

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Т.И.Данилина

**Технология тонкопленочных
микросхем**

Учебное пособие

Томск 2012

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Введение	5
2.	Получение рисунка интегральных микросхем	7
2.1.	Фотолитография	7
2.2.	Способы экспонирования	14
2.3.	Фотошаблоны и технология их получения	17
2.4.	Оптические эффекты при фотолитографии	28
2.5.	Методы и технология формирования рисунка тонкопленочных элементов	33
3.	Технологические основы пленочной микроэлектроники	39
3.1.	Термическое испарение в вакууме	39
3.1.1.	Вакуумные напылительные установки	39
3.1.2.	Формирование молекулярного потока	40
3.1.3.	Испарение вещества	41
3.1.4.	Скорость конденсации	44
3.1.5.	Механизм испарения соединений и сплавов	49
3.1.6.	Степень загрязнения пленок при конденсации	52
3.1.7.	Способы испарения	54
3.1.8.	Практические рекомендации	62
3.2.	Ионно-плазменное распыление	64
3.2.1.	Физика ионного распыления	64
3.2.2.	Модель ионного распыления	67
3.2.3.	Теории ионного распыления	74
3.2.4.	Скорость осаждения пленок	80
3.2.5.	Получение пленок ионно-плазменным распылением	81
4.	Элементы тонкопленочных микросхем	85
4.1.	Подложки пленочных ИМС	85
4.1.1.	Материалы подложек	85
4.1.2.	Свойства подложечных материалов	87
4.1.3.	Очистка подложек	91
4.2.	Тонкопленочные резисторы	92
4.2.1.	Выбор материалов	92
4.2.2.	Технологические погрешности резисторов	95
4.3.	Тонкопленочные конденсаторы	99
4.3.1.	Параметры тонкопленочных конденсаторов	99
4.3.2.	Диэлектрические материалы	101
4.3.3.	Выбор материала обкладок	102
4.4.	Тонкопленочные индуктивности	103
4.5.	Проводники и контактные площадки	105
5.	Типовые технологические процессы изготовления тонкопленочных элементов	

ночных ИМС	109
6. Области применения тонких пленок	118
6.1. Тонкие пленки в технике СВЧ	118
6.2. Тонкослойные оптические покрытия	125
6.2.1. Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра	125
6.2.2. Отражающие покрытия для вакуумного ультрафиолетового излучения	128
6.2.3. Диэлектрические многослойные пленочные системы	129
7. Методические указания по самостоятельной работе студентов	132
7.1. Методические указания по выполнению контрольных работ	
7.2. Примеры решения задач	134
7.3. Задачи для самостоятельного решения	139
7.4. Задания к контрольной работе №2	141
Литература	144
Приложение 1	145
Приложение 2	146
Приложение 3	147

1. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития радиоэлектроники характеризуется широким применением интегральных микросхем (ИМС) во всех радиотехнических схемах. Это связано со значительным усложнением требований и задач, решаемых радиоэлектронной аппаратурой.

В микроэлектронике используются два основных вида интегральных микросхем: пленочные и полупроводниковые ИМС. Пленочные ИМС создаются на диэлектрической подложке путем послойного нанесения пленок различных материалов с одновременным формированием из них микроэлементов и их соединений. Полупроводниковые ИМС создаются путем локального воздействия на микроучастки полупроводникового монокристалла и придания им свойств, соответствующих функциям микроэлементов и их соединений.

Комбинации этих технологий позволили создать гибридные и совмещенные ИМС, которые компенсируют некоторые недостатки, имеющиеся у пленочных и полупроводниковых ИМС.

В настоящее время микроэлектронные устройства, изготовленные с использованием гибридных интегральных схем сверхвысокочастотного диапазона (ГИС СВЧ) определяют в большой степени техническую и экономическую эффективность приемопередающих систем цифровой радиосвязи, радиолокации и радионавигации.

Внедрение методов тонкопленочной технологии в процесс травления ГИС СВЧ позволит повысить точность изготовления при очень малых размерах элементов с распределенными параметрами.

Возрастающие требования к характеристикам ГИС СВЧ и увеличению частотного диапазона до сотен гигагерц заставляют разработчиков постоянно совершенствовать как конструкции, так и технологию.

Тонкопленочные технологии находят широкое применение в микро – и наноэлектронике для изготовления изделий магнито - , крио - , опто – электроники и для получения широкого круга оптических покрытий различного назначения.

Учебное пособие представляет собой конспект лекций по дисциплине "Технология тонкопленочных микросхем" для студентов специальности 210104 "Микроэлектроника и твердотельная электроника" и имеет методические указания по самостоятельной работе студентов.

Учебное пособие содержит разделы по получению рисунка ИМС, по технологическим основам пленочной микроэлектроники, элементам тонкопленочных ИМС, в том числе ГИС СВЧ, а также по технологиям и свойствам оптических покрытий.

Учебное пособие снабжено приложениями, необходимыми для выполнения контрольных работ и индивидуальных заданий.

2. ПОЛУЧЕНИЕ РИСУНКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

2.1. Фотолитография

Получение рельефа требуемой конфигурации в диэлектрических и металлических пленках, нанесенных на поверхность полупроводниковых или диэлектрических подложек, является неотъемлемым процессом технологии изготовления интегральных схем (ИС). Он получил название **литографии**. Литография основана на использовании особых высокомолекулярных соединений - резистов, обладающих способностью изменять свои свойства под действием различного рода излучений - ультрафиолетового (фотолитография), рентгеновского (рентгенолитография), потока электронов (электронолитография) и ионов (ионно-лучевая литография).

Фотолитография состоит в следующем. Чувствительные к свету соединения **фоторезисты** (ФР) наносятся на поверхность подложки и подвергаются воздействию излучения (**экспонируются**). Использование специальной стеклянной маски с прозрачными и непрозрачными полями **фотошаблона** (ФШ) приводит к локальному воздействию излучения на ФР и, следовательно, к локальному изменению его свойств. При последующем воздействии определенных химикатов происходит удаление с подложки отдельных участков пленки ФР, освещенных или неосвещенных в зависимости от типа ФР (**проявление**). Создается защитная маска с рисунком, повторяющим рисунок фотошаблона. Резисты могут быть как негативными, так и позитивными. После воздействия экспонирующего облучения растворимость негативных резистов в проявителе уменьшается, а позитивных увеличивается (рис.2.1).

Фоторезисты - это светочувствительные материалы с изменяющейся под действием света растворимостью. Фоторезисты обычно состоят из трех компонентов:

- **светочувствительных веществ;**
- **пленкообразующих веществ;**
- **растворителей.**

В **негативных** ФР под действием света протекает реакция фотоприсоединения (фотополимеризации). При **фотополимеризации** происходит поперечная сшивка молекул полимера, в результате чего они укрупняются, становятся трехмерными, и их химическая стойкость возрастает. В негативных ФР на основе поливинилциннаматов (ПВЦ) полимерной основой является эфир поливинилового спирта, с молеку-

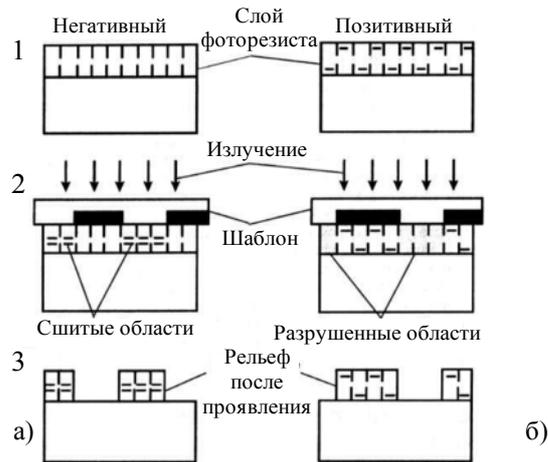


Рис.2.1. Схемы процесса фотолитографии с негативным (а) и позитивным (б) фоторезистами.

лами которого связана коричневая кислота, представляющая собой светочувствительный компонент (циннамоильная группа). В структуре коричневой кислоты имеются группы с относительно малой энергией связи H . При воздействии света с энергией кванта $h \nu$ происходит разрыв связей между молекулами ПВЦ. В результате исходные молекулярные цепочки ПВЦ образуют трехмерную структуру. Интенсивное поглощение света фоторезистом на основе ПВЦ, приводящее к образованию трехмерной структуры, начинается с длины волны менее 320 нм. Граница поглощения сдвигается в сторону более длинных волн (360–410) нм при добавлении сенсibilизатора.

Фоторезисты на основе ПВЦ имеют удовлетворительную кислотостойкость, но они не выдерживают воздействия концентрированной плавиковой кислоты. Повышенной кислотостойкостью обладают негативные ФР на основе каучуков с различными добавками. Каучуки не являются светочувствительными веществами, поэтому в состав ФР вводят светочувствительные диазосоединения. Под действием света молекула диазосоединения разлагается с потерей молекулы азота, образуя новые вещества - нитрены, которые вступают в реакцию с макромолекулами каучука. В результате образуется стойкая трехмерная структура.

В **позитивных** ФР под действием света образуются растворимые соединения (**фоторазложение**). Для осуществления этой задачи удоб-

но использовать смеси нафтохинондиазидов (НХД) с фенолформальдегидными смолами в органических растворителях. Светочувствительной основой является НХД, а смола играет роль химически стойкого полимера. В результате облучения и разрыва связей образуется инденкарбоновая кислота. Для завершения деструкции и перевода кислоты в растворимую соль необходимо воздействовать на нее проявителем со щелочными свойствами. При этом проявитель должен растворять и полимерную основу. Необлученные молекулы НХД затрудняют, но не исключают полностью растворение основы в щелочных растворителях на неэкспонированных участках.

Важным компонентом ФР являются растворители, от которых зависят стабильность жидких растворов, характеристики нанесения и качество слоя ФР и др.

Основными параметрами ФР являются **светочувствительность, разрешающая способность, химическая стойкость** к травителям [1,2]. Светочувствительность S - это величина, обратная экспозиции, т.е. количеству световой энергии, необходимой для облучения ФР, чтобы перевести его в нерастворимое (негативный ФР) или растворимое (позитивный ФР) состояние

$$S = \frac{1}{H} \left[\frac{1}{Et} \right],$$

где H - экспозиция (доза облучения);

E - энергооблученность;

t - длительность облучения (или плотность потока энергии на поверхность фотослоя).

Критерием светочувствительности ФР служит четкость рельефа рисунка в его слое после проведения процессов экспонирования и проявления. При этом рельеф рисунка должен иметь резко очерченную границу между областями удаленного и оставшегося на поверхности подложки слоя ФР.

Негативный ФР можно рассматривать как фоточувствительный материал с эффективной пороговой энергией E_n . Если энергия фотонов E , падающих на резист, меньше пороговой энергии, то резист удаляется в процессе проявления. Если же $E \geq E_n$, то резист становится нерастворимым в проявителе и получающееся изображение действует как защитная маска. Величина E_n зависит от многих факторов: типа ФР, толщины ФР, материала подложки и др. Приблизительная оценка E_n может быть получена из характеристической кривой резиста - зависимости глубины проявления от энергии экспонирования или экспозиции H (рис.2.2). Характеристическая кривая представляет собой зависи-

мость отношения толщины полимеризованной пленки d_s к ее исходной толщине d_0 от $\lg H$ [2]. Интенсивные фотохимические реакции для негативного ФР начинаются при экспозиции H_1 , что соответствует пороговой чувствительности ФР $S_n = 1/H_1$. При величинах энергии, превышающих пороговое значение в 2-3 раза растворяется очень незначительная часть пленки негативных ФР. В качестве критерия светочувствительности S_0 была выбрана d , составляющая 90 % от исходной толщины. Это соответствует экспозиции H_2 и $S_0 = 1/H_2$.

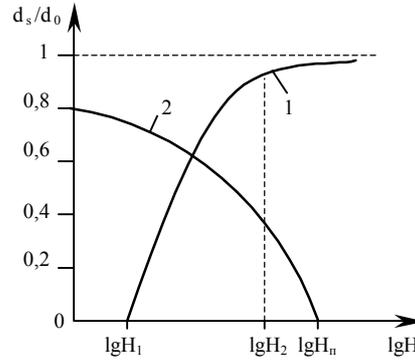


Рис.2.2. Характеристические кривые для негативных (1) и позитивных (2) ФР

В соответствии с законом Бугера-Ламберта интенсивность света, а, следовательно, и экспозиция уменьшается с увеличением глубины проникновения энергии в ФР, т.е. по экспоненциальному закону

$$H_d = H_0 \exp(-\alpha d)$$

где H_0 - экспозиция на поверхности ФР;

α - коэффициент поглощения энергии материалом ФР, зависящий от длины волны экспонирующего излучения;

d - глубина проникновения энергии в ФР.

Экспозиция на поверхности фоторезиста, при которой он прорабатывается на глубину d , будет равна

$$H_0 = H_d \exp(\alpha d)$$

отсюда $d = (\lg H_0 - \lg H_d) / \alpha$

Толщина сшитого слоя пропорциональна $\lg H$. Последнее уравнение описывает линейный участок характеристической кривой (интервал $H_1 \mid H_2$). Кривая справедлива только для конкретной марки и толщины ФР.

Позитивный ФР имеет аналогичную характеристическую кривую, но в зеркальном изображении (см.рис.2.2). Растворимость позитивного резиста в проявителе имеется даже при нулевом значении H . При увеличении энергии она значительно возрастает до тех пор, пока при некотором пороговом значении H_n не наступит полная растворимость. При экспонировании позитивного фоторезиста необходимо облучение с большей энергией (большее время экспонирования), чем для негативного фоторезиста. Следовательно, эффективность экспонирования позитивного ФР меньше по сравнению с эффективностью экспонирования негативного ФР.

Более полную информацию о поведении позитивного фоторезиста дает зависимость скорости проявления V_{np} от экспозиции, представленная на рис.2.3. Для позитивного фоторезиста важно, чтобы время проявления облученных участков в щелочном растворе было минимальным. Поскольку скорость растворения облученных участков зависит от концентрации образующейся при фотолизе инденкарбоновой кислоты, зависимость V_{np} от экспозиции позволяет оценить чувствительность фоторезиста [2]. Она определяется при H_2 , когда скорость проявления достигает максимума $S_0 \quad 1/H_2$.

Таким образом, критерием светочувствительности **негативного** ФР является образование после экспонирования и проявления на поверхности подложки локальных полимеризованных участков - рельефа рисунка. Критерием S позитивного ФР является полнота разрушения и удаления с поверхности подложки локальных участков слоя ФР после экспонирования и проявления и образование рельефа рисунка.

Разрешающая способность характеризует способность ФР к созданию рельефа рисунка с минимальными размерами элементов. Разрешающая способность R определяется числом линий равной ширины,

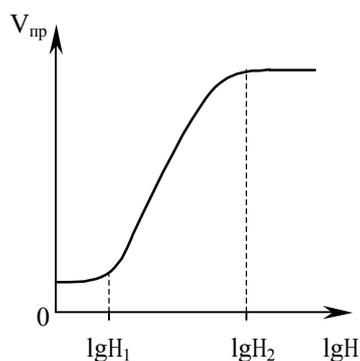


Рис.2.3. Зависимость скорости проявления позитивного ФР от экспозиции

разделенных промежутками такой же ширины и вмещающихся в одном миллиметре. Разрешающая способность определяется путем экспонирования ФР через штриховую мишу, которую используют в качестве ФШ. После проявления выделяется участок с различимыми штрихами наименьшей ширины. Разрешающая способность ФР и процесса ФЛ в целом с уменьшением толщины слоя ФР увеличивается (рис.2.4). Однако нижний предел толщины слоя ФР обусловлен снижением защитной способности таких слоев. При $d < 0,2$ мкм возрастает растравливание слоя за счет дефектов пленки на операции проявления. Разрешающая способность для негативных ФР составляет 300 линий/мм, для позитивных ФР она выше - 1500-2000 линий/мм. Для получения изображений элементов с размерами 5-10 мкм необходимо выбирать фоторезист с $R=500-1000$ линий/мм. Основные характеристики некоторых позитивных и негативных фоторезистов приведены в [2].

Химическая стойкость - это способность слоя ФР защищать поверхность подложки от воздействия травителя. Критерием стойкости является время, в течение которого ФР выдерживает действие травителя до момента появления таких дефектов, как частичное разрушение, отслаивание от подложки, локальное точечное растравливание слоя или подтравливание его на границе с подложкой. Стойкость ФР к химическим воздействиям зависит от типа ФР, его толщины и др. Поэтому стойкость ФР оценивают величиной бокового подтравла l или фактором травления $K = d/l$, где d - глубина травления (рис.2.5). Чем меньше боковое подтравливание l при заданной глубине травления, тем выше стойкость фоторезиста к травителю. На негативном

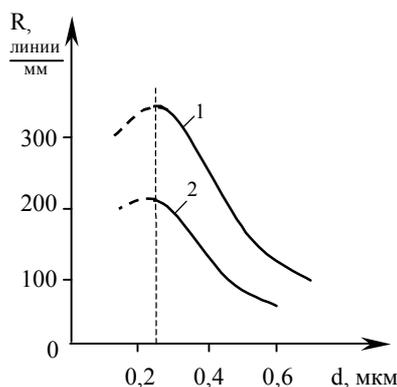


Рис.2.4. Зависимость разрешающей способности негативного фоторезиста (1) и фотолитографического процесса в целом (2) от толщины фоторезиста

фоторезисте боковой подтрав составляет 1-2 мкм, на позитивном фоторезисте на основе НХД - порядка 0,3-0,4 мкм.

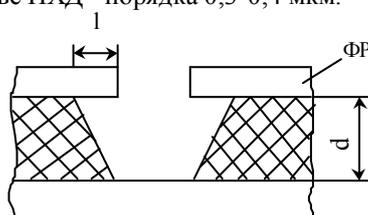


Рис.2.5. Боковой подтрав

Адгезия - это способность слоя ФР препятствовать проникновению травителя к подложке по периметру рельефа рисунка элементов. Стабильность свойств ФР характеризуется их сроком службы.

Выбор толщины фоторезиста делается, исходя из следующих соображений. Практикой установлено, что **толщина ФР должна быть в 3-4 раза меньше минимального размера** рисунка элементов. С другой стороны, толщина ФР должна быть достаточной, чтобы противостоять действию травителей (кислот и щелочей) и перекрывать локальные дефекты. Таким образом, выбор толщины ФР обусловлен компромиссом между требованием достаточной разрешающей способности и адгезии, с одной стороны, и защитными свойствами, с другой. Обычно толщину ФР выбирают в пределах 0,5-1,5 мкм.

2.2. Способы экспонирования

В оптической литографии используется три способа:

- **контактная** фотолитография;
- **бесконтактная** или фотолитография с зазором;
- **проекционная** фотолитография.

При контактной фотолитографии фотошаблон находится в непосредственном контакте со слоем ФР на подложке (рис.2.6). Для засветки ФР через ФШ используется источник света с требуемой длиной волны.

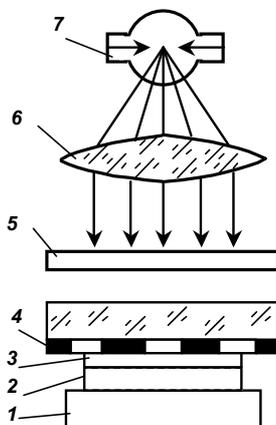


Рис.2.6. Схема контактной фотолитографии

- 1 - предметный столик; 2- подложка; 3 - слой фоторезиста;
4 - фотошаблон; 5 - затвор; 6 - конденсор; 7 - источник света.

Конденсорная линза (конденсор) служит для создания равномерного светового потока. Затвор задает дозу экспонирования. На некотором расстоянии от источника света размещается подложка с фотошаблоном. За счет плотного контакта достигаются высокие разрешения. Технологически между ФШ и подложкой будет зазор, обусловленный толщиной ФР, наличием неровностей на подложке, искривлением подложки и др. Кроме того разрешение зависит от свойств ФР. Рассмотрим особенности прохождения света в негативных и позитивных ФР (рис.2.7).

При прохождении света наблюдаются дифракция на границе темного и светлого полей на ФШ, рассеяние света в слое ФР и отражение света от подложки. За счет отражения света область негативного ФР полимеризуется и удерживается при проявлении за счет сил сцепле-

ния с подложкой. В результате этого в негативных ФР образуется “ореол”, ухудшающий разрешающую способность ФР. В позитивных ФР при проявлении вымывается только верхняя часть рисунка, что не влияет на разрешающую способность. Отсюда следует, что разрешающая способность позитивного ФР будет лучше, чем негативного ФР. Для уменьшения дифракции надо использовать для экспонирования более коротковолновое излучение с $\lambda = 220-260$ нм.

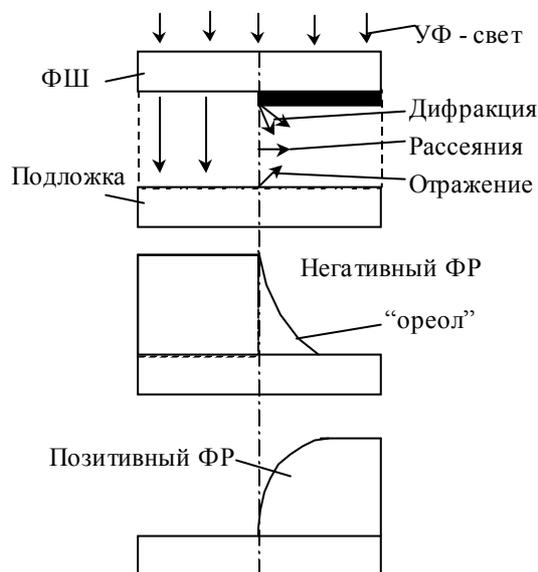


Рис.2.7. Прохождение света в негативном и позитивном ФР.

Основной недостаток контактной ФЛ состоит в изнашивании ФШ при его многократном использовании. Плотное соприкосновение ФШ с подложкой приводит к возникновению дефектов на соприкасающихся поверхностях как шаблона, так и резиста. Накопление дефектов и частиц ФР, прилипающих к ФШ, приводит к его быстрому износу.

В **бесконтактной** ФЛ во время экспонирования между подложкой и ФШ поддерживается небольшой зазор 10-40 мкм. Этот зазор уменьшает (но не устраняет) возможность повреждения поверхности шаблона. При наличии зазора дифракция света уменьшает разрешающую способность и одновременно ухудшает четкость изображения. Степень этих негативных явлений зависит от величины зазора между ФШ и подложкой, который может быть неодинаковым вдоль пластины. При малых зазорах основным источником искажений являются неровности

поверхности подложки (пластины), при больших - эффекты дифракции. Процесс переноса изображения осуществляется в дифракционной области, разрешение в которой определяется как

$$b_{\min} \approx \sqrt{\lambda h},$$

где b_{\min} - минимальная ширина линии;

h - величина зазора.

Проекционная фотолитография заключается в проектировании изображения ФШ на подложку, покрытую ФР, с помощью проекционного объектива (рис.2.8).

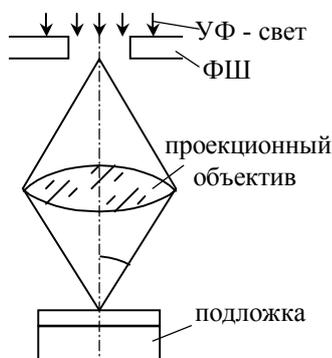


Рис.2.8. Перенос изображения в проекционной ФЛ

Качество проекционного объектива характеризует такой параметр, как числовая апертура

$$NA = n \sin \alpha,$$

где n - коэффициент преломления среды в пространстве изображения (для воздуха $n = 1$);

α - половина максимального угла расходимости лучей, приходящих в точку изображения на оптической оси проекционной системы.

Разрешающая способность (минимальный передаваемый размер элемента) определяется длиной волны излучения и числовой апертурой проекционного объектива

$$b_{\min} = K_1 \frac{\lambda}{NA},$$

где K_1 - технологический фактор.

Числовой коэффициент K_1 зависит от параметров оптической системы, а также от свойств ФР, режимов его обработки и др. Желательно, чтобы K_1 был по возможности меньшим. Если сделать $K_1 < NA$, то b_{\min}

. Однако это трудно достижимо. Чаще всего для систем с дифракци-

онными ограничениями $K_1=0,6-0,8$. Чем больше числовая апертура объектива, тем выше его разрешающая способность.

Важным параметром проекционной системы является глубина резкости f , определяемая как

$$f \propto |NA|^2.$$

Для компенсации aberrаций оптической системы, искривления поверхности подложек и изменения толщины слоя ФР необходима наибольшая глубина резкости. Глубина резкости оптической системы должна превышать 5 мкм. Это ограничивает апертуру линз и, следовательно, разрешающую способность метода. Для повышения разрешающей способности необходимо уменьшить λ , что, однако, затруднительно из-за возрастания коэффициента поглощения оптических стекол. Обычно в проекционных системах используют монохроматическое излучение с $\lambda=400-440$ нм. Схемы установки проекционной литографии без изменения масштаба переноса изображения и установки мультипликации с уменьшением приведены в [3,4].

2.3. Фотошаблоны и технология их получения

Фотошаблоны являются основным инструментом для получения рисунка в слое ФР на подложке. **Фотошаблон** - плоскопараллельная пластина из прозрачного материала, на которой имеется рисунок, состоящий из непрозрачных для света определенной длины волны участков, образующих топологию одного из слоев структуры прибора, многократно повторенного в пределах рабочего поля подложки. Топология структуры - рисунок (чертеж), включающий в себя размеры элементов структуры, их форму, положение и принятые допуски. Для изготовления ИМС необходим комплект ФШ в соответствии с количеством формируемых технологических слоев.

Типономиналы размеров ФШ, используемых в производстве полупроводниковых ИМС, приведены ниже.

Размер рабочего поля ФШ (диаметр полупроводниковой подложки), мм	60	76	100	125	150
Размер стеклянной пластины ФШ, мм	76x76	102x102	127x127	153x153	178x178

Производство ФШ является сложным многостадийным процессом, включающим:

- проектирование топологии интегральных схем;
- изготовление увеличенного фотооригинала;
- изготовление промежуточного ФШ;
- изготовление эталонного ФШ;
- изготовление рабочих ФШ.

Технологические основы производства ФШ изложены в [2]. Самым простым методом изготовления оригинала является вырезание увеличенного рисунка топологии в двухслойной пленке, состоящей из прозрачной основы (полиэфирные пленки) и непрозрачного покрытия (красный пластик). Прорезание непрозрачного покрытия осуществляется на координатографе. Управление движениями резца осуществляется либо вручную (ручной координатограф), либо автоматически по программе (автоматический координатограф). В производстве находят применение ручные ЭМ-701 и ЭМ-707 с рабочим полем 800x800 мм и автоматизированные ЭМ-703 и ЭМ-706 с рабочим полем 1200x1200 мм координатографы. **Точность позиционирования** резца для ручных моделей $x = 50$ мкм. Тогда **точность выполнения рисунка** для линии шириной b при масштабе увеличения M будет

$$b \frac{2x}{M}.$$

Масштаб оригинала выбирается, исходя из двух соображений:

- 1) требуемой точности изготовления рисунка;
- 2) размера рабочего поля подложки.

Размеры оригиналов будут увеличены в M раз по сравнению с размерами подложек, которые составляют для полупроводниковых интегральных схем 1x1, 4x3 мм, для пленочных - 8x10, 10x12 мм и т.д. Полученный оригинал должен уместиться на рабочем поле координатографа. Рисунок топологии выполняется для полупроводниковых схем в масштабе от 200:1 до 1000:1, а для пленочных схем - до 50:1. Этот увеличенный рисунок и является **первичным оригиналом**.

Первичный перенос изображения с оригинала на фотопластину осуществляется в редуционной фотокамере (рис.2.9 а). Редуционные фотокамеры позволяют производить отъем с оригиналов, имеющих максимальные размеры 750x750 и 1200x1200 мм соответственно на фотопластины с размерами 60x90 или 90x120 мм. Уменьшение осуществляется ступенчато от 10 до 50 раз. В результате последующей фото-

химической обработки (проявления и фиксации изображения) получают **промежуточный ФШ** на эмульсионной основе.

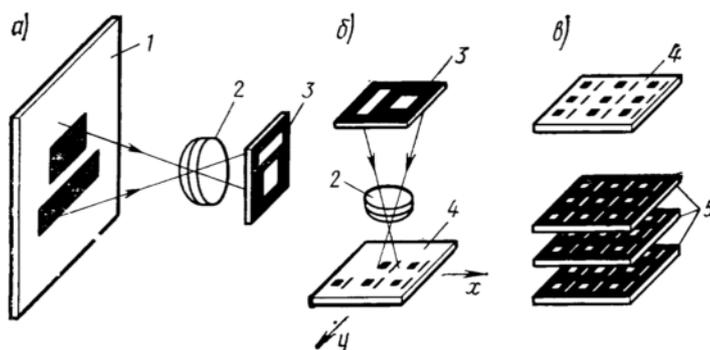


Рис. 2.9. Первичный отъем оригинала с уменьшением (а), вторичный отъем промежуточного ФШ с одновременным мультиплицированием (б), и контактная печать с эталонного ФШ (в)
1 - оригинал; 2 - объектив; 3 - промежуточный ФШ;
4 - эталонный ФШ; 5 - рабочие ФШ

Эталонный групповой ФШ получают путем мультиплицирования изображения рисунка, т.е. пошагового впечатывания, уменьшенного до натурального размера изображения промежуточного ФШ на фотопластину (рис.2.9 б). Процесс выполняется на специальных оптико-механических установках - фотоповторителях. Точность шага расположения модулей, т.е. **точность позиционирования** составляет для установки ЭМ-515А 2,5 мкм, а для ЭМ-522А 0,2 мкм. Мультиплицирование изображений можно выполнять не только на эмульсионных ФШ, но и на пластинах, покрытых фоторезистом с подслоем хрома. Это позволяет сократить число этапов производства ФШ за счет исключения этапа экспонирования эмульсионного эталонного ФШ, который имеет низкую стойкость к контактной печати.

Рабочие ФШ представляют собой копии с эмульсионных или хромированных эталонов, полученные методом контактной печати. В качестве покрытий для рабочих ФШ используются пленки хрома (хромированные ФШ) или полупрозрачные покрытия из окиси железа Fe_2O_3 (транспарентные ФШ). Хромированные ФШ имеют стойкость до 50 отпечатков, транспарентные ФШ выдерживают до 100 отпечатков. Не менее важно то, что для транспарентных ФШ проще поиск знаков со-

вмещения, так как окисное покрытие поглощает ультрафиолетовое излучение, но является прозрачным для видимого света.

Рассмотренный метод изготовления ФШ называется **оптико-механическим** методом. Необходимость многократного воспроизведения изображения на групповом ФШ, а также получения фотокопий с износостойким покрытием приводит к многоступенчатости процесса изготовления ФШ. Однако с каждой ступенью процесса происходит накопление дефектов в рисунке и требование высокой точности приводит в противоречие с требованием малой плотности дефектов. Оптико-механический метод получается длительным и дорогостоящим и рекомендуется для изготовления ФШ полупроводниковых приборов и интегральных схем крупносерийного производства.

Современным методом изготовления ФШ является **микрофотонаборный** метод генерации изображения. Микрофотонаборный метод реализуется либо оптическим, либо электронным генератором изображения. В основе работы оптического генератора изображения лежит принцип фотонабора. Топологическая структура рисунка расчленяется на элементарные прямоугольники с различным отношением сторон и определенной ориентацией по углу (рис.2.10). По заданной программе очередной элемент формируется подвижными шторками диафрагмы и разворачивается на необходимый угол, а двухкоординатный стол, на котором размещена светочувствительная пластина, отрабатывает заданные координаты. После остановки стола производится экспонирование светом с заранее установленной выдержкой. Соответственно исходными данными для каждой экспозиции являются длина и ширина очередного элемента, угол его поворота вокруг центра тяжести относительно оси x и координаты центра тяжести элемента (x и y). С помощью генератора изображения получают оригинал в масштабе 10:1, который используют для изготовления эталонных ФШ с помощью фотоповторителя. Схемы генераторов изображений приведены в [3,4], а схемы фотоповторителей и их основные характеристики в [2].

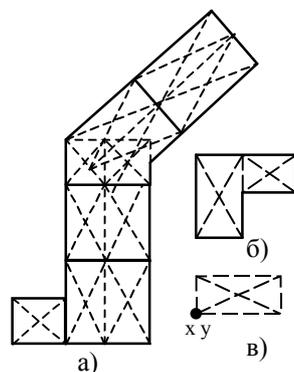


Рис. 2.10. Генерация изображений топологических элементов на микрофотонаборной установке
а - сложного; б, в - простых.

Оптический генератор позволяет осуществить до 300 тысяч экспозиций в час и формировать с большой скоростью сложный топологический рисунок. Однако ввиду того, что современные интегральные схемы имеют до миллиона топологических элементов даже при таком быстродействии формирование одного фотошаблона составляет десятки часов.

Электронно-лучевой генератор изображения в сравнении с оптическим имеет более высокое быстродействие. В нем используется электронный луч в режиме векторного сканирования. При этом возможно получение на рабочем поле до 50 млн. элементов.

Изготовление рабочих ФШ представляет собой процесс контактной ФЛ, состоящей из следующих этапов:

- осаждение пленки рабочего материала;
- нанесение ФР;
- первая сушка;
- совмещение и экспонирование;
- проявление ФР;
- травление пленок;
- удаление ФР;
- контроль ФШ.

Процессы контактной ФЛ описаны в [1-4].

Качество процесса ФЛ во многом определяется механическим и физико-химическим состоянием поверхности подложек. Механическое состояние поверхности подложек влияет на точность получения элементов рисунка, поэтому любые неровности, микробугорки, впадины,

царапины и риски приводят к их искажению. Кроме того, при нанесении слоя ФР эти дефекты вызывают появление пузырьков или проколов в слое ФР.

Физико-химическое состояние поверхности подложек влияет на ее смачиваемость и адгезию ФР. Поэтому на рабочих поверхностях подложек не должно быть инородных частиц, а также адсорбированных атомов и ионов жидкостей и газов.

Нанесенный на предварительно подготовленную поверхность подложки слой ФР должен быть однородным по толщине по всему их полю, без проколов, царапин, (т.е. быть сплошным) и иметь хорошую адгезию. **Для нанесения слоя ФР чаще всего используют метод центрифугирования.** При этом методе на подложку, которая устанавливается на столике центрифуги и удерживается на нем вакуумным присосом, фоторезист подается капельницей - дозатором. Когда столик приводится во вращение, фоторезист растекается тонким слоем по поверхности подложки. Прилегающий к подложке граничный слой формируется за счет уравнивания центробежной силы, пропорциональной числу оборотов, и силы сопротивления, зависящей от когезии молекул резиста. Когезия характеризуется вязкостью фоторезиста, так что толщина слоя $d_{ФР}$ прямо пропорциональна вязкости и обратно пропорциональна числу оборотов центрифуги

$$d_{ФР} = A \sqrt{\eta / \omega},$$

где A - коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Вязкость фоторезиста составляет 0,02-0,05 см/с, число оборотов центрифуги - от 2000 до 10000 об/мин. Зависимости толщины слоя ФР от частоты вращения центрифуги при различных коэффициентах его вязкости показаны в [4]. Используя метод центрифугирования, можно в зависимости от вязкости ФР регулировать толщину его слоя от 0,4 до 3,5 мкм, изменяя частоту вращения центрифуги от 1500 до 8000 об/мин. При малых скоростях центрифугирования слой ФР получается неровным и наблюдается его утолщение по краям подложки. Выбирая толщину слоя ФР, необходимо учитывать, что он должен обладать высокой разрешающей способностью (чем меньше толщина, тем выше разрешающая способность) и не терять стойкости к травителю. Кроме того слой фоторезиста не должен иметь дефектов в виде проколов, количество которых с уменьшением толщины увеличивается. Следовательно, толщина слоя ФР должна быть наименьшей, но достаточной для обеспечения его стойкости к травителю и обеспечивать малую дефектность.

Для окончательного удаления растворителя из слоя ФР его просушивают. При этом уплотняется молекулярная структура слоя, уменьшаются внутренние напряжения и повышается адгезия к подложке. Неполное удаление растворителя из слоя ФР снижает его кислотостойкость. Для удаления растворителя подложки нагревают до температуры, примерно равной 100 °С. Большое значение при сушке имеет механизм подвода теплоты. Существуют три метода сушки ФР: конвекционный, инфракрасный и в СВЧ-поле.

При **конвективной сушке** подложки выдерживают в термокамере при 90-100 °С в течение 15-30 мин. Недостаток этого метода - низкое качество ФР слоя.

При **инфракрасной сушке** источником теплоты является сама подложка, поглощающая ИК-излучение от специальной лампы. Так как "фронт сушки" перемещается от подложки к поверхности слоя ФР, качество сушки по сравнению с конвективной существенно выше, а время сокращается до 5-10 мин.

При **СВЧ-сушке** подложки нагреваются, поглощая электромагнитную энергию СВЧ-поля. Время сушки - несколько секунд. Достоинством этого метода является высокая производительность, а недостатками - сложность оборудования, а также неравномерность сушки слоя ФР.

При любом методе сушки ее режимы (время, температура) должны исключать появление структурных изменений в слое фоторезиста.

При нанесении слоя ФР могут появиться различные **виды брака**. Плохая адгезия ФР к подложке вызывает при последующем травлении растравливание и искажение рисунков элементов. Причиной плохой адгезии является некачественная подготовка поверхности подложек. Локальные неоднородности рельефа слоя ФР, имеющие вид капелек, обусловлены попаданием пылинок на подложки или присутствием посторонних частиц в фоторезисте. Микродефекты (проколы) слоя ФР связаны с теми же причинами, что и локальные неоднородности.

Точность полученного в процессе фотолитографии топологического рисунка в первую очередь определяется процессом совмещения и экспонирования. **Передача изображения с фотошаблона на подложку должна выполняться с точностью 10 % от минимального размера элемента.** Поэтому процессы совмещения и экспонирования проводят одновременно на одной установке. Перед экспонированием слоя ФР фотошаблон следует правильно сориентировать относительно подложки и рисунка предыдущего слоя. Для полного формирования структуры ИМС необходим комплект ФШ со строго согласованными топологическими рисунками элементов. При первой фотолитографии,

когда поверхность подложки еще не имеет рисунка, фотошаблон ориентируют относительно базового среза подложки. При последующих ФЛ, когда на подложках сформированы топологические слои, рисунок ФШ ориентируют относительно рисунка предыдущего слоя. Совмещают рисунки ФШ и подложки по специальным знакам - фигурам совмещения, предусмотренным в рисунке каждого топологического слоя. Существует два метода совмещения ФШ с подложками:

- визуальный, при котором, выполняя совмещение, наблюдают за контрольными отметками в микроскоп; при этом точность совмещения составляет 0,25-1,0 мкм и зависит от возможностей установки;
- автоматизированный фотоэлектрический, обеспечивающий точность совмещения 0,1-0,3 мкм.

Процедура совмещения осуществляется с помощью механизма совмещения микроизображений. Основными элементами этого механизма являются предметный шаровой столик со сферическим основанием-гнездом, рамка для закрепления ФШ и устройства перемещения рамки и поворота предметного столика. Подложку размещают на предметном столике так, чтобы слой ФР был сверху и закрепляют ФШ в подвижной рамке над поверхностью подложки. Между подложкой и ФШ должен быть зазор для свободного перемещения рамки при совмещении знаков.

После выполнения совмещения подложку прижимают к ФШ и экспонируют слой ФР. Обеспечить идеальный контакт и отсутствие локальных зазоров по большим площадям практически невозможно. Зазор при контактировании двух поверхностей носит случайный характер и обусловлен неплоскостью подложки, изгибом подложки при термообработках, наличием нижележащего микрорельефа и др. Этот зазор может колебаться в диапазоне 5-20 мкм. Наличие зазора ухудшает разрешающую способность контактной фотолитографии.

Окончательное формирование в пленке ФР изображения элементов схем происходит при его **проявлении**, когда в зависимости от типа ФР удаляются экспонированные или неэкспонированные участки. В результате на поверхности подложки остается защитная фоторезистивная маска требуемой конфигурации.

Проявителями для негативных ФР служат органические растворители: толуол, бензол, трихлорэтилен и др.

Позитивные ФР проявляются в слабых водных растворах щелочей: 0,3-0,6 %-ный раствор КОН; 1-2 %-ный раствор тринатрийфосфата и др.

Для каждого резиста существуют оптимальные сочетания времен экспонирования и проявления, обеспечивающие наилуч-

шую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка (рис.2.11). Такие зависимости для позитивного фоторезиста ФП-383 приведены в [2].

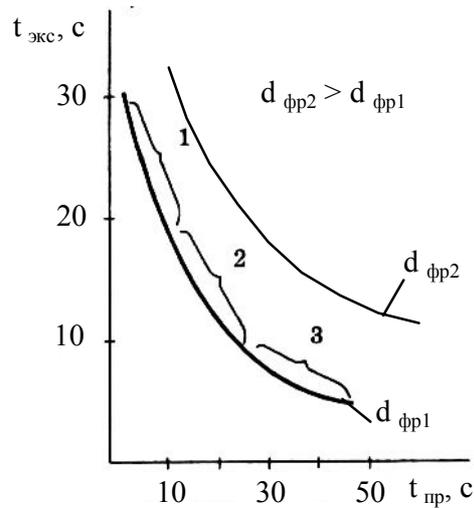


Рис.2.11. Зависимость между временами экспонирования и проявления, обеспечивающими наилучшую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка:
1,3 - области неустойчивых режимов;
2 - область устойчивых режимов.

Увеличение экспозиции уменьшает время проявления, но приводит к изменению размеров проявленных элементов рисунка (в позитивных резистах размеры увеличиваются, в негативных уменьшаются). Увеличение времени проявления повышает пористость и растравливание границ рисунка по контуру. Времена проявления и экспонирования связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью

$$t_{пр} = k_{пр} \frac{d_{ФР}^2}{t_{экс}},$$

где $k_{пр}$ - технологический фактор.

Если известно время проявления для одной толщины фоторезиста $d_{ФР1}$, то можно определить время проявления для другой толщины $d_{ФР2}$ при заданном времени экспонирования:

$$t_{np2} = t_{np1} \frac{d_{\Phi P2}^2}{d_{\Phi P1}^2}.$$

При проявлении негативных ФР происходит набухание и затем растворение неэкспонированных участков. При этом набухают и растворяются и экспонированные участки, но в значительно меньшей степени. Поэтому для получения четкого рисунка подбирают такой проявитель, который бы минимально воздействовал на экспонированные участки. При недостаточной экспозиции облученные участки будут растворяться почти также как и необлученные, что приведет к очень некачественному рисунку. Механизм проявления позитивных ФР заключается в образовании при химической реакции растворимых в воде солей, которые вымываются при проявлении. В отличие от негативных ФР в позитивных ФР отсутствует набухание, что повышает их разрешающую способность.

После проявления подложки промывают и сушат при повышенных температурах. Температура сушки составляет: для негативных ФР - 200-220 °С при времени выдержки 1 ч; для позитивных ФР - 200-240 °С - 0,5 ч. В процессе сушки в негативных ФР происходит окончательная полимеризация проявленных участков. Вследствие этого повышается стойкость слоя ФР к действию травителей и улучшается его адгезия к подложке.

После сушки подложки подвергают контролю под микроскопом. При контроле обнаруживаются: **посторонние включения, пылинки, микрочастицы**, которые создают участки, обладающие повышенной растворимостью. Эти дефекты, как правило, незаметны во время нанесения резиста, выявляются при проявлении, поскольку обладают повышенной растворимостью. В результате растворения они создают **поры (проколы)** в слое ФР. Плотность зависит не только от чистоты и качества резиста, запыленности окружающей среды, но и от толщины наносимого ФР. С уменьшением толщины плотность дефектов D увеличивается:

$$D = 1,4d_{\Phi P}^3,$$

где D - деф/см²;
 d - мкм.

Задубливание является финишной операцией нанесения фоторезистивной маски, поэтому после нее следует окончательный визуальный контроль перед травлением.

Основные виды выявляемых дефектов сводятся к следующим:

- некачественное удаление резиста (вызывается низкой адгезией из-за плохой подготовки поверхности);
- плохо проявленный рисунок (вызывается некачественным фоторезистом, нарушениями температуры первой сушки и режимов экспонирования);
- двойной край или большой клин по краю рельефа (вызывается неоптимальными режимами экспонирования и проявления, большим зазором между подложкой и фотошаблоном при экспонировании);
- неровный (“рваный”) край рельефа (в основном из-за загрязненного фотошаблона и несоблюдения режимов экспонирования);
- проколы (из-за запыленности среды и фоторезиста, перепроявления, уменьшения толщины, нарушения режимов экспонирования);
- остатки фоторезиста в проявленных окнах (из-за недопроявления или нарушения режимов экспонирования);
- изменение размеров рисунка (из-за ошибки в экспозиции, либо нарушения режимов проявления).

Контактная ФЛ заканчивается операцией травления технологического слоя и последующим удалением фоторезистивной маски. Для **удаления фоторезистов** можно применять множество жидких растворителей или использовать газофазные процессы с возбужденным кислородом (сжигание в кислородной плазме). Позитивные ФР легко удаляются в органических растворителях. Негативные ФР лучше удаляются при окислении. При жидкостном методе подложки кипятят в органических растворителях (диметилформамиде и др.). При этом слой ФР набухает и удаляется. Чем больше задублен ФР, тем он прочнее, тем сложнее его растворить.

Эффективное удаление ФР можно проводить в среде кислорода при высоких (до 700 °С) температурах, если это позволяет структура подложки. Освещение подложки ультрафиолетовыми лучами позволяет резко снизить температуру обработки.

Формирование топологии рисунка на технологическом слое (металлизация, диэлектрическая пленка) является конечной задачей фотолитографии. Это осуществляется химическим жидкостным либо “сухим” (ионно-плазменным) методами. **Химическое жидкостное травление основано на растворении в химических реагентах незащищенных фоторезистивной маской участков технологического слоя** и состоит из следующих стадий: диффузии и адсорбции молекул травителя к поверхности подложки; химической реакции; десорбции продуктов реакции и удаления их в раствор. Скорость травления зависит от наиболее медленной стадии и, кроме того, определяется составом травителя и его температурой. Используемые химические травите-

ли должны обладать **селективностью (избирательностью)**, т.е. способностью активно растворять основной технологический слой, не взаимодействуя с фоторезистом и другими нижележащими слоями. **Процесс химического жидкостного травления, как правило, изотропен, т.е. имеет одинаковую скорость во всех направлениях.** Участки подложки, незащищенные пленкой ФР, травятся не только вглубь, но и в стороны, т.е. происходит так называемое боковое подтравливание, что приводит к изменению линейных размеров элементов рисунка. При плохой адгезии слоя ФР травитель может проникать под него на значительное расстояние и в этом случае боковое подтравливание становится недопустимо большим. При хорошей адгезии фронт бокового травления (клин травления) имеет форму дуги. Изменение размеров элементов рисунка не должно превышать допусков, указанных в технических условиях.

Погрешность изготовления ФШ по оптико-механическому методу складывается из погрешностей, допускаемых на каждом этапе. Погрешность изготовления оригинала b_{op} определяется точностью вырезания рисунка на координатографе (x) и масштабом увеличения оригинала M_1 , т.е. $b_{op} = \frac{x}{M_1}$.

Погрешность изготовления промежуточного ФШ $b_{пром}$ определяется точностью переноса изображения с оригинала на редуцированной установке $b_{ред}$, масштабом промежуточного ФШ M_2 и ошибкой проявления эмульсионного слоя на фотопластине $b_{прэ}$:

$$b_{пром} = \sqrt{b_{op}^2 \left\{ \frac{b_{ред}}{M_2} \right\}^2 + \frac{b_{прэ}^2}{M_2^2}}$$

Ошибку проявления можно принять равной удвоенной толщине эмульсионного слоя. Погрешность изготовления эталонного ФШ будет:

$$b_{эт} = \sqrt{b_{пром}^2 \left\{ b_{фп} \right\}^2 + b_{прэ}^2}$$

где $b_{фп}$ — точность фотоповторителя.

Рисунок эталонного ФШ переносится на установке совмещения и экспонирования на подложку с фоторезистом, проявляется и через

полученную маску травится рабочий слой ФШ. Суммарная ошибка изготовления рабочего ФШ будет представлять сумму следующих ошибок:

$$b_{\text{раб.фш}} = \sqrt{b_{\text{эм}}^2 + b_{\text{совм}}^2 + b_{\text{прфр}}^2 + b_{\text{тр}}^2}$$

где $b_{\text{совм}}$ — точность установки совмещения и экспонирования, используемой при проведении контактной фотолитографии;

$b_{\text{прфр}}$ — ошибка проявления фоторезиста, которая равна удвоенной толщине фоторезиста;

$b_{\text{тр}}$ — ошибка травления рабочего слоя (например хрома), которая при жидкостном химическом травлении равна удвоенной толщине пленки хрома.

Наибольший вклад в эту погрешность изготовления рабочего фотошаблона вносят ошибки проявления и травления. Поскольку эти ошибки всегда действуют в одном направлении, т.е. они увеличивают размер окна на две толщины травимого слоя, то их влияние можно частично компенсировать на этапе проектирования за счет уменьшения размера окна.

Параметры технологических установок приведены в [2, 5].

Разрешающая способность контактной фотолитографии оценивается как минимальный размер, который можно получить при формировании рисунка в рабочем слое:

$$b_{\text{min}} = b_m + b_{\text{тр}},$$

где b_m — размер в фоторезистивной маске;

$b_{\text{тр}}$ — ошибка, возникающая при травлении рабочего слоя.

При жидкостном химическом травлении она равна удвоенной толщине рабочего слоя.

Если вытравливается окно в рабочем слое, то его размер увеличивается, т.е. $b_{\text{тр}}$ прибавляется к b_m . При вытравливании линии в рабочем слое происходит подтравливание и размер линии уменьшается и $b_{\text{тр}}$ вычитается из b_m .

Аналогично определяется ширина линии (окна) в маске:

$$b_m = b_p - b_{\text{тр}}$$

где b_p — расчетная величина;

b_m – ошибка изготовления маски.

Погрешность изготовления контактной фоторезистивной маски определяется ошибкой изготовления рабочего фотошаблона $b_{\text{раб.фи}}$, ошибкой на операции совмещения и экспонирования $b_{\text{совм}}$ (параметр установки) и ошибкой проявления $b_{\text{прфр}}$, равной удвоенной толщине слоя фоторезиста.

Таким образом, ошибка изготовления маски определяется:

$$b_m = \sqrt{b_{\text{раб.фи}}^2 + b_{\text{совм}}^2 + b_{\text{прфр}}^2}.$$

2.4. Оптические эффекты при фотолитографии

При переносе изображения с фотошаблона на слой ФР дифракция на краях маски ФШ вызывает искажение элементов рисунка, формируемого на слое фоторезиста. Между ФШ и подложкой даже при контакте всегда имеется некоторый зазор h , обусловленный их взаимной неплоскостью. Необходимо также принимать в расчет толщину слоя ФР, так при воспроизведении элементов малых размеров она соизмерима с ними. Фактически зазор между ФШ и подложкой может достигать 20 мкм. Дифракция излучения при прохождении его через фотошаблон с рисунком в виде периодической решетки с прозрачными и непрозрачными участками равной ширины b приводит к перераспределению интенсивности излучения I на поверхности фоторезиста (рис.2.12).

Из-за дифракции на краях непрозрачных участков шаблона освещенность фоторезиста оказывается неравномерной, причем свет проникает и в область геометрической тени. Неравномерность освещенности приводит к тому, что после проявления элементы в слое ФР имеют нерезкий контур - появляется вуаль.

В теории дифракции выделены три случая дифракционного перераспределения излучения. Вид дифракционной картины зависит от величины волнового параметра P

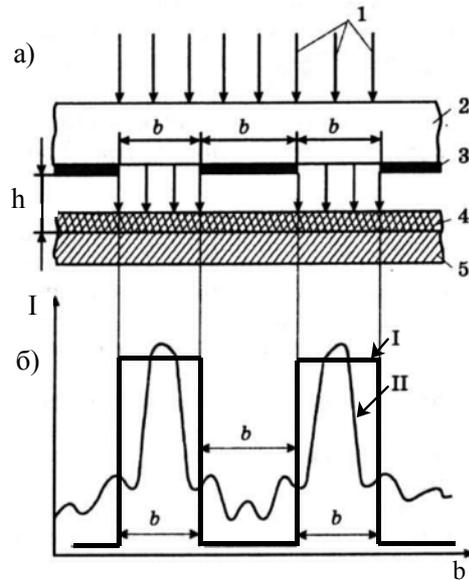


Рис.2.12. Схема переноса изображения при контактной ФЛ (а) и перераспределение интенсивности излучения на поверхности ФР (б): 1 - поток УФ-излучения; 2 - фотошаблон; 3 - рисунок в маскирующем слое ФШ; 4 - слой фоторезиста; 5 - подложка; I, II - зоны идеальной и фактической передачи изображения

$$P \sim \frac{\sqrt{h}}{b}$$

Случай Френеля $|P| \ll 1$ реализуется, когда размеры элементов b достаточно велики и мал зазор h (плотный контакт) или мала. Распределение интенсивности излучения на плоскости подложки будет аналогично рис.2.12.

Переходной случай $|P| \sim 1$. Колебания интенсивности охватывают всю область, соответствующую изображению прозрачного участка, а также наблюдаются и в области непрозрачных участков. В зависимости от величины P в середине дифракционной картины может быть как максимум, так и минимум интенсивности.

Дифракция Фраунгофера реализуется при малых размерах элементов или большом зазоре между ФШ и подложкой $|P| \gg 1$. Этот слу-

чай соответствует проекционной фотолиитографии. Против середины прозрачного участка щели находится основной максимум интенсивности, который тем сильнее размазан, чем уже щель (рис.2.13). Расстояние от центра дифракционной картины до первого минимума растет с уменьшением b . Центральный максимум I при этом расширяется и уменьшается в высоте. При $b = \lambda$ первый максимум уходит в бесконечность.

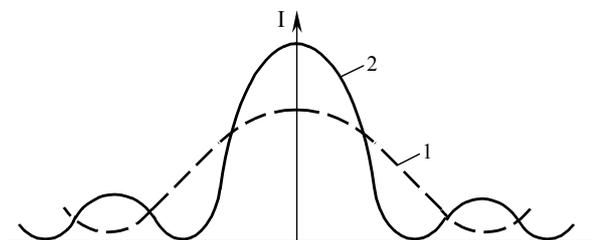


Рис.2.13. Дифракционное перераспределение интенсивности излучения для узкой и широкой щели

Поскольку распределение энергии излучения, падающего на пленку ФР, равно распределению интенсивности излучения, умноженному на время экспонирования, то край изображения на ФР определяется краями дифракционной картины в положении, где энергия экспонирования равна пороговому значению энергии для резиста. Это вызывает изменения размеров элементов изображения на резисте.

Другим фактором, ограничивающим разрешающую способность контактной ФЛ, является расходимость пучка излучения в системе экспонирования и многократное его отражение от поверхностей ФШ и слоя ФР. При наличии зазора h между ФШ и подложкой наблюдается по сравнению с размером на ФШ увеличение светлых (экспонируемых) областей, пропорциональное углу расходимости пучка излучения и равное $2ha$, т.е. $b \geq b_{\min} \left\{ \begin{array}{l} 2h \\ \end{array} \right.$. Уменьшить это изменение можно путем использования специальных конденсорных линз, позволяющих получать параллельный пучок излучения с углом α , близким к нулю.

Другим нежелательным эффектом, связанным с прохождением света через окно в ФШ под углом, отличающимся от прямого по отношению к поверхности слоя ФР, является многократное отражение в системе ФШ-слой ФР. Это вызывает паразитное экспонирование дополни-

тельной области и приводит к изменению размеров элементов. Для уменьшения влияния этого явления на хромовый маскирующий слой наносят специальные оптические низкоотражающие покрытия в виде пленок оксидов хрома. Коэффициент отражения слоя хрома для излучения с $\lambda = 436$ нм равен 0,65-0,75, а для низкоотражающих покрытий он равен 0,05-0,08. Это резко снижает паразитную засветку. Применение в качестве маскирующего слоя фотошаблона на основе оксида железа также повышает разрешающую способность, так как его коэффициент отражения примерно равен 0,25-0,3.

Поскольку слой ФР является прозрачным и оптически однородным и лежит на отражающей поверхности, то при освещении его светом наблюдаются **интерференционные эффекты**. Это вызывает засветку слоя ФР по толщине. Этот эффект зависит от толщины ФР.

Таким образом, учитывая, что при фотолитографии большую роль играют дифракционные и интерференционные явления, для увеличения ее разрешающей способности необходимо, чтобы толщина слоя ФР и длина волны света были минимальны. Кроме того, при контактной ФЛ следует использовать ФШ с маскирующим слоем, обладающим малой отражающей способностью, а зазор между ними и подложками должен быть минимален.

Качество оптического изображения проекционной ФЛ определяется разрешающей способностью объектива, т.е. возможностью объектива разрешать последовательность прозрачных (a) и непрозрачных (b) полос (дифракционную решетку). Дифракционная решетка характеризуется пространственной частотой

$$\frac{1}{a \cdot b}$$

Вследствие дифракционных искажений пространственная модуляция оптического излучения приобретает синусоидальный характер с максимальной I_{\max} и минимальной I_{\min} интенсивностями света (см.рис.2.12). Объектив характеризуется модуляционной передаточной

функцией ($MПФ$), которая определяется как $MПФ = \frac{I_{\max} \cdot I_{\min}}{I_{\max} \cdot I_{\min}}$.

Объектив может передавать изображение до определенной частоты. Максимальная частота решетки, которая может быть передана ко-

герентной передаточной системой, равна $\frac{NA}{\max}$, для некогерентной $\frac{2NA}{\max}$.

Модуляционная передаточная функция для когерентной системы остается равной 1 вплоть до нормированной частоты $\frac{1}{\max}$ 0,5 ($\frac{1}{\max}$ для некогерентной системы), затем МПФ резко падает до 0 (рис.2.14а).

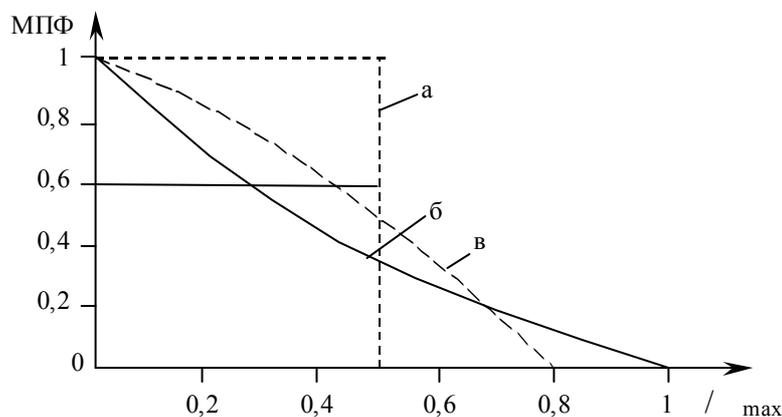


Рис. 2.14. МПФ в зависимости от нормированной частоты решетки: а - когерентная; б - некогерентная; в - частично-когерентная системы

Когерентная оптическая система создает изображение дифракционной решетки в равной степени до тех пор, пока шаг решетки не станет равным максимальной частоте когерентной системы. В этом случае изображение получить нельзя.

Для некогерентной системы МПФ монотонно уменьшается до нуля при нормированной частоте $\frac{1}{\max}$ 1 (рис.2.14 б). Кроме того, она может быть рассчитана по формуле

$$МПФ = \frac{2}{\max} \arccos \left| \frac{1}{\max} \left| \frac{1}{\max} \right| \right|^{1/2}.$$

Для того, чтобы получить в резисте систему равных линий и промежутков шириной 1 мкм, необходимо, чтобы значение $MПФ$ объектива на соответствующей частоте было не менее 0,6. Модуляция в 60 % соответствует $I_{max}=80\%$ и $I_{min}=20\%$ интенсивности света, пропущенного элементами объектива. При $MПФ=0,6$ допускается 20%-ное недоэкспонирование резиста. Из рис.2.14 следует, что с помощью полностью некогерентных систем можно создавать изображение дифракционной решетки с шагом, в два раза меньшим, чем при использовании когерентных систем ($MПФ=0,6$). Однако с увеличением пространственной частоты контраст изображения монотонно уменьшается. По этой причине в оптических экспонирующих устройствах используют частично когерентное освещение (рис.2.14 в). Это позволяет повысить разрешение изображения и одновременно избежать образования “колец изображения”, что обычно имеет место при использовании когерентного освещения. Таким образом, надо сделать выбор между уменьшением минимального размера элемента и повышением резкости изображения.

Кроме $MПФ$ объектива нужно учитывать $MПФ$ самого резиста. При формировании субмикронных размеров объектив с любой $MПФ$ не позволит выйти за пределы того технологического минимума, который определяется $MПФ$ резиста. Ввели понятие критической $MПФ$ резиста ($КМПФ$).

Минимально воспроизводимый размер объектива и резиста определяется следующим условием: $MПФ$ объектива должно быть больше $КМПФ$ резиста.

Большинство резистов имеют $КМПФ$ порядка 0,6 и тогда при $MПФ$ объектива, равной 0,8, можно получить разрешение порядка 1 мкм. Если $MПФ$ объектива равна 0,6, то потребуются высококонтрастные резисты.

2.5. Методы и технология формирования рисунка интегральных микросхем

Для создания геометрического рисунка совмещенных тонкопленочных элементов, образующих многослойную структуру, можно выделить две группы методов: контактные маски и методы свободной маски. В технологии полупроводниковых ИМС используются контактные маски, которые представляют собой применение последовательной селективной и обратной фотолитографии. Метод последовательной ФЛ (прямые маски) представлен на рис.2.15 а. Сначала на подложку 1 наносится тонкопленочный слой из рабочего материала 2, например,

SiO_2 на кремниевую подложку, затем контактной фотолитографией формируется фоторезистивная маска (рис.2.15, 4-7). Через прямую ФР-маску травится слой SiO_2 . Травитель для SiO_2 не должен разрушать и травить фоторезист и подложку (селективный травитель). После травления ФР-маска удаляется.

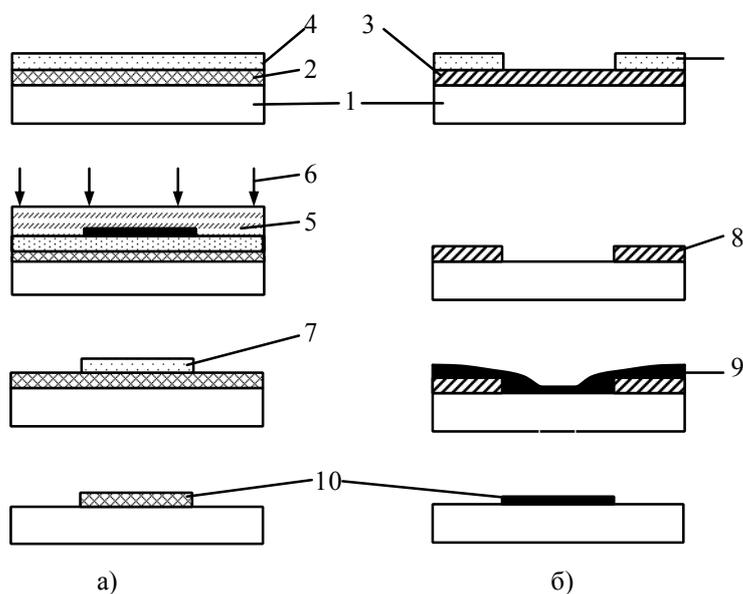


Рис.2.15. Методы последовательной (а) и обратной фотолитографий (б).

1 - подложка; 2 - слой SiO_2 ; 3 - слой меди; 4 - фоторезист;
 5 - фотошаблон; 6 - излучение; 7 - фоторезистивная маска;
 8 - обратная маска в слое меди; 9 - пленка рабочего материала;
 10 - рисунок в рабочем слое.

В обратной ФЛ маска формируется в слое ФР или в пленке из вспомогательного металла, который легко травится, например, из меди (рис.2.15 б). Пленка меди 3 напыляется непосредственно на подложку 1. С помощью фоторезистивного защитного рельефа 4 в нем формируется рисунок 8, негативный (обратный) по отношению к требуемому изображению. Фоторезистивная маска удаляется и на металлическую маску наносится рабочий материал 9. При травлении материала маски

(меди), находящейся под рабочим слоем, последний удаляется с подложки, за исключением мест, где он осажден непосредственно на подложку. За счет этого получается рисунок 10 в рабочем материале. Однако технологический процесс с обратной металлической маской несколько усложняется. Возможен и упрощенный метод обратной ФЛ, при котором на подложку наносится фоторезист и на нем образуется негативный рисунок требуемой конфигурации; далее наносится сплошной слой рабочей пленки, который удаляется с подложки вместе с фоторезистом.

Метод обратной фоторезистивной маски исключает действие сильных травителей на пленку, так как ФР удаляется органическим растворителем. Однако, используя обратную ФР маску, нельзя применять сильный нагрев, так как он приводит к дополнительной полимеризации или разложению фоторезиста. В процессах, в которых имеет место нагрев, следует применять обратную ФЛ с подслоем (рис.2.15 б).

Особенностью фотолитографии для пленочных микросхем является широкий диапазон применяемых материалов и методов их осаждения, что требует более разнообразных способов формирования рисунка, чем в полупроводниковой технологии [5]. В тонкопленочной технологии используются разнообразные методы селективного травления через фоторезистивные и металлические маски, а также обратные маски, если трудно подобрать селективный травитель.

Рассмотрим получение рисунка тонкопленочных резисторов на основе пленок хрома с контактами из меди и никеля. При прямой ФЛ на подложку 1 напыляются три сплошных слоя: хром 2, медь 3 и никель 4 (рис.2.16 а). Нанесенный ФР 7 экспонируют через ФШ: задающий совместный рисунок резистора и контактных площадок. Затем травят одновременно все три слоя на участках, незащищенных ФР (рис.2.16 а, 8). Вторая фотолитография проводится с целью формирования защитного рельефа на контактах, через который удаляют с помощью селективного травителя пленки меди и никеля с самого резистора (рис.2.16, 9-10). В результате получается резистор из пленки хрома с трехслойными контактами хром-медь-никель. Формирование этого же тонкопленочного резистора с применением обратной ФЛ представлено на рис.2.16 б. Рисунок резистора с контактами формируется прямой фотолитографией на пленке хрома 11. Затем наносится ФР 12 и формируется защитный рельеф, на который напыляется сплошным слоем материал контактов 13. При травлении обратной фоторезистивной маски удаляется лежащая на ней пленка и получается резистор и контакты с подслоем хрома 14.

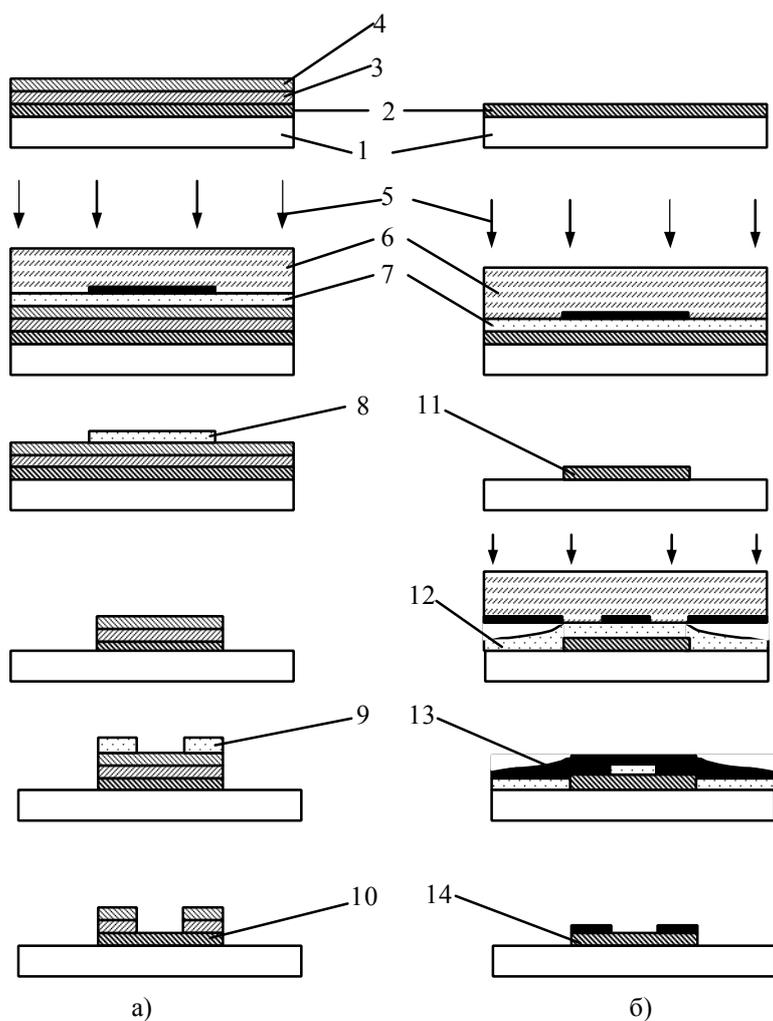


Рис.2.16. Формирование рисунка тонкопленочных резисторов с применением прямой (а) и обратной (б) масок
 1 - подложки; 2 - пленка хрома; 3 - пленка меди; 4 - пленка никеля; 5 - излучение; 6 - фотошаблон; 7,12 - фоторезист; 8,9 - ФР-маски; 10 - резистор из пленки хрома с контактами хром-медь-никель; 11 - рисунок резистора из пленки хрома; 13 - пленка материала контактов; 14 - резистор с контактами.

Достоинством контактных масок является их высокая точность, а недостатком - многократность повторения процессов ФЛ, действие травителей на пленки, что ухудшает их свойства.

Метод свободных масок базируется на использовании специальных металлических трафаретов. К трафарету предъявляют ряд требований, определяемых условиями его эксплуатации. Трафарет используют в качестве маски при напылении пленок методом термического испарения в вакууме. Он устанавливается перед подложкой с некоторым зазором. Напыляемое вещество с испарителя поступает на подложку только через окна в трафарете, которые и образуют рисунок. Поэтому трафарет должен обладать жесткостью и упругостью, чтобы при нагреве в процессе напыления не деформироваться, но при этом быть достаточно тонким для уменьшения эффекта затенения. Этим требованиям удовлетворяют сплавы меди, сталь, молибден, бериллиевая бронза при толщинах фольги 50-125 мкм.

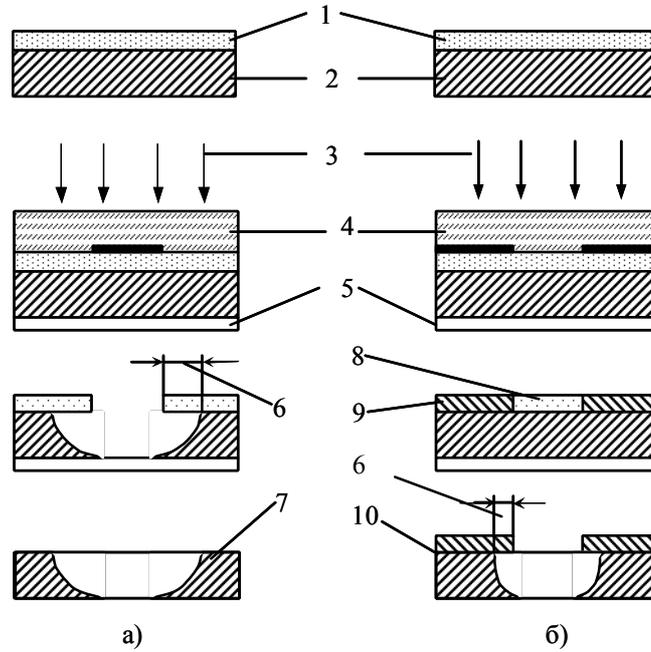
Схема изготовления монометаллического трафарета представлена на рис.2.17 а и включает в себя операции изготовления ФР маски (нанесение ФР1 на фольгу 2, экспонирование 3, проявление). Затем следует операция травления фольги. На операции травления другую сторону пластины защищают лаком 5. Величина подтравливания приблизительно равна глубине травления 6 (рис.2.17 а). Монометаллические трафареты, полученные методом контактной ФЛ, применяют редко из-за сильного растравливания материала фольги и ограниченной точности перенесения рисунка с фотошаблона (до 5-15 мкм).

Для устранения подтравливания применяют биметаллические трафареты, в которых один слой, более толстый (100-150 мкм), служит основой и обеспечивает механическую прочность маски; другой слой относительно тонкий (7-10 мкм), является собственно трафаретом и обеспечивает точное воспроизведение рисунка (биметаллический трафарет).

В качестве основы биметаллического трафарета применяют пластины из бериллиевой бронзы толщиной 0,1-0,15 мм, на которой формируют защитную маску из фоторезиста (рис.2.17 б). Изолирующий рисунок на поверхности пластины соответствует будущим местам отверстий в трафарете. На открытые участки пластины гальваническим способом наращивают слой никеля толщиной до 10 мкм. Затем фоторезистивную маску удаляют и травят пластину на всю глубину, при этом слой никеля выполняет функцию защитной маски. Биметаллические трафареты характеризуются более высокой точностью по сравнению с монометаллическими трафаретами, но отличаются непрочностью на-

висающих слоев никеля и возможностью зарастания щели при напылении материалов.

Рис.2.17. Схема изготовления монометаллического (а) и биметаллического (б) трафаретов
 1 - фоторезист; 2 - фольга; 3 - излучение; 4 - фотошаблон; 5 - лак; 6 - подтрав; 7 - монометаллический трафарет; 8 - ФР-маска -; 9 - слой никеля; 10 - биметаллический трафарет.



3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛЕНОЧНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

3.1. Термическое испарение в вакууме

3.1.1. Вакуумные напылительные установки

Суть метода заключается в нагреве вещества до температуры испарения, его испарении и последующей конденсации в вакууме на подложке. Получение пленок возможно только при низких давлениях в вакуумных установках. Схема установки показана на рис.3.1.

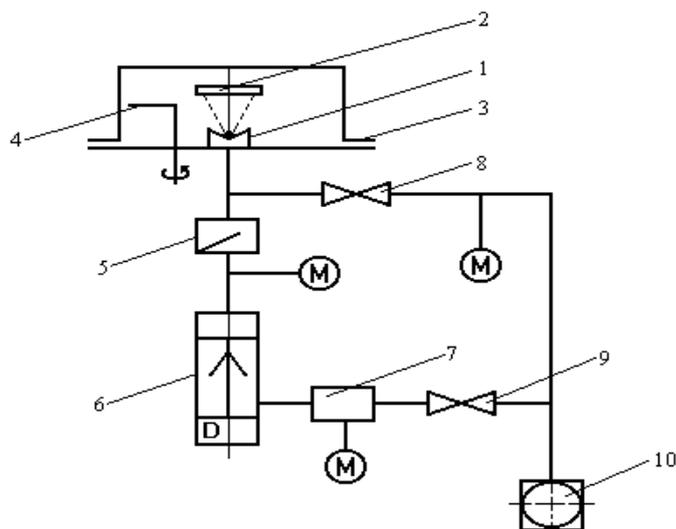


Рис. 3.1. Схема установки вакуумного напыления

1 - испаритель; 2 - подложка; 3 - рабочая камера; 4 - заслонка;
5 - затвор; 6 - высоковакуумный насос; 7 - форбаллон;
8,9 - вакуумные вентили; 10 - форвакуумный насос

В условиях высокого вакуума материал, помещенный в испаритель 1, разогревается и испаряется, в результате чего молекулы вещества движутся к подложке 2, где они конденсируются, образуя пленку. Процесс осуществляется внутри камеры 3, связанной с непрерывно работающей системой откачки воздуха.

Вакуумная система состоит из высоковакуумного паромасляного насоса 6 и механического насоса 10. Подключение насосов к рабочей камере осуществляется с помощью вакуумных вентилей по основной и вспомогательной линиям откачки. Откачка рабочей камеры 3 производится через отверстие в рабочей плите установки. На входе паромасляного насоса 6 устанавливаются маслоотражатель и затвор 5, отделяющий входной патрубок насоса от рабочего объема. По основной линии откачка производится следующим образом: рабочая камера 3 - открытый затвор 5 - насос 6 - форбаллон 7 - открытый вентиль 9 - насос - 10, а по вспомогательной линии: камера 3 - открытый вентиль 8 - насос 10. При этом вентиль 9 должен быть закрыт. С помощью вспомогательной линии откачки в рабочей камере создается давление порядка 10 Па, необходимое для работы высоковакуумного насоса. Затем вентиль 8 закрывают, открывают вентиль 9 и затвор 5 и дальше производят откачку по основной линии, предварительно включив нагреватель паромасляного насоса.

Таким образом, для осуществления процесса термического испарения в вакууме необходимо обеспечить следующие основные условия: достаточно интенсивное испарение материала, направленный молекулярный поток к подложке и конденсацию пара на подложке.

3.1.2. Формирование молекулярного потока

Для формирования молекулярного потока условия в пролетном пространстве между испарителем и подложкой должны быть такими, чтобы молекулы испаренного вещества без столкновений с молекулами остаточных газов достигали подложки. Если столкновения часты, то будет мала скорость осаждения пленок, велико подпыление (рис.3.2 а). Направленное движение молекул вещества к подложке может быть создано за счет достаточно высокого вакуума и путем соответствующей конфигурации испарителей (рис.3.2 б). Для определения условий существования молекулярного потока удобнее характеризовать степень вакуума не давлением остаточных газов p_2 , а средней длиной свобод-

ного пробега молекул

$$\lambda = \frac{kT_2}{p_2 \sqrt{2}},$$

где k — постоянная Больцмана;

T_2 — температура газа;

p_g | давление газа;
 | диаметр молекул испаряемого вещества.

Уже при давлении $p_g = 10^{-2}$ Па средняя длина свободного пробега составляет 50 см, что превышает реальное расстояние h от испарителя до подложки (обычно не более 20 см).

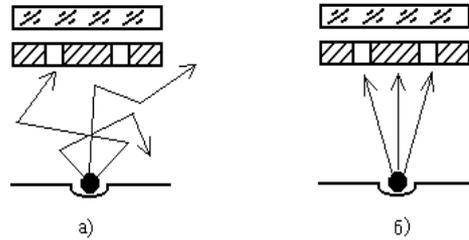


Рис. 3.2. Осаждение пленок в условиях низкого (а) и высокого (б) вакуума

Таким образом, для создания прямолинейных траекторий движения молекул вещества в пространстве между испарителем и подложкой необходимо давление остаточного газа порядка 10^{-2} - 10^{-3} Па.

3.1.3. Испарение вещества

Переход твердых тел или жидкостей в газообразное состояние называется испарением и может быть рассмотрен на основе положений термодинамики и кинетической теории газа. Особое значение имеет условие термодинамического равновесия, при котором два состояния вещества, например, конденсированная фаза (жидкость, твердое вещество) и ее пар, существуют при одной и той же температуре в контакте друг с другом без каких-либо изменений во времени. Это означает, что количество испаренного вещества должно быть равно количеству сконденсированного вещества за все время, пока поддерживается равновесие (состояние насыщения). При этих условиях твердые тела и жидкости характеризуются определенным давлением насыщенных паров p_s , которое зависит только от температуры для данного вещества. На первый взгляд может показаться, что равновесное давление пара не имеет непосредственного отношения к процессу вакуумного

испарения, поскольку последний заключается в переходе вещества из одного состояния в другое. Тем не менее, теория и экспериментальные данные показывают, что скорости испарения не могут превышать некоторого предела, пропорционального равновесному давлению пара. Следовательно, давление p_s над поверхностью твердого или жидкого тела является важной величиной, позволяющей определить способность вещества к испарению и температуры, при которых достижимы необходимые скорости испарения. Из условия равновесия пар-твердое тело, пар-жидкость путем решения уравнений термодинамики получена зависимость давления насыщенного пара от температуры испарения T_u

$$\lg p_s = A + B/T_u, \quad (3.1)$$

где p_s — давление насыщенного пара, Па;

A и B — постоянные, характеризующие природу вещества, приведены в приложении 3 данного учебного пособия.

Таким образом, чем выше температура, тем больше давление насыщенного пара и больше скорость испарения. Температуру вещества, при которой давление насыщенного пара $p_s = 1,33$ Па, называют условной температурой испарения. Для некоторых веществ условная температура испарения ниже температуры плавления, т.е. эти вещества достаточно интенсивно испаряются из твердого состояния (возгонка или сублимация). Данные по давлению паров в широком температурном интервале для разных веществ приведены в [7].

Применение кинетической теории газов для интерпретации явления испарения позволяет создать теорию процесса испарения. Количественные оценки скорости испарения, с которой вещество из конденсированной фазы переходит в газообразную, связаны с именами Герца, Кнудсена, Ленгмюра.

Скорость испарения определяется числом молекул, уходящих из исходного вещества в единицу времени. Число молекул, обладающих скоростями, достаточными для ухода их в паровое пространство, можно определить из максвелловского распределения, которое показывает, какая доля молекул от всего количества молекул обладает скоростями, лежащими между v и $v + dv$. Для компоненты скорости v_x , перпендикулярной к границе раздела, имеем

$$dn = n \sqrt{\frac{m}{2kT_u}} \exp\left[-\frac{mv_x^2}{2kT_u}\right] v_x dv_x, \quad (3.2)$$

где n | число молекул в единице объема исходного вещества, м^3 ;

m | масса молекулы, кг;

k | постоянная Больцмана, Дж/град.;

T_u | температура, до которой нагрето вещество, К.

Скорость испарения будут определять все молекулы, компонента скорости которых, перпендикулярная к границе раздела, превышает некоторую v_{np} . Они покинут поверхность и перейдут в газовую фазу

$$N_u = n \int_{v_{np}} \sqrt{\frac{m}{2kT}} \exp\left[-\frac{mv_x^2}{2kT}\right] v_x dv_x = n \sqrt{\frac{kT_u}{2m}} \exp\left[-\frac{mv_{np}^2}{2kT}\right], \quad (3.3)$$

где N_u | число молекул, испаренных с единицы площади в единицу времени, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$.

При рассмотрении процесса испарения можно воспользоваться условием термодинамического равновесия, при котором количество испаренных из исходного вещества молекул равно количеству вновь сконденсированных молекул из парового пространства. Однако конденсироваться могут молекулы с нулевой скоростью. Тогда после интегрирования выражения (3.3) получим

$$N_k = n_{\text{пара}} \sqrt{\frac{kT_u}{2m}}.$$

Воспользуемся уравнением состояния идеального газа

$$p_s = nkT_s, \quad (3.4)$$

где p_s | давление газа, Па;

n | число молекул газа в единице объема, м^{-3} ;

T_s | температура газа, К.

Для пространства, занятого паром, уравнение (3.4) можно записать

$$p_s V = n_{\text{пара}} kT_u.$$

Отсюда для единичного объема

$$n_{\text{пара}} = \frac{p_s}{kT_u}, \quad (3.5)$$

где T_u — температура, до которой нагрето испаряемое вещество.
С учетом (3.5) количество испарившихся молекул будет

$$N_u = N_k \frac{p_s}{\sqrt{2} m k T_u}. \quad (3.6)$$

Скорость испарения, т.е. количество вещества, покидающее единицу поверхности испарителя в единицу времени, определяется

$$W_u = m N_u = p_s \sqrt{\frac{m}{2 k T_u}}, \text{ кг/м}^2\text{с}. \quad (3.7)$$

3.1.4. Скорость конденсации

Количество вещества, достигающее поверхности подложки, будет зависеть от конфигурации испарителя и подложки. Рассмотрим малую сферу ds_1 , испаряющую вещество с одинаковой скоростью в количестве Q во всех направлениях. Такой испаритель будем называть точечным источником. Для молекулярного потока испарение вещества из точечного источника в телесный угол d в направлении r (рис.3.3) аналогично распространению лучистой энергии и описывается известными оптическими соотношениями. Поток испаренного вещества, приходящийся на единицу телесного угла, есть

$$dQ_1 = \frac{Q}{4}, \quad (3.8)$$

где Q — общее количество вещества, испаренного с испарителя ds_1 за время t , кг.

Величина Q связана со скоростью испарения следующим соотношением

$$Q = W_u ds_1 t. \quad (3.9)$$

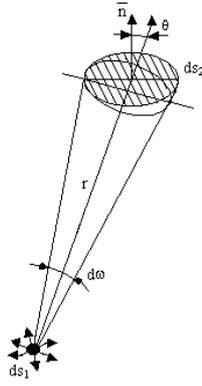


Рис.3.3. Испарение вещества из точечного источника в телесный угол d в направлении r

В пределах пространственного угла d на площадку ds_2 поступает

$$dQ = \frac{Q}{4} d \quad (3.10)$$

Через любое сечение конуса, ограниченного d , проходит один и тот же поток. Сечение конуса сферической поверхностью с центром в ds_1 и радиусом, равным единице, дает меру телесного угла конуса d . Если нормаль \vec{n} к ds_2 составляет угол θ с осью конуса, а расстояние от ds_1 до площадки ds_2 есть r , то

$$d = \frac{ds_2 \cos \theta}{r^2} \quad (3.11)$$

Количество вещества, поступающего на единицу поверхности ds_2 , с учетом (3.10) и (3.11) есть

$$dQ = \frac{Q}{4} \frac{\cos \theta}{r^2}, \quad (3.12)$$

т.е. это количество обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до приемной поверхности и прямо пропорционально косинусу угла, составляемого направлением потока (осью узкого конуса, внутри которого распространяется поток) с нормалью к приемной поверхности.

Рассмотрим маленькую площадку ds_1 , с одной стороны которой испаряется Q вещества (в угол φ). Для поверхностного испарителя количество испаренного вещества зависит от направления испарения. Тогда в соответствии с законом косинуса Ламберта-Кнудсена количество вещества, проходящего в телесном угле $d\omega$ по направлению r , образующему угол d с нормалью к поверхности испарителя (рис.3.4), равно

$$dQ = \frac{Q}{4\pi} \cos d \cdot d\omega. \quad (3.13)$$

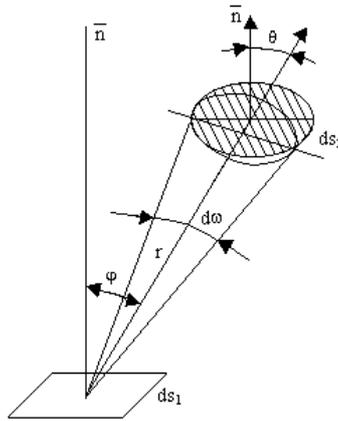


Рис.3.4. Испарение вещества с элементарной площадки

В отличие от точечного источника количество испаренного вещества с поверхностного испарителя пропорционально $\cos d$. Если вещество поступает на площадку ds_2 , наклоненную к направлению пучка паров под углом θ , то количество вещества, осажденного на такую площадку, равно

$$dQ = \frac{Q}{4\pi} \cos d \cdot \cos \theta \frac{ds_2}{r^2}. \quad (3.14)$$

Количество вещества dQ можно определить через его плотность ρ и объем dV , занимаемый конденсатом на подложке

$$dQ = dV ds_2 d, \quad (3.15)$$

где d — толщина пленки, конденсированная в каждой точке подложки за время напыления.

С учетом (3.9), (3.14) и (3.15) толщину пленки можно определить

$$d = \frac{dQ}{ds_2} = \frac{Q}{r^2} \frac{\cos \theta}{\cos \alpha};$$

$$d = \frac{W_u ds_1 t}{4} \frac{\cos \theta}{r^2}. \quad (3.16)$$

Аналогичные рассуждения для точечного испарителя приводят к выражению

$$d = \frac{W_u ds_1 t}{4} \frac{\cos \theta}{r^2}. \quad (3.17)$$

Скорость конденсации определяется как скорость наращивания толщины пленки за единицу времени t , т.е. $W_k = d/t$. Если подложка расположена параллельно поверхности испарителя, то для любой точки подложки (рис.3.5) имеем

$$\cos \theta = \cos \alpha = h/r, \text{ а } r^2 = h^2 (x^2 + y^2).$$

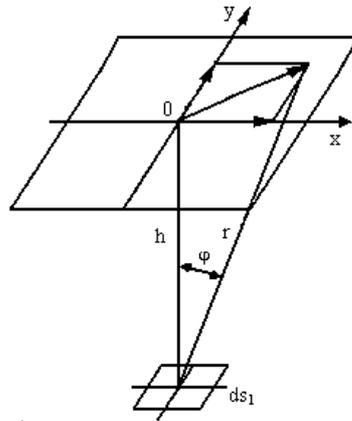


Рис. 3.5. Испарение с малой площадки ds_1 на параллельную ей плоскую поверхность

Тогда для поверхностного испарителя

$$d = \frac{W_u ds_1 t}{h^2 \sqrt{1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}}}. \quad (3.18)$$

Для точечного испарителя

$$d = \frac{W_u ds_1 t}{4 \sqrt{1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}}}. \quad (3.19)$$

Толщина пленки над источником (при $x = 0, y = 0$) для поверхностного испарителя равна

$$d_0 = \frac{W_u ds_1 t}{h^2}. \quad (3.20)$$

Отношение толщины пленки в произвольной точке к толщине пленки в центре подложки будет:

для поверхностного испарителя

$$\frac{d}{d_0} = \frac{h^4}{\left[1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right]^2}; \quad (3.21)$$

для точечного испарителя

$$\frac{d}{d_0} = \frac{h^3}{\left[1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right]^{3/2}}. \quad (3.22)$$

Эти отношения используются для оценки равномерности толщины пленки по подложке.

При выводе уравнений (3.16) и (3.17) предполагалось, что оба испарителя имеют бесконечно малую площадь испарения ds_1 . На практике испарение осуществляют из испарителей с конечными размерами. В этом случае толщина может быть получена интегрированием уравнений (3.16) и (3.17). Расчеты для испарителей в виде диска и тонкого кольца приведены в [7].

3.1.5. Механизм испарения соединений и сплавов

При испарении металлов основным видом частиц в газовой фазе являются одиночные атомы металла. При испарении соединений переход в газообразное состояние обычно сопровождается изменением вида молекулы. Было доказано, что испарение соединений сопровождается диссоциацией, которая сильно влияет на стехиометрическое соотношение составляющих. Это особенно сильно проявляется, если один из продуктов диссоциации является нелетучим. Последний случай соответствует термическому разложению и исключает возможность применения непосредственного испарения. Таким образом, осаждение пленок соединений из одного испарителя возможно только в том случае, если вещество переходит в газообразное состояние в виде неразложившихся молекул или если продукты разложения обладают одинаковой летучестью. Если это условие выполняется, то говорят о согласованном испарении.

Примером испарения без диссоциации является процесс испарения некоторых окислов, таких как SiO , SiO_2 , MgF_2 и др. Стехиометрические пленки монооксида кремния SiO получают при температурах испарения 1200-1250 °С. Окислы Ti , Zr , Nb , Ta , V , Mg и др. испаряются с диссоциацией. Пары этих веществ содержат молекулы двойных окислов, атомы кислорода и молекулы низших окислов. Высшие окислы теряют кислород при температурах, слишком малых для заметной летучести низших окислов. В результате этого в пленках окислов наблюдается недостаток кислорода, что вызывает изменение диэлектрических, оптических и других свойств пленок.

Испарение полупроводниковых соединений CdS , CdSe , CdTe , ZnS , ZnSe и др. сопровождается диссоциацией, приводящей к увеличению содержания легколетучих компонент S , Se , Te в паре и, соответственно, в пленках.

При термическом разложении испарение соединений идет несогласованно, т.е. при температуре испарения летучесть их составляющих отличается столь сильно, что химический состав пара и, следовательно, пленки не совпадает с химическим составом исходного вещества. При испарении GaAs , InSb и других соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ для относительно летучих веществ V группы (As , Sb) давление $p_s = 1,33$ Па достигается при температурах от 700 до 900 °С. В этом диапазоне температур металлы III группы Ga , In , Al находятся в расплавленном состоянии и имеют давление p_s на несколько порядков меньше, чем для элементов V группы. В этом случае пленка на подложке не образуется вовсе или ее состав существенно отличается от состава исходного вещества. Со-

составляющие сплавов испаряются подобно чистым металлам независимо друг от друга и преимущественно в виде отдельных атомов А и В. Однако давление пара составляющей В сплава отличается от давления чистого металла при той же температуре. Это происходит вследствие изменения химического потенциала металла В, когда он растворяется в другом металле А, образуя сплав АВ. Если молярную концентрацию выразить в виде молярной концентрации x_B , то имеем

$$p_B = x_B p_{sB},$$

где p_B — парциальное давление пара компоненты В над расплавом при постоянной температуре испарения;

p_{sB} — давление насыщенного пара чистой компоненты В.

Это выражение является одной из форм записи закона Рауля, который говорит о том, что давление составляющей над раствором уменьшается пропорционально молярной концентрации. Поведение реальных сплавов отличается от растворов, поэтому необходимо ввести поправочный коэффициент, учитывающий активность компоненты А и В в сплаве $p_B = f_B x_B p_{sB}$. Точки p_{sA} и p_{sB} соответствуют давлению паров чистых компонентов А и В (рис.3.6). Понижение давления паров А вследствие растворения в нем компоненты В изобразится прямой p_{sA} — В. Аналогичная зависимость будет для давления паров компоненты В — прямая p_{sB} — А. Общее давление пара p_{AB} , равновесного с расплавом, будет равно

$$p_{AB} = f_A x_A p_{sA} + f_B x_B p_{sB}.$$

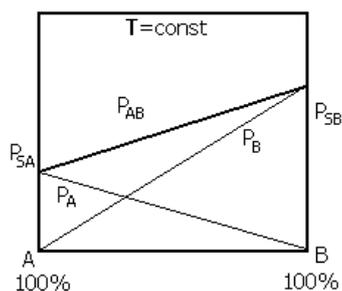


Рис.3.6. Графическое изображение закона Рауля

Коэффициент f зависит от температуры и от природы компонентов сплава и может быть больше 1 и меньше 1. Для идеальных растворов $f = 1$. При $f < 1$ силы взаимодействия между разнородными атомами слабее, чем взаимодействие в чистой фазе, и необходимая для испарения энергия ниже, и наоборот. Если f отличается от 1, то состав паровой фазы будет отличаться от состава вещества, помещенного в испаритель. Это явление называется фракционированием сплава.

Применение закона Рауля для процесса испарения жидких сплавов приводит к тому, что в уравнении Кнудсена появляются коэффициенты активности. Запишем потоки при испарении сплава АВ

$$N_{uA} = \frac{p_{sA} f_A x_A}{\sqrt{2 k T_u m_A}}; \quad N_{uB} = \frac{p_{sB} f_B x_B}{\sqrt{2 k T_u m_B}}.$$

Следовательно, отношение числа частиц А к числу частиц В в потоке пара в любой момент времени будет

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{f_A x_A p_{sA}}{f_B x_B p_{sB}} \frac{M_B}{M_A}^{1/2},$$

где $x_A + x_B = 1$.

Если коэффициенты активности остаются постоянными, то параметры, характеризующие вещество системы, могут быть объединены в один параметр, который называется коэффициентом испарения сплава К:

$$K = \frac{f_A p_{sA}}{f_B p_{sB}} \frac{M_B}{M_A}^{1/2}.$$

Тогда соотношение компонент А и В в паре будет $\frac{N_A}{N_B} = K \frac{x_A}{x_B}$. Если считать, что состав пленки такой же, как и состав пара, то содержание компонент в пленке C_A и C_B можно определить следующим образом:

$$C_A + C_B = 1; \quad K \frac{x_A}{x_B} = \frac{C_A}{C_B} \quad \left| \frac{C_A}{1 - C_A} = K \frac{x_A}{1 - x_A} \right|,$$

отсюда для компоненты А получим

$$C_A = \frac{K x_A}{1 + x_A (K - 1)}.$$

Для компоненты В расчет можно произвести аналогичным образом

$$\frac{C_A}{C_B} = K \frac{x_A}{x_B}, \quad \frac{1}{C_B} = K \frac{1}{x_B}.$$

$$C_B = x_B \left\{ K \frac{1}{x_B} \right\}^{1/1}.$$

При $K=1$ состав источника пара и пленки одинаков. На практике $K \neq 1$ и в ходе испарения материал в тигле обедняется одним из компонентов.

3.1.6. Степень загрязнения пленок при конденсации

Рассмотрим требования, которые предъявляются к вакууму, исходя из условия получения "чистых" пленок во время конденсации. Степень чистоты пленки можно оценить по количеству газа, содержащегося в пленке, а точнее по отношению количества загрязняющих газовых включений к количеству молекул основного вещества.

Источниками загрязнений являются остаточные газы в рабочей камере (H_2O , O_2 , N_2 , H_2 , CO , CO_2), углеводороды (C_2H_4 , C_2H_2 и др.), поток газов из насосов, десорбция газов с нагретых стенок и др. При напылении металлических пленок хемосорбция активных газов приводит к образованию окислов, а физическая адсорбция может изменять структуру и механические свойства пленок. При получении пленок с заданными свойствами устанавливаются допустимые пределы загрязнений.

Степень загрязнения пленок оценивается по отношению потока молекул газа, налетающих на подложку N_2 , к числу испаренных молекул, достигающих единицы площади подложки в единицу времени N_d . Поток молекул газа, налетающих на подложку, можно определить из кинетической теории газов, как

$$N_2 = \frac{p_2}{\sqrt{2} k m_2 T_2},$$

где p_2 | давление остаточных газов в рабочей камере;

k | постоянная Больцмана;

m_2 | масса молекулы газа;

T_2 | температура газа.

Скорость испарения может быть описана подобным выражением

$$N_u = \frac{p_s}{\sqrt{2 k m_u T_u}},$$

где p_s — равновесное давление пара испаренного вещества;

m_u — масса молекулы испаряемого вещества;

T_u — температура испарения.

Со всего испарителя будет испаряться $S_u N_u$ вещества, где S_u — площадь испарителя.

Скорость образования пленки определяется числом атомов пара, достигающих подложки в единицу времени. Используя второй закон Кнудсена, можно записать

для точечного испарителя

$$N_o = \frac{S_u N_u \cos \theta}{4 r^2};$$

для поверхностного испарителя

$$N_o = \frac{S_u N_u}{r^2} \cos \theta \cos \alpha,$$

где θ — угол между нормалью к приемной поверхности (подложке) и направлением испарения r ;

α — угол между нормалью к поверхности испарителя и направлением испарения r ;

r — расстояние от испарителя до точки на подложке, в которой определяется степень загрязнения пленок.

Найдем отношение потока молекул газа, бомбардирующих подложку, к потоку конденсирующихся молекул пара. Для поверхностного испарителя будем иметь

$$\frac{N_z}{N_o} = \frac{p_z}{p_s} \sqrt{\frac{m_u T_u}{m_z T_z}} \frac{r^2}{S_u \cos \theta \cos \alpha}.$$

Подсчитаем для конкретного случая испарения алюминия с испарителя площадью 1 см^2 при $T_u = 1340 \text{ К}$. Остаточным газом считаем азот с $m_z = 28 \text{ г/моль}$ и $T_z = 288 \text{ К}$. Если $p_s = 10 \text{ Па}$, $T_u = 1340 \text{ К}$, $r = 0,1 \text{ м}$, $p_z = 10^{-2} \text{ Па}$, то N_z/N_o будет равно 0,73. При снижении давления газа и увеличении скорости испарения степень загрязнения пленок

уменьшается. Для данного вещества N_2/N_0 можно записать в виде

$$N_2/N_0 = \frac{P_2}{P_s} K, \text{ где } K \text{ — константа, зависящая от положения данной}$$

точки на подложке. Величина N_2/N_0 становится больше к периферии подложки. Для приведенного примера при увеличении r до 0,2 м отношение N_2/N_0 становится равным 2,93, т.е. на каждый атом пара приходится уже три молекулы газа. При рассмотрении вопроса о степени загрязнения пленок необходимо учитывать еще следующие соображения.

Не всякая молекула газа, обладающая сродством к материалу пленки, будет адсорбирована при первом же соударении с поверхностью конденсата. Более того, концентрация хемосорбированных или физически адсорбированных молекул на поверхности растущей пленки возрастает с повышением давления остаточных газов не беспречно, а стремится к насыщению. Вероятность прилипания (захвата) молекул газа при их соударении о поверхность конденсата зависит от энергии связи между газом и данным материалом. Большинство материалов избирательно сорбируют газы.

Требования к степени чистоты пленок диктуются практическими соображениями по обеспечению требуемых свойств пленок. Для получения металлических проводящих пленок с сопротивлением 0,1 Ом/степень загрязнения не должна превышать 1. Сверхпроводящие пленки с очень низким сопротивлением можно получить в установках со сверхвысоким вакуумом, обеспечивающим степень загрязнения N_2/N_0 менее 10^{-3} - 10^{-4} . Очень высокие требования предъявляются к вакууму, особенно к обеспечению низкого уровня химически активных газов, при осаждении полупроводниковых пленок. Задачи обеспечения требуемой чистоты пленок решаются одновременно путем снижения давления газа (сверхвысокий вакуум) и увеличения скорости испарения.

3.1.7. Способы испарения

Существующие испарители можно разделить на две группы: испарители с непосредственным нагревом и испарители с косвенным нагревом.

Испарителями с непосредственным нагревом называются такие испарители, в которых ток пропускается непосредственно через испаряемый материал. Такой метод испарения может быть применен только

для проволочных или ленточных материалов, температура испарения которых ниже температуры плавления. Преимущество метода испарения с непосредственным нагревом заключается в том, что при этом отсутствуют элементы подогревателя, способные загрязнить наносимую тонкую пленку.

При испарении с косвенным нагревом предусматриваются специальные подогреватели, при помощи которых испаряемое вещество нагревается до температуры, соответствующей температуре испарения. Выбор материала подогревателей определяется в основном следующими основными требованиями:

- 1) давление насыщенных паров материала подогревателя должно быть пренебрежимо малым при рабочих температурах испарения;
- 2) испаряемый материал в расплавленном состоянии должен хорошо смачивать материал подогревателя, обеспечивая таким образом хороший тепловой контакт;
- 3) не должно происходить никаких химических реакций между материалом подогревателя и испаряемым металлом, а также не должны образовываться сплавы между этими веществами. Образование сплавов может привести к загрязнению и разрушению подогревателя.

Испарители с косвенным нагревом могут быть проволочные, ленточные и тигельные [2,5]. Испарение металлов с проволочных нагревателей может происходить в телесные углы вплоть до 4° (точечные испарители), в то время как с ленточных оно ограничено телесным углом (поверхностные испарители). Различные конструкции испарителей показаны на рис.3.7.

При небольших количествах испаряемого металла и при условии, что испаряемый металл смачивает материал нагревателя, применяются V-образные, линейные и спиральные испарители (см.рис.3.7 а,б,в). В этих конструкциях испаряемый металл в виде загнутых кусочков проволоки или полосок листового материала насаживается на испаритель. При пропускании тока эти кусочки расплавляются и смачивают испаритель, при этом смачивание и поверхностное натяжение удерживают расплавленный металл на поверхности испарителя. Практика показывает, что испарение металла происходит не из центра образованного расплавленного кусочка, а с прилегающих к нему участков проволоки нагревателя (точки 1 и 2 рис.3.7 а). При хорошем смачивании материала нагревателя испаряемым металлом всегда происходит некоторое взаимодействие между этими веществами. Типичным примером такого взаимодействия является образование сплава при испарении алюминия с вольфрама. Однако, несмотря на некоторую растворимость вольфра-

ма в алюминии, можно подобрать такие условия испарения, при которых эта растворимость не оказывает существенного влияния на процесс испарения.

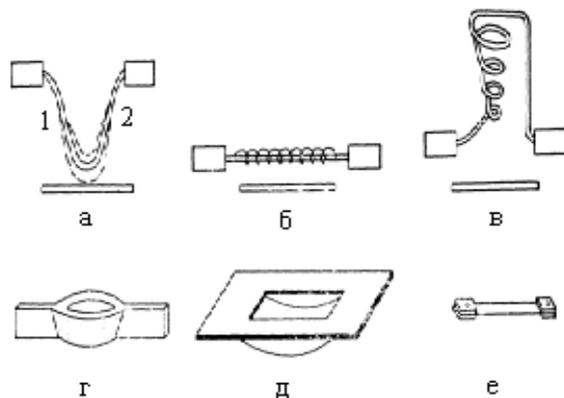


Рис. 3.7. Схемы испарителей. Проволочные: а - V-образный испаритель; б - линейный испаритель; в - спиральный конический испаритель. Ленточные: г - лодочка; д - лента с вдавленным желобом; е - отрезок ленты.

Для испарения больших количеств металла и порошкообразных материалов применяются испарители в виде лодочек или тиглей, подогреваемых электрическим током. Испарители типа "лодочка" изготавливаются из тугоплавких металлов: вольфрама, тантала, молибдена (см.рис.3.7 г,д,е). Вольфрамовые ленты более хрупки и поэтому менее удобны в работе, чем другие ленты из перечисленных материалов.

Для испарения металлов с низкой температурой плавления можно использовать тигли из стекла и кварца, которые окружены спиралью. Для испарения больших количеств металлов с высокой точкой плавления применяются тигли из алунда (Al_2O_3) и окиси бериллия (BeO). Такие тигли могут быть сделаны относительно большой емкости. Тигли из Al_2O_3 успешно используются для испарения металлов, точка плавления которых ниже $1600\text{ }^\circ\text{C}$; тигли из BeO могут быть использованы до температуры $1750\text{ }^\circ\text{C}$.

Тигли из Al_2O_3 применяются для испарения больших количеств Co , Cu , Ge , Mn , Fe , Ni , Ag , Sn . Тигли из BeO используются для испаре-

ния Co, Fe и Si. Для испарения металлов при температуре порядка 2200 °C применяются тигли из окиси тория.

Для еще более высоких температур испарения в качестве материала для испарителей применяется графит. При этом испаряемый металл может быть введен в углубление на непосредственно нагреваемом графитовом стержне или в тигель из графита, подогреваемом при помощи спирали. Следует отметить, что при высоких температурах многие металлы реагируют с углеродом, образуя карбиды, поэтому они не могут быть испарены из графитовых тиглей. К таким металлам относятся алюминий, который реагирует с углеродом с образованием легколетучего карбида алюминия. При испарении кремния из графитового тигля происходит образование карбида кремния, который является нелетучим. Аналогичные явления наблюдаются при испарении титана. Металлы, которые не реагируют с углеродом при высоких температурах (бериллий, серебро, стронций и др.), могут быть успешно испарены из графитовых тиглей.

Для испарения тугоплавких веществ используются электронные испарители, с помощью которых можно разогревать вещества до очень высоких температур, вплоть до 3500 °C [7]. Однако многие химические соединения разлагаются под действием электронной бомбардировки. В результате осажденная пленка имеет химический состав, отличный от исходного вещества. Поэтому электронный нагрев применяют в основном для испарения тугоплавких металлов, элементарных полупроводников и некоторых диэлектриков.

Метод нагрева с помощью электронной бомбардировки при нанесении тонких пленок заключается в том, что испаряемое вещество, которое должно быть нагрето, размещается на электроде с высоким положительным потенциалом или само используется в качестве такого электрода. Нить накала, представляющая собой несколько витков вольфрамовой проволоки, намотана вокруг этого положительно заряженного электрода или размещена вблизи него. Электроны, эмиттируемые накаленной нитью, бомбардируют электрод. В результате этого испаряемое вещество может быть нагрето до очень высоких температур. Несколько возможных конструкций электронных испарителей схематически изображены на рис.3.8.

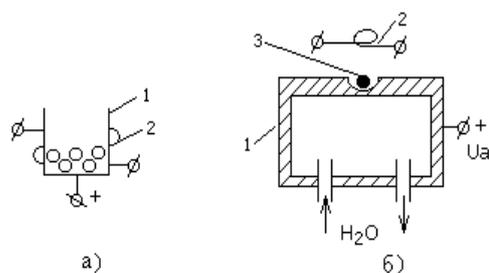


Рис. 3.8. Схемы простых электронных испарителей. 1 - тигель; 2 - термокатод; 3 - испаряемое вещество.

Простые электронные испарители (рис.3.8 а) содержат два электрода: тигель 1 и катод 2. Напряжение между тиглем и катодом равно приблизительно 4000 В, электронный ток 100 мА. Разогрев вещества 3, помещенного в тигель, может происходить до температур порядка 3000 К. Недостатком такого испарителя является взаимодействие расплава с материалом испарителя.

На рис.3.8 б показано устройство, в котором в качестве испарителя используется охлаждаемый водой тигель 1 из меди. На торце этого тигля сделано углубление, в которое помещается испаряемое вещество 3. На катод 2 подается отрицательный относительно заземленного испарителя потенциал 2-4 кВ. Охлаждаемый испаритель предохраняет от сплавления материал тигля с испаряемым веществом.

Это объясняется тем, что во время электронной бомбардировки тигель остается сравнительно холодным и поэтому материал, находящийся в непосредственном контакте с холодной поверхностью, не плавится. Этот тонкий слой нерасплавившегося металла служит "тиглем" для остального материала, и, таким образом, исключается возможность образования сплава. Охлаждаемые тигли успешно использовались для испарения Al, Ni, Ti, Ta, Pt и окиси алюминия. Недостатком таких испарителей является загрязнение термокатада испаряемым веществом, отсюда потеря эмиссионной способности катода и его малый срок службы.

Для разогрева испарителя вместо простой раскаленной нити термокатада можно использовать электронную пушку. На рис.3.9 приведена схема испарителя с магнитной фокусировкой электронного луча.

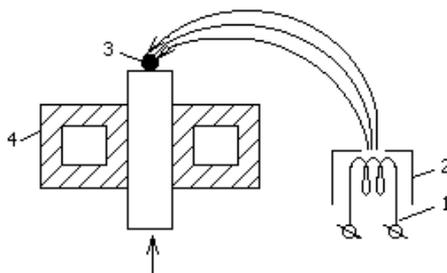


Рис. 3.9. Схема сложного электронного испарителя с магнитной фокусировкой: 1 - термокатод; 2 - анод; 3 - испаряемое вещество; 4 - охлаждаемый держатель.

Электроны эмиттируются термокатодом 1, извлекаются с помощью анода 2. Электроны, попадая в поперечное магнитное поле \vec{B} , фокусируются и направляются на испаряемое вещество 3, которое подается в виде стержня в зону испарения через охлаждаемый водой держатель 4. Полюса магнита и электронная пушка расположены ниже уровня жидкого металла и защищены от попадания паров. Нагрев электронной бомбардировкой в сложных электронных испарителях дает возможность избежать непосредственного контакта тугоплавкого испаряемого вещества с материалом тигля в зоне расплава, что позволяет исключить один из источников загрязнения пленок. Испаритель работает при анодном напряжении $U_a=8-12$ кВ и токе луча 0,2-0,5 А. Размеры фокусного пятна на поверхности металла могут быть сделаны 2×1 мм². При указанных параметрах можно испарять тугоплавкие металлы с большой скоростью.

Недостатком электронных испарителей является их сложность, большие потребляемые мощности и невозможность получения пленок сложных соединений стехиометрического состава.

Для получения пленок соединений и сплавов стехиометрического состава используются специальные методы испарения [7].

Взрывное (дискретное) испарение применяется для осаждения пленок, соединений, сплавов и смесей, составляющие которых имеют разные давления паров. Температура испарителя выбирается такой, чтобы происходило испарение наименее летучего вещества. Испаряемое вещество в виде гранул загружается в бункер 1 и подается за счет вибраций на транспортер 2. С транспортера вещество попадает на разогретый испаритель 3. Поток испаренного вещества поступает на подложку 4 (рис.3.10).

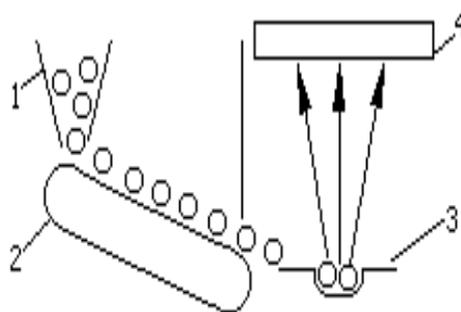


Рис.3.10. Схема взрывного испарения. 1 - бункер; 2 - транспортер; 3 - испаритель; 4 - подложка.

Температура испарителя должна быть такой, чтобы каждая порция испарялась мгновенно и полностью. Весь процесс испарения разбивается на ряд дискретных испарений. Для взрывного испарения очень важным является выбор оптимальной температуры испарения. При температуре испарителя меньше оптимальной взрывное испарение будет происходить точно так же, как обычное термическое испарение с диссоциацией или разложением, а испарение при температуре больше оптимальной будет сопровождаться появлением в молекулярном потоке испаренного вещества очень крупных частиц, попадающих на подложку, что в большинстве случаев недопустимо. Поэтому для реализации взрывного испарения необходимо грамотно выбирать температуру испарения, материал и конструкцию испарителя.

В случае металлов и сплавов непрерывное испарение малых количеств вещества можно производить при подаче проволоки с катушки через направляющую трубку на поверхность нагретого испарителя. Для испарения соединений используются, главным образом, устройства, в которых порошок подается за счет вибрации из бункера.

Метод одновременного испарения из двух испарителей. Испарение двух материалов при различных температурах с последующей их совместной конденсацией на одной и той же подложке исключает проблемы фракционирования и разложения, которые встречаются при непосредственном испарении большинства сплавов и соединений. Возможно также проводить совместное осаждение веществ, которые не образуют ни соединений, ни твердых растворов. Примером являются пленки резисторов из окислов и металлов (керметы).

Целью метода двух испарителей является получение пленок заданного состава. Для выполнения этой задачи необходимо поддерживать разные температуры испарителей T_1 и T_2 , обеспечивающие одинаковое давление насыщенных паров атомов компонент А и В в потоке пара, независимо от их летучести (рис.3.11). Температура подложки (T_3) должна способствовать конденсации пленок на подложке с образованием соединения АВ. Поэтому этот метод получил еще название метод трех температур.

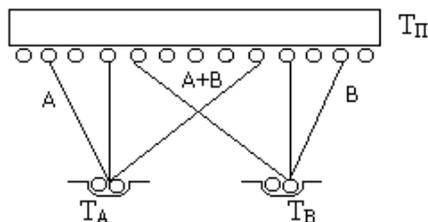


Рис.3.11. Схема одновременного испарения из двух испарителей.

Одной из общих проблем является нахождение такого расположения испарителей, при котором площадь подложки была бы равномерно экспонирована для обоих потоков паров. В соответствии с законами распространения испаренного вещества (см. подраздел 3.1.4) надо определить геометрию источников, их взаимное расположение и расстояния до подложки h , чтобы площадь, на которой образуется пленка заданного состава, была максимальной. С этой целью используют, например, устройство из двух концентрических испарителей. Другим решением является такое наклонное положение испарителей, при котором оба потока будут направлены на подложку под одним и тем же углом. В общем случае влияние угла падения испаренных атомов можно уменьшить за счет увеличения расстояния от испарителя до подложки. Если необходимо получать пленки с меняющимся составом, то это может быть достигнуто удалением испарителей друг от друга.

Состав пленок соединений менее чувствителен к положению испарителей и не требует столь строгого контроля потока пара, как в случае пленок сплавов или пленок типа керметов. Причина этого заключается в том, что состав пленок соединений зависит не только от отношения давлений составляющих, но и от поверхностной реакции образования соединения на подложке при температуре T_3 . Таким образом, испарение соединений из двух испарителей аналогично реактивному испарению, в котором рост пленки определяется температурой

подложки. При испарении компонентов сплавов и керметов выбор температуры подложки диктуется получением плотных пленок с хорошей адгезией, а состав пленок будет зависеть от вышерассмотренных параметров.

3.1.8. Практические рекомендации

Дальнейший выбор конкретного способа испарения определяется особенностями испарения веществ. Большинство металлов испаряется с помощью проволочных или ленточных испарителей [7]. Алюминий испаряется при температуре 1500 К с проволочного испарителя из вольфрама (см.рис.3.7 а). Такой тип испарителя можно отнести к точечному с площадью испарения 0,3-0,6 см². Такие же испарители можно рекомендовать для испарения хрома при температуре 1670 К. Медь можно испарять из проволочных или ленточных испарителей при температуре 1530 К.

Предпочтительным материалом для ленточных испарителей является молибден. Ленточные испарители относятся к поверхностным испарителям с площадью испарения 1-3 см² (см.рис.3.7 г-е). Такой металл, как галлий, имеет низкую температуру плавления (300 К), но достаточно высокую температуру испарения (1400 К), образует сплавы с тугоплавкими металлами, поэтому кадмий испаряют из тигельных испарителей, изготовленных из окиси бериллия BeO или окиси алюминия Al_2O_3 . Золото испаряется из жидкой фазы при температуре 1670 К из проволочных ленточных или тигельных испарителей. Золото в расплаве реагирует с танталом, смачивает вольфрам и молибден. Тигли из молибдена выдерживают всего несколько процессов испарения. Молибден можно испарять из твердой фазы при температуре 2800 К непосредственно из молибденовой фольги с малой скоростью за счет сублимации. Предпочтительным является электронно-лучевое испарение. Трудности испарения никеля связаны с тем, что расплав образует сплавы с тугоплавкими металлами, следовательно, загрузка должна быть ограничена. Лучше применять электронно-лучевое испарение с охлаждаемых тиглей (см.рис.3.8 б). Платина испаряется при температуре 2370 К из вольфрамовых испарителей или тиглей из тугоплавких окислов. Поскольку температура испарения высокая, то предпочтительно электронно-лучевое испарение. Серебро легко испаряется с проволочных или ленточных испарителей из молибдена и тантала, но наиболее долговечны тигли из молибдена. Тугоплавкие металлы тантал, вольфрам, ванадий, цирконий и другие следует испарять

рять с помощью электронно-лучевого испарителя (см.рис.3.9). При этом можно обеспечить большие скорости испарения. При испарении кремния применяются тигли из тугоплавких окислов бериллия и циркония. Однако они разрушаются расплавленным кремнием и пленки загрязняются SiO . Наиболее чистые пленки получаются при электронно-лучевом испарении.

Для испарения Al_2O_3 используется электронный испаритель (см.рис.3.9). Это соединение почти не разлагается при испарении из W и Mo при температурах 2100-2500 К. Аналогично испаряются окислы бора, бериллия, висмута, кальция и др. Испарение окислов индия $|In_2O_3|$ из платиновых тиглей идет с небольшим разложением. В составе пара фиксируются молекулы In, In_2O_3, O_2 . При испарении из Al_2O_3 тиглей при 1300-1700 К молекул In_2O_3 больше, чем молекул In . Окисел сурьмы $|Sb_2O_3|$ при испарении из W переходит в низшие окислы. При использовании нагревателя из Pt разложения нет. Моноксид кремния SiO обычно испаряется при давлении остаточных газов меньших 10^{-3} Па и температурах между 1420-1520 К. Диссоциация на Si и O_2 начинается при температурах более 1520 К и может привести к пленкам с недостатком кислорода. Рекомендуемый тип испарителя - поверхностный, выполненный в виде тигля из Ta или Mo . Окись титана $|TiO_2|$ разлагается на низшие окислы при нагреве до 2300 К. При импульсном нагреве электронным лучом получаются почти стехиометрические пленки. При испарении окиси циркония $|ZrO_2|$ из тантала при 2000 К образуется летучая TaO . При испарении из W образуются пленки с дефицитом кислорода. При нагреве электронным лучом окись циркония также теряет кислород.

Полупроводниковые соединения $CdS, CdSe, CaTe, PbS$ и другие испаряются из лодочек $|Ta, Mo|$ тигельных испарителей (графит, Al_2O_3) с диссоциацией и состав пленок отличается от стехиометрического. При испарении соединения Sb_2Se_3 из Ta -лодочки при 780-880 К наблюдается фракционирование и осаждение пленки с переменным составом. Для получения пленок из сложных соединений стехиометрического состава рекомендуется одновременное испарение из двух испарителей (см.рис.3.11).

Метод взрывного испарения (см.рис.3.10) рекомендуется для получения пленок сплавов $Au | Cd, Ni | Fe, Ni | Cr$ и пленок из смеси порошков металл-диэлектрик $| Cr \{ SiO, Cr \} Si |$. Этим же методом можно получать пленки сложных соединений. При испарении порошка арсенида галлия $| GaAs |$ образуются эпитаксиальные пленки на кристаллах $GaAs$ и Ge . Аналогично получают пленки соединений $GaSb, InP, InAs, InSb$ и др.

3.2. ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

3.2.1. Физика ионного распыления

Ионно-плазменное распыление - это процесс распыления мишени, выполненной из требуемого материала, высокоэнергетическими ионами инертных газов. Распыленные ионами атомы материала мишени, осаждаясь на подложке, формируют пленку материала. Ионно-плазменное распыление можно реализовать путем распыления материала катода в плазме газового разряда ионизированными молекулами разряженного газа (катодное распыление), либо путем распыления мишени в высоком вакууме сформированным пучком ионов (ионное распыление).

Распыление ионной бомбардировкой, как и испарение в вакууме, позволяет получать проводящие, резистивные, диэлектрические, полупроводниковые и магнитные пленки, но, по сравнению с термическим вакуумным напылением, имеет ряд преимуществ.

Катодное распыление основано на явлении разрушения катода при бомбардировке его ионизированными молекулами разряженного газа. Атомы, вылетающие с поверхности катода при его разрушении, распространяются в окружающем пространстве и осаждаются на приемной поверхности, которой является подложка. Схема процесса катодного распыления изображена на рис.3.12. В рабочей камере 1 установлена двухэлектродная система, состоящая из "холодного" катода 2, изготовленного из материала, подвергаемого распылению, и анода 4, на котором располагается подложка 5. Между катодом и анодом расположена заслонка (на рисунке не показана), которая так же, как и при термическом напылении, предназначена для перекрывания потока распыляемого вещества по мере надобности. Из рабочей камеры откачивается воздух, после чего в камеру напускается рабочий газ, давление которого устанавливается равным 1-10 Па.

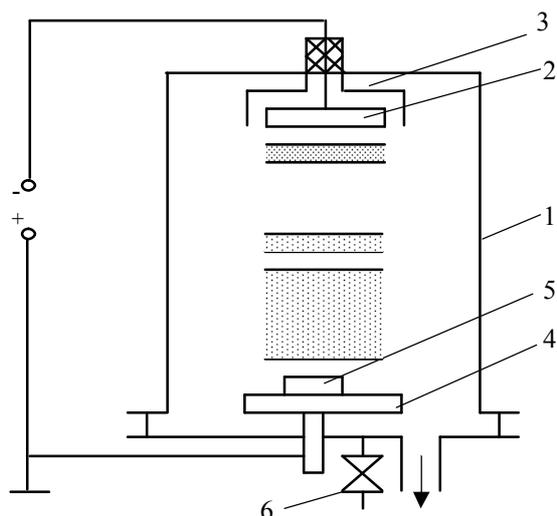


Рис. 3.12. Схема процесса катодного распыления: 1 - рабочая камера; 2 - катод; 3 - экран; 4 - анод; 5 - подложка; 6 - натекатель.

Затем между катодом и анодом подается высокое напряжение, порядка нескольких киловольт, которое вызывает пробой газовой промежутка и поддержание разряда.

Глеющий разряд имеет характерное распределение потенциала между катодом и анодом, изображенное на рис.3.12. Непосредственно у самого катода располагается светящаяся область, называемая катодным свечением. Прилегающая к ней область темного катодного пространства характеризуется наибольшим изменением потенциала. Затем следует область отрицательного свечения, за которой наблюдается темная, с размытыми краями область фарадеева пространства. Примаыкающая к аноду область называется положительным столбом. С точки зрения физики разряда наиболее важной является область темного катодного пространства. Основная часть приложенного напряжения падает на темном катодном пространстве, что объясняется большой разностью концентраций положительных ионов на границах катодного пространства. Толщина области приблизительно равна среднему расстоянию, которое проходят эмитированные катодом электроны до первого ионизирующего столкновения. Из-за большой напряженности

электрического поля в катодном темном пространстве вторичные электроны пересекают его быстро. Однако как только они достигают границы отрицательного свечения и вызывают генерацию большого числа электронно-ионных пар, положительный объемный заряд быстро спадает и начинается нейтральная область, содержащая приблизительно одинаковое число электронов и положительных ионов. Так как ионы экранируются электронами, они движутся в области отрицательного свечения посредством диффузии. Когда же ион достигает границы темного катодного пространства, он быстро устремляется к катоду и бомбардирует его с энергией, равной или меньшей энергии, соответствующей падению напряжения на темном катодном пространстве, в зависимости от того, испытал ли он на пути к катоду столкновения или нет. Удар иона о катод приводит к двум эффектам: к эмиссии нейтральных атомов (катодное распыление материала) и к эмиссии вторичных электронов. Вторичные электроны служат для поддержания разряда. Когда электроны попадают в область отрицательного свечения, они, по существу, обладают энергией, соответствующей полному катодному падению потенциала. Эта энергия затем теряется в серии столкновений, ионизирующих или возбуждающих атомы газа. В конце концов энергия электронов уменьшается настолько, что при последующих столкновениях они уже не могут ионизовать атомы газа. Соответствующий участок разрядного промежутка определяет дальнюю границу отрицательного свечения. Поскольку здесь не происходит ионизации газа, электроны накапливаются в этой области и образуют небольшой пространственный заряд. Энергии электронов недостаточно даже для возбуждения атомов газа, поэтому эта область темная и получила название фарадеево темное пространство. В оставшейся части разряда от края фарадеева темного пространства и до анода имеется слабое электрическое поле - положительный столб. Электроны ускоряются к аноду. Так как существование самостоятельного разряда зависит только от эмиссии достаточного числа электронов с "холодного" катода за счет его бомбардировки положительными ионами, то изменение расположения анода будет слабо влиять на электрические характеристики разряда до тех пор, пока его не придвинуть к краю темного катодного пространства. В этом случае разряд погаснет, так как это расстояние становится меньше длины пробега электронов, необходимой для ионизации газа. Это явление используется на практике для подавления побочных разрядов с нерабочей стороны катода. С этой целью вокруг катода устанавливается экран 3 (см.рис.3.12), находящийся под потенциалом анода и на расстоянии меньше длины темного катодного пространства. Расположение подложки в пространстве меж-

ду катодом и анодом оказывает большое влияние на условия осаждения пленок. Чем больше расстояние от катода до подложки, тем большее число распыленных атомов катода не доходит до подложки вследствие столкновений с молекулами газа, тем меньше скорость осаждения. Однако при приближении подложки к области темного катодного пространства распыление катода начинает замедляться в результате задержки ионов подложкой. Кроме того, на нее будут попадать из области отрицательного свечения электроны с большими энергиями, что неблагоприятно влияет на свойства пленок. Оптимальным является расстояние от подложки до катода, вдвое превышающее ширину темного катодного пространства.

Эффективность ионного распыления характеризуется коэффициентом распыления S , который равен числу атомов, распыляемых под воздействием одного иона

$$S = \frac{N_a}{N_u},$$

где N_a - число выбитых (распыленных) атомов;

N_u - число падающих ионов.

Коэффициент распыления не является обычно целым числом и должен рассматриваться как статистическое среднее.

3.2.2. Модель ионного распыления

Единой теории, объясняющей механизм катодного распыления, пока не существует. Одной из теорий является теория "горячего пятна", которая объясняет распыление термическим испарением локально нагретого участка мишени вследствие бомбардировки ионами. Существуют также различные гипотезы о химическом взаимодействии заряженной частицы с распыляемым веществом и образованием на поверхности мишени летучих соединений.

Наиболее удачно экспериментальные результаты по ионному распылению объясняются с позиций импульсного механизма. Модель ионного распыления по этой теории можно рассмотреть на схеме, представленной на рис.3.13.

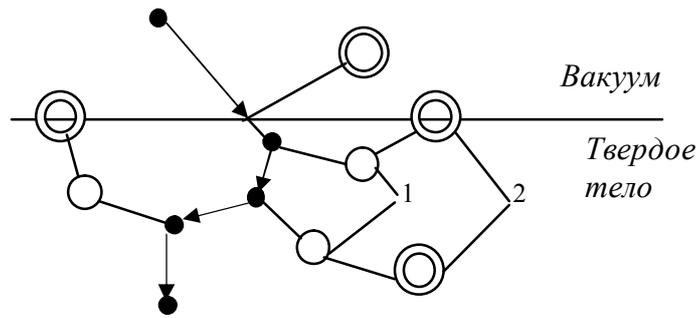


Рис. 3.13. Схема процесса ионного распыления: 1 - первично смещенные атомы; 2 - вторично смещенные атомы.

Движущийся на катод (мишень) ион газа массой M_1 передает свою энергию E атомам решетки в серии последовательных столкновений. Если при столкновении атому мишени массой M_2 передается энергия, превосходящая энергию связи атомов в решетке (энергию смещения) $E_{см}$, он покидает свое равновесное положение, превращаясь в первично смещенный атом. Смещенный атом, в свою очередь, сталкивается с окружающими атомами решетки, производя вторичные смещения, и т.д. Это процесс длится до тех пор, пока энергия атома не уменьшится до уровня, ниже которого передача энергии, большей $E_{см}$, становится невозможной. Затем атомы продолжают сталкиваться, но уже не смещают атомы и замедляются до энергии сублимации $E_{суб}$ и затем принимают участие в тепловом движении атомов решетки.

Максимальная энергия, которую может ион передать атому при лобовом соударении, равна

$$E_{\max} = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} E, \quad (3.23)$$

где M_1 , M_2 - масса иона и атома мишени;
 E - энергия иона.

Смещенный атом характеризуется средней энергией \bar{E} , величина которой зависит от вида взаимодействия. Если смещенный атом получит энергию больше $E_{см}$ и импульс энергии будет направлен в сторону поверхности, то он может покинуть эту поверхность и стать распыленным атомом. Энергию смещения можно оценить, зная энергию сублимации для материала мишени $E_{суб}$. При сублимации происходит удаление атомов с поверхности, где действует только половина связей. Для удаления атома из объема мишени уже необходима энергия $2E_{суб}$. При

столкновениях атом не только выбивается из занимаемого положения, но и внедряется в решетку, смещая другие атомы. Для удаления таких атомов необходима энергия не меньше $4E_{суб}$. Следовательно, процесс выбивания атомов из поверхности и их выброс в вакуум будет иметь место, если смещенные атомы получают энергию более $4E_{суб}$.

Вылет атомов из мишени в вакуум зависит как от энергии, так и от импульса, полученного им от иона или от быстрых смещенных атомов. Действительно, атом, который получил импульс, направленный внутрь мишени, не сможет вылететь из вещества. Если в результате соударения с другими атомами он получит импульс, направленный к поверхности, и сохранит при своем движении к ней достаточную энергию, чтобы преодолеть энергию связи, то такой атом вылетит из вещества. Импульсную теорию ионного распыления подтверждают следующие экспериментальные результаты.

При бомбардировке мишени электронами для распыления была бы необходима намного большая кинетическая энергия (например, 500 кэВ для меди), чем для ионов. Это обусловлено тем, что обмен энергиями между легким электроном и тяжелым атомом мишени весьма неэффективен. Ток вторичных электронов, измеренный при распылении, очень мал. Это говорит о том, что отсутствует нагрев до высоких температур и термоэлектронная эмиссия.

Для поликристаллических и аморфных материалов в диапазоне температур до 600 К значение коэффициента распыления не зависит от температуры мишени. При дальнейшем повышении температуры коэффициент распыления должен уменьшаться, так как сечение смещения атомов материала бомбардирующими ионами уменьшается с ростом температуры. Наблюдаемые в ряде случаев аномальные зависимости от температуры мишени могут быть вызваны удалением загрязнений, структурными превращениями или началом испарения материала.

Зависимости коэффициента распыления от массы бомбардирующих ионов, их энергии, угла падения ионов и кристаллической структуры мишени также объясняются импульсным механизмом распыления.

Энергия распыленных атомов

Вопрос об энергии распыленных атомов имеет большое значение для понимания процессов ионного распыления. Энергия атомов при распылении гораздо больше энергии атомов при испарении. Это подтверждается измерениями скоростей распыленных атомов различными методами. Средняя энергия атомов меди, распыленных ионами криптона с энергией 900 эВ, составляет 5 эВ, что эквивалентно температуре 58000 К, в то время как средняя энергия испаренных атомов при тем-

пературе испарения меди 1500 К составляет 0,2 эВ. При увеличении энергии бомбардирующих ионов увеличивается доля атомов с энергиями в десятки и даже сотни электронвольт. Большие энергии распыленных атомов могут быть объяснены только с позиций импульсного механизма и опровергают термическую теорию распыления.

Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов

На рис.3.14. представлена зависимость коэффициента распыления меди, бомбардируемой ионами аргона с энергией в интервале от 10 до 150000 эВ. Эта форма кривой типична для любого элемента. Эту зависимость можно приблизительно разделить на 5 областей.

Область I отвечает интервалу энергий ионов, слишком малых, чтобы вызвать какое-либо распыление. По-видимому, она простирается до порога распыления. Пороговая энергия $E_{пор}$ представляет собой наименьшую энергию иона, необходимую для удаления с поверхности атома, связанного с решеткой максимально возможным числом связей. Ее можно определить из условия

$$E_{пор} = E_{суб},$$

где α - коэффициент, определяющий максимальную долю энергии, которую ион может передать атому.

Он зависит от соотношения масс иона M_1 и атома M_2

$$\alpha = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2}. \quad (3.24)$$

Для комбинации серебро-ион ртути $\alpha = 0,9$ и $E_{пор} = 3$ эВ при энергии сублимации серебра 2,7 эВ. Если α мало, например, для комбинации алюминий-ион водорода $\alpha = 0,13$, то $E_{пор} = 24,5$ эВ.

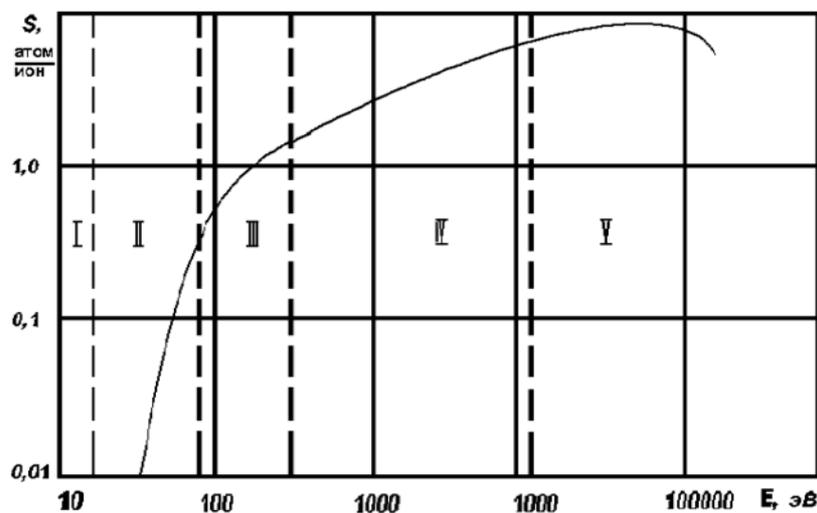


Рис.3.14. Коэффициент распыления поликристаллической меди, бомбардируемой ионами аргона (Ar^+)

В области II распыление уже начинается, однако с очень малой скоростью, и коэффициент распыления быстро возрастает при сравнительно малом увеличении энергии.

В области III с возрастанием энергии ионов коэффициент распыления увеличивается приблизительно линейно, а величина его становится достаточно большой для практического использования ионного распыления при нанесении тонких пленок.

В области IV, представляющей наибольший интерес при изготовлении пленок, коэффициент распыления продолжает увеличиваться с ростом энергии ионов, однако уже медленнее, чем в областях I-III. Снижение скорости роста коэффициента распыления при увеличении энергии ионов можно объяснить тем, что ионы большей энергии глубже проникают в мишень и, следовательно, не все атомы, выбитые со своих мест в решетке бомбардирующим ионом, смогут достичь поверхности и покинуть ее.

В области V имеется широкий максимум, где коэффициент распыления почти не зависит от энергии ионов. Затем кривая идет вниз, так как глубина проникновения ионов становится настолько большой, что коэффициент распыления уменьшается. Для легких ионов, таких как водород или гелий, максимум достигается уже при нескольких тысячах электрон-вольт, поскольку эти легкие ионы довольно свободно прони-

кают вглубь материала. Для тяжелых ионов, таких как ксенон или ртуть, максимум может не достигаться даже при энергиях 50000 эВ или выше. Следовательно, на характер зависимости коэффициента распыления от энергии $S(E)$ существенное значение оказывает отношение масс иона и атома мишени. Поэтому установленные из опытов закономерности действительны лишь в определенных пределах. В интервале энергий 50-400 эВ наблюдается линейный рост коэффициента распыления с увеличением энергии ионов E (область II) $S \propto AE$. Когда $E > 700$ эВ, зависимость примерно можно описать формулой $S \propto B\sqrt{E}$. Последняя зависимость имеет место в диапазоне энергий: $E=0,7-70$ кэВ при $M_1 > M_2$; $E=0,7-5(10)$ кэВ при $M_1 < M_2$; $E=0,7-20$ кэВ при $M_1 = M_2$. Постоянные A и B характеризуют ион и атом вещества.

Влияние угла падения ионов на коэффициент распыления

В условиях тлеющего разряда управлять углом падения ионов на катод или мишень не представляется возможным. В связи с этим зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов начали изучать при помощи пучков ионов. С точки зрения импульсной теории распыления должна существовать зависимость

$$S = S_0 \sec \theta, \quad (3.25)$$

где S - коэффициент распыления для угла падения ионов θ ;

S_0 - то же для $\theta = 0^\circ$.

С ростом угла падения ионов на поверхность распыляемого материала от 0 (отсчет ведется от нормали к поверхности) до $60-70^\circ$ наблюдается увеличение коэффициента распыления материалов.

Зависимость (3.25) легко объяснить, исходя из механизма физического распыления. Коэффициент распыления при нормальном падении ионов прямо пропорционален энергии, рассеиваемой в поверхностном слое материала, в пределах которого упругие столкновения с атомами будут приводить к распылению. При угле падения θ длина пробега ионов, а следовательно, и число столкновений в этом поверхностном слое будут в $1/\cos \theta$ раз больше. Значение угла падения ионов θ_{\max} , при котором наблюдается максимальный коэффициент распыления материала S_{\max} , зависит от энергии ионов. Значение θ_{\max} в зависимости от энергии ионов E можно приблизительно рассчитать по формуле Линдхарда

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{5 a^2 N_0^{2/3} Z_1 Z_2 E_R}{E Z_1^{2/3} Z_2^{2/3}} \right]^{1/2},$$

где a | радиус экранирования ядра орбитальными электронами;

N_0 | атомная плотность распыляемого материала;

Z_1, Z_2 | атомные номера иона и атома мишени;

E_R 13,5 эВ - энергия связи электрона в атоме водорода

Увеличение угла падения от 60-70 до 90 градусов приводит к уменьшению коэффициента распыления до нуля из-за отражения ионов от поверхности материала.

Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов не представляет большого интереса при осаждении тонких пленок, но очень важна при использовании ионно-плазменных процессов для травления микрорельефа.

Распыление монокристаллов

Кристаллическое строение веществ оказывает существенное влияние на взаимодействие ионов или атомов с веществом. Это особенно ярко проявляется при распылении монокристаллов, когда атомы эмитируются вдоль направлений плотноупакованных цепочек атомов и следующих за ними по плотности упаковки. Р.Г.Силсби в 1957г. дал объяснение указанному явлению, открыв геометрические свойства атомных цепочек фокусировать столкновения атомов или, точнее, фокусировать направление импульса, который получает один из атомов цепочки. Налетающие на мишень ионы вызывают цепочки сфокусированных столкновений подобных тем, которые наблюдаются при соударении бильярдного шара с плотноупакованной группой подобных шаров. Схема действия механизма фокусировки показана на рис.3.14.

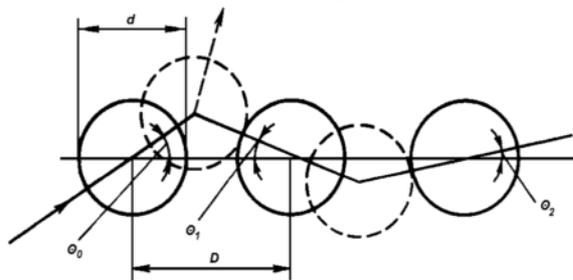


Рис. 3.15. Схема действия механизма фокусировки

Рассматривая механизм взаимодействия частиц как соударение одинаковых твердых сфер диаметром d , расположенных вдоль оси x на расстоянии D друг от друга, для малых значений θ - угла налета частицы, можно записать

$$1 - \cos \theta \frac{D}{d} \leq 1,$$

где θ - угол между осью x и направлением смещения второго атома в цепочке столкновений.

Фокусировка Силсби наблюдается в том случае, когда $\theta < \theta_0$. При этом условии угол θ монотонно убывает по направлению x . В кристалле межатомные расстояния D зависят от направления в решетке, причем величина их минимальна в направлениях плотнейшей упаковки, поэтому в этих направлениях вероятность фокусировки высока и коэффициент распыления также должен быть высоким.

Таким образом, направленная эмиссия вдоль плотноупакованных направлений кристаллов обусловлена геометрическими свойствами цепочки атомов. Анизотропный характер распыления монокристаллов ясно указывает на импульсный механизм ионного распыления, так как при испарении монокристаллов испаряемые атомы имеют угловое распределение, которое описывается законом косинуса, являющимся следствием диффузного отражения молекул атомов от поверхности твердого тела (изотропное распределение).

3.2.3. Теории ионного распыления

Большинство теорий ионного распыления разработано для некоторых, иногда довольно узких, диапазонов энергий ионов или типов соударений. Очень часто они содержат один или несколько параметров, величина которых еще неизвестна. Все это связано с большими трудностями, которые возникают при описании взаимодействия между атомными частицами.

Одну из наиболее плодотворных теорий распыления, хотя и не очень строгую, предложил Пиз. Основные положения этой теории изложены в [6,8]. Столкновения, приводящие к распылению, удобно разделить по их энергии на три категории. Когда энергия иона невелика $E < E_A$, он не может проникнуть сквозь электронную оболочку атома, и столкновения можно рассматривать как соударения абсолютно упругих твердых шаров. При больших энергиях $E > E_B$ бомбардирующий ион свободно проходит сквозь электронную оболочку атома и смещает ядро (неэкранированные кулоновские столкновения). При средних энергиях $E_A < E < E_B$ происходят экранированные кулоновские соударения ядер. Значения предельных энергий определяются

$$E_A = 2E_R \frac{Z_1 Z_2}{Z_1^{2/3} \{ Z_2^{2/3} \}^{1/2}} \left[\frac{M_1 \{ M_2 \}}{M_2} \right], \quad (3.26)$$

где E_R - энергия связи электрона в атоме водорода (энергия Ридберга);
 Z_1, Z_2 - атомные номера иона и атома мишени.

$$E_B = 4E_R^2 \frac{Z_1^2 Z_2^2}{Z_1^{2/3} \{ Z_2^{2/3} \}} \left[\frac{M_1}{M_2 E_{cm}} \right], \quad (3.27)$$

Взаимодействие между атомными частицами описывается с помощью законов квантовой механики. В определенных пределах взаимодействие между двумя атомами можно рассматривать с точки зрения классической механики. Пределы применимости классического приближения, согласно Н.Бору, зависят от соотношения между двумя характеристическими величинами a и b . Н.Бор определил a как радиус экранирования ядра орбитальными электронами

$$a = \frac{0,885 a_0}{(Z_1^{2/3} \{ Z_2^{2/3} \})^{1/2}}, \quad (3.28)$$

где a_0 - первый боровский радиус атома водорода.

Вторая величина представляет собой минимальное расстояние между двумя взаимно сталкивающимися заряженными частицами при лобовом ударе

$$b = \frac{2|Z_1 Z_2| e^2}{0 V^2},$$

где e - заряд электрона;

0 - приведенная масса;

V - относительная скорость частиц.

Приведенная масса равна

$$0 = \frac{M_1 M_2}{M_1 \{ M_2 \}}.$$

Если $b \gg a$, т.е. расстояние наименьшего сближения атомов b при лобовом столкновении значительно больше радиуса a электронного облака атома, происходит упругое столкновение типа столкновений упругих твердых шаров. Это имеет место, когда энергия иона невелика $E < E_A$. При больших энергиях падающего иона $E > E_B$, когда $b \ll a$, соударения будут слабо экранированными (ядерными). Применение того или иного приближения зависит не только от скорости частиц, большое значение имеет также величина угла рассеяния и потенциал взаимодействия между частицами.

Пиз создал теорию, которая охватывает три типа соударений атомов. При описании процесса распыления Пиз принимает, что бомбардирующий ион создает первичный смещенный атом на поверхности. Поперечное сечение такого процесса равно σ_p . Вероятность смещения более чем одного атома вблизи поверхности очень мала. Этот смещенный атом движется, затем внутрь материала и выбивает атомы, некоторые из которых действительно распыляются с поверхности. Так как энергия смещенного атома \bar{E} не очень велика (порядка 100 эВ), то применение модели столкновения твердых шаров оправдано. При замедлении первично смещенного атома до энергии сублимации $E_{суб}$ произойдет n столкновений (рис.3.16).

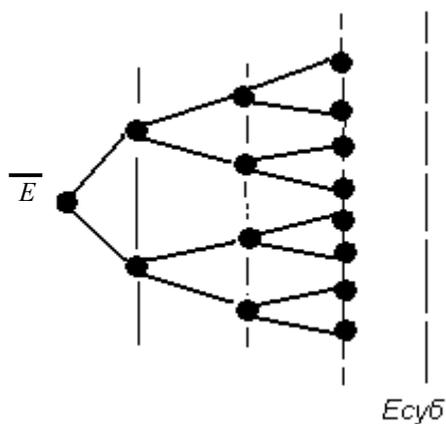


Рис.3.16. Схема замедления первично смещенного атома.

Если уподобить столкновения атомов в твердом теле парным столкновениям хаотически распределенных частиц, то можно записать

$$2^n = \frac{\bar{E}}{E_{суб}},$$

откуда

$$n = \frac{\lg \bar{E} / E_{суб}}{\lg 2}.$$

Теоретически было показано, что смещенные атомы диффундируют к поверхности через $n^{1/2}$ атомных слоев. Значит число атомных слоев, включая поверхностный слой, которые дают вклад в распыление, будет $1 + n^{1/2}$. Плотность каждого атомного слоя можно представить как $N_0^{2/3}$, где N_0 - число атомов в единице объема. Тогда эффективное сечение столкновения в пределах одного слоя будет $\sigma_p N_0^{2/3}$. Согласно импульсной теории распыления полное число атомов, смещенных каждой первичной частицей, составляет $\bar{E} / 2E_{см}$. Кроме того, только половина из смещенных атомов $\frac{1}{2} \frac{\bar{E}}{2E_{см}}$ продиффундирует примерно на то же расстояние, что и первичные частицы, т.е. через $n^{1/2}$ атомных слоев.

С учетом всех составляющих коэффициент распыления в теории Пиза определяется

$$S = \sigma_p N_0^{2/3} \frac{\bar{E}}{4E_{см}} \left\{ 1 + \frac{\lg \bar{E} / E_{суб}}{\lg 2} \right\}^{1/2}, \quad (3.29)$$

где σ_p - поперечное сечение столкновения иона с атомами твердого тела, при котором атому передается энергия, превышающая $E_{см}$;

\bar{E} - средняя энергия смещенных атомов;

$E_{см}$ - энергия смещения;

$E_{суб}$ - энергия сублимации;

N_0 - число атомов в единице объема.

При выводе уравнения (3.29) предполагается нормальное падение ионов на мишень и выполнение условия $E_{max} \gg \bar{E} > 2E_{см}$.

Величины σ_p и \bar{E} зависят от типа соударений. В области неэкранированных кулоновских столкновений, когда $E > E_B$, имеем

$$\sigma_p = 4 a_0^2 Z_1^2 Z_2^2 E_R^2 \left| \frac{E_{см}}{E_{max}} - \frac{M_1}{M_2} \frac{E}{E_{см}} \right|; \quad (3.30)$$

$$\bar{E} = \frac{E_{max} E_{см}}{E_{max} + E_{см}} \ln \frac{E_{max}}{E_{см}}, \quad (3.31)$$

В области экранированных кулоновских столкновений при $E_A < E < E_B$

$$p \quad a^2; \quad (3.32)$$

$$\bar{E} = E_{cm} \frac{E_B}{E} \ln 1 \left\{ \frac{4E^2}{E_A^2} \right\}. \quad (3.33)$$

В области столкновений атомов типа твердых шаров $E < E_A$ общее поперечное сечение столкновения σ_T равно

$$\sigma_T = a^2 \frac{E_A}{2,72E}, \quad (3.34)$$

а

$$p = 1 - \frac{E_{cm}}{E_{max}} \sigma_T, \quad (3.35)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \left(E_{max} + E_{cm} \right) \quad (3.36)$$

Расчет коэффициента распыления по теории Пиза дает наиболее точный результат для области больших энергий $E > E_B$. Расчетные значения коэффициента распыления качественно согласуются с экспериментальными в широком диапазоне энергий ионов и отношений M_1/M_2 . Но теоретически вычисленные значения S оказываются в большинстве случаев в 1,5-3 раза больше экспериментальных.

Наиболее строгая и законченная теория катодного распыления аморфных и поликристаллических материалов разработана Зигмундом [6,8]. Согласно этой теории при бомбардировке мишеней ионами по нормали к поверхности в области энергий $E < E^*$ коэффициент распыления прямо пропорционально зависит от энергии

$$S = \frac{3 M_1 M_2 E}{2 (M_1 + M_2)^2 2E_{суб}}, \quad (3.37)$$

где β - безразмерный параметр, зависящий от отношения M_2/M_1 (рис.3.17).

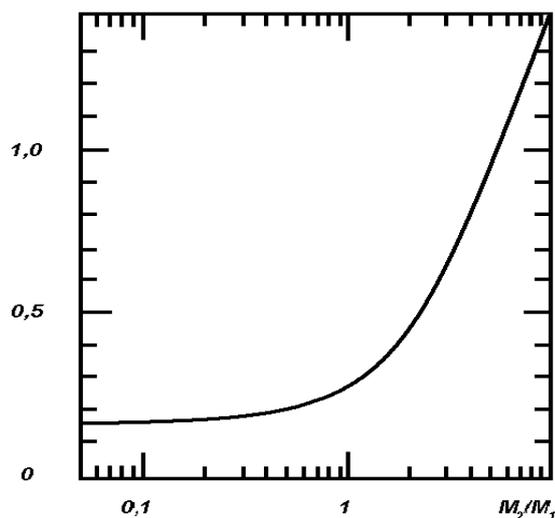


Рис.3.17. Зависимость параметра от отношения массы атома рассеиваемого материала к массе иона

Величина E^* определяется

$$E^* = 515a^2 Z_1 Z_2 \frac{M_1 \{ M_2}{M_2}, \quad (3.38)$$

где a - радиус экранирования ядра орбитальными электронами.

В области энергий $E > E^*$

$$S = 4,2 \cdot 10^{18} \frac{\sigma_{\text{я}}(E)}{2E_{\text{суб}}}. \quad (3.39)$$

Величина $\sigma_{\text{я}}(E)$ представляет собой ядерное тормозное сечение ионов и рассчитывается по формуле

$$\sigma_{\text{я}}(E) = \frac{Z_1 Z_2 e^2 a M_1}{|M_1 \{ M_2|_0} \sigma_{\text{я}}(), \quad (3.40)$$

где e - заряд электрона;

ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\sigma_{\text{я}}()$ - приведенное ядерное тормозное сечение ионов.

Приведенная энергия ионов рассчитывается по формуле

$$\frac{4 M_2 a E}{M_1 \{ M_2 \} Z_1 Z_2 e^2}. \quad (3.41)$$

Значения γ в зависимости от E представлены в табл.3.1.

Таблица 3.1

Значения γ при разных значениях приведенной энергии ионов

	0,002	0,004	0,01	0,02	0,04	0,1	0,2
γ	0,120	0,154	0,211	0,261	0,311	0,372	0,403

	0,4	1,0	2,0	4,0	10	20	40
γ	0,405	0,356	0,291	0,214	0,128	0,0813	0,0493

Экспериментальные и рассчитанные по формулам значения коэффициентов распыления для таких материалов, как Cr, Ge, Mo, Pt, совпадают. Для металлов (Al, Ti, Nb, Ta), которые могут окисляться кислородом остаточной атмосферы даже при низких парциальных давлениях, экспериментальные значения меньше расчетных в 2-3 раза, так как коэффициенты распыления окислов меньше коэффициентов распыления соответствующих металлов.

3.2.4. Скорость осаждения пленок

Для количественной характеристики процесса ионного распыления вводится величина скорости распыления, определяемая коэффициентом распыления S , количеством бомбардирующих ионов N_u и плотностью материала мишени N_o

$$V_p = \frac{N_u S}{N_o}. \quad (3.42)$$

Величина N_u зависит от плотности ионного тока в ионном пучке j , поступающем на мишень (катод)

$$N_u = \frac{j}{q} = \frac{j}{en}, \quad (3.43)$$

где q - заряд иона;

n - кратность заряда иона;

j - плотность ионного тока;

e - заряд электрона

При расчете скорости осаждения пленок на подложке необходимо кроме скорости распыления учитывать расстояние от мишени до подложки и конфигурацию электродов. Для дисковой мишени и круглой подложки, расположенных параллельно друг другу, получена следующая формула для скорости осаждения

$$V_{oc} = V_p \frac{1}{2} \left\{ \frac{r_k^2 + h^2 + r_n^2}{r_k^4 + 2h^2 + r_n^2} \left[r_k^2 + h^2 + r_n^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (3.44)$$

где r_k - радиус мишени (катода);

h - расстояние между мишенью и подложкой;

r_n - радиус подложки;

V_p - скорость распыления.

Зная скорость осаждения, можно определить толщину пленки d , наращиваемую за определенное время в разных точках подложки. Это позволяет оценить равномерность толщины пленки по подложке.

В экспериментальных исследованиях наблюдается уменьшение скорости осаждения пленок, когда давление рабочего газа превышает 1 Па. Это объясняется увеличением вероятности возвращения распыленных атомов на мишень из-за обратной диффузии и обратного рассеяния (отражения) с ростом давления газа. Учет этого явления в расчетах скорости осаждения дается в [9].

3.2.5. Получение пленок ионно-плазменным распылением

Получение чистых пленок полупроводников, металлов, сплавов и соединений реализуется путем распыления соответствующих мишеней в инертном газе, чаще всего в аргоне. Для реализации ионного распыления вакуумная установка предварительно откачивается до высокого вакуума (10^{-2} - 10^{-3}) Па, затем напускается аргон до рабочего давления, при котором можно зажечь разряд. В диодных системах распыления (см.рис.3.12) разряд поддерживается при требуемых параметрах разряда U_p и токе разряда. Ионы аргона, ускоренные катодным падением потенциала, близким к U_p , бомбардируют поверхность катода. Катод выполняется из распыляемого материала или изготавливается специальная мишень. Энергию ионов можно приблизительно считать равной U_p . Разрядный ток определяет количество ионов, падающих на мишень, а, следовательно, и скорость распыления. Ионное распыление рекомендуется для получения пленок тугоплавких металлов вольфрама,

молибдена, тантала, рения, циркония и др. Этот метод широко используется для получения пленок алюминия с добавкой кремния для металлизации в технологии полупроводниковых интегральных схем.

Для осаждения пленок сплавов метод ионного распыления имеет ряд преимуществ перед методом термического испарения. Химический состав напыленных пленок обычно соответствует составу катода-мишени даже в том случае, если компоненты сплава характеризуются различными коэффициентами распыления. Это объясняется тем, что спустя некоторое время после того, как компонент с наибольшей скоростью распыления покинет катод, поверхность катода обогащается другим компонентом до тех пор, пока не установится “стационарный” состав поверхности. По достижении этого состояния напыленная пленка будет иметь тот же состав, что и катод. Иначе обстоит дело при испарении: из-за высокой температуры испарения вещество из внутренних участков быстро диффундирует к поверхности. Если бы при распылении температура катода повысилась настолько, что диффузия из объема стала бы значительной, то напыленные пленки по составу отличались бы от катода.

При распылении сложных соединений не происходит диссоциации, что позволяет получать пленки стехиометрического состава. Этим способом получены пленки таких составов, как InSb , GeSb , Bi_2Te_3 , PbTe и др. с хорошей стехиометрией.

С помощью ионного распыления можно проводить эпитаксиальное наращивание различных металлических и полупроводниковых пленок. При ионном распылении эпитаксиальный рост может происходить при меньших температурах, чем при напылении. Были получены монокристаллические пленки Au , Ag , Fe , Ni , Co и др. на NaCl при комнатной температуре. Венер получил монокристаллические пленки германия на подложке из германия при температуре подложки 300°C .

Достоинством ионного распыления является возможность получения пленок тугоплавких соединений, таких как бориды, оксиды, нитриды и др. Процесс распыления практически не зависит от температуры плавления материала. Однако следует помнить, что если мишень выполнена из изолирующего материала, то производить распыление на постоянном токе невозможно. При отрицательном потенциале на мишени она зарядится положительно и далее на нее поступать ионы не будут. Поэтому прибегают к распылению на высокой частоте.

Преднамеренное введение реакционно-способного газа в распылительную среду с целью изменения или управления свойствами пленок называют реактивным распылением. Этим методом были получены пленки изолирующих и полупроводниковых соединений различных

металлов. Это достигалось путем введения в распылительную среду кислорода или использования чистого кислорода. Кроме того были получены нитриды, карбиды и сульфиды с помощью соответственно азота, метана или окиси углерода и сернистого водорода. Для осаждения диэлектриков чаще всего используют смесь инертного газа с относительно небольшой добавкой активного газа. В зависимости от давления активного газа реакция образования соединения может протекать либо на катоде (мишени) и тогда к подложке переносится готовое соединение, либо на подложке в процессе образования пленки. При низких давлениях более вероятен второй из указанных механизмов, при высоких - первый. Считается также, что реакция может протекать и в паровой фазе между атомами распыляемого материала и атомами газа, но такой процесс маловероятен.

Метод реактивного распыления - один из важнейших в тонкопленочной технологии, позволяющий управляемо изменять свойства пленок. Это можно продемонстрировать на примере распыления тантала в различных средах с добавлением активных газов. На рис.3.18 показана зависимость удельного сопротивления получаемых пленок от парциального давления активных газов. Наименьшее из показанных парциальных давлений 10^{-4} Па соответствует остаточному давлению перед напуском рабочего газа, состоящего из смеси аргона и активного газа. Суммарное давление смеси газов составляет 1 Па. По мере повышения давления азота сопротивление растет вследствие захвата пленкой азота с образованием соединения Ta_2N . При дальнейшем увеличении давления азота состав пленок изменяется, пока не образуется фаза, приписываемая TaN . По мере увеличения парциального давления кислорода до относительно высокого уровня пленка по составу приближается к окиси тантала и удельное сопротивление ее быстро увеличивается. При введении окиси углерода образуются пленки карбида тантала с переменным сопротивлением. Таким образом на основе пленок тантала можно изготовить тонкопленочную интегральную схему с проводниками из тантала, резисторами из нитрида тантала и конденсаторами тантал-окисел тантала-золото.

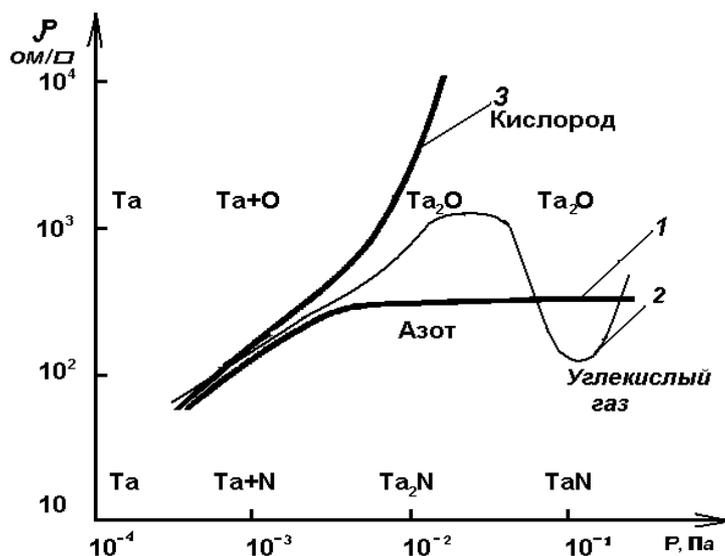


Рис.3.18. Зависимость удельного сопротивления пленок тантала от парциального давления активных газов: 1 - азот; 2 - углекислый газ; 3 - кислород.

Ионное распыление является достаточно технологичным методом для получения пленок Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiO_2 путем реактивного или высокочастотного распыления.

Магнитные пленки, служащие носителем информации, такие, как Fe-Ni, с точным содержанием компонент получают как термическим испарением в высоком вакууме, так и в чистых условиях ионным распылением. В первом случае борьба ведется с нестехиометричностью полученной пленки, во втором случае - с процессами окисления осаждаемого слоя.

Распыление с разделением камеры формирования разряда и камеры осаждения пленок служит для получения чистых пленок для нужд микроэлектроники.

Различные способы ионного и ионно-плазменного осаждения тонких пленок приведены в [8].

4. ЭЛЕМЕНТЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ

МИКРОСХЕМ

4.1 Подложки пленочных ИМС

4.1.1. Материалы подложек

Подложки в технологии изготовления пленочных и гибридных ИМС играют очень важную роль. Подложки являются основанием для группового формирования на них ИМС, главным элементом конструкции ИМС, выполняющим роль механической опоры, обеспечивают теплоотвод и электрическую изоляцию элементов.

Подложка предназначена для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных ИМС, межэлементных и межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.

Материал, геометрические размеры и состояние поверхности подложек во многом определяют качество формируемых элементов и надежность функционирования ИМС и микросборок. Различные способы формирования пленочных элементов, монтажа и сборки, а также многообразие выполняемых гибридными ИМС функций диктуют разнообразные и даже противоречивые требования к подложкам. В настоящее время нет такого материала для подложек, который в одинаковой мере удовлетворял бы этим разнообразным требованиям. Для изготовления подложек в основном используют стекло, керамику, ситалл.

Стекло. Для подложек используют боросиликатные и алюмосиликатные стекла. Путем листового проката этих стекол получают достаточно гладкую поверхность, не прибегая к полированию.

Применение щелочных стекол, содержащих окислы Na_2O , CaO , ограничено нестабильностью их свойств, поскольку при нагреве в электрическом поле наблюдается интенсивное выщелачивание. К недостаткам подложек из стекла следует отнести малую теплопроводность, что не позволяет применять их при повышенном нагреве. При интенсивном нагреве предпочтительнее кварц и кварцевое стекло. Подложки из стекла имеют аморфную структуру.

Керамика. Исходными материалами являются порошкообразные окислы. Смесь окислов отжигают при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ и измельчают до однородного размера зерна. Добавляют около 2 % связующего вещества, а затем прессуют или делают в виде ленты, пропуская под режущим инструментом. Ленту высушивают на воздухе для удаления растворителя. Затем из ленты вырезают подложки желаемой формы. Можно сделать отверстия или направляющие кромки. Вырезанные подложки спекают при $1500\text{-}1700\text{ }^\circ\text{C}$.

Керамики изготавливаются с различным содержанием окислов: алюминевая керамика - Al_2O_3 от 96 % до 99,9 %; бериллиевая керамика BeO - 99,5 %. Чем меньше в керамике содержится связующего вещества, тем прочнее керамика. Прочность связующего вещества значительно ниже прочности Al_2O_3 или BeO , поэтому полученное спеканием изделие при больших нагрузках разрушается по связующему веществу. Увеличение содержания Al_2O_3 в керамике значительно улучшает ее свойства, а именно, увеличиваются **механическая прочность, теплопроводность**, улучшаются **электрические** свойства.

После спекания керамика имеет шероховатую поверхность. Эту поверхность улучшают шлифовкой и полировкой, но это дорого. Для улучшения поверхности керамику покрывают стеклянной глазурью и еще раз отжигают. Керамические подложки имеют **поликристаллическую** структуру.

Синтетический сапфир - это монокристаллическая окись алюминия. Прокаленный порошок алюмоаммониевых квасцов расплавляют в кислородно-водородном пламени и выращивают монокристаллическую булю, которую разрезают на пластины и полируют.

Ситаллы - стеклокристаллический материал. Ситалл отличается от стекла наличием микрокристаллической фазы, занимающей от 50 до 95 % всего объема. Это резко повышает механическую прочность ситалла и улучшает его электрические свойства. Искусственную кристаллизацию стекла для получения ситалла производят путем введения в шихту катализаторов, способных образовывать зародыши кристаллизации. Если это происходит при фотохимическом процессе, то полученный материал называют фотоситаллом. Например, если в шихту ввести ионы Ag и облучить светом, то серебро восстанавливается до металла, и получаем большое число зародышей кристаллизации, равномерно распределенных во всем объеме. Для изготовления подложек чаще всего используется марка СТ50-1.

Геометрические размеры подложек стандартизированы. Подложки из стекла имеют размеры 50x50, 48x60, 60x96, 100x100 и 96x120 мм, из керамики и ситалла 48x60, 60x96 и 96x120, из сапфира - 24x30 мм. Толщина составляет 0,6-1 мм. Деление подложек с ИМС на части, кратные двум и трем, дает нормализованный ряд типоразмеров плат.

В последнее время для изготовления гибридных БИС и микросборок применяют гибкие подложки из полимерных материалов. Наибольшее распространение получили полиимидные пленки толщиной 40-50 мкм, которые допускают двустороннюю обработку и вакуумное нанесение тонких пленок для создания двухслойной разводки, а также травления отверстий для создания металлизированных переходов меж-

ду слоями. Основными преимуществами гибких подложек являются способность изгибаться и свертываться в трех плоскостях, принимать форму корпуса сложной конструкции, а также малые толщины и масса, ударопрочность.

Наиболее перспективными для гибридных БИС и микросборок являются металлические подложки (платы), поверхность которых покрывают относительно тонким (40-60 мкм) слоем диэлектрика. Для этих целей используют алюминиевые пластины с анодированной поверхностью, стальные пластины, покрытые стеклом или полиимидным лаком, и др. Металлические подложки существенно улучшают теплоотвод от компонентов, обеспечивают необходимую жесткость конструкции гибридных ИМС и микросборок.

4.1.2. Свойства подложечных материалов

Шероховатость поверхности. Состояние поверхности подложки оказывает существенное влияние на структуру наносимых пленок и параметры пленочных элементов. Большая шероховатость поверхности подложки, наличие на ней микронеровностей уменьшают толщину пленок, вызывают локальное изменение электрофизических свойств пленок и тем самым снижают воспроизводимость параметров пленочных элементов и их надежность. Поэтому подложки для тонкопленочных ИМС должны иметь минимальную шероховатость, быть без пор и трещин. Так, при нанесении тонких пленок толщиной до 100 нм допустимая высота микронеровностей не должна превышать 25 нм, что соответствует 14-му классу чистоты поверхности подложек.

Толстые пленки наносят толщиной до 50 мкм, поэтому подложки для толстопленочных ИМС могут иметь микронеровности до 2 мкм, что соответствует восьмому классу чистоты (не хуже).

Шероховатость поверхности подложек зависит от материала подложек и способов их обработки (табл.4.1).

Таблица 4.1

Шероховатость подложек

Материал подложки	Стекла, сапфир	Глазурованные и поли-	Свежеотожженная кера-	Керамика 96 % Al_2O_3
-------------------	----------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------

		рованные керамики, ситалл	мика 99,5 % Al_2O_3	
Высота неровностей, мкм	0,025	0,05	1	1,5
Класс чистоты	14	13-14	10	9

Для стекол наблюдаются случайные неровности, обусловленные нерегулярностями вытягивания. Они малы. Такой же характер носит поверхность глазурированной керамики и полированного сапфира. Высота неровностей для мелкозернистой керамики (96 % Al_2O_3) составляет 1,5 мкм и на длине 20 мкм - два пика, а для керамики 99,5 % Al_2O_3 амплитуда пиков меньше (1 мкм), но на той же длине умещается уже три пика. Керамику можно полировать и, если размеры зерен малы, обработанная поверхность может быть столь же гладкой, как поверхность стекла. Однако это сильно увеличивает стоимость подложек.

Плоскостность необходима для качественной работы установок совмещения. На четкость линий в фотолитографии особенно влияет волнистость поверхности. Если при экспонировании поверхность фоторезиста не приведена в совершенный контакт с фотошаблоном, то свет будет попадать на периферию непрозрачных участков, и четкость будет ухудшаться. И керамикам, и стеклам присуща волнистость поверхности, причем для керамик положение еще больше осложняется из-за искривления в процессе отжига, а также при операции глазурирования.

Для подложек с большим радиусом кривизны R допустимы отклонения от плоскостности 50 мкм/см, при малом R недопустимы отклонения даже 10 мкм/см. Характерные отклонения от плоскостности для различных материалов подложек представлены в табл.4.2.

Таблица 4.2

Отклонения от плоскостности

Материал подложки	Полированные поверхности	Стекло	Керамики, ситалл
Отклонения, мкм/см	<1	40	50

Теплопроводность. Материал подложки должен обладать хорошей теплопроводностью, что позволяет избежать возникновения в микросхеме местного перегрева, вызывающего изменение характеристик или даже разрушения пленок. Подложка, изготовленная из материала с высокой теплопроводностью, обеспечивает выравнивание температурного градиента по всей поверхности, а также отвод тепла от микросхем. Стекла имеют очень малую теплопроводность. Из подложечных материалов высокой теплопроводностью обладает керамика на основе бериллия. Теплопроводность подложечных материалов представлена в табл.4.3. Теплопроводность меди взята за единицу.

Таблица 4.3

Теплопроводность материалов

Материал подложки	Стекла, ситалл	Керамика на основе Al_2O_3	Керамика на основе BeO	Медь
Теплопроводность, отн.ед.	0,002-0,005	0,05	0,2	1

Термическое расширение характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Коэффициент термического расширения типичных подложечных материалов меньше, чем у металлов. Кроме того, обычно применяют многослойные металлические композиции, поэтому при подгонке ТКЛР пленки и подложки приходится искать некоторое компромиссное решение (табл.4.4).

Таблица 4.4

ТКЛР пленок и подложек

Материал подложки	Al	Cu, Au	Ta	Стекла, ситалл	Керамики	Кварц (SiO_2)
ТКЛР, 10^{-6} град $^{-1}$	20	14	6,5	4,1-5	6	0,56

Механическая прочность приобретает важное значение, когда подложки надо сделать тонкими, так как это экономит материал и уменьшает вес ИМС. Обычно толщина подложек составляет десятые доли миллиметра. Толщина подложек из ситалла составляет 0,3-0,5 мм.

Термическая стойкость. В отношении термической стойкости материалы располагаются в том же порядке, что и в отношении температуры размягчения или плавления (табл.4.5).

Таблица 4.5

Температура размягчения материалов

Материал	Керамика 99,9 % Al_2O_3 сапфир	96 % Al_2O_3 98 % BeO	Кварц	Стекла, ситалл
$T_{\text{размягч.}}, ^\circ C$	2040	1600	1580	620-750

Химическая стойкость существенна на всех стадиях обработки подложек. Почти все стекла содержат силикатные компоненты (SiO_2), окислы щелочноземельных металлов Na_2O , CaO и др. Поэтому поверхность этих подложек может ухудшаться при длительном воздействии влажной среды из-за выветривания, связанного с большим содержанием Na_2O .

Все стекла из-за наличия SiO_2 подвержены действию плавиковой кислоты, используемой для травления тугоплавких металлов. Кроме того, может наблюдаться взаимодействие окислов щелочных металлов с пленками, приводящее к ухудшению свойств пленок. Отсюда следует, что из стекол в качестве подложек следует использовать бесщелочные стекла, например, алюмоборосиликатные стекла (С48-3, С41-1).

Наиболее химически стойки полированные керамические подложки на основе Al_2O_3 , BeO и сапфир.

Электропроводность. Считают, что все стекла и керамики, используемые в качестве подложечных материалов, являются хорошими изоляторами.

Стоимость. Если принять за единицу стоимости подложечного материала стоимость неглазурованной керамики с содержанием 99,5 % Al_2O_3 , то стоимость стекол составит 0,04-0,65, керамики на основе BeO - 4, сапфира - 400.

4.1.3. Очистка подложек

Пленки должны иметь прочную связь (адгезию) с подложкой. Эта связь не должна ухудшаться со временем или под воздействием элек-

трического поля. Хорошая адгезия обеспечивается для таких материалов пленок, которые образуют переходной окисный слой с материалом подложки. Переходной слой обеспечивает отличную химическую связь с подложкой. Пленки алюминия и хрома имеют большое сродство к стеклянному и керамическим подложкам и образуют переходной слой. Пленки золота обладают плохой адгезией. Поэтому улучшить адгезию пленок из золота можно с помощью подслоя хрома или алюминия, а между хромом и золотом возникает прочная металлическая связь.

Загрязнение на подложке, имеющее толщину всего в несколько атомных слоев, может воспрепятствовать хорошему сцеплению, т.е. образованию хорошего окисного слоя и сильно ослабить адгезию. Даже мельчайшие посторонние частицы по своим размерам соизмеримы с толщиной пленки и поэтому оказывают существенное влияние на качество пленки. Загрязнения могут химически взаимодействовать с материалом пленки. Кроме того, известно, что на чистой и загрязненной подложках получают пленки различной структуры.

Поэтому при изготовлении тонкопленочных ИМС одним из важнейших условий обеспечения качества является **чистота подложки**.

Удаление жиров. Подложка имеет загрязнения, обусловленные операциями изготовления, контактом с человеком, пылью из воздуха и др. Для удаления жиров используют химическую очистку. Хорошие результаты при отмывке стеклянных подложек дает химическое травление их в едком натре или в едком кали с последующей обработкой в концентрированной хромовой смеси (хромпике), состоящей из раствора $K_2Cr_2O_7$ в концентрированной серной кислоте. Более интенсивная очистка получается при обработке стеклянных подложек в кипящем растворе хромпика. Кислотные травители, взаимодействуя с загрязнениями, например, со смазками или с некоторыми окислами, превращают их в более растворимые соединения, щелочные же травители омыливают жиры и снижают их поверхностное натяжение.

Для заключительных промывок используют дистиллированную или деионизованную воду и изопропиловый спирт.

Кислотные травители воздействуют на поверхность подложки, поэтому в растворах кислот опасно обрабатывать керамику, ситалл и др. Такая обработка приводит к протравливанию поверхности с углублением рельефа, т.е. увеличивают шероховатость. Поэтому применяют для удаления жировых загрязнений органические растворители. Минеральные масла растворяются в углеводородах (трихлорэтилен, четыреххлористый углерод и др.), а растительные масла - в спирте (изопропиловый спирт).

Чаще всего используется следующая технология промывки подложек из стекла, керамики, ситалла. Для обезжиривания подложек используется состав: перекись водорода (H_2O_2), аммиак (NH_4OH) и вода. Подложки кипятятся в этом нейтральном растворе. Затем следует многократная промывка в дистиллированной воде.

Процесс растворения жировой пленки может быть ускорен наложением ультразвуковых колебаний.

Следует отметить, что чаще используется комбинация различных способов промывок, т.к. один способ не всегда обеспечивает удовлетворительные результаты.

Сушка подложек осуществляется с помощью сжатого очищенного воздуха или в печи при продувке очищенным Ar или N_2 .

Для **контроля степени очистки** подложек используются качественные и количественные методы контроля. Качественный контроль осуществляется по "черному блику", а количественный - по методу капли, царапины или путем контроля электропроводности деионизованной воды.

Свежеочищенная поверхность подложки обладает большим уровнем свободной энергии, что приводит к быстрому повторному загрязнению пылью и влагой из атмосферы, поэтому очень важно правильное хранение подложек между операциями. Оно должно быть не более суток. Даже чистая подложка, помещенная в вакуум, быстро сорбирует газы. Поэтому перед осаждением пленок подложка прогревается или подвергается очистке с помощью ионной бомбардировки.

4.2. Тонкопленочные резисторы

4.2.1. Выбор материалов

Основными элементами тонкопленочных микросхем являются подложка и система пассивных элементов, включающая резисторы, конденсаторы, индуктивности, проводники и контактные площадки.

Проблема создания тонкопленочных резисторов связана с технологическими вопросами получения следующих характеристик пленки резистивного материала:

- удельного сопротивления пленки, его воспроизводимости и стабильности во времени;
- удельной рассеиваемой мощности пленки;
- температурного коэффициента сопротивления (ТКС);
- эксплуатационных характеристик (спектра и уровня шумов и др.).

С учетом возможности получения данных характеристик резистивной пленки могут быть рассчитаны электрические параметры и конструкция

резисторов. Взаимосвязь конструктивных и технологических параметров резисторов устанавливается основным уравнением для их расчета

$$R = \frac{\rho_v l}{b d},$$

где R — сопротивление резистора, Ом;

ρ_v — удельное объемное сопротивление материала резистивной пленки, Ом м;

l, b, d — соответственно длина, ширина и толщина резистора (рис.4.1).

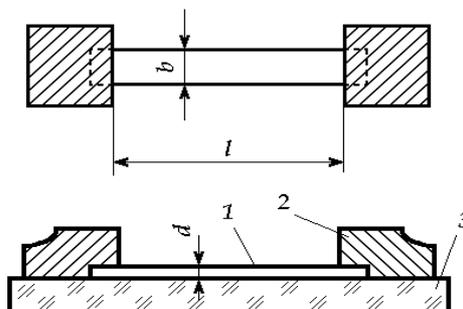


Рис. 4.1. Тонкопленочный резистор

1 - резистивная пленка; 2 - контактная пленка проводящего материала; 3 - подложка.

При использовании одного и того же резистивного материала общей для всех резисторов микросхемы величиной, не зависящей от номинала резисторов и его размеров, является сопротивление резистивной пленки ρ_s . Проектируя тонкопленочные резисторы, предполагают также, что и толщина резистивной пленки одна и та же для всех одновременно изготавливаемых резисторов.

Это позволяет ввести понятие о ρ_s — поверхностном удельном сопротивлении резистивной пленки, величина которого определяется только удельным объемным сопротивлением материала резистивной пленки и его толщиной и численно равна сопротивлению резистора квадратной формы с произвольным размером сторон. Уравнение для сопротивления резистора при этом может быть записано как

$$R = \frac{l}{b} K_{\phi},$$

где K_{ϕ} — коэффициент формы или число квадратов резистора.

Для получения пленочных резисторов с номиналами от единиц и долей ома до десятков и сотен мегом используются материалы, удельное сопротивление которых изменяется в широких пределах. Материалы тонкопленочных резисторов можно условно разделить на несколько групп: резистивные материалы на основе металлических сплавов и микрокомпозиций (смесей), полупроводниковые материалы и др. Данные по характеристикам резистивных материалов приведены в [5]. В качестве резистивных материалов на основе чистых металлов чаще всего используются хром и тантал с сопротивлением (100-200) Ом/ и ТКС порядка (5-10) 10^{-4} 1/град. Необходимость создания резистивных пленок с большими значениями удельного сопротивления порядка сотен и тысяч омов на квадрат заставила обратиться к новым типам материалов, в том числе и к металлическим сплавам. Пленки нихрома с толщиной 20-50 нм имеют ρ_s (50-300) Ом/ и ТКС - 2 10^{-4} 1/град. По своим свойствам к сплавам приближаются так называемые микрокомпозиции, в состав которых наряду с металлами вводятся полупроводники или диэлектрики. При использовании сплавов кремния в сочетании с некоторыми металлами образуется диэлектрическая фаза в виде окислов кремния в композиции с проводящей фазой дисилицидов металлов, многие из которых являются примесными полупроводниками с высоким удельным сопротивлением. До термостабилизации эти пленки имеют практически аморфную структуру и отрицательный ТКС, но после термообработки кристаллизуются; ТКС пленок при этом уменьшается. Структура таких сплавов однородна и обеспечивает малый уровень шумов. Увеличение процентного содержания диэлектрической фазы приводит к возрастанию удельного сопротивления микрокомпозиций с одновременным изменением величины ТКС в сторону отрицательных значений. Наиболее широко для изготовления микрокомпозиционных резисторов используются сплавы типа МЛТ. Обычно в их состав входят в качестве основных веществ хром и кремний с добавками железа, никеля и алюминия. Для сплава МЛТ-3М удается с хорошей воспроизводимостью получать удельные сопротивления (200-800) Ом/ и ТКС - (60-150) 10^{-5} 1/град.

Для получения резистивных пленок с ρ_s 1 кОм/ и более используют керметы, являющиеся частным случаем микрокомпозиций. В

их состав входят металлы и диэлектрик. Наиболее воспроизводимые результаты при высокой стабильности и низком значении ТКС в настоящее время удалось получить лишь для керметов хром (Cr)-моноокись кремния (SiO). Максимальное ρ_s , которое удалось получить для этих резисторов, составляет 20 кОм/ . Однако практически используются резисторы на основе Cr-SiO с ρ_s не более 2000 Ом/ .

В последнее время разработаны специальные сплавы, например, сплав РС-1004 для высокоомных резисторов с удельным сопротивлением 40-50 кОм/ . Основным недостатком этих резисторов является высокая абсолютная величина ТКС. Тем не менее, эти резисторы могут успешно применяться в высокоомных делителях напряжения. Полупроводниковые соединения PbO, SnO, In₂O₃ и др. являются высокоомными материалами, но мало изучены и не применяются для изготовления тонкопленочных резисторов.

4.2.2. Технологические погрешности резисторов

Воспроизводимость номиналов резисторов определяется воспроизводимостью удельного поверхностного сопротивления и геометрии резистора. Для тонкопленочных резисторов обычно длина больше его ширины, поэтому воспроизводимость геометрии резистора будет определяться погрешностью получения ширины резистора. Эта погрешность будет определяться способом получения рисунка.

Для контактных масок при травлении резистивных пленок через маску шириной b_m возникает боковой подтрав $2d$ (рис.4.2).

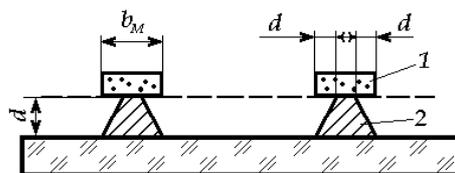


Рис. 4.2. Процесс переноса изображения с контактной маски 1 на резистивную пленку 2.

С учетом абсолютных погрешностей получим

$$b_p \left\{ b_R \left(b_p \left\{ b_m \right\} \right) \right\} \left| 2 \left\{ d \right\} \right| d \left. \right\} , \quad (4.1)$$

где b_p — расчетная величина ширины резистора;

b_R , b_m , d — соответственно абсолютные погрешности ширины резистора, маски и толщины резистивной пленки.

Преобразования приводят к следующей формуле

$$b_p \left\{ 1 \left\{ \frac{b_p}{b_p} \right\} \right\} b_p \left\{ 1 \left\{ \frac{b_m}{b_p} \right\} \right\} \left| 2d \left\{ 1 \left\{ \frac{d}{d} \right\} \right\} \right| ,$$

отсюда

$$\frac{b_R}{b_p} \left\{ \frac{b_m}{b_p} \right\} \left| 2 \frac{d}{b_p} \left\{ 1 \left\{ \frac{d}{d} \right\} \right\} \right| , \quad (4.2)$$

где $\frac{b_R}{b_p}$, $\frac{b_m}{b_p}$, $\frac{d}{b_p}$ — относительные погрешности собственно шири-

ны резистора b_R , маски b_m и толщины d .

Абсолютная погрешность изготовления контактной фоторезистивной маски определяется ошибкой изготовления фотошаблона $b_{\text{фи}}$, ошибкой на операции совмещения и экспонирования $b_{\text{эксн}}$ (параметр установки) и ошибкой $b_{\text{пр}}$, возникающей на операции проявления, равной удвоенной толщине слоя фоторезиста. Для подсчета полной ошибки контактной маски следует применить закон сложения ошибок

$$b_m = \sqrt{b_{\text{фи}}^2 \left\{ b_{\text{эксн}}^2 \right\} \left\{ b_{\text{пр}}^2 \right\}} . \quad (4.3)$$

Погрешность по толщине d определяется воспроизводимостью процесса осаждения пленки и разбросом ее толщины по подложке и устанавливается экспериментально. Если есть необходимость, то погрешность по длине рассчитывается аналогично.

Для тонкопленочных резисторов, рисунок которых получен через свободную маску, ошибка по длине и ширине складывается из ошибки изготовления трафарета и ошибок, возникающих в процессе напыления. Ошибка трафарета зависит от способа его изготовления. В производстве наибольшее распространение получил фотохимический метод изготовления свободных масок, основанный на фотопереносе изобра-

жения с фотошаблона на металлическую заготовку маски с последующим ее травлением. Для биметаллической маски точность составляет 10 мкм. В процессе эксплуатации маска постепенно теряет свою точность вследствие осаждения на нее тонкопленочных слоев. Испаренное вещество одновременно осаждается на подложку и на края трафарета. В этом случае запыление рабочих окон шириной b составляет

$$b_{\text{зан}} = |2dn|,$$

где d | толщина напыляемой пленки;
 n | число напылений.

Допустимое число напылений зависит от размеров окон и требуемой точности.

Ошибки подпыления и затенения, возникающие в процессе напыления, поясняются рис.4.3. Если поток частиц из испарителя в высоком вакууме считать прямолинейным, то часть участков трафарета может экранировать подложку. Эффект затенения зависит от толщины трафарета и взаимного расположения элементов системы испаритель-трафарет-подложка. Из рис.4.3. ошибка затенения определяется

$$b_{\text{зан}} = |t \left\{ s \left[tg \left| t \right\{ s \left[\frac{x}{h} \right. \right. \right. \right.$$

где x | удаление элемента (окна) от центра подложки;
 h | кратчайшее расстояние от испарителя до подложки;
 s | зазор между трафаретом и подложкой;
 t | толщина трафарета.

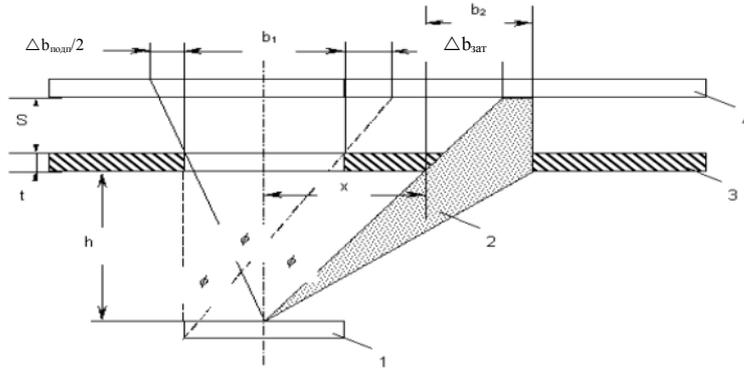


Рис. 4.3. К расчету ошибок подпыления и затенения

1 - испаритель; 2 - молекулярный поток;
3 - свободная маска (трафарет); 4 – подложка; b_1, b_2 – размеры окон в трафарете

Рассмотренный случай является простейшим. При сложной форме рабочих окон трафарета проекция тени может сильно отличаться от фактической формы окна. Если испаритель имеет форму нити или лодочки, то учет появления тени затруднен. Эта погрешность может быть уменьшена за счет рационального размещения прорезей в трафарете и испарителя, а также за счет введения нескольких испарителей.

При наличии зазора между трафаретом и подложкой возникает подпыление. Из рис.4.3 для точечного испарителя

$$\frac{b_{\text{подп}}}{2} = s \operatorname{tg} s \frac{b_1/2}{h \operatorname{tg} t}.$$

При $t = h$

$$b_{\text{подп}} = \frac{s b_1}{h}.$$

Для поверхностного испарителя (рис.4.3)

$$b_{\text{подп}} = \frac{s |L \operatorname{tg} b_1|}{h},$$

где b_1 – ширина окна в трафарете;

L – длина испарителя.

На ошибку подпыления существенное влияние оказывает давление остаточных газов в рабочей камере в процессе напыления. С увеличением этого давления ошибка подпыления очень сильно возрастает. Эффект подпыления является одной из причин, почему свободные маски не используются при катодном распылении, которое реализуется при высоких давлениях.

Полная ошибка напыления определяется

$$b_{\text{нап}} = \sqrt{b_{\text{зан}}^2 \operatorname{tg} b_{\text{зан}}^2 \operatorname{tg} b_{\text{подп}}^2}.$$

С учетом ошибки изготовления трафарета

$$b = \sqrt{b_{\text{траф}}^2 \operatorname{tg} b_{\text{нап}}^2}.$$

Погрешность по длине рассчитывается аналогично.

4.3. Тонкопленочные конденсаторы

4.3.1. Параметры тонкопленочных конденсаторов

Тонкопленочный конденсатор (ТПК) конструктивно представляет собой многослойную структуру, в простейшем случае состоящую из двух металлических обкладок, разделенных слоем диэлектрика (рис.4.4).

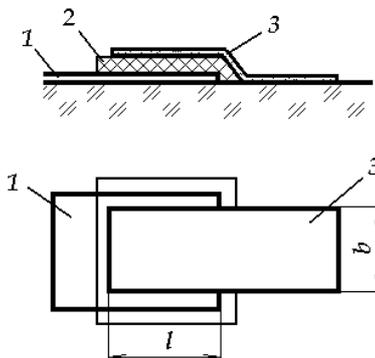


Рис. 4.4. Тонкопленочный конденсатор. 1 - нижняя обкладка; 2 - диэлектрик; 3 - верхняя обкладка; l и b - длина и ширина площади перекрытия верхней и нижней обкладок конденсатора.

Основные электрические параметры ТПК: емкость C , рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$, тангенс угла диэлектрических потерь tg и эксплуатационные параметры определяются многочисленными факторами, в том числе материалами, способами напыления, толщиной пленок и др. Конструкция и технология изготовления конденсаторов имеют ряд особенностей. Емкость конденсатора определяется как

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{d} \frac{l b}{d}, \quad (4.4)$$

где ϵ_0 | электрическая постоянная;
 ϵ_s | диэлектрическая постоянная материала;
 s | поперечное сечение обкладок конденсатора (активная площадь);
 l, b | длина и ширина обкладок;
 d | толщина диэлектрической пленки.

Поскольку свойства материалов, полученных в виде тонких пленок, могут значительно отличаться от свойств массивных образцов, при проектировании конденсаторов и разработке технологии их изготовления используют понятие об удельной емкости C_0 , как одной из характеристик диэлектрического слоя

$$C_0 = \frac{C}{s} = \frac{\epsilon_0}{d}.$$

Чем больше C_0 , тем меньшую площадь занимает конденсатор на подложке. Надо выбирать материалы с большим ϵ_0 или делать слишком тонкой диэлектрическую пленку. Однако применение слишком тонких пленок исключается, так как пленки менее 100-200 нм содержат большое количество дефектов.

Второй параметр, характеризующий свойства ТПК, - электрическая прочность E_{np} , т.е. напряженность электрического поля, при которой происходит пробой конденсатора. Электрическая прочность определяется экспериментально по пробивному напряжению U_{np} как $E_{np} = U_{np} / d$. Электрическая прочность для средних толщин для одного и того же материала, полученного известным способом, является величиной постоянной. Очевидно, что рабочее напряжение конденсатора должно быть меньше напряжения пробоя, т.е.

$$U_{раб} = \frac{U_{np}}{K_3} = \frac{E_{np} d}{K_3},$$

где K_3 - коэффициент запаса ($K_3 = 2 \dots 4$).

Из последнего соотношения можно сформулировать условие выбора минимальной толщины диэлектрика

$$d = \frac{U_{раб} K_3}{E_{np}}.$$

Если из этого условия толщина диэлектрической пленки получается менее 100 нм, то надо выбирать толщину, исходя из технологических соображений, в диапазоне 100-200 нм.

Кроме диэлектрических потерь, в конденсаторе имеется еще один источник потерь, связанный с сопротивлением обоих электродов

$$tg \delta = tg \delta' \left\{ \frac{2 C_v l}{3 b d_1} \right\},$$

где $tg \delta$ | измеряемый тангенс угла диэлектрических потерь;
 $tg \delta'$ | частотно-независимый вклад диэлектрика;
 C | емкость конденсатора;
 ω | угловая частота;
 ρ_v | удельное объемное сопротивление материала электродов
 d_1 | толщина электрода;
 l, b | длина и ширина площади перекрытия верхнего и нижнего электродов.

Из этого уравнения видно, что ρ_v, d_1 и их соотношение сильно влияют на работу ТПК при высоких частотах. Ограничения по частоте для высокочастотных конденсаторов могут быть уменьшены увеличением толщины и проводимости металлических электродов.

Температурный коэффициент емкости характеризует изменение емкости в интервале температур от минус 65 до плюс 125 °С и стабильную работу ТПК.

4.3.2. Диэлектрические материалы

Рассмотренные параметры, а также эксплуатационные характеристики ТПК, такие как надежность, временная стабильность, частотные свойства определяются выбором материалов и способом их получения.

Рассмотрим свойства некоторых наиболее часто используемых диэлектрических материалов.

Моноокись кремния (SiO), обычно получаемая термическим испарением, имеет диэлектрическую постоянную от 3,5 до 6, что соответствует изменению состава от двуокиси кремния SiO₂ до чистой SiO, образует малодефектную и гладкую пленку. При температурах испарения более 1250 °С SiO диссоциирует в испарителе с выделением свободного кремния, который может увеличивать толщину пленок до 10. При этом свойства пленок ухудшаются.

Пленки окиси тантала (Ta₂O₅) получают ионно-плазменным распылением (реактивное, высокочастотное) или анодным окислением. Эти пленки характеризуются диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в диапазоне 16-25, и малой дефектностью для анодноокисляемых пленок. Электрическая прочность конденсаторов с использованием диэлектрика Ta₂O₅ сильно зависит от материалов электродов и способов их получения.

Пленки окиси алюминия (Al_2O_3) с $8 \mid 10$ получают ионно-плазменным распылением, электронной бомбардировкой, анодным окислением. При испарении исходного вещества Al_2O_3 с помощью электронного луча пленки на подложке получают нестехиометрического состава с дефицитом кислорода, что приводит к ухудшению свойств пленок.

При испарении окислов титана (TiO_2) и циркония (ZrO_2) получают соответственно пленки с $30 \mid 40$ и $20 \mid 22$. Электрическая прочность и другие параметры ТПК зависят от способов получения диэлектрических пленок и материала обкладок. Для плотных пленок TiO_2 и ZrO_2 с электродами из алюминия электрическая прочность составляет $E_{np} \approx 1 \cdot 10^6 \text{ В/см}$. Для изготовления конденсаторов малой емкости могут использоваться пленки на основе боросиликатного стекла (80 % SiO_2 и 20 % B_2O_3), имеющие 4 и $E_{np} \approx 5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$. Получаются такие пленки методом взрывного испарения.

4.3.3. Выбор материала обкладок

К материалам обкладок предъявляются следующие требования: низкое сопротивление $0,05\text{-}0,2 \text{ Ом/}$, ровная и гладкая поверхность и малый коэффициент диффузии. Отказ ТПК чаще всего происходит из-за закорачивания, которое зависит как от качества диэлектрической пленки, так и от качества обкладок.

Очень зернистые пленки таких материалов, как **свинец** и **олово**, неприемлемы, т.к. их поверхность весьма шероховата. Мало пригодны также металлы с высокой температурой испарения (**хром**, **никель**, **железо**). Такие металлы приводят к большому количеству коротких замыканий, очевидно, вследствие проникновения атомов металла с большой кинетической энергией в диэлектрик при конденсации.

Золото и **серебро**, хотя имеют сравнительно низкую температуру испарения, также могут вызывать замыкание обкладок. Оно происходит из-за интенсивной диффузии атомов этих металлов из обкладок после осаждения (вдоль границ зерен).

Наилучший выход получается при использовании **алюминия**, который имеет низкую температуру испарения и малую подвижность атомов на поверхности, благодаря окислительным процессам. Надо обязательно исключить разбрызгивание, т.е. попадание крупных капель и прожигание диэлектрика при нанесении верхней обкладки.

Электрическая прочность ТПК на основе диэлектрической пленки SiO с различными материалами обкладок составляет:

Al-SiO-Al - $2 \cdot 10^6$ В/см;

Cu-SiO-Cu - $0,8 \cdot 10^6$ В/см;

Ag-SiO-Ag - $0,18 \cdot 10^6$ В/см.

Если применять свинец, олово, то E_{np} снижается в 10-20 раз, а количество коротких замыканий увеличивается в 10 раз. Для плотных диэлектрических пленок окиси тантала, получаемых ионно-плазменным распылением или анодным окислением, можно в качестве материала обкладок выбирать такие металлы, как тантал, золото. Например, танталовый конденсатор делается следующим образом: сначала напыляется пленка тантала, затем она окисляется, а затем напыляется верхний электрод. Получается структура Ta-Ta₂O₅-Au, обеспечивающая хорошие параметры.

4.4. Тонкопленочные индуктивности

Тонкопленочные катушки индуктивности обычно изготавливают в виде круглой или прямоугольной проводящей спирали, выполненной на поверхности диэлектрической подложки (рис.4.5). Такая катушка индуктивности может быть охарактеризована набором параметров, среди которых в качестве основных можно выделить: индуктивность L , добротность Q , собственную емкость C_0 и температурный коэффициент индуктивности (ТКИ).

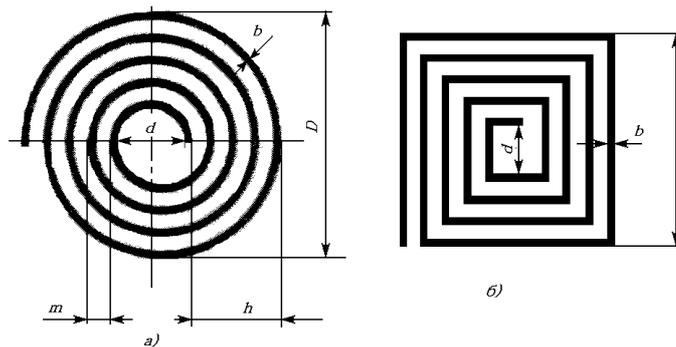


Рис. 4.5. Тонкопленочная индуктивность. а) круглой формы; б) квадратной формы: b | ширина проводника; m | шаг проводников

индуктивности; h | суммарная ширина проводников; d и D | внутренний и внешний размеры индуктивности.

Строгий расчет индуктивности пленочной катушки достаточно сложен, поэтому чаще прибегают к эмпирическим соотношениям, в которые входят параметры элементов конструкции катушки: ее форма, число и размеры витков при заданных ограничениях на используемые материалы подложек. Так, для плоской спиральной катушки, изготовленной на диэлектрическом основании, с достаточной для практических расчетов точностью при $D = 3,5d$ и $h = m$ справедливо соотношение [5]

$$L = \frac{25D_1 N^2}{1 + 3 \frac{h}{D_1}} \text{ нГ},$$

где $D_1 = 0,5(D + d)$ | средний диаметр витка;

N | число витков катушки;

$h = 0,5(D + d)$ | суммарная ширина проводников;

m | шаг проводников.

Из формулы следует, что при прочих равных условиях величина индуктивности пропорциональна среднему диаметру витка спирали и квадрату числа витков. Поскольку практически размеры отдельных пленочных элементов не превосходят 1 см^2 , а число витков спирали ограничено суммой межвитковых емкостей, активным сопротивлением спирали, разрешающей способностью используемого процесса нанесения пленок и получения рисунка, постольку предельная величина индуктивности пленочной катушки на диэлектрической подложке обычно мала. Тонкопленочная индуктивность на основе пленок меди, алюминия диаметром 8 мм имеет индуктивность 3,5 мкГн добротность 50 на частоте 15 МГц. Покрытие катушки ферромагнитной пленкой увеличивает индуктивность до 100 мкГн.

Увеличение добротности катушек обычно достигается за счет выбора материалов с малым удельным сопротивлением (обычно это медь с подслоем титана или ванадия), использования достаточно толстых (до 30-40 мкм) слоев, использования изоляционных слоев с малыми потерями на рабочих частотах (стекло, ситаллы) и применения профилированных подложек с тем, чтобы витки катушки формировались на

выступающих участках основания и тем самым уменьшалась межвитковая емкость.

Использование в пленочных катушках индуктивности слоев толщиной в несколько десятков микрометров определяет специфические методы их нанесения по заданному рисунку. Наиболее часто используются процессы осаждения сплошного токопроводящего покрытия, нанесения на него диэлектрического защитного слоя, окна в котором соответствуют рисунку спирали с последующим гальваническим наращиванием слоев до необходимой толщины и снятием диэлектрического и тонкого проводящего слоев в зазорах между витками спирали.

Еще одна возможность увеличения добротности катушек индуктивности заключается в преимущественном выборе круглой формы спирали, поскольку для одного и того же номинала индуктивности длина проводника круглой спирали меньше, чем квадратной, и соответственно меньше величина активного сопротивления. Существует оптимальное соотношение внутреннего и внешнего диаметров спирали, численно равное $d/D = 0,4$ для круглой спирали и 0,362 для квадратной спирали.

При перечисленных условиях добротность тонкопленочных катушек индуктивности находится в пределах 80-150.

4.5. Проводники и контактные площадки

Необходимыми элементами любой тонкопленочной микросхемы являются пленочные проводящие слои и контактные площадки, основное назначение которых объединить пленочные и навесные компоненты в законченную схему, выполняющую определенную электрическую функцию.

Этим обусловлено все многообразие требований, предъявляемых к пленочным проводникам и контактным площадкам. Они должны с минимальными потерями подводить напряжение питания к функциональным компонентам микросхемы, с минимальными искажениями передавать сигналы, обеспечивать надежный, чаще всего невыпрямляющий и малошумящий контакт с элементами микросхемы.

Требования, предъявляемые к пленочным проводникам и контактным площадкам, в ряде случаев противоречат друг другу. Например, увеличение ширины пленочного проводника уменьшает его индуктивность, но одновременно возрастает емкость этого проводника относительно земли и расположенных в непосредственной близости элементов микросхемы. Материалы с малым значением удельного со-

противления, применяемые для проводников и контактных площадок, как правило, имеют плохую адгезию к подложке.

Ниже рассматриваются основные критерии, определяющие выбор материала проводников и контактных площадок.

Фактором, определяющим верхнюю границу толщины проводящей пленки, является усилие отрыва или сдвига пленки. Этот параметр в первом приближении зависит от соотношения сил адгезии пленки к основанию и возникающих напряжений (например, из-за разности коэффициентов линейного расширения пленки и основания).

Если силы адгезии сконцентрированы лишь в области контакта двух разнородных слоев и с этой точки зрения не зависят от толщины пленки, то термические напряжения пропорциональны объему пленки и, следовательно, сила сцепления пленки и основания, как правило, убывает с толщиной.

Эти и многие другие факторы ограничивают диапазон толщин проводящих пленок областью 0,1-1,0 мкм.

Величина сил адгезии проводников к подложке определяется природой контактирующих материалов и условиями нанесения пленки, а именно:

- поверхностью подложки;
- степенью чистоты поверхности подложки;
- наличием подслоя и его природой;
- температурой, при которой наносится пленка, и энергией осаждающихся атомов.

Поскольку контактные площадки предназначены для присоединения навесных элементов и внешних выводов микросхемы, одним из решающих факторов, определяющих выбор материала, является его способность к пайке и сварке без нарушения ее целостности.

С точки зрения минимального электросопротивления наиболее подходящими для создания проводников и контактных площадок являются золото, серебро, медь, никель и алюминий (табл.4.6).

Золото обладает высокой химической стойкостью, малым электросопротивлением, хорошо паяется и сваривается с выводами навесных компонентов микросхемы. К его недостаткам кроме высокой стоимости следует отнести низкую адгезию к диэлектрической подложке и склонность к агрегации. Поэтому золото при создании пленочных проводников и контактных площадок чаще всего используется в комбинации с другими материалами: адгезионным подслоем хрома, никрома, титана или выступает в качестве верхнего химически инертного защитного и технологического слоя на тантале, меди и некоторых других материалах.

Серебро имеет наибольшую электропроводность, коррозионно-устойчиво, допускает пайку и сварку. Высокая миграционная подвижность серебра при отсутствии надлежащих мер защиты в ряде случаев приводит к отказам микросхемы.

Медь - один из наиболее часто используемых материалов. Она характеризуется высокой электропроводностью, хорошо сочетается с другими материалами при создании многослойных проводников. Медь по свойствам приближается к серебру и сохраняет присущий серебру недостаток - высокую миграционную подвижность. Кроме того, медь склонна к окислению. Поэтому медь в качестве материала проводящего слоя обычно используется с адгезионным подслоем марганца, титана, хрома или нихрома и защитным покрытием из никеля, золота или припоя. Для уменьшения электромиграции меди под действием постоянных потенциалов в присутствии влаги окружающей атмосферы обязательно использование плотных и негигроскопичных диэлектрических покрытий.

Никель обычно не применяется в качестве основного компонента материала проводящего слоя, а используется в качестве верхнего защитного слоя на меди, алюминии и пр. Он обеспечивает надежную пайку и сварку внешних выводов микросхемы.

Таким образом контактные площадки и проводники делаются двух- и трехслойными: адгезионный подслой - основной проводящий слой - защитный слой. В качестве материала подслоя используются нихром, хром, титан, тантал марганец, обеспечивающие адгезию основного проводящего слоя к диэлектрической подложке. Толщина пленки подслоя составляет 0,01-0,03 мкм. Толщина проводящего слоя (Au, Cu) обычно лежит в диапазоне 0,4-1,0 мкм. Защитный слой (Au, Ni, Ag) делается достаточно тонким порядка 0,05-0,1 мкм. Защитный слой обычно требуется для пленок меди, так как она легко окисляется на воздухе.

Комбинации материалов для проводников и контактных площадок приведены в табл.4.6.

Таблица 4.6

Характеристики проводников и контактных площадок

Материалы	Удельное сопротивление ρ_s , Ом/
Нихром-золото	0,03-0,04
Нихром-медь-никель	0,02-0,04
Нихром-медь-серебро	0,02-0,04
Нихром-медь-золото	0,02-0,04

Нихром-алюминий-никель	0,1-0,2
------------------------	---------

Алюминий широко применяется для создания проводящих слоев, контактных площадок и элементов пересечений. Кроме того, в микросхемах с тонкопленочными конденсаторами алюминий используется для верхних и нижних обкладок.

Образующаяся на алюминии тонкая окисная пленка затрудняет его сварку и особенно пайку; однако ее присутствие позволяет создавать высоконадежные пленочные пересечения благодаря эффекту "самозалечивания". Большим преимуществом алюминия при создании тонкопленочных проводников и пересечений является то, что в ряде технологических процессов проводящая пленка алюминия может быть превращена в диэлектрический слой окиси алюминия и, следовательно, возможно получение безрельефных структур. К достоинствам алюминия следует также отнести и то, что он практически не меняет свои свойства при температурах до 500 °С.

Благодаря перечисленным выше свойствам алюминий находит самое широкое применение в технологии гибридно-пленочных микросхем. К недостаткам алюминия следует отнести технологические сложности получения толстых (5-10 мкм) слоев.

В последнее время используются фракционирующие сплавы, в состав которых входит наряду с медью 2 % Mn, 5 % Ni, 0,1 % Ti. Из сплава сначала испаряется легколетучий компонент (Mn), затем медь. Приповерхностная зона будет обогащена материалами с высокой температурой испарения (Ni, Ti). На основе таких слоев можно делать контактные площадки и проводники, удовлетворяющие всем поставленным требованиям.

Для микросхем на основе пленок тантала в качестве материала резисторов и для подслоя выбирают тантал с толщиной до 0,05 мкм, затем осаждают диэлектрический слой, а в качестве материала верхней обкладки и для проводящего слоя используют золото. Таким образом, проводники и контактные площадки имеют двухслойную структуру Ta-Au.

Одновременное использование различных материалов при создании одной микросхемы накладывает на их выбор ряд дополнительных ограничений. Рекомендуется учитывать возможность появления дополнительных шумов, контактной разности потенциалов в месте контакта разнородных материалов, переходного сопротивления на границе раздела слоев.

5. ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИМС

В настоящее время существует большое количество типовых технологических процессов изготовления тонкопленочных ИМС. В основу каждого процесса положены способ нанесения пленок и метод получения рисунка элементов ИМС.

Например, термическое испарение с осаждением пленки на подложку через свободные маски (трафареты), получение сплошных пленок путем термического испарения в вакууме или ионно-плазменным распылением с последующим формированием рисунка с помощью фотолитографии и др. Каждый из процессов имеет свои разновидности в зависимости от количества и типов пленочных элементов, от наличия внутрисхемных соединений и используемых материалов. Поэтому последовательность операций при формировании пленочных элементов различна.

Представим техмаршрут изготовления резистивно-ёмкостной тонкопленочной микросхемы (RC-схемы) состоящей из резисторов на основе пленок хрома и конденсаторов Al-SiO-Al. Для такой RC-схемы целесообразно проводники и контактные площадки выполнять из алюминия. На рис. 5.1–5.4 показана последовательность формирования схемы с использованием контактных масок. Первые две операции технологического процесса — нанесение резистивного слоя (Cr), проводящего слоя (Al) для внутрисхемных соединений и нижней обкладки конденсатора — выполняют в одном вакуумном цикле, в вакуумных установках, рабочие камеры которых оборудованы двумя испарителями и устройствами карусельного типа для смены нескольких подложек, а также устройствами подвода их на позиции испарения.

Процесс формирования резистивного слоя осуществляют следующим образом. Перед началом технологического цикла производят подготовку вакуумной установки путем очистки рабочей камеры и загрузки испарителей навесками из хрома и алюминия. На карусели устанавливают подложки и контрольные образцы для измерения удельного сопротивления резистивной пленки в процессе её осаждения. После загрузки рабочую камеру откачивают до необходимого давления (10^{-2} – 10^{-4}) Па, нагревают подложки до температуры 200–250 °С, подводят на позицию испарения хрома, разогревают его до температуры испарения и, открывая заслонку, производят напыление на подложку. При получении резистивного слоя заданной толщины, закрыв заслонку,

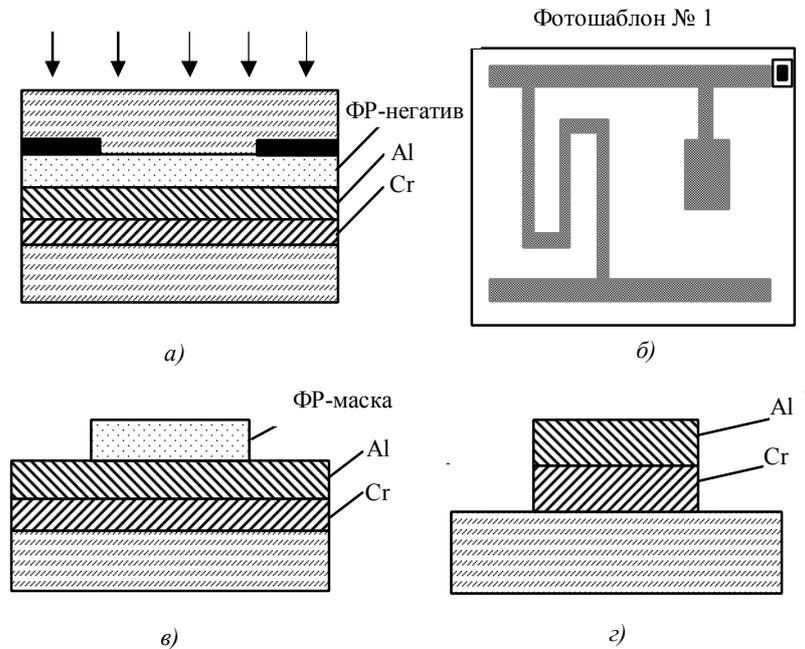


Рис. 5.1. Формирование рисунка в слоях хрома и алюминия: экспонирование (а); фотошаблон № 1 (б); проявление фоторезиста (в); травление хрома и алюминия (г);

прекращают напыление и на позицию напыления подводят следующую подложку. Таким образом, наносят резистивный слой последовательно на все подложки. Затем выключают нагрев испарителя хрома, включают испаритель алюминия и аналогично осуществляют напыление про-

водящего слоя алюминия на все подложки. Выключают нагрев испарителя и подложек. Подложки сначала остывают в вакууме до температуры 50–60 °С, а затем извлекаются из вакуумной установки.

Формирование рисунка в слоях хрома и алюминия осуществляется с помощью двух последовательных фотолитографий (прямые контактные маски). Для первой ФЛ используется фотошаблон, задающий совместный рисунок резистора, проводников, контактных площадок, нижней обкладки конденсатора и меток совмещения (рис. 5.1). Для одновременного травления хрома и алюминия используется универсальный травитель, который не разрушает ФР-маску. После удаления маски на подложке получается покрытие из слоев хрома и алюминия.

С помощью второй ФЛ удаляют алюминий с резистора, используя фотошаблон № 2, задающий рисунок контактных площадок, проводников, нижней обкладки конденсатора и меток совмещения (рис. 5.2). При этом выбирают селективный травитель, который травит алюминий, но не действует на хром. В результате все проводники и нижняя обкладка конденсатора получается двухслойными. Диэлектрическая пленка SiO напыляется на подложку сплошным слоем и рисунок формируется с помощью ФШ № 3, который просто совмещается с рисунком, имеющимся на подложке. Это совмещение возможно, поскольку слой SiO прозрачный и большой точности при изготовлении диэлектрика не требуется (рис. 5.3).

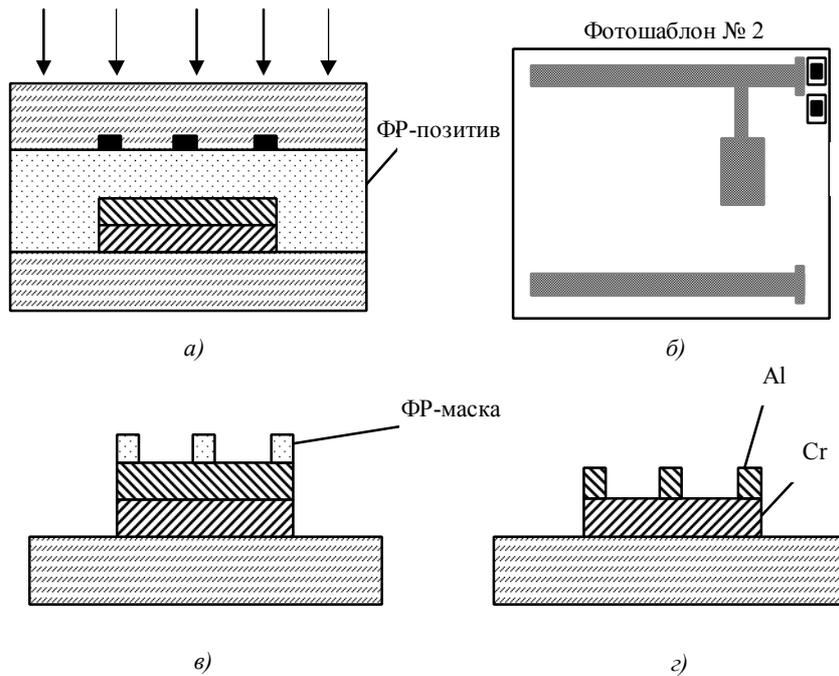


Рис. 5.2. Формирование рисунка в слое алюминия:
экспонирование (а); вид фотошаблона № 2 (б); проявление
фоторезиста (в); травление алюминия (г);

Для формирования верхней обкладки конденсатора нужно использовать обратные маски, так как, если напылять Al на уже сформированную часть схемы, где уже имеется слой алюминия, то, во-первых, нельзя будет разделить травление верхнего слоя Al от нижележащего, во-вторых, нельзя будет сделать совмещение меток на шаблоне с метками на подложке, так как алюминий является непрозрачным материалом.

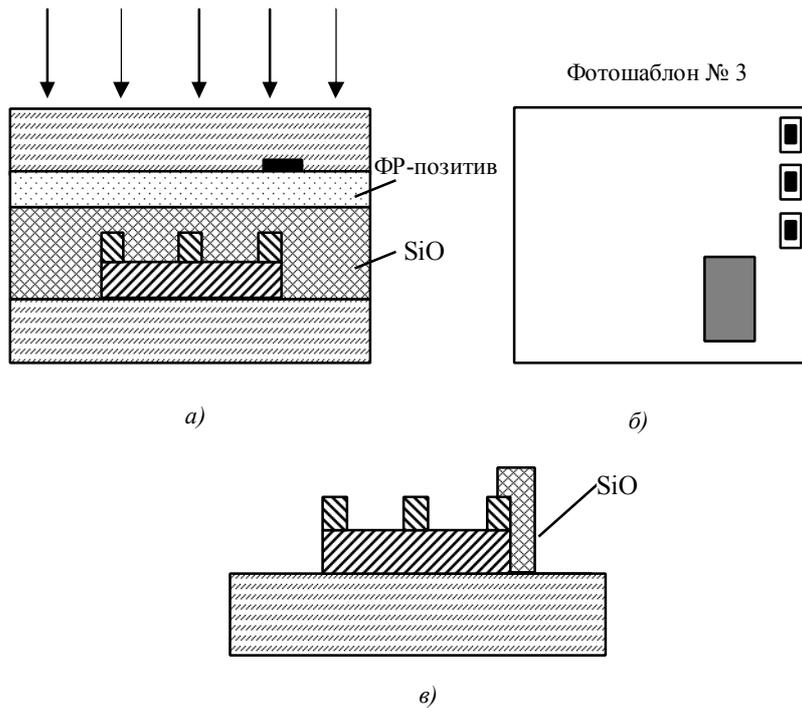


Рис. 5.3. Формирование рисунка в слое диэлектрика: экспонирование (а); вид фотошаблона № 3 (б); травление диэлектрика (в)

Последовательность формирования верхней обкладки конденсатора и проводников с помощью обратной ФР-маски заключается в следующем (рис. 5.4). Сначала на подложку наносится позитивный фоторезист и с помощью ФШ № 4 формируется обратная ФР-маска, на который сплошным слоем сверху напыляется алюминий. Воздействуя на фоторезист, удаляют ФР-маску вместе с алюминием, лежащим на ней. На подложке остается слой алюминия, соответствующий рисунку верхней обкладки конденсатора и, возможно части проводников и контактных площадок.

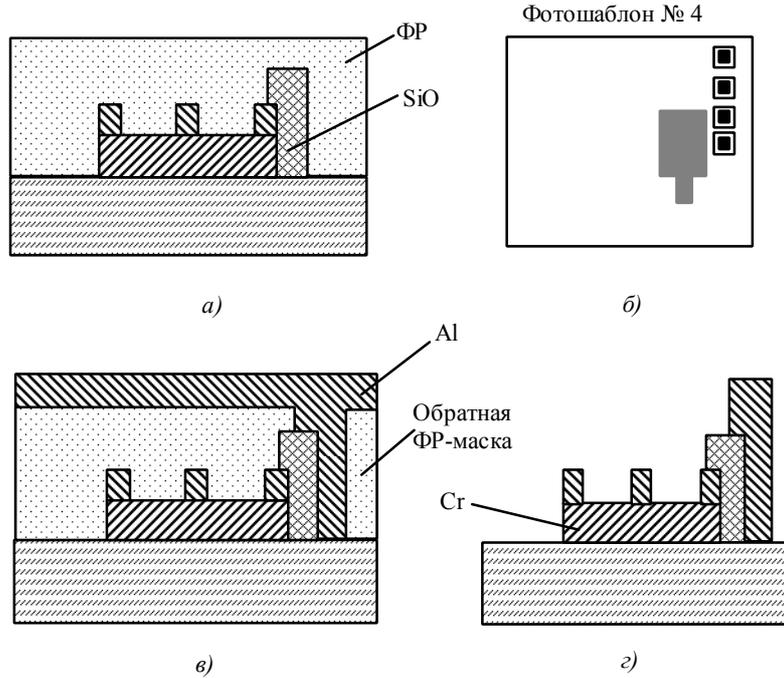


Рис. 5.4. Формирование рисунка в слое алюминия методом обратной маски: нанесение ФР (а); вид шаблона № 4 (б); напыление алюминия (в); взрыв

Для изготовления RC-схемы можно использовать **комбинированный способ** получения рисунка, сочетающий фотолитографию и свободные маски (трафареты). Резисторы, проводники и нижняя обкладка конденсатора формируются с помощью двух последовательных фотолитографий (см. рис. 5.1–5.2).

После этого в непрерывном вакуумном цикле через соответствующие трафареты напыляют диэлектрик SiO и верхние обкладки конденсатора из алюминия.

Это возможно, если верхняя обкладка имеет достаточно большие размеры, а область диэлектрика перекрывает размеры обкладок и не влияет на емкость конденсатора.

Танталовая технология

Типовые технологические процессы изготовления пассивной части гибридных ИМС по танталовой технологии основаны на катодном

распылении для нанесения пленок тантала и различных способах получения пленочных конфигураций. При этом металлические пленки из тантала являются исходным материалом для формирования проводящих, резистивных и емкостных элементов. Так, применяя катодное реактивное распыление, можно получать резистивные пленки с большим диапазоном удельного сопротивления, а используя анодирование пленок тантала — диэлектрические слои окиси тантала Ta_2O_5 . Следовательно, общий принцип танталовой технологии заключается в монолитности изготавливаемой пленочной структуры, что значительно облегчает ее производство.

Возможности и преимущества танталовой технологии обусловлены, прежде всего, особыми свойствами пленок тантала:

а) резисторы и конденсаторы могут быть получены на основе одного материала, что существенно упрощает технологию и снижает стоимость ИМС;

б) RC-элементы на основе пленок тантала стабильны и надежны во времени;

в) с помощью анодирования пленок тантала можно получить диэлектрик для конденсаторов, осуществить защиту резисторов и откорректировать значение сопротивления;

г) высокое поверхностное сопротивление достигается при низком температурном коэффициенте сопротивления и достаточной стабильности;

д) пленка Ta_2O_5 обладает высокой электрической прочностью, высоким значением ϵ , невосприимчивостью к влажности и высокой добротностью;

е) тантал невосприимчив к радиации.

В связи с этим по танталовой технологии можно изготавливать пассивные RC-структуры как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами любой сложности и конфигурации. На основе танталовой технологии можно получить три типа пленочных конденсаторов:

1) со структурой $Ta — Ta_2O_5 — Au$, для которых характерна высокая электрическая прочность;

2) со структурой $Ta — Ta_2O_5 — Ni(Ti)Au$, характеризующиеся пониженной чувствительностью к влаге (благодаря прослойке из Ni или Ti);

3) со структурой $Au — Ta_2O_5 — Al$, характеризующиеся низким сопротивлением обкладок и высокой добротностью.

Учитывая эти особенности и то, что пленки Ta_2O_5 травят в щелочном травителе, а пленки тантала — в кислотном, можно получить различные варианты типового технологического процесса.

дирование выполняют в электрохимической ванне, наполненной электролитом, в который погружен нерастворимый катод. Анодом служит пленка тантала, все элементы рисунка которой электрически соединены между собой алюминиевой контактной маской.

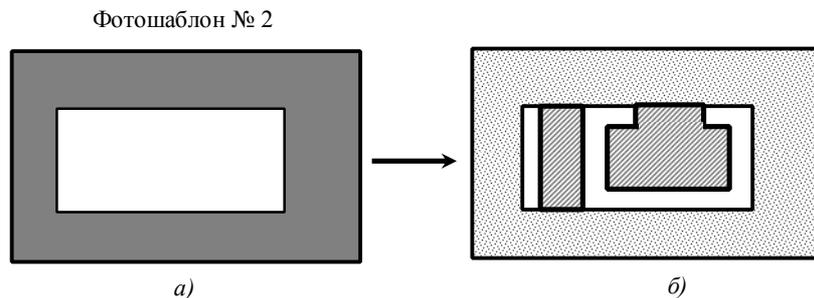


Рис. 5.6. Формирование рисунка контактной маски:
а — фотошаблон № 2; б — рисунок на подложке

Для того чтобы алюминий не окислялся, перед анодированием не удаляют с подложки защитный рельеф из фоторезиста, полученный перед этим. При постоянной температуре электролита толщина пленки оксида зависит только от напряжения, приложенного между анодом и катодом, поэтому процесс роста пленки оксида тантала довольно просто контролируется.

Получаемая в результате электролитического анодирования пленка оксида имеет непористую аморфную структуру, обладает химической стойкостью и высокой механической прочностью. Вследствие этого оксид тантала используется в качестве диэлектрика конденсатора и защищает танталовые резисторы от коррозии.

По окончании процесса анодирования с подложек удаляют защитный рельеф из фоторезиста и снова осаждают на них методом термического испарения сплошной слой алюминия, в котором затем вытравливают рисунок верхней обкладки конденсатора и получают на подложке рисунок ИМС по танталовой технологии (рис. 5.7).

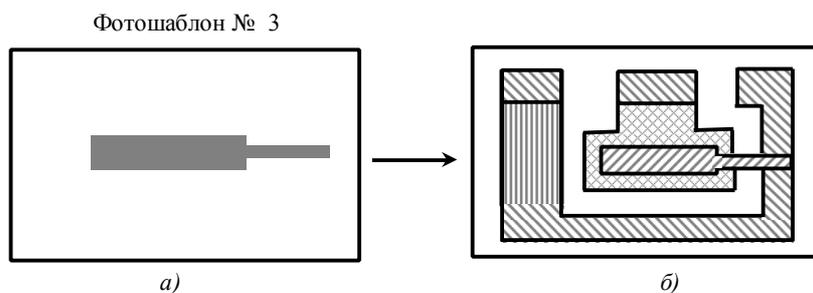


Рис.5.7. Формирование рисунка верхней обкладки:
 а — фотошаблон № 3; рисунок ИМС на подложке

Несмотря на то что процесс катодного распыления сложнее процесса термического испарения в вакууме, благодаря технологичности и большим возможностям танталовая технология широко используется при изготовлении высокостабильных гибридных ИМС.

Электронно-лучевая технология

Данный типовой технологический процесс наиболее целесообразен для изготовления ИМС, содержащих только пленочные резисторы и соединения. Технологический процесс формирования пассивной части гибридной ИМС с использованием электронно-лучевой гравировки для получения пленочных конфигураций проводят в такой последовательности. Вначале на керамическую подложку в виде сплошных покрытий напыляют резистивный и проводящий слои, после чего проводят два фрезерования с помощью электронного луча для получения необходимой конфигурации пленочных элементов. Особенностью электронно-лучевой технологии является возможность ее автоматизации. Поскольку перемещением электронного луча по поверхности легко управлять электрическим или магнитным полем, необходимую конфигурацию можно получить по заданной программе. Такой программный способ изготовления наиболее экономичен для получения ИМС, пассивная часть которых содержит резисторы высокой точности и соединения.

6. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

6.1. Тонкие пленки в технике СВЧ

Интегральная микросхема СВЧ представляет собой микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию передачи или преобразования СВЧ - сигнала. Особенности технологии гибридных интегральных схем СВЧ представлены в [10].

Основной частью конструкции СВЧ является микрополосковая плата, основанием которой является подложка или часть подложки стандартного размера. Подложку изготавливают из диэлектрических материалов: керамики, ситалла, сапфира или феррита; она служит заготовкой для нанесения на ее поверхность пленочных элементов. Подложка может быть комбинированной, т.е. содержать в одном диэлектрическом материале вставки, например, феррита.

На поверхности подложки формируют пленочные элементы с распределенными или сосредоточенными параметрами: микрополосковые линии (МПЛ), резисторы, конденсаторы, индуктивности.

На поверхности микрополосковой платы устанавливают навесные компоненты: диоды, транзисторы, конденсаторы, индуктивности. Их присоединяют к пленочным элементам методами пайки или сварки.

Поверхность подложки, на которой формируются пленочные элементы, называют рабочей. Другая поверхность подложки полностью или частично металлизирована и выполняет функции экрана.

Микрополосковую плату устанавливают в корпус; электрическую связь с другими узлами осуществляют при помощи коаксиальных высокочастотных соединителей и низкочастотных выводов.

Одним из характерных элементов СВЧ является микрополосковая линия, которая совместно с подложкой и экраном выполняет функции СВЧ - линии передач. К схемам СВЧ, у которых создаются функциональные элементы на основе отрезков МПЛ, предъявляются более высокие требования к точности их геометрических размеров и взаимному расположению в отличие от схем низкочастотного диапазона, где пленочные проводники выполняют роль коммутационных элементов.

Схемы СВЧ, содержащие элементы с сосредоточенными параметрами, по своей конструкции близки к микросхемам низкочастотного диапазона. Основу технологий схем СВЧ составляют методы и процессы, которые нашли широкое применение при создании низкочастотных микросхем широкого функционального назначения.

Параметры пленочных элементов СВЧ определяются физическими свойствами применяемых материалов, способами их нанесения и формирования конфигурации. К основным материалам относятся: под-

ложки, резистивные, проводящие и диэлектрические пленки, из которых формируются элементы.

Основное назначение подложки в технологическом процессе, с одной стороны, состоит в том, чтобы служить механически прочной и химически стойкой основой, способной выдержать сложные тепловые, механические и химические воздействия при образовании пленочных элементов. С другой стороны, находясь в составе устройства, подложка становится составной частью схем СВЧ; в ней сосредотачиваются поля СВЧ. Поэтому свойства схем СВЧ в значительной мере зависят от электрических свойств подложки.

Одним из важнейших параметров материала подложек являются относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r и тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$. Для повышения степени интеграции схем СВЧ желательно применять подложки с высоким значением ϵ_r . При этом снижаются потери на излучение МПЛ, поскольку большая часть электромагнитного поля концентрируется в области диэлектрика под проводником микрополосковой линии. Однако при высоких значениях ϵ_r материала в подложках легко возбуждаются поверхностные волны, такие материалы характеризуются сравнительно низкими значениями температур точек Кюри и сильной зависимостью ϵ_r от температуры. Это вынуждает выбирать материалы подложек с $\epsilon_r = 8 - 10$.

Высокое удельное электрическое сопротивление подложки определяет электрическую прочность МПЛ, а высокая теплопроводность подложки обеспечивает уменьшение температурного градиента на ее поверхности и снижение общего уровня нагрева за счет отвода тепла на корпус. С повышением частоты СВЧ сигнала электрическая прочность диэлектрических материалов снижается.

Важным является требование высокой чистоты обработки диэлектрической подложки. Шероховатость поверхности проводников, обращенной к подложке, определяется шероховатостью последней. Это будет определять четкость и точность рисунка схемы, высокочастотные потери в проводниках, надежность сосредоточенных элементов схем СВЧ - конденсаторов и резисторов. Шероховатость поверхности микрополосковых проводников ведет к росту активных потерь в линии. Это обусловлено тем, что за счет поверхностного эффекта токи СВЧ в проводниках текут в тонком поверхностном слое. Шероховатость поверхности вызывает рост эффективной поверхности, т.е. длины пути поверхностных токов по сравнению с гладкой поверхностью.

Общие требования к материалам подложек для тонкопленочных схем и их свойства рассмотрены в подразделе 4.1. данного учебного пособия. Наиболее широко используются в качестве материалов под-

ложек схем СВЧ: ситаллы, керамики на основе окислов алюминия и бериллия. Керамика на основе окислов алюминия имеет низкие диэлектрические потери, небольшие изменения диэлектрических параметров и tg с изменением температуры, хорошую их стабильность.

Керамика с содержанием корунда Al_2O_3 99,8% и выше выпускается под названием «Поликор» и отличается повышенной химической и термической стойкостью.

Сапфир, представляющий собой монокристаллическую окись алюминия с содержанием Al_2O_3 99,6%, бывает природным и синтетическим. Последний получают ориентированным вытягиванием по методу Чохральского. Монокристаллический сапфир имеет ряд преимуществ по сравнению с поликристаллическим. Этот диэлектрик более однороден по своим свойствам, имеет высокую плотность. Его поверхность может быть обработана до высокой чистоты. Поэтому сапфир применяют в тех случаях, когда необходимы высокое разрешение и наибольшая однородность электрических свойств. Из-за высокой стоимости область применения сапфира ограничена прецизионными высокомоощными СВЧ - схемами. Бериллиевая керамика имеет хорошие диэлектрические свойства и отличную термическую проводимость, но она трудно обрабатывается.

Ферриты представляют собой класс материалов, в которых удачно сочетаются свойства полупроводников, диэлектриков и ферромагнетиков. Поэтому их использование в качестве материала подложек схем СВЧ позволяет создать новый вид устройств, в которых возможно ввести управление свойствами за счет внешнего магнитного поля. Ферритовые элементы могут служить составной частью так называемой «комбинированной» подложки, представляющей собой диэлектрическое основание, содержащее активные магнитные зоны.

Проводящие пленки находят различное применение в схемах СВЧ. На основе металлических пленок, имеющих хорошую электропроводность, создаются микрополосковые линии, индуктивности, планарные конденсаторы, контактные площадки, обкладки многослойных конденсаторов.

Рассмотрим, чем обусловлены требования к свойствам проводящих пленок. Для элементов схем СВЧ, формируемых на подложках с малым tg доминирующее влияние на величину активных потерь оказывают потери в проводниках. Их величина зависит от удельного сопротивления материала, из которого изготовлена пленка, структуры проводящей пленки, ее однородности, плотности, внутренних напря-

жений в пленке, чистоты токонесущей поверхности. Большинство перечисленных факторов определяется технологическим процессом.

Для создания проводящих пленок применяются медь, серебро, золото, алюминий. Пригодность этих металлов в качестве проводников рассмотрена в подразделе 4.5. данного учебного пособия. Основу микрополосковой линии составляет металл с хорошей проводимостью: медь или золото. В системе «хром - золото» при повышенных температурах происходит диффузия хрома в золото, что приводит к значительному увеличению сопротивления. Для того чтобы избежать этого явления, можно вместо хрома использовать титан. Несмотря на положительные свойства золота, его использование в качестве основного проводящего слоя микрополосковой линии является экономически невыгодным. Поэтому чаще используют для этой цели медь. Медный слой состоит из двух слоев: тонкого (около 1 мкм), осажденного в вакууме, и толстого (до 8-10 мкм), полученного путем гальванического наращивания. В качестве адгезионного подслоя используется хром или никром, а для защиты используют золото или серебро. Структура и используемые материалы для контактных площадок пленочных схем СВЧ практически аналогичны микрополосковым линиям.

Основные требования, которые предъявляются к резистивным материалам, следующие: величина удельного сопротивления 50 - 1000 Ом/Д; высокая стабильность; малая величина температурного коэффициента сопротивления, способность к образованию однородной структуры, способность к химическому травлению, хорошая адгезия с подложкой. В качестве резистивного слоя в схемах СВЧ применяют 4 группы материалов, общие свойства которых рассмотрены в подразделе 4.2. данного учебного пособия, а их пригодность для схем СВЧ – в [10].

При выборе диэлектриков для изготовления конденсаторов схем СВЧ необходимо учитывать следующие требования: высокую воспроизводимость свойств; низкие диэлектрические потери на СВЧ; высокую пробивную прочность; высокую диэлектрическую проницаемость, хорошую температурную стабильность и химическую стойкость при эксплуатации; минимальную гигроскопичность; температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), близкий к ТКЛР подложки и металлических пленок, и др.

Наиболее широко используются пленки монооксида кремния SiO, которая сублимирует при температуре 1100 - 1300°C. На свойства получаемых пленок SiO сильно влияют технологические условия получения. Плохая воспроизводимость характеристик пленок SiO объясняется наличием в них таких соединений кремния, как SiO₂, Si₂O₃, имеющих

различные электрофизические характеристики. Пленки SiO_2 в основном используют для получения конденсаторов, работающих при повышенных температурах.

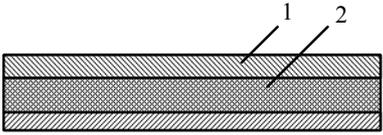
На практике часто применяют пленки Al_2O_3 и Ta_2O_5 , получаемые анодированием пленок Al и Ta. Преимуществом пленок Ta_2O_5 являются их высокая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon = 25$) и возможность получения больших удельных емкостей ($0,1 - 0,2 \text{ мкФ/см}^2$). Однако частотный диапазон этих элементов невелик ($0,1 - 1,0 \text{ МГц}$) вследствие высокого сопротивления нижней танталовой обкладки. Особенностью применения пленок Ta_2O_5 в схемах СВЧ является трудность совмещения вакуумно - термического метода получения резистивных и проводящих элементов с электрохимическим методом получения диэлектрической пленки Ta_2O_5 . Для обеспечения высокой адгезии верхней обкладки конденсатора к Ta_2O_5 применяют двухслойные системы Cr - Au, Cr - Al.

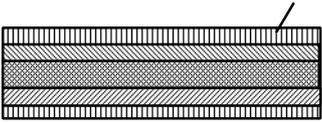
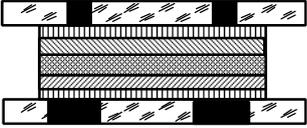
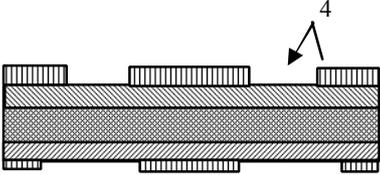
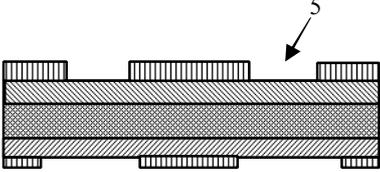
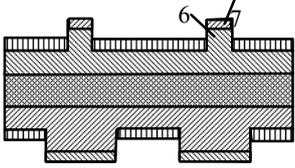
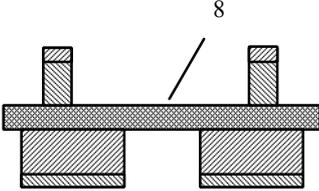
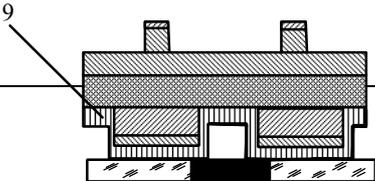
Простоту нанесения пленок Al и процесса анодирования используют при получении конденсаторов с диэлектриком Al_2O_3 . Несмотря на небольшую величину относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 8-9$), пленки Al_2O_3 имеют высокую воспроизводимость и стабильность. В этом случае проводники, обкладки конденсаторов и диэлектрические пленки изготавливают обычно на основе одного и того же материала. Система Al - Al_2O_3 отличается термодинамической устойчивостью во времени и малокритична к технологическим факторам при анодировании.

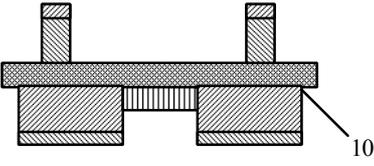
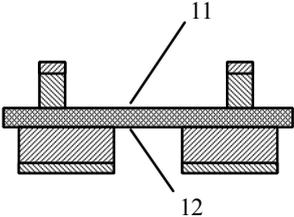
Способы формирования рисунка пленочных элементов рассмотрены в разделе 2, а способы получения пленок рассмотрены в разделе 3 данного учебного пособия.

В таблице 6.1. приведены последовательные этапы процессов: напыления в вакууме, фотолитографической обработки, селективного травления и электрохимического осаждения, используемые при изготовлении двусторонних пленочных схем, содержащих МПЛ на основе структуры Cr - Cu - Au и резисторы на основе пленок хрома.

Таблица 6.1. – Техмаршрут изготовления тонкопленочной ИМС

Выполняемая операция	Содержание операции
	<p>Напыление в вакууме 1 структуры «хром-медь-хром», 2 – с двух сторон подложки</p>

	<p>a — формирование микрополосковых линий: 3 — нанесение и сушка фоторезистора «ФН-11»</p>
	<p>Экспонирование поочередно с двух сторон</p>
	<p>4 — проявление и сушка слоя фоторезиста</p>
	<p>5 — травление хрома с двух сторон</p>
	<p>6 — гальваническое наращивание меди, 7 — золота в «окнах» фоторезистивной маски</p>
	<p>Снятие фоторезиста и травление слоев 8 — хрома и меди</p>
	<p>б — формирование резисторов: 9 — нанесение фоторезиста «ФП-383» и</p>

	экспонирование
	<i>10</i> – проявление фоторезиста «ФП-383»
	<i>11</i> – травление резистивного слоя <i>12</i> – снятие фоторезиста «ФП-383»

Технологический процесс изготовления пленочных элементов должен обеспечить заданные точность их геометрических размеров и определенные электрофизические параметры, которые зависят от технологических методов и способов их изготовления и режимов отдельных операций. На электрические характеристики тонких пленок влияют состав и давление остаточного газа, скорость испарения, температура подложки и др. [10].

6.2. Тонкослойные оптические покрытия

6.2.1. Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра.

В настоящее время для линз и окон почти всех оптических приборов, работающих в видимой и инфракрасной областях спектра, используются просветляющие покрытия [11,12]. Просветление поверхностей элементов оптических систем используются по двум причинам. Во-первых, если оптическая система состоит из элементов с высокими показателями преломления и если количество элементов велико, потери света из-за отражений могут стать недопустимо большими. Во-вторых, в плоскость изображения попадает свет, претерпевший много-

кратные отражения от поверхностей элементов, что приводит к уменьшению контраста и четкости изображения.

На рис.6.1. приведена система обозначений, принятая для показателя преломления и коэффициентов отражения Френеля. Показатели преломления окружающей среды и подложки обозначены через n_0 и n_s соответственно, а слои нумеруются по порядку от наружного слоя к подложке.

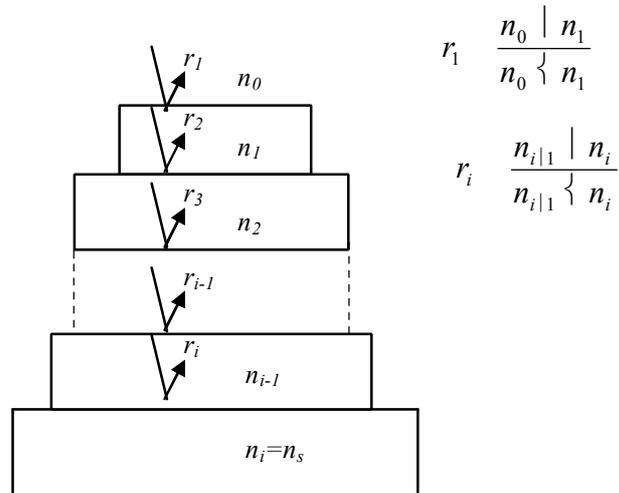


Рис. 6.1. Обозначения, принятые для коэффициентов Френеля r и показателей преломления n .

Для однослойных просветляющих покрытий с оптической толщиной, равной $\lambda/4$, условием отсутствия отражения будет

$$n_1^2 = n_0 n_s.$$

Интенсивность отраженного света характеризуется коэффициентом

$$R = |r|^2 = \frac{n_1^2 - n_0 n_s}{n_1^2 + n_0 n_s}.$$

При выполнении условия $n_1^2 = n_0 n_s$ коэффициент отражения $R = 0$. Отклонение показателя преломления пленки от оптимального значения даже на 10% приводит к отражению примерно в 1%. От-

ражение пленки, оптическая толщина которой составляет $\lambda/2$ или любое четное число $\lambda/4$, равно отражению подложки без покрытия. Если $n_1 = n_s$, то отражение максимально, когда толщина пленки кратна $\lambda/2$. Это означает, что коэффициент отражения однослойного просветляющего покрытия не будет превышать коэффициента отражения чистой подложки. С другой стороны при $n_1 = n_s$ минимум коэффициента отражения совпадает с коэффициентом отражения чистой подложки, а максимум определяется приведенным выше уравнением.

Для двухслойных покрытий можно рассмотреть следующие случаи.

Случай 1 – два слоя с одинаковыми оптическими толщинами $n_1 d_1 = n_2 d_2$ (d – геометрическая толщина пленки) и $n_0 = n_s$. Это будет обычный случай двойного слоя между одинаковыми средами: толщина каждого слоя кратна $\lambda/2$.

Случай 2 – $n_1^2 n_s = n_2^2 n_0$. это соответствует двухслойному покрытию, дающему нулевое отражение, когда оптическая толщина каждого слоя составляет нечетное число $\lambda/4$. Если не выполнено условие для показателей преломления, минимальное отражение двухслойного покрытия $\lambda/4$ – пленками не равно нулю. В этом случае минимальное отражение можно вычислить по формуле:

$$R_{\lambda/4} = \frac{n_1^2 n_s - n_2^2 n_0}{n_1^2 n_s + n_2^2 n_0}.$$

Случай 3 – с покрытием из двух пленок равной оптической толщины можно получить широкую спектральную область низких значений коэффициента отражения, если показатели преломления удовлетворяют соотношению $n_1 n_2 = n_0 n_s$.

Широкая спектральная область с низким и более постоянным отражением может быть получена при использовании трехслойных покрытий. Для системы с толщиной каждого слоя $\lambda/4$ отражение равно нулю в двух случаях:

$$1) n_1 n_3 = n_2^2 n_0 n_s.$$

Если показатели преломления удовлетворяют этому условию, то имеется три нулевых минимума отражения: один на θ_0 и по одному с каждой стороны от θ_0 .

$$2) n_1 n_3 = n_2 \sqrt{n_0 n_s}.$$

Это соотношение является обобщением случая 1, так как теперь n_2 не обязательно должен быть равным $\sqrt{n_0 n_s}$. Такой более широкий выбор n_2 позволяет использовать в качестве практического просветляющего покрытия для стекла систему $\lambda/4 - \lambda/4 - \lambda/4$.

Для системы, в которой толщина верхнего слоя равна $\lambda/4$, среднего – $\lambda/2$, внутреннего – $\lambda/4$, отражение будет равно нулю, если показатели преломления удовлетворяют условию $n_1^2 n_s = n_3^2 n_0$.

Для изготовления просветляющих покрытий наиболее подходящими по своим оптическим свойствам и долговечностью являются следующие материалы: MgF_2 (1,38), SiO_2 (1,46), SiO (1,55-2), Al_2O_3 (1,60), ZrO_2 (2,1), ZnS (2,35). В скобках указаны показатели преломления для $\lambda = 550$ нм. Эти материалы можно получать путем напыления в высоком вакууме.

Пленки MgF_2 , напыленные с высокой скоростью на нагретую подложку из стекла ($n_s = 1,5$) образуют долговечное покрытие, снижающее отражение подложки с 4 до 1,3%. В двухслойных покрытиях первый слой от подложки напыляют с малой скоростью и показателем преломления 1,7, а наружный слой – MgF_2 .

Для получения широкой спектральной области малого отражения используют покрытия, состоящие из пленки толщиной $\lambda/2$ с большим показателем преломления, лежащей на стекле и пленки толщиной $\lambda/4$ с малым показателем преломления (внешний слой).

Многие прозрачные в ИК – области материалы, особенно те, которые сильно поглощают в видимой области спектра, обладают высокими показателями преломления в ИК – области. В первую очередь это относится к таким полупроводникам, как Si, Ge, InAs и InSb, которые в

настоящее время широко используются в инфракрасной технике для окон, линз и длинноволновых пропускающих фильтров. Их высокие показатели преломления приводят к значительным потерям вследствие френелевского отражения, так что даже тонкие непоглощающие пластинки из этих материалов пропускают лишь 50% или даже меньшую часть падающего излучения. Следовательно, для получения большого пропускания и хорошего изображения при применении оптических деталей из этих материалов необходимы просветляющие покрытия.

Оказывается, что в ближней ИК – области наиболее подходящим покрытием для кремния, германия и InAs является окись кремния SiO. Она не только эффективно снижает отражение, но и обладает хорошей адгезией и большим сопротивлением истиранию.

6.2.2. Отражающие покрытия для вакуумного ультрафиолетового излучения.

За последние годы наблюдается резкое возрастание интереса к физическим проблемам, связанным с измерением и использованием вакуумного ультрафиолетового излучения. Для этой области излучения требуются прозрачные материалы для длин волн короче 105 нм, а также фильтры и зеркала. Хорошо известно, что для 200 нм алюминий является зеркалом с коэффициентом отражения 90%, который уменьшается при меньших длинах волн. Термин «вакуумный ультрафиолет» будет относиться к области длин волн от 50 до 200 нм [13].

Коэффициент отражения алюминия, напыленного путем термического испарения в вакууме, зависит от скорости осаждения и давления остаточного газа в процессе напыления. Большие скорости осаждения и лучший вакуум приводят к пленкам, на которых вырастают более тонкие окисные слои, что способствует увеличению коэффициента отражения.

Алюминий имеет коэффициент отражения примерно 90% и выше во всем диапазоне длин волн от ИК области до 140 нм, постепенно уменьшаясь до 86% при 102,6 нм. При 121,6 нм коэффициент отражения алюминия уменьшается до 40% после двухчасового пребывания на воздухе. За это время образуется слой окисла толщиной примерно 2 нм. Отсюда видно, что при определении отражения в области вакуумного ультрафиолета нельзя пренебрегать влиянием окисных или других загрязняющих пленок, даже очень малой толщины.

В качестве отражающих покрытий могут применяться пленки германия, золота и платины. Наивысший коэффициент отражения пле-

нок германия составляет примерно 54% при 121,6 нм, который уменьшался после выдержки германия в вакууме или на воздухе. Резкое уменьшение отражения со временем пребывания в вакууме непосредственно после испарения наблюдается не для всех напыленных материалов. К нечувствительным материалам относятся, в частности, золото и платина, для которых вначале наблюдается небольшое изменение отражения, а затем эта величина стабилизируется.

Для улучшения характеристик отражения применяется пленочная система, например алюминий с защитной пленкой MgF_2 . Высокий коэффициент отражения в области вакуумного ультрафиолета покрытий MgF_2 на алюминии не уменьшается со временем при нормальных условиях хранения.

Во многих приборах для вакуумного ультрафиолета значительную трудность представляет устранение значительного по интенсивности длинноволнового рассеянного света. Для этих целей желательно иметь покрытия, которые бы обладали очень низким коэффициентом отражения в видимой и ближней ультрафиолетовой областях и высоким коэффициентом отражения в области вакуумного ультрафиолета. Например пленка MgF_2 толщиной 25 нм, осажденная на пленку ZnS толщиной 80 нм, увеличивает отражение при 121,6 нм от 33 до 46% и значительно уменьшает отражение для больших длин волн.

6.2.3. Диэлектрические многослойные пленочные системы

К оптическим многослойным пленочным системам из диэлектрических материалов предъявляются постоянно возрастающие требования: желание получения определенных параметров отражения или пропускания при минимальных суммарных потерях (поглощение A , рассеяние S), а также при этом желание получения высоких механических качеств.

Бурное развитие лазеров высокой мощности, а также большой промышленный спрос на специальные отрезающие и линейные фильтры потребовали создания автоматически работающих установок для напыления и катодного распыления, которые могут производить любые оптические пленочные системы с достаточной воспроизводимостью.

С помощью электроннолучевого напыления или катодного распыления сегодня изготавливаются оптические пленки из двуокиси кремния (SiO_2) и двуокиси титана (TiO_2).

Многослойные пленочные системы характеризуются следующими параметрами:

- а) показателем преломления n

- | | |
|-----------------|---|
| б) пропусканием | T |
| в) отражением | R |
| г) рассеянием | S |
| д) поглощением | A |

Эти физические параметры связаны друг с другом уравнением: $T + R + A + S = 1$.

В качестве примера на рис. 6.2. показана кривая пропускания лазерного зеркала, состоящего из 21 отдельной пленки. В качестве подложки использовалось стекло с показателем преломления $n=1,52$.

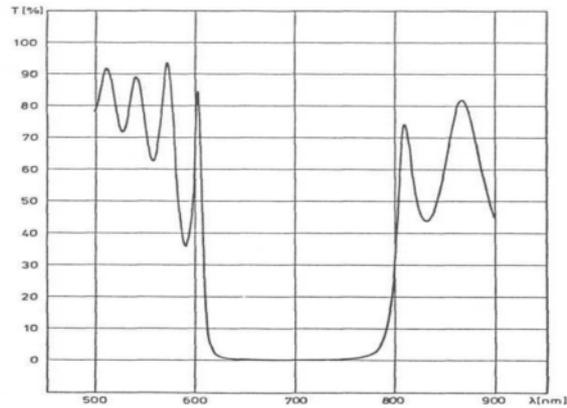


Рис. 6.2. Кривая пропускания лазерного зеркала.

Зеркало было изготовлено при помощи электроннолучевой пушки при давлении кислорода $p = 5 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре подложки 100 С. Были получены следующие данные по пленкам из SiO_2 / TiO_2 :
 $A=0,12$; $T = 0,04$; $R = 99,78$; $S = 0,06$.

Область применения покрытий:

- лазерная техника;
- оптико-электронные приборы;
- спектральная и спектрофотометрическая аппаратура;
- тепловизионные приборы и др.

В настоящее время накоплен опыт по созданию покрытий для оптических элементов лазеров, в том числе для управляемого термоядерного синтеза, по нанесению покрытий на крупногабаритную оптику (диаметр подложки до 600мм), по созданию светоделительных покрытий с заданным соотношением R/T , фильтрующих покрытий и др.

7 Методические указания по самостоятельной работе студентов.

7.1 Методические указания по выполнению контрольных работ.

В пособии принять следующие обозначения и сокращения:

- интегральная микросхема – ИМС;
- фотолитография – ФЛ;
- фоторезисты –ФР;
- фотошаблон – ФШ.

В первую контрольную работу включены следующие темы:

- 1) фоторезисты;
- 2) разрешающая способность ФЛ;
- 3) фотолитография;
- 4) изготовление ФШ;
- 5) получение рисунка ИМС.

Сведения по фотолитографии содержатся в разделе 2. Следует обратить внимание на следующее. Фотошаблоны могут быть с негативным и позитивным изображениями по отношению к тому рисунку, который надо получить на подложке. Например, если надо сформировать окно в слое SiO_2 , то в позитивном ФШ на этом месте должен быть светлый участок. Если надо получить тонкопленочный резистор или другой элемент в центре подложки, то в позитивном ФШ на этом месте должен быть темный участок. Выбор ФР (негативный или позитивный) должен быть согласован с ФШ.

Технология изготовления ФШ по оптико-механическому методу включает следующие операции:

- изготовление оригинала;
- изготовление промежуточного ФШ;
- изготовление эталонного ФШ;
- изготовление рабочего ФШ.

На первом этапе вычерчивается на координатографе оригинал с большим увеличением: для полупроводниковым ИМС – в масштабе от М200:1 до М1000:1, а для пленочных схем – от М10:1 до М100:1. На втором этапе изображение оригинала переносится на редуциционной установке на фотопластину с уменьшением. После проявления фотопластины получается промежуточный ФШ с единичным изображением ИМС. Масштаб уменьшения выбирается так, чтобы промежуточный фотошаблон имел масштаб М10:1 или М5:1.

Изображение с промежуточного ФШ переносится на фотопластину на фотоповторителе с уменьшением в заданное число раз до получения конечных размеров элементов (М1:1). Одновременно рисунок промежуточного ФШ размножается по всему полю фотопластины столько раз, сколько требуется затем готовых схем на подложке (групповой ФШ). После операции проявления получаем эталонный ФШ, в котором рисунок сформирован в эмульсионном слое с размерами элементов в М1:1. Эталонный ФШ нельзя использовать в качестве рабочего, так как эмульсионный слой быстро повреждается, накапливаются дефекты, и он становится непригодным к использованию. Рабочие ФШ делаются с эталонного ФШ на стеклянной подложке в технологическом слое с помощью контактной ФЛ.

Вторая контрольная работа включает в себя следующие темы:

- 1) термическое испарение в вакууме;
- 2) режимы напыления пленок;
- 3) ионно-плазменное распыление (ИПР);
- 4) тонкопленочные элементы;
- 5) технология тонкопленочных элементов;
- 6) типовые технологические процессы изготовления ИМС.

Термическое испарение в вакууме достаточно подробно рассмотрено в учебном пособии в разделе 3.1. Распределение толщины пленки по подложке оценивается отношением толщины пленки в любой точке подложки d к толщине в центре подложке - d_0 , т.е. $\frac{d}{d_0}$. Если

это отношение, например, равно 0,85, то это соответствует разбросу толщины 15%. Во всех задачах выбирается стандартная подложка 60×48 мм, которая устанавливается симметрично относительно испарителя на расстоянии h от него, т.е. положение испарителя соответствует центру подложки.

При расчете скорости испарения по формуле (3.7) давление p_s следует подставлять в Па, массу – в кг, температуру испарения T_u – в К. Условная температура испарения соответствует давлению насыщенных паров $p_s=1,33$ Па. Необходимые для расчетов константы выбираются из соответствующих приложений.

7.2 Примеры решения задач.

Тема: «Термическое испарение в вакууме».

1) Рассчитать давление насыщенных паров при термическом испарении серебра при температуре 1320 К.

Решение.

Давление насыщенных паров рассчитывается по формуле:

$$\lg p_s = A - \frac{B}{T_u},$$

где p_s – давление насыщенного пара, Па;

A, B – постоянные, приведенные в приложении 3.

Для расчета p_s запишем

$$p_s = 10^{A - \frac{B}{T_u}}$$

$$\text{Тогда } p_s = 10^{10,78 - \frac{14090}{1320}} = 1,28 \text{ Па}$$

$$\text{Ответ: } p_s = 1,28 \text{ Па}$$

2) Рассчитать скорость испарения серебра при температуре 1320 К.

Решение.

Скорость испарения рассчитывается по формуле:

$$W_u = p_s \sqrt{\frac{m}{2kT_u}},$$

где k – постоянная Больцмана;

m – масса молекулы.

При заданной температуре испарения рассчитывается давление p_s . Воспользуемся значением p_s из предыдущей задачи. Массу молекулы рассчитываем следующим образом: из таблицы Менделеева (приложение 2) находим молекулярный вес $m = 107,9 \text{ а.е.м.}$. Учитываем, что $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, и получаем массу молекулы серебра $m = 107,9 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 1,79 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$.

$$W_u = 1,28 \sqrt{\frac{1,79 \cdot 10^{125}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,38 \cdot 10^{23} \cdot 1320}} = 1,28 \sqrt{\frac{1,79 \cdot 10^{15}}{6,28 \cdot 1,38 \cdot 1,32}} = 1,58 \cdot 10^{13} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\text{Ответ: } W_u = 1,58 \cdot 10^{13} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

3) Рассчитать скорость конденсации и время напыления пленок серебра толщиной 0,5 мкм.

Скорость конденсации для центра подложек ($x = y = 0$) рассчитывается по формуле

$$W_k = \frac{W_u \cdot ds_1}{4} \cdot \frac{1}{h^2} \text{ - для точечного испарителя,}$$

где W_u - скорость испарения;

ds_1 - площадь испарителя;

ρ - плотность вещества;

h - расстояние.

$$W_k = \frac{W_u \cdot ds_1}{4} \cdot \frac{1}{h^2} \text{ - для поверхностного испарителя.}$$

С другой стороны, скорость конденсации есть скорость роста пленок, т.е.

$$W_k = \frac{d}{t},$$

где d - толщина;

t - время.

Решение.

Выбираем поверхностный испаритель с площадью $ds_1 = 1 \text{ см}^2$ и расстояние от испарителя до подложки - 10 см . Плотность серебра выберем из приложения 3: $10,49 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Воспользуемся значением скорости испарения из предыдущей задачи

$$W_u = 1,58 \cdot 10^{13} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Подставляем в формулу все значения в системе СИ:

$$W_k = \frac{1,58 \cdot 10^{13} \cdot 10^{14}}{3,14 \cdot 10,49 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{(10^{11})^2} \cdot \frac{1,58 \cdot 10^{19}}{3,14 \cdot 1,049} = 4,8 \cdot 10^{10} \text{ м/с}$$

Для конденсации пленок серебра толщиной 0,5 мкм потребуется время напыления:

$$t = \frac{d}{W_k} = \frac{0,5 \cdot 10^6}{4,8 \cdot 10^{10}} = 1,04 \cdot 10^3 \text{ с}$$

Ответ: 1040 с или 17,3 мин.

4) Рассчитать разброс толщины пленки на стандартной подложке при следующих условиях: испаритель – поверхностный; расстояние $h = 10 \text{ см}$.

Выбираем стандартную подложку с размерами $60 \times 48 \text{ мм}$, т.е. $x = 30 \text{ мм}$, $y = 24 \text{ мм}$. Воспользовавшись формулой (3.21):

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{1 \left\{ \frac{x^2}{h^2} \right\} \left\{ \frac{y^2}{h^2} \right\}^2},$$

где d , d_0 – толщина пленки соответственно в произвольной точке и в центре подложки.

Решение.

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{1 \left\{ \frac{3^2}{10^2} \right\} \left\{ \frac{2,4^2}{10^2} \right\}^2} = \frac{1}{\left[1 \left\{ 0,09 \right\} \left\{ 0,0576 \right\}^2 \right]} = 0,76$$

Таким образом, толщина на краю подложки составляет 76% от толщины в центре подложки. Разброс составляет $(1-0,76)=0,24$

Ответ: 24%.

Тема: «Ионно-плазменное распыление».

1) Рассчитать скорость распыления мишени из тантала ионами аргона с энергией 1 кэВ при плотности ионного тока 10 А/см^2 . Коэффициент распыления тантала – $S=1,18 \text{ ат/ион}$.

Решение.

Скорость распыления рассчитывается по формуле

$$V_p = \frac{N_u S}{N_0},$$

где N_u – число ионов, падающих на единицу площади в единицу времени.

Величина N_u зависит от плотности ионного тока j , на мишени.

$$N_u = \frac{j}{e},$$

где e – заряд электрона.

Атомную плотность мишени берем из приложения 3. Для тантала $N_0 = 5,52 \cdot 10^{28} \text{ ат/м}^3$.

Решение.

$$N_u = \frac{10}{1,6 \cdot 10^{19}} = 6,25 \cdot 10^{19} \text{ ион/м}^2 \text{ с},$$

$$V_p = \frac{6,25 \cdot 10^{19} \cdot 1,18}{5,52 \cdot 10^{28}} = 1,34 \cdot 10^9 \text{ м/с}.$$

Ответ: $V_p = 1,34 \cdot 10^9 \text{ м/с}$

1) Рассчитать коэффициент распыления ванадия ионами аргона с энергией 5 кэВ, используя теорию Зигмунда.

Решение.

Сначала определяем критическую энергию E^* по формуле:

$$E^* = 515 a^2 Z_1 Z_2 \frac{M_1 \sqrt{M_2}}{M_2},$$

где a – параметр экранирования;

Z_1, Z_2 – атомные массы соответственно иона и атома мишени.

Параметр экранирования a рассчитывается, как

$$a = \frac{0,085 a_0}{\left[Z_1^{2/3} \sqrt{Z_2^{2/3}} \right]^{1/2}},$$

где a_0 – первый борковский радиус атома водорода.

Берем a_0 из приложения 1 $a_0 = 5,29 \cdot 10^{11} \text{ м}$. Из таблицы Менделеева (приложение 2) для аргона - $Z_1 = 18$, $M_1 = 40$; для ванадия - $Z_2 = 23$, $M_2 = 51$.

$$a = \frac{0,085 \cdot 5,29 \cdot 10^{11}}{\left[18^{2/3} \cdot 23^{2/3}\right]^{1/2}} = 1,21 \cdot 10^{11} \text{ м}$$

$$E^* = 515 \left[1,21 \cdot 10^{11}\right]^2 \cdot 18 \cdot 23 \cdot \frac{40 \cdot 51}{51} = 5,6 \cdot 10^{17} \text{ Дж.}$$

Энергия иона составляет, $E = 5 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 8 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$, что больше критической энергии. В области энергий $E > E^*$ коэффициент распыления рассчитывается по формуле (3,39):

$$S = 4,2 \cdot 10^{18} \frac{Y(E)}{2 E_{\text{субл}}}$$

Величина $Y(E)$ представляет собой ядерное тормозное сечение ионов и рассчитывается по формуле (3.40):

$$Y(E) = \frac{Z_1 Z_2 e^2 a M_1}{(M_1 \cdot M_2)^0} Y(E)$$

Сначала рассчитываем приведенную энергию по формуле (3.41):

$$\frac{4 \cdot M_2 \cdot a \cdot E}{(M_1 \cdot M_2) \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2} = \frac{4 \cdot 8,85 \cdot 10^{12} \cdot 51 \cdot 1,21 \cdot 10^{11} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{19}}{91 \cdot 18 \cdot 23 \cdot (1,6 \cdot 10^{19})^2} = 5,69 \cdot 10^{12}$$

Приведенное ядерное тормозное сечение ионов для данного значения $0,057$ находим из таблицы 3.1, аппроксимируя участок зависимости между $0,04$ и $0,1$. Получаем $Y(E) = 0,34$.

Далее рассчитываем

$$Y(E) = \frac{18 \cdot 23 \cdot (1,6 \cdot 10^{19})^2 \cdot 1,21 \cdot 10^{11}}{91 \cdot 8,85 \cdot 10^{12}} \cdot 0,34 \cdot \frac{436 \cdot 10^{19} \cdot 10^{19} \cdot 10^{11}}{805,35 \cdot 10^{12}} = 5,4 \cdot 10^{38}$$

Энергия сублимации для ванадия составляет $3,7 \text{ эВ}$.

$$\text{Тогда: } S = 4,2 \cdot 10^{18} \cdot \frac{5,4 \cdot 10^{138}}{2 \cdot 3,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{119}} = 0,19$$

Ответ: $S = 0,19$.

7.3 Задачи для самостоятельного решения.

Тема: «Термическое испарение в вакууме».

1) Рассчитать скорость испарения алюминия при следующих температурах:

- а) при условной температуре испарения;
- б) на 10% выше условной;
- в) на 20% выше условной;
- г) на 30% выше условной.

2) Рассчитать скорость испарения различных металлов при условных температурах испарения.

- а) медь;
- б) молибден;
- в) золото;
- г) вольфрам.

3) Рассчитать время напыления пленок меди толщиной 0,5 мкм в центре подложки. Медь испаряется из поверхностного испарителя площадью 1 см² при расстоянии от испарителя до подложки - 10 см, при следующих скоростях испарения:

- а) $1 \cdot 10^{13} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
- б) $5 \cdot 10^{13} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
- в) $7 \cdot 10^{13} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
- г) $2 \cdot 10^{13} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$.

Тема: «Ионно-плазменное распыление».

1) Какой тип столкновения имеет место при распылении:

- а) распыляемый материал – медь; ионы – водород с энергией 1 кэВ.
- б) распыляемый материал – медь; ионы – ртуть с энергией 10 кэВ.
- в) распыляемый материал – алюминий; ионы – аргон с энергией 5 кэВ.
- г) распыляемый материал – золото; ионы – аргон с энергией 5 кэВ.

2) Представить зависимость коэффициента распыления S от энергии иона в диапазоне 50-150 эВ для мишени из меди при бомбардировке ионами аргона, если при $E = 50\text{эВ}$ $S = 0,05\text{атом/ион}$.

3) Представить зависимость S от E в диапазоне от пороговой энергии до 200 эВ. Мишень – тантал; ионы – аргон. Коэффициент распыления $S = 0,01$ при $E = 50\text{эВ}$; $S = 0,1$ при $E = 100\text{эВ}$; $S = 0,4$ при $E = 200\text{эВ}$.

4) Рассчитать зависимость S от угла падения иона на мишень φ в диапазоне $0 \leq \varphi \leq 50^\circ$, если $S_0 = 1,2$.

5) Как зависит коэффициент распыления от количества ионов, падающих на мишень:

- увеличивается;
- уменьшается;
- не меняется.

6) Рассчитать скорость распыления при $j = 10\text{А/м}^2$ для следующих мишеней:

- из кремния с коэффициентом $S = 1,45$;
- из алюминия с коэффициентом $S = 1,75$;
- из кремния с коэффициентом $S = 4,34$;
- из тантала с коэффициентом $S = 1,48$.

Тема: «Элементы тонкопленочных ИМС».

1) Выбрать резистивный материал для изготовления тонкопленочных резисторов.

Вариант Параметры	1	2	3	4	5
$R, \text{Ом}$	200	1000	1000	800	1200
$l, \text{мкм}$	60	200	100	180	210
$b, \text{мкм}$	30	40	50	60	70

2) Рассчитать толщину диэлектрической пленки для тонкопленочных конденсаторов.

Вариант	1	2	3	4	5
Рабочее напряжение, $U_p, В$	15	20	15	25	20
Электрическая прочность, $E_{np}, В/см$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^5$
Коэффициент запаса, K_3	3	3	2	4	2

7.4. Задания к контрольной работе №2

1. Рассчитать давление насыщенных паров при термическом испарении материалов.

№варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Материал	<i>Ag</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Au</i>	<i>Pt</i>	<i>Ti</i>	<i>W</i>	<i>Cr</i>	<i>Ta</i>
$T_u, К$	1320	1423	1546	2800	1738	2360	1832	3580	1478	3340

2. Рассчитать скорость термического испарения материалов.

№варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Материал	<i>Ag</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Au</i>	<i>Pt</i>	<i>Ti</i>	<i>W</i>	<i>Cr</i>	<i>Ta</i>
$T_u, К$	1452	1540	1700	3080	1912	2596	2000	3940	1628	3670

3. Какой тип столкновений имеет место при ионном распылении? Расчеты сделать по теории Пиза.

№варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расп. материал	<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Au</i>	<i>Ni</i>	<i>Pt</i>	<i>Cu</i>	<i>Ti</i>	<i>Mo</i>
Ионы	H_2	Hg	<i>Ar</i>	<i>Ar</i>	<i>Ar</i>	<i>He</i>	<i>Ar</i>	O_2	<i>Ar</i>	<i>Ar</i>
Эн.ионов, кэВ	1	10	5	100	5	10	10	1	5	5

4. Рассчитать время напыления пленок в центре подложки. Принять для ИПР скорость конденсации равной скорости распыления.

№варианта	1	2	3	4	5	7	8	9	10	
Материал	<i>Ag</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Au</i>	<i>Pt</i>	<i>Ti</i>	<i>W</i>	<i>Cr</i>	<i>Ta</i>
Метод напы-	Исп.	Исп.	Исп.	ИПР	ИПР	ИПР	Исп.	ИПР	Исп.	ИПР

ления										
Ск-ть исп., $кг/м^2с$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$				$4,2 \cdot 10^{-3}$		$3,2 \cdot 10^{-3}$	
Толщина пленки, $мкм$	1	0,7	1	0,3	0,5	0,5	0,3	0,1	0,1	0,3
Тип испари- теля	повер.	точен.	повер.				точен.		точен.	
Площ. исп., $см^2$	1	0,5	1				0,8		0,8	
Расстояние h , $см$	8	10	8				11		12	
Кэф. расп., $ат/ион$				1,68	2,45	1,81		1,83		1,1
Плотн.ион. тока на мишени, $А/см^2$				15	10	10		10		15

5. Выбрать резистивный материал для изготовления тонкопленочных резисторов

№варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R, Ом$	200	1000	1000	800	1200	1400	2500	3000	2000	3000
K_{ϕ}	2	5	2	3	3	2	2	2	20	10

6. Рассчитать погрешность изготовления тонкопленочного резистора (по ширине), используя прямую контактную маску. Ошибка воспроизведения толщины d 5%; ошибка экспонирования $b_{экс}$ 0,5 мкм; ошибка проявления $b_{проявл}$ 1 мкм.

№варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$b_p, мкм$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$d, мкм$	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$b_{рфи}, мкм$	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5

7. Рассчитать техмаршрут изготовления фрагмента тонкопленочной интегральной микросхемы, состоящей из указанных элементов.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Параметры										
Резисторы	Cr		Ti			Mo	Ta		Cr	W

Контакты, проводники	<i>Al</i>		<i>Al</i>	<i>Al</i>		<i>Al</i>	<i>Au</i>		<i>Al</i>	<i>Al</i>
Обкладки		<i>Ta, Au</i>			<i>Al</i>			<i>Al</i>		
Конденсаторы, диэлектрик		Ta_2O_5			<i>SiO</i>			TiO_2	Al_2O_3	
Индуктивности				<i>Cr-Cu-Ni</i>						
Способы получения пленок	ТИ	ИПР	ТИ	ТИ	ТИ	ТИ	ИПР	ТИ	ТИ	ИПР
Фоторезисты	Позит.	Негат.	Позит.	Негат.	Позит.	Негат.	Позит.	Негат.	Позит.	Негат.
Метод получения рисунка - контактные маски	прямые	прямые и обратные	прямые	прямые и обратные	прямые и обратные	прямые	прямые	прямые и обратные	прямые	прямые

ТИ – термическое испарение;

ИПР – ионно – плазменное распыление.

8. Определить размеры платы для отдельной ИМС, если на стандартной подложке из ситалла одновременно формируются идентичные тонкопленочные схемы в указанном количестве:

- 1) 80; 2) 12; 3) 24; 4) 48; 5) 20;
6) 32; 7) 40; 8) 36; 9) 60; 10) 30.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. - М.: Высшая школа, 1986. -464с.
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем. - М.: Высшая школа, 1986. -315с.
3. Радионов Ю.А. Литография в производстве интегральных микросхем. - Минск: Дизайн ПРО, 1998. -95с.
4. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: Учеб.пособие для ПТУ. Кн.8. Литографические процессы / В.В.Мартынов, Т.Е.Базарова. - М.: Высшая школа, 1990. -120с.
5. Гимпельсон В.Д., Радионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. - М.: Машиностроение, 1976. -328с.
6. Данилина Т.И. Перспективные технологии производства СБИС. - Томск: ТМЦ ДО, 2000. -99с.
7. Технология тонких пленок. Справочник под ред. Л.Майссела, Р.Глэнга. - М.: Сов.радио, 1977. Т.1. -662с.
8. Данилина Т.И., Смирнов С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС. - Томск: Томск. ун-т систем управления и радиоэлектроники. 2000. -140с.
9. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Ионное травление микроструктур. - М.; Сов.радио, 1979. -104с.
10. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технология гибридных интегральных схем СВЧ. – М., Высшая школа, 1980. – 285с.
11. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. – Л., Машиностроение. – 1977. – 264с.
12. Кокс Дж.Т., Хасс Г. Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра. - Вкн.: Физика тонких пленок, М.: Мир, 1967. Т.2 - с. 186 – 253
13. Мадден Р.П. Изготовление и исследование отражающих покрытий для вакуумного ультрафиолетового излучения. Вкн.: Физика тонких пленок – М.: Мир. – 1967. Т.1 - с. 152 – 223

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Основные физические постоянные

Постоянные	Символ	Значение	Единицы СИ
Элементарный заряд	e	1,6	10^{19} Кл
Число Авогадро	N_A	6,02	10^{23} моль ⁻¹
Масса покоя электрона	m_e	9,1	10^{31} кг
Постоянная Планка	h	6,62	10^{34} Дж·с
Атомная единица массы	<i>a.e.m.</i>	1,66	10^{-27} кг
Газовая постоянная	R	8,3	Дж моль ⁻¹ град ⁻¹
Постоянная Больцмана	k	1,38	10^{23} Дж град ⁻¹
Первый радиус Бора	a_0	5,67	10^{11} м
Диэлектрическая проницаемость вакуума	ϵ_0	8,85	10^{12} Ф м ⁻¹

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

1 Дж = 0,24 кал; 1 кал = 4,19 Дж

1 эВ = $1,6 \cdot 10^{12}$ эрг $1,6 \cdot 10^{19}$ Дж $3,83 \cdot 10^{20}$ кал

1 м = 10^{10} А° 10^9 нм 10^6 мкм 10^3 мм 10^2 см

Заряд электрона $e = 4,8 \cdot 10^{10}$ СГС = $1,6 \cdot 10^{19}$ Кл

Газовая постоянная $R = 8,31$ Дж моль⁻¹ К⁻¹ = $1,987$ кал моль⁻¹ К⁻¹

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{23}$ Дж К⁻¹ $8,63 \cdot 10^{15}$ эВ К⁻¹

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

Периоды	Ряды	Группы элементов									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	I	1 H 1,008							2 <i>He</i> 4,0		
		3 <i>Li</i> 6,94	4 <i>Be</i> 9,01	5 <i>B</i> 10,81	6 <i>C</i> 12,0	7 <i>N</i> 14,01	8 <i>O</i> 16,0	9 <i>F</i> 19,0	10 <i>Ne</i> 20,18		
3	III	11 <i>Na</i> 23	12 <i>Mg</i> 24,30	13 <i>Al</i> 26,98	14 <i>Si</i> 28,09	15 <i>P</i> 30,97	16 <i>S</i> 32,06	17 <i>Cl</i> 35,45	18 <i>Ar</i> 40,0		
		19 <i>K</i> 39,10	20 <i>Ca</i> 40,08	21 <i>Sc</i> 44,96	22 <i>Ti</i> 47,90	23 <i>V</i> 50,94	24 <i>Cr</i> 52,0	25 <i>Mn</i> 54,9	26 <i>Fe</i> 55,8	27 <i>Co</i> 58,9	28 <i>Ni</i> 58,7
4	V	29 <i>Cu</i> 63,55	30 <i>Zn</i> 65,38	31 <i>Ga</i> 69,72	32 <i>Ge</i> 72,5	33 <i>As</i> 74,92	34 <i>Se</i> 79,0	35 <i>Br</i> 79,9	36 <i>Kr</i> 83,8		

5	VI	37 <i>Rb</i> 85,5	38 <i>Sr</i> 87,6	39 <i>Y</i> 88,9	40 <i>Zr</i> 91,2	41 <i>Nb</i> 92,9	42 <i>Mo</i> 96,0	43 <i>Tc</i> 98,9	44 <i>Ru</i> 101,0	45 <i>Rh</i> 102,9	46 <i>Pd</i> 106,4
	VII	47 <i>Ag</i> 107,9	48 <i>Cd</i> 112,4	49 <i>In</i> 114,8	50 <i>Sn</i> 118,8	51 <i>Sb</i> 121,8	52 <i>Te</i> 127,6	53 <i>I</i> 126,9	54 <i>Xe</i> 131,3		
6	VIII	55 <i>Cs</i> 132,9	56 <i>Ba</i> 137,3	La-Lu	72 <i>Hf</i> 178,5	73 <i>Ta</i> 180,9	74 <i>W</i> 183,8	75 <i>Re</i> 186,2	76 <i>Os</i> 190,2	77 <i>Ir</i> 192,2	78 <i>Pt</i> 195,0
	IX	79 <i>Au</i> 197	80 <i>Hg</i> 200,6	81 <i>Tl</i> 204,3	82 <i>Pb</i> 207,2	83 <i>Bi</i> 209,0	84 <i>Po</i> (209)	85 <i>At</i> (210)	86 <i>Rn</i> (222)		
7	X	87 <i>Fr</i> (223)	88 <i>Ra</i> 226	Ac-(Lr)	104 <i>Ku</i> (261)	105 <i>Ns</i> (261)					

Приложение 3

Параметры металлов и полупроводников

Материал	Плотность 10^3 , $\text{кг}/\text{м}^3$	Атомная плотность $N_0 \cdot 10^{28}$, $\text{атом}/\text{м}^3$	Условная температура испарения, К	Коэффициенты		Энергия сублимации, $E_{\text{суб}}$, ЭВ
				A	B	
Ag	10,49	5,85	1320	10,78	14090	2,7
Al	2,7	6,04	1423	11,11	15630	3,26
Cu	8,96	8,52	1546	10,84	16580	3,56
Mo	10,2	6,39	2800	10,92	30310	6,9
Au	19,32	5,90	1738	10,77	18520	3,92
Pt	21,5	6,61	2360	11,75	27500	5,56
Ti	4,52	5,66	1832	11,1	20110	4,34
W	19,3	6,09	3580	11,36	40260	8,76
Ni	8,9	9,03	1780	11,67	20600	4,41
Cr	7,19	7,64	1478	12,0	17560	3,68
Si	2,42	5,04	1615	12,32	19700	3,91
Ta	16,6	5,52	3340	12,12	40210	8,7
Ge	5,32	4,53	1520	10,12	15150	3,77
Cd	8,65		538	10,9	5800	
Fe	7,86		1720	12,53	21960	
Zn	6,5		616	11,06	6740	

