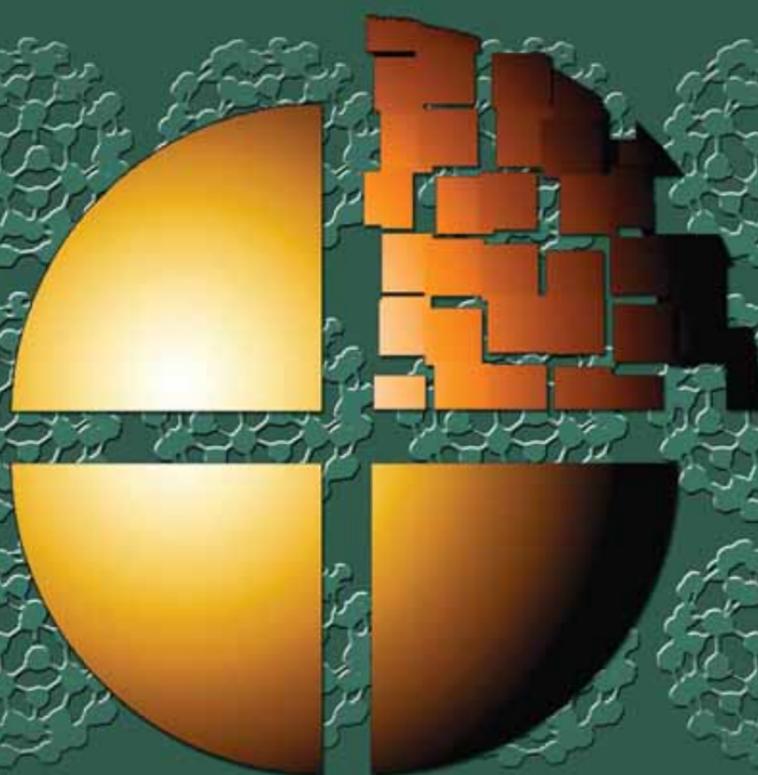


НАНОТЕХНОЛОГИИ

ВВЕДЕНИЕ В ПРОЦЕССЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

ТОМ 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО

БИНОМ

ВВЕДЕНИЕ В ПРОЦЕССЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В ДВУХ ТОМАХ

Том 2

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ**



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2011

УДК 621.3
ББК 32.844.1я73
В24

Серия основана в 2006 году.

Авторский коллектив:

М. В. Акуленок, В. М. Андреев, Д. Г. Громов, Д. В. Зиновьев,
А. И. Мочалов, А. Д. Сулимин, К. А. Тузовский

Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий :
B24 учебное пособие для вузов : в 2 т. / под общ. ред. Ю. Н. Коркишко. —
М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010–2011. — (Нанотехнологии).

ISBN 978-5-9963-0341-0

Т. 2 : Технологические аспекты / [М. В. Акуленок, В. М. Андреев,
Д. Г. Громов и др.]. — 2011. — 252 с. : ил.

ISBN 978-5-9963-0336-6

Разделение данной книги на 2 тома обусловлено большим объемом материала, касающегося интегральных микро- и нанотехнологий; при этом каждый из томов представляет вполне самостоятельный интерес.

Во втором томе изложены технологические и конструктивные основы и особенности методов формирования и «сухого» травления на поверхности подложки тонких слоев и локальных областей проводящих, диэлектрических и полупроводниковых материалов в условиях уменьшения размеров элементов до нанометрового диапазона для интегральных технологий микро- и нанoeлектроники, оптоэлектроники, микросистемной техники. Рассматриваются эпитаксиальные процессы, процессы вакуум-термического и ионно-плазменного осаждения, ионного, ионно-химического и плазмохимического травления, термического окисления, методы легирования термической диффузией и ионной имплантацией, а также процессы фотолитографии.

Для студентов и аспирантов высших учебных заведений, специализирующихся в области микро- и нанoeлектроники, микроэлектромеханических систем, физики твердого тела, материаловедения. Книга может быть полезна инженерно-техническим работникам соответствующих областей.

УДК 621.3
ББК 32.844.1я73

Учебное издание

Серия: «Нанотехнологии»

ВВЕДЕНИЕ В ПРОЦЕССЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В двух томах

Том 2

Акуленок Марина Викторовна, Андреев Владимир Михайлович,
Громов Дмитрий Геннадьевич и др.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Ведущий редактор *Д. Новикова*. Редактор *П. Селиверстов*
Художник *С. Инфантэ*. Иллюстрации: *Д. Жуков*

Технический редактор *Е. Деникова*

Оригинал-макет подготовлен *М. Копаницкой* в пакете $\LaTeX 2\epsilon$

Подписано в печать 09.09.10. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 16. Тираж ??? экз. Заказ

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272, e-mail: binom@Lbz.ru, http://www.Lbz.ru

ISBN 978-5-9963-0336-6 (Т. 2)
ISBN 978-5-9963-0341-0

© БИНОМ. Лаборатория знаний,
2010–2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора	3
Введение	5
Глава 1. Формирование тонких пленок	7
1.1. Получение тонких пленок методом вакуум-термического испарения	7
1.1.1. Условия осаждения тонких пленок. Поглощение газов в процессе конденсации пленки	10
1.1.2. Влияние условий конденсации на структуру и свойства тонких пленок	16
1.1.3. Резистивное испарение	21
1.1.4. Электронно-лучевое испарение	23
1.2. Получение тонких пленок методом ионно-плазменного нанесения	24
1.2.1. Структура плазмы тлеющего разряда	28
1.2.2. Катодное распыление	32
1.2.3. Реактивное ионно-плазменное распыление	35
1.2.4. Триодное распыление	42
1.2.5. Магнетронное распыление	45
1.3. Технологические рекомендации	53
Глава 2. Развитие методов осаждения проводящих материалов на поверхности со сложным нанорельефом	55
2.1. Особенности магнетронного распыления	55
2.2. Направленное осаждение	57
2.2.1. Направленное осаждение из потока нейтральных атомов	58
2.2.2. Коллимированное осаждение	59
2.2.3. Направленное осаждение из высокоионизованной плазмы	61
2.2.4. Модель ионизации металлов в плазме	62
2.2.5. Магнетронное распыление с дополнительной ионизацией атомов пленкообразующих материалов в индуктивно связанной плазме	68

2.2.6.	Системы с дополнительной ионизацией атомов пленкообразующих материалов за счет микровольтового разряда	72
2.2.7.	Импульсное магнетронное распылительное устройство	73
2.2.8.	Самоподдерживающееся распыление	77
2.2.9.	Распыление в магнетроне с полым катодом	77
2.2.10.	Направленное осаждение с использованием вакуумного дугового разряда	78
2.2.11.	Применение процессов направленного осаждения проводящих материалов при формировании металлизации интегральных схем.	83
Глава 3.	Эпитаксия кремния	86
3.1.	Эпитаксия как вариант газофазного химического осаждения.	88
3.2.	Оборудование для процессов газофазного химического осаждения.	97
3.2.1.	Система газораспределения.	101
3.2.2.	Система обработки отходящих газов	102
3.2.3.	Производственное помещение	103
3.2.4.	Контрольно-измерительное оборудование.	103
3.3.	Технологический процесс эпитаксии	105
3.3.1.	Предэпитаксиальная обработка подложек.	105
3.3.2.	Защита обратной стороны подложки	105
3.3.3.	Наладочные процессы	106
3.4.	Проблема автолегирования	110
3.5.	Дефекты эпитаксиальных структур	118
3.6.	Эпитаксия на структурированных подложках	121
3.7.	Применение эпитаксиальных структур	123
3.7.1.	Преимущества эпитаксиальных структур как приборного полуфабриката	124
3.7.2.	Биполярные дискретные приборы и интегральные схемы	124
3.7.3.	МОП-приборы и диоды Шоттки.	126
3.8.	Тенденции развития эпитаксии	127
Глава 4.	Методы формирования диэлектрических пленок	138
4.1.	Формирование собственных диэлектрических пленок термическим окислением кремниевых пластин	138
4.1.1.	Кинетика образования диоксида кремния по Дилу—Гроуву	140

4.1.2.	Примеры реализации термического окисления кремния	144
4.2.	Осаждение диоксида кремния	147
4.2.1.	Осаждение SiO_2 из парогазовых смесей	148
4.2.2.	Пиролиз кремнийорганических соединений	152
4.2.3.	Плазмохимическое осаждение SiO_2	154
4.2.4.	Осаждение пленок SiO_2 методами катодного и магнетронного распыления	157
4.2.5.	Технология формирования слоев SiO_2 методом «Spin-on-glass»	157
4.2.6.	Влияние способа получения диоксида кремния на его свойства	158
4.3.	Нитрид кремния и методы его получения	160
4.3.1.	Осаждение нитрида кремния из газовой фазы	161
4.3.2.	Плазмохимическое осаждение нитрида кремния	164
4.3.3.	Влияние способа формирования нитрида кремния на свойства пленок	164
4.4.	Формирование скрытых слоев SiO_2 , Si_3N_4 и SiO_xN_y методом ионной имплантации	167
Глава 5.	Сухое травление.	170
5.1.	Процессы травления	170
5.2.	Основные параметры процесса травления	172
5.3.	Особенности метода сухого травления	178
5.3.1.	Анизотропия	179
5.3.2.	Селективность	180
5.3.3.	Равномерность	181
5.4.	Классификация процессов плазменного травления	181
5.5.	Ионное травление	184
5.5.1.	Коэффициент распыления материалов	184
5.5.2.	Скорость ионного травления	186
5.5.3.	Особенности переноса изображения с маски на рабочий материал	186
5.5.4.	Маскирующие материалы	188
5.5.5.	Зарядовые явления в диэлектриках, вызванные ионным травлением	190
5.5.6.	Оборудование для ионно-лучевого травления	191
5.6.	Плазмохимическое травление	195
5.7.	Ионно-химическое травление	200
5.7.1.	Особенности ионно-химического травления	200
5.7.2.	Оборудование для ионно-химического травления	205

Глава 6. Процессы легирования	209
6.1. Термодиффузия легирующих примесей	210
6.2. Оборудование для ионной имплантации	215
Глава 7. Литографические процессы	220
7.1. Классификация литографических процессов	220
7.2. Фотолитография	224
7.2.1. Характеристики фоторезистов	224
7.2.2. Оптические эффекты	225
7.2.3. Технология фотолитографии	229
7.3. Литография высокого разрешения	234
7.3.1. Рентгенолитография	235
7.3.2. Электронолитография	238
Литература	243

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Начиная с 50-х годов XX века глобальный научно-технический прогресс, обогативший человечество различными техническими средствами, неразрывно связан с развитием интегральных микро- и нанотехнологий.

Под *интегральными* понимают микро- и нанотехнологии, с помощью которых в объеме и на поверхности твердого тела (подложки) создается устройство или множество устройств, каждое из которых состоит, в свою очередь, из огромного количества взаимосвязанных микро- и наноэлементов. Назначение такого рода устройств самое различное. Это могут быть интегральные схемы, микроэлектромеханические системы или, например, волоконно-оптический модулятор.

Основное направление развития данных технологий связано с производством интегральных схем. Сегодня на одной полупроводниковой подложке формируются несколько тысяч чипов, каждый из которых содержит миллионы транзисторов. За указанное время размер элементов интегральной схемы уменьшился от сотен микрометров до десятков нанометров.

Появление интегральных микро- и нанотехнологий стало возможным благодаря разработке ряда базовых технологических процессов: осаждения материалов, их травления, перераспределения атомов вещества и литографии. С одной стороны, за рассматриваемый период времени эти процессы стали уже классическими. Что касается использования в нанoeлектронике, то некоторые из них уступили место другим. Так произошло, например, с процессами диффузии, которые по мере уменьшения размеров элементов были постепенно вытеснены более прецизионным методом ионной имплантации, и с процессами жидкостного травления, на смену которым пришли (опять-таки более прецизионные) методы сухого травления.

С другой стороны, за указанное время базовые процессы постоянно совершенствовались, что привело к появлению самых разнообразных методов и оборудования для их реализации. Поэтому задача современного технолога состоит в правильном выборе из существующего многообразия методов таких процессов и оборудования, которые обеспечат изготовление изделия с требуемыми характеристиками и свойствами.

Цель настоящего пособия состоит в том, чтобы изложить физико-химические основы процессов технологии изготовления интегральных схем, продемонстрировать влияние различных параметров того или иного процесса на конечный результат, а также познакомить читателя с модификациями этих процессов, происходящими вследствие уменьшения размеров элементов интегральных схем.

В пособии рассматриваются процессы эпитаксии, процессы формирования тонких пленок проводящих материалов и получения слоев диэлектрических материалов, сухое травление, процессы создания легированных областей в полупроводниковом кристалле, фотолитография. Основное внимание уделено эволюции процессов формирования тонкопленочных слоев, поскольку при уменьшении размеров элементов интегральных схем до нанометрового диапазона система межсоединений становится наиболее проблемной из-за увеличения доли необходимых для ее формирования операций в технологическом маршруте изготовления интегральной схемы.

В связи с большим объемом материала было принято решение о издании этой книги в виде двух отдельных томов. При этом каждый из них может представлять вполне самостоятельный интерес.

В первом томе «Физико-химические основы технологии микроэлектроники» основное внимание обращается на анализ физико-химических основ ключевых технологических процессов микроэлектроники, таких как гетерогенное фазообразование, перераспределение вещества при термической и нетермической активации процессов, фотохимическое воздействие различных излучений, полей и др. Взаимосвязь этих процессов на протяжении всего технологического цикла изготовления интегральных схем устанавливается путем рассмотрения проблем межфазного взаимодействия в неравновесных микрогетерогенных системах, совместимости контактирующих материалов, анализа критериев, позволяющих прогнозировать физико-химический характер взаимодействия с использованием диаграмм фазовых равновесий.

Второй том «Технологические аспекты» включает материал, дополняющий и развивающий тематику первого тома.

То обстоятельство, что отдельные главы книги написаны разными авторами, неизбежно привело к некоторым повторениям и различиям в стиле изложения. Однако именно это обеспечило рассмотрение соответствующих вопросов на современном теоретическом уровне.

*д. ф.-м. н., профессор
Ю. Н. Коркишко*

ВВЕДЕНИЕ

Бурный прогресс высоких технологий за последние 20 лет привел к их переходу от микро- к наноразмерам. При этом круг базовых технологических процессов — эпитаксия, осаждение тонких слоев различных по структуре и свойствам материалов, процессы отмывки, травления, легирования и литографии — остался практически неизменным. Однако сами процессы и методы постоянно совершенствовались и модернизировались, что в итоге и позволило добиться такого прогресса. В настоящее время в сфере высоких технологий при нарастающей глобализации происходит углубление специализации. Если в 60–70-е гг. прошлого столетия практически каждая фирма из отрасли микроэлектроники занималась как разработкой новых технологий и оборудования для них, так и непосредственно производством приборов, то сейчас лишь небольшое количество передовых компаний (таких как Intel, AMD, IBM) с помощью своих разбросанных по всему миру лабораторий, научных групп, университетов и т. п. занимаются новыми разработками и их внедрением, а множество фирм-потребителей этих технологий сосредоточено исключительно на производстве с использованием закупленных ими технологий.

На сегодняшний день приходится констатировать, что из-за экономического кризиса, разразившегося в России в 90-х гг. прошлого века, она оказалась в числе стран, покупающих технологии у иностранных компаний, и, следовательно, зависимых от них в этом отношении. Учитывая такое серьезное отставание, возвращение России в разряд передовых держав в области микро- и нанотехнологий невозможно без развития собственных технологий. Достижение уровня передовых компаний может оказаться непосильной задачей. Поэтому усилия должны быть сосредоточены на разработке уникальных высокотехнологичных приборов, устройств и технологий, которые позволят занять свою нишу в глобальной мировой экономике. А это возможно только при условии глубокого знания базовых процессов интегральных технологий. Существует целый ряд смежных областей, таких как оптоэлектроника, акустоэлектроника, сенсорика, изготовление микроэлектромеханических систем, в которых используется один и тот же круг базовых технологических процессов. Безусловно необходимо развитие новейших нанотехнологий, поскольку

исследования в области нанометровых размеров рано или поздно должны привести к прорыву и переходу на новый качественный уровень. Здесь очень важно не остаться в стороне от грядущей нанотехнологической революции.

Разработка новых технологий невозможна без использования уже накопленного опыта. Именно поэтому главная цель данного учебного пособия заключается в том, чтобы, с одной стороны, изложить технологические основы базовых процессов, познакомить читателя с оборудованием, на котором они реализуются, и обобщить накопленный опыт их использования, а с другой стороны, рассказать о тенденциях развития этих процессов в современных условиях, что, на наш взгляд, должно быть полезным для студентов, а также для специалистов, занимающихся разработкой новых приборов и технологий их изготовления.

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Тонкие пленки играют определяющую роль в современных нанотехнологиях, относящихся к разработке устройств наноэлектроники, микро-электромеханических систем, солнечных батарей, сенсоров и др. Так, например, в интегральных схемах с наноразмерными технологическими нормами может использоваться до тридцати тонких слоев проводящих, полупроводниковых и диэлектрических материалов различного функционального назначения. При этом технологические требования таковы, что в одних случаях эти тонкие слои должны равномерно покрывать плоскую поверхность, в других — полностью воспроизводить сложный рельеф интегральной схемы, а в третьих — заполнять наноразмерные зазоры, не оставляя пустот. Поэтому для формирования тонких пленок разработан широкий спектр конструктивных приемов и методов. Первые две главы данного пособия посвящены особенностям формирования тонких пленок и различным методам их получения.

1.1. Получение тонких пленок методом вакуум-термического испарения

Термическое испарение представляет собой процесс перехода молекул из жидкости или твердого тела в пар вследствие разрыва связей между поверхностными атомами испаряемого вещества. Вероятность испарения поверхностного атома зависит от величины энергии разрыва межатомных связей E_C , а атомная удельная скорость испарения (т. е. количество атомов вещества, испаряющихся с единицы площади в единицу времени) определяется соотношением:

$$N_{\text{И}} = N^{2/3} \nu \exp\left[-\frac{E_C}{kT_{\text{И}}}\right], \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1.1)$$

где N — концентрация атомов в объеме испаряемого вещества, см^{-3} ; $N^{2/3}$ — концентрация атомов на поверхности испаряемого вещества ($N^{2/3} \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$); ν — частота колебаний атомов кристаллической решетки, с^{-1} ; $T_{\text{И}}$ — температура испарения, К; k — постоянная Больцмана; $kT_{\text{И}}$ — величина, пропорциональная средней кинетической энергии атомов вещества, Дж.

При отличной от абсолютного нуля температуре всегда имеется вероятность того, что мгновенная кинетическая энергия отдельных поверхностных атомов превысит E_C . Поэтому испарение вещества происходит практически при любой температуре. Однако *температурой испарения* условно называют такую, при которой давление насыщенного пара вещества над поверхностью (P_S) достигает 1,33 Па.

Скорость испарения G (масса вещества, испаряемого в единицу времени с единицы площади поверхности испарителя) зависит от давления насыщенных паров и температуры и описывается уравнением Ленгмюра:

$$G = 7,76P_S \sqrt{\frac{M_{И}}{T_{И}}}, \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1.2)$$

где P_S — давление насыщенного пара, Па; $M_{И}$ — молярная масса испаряемого вещества, г · моль⁻¹; $T_{И}$ — температура испаряемого вещества, К.

Если ввести коэффициент испарения $\alpha_{И}$ (для чистой поверхности испаряемого вещества $\alpha_{И} = 1$), то для скорости свободного испарения $N_{И}$ в вакууме можно записать:

$$N_{И} = 4,66 \cdot 10^{24} \frac{\alpha_{И} P_S}{\sqrt{M_{И} T_{И}}}, \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (1.3)$$

Следует отметить, что формула (1.3) справедлива только для так называемых молекулярных режимов, при которых испарившийся атом попадает на подложку без соударений, а упругость паров материала не превышает $1,33 \cdot 10^2$ Па. При большей упругости пара длина свободного пробега его атомов уменьшается из-за скопления паров над расплавом, и процесс испарения начинает зависеть от скорости «рассасывания» этого облака, т. е. от диффузии атомов из пограничного слоя в окружающий объем, что не учитывается формулой (1.3).

Скорость испарения нелинейно зависит от температуры. Зависимость давления насыщенного пара от температуры описывается уравнением Клаузиуса—Клапейрона:

$$\lg P_S = \frac{L_0}{2,303R} \frac{1}{T} + \frac{y_1}{R} \lg T + \frac{y_2}{2,303R} T + \dots + I, \quad (1.4)$$

где L_0 — скрытая теплота испарения; y_1, y_2 — температурные коэффициенты; I — постоянная интегрирования; R — универсальная газовая постоянная. Следствием такой зависимости является то, что повышение температуры вещества на 10–15% (в диапазоне температур, превышающих температуру испарения) приводит почти к десятикратному увеличению давления его насыщенных паров P_S , что можно видеть на примере титана (рис. 1.1). Кроме того, из рис. 1.1 видно, что скорость испарения титана повышается (так как повышается P_S) при понижении остаточного давления в камере. Вероятно, она зависит и от состава

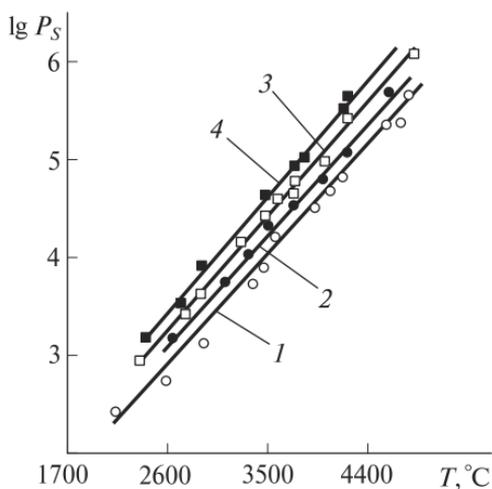


Рис. 1.1. Изменение давления насыщенного пара титана P_S с ростом температуры при использовании различных средств откачки: 1 — откачка паромасляным насосом при $P_{ост} = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па; 2 — откачка паромасляным насосом при использовании азотной ловушки и $P_{ост} = 1,33 \cdot 10^{-4}$ Па; 3 — откачка ионно-геттерным насосом при $P_{ост} = 0,4 \cdot 10^{-5}$ Па; 4 — откачка ионно-геттерным насосом при $P_{ост} = 6,65 \cdot 10^{-7}$ Па

остаточной атмосферы, уменьшаясь из-за интенсивного взаимодействия испаряющейся поверхности титана с содержащей углерод органической примесью, которая неизбежно присутствует в откачиваемом объеме при использовании паромасляного насоса.

Так как температурные зависимости скорости испарения разных материалов значительно различаются, это осложняет процесс формирования тонких пленок сплавов. Состав сплава не может оставаться одинаковым по толщине пленки, поскольку в первую очередь будет испаряться компонент, обладающий более высоким давлением насыщенного пара. Пленку с однородным по толщине составом можно получить, если компоненты сплава испаряются из двух независимых источников. Однако в этом случае очень сложно воспроизводить одинаковый состав пленки в каждом процессе ее нанесения.

Кроме того, на скорость испарения вещества влияет наличие на его поверхности оксидных пленок. Присутствие такого слоя на металле чаще всего приводит к уменьшению скорости испарения. Скорость испарения материалов, обладающих летучими оксидами, может увеличиваться с ростом давления остаточных газов вследствие образования и испарения этих оксидов. К числу таких материалов относятся вольфрам, молибден, германий, кремний. Аномально высокая скорость испарения золота

и серебра в присутствии химически активных газов связана с образованием легколетучих промежуточных соединений, которые в дальнейшем могут диссоциировать и вступать во вторичные реакции.

1.1.1. Условия осаждения тонких пленок. Поглощение газов в процессе конденсации пленки

Когда испаренные частицы (атомы или молекулы) ударяются о поверхность твердого тела, происходит их энергообмен с атомами поверхности. В результате этого частицы могут:

- упруго отразиться от поверхности (рис. 1.2, *а*);
- сконденсироваться (адсорбироваться) на поверхности и прийти с ней в термическое равновесие (рис. 1.2, *б*);
- сконденсироваться (адсорбироваться) на поверхности и мигрировать вдоль нее на некоторое расстояние благодаря оставшейся кинетической энергии, после чего либо прийти с поверхностью в термическое равновесие, либо вновь испариться (рис. 1.2, *в*).

Вероятности протекания этих процессов являются функциями среднего времени жизни адсорбированного атома на поверхности, которое может быть определено по формуле:

$$\tau_a = \nu_a^{-1} \exp \left[\frac{E_d}{kT} \right], \text{ с}, \quad (1.5)$$

где ν_a — частота колебаний адсорбированного атома около положения равновесия, с^{-1} ; E_d — энергия десорбции (энергия испарения атома с поверхности подложки), Дж; kT — величина, пропорциональная средней кинетической энергии атомов вещества в адсорбированном состоянии, Дж.

Адсорбция частиц зависит от нескольких факторов.

1. Адсорбция частицы происходит, если ее кинетическая энергия меньше некоторого критического значения. В противном случае происходит отражение от поверхности.

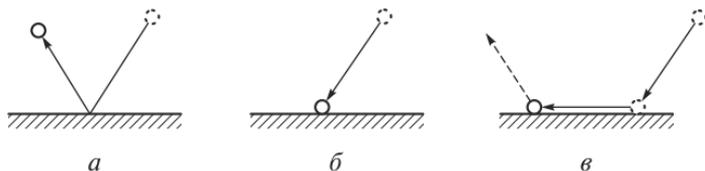


Рис. 1.2. Варианты физического взаимодействия испаренного атома с поверхностью твердого тела: *а* — упругое отражение; *б* — конденсация; *в* — конденсация с поверхностной диффузией и последующим реиспарением

2. Вероятность адсорбции возрастает при увеличении силы взаимодействия частицы с атомами поверхностного слоя адсорбента.

3. Вероятность адсорбции зависит от величины упругой связи атомов решетки. Чем сильнее эта связь, тем быстрее энергия отводится из зоны соударения в кристаллическую решетку твердого тела.

4. Загрязнение поверхности твердого тела примесями или проникновение примесей в приповерхностный слой приводит к уменьшению вероятности адсорбции, если атомы примесей вызывают в твердом теле образование дефектов, снижающих скорость распространения колебаний.

Характерной особенностью процесса вакуум-термического испарения и конденсации является то, что даже при самых больших температурах испарения (2000–5000 К) средняя энергия испаренных атомов составляет всего лишь $(0,3-6,4) \cdot 10^{-19}$ Дж. Конденсация частиц с такими энергиями практически не приводит к их проникновению в глубину материала подложки. Это определяет и достоинство, и недостатки метода вакуум-термического испарения и конденсации. Достоинство состоит в том, что метод обеспечивает очень резкую межфазную границу между осажденной пленкой и подложкой. Это важно при формировании оптических покрытий или рисунка в слое путем его травления через маску. Первый недостаток, обусловленный низкой энергией конденсирующихся частиц, заключается в более слабой адгезии тонких пленок, полученных вакуум-термическим испарением, по сравнению с другими методами формирования тонкопленочных покрытий. Второй недостаток метода связан с задачей покрытия поверхностей со сложным рельефом. Без нагрева подложки энергия частиц оказывается недостаточной для реализации упругого отражения или конденсации с последующим реиспарением (см. рис. 1.2, *a* и *в*). По этой причине конденсация испаренного материала на затененных участках поверхности не происходит, и в результате — осажденная пленка имеет разрывы (рис. 1.3).

Соотношение между протекающими на поверхности процессами адсорбции и десорбции атомов испаренного вещества характеризуется коэффициентом конденсации (называемым также коэффициентом прилипания) α_K . Он равен отношению числа атомов испаренного вещества, адсорбированных за единицу времени на единице площади поверхности, к общему числу атомов этого вещества, испытавших соударение с той же единичной поверхностью за то же время:

$$\alpha_K = \frac{N_K}{N_{\text{пад}}}, \quad (1.6)$$

где

$$N_{\text{пад}} = \frac{A}{4\pi l^2} N_{\text{И}}. \quad (1.6, a)$$

Здесь A — площадь испарителя; l — расстояние от испарителя до поверхности осаждения; $N_{\text{И}}$ — скорость свободного испарения в вакууме. В зависимости от условий конденсации коэффициент прилипания может принимать значения в пределах $0 \leq \alpha_{\text{К}} \leq 1$.

Поскольку соотношение между процессами адсорбции и десорбции зависит от температуры поверхности, на которой они протекают [см. выражение (1.5)], коэффициент конденсации $\alpha_{\text{К}}$ также зависит от температуры:

$$\alpha_{\text{К}} = 1 - \Gamma \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1.7)$$

где Γ — постоянная, зависящая от природы адсорбата и адсорбента; E_a — энергия адсорбции атомов.

Если с испарителя площадью A при некоторой фиксированной температуре испускается поток молекул $N_{\text{И}}$ (рис. 1.4), то на плоской подложке, расположенной на расстоянии l от испарителя, в точке, отстоящей от ее центра на расстояние r , будет конденсироваться поток молекул

$$N_{\text{К}}(r) = \frac{\alpha_{\text{К}} A N_{\text{И}}}{4\pi l^2} \cos^2 \theta, \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1.8)$$

где θ — угол между направлением пучка и нормалью к поверхности подложки.

Из выражений (1.7) и (1.8) следует, что при вакуум-термическом испарении поток конденсирующихся молекул $N_{\text{К}}$ зависит от температуры поверхности, на которой происходит конденсация. С ростом температуры

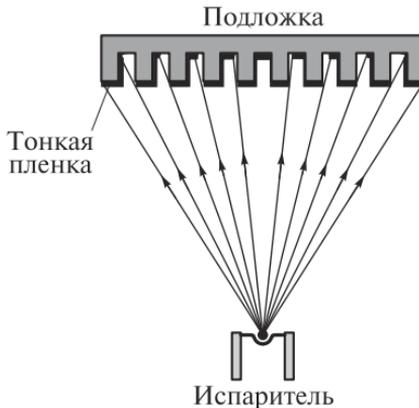


Рис. 1.3. Покрытие неподвижной поверхности со сложным рельефом тонкой пленкой при вакуум-термическом испарении

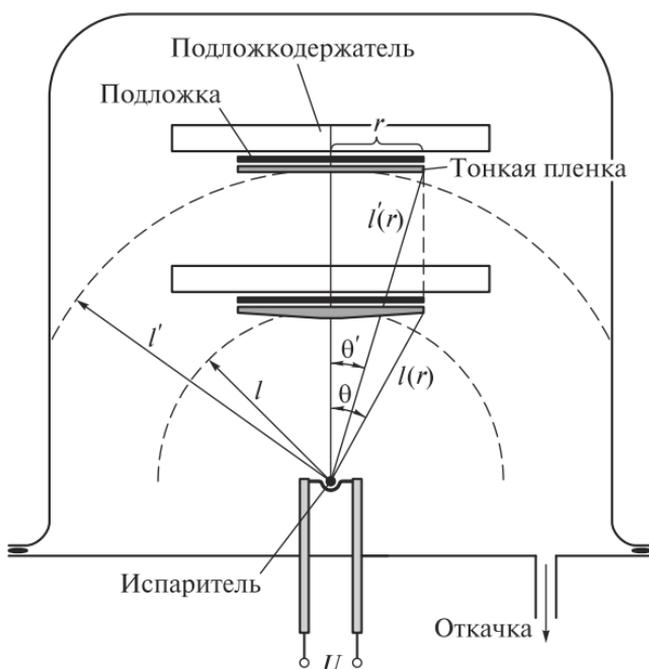


Рис. 1.4. Схема, поясняющая влияние расстояния от испарителя до различных участков подложки на толщину тонкой пленки и ее равномерность

подложки число испаренных с ее поверхности частиц увеличивается, а при температуре выше некоторой критической наблюдается их полное испарение. *Критическая температура* зависит от природы конденсируемого вещества, природы подложки, степени ее чистоты и возрастает при увеличении плотности потока. Уменьшение плотности потока частиц при фиксированной температуре также может привести к их полному испарению.

Анализируя формулу (1.8), следует обратить внимание на два обстоятельства. С одной стороны, скорость конденсации N_K обратно пропорциональна квадрату расстояния от испарителя l . Следовательно, чтобы добиться высокой скорости осаждения пленки, необходимо приближать подложку к испарителю. С другой стороны, скорость конденсации зависит от угла θ . Обычно в устройствах для вакуум-термического испарения и конденсации (вне зависимости от используемого способа нагрева испаряемого вещества) площадь поверхности испарения существенно меньше площади подложки, на которую осаждают пленку. Другими словами, относительно размеров подложки источник испарения является точечным, поэтому одинаковая скорость конденсации достигается лишь

[. . .]