

материалов и технологий

Е. БЕРЛИН, С. ДВИНИН,
Л. СЕЙДМАН

**Вакуумная
технология
и оборудование**
для нанесения
и травления тонких пленок



ТЕХНОСФЕРА



М И Р **м а т е р и а л о в** **и т е х н о л о г и й**

Е. БЕРЛИН, С. ДВИНИН,
Л. СЕЙДМАН

**Вакуумная
технология
и оборудование
для нанесения
и травления
тонких пленок**

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2007

Берлин Е.В., Двинин С.А., Сейдман Л.А.
Вакуумная технология и оборудование для нанесения
и травления тонких пленок
Москва:
Техносфера, 2007. — 176с., 4с. цв. вклейки
ISBN: 978-5-94836-134-5

В книге обобщено современное состояние одной из отраслей производства изделий электронной техники: вакуумной технологии нанесения и травления тонких пленок. Книга содержит подробное описание магнетронных напылительных установок, плазмохимических установок для травления тонких пленок и технологических особенностей их использования. Описаны математические модели, способы управления и примеры использования реактивного магнетронного напыления, принципы построения и применения среднечастотных источников питания для реактивного магнетронного напыления. Приведены теоретические основы и физические принципы конструирования нового типа источника высокочастотного разряда низкого давления для ионного или плазмохимического травления тонких пленок и/или их стимулированного плазмой осаждения.

Книга рассчитана на специалистов научно-исследовательских лабораторий, конструкторских бюро и производственных подразделений предприятий, занимающихся разработкой и изготовлением различных изделий электронной техники и оборудования для их производства.

© 2007, Е.В. Берлин, С.А. Двинин, Л.А. Сейдман
© 2007, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет,
оформление

ISBN: 978-5-94836-134-5

Содержание

Введение	8
ЧАСТЬ 1. НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК	11
Глава 1. Технологические особенности нанесения	
резистивных слоев	11
1.1 Резисторы из силицидов тугоплавких металлов	11
1.2. Способы получения резистивных слоев из силицидов	
угоплавких металлов	15
1.2.1. Термическое испарение из жидкой фазы	15
1.2.2. Термическое «взрывное» испарение	16
1.2.3. Ионное распыление	16
1.2.4. Магнетронное распыление	17
Глава 2. Технологические особенности нанесения	
металлизации ГИС	18
2.1. Виды металлизации ГИС	18
2.2. Способы получения металлизации ГИС	21
2.2.1. Термическое испарение из жидкой фазы	21
2.2.2. Электроннолучевое испарение	21
2.2.3. Магнетронное распыление	22
Глава 3. Устройство магнетронного источника распыления	23
3.1. Принцип действия магнетронного	
источника распыления	23
3.2. Особенности вакуумной откачки	
магнетронных установок	29
Литература к главам 1–3	31
Глава 4. Способы получения равномерного нанесения пленки	
из протяженного магнетронного источника	32
4.1. Влияние соотношения размеров магнетрона	
и подложки	32

4.2. Влияние неоднородности магнитного поля	33
4.3. Влияние положения анодов на равномерность толщины пленки	34
4.3.1. Влияние расстояния анод – катод.....	34
4.3.2. Влияние анодов, противоположащих поверхности мишени.....	35
4.3.3. Влияние симметрии расположения анодов.....	36
4.4. Дополнительные причины неравномерности при реактивном распылении	38
4.4.1. Влияние состояния поверхности анода	38
4.4.2. Влияние соотношения длин протяженного магнетрона и рейки подачи реактивного газа.....	39
4.4.3. Выравнивание неоднородностей нанесенной пленки локальной регулируемой подачей азота или аргона	39
Литература к главе 4	40
Глава 5. Процесс реактивного магнетронного распыления со среднечастотным источником питания магнетрона	42
5.1. Причины пробоев на катоде при реактивном магнетронном распылении.....	42
5.2. Подавление пробоев на катоде с помощью импульсного СЧ ИП	46
5.3. Процессы в плазме среднечастотного разряда	48
5.4. Влияние импульсного СЧ ИП на скорость осаждения пленки.....	51
5.5. Работа ИП при возникновении дуги.....	56
5.5.1. Способы обнаружения пробоя	56
5.5.2. Влияние времени задержки выключения ИП после пробоя на стабильность реактивного процесса напыления	56
5.5.3. Влияние времени выключения импульсного СЧ ИП после пробоя на стабильность реактивного процесса напыления.....	57
5.6. Причины пробоев на аноде при реактивном магнетронном разряде и их устранение	58
5.6.1. Причины пробоев на аноде. Проблема «исчезающего» анода	58

5.6.2. Дуальное магнетронное распыление.....	59
5.6.3. Пакетное импульсное распыление.....	61
5.6.4. Распыление с дополнительным анодом.....	61
Литература к главе 5	62
Глава 6. Магнетронные напылительные установки предприятия ООО «Эсто-Вакуум»	
6.1. Ранее выпускавшиеся магнетронные напылительные установки «Каролина Д-10» и «Каролина Д-10К».....	65
6.2. Современные магнетронные напылительные установки для нанесения многослойных покрытий	68
6.2.1. Установка «Каролина Д-12А»	69
6.2.1.1. Рабочая камера установки	69
6.2.1.2. Стойка питания и управления.....	70
6.2.2. Установка «Каролина Д-12Б».....	71
6.2.3. Особенности установки «Каролина Д-12Б1».....	72
6.2.4. Особенности установки «Каролина Д-12В»	73
6.2.5. Технологическое применение описанных магнетронных установок	75
6.3. Резюме по напылительным установкам.....	75
Литература к главе 6	77
Глава 7. Технологические особенности нанесения различных слоев на магнетронной установке	78
7.1. Технологические особенности нанесения резистивного слоя на магнетронной установке.....	78
7.1.1. Подготовка новой мишени из силицидного сплава к работе	78
7.1.2. Особенности проведения процесса нанесения резистивного слоя.....	79
7.1.3. Получение заданной величины поверхностного сопротивления пленки	79
7.2.4. Стабилизация поверхностного сопротивления резистивного слоя	80
7.2. Технологические особенности нанесения металлизации на магнетронной установке	80

Глава 8. Предотвращение появления следов электрических разрядов на металлической пленке, нанесенной с помощью магнетрона	83
Литература к главе 8	89
Глава 9. Способы управления процессом реактивного магнетронного распыления с помощью вольтамперных характеристик разряда	90
Литература к главе 9	100
Глава 10. Моделирование процесса реактивного нанесения	101
Литература к главе 10	109
Глава 11. Получение чередующихся слоев различных диэлектриков на основе кремния в одном процессе на магнетронной установке	110
Литература к главе 11	117
ЧАСТЬ 2. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	118
Введение	118
Глава 12. Физические процессы и модели высокочастотного разряда низкого давления	121
12.1. Баланс заряженных частиц в плазме	123
12.2. Баланс энергии электронов в плазме	125
Глава 13. Различные способы возбуждения ВЧ поля в плазме	128
13.1. Диодный емкостной плазменный реактор	128
13.2. Источники на индуктивно связанной плазме	129
13.3. Источники на поверхностных волнах	131
13.4. Источники на электронном циклотронном резонансе ($\omega \approx \Omega e$)	132
13.5. Источники на геликонах	132
Глава 14. Импеданс емкостного ВЧ-разряда низкого давления ..	133
Глава 15. Свойства слоя пространственного заряда	135

Глава 16. Возбуждение ВЧ поля в ТСР-разряде	138
Глава 17. Распределение плотности электронов в плазме	144
Литература к главам 12–17	146
Глава 18. Ранее выпускавшаяся установка для реактивного ионно-плазменного травления «Каролина РЕ-4» (ЭРА-3М, ЭРА-4)	149
18.1. Разработка ТСР-источника	150
18.2. Устройство установки	151
18.3. Рабочая камера установки	152
18.3.1 Вакуумная и газовая системы установки	153
18.4. Стойка питания и управления установки	154
18.5. Работа установки	155
18.6. Применение установки в технологии изделий микроэлектроники	157
Литература к главе 18	159
Глава 19. Шлюзовая установка плазмохимического травления «Каролина РЕ-11»	160
19.1 Устройство установки	160
19.2. Работа установки	161
19.3. Размещение и монтаж установки	163
19.4. Применение установки «Каролина РЕ-11»	163
Глава 20. Шлюзовая установка плазмохимического травления «Каролина 15»	165
Глава 21. Плазменно-стимулированное осаждение слоев из газовой фазы (PCVD) с применением генератора высокоплотной плазмы типа трансформаторно-связанной плазмы (ТСР)	170

Введение

Тенденции развития мирового рынка электронной техники, а также экономические аспекты полупроводникового производства ведут к увеличению степени интеграции полупроводниковых приборов на поверхности подложек. Степень интеграции в свою очередь напрямую связана как с увеличением диаметра применяемых в производстве пластин, так и с уменьшением геометрических размеров полупроводниковых приборов на их поверхности. Сегодня размеры используемых подложек возросли до 300 мм, а степень интеграции выросла до одного миллиарда полупроводниковых приборов на одной пластине и более. Размеры элементов, формируемых на пластине, в серийном производстве уменьшились до 0,09 мкм. С повышением требований к выпускаемой продукции растут соответственно требования к технологическим процессам, применяемым в производстве.

Современная электроника давно уже отошла от производства сложных и умных аппаратов на дискретных элементах. Это связано с тем, что дискретные элементы уже не могут обеспечить достижение часто противоречащих друг другу требований: увеличение сложности аппарата и участие огромного числа компонентов, снижение массы аппарата, повышение его быстродействия и надежности. Совмещение этих противоречивых требований стало возможным только фактически в новой отрасли техники – микроэлектронике. В микроэлектронике с помощью современных научных и технологических достижений создаются миниатюрные высоконадежные и экономически выгодные электронные устройства.

Основной элементной базой микроэлектроники являются уже не отдельные компоненты, а интегральные схемы (ИС), представляющие собой функциональные микроминиатюрные узлы электронной аппаратуры. В ИС элементы и соединительные проводники изготовлены в едином технологическом цикле на поверхности или в объеме материала основания (подложки), имеют герметизацию и защиту от внешних воздействий.

В зависимости от базовой технологии изготовления различают полупроводниковые, пленочные, совмещенные и гибридные интегральные схемы.

В **полупроводниковой ИС** все элементы выполнены на поверхности или в объеме подложки из полупроводникового материала. Соединения в таких схемах могут быть выполнены либо в объеме полупроводникового кристалла в виде инверсионных слоев высокой проводимости, либо напылением металлического проводника на защитный слой кристалла. Если все элементы микросхемы выполнены в объеме одного кристалла полупроводника, то такая микросхема называется **монолитной полупроводниковой ИС**.

В **пленочной интегральной микросхеме** все элементы и соединения выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность диэлектрической подложки. Пленочные интегральные микросхемы делятся на тонкопленочные и толстопленочные. Элементы тонкопленочных схем (толщина менее 1 мкм) наносятся на подложку преимущественно методами вакуумного напыления. Элементы толстопленочных схем (толщина обычно более 1 мкм) наносятся на подложку методами шелкографии.

В **совмещенной интегральной микросхеме** все элементы и соединения выполнены на поверхности или в объеме подложки из полупроводникового материала методами изготовления полупроводниковых и пленочных схем.

Гибридными интегральными схемами (ГИС) называют микросхемы, в которых осуществлена гибридизация пленочной интегральной технологии и технологии дискретных навесных элементов. В них обычно на диэлектрической подложке изготавливают в виде пленок только пассивные элементы, а активные элементы в виде кристаллов полупроводника устанавливают на поверхности подложки.

Развитие современных ГИС быстро шло по пути миниатюризации (размеры элементов 1-3 мкм) и увеличения числа элементов в единой схеме (до тысяч и сотен тысяч штук). Такие ГИС с высокой степенью интеграции называются **большие интегральные схемы (БИС)**.

Преимуществом таких гибридных ИС является то, что в них содержатся менее сложные активные элементы, чем в соответствующих монолитных полупроводниковых схемах. Кроме того, ГИС рационально использовать при разработке и макетировании аппаратуры, а также в не слишком массовой аппаратуре, так как первоначальные

затраты на разработку монолитных ИС во много раз больше, чем на разработку вариантов гибридных схем.

ГИС заняли доминирующее положение в устройствах СВЧ-диапазона. Причем для устройств, работающих на частотах до 1 ГГц, с успехом может применяться толстопленочная технология, поскольку она не требует жестких допусков и высокой точности нанесения и обработки пленок. Для устройств, работающих на более высоких частотах, когда необходимо обеспечить прецизионное нанесение пленочных элементов очень малых размеров, предпочтительнее тонкопленочная технология.

При дальнейшем уменьшении размеров элементов топологии и увеличении размеров схемы существенно снижается воспроизводимость технологических процессов и повышается вероятность появления случайных дефектов. Что приводит к значительному удорожанию оборудования, необходимости создания автоматизированных систем, исключая непосредственное участие человека в технологическом процессе.

В данной работе мы подробно рассмотрим технологию и аппаратуру для получения тонкопленочных элементов ИС с помощью нанесения пленок и их травления в вакууме.

ЧАСТЬ I НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК

ГЛАВА I

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ СЛОЕВ

1.1 Резисторы из силицидов тугоплавких металлов

Резисторы из силицидов тугоплавких металлов являются частным случаем резисторов из сплавов металлов. Одним из компонентов силицида является кремний, а вторым компонентом — один или несколько тугоплавких металлов. Их электропроводность уменьшается с увеличением концентрации кремния, поскольку наличие валентных связей металл-кремний уменьшает концентрацию свободных электронов и увеличивает удельное сопротивление.

За счет использования силицидных фаз кремния в материале резисторов можно получить стабильные тонкопленочные элементы при высоких значениях поверхностного сопротивления [1–5, 7]. Большим преимуществом силицидных резисторов является то, что в процессе их получения и после термического стабилизирующего отжига кристаллическая структура тонких пленок имеет, как правило, мелкодисперсный состав, а их фазовый состав остается неизменным в течение долгого времени. Это обеспечивает получение стабильных и надежных тонкопленочных резисторов с широким диапазоном поверхностных сопротивлений.

Не менее важно, что металлосилицидные резисторы обладают высокой стабильностью при повышенных температурах, высокой микротвердостью и радиационной стойкостью.

Наиболее распространенными материалами для силицидных резисторов являются следующие силициды тугоплавких металлов

MoSi₂, CrSi₂, CrSi [3–5]. Типичные характеристики резисторов из этих материалов, полученных ионным распылением: поверхностное сопротивление от 200 до 20000 Ом/кв, толщина пленки от 0,02 до 0,1 мкм, ТКС примерно 10⁻³-10⁻⁴ 1/град.

Резисторы из сплавов системы Ni-Cr-Si приготавливали как путем плавления сплавов, так и смешиванием порошков никеля, хрома и кремния в различных пропорциях [9]. Полученные смеси наносились в виде суспензий на вольфрамовый испаритель. При испарении сплавов системы Ni-Cr-Si испаритель предварительно обрабатывали в вакууме путем испарения навески порошка кремния. Напыление пленок проводили при температуре подложек 420 К. После напыления пленки отжидали в вакууме при 570 К в течение 45 минут, а затем на воздухе при той же температуре в течение 14 часов. Сведения о полученных резисторах на основе силицидов никеля и хрома приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Влияние химического состава на электрические характеристики пленок системы Ni-Cr-Si [9].

Навеска	Состав навески, вес. %			Средние значения параметров пленок	
	Никель	Хром	Кремний	ρ, Ом/□	ТКС·10 ⁶ , К ⁻¹
Смесь порошков элементов	70	20	10	640	170
	63	20	17	970	75
	46	24	30	1320	45
	26	24	50	1930	-150
	15	10	75	3650	-240
	Порошки сплавов	33,8	24	42,2	1450
45,1		16	38,9	1120	+65
22,5		32	38,9	1830	-80
50,7		12	37,3	980	+110
16,9		36	47,1	3270	-140

Более тонкие пленки характеризуются большим разбросом по удельному сопротивлению и ТКС, а также малой стабильностью и воспроизводимостью. Для более толстых пленок требуется слишком длительное время напыления и существенно большая площадь для их размещения в микросхемах.

Для изготовления резисторов с широким диапазоном поверхностного сопротивления от 10 до 10⁴ Ом/□ разработали ряд резистивных сплавов серии РС (таблица 1.2).

Таблица 1.2

Электрические свойства тонкопленочных резисторов на основе сплавов серии РС [3]

Марка сплава	Удельное сопротивление, Ом/□	ТКС, град ⁻¹ , 10 ⁻⁴ , не более	Допустимая мощность рассеяния, Вт/см ² , не более	Необратимые изменения сопротивления после 1000 ч работы под нагрузкой 1 Вт/см ² при 85°С, не более
РС4800	100–1000	2	5	1
РС3710	50–3000	1	5	0,5
РС3001	800–3000	1	5	0,5
РС1004	3000–50000	15	5	2
РС1714	300–500	2	5	1
РС4400	1000–5000	3	10	-
РС4404	1000–5000	3	10	-
РС4206	1000	0,5	2	0,5
РС5402	5–100	0,5	2	1
РС5406К	10–500	0,5	2	1

Пленки на основе РС получают как методом «взрывного» испарения в вакууме, так и методами магнетронного распыления. Независимо от способа получения не рекомендуется выбирать сплав, у которого только на верхней границе рекомендуемого диапазона достигается заданное поверхностное сопротивление. Так как там воспроизводимость получения заданного поверхностного сопротивления заметно снижается.

В резисторах на основе РС-1004 с $R_s=40-50$ кОм/□ при естественном хранении за 1000 ч сопротивление изменяется на $\pm 1,0\%$, под воздействием нагрузки 5 Вт/см² за 1000 ч – на $\pm 2\%$, после 15 термоциклов ($-60..+125^\circ\text{C}$) – на $0,5\pm 0,3\%$. При температуре 150°C ТКС составляет $(1,5-2,5) \cdot 10^{-3}$ 1/град.

Основным недостатком, ограничивающим применение резисторов на основе РС-1004, является высокое абсолютное значение ТКС. Изменение скорости нанесения в широких пределах, варьирование в температуры подложки от 150 до 450°C , отжиг образцов на воздухе при температуре 150°C не позволяют уменьшить ТКС. Несмотря на это такие резисторы $=50$ кОм/□ применяются в ГИС там, где величина ТКС не так важна.

На основе сплава РС-3710 возможно создание «взрывным» испарением стабильных резисторов с удельным сопротивлением 3 кОм/□. Однако для этого необходимо проводить их термообработку при температуре 350°C в течение 4 ч. Уход от номинала не превышает 5% , а ТКС близок к нулю.

Стабильность таких резисторов при температуре 75°C в течение 500 ч не ниже $0,15\%$. При использовании ионного распыления мишени из сплава РС-3710 резисторы с поверхностным сопротивлением в 300 Ом/□ обладают хорошей временной стабильностью, которая ухудшается с увеличением поверхностного сопротивления до 5000 Ом/□.

Сплав РС-5406 предназначен для создания стабильных резисторов с низким удельным сопротивлением $10-100$ Ом/□. В работе [5] сравнивали пленки резистивного сплава РС-5406 с поверхностным сопротивлением 100 Ом/□, полученные двумя способами: из порошка, путем его «взрывного» испарения, и магнетронным распылением из мишени. Оба способа дали сходные результаты при отжиге в диапазоне температур $400-600^\circ\text{C}$. В частности, их поверхностное сопротивление снижалось на 20% при 400°C . Это приводило к тому, что величина сопротивления резисторов неконтролируемо изменялась при последующих операциях их изготовления. Поэтому необходим последующий после нанесения стабилизирующий отжиг. Так после отжига при 400°C термообработка при температурах ниже 400°C уже не меняет их сопротивления. Однако такая стабилизация резисторов сопровождается изменением их номиналов, что может снижать процент их выхода годных.

Для увеличения их термической стабильности предложены два способа. Первый – добавка азота в резистивную пленку во время ее получения. Действительно, атомы азота несколько увеличивают сопротивление пленки и тормозят ее рекристаллизацию, так как, вступая в связь с атомами кремния или металла, они снижают их подвижность.

Второй способ – выбор резистивного сплава из такой пары силицидов, в котором термообработка вызывает изменение сопротивления одного силицида в одну сторону, а другого в противоположную. При таком составе силицидов изменения сопротивления можно полностью скомпенсировать [6]. Этот путь оказался более продуктивным: у сплава из силицидов вольфрама и молибдена и без предварительного отжига уменьшение величины резисторов не превышало 3% при многократном отжиге до 550°C .

1.2. Способы получения резистивных слоев из силицидов тугоплавких металлов

1.2.1. Термическое испарение из жидкой фазы

Термическое испарение – самый старый и известный способ получения тонких пленок силицидов. Метод состоит в том, что напыляемый материал нагревается в вакууме до температуры, при которой он расплавляется и начинает интенсивно испаряться. В вакууме $1 \cdot 10^{-6}-1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. длина свободного пробега испаренных молекул намного больше расстояния между подложкой и источником, поэтому испарившиеся частицы образуют направленный молекулярный поток. На размещенной на их пути подложке происходит осаждение материала в виде тонкой пленки.

Для испарения резистивных материалов из силицидов металлов используют обычно косвенный подогрев. В этом случае электрическим током разогревается вольфрамовый испаритель, на котором находится испаряемый материал.

Главное достоинство описанного метода – его простота. Недостатков у него, к сожалению, больше. К ним относятся:

- Невозможность испарения тугоплавких металлов
- Трудность испарения сплавов (к ним относятся и силициды) ввиду различия скоростей испарения отдельных их компонентов, что обусловлено различием в значении упругости их паров

- Химическое взаимодействие расплава напыляемого материала с материалом подогревателя

В результате характеристики полученных пленок отличаются от соответствующих характеристик исходного материала. Причиной этого является изменение структуры пленок и загрязнение их материалом нагревателя.

1.2.2. Термическое «взрывное» испарение

В методе термического «взрывного» испарения порошкообразный испаряемый материал сложного состава из вибробункерного устройства непрерывно подается на испаритель, предварительно нагретый до температуры, превышающей температуру испарения наиболее тугоплавкого компонента. В результате происходит мгновенное «взрывообразное» испарение порции материала. Температура испарителя должна быть выбрана очень тщательным образом, так как при слишком высокой температуре испарителя частицы материала могут отражаться от испарителя, не расплавляясь и не испаряясь.

Подача материала на испаритель тоже должна осуществляться со строго определенной постоянной скоростью, равной скорости его испарения. Только тогда состав пленки будет соответствовать составу исходного материала.

Применение метода «взрывного» испарения позволяет получать высококачественные резистивные пленки из металлосилицидных сплавов, но технологически метод сравнительно сложен.

1.2.3. Ионное распыление

Ионное распыление металлосилицидных сплавов имеет ряд принципиальных технологических преимуществ:

- Многокомпонентные материалы не фракционируют, и состав пленки примерно соответствует составу исходного материала
- Мишень используется многократно, что обеспечивает высокую чистоту и воспроизводимость состава пленки
- Поддерживая постоянным ток разряда, можно строго контролировать скорость осаждения
- Высокая энергия распыленных атомов и ионов рабочего газа способствуют повышению адгезии пленки к подложке и выбиванию из пленки атомов загрязнений.

Несмотря на перечисленные принципиальные преимущества, метод ионного распыления сначала ограниченно использовался в электронной промышленности для получения резистивных слоев. Объясняется это тем, что из-за сравнительно низких скоростей распыления пленки загрязнялись молекулами остаточных газов. Этот недостаток удалось преодолеть только при использовании магнетронных источников распыления.

1.2.4. Магнетронное распыление

С появлением и развитием магнетронного распыления ионное распыление прочно вошло в практику современного производства гибридных интегральных схем. Магнетронное распыление применяется в двух вариантах. Первый предусматривает применение двух источников распыления, один из которых распыляет кремний, а другой — тугоплавкий металл. Преимущества данного метода заключаются в том, что мишени для него сравнительно легче изготовить и они дешевле. Кроме того, возможно гибкое регулирование состава получаемых пленок за счет изменения режима одного из магнетронов. Недостатки этого варианта вытекают из его достоинств. Он характеризуется сложностью оборудования (два магнетрона и источника питания), а для получения воспроизводимого состава пленок необходимо применять специальные устройства стабилизации скоростей распыления каждого источника. Поэтому данный вариант используется только в исследовательских работах, когда важно изучить поведение пленок различного состава.

В промышленных масштабах используется обычно второй вариант. Во втором варианте используется один источник распыления, мишень которого выполнена из силицидов тугоплавкого металла [5]. Мишени нужного состава изготавливаются методами порошковой металлургии.

ГЛАВА 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ГИС

2.1. Виды металлизации ГИС

Металлизация ГИС— это одно- или многослойное покрытие, обеспечивающее электрическое соединение между резистивной пленкой и контактными площадками, а также между отдельными элементами схемы и внешними присоединениями. В качестве материалов электропроводящих контактов тонкопленочных элементов используют одно-, двух- и трехслойные структуры на основе металлов.

Между слоями материалов контактных площадок и резисторами образуются электрические соединения — пленочные контакты. Для контактов пленочных элементов выбирают материалы, отличающиеся:

- достаточно высокой адгезией к материалу подложки и к материалу предварительно нанесенных пленок, исключающие их отслоение при подсоединении к ним выводов;
- низким, стабильным электрическим сопротивлением в условиях эксплуатации порядка $0,1—0,01 \text{ Ом}/\square$;
- антикоррозионной и металлургической стойкостью по отношению к нанесенным пленкам и контактируемым проводникам;
- способностью к пайке, сварке выводов.

Технология контактов должна быть воспроизводимой и должна базироваться на известных методах получения тонких пленок и создания заданной конфигурации. Для получения металлизации ис-

пользуют в основном чистые металлы с высокой проводимостью — золото, медь, серебро. К сожалению, наряду с высокой проводимостью они обладают неудовлетворительной адгезией к подложкам. Поэтому, как правило, применяют двух- и трехслойные системы металлизации.

Для улучшения адгезии хорошо проводящего металла используют тонкий адгезионный слой другого металла, располагаемого между подложкой и основным слоем. Этот подслоя обеспечивает высокую адгезию и низкое переходное сопротивление контакта.

Адгезия определяется процессом образования окисной пленки напыляемого металла, а также температурой испарения (то есть энергией конденсируемых частиц) и увеличивается при образовании переходной окисной пленки подложка—контакт. Поэтому в качестве адгезионного слоя для металлов высокой проводимости (то есть проводящего слоя контакта) применяют металлы, активные к кислороду (таблица 2.1).

Таблица 2.1

Материалы проводящего слоя	Au	Ag	Cu	Al
Материалы подслоя	Mo, Cr, Ta, Ti, W, NiCr	Cr, Ti, NiCr	Ti, Mn, V, NiCr, Cr	NiCr, Mo, Ta, Ti, Ni

Однако для таких сочетаний не исключена возможность деградации системы металлизации из-за взаимной диффузии металлов, электрохимической коррозии пары или термического окисления активного металла [8]. Эти явления приводят к выходу из строя контакта, например, как в случае «пурпурной чумы» при использовании системы алюминий—золото [8]. Особенно чувствительны двойные системы к воздействию влажности из-за возникновения гальванических пар, приводящих к быстрому травлению одного из металлов.

С целью частичного устранения металлургической несовместимости различных материалов контактной пары, исключения расслаивания системы контактов, состоящих из различных металлов, и подавления их взаимной диффузии используют напыление дополнительного промежуточного слоя (таблица 2.2).

Таблица 2.2

Подслой	Ti	Cr	NiCr	Ti
Промежуточный слой	Pt	Ag	Pd	Pd
Проводящий основной слой	Au	Au	Au	Au

При использовании в качестве основного слоя контакта меди на поверхность контакта наносят защитное металлическое покрытие (золото, никель), предотвращающее окисление меди. Материал защитного слоя должен обеспечивать прочную адгезию с проводящим слоем, достаточную химическую инертность, коррозионную стойкость и допускать сварку и пайку внешних выводов. В других случаях, когда необходимо вырастить гальванически на меди слои других металлов, применяют защиту поверхности меди тонким слоем переходного металла.

Основную роль в обеспечении адгезии защитного слоя к основному проводящему слою играют диффузионные процессы, на протекание которых существенно влияет:

- близость типа кристаллических решеток;
- наличие несовершенства структуры;
- способность образования твердого раствора между ними;
- близость атомных диаметров взаимодействующих металлов.

Особенности металлизации СВЧ ГИС заключаются в повышенных требованиях к подслою многослойной металлизации. Это связано с тем, что дорожки металлизации СВЧ ГИС представляют собой полосковые линии, в которых СВЧ-ток протекает, в основном, в слоях, близких к подложке. Наличие там подслоя с повышенным сопротивлением снижает добротность СВЧ-схемы. В связи с этим необходимо делать подслои минимальной толщины. Еще лучше вообще исключить подслои из металлизации СВЧ ГИС, повысив до необходимого уровня адгезию проводящего металла. В этом направлении в настоящее время ведется много работ.

Условием стабильной работы СВЧ-металлизации, для которой характерны дорожки малого сечения, является также отсутствие диффузионных процессов при нормальной температуре, сопровождаемых переносом металла вдоль токовой дорожки под действием электрического тока высокой плотности (электромиграции).

Наиболее популярные системы металлизации СВЧ: Cr-Cu-Ni, Cr-Cu-Cr, V-Cu, V-Al, Ti-Pt-Au и другие.

2.2. Способы получения металлизации ГИС

2.2.1. Термическое испарение из жидкой фазы

Достоинства и недостатки этого метода изложены выше при описании методов нанесения пленок резистивных материалов.

2.2.2. Электроннолучевое испарение

Разновидностью метода термического испарения является электроннолучевое испарение. В этом методе разогрев испаряемого материала осуществляется электронной бомбардировкой.

Электронно-лучевые испарители благодаря локальному плавлению навески позволяют устранить взаимодействие ее с материалом держателя навески (обычно тигель), поэтому тигли могут использоваться многократно. Концентрация в фокальном пятне электронного луча мощности порядка 10^8 Вт/см² дает возможность испарять тугоплавкие материалы. При этом испаряемый материал практически не загрязняется материалом тигля.

Выделяющаяся при торможении электронов энергия расходуется не только на испарение навески, но и на компенсацию тепловых потерь за счет излучения и теплопроводности тигля. Поэтому испарение из неохлаждаемых тиглей происходит более интенсивно и при меньшей мощности электронного луча, чем из охлаждаемых, но при этом не исключается взаимодействие расплава испаряемого материала с материалом тигля.

Поэтому испарение из неохлаждаемых тиглей применяется ограниченно. В охлаждаемом тигле вблизи его стенок образуется слой нерасплавленного материала (автотигель), вследствие чего существенно снижаются загрязнения испаряемого материала всевозможными примесями.

При нагреве испаряемого материала необходимо избегать электронной бомбардировки самого тигля, так как выделяющиеся при этом газы загрязняют пленку. Например, бомбардировка тигля электронным потоком мощностью около 200 Вт ведет к увеличению давления в вакуумной камере с 10^{-6} до 10^{-2} мм рт. ст. за счет повышения парциальных давлений N₂, CO, CO₂ и паров воды.

Многие из указанных трудностей можно устранить, если электронный луч фокусировать так, чтобы подлежащий испарению материал расплавлялся локально. Тогда необходимость в применении тиг-

лей отпадает, однако нужно постоянно перемещать луч по навеске. Если же этого не делать, на навеске образуется кратер, увеличивается неравномерность потока испарившихся частиц, в результате чего неравномерно формируется пленка.

2.2.3. Магнетронное распыление

С появлением и развитием магнетронных источников магнетронное распыление прочно вошло в практику получения металлизации современных гибридных интегральных схем. Магнетронное распыление применяется в большом числе различных напылительных установок, как вновь разрабатываемых, так и модернизируемых вакуумных установках предыдущих годов выпуска. Подробнее о магнетронном распылении и магнетронных установках будет рассказано в следующих главах.

ГЛАВА 3

УСТРОЙСТВО МАГНЕТРОННОГО ИСТОЧНИКА РАСПЫЛЕНИЯ

3.1. Принцип действия магнетронного источника распыления

Магнетронными называются системы, в которых используются неоднородные скрещенные электрическое и магнитное поля. Магнетронные распылительные системы получили свое название от СВЧ-приборов магнетронного типа, хотя, кроме наличия скрещенных электрического и магнитного полей, ничего общего с ними не имеют. Электрические параметры разряда в магнетронной системе в значительной степени зависят от рабочего давления, величины и конфигурации магнитного поля, конструктивных особенностей распылительной системы [1].

Магнетронные системы относятся к системам ионного распыления, в которых распыление материала происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа (обычно аргона), образующихся в плазме аномального тлеющего разряда. Высокая скорость распыления, характерная для этих систем, достигается увеличением плотности ионного тока за счет локализации плазмы у распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля.

Принцип действия магнетронной распылительной системы показан на рис. 3.1. Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени.

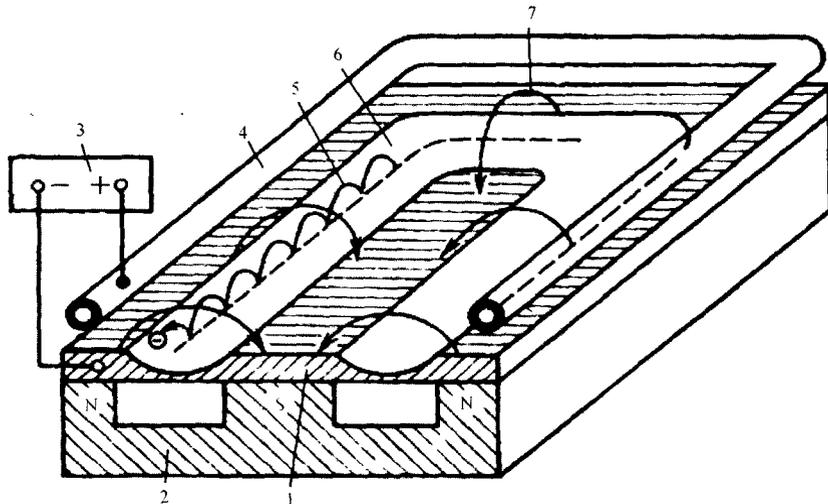


Рис. 3.1. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью: 1 – катод-мишень; 2 – магнитная система; 3 – источник питания; 4 – анод; 5 – траектория движения электрона; 6 – зона распыления; 7 – силовая линия магнитного поля

Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны совершают движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой стороны – отрицательно заряженной поверхностью мишени, отталкивающей их. Электроны совершают циклическое движение в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию и диффундирует на границу плазмы по направлению к аноду. Таким образом, большая часть энергии

электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение атомов рабочего газа (чаще всего – аргона), что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это в свою очередь обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости распыления, а, следовательно, и скорости осаждения пленки. Средние скорости осаждения различных материалов с помощью магнетронной распылительной системы, имеющей плоскую дисковую мишень диаметром 150 мм при мощности источника 4 кВт и расположении подложки на расстоянии 60 мм от поверхности мишени, составляют от 10 до 70 нм/с.

Следует отметить, что плазма разряда существует, в основном, в области магнитной ловушки в непосредственной близости от мишени, и ее форма определяется геометрией и величиной магнитного поля. Создание магнитной ловушки у распыляемой поверхности мишени представляет собой простое, но весьма эффективное решение проблемы увеличения скорости распыления в плазменных распылительных системах. Но помимо этого достоинства магнетронная распылительная система обладает рядом специфических свойств, основным из которых является отсутствие бомбардировки подложки высокоэнергетическими вторичными электронами.

Известно, что при распылении материалов в плазме тлеющего разряда высокоэнергетические вторичные электроны с мишени являются основным источником нагрева подложек. В магнетронной распылительной системе вторичные электроны захватываются магнитной ловушкой и не бомбардируют подложку, что обеспечивает ее сравнительно низкую температуру. Источниками нагрева подложки в этой системе служат кинетическая энергия и энергия конденсации осаждаемых атомов, энергия отраженных от мишени нейтрализованных ионов и энергия ионов вторичной плазмы, а также излучение плазмы.

Энергия конденсации составляет 3–9 эВ/атом, кинетическая энергия в зависимости от распыляемого материала от 5 (для алюминия) до 20 эВ/атом (для вольфрама), а излучение плазмы 2–10 эВ/атом. Энергия вторичных ионов в зависимости от конструкции магнетрона и подложкодержателя может составлять 30–50 эВ/ион. Плотность ионного тока на подложку зависит только от концентрации вторичной плазмы в области подложки, а она, в свою очередь, зависит от

мощности магнетронного разряда и конфигурации и напряженности магнитного поля магнетрона. Магнетроны условно подразделяются на «сбалансированные» и «разбалансированные» с разной степенью разбалансированности. Эту степень разбалансированности можно характеризовать отношением плотности тока вторичных ионов на подложку к плотности потока падающих на нее распыленных атомов.

От степени разбалансированности магнетрона зависит и крутизна вольтамперной характеристики разряда, и термическая нагрузка на подложку, и во многих случаях, качество и структура напыляемых пленок.

Сравнение этих результатов с данными, полученными для метода термического испарения в вакууме, показывает (рис. 3.2), что при сравнительно низких скоростях испарения последний характеризуется более высокой тепловой энергией на подложку. Это объясняется тем, что в данном случае основным источником нагрева подложки является радиационное излучение с поверхности расплавленного материала. Однако при высоких скоростях испарения начинает преобладать нагрев за счет энергии конденсации. Во многих случаях нагрев подложки в магнетронных системах сравним, а при испарении тугоплавких материалов даже ниже, чем при методе термического испарения. Это дает возможность использовать магнетронные системы

для нанесения пленок на подложки из материала с низкой термостойкостью (пластики, полимеры, оргстекло и бумагу).

Основные рабочие параметры магнетронных распылительных систем – напряжение на электродах, ток разряда, плотность тока на мишени и удельная мощность, величина индукции магнитного поля и рабочее давление. От величины и стабильности перечисленных параметров, которые взаимно связаны между собой, зависят стабильность разряда и воспроизводимость процесса нанесения пленок.

Магнетронные системы относятся к низковольтным системам распыления. Напряжение питания постоянного тока не превышает 700–800 В. Однако, для удобства поджига разряда, особенно при низких давлениях, применяется «поджигающее» напряжение, которое составляет обычно от 1200 до 1350 В. Источник «поджигающего» напряжения имеет круто падающую вольтамперную характеристику и при токе магнетрона более 100–200 мА напряжение на разряде становится «рабочим».

Рабочее напряжение обычно составляет 300–700 В, причем на мишень подается отрицательный потенциал, а анод обычно имеет нулевой потенциал. Однако в магнетронных системах с плоским катодом для более полного улавливания вторичных электронов рекомендуется на анод подавать небольшое положительное смещение (40–50 В). В некоторых системах предусматривается подача отрицательного напряжения смещения на подложку (до 100 В) для реализации осаждения со смещением.

Ток разряда зависит от многих факторов, например, от рабочего напряжения, давления и рабочего газа, индукции магнитного поля, конфигурации магнетронной системы, распыляемого материала, и определяется мощностью источника питания. Плотность тока на мишени очень велика и для систем с плоским катодом может достигать – 200 мА/см², причем максимальные плотности тока в центральной части зоны распыления могут быть значительно выше. Значения удельной мощности выделяемой на поверхности мишени за счет ионной бомбардировки в магнетронных системах с плоским катодом – 100 Вт/см² и выше. Предельно допустимая мощность определяется условиями охлаждения мишени и теплопроводностью распыляемого материала.

Магнетронная распылительная система может работать в диапазоне давлений от 10⁻² до 1 Па и выше. Важнейшими параметрами, во многом определяющими характер разряда в ней, являются геомет-

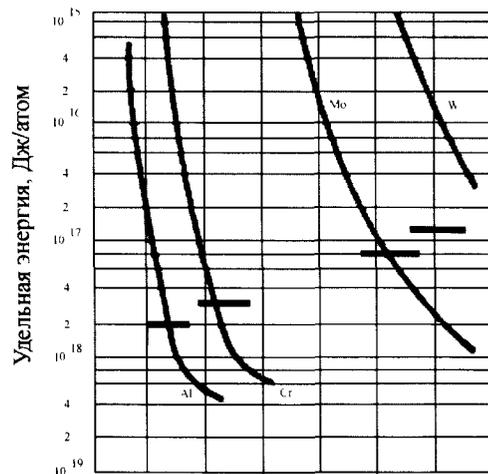


Рис. 3.2. Удельная тепловая энергия, рассеиваемая на подложке при электронно-лучевом испарении (диаметр тигля 5 см) различных металлов. Горизонтальными линиями показаны средние значения энергии при распылении тех же материалов в магнетронной системе.

рия и величина магнитного поля, индукция которого у поверхности мишени 0,03–0,1 Т.

Одной из основных характеристик разряда является вольтамперная характеристика (ВАХ). Существенное влияние на нее оказывают рабочее давление и индукция магнитного поля. С уменьшением рабочего давления ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений и приближаются к линейной зависимости. Аналогичным образом влияет и индукция магнитного поля. На ВАХ разряда влияют также материал мишени и ее форма, которая видоизменяется по мере распыления материала. Образование выемки в плоской мишени приводит к сдвигу ВАХ в область меньших рабочих напряжений из-за улучшения условий локализации плазмы, причем этот сдвиг растет с увеличением давления. В этом случае определяющим является не только геометрический фактор, но и переход зоны разряда в область более сильного магнитного поля по мере распыления мишени.

Эффективность работы магнетронной распылительной системы зависит от правильного выбора рабочих параметров процесса, а стабильность этих параметров определяет постоянство скорости осаждения пленки и воспроизводимость свойств получаемых пленок. В реактивных процессах параметры процесса влияют друг на друга, и эта взаимосвязь имеет довольно сложный вид. Эта взаимосвязь будет описана в главах 9–11.

Существенно более простая ситуация в не реактивных процессах, использующих в качестве рабочего газа инертный газ, чаще всего аргон. Там необходимая скорость осаждения пленки в магнетронной системе с достаточной точностью может поддерживаться за счет постоянства подводимой мощности. Эту функцию (стабилизацию мощности) может выполнять источник питания, благодаря чему управление конечной толщиной пленки достигается, если задается время осаждения. Однако можно управлять ростом пленки и с помощью прямых методов контроля, например, с помощью кварцевого датчика, поскольку плазма в магнетронной системе локализована и не воздействует на датчик. Как показывает практика, для обеспечения воспроизводимости и стабильности процесса нанесения пленки мощность разряда необходимо поддерживать с точностью $\pm 2\%$. При этом рабочее давление должно быть постоянным (отклонение не должно превышать $\pm 5\%$).

3.2 Особенности вакуумной откачки магнетронных установок

Основными видами откачных средств, используемых в установках с магнетронными распылительными системами, являются диффузионные, турбомолекулярные и криогенные насосы. При переходе от режима высоковакуумной откачки ($p=10^{-3}$ – 10^{-4} Па) к режиму распыления ($p=0,3$ Па) существенное значение имеет правильный выбор места дросселирования газового потока (снижение скорости откачки) с целью снижения газовой нагрузки на откачную систему или, как в случае с диффузионными насосами, сохранение состояния насоса в режиме постоянной скорости откачки. Дросселирование необходимо и для снижения потока газов, поступающих в форвакуумный насос, который «захлебывается» этим потоком. Из-за чего давление на его входе возрастает, что роковым образом сказывается на работе диффузионного насоса. Иногда дросселирование производится частичным перекрытием затвора, расположенного над азотной ловушкой. Однако такое дросселирование не рационально, поскольку вызывает увеличение концентрации загрязняющих примесей.

Так, если при полностью открытом затворе эффективная скорость откачки равна S_{H1} , а затем при его частичном перекрытии становится S_{H2} , то одновременно в S_{H1}/S_{H2} раз возрастает давление загрязняющих примесей в рабочем объеме установки, что в ряде случаев недопустимо. Поэтому дросселирование потока рекомендуется производить ниже азотной ловушки, что позволяет сохранить скорость откачки паров воды (которые являются основной компонентой остаточной среды в не прогреваемых установках) на прежнем уровне и тем самым снизить давление загрязняющих примесей в 15–20 раз. При этом время высоковакуумной откачки рабочего объема установки за счет постоянного дросселирования газового потока увеличивается незначительно (примерно в 1,5 раза).

В последние годы для откачки в установках с магнетронными системами все шире начинают применяться турбомолекулярные насосы, характерной особенностью которых является стабильная скорость откачки в широком интервале давлений (от 10^1 до 10^{-6} Па). Однако для этих насосов характерна избирательность откачки, в частности у них низок коэффициент компрессии по легким газам, в первую очередь по водороду, что ограничивает возможность достижения высокого вакуума. Наличие водорода в качестве остаточного газа

может значительно повлиять на качество пленок, получаемых с помощью магнетронных систем. Исследования показали, что для обеспечения достаточно эффективной откачки водорода при использовании турбомолекулярных насосов в установках с большими потоками рабочего газа на выходе насоса необходимо устанавливать механический форвакуумный насос с высокой производительностью, причем соотношение скоростей откачки турбомолекулярного и механического насосов должно быть не выше 20:1. Кроме того, для увеличения эффективности откачки воды рекомендуется над входом турбомолекулярного насоса устанавливать криогенную ловушку. При этих двух условиях указанный насос применим в качестве откачного средства в области среднего вакуума и при больших потоках газа.

Весьма перспективными для откачки вакуумных установок с магнетронными распылительными системами считаются крионасосы. Исследования показывают, что по характеристикам откачки они аналогичны турбомолекулярным насосам, однако полностью исключают наличие в рабочем объеме углеводородов. При работе с большими потоками газа на криопанели крионасоса нарастает слой конденсированных остаточных газов, и эффективность откачки начинает падать. Обычно максимальное рабочее давление для крионасосов составляет 0,13 Па, и работа при более высоких давлениях требует дросселирования и наличия дополнительной азотной ловушки для конденсации на ней паров воды.

Специально разработанный для магнетронной системы крионасос имеет двойную криопанель: центральная ее часть, имеющая температуру 20 К, окружена панелью с температурой 80 К. Основной поток аргона и паров воды откачивается внешней панелью, а более легкие газы конденсируются на центральной. Такая конструкция позволяет вести эффективную откачку при давлении инертного газа до 0,4 Па без использования азотной ловушки и дросселирования и сохранять состав остаточных газов на одном уровне в течение длительного (до 7 часов) процесса распыления.

В последнее время наметилась тенденция использования современных высокопроизводительных форвакуумных агрегатов. Такие агрегаты способны работать, перекачивая большие потоки газов, поэтому отпадает необходимость дросселирования высоковакуумного насоса, работающего с прокачкой газа (турбомолекулярного или диффузионного).

Литература к главам 1–3

- 1 Данилин Б С , Сырчин В К. Магнетронные распылительные системы. М , «Радио и связь» 1982, 73 с.
- 2 Готра З Ю , Войтехов А Н , Хромьяк И Я. Резистивные материалы для низкоомных тонкопленочных резисторов интегральных схем. – Зарубежная электронная техника, 1984, №2, 47-80 с.
- 3 Кондратов Н М. Резистивные материалы. – Обзоры по электронной технике, сер. Материалы, М , 1979, вып. 4, 36 с.
- 4 Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. Пер. с англ. к. т. н. В. В. Баранова под ред. д. т. н. Ю. Д. Чистякова, М , «Мир», 1986, 176 с.
- 5 Качурина Е Е , Рябова Н Е , Сейдман Л А , Смирнова Н А. Нанесение пленок силицидов тугоплавких металлов для изделий микроэлектроники. – Электронная промышленность, 1986, вып. 8, 58-60 с.
- 6 Лихтман А Е , Сейдман Л А , Смирнова Н А. Тепlopечатающая головка. – Авт. свид. №1271200 с приоритетом от 24.02.84.
- 7 Готра З Ю , Мушкарден Э М , Смеркло Л М. Технологические основы гибридных интегральных схем. Львов «Вища школа», 1977, 167 с.
- 8 Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции. Под редакцией Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера, М , «Мир», 1982.
- 9 Гурский Л И и др. Структура, технология и свойства пленочных резисторов. Под ред. Лабунова В А. – Мн , «Наука и техника», 1987, 264 с.

ГЛАВА 4

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНКИ ИЗ ПРОТЯЖЕННОГО МАГНЕТРОННОГО ИСТОЧНИКА

Способы получения равномерности нанесения пленки из протяженного магнетронного источника исследовались на напылительной магнетронной установке Р-1200, предназначенной для нанесения покрытий на рулонные материалы, в частности на полимерные пленки шириной 1230 мм. В ней были использованы протяженные магнетроны, то есть такие, у которых длина зоны эрозии (1300 мм) в алюминиевых мишенях была много больше ее ширины (100 мм).

4.1. Влияние соотношения размеров магнетрона и подложки

Применение протяженного магнетрона дает возможность ожидать равномерного осаждения вдоль всей его длины. Однако в нашей работе, когда длина зоны эрозии магнетрона была примерно равна ширине подложки, оказалось что этого совершенно недостаточно для получения равномерного по всей ширине подложки покрытия. Это означает необходимость учесть, что в действительности магнетрон – источник распыления конечной длины. Как показывает расчет распределения толщины наносимой пленки, при указанной геометрии на краях подложки толщина покрытия алюминия почти на 50% меньше (рис. 4.1). Из-за этого пропускание покрытия там выше на 30-50%.

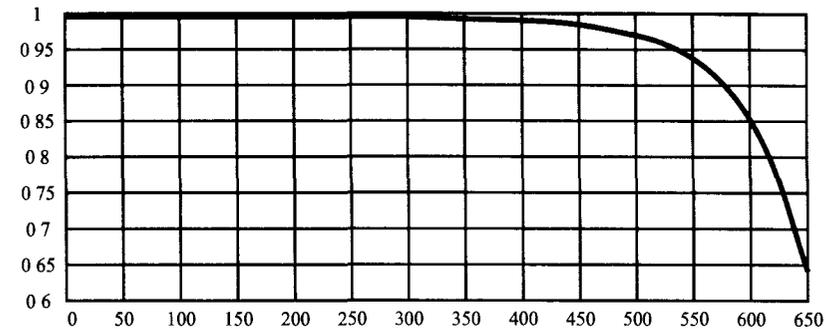


Рис. 4.1. Относительное изменение толщины покрытия на полуширине подложки (по оси абсцисс расстояние от середины магнетрона в мм)

Из расчета также следует, что при расстоянии до подложки 100 мм для получения неравномерности по толщине менее 5% необходимо превышение длины зоны эрозии магнетрона над размером подложки на 270 мм, для менее 2% – на 390 мм и для менее 1% – на 540 мм. В работе [1], где особое внимание уделяли равномерности оптического покрытия, это превышение составляет 600-650 мм.

Улучшить равномерность покрытия при ограниченной длине мишени удалось также как и в работе [9], в которой недостаток длины компенсировали увеличением количества вещества, распыляемого на концах магнетрона. Достигали этого, делая зону эрозии на концах мишени извилистой, и тем увеличивали количество распыляемого вещества на единицу длины магнетрона. Так удалось увеличить толщину напротив края мишени с 50% до 65%, одновременно расширив размер области равномерного нанесения пленки (с допуском $\pm 2,5\%$) на 280 мм [9].

4.2. Влияние неоднородности магнитного поля

Неоднородность магнитного поля у поверхности мишени магнетрона может быть вызвана не идентичностью используемых магнитов или присутствием дополнительных магнитов вне катодного узла. Более слабое магнитное поле приводит к получению меньших скоростей распыления [1, 3]. Этот факт используется в неактивном или 100% реактивном процессе для локальной регулировки равномерности нанесения [1, 3] в пределах нескольких процентов.

В частности, в работе [1] так осуществляли тонкую настройку магнитной системы магнетрона. Для этого регулировали зазор между магнитными полюсами и мишенью. Увеличивая зазор в середине магнетрона, уменьшали величину магнитного поля там и тем снизили скорость распыления на 6-8%. То же удалось осуществить в реактивном процессе, уменьшая магнитное поле на концах магнетрона, доведя равномерность до $\pm 2\%$ [1].

4.3. Влияние положения анодов на равномерность толщины пленки

4.3.1. Влияние расстояния анод – катод

Область, в пределах которой электрон теряет энергию при столкновении с молекулами газа, является областью существования плазмы (рис. 4.2). Граница этой области – условный анод [10]. Положение реального анода относительно условного – важный параметр магнетронного разряда.

Если реальный анод ближе к катоду, чем условный, то свечение плазмы распространяется до анода. Потенциал анода примерно равен потенциалу плазмы. Такой анод снижает эффективность работы магнитной ловушки магнетрона, собирая как потерявшие энергию, так и энергичные электроны. Из-за этого нагрев его сравнительно велик. Локальный отбор энергичных электронов из плазмы снижает ее плотность в этом месте и, соответственно, скорость распыления.

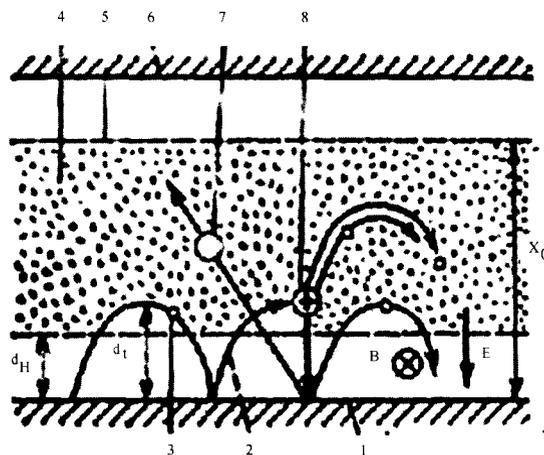


Рис. 4.2. Схема разрядного промежутка магнетронной распылительной системы [10] 1 – катод-мишень, 2 – траектория вторичного электрона, 3 – электрон, 4 – плазма, 5 – условный анод, 6 – анод, 7 – распыленный атом, 8 – ион

Если же реальный анод расположен дальше условного, то свечение плазмы не доходит до анода. В этом случае потерявшие энергию электроны выходят из магнитной ловушки и движутся к аноду. Поскольку анод собирает только потерявшие энергию электроны, то нагрев такого анода сравнительно невелик.

Чем дальше анод или чем меньше его площадь, тем больше разница потенциалов между анодом и плазмой. А чем больше эта разница потенциалов, тем ниже разница потенциалов между плазмой и катодом, из-за чего снижается плотность тока и скорость распыления [5]. Описанное явление может иметь место, как для всего разряда, так и для отдельных его частей, в зависимости от взаимного расположения реального и условного анодов. Используя этот эффект, локально приближая или удаляя анод, можно корректировать скорость распыления в нужных местах на 5-10%.

Когда аноды были расположены вдоль и вблизи катода, получалось симметричное распределение скорости нанесения пленки вдоль оси магнетрона, но с резким падением на концах магнетрона. То есть, распределение соответствовало теоретическому расчету для магнетрона ограниченной длины. Наличие или отсутствие положительного смещения на анодах не влияло на распределение скорости нанесения. В тоже время в других условиях положительное смещение на анодах может быть полезным, чтобы обеспечить хорошую равномерность нанесения, так как исключают влияние каких-либо других заземленных металлических частей арматуры, ранее действовавших как аноды.

4.3.2. Влияние анодов, противоположащих поверхности мишени

В нашей установке кроме анодов, обрамляющих протяженный катодный узел, имелись аноды, расположенные напротив мишеней у их концов (рис. 4.3). Это были экраны, ограничивающие зону нанесения пленки. Эти экраны были вне зоны светящейся плазмы, и имели площадь не меньшую, чем катоды. В этом случае в центральной части магнетронов, где площадь анодов была меньше, анодное падение потенциала было выше, и соответственно скорость распыления ниже. Это отразилось на распределении толщины получаемого покрытия: в центральной части толщина покрытия меньше.

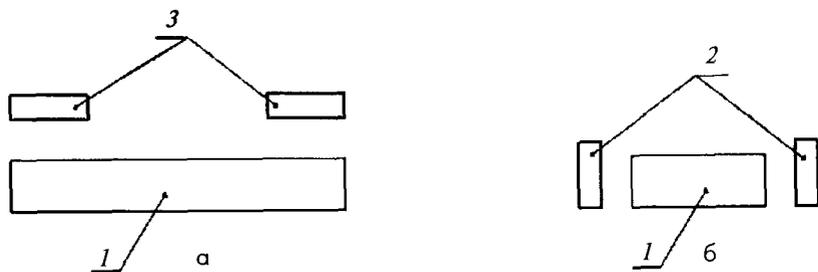


Рис. 4.3. Схема расположения анодов *а* – вид сбоку магнетрона; *б* – вид с торца магнетрона: 1 – катодный узел, 2 – продольные аноды, 3 – противолежащие аноды

Когда убрали продольные аноды, описанный выше эффект проявился сильнее. Одновременно для поддержания того же напряжения разряда при стабилизованном токе пришлось увеличить поток аргона в камеру примерно на 25%.

Таким образом, распределение толщины покрытия вдоль магнетронов формируется под действием и продольных анодов, и противолежащих анодов. В результате распределение пропускания покрытия имеет вид, показанный на рис. 4.4, на котором видны и подъем пропускания на краях, и его провалы вблизи краев. Подъем – это результат недостаточной длины магнетрона. А наличие провала (локальное снижение оптического пропускания пленки на 4–10% (увеличения ее толщины) вблизи краев магнетрона (у нас 100–150 мм от края подложки)) – результат влияния на скорость распыления нескольких причин:

1 Противолежащий анод есть только вблизи концов магнетрона, поэтому он стимулирует там увеличение ионизации и скорости распыления.

2. Неоднородность холловского тока приводит к тому, что анодный ток и скорость распыления нарастают к краям магнетрона [3].

Нарастание толщины пленки к краям магнетрона заканчивается там, где сказывается действие недостаточности его длины. Для устранения провалов пропускания было необходимо прикрыть противолежащие аноды изолированным экраном так, чтобы их влияние могло сказываться только на самых краях подложки, и таким образом можно в какой-то мере компенсировать недостаточность длины магнетрона.

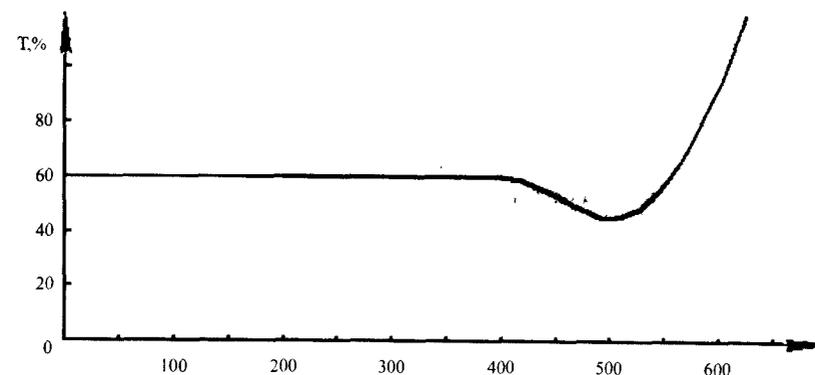


Рис. 4.4. Распределение пропускания покрытия вдоль магнетрона (по оси абсцисс – расстояние от середины магнетрона в мм)

4.3.3. Влияние симметрии расположения анодов

Если анод расположен вдоль протяженного катодного узла только с одной стороны, то такая несимметричная система дает несимметричное распределение толщины пленки: у одного конца магнетрона она существенно выше, чем у другого [3]. Это связано с холловским током в плазме магнетронного разряда [3]. Электрическое поле одностороннего анода действует на холловские электроны на торцевых участках: на одном ускоряет их, а на другом замедляет. Там, где они ускоряются, там скорость распыления выше. А на другом торце – наоборот. Отсюда возникает перекося. В нашей установке при работе одного магнетрона был замечен перекося распределения пропускания пленки вдоль магнетрона от –15% на одном конце до +20% на другом.

Симметричное распределение толщины пленки вдоль магнетрона дает протяженный магнетрон, у которого катодный узел обрамлен длинными анодами симметрично с двух сторон. Точно также дуальная система магнетронов, обрамленная длинными анодами с двух сторон, дает симметричное распределение толщины пленки вдоль магнетронов. Объясняется это тем, что у каждого из пары магнетронов, обрамленных парой анодов, перекося противоположны. При совместной работе они компенсируют друг друга. Симметричность системы зависит от идентичности магнетронов, которые обычно все-таки отличаются один от другого [7].

Например, из-за небольшого различия магнитов один из магнетронов при равных токах разряда работает при меньшем напряжении и распыляет мишень, по-видимому, с меньшей скоростью. Поэтому, если перекос возник в силу каких-либо причин, например, из-за не идентичности магнетронов, то его можно компенсировать, сдвигая оба анода относительно магнетрона в поперечном направлении. Этим интенсифицируется распыление одного или другого торца и достигается симметрия распределения.

Если из-за недостаточной длины магнетрона необходимо интенсифицировать распыление обоих торцов одновременно, то надо поставить аноды параллелограммом так, чтобы они приближались к катоду у его торцов с той стороны, где электрическое поле анодов будет ускорять холловские электроны при прохождении ими торцевых участков плазменного тороида. Тот же эффект можно получить, выдвигая там аноды вперед, увеличивая этим их площадь. Все это справедливо как для одиночного магнетрона, распыляющего металлическую мишень, так и для пары соседних магнетронов, занятых в реактивном процессе.

Итак, суммарное распределение равно сумме распределений от одиночных магнетронов, имеющих по одному одностороннему аноду [3]. В результате у концов магнетронов толщина пленки на 20% больше, чем в середине [3]. Снизить указанную неравномерность удастся введением дополнительного анода между магнетронами [3].

4.4. Дополнительные причины неравномерности при реактивном распылении

4.4.1. Влияние состояния поверхности анода

Поверхность анода в реактивном процессе покрывается слоем диэлектрика, который может существенно влиять на режим разряда [2–3, 5, 8]. На поверхности диэлектрика оседают электроны, которые создают электрическое поле внутри диэлектрика и вне его. Внутренние электрические поля могут вызвать электрические пробой диэлектрика. А внешнее поле увеличивает анодное падение потенциала, что требует увеличения напряжения разряда и тем снижает эффективность использования источника питания. Кроме того, локальные неоднородности такого поля могут вызвать неоднородность анодного свечения и увеличение со временем неравномерности скорости распыления вдоль

магнетрона с 2 до 4% [8]. Слишком толстый слой диэлектрика на аноде может перекрыть путь электронов, анод как бы исчезает. Эта тема «исчезающего анода» предмет отдельного рассмотрения (см. главу 5).

4.4.2. Влияние соотношения длин протяженного магнетрона и рейки подачи реактивного газа

Рассмотрим ситуацию, при которой вдоль магнетрона установлена газоподающая рейка, обеспечивающая одинаковые потоки реактивных газов на единицу длины. В этом случае плотность ионного тока реактивного газа (например, азота) на мишень также будет одинакова. В этой ситуации условия распыления будут одинаковы по всей длине мишени. Однако условия осаждения на краях будут отличаться от условий в середине. Отличия состоят в том, что материал, распыляемый на краях, осаждается на сравнительно большей площади. Из-за этого пленка там содержит больше атомов газа и толщина ее существенно ниже, чем в середине. Это приводит к тому, что на краях подложки пленка будет иметь еще более заметные увеличения пропускания, чем при не реактивном процессе.

Чтобы сгладить неравномерность, необходимо чтобы на краях давление реактивного газа было ниже, чем в середине. Это достигается или изменением длины рейки, или, что проще, прикрытием отверстий азотной рейки на ее краях. Тогда степень покрытия поверхности мишени на краях будет ниже, а скорость распыления на краях будет выше. Состав пленки у краев будет ближе к составу пленки у центра магнетрона, отчего ее коэффициент преломления возрастет. Все это снизит пропускание на краях до уровня равного пропусканию в середине, а оптическую толщину пленки подтянет к оптической толщине покрытия в середине подложки.

Количество прикрытых отверстий в азотной рейке определяется по выравниванию пропускания на краях подложки. Одновременно добиваются симметричности распределения пропускания.

4.4.3. Выравнивание неоднородностей нанесенной пленки локальной регулируемой подачей азота или аргона

Локальные неоднородности распределения скорости распыления при не реактивном процессе распыления можно компенсировать локальной дополнительной подачей азота в места, где пропускание недостаточно, то есть в места провала пропускания. Это делали с помо-

щью дополнительной системы подачи реактивного газа в этих местах [1, 8] Тоже было осуществлено в нашей работе Для этого к рейке в соответствующих местах (470 мм от середины магнетрона) прикрепили дополнительные сопла регулируемой подачи азота с помощью автоматической системы напуска В обоих случаях регуляторы дополнительных потоков были выведены наружу Ими можно было регулировать пропускание непосредственно во время процесса, наблюдая пропускание на обоих краях пленки Удалось выровнять пропускание так, что оставшиеся неоднородности не превышали 2-4% То же делали в работе [1], где дополнительно локально подавали кислород, чтобы снизить там скорость нанесения, и аргон там, где надо было ее увеличить У нас и в работе [1] выравнивание скорости распыления на торцах магнетрона проводилось вручную, а в работе [8] – автоматически Для этого использовали разностный сигнал от датчиков оптического пропускания пленки, установленных у торцов магнетрона Этот сигнал управлял подачей аргона у торцов магнетрона

Обычно неоднородности подачи аргона слабо сказываются на форме распределения пропускания наносимой металлической пленки Это объясняется тем, что атомы аргона практически не поглощаются растущей пленкой и достаточно свободно распределяются по всему объему рабочей камеры Поэтому локальная подача аргона увеличивает распыление там всего на 1-4% В реактивном процессе это сказывается сильнее, так как дополнительный аргон еще снижает долю ионов азота в общем, ионном токе, что уменьшает степень покрытия мишени Но эффект все равно не большой 3-7%

Резюме для протяженных магнетронов (длиной более 1,5 м) удается получить равномерность толщины пленки на подложке до $\pm 2\%$ [1, 8]

Литература к главе 4

- 1 Dannenberg R Newcomb R and Ryan A Uniformity control of rate enhanced reactive AC sputtering – 42tf Annual Techn Conf Proc , (1999), Soc of Vac Coaters, p 181-185
- 2 Scholl R Anode problems in pulsed power reactive sputtering of dielectrics – 42tf Annual Techn Conf Proc , (1999), Soc of Vac Coaters, p 169-175
- 3 Sieck P Effect of anode location on deposition profiles for long rotatable magnetrons – 37tf Annual Techn Conf Proc , (1994), Soc of Vac Coaters, p 233-236

- 4 Hillendahl J and Newcomb R Utilization of silicon targets for reactive sputtering from a rotating cylindrical DC magnetron cathode – 36tf Annual Techn Conf Proc , (1993), Soc of Vac Coaters, p 491-494
- 5 Glocker D A An estimate of the potentials developed on coated anodes during pulsed DC reactive sputtering – 42tf Annual Techn Conf Proc , (1999), Soc of Vac Coaters, p 87-90
- 6 Heister U and all Recent developments on optical coatings sputtered by dual magnetron using a process regulation system – 42tf Annual Techn Conf Proc , (1999) Soc of Vac Coaters, p 34-38
- 7 Kirchoff V And Kopte T High power pulsed magnetron sputter technology – 39tf Annual Techn Conf Proc , (1996), Soc of Vac Coaters, p 117-122
- 8 Nadel S J and Greene P Strategies for high reactive sputtering – Thin Solid Films, 392 (2001) p 174-183
- 9 De Booscher W and Cnockaert D Advances in cylindrical magnetrons – 42tf Annual Techn Conf Proc , (1999), Soc of Vac Coaters, p 156-162
- 10 Данилин Б С , Сырчин В К Магнетронные распылительные системы М , «Радио и связь», 1982, 73 с

ГЛАВА 5

ПРОЦЕСС РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ СО СРЕДНЕЧАСТОТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ МАГНЕТРОНА

Получение пленок диэлектриков в процессе реактивного распыления создает массу проблем, связанных с возникновением большого числа пробоев в разрядной системе. Появление пробоев связано с накоплением заряда на поверхности мишени, частично покрытой слоем диэлектрика. Для решения этой проблемы широко применяются среднечастотные источники питания (СЧ ИП). В этой главе рассмотрим причины пробоев, способы их подавления и особенности процесса реактивного распыления при использовании СЧ ИП.

5.1. Причины пробоев на катоде при реактивном магнетронном распылении

Проблема пробоев (образования дуг) при магнетронном разряде, хотя она имеет место и при нереактивном разряде, резко усилилась при реактивном распылении. В процессе реактивного ионного распыления на поверхности мишени из-за взаимодействия с ней атомов и ионов реактивного газа образуется слой диэлектрика. При бомбардировке его положительными ионами из плазмы разряда на его поверхности скапливается положительный заряд, который притягивает электроны из мишени, образуя в диэлектрике сильное электрическое поле [1]. Так образуется конденсатор. Напряжение на конденсаторе растет со временем и в пределе может сравниться с напряже-

нием ИП. Так как разность потенциалов между мишенью и плазмой задана источником питания, то разность потенциалов между плазмой и поверхностью диэлектрика стремится к нулю. И тогда распыление диэлектрика прекращается.

На практике распыление не прекращается, так как заряд на диэлектрике не накапливается до такой степени. Заряд с поверхности диэлектрика сбрасывается при пробоях диэлектрика. Например, в работе [6] был проведен оценочный расчет для процесса получения SiO_2 . Если на слое диэлектрика толщиной 100 нм падает полное напряжение источника питания 700 В, то это создаст в нем электрическое поле с напряженностью $7 \cdot 10^9$ В/м, которая на порядок выше напряженности пробивного поля для SiO_2 — $E_{\text{пр}} = 7 \cdot 10^8$ В/м. В такой ситуации будут иметь место многочисленные пробои, которые обычно называют микропробоями. В той же работе показано, что слой соединения, обладающий заметной проводимостью, не накапливает заряд и не создает пробоев. Это подтверждено экспериментально в процессах получения пленок проводящих соединений SnO_2 , ZnO и In_2O_3 .

Диэлектрики с очень низкой проводимостью, менее 10^{10} (Ом·см)⁻¹, и высокими пробивными напряженностями, такие как Al_2O_3 , AlN , S_3N_4 , SiO_2 и Ta_2O_5 , хорошо накапливают заряд. Если напряженность поля в диэлектрике превысит пробивную напряженность диэлектрика — $E_{\text{пр}}$, то имеют место микропробойи слоя диэлектрика на поверхности мишени. Интервал между микропробоями $t_{\text{пр}}$ определяется временем накопления заряда и равен [1]:

$$t_{\text{пр}} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E_{\text{пр}}}{i}, \quad (5.1)$$

где ϵ_0 и ϵ — диэлектрические проницаемости вакуума и диэлектрика; i — плотность тока положительных ионов на мишень.

Из формулы (5.1) можно сделать несколько выводов. Первый: при заданной плотности ионного тока количество микропробоев не зависит от толщины диэлектрика. Это связано с тем, что с одной стороны, чем меньше его толщина, тем ниже потенциал пробоя, но с другой стороны соответственно выше емкость конденсатора, образованного этим диэлектриком, и из-за этого ниже скорость роста потенциала. В результате микропробойи диэлектрика происходит одновременно на участках с разной толщиной диэлектрика, если плотность ионного тока на них одинакова. Второй вывод: для снижения

количества микропробоев целесообразно снижать плотность тока на мишень, то есть при заданном токе разряда делать зону эрозии больших размеров.

Можно оценить частоту возникновения микропробоев f_{np} на мишени алюминия при получении Al_2O_3 [1], для которого $E_{np} = 1 \cdot 10^8$ В/м и $\epsilon = 10$, а типичная плотность тока 450 А/м²:

$$f_{np} = \frac{1}{t_{np}} = \frac{i}{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E_{np}} = 50 \text{ кГц.} \quad (5.2)$$

Этот оценочный расчет подтверждается тем, что микропробой гасятся при использовании среднечастотного (40–50 кГц) ИП [2–3, 9–10, 23].

Иногда микропробой перерастают в дуговые разряды между мишенью и плазмой или заземленными экранами [2]. Это происходит, если из-за микропробоя на поверхности катода возникает горячее катодное пятно диаметром около 10 мкм [7]. Температура в пятне повышается настолько, что поддерживает высокий ток термоэлектронной эмиссии из катода с типичной плотностью тока $1 \cdot 10^{12}$ А/м². Во время дугового пробоя импеданс разряда резко снижается, ток резко возрастает, а напряжение разряда падает до 80–120 В. В это время из-за наличия магнитного поля дуга может передвигаться по поверхности катода, оставляя след. Возникший дуговой разряд будет существовать, пока работает ИП. Разряд прекращается только после отключения питающего напряжения.

Величина энергии, выделяемой локально в дуговом пробое, определяется электрическими параметрами дуги и свойствами ИП. Даже если предусмотрены специальные электронные схемы снятия напряжения питания при пробое, то отключение в тиристорных ИП происходит только после истечения половины периода (10 мс). Поэтому в тиристорном ИП длительность дуги 5–10 мс, следовательно, энергия пробоя будет 20–200 Дж. Такой энергии достаточно для локального испарения некоторого количества материала катода, которое осядет в виде пятна на подложке, или возможно даже образование микрокапель или микрочастиц и перенос их на подложку с образованием дефектов в растущей пленке [22].

В среднечастотном ИП длительность дуги не превышает 10–50 мкс (в зависимости от частоты). Энергия пробоя в этом случае будет всего 20–1000 мДж. Это на два-три порядка меньше, чем в обычном

тиристорном ИП. Следовательно, все возможные дефекты в пленке, связанные с пробоями, будут проявляться во столько же раз меньше.

Предыдущие оценки были сделаны в предположении, что плотность тока и толщина диэлектрика одинаковы по площади мишени, что для магнетронов не верно. Для магнетронов характерно неравномерное распределение тока и диэлектрика по площади мишени.

При получении окислов центральная часть зона эрозии обычно свободна от диэлектрика. По мере удаления от края свободной части зоны эрозии толщина слоя диэлектрика возрастает, а плотность ионного тока снижается. У границы зоны эрозии толщина диэлектрика близка к нулю, там же на него приходится максимальная плотность ионного тока. Поэтому в диэлектрике у границы с поверхностью открытого металла в зоне эрозии резко возрастает напряженность электрического поля [1, 4] и, соответственно, количество микропробоев. Поэтому именно этот сравнительно небольшой по площади участок авторы работ [1, 4] считают ответственным за пробой. Но мы придерживаемся другого мнения.

Дело в том, что частота возникновения микропробоев f_{np} на много порядков превышает частоту возникновения дуговых пробоев на мишени [1–2]. То есть дуга, хотя и провоцируется микропробоем, но не каждым, а только таким, в котором реализуется достаточная плотность энергии для образования горячего катодного пятна на мишени. Плотность энергии микропробоя диэлектрика можно оценить по формуле:

$$W = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon}{2} \cdot \Delta \cdot E_{np}^2. \quad (5.3)$$

Для возникновения катодного пятна необходима критическая плотность энергии W_k . Через нее определим необходимую минимальную толщину диэлектрика:

$$\Delta_{min} = \frac{2 \cdot W_k}{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E_{np}^2}. \quad (5.4)$$

Таким образом, мы видим, что для перерастания микропробоя в дуговой пробой необходима минимальная толщина диэлектрика, которая зависит только от свойств самого диэлектрика. Возможно, этим объясняется заметная разница в количестве дуговых пробоев в реактивном магнетронном процессе получения различных диэлектриков.

Из-за большой неравномерности плотности тока по поверхности мишени в магнетронном источнике достаточная толщина диэлектрика будет иметь место не вблизи краев свободной части зоны эрозии, а поодаль от нее. И, несмотря на то, что количество микропробоев там ниже, вероятность перерастания их в дуговые пробои значительно выше. Поэтому именно там, по нашему мнению, имеет место большинство дуг.

5.2. Подавление пробоев на катодe с помощью импульсного СЧ ИП

Как было показано выше, причиной микропробоев является положительный заряд, накапливаемый на поверхности диэлектрика. Для устранения микропробоев необходимо не допускать его накопления и периодически устранять этот заряд. Устраняют заряд, привлекая электроны из плазмы разряда с помощью периодической паузы в распылении (униполярное импульсное распыление) или периодической подачи на мишень кратковременных положительных импульсов (двуполярное импульсное распыление).

Критическая минимальная частота импульсов, необходимая для исключения микропробоев $f_{кр}$, определяется по формуле (5.2). Критическая частота растет с ростом тока в соответствии с формулой (5.2), что подтверждено экспериментально [9–10].

Для достижения указанной цели применяются импульсные СЧ ИП [14], подающие на мишень магнетрона периодическое напряжение питания с частотой в диапазоне 10–150 кГц. В каждом периоде имеется отрицательный импульс с электрическими параметрами, необходимыми для распыления мишени и длительностью, не превышающей $t_{пр}$, и пауза или реверсный положительный импульс для устранения заряда на поверхности диэлектрика, образовавшегося на поверхности мишени. Из-за высокой подвижности электронов для их извлечения из плазмы достаточен потенциал всего несколько десятков вольт. Даже если напряжение во время положительного импульса не подается, то есть имеет место пауза, то заряд на поверхности диэлектрика все равно удаляется за счет притягивания электронов из плазмы электрическим полем самого заряда [2].

Наличие пробоев не зависит от амплитуды положительных импульсов [3]. Обычно величина положительного импульса лежит в диапазоне 0–20% от величины отрицательного импульса [3, 10, 14].

В начале реверсного импульса на поверхность мишени приходит большой электронный ток, амплитуда которого может в несколько раз превышать амплитуду основного импульса [31]. Такой ток длится всего 0,1–0,15 мкс. После чего ток спадает до нуля, а затем устанавливается величиной несколько десятых долей ампера и длится все оставшееся время реверсного импульса. Чем больше длительность импульса, тем больше отрицательный заряд, аккумулируемый поверхностью мишени. Это способствует снижению частоты пробоев.

Решающим фактором для подавления пробоев является длительность положительных импульсов, которая должна быть больше некоторой минимальной. Последняя определяется достижением равновесия, при котором положительный заряд, накопленный во время отрицательного импульса, успевает компенсироваться во время положительного импульса [3, 9–10]. Из-за высокой подвижности электронов для процесса компенсации достаточно всего 2–10 мкс [10, 15]. Таким образом, длительность положительного импульса может не превышать этой длительности.

Если же во время короткого положительного импульса не весь накопленный на поверхности диэлектрика заряд успеет компенсироваться электронами, то величина заряда будет увеличиваться с каждым периодом, и начнутся пробои. Чтобы предотвратить накопление заряда из-за малой длительности положительного импульса, необходимо снижать и длительность отрицательного импульса [9–10]. То есть снижать период, увеличивая частоту импульсов до величины, при которой пробоев нет. Таким образом, чем выше частота, тем меньше вероятность появления пробоев. Однако, повышение частоты, как мы увидим дальше, ведет к снижению скорости распыления. То есть частота не должна существенно превышать критическую.

Таким образом, большое значение имеет соотношение между длительностями отрицательного и положительного импульсов. Оно выражается так называемым коэффициентом нагрузки [3, 10]:

$$\eta = \frac{\tau}{\tau_+ + \tau_-} = \frac{\tau_-}{T} = f \cdot \tau_-, \quad (5.5)$$

где τ_- – длительность отрицательного импульса, τ_+ – длительность положительного импульса.

В работе [3] показано, что для устранения пробоев величина η не должна превышать 0,65-0,7. В эксперименте получено, что при одинаковой длительности положительного импульса τ_+ критическая частота ниже у сбалансированного магнетрона, чем у несбалансированного [10]. При прочих равных условиях, чем больше рабочее давление, тем ниже критическая частота [9].

Рекомендации по подбору режима реактивного распыления [10]:

- Установить наименьшую частоту, при которой пробои не видны в течение долгого времени
- Установить наименьшую допустимую длительность положительного импульса

Подбор режима необходимо делать на наибольшем токе разряда. Тогда и при меньших токах пробоев не будет.

5.3. Процессы в плазме среднечастотного разряда

Процесс переключения с отрицательного на положительный импульс напряжения длится всего несколько сотых микросекунды [3, 9–10]. В это время ток на мишень тоже меняет полярность: вместо ионного становится электронным. Из-за значительно большей подвижности электронов их ток на мишень почти мгновенно подсакивает до довольно больших величин, намного превышающих величину тока ионов во время отрицательного импульса. Амплитуда электронного тока определяется амплитудой предыдущего тока ионов и величиной суммы сопротивлений ИП и плазмы разряда. Последнее сопротивление составляет примерно 0,6 Ом [3].

Далее величина тока экспоненциально снижается из-за снижения плотности плазмы [3, 10, 20]. Объясняется это тем, что во время положительного импульса существование плазмы больше не поддерживается разрядом. Но она существует еще некоторое время, пока ее частицы обоих знаков благодаря диффузии не уйдут на стенки арматуры или вакуумной камеры.

Величину времени рассасывания для плазмы, заполняющей первоначально сферу радиусом R , можно приблизительно рассчитать по формуле (5.6) [10]. Например, для ионов кислорода в сфере 10 см для двух электронных температур 30 и 3 эВ постоянные времени рассасывания будут соответственно 7,5 и 26 мкс.

$$\tau = \frac{R}{1.11} \cdot \sqrt{\frac{M_i}{2 \cdot k \cdot T_e}}, \quad (5.6)$$

где M_i – масса ионов, T_e – электронная температура.

Постоянная времени снижения тока электронов зависит от формы магнитного поля магнетрона (сбалансированный или не сбалансированный) и от химического состава плазмы. Она была оценена для несбалансированного магнетрона в работе [10] величиной 15 мкс и в работе [20] величиной примерно 20-30 мкс. Для сбалансированного магнетрона снижение плотности плазмы и тока электронов описывается двумя постоянными времени: 3-5 мкс (начальная быстрая стадия) и 30-40 мкс (последующая медленная стадия) [9–10]. Большая постоянная времени у несбалансированного магнетрона получается из-за большего объема, занимаемого его плазмой. Наличие двух значений постоянной времени объясняется, возможно, наличием в магнетронной плазме электронов с двумя различными температурами [10].

В работе [12] показано, что еще быстрее, чем ток, исчезает оптическая эмиссия плазмы во время положительного импульса [12]: за 5 мкс свечение плазмы практически исчезает. Это свидетельствует о том, что время жизни возбужденных молекул в плазме еще короче времени диффузии ионов на стенки камеры и не превышает нескольких микросекунд.

Если промежуток времени между отрицательными импульсами не превышает двух-трех постоянных времени, то ток электронов не успевает снизиться до нуля, так как за это время не все носители заряда успевают уйти из плазмы на стенки камеры. Поэтому во время переключения напряжения с положительного на отрицательное в объеме еще существуют электроны и ионы, и специальный поджиг плазмы высоким напряжением не требуется. Плотность плазмы в конце положительного импульса определяет величину возникающего с началом отрицательного импульса тока ионов. Затем ток ионов нарастает со временем. Время $\tau_{\text{восст}}$, необходимое для возрастания тока ионов до установившегося уровня [10, 20], зависит от длительности положительного импульса. Чем оно больше, тем труднее последующее восстановление плазмы: требуется большее $\tau_{\text{восст}}$ и большее напряжение в начале отрицательного импульса [9]. В работах [9–10] время $\tau_{\text{восст}}$ не превышает 2 мкс, а в работе [12] – 15 мкс.

Аналогичные закономерности были замечены в поведении ВЧ-плазмы, созданной антенной (глава 16), к которой подводили ВЧ-мощность, модулированную частотой 12,5 кГц [28]. ВЧ-мощность включалась на 50 мкс. Это было минимальное время, необходимое для достижения установившегося уровня плотности плазмы. Затем питание антенны отключали на 30 мкс. Это максимальное время, за которое плазма еще не исчезнет.

Если длительность положительного импульса постоянна, то увеличение тока разряда (а, соответственно, и увеличение исходной концентрации плазмы в районе мишени) сокращает время восстановления плазмы [9, 20]. Изменение давления в диапазоне 0,4–1,3 Па и частоты в диапазоне 20–70 кГц не оказывает существенного влияния на восстановление плазмы [9]. Хотя в работе [20] отметили, что увеличение давления аргона до 1 Па сокращало время восстановления плазмы.

Если ИП используется в режиме стабилизированного тока, то наблюдается некоторое увеличение напряжения в начале отрицательного импульса [9, 20]. А так как форма ВАХ магнетронных источников такова, что ток резко возрастает при увеличении напряжения, то благодаря этому происходит более быстрое восстановление плотности плазмы, тока ионов и скорости распыления. Таким образом, скорость восстановления плазмы больше при применении ИП в режиме стабилизированного тока. Тем не менее, на практике используют среднечастотные ИП как в режиме стабилизированного тока, так и в режиме стабилизированного напряжения. Выбор режима определяется формой вольтамперной характеристики реактивного разряда (глава 9).

При питании магнетрона переменным током синусоидальной формы осциллограмма тока повторяла бы осциллограмму напряжения, если бы плазма не была нелинейной системой, то есть свойства электронов и ионов были бы одинаковы [23]. На самом деле их подвижности отличаются на несколько порядков (необходимо помнить, что поперек магнитных силовых линий подвижность ионов выше подвижности электронов, а вдоль линий – наоборот). Этим и объясняется такое сильное влияние конфигурации магнитного поля на работу магнетронных распылительных систем. Поэтому осциллограмма тока существенно отличается от осциллограммы напряжения. В частности, наблюдается отставание по фазе тока разряда относительно приложенного напряжения. Оно тем более, чем больше мощность разряда и его рабочее давление [23].

Те же причины приводят к тому, что при подаче на катод магнетрона импульсов прямоугольной формы, осциллограмма тока разряда отличается от осциллограммы напряжения. Наиболее заметны следующие существенные отличия: падение тока во время положительного импульса и задержка его нарастания во время отрицательного импульса [9–10, 12, 20]. Из-за этого при снижении давления аргона или длительности отрицательного импульса форма импульса тока изменяется от трапециидальной к треугольной [20].

5.4. Влияние импульсного СЧ ИП на скорость осаждения пленки

При переходе от распыления на постоянном токе к импульсному СЧ-распылению скорость распыления, как ожидается, должна снижаться. Это связано с двумя причинами: во-первых, часть периода распыления отсутствует [11, 20], и, во вторых, в начале отрицательного импульса пока плазма не восстановилась, скорость распыления понижена.

Действительно, скорость осаждения прозрачных пленок Al_2O_3 с коэффициентом преломления не менее 1,55, то есть примерно стехиометрических пленок, уменьшалась при увеличении частоты импульсов [10]. Объясняется это тем, что скорость осаждения в отрицательном импульсе достигает установившегося уровня только тогда, когда плазма полностью восстановится, то есть когда ток ионов и мощность разряда достигнут установившегося уровня. Время, затрачиваемое на восстановление плазмы, уменьшает эффективную длительность отрицательного импульса и его эффективность, и тем больше, чем короче отрицательный импульс [20]. Поэтому при постоянном τ_+ скорость осаждения снижается с ростом частоты (рис. 5.1) [10, 23].

Было показано [10, 20], что с уменьшением τ_+ растет скорость осаждения. Это естественно, так как распыление приближается к режиму распыления на постоянном токе. Когда при постоянной частоте импульсов τ_+ снижается, увеличиваются не только скорость осаждения, но и одновременно приложенная мощность. Причем для любой частоты скорость осаждения с точностью 10% прямо пропорциональна мощности разряда, определяемой как произведение энергии одного отрицательного импульса на частоту следования (рис. 5.1) [10, 20]. Такая зависимость обычно справедлива для всех случаев магнетронного распыления, реактивного и не реактивного.

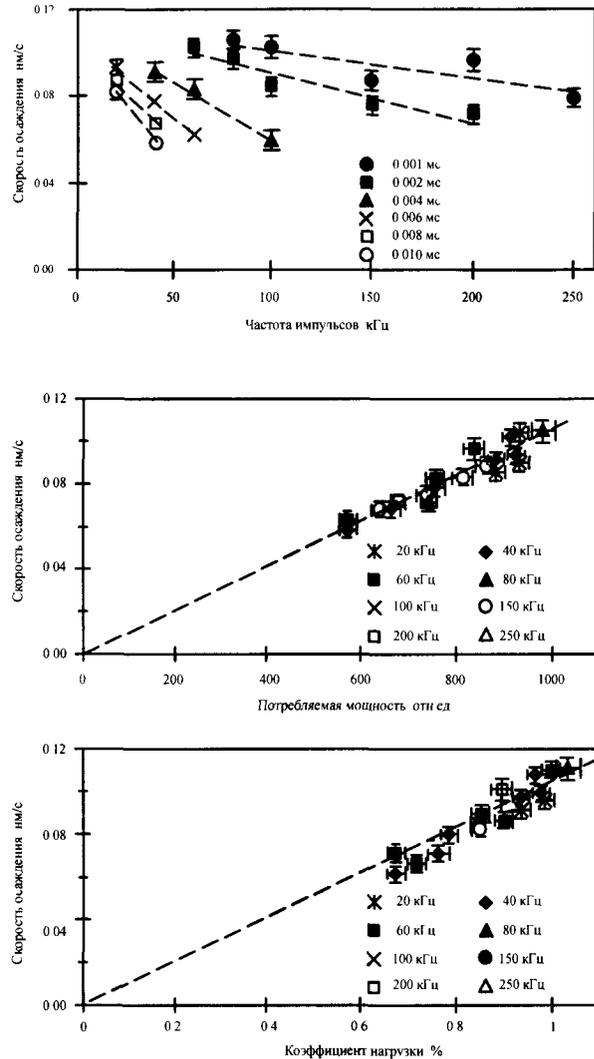
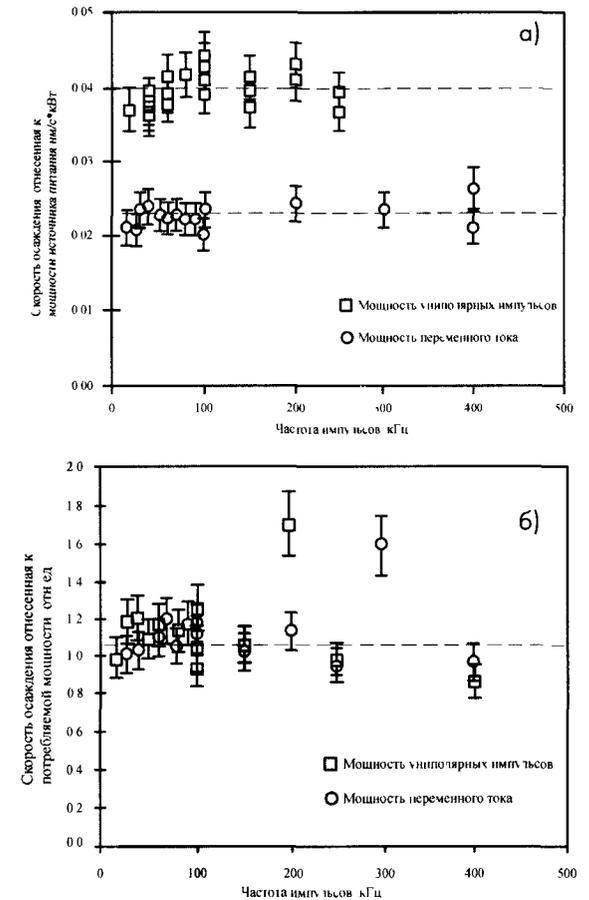


Рис. 5.1. Скорость осаждения в зависимости от: *a* – частоты импульсов при различных длительностях импульсов обратной полярности, *б* – мощности, потребляемой разрядом при различных частотах, *в* – коэффициента нагрузки при различных частотах импульсов и длительностях импульсов обратной полярности в мкс. Условия осаждения: ток катода 9 А, давление аргона 0,4 Па [10]

Рис. 5.2. Зависимости от частоты скорости осаждения пленки, отнесенной к: *a* – мощности, расходуемой источником питания, при различных частотах импульсов или переменного тока; *б* – мощности, потребляемой разрядом, оцениваемой по площади импульса на экране осциллографа. Условия осаждения: ток катода 9 А, давление аргона 0,4 Па [10]



В то же время эффективность осаждения, или удельная скорость осаждения, понимаемая как скорость осаждения, приходящаяся на единицу эффективной (поглощенной) мощности, практически не меняется при изменении τ_+ . Точно так же она не зависит от частоты импульсов (рис. 5.2) [10]. Это же справедливо для распыления на синусоидальном переменном токе. Но эффективность для переменного тока в два раза меньше (рис. 5.2) [10], так как в этом случае половину периода распыление не происходит. Если же учитывать мощность, потребляемую разрядом только во время отрицательных (распыляющих) импульсов, то эффективность импульсного распыления и распыления на переменном токе оказываются одинаковыми (рис. 5.2) [10, 20].

Кроме эффективной (поглощаемой) разрядом мощности при высоких частотах в цепях питания магнетрона присутствуют [21], так называемые, отраженная и циркулирующая мощности. Их появление связано с тем, что сопротивление магнетронного разряда имеет существенную емкостную составляющую. Она увеличивается при появлении на поверхности мишени диэлектрической пленки в реактивном процессе [21]. Изменения реактивных составляющих мощности очень чувствительны к изменениям параметров разряда, в особенности к изменению состояния поверхности мишени. Это дает возможность, измеряя реактивную составляющую мощности, контролировать процесс и делать его стабильным [21].

Обычно наблюдается прямая пропорциональность между скоростью нанесения и коэффициентом нагрузки (рис. 5.3) [3, 10, 20]. Но при высоких частотах, как оказалось [11], при снижении коэффициента нагрузки до 60% скорость осаждения снижается только до 70% от скорости распыления на постоянном токе. То есть, существует и обратная тенденция увеличения скорости осаждения благодаря возникновению режима «предпочтительное распыление», в котором распыление диэлектрика идет с повышенным коэффициентом распыления [14].

Режим «предпочтительное распыление» заключается в следующем. Когда на мишень в положительном импульсе подается, например, +100 В, электроны из плазмы не только компенсируют положительный заряд ионов на поверхности диэлектрика, но и заряжают эту поверхность отрицательным зарядом. В результате на поверхности диэлектрика относительно мишени образуется потенциал -100 В. При переключении напряжения на мишени на отрицательное, например, на -400 В, потенциал поверхности диэлектрика относительно плазмы достигает -500 В. Этим повышенным потенциалом ионы аргона вытягиваются из плазмы, ускоряются и бомбардируют диэлектрик, распыляя его более эффективно. Степень покрытия мишени уменьшается, а скорость распыления материала мишени возрастает. Чем выше амплитуда положительного импульса, тем больше скорость нанесения. Так при увеличении амплитуды с 10 до 20% величины амплитуды отрицательного импульса, скорость возрастает в 1,5 раза (рис. 5.4).

Величина положительного импульса должна быть достаточно высокой, чтобы сделать заметным режим «предпочтительное распыление», но не превышать величины, вызывающей распыление арматуры. Обычно используют амплитуду положительного импульса до 200 В [29].

Рис. 5.3. Скорость осаждения пленок окиси алюминия, приходящаяся на 1 ампер тока разряда, в нм/мин/А в зависимости от коэффициента нагрузки [3]

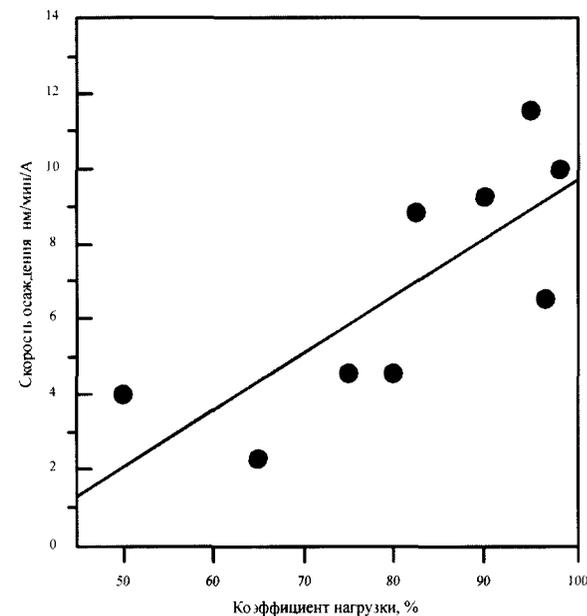
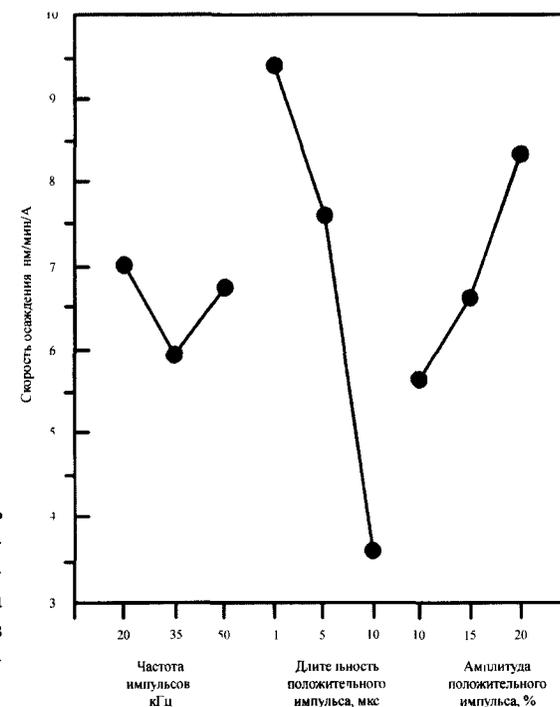


Рис. 5.4. Скорость осаждения пленок окиси алюминия, приходящаяся на 1 ампер тока разряда, в зависимости от параметров разряда [3]



Точно также и длительность положительного импульса должна быть достаточной для перезарядки поверхности диэлектрика. Так как отрицательный заряд компенсируется ионами за короткое время в начале отрицательного импульса, то предпочтительное распыление происходит только в это время в начале отрицательного импульса, и его эффективность заметно проявляется только на высоких частотах 80–150 кГц, когда длительность отрицательного импульса достаточно мала. Там она проявляется даже при образовании на поверхности мишени пленок проводящих соединений, таких как TiN, TaN, ITO [14].

5.5. Работа ИП при возникновении дуги

Применение СЧ ИП не гарантирует полного исключения возникновения дуг в процессе распыления. Поэтому в современных ИП применяют дополнительные специальные системы подавления возникающих дуг. Параметры таких систем, подавляющих отдельные дуги, обсуждаются в работах [31–34]. Общим способом подавления возникающих дуг является снятие напряжения питания или резкая смена полярности питающего напряжения. Внеочередной реверсный импульс прерывает дугу и перезаряжает поверхность диэлектрика. Далее процесс продолжается обычным образом.

5.5.1. Способы обнаружения пробоя

Возникшая дуга проявляется в возрастании тока и в резком падении напряжения разряда. На этом основаны основные способы ее обнаружения. Типичный предел падения напряжения устанавливается в диапазоне 50–150 В [22, 31]. Фиксация пробоя занимает не более 1 мкс.

5.5.2. Влияние времени задержки выключения ИП после пробоя на стабильность реактивного процесса напыления

Казалось бы, что при возникновении дуги, чем быстрее среагирует защита, тем лучше. Действительно, за малое время существования дуги меньшая энергия локально действует на мишень и производит меньшие разрушения. Однако эксперимент [31, 34] не подтверждает этого. Для каждой пары материал мишени – реактивный газ существует оптимальное с точки зрения достижения минимального числа дуг время задержки выключения ИП в диапазоне 5–400 мкс. Так, на-

пример, для цинковой или индиевой мишени с кислородом оптимальное время задержки оказалось 50 мкс [34], и это притом, что ИП позволял отключать питающее напряжение через 10 мкс. Для алюминиевой мишени в среде кислорода время задержки 5 мкс дает существенно лучший результат, чем время задержки 1 мкс.

Объясняется это тем, что большая энергия, действующая на мишень в дуге, может быть полезна, так как очищает поверхность мишени от локальных излишних островков окисла, что уменьшает вероятность образования последующих дуг во время процесса распыления. Это, безусловно, полезно во время очистки поверхности мишени в начале процесса распылением ее на заслонку. Во время нанесения пленки на подложку это тоже бывает полезно. Однако в некоторых случаях время задержки нельзя увеличивать, когда наиболее важно исключить появление в пленке дефектов, вызванных локальными энергичными воздействиями на мишень.

5.5.3. Влияние времени выключения импульсного СЧ ИП после пробоя на стабильность реактивного процесса напыления

При возникновении дуги включается защита импульсного СЧ ИП, которая отключает его от магнетрона или подает на магнетрон положительный импульс. В это время в вакуумной камере дуга прекращается, и носители заряда рассеиваются. После окончания этих процессов возможно безопасное повторное включение ИП. Чем на большее время отключается ИП, тем больше вероятность, что повторное включение будет безопасным. При не реактивных процессах распыления обычно можно отключать питание магнетрона на десятках миллисекунд.

В реактивном процессе распыления время отключения питания влияет на стабильность процесса напыления [32]. Чем на большее время отключается ИП, тем больше возрастает в это время парциальное давление реактивного газа, степень покрытия поверхности мишени и растущей пленки. И тем дольше эти параметры будут возвращаться к первоначальным величинам после включения ИП [32]. Это, во-первых, приводит к неконтролируемым изменениям свойств пленки, и, во-вторых, может вывести процесс из заданной рабочей точки в режим полностью покрытой диэлектриком мишени. Поэтому экспериментально получено, что время выключения импульсного СЧ ИП после пробоя не должно превышать 0,8–1,0 мс [32].

5.6. Причины пробоев на аноде при реактивном магнетронном разряде и их устранение

5.6.1. Причины пробоев на аноде. Проблема «исчезающего» анода

В процессе реактивного нанесения диэлектрических пленок на аноде магнетронного источника возникает ситуация, аналогичная ситуации на поверхности катода [8]. На слое диэлектрика, осаждающегося на аноде, аккумулируются электроны из плазмы разряда, которые создают в нем электрическое поле. Равновесный потенциал на поверхности диэлектрика обычно отрицательный и может достичь на хорошем диэлектрике потенциала катода, что приведет к прекращению разряда. В реальных случаях этот потенциал существенно ниже катодного, он растет со временем нанесения от -6 до -25 В из-за увеличения толщины диэлектрика и тем быстрее, чем меньше площадь анода [5]. Даже такие небольшие изменения потенциала вызывают существенные изменения тока через анод, покрытый диэлектриком. Поскольку покрытие анода диэлектриком может быть неоднородным, то и потенциал может распределяться неравномерно. Следствием чего будет появление локальной неоднородности распыления.

Если же напряженность поля в диэлектрике превысит пробивную, то произойдет пробой. Его результатом может быть вылет частиц покрытия, загрязняющих слой, наносимый на изделие, и выделение заметного количества газов, влияющих на режим разряда.

Проблемы роста заряда на диэлектрике и его пробоя на аноде решаются, в какой-то мере, применением среднечастотных импульсных ИП [8]. В СЧ-разряде отрицательный заряд накапливается на поверхности анодного диэлектрика во время распыляющей части импульса. В это время зазор между анодом и плазмой составляет всего несколько дебаевских радиусов, то есть доли миллиметра.

Во время импульса обратной полярности [5] отрицательный заряд должен компенсироваться током ионов из плазмы разряда. К сожалению, величина этого тока ограничена низкой подвижностью ионов и замедляющим действием пространственного заряда. Во время импульса обратной полярности потенциал плазмы вырастает почти до амплитуды этого импульса. Анод в это время отрицателен по отношению к плазме, и анодный зазор расширяется мгновенно. В захваченном им объеме собираются все ионы, кото-

рые двигаются к аноду под действием электрического поля. Они компенсируют отрицательный заряд, и тогда анод снова работает коллектором электронов.

Из-за различия в подвижности ионов и электронов компенсация ионами заряда на анодном диэлектрике происходит менее эффективно, чем компенсация электронами на катоде [5]. Поэтому, как показано в [5], для анода, покрытого диэлектриком, существует предельная плотность тока, при превышении которой анод не работает коллектором электронов, и резко встает проблема исчезающего анода (hidden anode). Эта критическая плотность тока зависит от концентрации ионов и энергии электронов в плазме, а так же от частоты ИП и длительности положительного импульса. Если плотность тока на анод не велика и не превышает критической, то диэлектрик на аноде практически не влияет на работу анода. Но если плотность тока превышает критическую ($2-10$ А/м²), то, несмотря на применение импульсного СЧ ИП, заряд на анодном диэлектрике не компенсируется, и анод перестает работать коллектором электронов [5]. В этом случае применяют устройства, в которых анод может очищаться от диэлектрика непосредственно во время процесса.

Используют два варианта: дуальное магнетронное распыление [Dual Magnetron Sputtering (DMS)] и мультианодное распыление, оно же называется «распыление с дополнительным анодом» [Redundant Anode Sputtering (RAS)].

5.6.2. Дуальное магнетронное распыление

При дуальном магнетронном распылении два одинаковых, либо с противоположными магнитными системами [29] магнетрона, электрически изолированные друг от друга, устанавливаются рядом в одной вакуумной распылительной камере и питаются в противофазе среднечастотным импульсным двуполярным напряжением синусоидальной [23] или прямоугольной [2, 26] формы. В такой ситуации одну половину периода один магнетрон работает катодом, а другой – анодом. В другую половину периода – наоборот. Мишень магнетрона, работающего в данную половину периода катодом, очищается в это время от излишнего диэлектрика. Таким образом, поверхности мишеней поочередно очищаются, что не дает вырасти там толстому сплошному слою диэлектрика, и это позволяет предотвратить «исчезновение» анода.

Некоторую проблему представляет собой неизбежная небольшая (10%) асимметрия магнетронов, работающих дуально [23]. Компенсировать ее можно, изменяя баланс мощностей, подводимых к магнетронам. Делают это, изменяя длительность чередующихся импульсов. Другой способ – подать небольшое компенсирующее постоянное напряжение на один из магнетронов.

Дуальное магнетронное распыление (DMS) с импульсным ИП в варианте «Twin-Mag» фирмы Leybold AG позволяет независимо регулировать параметры импульсов, приходящих на каждую мишень, что дает дополнительную возможность одновременно распылять разные металлы и получать пленки сплавов контролируемого состава [22].

Для того чтобы электроны могли проходить от одного магнетрона к другому, мишени должны «видеть» друг друга, то есть путь электронов должен быть максимально коротким [22, 24]. Кроме того, оказалось, более целесообразно использовать магнитные системы магнетронов противоположной полярности (CFUBMS) [29]. Тогда ток ионов на подложку в 2–3 раза выше, чем при магнетронах с одинаковой полярностью магнитных систем (MFUBMS).

Развитием системы «Twin-Mag I» стала система «Twin-Mag II» [24]. Новым в этой системе является расположение мишеней магнетронов не в одной плоскости, а под углом (20–60°) друг к другу. Одновременно увеличивается ширина мишеней: с 100 до 240 мм [24–25]. Это, в свою очередь, позволило увеличить подводимую к магнетронам мощность и количество материала в мишени.

При питании пары магнетронов двуполярными импульсами зажигание разряда затруднено тем, что максимальная плотность электронов и ионов находится у мишени магнетрона, который уже отработал катодом, а у второго магнетрона, который должен стать катодом, плотность заряженных частиц понижена. Поэтому целесообразно применение специального поджига.

Дуальное магнетронное распыление (DMS) с импульсным ИП успешно решает проблемы «исчезающего» анода и пробоев на катоде. Этот метод получил широкое распространение, и с его помощью успешно получали пленки диэлектриков. Но ему свойственны свои недостатки:

1) Требуется два магнетрона, что усложняет и удорожает оборудование. Такую систему невозможно встроить в существующие установки, так как там не предусмотрено достаточно места для второго магнетрона.

2) Работе мишеней в качестве анодов мешает окружающее их магнитное поле. Оно препятствует движению электронов и увеличивает анодное падение потенциала, что, в свою очередь, снижает скорость распыления.

5.6.3. *Пакетное импульсное распыление*

Частично недостатки дуального распыления снимаются в пакетном импульсном распылении [35]. При таком распылении на один из магнетронов подается пакет униполярных импульсов с небольшими паузами. В это время этот магнетрон работает как одиночный катод, а второй магнетрон служит анодом. Поверхность мишени второго магнетрона покрывается диэлектриком, но достаточно медленно, чтобы было возможно подать на магнетрон 10–1000 импульсов. Затем такой же пакет импульсов подается на второй магнетрон, а первый в это время служит анодом. Таким образом, решаются обе проблемы: подавления дугообразования на катоде и исчезающего анода. Преимуществом данного метода является малые паузы между импульсами в пакете, так как здесь нет опасности повреждения переключающих ключей в ИП. Во время малой паузы плазма не успевает рассеяться, и во время рабочего импульса ток разряда быстро нарастает, даже без применения поджигающего напряжения. Форма импульса тока становится из треугольной прямоугольной, что позволяет более эффективно использовать ИП.

5.6.4. *Распыление с дополнительным анодом*

Распыление с дополнительным анодом (РДА) – альтернатива дуальному импульсному магнетронному распылению в решении проблемы «исчезающего анода». Оно конструктивно проще и не имеет существенных недостатков, присущих дуальному магнетронному распылению.

В РДА используется всего один магнетрон [то есть Singly-Magnetron-Sputter-System (SMS)], два анода и среднечастотный ИП, имеющий на выходе трансформатор [8]. Вторичная обмотка трансформатора имеет среднюю точку, соединенную с катодным узлом магнетрона, а ее крайние выводы присоединены к анодам.

Система работает следующим образом. Каждую половину периода один из анодов имеет положительный потенциал относительно катодного узла, а другой – отрицательный. Площадь анодов достаточно велика, магнитное поле около него отсутствует. Поэтому нет

препятствий для движения электронов к положительному аноду. Он работает в эту половину периода коллектором электронов. Анодное падение потенциала мало, и плазма имеет потенциал положительно-го анода. Катодный узел имеет отрицательный относительно плазмы потенциал, под действием которого мишень распыляется. Второй анод в это время имеет вдвое больший отрицательный потенциал, чем катод, благодаря чему анод тоже распыляется и очищается от диэлектрика.

Во время второго полупериода катод все так же распыляется, а очищается другой анод. В результате катод распыляется все время, а аноды, чередуясь, очищаются от попавшего на них диэлектрика.

Поскольку время переключения напряжения между двумя полупериодами мало, плазма не гаснет, и ее плотность не снижается. Поэтому при включении каждого следующего полупериода не требуется повышенного напряжения для поджига плазмы. Однако отрезок времени переключения играет существенную роль. В это время все электроды имеют почти одинаковый потенциал, равный потенциалу плазмы, а поверхность диэлектрика, покрывающего электроды, имеет положительный относительно плазмы потенциал. Он вытягивает электроны из плазмы. Заряд на поверхности диэлектрика компенсируется, и причина пробоев устраняется. Более сложные варианты с несколькими анодами описаны в работах [36–37].

Литература к главе 5

- Scholl R.A. Advance in arc handling in reactive and other difficult processes. – 37th Annual Techn. Conf. Proc., (1994), Soc. of Vac. Coaters, p. 312-316.
- Schiller S., Goedicke K., Kirchhoff V., Potentials of the pulse magnetron sputter technology. – Proceedings of seventh international conference on vacuum web coatings, Miami, Florida, November 10-12, 1993, Ed. R.Bakish.
- Kelly P.J. and all. Reactive pulsed magnetron sputtering process for alumina films. – J. Vac. Sci. Technol. A, 2000, v. 18, №6, p. 2890-2896.
- Scherer M. and all. Reactive alternating current magnetron sputtering of dielectric layers. – J. Vac. Sci. Technol. A, 1992, v. 10, №4, part.2, p. 1772-1776.
- Glocker D.A. An estimate of the potentials developed on coated anodes during pulsed DC reactive sputtering. – 42th Annual Techn. Conf. Proc., (1999), Soc. of Vac. Coaters, p. 87-90.
- Szczyrbowski J. and Teschner G. Reactive sputtering of SiO₂ layer large-scale substrate using an AC twin-magnetron cathode – 38th Annual Techn. Conf. Proc., (1995), Soc. of Vac. Coaters, p. 389-394.
- Schulke T., Siemroth P., Vacuum arc cathode spots as a self-similarity phenomenon. – IEEE Trans. on plasma science, v. 24, №1, 1996, p. 63-64.
- Scholl R. Anode problems in pulsed power reactive sputtering of dielectrics. – 42th Annual Techn. Conf. Proc., (1999), Soc. of Vac. Coaters, p. 169-175.
- Belkind A., Freilich A. and Scholl R. Electrical dynamics of pulsed plasmas. – 41st Annual Techn. Conf. Proc., (1998), Soc. of Vac. Coaters, p. 321-326.
- Belkind A., Freilich A. and Scholl R. Using pulsed direct current power for reactive sputtering of Al₂O₃. – J. Vac. Sci. Technol. A, 1998, v. 17, №4, p.1934-1940.
- Graham M.E. and Sproul W.D. Pulsed-DC reactive sputtering – new opportunities. – 37th Annual Techn. Conf. Proc., (1994), Soc. of Vac. Coaters, p. 275-279.
- Ohsaki E. and all., High-rate deposition of SiO₂ by modulated DC reactive sputtering in the transition mode without a feedback system. – Thin Solid Films, 1996, v. 281-282, p. 213-217.
- Macak K. and all. Ionized sputter deposition using an extremely high plasma density pulsed magnetron discharge. – J. Vac. Sci. Technol. A, 2000, v. 18, №4, p. 1533-1537.
- Seller J.C. Asymmetric bipolar pulse DC – an enabling technology for reactive PVD. – 39th Annual Techn. Conf. Proc., (1996), Soc. of Vac. Coaters, p. 123-127.
- Barnat E. and Lu T.-M. Pulsed bias magnetron sputtering of thin films on insulators. – J. Vac. Sci. Technol. A, 1999, v. 17, №6, p. 3322-3326.
- Технология тонких пленок. Справочник. Т.1. Под ред. Л. Майссела и Р. Глэнга. Пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона и Г.Г. Смолко. М., Сов. радио, 1977. 664 с.
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., Наука, 1992.
- Труды постоянно действующего семинара «Электровакuumная техника и технология». Под ред. А.В. Горина, М., 1999 г., 168 с.
- Sproul W.D. and all. Reactive direct current magnetron sputtering of aluminum oxide coatings. – J. Vac. Sci. Technol. A, 1995, v. 13, №3, p. 1188-1191.
- Musil J. and all. Pulsed dc magnetron discharge for high-rate sputtering of thin films. – J. Vac. Sci. Technol. A, 2000, v. 19, №2, p. 420-424.
- Posadowski W.M., Pulsed magnetron sputtering of reactive compounds. – Thin Solid Films, 1999, v. 343-344, p. 85-89.
- Scholl R.A. Reactive PV deposition of insulators. – 39th Annual Techn. Conf. Proc., (1996), Soc. of Vac. Coaters, p. 31-34.
- Kirchoff V., Kopte T. High-Power pulsed magnetron sputter technology. – 39th Annual Techn. Conf. Proc., (1996), Soc. of Vac. Coaters, p. 117-122.
- Heister U. and all. Twin_MagTM II: attempts to improve an excellent sputter tool. – Thin Solid Films, 1999, v. 351, p. 27-31.
- Heister U. and all. Recent developments on optical coatings sputtered by dual magnetron using a process regulation system. – 42th Annual Techn. Conf. Proc., (1999), Soc. of Vac. Coaters, p. 34-38.
- Brauer G., Szczyrbowski J. and Teschner G. New approaches for reactive sputtering of dielectric materials on large scale substrates. – J. Non-Crystalline Solids, 1997, v. 218, p. 19-24.
- Laird R.E. and Wolfe J.D. The evolution of durable, silver-based, low emissivity films deposited by D.C. magnetron sputtering (ZnO to Si₃N₄). – 37th Annual Techn. Conf. Proc., (1994), Soc. of Vac. Coaters, p. 428-431.
- Ohtake H. and all. Pulse-time-modulated inductively coupled plasma etching for high-performance polysilicon patterning on thin gate oxides. – J. Vac. Sci. Technol. B, 2000, v. 18, №5, p. 2495-2499.
- Kelly P.J. and Arnell R.D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. – Vacuum, 2000, v. 56, №1, p. 159-172.

30. Kelly P.J. and all. Studies of mid-frequency pulsed dc biasing. — J. Vac. Sci. Technol. A, 2001, v. 19, №6, p. 2856-2863.
31. Carter D. and all. Parameter optimization in pulsed DC reactive sputter deposition of aluminum oxide. — 45th Annual Techn. Conf. Proc., (2002), Soc. of Vac. Coaters, p. 570-577.
32. Christie D.J. and Seymour E.A. Power system requirements for enhanced mid-frequency process stability. — 46th Annual Techn. Conf. Proc., (2003), Soc. of Vac. Coaters, p. 257-262.
33. Rettich T. and Anderson L. Arc management in DC and MF generators for large area coating systems. — 47th Annual Techn. Conf. Proc., (2004), Soc. of Vac. Coaters, p. 237-240.
34. Milde F. and all. Experience with high power DC supplies with fast arc suppression in large area coating. — 44th Annual Techn. Conf. Proc., (2001), Soc. of Vac. Coaters, p. 375-381.
35. Winkler T. Pulse Magnetron Sputtering—Development and Application Trends. — 45th Annual Techn. Conf. Proc., (2002), Soc. of Vac. Coaters, p. 315-321.
36. Belkind A. and all. Reactive sputtering using a dual-anode magnetron system. — 44th Annual Techn. Conf. Proc., (2001), Soc. of Vac. Coaters, p. 130-135.
37. Jüttner B. The dynamics of arc cathode spots in vacuum. Part III: measurements with improved resolution and UV radiation. — J. Phys. D: Appl. Phys. 31 (1998) 1728–1736.

ГЛАВА 6

МАГНЕТРОННЫЕ НАПЫЛИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПРЕДПРИЯТИЯ ООО «ЭСТО-ВАКУУМ»

6.1. Ранее выпускавшиеся магнетронные напылительные установки «Каролина Д-10» и «Каролина Д-10К»

Научно-производственное предприятие ООО «ЭСТО-Вакуум» с 1994 года занимается разработкой, изготовлением и наладкой различного вакуумного технологического оборудования. Разрабатываемые установки магнетронного напыления решают различные технологические задачи, но имеют много общего в их конструктивном решении.

Эта деятельность началась с модернизации под магнетронное нанесение вакуумных установок типа УВН-71ПЗ, Оратория-9, УВН-73 и многих других. После модернизации установка называлась «Каролина Д-10».

Модификацией установки «Каролина Д-10» является установка «Каролина Д-10К». Ее основное отличие от первоначального варианта, имеющего диффузионный насос Н-2Т с азотной ловушкой, — использование в качестве высоковакуумного насоса криогенного насоса типа «Криоторр-8» фирмы СТИ. Применение этого средства откачки существенно снижает эксплуатационные расходы и позволяет достичь безмасляного вакуума. Упомянутые установки в настоящее время не выпускаются, но широко распространены и эксплуатируются на различных предприятиях.

Внешний вид установок после модернизации показан на рисунке 6.1. Как видно на рисунке, установка состоит из вакуумного поста и стойки управления. Вакуумный пост содержит описанную выше систему откачки и рабочую камеру.

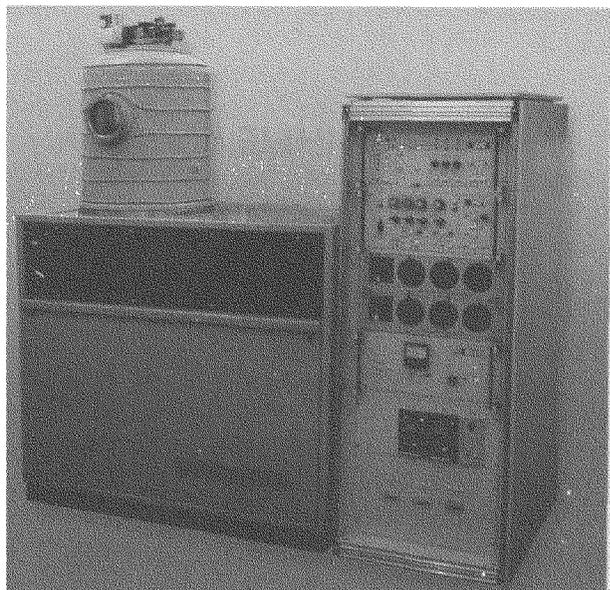


Рис. 6.1. Внешний вид установки «Каролина Д-10»

Рабочая камера установки содержит набор устройств, необходимых для решения большинства технологических задач. В зависимости от выбранной комплектации камера содержит от одного до трех протяженных магнетронных источников, барабан с держателями подложек, нагреватель подложек и ионный источник для очистки их поверхности.

Полупроводниковые подложки диаметром 100 мм или диэлектрические размером 48×60 мм² устанавливались на съемных кассетах, объединенных в вертикальный барабан диаметром 480 мм и высотой 450 мм. Нанесение пленок велось на внутреннюю поверхность барабана.

Внутри барабана были вертикально установлены протяженные магнетроны с мишенью длиной 440 мм. Это позволяло наносить за один цикл слои нескольких различных материалов, что часто очень важно в микроэлектронике.

Кроме магнетронов внутри барабана был установлен протяженный ионный источник типа «Радикал». С его помощью могла проводиться предварительная очистка поверхности подложек пучком ионов кислорода при токе до 1 А.

Перед нанесением пленок подложки нагреваются излучением двух нагревателей до температуры, которая может достигать 300°С.

Нагреватели состоят из двух отражателей, на которых смонтированы протяженные ТЭНы (рис. 6.2) мощностью 2,5 кВт каждый. Температура контролируется с помощью платинового резистивного датчика, установленного на барабане установки.

Газы (аргон, азот и кислород) в камеру подавались через газораспределительную систему ионного источника. Все газовые магистрали установки выполнены из нержавеющей стали. Поток газов автоматически контролируется независимо по трем каналам регуляторами расхода газов на базе РРГ-9 с электромагнитными запорными клапанами. Расход рабочего газа регулируется в диапазоне от 0 до 0,1 Вт с точностью 1%.

Стойка питания и управления установки располагается вплотную к вакуумному посту справа (рис. 6.1). Она содержит все блоки управления установкой.

Для питания магнетронов использовали блок питания типа ИВЕ-145 фирмы «Плазматех», который содержал бестрансформаторный преобразователь тока промышленной частоты в униполярный импульсный ток с частотой 30 кГц. Его максимальная мощность была 6 кВт при токе до 12 А. Блок питания магнетрона имел схему стабилизации тока, мощности или напряжения разряда, встроенные устройства дугогашения и защиты от короткого замыкания, а также защиту от перекоса фаз. Такой блок питания незаменим при нанесении диэлектрических слоев методом реактивного магнетронного распыления.

Блок питания и управления трехканальной прецизионной системой газонапуска типа РРГ-9-2,5 имел цифровую индикацию заданных и фактических расходов газов. Блок регулятора нагрева подложек обеспечивал задание и поддержание температуры подложки в диапазоне 50-300°С с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Блок питания привода барабана позволял плавно регулировать скорость вращения барабана подложек в диапазоне 10-40 об/мин.

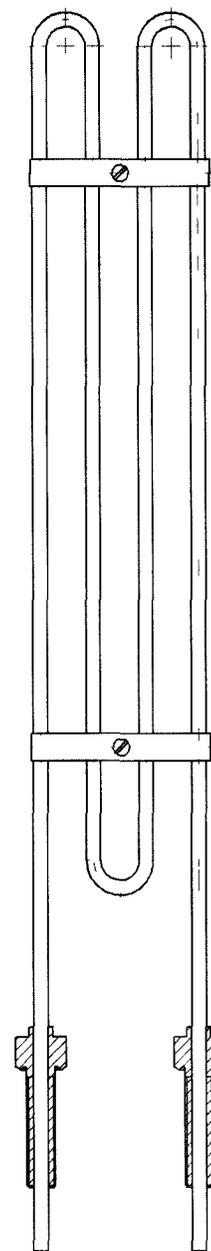


Рис. 6.2. Нагреватель подложки

6.2. Современные магнетронные напылительные установки для нанесения многослойных покрытий

Новые напылительные установки фирмы ООО «ЭСТО-Вакуум» также предназначены для нанесения многослойных покрытий на изделия электронной техники, а так же на некоторые другие изделия. Многослойные покрытия целесообразно наносить на подложку за один технологический цикл. Это не только увеличивает производительность процесса, но и снижает плотность дефектов в слоях, что позволяет значительно улучшить межслойную адгезию и исключить расслоение структуры при дальнейших операциях.

Эти задачи могут быть успешно решены с помощью разработанных и серийно выпускаемых ООО «ЭСТО-Вакуум» вакуумных напылительных установок «Каролина Д-12А», «Каролина Д-12Б», «Каролина Д-12Б1» и «Каролина Д-12В» [5]. Это полностью автоматизированные установки вакуумного напыления с возможностями комбинирования средств нанесения и травления.

Установки характеризуются общим конструктивным решением и максимальной унификацией узлов и деталей. Все они выполнены на вновь разработанном оригинальном откачном посту и имеют одинаковую откачную базу, включающую двухступенчатый агрегат типа АВР-50, вынесенный за установку, и криогенный насос типа Криоторр-8 со скоростью откачки 1500 л/сек по азоту и 4000 л/сек по воде.

Они имеют вакуумные камеры с одинаковым внутренним диаметром 630 мм и различные по высоте. Различие установок заключается в компоновке рабочей камеры. В установке «Каролина Д-12А» подложки располагаются на горизонтальной карусели, а в установках «Каролина Д-12Б, Д-12Б1 и Д-12В» – на вертикальном барабане.

Технологические газы (аргон, азот и кислород) подаются в камеру через газораспределительную систему, выполненную из нержавеющей стали. Потоки газов независимо контролируются трехканальными регуляторами расхода газов на базе РРГ-9 с запорными клапанами. Расход рабочего газа регулируется в диапазоне 0–0,1 Вт. Управление трехканальной прецизионной системой газонапуска производится в автоматическом режиме согласно технологической программе.

Все установки снабжены автономной системой оборотного охлаждения, которая заливается дистиллированной водой и охлаждается через герметичный теплообменник оборотной водой предпри-

тия. Они снабжены системой экономии этой воды: при отсутствии энерговыделения в установке проток внешней воды через систему теплообмена прекращается.

6.2.1. Установка «Каролина Д-12А»

Установка «Каролина Д-12А» – вакуумная установка для решения исследовательских задач в области нанесения тонких пленок и для обеспечения мелко- и среднесерийного производства. Компоновка ее представлена на рис. 6.3а, а внешний вид на рис. 6.3б (см. цветную вклейку). Она предназначена для магнетронного и (или) термического напыления на керамические, кремниевые и другие подложки диаметром до 100 мм. Горизонтальная компоновка камеры установки позволила совместить магнетронное нанесение с термическим испарением, что важно для технологии некоторых изделий.

Вакуумная установка «Каролина Д-12А» содержит традиционный вакуумный пост и стойку управления (рис. 6.3а, цветная вклейка). В свою очередь, в вакуумный пост входят рабочая камера и система откачки. Предельное давление, достигаемое в рабочей камере, – $5 \cdot 10^{-4}$ Па.

6.2.1.1. Рабочая камера установки

Рабочая камера установки (рис. 6.4 и 6.5, цветная вклейка) содержит полный набор устройств, необходимых для решения различных исследовательских и технологических задач. В зависимости от выбранной комплектации в набор входят – от одного до четырех магнетронных источников, один или два термических испарителя, устройство для плазменной очистки подложек, карусель для позиционирования подложек и нагреватель подложек. Далее рассмотрим эти узлы подробнее.

На горизонтальном диске карусели диаметром 480 мм можно разместить до 12 полупроводниковых пластин диаметром 100 мм или 24 диэлектрических подложек размером 48х60 мм. Карусель электрически изолирована от корпуса установки. Электрический вывод от нее выведен наружу, через него на подложки может быть подано отрицательное или импульсное смещение. На карусели установлен также держатель свидетеля, контакты которого через коллектор выведены наружу.

Привод вращения карусели, установленный сверху на колпаке рабочей камеры, обеспечивает вращение карусели с подложками с регулируемой скоростью 0–20 об/мин. Управляемый привод вращения карусели позволяет реализовывать напыление как при непре-

рывном ее вращении, так и «пошаговое», с точным переводом подложки из любого номера позиции в любую другую и в любой последовательности. Такая опция позволяет существенно экономить дорогостоящие мишени, так как для напыления одного образца не надо «размазывать» напыляемый материал по всей карусели.

С помощью отдельного привода управляют положением заслонок (открыта или закрыта). Назначение заслонок — очистка мишени любого магнетрона перед каждым напылением или очистка навески термического испарителя предварительным ее испарением.

Под каруселью располагаются магнетроны с круглыми горизонтальными мишенями диаметром 100 мм. Мишень прижимается к водоохлаждаемому основанию прижимной рамкой, над ней расположен анод магнетрона, который изолирован от корпуса установки, благодаря чему на анод можно подавать положительное смещение. Весь катодный узел окружен защитным экраном. Возможна реализация «жидкофазного» режима распыления мишеней с автоматическим управлением.

Кроме магнетронов под каруселью устанавливаются термические испарители (в том числе и с вибробункером для «взрывного» испарения).

Под каруселью находится устройство плазменной очистки. С его помощью проводится предварительная очистка подложек бомбардировкой ионами кислорода или любого другого рабочего газа. Эта операция обычно занимает 3 мин. Устройство очистки подключено к генератору высокой частоты 13,56 МГц максимальной мощностью до 1 кВА.

Все позиции под каруселью унифицированы и позволяют легко заменить, например, магнетрон на термический испаритель или ионный источник.

Перед нанесением пленок подложки нагреваются резистивным нагревателем мощностью 2,5 кВт до заданной температуры вплоть до 300°C. Температура измеряется с точностью 5% с помощью платинового резистивного датчика, установленного на карусели установки.

6.2.1.2. Стойка питания и управления

Стойка питания и управления установки располагается вплотную к вакуумному посту (рис. 6.3, цветная вклейка) и содержит все блоки управления установкой. Для питания магнетронов используется импульсный среднечастотный блок питания типа EL разработки фирмы «ЭСТО-Эл». Блок содержит бестрансформаторный преобразова-

тель тока промышленной частоты в импульсы с частотой до 40 кГц. В блок питания входит схема стабилизации по выбору тока, мощности или напряжения разряда, устройства дугогашения и защиты от короткого замыкания, а также устройство защиты от перекоса фаз. Максимальная мощность блока питания составляет 6 кВт, максимальный ток — до 10 А. Такой блок питания обеспечивает нанесение диэлектрических слоев методом реактивного магнетронного распыления.

По выбору технолога процесс нанесения может заканчиваться в автоматическом режиме, либо по достижении заданного времени напыления, либо после напыления на датчик сопротивления (свидетель) напыляемой пленки (только первой) заданного сопротивления. Датчик сопротивления напыляемой пленки во время вращения карусели при каждом обороте попадает в зону плазмы работающего магнетрона, что приводит к временному искажению показаний величины ее сопротивления. Чтобы исключить такое искажение показаний свидетеля, наверху рабочей камеры устанавливается датчик положения свидетеля относительно магнетрона (датчик стробирования). Схема измерения сопротивления свидетеля по команде датчика положения считывает информацию только тогда, когда свидетель находится за пределами зоны плазмы магнетрона. Измеренная величина сопротивления запоминается и воспроизводится цифровым индикатором, и при каждом обороте карусели показания обновляются. Диапазон контроля сопротивления свидетеля 0,2–20 кОм с точностью $\pm 3\%$.

В стойке управления предусмотрен блок подачи и регулировки потенциала смещения подложки во время нанесения пленки, постоянного отрицательного, импульсного с частотой 100 кГц или высокочастотного с частотой 13,56 МГц. Мощность импульсного генератора смещения 1 кВА.

Производительность установки составляет не менее четырех процессов в смену. Мощность, потребляемая установкой от питающей сети, не превышает 15 кВА.

6.2.2. Установка «Каролина Д-12Б»

Внешний вид установки «Каролина Д-12Б» приведен в Приложении. Эта установка имеет такую же откачную базу, как и установка «Каролина Д-12А», но имеет вертикальную компоновку вакуумной камеры (рис. 6.6 и 6.7, цветная вклейка). Использование вертикальной компоновки установки и барабанного держателя подложек позволило значительно увеличить производительность установки. Количество обрабатываемых

за один цикл подложек возросло до 39 шт. круглых диаметром 100 мм или до 111 шт. прямоугольных размером 60·48 мм². Для удобной смены подложек предусмотрена загрузочная дверь в боковой стенке камеры.

Кроме того, вертикальная компоновка установки дала возможность монтажа протяженного ионного источника (рис. 6.9, цветная вклейка) и позволила увеличить максимальное количество магнетронов в установке до 8 шт. Они устанавливаются внутри и снаружи цилиндрического барабана. Этим обеспечивается возможность напыления на подложки одновременно с двух сторон.

Магнетроны, расположенные снаружи барабана, смонтированы на открывающихся дверях, что значительно облегчает замену их мишеней. Размер мишени магнетронов 440×100×(6-15) мм³ (рис. 6.8, цветная вклейка).

Установка в максимальном варианте комплектации имеет два комплекта блоков питания магнетронов, блок питания ионного источника и блок подачи смещения (постоянного или импульсного) на барабан-подложкодержатель. Предусмотрено применение по требованию заказчика планетарного механизма вращения цилиндрических подложек (ось вращения – вертикальна) диаметром до 100 мм.

Перед нанесением пленок подложки нагреваются излучением двух нагревателей до температуры 300°С. Нагреватели состоят из отражателей, на которых смонтированы протяженные ТЭНы мощностью 2,5 кВт каждый.

6.2.3. Особенности установки «Каролина Д-12Б1»

Установка «Каролина Д-12Б1» – полностью автоматическая установка магнетронного напыления, управляемая компьютером. Эта установка разработана на базе установки «Каролина Д-12Б» специально для магнетронного нанесения покрытий на металлорежущий инструмент и любые другие неплоские подложки.

Обрабатываемые изделия размещаются на двадцати держателях диаметром около 80 мм и рабочей высотой 300 мм. Каждый держатель во время нанесения покрытия может вращаться вокруг своей вертикальной оси. Кроме того, держатели образуют цилиндр-барабан, который может вращаться вокруг центра камеры. Приводы вращения барабана и держателей независимы, что позволяет производить напыление как в режиме непрерывного вращения барабана и держателей, так и в режиме остановленного барабана и вращении держателей, находящихся перед магнетронами.

В рабочей камере установки может быть смонтировано до 8 магнетронов с размером мишени 440·100·(6-15) мм. Магнетроны располагаются внутри и снаружи цилиндра, образованного держателями. Оптимальное расположение и магнитные системы магнетронов выполнены таким образом, что позволяют реализовать дуальное магнетронное распыление (см. главу 5). Управляемая заслонка позволяет предварительно очистить распылением мишени любой пары магнетронов.

Установка оснащена двумя импульсными блоками питания магнетронов с регулируемой частотой импульсов до 40 кГц и регулируемой паузой между импульсами. Мощность блоков питания магнетронов в зависимости от задач может варьироваться от 6 до 18 кВА. Кроме того, установка имеет блок питания для подачи смещения на изделия мощностью до 6 кВА и частотой 40 кГц.

Для предварительной очистки поверхности изделий имеется протяженный ионный источник типа УАС с напряжением до 3 кВ и рабочим током до 700 мА, установленный на загрузочной двери. На этой же двери установлены два ТЭНа для ускоренного предварительного нагрева и обезгаживания изделий мощностью по 2,5 кВА каждый.

Трехканальная система газонапуска на РРГ позволяет независимо контролировать напуск различных газов для реактивного напыления всех известных соединений (нитриды титана и хрома, оксиды циркония, нитриды кремния и т. д.)

Для удобства обслуживания внутренних магнетронов и облегчения очистки камеры и внутрикамерного устройства корпус камеры установки сделан поднимающимся на гидроподъемнике, встроенном в установку. Полная разборка и сборка внутрикамерного устройства у обученного персонала занимает не более 1 часа.

Установка комплектуется двойным набором подложкодержателей, поэтому полная перезагрузка установки занимает не более нескольких минут. Скорость напыления пленки алюминия при одном работающем 18 кВА блоке достигает 7 мкм/час на вращающийся барабан. С учетом откачки и остывания в этой конфигурации можно получить длительность цикла порядка 2-2,5 часа.

6.2.4. Особенности установки «Каролина Д-12В»

Эта установка разработана на основе установки «Каролина Д-12Б» специально для применения в особо чистых производствах. Для этого установка снабжена специальной плоской панелью, которая отделяет чистую комнату от помещения, в котором размещается собствен-

но установка. Вакуумная камера установки снабжена прямоугольной дверью большого размера для удобства загрузки-выгрузки носителей подложек. В чистую комнату открывается только загрузочная дверь.

На панели крепится дублирующий дисплей управления установкой. Таким образом, установка может управляться как из чистой комнаты, так и из менее чистого производственного помещения.

Установка имеет магнетроны только внутреннего расположения (4 позиции) увеличенных габаритов (размеры мишени $749 \times 100 \times (6-15) \text{ мм}^3$). В связи с этим загрузка установки стала значительно больше, чем в установке «Каролина Д-12Б»: 48 подложек диаметром 150 мм или 90-108 подложек диаметром 100 мм. Установка комплектуется двойным комплектом подложкодержателей. Поэтому полная перезагрузка установки занимает не более нескольких минут.

При техническом обслуживании установки (замена мишеней магнетронов, внутрикамерной оснастки, чистка экранов и т. д.) ниша двери перекрывается специальным экраном, и корпус камеры может подниматься с помощью гидроподъемника на высоту 3 метра от пола и потом опускаться на исходную высоту в удобном для обслуживания положении. Крышка камеры также съемная. Полная разборка и сборка внутрикамерного устройства у обученного персонала занимает не более 1 часа.

На рис. 6.10 представлен рисунок боковой проекции установки с «человеком» ростом 180 см, находящимся в чистой зоне.

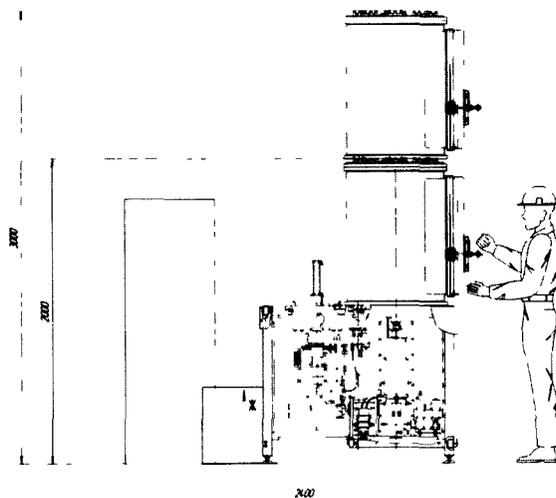


Рис. 6.10. Боковая проекция установки «Каролина Д-12В»

6.2.5. Технологическое применение описанных магнетронных установок

Описанные установки магнетронного напыления использовались в производстве гибридных ИС для нанесения в одном вакуумном процессе резистивных материалов типа РС-5406 или РС-3710 [1] и защитного слоя титана. Нанесение слоя с поверхностным сопротивлением $20-1000 \text{ Ом}/\square$ занимало 2–25 мин. при токе разряда 0,8-2 А. Разброс значений поверхностного сопротивления пленок в одной партии обычно не превышал $\pm 3\%$.

Системы металлизации ГИС тоже получали на этих установках, для чего наносили чередующиеся слои различных металлов, например, ванадия, меди и хрома [2]. Скорость нанесения меди была примерно 8 мкм/час.

Нанесение слоев за один цикл позволило значительно улучшить межслойную адгезию и исключить расслоение структуры при дальнейших операциях. Дело в том, что в случае изготовления многослойной металлизации при сравнительно длительном перерыве между осаждением пленок в вакууме, материал верхней пленки конденсируется не на чистую поверхность нижней пленки, а на поверхность, покрытую слоем окисла. Причем толщина окисла пропорциональна длительности паузы между нанесением слоев. Поэтому эта пауза должна быть как можно короче.

Описанные установки хорошо показали себя и в более сложных процессах, таких как реактивное нанесение пленок окислов и нитридов [3–4]. Особенно часто установки использовались для получения чередующихся слоев оксида и нитрида кремния. Эти слои получали методом реактивного магнетронного напыления, в котором кремниевая мишень распыляется в смеси аргона и реактивного газа, азота или кислорода. Такой метод позволяет наносить на движущиеся подложки слои упомянутых химических соединений с достаточно большой скоростью: до 2 мкм/ч (главы 9–11).

6.3. Резюме по напылительным установкам

1. Разработаны и выпускаются серийно вакуумные напылительные установки для нанесения слоев металлов, резистивных сплавов и диэлектриков, и их многослойных комбинаций в едином вакуумном цикле.
2. Комплектация установок зависит от требований заказчика. Установки оснащаются необходимым числом протяженных магнетронных источников, ионным источником для очистки поверхности

подложек, нагревателем подложек и вращающимся барабаном для крепления подложек.

3. Допустима работа источника ионов совместно с магнетроном на смеси газов. Предусмотрен вариант напыления с подачей смещения 100 кГц (13,56 МГц) на держатель подложек. Мощность генератора смещения 1 кВт.
4. Предельное давление в рабочей камере $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Количество подаваемых (неагрессивных) газов до 3 шт. Расход подаваемых в камеру рабочих газов по одному каналу от 0 до 0,1 Вт. Суммарное давление в камере при работе магнетронов от 0,07 до 0,3 Па.
5. Температура нагрева подложек 50-250°C, максимальная 300°C. Неустойчивость поддержания температуры подложек $\pm 5\%$.
6. Диапазон контроля сопротивления свидетеля 20,0-0,2 кОм. Погрешность измерения сопротивления 3%.
7. Установки полностью автоматизированы. Они снабжены автономной замкнутой системой горячего водоснабжения. Время подготовки установки к работе с учетом времени подготовки высоковакуумного насоса не более 100 мин.
8. Изготовленные к настоящему времени установки успешно эксплуатируются на многих предприятиях электронной промышленности.
9. Основные технические характеристики установок для сравнения сведены в таблицу:

№	Параметр установки	«Каролина Д-10» и «Каролина Д-10К»	«Каролина Д-12А»	«Каролина Д-12Б», «Каролина Д-12Б1» и «Каролина Д-12В»
1	Количество подложек, обрабатываемых за 1 цикл, шт.	95 прямоугольных или 36 круглых	12 круглых	111 прямоугольных или 39 круглых
2	Размеры обрабатываемых подложек, мм	60x48x0,5...2 или до Ø100	до Ø 100	60x48x0,5...2 или до Ø 100
3	Количество устройств ионной очистки изделий, шт.	1	1	2
4	Возможна установка термических испарителей	—	до 2	—
5	Количество магнетронов в установке, шт.	1÷4	1÷4	1÷8

№	Параметр установки	«Каролина Д-10» и «Каролина Д-10К»	«Каролина Д-12А»	«Каролина Д-12Б», «Каролина Д-12Б1» и «Каролина Д-12В»
8	Рабочее напряжение магнетронов, В	300...600	300...650	300...650
9	Размер мишеней из металлов и сплавов, кремния и т. п. (могут использоваться составные мишени косвенного охлаждения).	441x100x(6-15) мм ³	диаметр 100 мм	440x100x6 мм ³ 448x108x15 мм ³
11	Габаритные размеры модуля откачки ширина x глубина x высота с поднятым колпаком, мм ³	1300x850x2700	1300x850x2000	1300x850x2700
12	Масса со стойкой питания и управления, кг	до 500	до 600	до 700

Литература к главе 6

1. Кондратов Н.М. Резистивные материалы. — Обзоры по электронной технике, сер. Материалы, М., 1979, вып. 4, 36 с.
2. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Установка для магнетронного нанесения многослойных покрытий. — ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2003, вып. 7, 58-60 с.
3. Сейдман Л.А. Способы управления процессом реактивного магнетронного распыления с помощью вольтамперных характеристик разряда. — Труды постоянно действующего семинара «Электровакуумная техника и технология», под ред. А.В. Горина, М., 1999, 168 с.
4. Берлин Е.В., Воробьев А.Н. и Сейдман Л.А. Получение чередующихся слоев диэлектриков на основе кремния. — ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2002, вып. 5, 50-52 с.
5. Берлин Е.В. и Сейдман Л.А. Напылительные установки для многослойных покрытий. — ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2006, вып. 2, 88-91 с.

ГЛАВА 7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СЛОЕВ НА МАГНЕТРОННОЙ УСТАНОВКЕ

7.1. Технологические особенности нанесения резистивного слоя на магнетронной установке

7.1.1. Подготовка новой мишени из силицидного сплава к работе

Мишени большого размера из силицидного сплава выполняются из отдельных фрагментов, которые изготавливаются методом порошковой металлургии. Для получения равномерной по поверхностному сопротивлению пленки необходимо иметь однородную мишень. Поэтому после вскрытия упаковки с фрагментами новой мишени из резистивного сплава необходимо по сертификатам убедиться, что все фрагменты принадлежат одной партии. В противном случае вернуть упаковку изготовителю.

Фрагменты мишени устанавливаются на ее держатель так, чтобы они составили единую мишень без щелей и ступенек. Далее проводится контрольный процесс, в котором предварительное распыление мишени при токе разряда 2 А должно быть не менее 20 минут (во избежание растрескивания мишени ток вводить плавно, в течение 80-100 сек). Если время нанесения слоя с заданным сопротивлением отличается от времени нанесения при старой мишени более чем на 10%, повторить контрольный процесс с предварительным распылением мишени при токе разряда 2 А не менее 20 минут. Если результаты контрольного процесса по качеству резистивного слоя удовлетворительны, то можно приступить к проведению рабочих процессов.

7.1.2. Особенности проведения процесса нанесения резистивного слоя

В установках периодического действия мишень подвергается действию атмосферы, в результате чего ее поверхность покрывается тонким слоем окисла. Для получения воспроизводимых результатов его необходимо удалять непосредственно перед нанесением пленки на подложку в каждом рабочем процессе. Для этого мишень предварительно распыляют на закрытую заслонку. Время очистки выбирается экспериментально по графику зависимости поверхностного сопротивления пленок, нанесенных в одном и том же режиме, от времени предварительного распыления мишени на заслонку. Время предварительного распыления, после которого поверхностное сопротивление полученных пленок перестает изменяться, принимают в дальнейшем за время очистки. Режим очистки выбирается равным рабочему режиму распыления или берется несколько более жестким (с большей мощности магнетрона).

7.1.3. Получение заданной величины поверхностного сопротивления пленки

Обычно «свидетель» имеет отношение ширины к длине 1:4. Тогда, например, если необходимо получить поверхностное сопротивление $R_s = 1 \text{ кОм}/\square$, то напыление ведут до достижения сопротивления свидетеля R по измерительному прибору 4 кОм. Используемый измерительный прибор должен иметь несколько диапазонов измерения. В начале осаждения пленки сопротивление свидетеля будет изменяться быстро, затем медленно. Учитывая, что при последующей стабилизации R будет уменьшаться, то напыление заканчивают несколько ранее заданной величины.

Для выравнивания получаемых значений R_s по образующей барабана используют экран-диафрагму, прикрывающего края зоны нанесения резистивного слоя. Для определения формы экрана-диафрагмы необходимо провести несколько предварительных процессов. Для этого на один держатель подложек устанавливают 8-10 шт. свидетелей, равномерно распределенных по высоте. После проведения процесса осаждения измеряют R_s . И по результатам замера обычно увеличивают ширину открытой зоны экрана в тех местах, где R_s имеет повышенное значение. Операцию повторяют несколько раз до достижения требуемого разброса по R_s по всей образующей барабана.

Величина поверхностного сопротивления резистивной пленки определяется: толщиной пленки, ее микроструктурой и микрорельефом поверхности подложки. Так как толщина пленки не велика (50-80 нм), то R_s в значительной степени зависит от микронеровностей поверхности подложки (для ситалла СТ-50 отдельные пики достигают высоты 30 нм). Если посмотреть на ситалловую подложку СТ-50 на просвет, то можно обнаружить цветные разводы (фиолетовые, бежевые, и т. п.), то есть плотность материала подложки неодинакова, и поэтому микрорельеф даже на одной подложке при полировке получится различный. Кроме того, для отмывки подложек обычно применяется стандартный перекисно-аммиачный раствор, обладающий высокой химической активностью. Из-за этого отмываемая поверхность подложки может быть более развита, чем не отмываемая. Поэтому «свидетель» (подложку, используемую для контроля величины сопротивления в процессе осаждения и стабилизации резистивной пленки) желательно изготавливать из партии тех же подложек, на которые наносится резистивный слой.

7.2.4. Стабилизация поверхностного сопротивления резистивного слоя

При производстве некоторых ГИС с повышенными требованиями к стабильности проводят операцию стабилизации свойств резистивного слоя. Для этого после осаждения нагревают подложки до $T=240-300^\circ\text{C}$ и выдерживают в течение 10 мин. Процесс стабилизации заканчивается, если прекращается изменение R . Когда температура подложки упадет до $200-220^\circ\text{C}$, в камеру напускают атмосферный воздух и выдерживают подложки до достижения температуры выгрузки.

При стабилизации идет рост кристаллов, и, следовательно, уменьшается сопротивление пленки. Если полученное сопротивление занижено по сравнению с заданным сопротивлением пленки, то его можно повысить, применив ионное травление резистивной пленки.

7.2. Технологические особенности нанесения металлизации на магнетронной установке

Нанесение многослойной металлизации в процессе создания ГИС проводят в едином технологическом цикле без нарушения вакуума в установке. В противном случае чистая металлическая поверхность при нормальном давлении быстро покрывается слоем молекул газа. То же, но медленнее происходит и в вакууме. Молекулы кислорода связы-

ваются с атомами металла, и за короткий промежуток времени образуется окисный слой, который покрывается снова адсорбированной пленкой газа. Поэтому эта пауза должна быть как можно короче.

Откачка рабочей камеры установки паромасляным насосом создает опасность попадания паров масла в камеру и конденсации их на поверхности подложки. Это может привести к ухудшению адгезии наносимых пленок и к возрастанию контактного сопротивления. Для исключения этого явления применяют криогенную ловушку на входе паромасляного насоса, заливаемую жидким азотом. Для ее эффективной работы необходимо ее охлаждать, то есть заполнять ее жидким азотом, еще до открытия высоковакуумного затвора.

Для тех же целей необходимо сокращать время экспозиции поверхности холодной подложки во время откачки паромасляным насосом. Для этого целесообразно включать нагрев подложек уже при достижении давления в камере $5 \cdot 10^{-2}$ Па. Тогда дальнейшее существование более длительное время откачки поверхность подложки будет нагрета, что обеспечит испарение и отражение от нее молекул паров масла.

В установках периодического действия мишень подвергается воздействию атмосферы во время перезагрузки камеры. В результате этого воздействия ее поверхность покрывается тонким слоем окисла. Для получения воспроизводимых результатов его необходимо удалять непосредственно перед нанесением пленки на подложку. Это относится ко всем мишеням, используемым для изготовления многослойной металлизации. Очистку мишеней проводят непосредственно перед началом нанесения, когда уже достигнуты необходимые вакуум и температура подложки.

Для очистки поверхности мишени ее предварительно распыляют на закрытую заслонку. В качестве режима очистки выбирается рабочий режим или несколько более жесткий. Время очистки каждой мишени выбирается 3-5 минут. Обычно этого достаточно, так как скорость распыления металлов достаточно высока. Порядок очистки мишеней выбирается обратный по отношению к порядку нанесения. То есть последней очищается мишень из металла, обеспечивающего адгезию металлизации к подложке. Это делается потому, что сразу же после очистки поверхности мишени открывается заслонка и осуществляется нанесение адгезионного подслоя. Затем происходит нанесение остальных слоев. Мишени остальных металлов не успевают за это время окислиться, так как они менее активны по отношению к кислороду.

Решающим фактором и здесь является отсутствие большого перерыва между нанесением всех слоев, особенно адгезионного подслоя и слоя проводящего металла. Он не должен превышать 10-20 секунд. В противном случае тонкий слой адгезионного металла может успеть окислиться, что резко ухудшит адгезию к нему проводящего металла.

ГЛАВА 8

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ СЛЕДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКЕ, НАНЕСЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНЕТРОНА

Специалистам, занимающимся нанесением тонких пленок в вакууме, хорошо известен один из видов брака — следы разряда (пробоя) на металлической пленке, нанесенной на диэлектрическую подложку. Они представляют собой тонкие ветвящиеся прозрачные дорожки. Возникновение такого разряда стимулируется заряженными частицами плазмы. Появляться они могут при какой-либо плазменной обработке, в том числе и при магнетронном нанесении. Причиной их возникновения является отрицательный потенциал автосмещения, который плазма создает на подложке, если его величина достаточна для возникновения локального несамостоятельного разряда. Для возникновения автоэлектронного дугового разряда достаточно потенциала, большего, чем потенциал ионизации рабочего газа. Например, для аргона необходимо более 16 В. Кроме того, чтобы локальный разряд оставил следы на пленке, величина такого потенциала должна превышать пороговый потенциал ионного распыления материала пленки, составляющий для различных металлов от 13 до 30 В [1].

При магнетронном нанесении величина потенциала пленки может быть как выше, так и ниже порогового. Величина потенциала существенно зависит от материала пленки, от режимов нанесения и конструкции магнетрона. В частности, она сравнительно невелика при нанесении пленок меди и серебра, всего 8–14 В. Более высокие потенциалы возникают при нанесении пленок алюминия или нит-

рида алюминия на металлическую пленку: 30-70 В. Поскольку минимальный потенциал распыления, например, серебра в аргоне, -15 В, то эти потенциалы уже достаточны не только для возникновения пробоев на серебряную пленку, но и для ее ионного фрезерования.

Пока нет пробоя на пленку токи электронов и ионов на нее из плазмы благодаря потенциалу автосмещения равны и примерно равномерно распределены по ее площади. Во время локального пробоя на пленке образуется катодное пятно малого диаметра (5-15 микрон). В нем идет интенсивная бомбардировка пленки ионами плазмы, и происходит быстрое распыление атомов металла. После чего оно передвигается на свежие участки пленки, создавая на ней причудливые узоры. К катодному пятну электроны стягиваются с остальной поверхности металлической пленки, контактирующей с плазмой основного разряда. Поэтому, чем ниже поверхностное сопротивление пленки, тем успешнее поддерживается пробой. Это хорошо подтверждается практикой: на более толстых металлических пленках вероятность возникновения пробоев существенно выше, а след их шире.

Возникновению пробоя на металлическую пленку способствует наличие на ней слоя диэлектрика, имеющего, как правило, больший, чем у металла коэффициент ионно-электронной эмиссии. Такая ситуация возникает при нанесении на металлическую пленку диэлектрической или при нанесении самой металлической пленки в плохом вакууме, когда диэлектрик образуется за счет реакции металла с остаточными газами. Поэтому образование пробоев резко учащается при возникновении течи воздуха или воды в вакуумную камеру. Улучшение вакуума, обычно, помогает при нанесении металлических пленок, но практически бесполезно при нанесении диэлектрика на металлическую пленку.

Для борьбы с такими вредными электрическими разрядами естественно было применить электрическое смещение пленки относительно плазмы. Подача на пленку более высокого отрицательного потенциала от внешнего источника питания, как и ожидалось, не снижает количества пробоев, и даже способствует их образованию.

Могло бы показаться, что исключить появление пробоев можно было бы, просто заземлив пленку, и тем снизить разность потенциалов между ней и плазмой. Однако это не приводит к положительному результату, так как резко увеличивает электронный ток на пленку. В результате на электрическом сопротивлении пленки до точки заземления сохраняется высокая разность потенциалов, достаточная для возникновения пробоев.

Исключить появление пробоев на пленку могла бы подача на нее положительного смещения. В этом случае пленка по отношению к плазме становится не катодом, а анодом. Следов на пленке от пробоев нет, но пленка перегревается из-за повышенной электронной бомбардировки. Поэтому этот метод борьбы с пробоями не применяется.

Итак, подача любого постоянного смещения на пленку не решает описанной проблемы. Решить ее удалось с помощью импульсного смещения. На пленку подавали положительный кратковременный импульс, который прекращал ее работу в качестве катода, и тем прерывал пробой. В нашей экспериментальной установке для покрытия рулонных материалов импульсы подавались на один из валов, по которому полимерная пленка прокатывалась уже нанесенной на ее поверхность металлической пленкой.

Как и ожидалось, экспериментально было получено, что чем выше частота следования импульсов, тем короче следы пробоев на пленке. Если без импульсного смещения следы образуют рисунок с габаритом до одного метра, то при частоте импульсов 1 кГц они образуют линию длиной менее 100 мм. При частоте 2 кГц следы видны уже в виде отдельных нитей длиной 40-60 мм. А уже при 4 кГц следы пробоев на пленке не видны. Таким образом, эта частота достаточна для подавления пробоев.

Для определения оптимальной длительности импульсов рассмотрим эпюры напряжений и токов импульсов (рис. 8.1). Они были получены, когда источник импульсного смещения подавал прямоугольные импульсы с амплитудой $+50$ В. Эти импульсы заряжали конденсатор С1, образованный пленкой, подложкой и стенками камеры. Его емкость определяется материалом и размерами подложки. В нашем случае подложка представляла собой лавсан толщиной 200 мкм и шириной 1200 мм, охватывающий охлаждаемый барабан. Емкость такого конденсатора равна примерно 1 мкФ. В процессе зарядки конденсатора напряжение на нем меняется от потенциала автосмещения $V_2 = -40$ В до положительных значений, а ток импульса снижается от максимальной величины до тока I_3 , равного электронному току из плазмы на пленку, имеющую положительный относительно плазмы потенциал.

После зарядки конденсатора, пока еще действует импульс, в цепи смещения сохраняется ток, равный электронному току из плазмы на пленку. Величина тока зависит от параметров плазмы, сопротивления пленки и от площади пленки, открытой на плазму. Эти парамет-

ры можно охарактеризовать внутренним сопротивлением плазмы R_2 . Оно обратно пропорционально току магнетронов и может быть определено по формуле $R_2 = V_2 / I_{кз}$, где $I_{кз}$ – ток, идущий с пленки на корпус установки при их коротком замыкании. В нашем случае при токе магнетронов 45 А это примерно 2,5 Ом. Тогда в установившемся в импульсе режиме ток электронов из плазмы равен:

$$I_3 = \frac{(V_1 - V_2)}{(R_1 - R_2)} = 23 \text{ А}, \quad (8.1)$$

Потенциал пленки, находящейся напротив магнетронов, во время действия импульса можно подсчитать по формуле:

$$V = V_1 - R_1 \cdot I_u. \quad (8.2)$$

Учитывая, что $V_1 = 50$ В, и оценивая величину I_u по эюре, можно построить эюру для V (рис. 8.1). Пока ток импульса снижается, потенциал пленки V растет до положительных значений. В это время разность потенциалов между пленкой и плазмой уменьшается и становится меньше минимального потенциала распыления. В результате пленка уже не может быть профрезерована разрядом между ней и плазмой. Далее, когда потенциал пленки становится положительным, пленка перестает быть катодом, поэтому если такой разряд и возник в промежутках между импульсами смещения, то первый же импульс гасит его.

Величина достигнутого пленкой потенциала зависит от длительности импульса: чем длиннее импульс, тем выше потенциал. Но излишне длинные импульсы могут вызвать дополнительный нагрев пленки, а снижать длительность ниже определенного предела недопустимо. Допустимая минимальная длительность импульса определяется по эюре тока импульса: на ней обязателен участок установившегося тока электронов из плазмы разряда.

Схема для компьютерного моделирования приведена на рис. 8.2, а результаты моделирования на рис. 8.3. На схеме источник напряжения $V1$ и выключатель $SW 1$ моделируют источник импульсов с амплитудой +50 В. Резистор $R1 = 1.5$ Ом представляет собой сопротивление пленки между токоподводящим валом и барабаном. Источник напряжения $V2$ моделирует плазму магнетронного разряда, заряжающего пленку до потенциала –40 В, а резистор $R2$ представляет собой его внутреннее сопротивление. И, наконец, конденсатор $C1 = 1$ мкФ – это емкость между металлической пленкой и барабаном.

На графиках рисунка 8.3, так же как и на рисунке 8.1, мы видим изменения тока, отбираемого от источника импульсного смещения. Совпадение эюры тока модели с эюрой тока реального импульса показывает, что модель выбрана правильно. Кроме того, модель позволяет оценить величину тока пробоя на пленку, который равен примерно 5 А. Учитывая диаметр следа, получим плотность тока в пробое $(5 \cdot 10) \cdot 10^6$ А/см², что является типичным для дугового разряда [2].

Рассмотрим теперь некоторые технологические аспекты применения импульсного смещения.

Важный вопрос: как подать импульсное смещение на металлическую (Ag) пленку, на которую наносится диэлектрическая пленка, например AlN. Если подавать импульсы на вал, по которому прокатывается подложка уже с двухслойным покрытием Ag+AlN, то электрический контакт вала с пленкой ненадежен, что заметно на эюре тока: величина тока иногда падает до нуля. В этой ситуации диэлектрический слой пробивается импульсами, отчего на пленке остаются следы в виде черточек. Чтобы исключить пробои диэлектрика и образование черточек, импульсы необходимо подавать только на тот вал, по которому движется подложка, у которой верхний слой покрытия металлический. В этом случае электрический контакт между валом и пленкой надежен, и его сопротивление не превышает десятых долей Ома.

При работе с импульсным смещением очень важно гарантировать отсутствие случайных закороток проводящей пленки на корпус установки. Такие заземления пленки срывают работу импульсного смещения, и на пленке появляются следы пробоев. Причем следы берут свое начало от точки закоротки. Такими точками бывают неровности на границе подложки (в нашем случае лавсановой ленты), из-за которых пленка может касаться заземленных экранов установки. Кроме того, точками заземления могут оказаться слои металла на торцах подложки. Чтобы исключить их, мы стали делать металлическое покрытие, не доходящим на 5 мм до края подложки.

Таким образом, с учетом указанных выше технологических особенностей применение импульсного смещения позволяет полностью исключить появление на металлической пленке следов пробоев даже при нанесении диэлектрика на металлическую пленку.

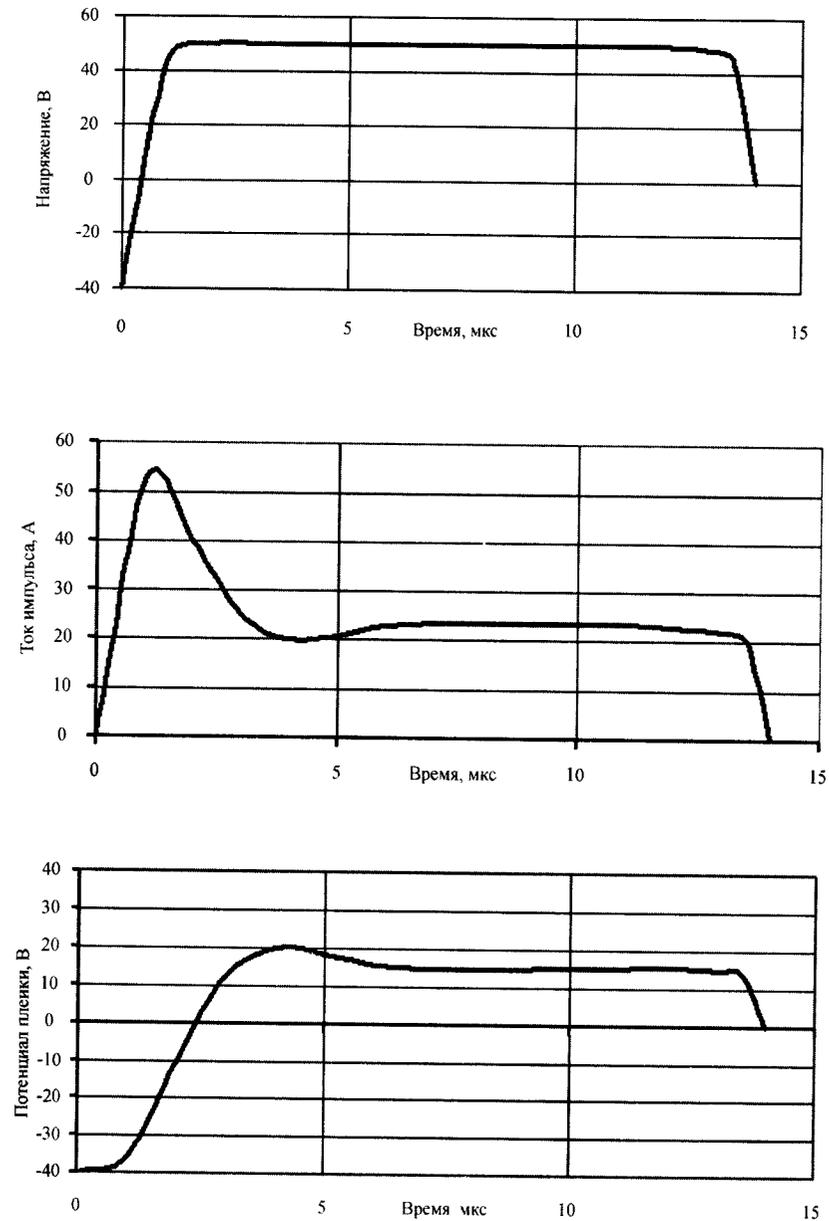


Рис. 8.1. Эпюры напряжений и токов импульсов

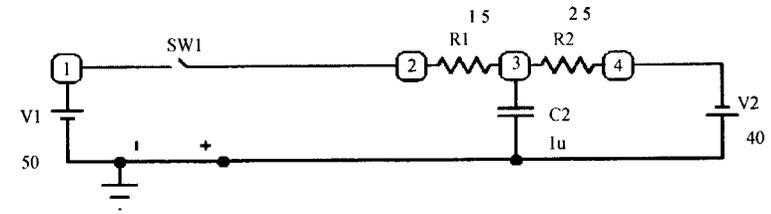


Рис. 8.2. Схема для компьютерного моделирования

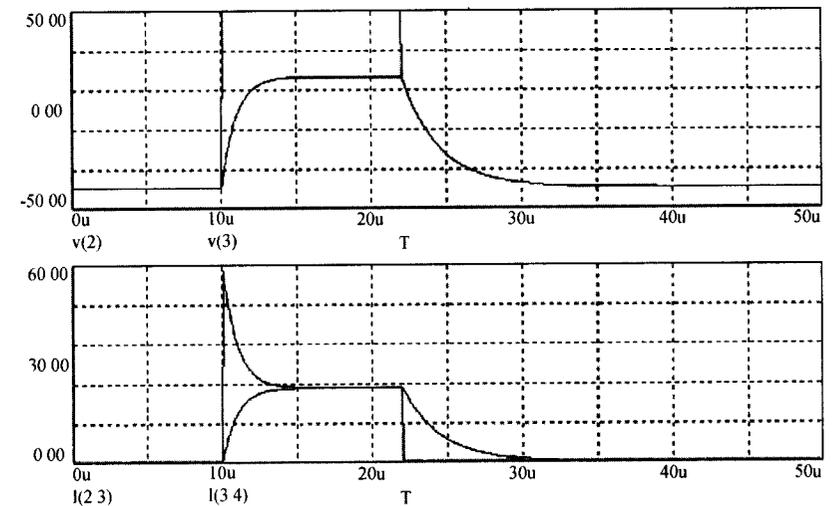


Рис. 8.3. Результаты компьютерного моделирования

Литература к главе 8

1. Технология тонких пленок. Справочник. Т.1. Под ред. Л. Майссела и Р. Глэнга. Пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона и Г.Г. Смолко. М., Сов. радио, 1977, 664 с.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., Наука. 1992, 420 с.

ГЛАВА 9

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДА

Реактивное распыление – это ионное распыление металлических или полупроводниковых мишеней в среде, содержащей реактивный газ. Оно позволяет получать пленки химического соединения металла мишени с реактивным газом. Источником ионов служит плазма газового разряда, процессы в которой определяют форму его вольтамперной характеристики (ВАХ) и свойства получаемых пленок. В свою очередь ВАХ разряда позволяет судить о процессах, происходящих в реактивном разряде. Далее мы рассмотрим технологическое применение этих взаимозависимостей для гибкого регулирования процесса реактивного распыления.

Как известно, ВАХ разряда в аргоне имеет сравнительно простой вид: ток разряда монотонно увеличивается с ростом напряжения (рис. 9.1). Одновременно растет мощность разряда и скорость распыления мишени. При низком давлении остаточных газов поверхность мишени свободна от слоя химического соединения. При включении и выключении разряда давление в камере практически не меняется, так как поглощение аргона растущей пленкой незначительно.

В реактивном газе (азоте, кислороде и т. п.) ВАХ разряда имеет тоже простой вид (рис. 9.1), представляющий собой монотонные зависимости тока от напряжения. Относительно ВАХ в аргоне они сдвинуты в сторону больших или меньших токов. Это зависит, главным образом, от соотношения коэффициентов вторичной электронной

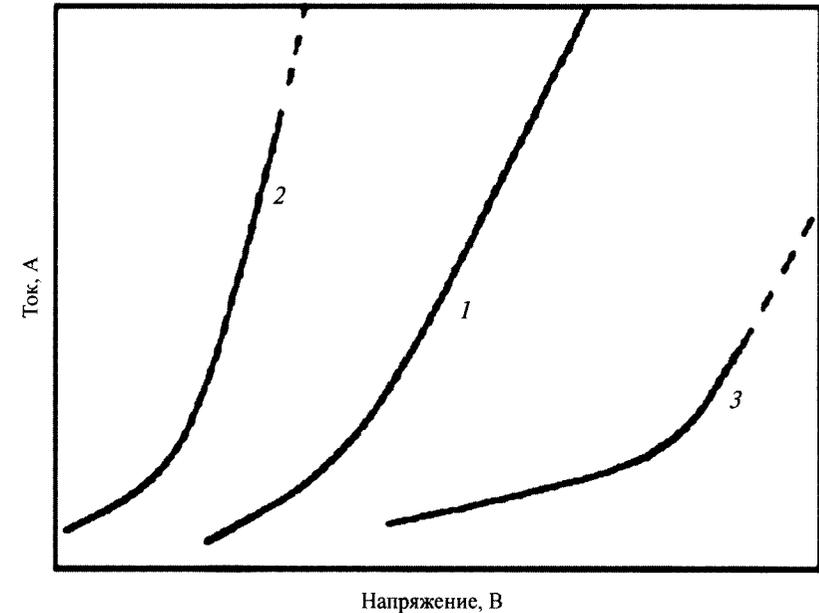


Рис. 9.1. ВАХ магнетрона в аргоне (1) или в реактивном газе при $\gamma_c > \gamma_m$ (2) и при $\gamma_c < \gamma_m$ (3)

эмиссии материала мишени γ_m и химического соединения γ_c [1]. Если $\gamma_c > \gamma_m$, то ВАХ в реактивном газе лежит выше ВАХ в аргоне, и наоборот, если $\gamma_c < \gamma_m$, то – ниже. Соотношение определяет не только относительное положение ВАХ в реактивном газе, но и расстояние между ВАХ в аргоне и в реактивном газе. Чем больше различие γ_m и γ_c , тем дальше они отстоят друг от друга.

В отличие от разряда в аргоне, в котором давление в камере не зависит от мощности разряда, при разряде в реактивном газе его давление довольно быстро снижается с ростом мощности разряда из-за поглощения реактивного газа растущей пленкой. При достаточно большой мощности давление снижается настолько, что разряд гаснет. После этого в отсутствие разряда давление в камере растет, и разряд снова загорается. Эти процессы повторяются, т. е. разряд становится пульсирующим.

Таким образом, мощный разряд в реактивном газе нестабилен. Однако известно, что пульсации в мощном магнетронном разряде не

возникают, если кроме давления реактивного газа в камере создано достаточное давление инертного газа. Поэтому в магнетронных распылительных устройствах разряд в реактивном газе практически не используют, а реактивное распыление ведут в смеси инертного, обычно аргона, и реактивного газов.

Рассмотрим изменение ВАХ электрического разряда в аргоне при добавлении к нему реактивного газа. В начале при малых количествах его молекул из-за меньшего их сечения ионизации может потребоваться увеличение напряжения для поддержания постоянного тока или произойдет снижение тока при постоянном напряжении. Эти изменения в большинстве случаев сравнительно невелики, примерно 5-10%. Они обусловлены только изменением состава газовой среды. При этом поверхность мишени остается свободной от слоя химического соединения.

При дальнейшем увеличении потока реактивного газа мишень покрывается слоем химического соединения, и происходят уже существенные изменения формы ВАХ. Они определяются, в основном, как параметрами используемых веществ (коэффициенты распыления и вторичной электронной эмиссии материалов мишени и его химического соединения с реактивным газом), так и параметрами оборудования (эффективная скорость откачки вакуумной камеры и её геометрия). В этой ситуации можно наблюдать два вида ВАХ (рис. 9.2).

В каждом виде ВАХ можно выделить три области режимов реактивного магнетронного разряда. Первая область – это область больших мощностей разряда, где мишень практически свободна от слоя химического соединения, а парциальное давление реактивного газа мало. Поэтому ВАХ разряда в этой области приближается к ВАХ разряда в аргоне.

Вторая область – область малых мощностей разряда. Здесь поверхность мишени полностью покрыта слоем химического соединения. Скорость распыления мала, а парциальное давление реактивного газа велико и определяет ход ВАХ. Поэтому здесь ВАХ близки к ВАХ разряда в соответствующем реактивном газе.

Между указанными областями расположена область переходных режимов, в которой мишень частично покрыта слоем химического соединения. При изменении степени покрытия мишени меняются давление реактивного газа, скорость распыления мишени, электрические и другие параметры разряда. Характерной особенностью этой области является отрицательное динамическое сопротивление разряда.

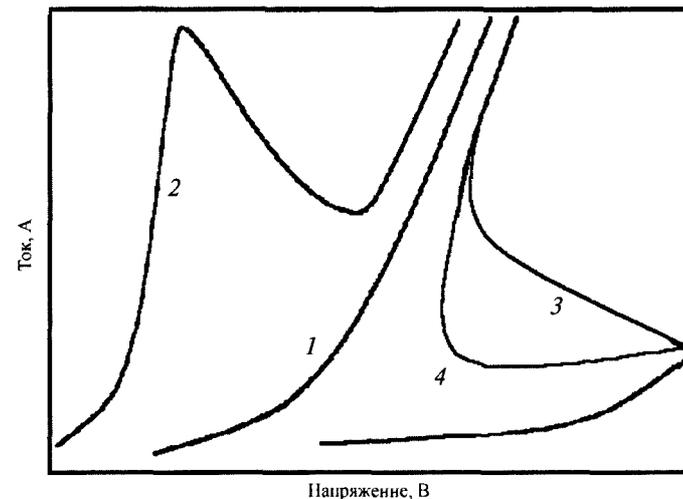


Рис. 9.2. ВАХ магнетрона в аргоне (1) и в смеси аргона и реактивного газа при $\gamma_c > \gamma_m$ (2) и при $\gamma_c < \gamma_m$ (3 и 4). Источники питания выбраны правильно

Ширина переходной области с отрицательным динамическим сопротивлением в большой мере определяется энтальпией образования химического соединения [2]. Чем она больше, тем шире эта область. Если определять ширину этой области в процентах от ширины второй области, то полученные экспериментальные данные можно сопоставить с величиной энтальпии в таблице 9.1.

Таблица 9.1

Соединение	Энтальпия, кДж/моль	Ширина переходной области
AlN	318	12-16%
Si ₃ N ₄	750	20-24%
SiO ₂	910	40-50%
Al ₂ O ₃	1676	30-40%

Два вида ВАХ у разряда в смеси газов возникают в соответствие с соотношением γ_m и γ_c . Если $\gamma_c > \gamma_m$, то образуются N-образные характе-

ристики (кривая 2), а если $\gamma_c < \gamma_m$, то S-образные с различным средним наклоном переходной области (кривые 3 и 4). Оба вида ВАХ могут вырождаться в монотонные характеристики, когда парциальное давление реактивного газа в камере сравнительно мало и слабо влияет на параметры разряда.

Таким образом, изменения ВАХ разряда отражают изменения состояния поверхности мишени, парциального давления реактивного газа, скорости распыления мишени, состава образующихся пленок и других параметров процесса. Одновременно с этим существует и обратная зависимость: при изменении электрических параметров разряда меняются другие его параметры.

Существование двух форм ВАХ реактивного магнетронного разряда, N-образной и S-образной (рис. 9.2), предъявляет определенные требования к характеристикам источника питания. Для N-образной ВАХ он должен быть источником напряжения, а для S-образной – источником тока. Правильно выбранный источник питания обеспечивает увеличение мощности разряда в ответ на увеличение парциального давления реактивного газа в камере. Тогда росту степени покрытия мишени из-за возросшего давления газа будет противодействовать увеличение скорости её очистки из-за повышенной мощности разряда. Если величина такого противодействия достаточна, то в этом случае все режимы устойчивы, в том числе и в области переходных режимов.

Например, увеличение парциального давления реактивного газа в камере увеличивает степень покрытия мишени и одновременно при N-образной характеристике и стабилизированном напряжении увеличивает ток разряда. При большем токе – больше скорость очистки мишени от слоя химического соединения, поэтому степень покрытия мишени растет не до единицы, а до нового равновесного состояния, соответствующего новым условиям в вакуумной камере.

В другом случае, когда источник питания выбран неправильно или величина противодействия недостаточна, переходная область исчезает из ВАХ разряда. На её месте появляется гистерезисная петля, отражающая самопроизвольные переходы режима разряда от полностью покрытой мишени к полностью свободной, и наоборот (рис. 9.3).

Например, если для поддержания реактивного разряда, имеющего N-образную ВАХ, использовать источник стабилизированно-

го тока, то при некотором увеличении давления реактивного газа сопровождающее его увеличение степени покрытия мишени вызовет снижение напряжения разряда и скорости распыления мишени. Последнее вызовет дальнейшее уменьшение скорости роста пленки, уменьшение поглощения ею реактивного газа и увеличение его парциального давления в камере. Это будет продолжаться до тех пор, пока вся поверхность мишени не будет покрыта слоем химического соединения.

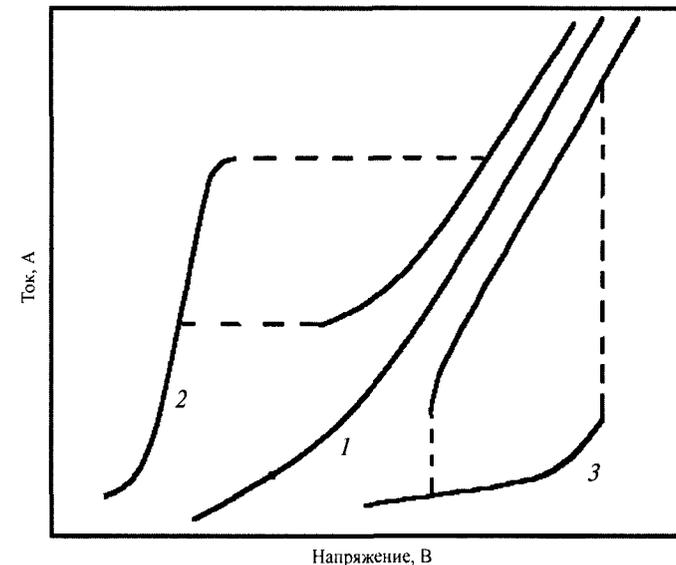


Рис. 9.3. ВАХ магнетрона в аргоне (1) и в смеси аргона и реактивного газа при $\gamma_c > \gamma_m$ (2) и при $\gamma_c < \gamma_m$ (3). Источники питания выбраны неправильно

Таким образом, правильный выбор источника питания позволяет устранить гистерезис, не прибегая к дорогостоящему увеличению производительности откатных средств, как это обычно рекомендуется в большинстве работ по реактивному распылению.

Исключение представляет собой ВАХ, форма которой представлена кривой 4 на рис. 9.2. ВАХ такой формы возникает, когда коэффициент распыления химического соединения мало отличается от коэффициента распыления исходного металла. В этом случае любой источник питания не обеспечивает однозначности режима разряда,

и, следовательно, управление процессом по ВАХ разряда невозможно. Для таких процессов требуются другие способы контроля (маспектрометрический, эмиссионный и др.).

Вид ВАХ разряда и рекомендованный тип источника питания для получения пленок при различных комбинациях мишень – реактивный газ приведены в таблице 9.2. Последняя строка таблицы относится к случаю, когда коэффициенты вторичной электронной эмиссии материала мишени и его химического соединения близки по величине. В этом случае ВАХ в смеси газов монотонна и мало отличается от ВАХ в аргоне. Можно применять любой источник питания. Но контролировать процесс по ВАХ разряда невозможно.

Таблица 9.2

Материал мишени	Реактивный газ	Вид ВАХ	Тип источника питания
Si, Al	N ₂	N-образная	Стабилизированное напряжение
Si, Al, Sn, In, Zn, Zr	O ₂		
Nb, V	N ₂	S-образная	Стабилизированный ток или мощность
Ta, V	O ₂	S-образная	
Ti, Ta, Cr	N ₂	монотонная	Любой

Сопоставим теперь свойства пленок, получаемых в режимах, соответствующих различным областям ВАХ. В первой области режимов мощность разряда велика, мишень свободна от слоя химического соединения, в силу этих причин скорость её распыления высока. В то же время парциальное давление реактивного газа мало, поэтому образуются пленки со значительным дефицитом реактивного газа. Состав их далек от стехиометрического.

Во второй области парциальное давление реактивного газа достаточно велико для образования пленок химического соединения стехиометрического и даже сверхстехиометрического состава. Однако из-за малых мощностей разряда и из-за того, что поверхность мишени покрыта слоем химического соединения, коэффициент распыления которого мал, скорость роста пленок в этой области режимов очень невысока.

Для получения стехиометрических пленок с высокой производительностью наибольший интерес представляет область переходных

режимов. В ней при плавном увеличении скорости распыления монотонно снижается парциальное давление реактивного газа. В результате плавно изменяется состав пленок в сторону уменьшения доли реактивного газа. Это позволяет уверенно управлять составом получаемых пленок, выбирая положение рабочей точки на ВАХ разряда.

Итак, знание формы ВАХ разряда позволяет правильно выбрать тип источника питания и получить устойчивые режимы электрического разряда в смеси инертного и реактивного газов. Но ВАХ позволяет также контролировать состав газовой среды и точно регулировать потоки обоих газов в рабочую камеру [3–4]. Ниже это будет проиллюстрировано сначала для потока реактивного газа.

На рис. 9.4 показаны ВАХ разряда в магнетроне с кремниевой мишенью в смеси аргона и азота [5]. Скорость откачки камеры и поток аргона были постоянны. Хорошо видны стадии превращения монотонной ВАХ в аргоне в N-образную ВАХ в смеси газов. При стабилизации напряжения разряда рост потока азота сопровождается ростом тока разряда и, соответственно, скорости распыления. Причем зависимости эти однозначны, т. е. при увеличении или уменьше-

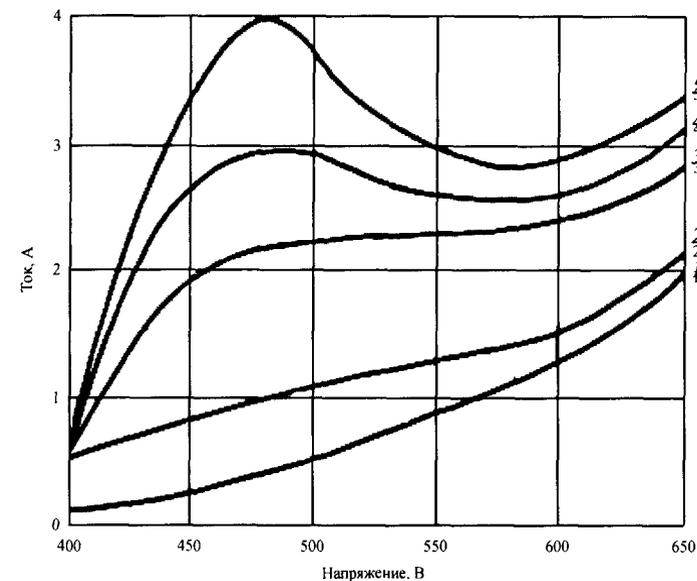


Рис. 9.4. ВАХ магнетрона с кремниевой мишенью в аргоне (1) и в смеси аргона и азота при возрастающих давлениях азота (2,3,4,5)

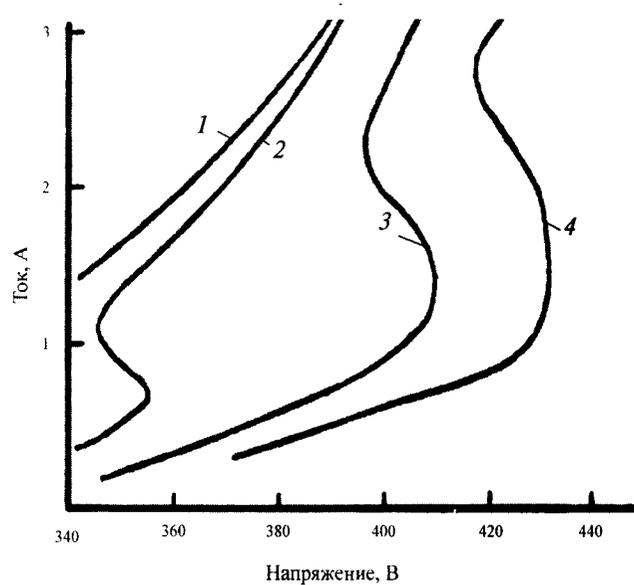


Рис. 9.5. ВАХ магнетрона с ниобиевой мишенью в аргоне (1) и в смеси аргона и азота при возрастающих давлениях азота (2, 3, 4)

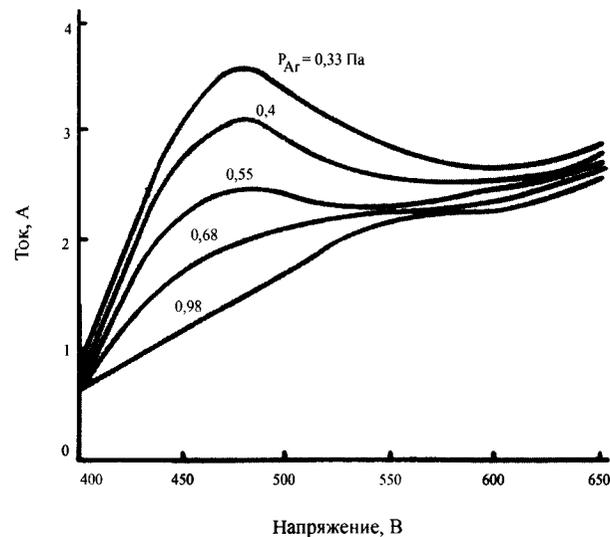


Рис. 9.6. ВАХ магнетрона с кремниевой мишенью в смеси аргона и азота при различных давлениях аргона в камере

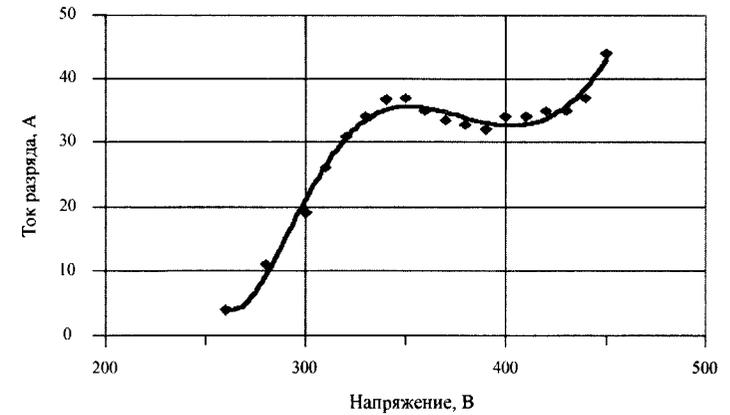


Рис. 9.7. ВАХ магнетрона с алюминиевой мишенью в смеси аргона и азота

нии потока азота каждому его значению соответствует одно значение тока разряда. Это дает возможность контролировать поток азота по току разряда. Можно сказать, что здесь магнетрон работает как измеритель парциального давления реактивного газа.

Тот же способ контроля можно использовать и в случае S-образных ВАХ разряда [6]. На рис. 9.5 изображены ВАХ разряда в магнетроне с ниобиевой мишенью в смеси аргона и азота. При использовании источника питания со стабилизированным током напряжение разряда плавно растет с ростом потока азота, что позволяет его уверенно контролировать.

На состав получаемых пленок и скорость их нанесения кроме парциального давления реактивного газа существенное влияние оказывает давление аргона в вакуумной камере, что отражается во влиянии его на ВАХ разряда (рис. 9.6) [4]. На рис. 9.6 приведены ВАХ разряда в магнетроне с кремниевой мишенью, полученные при постоянном потоке азота и различных давлениях аргона. Особенностью их является слабое влияние давления аргона на ток разряда в области минимума тока и значительное влияние в области максимума тока. Это позволяет по величине максимума тока регулировать количество аргона, делая это, конечно, после регулировки потока азота. Для достижения большей точности «подгонки» формы ВАХ регулировки потоков газов можно повторить.

Приведенные выше ВАХ реактивного разряда получены в планарных магнетронах с круглой мишенью диаметром 150 мм. Но указанные зависимости имеют место и в протяженном магнетроне с размером мишени 1400x120 мм². В таком магнетроне распыляли алюминиевую мишень в смеси аргона и азота. Полученная в этом процессе ВАХ приведена на рис. 9.7.

Описанный способ регулировки потоков газов по ВАХ разряда обеспечивают высокую воспроизводимость (не хуже $\pm 5\%$) состава и толщины получаемых пленок. Его достоинства и преимущества по сравнению с другими методами состоят в том, что с его помощью контролируется ситуация непосредственно в разряде. Кроме того, автоматически учитываются обычно слабо контролируемые параметры процесса, такие как быстрота откачки вакуумных насосов, износ мишени, скорость газоотделения от поверхностей арматуры и подложки, и т. п.

Литература к главе 9

1. Lewis M.A., Gloker D.A. Measurements of secondary electron emission in reactive sputtering of aluminum and titanium nitrid. — J. Vac. Sci. Technol.A, 1989, v.7, №3, p. 1019-1024.
2. Hohnke D.K., Schmatz D.J. and Hurley M.D. Reactive sputter deposition: a quantitative analysis.— Thin Solid Films, 1984, v. 118, p. 301-310.
3. Колесов Е.И., Сейдман Л.А. Способ плазменного реактивного нанесения пленок в вакууме. — Авт. свид. 1163656.
4. Колесов Е.И. и Сейдман Л.А. Способ получения пленок химического соединения. — Авт. свид. 1297504.
5. Сейдман Л.А. Получение пленок нитрида кремния реактивным распылением на постоянном токе. — Электронная промышленность, 1984, вып. 4(132), 15-20 с.
6. Будянский М.Я. и Сейдман Л.А. Получение сверхпроводящих пленок нитрида ниобия. — Электронная промышленность, 1992, вып. 2, 21-24 с.

ГЛАВА 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕАКТИВНОГО НАНЕСЕНИЯ

Моделирование сложных процессов позволяет лучше понять моделируемый процесс и сократить количество экспериментов, необходимых для поиска оптимального режима. Это особенно актуально для такого процесса как реактивное распыление, параметры которого сложным образом зависят друг от друга.

Как известно, для реактивного магнетронного нанесения уже существует хорошо разработанная модель Берга и др. [1–3]. Она достаточно хорошо опробована на многих реактивных процессах [4–7]. Однако ей присущ существенный недостаток: она охватывает не все реактивные процессы, а только такие, в которых газ взаимодействует с металлом без какой-либо дополнительной активации, например, ионизацией.

Характер взаимодействия различных металлов и газов хорошо изучен, в частности, разработчиками геттерных насосов. В работе [8] приведена таблица 10.1, классифицирующая пары металл–газ по интенсивности их взаимодействия. Из таблицы видно, что с кислородом все металлы интенсивно взаимодействуют без дополнительной ионизации, а с азотом только часть металлов. Остальные металлы (третья строка таблицы 10.1) взаимодействуют только с активированным (ионизированным) азотом. Среди них алюминий и кремний, используемые в таких важных для практики случаях как получение пленок их нитридов. Этот вывод о необходимости ионизации азота был подтвержден в работах [9–12], где нитриды алюминия или кремния получали реакцией растущей пленки металла с падающим на нее пучком частиц азота, и в работах [13–14], где пленки нитридов получали реактивным ионным распылением. Во всех случаях нитрид получался только тогда, когда азот был ионизирован. Когда же это был

поток молекул, нитрид не образовывался. Это значит, что при построении модели должно учитываться действие ионов реактивного газа, а не его молекул.

Однако, как мы уже говорили, в известной модели в основе расчета лежит учет удельного потока атомов реактивного газа в виде нейтральных молекул к мишени и подложке. Он пропорционален парциальному давлению реактивного газа в камере P и определяется выражением $n_g = G \cdot P$, где G – коэффициент пропорциональности, учитывающий двухатомность молекулы реактивного газа. Это не верно в случае синтеза нитридов кремния или алюминия, при котором взаимодействие материала мишени осуществляется только с ионизированными молекулами азота. Именно для этого случая нами разработана новая модель, пригодная для таких пар металл–газ, в которых для реакции между ними необходима ионизация молекул газа.

Главное отличие новой модели в том, что учитывается поток только ионизированных частиц реактивного газа к мишени и подложке. Плотность такого потока

$$n_g = \frac{2 \cdot i}{e} \cdot \frac{P}{P + P_{Ar}}, \quad (10.1)$$

здесь i – плотность ионного тока, e – заряд электрона, P_{Ar} – парциальное давление аргона.

Двойка в формуле (10.1) учитывает двухатомность молекулы реактивного газа. Последний множитель это доля ионов реактивного газа в совокупном ионном токе.

Плотность потока ионизированных частиц реактивного газа это новый элемент предлагаемой модели. Введение этого элемента позволило построить новую модель реактивного распыления, пригодную для веществ, не охватываемых известной моделью.

Разработанная нами новая модель, также как и известная, представляет собой совокупность нескольких уравнений, описывающих отдельные реакции и явления, имеющие место в реактивном процессе. Первые два уравнения показывают скорость распыления из мишени атомов металла N (10.2) и молекул его химического соединения N_c (10.3)

$$N = \frac{\eta_m \cdot i \cdot F_m}{e} \cdot (1 - \theta_m), \quad (10.2)$$

$$N_c = \frac{\eta_c \cdot i \cdot F_m}{e} \cdot \theta_m \quad (10.3)$$

где η_m и η_c – коэффициенты распыления соответственно металла и соединения, F_m – площадь мишени, θ_m – степень покрытия поверхности мишени молекулами соединения.

Коэффициент распыления металла, в том числе и кремния, зависит от напряжения распыления и лежит в пределах 0,3–1,0. Коэффициент распыления соединения всегда значительно ниже и для нитридов лежит в пределах 0,03–0,1.

Следующие уравнения (10.4) и (10.5) описывают равновесные состояния поверхностей мишени и растущей пленки при наличии реактивного газа в газовом разряде. Они получены приравниванием скоростей увеличения и уменьшения степени покрытия этих поверхностей молекулами соединения в стационарном процессе.

$$\sigma \cdot \frac{2 \cdot i}{e} \cdot \frac{P}{P + P_{Ar}} \cdot (1 - \theta_m) = m \cdot \frac{\eta_c \cdot i}{e} \cdot \theta_m \quad (10.4)$$

$$\sigma \cdot F_f \cdot \frac{2 \cdot i}{e} \cdot \frac{P}{P + P_{Ar}} \cdot (1 - \theta_f) + m \cdot N_c \cdot (1 - \theta_f) = \frac{N}{D} \cdot \theta_f, \quad (10.5)$$

где σ – коэффициент прилипания ионизированных частиц реактивного газа, как правило, равный единице, θ_f – степень покрытия поверхности пленки молекулами соединения, F_f – площадь поверхности пленки, D – предельное отношение числа атомов металла к числу атомов газа в соединении сверхстехиометрического состава, m – количество атомов газа в молекуле соединения стехиометрического состава.

В следующем уравнении (10.6) подсчитывается количество атомов реактивного газа, поглощенных растущей пленкой ΔN .

$$\Delta N = \sigma \cdot F_f \cdot \frac{2 \cdot i}{e} \cdot \frac{P}{P + P_{Ar}} \cdot (1 - \theta_f) + \frac{m}{D} \cdot N_c, \quad (10.6)$$

Выражение (10.7) определяет состав пленки через величину k_p , равную отношению количества атомов металла в пленке к количеству атомов газа.

$$k_f = \frac{N + l \cdot N_c}{\Delta N}, \quad (10.7)$$

где l – количество атомов металла в молекуле соединения стехиометрического состава.

Например, для стехиометрического нитрида кремния $l=3$, $m=4$ и $k_f=0.75$. В то же время известен предельный сверхстехиометрический нитрид кремния, для которого $D=0,65$. Для стехиометрического нитрида алюминия $l=1$, $m=1$ и $k_f=1$, а известный предельный сверхстехиометрический состав: $D=0,85$.

Следующие уравнения (10.8) и (10.9) описывают скорость поглощения реактивного газа растущей пленкой – f и поток реактивного газа в вакуумную камеру – Q .

$$f = \frac{g \cdot \Delta N}{P}, \quad (10.8)$$

$$Q = P \cdot (S + f), \quad (10.9)$$

где S – скорость откачки реактивного газа вакуумным насосом, g – коэффициент пересчета количества атомов в поток газа.

Коэффициент пересчета количества атомов в количество газа подсчитаем следующим образом. При атмосферном давлении $P_a=101 \cdot 10^3$ Па грамм-моль занимает объем $V=22,4 \cdot 10^{-3}$ м³. Количество газа, заключенного в этом объеме, равно $P_a \cdot V=101 \cdot 10^3 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3}=2263$ Дж. Количество молекул в этом объеме (число Авогадро) равно $N_a=6,02 \cdot 10^{23}$. Количество атомов двухатомного газа в этом объеме равно $2 \cdot N_a$. В результате коэффициент пересчета количества атомов в количество газа: $g=P_a \cdot V/2 \cdot N_a=1,9 \cdot 10^{21}$ Дж. Этот же коэффициент используется для пересчета изменения количества атомов газа ΔN в его поток, выраженный в ваттах.

И, наконец, последние выражения позволяют вычислить полный ток разряда – I (10.10) и скорость нанесения пленки – R (10.11).

$$I = F_m \cdot i \cdot [1 + \gamma_m + (\gamma_c - \gamma_m) \cdot \theta_m], \quad (10.10)$$

где γ_m и γ_c – коэффициенты электронно-ионной эмиссии соответственно для металла и соединения.

$$R = \frac{M_m \cdot N}{N_a \cdot d_m \cdot F_f} + \frac{M_c \cdot N}{N_a \cdot d_c \cdot F_a} + \frac{\sigma \cdot n_g \cdot (1 - \theta_f)}{N_a \cdot m} \cdot \left(\frac{M_c}{d_c} - l \cdot \frac{M_m}{d_m} \right), \quad (10.11)$$

где M_m и M_c – молекулярный вес соответственно металла и соединения, d_m и d_c – плотность соответственно металла и соединения, N_a – число Авогадро.

- В приведенных уравнениях присутствуют три группы величин:
- Физические постоянные и параметры используемых веществ. Они берутся из справочников.
 - Параметры используемого оборудования, такие как скорость откачки вакуумной камеры, площадь мишени и эффективная площадь подложки. Они известны технологу.
 - Переменные величины, характеризующие процесс. Это парциальное давление реактивного газа, его поток в камеру, скорость его поглощения пленкой, состав и скорость роста пленки, ток и напряжение разряда.

Получение зависимостей между этими величинами и есть основная задача модели. Для этого необходимо решить приведенную выше систему уравнений (1.10.2-1.10.11). Ее удастся решить однозначно, причем получение однозначного решения указывает на полноту такой системы уравнений. Решение этой совокупности уравнений дает любые интересующие нас зависимости параметров процесса друг от друга. Их можно получить любое количество. Только некоторые из них показаны на рис. 10.1 на примере процесса получения нитрида алюминия. На рисунке проиллюстрированы по две основные зависимости, полученные при различных способах проведения процесса:

- при постоянном потоке реактивного газа в камеру,
- при постоянном напряжении разряда,
- при постоянном токе разряда.
- при условии получения стехиометрического состава пленки.

На первом графике показана зависимость скорости роста пленки от тока разряда. На практике в таком виде она может быть получена только при использовании одного из известных способов контроля парциального давления. В противном случае указанная зависимость представляет собой хорошо известную гистерезисную петлю с двумя самопроизвольными переходами между двух равновесных состояний разряда. На втором графике мы видим известную N-образную вольтамперную характеристику (ВАХ) такого разряда [15].

Как известно, для такого разряда необходимо использовать источники питания со стабилизированным напряжением [15]. Это проиллюстрировано на второй паре графиков. Здесь, как мы видим, основные параметры процесса монотонно зависят друг от друга, и никаких гистерезисных петель не возникает. То есть процесс устойчив и легко управляем.

Третья пара графиков иллюстрирует противоположную ситуацию, когда выбран неподходящий для данного процесса источник питания, а именно источник стабилизированного тока. Хорошо видно, что зависимости не однозначные, и процесс неустойчив.

И, наконец, четвертая пара графиков представляет совокупность режимов, обеспечивающих осаждение стехиометрических пленок нитрида алюминия. При соблюдении этого условия скорость нанесения пленки прямо пропорциональна току разряда, и напряжение разряда плавно растет с ростом тока.

Таким образом, приведенные графики описывают различные способы проведения реактивного процесса, подтверждение которым мы наблюдали в своих экспериментах. Причем особенно часто проверялись зависимости, получаемые при стабилизированном напряжении разряда. В этом режиме мы работали практически постоянно. В этом же режиме мы провели сравнение экспериментальных данных с расчетными данными, полученными при использовании двух моделей известной и новой. Результаты сравнения двух моделей с экспериментом приведены в таблице 10.2. В расчетах и в эксперименте нами использовался следующий режим: магнетрон с алюминиевой мишенью площадью 0,2 м², напряжение разряда 365 В, поток азота в камеру 0,236 Вт, скорость откачки камеры 5 м³/с.

Сравнение режимов по таблице 10.2 позволяет сделать выбор более правильной модели. Как и ожидалось, это оказалась предлагаемая модель. Она ближе к эксперименту по величине парциального давления азота в разряде и скорости поглощения азота растущей пленкой. Это говорит о том, что в основу новой модели положен механизм, более близкий к реальности.

Аналогичные сравнения были проведены по работам других авторов [7, 16], посвященным получению нитрида алюминия реактивным магнетронным распылением на постоянном токе. И здесь предлагаемая модель дает результаты значительно лучше совпадающие с экспериментом.

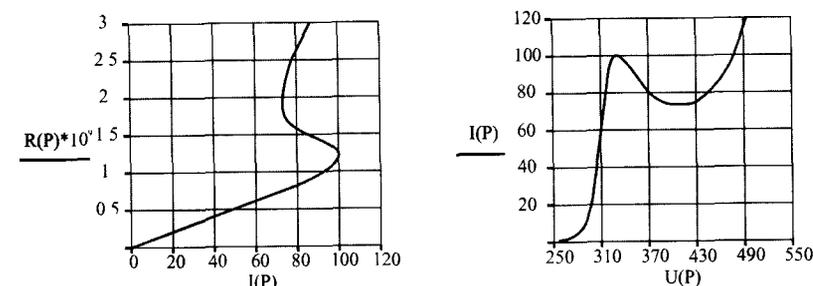
Таким образом, предложенная модель имеет другую область применения, не охватываемую существующей моделью, в частности, она работает при моделировании таких важных для практики процессов, как получение нитридов кремния или алюминия. Она позволяет для этих процессов гораздо лучше рассчитывать характеристики процесса, и проводить его оптимизацию, не прибегая к многочисленным экспериментам.

Таблица 10.1

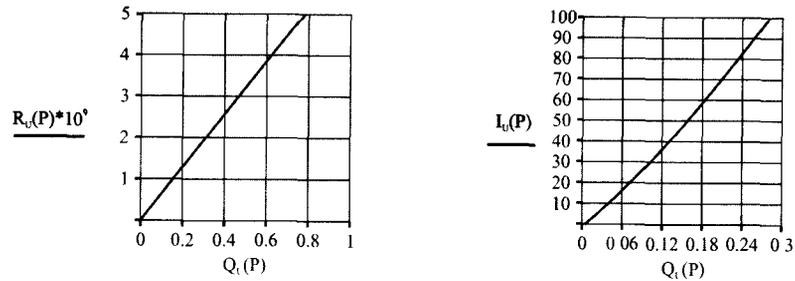
Металлы	Газы	
	кислород	азот
Ti, Zr, V, Nb, Ta, W, Mo	3	3
Cr, Fe, Co	3	2
Al, Si, Cu, Pt, Zn, In, Ge, Sn	3	0

Таблица 10.2

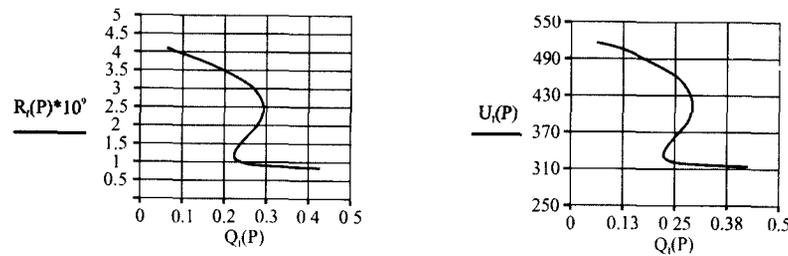
	Ток разряда, А	Давление в разряде, мм рт. ст.	Скорость поглощения азота, м ³ /с
Новая модель	2,45	3·10 ⁻³	78
Известная модель	2,40	7,2·10 ⁻³	28
Эксперимент	2,45	2,7·10 ⁻³	82,4



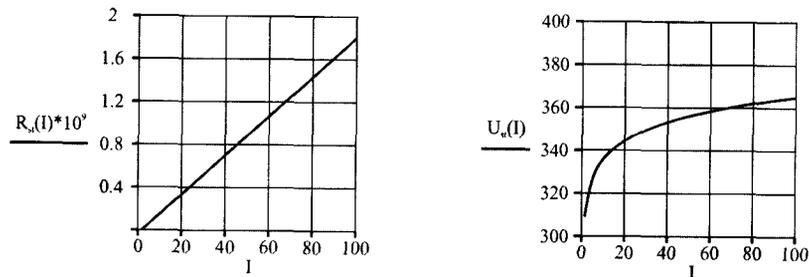
А) при постоянном потоке азота



Б) при постоянном напряжении разряда



В) при постоянном токе разряда



Г) при получении стехиометрического нитрида

Рис. 10.1. Характеристики реактивного процесса получения пленок нитрида алюминия

Литература к главе 10

1. S. Berg and all., Modeling of reactive sputtering of compound materials.— J. Vac. Sci. Technol. A, 1987, v.5, №2, p. 202-207.
2. S. Berg and all, Process modeling of reactive sputtering.— J. Vac. Sci. Technol. A, 1989, v. 7, №3, p. 1225-1229.
3. S. Berg and all., Computer modeling as a tool to predict deposition rate and film composition in reactive sputtering process.— J. Vac. Sci. Technol. A, 1998, v. 16, №3, p. 1277-1285.
4. P. Carlsson and all., Reactive sputtering using two reactive gases, experiments and computer modeling.— J. Vac. Sci. Technol. A, 1993, v. 11, №4, p. 1534-1539.
5. T. Nyberg and all., In situ diagnostic studies of reactive co-sputtering from two targets by means of soft x-ray and optical emission spectroscopy.— J. Vac. Sci. Technol. A, 1997, v. 15, №1, p. 145-148.
6. V.A. Koss, I.V. Ioffe and A. Belkind, Computational model of reactive sputtering.— J. Vac. Sci. Technol. A, 1993, v. 11, №3, p. 701-703.
7. H. Ofner, and all., A reactive sputtering model applied to AlN.— J. Vac. Sci. Technol. A, 1991, v. 9, №5, p. 2795-2796.
8. Л.П. Саблев, В.М. Шулаев и А.А. Андреев. Сорбционные высоковакуумные электродуговые насосы большой производительности для технологического оборудования. — В сборнике трудов научно-практического симпозиума «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении», Харьков, 2000, 17-21 с.
9. Erler H.G., Reiese G., Weissmantel C. Nitride film deposition by reactive ion beam sputtering. — Thin Solid Films, 1980, v. 65, №2, p. 233-245.
10. Weissmantel C. Ion beam utilization for etching and film deposition. — Le vide, les couches minces, 1976, №183, p. 107-116.
11. Harper J.M.E., Cuomo J.J., Hentzell H.T.G. Synthesis of compound thin film by dual ion beam deposition. 1.Experimental approach. — J. Appl. Phys., 1985, v. 58, №1, p. 550-555.
12. Hentzell H.T.G., Harper J.M.E., Cuomo J.J. Structure of Al-N films deposited by a quantitative dual ion beam process. — Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1984, v. 27, p. 519.
13. Affinito J., Parsons R.R., Mechanisms of voltage controlled, reactive, planar magnetron sputtering of Al in Ar/N₂ and Ar/O₂ atmospheres. — J. Vac. Sci. Technol. A, 1984, v. 2, №3, p. 1275-1284.
14. Mogab C.J., Lugujo E., Backscattering analysis of the composition of silicon-nitride films deposited by rf reactive sputtering. — J. Appl. Phys, 1976, v. 47, №4, p. 1302-1309.
15. Сейдман Л.А., Способы управления процессом реактивного магнетронного распыления с помощью вольтамперных характеристик разряда. — В книге «Труды постоянно действующего научно-технического семинара “Электровacuумная техника и технология”», М., 1999, 168 с.
16. Schulte J., Sobe G. Magnetron sputtering of aluminium using oxygen or nitrogen as reactive gas. — Thin Solid Films, 1998, №324, p. 19-24.

ГЛАВА 11

ПОЛУЧЕНИЕ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ СЛОЕВ РАЗЛИЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ В ОДНОМ ПРОЦЕССЕ НА МАГНЕТРОННОЙ УСТАНОВКЕ

В производстве современных полупроводниковых приборов используются чередующиеся слои различных диэлектриков для проведения тонкой фотолитографии или получения сложных пространственных структур. Особенно часто применяются чередующиеся слои на основе соединений кремния: его нитрида и оксида. Получать такие слои желательно в одном вакуумном цикле, так как это не только увеличивает производительность, но и снижает количество дефектов в слоях [3].

При нанесении покрытий на полупроводниковые структуры, в частности из арсенида галлия, существенно ограничена возможная температура нанесения. Она должна быть не выше 300°C. При такой температуре достаточно высокую адгезию и скорость нанесения обеспечивает метод реактивного магнетронного нанесения, в котором кремниевая мишень расплывается в смеси аргона и реактивного газа, азота или кислорода [2–3]. Такой метод позволяет на движущиеся подложки наносить слои химических соединений с достаточно большой скоростью: 1–2 мкм/час.

Для осуществления указанного процесса была использована описанная выше универсальная установка «Каролина Д-10». Мишень из шести пластин монокристаллического кремния марки КЭФ 0,1 была прижата к водоохлаждаемому основанию из нержавеющей стали.

Подложки из кремния или арсенида галлия устанавливались на кассетах, объединенных в барабан диаметром 500 мм и высотой 450 мм. Общая загрузка составляла 36 подложек. Нанесение велось на внутреннюю поверхность барабана, вращающегося со скоростью 20 оборотов в минуту.

Перед нанесением слоев подложки нагревались до температуры 250°C.

Газы (аргон, азот и кислород) в камеру подавались через газораспределительную систему ионного источника. Их поток регулировался регуляторами расхода газов с помощью блока управления подачей газов типа РРГ-9-2,5.

В описанных условиях были получены вольтамперные характеристики (ВАХ) разрядов в различных газовых средах (рис. 11.1). Первая ВАХ получена в среде аргона при его потоке в камеру 0,026 Вт. Она представляет собой типичную для неактивного разряда монотонную кривую. Ее можно, как это обычно делается, описать уравнением:

$$I = a \cdot U^b, \quad (11.1)$$

где I – ток разряда в амперах, U – напряжение разряда в вольтах, $a = 2 \cdot 10^{-15}$ – коэффициент пропорциональности, $b = 6$ – показатель степени.

Показатель степени характеризует качество магнитной ловушки магнетрона, удерживающего электроны у поверхности подложки. Его сравнительно небольшая величина в нашем случае говорит о том, что магнитное поле ослаблено из-за большой суммарной толщины мишени и ее водоохлаждаемого основания. Можно было уменьшить толщину мишени, но мы предпочли оставить ее такой для достижения большего срока ее службы и увеличения коэффициента ее использования.

Как известно [1], чтобы все режимы разрядов с кремниевыми мишенями были устойчивы, необходимо применять источник питания магнетрона со стабилизированным напряжением. Это и было осуществлено во всех последующих экспериментах. Вторая ВАХ была получена, когда к аргону добавлен поток кислорода 0,032 Вт. Она имеет типичный для реактивных процессов N-образный вид [1–4].

Третья ВАХ получена при том же потоке аргона и потоке азота 0,023 Вт. Вместо обычно получаемой N-образной характеристики мы видим монотонную, что говорит о том, что быстрота поглощения азота пленкой много меньше скорости поглощения кислорода и сравнима со скоростью откачки камеры.

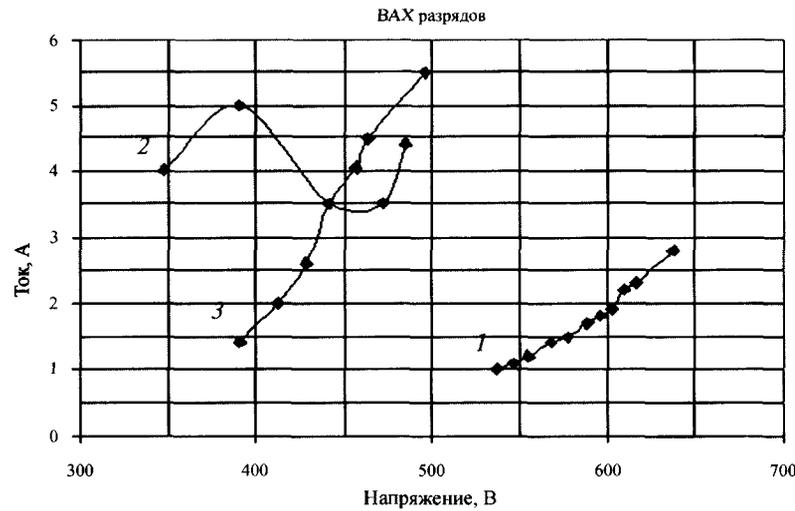


Рис. 11.1. Вольтамперные характеристики разряда в магнетроне с кремниевой мишенью: 1 – в среде аргона, 2 – в смеси аргона и кислорода, 3 – в смеси аргона и азота

На рис. 11.1 хорошо видно, что ВАХ реактивных разрядов соответствуют напряжениям разряда существенно меньшим, чем ВАХ неактивного разряда. Рабочий диапазон напряжений при получении соединений должен быть 400–550 В. Во всех случаях, чем выше напряжение разряда, тем больше скорость нанесения, но больше концентрация атомов кремния в слоях. Чтобы быстрее найти оптимум, мы использовали компьютерную модель реактивного процесса (глава 10). Она позволяет вычислить все параметры процесса, в частности степень покрытия поверхности мишени диэлектриком – θ . Это, в свою очередь, дает возможность вывести аналитические зависимости ВАХ реактивного разряда. Они имеют следующий вид:

$$I = a \cdot U^{b+c\theta}, \quad (11.2)$$

где c – коэффициент, зависящий от величины коэффициента вторичной электронной эмиссии диэлектрика. В наших условиях для нитрида $c=0,55$, а для оксида $c=0,9$.

Результаты расчета ВАХ приведены на рис. 11.2 и 11.3. Их достаточно хорошее совпадение с экспериментальными (рис. 11.1) гово-

рит о правильности используемой модели. Это позволило нам сократить число дальнейших экспериментов по определению интересующих нас взаимозависимостей параметров процесса при фиксированном напряжении разряда. Результаты расчета параметров процесса с помощью модели приведены на графиках (рис. 11.4–11.11).

Изменения скорости поглощения реактивного газа растущей пленкой при стабилизированном напряжении разряда – f_U показаны на рисунках 11.10 и 11.11. Зависимости сильно отличаются друг от друга. Во время получения нитрида при росте тока f_U сначала растет, проходит через максимум и снижается. Но даже в максимуме не превышает $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$. В тех же условиях во время получения оксида f_U меняется от $5 \text{ м}^3/\text{с}$ при получении стехиометрического соединения до более чем $50 \text{ м}^3/\text{с}$ при малых потоках кислорода. Это подтверждает данное выше объяснение различия в форме ВАХ обоих разрядов.

Остальные свойства разряда в обоих реактивных газах похожи друг на друга. На рисунках 11.4 и 11.6 изображены зависимости тока разряда от потока реактивного газа в вакуумную камеру. Зависимости для обоих газов практически линейные, то есть ток разряда сам по себе может служить мерой потока реактивного газа.

Скорости роста пленок нитрида и оксида приведены соответственно на рис. 11.8 и 11.9. Зависимости скоростей

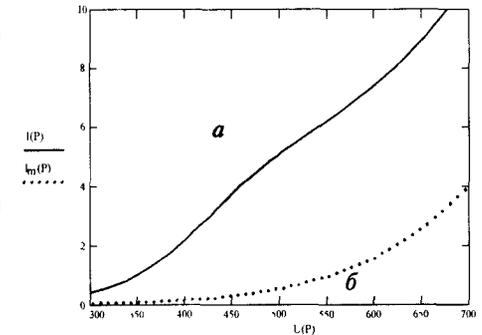


Рис. 11.2. Вольт-амперные характеристики магнетронного разряда: а – в смеси аргона и азота, б – в аргоне

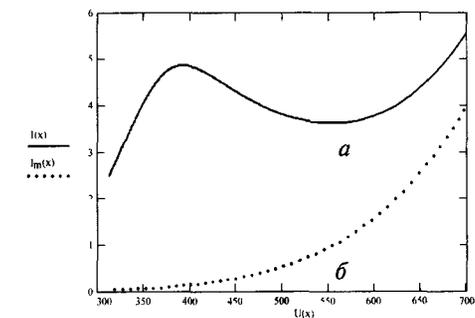


Рис. 11.3. Вольт-амперные характеристики магнетронного разряда: а – в смеси аргона и кислорода, б – в аргоне

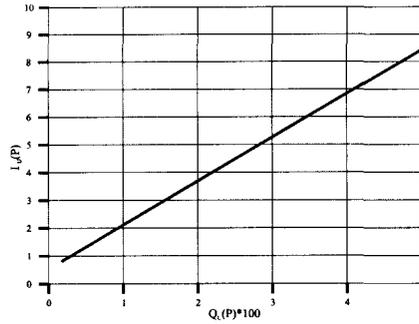


Рис. 11.4. Зависимость тока разряда в амперах от потока азота в камеру в Вт при постоянном напряжении разряда

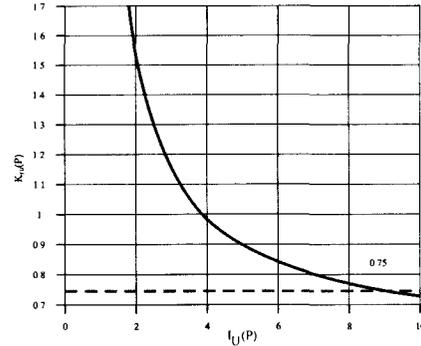


Рис. 11.5. Зависимость состава пленки нитрида кремния от тока разряда в амперах. Пунктиром отмечен стехиометрический состав

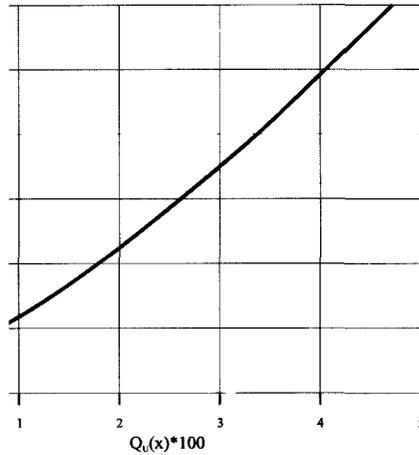


Рис. 11.6. Зависимость тока разряда в амперах от потока кислорода в камеру при постоянном напряжении разряда

роста от тока разряда монотонные, почти линейные. Никаких спонтанных переходов между различными состояниями разряда не наблюдается, и все режимы стабильны, что подтверждает правильность выбора ИП.

Состав пленок, выраженный как отношение числа атомов кремния в пленке к числу атомов газа в ней, зависит от тока разряда (рис. 11.5 и 11.7). Зависимости, как и в предыдущих случаях, монотонные. Чем больше поток реактивного газа, тем больше ток разряда и ближе состав пленки к стехиометрическому. Из этих графиков можем определить режимы, необходимые для получения стехиометрических пленок нитрида кремния и его оксида. Итоги подведены в таблице 11.1, где приведены расчетные режимы получения стехиометрических пленок нитрида и оксида кремния.

Итоги подведены в таблице 11.1, где приведены расчетные режимы получения стехиометрических пленок нитрида и оксида кремния.

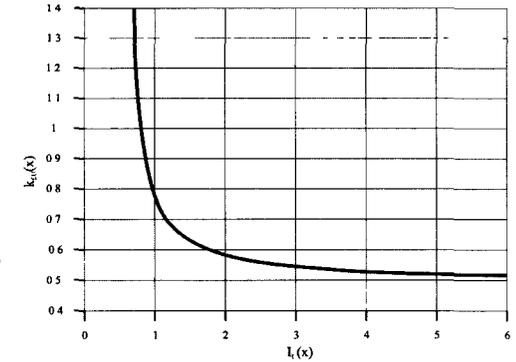


Рис. 11.7. Зависимость состава пленки оксида кремния от тока разряда в амперах

Таблица 11.1

Соединение	Напряжение разряда, В	Ток разряда в смеси газов, А	Поток реактивного газа, Вт	Скорость нанесения, мкм/ч
Нитрид	510	6	0,03	1,2
Оксид	500	5,5	0,04	1,44

Таблица 11.2

Соединение	Напряжение, В	Ток разряда в смеси газов, А	Поток реактивного газа, Вт	Скорость нанесения, мкм/ч
Нитрид	500	6	0,025	1,26
Оксид	520	5	0,037	1,35

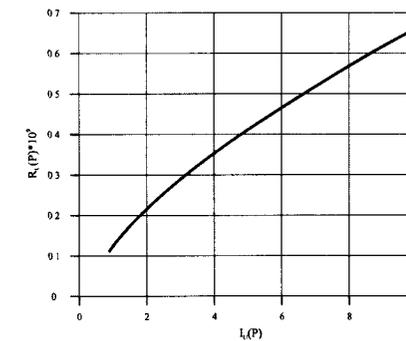


Рис. 11.8. Зависимость скорости роста пленки нитрида в м/с от тока разряда в амперах

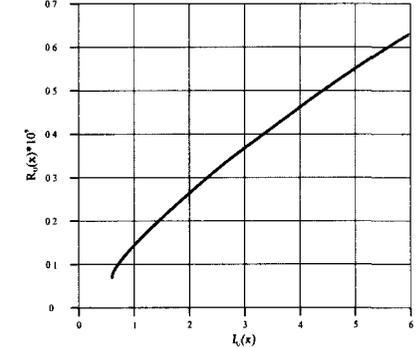


Рис. 11.9. Зависимость скорости роста пленки оксида кремния в м/с от тока разряда в амперах

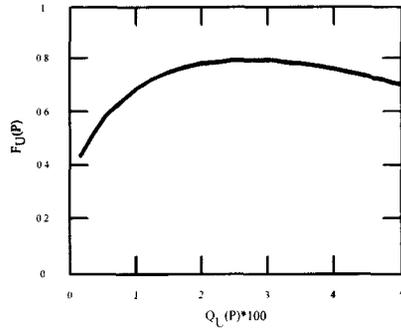


Рис. 11.10. Скорость поглощения азота растущей пленкой

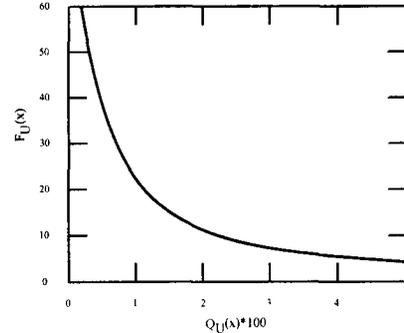


Рис. 11.11. Скорость поглощения кислорода растущей пленкой

Для проверки рабочих режимов таблицы 11.1 были проведены процессы нанесения слоев нитрида и оксида кремния при различных напряжениях, близких к расчетным. Таким способом были найдены оптимальные режимы, при которых полученные слои были прозрачны и бесцветны. Состав таких пленок близок к стехиометрическому. Эти режимы приведены в таблице 11.2.

В режимах, указанных в таблице 11.2, мы проводили нанесение пленок на полупроводниковые пластины, содержащие структуры приборов. Одной из важнейших технологических задач, которые необходимо было решить при создании высокочастотного полевого транзистора, было формирование субмикронного электрода затвора, расположенного точно в середине канавки шириной 1,5–2 мкм. Размер затвора и точность его совмещения с канавкой существенно влияли на коэффициент усиления по мощности и пробивное напряжение затвора. Наилучшие результаты были получены при использовании технологии самосовмещения электрода затвора с канавкой. Самосовмещение осуществлялось путем использования двухслойных диэлектрических покрытий SiO_2 и Si_3N_4 . Далее использовали селективность травления каждого материала. На верхнем слое нитрида кремния методом электронной литографии формировали резистивную маску с размерами окна, соответствующими размерам субмикронного электрода затвора. После чего методом ионного травления такие окна формировали в слое нитрида. Далее химическим травлением в слое оксида формировали окна размером 1,5–2 мкм. Окна вследствие изотропности химического травления ока-

зывались точно совмещенными с окнами в слое нитрида. Через полученную таким образом структуру сначала травили канавку в полупроводниковой подложке, а затем напылением формировали электрод затвора. В описанной технологии самосовмещения к используемым диэлектрическим слоям предъявляли следующие основные требования: хорошая адгезия к подложке и между слоями, низкая плотность объемного заряда, низкий уровень механических напряжений и отсутствие посторонних примесей. Этим требованиям хорошо отвечают слои нитрида и оксида кремния, полученные в данной работе.

Резюме:

Разработана технология нанесения пленок кремния, его оксида и нитрида в любой комбинации. Скорость нанесения диэлектриков не менее 1,5 мкм/ч на движущуюся подложку и 15 мкм/ч на неподвижную. Температура подложек во время нанесения пленок не превышала 300°C.

Литература к главе 11

1. Сейдман Л.А. Способы управления процессом реактивного магнетронного распыления с помощью вольтамперных характеристик разряда. — Труды постоянно действующего семинара «Электровакуумная техника и технология», под ред. А.В. Горина, М., 1999, 168 с.
2. Берлин Е.В., Воробьев А. и Сейдман Л.А. Получение чередующихся слоев диэлектриков на основе кремния. — ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2002, вып. 5, 50–52 с.
3. Сейдман Л.А., Фомичев В.Н. Новое применение установки «Оратория-5»: нанесение диэлектриков на крупноформатные подложки. — Электронная промышленность, 1990, вып. 3, 60–61 с.
4. Сейдман Л.А., Спектор А.А. Низкотемпературное нанесение пленок двуокиси кремния. — Электронная промышленность, 1988, вып. 7, 13–14 с.
5. Berg S. and all Computer modeling as a tool to predict deposition rate and film composition in reactive sputtering process. — J. Vac. Sci. Technol. A, 1998, v. 16, № 3, p. 1277–1285.

ЧАСТЬ 2

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Введение

Тенденции развития мирового рынка электронной техники, а также экономические аспекты полупроводникового производства ведут к увеличению степени интеграции полупроводниковых приборов на поверхности подложек. Степень интеграции, в свою очередь, напрямую связана как с увеличением диаметра применяемых в производстве пластин, так и с уменьшением геометрических размеров полупроводниковых приборов на их поверхности. Сегодня размеры используемых подложек возросли до 300 мм, а степень интеграции выросла до одного миллиарда полупроводниковых приборов на одной пластине и более. Размеры элементов, формируемых на пластине, уменьшились до 0,09 мкм в серийном производстве.

С повышением требований к выпускаемой продукции растут соответственно требования к технологическим процессам, применяемым в производстве. Для новых более совершенных технологических процессов требуется создание принципиально нового вакуумного технологического оборудования, использующего перспективные физические принципы обработки и обеспечивающего непрерывность вакуумного цикла формирования элементов микросхем в рабочих камерах (концепция так называемых кластерных систем обработки). Для решения проблемы формирования микроструктур с размерами элементов в субмикронной области наиболее перспективны ионно-плазменные процессы в непрерывном вакуумном цикле с нанесением. В настоящее время лидерство по-прежнему удерживают высокоэффективные системы обработки, использующие плазму, генерируемую в скрещенных электрическом и магнитном полях [1]. В последние годы возрос интерес к системам и методам, реализующим ионно-плазменную обработку при использовании резонансных

явлений в ВЧ- и СВЧ-плазме [2–3]. Обеспечивая генерацию плазмы высокой плотности (более 10^{11} см⁻³) и высокие скорости обработки, в то же время эти системы создают низкий уровень теплового и зарядового воздействия на обрабатываемые структуры, а также обеспечивают высокую чистоту процесса, поскольку работают при сравнительно низких давлениях и сводят к минимуму возможность паразитного распыления элементов внутрикамерного устройства.

В сухом плазменном травлении, плазма высокой плотности используется при низком давлении для высокоскоростного анизотропного травления кремния оксида кремния и поликремния.

В подобных устройствах используются три основных принципа создания плазмы: устройства на электронном циклотронном резонансе ЭЦР (ECR) [2], геликонные источники плазмы [3] а также плазменные источники на индуктивном ВЧ-разряде (ICP) [4, 5, 16–21]. ЭЦР источники позволяют получить однородную плазму большого диаметра при низком давлении газа (до 10^{-1} Па), они дороги вследствие необходимости создавать сильные (до 1 кГс (875 Гс на частоту 2,45 ГГц)) магнитные поля и применять мощные генераторы электрического поля СВЧ-диапазона.

Источники, использующие плазму, создаваемую распространяющимся в ней геликоном имеют гораздо более низкую стоимость при сравнимых рабочих давлениях и плотностях плазмы, однако необходимость создавать даже более слабое (50–100 Гс) магнитное поле ведет к удорожанию установки и трудностям с получением однородной плазмы при увеличении размера обрабатываемых подложек. Поэтому в современных технологических линиях все шире используются источники плазмы высокой плотности на основе ВЧ-разряда, формирующие так называемую «трансформаторно-связанную (или индуктивно-связанную) плазму» (принятая латинская аббревиатура TSP или ICP – Inductively Coupled Plasma). TSP-разряд позволяет травить материалы микроэлектроники высоким разрешением (менее 0,2 мкм) и осаждать слои из парогазовых смесей (плазменно стимулированный CVD-процесс), обеспечивая при этом высокую эффективность и качество проведения процесса [4].

Многие ведущие производители оборудования для плазмохимического травления, такие, например, как Applied Materials Inc (Санта Клара, Калифорния), LSI Logic Corporation (Милпи-

лас, Калифорния), LAM Research Corporation (Фремонт, Калифорния), в настоящее время активно занимаются разработкой реакторов такого типа. Особенностью ТСР-реакторов являются высокая концентрация плазмы (порядка 10^{12} см^{-3}), низкий потенциал плазмы, характерный для индукционного разряда, возможность независимого регулирования плотности плазмы и энергии ионов с помощью подачи независимого смещения на подложку, высокая равномерность ионного тока на подложку большого диаметра.

В настоящее время внимание разработчиков технологического оборудования направлено на изучение высокочастотных источников плазмы высокой плотности, которые позволяют методом ионно-плазменного травления получать высокую однородность травления подложек с высокой селективностью.

ГЛАВА 12

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МОДЕЛИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

К высокочастотным обычно относят разряды, создаваемые внешним переменным полем с частотой, лежащей в диапазоне радиочастот (1–100 МГц). При этом обычно верны следующие ограничения на частоту:

1. За период одного колебания внешнего поля распределения плотности и температуры электронов остаются квазистационарными, т. е. для частоты внешнего поля выполняются соотношения $\omega \gg \nu_{en}(2m/M)$ и $\omega \gg \nu_i$, где ν_{en} – частота транспортных столкновений электронов, ν_i – частота ионизации, m/M – отношение масс электрона и иона (нейтрала).
2. Естественно также положить размеры описываемой системы (L) много большими амплитуд колебания частиц под действием внешнего поля: $\omega^2 \gg e|E|/mL$; где e – элементарный электрический заряд, $|E|$ – амплитуда внешнего ВЧ-поля.

Высокочастотные разряды делятся на индуктивные, поддерживаемые замкнутым вихревым электрическим полем, не пересекающим границу плазмы, и емкостные, электрическое поле которых пересекает границу плазмы, создавая на ней пространственные заряды. В последнем случае ВЧ-поле обычно выпрямляется на нелинейности в слое пространственного заряда, создавая вблизи границы постоянное поле, ускоряющее ионы. Поэтому цена одного электрона в емкостном разряде обычно больше, чем в индуктивном (т. е. при равном вкладе ВЧ-мощности в равный объем генерируемой плазмы ее концентрация в случае индукционного разряда будет выше, чем у емкостного).

Кроме того, большие электрические поля и высокие энергии ионов, необходимые для стационарного существования емкостного

разряда, могут привести к пробое диэлектрика на подложке, с другой стороны иногда оказываются полезными, например, при ионном травлении подложек распылением в благородных газах.

Источники плазмы на ВЧ-разряде обладают следующими преимуществами по сравнению с источниками плазмы постоянного тока.

1. Отсутствие дрейфа частиц в постоянном поле уменьшает потери частиц, поэтому ВЧ-разряд удается зажигать при более низком давлении, чем на постоянном токе.
2. ВЧ-разряду не нужны электроды (катод и анод), поэтому не страшно распыление их материала. Кроме того, отсутствие металлических (а тем более накаливаемых) электродов позволяет работать длительное время с химически активными газами.
3. Возможно регулирование энергии ионов, бомбардирующих обрабатываемые подложки изменением ВЧ-потенциала на подложкодержателе, причем такая регулировка возможна даже для диэлектрических подложек.

Для оценки параметров и расчета ВЧ-источников плазмы, так же как и других газоразрядных устройств (например, источников света) используется балансовый метод.

Этот метод включает в себя рассмотрение:

1. Баланса частиц в плазме.
2. Баланса энергии в плазме
3. Условий передачи энергии от ВЧ-поля электронам плазмы.
4. Условий возбуждения ВЧ-поля в разряде и передачи энергии ВЧ-генератора, возбуждаемому в плазме ВЧ-полю.

Функция распределения электронов по энергиям в разряде очень часто отличается от максвелловской, поэтому температуру электронов определяют соотношением $3kT_e/2 = \langle \epsilon \rangle$, где $\langle \epsilon \rangle$ – средняя энергия электронов. Кроме того, обычно при рассмотрении баланса предполагается, что температура электронов постоянна по всему объему реактора, что существенно упрощает задачу. Это условие выполняется, если давление рабочего газа достаточно мало (размер рабочей камеры L больше длины обмена энергией $\lambda_{en} (M/2m)^{1/2}$). Здесь λ_{en} – длина свободного пробега электронов. Если плотность электронов достаточно велика (выполнено условие $v_{ce} > v_{en} (2m/M)^{1/2}$, где v_{ce} – частота межэлектронных столкновений), то функцию распределения электронов по энергиям можно считать максвелловской.

12.1. Баланс заряженных частиц в плазме

Целью рассмотрения баланса заряженных частиц является определение среднего времени жизни электрона (или иона) в плазме. Время жизни зависит от геометрии рабочей камеры, рабочего газа и его давления. Простые соотношения для времени жизни известны для двух режимов плазменных реакторов низкого давления [8–13].

1. Диффузионный режим [10] (характерные размеры цилиндрического реактора: длина L и диаметр R много больше длины свободного пробега иона λ_{in})

$$\tau_{\text{жD}}^{-1} = D_a \left(\frac{2.405^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{L^2} \right). \quad (12.1)$$

Здесь $D_a = \mu_i kT_e / e$ – коэффициент амбиполярной диффузии, μ_i – подвижность ионов, k – постоянная Больцмана, e – элементарный электрический заряд.

2. Режим свободного пробега ионов $R, L \ll \lambda_{in}$. Решения известны только для одномерных задач [11]. Для цилиндрической геометрии

$$\tau_{\text{жL}}^{-1} \cong \sqrt{\frac{kT_e}{M}} \frac{2}{R}. \quad (12.2)$$

Предложена аппроксимационная формула [9], охватывающая также промежуточную область давлений

$$\tau_{\text{ж}} \cong \sqrt{\tau_{\text{жL}}^2 + \tau_{\text{жD}}^2}. \quad (12.3)$$

Чтобы разряд в рабочей камере мог существовать, за время $\tau_{\text{ж}}$ электрон, уходящий на стенку, должен родить один новый электрон, т.е. должно выполняться условие $\nu_i = \tau_{\text{ж}}^{-1}$. Частоту ионизации ν_i можно рассчитать по формуле

$$\nu_{i,q} = 4\pi N \int_0^{\infty} V \sigma_{i,q}(V) f_e(V) V^2 dV, \quad (12.4)$$

где $\sigma_{i,q}$ – сечение ионизации или возбуждения, $f_e(V)$ – функция распределения электронов по энергиям, которая предполагается изотропной.

Энергия, переносимая ионами на стенку в рамках модели Шоттки, рассчитана быть не может, так как движение последних в приграничной области теорией не описывается.

Для расчета частоты ионизации обычно используется линейная аппроксимация сечения

$$\sigma_i = a (\varepsilon - \varepsilon_s)$$

или аппроксимация Фабриканта

$$\sigma_q = \sigma_{ms} \frac{\varepsilon - \varepsilon_s}{\varepsilon_{ms} - \varepsilon_s} \exp\left(\frac{\varepsilon_{ms} - \varepsilon}{\varepsilon_{ms} - \varepsilon_s}\right),$$

где ε_{ms} — энергия, при которой сечение максимально и равно σ_{ms} , ε_s — порог сечения.

Эти аппроксимации неплохо описывают ход сечения вблизи порога, а также позволяют аналитически рассчитать интеграл:

$$v_i = \frac{2}{\sqrt{\pi}} a N \left(\frac{2kT_e}{e}\right)^{3/2} \frac{e^{1/2}}{m^{1/2}} \left(1 + \frac{\varepsilon_i}{2kT_e}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{kT_e}\right), \quad (12.5)$$

$$v_s = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sigma_{ms} N \left(\frac{kT_e}{m}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{\varepsilon_s}{2kT_e} \left(1 + \frac{kT_e}{\varepsilon_{ms} - \varepsilon_s}\right)\right) \exp\left(1 - \frac{\varepsilon_s}{kT_e}\right) / \left(1 + \frac{kT_e}{\varepsilon_{ms} - \varepsilon_s}\right)^3. \quad (12.6)$$

Согласно последним формулам частота ионизации прямо пропорциональна давлению нейтралов и стремится к постоянной величине с ростом температуры электронов. Поэтому существует минимальное давление нейтралов, при котором разряд в рабочей камере данных размеров и формы при данном рабочем газе еще может существовать. Поэтому, если необходимо создать источник малого размера при низком давлении газа, для уменьшения потерь частиц на стенку в разряде создают магнитное поле.

При пробое время жизни электронов τ_{br} определяется при высоких давлениях свободной диффузией, либо временем пролета электрона на стенку [13]. Диффузионное время жизни электрона при пробое мы обозначим τ_{brD} , а пролетное — τ_{brL} .

$$\tau_{brD}^{-1} = \mu_e \frac{kT_e}{e} \left(\frac{2.405^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{L^2}\right), \tau_{brL}^{-1} \cong \sqrt{\frac{kT_e}{m}} \frac{2}{R}.$$

Когда эти времена близки, τ_{br} можно оценить по аппроксимационной формуле

$$\tau_{br} \cong \sqrt{\tau_{brL}^2 + \tau_{brD}^2}.$$

Здесь μ_e — подвижность электронов, которая в сотни раз больше подвижности ионов.

Поскольку скорость электронов и их подвижность много больше скорости и подвижности ионов, то время жизни электронов при пробое оказывается много меньше их времени жизни в стационарном разряде. Это в частности, обусловлено существованием в стационарном разряде потенциального барьера, отражающего электроны на границе плазмы, который при пробое газа отсутствует. Поэтому ВЧ-поле в разрядной камере, необходимое для зажигания разряда обычно больше, чем поле в стационарном разряде. Кроме того, в области низких давлений существует диапазон условий, когда существование стационарного разряда возможно, а его инициация — нет, в силу недостаточности ионизации. Поджиг разряда в данных условиях осуществляют кратковременным увеличением давления в разрядной камере или наложением магнитного поля, уменьшающего потери электронов на стенку. Отметим, что формулы для времени жизни электрона, приведенные в данной главе, являются лишь оценками. Получение более точных результатов требует проведения численных расчетов.

12.2. Баланс энергии электронов в плазме

Баланс энергии электронов рассчитывается с помощью уравнения (см. например [8])

$$Q_{HF} = Q_{upr} + Q_{ex} + Q_{osc} + Q_{rot} + Q_i + Q_{st}. \quad (12.7)$$

Здесь Q_{HF} — энергия, сообщаемая электронам электрическим полем, Q_{upr} — энергия, передаваемая электронами нейтралам в упругих столкновениях, Q_{ex} , Q_{osc} , Q_{rot} , — затрачиваемая на возбуждение электронных, колебательных и вращательных возбужденных состояний (колебательные и вращательные состояния существуют только в молекулярном газе), Q_i — энергия, затрачиваемая на ионизацию, Q_{st} — энергия, теряемая электронами и ионами на стенке.

Задача оптимизации реактора состоит во вложении энергии в нужные степени свободы. В частности, для установки ионного реактивного травления нужно достигать максимальной степени ионизации и ускорять ионы, движущиеся к стенке. При создании химичес-

ких лазеров очень часто нужно запастись энергией в колебательных степенях свободы. Для технологических реакторов низкого давления возбужденные состояния обычно дезактивируются за счет спонтанного излучения. Энергия, теряемая электронами, может быть рассчитана по следующим формулам:

$$Q_{upr} = \int_0^R r dr \int_0^L n(r, z) dz \left\{ \frac{2m}{M} v_{en} \frac{3}{2} k (T_e - T_g) \right\}, \quad (12.8)$$

$$Q_{ex} + Q_{ocs} + Q_{rot} = \int_0^R r dr \int_0^L n(r, z) dz \left\{ \sum_s v_s(T_e) \varepsilon_s \right\}, \quad (12.9)$$

$$Q_i = \int_0^R r dr \int_0^L n(r, z) dz \left\{ v_i(T_e) \left(\varepsilon_i + \frac{3}{2} k T_e \right) \right\}, \quad (12.10)$$

$$Q_{st} = \int_0^R r dr \int_0^L n(r, z) dz \left\{ v_i(T_e) \left(\frac{1}{2} k T_e \ln \left(\frac{M}{m} \right) \right) \right\}. \quad (12.11)$$

При записи этих соотношений мы совместно учли все виды неупругих столкновений (электронное, колебательное и вращательное возбуждение). Частоты неупругих столкновений рассчитываются по формуле (12.4). Если сечение соответствующего процесса удастся приближенно описать аппроксимацией Фабриканта, то для частоты неупругих столкновений можно использовать формулу (12.6). Энергия, затрачиваемая на ионизацию, в конце концов, выделяется на стенках реакторов при рекомбинации электронов и ионов. При записи энергии, теряемой на стенках ионами, мы не учли возможное дополнительное ускорение ионов за счет выпрямления ВЧ-полей, в приграничных областях плазмы. В отсутствие бесстолкновительного поглощения энергии [14] и магнитных полей энергия, передаваемая электронам от ВЧ-поля, определяется соотношением

$$Q_{HF} = \int_0^R r dr \int_0^L \frac{n(r, z) e^2 v_{en} \bar{E}^2(r, z)}{m(\omega^2 + v_{en}^2)} dz. \quad (12.12)$$

Иногда правую часть уравнения баланса энергии записывают в виде

$$w_1(T_e) = \frac{Q_{upr} + Q_{ex} + Q_{ocs} + Q_{rot} + Q_i + Q_{st}}{\int_0^R r dr \int_0^L n(r, z) dz} = \kappa(T_e) v_{en} \frac{3}{2} k (T_e - T_g), \quad (12.13)$$

где κ – средняя доля энергии, теряемая электроном в столкновениях.

Пример зависимости κ от температуры для гелия приведен на рис. 12.1 [8, 15]. Из рисунка следует, что при слабом нагреве электронов преобладают упругие, а при сильном – неупругие потери.

Формулы, содержащиеся в двух последних главах, позволяют рассчитать мощность, которую необходимо вложить в разряд для создания плазмы с заданными параметрами и являются основой на начальном этапе разработки реактора.

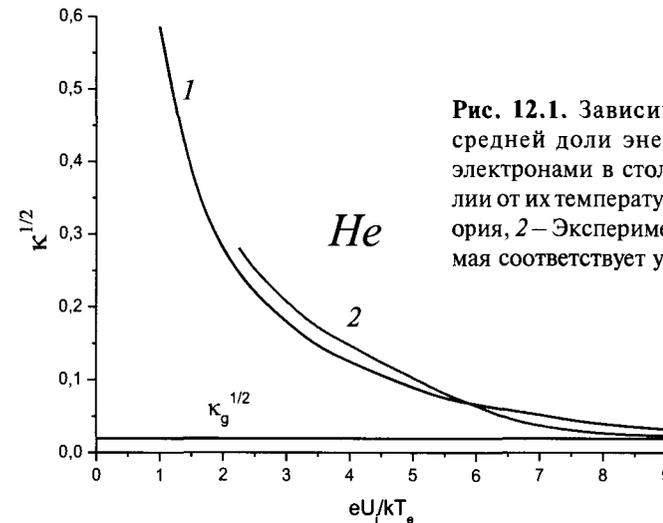


Рис. 12.1. Зависимость корня из средней доли энергии, теряемой электронами в столкновениях в гелии от их температуры [8, 15]: 1 – Теория, 2 – Эксперимент. Нижняя прямая соответствует упругим потерям

ГЛАВА 13

РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЧ ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ

Рассмотрим теперь некоторые практические конструкции плазменных технологических высокочастотных реакторов.

13.1. Диодный емкостной плазменный реактор (рис. 13.1)

Реактор содержит помещенные в вакуумную камеру 1: активный электрод 2, с расположенной на нем обрабатываемой подложкой 3, подключенный к ВЧ-генератору 5 и заземленный электрод 4. Электрическое поле создается между пластинами, к которым приложено ВЧ-напряжение, и может быть рассчитано как поле в конденсаторе с неоднородным заполнением (включая плазму и слои пространственного заряда), т. е. основной модели является уравнение непрерывности полного тока. Некоторым оправданием такой модели служит утверждение, что характерный размер разряда много меньше длин волн, распространяющихся в плазме, однако оно нуждается в дополнительных подтверждениях.

ЕМКОСТНОЙ РЕАКТОР

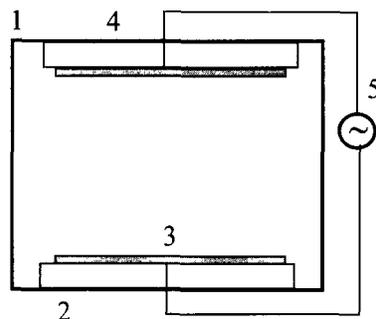


Рис. 13.1. Диодный емкостной плазменный реактор

Вариант триодного емкостного реактора [16] представлен на рис. 13.2. По сравнению с диодным реактором он содержит дополнительную сетку 6, располо-

женную между электродами и находящуюся под плавающим потенциалом. При этом в пространстве между сеткой и активным электродом реализуется эффект «полого катода». Плотность заряженных частиц вблизи подложки в триодном реакторе увеличивается в 3–4 раза, а автосмещение на электроде уменьшается в 4–5 раз.

ТРИОДНЫЙ РЕАКТОР

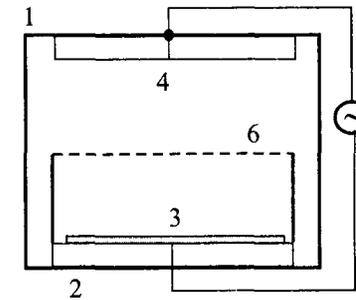


Рис. 13.2. Триодный емкостной плазменный реактор

ИНДУКТИВНЫЙ РЕАКТОР

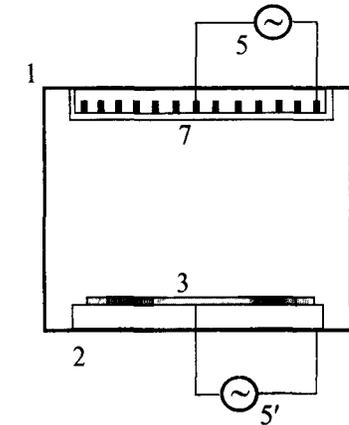


Рис. 13.3. Индуктивный плазменный реактор

Пример такого разряда приведен на рис. 13.3. Электрическое поле обычно возбуждается как поле индукции, возбуждаемое антенной в виде плоской или цилиндрической катушки индуктивности (рис. 13.4). К антенне подводится ВЧ-мощность от генератора 5. Подложка 3 обычно размещается на подложкодержателе 2, представляющем собой плоский электрод. Для независимого управления энергией ионов, бомбардирующих подложку, к подложкодержателю подводится ВЧ-напряжение от дополнительного ВЧ-генератора 5', частота которого может не совпадать с частотой основного генератора 5. Электростатическое экранирование индуктивных антенн (рис. 13.4) применяется, когда необходимо дополнительно уменьшить емкостную составляющую поля.

13.2. Источники на индуктивно связанной плазме [17–19]

Электрическое поле обычно возбуждается как поле индукции, возбуждаемое антенной в виде плоской или цилиндрической катушки индуктивности (рис. 13.4). К антенне подводится ВЧ-мощность от генератора 5. Подложка 3 обычно размещается на подложкодержателе 2, представляющем собой плоский электрод. Для независимого управления энергией ионов, бомбардирующих подложку, к подложкодержателю подводится ВЧ-напряжение от дополнительного ВЧ-генератора 5', частота которого может не совпадать с частотой основного генератора 5. Электростатическое экранирование индуктивных антенн (рис. 13.4) применяется, когда необходимо дополнительно уменьшить емкостную составляющую поля.

С точки зрения численного расчета, электрическое поле катушки наиболее удобно рассчитывается с помощью скалярного φ и векторного \mathbf{A} потенциалов.

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t},$$

которые удовлетворяют уравнениям [51, с. 116]

$$\nabla^2 \mathbf{A} + \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j}, \quad \nabla^2 \varphi + \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

где ε_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, \mathbf{j}, ρ – распределения плотности тока и пространственного заряда в антенне. Решение этих уравнений имеет стандартный вид

$$\mathbf{A} = \mu_0 \iiint_V \frac{\mathbf{j} \exp(-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|) d\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}, \quad \varphi = \frac{1}{\varepsilon_0} \iiint_V \frac{\rho \exp(-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|) d\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}, \quad (13.1)$$

где $k = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \omega = \omega/c$, c – скорость света. В идеальной антенне с линейным током и отсутствием пространственного заряда

$$\mathbf{A} = I \oint_L \frac{\exp(-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|) d\mathbf{l}'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|},$$

где интегрирование идет вдоль проводника,

по которому течет ток, \mathbf{r}' – координата точки l' проводника.

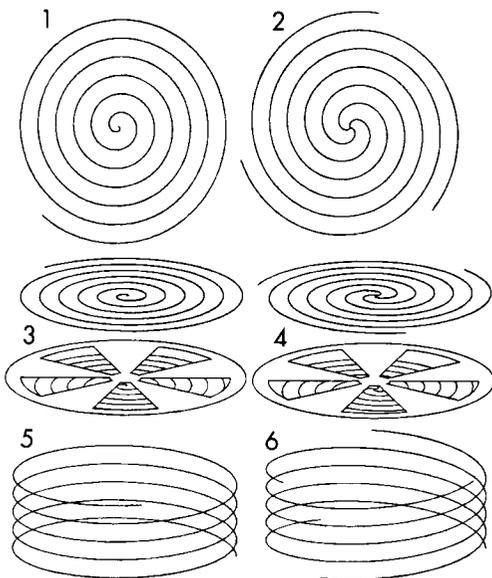


Рис. 13.4. Варианты индуктивных антенн 1 – Антенна в виде плоской спирали 2 – Антенна в виде многозаходной спирали 3, 4 – экранированные антенны 5, 6 – однозаходная и многозаходная цилиндрические антенны

В квазистатической системе показатель экспоненты близок к 0, что позволяет дополнительно упростить расчет. Альтернативный способ вычисления тока заключается в разложении поля по собственным модам камеры, в которой возбуждается полу, рассматриваемой как резонатор (см., например [37], [51]).

В симметричной разрядной камере возможно также определить напряженности полей с использованием разложения поля по собственным модам камеры [20–21]. Необходимо заметить, что обычно при расчете электромагнитных полей в камере распределение плотности заряженных частиц в разряде считают однородным, что далеко не всегда так, поэтому полученные результаты имеют скорее качественный, а не количественный характер.

13.3. Источники на поверхностных волнах [22]

Емкостные и индуктивные разряды, рассмотренные в п. 1 и 2, имеют характерный размер гораздо меньше, чем длина ВЧ волны, создающей плазму. Если эти размеры сравнимы, или наоборот, размеры плазмы превышают длину электромагнитной волны λ , что возможно при разработке источников больших размеров или использовании волн частотой 100 МГц и выше, для возбуждения плазмы можно использовать поверхностные волны [52 – 56]. Обычно эти волны возбуждаются на одной из границ плазмы, граничащей с диэлектриком, или со специальной диэлектрической антенной, вводимой в плазму. Их можно также создать вблизи помещенного в плазму проводника, окруженного слоем диэлектрика. Поле поверхностной волны содержит составляющие электрического поля как параллельные, так и перпендикулярные границе, поэтому рассматриваемый разряд может обладать свойствами как емкостного, так и индуктивного разряда, а для возбуждения поверхностной волны могут использоваться как емкостные, так и индуктивные излучатели. Поле поверхностной волны проникает в плазму на небольшое расстояние, поэтому амплитуда ВЧ поля вблизи подложки мала, и в этом смысле источник на поверхностной волне аналогичен индуктивному источнику. Простое выражение для волнового числа $h = 2\pi/\lambda$ поверхностной волны можно записать для плазменного полупространства, граничащего с вакуумом $h^2 = \omega^2 \varepsilon / c^2 (\varepsilon + 1)$, где ε – диэлектрическая проницаемость плазмы.

13.4. Источники на электронном циклотронном резонансе ($\omega \approx \Omega_e$) [2]

Основной идеей реализации такого разряда является уменьшение минимального давления поддержания плазмы. Дело в том, что без магнитного поля активная часть проводимости на один электрон $\sigma_e = e^2 v / m(v^2 + \omega^2)$ падает с уменьшением давления, что требует увеличения амплитуды колебаний электронов в плазме за счёт внешнего ВЧ-поля. В то же время наложение магнитного поля модифицирует проводимость таким образом, что при $\omega \sim \Omega_e$ она имеет асимптотику $\sigma_e = e^2 / m(\omega - \Omega_e - i\nu)$, ($\Omega_e = eH/mc$ – электронная циклотронная частота, H – напряженность магнитного поля в системе СГС, в СИ последняя формула имеет вид $\Omega_e = eB/c$, где $B = \mu_0 H$, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума). Проводимость и нагрев электронов растут с уменьшением давления. Следует отметить, что выполнение равенства $\omega \approx \Omega_e$ во всём разряде трудно реализуемо, так как требует достижения однородности магнитного поля в пространстве с точностью до 1% и более. Поэтому в типичных условиях нагрев электронов происходит только на резонансной поверхности, а функция распределения электронов существенно отличается от максвелловской.

13.5. Источники на геликонах

Кроме поверхностных волн, для создания разряда в магнитном поле могут использоваться геликоны – волны с частотой, лежащей в диапазоне между электронной $\Omega_e = eH/mc$ и ионной $\Omega_i = eH/Mc$ циклотронными частотами $\Omega_i < \omega < \Omega_e$. Эти волны хорошо поглощаются электронами, так как их фазовая скорость много меньше скорости света и проникают вглубь плазмы, что позволяет создать на их основе эффективные источники плазмы, работающие при очень низких давлениях нейтрального газа. Возбуждение геликонов возможно с помощью обычных индуктивных антенн (см. рис. 13.4), хотя иногда используются и антенны специальной конструкции [3]. В настоящее время разработаны источники, в которых разряд создается волнами, распространяющимися как вдоль [23], так и поперек магнитного поля [3, 24].

При распространении строго поперек магнитного поля частота этих волн ω близка к нижнегибридной частоте, а сами волны называются нижнегибридными (см. [3, 57]).

ГЛАВА 14

ИМПЕДАНС ЕМКОСТНОГО ВЧ-РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Для симметричного ВЧ-разряда его импеданс может быть рассчитан с помощью простой модели. Рассмотрим стандартный емкостной ВЧ-разряд, содержащий два электрода, расстояние между которыми равно L . Вблизи каждого из электродов формируется свой слой пространственного заряда, толщину которого обозначим d . Импеданс разряда можно рассчитать исходя из предположения, что слой пространственного заряда свободен от электронов, т. е. их диэлектрическая проницаемость равна 1 (рис. 14.1). Предположив, что плотность электронов в самом разряде равна n , его диэлектрическую проницаемость можно считать равной $\epsilon(\omega) = 1 - 4\pi n e^2 / m\omega(\omega + i\nu)$.

Таким образом, разряд может быть рассмотрен как совокупность трех последовательно соединенных конденсаторов с емкостями.

$$C_1 = C_3 = \frac{\epsilon_0 S}{d}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon(\omega) S}{L - 2d} = \frac{\epsilon_0 S}{L - 2d} \left(1 - \frac{ne^2}{\epsilon_0 m\omega(\omega + i\nu)} \right) \quad (14.1)$$

Поскольку диэлектрическая проницаемость плазмы обычно отрицательна, то C_2 фактически представляет собой индуктивность.

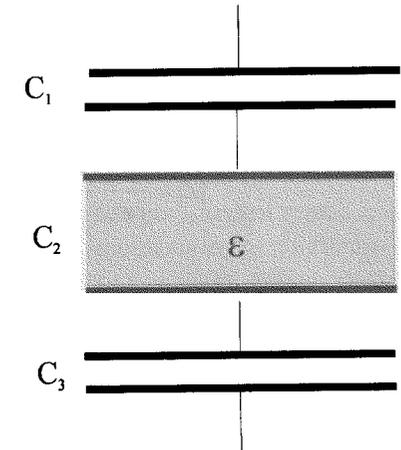


Рис. 14.1. Простая эквивалентная схема емкостного диодного реактора

Емкость разряда в целом может быть рассчитана как

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{2d}{\epsilon_0 S} + \frac{(L-2d)}{\epsilon_0 \epsilon(\omega) S} = \frac{2d\epsilon(\omega) + L - 2d}{\epsilon_0 \epsilon(\omega) S}. \quad (14.2)$$

Импеданс разряда может быть чисто активным, если $\left(1 - \frac{ne^2}{\epsilon_0 m \omega(\omega + iv)}\right) = -\frac{L-2d}{2d}$, т. е. $n = \frac{L}{2d} \operatorname{Re} \frac{\epsilon_0 m \omega(\omega + iv)}{e^2}$ (этот резонанс имеет название геометрического резонанса плазма–слой пространственного заряда), в этом случае падение напряжения на слое пространственного заряда компенсирует падение напряжения на плазме. При больших плотностях электронов разряд имеет емкостной импеданс, при меньших – индуктивный. Формула (14.2) позволяет рассчитать импеданс емкостного симметричного разряда.

$$|Z| = \frac{L}{\omega \epsilon_0 S} \frac{\left(1 - \frac{2d}{L} \frac{n}{n_c}\right)^2 + \left(\frac{2d}{L} \frac{n}{n_c} \frac{v}{\omega}\right)^2}{\left(\left(1 - \frac{n}{n_c}\right)^2 + \left(\frac{n}{n_c} \frac{v}{\omega}\right)^2\right)}. \quad (14.3)$$

Здесь введено обозначение для критической концентрации электронов $n_c = \epsilon_0 m(\omega^2 + v^2)/e^2$.

Указанное соотношение качественно правильно описывает импеданс разряда при не очень больших напряжениях на последнем, когда несущественна вторичная эмиссия электронов из электрода (подложки) и генерация пучков заряженных частиц [25]. Модель неприменима к некоторым режимам ВЧ-разряда при высоком давлении, когда размер слоя пространственного заряда больше длины свободного пробега электронов. В этом случае при высоких напряжениях возможен пробой слоя пространственного заряда по таунсендовскому механизму [14]. В технологических реакторах, предназначенных для воздействия на поверхность подложки, такие режимы не используются. Рассмотренный механизм расчета импеданса плазмы может быть также применен для несимметричного разряда, и для расчета процессов вблизи подложки в индуктивном разряде, когда на подложкодержатель подается ВЧ-напряжение от дополнительного ВЧ-генератора.

Рассмотренная в данной главе модель справедлива, если ионы не успевают за время периода поля сдвинуться на расстояние порядка размера слоя. Это означает, что частота ВЧ-генератора должна быть выше ионной плазменной частоты $2\pi f \gg 4\pi n e^2 / M$.

ГЛАВА 15

СВОЙСТВА СЛОЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

Поскольку электронный и ионный токи на стенку должны быть равны, а тепловая скорость электронов во много раз больше тепловой скорости ионов, вблизи стенки в плазме образуется слой пространственного заряда (СПЗ). Скачок потенциала, возникающий вследствие формирования слоя, уменьшает электронный ток и увеличивает энергию ионов, падающих на стенку.

Для корректного применения результатов предыдущей главы для расчета характеристик емкостного разряда необходимо знать толщину слоя пространственного заряда. Ее обычно находят, решая уравнение для потенциала пространства j

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{e}{\epsilon_0} [n_e - n_+], \quad (15.1)$$

где плотность электронов n_e , может быть найдена по формуле $n_e = n_0 \exp(e\varphi/kT_e)$, n_0 – плотность заряженных частиц на границе плазмы и слоя.

Последняя формула предполагает, что электроны находятся в равновесии с электрическим полем. Плотность ионов n_+ рассчитывают, исходя из непрерывности потока ионов на стенку $n_0 V_0 = n_+(x) \sqrt{V_0^2 + 2e\varphi(x)/M}$, где V_0 – скорость ионов на границе слоя пространственного заряда.

Таким образом, распределение потенциала имеет вид

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{e}{\epsilon_0} n_0 \left[\exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right) - \frac{V_0}{\sqrt{V_0^2 + 2e\varphi/M}} \right], \quad (15.2)$$

Граничные условия для уравнения, (15.2), позволяющие произвести сопряжение уравнений слоя и уравнений плазмы и таким образом рассчитать толщину слоя, обсуждаются вплоть до настоящего времени [26–30]. Для бесстолкновительной плазмы достаточную точность дает закон 3/2 Чайлда-Ленгмюра (он следует из уравнения (15.2) при полном пренебрежении электронной плотностью)

$$L = \frac{2^{3/4}}{3} R_{De} \left(\frac{e\varphi_0}{kT_e} \right)^{3/4}, \quad (15.3)$$

где $R_{De} = \sqrt{\epsilon_0 kT_e / ne^2}$ — электронный радиус Дебая (обычно в учебниках приводят эту формулу в системе СГС, и она имеет вид $R_{De} = \sqrt{kT_e / 4\pi ne^2}$), φ_0 — падение потенциала на слое.

Падение напряжения на слое пространственного заряда определяется из условия равенства электронного и ионного токов. Установлено, что в граничной области плазмы ионы ускоряются амбиполярным полем вплоть до ионно-звуковой скорости (критерий Бома). Таким образом, плотность ионного тока на стенку может быть рассчитана как

$$j_+ = n_0 e \sqrt{kT_e / M}. \quad (15.4)$$

В практически важном случае, когда частота электрического поля много меньше электронной плазменной частоты $2\pi f \ll 4\pi ne^2 / m$, можно считать, что электроны в слое пространственного заряда находятся в равновесии с электрическим полем, поэтому мгновенное значение плотности электронного тока на стенку можно рассчитать по формуле

$$j_e = neV = \frac{n_0 e}{4} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}} \exp\left(\frac{e(\varphi_0 + V_{HF} \cos(\omega t))}{kT_e}\right). \quad (15.5)$$

Здесь φ_0 — усредненное за период напряжение на слое, V_{HF} — амплитуда переменного напряжения на слое.

Условие равенства электронного и ионного токов в среднем за период приводит к соотношению

$$\sqrt{\frac{M}{2\pi m}} \int_0^{2\pi/\omega} dt \left(\exp\left(\frac{e(\varphi_0 + V_{HF} \cos(\omega t))}{kT_e}\right) - 1 \right) = 0,$$

откуда следует ($I_0(x)$ — модифицированная функция Бесселя мнимого аргумента)

$$\varphi_0 = -\frac{kT_e}{e} \left[\frac{1}{2} \ln\left(\frac{M}{2\pi m}\right) + \ln I_0\left(\frac{eV_{HF}}{kT}\right) \right], \quad (15.6)$$

Таким образом, наложение внешнего переменного электрического поля на слой приводит к увеличению постоянного потенциала слоя, а в соответствии с формулой (15.3) — и к увеличению его толщины. Таким образом, импеданс емкостного ВЧ-разряда (14.3), поскольку он зависит как от плотности электронов, так и от толщины слоя, является функцией амплитуды ВЧ-поля на разряде. В практически интересных случаях падение напряжение на слое пространственного заряда превышает напряжение на самом разряде, и разряд в целом имеет емкостной импеданс.

При записи формулы (15.5) мы предположили, что переменное поле на слое синусоидально. В реальных реакторах поле может содержать большое количество гармоник, число и амплитуда которых зависят от свойств разряда, схемы согласующего устройства, схемы и режима выходного каскада ВЧ-генератора. Тем не менее, проведенный анализ качественно правильно описывает характер явлений в разряде.

С более сложными моделями слоя пространственного заряда можно познакомиться в работах [31–34].

ГЛАВА 16

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЧ ПОЛЯ В ТСП-РАЗРЯДЕ

Электрическое поле, создаваемое индуктивной антенной (ИСП и ТСП-разряды), в случае идеальной антенны содержит только компоненту электрического поля параллельную к границе плазмы, поэтому не создает дополнительного напряжения на слое. Поэтому авто-смещение плазмы в индуктивном разряде оказывается существенно меньше, чем в емкостном, что является его главным преимуществом. Кроме того, при увеличении площади обрабатываемой поверхности емкость разряда оказывается слишком большой, что затрудняет согласование емкостного разряда с генератором.

Главным этапом создания ТСП-устройств является изучение физических явлений, лежащих в основе работы данной системы генерации плазмы и определяющих и рабочих параметров. Исследования показали, что эти явления различны в момент возбуждения разряда и в стационарном рабочем режиме.

Рассмотрим стационарный режим разряда. После формирования разряда, когда глубина проникновения ВЧ-поля в плазму $\Lambda = c/\omega_{pe}$ ($\omega_{pe} = ne^2/\epsilon_0 m$ – плазменная частота) становится много меньше поперечного размера области плазмы, разряд переходит в ТСП-режим. В этом режиме плазма поддерживается током, индуцированным в ней внешней антенной.

Качественная оценка характеристик подобной системы может быть сделана на основе рассмотрения плазмы как идеального проводника. В этом случае магнитное поле, создаваемое индуцированным в плазме током, можно описать как поле тока, расположенного симметрично току антенны относительно границы плазмы и направленного в противоположную сторону. Обозначив ток в антенне I_1 , а индуцированный в плазме ток I_2 , можно составить эквивалентную схему ТСП-устройства в виде индуктивно связанных токов. Для этого случая уравнения токов I_1 и I_2 имеют вид:

$$j\omega L_{11}I_1 + j\omega L_{12}I_2 = U, \quad (16.1)$$

$$j\omega L_{21}I_1 + j\omega L_{22}I_2 + Z_N I_2 = 0, \quad (16.2)$$

где L_{11} – индуктивность ненагруженной антенны; L_{22} – индуктивность вторичной обмотки (тока индуцированного в плазме); Z_N – импеданс нагрузки (учитывающий потери в плазме); L_{12} и L_{21} – коэффициенты, отражающие взаимную связь тока в антенне и индуцированного тока в плазме; U – напряжение на антенне.

Решение системы уравнений (1)–(2) позволяет найти импеданс антенны $Z = U/I_1$ в виде

$$Z = j\omega \cdot \left(L_{11} - \frac{L_{12}L_{21}}{L_{22} + Z_N/j\omega} \right) \quad (16.3)$$

и индуцируемый в плазме ток

$$I_2 = -\frac{U}{Z} \cdot \frac{L_{21}}{L_{22} + Z_N/j\omega}. \quad (16.4)$$

В отсутствии нагрузки (плазмы) $Z_N = \infty$ и $Z = j\omega L_{11}$. Характеристики нагруженной системы зависят от соотношения L_{11} и L_{22} , а также коэффициентов взаимной индукции L_{12} и L_{21} . Как известно [35], выполняется соотношение $L_{11}L_{22} \geq L_{12}L_{21}$, причем равенство может иметь место, если магнитные потоки через первичную и вторичную обмотки совпадают. Это возможно при применении магнитного сердечника (трансформатор), либо при совпадении пространственного распределения тока первичной и вторичной обмоток, то есть тока антенны и индуцированного тока в плазме для нашего случая. Если плотность плазмы велика ($Z_N \ll j\omega L_{22}$), то из (3) следует

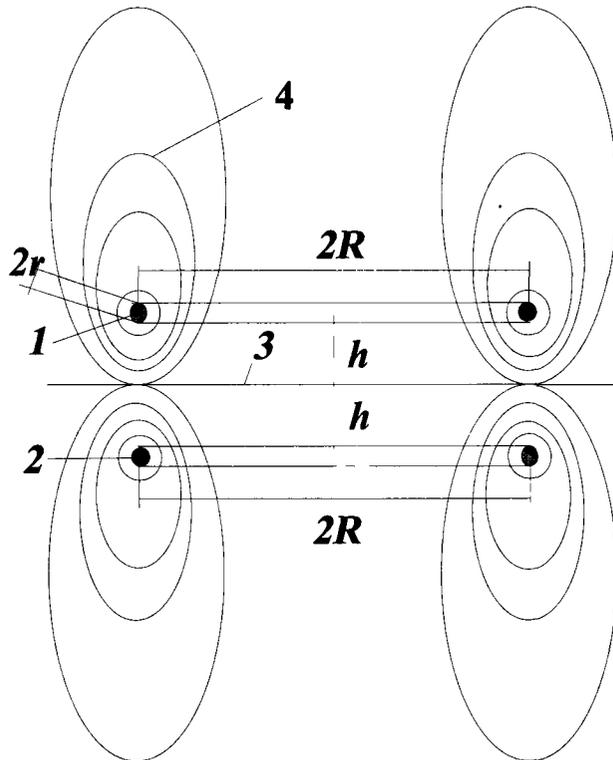
$$Z = j\omega \cdot \left(L_{11} - \frac{L_{12}L_{21}}{L_{22}} \right) + \frac{Z_N L_{12}L_{21}}{L_{22}^2}. \quad (16.5)$$

Таким образом, если $L_{11}L_{22} \neq L_{12}L_{21}$, то антенна имеет не скомпенсированный индуктивный импеданс. Именно наличие этого импеданса приводит к необходимости в стандартных ТСП-источниках увеличивать напряжение на антенне в рабочем режиме до нескольких киловольт, что ведет к дополнительным потерям энергии в антенне. В соответствии с (16.4), этот импеданс ограничивает ток, индуцируемый во вторичной обмотке (плазме).

Для уменьшения импеданса необходимо увеличивать степень индуктивной связи токов, текущих по антенне и по плазме. Пути увеличения этой связи можно понять, рассмотрев плазму как идеальный проводник, а антенну – как кольцо радиуса R из проводника с сечением радиуса r , находящегося на расстоянии h над этим идеальным проводником (рис. 16.1). В этом случае распределение токов по поверхности проводника таково, что создаваемое им поле может быть рассмотрено как поле тока, текущего внутри проводника симметрично току антенны относительно границы проводника. Индуктивности кольцевых токов I_1 и I_2 могут быть оценены по следующим формулам (в предположении, что ток течет по поверхности кольца) [36–37]:

$$L_{22} = L_{11} = \mu_0 \cdot \mu \cdot R \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot R}{r} \right) - 2 \right) \text{ (Гн)}. \quad (16.6)$$

Рис. 16.1. Генерация поля в плазме индуктивной антенной. 1 – возбуждающая поле кольцевая антенна, по которой протекает электрический ток. 2 – индуцируемый в плазме переменный ток. 3 – граница плазмы. 4 – силовые линии магнитного поля, создаваемого током антенны и индуцированным током. R – радиус кольцевой антенны, r – радиус проводника, из которого она выполнена.



Коэффициент взаимной индукции можно оценить для условия $r \ll h \ll R$. В этом случае, считая поле вблизи проводника полем прямого тока, и оценив магнитный поток, проходящий в пространстве между кольцами, получим:

$$L_{12} = L_{21} = L_{11} - \Delta L, \quad (16.7)$$

$$\text{где } \Delta L = \mu_0 \cdot \mu \cdot R \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h}{r} \right) \text{ (Гн)}. \quad (16.8)$$

С учетом (16.6) и (16.8), формула (16.7) примет вид

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \cdot \mu \cdot R \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot R}{2 \cdot h} \right) - 2 \right) \text{ (Гн)}, \quad (16.9)$$

а (16.5) можно переписать в виде

$$Z = j \cdot \omega \cdot \left(\frac{2 \cdot L_{11} \cdot \Delta L - \Delta L^2}{L_{11}} \right) + Z_N \cdot \frac{(L_{11} - \Delta L)^2}{L_{11}^2}. \quad (16.10)$$

Из формул (16.7) – (16.9) следует, что для увеличения коэффициента связи и, тем самым, компенсации индуктивного импеданса необходимо уменьшать расстояние между индуцирующим витком и плазмой.

Реальным физическим ограничением этого размера, при достижении которого наблюдается существенное увеличение коэффициента связи между током антенны и индуцированным током в плазме, следует считать глубину проникновения поля в плазму Λ в рабочем режиме, так как в плазме, в отличие от идеального проводника, индуцируемый ток распределен по ее поверхностному слою толщиной порядка Λ (для электронной плотности 10^{11} см^{-3} получаем $\Lambda = 1,7 \text{ см}$, а для 10^{12} см^{-3} – $\Lambda = 0,51 \text{ см}$).

Тем не менее, дальнейшее уменьшение расстояния между антенной и границей плазмы также ведет к росту коэффициента связи, хотя и не такому значительному, как при движении с расстояний, больших Λ .

Реальным конструктивным ограничением размера, до которого можно уменьшать расстояние между антенной и плазмой, следует считать толщину диэлектрика, разделяющего антенну и плазму. Эта толщина определяется термомеханической, химической и электрической прочностью экранирующего диэлектрического материала. Поэтому прочностные характеристики окон из диэлектрика выходят

на первый план в конструкциях ТСП-источников, где окно разделяет антенну, находящуюся на атмосфере, и вакуумный объем.

Кроме создания тока в плазме, помещенная внутрь рабочей камеры антенна способна наводить паразитные токи на металлических стенках рабочей камеры. Для объяснения условий, при которых эти токи не существенны, рассмотрим магнитное поле, создаваемое совместно токами, текущими по антенне и по плазме. При больших плотностях электронов и расположении антенны вблизи поверхности плазмы магнитные поля этих токов взаимно компенсируют друг друга. Результирующее магнитное поле, создаваемое этими токами на расстоянии H , превышающем расстояние между током в антенне и током в плазме, резко падает при удалении от антенны (пропорционально $1/H^3$). В реальной системе такой спад магнитного поля начинается при удалении от антенны на расстояние, равное сумме расстояния от антенны до границы плазмы и глубины проникновения поля в плазму (т. е. $H > h + \Lambda$). Эксперименты показали, что введенные в камеру токи практически не сказываются на характеристиках антенны в рабочем режиме, если она удалена от металлической поверхности рабочей камеры на расстояние, большее утроенной глубины скин-слоя.

Одной из проблем при разработке газоразрядных систем, в которых потенциальный электрод размещается внутри рабочей камеры, является предотвращение процессов плазмообразования между электродом и близлежащими стенками камеры (или фланцем, на котором размещается электрод). В ТСП-устройстве пробой промежутка между антенной и стенкой камеры приводит к уменьшению эффективности процесса плазмообразования в рабочей области между антенной и подложкодержателем, поскольку на пробой в нерабочей области тратится дополнительная энергия, что в целом снижает эффективность работы ТСП-источника.

Вероятность пробоя зависит от величины зазора, электрического поля, давления газа, формы поверхностей. Поскольку расстояние между антенной и поверхностью рабочей камеры обычно существенно меньше, чем расстояние от антенны до подложкодержателя, то при низких давлениях, когда длина свободного пробега ионизирующих электронов достаточно велика, генерация плазмы происходит преимущественно в области между антенной и подложкодержателем. Вероятность процессов ионизации существенно снижается также из-за высокого значения электрического поля в сравнительно малом за-

зоре между антенной и стенкой камеры (при очень сильных полях уменьшается сечение ионизации газа электронами). Тем не менее, при сравнительно высоких давлениях газа пробои в нерабочих областях вакуумного объема возможны.

Для исключения этого эффекта достаточно заполнить пространство между антенной и поверхностью рабочей камеры твердым диэлектриком (полностью или частично). Влияние частичного заполнения пространства диэлектриком связано с увеличением вероятности рекомбинации электронов и ионов на диэлектрике. Это уменьшает время жизни электрона в зазоре и увеличивает поле, необходимое для поддержания плазмы.

При обработке микроструктур, чувствительных к зарядовому и энергетическому воздействию, важной проблемой является снижение электрического поля вблизи обрабатываемой подложки. В этом случае необходимо минимизировать ВЧ-поле в окрестности подложки, что обеспечит малую энергию бомбардирующих ионов, а также предотвратит пробой тонких диэлектрических слоев на подложке. С этой целью подложка должна быть удалена от антенны на расстояние, не меньшее утроенной глубины проникновения поля в плазму. Поскольку обычно расстояние между антенной и подложкой превышает 10 см (при меньших расстояниях затрудняется поджигание разряда и растет минимальное давление, при котором может существовать стационарный разряд), то в плазменных установках для травления и нанесения пленок указанное условие выполняется практически всегда.

ГЛАВА 17

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ПЛОТНОСТИ
ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ

Одним из главных условий применения плазменных источников в микроэлектронике является обеспечение равномерного распределения плотности плазмы в окрестности подложки. Для этого, как правило, необходимо получить возможно более однородное распределение плотности заряженных частиц в пределах всей разрядной области.

Задача о пространственном распределении плотности заряженных частиц в плазме положительного столба газового разряда решалась неоднократно в различных приближениях [8, 10–11, 38–43], см. также обзор [44].

В большинстве работ предполагается, что распределение частоты ионизации в пространстве однородно, что справедливо в условиях выравнивания электронной температуры (когда размеры системы L, R много меньше характерного размера переноса тепла $L, R < \lambda_{en} (M/2m)^{1/2}$) и отсутствия бесстолкновительного поглощения ВЧ-поля. Кроме пространственного распределения плотности решение соответствующей задачи позволяет определить точное время жизни заряженных частиц.

Для одномерно-неоднородного плазменного столба задачу можно считать решенной как в предельных случаях $L, R \gg \lambda_{in}$ [8, 10, 12, 38], и $L, R \ll \lambda_{in}$ [8, 11], так и в промежуточном режиме $L, R \approx \lambda_{in}$ [8, 40–41]. В реальных разрядных камерах, однако, продольный и поперечный размеры одного порядка, поэтому одномерные решения имеют ограниченную ценность. Для цилиндрической разрядной камеры многомерное решение может быть легко получено в диффузионном режиме ($L, R \gg \lambda_{in}$, плазма предполагается сосредоточенной в области $-L/2 < x < L/2, 0 \leq r < R$):

$$n_e = n_0 \cdot J_0 \left(2.405 \cdot \frac{r}{R} \right) \cos \left(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot L} \right). \quad (17.1)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

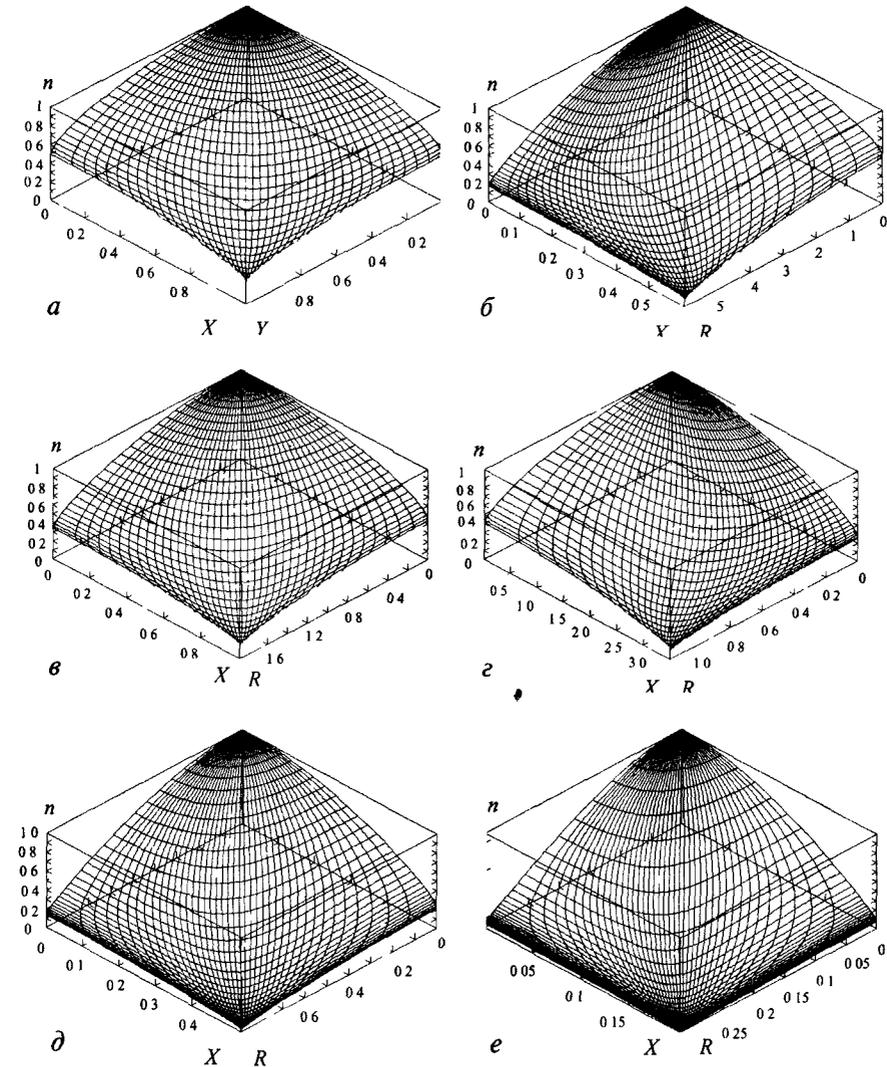


Рис. 17.1. Распределение плотности электронов в разряде в плоской (а) и цилиндрической (б–е) разрядных камерах [43]. Линии, обрисовывающие поверхность, представляют собой линии постоянной скорости (W) и постоянного направления скорости (угла θ): а – $\xi=0.6$, б–г – $\xi=1.1$, д – $\xi=10$, е) $\xi=100$. Параметр ξ есть отношение частоты столкновений ионов с нейтрали к частоте ионизации $\xi = v_{in}/v_i$.

Однако последнее решение, давая достаточно хорошее приближение для времени жизни электрона (см. формулу (12.1)) и плотности тока ионов на подложку $j_i = D_a \partial n / \partial x$, неудовлетворительно описывает распределение плотности плазмы в приграничной области. В [38] предложено модифицировать диффузионную модель путем замены нулевого граничного условия для плотности заряженных частиц на стенке граничными условиями третьего рода

$$\left(D_a \frac{dn}{dr} - n \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{M}} \right)_{r=R} = 0 \quad \left(D_a \frac{dn}{dx} - n \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{M}} \right)_{x=\pm L} = 0. \quad (17.2)$$

Эти условия позволяют существенно улучшить согласие с экспериментом, однако они не являются окончательно обоснованными. Кроме того, получаемые с их помощью решения уравнения диффузии отличаются от истинных в приграничных областях плазмы. Наконец, в [42–43] точные решения уравнений движения ионов во всей области разряда. Примеры численных расчетов приведены на рис. 17.1. Использование модели позволяет оценить соотношение радиуса подложки и радиуса рабочей камеры, при котором достигается требуемая однородность технологического процесса и одновременно рационально используется объем рабочей камеры.

К сожалению, до сих пор не известны хотя бы приближенные многомерные решения для больших длин свободного пробега. Тем более не известны решения в переходных режимах, когда длина свободного пробега иона и размер рабочей камеры одного порядка. При давлении нейтралов свыше 3 Тор возможно влияние гидродинамического движения нейтралов в камере, проблемы существуют при описании разряда в электроотрицательных газах. Кроме того, в разряде низкого давления обычно существенны процессы бесстолкновительного поглощения ВЧ-поля, которые могут приводить к неоднородности частоты ионизации в пространстве. Во всех этих направлениях в настоящее время идут интенсивные исследования [45–50].

В данной работе мы не рассматриваем проблемы управления пространственным распределением плотности заряженных частиц с помощью внешнего магнитного поля.

Литература к главам 12–17

1. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Устройства со скрещенными полями и перспективы их использования в технологии микроэлектроники. М., ЦНИИ “Электроника”, 1991, вып. 2 (1619).

2. Pelletier J., Lagarde T., Durandet A. and Tynelis-Diez K. Distributed ECR Plasma sources: Reactor scale-up and performance. In: «Microwave plasma and its applications», edited by Yury A. Lebedev. Moscow: The Moscow Physical Society, 1995, p. 352–365.
3. Boswell R.W. Very efficient plasma generation by whistler waves near lower hybrid frequency. – Plasma Phys and Contr. Fusion, vol. 26, No. 10, p. 1147–1162.
4. Perry A.J., Boswell R.W. Fast anisotropic etching of silicon in an inductively coupled plasma reactor. – Appl. Phys. Lett. 55(2), 10 July 1989, p. 148–150.
5. Берлин Е.В., Сырчин В.К., Морозовский Н.А. Источник плазмы высокой плотности на основе высокочастотного ТСП-разряда. УДК 621.3.049.77.002.5
6. Смирнов Б.М. Физика слабоионизованного газа. М., Наука, 1978, 341 с.
7. Riemann K.-U. The Bohm Criterion and Sheath Formation. J. Phys. D: Appl. Phys. 1991, V. 24, p. 493–518.
8. Грановский В.И. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М., Наука, 1971, 235–291 с.
9. Довженко В.А. Исследование стационарного СВЧ-разряда внутри волновода. Кандидатская диссертация, 1974.
10. Schottky W. Physikalische Zeitschrift, (1924), v. 25, p. 635.
11. Langmuir I., Tonks L., Physical Review, (1929), v. 34, p. 876.
12. Ewald H.N., Crawford F.W., S.A. Self S.A. Steady-State Theory of an Intermediate-Pressure Discharge Column in a Magnetic Field. Journal of Applied Physics, v. 38 (1967), № 7, p. 2753–2761.
13. Мак-Доналд. СВЧ-пробой в газах. М., Мир, 1974.
14. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд. Наука, Физматлит, 1995.
15. Lehnert B. Nuovo Cim. Supl. 1959, V. 13a, p. 59.
16. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. М., Радио и связь, 1991, 138 с.
17. Xue-Yu Qian, Arthur H. Sato. Inductively coupled RF plasma reactor with floating coil antenna for reduced capacitive coupling. US Patent №5683539 от 4.11.1997 (Заявлен 7.06.1995).
18. John Forster, Baruey M. Cohen, Bradley O. Stimson, George Preulx. Inductively coupled plasma reactor with top electrode for enhancing plasma ignition. US Patent №5685941 от 11.11.1997 (Заявлен 21.11.1995).
19. Ajil P. Paranjpe, Cecil J. Davis, Robert T. Matthews. Structure and method for incorporating an inductively coupled plasma source in a plasma processing chamber. US Patent №5580385 от 3.12.1996 (Заявлен 30.06.1994).
20. Вавилин К.В., Рухадзе А.А., Ри М.Х., Плаксин В.Ю. ЖТФ, 2004, т. 74, вып. 5., 44 с., вып. 6, 25 с., вып. 6, 29 с.
21. Вавилин К.В., Рухадзе А.А., Ри М.Х., Плаксин В.Ю. Физика плазмы, 2004, т. 30, 739 с.
22. Moisan M., Jaurzewsky Z., Pautel R. The Theory and Characteristics of an Efficient Surface Wave Launcher (surfatron) Produced Long Plasma Column. Journal of Physics D: Applied Physics, v. 12 (1979), p. 219–237.
23. G. Lisitano, R.A. Ellis, W.M. Hooke, T.H. Stix. Revue Scientific Instrument, v. 41 (1970), p. 600.
24. A. Komori, T. Shoji, K. Migamoto, J. Kawai, Y. Kawai. Helicon Waves and Efficient Plasma Production. Physics of Fluids, B, v. 3(4) (1991), p. 893–898.
25. Ершов А.П., Кузовников А.А., Савинов В.П. Физика граничных слоев плазмы. М., Издательство МГУ, 1990, 47–56 с.
26. Godyak V., Sternberg N. IEEE Trans on plasma science, 2003. Vol. PS-31, №2, p. 303.
27. Godyak V.A. Phys. Lett., 1982, vol. 89A, p. 80.

28. Godyak V., Sternberg N. IEEE Trans on plasma science, 1990, Vol. PS-18, p. 159.
29. Franklin R.N. IEEE Trans on plasma science, 2002, Vol. PS-30, p. 352.
30. Riemann K.-U. J. Phys.D, Appl.Phys., 1991, v. 24, p. 493.
31. Ковалев А.С., Муратов Е.А., Озеренко А.А., Суетин Н.В., Рахимов А.Т. // Физика плазмы, Т.11, 882 с., 1985.
32. Lieberman M.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. V. 16. p. 638.
33. Lieberman M.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1989. V. 17. p. 338.
34. Godyak V., Sternberg N. // Phys. Rev. A. 1990. V. 42. p. 2299.
35. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Негушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М., Энергоатомиздат, 1989, Глава 6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, ГРФМЛ, 1982, §33, 173 с.
36. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М., Наука, ГРФМЛ, 1976, 235 с.
37. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М., «Радио и связь», 1988, с. 116.
38. Годяк В.А., Максимов А.Н. Вестник Московского университета, 1983 .
39. Persson K.B. Inertia controlled ambipolar diffusion. Phys. Fluids, 1962, v. 5, p. 1625.
40. Двинин С.А., Довженко В.А., Кузовников А.А. К теории пристеночного слоя в плазме газового разряда. Физика плазмы, т. 25, вып. 11, 882-892 с., 1999.
41. Двинин С.А., Довженко В.А., Кузовников А.А. Кинетическая теория положительного столба газового разряда и пристеночного слоя. Физика плазмы, т. 26, вып. 2, 179-189 с., 2000.
42. Берлин Е.В., Двинин С.А., Михеев В.В. и др. Распределение плотности плазмы в цилиндрической разрядной камере. Вестник МГУ, 2004, №3, 43-46 с.
43. Берлин Е.В., Двинин С.А., Михеев В.В. и др. Двумерные распределения плотности плазмы в газовом разряде низкого давления. Физика плазмы, 2004, №12, 1043-1051 с.
44. Физические основы плазменных и лучевых технологий. М., Физический факультет МГУ, 2000, 4–23 с.
45. Tuszewski M., White R.R. Plasma Sources Sci. Technol. 2002. V. 11, p. 338.
46. Franklin R.N. Journal of Phys D: Appl. Phys. 2005. V. 38, p. 2790.
47. Franklin R.N. Journal of Phys D: Appl. Phys. 2003. V. 36, p. 823.
48. Franklin R.N. Journal of Phys D: Appl. Phys. 2002. V. 35, p. 536.
49. Franklin R.N., Snell J. Journal of Phys D: Appl. Phys. 1999. V. 32, p. 1031.
50. Kaganovich I.D. Phys Plasmas, 2001, V.8, p.2540.
51. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн М.: Наука, ГРФМЛ, 1989, 544 с.
52. A.W. Trivelpiece and R.W Gould. J. Appl. Phys. 30, 1784 (1959)
53. A.W. Trivelpiece. Slow wave propagation in plasma wave Guides (San Francisco Press, Inc., San Francisco, 1967)
54. Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. Волны в магнитоактивной плазме. М. Наука, 1969, 1975, 254 с.
55. Кондратенко А.Н. Поверхностные волны. М.: Атомиздат, 1976, 232 с.
56. Кондратенко А.Н. Поверхностные и объемные волны в ограниченной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1985.
57. Olson; Lynn B. More efficient RF plasma electric thruster. US Patent 6293090 September 25, 2001.

ГЛАВА 18

РАНЕЕ ВЫПУСКАВШАЯСЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РЕАКТИВНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ «КАРОЛИНА РЕ-4» (ЭРА-3М, ЭРА-4)

В современных полупроводниковых приборах размеры элементов давно перешли субмикронный рубеж и достигли уже размеров 0,1 мкм и менее. При создании таких элементов после электронолитографии или фотолитографии высокого разрешения очень важно вытравливать их прецизионно с максимальной скоростью в направлении, перпендикулярном поверхности, и с минимальной скоростью в боковом направлении. Такое анизотропное травление некоторых специальных материалов, применяемых в полупроводниковых приборах (нитрид кремния, двуокись кремния, нитрид галлия, арсенид галлия и т. д.), является задачей практически не разрешимой для процессов традиционного химического травления.

С этой задачей справляется ионное травление. Оно успешно применяется при травлении тонких металлических пленок. Однако, из-за того, что приходится использовать высокие энергии ионов порядка 500–1500 эВ, глубина нарушенного слоя в полупроводнике достигает 200 ангстрем, что резко ухудшает параметры полупроводникового прибора вплоть до полной потери работоспособности.

Наиболее полно указанных целей удастся достичь, используя реактивное ионное травление [1]. В этом процессе осуществляется бомбардировка подложки ненаправленным потоком радикалов, получаемых из-за диссоциации в плазме технологического газа, содержащего химически активные компоненты, и направленным потоком ионов с энергиями, не превышающими 20–200 эВ. Такие энергии в большинстве случаев безопасны для кристаллической решетки полупроводника.

Достаточно большая скорость травления достигается благодаря химическому взаимодействию активированных частиц технологического газа с материалом подложки при ионной стимуляции процессов химического взаимодействия и десорбции продуктов реакции. В результате травления образуются летучие продукты, удаляемые откачными средствами. Высокая плотность ионного тока и его направленность перпендикулярно плоскости подложки позволяет получать анизотропные профили травления.

Далее описана установка, созданная для реактивного ионно-плазменного травления. Причем необходимость разработки процессов травления, отвечающих разнообразным требованиям, предъявляемым технологией полупроводниковых приборов, заставила отказаться от достижения очень высокой производительности в каждом конкретном процессе в пользу универсальности. Поэтому описываемая установка проектировалась для обеспечения различных режимов травления, как с высокой скоростью травления, так и с максимальной анизотропией.

Установка предназначена для плазмохимического или ионно-химического удаления фоторезиста, травления полиимида, оксида и нитрида кремния, титана, тантала, циркония и их оксидов и нитридов, материалов типа РС-3710 в технологии гибридных интегральных схем и полупроводниковых приборов на различных подложках, в том числе и на платах с многоуровневой металлизацией, в режиме форвакуумной или высоковакуумной откачки рабочей камеры.

Режим травления с высоковакуумной откачкой применяется для глубокого травления с сохранением вертикальности стенок канавок и для повышения стойкости фоторезиста. Режим травления с форвакуумной откачкой применяется для удаления фоторезиста и для сглаживания острых кромок в верхней части вытравленных пазов.

18.1. Разработка ТСП-источника

На основе проведенного обоснования условий существования ТСП-разряда можно сказать, что определяющим этапом создания ТСП-устройств является изучение физических явлений, лежащих в основе работы данной системы генерации плазмы и определяющих выбор ее конструктивных и рабочих параметров. Исследование данной научной проблемы, безусловно, является предпосылкой для создания принципиально нового типа плазменного оборудования, позволяющего организовывать высоко технологичные процессы в полупроводниковом производстве.

Требования:

1. Простота конструкции.
2. Создание плазмы высокой плотности (не ниже $2+5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$).
3. Экологическая чистота.
4. Высокий КПД использования ВЧ-мощности генератора за счет уменьшения рабочего объема плазмы (параметр, характеризующий отношение мощности генератора к рабочему объему, заполняемому плазмой (кВт/л)).

Кроме того, существует целый ряд требований, выполнение которых существенно улучшает его потребительские свойства.

1. Обеспечение однородности плазмы.
2. Обеспечение регулировки энергии ионов на подложки независимо от ионного тока (плотности заряженных частиц в плазме) с помощью независимого генератора, подключенного к подложкодержателю.
3. Обеспечение эффективного использования энергии, переданной в плазму (вложение энергии в нужные степени свободы).
4. Обеспечение эффективной передачи энергии от ВЧ-генератора в плазму (хорошее согласование и уменьшение паразитных потерь энергии).

Исходя из этих требований, был создан «Источник ионов высокой плотности» (патент РФ №2 171 555) (далее антенна) [2–5]. Работа этого источника основана на использовании высокочастотного индукционного плазменного разряда, в литературе описываемого как «Трансформаторно-связанная плазма» (см. главы 12-17).

Указанная антенна нашла применение в нижеописанных установках серии «Каролина PE» (Plasma etching). Установки этой серии представляют собой ряд установок для плазмохимического травления (ПХТ), в которых реализован основной принцип – раздельное управление концентрацией плазмы (и плотностью ионного тока, соответственно) и энергией ионов, для чего применяются отдельные генераторы для питания антенны и подложкодержателя.

18.2. Устройство установки

Установка реактивного ионного травления традиционно выполнена в виде двух отдельных модулей: рабочей камеры с вакуумным постом и стойки питания и управления.

18.3. Рабочая камера установки

Обрабатываемые подложки диаметром до 150 мм размещаются на водоохлаждаемом столике диаметром 160 мм или прямоугольном с размерами 240·250 мм². Столик закрепляется на верхней крышке вакуумной камеры. Через нее проходят электрические выводы столика и вывод зонда Ленгмюра, используемого для контроля параметров плазмы. На рабочий столик при работе установки в режиме ионно-химического травления может быть подано импульсное напряжение от генератора низкой частоты (далее ГНЧ) с частотой 100 кГц или через согласующее устройство, ВЧ-напряжение с частотой 13,56 МГц.

Для равномерной обработки подложек диаметром 150 мм требуется излучатель ВЧ-мощности (далее антенна) внешним диаметром 222 мм. Антенна имеет вид цилиндра высотой 50 мм. Она снабжена коаксиальным герметичным подводом ВЧ-мощности и вводами водяного охлаждения. Корпус антенны, отделяющий ее от плазмы, сделан из кварца толщиной 4 мм. Внутри корпуса расположены четыре спиральные катушки, витки которых выполнены из плоской меди толщиной 2 мм. Особенностью данной конструкции является совмещение спиралей в одном объеме так, что они вложены друг в друга. Это дало возможность уменьшить габариты антенны и сконцентрировать излучаемую мощность. Поэтому при сравнительно не высоких ВЧ-мощностях (200 ÷ 800 Вт) удалось получить высокую концентрацию плазмы при высокой равномерности.

Антенна располагается соосно с рабочим столиком напротив обрабатываемой подложки на расстоянии 60-120 мм с возможностью регулировки этого расстояния. Антенна смонтирована на отдельном фланце. На этом же фланце вне камеры монтируется специальное устройство согласования антенны, к которому подключается ВЧ-генератор с частотой 13,56 МГц и регулируемой мощностью от 100 до 1000 Вт. Плоский индуктор антенны отделен от плазмы диэлектрическим (кварцевым) экраном. Перед экраном со стороны столика образуется зона чрезвычайно концентрированной плазмы в виде цилиндра с площадью основания, равной площади антенны. Неравномерность плазмы на столике размером 200·200 мм² не более ±3%. Потенциал, создаваемый плазмой на изолированном столике, без подачи потенциала смещения, составляет плюс 3÷5 В относительно корпуса камеры.

Концентрация плазмы определяется мощностью, подаваемой на антенну от ВЧ-генератора, и давлением в камере, а также используе-

мым реактивным газом и при прочих неизменных параметрах линейно зависит от мощности, подаваемой на антенну от ВЧ-генератора.

На специальном каркасе расположено устройство лазерного контроля глубины травления, подключенное к своему блоку управления, имеющему выход на компьютер или самописец.

В плоскости столика за пределами вакуумного объема на специальных кронштейнах размещается электромагнитная система. Она состоит из электромагнитной катушки, ось которой совпадает с осью системы. Потребляемый ею ток регулируется от нуля до 3 А. Она используется для создания магнитного поля в рабочей зоне, когда это необходимо из соображений удобства технологического применения, например, при работе с сильно диссоциирующими газами, когда при зажигании плазмы резко меняется давление в камере и возникает необходимость дополнительно согласовать ВЧ-генератор с плазмой. В этом случае заранее включенное магнитное поле напряженностью всего 10÷15 Гс существенно упрощает процесс согласования.

Раздельное регулирование плотности плазмы и энергии ионов, вытягиваемых из плазмы, обеспечивает широкие возможности для выбора оптимальных режимов травления.

18.3.1 Вакуумная и газовая системы установки

Вакуумная система установки подсоединена к вакуумной камере через электромеханический затвор ЗВЭ-160. Вакуум в камере установки создается с помощью диффузионного насоса Н-160, который имеет скорость откачки 0,7 м³/с, и заливной азотной ловушки с диаметром эффективного отверстия 160 мм. Азотная ловушка существенно снижает влияние на процесс травления водяных паров из остаточных газов и, кроме того, конденсирует летучие продукты реакции травления и большинство применяемых рабочих газов. При применении азотной ловушки в диффузионный насос не попадают ни продукты реакции, ни рабочие газы.

На азотной ловушке закреплен датчик наличия жидкого азота в ловушке. Ловушка с помощью устройства подачи жидкого азота из комплекта установки подключается к сосуду с жидким азотом. Управление подачей жидкого азота в ловушку выведено на лицевую панель блока управления вакуумной системой.

Для плавной регулировки скорости откачки камеры в трубке, соединяющей вакуумную камеру с откачной системой, имеется дроссельная заслонка. Снижение с ее помощью эффективной скорости откачки

вакуумной камеры увеличивает давление рабочих газов в камере, что используется иногда для облегчения зажигания плазмы при предельно низких рабочих давлениях. После зажигания заслонка снова открывается.

Заслонка используется и для повышения давления в камере без увеличения газовой нагрузки на откачную систему, если этого требует технология травления конкретного материала.

Для предварительной откачки камеры и поддержки работы диффузионного насоса предусмотрен форвакуумный агрегат АВР-50. Обслуживание откачных средств проводится с учетом накопления в них токсичных газов и продуктов травления. Для этого замену масла в обоих насосах проводят одновременно через два месяца двухсменной работы. Из этих же соображений выхлоп форвакуумного агрегата и газы после продувки камеры направляются в магистраль вытяжки.

Газовая система установки состоит из двух-трехканальной системы управления газонапуском и двух-трех каналов газонапуска на базе регуляторов расхода газа РРГ-9 с электромагнитными запорными клапанами. Расход рабочего газа регулируется от 0 до 0,1 Вт. Показания расходомера РРГ-9 выраженные в вольтах, пропорциональны потоку газа. Пересчет его показаний в поток соответствующих газов, выраженный в ваттах, осуществляется путем их умножения на соответствующий градуировочный коэффициент: 0,0175 для аргона, 0,025 для кислорода, 0,095 для шестифтористой серы и 0,09 для четыреххлористого кремния.

Все газовые магистрали установки выполнены из нержавеющей стали. Система управления газонапуском находится на лицевой панели вакуумного поста в удобном для оператора месте.

18.4. Стойка питания и управления установки

Стойка питания и управления установки располагается вплотную к вакуумному посту справа. Она состоит из блока управления вакуумной системой, ВЧ-генератора со своим согласующим устройством, нагруженным на антенну, и НЧ- или ВЧ-генераторов, нагруженных на стол, многоканального вакуумметра БПДВ, источников питания электромагнита и лазера.

В стойке устанавливается один ВЧ-генератор типа УВ-1 мощностью до 1 кВА и с частотой 13,56 МГц для питания антенны. Управление устройством согласования встроено в генератор. Над ВЧ-генератором располагается НЧ- или ВЧ-генератор, который выдает сигнал смещения, имеющий форму меандра. Частота генератора 100 кГц, поэтому

согласующее устройство НЧ-генератору не требуется. Величина напряжения автосмещения столика измеряется одним из приборов генератора. Приборы генератора показывают также ионный ток, текущий в цепи генератора, и амплитудное значение НЧ-напряжения.

В целях возможной последующей модернизации установки для питания рабочего столика вместо НЧ-генератора на стойке может быть установлен второй ВЧ-генератор типа УВ-1. Тогда на кожухе согласующего устройства антенны устанавливается отдельный прибор измерения автосмещения столика. А в нижней задней части первого модуля установки располагается согласующее устройство, соединяющееся ВЧ-кабелем с рабочим столиком и генератором ВЧ, подающим смещение на столик.

Мощность, потребляемая установкой от питающей сети, не более 7 кВА.

18.5. Работа установки

После достижения в камере нужного по технологии остаточного давления (реально достижимое не хуже $5 \cdot 10^{-4}$ Па) в камеру напускаются технологические газы. Чем ниже рабочее давление технологических газов, тем ниже скорость травления, но выше анизотропия травления. Поэтому для прецизионного травления использовали рабочее давление примерно $6 \cdot 10^{-2}$ Па, а для ускоренного травления — $4 \cdot 10^{-1}$ Па. Затем включается ВЧ-генератор в режиме стабилизированной мощности. Подводимая мощность регулировалась в диапазоне от 100 до 1000 Вт.

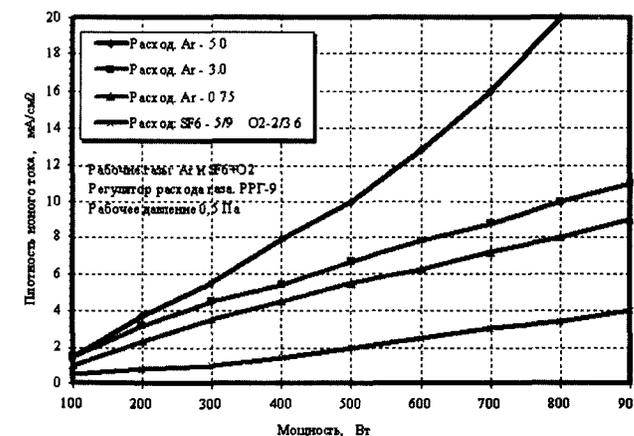


Рис. 18.1. Плотность ионного тока в зависимости от мощности, подводимой к антенне, при фиксированных значениях расхода газов

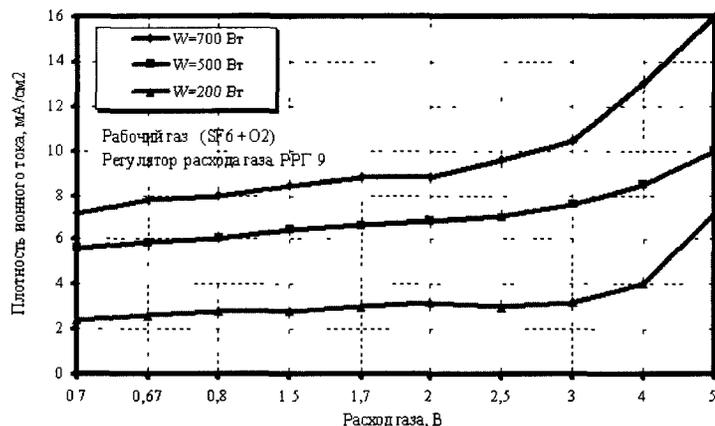


Рис. 18.2. Плотность ионного тока в зависимости от расхода рабочего газа при фиксированной ВЧ-мощности

Зонд Ленгмюра, установленный около подложек, дает возможность оценить плотность ионного тока. Она практически линейно зависит от ВЧ-мощности, подводимой к антенне (рис. 18.1–18.2). Плотность плазмы, в свою очередь, прямо пропорциональна плотности ионного тока, что дает возможность оценить ее по графикам на рис. 18.1 – 18.2. Оценочным расчетом из зависимости плотности ионного тока от мощности ВЧ в антенне было получено, что при мощности 800 Вт в среде аргона достигается очень высокая концентрация плазмы (более $1 \cdot 10^{12}$ электронов в см^3). Кроме того, из рисунка 18.2 следует, что величина плотности ионного тока растет с ростом давления технологического газа (и пропорционально его потоку).

Без подачи на столик ВЧ- или НЧ-мощности потенциал столика относительно плазмы составляет всего несколько вольт. Этот потенциал, определяющий энергию ионов, бомбардирующих поверхность столика, возрастает, когда на столик подают мощность от ВЧ- или НЧ-генератора. Эта мощность ограничена сверху стойкостью используемых фоторезистов или электронорезистов. Точное значение мощности (от 70 до 300 Вт в случае ВЧ-генератора) устанавливали таким, чтобы потенциал автосмещения был в диапазоне минус 20÷200 В относительно корпуса камеры.

Такой режим обеспечивал скорость травления двуоксида кремния 1 мкм/мин, монокристаллического кремния до 10 мкм/мин и нитрида галлия 0,12÷1,2 мкм/мин (естественно, в различных технологических средах и при различных давлениях).

Плотность ионного тока контролируется по амперметру генератора НЧ. Реальная величина ионного тока равна разности показаний амперметра в присутствии плазмы и без нее. В отсутствие плазмы ток генератора обусловлен емкостной связью столика с «землей».

При работе системы травления рабочий столик заряжается электронами плазмы, смещая потенциал столика в минус на величину, близкую к амплитуде генератора НЧ. Максимальная энергия ионов, бомбардирующих рабочий столик с изделиями, равна сумме двух напряжений: амплитуды напряжения импульсов плюс напряжение смещения.

Величина и стабильность напряжения смещения, а также тока генератора НЧ служат показателями воспроизводимости режима травления от процесса к процессу.

18.6. Применение установки в технологии изделий микроэлектроники

На установке «Каролина PE-4» получены окна сверхмалых размеров в диэлектрических пленках при изготовлении полевых транзисторов сверхвысокой частоты (30–40 ГГц) на арсениде галлия. Окна получали с помощью электроннолучевой литографии и последующего травления в плазме фреона-218 при давлении 0,1 Па.

Мощность обоих генераторов – и того, что подключен к антенне источника плазмы, и того, что подключен к столику, не превышала 150 Вт. Скорость травления нитрида кремния составила 0,14 мкм/мин. При этом скорость бокового травления была в сто раз меньше. Равномерность травления на пластине диаметром 150 мм была не хуже $\pm 3\%$. Ширина полученной «канавки» не превышала 0,1 мкм при толщине диэлектрика (нитрид кремния) 0,15 мкм (рис. 18.3). При этом низкая энергия ионов, бомбардирующих подложку (не более 100 эВ), позволила получать низкий уровень радиационных повреждений подложки из арсенида галлия, так как эта область является контактной зоной Т-образного затвора полевого транзистора.

Кроме того, установка была использована при травлении эпитаксиальных структур нитрида галлия на сапфире при производстве светодиодов синего излучения. Процесс вели в плазме смеси газов, содержащих хлористые соединения при очень низких рабочих давлениях (менее 0,1 Па). Мощность в антенне была не более 400 Вт, смещение не более 200 В при применении НЧ-генератора. Глубина

травления составляла 1,4 мкм, и скорость травления не менее 0,12 мкм/мин. Точность остановки по достижении заданной глубины травления не хуже 50 нм (при использовании лазерного измерителя глубины травления). И здесь одним из главных достоинств установки явилась низкая энергия ионов в процессе травления, благодаря которой создаются малые радиационные повреждения приповерхностных слоев нитрида галлия, что позволило получить омические контакты к протравленным областям с низким переходным сопротивлением.

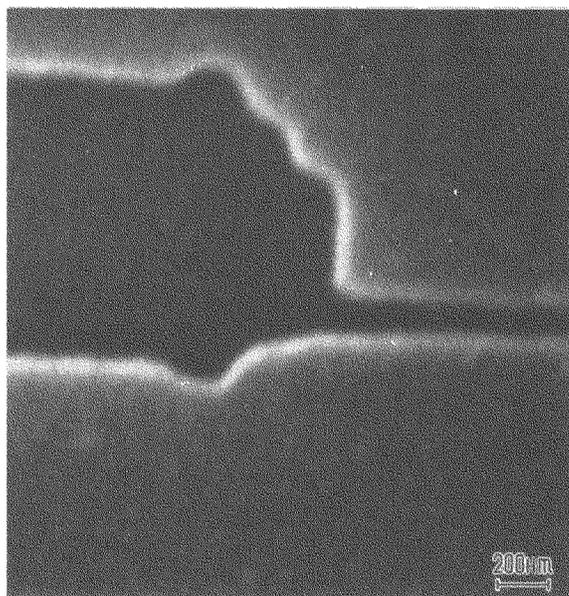


Рис. 18.3. Вид канавки после травления

При травлении монокристаллического кремния на установке «Каролина РЕ-4» скорость травления при давлении элегаза 0,5 Па и мощности в антенне 750 Вт достигала 3 мкм/мин. В том же процессе скорость травления термической двуокиси кремния была в пять раз ниже.

Как уже отмечалось, установка проектировалась как универсальная. Поэтому кроме реактивного ионного травления на ней проводили травление систем металлизации полупроводниковых приборов в среде аргона. Травление шло исключительно за счет ионного распыления. Скорость травления, например, золота составляла 0,2 мкм/мин.

Кроме того, были получены хорошие результаты по травлению пленок алюминия на пластинах из арсенида галлия. При травлении через маску из фоторезиста были получены линии субмикронных размеров (0,5 мкм) с вертикальной стенкой. Особенности устройства позволяют проводить процесс травления алюминия с различными, в том числе и малыми, скоростями. Это, в свою очередь, позволяет снизить тепловые нагрузки на фоторезистивную маску и получать рисунки с хорошим разрешением на подложках с низкой теплопроводностью.

В настоящее время установки «Каролина РЕ-4» используются для травления в серийном производстве полупроводниковых лазеров и светодиодов. Установки обеспечили высокую воспроизводимость процессов травления гетероструктур и отсутствие радиационных повреждений приповерхностных слоев полупроводника.

Литература к главе 18

1. Плазменная технология в производстве СБИС. Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. Перевод с англ. под ред. Е.С. Машковой, М., «Мир», 1987, 470 с.
2. Берлин Е.В., патент России №2171555 «Источник ионов высокой плотности», приоритет от 06.03.00.
3. Xue-Yu Qian, Arthur H. Sato. Inductively coupled RF plasma reactor with floating coil antenna for reduced capacitive coupling. US Patent №5683539 (4.11.1997)
4. John Forster, Baruey M. Cohen, Bradley O. Stimson, George Preulx. Inductively coupled plasma reactor with top electrode for enhancing plasma ignition. US Patent №5685941 (21.11.1995).
5. Ajil P. Paranjpe, Cecil J. Davis, Robert T. Matthews. Structure and method for incorporating an inductively coupled plasma source in a plasma processing chamber. US Patent №5580385 (3.12.1994).

ГЛАВА 19

ШЛЮЗОВАЯ УСТАНОВКА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ «КАРОЛИНА РЕ-11»

Новые серийно выпускаемые шлюзовые установки фирмы ООО «ЭСТО-Вакуум» для ионно- и плазмохимического травления «Каролина РЕ-11» и «Каролина 15» разработаны на основании опыта изготовления и эксплуатации установок «Каролина РЕ-4». Установки предназначены для поштучной обработки подложек или их носителей диаметром 200 мм. Установки осуществляют ионно- и плазмохимическое травление материалов, применяемых в производстве изделий микроэлектроники.

19.1 Устройство установки

Установка состоит из вакуумного агрегата, модуля травления, модуля газоподачи, шкафа управления.

На каркасе модуля травления горизонтально закреплена цилиндрическая рабочая камера. На переднем фланце рабочей камеры установлен шлюз загрузки-выгрузки изделий. Шлюз имеет открываемую камеру, внутри которой на подвижном штоке установлен изолированный, водоохлаждаемый столик — подложкодержатель, на котором крепятся обрабатываемые изделия. Подвод и слив воды (охлаждающей или прогревающей жидкости) в подложкодержатель выполнены из изоляционного шланга длиной не менее 1,5 м.

Шлюз имеет клапан напуска воздуха в шлюзовую камеру, систему форвакуумной откачки и вакуумный затвор, отделяющий камеру шлюза от рабочей камеры на время проведения загрузки-выгрузки изделий. При открытом затворе шлюза и достигнутом вакууме в рабочей

камере подложкодержатель на штоке с помощью пневмоцилиндров перемещается в рабочую камеру, после чего камера шлюза отсекается от рабочей камеры специальной затворной тарелкой, упруго закрепленной на корпусе штока. Этот элемент исключает попадание рабочих газов и продуктов травления в камеру шлюза во время процесса.

Источник ионов высокой плотности (антенна) (см. главы 12-17) располагается на заднем фланце рабочей камеры. Антенна смонтирована с возможностью перемещения вдоль продольной оси камеры. Для равномерной обработки подложек (допуск по скорости травления $\pm 5\%$) диаметром до 200 мм требуется антенна диаметром 220 мм. При таком размере антенны равномерность на диаметре 150 мм составляет при травлении термической двуокиси кремния $\pm 1\%$.

К боковому фланцу рабочей камеры крепится патрубок с датчиками измерения вакуума, соосно с ним патрубок с управляемой дроссельной заслонкой, высоковакуумный затвор камеры и, по заказу, криогенная ловушка, отсекаемая от турбомолекулярного насоса вторым высоковакуумным затвором. Такая криогенная ловушка имеет возможность автономной регенерации, при этом продукты реакции и сконденсированные газы не попадают ни в рабочую камеру, ни в высоковакуумный насос.

Система форвакуумной откачки камеры подключается к патрубку измерения вакуума. Форвакуумные насосы откачки камеры и шлюза АВР-50 вынесены за пределы модуля, устанавливаются согласно схеме размещения оборудования.

19.2. Работа установки

На этом же фланце, что и антенна, монтируется специальное согласующее устройство, к которому подключается ВЧ-генератор с частотой 13,56 МГц мощностью от 300-900 Вт. Антенна находится напротив обрабатываемой подложки, находящейся на столике-подложкодержателе и имеет вид цилиндра высотой 50 мм, имеющего со стороны плазмы кварцевый защитный колпак.

Источник плазмы на расстоянии 80÷120 мм от антенны создает плазму высокой плотности в зависимости от поданной мощности и сорта рабочего газа. Плотность достигает 10^{12} электронов в см^3 и более при давлении аргона 0,5 Па и ВЧ-мощности 900 ВА. Диапазон рабочих давлений этого разряда достаточно велик, и в зависимости от технологических задач может составлять от 10 Па до 0,1 Па и менее.

При необходимости еще более повысить параметры плазмы применяется навесная магнитная система в виде двух электромагнитных катушек большого диаметра. Незначительные магнитные поля, не искажающие равномерность обработки подложек, могут повысить плотность плазмы на 50–70%.

Без подачи потенциала на подложкодержатель потенциал плазмы составляет всего несколько вольт, и ионная составляющая потока ионов и радикалов, участвующая в обработке подложки, практически не имеет энергии.

При подаче на подложкодержатель ВЧ-смещения промышленной частоты 13,56 МГц в условиях наличия плазмы на подложкодержателе возникает отрицательный потенциал автосмещения относительно корпуса установки. Так как потенциал плазмы относительно корпуса установки, как правило, положительный и в зависимости от условий разряда не превышает двадцати вольт, можно считать, что ионы, ускоряющиеся в сторону обрабатываемого объекта разностью потенциалов между плазмой и подложкодержателем, приобретают энергию порядка потенциала автосмещения.

В случае подачи на подложкодержатель от НЧ-генератора прямоугольных импульсов с частотой 100 КГц энергия ионов составляет почти две амплитуды генератора, из-за выпрямляющего эффекта на границе плазма–подложкодержатель.

Кроме плазмохимического установка обеспечивает также травление материалов ионами аргона. Механизм травления – физическое распыление. Поскольку при физическом распылении продукты реакции не удаляются откачной системой, а оседают на окружающих экранах в виде проводящей пленки, диэлектрический защитный колпак антенны (в случае травления металлов) прикрывается диэлектрическим или металлическим экраном специальной формы, чтобы исключить искажение поля антенны.

Загрузка и выгрузка изделий производится через шлюз. При этом стол с обработанными изделиями извлекается из рабочей камеры через шлюзовую камеру на атмосферу, и перегрузка стола осуществляется вручную. Это не совсем правильно с точки зрения выноса продуктов реакции, возможно осевших на арматуре, столике и т. д. на атмосферу, но позволяет загружать в шлюзовую установку изделия нестандартных размеров, осколки пластин и даже объекты неплоской формы.

Система вакуумной откачки рабочей камеры установки может осуществляться (по выбору заказчика) криогенным, турбомолекуляр-

ным или диффузионным насосом. Криогенный насос мало пригоден для работы с химически активными и сложными молекулярными газами из-за накопления их на криоголовке насоса, поэтому его рекомендуется использовать только при применении в процессе обработки изделий благородных газов (Ar, Kr, Xe).

Все управление установкой производится со стойки управления, размещенной справа от модуля травления. Установка управляется компьютером. Программное обеспечение позволяет задавать значительное количество процессов обработки изделий в произвольной последовательности, включая смену рабочих газов, изменение подаваемой в антенну и на подложкодержатель мощности, длительности обработки изделий на каждом этапе.

19.3. Размещение и монтаж установки

Установка оснащается (по спецзаказу) также одной или двумя системами стабилизации температуры оборотной жидкости (воды или другой, заменяющей ее жидкости) для быстрой смены температуры в том или ином узле: вместе или раздельно на рабочую камеру, антенну и подложкодержатель. Кроме того, по спецзаказу, установка комплектуется собственным компрессором.

Установка размещается без специального фундамента. Площадь размещения 20 м² с учетом движущихся частей, рабочего места оператора и проходов. Агрегаты АВР-50 устанавливаются сзади модуля откачки установки или на техническом этаже.

Разделение установки на относительно небольшие агрегаты сделано специально для упрощения транспортировки и монтажа установки. С той же целью модули снабжены собственными колесами.

19.4. Применение установки «Каролина PE-11»

На установке «Каролина PE-11» можно проводить все процессы, которые были разработаны для установки «Каролина PE-4». Кроме этих процессов, применение установки «Каролина PE-11» дало следующие результаты.

- Установка была применена для травления слоев двуокиси кремния. Скорость травления по термической двуокиси кремния составила 0,4 мкм/мин при давлении порядка 0,1 Па. Равномерность травления на пластине диаметром 150 мм была не

хуже $\pm 1\%$. Селективность по поликристаллическому кремнию относительно термической двуокиси кремния составляла 1 к 5. При этом мощность обоих генераторов – и того, что подключен к излучателю источника плазмы, и того, что подключен к подложкодержателю, не превышала 300 Вт. В рассматриваемом случае источником потенциала подложки служил ВЧ-генератор установки (1000 Вт, 13,56 МГц) в паре со своим согласующим устройством.

- Установка с ручным шлюзовым устройством на основе источника плазмы высокой плотности используется для ионного травления материалов типа КРТ, где показала втрое большую скорость и хороший профиль травления по сравнению с ионно-лучевым травлением при использовании сеточного ионного источника типа Кауфмана. Травление проводилось в среде аргона, время травления на глубину 12 мкм было около 25 минут через маску позитивного фоторезиста. Для подачи смещения на подложку использовался генератор низкой частоты (50 КГц) со специальной формой выходного сигнала.
- Получены положительные технические заключения по испытаниям «источника ионов высокой плотности» типа ТСП на установке «Каролина РЕ-11» от предприятий «Сапфир», НИИ «Полюс», «Орион», «Светлана», и от ОАО «АНГСТРЕМ» на применение его в промышленной двухкамерной установке плазмохимического травления JIR-260.

ГЛАВА 20

ШЛЮЗОВАЯ УСТАНОВКА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ «КАРОЛИНА 15»

По результатам эксплуатации установки «Каролина РЕ-11» была разработана новая плазмохимическая установка «Каролина 15» «традиционной» схемы шлюзования, когда перегружается только рабочая подложка или носитель с образцами, по размерам и весу сравнимый с рабочей подложкой. Таким образом, из рабочей камеры выносятся минимальное количество продуктов реакции, осевших на пластину или носитель. Внешний вид установки приведен в Приложении.

Для увеличения теплоотвода от рабочей пластины или носителя был применен так называемый «гелиевый теплоотвод» – подача гелия в рабочий стол под обратную сторону пластины или носителя, создавая условия так называемого «аномального теплопереноса», существенно улучшая условия охлаждения подложек.

Откачка вакуумной камеры осуществляется химически стойким турбомолекулярным насосом типа Turbo-V 551 Navigator или аналогичным со скоростью откачки от 400 до 900 л/сек. Для измерения вакуума в активной зоне камеры применен датчик типа Баратрон.

Установка может укомплектовываться лазерным устройством для измерения скорости и глубины травления ЛИТ–1. В нем используется полупроводниковый лазер с излучением с длиной волны 638 нм и мощностью порядка 3–5 мВт. Устройство может применяться как для прозрачных, так и непрозрачных для данного излучения слоев. В последнем случае устройство работает на отражении от поверхности рельефа.

Оптическая схема устройства приведена на рис. 20.1. Падающий луч полупроводникового лазера делится полупрозрачным зеркалом. Один из разделенных лучей собирается на фотоприемнике фокусирующей линзой, и этот сигнал используется в качестве

опорного сигнала. Другой луч согласно схеме на рис. 20.1 падает на объект обработки. Интенсивность отраженного луча меняется со временем из-за интерференции лазерного излучения на осаждаемой или стравливаемой пленке (имеется в виду интерференция лучей, отраженных от верхней и нижней границы наносимого или стравливаемого слоя).

Устройство может измерять меняющуюся разность хода отраженного луча от верхней и нижней границы травимого рельефа. Если рельеф частично замаскирован прозрачным для лазера фоторезистом, скорость травления фоторезиста также будет измеряться вместе с измерением глубины рельефа. Математическое выражение для зависимости изменения интенсивности отраженного луча от глубины достаточно сложное и содержит много параметров (коэффициенты преломления, зависящие от степени легирования слоев, неточно определяемые в процессе производства). Тем не менее сопоставление кривых, получаемых в процессе травления или нанесения, с анализом образцов другими методами позволяет с высокой точностью определять глубину травления или толщину осажденного слоя, и затем использовать полученные закономерности во время последующих процессов.

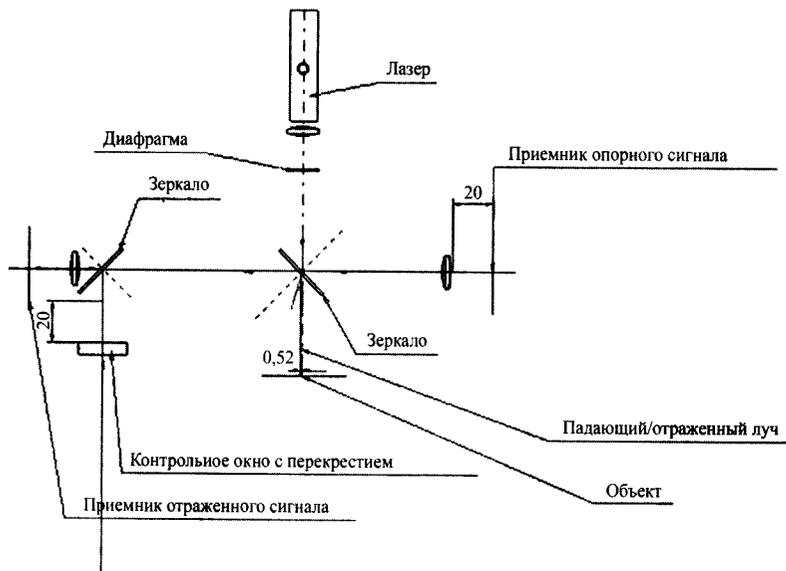


Рис. 20.1. Оптическая схема лазерного измерителя толщины

Отраженный от объекта луч отклоняется тем же полупрозрачным зеркалом и направляется на приемник отраженного луча. По пути он встречает еще одно полупрозрачное зеркало, которое направляет часть луча в контрольное окно, по которому оператор контролирует наличие отраженного от объекта луча и правильность его попадания в приемник (по положению в контрольном окне). На схеме рис. 20.1 эта часть повернута на девяносто градусов относительно оси луча и плоскости чертежа. В реальности оператор смотрит на окно перпендикулярно плоскости чертежа. После полупрозрачного зеркала через фокусирующую линзу луч попадает на фотоприемник отраженного сигнала.

Сигналы, пропорциональные интенсивности прямого и отраженного лучей, поступают на логарифмический усилитель. Выходное напряжение усилителя пропорционально логарифму отношения токов усилителей отраженного и опорного сигнала. То, что усилитель логарифмический, позволяет работать в очень широком диапазоне интенсивностей отраженного сигнала без перенастройки чувствительности усилителей отраженного и опорного сигналов. С помощью описанного устройства можно вести процесс травления, например, кварцевого стекла, на глубину сотен микрон с точностью до 20–50 нм.

Новейшая модификация устройства подключена к контроллеру установки, что позволило производить расчет скорости и глубины травления по заданным формулам в компьютере, управляющем установкой. Управляющий компьютер, используя эти расчеты способен вести процесс автоматически, без участия оператора, что значительно повышает воспроизводимость процесса.

Другим важным последствием применения такого измерителя является возможность быстрой отработки технологических процессов, особенно длительных. Технолог, проводя процесс, меняет технологические параметры один за другим, и за считанные минуты определяет влияние того или иного параметра на скорость технологического процесса и оптимизирует технологические режимы буквально «на ходу». Так во время одного процесса определяется влияние состава газовой среды, давления, мощности, автосмещения и т. д. на скорость травления. В будущем можно даже будет осуществить автоматическую процедуру оптимизации техпроцесса без участия технолога.

Например, с помощью устройства ЛИТ-1 был однозначно решен вопрос о полезности применения магнитно-резонансной системы на ТСР в реакторе «Каролины-15». Оказалось, что в одних и тех же условиях разряда, расхода газа, на одном и том же образце монокристаллического кварца скорость травления при включении магнитно-резонансной системы увеличивалась почти в два раза (с 0,33 мкм/мин до 0,57 мкм/мин).

Установка «Каролина 15» в настоящее время применяется для производства полупроводниковых лазеров и светодиодов на арсениде или нитриде галлия. Кроме того, она показала свою пригодность для травления пьезокварца, SiO_2 , кремния, полиимида, арсенида галлия, поликристаллического кремния, нитрида кремния, алюминия, меди, золота, серебра, и для снятия фоторезиста. Установка может применяться и для стимулированного плазмой осаждения диэлектриков из газовой фазы (например, SiO_2 , Si_3N_4) (см. главу 21).

Резюме по установкам плазмохимического и ионного травления и нанесения тонких пленок:

1. Разработаны и выпускаются серийно вакуумные установки для нанесения и травления слоев металлов, резистивных сплавов и диэлектриков, и их многослойных комбинаций в едином вакуумном цикле.
2. Комплектация установок зависит от требований заказчика. В качестве высоковакуумного насоса может быть использован диффузионный насос Н-160, турбомолекулярный насос ТМН-1500 или криогенный.
3. Предельное давление в рабочей камере – $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Время откачки рабочей камеры до предельного вакуума при разогнанном высоковакуумном насосе – 180 мин.
4. Давление в шлюзе загрузки-выгрузки – 2 Па. Время откачки шлюза от атмосферного давления до 2 Па не более 1 минуты.
5. Время перехода манипулятора в рабочую камеру и обратно – 30 сек
6. Количество рабочих газов – 2–8. Расход рабочих газов – от 0 до 3,6 л/час. Диапазон рабочих давлений $5 \cdot 10^{-2}$ –20 Па.
7. Рабочая частота источника ионов – 13,56 МГц. ВЧ-мощность, подаваемая на антенну от 100 до 900 Вт.

8. Рабочий столик изолированный, водоохлаждаемый. Равномерность травления SiO на подложке диаметром 150 мм – не хуже $\pm 1\%$.
9. Установки полностью автоматизированы. Снабжены автономной замкнутой системой горячего водоснабжения. Время подготовки установки к работе с учетом «разгона» крионасоса не более 100 мин.
10. Установки обеспечивают работу при подключении к ним:
 - холодной воды с температурой от +5 до 20°C, под давлением 3 ± 1 атм. (качество воды по ГОСТ2874-82).
 - сжатого воздуха под давлением 5÷6 атм.
 - рабочих газов марки ОСЧ под давлением 1÷5 атм.
 - слива воды с диаметром трубы не менее 20 мм.
 - выхлопа форвакуумных агрегатов(та) АВР-50 к вытяжной вентиляции.
11. Изготовленные к настоящему времени установки успешно эксплуатируются на многих предприятиях электронной промышленности.

ГЛАВА 21

ПЛАЗМЕННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ СЛОЕВ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ (PCVD) С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ТИПА ТРАНСФОРМАТОРНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ (ТСР)

В настоящее время широкое применение в технологических процессах микроэлектроники, микромеханики и в производстве многоуровневых ГИС находят процессы газофазного осаждения диэлектриков и полупроводников с применением плазменной стимуляции процесса осаждения (PCVD).

Суть плазменной стимуляции процесса осаждения покрытий из газовой фазы состоит в том, что плазма создает на поверхности подложки условия, эквивалентные очень высокой температуре, часто превышающей предельную температуру подложки, и ускоряет процессы химического взаимодействия компонентов газовой смеси на поверхности подложки. В силу высокой «энергетики» процесса плазменной стимуляции удается получать соединения из не взаимодействующих в нормальных условиях газовых компонент, например, моносилана и азота.

Для стимуляции процесса осаждения из газовой фазы был использован «Источник ионов высокой плотности» («антенна») [9], аналогичный с описанными выше генераторами высокоплотной плазмы, использовавшимися в установках для плазмохимического травления «Каролина PE-4», «Каролина PE-11» и «Каролина 15».

С помощью незначительных доработок, в основном касающихся конструкции столов-подложкодержателей (прогреваемые столы)

и систем газонапуска (газораспределители и регуляторы расхода газа, предназначенные для работы с моносиланом), любая из описанных установок становится установкой для плазменно-стимулированного осаждения из газовой фазы.

Была также произведена модернизация шлюзовой установки плазмохимического травления производства фирмы «Алкатель» (RDE-300), с применением «антенны», имевшая перед собой цель осаждения нитрида кремния с высокой скоростью при улучшении параметров осаждаемой пленки. Для этого в установке на верхнем фланце рабочей камеры была смонтирована «антенна» с согласующим устройством и системой лазерного контроля толщины наносимого диэлектрика. Для питания «антенны» использовался ВЧ-генератор стандартной промышленной частоты 13,56 МГц. Мощность генератора составляла от 100 до 1000 Вт.

Применение «антенны» позволило отработать следующие технологии:

- Осаждение диоксида кремния в смеси моносилана с кислородом на кремниевые и сапфировые подложки при температуре процесса не выше 200°C со скоростями до 200 нм/мин.
- Осаждение с температурой подложки не выше 250°C стехиометрического и нестехиометрического нитрида кремния из смеси моносилана с азотом на полиимидный лак, нанесенный на кремниевую подложку.
- Равномерность по толщине осаждаемых слоев на подложке диаметром 150 мм была не хуже $\pm 3\%$.
- Показана возможность планаризации рельефа подложки при осаждении диэлектрика с одновременным травлением (за счет некоторого снижения скорости осаждения).

Была выпущена мелкая серия установок плазменно-стимулированного газофазного осаждения на базе установки «Каролина PE-4» с лазерным контролем толщины осаждаемой пленки. В технологии применялся гексаметилдисилоксан в смеси с кислородом, что ограничило скорость осаждения диоксида кремния до 50 нм/мин из-за большого потока кислорода, необходимого для образования стехиометрического диоксида кремния в данной смеси. Режим осаждения:

- Диаметр реактора – 390 мм.
- Диаметр антенны – порядка 190 мм.

- Предварительный вакуум – 1 мПа.
- Диаметр стола – 160 мм.
- Неравномерность толщины пленки по площади стола – $\pm 3\%$.
- Рабочее давление смеси в реакторе – 0,2 Па.
- Расход кислорода – 0,1 Вт.
- Начальная температура подложек – 150°C.
- ВЧ-мощность на «антенне» при осаждении – 300 Вт.
- Смещение на подложкодержатель – не подавалось.

Осаждение производилось на сапфировые заготовки. Толщина полученных слоев составляла $0,4 \pm 0,5$ мкм. Слои соответствовали всем требованиям оптических покрытий из этого материала (коэффициент преломления 1,47 и прозрачность 0,99 в оптическом диапазоне).

Опытная эксплуатация установок плазменно-стимулированного осаждения слоев из газовой фазы с применением «антенны» показала высокую воспроизводимость процесса по скоростям нанесения, равномерности и качеству наносимых покрытий, что делает подобный процесс перспективным для массового применения в технологиях полупроводниковых приборов и многоуровневых ГИС.

Заявки на книги присылайте по адресу:
125319 Москва, а/я 594
Издательство «Техносфера»
e-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru
факс: (495) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosphera.ru>

Берлин Евгений Владимирович
Двинин Сергей Александрович
Сейдман Лев Александрович

**Вакуумная технология и оборудование
для нанесения и травления тонких пленок**

Компьютерная верстка – Г.В. Зайцева
Корректор – Е.М. Конова
Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев
Дизайн – И.А. Куколева
Выпускающий редактор – М.В. Капранова
Ответственный за выпуск – О.А. Казанцева

Формат 60x90/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон
Печ.л. 11. Тираж 1000 экз. Зак. № 2506
Бумага офсет №1, плотность 65г/м²,
цветная вклейка – мелованная 115 г/м²

Издательство «Техносфера»
Москва, Лубянский проезд, дом 27/1

Диaposитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»

Отпечатано в ООО ПФ «Полиграфист»
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, дом 3



Рис. 6.3. Конструкторская модель установки «Каролина Д-12 А»



Рис. 6.4. Конструкторская модель установки «Каролина Д-12 А» с открытой камерой.



Рис. 6.5. Конструкторская модель установки «Каролина Д-12 А» с открытой крышкой камеры.



Рис. 6.6. Конструкторская модель установки «Каролина Д-12Б» с открытыми дверями.



Рис. 6.7. Конструкторская модель установки «Каролина Д-12Б» с закрытыми дверями.



Рис. 6.8. Конструкторская модель магнетронного источника.

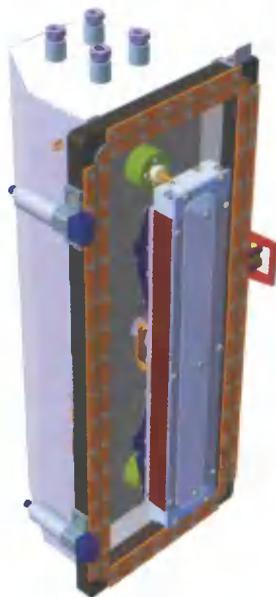


Рис. 6.9. Конструкторская модель ионного источника.



Рис. 12а. Внешний вид установки «Каролина Д-12А».



Рис. 12б. Внешний вид установки «Каролина Д-12Б».

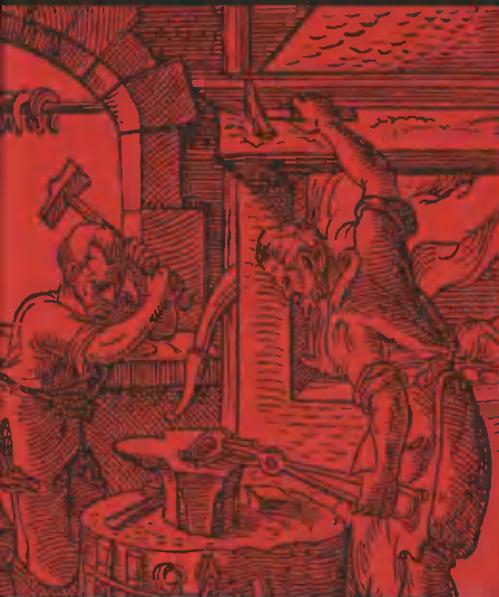


Рис.15. Внешний вид установки «Каролина 15».

мир материалов и технологий

Е. БЕРЛИН, С. ДВИНИН,
Л. СЕЙДМАН

Вакуумная
технология
и оборудование
для нанесения
и травления тонких пленок

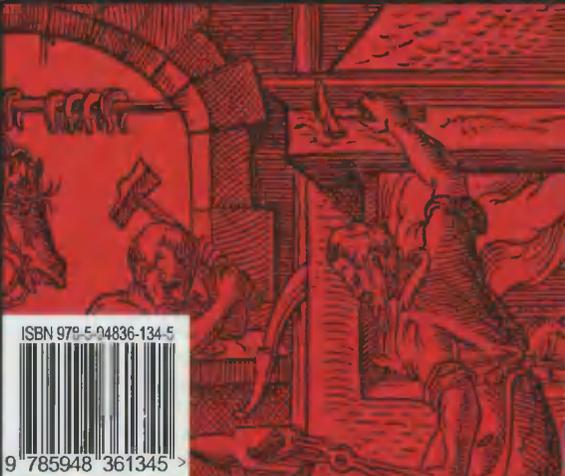


БЕРЛИН ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ –
ДИРЕКТОР И НАУЧНЫЙ
РУКОВОДИТЕЛЬ ООО "ЭСТО-ВАКУУМ",
АВТОР 40 ПУБЛИКАЦИЙ
И 9 ИЗОБРЕТЕНИЙ.

ДВИНИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ –
К.Ф.-М.Н., ДОЦЕНТ КАФЕДРЫ
ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ,
АВТОР 76 ПУБЛИКАЦИЙ
И 2-Х ИЗОБРЕТЕНИЙ.

СЕЙДМАН ЛЕВ АЛЕКСАНДРОВИЧ –
К.Т.Н., СТАРШИЙ НАУЧНЫЙ
СОТРУДНИК, АВТОР БОЛЕЕ 120
ПУБЛИКАЦИЙ И 15 ИЗОБРЕТЕНИЙ

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ,
СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ
И ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РЕАКТИВНОГО
МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ



ISBN 978-5-04836-134-5



9 785948 361345 >



ТЕХНОСФЕРА