18)$$

где  $U_{\text{ш}}(0)$  — средняя квадратическая величина низкочастотного шума [110].

Так как при высоких частотах уменьшаются как сигнал, так и шум, то на практике определенные преимущества дает использование в системе усилителя с повышенным коэффициентом усиления. Однако вид частотной зависимости коэффициента усиления в этом случае не такой, как у обычных дискретных приемников. Сравнение частотных зависимостей отношения сигнал-шум для SPRITE-приемников с короткой зоной считывания и дискретных приемников показывает, что информационная полоса первого эквивалентна полосе дискретного приемника размером  $2,2 L_a$ . Для приемника на спектральную область  $8 \dots 14$  мкм при 77 К это соответствует 55 мкм. Увеличение коэффициента усиления электрического тракта на высоких частотах при одновременном росте суммарной ФПМ системы расширяет шумовую полосу системы. Поэтому при расчете оптимальной формы частотной зависимости коэффициента усиления следует учитывать оба эффекта.

Таким образом, SPRITE-приемники имеют ряд особенностей, которые отличают их от обычных дискретных приборов. Помимо рассмотренного свойства увеличения обнаружительной способности с ростом скорости сканирования  $v_s$  к таким особенностям относится то, что вид ФПМ SPRITE-приемника определяется диффузионной длиной неосновных носителей, а не геометрическими размерами приемной площадки приемника. Для уменьшения вклада приемника в суммарную ФПМ системы целесообразно увеличивать геометрические размеры приемника и фокусное расстояние системы. При этом ФПМ приемника смещается в сторону больших частот, вследствие чего перестает определять суммарную МПФ системы, а то угловое поле, в пределах которого приемник сканирует изображение, остается постоянным.

Увеличение размеров чувствительного элемента SPRITE-приемника приводит к повышению чувствительности на высоких частотах без уменьшения чувствительности на низких частотах, однако его можно проводить до тех пор, пока не начнут сказываться

ся неравномерность характеристики фоточувствительного материала или повышение рассеиваемой мощности.

Улучшить ФПМ SPRITE-приемника можно также, уменьшив его длину, т. е. время диффузного размытия импульса возбуждения. В этом случае при неизменном числе приемников увеличение чувствительности на высоких частотах сопровождается ее снижением на низких частотах из-за уменьшения времени интегрирования сигнала. Однако наблюдающееся при уменьшении длины чувствительного элемента снижение рассеиваемой мощности одним элементом позволяет использовать большее число элементов, поэтому в данном случае повышение чувствительности происходит во всем диапазоне частот.

### 5.3. ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящее время основным средством регистрации излучения дальнего ИК-диапазона ( $\lambda=8 \dots 14$  мкм) являются полупроводниковые приемники, основанные на генерации светом носителей заряда по механизму «зона — зона». Поэтому используемые в этих целях материалы являются узкозонными: CdHgTe — КРТ, PbSnTe — СОТ и т. п. [111]. Малая ширина запрещенной зоны обуславливает ряд недостатков этих приемников: высокий уровень шумов, вызывающий необходимость их глубокого охлаждения; трудность в организации режима накопления; низкие воспроизводимость и надежность; низкая стойкость к радиации и воздействию внешней среды; трудоемкость создания элементов в интегральном исполнении, определяющая их высокую стоимость.

Перспективны для устранения указанных недостатков широкозонные пироэлектрические приемники ИК-излучения (ППИ), такие как кристаллы титаната бария  $\text{BaTiO}_3$  с примесями, триглицин сульфата  $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$  или ТГС, ниобат лития  $\text{LiTiO}_3$  и т. д. [112].

Пироэлектрический эффект заключается в том, что значение спонтанной поляризации, наблюдаемой у пироэлектрического кристалла при отсутствии внешнего поля, зависит от температуры, при изменениях которой на гранях кристаллов, перпендикулярных к полярной оси, могут быть обнаружены поверхностные заряды.

Разновидность пироэлектриков — сегнетоэлектрики — обладают обратной спонтанной поляризацией.

Для пироэлектриков характерно наличие одного или нескольких фазовых переходов, которые характеризуются поглощением, выделением теплоты и изменением удельного объема, причем одно состояние сменяется другим. Так, у кристалла  $\text{BaTiO}_3$  несколько фазовых переходов, но лишь один из них при охлаждении до точки Кюри является пироэлектрическим, в результате которого кубическая кристаллическая решетка переходит в тетрагональную и он спонтанно поляризуется.

В зависимости от направления вектора поляризации различают пироэлектрические приемники продольного (вектор направлен вдоль полярной оси) и попе-

речного типов. Если у приемников продольного типа выше чувствительность, то у приемников поперечного типа постоянная времени меньше на два порядка ( $\tau_{\text{п}} = 10^{-7} \dots 10^{-8}$  с).

По отношению к узкозонным полупроводниковым устройствам ППИ обладают рядом преимуществ:

возможностью эффективной регистрации излучения  $\lambda = 8 \dots 15$  мкм без охлаждения;

высоким быстродействием ( $10^{-11} \dots 10^{-12}$  с);

широким спектральным диапазоном ( $10^{-5} \dots 10^3$  мкм);

слабой чувствительностью к воздействию радиации и наличию примесей (до 0,1%), что обуславливает высокую технологичность;

высокой надежностью;

отсутствием необходимости в источнике питания для пироприемника;

высоким сопротивлением приемников, что обуславливает более низкий уровень токовых шумов, а следовательно, более эффективную их работу в режиме накопления;

широким динамическим диапазоном ( $10^7 \dots 10^8$ ).

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5.16, показывает, что для области длин волн 8 ... 14 мкм параметры реальных полупроводниковых приемников отличаются от параметров идеального приемника более чем на два порядка, в то время как для тепловых приемников это отличие находится в пределах одного порядка величины  $D^*$  [113].

Совершенствование неохлаждаемых фотонных приемников ограничено высокими темновыми токами вследствие физических механизмов, определяющих фоточувствительность элементов данного класса, и практически неосуществимо.

Принципиальных физических ограничений для достижения предельных характеристик у тепловых приемников нет, а их совершенствование определяется уровнем развития технологии, применением высококачественных усилителей и оптимальным согласованием их параметров с параметрами пироприемников.

При создании многоэлементных тепловизионных систем пироэлектрические приемники имеют дополнительные преимущества перед узкозонными фотоприемниками. Это связано с тем, что основным режимом работы таких устройств является временная задержка и накопление, наиболее эффективно реализуемый на приборах с зарядовой связью.

К недостаткам этого метода регистрации теплового излучения относятся низкая эффективность заполнения фокальной плоскости сканируемого изображения, недостаточная эффективность осуществления режима накопления, который позволяет улучшить отношение сигнал-шум по сравнению с отдельным приемником только в  $\sqrt{M}$ , где  $M$  — количество элементов. Кроме того, темновые токи в узкозонных материалах приводят к быстрому заполнению потенциальных ям ПЗС фоновым сигналом, что создает большие технологические и схемотехнические трудности, преодо-

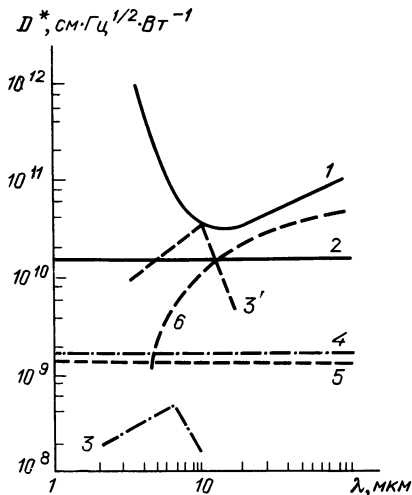


Рис. 5.16. Зависимость обнаружительной способности от длины волны излучения:

1 — идеального фотоприемника; 2 — идеального теплового приемника; 3 — реального фотонного приемника на основе кристалла КРТ (26% кадмия); 3' — охлаждаемого до 77 К КРТ (20%); 4 — реального пироприемника на основе кристалла ТГС; 5 — приемника на пленках  $PVF_2$ ; 6 — поведение обнаружительной способности идеального фотоприемника при изменении длинноволновой границы

ми, соответствующими устройству на глубоко охлаждаемом КРТ: минимально разрешаемая разность температур (МРТ) равна 0,25 К при разрешающей способности 10 лин./мм.

Изготовление чувствительных элементов ППИ в виде тонких пленок в едином технологическом цикле одновременно с полевыми транзисторами и другими элементами БИС позволяет увеличить число элементов в фокальной плоскости, лучше согласовать параметры приемника и усилителя, что приводит к повышению пространственного разрешения.

Небольшая толщина сегнетоэлектрического слоя позволяет реализовать высокие рабочие частоты, для которых характерен низкий уровень шумов, и перейти от режима накопления тепла к режиму накопления заряда. Кроме того, при регистрации импульсного излучения работа тонкопленочным приемником более эффективна (с уменьшением толщины сегнетоэлектрика его чувствительность возрастает).

В [115] описывается тонкопленочный пироэлектрический приемник на основе сегнетоэлектрика  $PbTiO_3$  толщиной 2,5 мкм. Обнаружительная способность образца при толщине 1 Гц на частотах 20 и 5 Гц составляет  $1,5$  и  $6 \cdot 10^8$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup>. То есть уже первые работы в направлении применения тонких сегнетоэлектрических пленок в приемных устройствах ИК-излучения показывают,

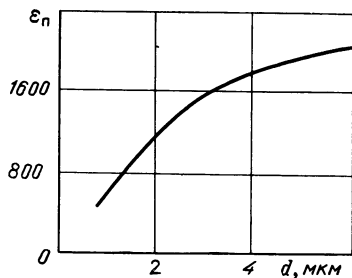


Рис. 5.17. Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon_n$  от толщины пленки ниобата бария стронция

ление которых приводит к повышению уровня шумов, а это вызывает необходимость глубокого охлаждения приемника.

Применение многоэлементных сегнетоэлектрических устройств непосредственно в интегральных микросхемах, размещенных на поверхности кремниевой пластины, позволяет существенно повысить выходные характеристики системы. В [114] такая гибридная схема обладает параметрами

что их обнаружительная способность близка к обнаружительной способности пироэлектрических кристаллов.

Использование сегнетоэлектрических пленок в многоэлементных устройствах имеет ряд характерных особенностей. Создание многоэлементных пироэлектрических устройств средствами технологии микроэлектроники связано с необходимостью оптимизации толщины пироэлектрика. Однако уменьшение толщины ограничено: характером зависимости от нее сегнетоэлектрических свойств (см. рис. 5.17); уменьшением эффективности поглощения энергии излучения за счет увеличения доли потерь энергии в электродах; усложнением реализации высокочастотной модуляции.

Увеличение толщины ограничено: повышением внутренних напряжений в пленке, приводящих в итоге к ее отрыву от подложки (для пленок одного из лучших пироэлектриков НБС  $d_{max} \approx 15 \dots 20$  мкм); усложнением проведения фотолитографии; тепловым характером процессов, определяющих прием изображения; увеличением емкости межэлементных соединений и входных емкостей транзисторов. При заданных размерах чувствительных элементов относительное уменьшение емкости этих элементов с ростом  $d$  приводит к уменьшению полезного сигнала. То есть пироэлектрические материалы с малой величиной  $\epsilon$  (такие, как  $PVF_2$ ,  $LiTaO_3$ ) не могут быть эффективно использованы при создании больших тепловизионных систем. Даже при  $M_{общ} = 50$  этот фактор уже проявляется — МРТ устройства на пироэлектрических материалах с существенно более низким пироэлектрическим качеством в 4 раза выше, чем на  $PVF_2$ : для кристаллов НБС  $MPT = 0,25$  К, для  $LiTaO_3$ ,  $MPT = 2,1$  К [114].

Таким образом, построение высококачественных тепловизионных систем более перспективно на материалах с высокими значениями  $\epsilon$  и соответственно  $\gamma$ . Однако при создании тепловизионных систем 3-го поколения увеличивается число элементов в фокальной плоскости (до  $10^5$  и более), что сопряжено с резким уменьшением эффективности использования полезного сигнала.

Оптимальная толщина пленок НБС с учетом наибольшей эффективности поглощения энергии излучения с  $\lambda = 10$  мкм лежит в пределах 6 ... 8 мкм.

Определение оптимальной толщины сегнетоэлектрика дает возможность расчета других параметров тепловизионного устройства. В [114] наиболее существенный параметр тепловизионного устройства МРТ определяется выражением

$$MPT = 1,48 \cdot 10^4 CN \sqrt{kT \epsilon \epsilon_0 v_{п}} / \gamma,$$

где  $N$  — число кадров в секунду;  $v_{п}$  — пространственная частота в лин./см;  $\gamma$  — пироэлектрический коэффициент в  $Кл \cdot м^{-2} \cdot град$ ;  $C$  — теплоемкость единицы объема материала сегнетоэлектрика.

Полагая  $N = 25$ ,  $T = 300$  К, получаем оценку  $MPT \approx 0,013$  К. Она в известной мере идеализирована, поскольку не учитывает степени черноты исследуемого объекта и поверхности приемника, потерь при регистрации сигнала, вклада в повышение чувствительности за счет внешних оптических элементов. Точное определение МРТ возможно только с учетом конкретных параметров всех узлов системы.

Важным фактором, определяющим эффективность использования сегнетоэлектрических пленок, является их технологическая совместимость с конструкцией современных СБИС. Речь идет о создании на поверхности кремниевых шайб качественно иного (по химическому составу, совершенству структуры, необходимости ориентации определенным образом кристаллографических осей, ТКЛР) компонента со специфическими условиями его синтеза: высокой температурой подложки, воздействием электронной и ионной бомбардировок, длительностью процесса и т. п. Исследование пленок НБС, синтезированных на поверхности кристаллов кремния, показало, что по пирозлектрическим и основным сегнетоэлектрическим свойствам они близки к соответствующим свойствам кристаллов; наблюдается и неизменность поверхностных состояний.

При глубоком охлаждении тепловых приемников, как известно, незначительно улучшается их обнаружительная способность в силу широкой области спектральной чувствительности. Однако при низкой температуре фона, например при работе в космосе,  $D^*$  тепловых приемников резко возрастает до  $10^{12}$  см $\cdot$ Гц $^{1/2}\cdot$ Вт $^{-1}$  и более, причем во всем спектральном диапазоне. Близкие параметры имеют, например, болометры, охлажденные до 2...3 К. Создание пироприемников, способных функционировать при столь низких температурах, принципиально осуществимо.

#### 5.4. ПОВЫШЕНИЕ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИК-ПРИЕМНИКОВ

В настоящее время для достижения высокой чувствительности узкозонные полупроводниковые ИК-приемники, используемые в среднем и дальнем ИК-диапазонах, охлаждаются до криогенных температур. Для ограничения фона в атмосферном окне 3...5 мкм в материалах собственных полупроводников типа КРТ требуется охлаждение до 200 К, что достигается за счет применения многокаскадных холодильников Пельтье. Для ограничения фона в диапазоне 8...12 мкм подобные материалы требуют охлаждения до 80 К, что обычно достигается за счет использования жидкого азота или мини-охладителей Джоуля—Томпсона. Такое охлаждение препятствует широкому распространению ИК-систем.

В [116] предлагается новый подход к проблеме охлаждения, базирующийся на применении структур, в которых плотности носителей поддерживаются на уровнях ниже равновесного. Обсуждаются факторы, ограничивающие отношение сигнал-шум в приемниках, а также способы улучшения этого отношения в стационарном и неравновесном состояниях и представляются первые экспериментальные результаты по одному из таких устройств.

Все фотонные приемники на собственных полупроводниках работают на поглощении фотонов с энергией, которая превышает ширину запрещенной зоны, и на последующем измерении числа



генерируемых пар электрон — дырка, например, по изменению проводимости фотопроводника или, как в диоде, по току в переходе. Однако при конечной температуре кроме фотогенерации пар существует много процессов, вызывающих генерацию пар электрон — дырка при решеточном поглощении. Отношение сигнал-шум обычно ограничивается статистическими флуктуациями скоростей генерации пар. Скорости рекомбинации также флуктуируют, но шум, связанный с этим, можно устранить путем размещения места рекомбинации в такой области структуры, где она оказывает малое влияние, например в контактах фотопроводника или в нейтральной области диода.

В качестве примера рассмотрим структуру идеализированного приемника, содержащего полупроводниковый материал площадью  $S$  и толщиной  $d$ , которая выбрана порядка  $\alpha^{-1}$ , где  $\alpha$  — коэффициент оптического поглощения. Предполагается, что каким-то образом производится счет всех пар электрон — дырка, рожденных фото- и тепловой генерациями. Чувствительность устройства  $R_\lambda$ , пар/Вт, для монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$  определяется из выражения

$$R_\lambda = \eta/E_\lambda,$$

где  $\eta$  — квантовая эффективность, определяемая выражением  $1 - \exp(1 - \alpha d)$ ;  $E_\lambda$  — энергия фотона, равная  $hc/\lambda$ .

Число возникающих пар, обусловленных фоновым излучением или тепловыми процессами, обычно достаточно велико, вследствие чего можно использовать аппроксимацию статистикой Пуассона. В этом случае дробовой шум процессов генерации или среднее квадратическое значение флуктуации в скоростях генерации можно выразить так:

$$g^2 = 2GSdB,$$

где  $B$  — ширина полосы;  $G$  — число всех типов генерации на единицу объема.

Тогда удельная обнаружительная способность

$$D_\lambda^* = \frac{R_\lambda S^{1/2} B^{1/2}}{g} = \frac{\eta}{E_\lambda (2Gd)^{1/2}}. \quad (5.19)$$

Для структуры идеализированного приемника предполагается также, что можно пренебречь всеми типами генерации на поверхностях или электродах, и, следовательно, общая скорость генерации выражается в виде суммы скоростей трех типов объемной генерации: Оже  $G_o$ , Шокли — Рида  $G_{ш-р}$  и излучательной  $G_n$ . Последний тип генерации обусловлен фотонами, испускаемыми корпусом приемника, а также фотонами, которые воспринимаются приемником от окружающих объектов после прохождения объектива. В этом случае ограничение отношения сигнал-шум приемника достигается при его охлаждении до такой степени, когда доминирует излучательная генерация, вызванная в основ-

ном фотонами, испускаемыми окружающими объектами. Этот очень простой способ рассмотрения работы приемника делает очевидной идентификацию излучательной генерации фоновым потоком.

Генерация Шокли — Рида обусловлена дефектами материала, что дает повышение уровней в запрещенной зоне. Этот процесс не принципиален, и его можно уменьшить новыми методами выращивания материалов при более низких температурах, например эпитаксией молекулярными пучками, выращиванием металлоорганики, жидкостной эпитаксией, в которых ожидается уменьшение плотности дефектов и примесей.

Оже-генерация является по существу ударной ионизацией свободными носителями, тепловая энергия которых превышает ширину запрещенной зоны. В трехзонных полупроводниках типа InSb или КРТ существуют десять возможных разновидностей Оже-генерации, которые отличаются типом начального высокоэнергетического носителя и конечными состояниями носителей. Механизм Оже-генерации, обусловленный ударной ионизацией электронами, доминирует в InSb и КРТ при температурах, когда материалы являются собственными полупроводниками или близки к ним (например, InSb или КРТ, слаболегированные на полосу 3... 5 мкм при температуре около 300 К, или КРТ на полосу 8... 12 мкм при температуре около 200 К). Один из способов уменьшения скорости Оже-генерации заключается в использовании большого отношения эффективных масс тяжелой дырки к электрону в узкозонных полупроводниках с примесью цинка и высокой  $p$ -концентрацией. Это приводит к улучшению отношения сигнал-шум в фотоприемниках  $p$ -типа.

Поскольку скорость Оже-генерации пропорциональна плотности определенного типа носителей (электронов), ожидается, что если эту плотность поддерживать ниже ее равновесного значения без одновременного возрастания электронной температуры и увеличения вероятности ионизации носителя, то можно достигнуть улучшения отношения сигнал-шум. Эта возможность реализуется в структурах, базирующихся на эксклюзии неосновных носителей в фотопроводниках или на экстракции неосновных носителей в диодах. Рассмотрим ограничение, накладываемое нагревом носителей на электрическое поле, которое может использоваться в образцах.

Скорость генерации  $g_n$  на один электрон для Оже-механизма в равновесном состоянии, когда масса тяжелой дырки существенно больше массы электрона, определяется выражением

$$g_n \approx F(m_n^*, m_p^*, \epsilon_n, F_1, F_2) \left( \frac{kT}{E_g} \right)^{3/2} \exp(-E_g/kT), \quad (5.20)$$

где  $F$  — функция масс носителей;  $\epsilon_n$  — высокочастотная диэлектрическая проницаемость;  $F_1, F_2$  — обменный интеграл;  $E_g$  — ширина запрещенной зоны материала;  $T$  — температура.

Влияние приложенного поля  $E$  на повышение электронной температуры можно рассчитать из уравнения

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{2m_n \mu_n^2 E^2 K_1(\theta/2T)}{3k\theta K_0(\theta/2T)}, \quad (5.21)$$

где  $\mu_n$  — подвижность электронов;  $\theta$  — дебаевская температура;  $K_0$  и  $K_1$  — функции Бесселя.

Предполагая, что температуру в уравнении (5.20) можно считать равной электронной температуре, дифференцирование уравнения (5.20) по температуре и подстановка (5.21) дает

$$\frac{\Delta g_n}{g_n} = \frac{2m_n^* \mu_n E^2 K_1(\theta/2T)}{3k\theta K_0(\theta/2T)} \left( \frac{3}{2} + \frac{Eg}{kT} \right). \quad (5.22)$$

Взяв  $\theta=200$  К и параметры, соответствующие КРТ с критической длиной волны 5 мкм при 295 К, получаем

$$\frac{\Delta g_n}{g_n} = \left( \frac{E}{1700} \right)^2. \quad (5.23)$$

В неравновесных устройствах с граничной длиной волны 5 мкм можно считать допустимыми поля вплоть до  $10^3$  В/см без существенного увеличения вероятности ионизации. Для КРТ с граничной длиной волны 10 мкм при 180 К получаем

$$\frac{\Delta g_n}{g_n} = \left( \frac{E}{600} \right)^2, \quad (5.24)$$

что показывает допустимость полей в несколько сотен вольт на сантиметр.

Неравновесного состояния с приемлемым слабым электрическим полем можно достичь в фотопроводниках посредством эксклюзии неосновных носителей, а в фотодиодах — посредством экстракции неосновных носителей. Оба типа устройств описываются ниже.

В изображенном на рис. 5.18 фотопроводнике используется эксклюзионный контакт (ЭК), который пропускает поток основных носителей и одновременно не инжектирует неосновных носителей.

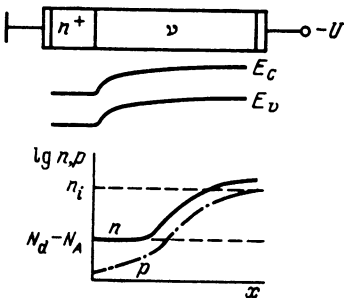


Рис. 5.18. Эксклюзионная структура с  $n^+v$ -переходом: показаны энергетические уровни и концентрации носителей

Для показанного здесь материала так называемого  $v$ -типа ( $n$ -тип со свойствами, близкими к свойствам собственного полупроводника) ЭК представляет собой  $n^+v$ -гомопереход, в котором  $n^+$ -область легирована до вырождения, т. е. это  $n$ - $v$ -гетеропереход от узкой зоны к широкой. Распределение концентраций носителей вдоль структуры устройства показано в нижней части рис. 5.18. До подачи напряжения смещения концентрации и электро-

нов, и дырок близки к их равновесным значениям. При подаче положительного напряжения смещения на ЭК в материал уже не могут инжектироваться дырки, которые поддерживали бы в объеме материала отток дырок от контакта. Следовательно, на некотором расстоянии от контакта концентрация дырок уменьшается. Для поддержания нейтральности пространственного заряда концентрация электронов также должна падать до уровня, близкого к примесному уровню  $N_d - N_a$ , тем самым уменьшая скорость Оже-генерации. Например, в КРТ при 295 К с  $x = 0,267$  (граничная длина волны 5 мкм) и  $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  согласно расчетам концентрация электронов будет уменьшена в 80 раз, что даст увеличение отношения сигнал-шум в 9 раз, т. е. это примерно в 3 раза превышает фоновый предел при условии, что генерация Шокли — Рида мала. Размеры эксклюзионной области зависят от ряда факторов, включая химический состав сплава, температуру и ток. Экспериментально наблюдаемые размеры в КРТ составляют десятки микрометров и лишь изредка превышают 100 мкм.

В другом варианте структур плотности носителей ниже своих равновесных значений поддерживаются посредством экстракции неосновных носителей. Эта диодная структура базируется на  $\pi$ -материале  $p$ -типа, близком по своим свойствам к собственным полупроводникам, и может иметь вид  $p^+ - \pi - n^+$ . Толщина  $\pi$ -области больше длины оптического поглощения и меньше диффузионной длины неосновных электронов. Кроме того,  $p^+$ -область имеет достаточную ширину и сильно легирована, так что любые носители, инжектируемые контактом при отрицательном смещении, не могут ни диффундировать, ни дрейфовать к переходу с  $\pi$ -областью.

При обратном смещении  $\pi - n^+$ -переход действует как сток неосновных носителей из  $\pi$ -области, которые диффундируют туда. При условии экстракции  $p^+ - \pi$ -перехода, который уже не инжектирует электроны в  $\pi$ -область, наблюдается спад концентрации электронов в этой области. Если, кроме того, ширина области мала по сравнению с диффузионной длиной неосновных носителей, происходит кардинальное снижение концентрации электронов. Для граничных условий  $n_\pi = 0$  при  $x = 0$  и  $\frac{\partial n_\pi}{\partial x} = 0$  при  $x = -d$  решение одномерного уравнения непрерывности для концентрации электронов  $n_\pi$  в  $\pi$ -области в предположении, что пространственный заряд мал и можно пренебречь рекомбинацией, имеет следующий вид:

$$n_\pi = (G_{\text{ш-р}} + G_{\text{н}}) \tau_i \left[ \frac{\cos \{ (x + d) / (\tau_i D_n)^{1/2} \}}{\cos \{ d / (\tau_i D_n)^{1/2} \}} - 1 \right], \quad (5.25)$$

где  $\tau_i$  — время жизни Оже-генерации в материале собственного полупроводника;  $d$  — толщина  $\pi$ -области;  $D_n$  — коэффициент диффузии для электронов.

Плотность обратного тока насыщения определяется выражением

$$J_s = qD_n \left. \frac{\partial n_x}{\partial x} \right|_{x=0} = q(G_{\text{Ш-Р}} + G_n)(\tau_i D_n)^{1/2} \operatorname{tg} \{d/(\tau_i D_n)^{1/2}\}. \quad (5.26)$$

Обнаружительная способность имеет вид

$$D_\lambda^* = \frac{\eta}{E_\lambda} \left( \frac{q}{2J_s} \right)^{1/2}, \quad (5.27)$$

где  $E_\lambda$  — энергия фотона с длиной волны  $\lambda$ . Она приближается к фоновому пределу, когда  $d^2 \ll \tau_i D_n$  и  $G_{\text{Ш-Р}} \ll G_n$ .

Для оценки напряженности электрического поля  $E$  в этом устройстве отметим, что полный ток постоянен, и сделаем предположение, что при  $x=0$  этот ток определяется диффузией электронов, а при  $x=-d$  — дрейфом дырок. Тогда

$$E \approx \frac{J_s}{q\mu_p N_a} \approx \frac{(G_{\text{Ш-Р}} + G_n) d}{\mu_p N_a}. \quad (5.28)$$

Для КРТ с граничной длиной волны 5 мкм при 295 К  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $\tau_{\text{Ш-Р}} = 10^{-5}$  с расчетное поле  $E_{\text{расч}} = 9 \text{ В/см}$ , для КРТ с граничной длиной волны 10 мкм при 180 К  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $\tau_{\text{Ш-Р}} = 10^{-6}$  с  $E_{\text{расч}} = 30 \text{ В/см}$ . Таким образом, поле в диодной структуре гораздо меньше поля, требуемого для возникновения эффектов горячих электронов.

Структура устройства, используемого в экспериментах для получения эксклюзии, схематически представлена на рис. 5.19. Устройства, изготавливаемые из КРТ, имеют длину 1000 мкм, ширину 100 мкм и толщину 6...8 мкм. По длине структуры попарно с противоположных сторон расположены потенциальные зондирующие электроды. Эксклюзионный контакт, обычно заземленный, изготавливается посредством ионной бомбардировки. Все поверхности пассивируются ZnS. Ниже представлены результаты исследований КРТ-структур с

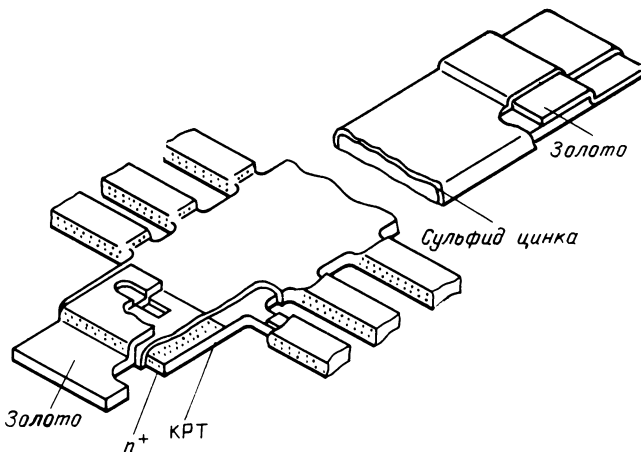


Рис. 5.19. Экспериментальное эксклюзионное устройство

$x=0,28$ , что дает при комнатной температуре граничную длину волны 4,7 мкм. Образцы изготавливаются из материала  $n$ -типа с  $N_d-N_a$  в интервале  $2 \cdot 10^{14} \dots 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Пример вольт-амперных характеристик представлен на рис. 5.20. Ток проходит между торцевыми электродами, а измеряемые напряжения снимаются с зондирующих электродов, как это показано на вставке рис. 5.20. Увеличение дифференциального сопротивления, наблюдаемое в нижнем левом квадранте (обратное смещение), указывает на наличие эксклюзии, причем определение точки на кривой, в которой происходит это увеличение, позволяет найти примерный ток, необходимый для возникновения эксклюзии в исследуемой части структуры. Определение указанной точки для каждой кривой производится путем нахождения двух касательных, одна из которых проводится при нулевом смещении, а вторая — при большом обратном смещении. Кривые  $U_2$  и  $U_3$  показывают, в частности, что дифференциальное сопротивление увеличивается лишь на некотором расстоянии от контакта. Поэтому можно ввести понятие эксклюзионной длины, линейно зависимой от плотности порогового тока около  $73 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$  с наклоном  $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \cdot \text{А}^{-1}$ .

Измерения параметров ИК-приемников производятся с помощью нефокусированного источника черного тела, промодулированного на частоте 800 Гц, на структурах, смещение на которые подается от источника постоянного тока, а напряжение снимается с электродов первой пары. Чувствительная (рабочая) площадка структуры, исходя из расчетов ее чувствительности и обнаружительной способности, выбирается между эксклюзионным контактом и первой парой зондирующих электродов площадью  $300 \times 100 \text{ мкм}$ . Однако при прямом сме-

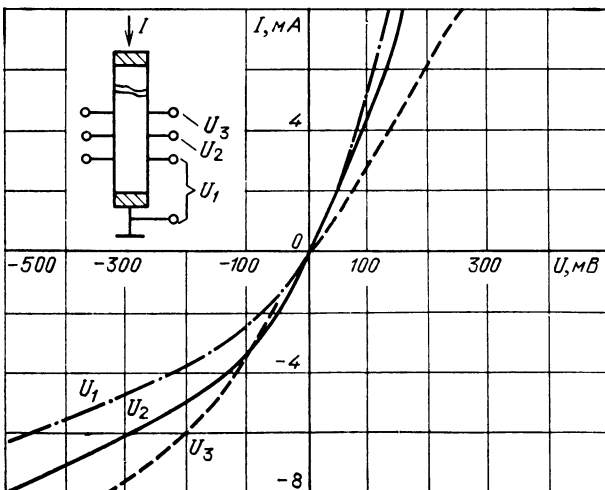


Рис. 5.20. Вольт-амперные характеристики фотопроводника с эксклюзионным контактом при 275 К, измеряемые в точках, показанных на вставке

щении происходит некоторый сбор носителей не только из указанной, но и из соседних областей структуры, что обуславливает при большом токе превышение чувствительности (по отношению к чувствительности рассматриваемой области) на 40% и обнаружительной способности на 20%.

Чувствительность при обратном смещении (ток равен 2 мА) в 22 раза превышает чувствительность при том же значении прямого смещения. Это обусловлено увеличением полного сопротивления эксклюзионной области структуры и эффективного времени жизни носителей.

Частотная чувствительность образца проверяется при облучении гелий-неоновым лазером, модулированным электрооптической ячейкой в диапазоне 1...1000 кГц. Эта характеристика равномерна до 100 кГц. Шум измеряется в интервале 1...100 кГц посредством малощумящего предусилителя и спектроанализатора. На низких частотах наблюдаются высокие уровни шума мерцания, причем они быстро возрастают с увеличением смещения. Для измерения этого шума и, следовательно, определения того, подавляется ли компонента, связанная с указанным выше механизмом Оже-генерации, необходимо проводить измерения на достаточно высокой частоте, чтобы  $1/f$ -шум не доминировал. Поэтому на частоте 100 кГц и при смещении, вызывающем ток 2 мА, наблюдается увеличение шумовых напряжений в 9 раз и, следовательно, улучшение обнаружительной способности в 2,5 раза. При малых смещениях, когда  $1/f$ -шум мал, а чувствительность повышается в 11 раз, наблюдается улучшение в 3 раза. На нормальной частоте измерений 20 кГц (ток равен 0,9 мА) обнаружительная способность улучшается в 2 раза.

Очень высокие уровни шума мерцания определяются следующими причинами: наличием пассивирующей поверхности ZnS, которая обедняет поверхности образца, что приводит к высоким скоростям поверхностной рекомбинации (и соответственно к высоким скоростям генерации); шумом, обусловленным флуктуациями скоростей носителей, инжектируемых эксклюзионным контактом. Сульфид цинка используется в качестве пассивирующего средства по той причине, что при традиционной методике формирования окисла самого материала образуется аккумулялирующая поверхность, шунтирующая эксклюзионную область.

Избыточный шум, обусловленный носителями, инжектируемыми контактом, можно устранить посредством корреляционной системы с двойной выборкой. До своей рекомбинации инжектируемые носители проходят несколько областей структуры, границами которых служат боковые зондирующие электроды. Для периодов флуктуации плотности носителей, которые превышают время пролета, можно пренебречь разностями фаз шумовых напряжений на указанных электродах. Если для получения сигнала облучается лишь одна область структуры (что осуществляется, например, с помощью маски), низкочастотный шум, обусловленный флуктуациями скорости инжектирования, можно устранить посредством одновременной выборки сигналов с облучаемой и необлучаемой частей структуры и их сравнения.

Таким образом, для подавления шумов, связанных с процессами Оже-генерации в ИК-приемниках, предложены структуры,

в которых использована эксклюзия или экстракция неосновных носителей, что делает возможной работу этих приемников при более высоких температурах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема построения твердотельных преобразователей изображений с распределенными параметрами и формирователей сигналов изображений уже давно привлекает внимание разработчиков. Был предложен ряд таких приборов на различных структурах. Первые пригодные для практики приборы в качестве фоточувствительной части имели МДП-структуры, работающие в режиме неравновесного обеднения. Переходные процессы в таких структурах положены в основу матричных формирователей телевизионных сигналов изображений и преобразователей изображений по когерентности, спектру и мощности, работающих в реальном масштабе времени.

В настоящее время обострились проблемы расширения чувствительности этих приборов в среднюю и длинноволновую инфракрасные области, построения ПВМС с микросекундным и наносекундным быстродействием. Последнее особенно важно для создания сверхмощных оптических вычислительных машин, методы построения которых в настоящее время интенсивно разрабатываются..

К настоящему времени уже достаточно определенно сформировалось мнение, что создание оптических вычислительных средств как аналогового, так и цифрового типа с производительностью, соизмеримой с производительностью человеческого мозга ( $10^{14}$  ...  $10^{15}$  бит/с), неразрывно связано с созданием преобразователей изображений с различными аналоговыми характеристиками, переключаемыми бистабильными характеристиками, долговременной памятью, скоростью стирания, возможностью вычитания, дифференцирования изображений по времени и координатам и др. Информационная емкость таких преобразователей должна быть  $10^7$  ...  $10^9$  бит, их быстродействие —  $10^{-5}$  ...  $10^{-8}$  с.

В последние годы широко обсуждается возможность построения для вычислительных целей преобразовательных структур с пикосекундным быстродействием на бистабильных элементах. Однако для стабильного функционирования таких систем с информационным массивом в  $1000 \times 1000$  элементов требуется иметь световую мощность в тракте 1 кВт, что весьма проблематично, особенно с учетом тепловых потерь преобразования и теплоотвода. Кроме того, при пикосекундном быстродействии существенной становится проблема синхронизации импульсов, а также проблема дисперсионного расширения сигналов.

По мнению автором более рациональным представляется искать возможность построения оптических процессоров с производительностью  $10^{14}$  бит/с на преобразователях с быстродействием  $10^{-5}$  ...  $10^{-8}$  с, увеличив их информационную емкость до  $10^7$  ...  $10^9$  бит,



т. е. максимально использовать присущий оптическим системам параллелизм обработки информации в виде изображений. Преобразователи с такой большой информационной емкостью целесообразней всего строить на структурах с распределенными параметрами, в которых за счет специфических свойств структур каждый элемент изображения работает независимо от соседних элементов, несмотря на их высокую плотность (100 лин/мм). При этом структура не разделяется на отдельные элементы. Примером такого преобразователя (см. гл. 2, 3) является пространственно-временной модулятор света на структурах МДП—жидкий кристалл, в которых МДП-структура изготавливается из полупроводников быстродействующих полупроводников.

На структурах МДП—ЖК существуют преобразователи с информационной емкостью  $10^6 \dots 10^8$  бит и быстродействием  $10^{-3}$  с, что позволило создать специализированные оптические процессоры, выполняющие интегральные преобразования (преобразование Фурье, корреляция) и фильтрацию зашумленных изображений с производительностью  $10^{10} \dots 10^{11}$  бит/с. Имеются реальные перспективы построения структур МДП—ЖК на сегнетоэлектрических жидких кристаллах с быстродействием  $10^{-5}$  с. Перспективным является применение в них быстродействующих аморфных полупроводников типа гидрогенизированного кремния, что позволяет увеличить информационную емкость за счет повышения разрешающей способности и площади преобразователя. Трудно предугадать все пути решения проблемы. Сейчас можно с определенной уверенностью сказать, что создание элементной базы оптических вычислительных средств с производительностью  $10^{14}$  бит/с является делом сравнительно недалекого будущего.

В инфракрасной области крайне важна задача «высокотемпературной» чувствительности.

Ее решение позволило бы уйти от гелиевых рабочих температур приемников. Здесь перспективны пироэлектрические приемники, чувствительность которых в некоторых спектральных диапазонах уже приближается к чувствительности охлаждаемых полупроводниковых приемников.

Другой путь повышения рабочей температуры ИК-приемников, предложенный Элиотом с сотрудниками в [116], связан с использованием неравновесных процессов при эксклюзии и экстракции в диодных структурах. Представляет интерес исследование для этих целей неравновесных переходных процессов и в МДП-структурах. Здесь требуется провести еще много поисковых работ, пока высокотемпературная ИК-фотопроводимость не станет доступной реальностью.

Проблема создания многоэлементных матричных формирователей сигналов изображений довольно успешно решается с помощью ПЗС-структур, SPRITE-приборов, пировидиконов, диодов Шотки и др. Однако разбивка фоточувствительного слоя на дискретные элементы сопряжена с целым рядом трудностей. Поэтому требует решения задача создания формирователей сигналов

изображений на структурах с распределенными параметрами. Здесь также необходим глубокий поиск. Исследуя свойства структур с распределенными параметрами для преобразования и обработки изображений, можно ожидать выявления новых физических явлений и принципиально новых возможностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковтонок Н. Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник-диэлектрик. — М.: Энергия, 1976. — 184 с.
2. Зуев В. А., Попов В. Г. Фотоэлектрические МДП-приборы. — М.: Радио и связь, 1983. — 160 с.
3. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью. — М.: Сов. радио, 1976. — 142 с.
4. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. — М.: Радио и связь, 1989.
5. Думаревский Ю. Д., Ковтонок Н. Ф., Савин А. И. Преобразование изображений в структурах полупроводник — диэлектрик. — М.: Наука, 1987. — 176 с.
6. Пространственные модуляторы света/А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов. — М.: Радио и связь, 1987. — 320 с.
7. Вуль А. Я., Дидейкин А. Т., Козырев С. В. Фотоприемники на основе структур металл — диэлектрик — полупроводник (МДП)/фотоприемники и фотопреобразователи. — Л.: Наука, 1986. — С. 105—130.
8. Green M. A. The Short-Wavelength Response of MIS Solar Cells//J. Appl. Phys. — 1979. — Vol. 50, N 2. — P. 1116—1122.
9. Особенности фотоэлектрических свойств туннельных МДП-структур с поликремниевым затвором/А. Я. Вуль, А. Т. Дидейкин, Ю. С. Зинчик и др. — Письма в ЖТФ. — 1983. — т. 9, № 3. — С. 150—154.
10. Герасимов А. Л., Гуткин А. А., Седов В. Е. Релаксация фототока в выпрямляющих контактах металл — полупроводник с промежуточным изолирующим слоем//ФТП. — 1980. — Т. 14, № 1. — С. 26—30.
11. Кинетика фотоответа туннельных МДП-структур/А. Я. Вуль, А. Т. Дидейкин, Ю. С. Зинчик и др. — ФТП. — 1983. — Т. 17, № 8. — С. 1471—1477.
12. Герасимов А. Л., Гуткин А. А., Седов В. Е. Влияние обратного смещения на фототок контактов Au — окисел —  $n$ -GaAs при  $\hbar\omega > E_g$ //ФТП. — 1980. — Т. 14, № 3. — С. 550—552.
13. Green M. A., Shewchun J. Current Multiplication in Metal — Insulator — Semiconductor (MIS) Tunnel Diodes Sol. St. Electr. — 1974. — Vol. 17, N 4. — P. 349—365.
14. Малахов Б. А., Покаякин В. И., Степанов Г. В. О переключении в структуре металл — тунельно-прозрачный слой двуокиси кремния —  $p$ - $n$ -переход//Микроэлектроника. — 1980. — Т. 9. Вып. 3. — С. 241—258.
15. Foss N. A., Ward S. A. Large — area Metal — Oxide — Semiconductor Avalanche Photodiodes//J. Appl. Phys. — 1973. — Vol. 44, N 2. — P. 728—731.
16. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. — М.: Мир, 1979. — 292 с.
17. Новая реверсивная запоминающая оптоэлектронная среда/М. В. Долгов, А. Ф. Плотноков, Ю. М. Попов и др.//Квантовая электроника. — 1987. — Т. 14, № 1. — С. 190—192.
18. О влиянии свойств подложки GaAs на совершенство структуры эпитаксиальных слоев/В. А. Горбылев, Г. М. Малавкин, В. Б. Освенский и др.//Электронная техника. — 1979. — Сер. 6. — Вып. 3. — С. 85—88.
19. Справочник технолога-оптика/Под ред. С. М. Кузнецова, М. А. Окатова. — Л.: Машиностроение, 1983. — 414 с.
20. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников/ Под ред. Б. Д. Луфт. — М.: Радио и связь, 1982. — 136 с.
21. Влияние некоторых технологических факторов на свойства границы раздела GaAs — диэлектрик/В. В. Козик, В. Г. Христюков, С. М. Щерб и др.//Электронная техника. — 1977. — Сер. 6. — Вып. 9. — с. 61—64.

22. Влияние загрязнений поверхности подложек на структуру тонких пленок/ Р. Б. Тагиров, Ф. Х. Вахитов, Р. И. Уразаев и др.//ОПМ. — 1982.—№ 11.— С. 42—45.
23. Голото И. Д., Докучаев Б. П., Колмагоров Г. Д. Чистота в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем. — М.: Энергия, 1975.— 208 с.
24. Автоматизированная очистка стеклянных пластин в производстве индикаторов/Б. В. Абалдуев, А. М. Ермолаев, Т. М. Назарова и др.//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 5, 6. — С. 117—118.
25. Пичугин И. Г., Таиров Ю. М. Технология полупроводниковых приборов. — М.: Высшая школа, 1984. — 288 с.
26. Валеев А. С., Шаповалов Г. И. Изменение краевого угла смачивания поверхности при ионной обработке и выдержке на воздухе//Электронная техника. — 1974. — Сер. 3. — Вып. 2. — С. 97—102.
27. Баковец В. В., Бизинская Е. А. Исследование поверхности кварца и стекла с помощью контактного угла смачивания. — ОМП. — 1984.—№ 10.— С. 43—45.
28. Исследование процессов растворения химического полирования полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$  в щелочных растворах феррицианида калия/Б. Д. Луфт, Л. Б. Хусид, В. В. Шемет и др.//Электронная техника. — 1982. — Сер. 6. — Вып. 4. — С. 24—30.
29. Готра З. Ю., Висьтак М. В. Новые достижения в технологии жидкокристаллических индикаторных устройств/Зарубежная электронная техника. — 1983. — № 12. — С. 3—56.
30. Методы получения прозрачных проводящих покрытий на основе оксида олова/Б. И. Козыркин, И. В. Бараненков, А. В. Кошценко и др.//Зарубежная радиоэлектроника. — 1984. — № 10. — С. 69—86.
31. Получение оптических покрытий методом химического осаждения из газовой фазы/Б. Г. Грибов, И. В. Бараненков, В. Н. Петров и др.//ОМП. — 1986. — № 5. — С. 47—56.
32. Бужинский И. М., Никищенко Е. А., Кравцова Н. И. Изменение поверхности волоконно-оптических пластин в результате термообработки.//ОМП. — 1980. — № 6. — С. 31—33.
33. Münz W. D. Herstellung Transparent Leitender Indium — Zink — Oxid — Schichten//Electric Production und Pruftechnik. — 1981. — N. 1—2. — P. 20—23.
34. Szczygowski J. Properties of RF-Sputtered Indium-Thin Oxide Films//Phys. Stat. Sol. — 1983. — Vol. 78. — P. 243.
35. William G. Haines and Richard H. Bule. Effects of Heat Treatment et the Optical and Electrucal Properties of Indiumthin Oxide Films//J. Appl. Phys.— 1978. — Vol. 49, N 1. — P. 304.
36. Gautherin G. and Weissmantel CHR. Some Trends in Preparing Film Structures by Ion-Beam Methods//Thin Solid Films. — 1978. — Vol. 50, N 2. — P. 135.
37. Литвиненко С. А., Митрофанов В. В., Соколов В. И. Процессы, протекающие при формировании системы кремний—оксид, и их влияние на свойства кремниевых планарных структур//Электронная техника.—1983. — Сер. 2. — Вып. 1.—С. 50—60.
38. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники/В. А. Лабунов, И. Л. Баранов, В. П. Бондаренко и др.//Зарубежная электронная техника. — 1983. — № 11. — С. 3—66.
39. Берченко Н. Н., Аигина Н. Р. Методы электронной и ионной спектроскопии для исследования поверхности и границ раздела в полупроводниковой электронике//Зарубежная электронная техника.—1986.— № 9, 10.
40. Белый В. И. Химия поверхности полупроводников  $A^{III}B^V$ //Проблемы электронного материаловедения. — Новосибирск: Наука, 1986. — С. 29—40.
41. Повышение оптического качества ОУТ на структурах МДП-ЖК/Н. Н. Двучичанская, Н. Ф. Ковтонюк, Е. Н. Сальников и др.//Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Проблемы развития радиооптики». — М., 1984. — Ч. 1. — С. 126.
42. Методы соединения оптических деталей/Е. Н. Прокофьев, Г. Ф. Пищик, В. С. Чередник и др. — Киев: Техника, 1984. — 128 с.

43. Пищик Г. Ф. Напряжения и деформации в деталях оптических приборов.— Л.: Машиностроение, 1968.—247 с.
44. Оптически управляемый транспарант с повышенной лучевой и тепловой стойкостью//Л. М. Баясный, П. В. Вашурин, Н. Н. Двудличанская и др./Тез. докл. I Всесоюз. семинара «Оптика жидких кристаллов». — Л.: ГОИ, 1987. — С. 246.
45. Efron U. et al. The Silicon Liquid Crystal Light Valve. — J. Appl. Phys. — 1985. — Vol. 57, N 4. — P. 1356.
46. Влияние состояния границы полупроводника в структуре МДП-ЖК на ее динамические характеристики//Л. М. Баясный, П. В. Вашурин, Е. Н. Сальников и др./Тез. докл. I Всесоюз. семинара «Оптика жидких кристаллов// Л.: ГОИ. — 1987. — С. 244.
47. Ковшов Е. И., Севастьянов В. П. Жидкокристаллические материалы для индикаторов//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 5, 6. — С. 7.
48. В. де Же. Физические свойства жидкокристаллических веществ. — М.: Мир, 1982. — 196 с.
49. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. — М.: Наука, 1978. — 384 с.
50. Севастьянов В. П., Копоть С. И., Солодовникова Л. А. Применение полиимидных пленок в качестве ориентантов жидких кристаллов//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 5, 6. — С. 75—80.
51. Григос В. И., Козунов В. А., Лукьянченко Е. С. Жидкокристаллические индикаторы на твист-эффекте//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 5, 6. — С. 27.
52. Cheng J., Boyd G. D., Storr F. G. A Scanning Electron Microscope Study of Columnar Topography and Liquid Crystal Alignment on Obliquely Deposited Oxide Surfaces at Low Rates//Appl. Phys. Lett. — 1980. — Vol. 37, N 8. — P. 716—719.
53. Аношкин А. В., Севастьянов В. П., Филипченко В. Я. Исследование ориентации жидких кристаллов косонапыленными пленками монооксида германия//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 5, 6. — С. 118—120.
54. Блинов Г. А., Волнистов В. Н. Ориентирование тонких слоев жидких кристаллов поверхностью подложки//Электронная техника. — 1983. — Сер. 10.— Вып. 1. — С. 46—54.
55. Севастьянов В. П., Рейтер А. В. Введение жидких кристаллов в пакет индикаторов. Особенности технологического процесса и его производительность//Электронная техника. — 1985. — Сер. 4. — Вып. 2. — С. 69—73.
56. Луизов А. В. Количественная оценка зрительного восприятия//Успехи научной фотографии. — 1985. — Т. XXIII. — С. 62—65.
57. Владимиров Ф. Л., Моричев И. Е., Плетнева Н. И. Влияние параметров элементов на основные характеристики оптически управляемых транспарантов типа фотопроводник — жидкий кристалл//ОМП. — 1985. — № 5. — С. 1—3.
58. Де Жен П. Физика жидких кристаллов: Пер. с англ / Под ред. А. С. Соинна. — М.: Мир, 1977. — 400 с.
59. Электрооптика нематического жидкого кристалла в пространственно неоднородном поле. Структура фотопроводник — жидкий кристалл: роль флексоэлектрического эффекта. — Препринт № 112. — М.: ФИАН, 1986. — 33 с.
60. Парфенов А. В. Пространственная модуляция света в фоточувствительных структурах МДПДМ с жидким кристаллом: Дис. канд. физ.-мат. наук.— М.: ФИАН, 1981. — 179 с.
61. Беляев В. В. Исследование ориентационных электрооптических эффектов в жидких кристаллах: Дис. канд. физ.-мат. наук.— М.: НИОПИК, 1980. — 162 с.
62. Электрооптические и временные характеристики полевых эффектов в тонких слоях нематических жидких кристаллов/Ф. Л. Владимиров, И. Е. Моричев, Л. И. Петрова и др.— Л.: Труды ГОИ. — 1986. — Т. 60. — Вып. 194. — С. 64—69.
63. Компанец И. Н., Парфенов А. В., Попов Ю. М. Пространственная модуляция света в фоточувствительной структуре жидкий кристалл — изолирован-

- ный кристалл арсенида галлия//Квантовая электроника.— 1979.— Т. 6, № 6.— С. 1810—1812.
64. Сонин А. С. Введение в физику жидких кристаллов.— М.: Наука, 1983.— 320 с.
  65. Жидкокристаллический сегнетоэлектрик с рекордной спонтанной поляризацией//Л. А. Береснев, Е. П. Пожидаев, Л. М. Блинов и др.//Письма в ЖЭТФ.— 1982.— Т. 35.— Вып. 10.— С. 430—432.
  66. Patel J. S., Goodby J. W. Properties and Applications of Ferroelectric Liquid Crystals.— Optical engineering.— 1987.— Vol. 26, N 5.— P. 373—384.
  67. Johnson K. M., Handschy M. A., Pagano — Stauffer L. A. Optical Computing and Image Processing With Ferroelectric Liquid Crystals//Optical engineering.— 1987.— Vol. 26, N 5.— P. 385—391.
  68. Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulator/D. Armitage, J. I. Taskora, N. A. Clark and others.— Mol. Cryst. Liq. Cryst.— 1987.— Vol. 144.— P. 309—316.
  69. Особенности пространственно-временной модуляции света структурой фотопроводник — сегнетоэлектрический смектик С/Ф. Л. Владимиров, Л. И. Петрова, Н. И. Плетнева и др.//Тез. докл. I Всесоюз. семинара «Оптика жидких кристаллов». — Л., 1987.— С. 177.
  70. Повышение контраста изображений с помощью жидкокристаллических преобразователей/В. П. Вашурин, И. Н. Компанец, Ю. М. Миронов.— Препринт № 250.— М.: ФИАН, 1985.— 28 с.
  71. Мильвидский М. Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике.— М.: Наука, 1986.— 144 с.
  72. Марков А. В., Морозов А. Н. К вопросу о причинах макроскопической неоднородности монокристаллов нелегированного полупроводящего арсенида галлия.//ФТП.— 1986.— Т. 20.— Вып. 1.— С. 154—157.
  73. Марков А. В., Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. О роли дислокаций в формировании свойств монокристаллов полупроводящего GaAs//ФТП.— 1986.— Т. 20.— Вып. 4.— С. 634—640.
  74. Ангелова Л. А., Кабанов А. И., Сагиян Г. М. Неразрушающий фотоэлектрический контроль однородности полупроводящих подложек//Электронная промышленность.— 1986.— № 8.— С. 31—36.
  75. Ангелова Л. А., Вернер В. Д., Сагиян Г. М. Расширение функциональных возможностей и повышение чувствительности метода фотоэлектрического сканирования.//Электронная промышленность.— 1985.— Вып. 3.— С. 71—74.
  76. Визуализация дефектов монокристаллов полупроводников в структурах МДП-ЖК/Ю. Д. Думаревский, Н. Ф. Ковтонок, А. Н. Лапшин и др.//Применение жидких кристаллов в неразрушающих методах контроля оптических материалов и изделий.— Л.: Наука, 1987.— С. 43—56.
  77. Исследование структуры нематических жидких кристаллов оптическими методами/Л. М. Блинов, В. А. Кизель, В. Г. Румянцев и др.//Кристаллография.— 1975.— № 20.— С. 2145—2152.
  78. Аморфные полупроводники/Под ред. М. Бродски.— М.: Мир, 1982.— 419 с.
  79. Владимиров Ф. Л., Моричев И. Е., Плетнева Н. И. Оптические управляемые транспаранты на основе жидких кристаллов//ОМП.— 1984.— № 3.— С. 54—63.
  80. Краснопевцев В. В. Аморфный гидрогенизированный кремний//Итоги науки и техники. Сер. Электроника.— 1982.— Т. 14.— С. 213—251.
  81. Жидкокристаллические ПВМС на основе полупроводниковых слоев а-CdTe, а-Si:H, ZnSe//Ю. Д. Думаревский, Т. В. Захарова, Н. Ф. Ковтонок и др.//Тез. докл. V Всесоюз. конф. «Жидкие кристаллы и их практическое использование». — Чернигов, 1988.— Т. 4.— С. 30.
  82. Сихарулидзе Д. Г., Чилая Г. С., Бродзели М. И. Жидкокристаллический преобразователь некогерентного изображения в когерентное на основе структуры полупроводник — диэлектрик//Квантовая электроника.— 1979.— Т. 6, № 6.— С. 1271—1277.
  83. Кинетика накопления фотоносителей на поверхностных состояниях в структурах полупроводник — диэлектрик при воздействии пакетов световых и

- электрических импульсов/Н. Ф. Ковтонюк, Ю. Д. Думаревский, В. И. Бузатов и др.//Микроэлектроника. — 1982. — № 11. — С. 455—456.
84. **Структуры металл—полупроводник—жидкий кристалл: влияние параметров управляющих сигналов на характеристики пространственной модуляции света/Ю. Д. Думаревский, Н. Ф. Ковтонюк, И. Н. Компанец и др.// Квантовая электроника. — 1984. — Т. 11, № 4. — С. 730—735.**
  85. **Особенности формирования электрооптического отклика ПВМС типа МДП-ЖК при импульсной входной засветке/С. Н. Аннин, В. В. Беляев, Н. Ф. Ковтонюк и др.// Сб. научных трудов: Пространственно-временные модуляторы света для оптической обработки информации. — ЛФТИ, 1987. — С. 34—38.**
  86. **Цыпкин Я. З. Детерминированные и стохастические системы управления. — М.: Наука, 1984. — 397 с.**
  87. **Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. — М.: Наука, 1980. — 235 с.**
  88. **Батищев Д. И. Поисковые методы оптимального проектирования. — М.: Сов. радио, 1975. — 215 с.**
  89. **Растринин Л. А. Системы экстремального управления. — М.: Наука, 1974. — 634 с.**
  90. **Кулагин С. В., Апарин Е. М. Проектирование фото- и киноприборов. — М.: Машиностроение, 1986. — 280 с.**
  91. **Миткин Р. Б. Возможности использования ЖК-элементов в фотокиноаппаратуре//Тез. докл. I Всесоюз. семинара «Оптика жидких кристаллов». — Л.: ГОИ, 1987. — С. 217.**
  92. **Кузубовский С. Ф. Корреляционно-экстремальные системы. — Киев: Навкова думка, 1972. — 196 с.**
  93. **Применение некогерентного оптико-электронного процессора в системах триангуляционного типа/В. А. Пилипович, А. А. Ковалев, Ю. В. Развин и др.//Тез. Докл. V Всесоюз. школы по оптической обработке информации. — Киев, 1984. — С. 242.**
  94. **Миткин Р. Б. Особенности применения структуры фотопроводник—жидкий кристалл для регистрации изображений//Импульсная фотометрия. — Л.: Машиностроение, 1986. — № 9. — С. 142—148.**
  95. **Василенко Г. И. Голографическое опознавание образов. — М.: Сов. радио, 1977. — 328 с.**
  96. **Максимов В. И., Кириченко Г. Б. Проекционные устройства отображения информации на управляемых транспарантах с жидким кристаллом//Зарубежная радиоэлектроника. — 1982. — Вып. 7. — С. 36—52.**
  97. **Особенности записи и считывания информации в реальном масштабе времени/Ю. М. Гусев, Н. Ф. Ковтонюк, В. Н. Ревенко и др.//Тез. докл. III Всесоюз. конф. по вычислительной оптоэлектронике. — Ереван, 1987. — Т. 2. — С. 188—189.**
  98. **Проекция фотографических и телевизионных изображений на большой экран с помощью устройств со структурой МДП-ЖК/Н. Ф. Ковтонюк, Ю. Д. Думаревский, Е. Н. Сальников и др.//Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Формирование оптического изображения и методы его обработки». — Кишинев, 1985. — Т. 2. — С. 30.**
  99. **Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф. Структуры МДП-ЖК в устройствах отображения информации на большом экране//Оптическая и цифровая обработка изображений. — Л.: Наука, 1988. — С. 131—134.**
  100. **А. С. 1019669 (СССР). МКИ Н04 N05/74. Светоклапанное проекционное устройство отображения изображения/В. В. Азовцев, К. И. Земсков, Д. Д. Судравский и др. 1983, Бюл. № 19.**
  101. **Жидкокристаллические модуляторы света—устройства для управления распределением интенсивности лазерного излучения/Ф. Л. Моричев, М. А. Грознов, А. Ф. Корнев. — Л.: Труды ГОИ, 1986. — Т. 60.—Вып. 194.— С. 73—81.**
  102. **Хазан Ж. П. Использование приборов «Титус» и «Фототитус» для обработки информации и преобразования изображений//Фотоника. — М.: Мир, 1978. — С. 243—263.**

103. **Обработка** оптического изображения на структуре фотополупроводник -- жидкий кристалл/А. Н. Андреев, М. Ю. Шатин, А. М. Шкабардия и др.// Приборы и системы управления. — 1985. — № 7. — С. 18—19.
104. **Котов Б. А.** Матричные преобразователи оптической информации в видимой области спектра//Фотоприемники и фотопреобразователи. — Л.: Наука, 1986. — С. 131—147.
105. **Мишон Г., Бурке Х.** Приемники изображения на ПЗИ//Приборы с зарядовой связью/Под ред. Д. Ф. Барба; Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — С. 13—39.
106. **Пригожин Г. Я.** Матричные формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью для одноматричных цветных телевизионных камер//Обзоры по электронной технике. Сер. 2. — 1986. — Вып. 4. — С. 1—60.
107. **Многоэлементные** приемники ИК излучения на диодах с барьером Шоттки/Н. Р. Ангина, П. А. Богомолов, В. И. Сидоров и др.// Зарубежная электронная техника. — 1986. — № 5. — С. 3—37.
108. **Ангина Н. Р., Богомолов П. А., Сидоров В. И.** Новое поколение фотоприемных устройств ИК-диапазона//Зарубежная электронная техника. — 1982. — № 5. — С. 3—81.
109. **Ангина Н. Р., Богомолов П. А., Сидоров В. И.** Приемники с внутренним интегрированием сигнала и тепловизионные системы на их основе//Зарубежная электронная техника. — 1984. — № 11. — С. 3—27.
110. **Elliot C. T., Day D., Wilson D. J.** An Interecting Detector for Serial Scan Thermal Imaging. — *Infrared Phys.*, 1982, Vol. 22, N 1. — P. 31—42.
111. **Фотоприемники** видимого и ИК-диапазонов/Пер. под ред. В. И. Стафеева — М.: Радио и связь, 1985. — 328 с.
112. **Ишанин Г. Г.** Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1986. — 175 с.
113. **Анцыгин В. Д., Косцов Э. Г.** Тонкопленочные приемники излучения на основе сегнетоэлектриков. — Препринт № 311. — Новосибирск, 1986. — 27 с. (Ин-т автоматки и электротметрии).
114. **Ronndy C. B.** Solid-State Pyroelectric Infrared Image Converter//*Infrared Phys.* — 1978. — Vol. 19. — P. 507—523.
115. **Okuyama M. et al.** PbTiO<sub>3</sub> Ferroelectric Thin Film Gate FET for Infrared Detection//*Ferroelectrics.* — 1981. — Vol. 33. — P. 235—241.
116. **Ashley T., Elliott C. T., Harker A. T.** Non-equilibrium Modes of Operation for Infrared Detectors//*Infrared Phys.*, 1986. — Vol. 26, N 5. — P. 303—315.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<i>Глава 1. Принципы действия фоточувствительных МДП-приборов</i>	
1.1. Кинетика переходных процессов в МДП-структурах из высокоомных полупроводников . . . . .	4
1.2. Классические фоточувствительные МДП-приборы . . . . .	7
1.3. Фоточувствительные МДП-структуры со сквозным током . . . . .	11
1.4. Лавинные МДП-фотодиоды . . . . .	16
1.5. Быстродействующие реверсивные запоминающие устройства на основе МДП-структур . . . . .	18
<i>Глава 2. Общие вопросы технологии изготовления фоточувствительных МДП-приборов</i>	
2.1. Требования, предъявляемые к структурам . . . . .	20
2.2. Механическая обработка подложек . . . . .	23
2.3. Очистка поверхности подложек . . . . .	26
2.4. Получение электропроводящих прозрачных пленок . . . . .	30
2.5. Изготовление диэлектрических пленок на поверхности Si . . . . .	36
2.6. Изготовление диэлектрических пленок на поверхности полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ . . . . .	39
2.7. Особенности изготовления МДП-структур с жидкими кристаллами . . . . .	41
<i>Глава 3. Преобразователи изображения со структурой МДП-ЖК</i>	
3.1. Принципы построения преобразователей . . . . .	54
3.2. Свойства жидких кристаллов, используемых в многослойных структурах МДП-ЖК . . . . .	60
3.3. Контраст и разрешающая способность структуры МДП-ЖК . . . . .	65
3.4. Влияние однородности параметров полупроводникового слоя на качество изображений, формируемых структурами МДП-ЖК . . . . .	71
3.5. Структуры МДП-ЖК на основе гидрогенизированного аморфного кремния . . . . .	78
3.6. Оптимизация режимов работы ПВМС . . . . .	82
3.7. Автоматическая настройка режимов работы структуры МДП-ЖК . . . . .	87
3.8. Некоторые применения приборов на структурах МДП-ЖК . . . . .	94
<i>Глава 4. Формирование видеосигнала цветных телекамер многоэлементными фоточувствительными матрицами на ПЗС</i>	
4.1. Матрицы с переносом кадра . . . . .	108
4.2. Матрицы со строчно-кадровой организацией . . . . .	111
4.3. Матрицы со строчной адресацией . . . . .	117
<i>Глава 5. Другие виды перспективных фоточувствительных приборов</i>	
5.1. Формирование сигналов изображения матрицами на диодах Шотки с ПЗС считыванием . . . . .	121



5.2. Инфракрасные системы на основе SPRITE-приемников . . . . . 133  
5.3. Пироэлектрические приемники ИК-излучения . . . . . 139  
5.4. Повышение рабочей температуры при использовании неравновесных режимов работы ИК-приемников . . . . . 143  
Заключение . . . . . 151  
Список литературы . . . . . 153



Фото-  
чувствительные  
МДП-приборы  
для  
преобразования  
изображений

Издательство «Радио и связь»