**ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ**

**Физика-техникалық факультеті**

**Қатты дене және бейсызық физика кафедрасы**

|  |  |
| --- | --- |
| Келісілген:    Факультет деканы  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Давлетов А.Е.  № \_10\_"\_31\_" \_\_05\_\_ 2013 ж. | Университет Ғылыми-әдістемелік Кеңесінде бекітілді Хаттама №\_\_\_ «\_\_\_\_»\_маусым\_ 2013 ж.  Оқу жұмысы жөніндегі проректор  **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** Ахмед-Заки Д.Ж.  **"\_\_\_\_\_\_\_"\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**2013 ж. |

**ПӘННІҢ ОҚУ-ӘДІСТЕМЕЛІК КОМПЛЕКСІ**

**«Жұқа қабықшалы микроэлектроника»**

6M072300**-** Техникалық физика мамандығының

2-курс магистратура студенттеріне арналған пәні бойынша

Оқу түрі күндізгі

**Алматы, 2013 ж.**

ПОӘК дайындаған қатты дене және бейсызық физика кафедрасының аға оқытушысы ***к.ф.-м.н.,* Сванбаев Елдос Абугалиевич,** 6M072300**- «**Техникалық физика» мамандығына арналған ПОӘК мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандарты негізінде және мамандықтың Элективті пәндер каталогі негізінде әзірленді.

Қатты дене және бейсызық физика кафедра мәжілісінде қаралып ұсынылды

«\_21\_» \_05\_ 2013 ж., хаттама № \_36\_

Кафедра меңгерушісі \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Приходько О.Ю.

### Факультеттің әдістеме (бюро) кеңесінде ұсынылды

«\_28\_» \_05\_ 2013 ж., хаттама № \_6\_

Төрайымы \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Габдуллина Г.Л.

**Лекции**

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-



a) б)

Рис.2.1. Схемы процесса фотолитографии с негативным (а)

и позитивным (б) фоторезистами.

лами которого связана коричная кислота, представляющая собой светочувствительный компонент (циннамоильная группа). В структуре коричной кислоты имеются группы с относительно малой энергией связи. При воздействии света с энергией кванта 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 сенсибилизатора.

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 удобно использовать смеси нафтохинондиазидов (НХД) с фенолформальдегидными смолами в органических раствоворителях. 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



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 *Еп*. Если энергия фотонов *Е*, падающих на резист, меньше пороговой энергии, то резист удаляется в процессе проявления. Если же то резист становится нерастворимым в проявителе и получающееся изображение действует как защитная маска. Величина *Еп* зависит от многих факторов: типа ФР, толщины ФР, материала подложки и др. Приблизительная оценка *Еп* может быть получена из характеристической кривой резиста - зависимости глубины проявления от энергии экспонирования или экспозиции *H* (рис.2.2). Характеристическая кривая представляет собой зависимость отношения толщины полимеризованной пленки ** к ее исходной толщине от [2]. Интенсивные фотохимические реакции для негативного ФР начинаются при экспозициичто соответствует пороговой чувствительности ФР . При величинах энергии, превышающих пороговое значение в 2-3 раза растворяется очень незначительная часть пленки негативных ФР. В качестве критерия светочувствительности была выбрана *d*, составляющая 90 % от исходной толщины. Это соответствует экспозиции и .



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



где *H*0 - экспозиция на поверхности ФР;

*μ* - 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



отсюда 

Толщина сшитого слоя пропорциональна . Последнее уравнение описывает линейный участок характеристической кривой (интервал ). 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 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 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 *Vпр* от экспозиции позволяет оценить чувствительность фоторезиста [2]. Она определяется при , когда скорость проявления достигает максимума .

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 умещающихся в одном миллиметре. Разрешающая способность определяется путем экспонирования ФР через штриховую миру, 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 подтрава *l* или фактором травления, где *d* - глубина травления (рис.2.5). Чем меньше боковое подтравливание *l* при заданной глубине травления, тем выше стойкость фоторезиста к травителю.



Рис.2.4.Зависимость разрешающей способности негативного

фоторезиста (1) и фотолитографического процесса в

целом (2) от толщины фоторезиста

На негативном 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 сцепления 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 *λ*=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

,

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

,

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

,

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 *≈λ*. Однако это трудно достижимо. Чаще всего для систем с дифракционными ограничениями *K*1=0,6-0,8. Чем больше числовая апертура объектива, тем выше его разрешающая способность.

Важным параметром проекционной системы является глубина резкости Δ*f*, определяемая как

.

Для компенсации аберраций 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 монохроматичное излучение с *λ*=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 | 76х76 | 102х102 | 127х127 | 153х153 | 178х178 |

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 800х800 мм и автоматизированные ЭМ-703 и ЭМ-706 с рабочим полем 1200х1200 мм координатографы. **Точность позицирования** резца для ручных моделей Δ*x*=±50 мкм. Тогда **точность выполнения рисунка** для линии шириной *b* при масштабе увеличения *M* будет

.

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 1х1, 4х3 мм, для пленочных - 8х10, 10х12 мм и т.д. Полученный оригинал должен умещаться 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 редукционной фотокамере (рис.2.9 а). Редукционные фотокамеры позволяют производить отсъем с оригиналов, имеющих максимальные размеры 750х750 и 1200х1200 мм соответственно на фотопластины с размерами 60х90 или 90х120 мм. Уменьшение осуществляется ступенчато от 10 до 50 раз. В результате последующей фотохимической обработки (проявления и фиксации изображения) получают **промежуточный** ФШ на эмульсионной основе.

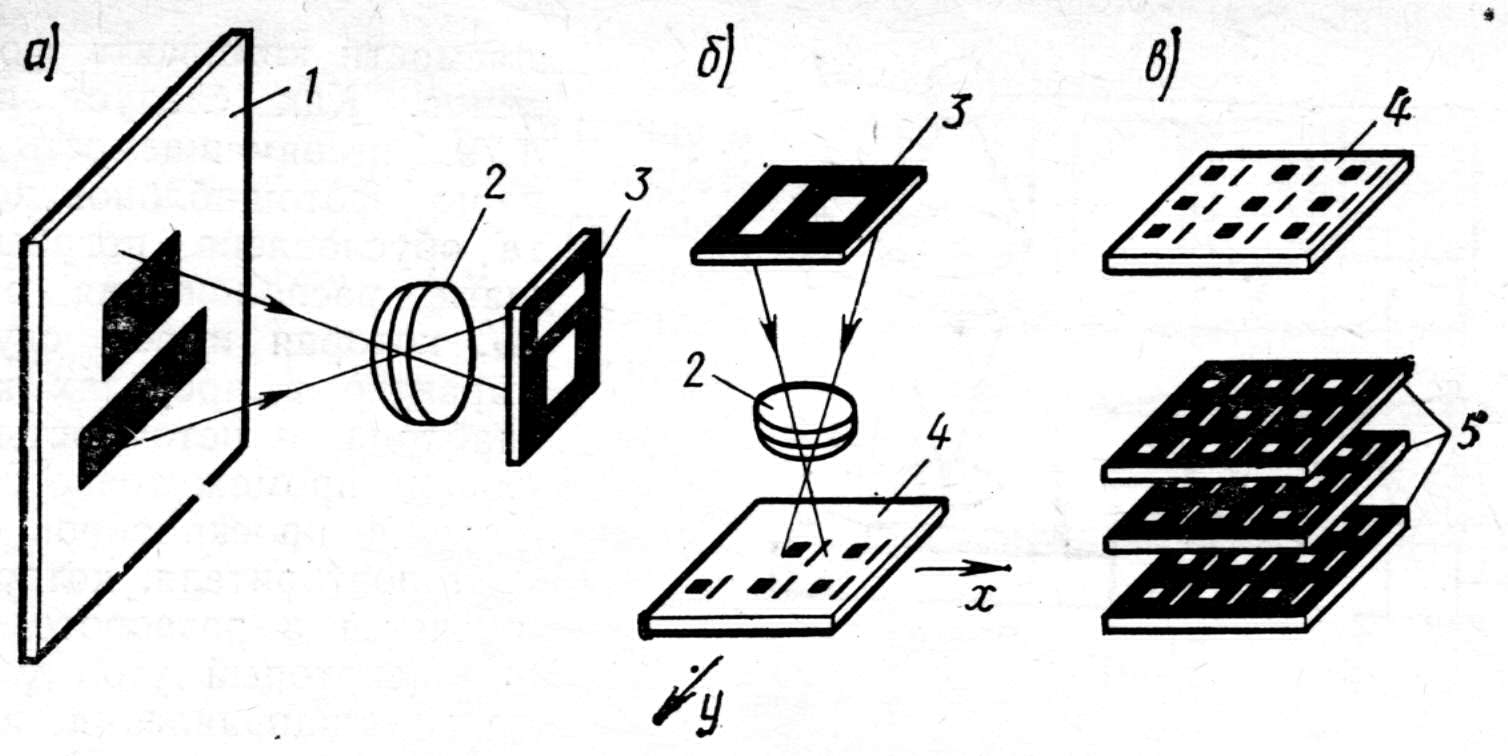


Рис. 2.9. Первичный отсъем оригинала с уменьшением (а),

вторичный отсъем 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** групповойФШ 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 позицирования** 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 Fe2O3 (транспарентные ФШ). Хромированные ФШ имеют стойкость до 50 отпечатков, транспарентные ФШ выдерживают до 100 отпечатков. Не менее важно то, что для транспаретных ФШ проще поиск знаков совмещения, 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 приходит 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 подложек 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 уравновешивания центробежной силы, пропорциональной числу оборотов, и силы сопротивления, зависящей от когезии молекул резиста. Когезия характеризуется вязкостью фоторезиста, так что толщина слоя *dФР* прямо пропорциональна вязкости *υ* и обратно пропорциональна числу оборотов центрифуги *ω*

,

где *А* - 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 оС. 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 оС 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 экспонировнаием 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 неплоскостностью подложки, изгибом подложки при термообработках, наличием нижележащего микрорельефа и др. Этот зазор может колебаться в диапазоне5-20 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 KOH; 1-2 %-ный раствор тринатрийфосфата и др.

**Для каждого резиста существуют оптимальные сочетания времен экспонирования и проявления, обеспечивающие наилучшую 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 времни проявления повышает пористость и растравливание границ рисунка по контуру. Времена проявления и экспонирования связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью

,

где *kпр* - технологический фактор.

Если известно время проявления для одной толщины фоторезиста *dФР*1, то можно определить время проявления для другой толщины *dФР*2 при заданном времени экспонирования:

.

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 прявлении. 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 оС при времени выдержки 1 ч; для позитивных ФР - 200-240 оС - 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, незаметные 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:

,

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 экспонироания);

- 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 оС) 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 травители 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  определяется точностью вырезания рисунка на координатографе () и масштабом увеличения оригинала М1, т.е. .

Погрешность изготовления промежуточного ФШ  определяется точностью переноса изображения с оригинала на редукционной установке , масштабом промежуточного ФШ М2 и ошибкой проявления эмульсионного слоя на фотопластине :



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



где  — 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:



где  — точность установки совмещения и экспонирования, используемой при проведении контактной фотолитографии;

 — ошибка проявления фоторезиста, которая равна удвоенной толщине фоторезиста;

 — 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:

,

где  – размер в фоторезистивной маске;

 – 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.  прибавляется к . При вытравливании линии в рабочем слое происходит подтравливание и размер линии уменьшается и  вычитается из .

Аналогично определяется ширина линии (окна) в маске:



где  – расчетная величина;

 – ошибка изготовления маски.

Погрешность изготовления контактной фоторезистивной маски определяется ошибкой изготовления рабочего фотошаблона , ошибкой на операции совмещения и экспонирования  (параметр установки) и ошибкой проявления , равной удвоенной толщине слоя фоторезиста.

Таким образом, ошибка изготовления маски определяется:

.

**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 неплоскостностью. 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

.

Случай Френеля  реализуется, когда размеры элементов *b* достаточно велики и мал зазор *h* (плотный контакт) или мала *λ*. Распределение интенсивности излучения на плоскости подложки будет аналогично рис.2.12.

Переходной случай . 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 . Этот случай соответствует проекционной фотолитографии. 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=λ* 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 *α* пучка излучения и равное , т.е. . 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 дополнительной 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 *λ*=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

.

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 (*МПФ*), которая определяется как .

Объектив может передавать изображение до определенной частоты. Максимальная частота решетки, которая может быть передана когерентной передаточной системой, равна , для некогерентной .

Модуляционная передаточная функция для когерентной системы остается равной 1 вплоть до нормированной частоты (νmax 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  (рис.2.14 б). Кроме того, она может быть рассчитана по формуле

.

Для того, чтобы получить в резисте систему равных линий и промежутков шириной 1 мкм, необходимо, чтобы значение *МПФ* 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 *МПФ*=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 (*МПФ*=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 *МПФ* объектива нужно учитывать *МПФ* самого резиста. При формировании субмикронных размеров объектив с любой *МПФ* не позволит выйти за пределы того технологического минимума, который определяется *МПФ* резиста. Ввели понятие критической *МПФ* резиста (*КМПФ*).

Минимально воспроизводимый размер объектива и резиста определяется следующим условием: *МПФ* объектива должно быть больше *КМПФ* резиста.

Большинство резистов имеют *КМПФ* порядка 0,6 и тогда при *МПФ* объектива, равной 0,8, можно получить разрешение порядка 1 мкм. Если *МПФ* 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 фотолитографий. Метод последовательной ФЛ (прямые маски) представлен на рис.2.15 а. Сначала на подложку 1 наносится тонкопленочный слой из рабочего материала 2, например, SiO2 на кремниевую подложку, затем контактной фотолитографией формируется фоторезистивная маска (рис.2.15, 4-7). Через прямую ФР-маску травится слой SiO2.Травитель для SiO2 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).

а)

б)

4

3

2

1

6

5

7

8

9

10

1 - подложка; 2 - слой SiO2; 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

4

3

2

1

5

6

7

8

9

13

14

10

11

12

а)

б)

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 нависающих слоев никеля и возможностью зарастания щели при напылении материалов.

1

2

3

4

6

5

9

а)

б)

7

8

10

1

2

3

4

6

5

9

а)

б)

7

8

10

6

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.

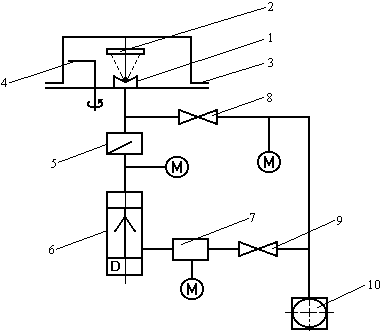


Рис. 3.1. Схема установки вакуумного напыления

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 , а средней длиной свободного пробега молекул 



где постоянная Больцмана;

температура газа;

давление газа;

диаметр молекул испаряемого вещества.

Уже при давлении Па средняя длина свободного пробега составляет 50 см, что превышает реальное расстояние от испарителя до подложки (обычно не более 20 см).

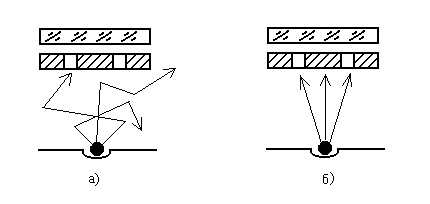


Рис. 3.2. Осаждение пленок в условиях низкого (а) и высокого (б) вакуума

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 , 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 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-жикость путем решения уравнений термодинамики получена зависимость давления насыщенного пара от температуры испарения 

 (3.1)

где 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 =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  и . Для компоненты скорости перпендикулярной к границе раздела, имеем

 (3.2)

где число молекул в единице объема исходного вещества, м3;

масса молекулы, кг;

постоянная Больцмана, Дж/град.;

температура, до которой нагрето вещество, К.

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

,(3.3)

где число молекул, испаренных с единицы площади в единицу времени, м-2с-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



Воспользуемся уравнением состояния идеального газа

 (3.4)

где давление газа, Па;

число молекул газа в единице объема, м-3;

температура газа, К.

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



Отсюда для единичного объема

 (3.5)

где температура, до которой нагрето испаряемое вещество.

С учетом (3.5) количество испарившихся молекул будет

 (3.6)

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

кг/м2с. (3.7)

*3.1.4. Скорость конденсации*

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

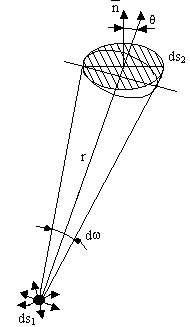
, (3.8)

где общее количество вещества, испаренного с испарителя за время , кг.

Величина связана со скоростью испарения следующим соотношением

. (3.9)

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



В пределах пространственного угла  на площадку поступает

. (3.10)

Через любое сечение конуса, ограниченного , проходит один и тот же поток. Сечение конуса сферической поверхностью с центром в и радиусом, равным единице, дает меру телесного угла конуса . Если нормаль к составляет угол с осью конуса, а расстояние от до площадки есть , то

. (3.11)

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

, (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 , с одной стороны которой испаряется вещества (в угол ). Для поверхностного испарителя количество испаренного вещества зависит от направления испарения. Тогда в соответствии с законом косинуса Ламберта-Кнудсена количество вещества, проходящего в телесном угле по направлению , образующему угол  с нормалью к поверхности испарителя (рис.3.4), равно

 . (3.13)

Рис.3.4. Испарение вещества с элементарной площадки

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

. (3.14)

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

, (3.15)

где толщина пленки, сконденсированная в каждой точке подложки за время напыления.

**әл-фараби ат. қазақ ұлттық университеті**

**Физика – техникалық факультеті**

**Қатты дене физикасы және бейсызық физика кафедрасы**

|  |  |
| --- | --- |
|  | Бекітілді Физика факультетінің Ғылым кеңесі мәжілісінде  хаттама № 10, 31.05.2013 ж.  Факульт деканы \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Давлетов А.Е.  "\_\_\_\_"\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2013ж. |

### СИЛЛАБУС

«Жұқа қабықшалы микроэлектроника»

6M072300**-** Техникалық физика мамандығының

2-курс магистратура студенттеріне арналған,

**Лектордың аты-жөні:** Сванбаев Елдос Абугалиевич., ф.-м.ғ.к., аға оқытушы, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, телефоны 8 775 846 4415, e-mail: eldos54@mail.ru , каб. 202.

**Пәннің мақсаттары мен міндеттері:**

**Пәнді оқытудың мақсаты:** Жұқа қабықшалы микроэлектроника (ЖҚМ) негізгі жұмыс істеу принциптерін, жасау әдістерін, олардың сипаттамалрын меңгеру.

**Міндеттері:** Жұқа қабықшалы микроэлектрониканың активті және пассивті компоненттерін, негізгі теорияларын, замануи қолдану қуралдарын біліп үйрену.

**Компетенциялар:** Дисциплинаны оқыту нәтижесінде студент міндетті:

Жұқа қабықшалы микроэлектрониканың ерекше перспективті бағытта дамуы және онда қолданылатын компоненттер жайлы түсінігі болуы;

- Жұқа қабықшалы микроэлектроника компоненттерінің сипаттамалырын және конструцияларын замануи қолдану қуралдарын білуге.

- Жұқа қабықшалы микроэлектроника талаптарына сәйкес техникалық эксплуатацилардың қолайлылығы, сенімділігі, технологиялылық және негізгі сипаттамаларын есептеу үшін алған білімдерін қолдана білуге;

**Пререквизиттар:** Жалпы физика. Жартылай өткізгіштер физикасы. Физикалық және кванттық оптиканың негіздері.

.

**Постреквизиттар:** Байланыстарды және оптикалық құрылғыларды басқаруды жобалау. «Хабарлағыштың оптикалық жүйелері», «Оптикалық байланыстағы өлшеулер» және т.б

**ДИСЦИПЛИНАНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ ЖӘНЕ МАЗМҰНЫ**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Апта | Тақырыптың аты | Сағ. саны | Максималды балл |
| **Модуль 1** | | | |
| 1 | **1 лекция** Кіріспе  Пән және курстың тапсырмалары. ЖҚМ даму жайлы қысқаша шолу. Ұсынылатын әдебиеттер. | 1 | 2 |
| **1 пракалық сабақ.** Жұқа қабықшалы кедергіні есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 2 | **2 лекция** ЖҚМ классификациясы. ЖҚМ түрлері.. Әрқайсысының қолданылу облысы. ЖҚМ жүйелерді техника-экономикалық салыстыру. | 1 | 2 |
| **2 пракалық сабақ** ЖҚМ қолданудағы информацияны беруді бағалау. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 3 | **3 лекция** ЖҚМ желісін тұрғызудағы жалпы принциптер. Алғашқы және қайталама желі. ЖҚМ активті және пассивті техникалық құрылғылардың тағайындау және негізгі сипаттамалары. Аналогты және сандық ЖҚМ. | 1 | 2 |
| **3 пракалық сабақ** Пассивті техникалық құрылғылардағы сыйымдылықты есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 4 | **4 лекция** ЖҚМ классификациясы. ЖҚМ физикалық процестер және жұмыс істеу принципі. | 1 | 2 |
| **4 пракалық сабақ** Сатылы оптоталшықтың параметрлерін есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 5 | **5 лекция** Оптикалық талшықтар және олардың сипаттамалары. Оптоталшықтың геометриялық параметрлері. Сыну көрсеткішінің профилі. Сатылы және градиентті оптоталшық. Сандық апертура. | 1 | 2 |
| **5 пракалық сабақ** Градиентті оптоталшықтың параметрлерін есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 6 | **6 лекция** Сатылы волновод үшін электромагниттік өрістің толқындық теңдеуі. Дисперсиялық теңдеулер. Таралуының сипаттамалыр және бағытталған модалардың типтері. Критикалық жиілік. Мода санын анықтау. Топтық және фазалық жылдамдық. Толқындық кедергі. | 1 | 2 |
| **6 пракалық сабақ** Сатылы оптоталшықтың мода санын анықтау. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 7 | **7 лекция** Қабықшаның, өзектің модалары және модалардың жойылуы.Қабықша және өзек арасында энергияның таралуы. Градиентті көпмодалық және бірмодалық оптоталшықта таралу ерекшеліктері. | 1 | 2 |
| **7 пракалық сабақ** Градиентті оптоталшықтың мода санын анықтау. | 2 | 4 |
|  |  |  |
| **АБ 1** |  |  |
| **1 АРАЛЫҚ БАҚЫЛАУ** |  | **30** |
| **Модуль 2 IІ тақырыптық блок** | | | |
| 8 | **8 лекция** Оптоталшықтың материалдағы жоғалтуы, жұтылуы және шашырауы. Мөлдірлігі және толқын ұзындығының диапазоны. Жұтылудың үш түрі: меншікті, қоспалы, атомдық құрылымды дефектылармен жұтылу. | 1 | 2 |
| **8 пракалық сабақ** Оптоталшықтың материалындағы жоғалтуды есептеу. | 2 | 2 |
| 9 | **9 лекция** Шашырау: Релея, Ми, бейсызықтық шашырау. Біртексіздіктегі жоғалу. Кабельдік жоғалулар. Макро және микро иілу есебінен басылулар. Жоғалту факторы сияқты радиациялық төзімділік. | 1 | 2 |
| **9 практикалық сабақ** Релей шашырауы кезіндегі оптоталшық материалындағы жоғалтуды есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 10 | **10 лекция** Жартылайөткізгіштік фотоэлементтердің вольтампрелік және энергетикалық сипаттамалары. | 1 | 2 |
| **10 пракалық сабақ** Оптикалық интерферометрия. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 11 | **11 лекция** Оптоталшықтың өткізу жолағы және дисперсия. Дисперсия түрлері. Мода аралық, материалдық және ішкі модалық дисперсия. Поляризациялық модалық дисперсия. | 1 | 2 |
| **11 пракалық сабақ** Бір модалық және көп модалық жарық өткізгіштерде дисперсияны есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 12 | **12 лекция** Оптоталшық бойынша сигналды жіберуде дисперсияның әсері. Бір модалық және көп модалық жарық өткізгіштердің өткелдік және жиіліктік сипаттамалары. Оптоталшықтың өткізгіштің мүмкіндігі. | 1 | 2 |
| **12 пракалық сабақ** Бір модалық жарық өткізгіштің жиіліктік сипаттамасын есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 13 | **13 лекция** Оптоталшықтың материалдары және жасалу технологиясы. Оптоталшықты дайындау үшін материалдардың негізгі класстары. Оптоталшықты жасаудың технологиялық процесстерінің негізгі топтары. Балқытпалардан оптоталшықтың созылуы. | 1 | 2 |
| **13 пракалық сабақ** Көп модалық жарық өткізгіштің жиіліктік сипаттамасын есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 14 | **14 лекция** Сәулені кіргізу құрылғысы. Сәуле көзі. Торец (кесілген жер) арқылы өтуі.  Оптоталшыққа жарықты кіргізудің эффективтілігі. Механикалық келіспеушіліктерге құрылғының сезгіштігі. | 1 | 2 |
| **14 пракалық сабақ** Оптоталшыққа жарықты кіргізудің эффективтілігін есептеу. | 2 | 2 |
|  |  |  |
| 15 | **15 лекция** Разъемды және разъемды емес жалғаулар. Оптоталшықты жалғау және тұтастыру. Френелдік шағылуға байланысты жоғалтулар. Жалғаулардың және бітіктердің сипаттамалары. Балқыту арқылы жалғау. Механикалық жалғау. Коннекторлардың типтері. |  | 1 |
| **15 пракалық сабақ** Коннекторлардағы жоғалтуларды есептеу. |  | 1 |
|  |  |  |
| **2 Аралық бақылау** |  | **30** |
| **Экзамен** |  | **40** |
|  | **БАРЛЫҒЫ** |  | **100** |

**ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**

**Негізгі:**

1. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи: учеб. пособие / В.И.

Ефанов. 2-е изд., доп. – Томск : ТУСУР, 2007. - 256 с. (20)

2. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи: Конструкции и характеристики : Учебное пособие

для вузов. - М. : Горячая линия-Телеком, 2002. - 232 с. : ил.

3. Ефанов В.И., Направляющие системы электросвязи (ч.2 «Волоконно-оптические линии

связи»): учебное пособие – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. –

163 с. (20)

**Қосымша:**

4. Ефанов В.И. Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-

оптических линий связи: методические указания к самостоятельной работе. – Томск:

ТУСУР, 2009. – 41 с. (20)

5. Ефанов В.И. Сборник задач по курсу «Оптические направляющие среды и пассивные ком-

поненты волоконно-оптических линий связи». – Томск.: ТУСУР, 2007. -50 с. (20)

6. В. И. Ефанов. Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-

оптических линий связи: методические указания к лабораторному практикуму. – Томск:

ТУСУР, 2008. – 67 с. (20)

7. Ефанов В.И. Проектирование волоконно-оптических линий связи. Учебно-методическое

пособие для выполнению курсового проекта по дисциплине «Оптические линии связи и пас-

сивные компоненты ВОЛС» – Томск.: ТУСУР, 2007. -100 с. (20)

8. Ефанов В.И. Проектирование, строительство и эксплуатация ВОЛС: учебное пособие –

Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 103 с. (20)

9. Портнов Э.Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабольные линии свя-

зи: Учебное пособие для вузов. – М: Горячая линия-Телеком, 2009. – 544с.: ил. (5)

10. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. 3-е изд.,

перераб. и доп. / сб. статей под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. М.: Техносфера, 2010. –

608 с.

11. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач:

Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 268 с.: ил.

12. Р. Фриман Волоконно-оптические системы связи 3-е дополнительное издание Москва:

Техносфера, 2006. -496с.

13. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС /Семенов А.Б. –

М.:Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. -632с.+88 цв.ил.

14. Р.Р. Убайдуллаев. Волоконно-оптические сети. М. ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000-277с..

ПӘННІҢ АКАДЕМИЯЛЫҚ САЯСАТЫ

Жұмыстардың барлық түрін көрсетілген мерзімде жасап тапсыру керек. Кезекті тапсырманы орындамаған, немесе 50% - дан кем балл алған студенттер бұл тапсрманы қосымша кесте бойынша қайта жасап, тапсыруына болады.

Орынды себептермен зертханалық сабақтарға қатыспаған студенттер оқытушының рұқсатынан кейін қосымша уақытта зертханалық жұмыстарды орындауға болады. Тапсырмалардың барлық түрін өткізбеген студенттер емтиханға жіберілмейді

Бағалау кезінде студенттердің сабақтағы белсенділігі мен сабаққа қатысуы ескеріледі.

Толерантты болыңыз, яғни өзгенің пікірін сыйлаңыз. Қарсылығыңызды әдепті күйде білдіріңіз. Плагиат және басқа да әділсіздіктерге тыйым салынады. СӨЖ, аралық бақылау және қорытынды емтихан тапсыру кезінде көшіру мен сыбырлауға, өзге біреу шығарған есептерді көшіруге, басқа студент үшін емтихан тапсыруға тыйым салынады. Курстың кез келген мәліметін бұрмалау, Интранетке рұқсатсыз кіру және шпаргалка қолдану үшін студент «F» қорытынды бағасын алады.

Өзіндік жұмысын (СӨЖ) орындау барысында, оның тапсыруы мен қорғауына қатысты, сонымен өткен тақырыптар бойынша қосымша мәлімет алу үшін және курс бойынша басқа да мәселелерді шешу үшін оқытушыны оның келесі офис-сағаттарында таба аласыз:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Әріптік жүйе бойынша бағалау | Балдардың сандық эквиваленті | % мәні | Дәстүрлі жүйе бойынша бағалау |
| А | 4,0 | 95-100 | Өте жақсы |
| А- | 3,67 | 90-94 |
| В+ | 3,33 | 85-89 | Жақсы |
| В | 3,0 | 80-84 |
| В- | 2,67 | 75-79 |
| С+ | 2,33 | 70-74 | Қанағаттанарлық |
| С | 2,0 | 65-69 |
| С- | 1,67 | 60-64 |
| D+ | 1,33 | 55-59 |
| D- | 1,0 | 50-54 |
| F | 0 | 0-49 | Қанақаттанарлықсыз |
| I  (Incomplete) | - | - | Пән аяқталмаған  *(GPA есептеу кезінде есептелінбейді)* |
| P  (Pass) | **-** | **-** | «Есептелінді»  *(GPA есептеу кезінде есептелінбейді)* |
| NP  (No Рass) | **-** | **-** | « Есептелінбейді»  *(GPA есептеу кезінде есептелінбейді)* |
| W  (Withdrawal) | - | - | «Пәннен бас тарту»  *(GPA есептеу кезінде есептелінбейді)* |
| AW  (Academic Withdrawal) |  |  | Пәннен академиялық себеп бойынша алып тастау  *(GPA есептеу кезінде есептелінбейді)* |
| AU  (Audit) | - | - | « Пән тыңдалды»  *(GPA есептеу кезінде есептелінбейді)* |
| Атт-ған |  | 30-60  50-100 | Аттестатталған |
| Атт-маған |  | 0-29  0-49 | Аттестатталмаған |
| R (Retake) | - | - | Пәнді қайта оқу |

**Бағаларды қою кестесі**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Бақылау түрі | Максимальдібалл | Минимальді балл немесе рейтинг өту | Қосымша |
| 1 | Аралық бақылау 1 | 100 | 50 | 1-7 апта аралығындағы барлық тапсырма тұрі бойынша бағаның қосындысы |
| 2 | Аралық бақылау 2 | 100 | 50 | 8-15 апта аралығындағы барлық тапсырма тұрі бойынша бағаның қосындысы |
| 3 | Ағымдағы үлгерімнің бағасы | (РК1+РК2)/2=100 | 50 | АБ1 мен АБ2 орташа арифметикалық қосындысы |
| 4 | Бақылаудың қорытынды бағасы (емтихан бағасы) | 100 | 50 |  |
| 5 | Пәннің қорытынды бағасы | 100 | 50 | Ағымдағы үлгерім мен естихан бағасының орташа арифметикалық қосындысы |

Кафедра мәжілісінде қарастырылды

*№36 хаттама «21» мамыр 2013 ж.*

Кафедра меңгерушісі Приходько О.Ю.

Дәріс оқушы Сванбаев Е.А.