

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет радиотехники и электроники

Кафедра микро- и наноэлектроники

**БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ
ФОТОЛИТОГРАФИИ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ**

*Рекомендовано УМО по образованию
в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для специальностей
1-41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы»,
1-41 01 03 «Квантовые информационные системы»*

Минск БГУИР 2017

УДК 776.1:621.3.049.77(076)

ББК 32.844.1я73

Б17

Авторы:

Ю. А. Родионов, Д. А. Котов, В. И. Плебанович, Н. С. Ковальчук

Рецензенты:

кафедра радиоэлектроники филиала «Минский радиотехнический колледж»
учреждения образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»
(протокол №5 от 05.01.2015);

профессор кафедры микро- и нанотехники
Белорусского национального технического университета,
доктор технических наук, профессор В. А. Сычик

Базовые технологические операции фотолитографии и
Б17 оборудование для их реализации : учеб.-метод. пособие / Ю. А. Родионов
[и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – 72 с. : ил.
ISBN 978-985-543-249-5.

Рассмотрены физико-химические основы базовых техпроцессов фотолитографии и основные виды соответствующего оборудования. Особое внимание уделено выбору технологических режимов для обеспечения качества как промежуточных операций, так и конечного продукта в целом. Рассмотрены основные причины возникновения типичных браков и предложены наиболее эффективные пути их минимизации. Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия по учебным дисциплинам «Технология изготовления интегральных микросхем», «Технологические процессы в микроэлектронике», «Микроэлектронные устройства».

УДК 776.1:621.3.049.77(076)
ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-543-249-5

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Основные термины и определения	4
Глава 1 Планарная технология и литография	5
1.1 Место литографии в технологии ИС	5
1.2 Литографические процессы: сущность, этапы и основные операции	7
1.3 Фоторезисты и их свойства	8
Глава 2 Основные этапы процесса фотолитографии.....	17
2.1 Этап 1. Формирование слоя фоторезиста	17
2.1.1 Подготовка поверхности подложки	17
2.1.2 Нанесение слоя фоторезиста.....	21
2.1.3 Мягкая сушка фоторезиста	23
2.2 Этап 2. Создание рельефной структуры фоторезиста	25
2.2.1 Фотошаблон и операция совмещения.....	25
2.2.2 Экспонирование фоторезиста	29
2.2.3 Проявление фоторезиста	39
2.2.4 Сушка фоторезиста	42
2.3 Этап 3. Перенос топологии фоторезиста на технологический слой	43
2.3.1 Химические (мокрые) методы обработки	43
2.3.2 Плазменные (сухие) методы обработки.....	45
Глава 3 Иммерсионная литография	50
3.1 Преимущества иммерсионной литографии	51
3.1.1 Увеличение числовой апертуры	51
3.1.2 Увеличение глубины фокуса.....	52
3.2 Недостатки иммерсионной литографии.....	54
3.2.1 Выщелачивание фоторезиста.....	54
3.2.2 Необходимость использования поверхностного покрытия	54
3.2.3 Иммерсионные дефекты	54
Глава 4 Литография экстремального ультрафиолета (EUVL)	56
Глава 5 Контроль топологии и размеров элементов изображения	59
Литература.....	70

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Литография – процесс формирования рельефного рисунка в актиночувствительном слое, нанесенном на поверхность подложек, с целью последующего переноса этого рисунка на материал подложки.

Актиночувствительным называется слой, который изменяет свои свойства (растворимость) под действием актиничного излучения (например, ультрафиолетового света или потока электронов).

Экспонирование – процесс облучения материала актиночувствительного слоя. Для процесса применяется излучение от рентгеновского диапазона до видимого света.

Фотолитография – процесс формирования рельефного рисунка на тонкой пленке светочувствительного материала.

Фоторезист – светочувствительный слой материала (полимерная пленка), который под воздействием света меняет свои физико-химические свойства (растворимость) и одновременно обладает химической стойкостью к воздействию агрессивных химических реагентов травления технологического слоя.

Фотошаблон – прозрачная для видимого света пластина с рисунком, выполненным непрозрачным слоем.

Топология структуры – рисунок (чертеж) слоя ИС.

Оригинал – увеличенный рисунок слоя ИС.

Эталонный фотошаблон – первый фотошаблон, с которого изготавливают рабочие копии.

Рабочий шаблон – шаблон, с которого изготавливают топологию структуры слоя ИС.

ГЛАВА 1

ПЛАНАРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ЛИТОГРАФИЯ

1.1 Место литографии в технологии ИС

По способу изготовления и получаемой структуре различают два принципиально разных типа интегральных микросхем: *полупроводниковые* и *пленочные*. По ряду причин ведущее положение занимают полупроводниковые микросхемы, представляющие собой основу современной микроэлектроники.

Полупроводниковая интегральная схема – это микросхема, элементы которой выполнены в приповерхностном слое полупроводниковой подложки. Технология их изготовления основана на легировании полупроводниковой (как правило, кремниевой) пластины поочередно донорными и акцепторными примесями, в результате чего под поверхностью образуются тонкие слои с разным типом проводимости и *p-n*-переходы. При этом отдельные слои используются в качестве резисторов, а *p-n*-переходы предназначены для реализации диодов и транзисторов.

Основными тенденциями развития микро- и нанoeлектроники являются два фактора: повышение плотности упаковки и повышение частотного диапазона работы изделия. Это приводит к необходимости уменьшения толщины технологического слоя (из-за скин-эффекта при гигагерцовом диапазоне рабочих частот) вплоть до нанометрового диапазона при нанометровых размерах элементов топологии. В основе модернизации современного техпроцесса лежит уменьшение топологической нормы, т. е. характерного размера элемента микросхемы, или увеличение разрешающей способности.

Чем меньше размер и выше точность, тем выше плотность упаковки элементов внутри микросхемы, больше количество логических элементов, размещаемых на единице площади микросхемы, и, соответственно, выше ее функциональные возможности. Обычно разрешающая способность оценивается по минимальной ширине воспроизводимой линии и определяется преимущественно способом экспонирования резиста и длиной волны воздействующего на него излучения. По мере увеличения требований к уровню разрешения литографического процесса длина волны используемого излучения становится все меньше.

Таким образом в твердотельной технологии (ИМС, МЭМС, микросенсоры, актюаторы и т. д.) литография занимает лидирующее место. Более того, литография в первую очередь определяет научно-технический уровень микроэлектронной отрасли.

При формировании схемотехники конкретного изделия используются технологические слои различных материалов и топологий. Поэтому после создания каждого технологического слоя следует формирование топологии, осуществляемое литографией, и в технологическом маршруте литография повторяется многократно (рисунок 1).

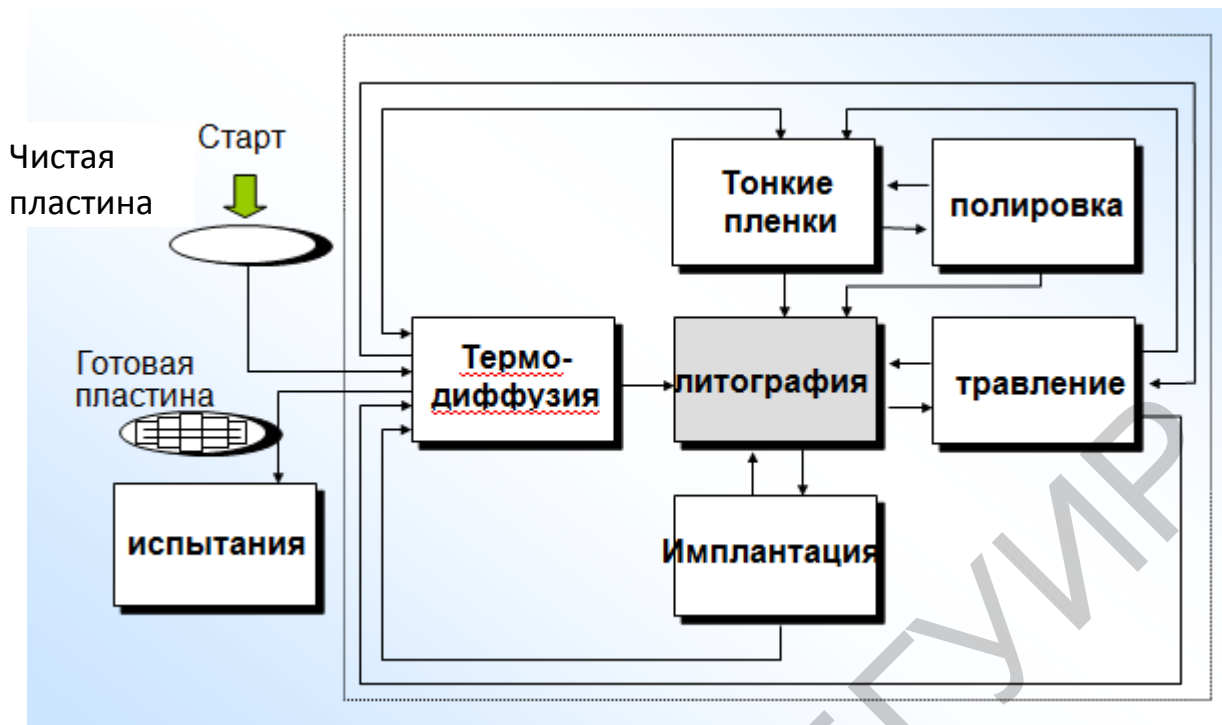


Рисунок 1 – Технологический маршрут изготовления ИС

Следовательно, литография также в первую очередь определяет и себестоимость изделия.

Из известной гаммы микроселектронных литографий (рисунок 2) оптическая литография, или фотолитография (ФЛ), обычно использует ультрафиолетовое излучение с длиной волны $\lambda = 0,36 \dots 0,45$ мкм.

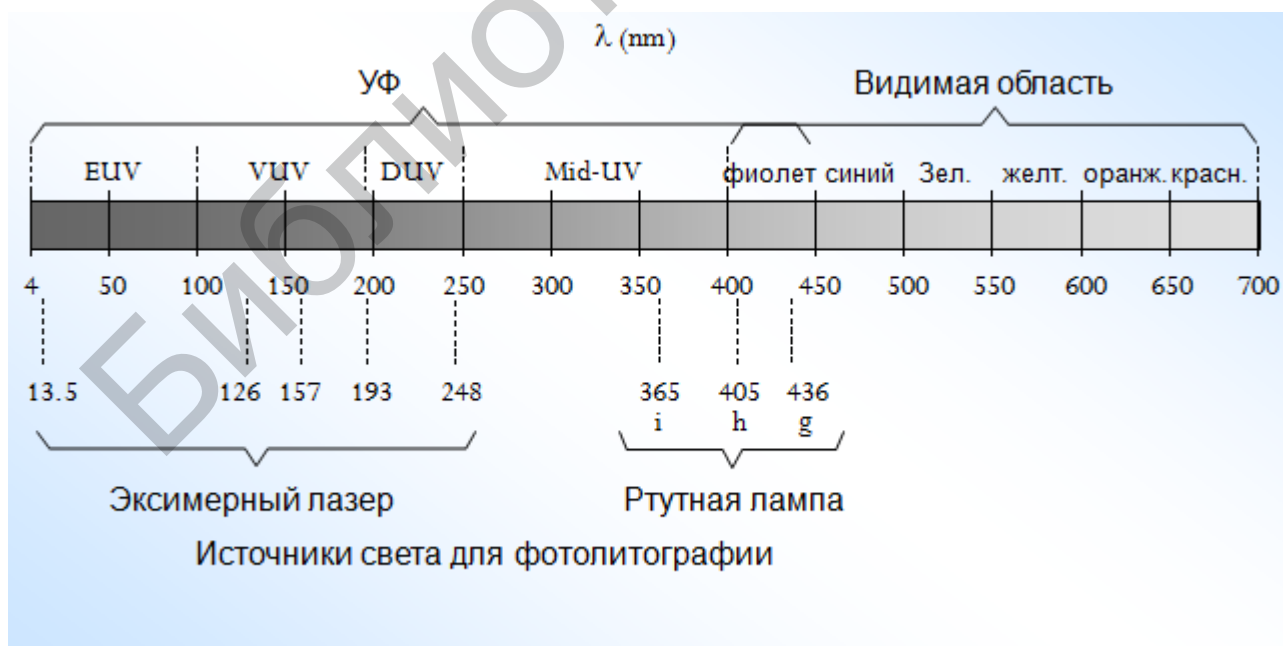


Рисунок 2 – Спектр видимого света и УФ-излучения

В технологии изготовления интегральных микросхем важное место занимают маски, обеспечивающие локальный характер напыления, легирования, травления, а в некоторых случаях и эпитаксии. Формированием масок в планарной технологии занимается литография.

Литография (от греч. lithos – ‘камень’ и grapho – ‘пишу’, ‘рисую’) – способ формирования рельефа (рисунка, топологии) в слое металла, диэлектрика или полупроводника. Процесс литографии осуществляется с использованием специальных материалов – фоторезистов (ФР), чувствительных к внешнему облучению и способных переходить в нерастворимое, устойчивое к действию травителей состояние (негативные резисты) или, наоборот, разрушаться (позитивные резисты). При этом фоторезисты должны обладать высокой стойкостью к воздействию химических агрессивных сред (кислоты, щелочи, активные газы, низкотемпературная газоразрядная плазма).

1.2 Литографические процессы: сущность, этапы и основные операции

В большинстве случаев литография проводится по какому-либо технологическому слою, нанесенному на поверхность полупроводниковой (как правило, кремниевой) пластины. В качестве такого слоя может использоваться пленка диэлектрика (SiO_2 , Si_3N_4), металла (Al, Cu, Mo, Cr, V, Ni и др.), поликремния SiO_2 и др. Проводя литографию по слою диэлектрика, формируют конфигурацию маски для травления нижележащего слоя, локального внедрения легирующей примеси, создания подзатворного диэлектрика в МДП-транзисторах; литография по металлу позволяет формировать топологию токоведущих дорожек, контактных площадок, тонкопленочных резисторов и других элементов ИС.

Каждый технологический слой ИС имеет свою топологию, поэтому литография в техпроцессе ИС повторяется многократно.

Процессы литографии можно разделить на три этапа, каждый из которых включает ряд последовательно выполняемых операций.

Этап 1. Формирование сплошного равномерного слоя резиста на поверхности подложки. Этап включает следующие операции:

- а) подготовка поверхности подложки;
- б) нанесение слоя ФР;
- в) мягкая термическая сушка ФР.

Этап 2. Создание рельефной структуры (маски) ФР. Операции этапа:

- а) экспонирование ФР;
- б) проявление ФР;
- в) жесткая термическая сушка (задубливание) ФР.

Этап 3. Перенос рельефа ФР на технологический слой. Операции этапа:

- а) травление технологического слоя;
- б) удаление ФР-маски;

- в) финишная отмывка;
- г) сушка.

Выполнение этих этапов основано на теоретических знаниях:

- 1) прикладной оптики, формирующей заданное изображение в резистивном слое;
- 2) прикладной фотохимии, определяющей закономерности поведения ФР в различных ситуациях;
- 3) прикладной теории травления (растворимости или распыления) различных материалов в жидкостных и плазмохимических средах.

Технологический маршрут проведения фотолитографии представляет собой цепочку специфических операций. Рассмотрим элементы этой цепочки на рисунке 3.

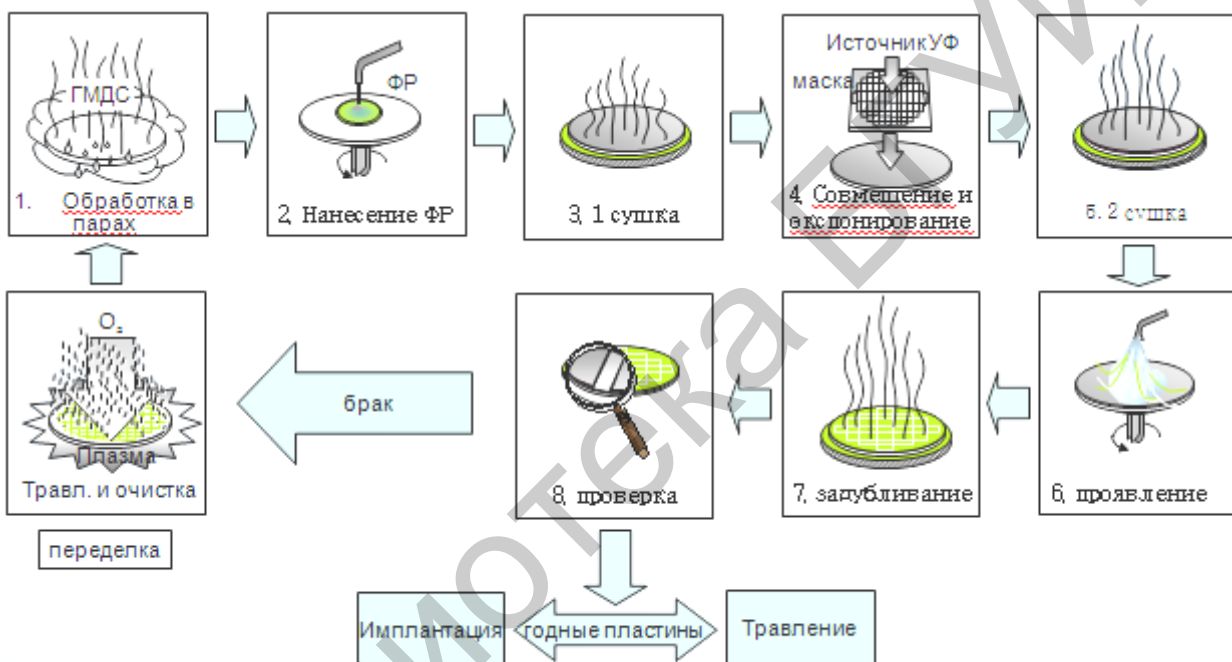


Рисунок 3 – Упрощенный технологический маршрут процесса фотолитографии

1.3 Фоторезисты и их свойства

Фоторезисты (актинорезисты) – это сложные полимерные композиции, в составе которых имеются пленкообразующие и фоточувствительные к ультрафиолетовому излучению компоненты, растворители и специальные добавки.

Добавки вводят для улучшения условий пленкообразования, изменения фоточувствительности (сенситизаторы), повышения адгезии ФР-слоя к подложкам, улучшения стойкости к воздействиям кислот, щелочей, высоких температур и др. Растворители определяют стабильность свойств готовых ФР, влияют на процесс нанесения и последующего высыхания фотослоя.

В качестве полимерной основы большинства ФР-материалов используются: поливиниловый спирт, полиэфиры, полиамиды, фенолформальдегидные и эпоксидные смолы, поливинилацетат, каучуки и др.

Световая энергия, поглощаемая молекулами или атомами актинорезиста, увеличивает запас их внутренней энергии. Молекула в результате поглощения кванта света переходит из нормального состояния в возбужденное. Подобное состояние неустойчиво, поэтому она быстро теряет избыточную энергию, возвращаясь к норме и выделяя соответствующий квант.

Атом ФР, возбужденный квантом света, претерпевает химическое изменение. В фотохимии склонность молекул к фотохимическому превращению оценивают квантовым выходом:

$$\gamma = \frac{\text{число прореагировавших молекул}}{\text{число поглощенных квантов}}. \quad (1)$$

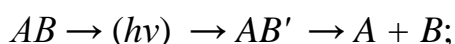
Согласно закону Эйнштейна каждый поглощенный квант энергии ($h\nu$) вызывает возбуждение одной молекулы. Отклонение γ от единицы объясняется тем, что вслед за первичным актом поглощения и возникновением электронно-возбужденного состояния молекулы следуют вторичные реакции, которые частично компенсируют результат первичного поглощения ($\gamma < 1$) или действуют в том же направлении ($\gamma > 1$).

Квантовый выход и скорость фотохимических реакций, зависящие от химического строения облучаемых веществ, определяются спектральным составом и интенсивностью падающего света.

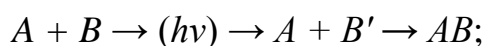
Фотохимические процессы, происходящие в ФР под действием УФ-излучения, можно разделить на две стадии: световую и темновую. На световой стадии в результате поглощения кванта излучения наиболее слабая химическая связь фоточувствительной молекулы разрывается с образованием свободного радикала. На темновой стадии протекают реакции, приводящие к деструкции (разрушению) молекулярных цепей полимера либо, наоборот, к структурированию (сшиванию) молекул в прочную сетку. В результате этого стойкость облученных участков к воздействию проявителя уменьшается или возрастает соответственно.

При поглощении световой энергии в фоторезистах протекают 4 типа фотохимических реакций:

1) *фотораспад (фотолиз)* – возбуждение молекулы с последующей ее диссоциацией на активные частицы:



2) *фотоприсоединение* – присоединение к возбужденной молекуле другой молекулы того или иного типа:



3) *фотоперегруппировка* – перегруппировка атомов в структуре молекулы:



4) *фотосенсибилизация* – перенос энергии возбуждения от одного компонента системы к другому:



Существует два класса фоторезистов: позитивные и негативные.

Позитивные ФР – это резисты, локальные участки которых после воздействия излучения за счет фотодеструкции (разрушения) удаляются в проявителях, а необлученные – остаются на подложке и образуют фоторезистивную контактную маску.

Позитивные ФР изготавливают на основе фоточувствительных нафтохинондиазидов (НХД) и фенолформальдегидных смол, являющихся пленкообразующими полимерами. Молекула позитивного ФР имеет строение R_1-O-R_2 , где R_1 и R_2 – светочувствительная и полимерная части, O – соединяющий их атом кислорода. При поглощении квантов облучения молекула НХД распадается на азот и неустойчивый радикал, который превращается в инденкарбен; последний присоединяет всегда имеющуюся в фоторезисте влагу, образуя инденкарбоновую кислоту (рисунок 4).

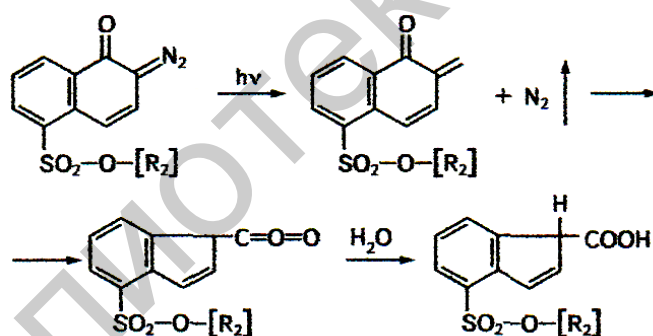


Рисунок 4 – Инденкарбоновая кислота

Облученные участки фотослоя, в отличие от необлученных, становятся гидрофильными, хорошо смачиваются и удаляются щелочными проявителями.

Негативные ФР – это резисты, локальные участки которых под действием излучения в результате фотоструктурирования (сшивания) становятся стойкими к воздействию проявителя и, в отличие от необлученных участков, остаются на подложке, образуя ФР-маску.

Негативные ФР изготавливают на основе поливинилциннамата или на основе каучуков. Поливинилциннамат (ПВЦ) представляет собой сложный эфир циннамоильной кислоты и поливинилового спирта и имеет общую формулу R_1-O-R_2 , где R_1 – фоточувствительная циннамоильная группа, R_2 –

пленкообразующая часть поливинилового спирта, О – соединяющий их атом кислорода (рисунок 5).

При поглощении квантов излучения наиболее слабые в светочувствительных частях молекул химические связи $\text{CH} = \text{CH}$ разрываются. За счет освободившихся связей происходит фотоструктурирование, т. е. поперечное сшивание молекул ПВЦ в трехмерную сетку.

Негативные ФР на основе каучука наиболее часто представляют собой механическую смесь циклокаучука и добавок, которые в возбужденном состоянии вступают в химическое взаимодействие с каучуком, в результате чего происходит сшивание линейных полимеров каучука образующимися свободными радикалами.

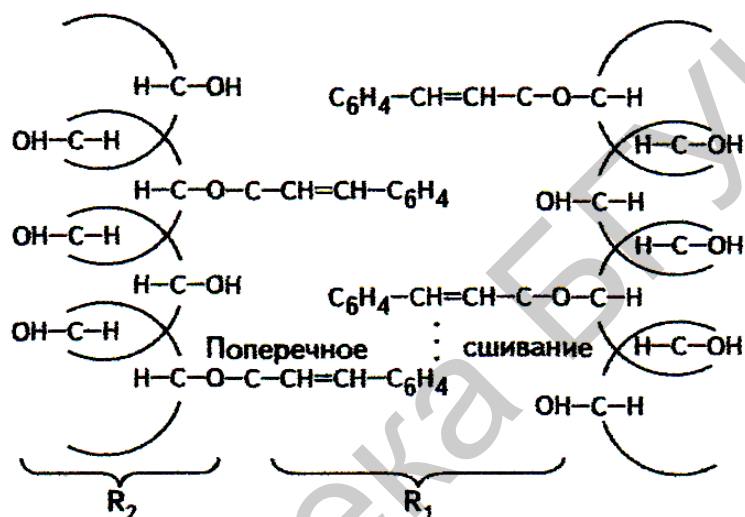


Рисунок 5 – Структура поливинилциннамата

На рисунках 6, 7 показана структура фоторезистивных масок, полученных с применением негативного и позитивного фоторезистов.

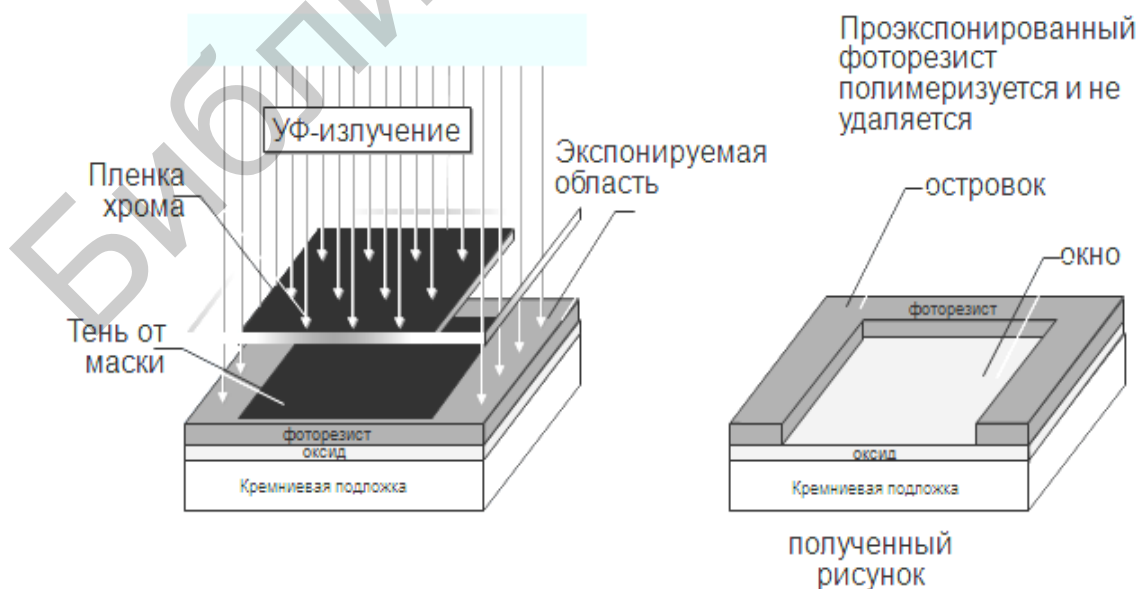


Рисунок 6 – Негативная фотолитография

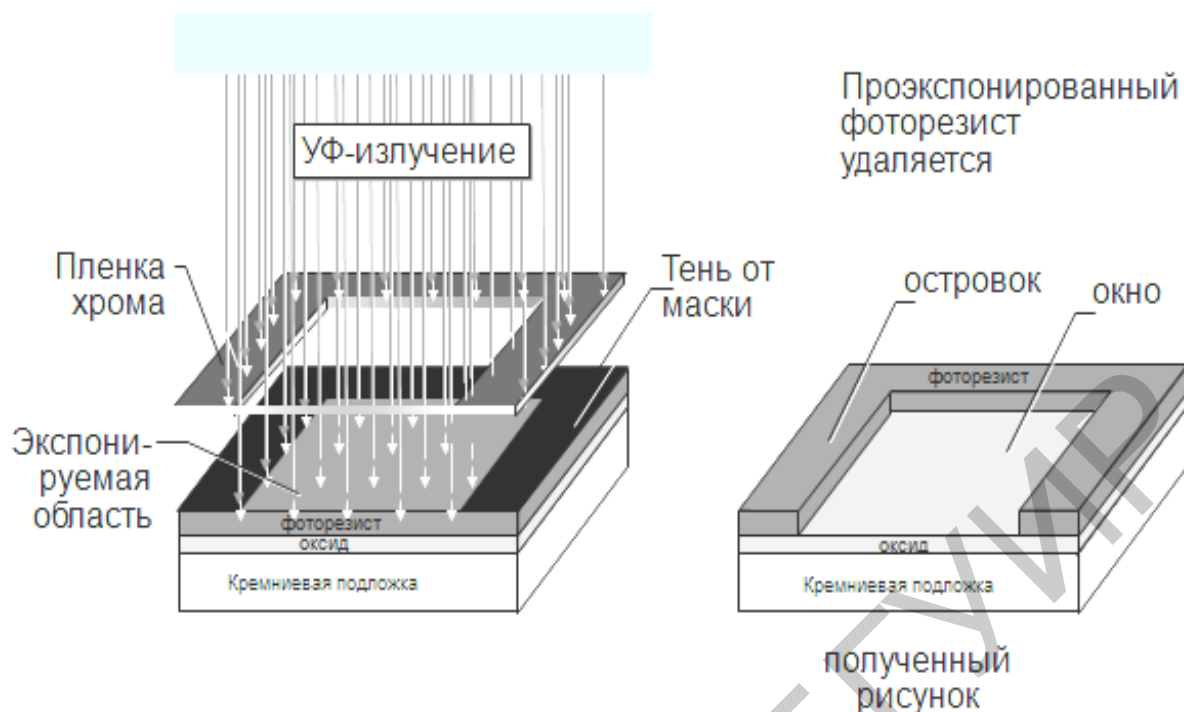


Рисунок 7 – Позитивная фотолитография

Основными параметрами, определяющими технологический уровень ФЛ, являются:

- минимальный элемент изображения и точность его воспроизведения в ФР по полю изображения, по подложке и в партии обрабатываемых подложек;
- погрешность совмещения топологических слоев;
- воспроизводимость формы (рельефа) элементов, протравленных в технологическом слое через маску в ФР;
- плотность дефектов в технологическом слое, внесенных в процессе литографии.

Рассмотрим следующие свойства фоторезистов.

1. *Светочувствительность* – это величина, обратная количеству поглощенной световой энергии, необходимой для получения в данном слое ФР определенного фотохимического эффекта, который состоит в потере (в негативном ФР) или приобретении (в позитивном ФР) растворимости облучаемых участков ФР

$$S = 1/(E \cdot t) = 1/H', \quad (2)$$

где E – интенсивность излучения слоя ФР h , в котором произошел требуемый фотохимический эффект;

t – время выдержки;

H – экспозиция.

Физический смысл этого критерия состоит в том, что чем меньше требуется экспозиция для изменения растворимости слоя на глубину h , тем более светочувствителен ФР. Большинство ФР обладает светочувствительностью к ультрафиолетовой области спектра, лежащей в диапазоне от 300 до 500 нм.

Критерием светочувствительности позитивных ФР является полнота разрушения и удаления (реакции фотолиза) с поверхности подложки локальных участков слоя ФР после экспонирования, проявления и образования рельефного рисунка.

Высокая светочувствительность материалов достигается введением в полимерные композиции светочувствительных добавок.

2. Разрешающая способность фоторезиста – это максимально возможное число отдельно передаваемых одинаковых линий защитного рельефа на 1 мм поверхности подложки

$$R = \frac{1000}{2l}, \quad (3)$$

где R – разрешающая способность, линий/мм;

l – ширина отдельно передаваемой линии, мкм.

Визуально разрешающую способность можно проиллюстрировать качественно сформированной фоторезистивной маской (рисунок 8), и тогда разрешающую способность можно представить как четко читаемый минимальный размер элемента топологии (рисунок 9).

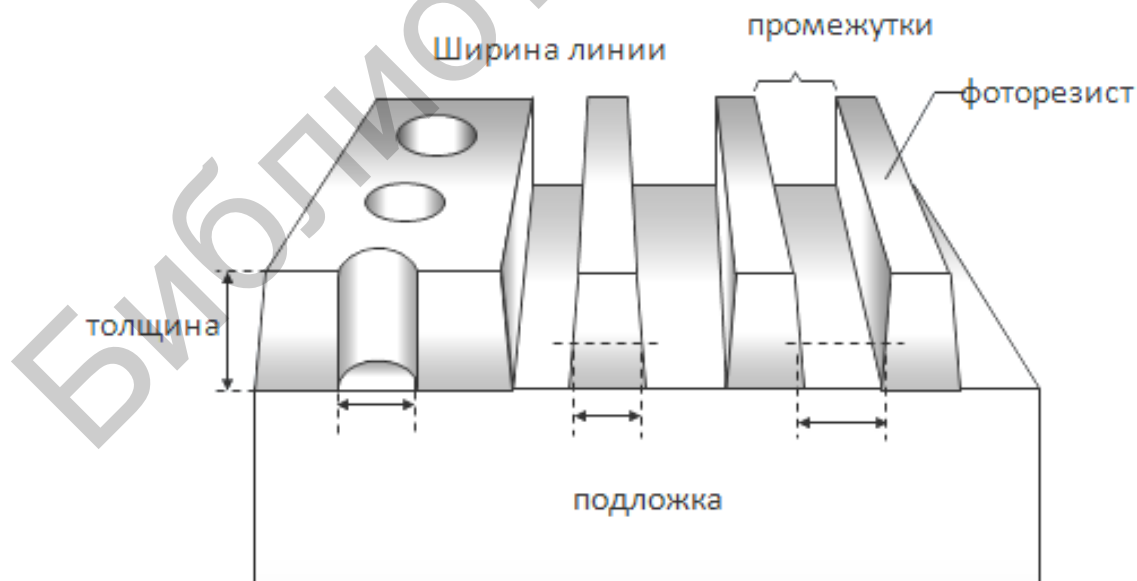


Рисунок 8 – Качественно сформированная фоторезистивная маска



Рисунок 9 – Разрешающая способность как четко читаемый размер топологии (0,25 мкм)

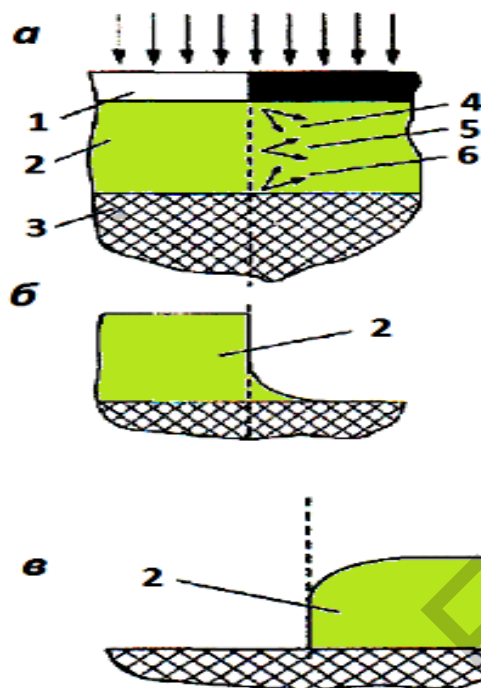
Следует различать разрешающую способность ФР и процесса ФЛ в целом. Так, при разрешающей способности ФР около 1000 линий/мм процесс ФЛ позволяет получать разрешающую способность около 600 линий/мм, что объясняется наличием дифракции, интерференции, рассеяния и отражения света в системе «подложка – ФР-фотошаблон (ФШ)» (рисунок 10).

Свет в затемненную фотошаблоном область ФР может попасть за счет дифракции 4, диффузионного рассеивания в слое 5 и за счет отражения от подложки 6 (рисунок 10, а). Негативные и позитивные ФР будут по-разному реагировать на эти явления. Верхняя часть слоя негативных ФР, частично засвеченная вследствие дифракции и рассеивания света, не окажет существенного влияния, т. к. при проявлении она в основном будет вымыта. Наоборот, нижняя часть слоя ФР, засвеченная в результате отражения от подложки и рассеивания, сохранится, поскольку она достаточно прочно удерживается адгезией. Таким образом, у подложки толщина слоя окажется убывающей (рисунок 10, б). В позитивных ФР верхний слой в результате дифракции и рассеивания будет частично засвечен и вымыт при проявлении, т. е. будет округленной верхняя кромка (рисунок 10, в). Отражение и рассеивание света также вызовут частичное разрушение нижнего слоя ФР, однако вследствие адгезии проявитель лишь незначительно вымоет эту область.

Разрешающая способность процесса ФЛ снижается также из-за бокового подтравливания материала подложки под слоем ФР на границах защитного рельефа (рисунок 11). Оно увеличивается при использовании толстых пленок.

Разрешающая способность процесса во многом определяется также совершенством применяемых ФШ и источников УФ-излучения. Принято

считать, что разрешающая способность всего процесса фотолитографии в 1,5-2 раза хуже разрешающей способности используемых фоторезистов.



a – основные источники размытости кромок ФР;

б – верхняя часть слоя негативных ФР;

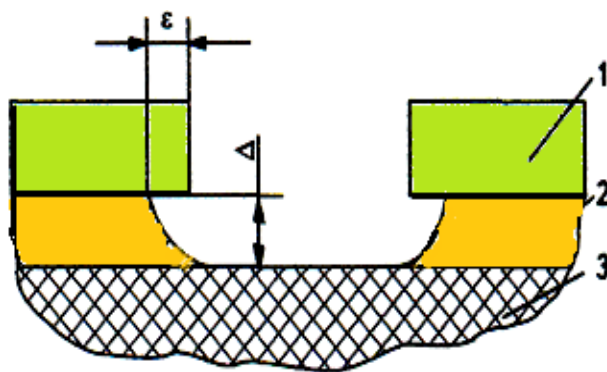
в – верхняя часть слоя у позитивных ФР:

1 – фотошаблон; 2 – фоторезист; 3 – подложка; 4 – дифракция света;
5 – диффузионное рассеивание; 6 – отражение лучей от подложки

Рисунок 10 – Причины размытости кромок фоторезиста

3. Устойчивость к химическим воздействиям.

ФР должны обладать высокой устойчивостью к воздействию кислот и щелочей, т. к. в процессе травления или электролитического осаждения защитный рельеф значительное время (до нескольких минут) контактирует с концентрированными кислотами (плавиковой, азотной, соляной, ортофосфорной, серной) и щелочами (едкими калием и натрием).



1 – фоторезист; 2 – пленка, подлежащая травлению (SiO_2 , металл);
3 – подложка; ε – боковое подтравливание; Δ – глубина травления

Рисунок 11 – Боковое подтравливание под слоем ФР

Кислотостойкость ФР часто оценивают фактором травления

$$K = \Delta/\varepsilon, \quad (4)$$

где Δ – глубина травления;

ε – боковое подтравливание (см. рисунок 11).

Стойкость фоторезистивного покрытия зависит также от адгезии слоя к подложке.

4. *Равномерность ФР-покрытия.*

Рассматривается как на отдельно взятой подложке (градиентная погрешность), так и при переходе от одной подложки к другой (воспроизводимость покрытия). Градиентная погрешность толщины ФР и невоспроизводимость ее в серии подложек ухудшают светочувствительность и кислотостойкость и в конечном итоге приводят к снижению процента выхода годных изделий, точности и стабильности их параметров.

Равномерность ФР-слоя зависит от метода и условий его формирования и определяется такими физико-химическими свойствами ФР, как вязкость, плотность и смачиваемость им подложки.

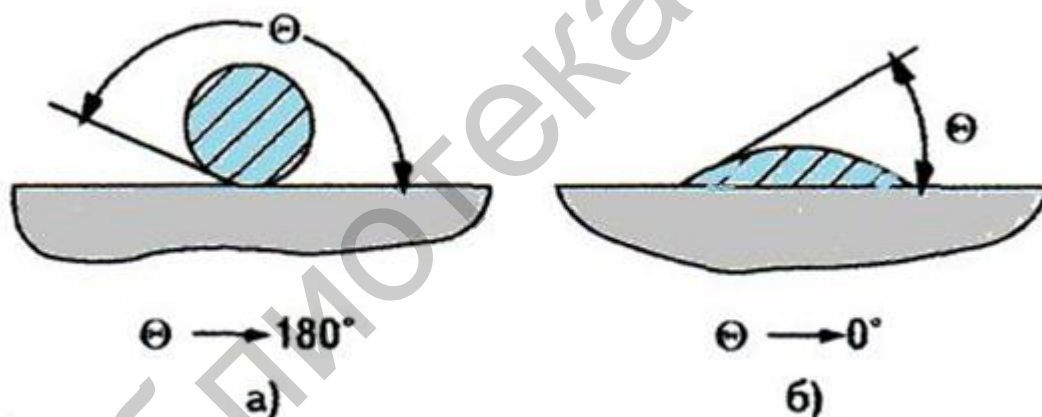
ГЛАВА 2 ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЦЕССА ФОТОЛИТОГРАФИИ

2.1 Этап 1. Формирование слоя фоторезиста

2.1.1 Подготовка поверхности подложки

Подготовка поверхности подложки к нанесению ФР состоит из нескольких операций и является индивидуальной для каждого конкретного случая в зависимости от материала подложки, технологии его получения, состояния поверхности и дальнейшего назначения маски. Адгезия фотослоя увеличивается с повышением смачивания поверхности подложки ФР. Проникновение травителя под слой фотомаски, приводящее к растравливанию подложки, в свою очередь, зависит от смачивания поверхности подложки травителем или водой.

Критерием смачиваемости является краевой угол смачивания Θ поверхности твердого тела жидкостью (рисунок 12). Оптимально подготовленной к ФЛ поверхностью является поверхность, которая хорошо смачивается ФР (гидрофильная поверхность) и плохо смачивается водой (гидрофобная поверхность), т. е. для которой выполняется условие: $\Theta_{\text{ф}} \rightarrow 0^\circ$, $\Theta_{\text{в}} \rightarrow 180^\circ$.



a – гидрофобная поверхность; *б* – гидрофильная поверхность

Рисунок 12 – Поверхность, смачиваемая жидкостью

Физико-химические загрязнения представляют собой адсорбированные на поверхности ионные и нейтральные примеси. Источниками загрязнения поверхности являются все материалы и среды, которые находятся в контакте с технологическим слоем (технологическая среда, инструмент, оснастка, тара и т. д.). Загрязняющие примеси делятся на органические (смолы, масла, жиры, остатки фоторезиста, растворители), механические (пыль, абразивы), ионные (растворимые в воде соли, кислоты и основания) и атомарные (золото, серебро,

медь, осаждаемые в виде микрородышей из источников нанесения металлизации).

Для их удаления применяют, как правило, следующие способы очистки: химические, основанные на десорбции примесей при обработке подложек в растворах, газовых средах и плазме, гидромеханические (для удаления пыли) и плазмы тлеющего разряда (для удаления любых загрязнений). Однако при использовании плазменных методов очистки следует учитывать возможность деградации поверхностного слоя при ионной бомбардировке.

Обезжиривание подложек проводится в парах органических растворителей: толуола, трихлорэтилена, четыреххлористого углерода и др.

Для удаления с поверхности подложек механических загрязнений применяют физические способы очистки, например гидромеханическую очистку (рисунок 13).



Рисунок 13 – Гидромеханическая очистка

Интенсификация процесса ультразвуком (рисунок 14) достаточно эффективна за счет эффекта кавитации, однако ее нельзя подавать на большой мощности, чтобы не вызвать деградацию поверхности.

После обезжиривания и гидромеханической очистки производят отмывку подложек – растворение в деионизованной воде остатков реагентов, минеральных солей, продуктов поверхностных реакций.

Чистота воды, используемой для финишной очистки, должна быть исключительно высокой. Используется только деионизованная вода с удельным сопротивлением 18 МОм·см (теоретически чистая вода имеет удельное сопротивление 18,24 МОм·см). Высокое удельное сопротивление воды свидетельствует об отсутствии носителей заряда, каковыми в основном являются ионы металлов и кислот.

В ИС высокой степени интеграции, начиная с третьей-четвертой литографии, сталкиваются с необходимостью планаризации поверхности. Это обусловлено конформностью рисунка вышележащего слоя (рисунок 15).

В современном производстве невозможно обойтись без химико-механической полировки (ХМП). По своей технической реализации ХМП не отличается от обычной алмазной полировки (рисунок 16), однако здесь нет абразива (алмазной пасты), которая создает механически нарушенный слой. Вместо алмазной пасты применяется травильный раствор, а вторичные продукты реакции удаляются гелем вещества, чья микротвердость не выше микротвердости материала нижележащего слоя. Физико-химическая идеология процесса ХМП показана на рисунке 17.

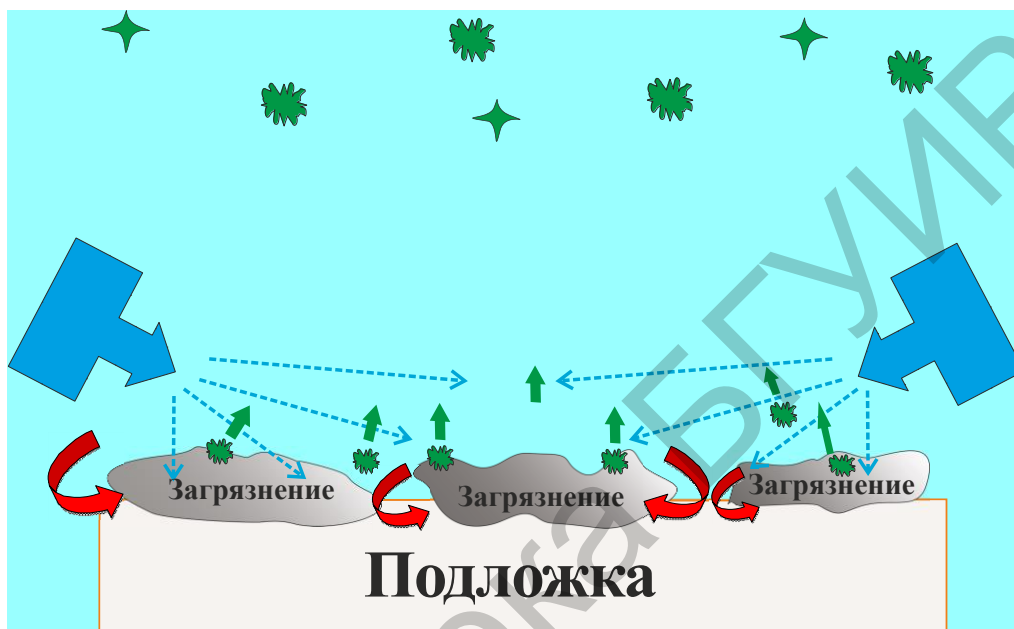


Рисунок 14 – Интенсификация процесса отмытки с помощью ультразвука



Рисунок 15 – Иллюстрация конформности нанесения вышележащего слоя

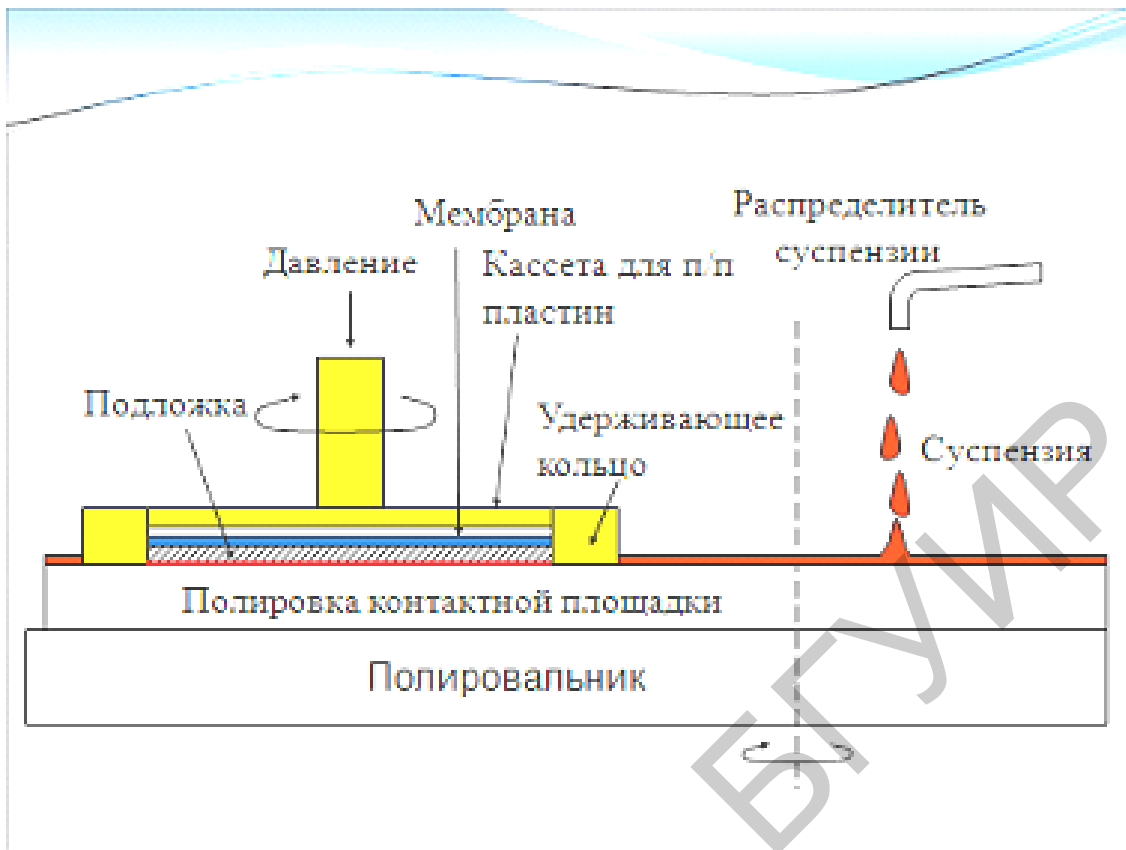


Рисунок 16 – Аппаратное обеспечение процесса ХМП

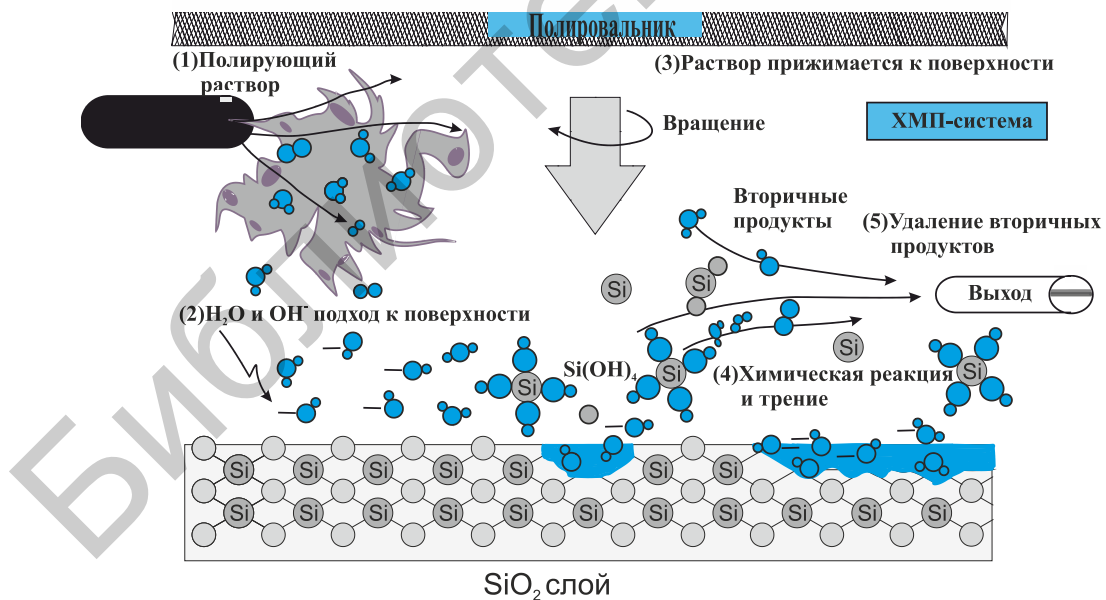


Рисунок 17 – Физико-химическая идеология ХМП

2.1.2 Нанесение слоя фоторезиста

Нанесенный на предварительно подготовленную поверхность подложек слой ФР должен быть однородным по толщине, без проколов и царапин (т. е. быть сплошным) и иметь хорошую адгезию.

Наносят слой ФР в максимально обеспыленной среде. Перед употреблением ФР обязательно фильтруют в специальных фильтрах (набор стеклянных фильтров Шотта и синтетических Петряинова).

Существуют следующие методы нанесения ФР:

- центрифугирование;
- распыление;
- электростатический метод;
- окунание;
- полив;
- накатка.

Наиболее распространенными являются методы центрифугирования и распыления.

Метод центрифугирования в основном применяется для круглых подложек и является базовым процессом практически всех ИС (рисунок 18).

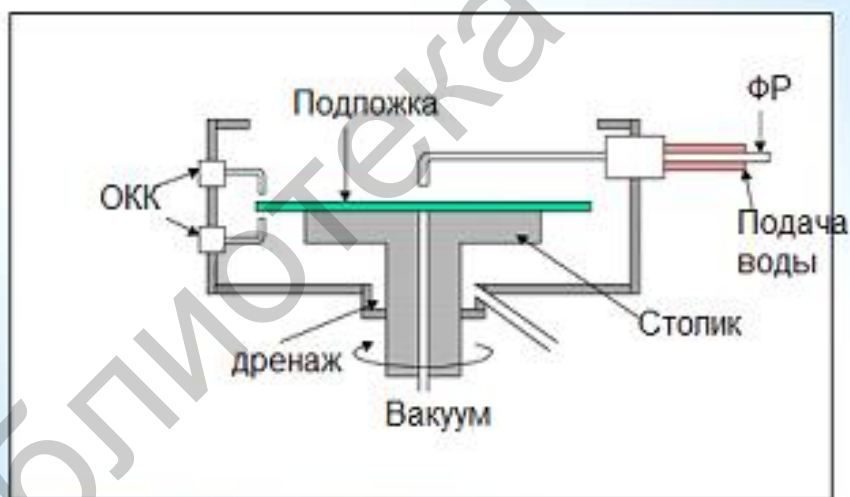


Рисунок 18 – Структура устройства центрифугирования

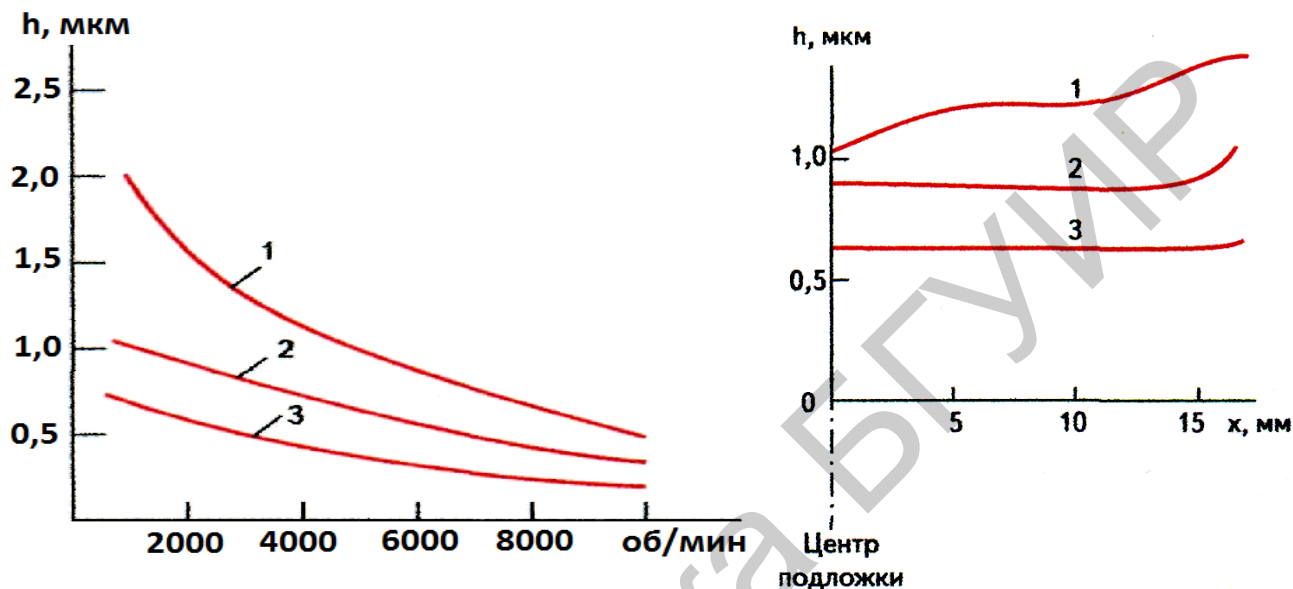
Когда столик приводится во вращение, ФР растекается тонким слоем по поверхности подложки, а его излишки сбрасываются с нее и стекают по кожуху. При вращении центрифуги происходит испарение растворителя и вязкость ФР возрастает, поэтому он не полностью сбрасывается с поверхности подложки.

С увеличением скорости центрифугирования уменьшается не только среднее значение толщины ФР (рисунок 19), но и ее разброс.

Большой разброс (невоспроизводимость) значений толщины при числе оборотов, меньше критического, можно объяснить краевым утолщением слоя

фоторезиста, которое с увеличением частоты вращения уменьшается и смещается к периферии подложки (см. рисунок 19). Это утолщение (так называемый край кромки) является проблемой при последующей фотолитографии из-за невозможности обеспечения плотного контакта между слоем ФР и плоскостью фотошаблона.

Решение этой проблемы осуществляется краевым растворением наносимого фоторезиста на той же установке центрифугирования (рисунок 20).



1 – $12 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$; 2 – $10 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$; 3 – $5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$

Рисунок 19 – Зависимость толщины слоя h фоторезиста от частоты вращения центрифуги при различных значениях его кинематической вязкости

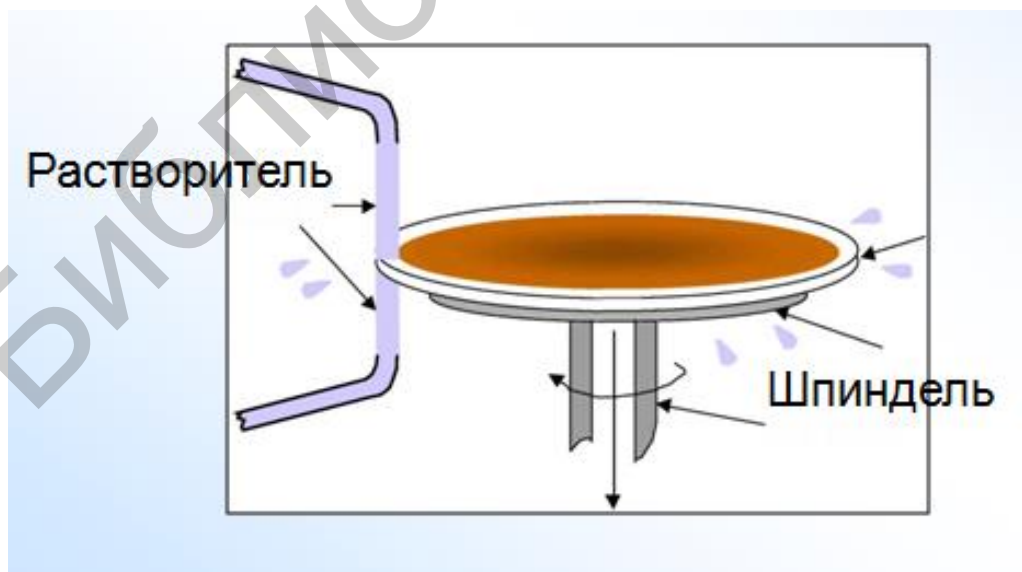
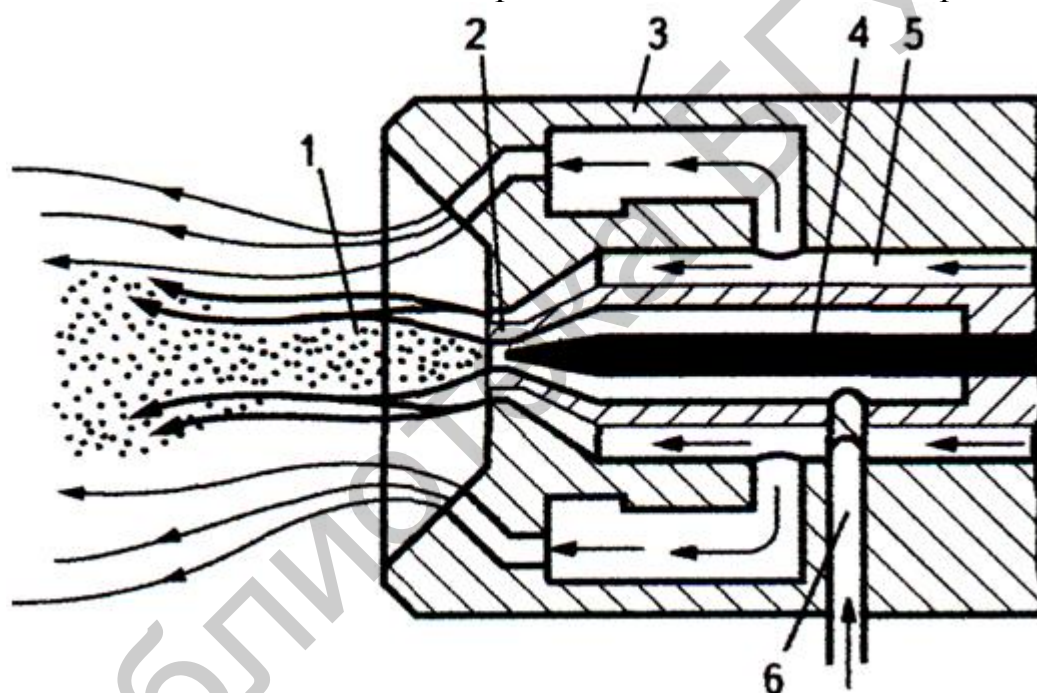


Рисунок 20 – Обрамление края кромки (ОКК)

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 агрессивному травителю. Кроме того, слой ФР не должен иметь дефектов в виде проколов, число которых с уменьшением толщины увеличивается. Следовательно, толщина слоя ФР должна быть минимальной, но достаточной для обеспечения его стойкости к травителю, плотности и малой дефектности.

При методе распыления (пультверизации) (рисунок 21) нанесение ФР производится форсункой, в которой для диспергирования струи раствора ФР при выходе из сопла используется сжатый воздух. Распылением можно наносить слой на рельефные поверхности, получать слои толщиной от 0,3 до 20 мкм с точностью до 10 %. Этот метод позволяет получить высокую конформность (повторение нижележащего рельефа вскрытого технологического слоя) без специальных методов планаризации поверхности. Однако он эффективен только для ИС с невысокой степенью интеграции и для относительно простых МЭМС.



1 – область разрезания; 2 – сопло; 3 – форсунка; 4 – регулирующая игла;
5 – распыляющий газ; 6 – подача фоторезиста

Рисунок 21 – Схема нанесения фоторезиста методом пультверизации

2.1.3 Мягкая сушка фоторезиста

Сушка ФР происходит в два этапа:

- 1) низкотемпературная выдержка нанесенного слоя;
- 2) высокотемпературная выдержка нанесенного слоя.

В процессе сушки удаляется растворитель и в пленке ФР происходит сложный релаксационный процесс плотной упаковки молекул,

уменьшающий внутренние напряжения и увеличивающий адгезию фотослоя к подложке. Растворитель при сушке необходимо удалять полностью, т. к. он экранирует фоточувствительные части молекул при экспонировании.

Удаление растворителя состоит из двух стадий:

- 1) диффузия изнутри слоя к границе «слой – атмосфера»;
- 2) испарение с поверхности.

Если испарение преобладает над диффузией, поверхностный слой ФР уплотняется раньше внутреннего слоя и препятствует удалению растворителя изнутри (своеобразная непроницаемая корка на жидком фоторезисте). При этом в слое ФР возникают внутренние напряжения, ослабляющие слой и приводящие к его разрывам.

Основными параметрами процесса сушки являются температура, время и характер выхода на рабочую температуру. При низких температурах адгезия фотослоя к подложке плохая, преобладает сцепление между собственными молекулами полимера (когезия). Слишком быстрая сушка может привести к возникновению механических напряжений в пленке. Температурная зависимость процесса высыхания показана на рисунке 22.

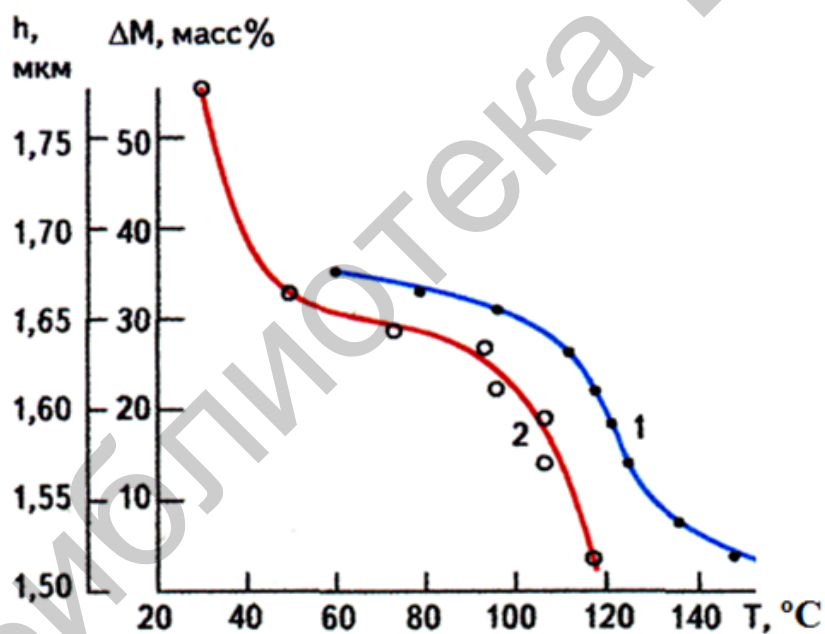


Рисунок 22 – Температурная зависимость потери массы ФР (1) и его толщины (2) при длительности сушки 30 мин

Предельной температурой сушки является температура задубливания слоя, но при этом происходит потеря светочувствительности ФР. Для большинства ФР предельная температура составляет 140–150 °C.

Существует три метода сушки:

- конвективный;
- инфракрасный (ИК);
- СВЧ-поле.

Конвективная сушка выполняется в термостатах. Образующаяся на поверхности уплотненная часть слоя препятствует равномерной и полной сушке. Для равномерного испарения растворителя и снижения внутренних механических напряжений в фотослое сушку выполняют в два этапа: 1) 15–20 мин при 18–20 °С; 2) 30–60 мин при 90–120 °С. Недостаток метода – низкое качество ФР-слоя.

ИК-сушка отличается равномерным удалением растворителя по толщине слоя резиста, поскольку источником тепла является сама подложка. ФР прозрачен для ИК-излучения, поэтому тепло достигает границы раздела «подложка – резист» и, отразившись от подложки, сильнее нагревает нижние прилегающие к подложке слои ФР. Градиент температуры и направление ухода растворителя при этом совпадают. Следовательно, «фронт сушки» перемещается от подложки к поверхности слоя ФР, поэтому у поверхности слой преждевременно не уплотняется. ИК-сушка является основным промышленным методом, применяемым в линиях фотолитографии.

При СВЧ-сушке поверхность нагревается («скин-эффект» – эффект вытеснения электронных процессов на поверхность) за счет поглощения СВЧ-поля. Такая сушка производится в печах мощностью 200–400 Вт при рабочей частоте 2,45 ГГц. Время сушки несколько секунд. СВЧ-сушке подвергают только однородные подложки без металлизации.

2.2 Этап 2. Создание рельефной структуры фоторезиста

Данный этап состоит из следующих операций: совмещение, экспонирование, проявление и жесткая термообработка резиста.

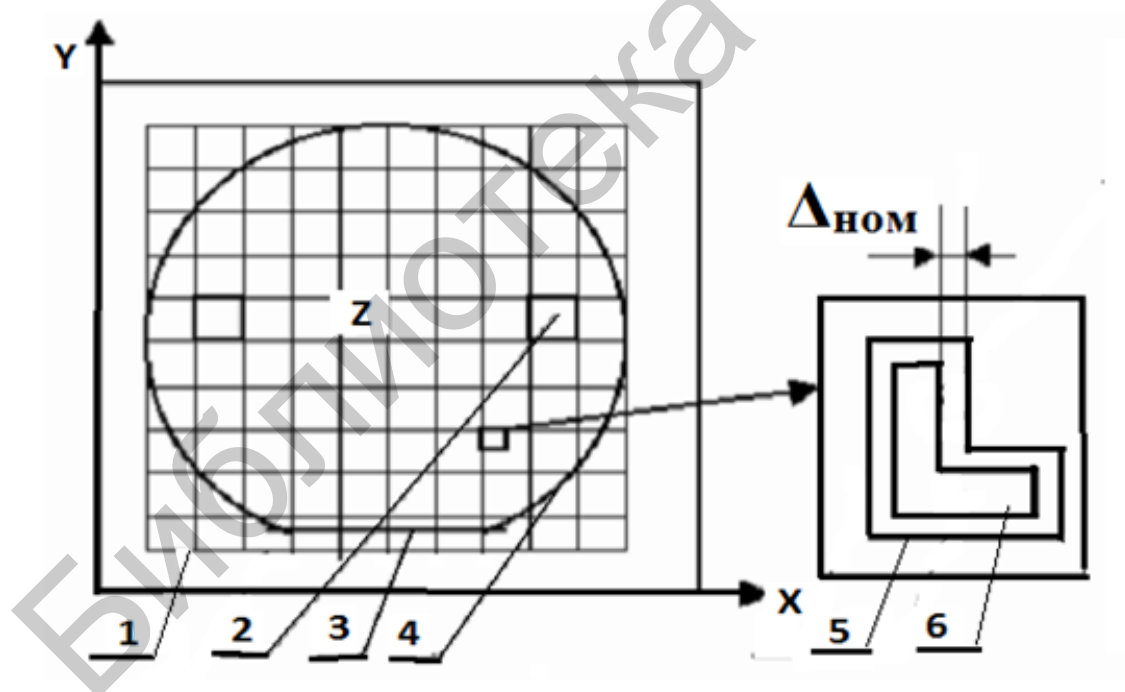
2.2.1 Фотошаблон и операция совмещения

Фотошаблон представляет собой плоскопараллельную пластину прямоугольной формы из прозрачного материала (кварц, оптическое стекло), на поверхность которой нанесен рисунок, состоящий из прозрачных и непрозрачных для света определенной длины волны участков на основе пленочного покрытия. Этот рисунок образует топологию одного из слоев прибора и размножен (мультиплицирован) по всему рабочему полю фотошаблона (групповой фотошаблон).

Для производства каждого прибора применяется комплект фотошаблонов. В качестве покрытий, создающих рисунок фотошаблонов, могут использоваться тонкие пленки металлов (обычно хрома). Такие шаблоны называются *металлизированными*, они являются наиболее распространенными в

серийном производстве ИС. Однако ввиду высокой зеркальности, чтобы избежать переотражения света между зеркальными поверхностями хрома и технологического слоя, поверхность хрома зачастую матируют. Если в качестве покрытий используют окисные пленки (окиси хрома, окиси железа, окись алюминия) или пленки нитрида кремния, такие шаблоны называются *цветными*. Цветные шаблоны выгодно отличаются от металлизированных повышенной износостойкостью при контактной печати и возможностью совмещать верхний рисунок с нижним ввиду оптической прозрачности окислов, несмотря на то что они цветные (окись хрома – зеленая, окись таллия – желтая, окись железа – рыжая и т. д.). Такие окислы получают из газовой фазы путем низкотемпературного осаждения из элементсодержащих газов (CVD-методы).

Начиная со второй ФЛ необходимо совмещать рисунок очередного ФШ с рисунком на подложке, полученным при формировании предыдущего технологического слоя. Следовательно, используемые комплекты фотошаблонов должны быть совмещаемыми, и перед выполнением операции экспонирования проводится операция совмещения. Совмещение выполняют на той же установке экспонирования путем наложения реперных меток ФШ на проявленные реперные метки нижележащего технологического слоя. Принцип совмещения показан на рисунке 23.



- 1 – групповой фотошаблон; 2 – модули для грубого совмещения;
 3 – базовый срез на подложке; 4 – нижележащий технологический слой;
 5 – реперный знак совмещения в модуле технологического слоя; 6 – знак совмещения в модуле фотошаблона

Рисунок 23 – Принцип операции совмещения

Используются три метода совмещения ФШ с подложкой:

1) *базовый*, при котором выбранный участок подложки (базу, сторону) устанавливают в определенном фиксированном положении; этот метод дает точность совмещения ± 10 мкм;

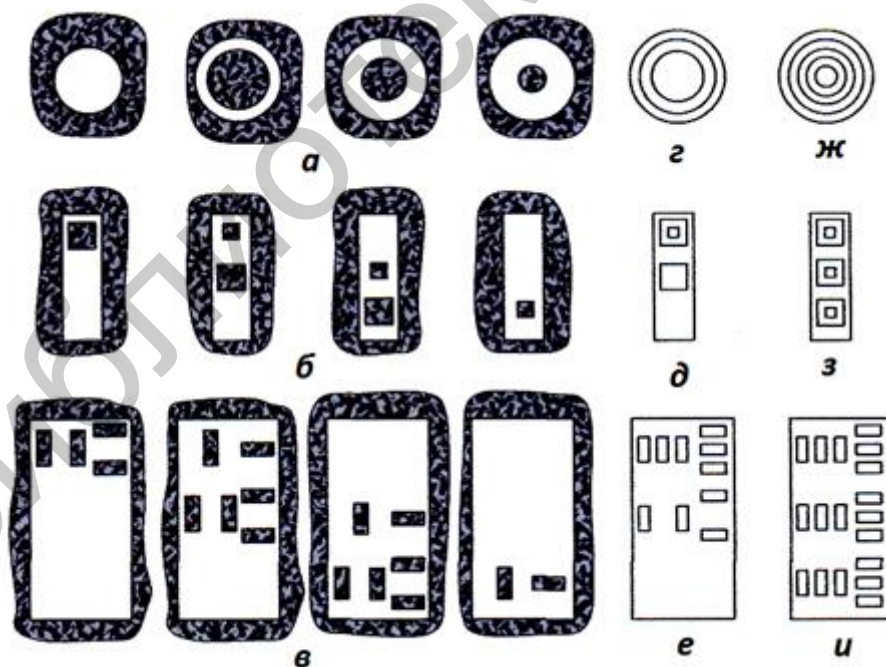
2) *визуальный*, при котором оператор совмещает ФШ с подложкой по контрольным меткам; этот метод обеспечивает точность совмещения 0,25–1 мкм и используется наиболее часто;

3) *автоматизированный (фотоэлектрический)* применяется с помощью фотоэлектронного микроскопа, обеспечивающего погрешность совмещения не более 0,03–0,3 мкм.

Визуальный способ совмещения заключается в одновременном наблюдении в неактивном свете с помощью микроскопа рисунка на пластине и рисунка ФШ.

Для предотвращения царапания и стирания поверхности ФШ и фотослоя между ними устанавливают микрозазор. При этом для совмещения используют двухпольные микроскопы, позволяющие одновременно наблюдать два отдаленных друг от друга участка подложки.

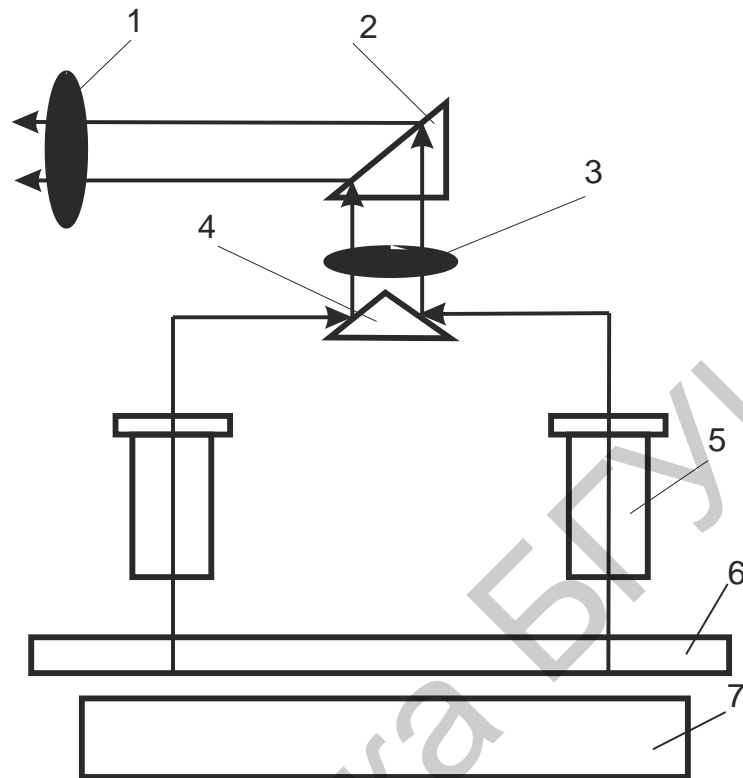
Сначала рисунки совмещаются по меткам грубого совмещения в пределах достаточно больших перемещений подложки. Затем выполняется точное совмещение с помощью фигур совмещения с контролируемым зазором по контуру (рисунок 24).



а – концентрические окружности; *б* – концентрические квадраты;
в – бисекторные знаки; *z–и* – их вид на пластине после второго и четвертого этапов ФЛ

Рисунок 24 – Знаки совмещения

Совмещение знаков должно быть осуществлено на двух противоположных краях подложки, что исключает разворот рисунков вокруг оси, перпендикулярной плоскости изображений (рисунок 25).



1 – окуляр; 2, 4 – призмы; 3 – линза; 5 – объектив; 6 – ФШ; 7 – подложка

Рисунок 25 – Схема совмещения с применением двупольного микроскопа

Автоматизированный (фотоэлектрический) метод – точное совмещение с помощью фотоэлектрического микроскопа, который фиксирует разницу освещенности между метками совмещения подложки и фотошаблона и преобразует полученную информацию в команды для перемещения столика с подложкой.

Одна из основных трудностей обеспечения точного совмещения – создание механизмов плавных перемещений подложек на расстояния менее 1 мкм. В современных установках совмещения используют устройства на пьезоэлектрических кристаллах, позволяющих создавать перемещение подложек с точностью ± 10 нм.

2.2.2 Экспонирование фоторезиста

Существует три способа экспонирования:

- контактное экспонирование (рисунок 26);
- экспонирование с микроззором;
- проекционное экспонирование (рисунок 27).

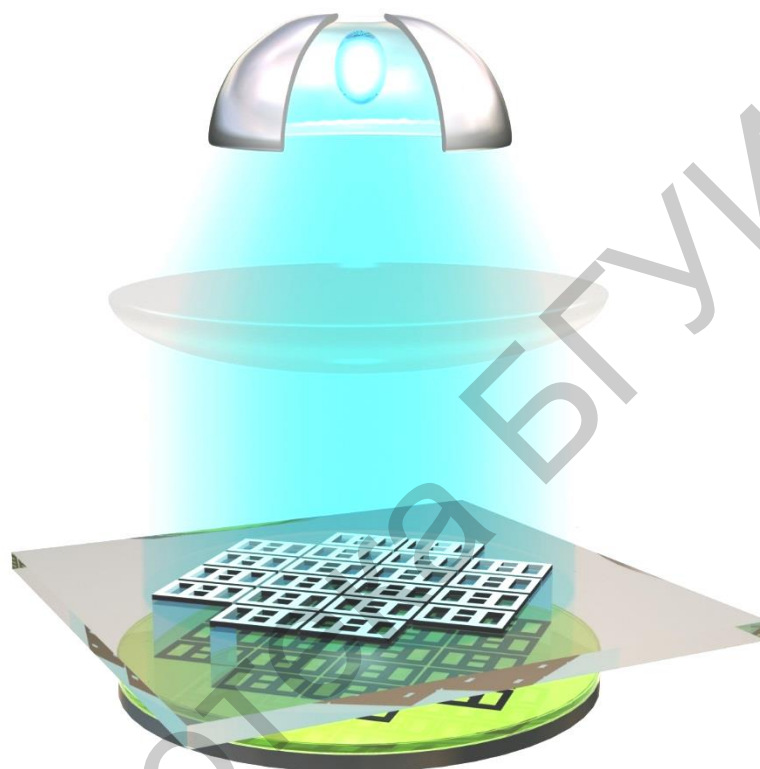


Рисунок 26 – Контактное экспонирование

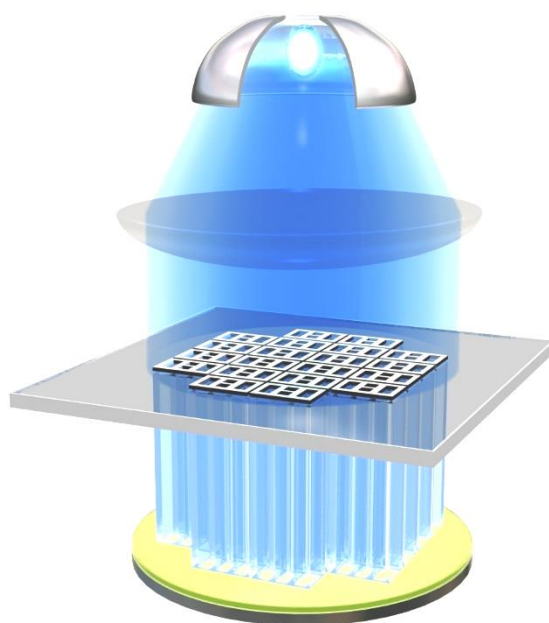


Рисунок 27 – Проекционное экспонирование

При контактном экспонировании необходимое усилие контакта между фотошаблоном и ФР создается вакуумным или пневматическим прижимом. В качестве источников экспонирующего УФ-излучения применяют ртутно-кварцевые лампы, обеспечивающие высокую освещенность (до десятков тысяч люксов). Для согласования спектров поглощения ФР и излучения источника применяют светофильтры. Параллельность пучка излучения, необходимая для равномерной освещенности экспонируемой поверхности фотослоя, обеспечивается системой конденсоров. Необходимое время экспонирования обеспечивается электромагнитным затвором, время открывания и закрывания шторки которого составляет 0,05–0,1 с.

Существенным ограничением контактной фотолитографии является неизбежность механических повреждений рабочих поверхностей ФШ и подложки. В этом плане максимальной механической износостойкостью обладают цветные фотошаблоны. При использовании обычных металлизированных шаблонов их защищают от механических повреждений нанесением оксида кремния методом CVD. Однако в итоге такой шаблон выдерживает 25–30 контактных экспонирований, после чего его приходится менять, поэтому экономическая целесообразность дешевого способа контактного экспонирования становится сомнительной.

На качество переноса изображения ФШ на фотослой существенно влияют дифракционные явления, которые обнаруживаются при наличии зазоров (даже при плотном механическом контакте) между ФШ и подложкой. Эти неизбежные зазоры возникают главным образом из-за неплоскостности подложки, которая достигает 20 мкм в исходной пластине и увеличивается при последующих термических операциях за счет естественного коробления.

Напомним кратко основные положения из оптики, определяющие качество экспонирования, что в конечном итоге определит качество рисунка – его четкость.

Оптическая система проецирует плоский объект в плоскости светочувствительного (актиничного) слоя. Масштаб изображения – это отношение величины реального отрезка к величине сопряженного отрезка в плоскости изображения. Угол изображения – это максимальный угол пучка лучей, проходящих от предмета во входной зрачок объектива.

Основными параметрами объектива являются:

- фокусное расстояние;
- раствор объектива – величина поверхности линзы для входа света (мера количества света, воспринимаемого объективом за единицу времени);
- относительное отверстие – отношение диаметра входного зрачка к фокусному расстоянию объектива;
- апертура – синус угла раствора со стороны изображения $A = n \sin \alpha$, где n – коэффициент преломления среды (для воздуха $n = 1$, $n > 1$ – иммерсионная среда).

Дифракция – расхожимость светового излучения при прохождении через узкие щели (рисунок 28).

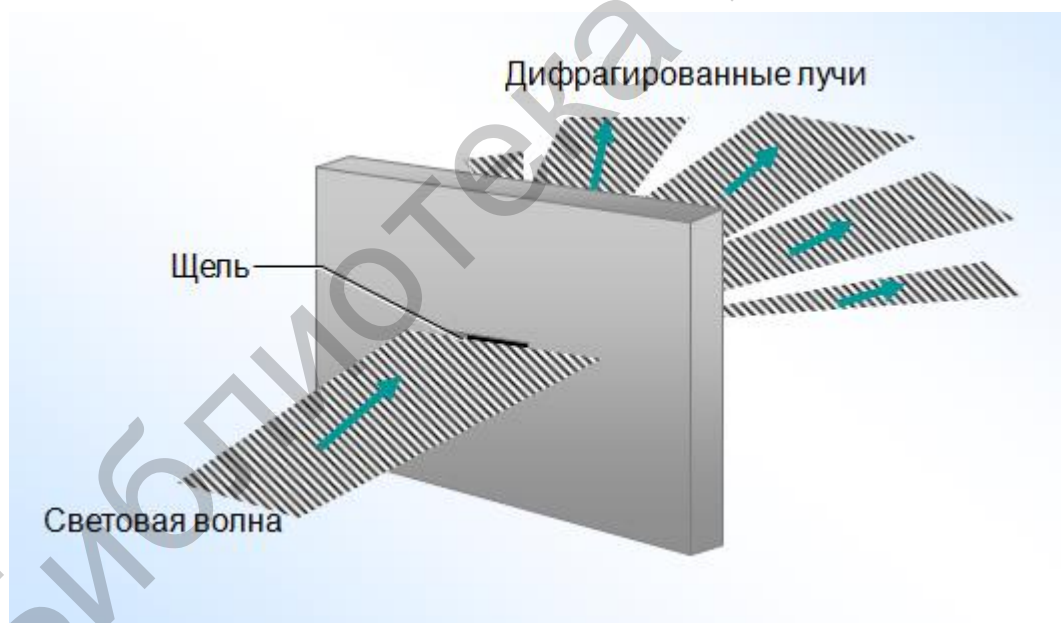


Рисунок 28 – Дифракция света

В результате дифракции на углах и переотражения от обратной стороны маски происходит дополнительная (неправильная) засветка ФР (рисунок 29).

Дифракция света без линзы обеспечивает неравномерную интенсивность проецированного света (рисунок 30).

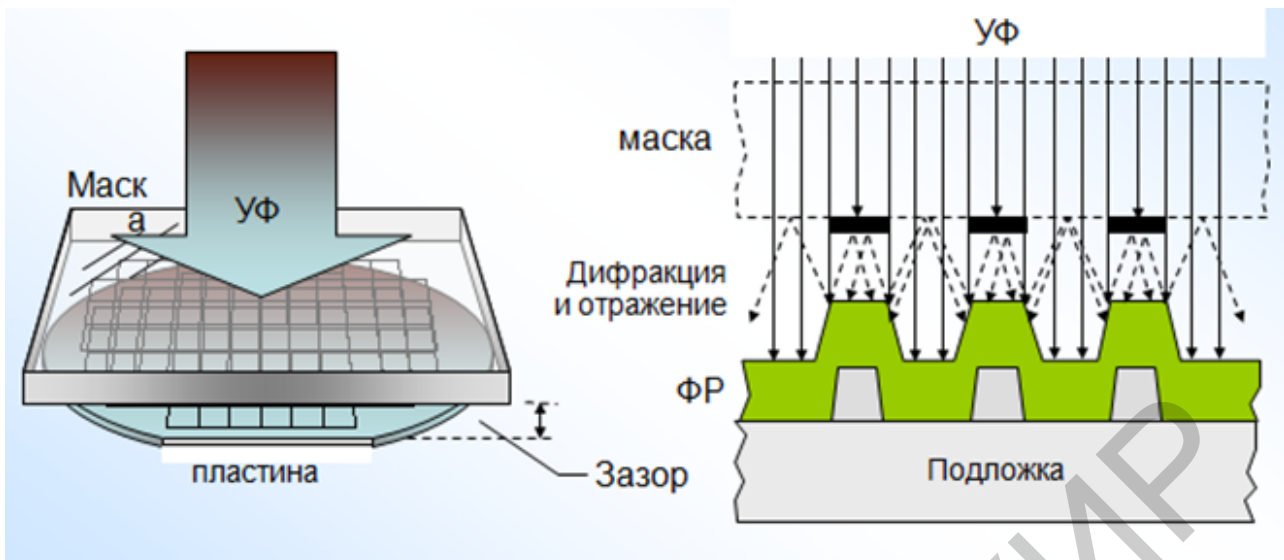


Рисунок 29 – Дифракция на границе и переотражение поверхности при фотолитографии на микрозазоре

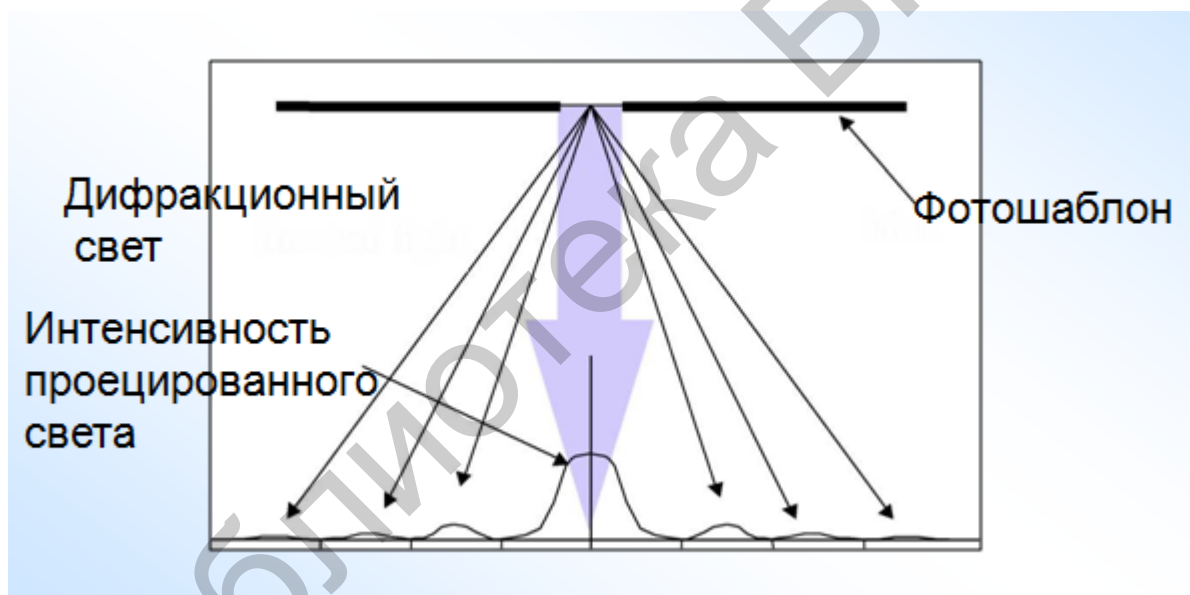


Рисунок 30 – Неравномерность интенсивности проецированного света

Введение линзы позволяет собрать дифрагированные лучи (рисунок 31).

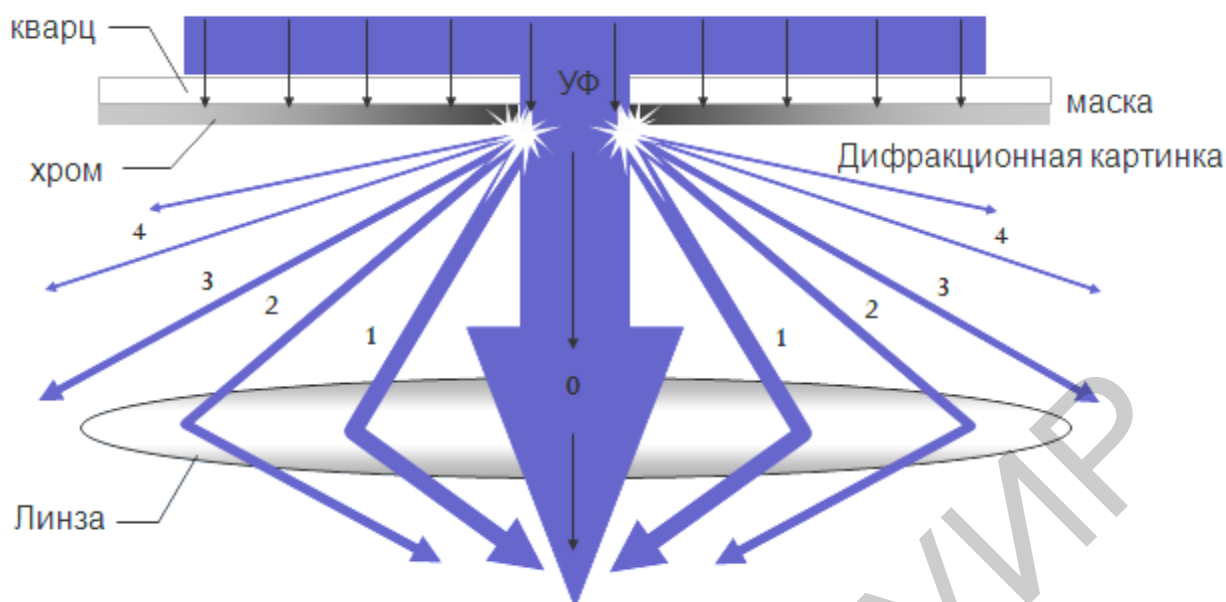


Рисунок 31 – Сбор дифрагированных лучей линзой

В результате прохождения света через линзу существенно уменьшается дифракция после фокусировки линзы (рисунок 32).

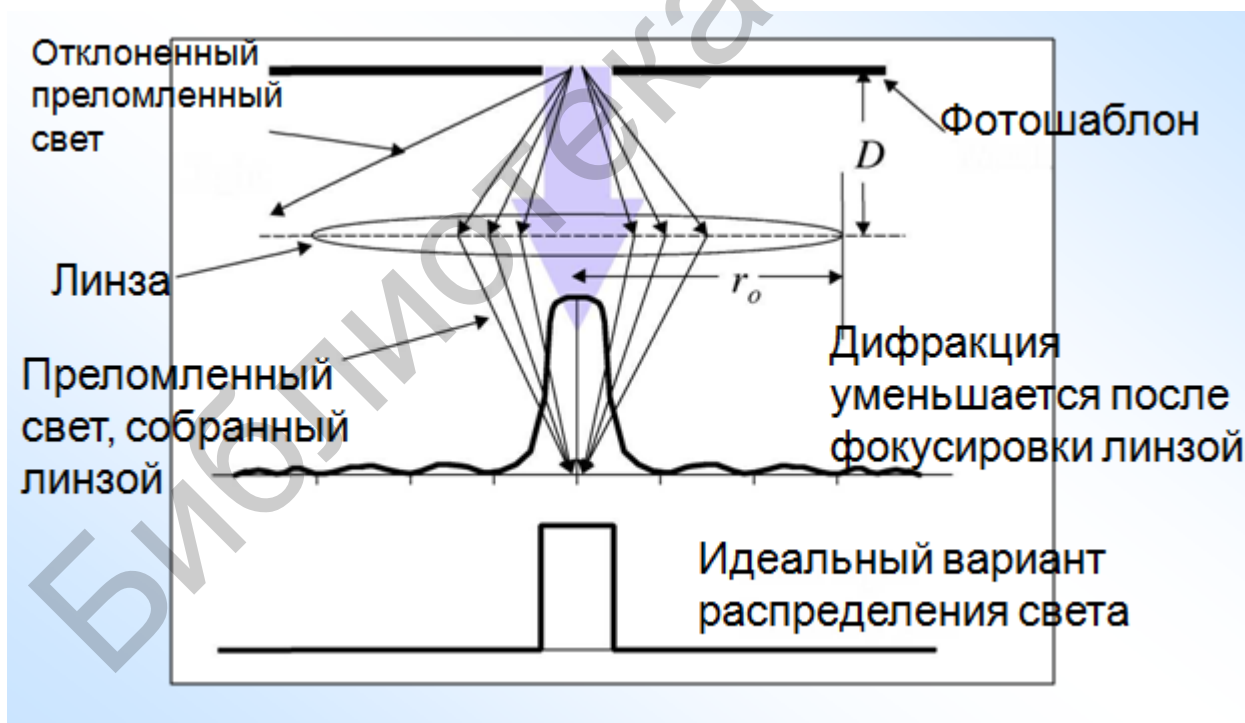


Рисунок 32 – Распределение интенсивности дифрагированного света фокусировки линзой

Интерференция обеспечивает периодическое усиление света (рисунок 33).

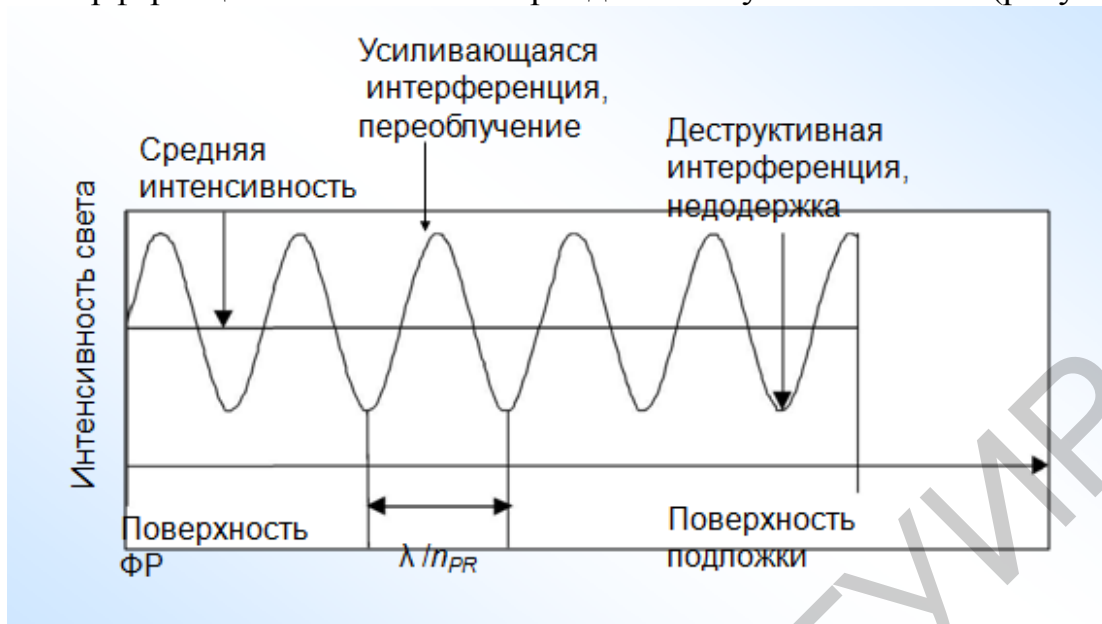


Рисунок 33 – Интенсивность стоячей световой волны, обусловленная интерференцией

В результате прохождения такой стоячей волны вертикальная стенка освещается световой синусоидой и после проявления становится гофрированной (рисунок 34).

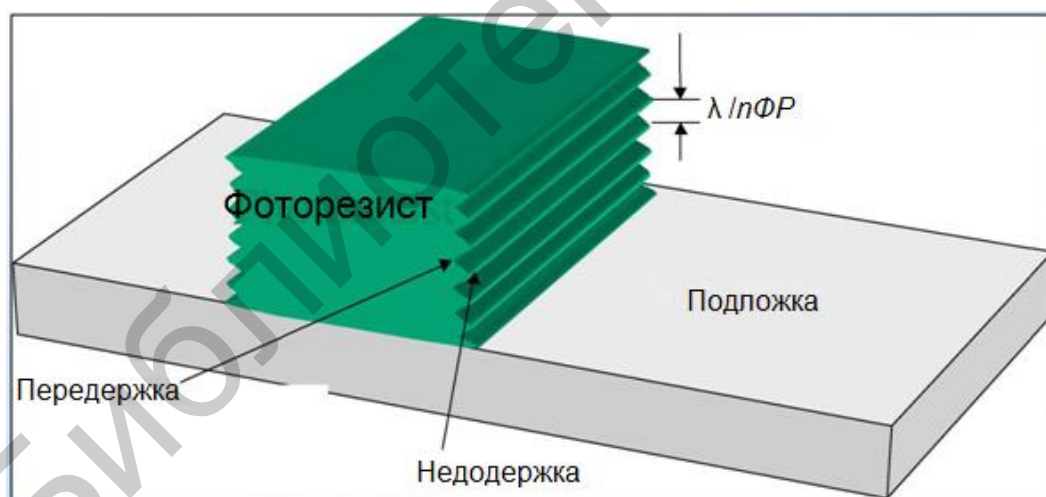


Рисунок 34 – Профиль вертикальной стенки фоторезиста, обусловленный прохождением стоячей волны

Числовая апертура NA – способность линзы собрать преломленный свет:

$$NA = 2r_0/D, \quad (5)$$

где r_0 – радиус линзы;

D – расстояние от предмета до линзы.

Линза с большим NA может захватить более высокий порядок преломленного света и генерировать более четкое изображение. Визуализация эффекта числовой апертуры показана на рисунке 35.

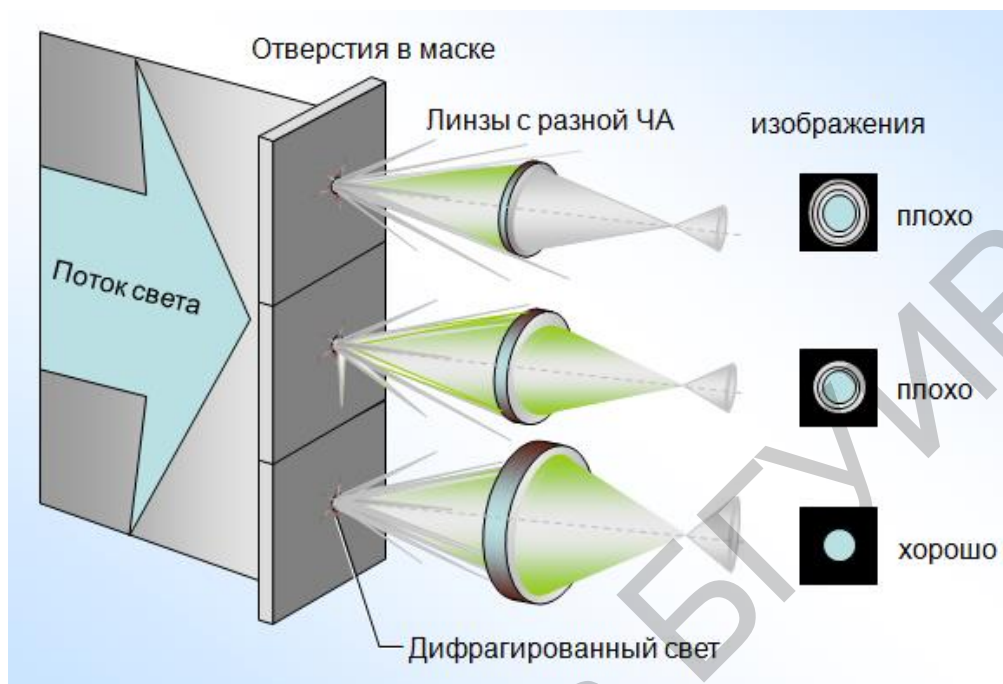


Рисунок 35 – Визуализация числовой апертуры

Разрешающая способность системы – минимальный размер элемента изображения – описывается критерием Рэля:

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} = k_1 \frac{\lambda}{n \sin \theta}, \quad (6)$$

где R – разрешающая способность;

k_1 – параметр процесса;

λ – длина волны экспонируемого света в вакууме;

NA – числовая апертура проекционной линзы ($NA = n \sin \theta$);

n – показатель преломления среды между проекционной линзой и подложкой;

θ – апертурный угол проекционной линзы, максимальный угол падения света на подложку.

Из критерия Рэля видно, что улучшение разрешающей способности фотолитографической системы возможно путем уменьшения длины волны λ экспонирующего света, увеличения числовой апертуры (NA) проекционной линзы и общей оптимизации процесса.

В полном соответствии с этим положением разрешающая способность в микроэлектронной промышленности увеличилась в результате разработки излучающих устройств с последовательно уменьшающейся длиной световой

волны: *g*-линия (436 нм), *i*-линия (365 нм), глубокого ультрафиолета (248 нм), ArF-лазера (193 нм); также создавались экспонирующие устройства с большими значениями *NA* для каждой длины волны соответственно. В дополнение к уменьшению длины волны и увеличению *NA* улучшение разрешающей способности может быть также достигнуто оптимизацией параметров процесса, что описывается параметром процесса k_1 .

Параметр процесса (k_1) – константа, выражающая определенную степень оптимизации параметров процесса, его технологичность. Этот комплексный параметр зависит от качества (чувствительности) фоторезиста и вариации технологии улучшения разрешения. Параметр процесса определяет сложность создания изображения определенных размеров на определенном экспонирующем устройстве. Большее значение параметра процесса упрощает контроль за литографическим процессом и повышает производительность, но увеличивает разрешающую способность системы. На производстве обычно реализуются процессы со значением $k_1 > 0,30$. Согласно теории дифракции минимальное значение $k_1 = 0,25$, но при этом неясно, возможно ли реализовать в промышленных масштабах такой технологический процесс. Литографический процесс со значением $0,25 < k_1 < 0,30$ сложен и требует крайне агрессивных решений в области технологии улучшения разрешения. Расчет разрешающей способности представлен на рисунке 36, где k_1 константа оптической системы, λ – длина волны света.

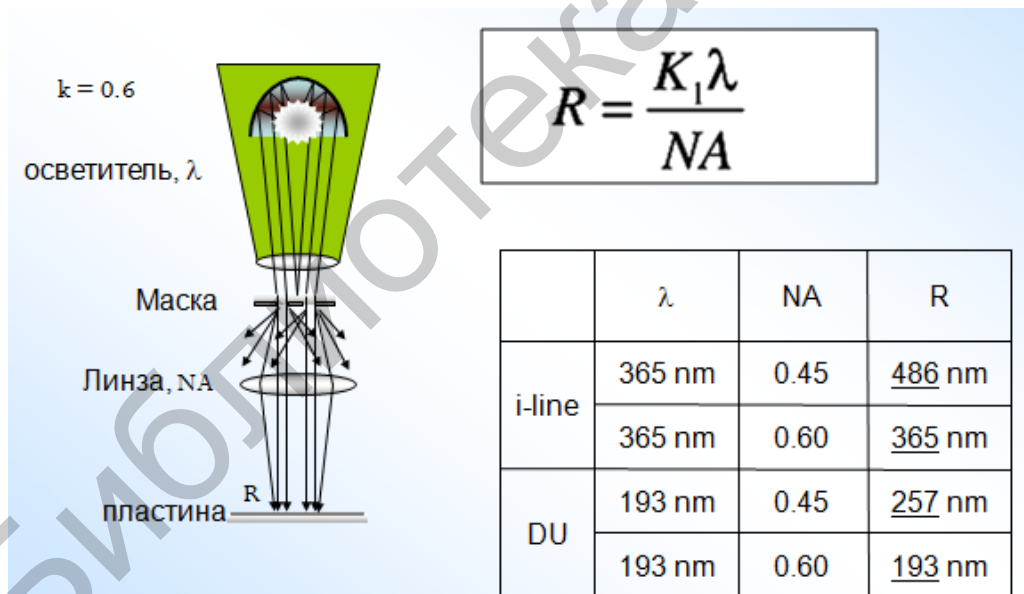
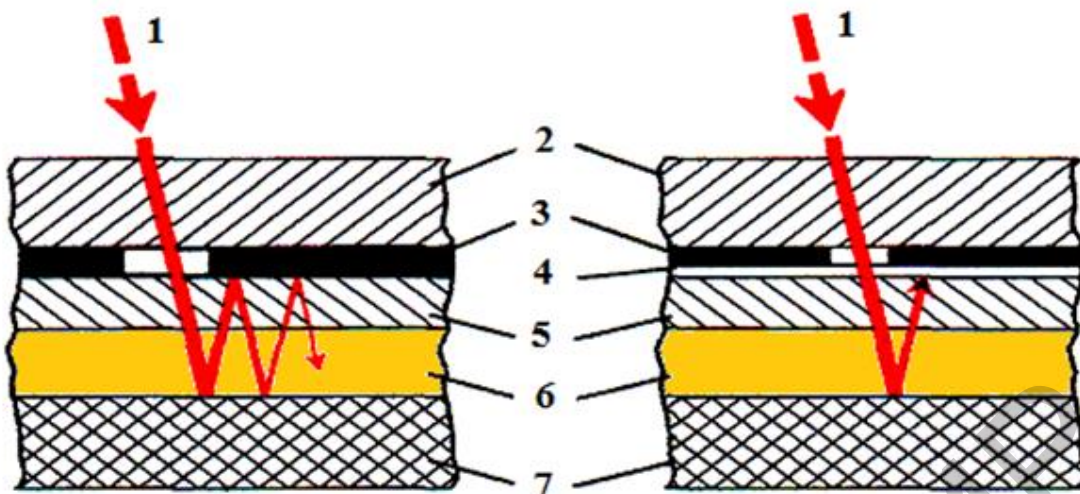


Рисунок 36 – Расчет разрешающей способности

Важным оптическим эффектом при экспонировании является прохождение УФ-излучения через пленку ФР. Световой поток, проходя через слой ФР, рассеивается в нем, а достигая подложки, отражается от нее и возвращается обратно в слой ФР. Дойдя до поверхности ФШ, световой поток отражается под углом от его металлизированных непрозрачных участков и снова попадает в слой ФР на подложке (рисунок 37).



1 – луч света; 2 – ФШ; 3 – непрозрачное покрытие ФШ;
 4 – противореальное покрытие; 5 – фоторезист;
 6 – технологический слой (SiO_2 , металл); 7 – подложка

Рисунок 37 – Эффект отражения света в системе «ФШ – подложка»

Эти отражения светового потока приводят к нежелательному дополнительному экспонированию участка слоя ФР, находящегося под непрозрачными участками ФШ (рисунок 38).

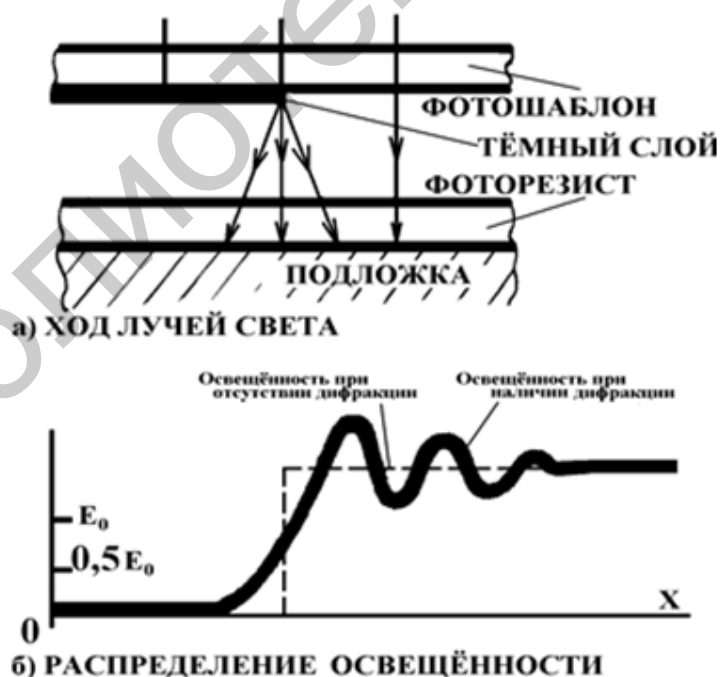


Рисунок 38 – Неравномерное распределение освещенности, вызывающее размытость края переносимого рисунка (ореол)

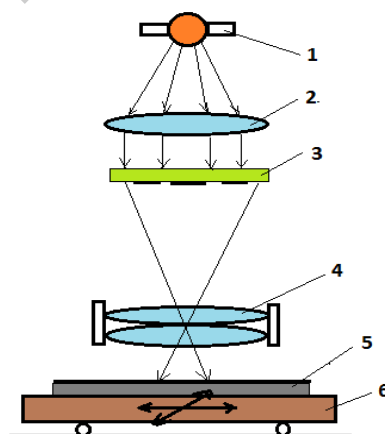
Интенсивность отраженного потока света зависит от коэффициентов отражения подложки и ФШ. Для снижения эффекта отражения при контактной ФЛ используют цветные оксидные ФШ, имеющие малый коэффициент отражения.

Таким образом, контактная ФЛ является наиболее отработанным методом, отличается высокой производительностью и невысокой стоимостью. Однако это устаревший метод, применяемый в настоящее время только для ИС с малой степенью интеграции.

Экспонирование с микрозазором позволяет избежать механических повреждений фотошаблона и слоя фоторезиста путем создания регулируемого небольшого зазора между фоторезистивной маской и фотошаблоном. Однако при этом увеличивается влияние дифракции света на передачу рисунка, что, в свою очередь, снижает разрешающую способность.

При проекционном экспонировании шаблон расположен на значительном расстоянии от подложки (рисунок 39), его износ полностью исключен. По способу формирования изображения на подложке проекционным экспонированием различают системы с переносом изображения ФШ одновременно на все рабочее поле подложки в масштабе 1:1 и системы с последовательным мультиплицированным переносом изображения в уменьшенном масштабе (сканирующие системы). В последнем случае используют промежуточный ФШ, представляющий собой одиночное изображение топологии слоя прибора, выполненное в увеличенном масштабе (10:1).

Проекционные системы, формирующие изображение на всем поле подложки, могут обеспечить высококачественное изображение только при наличии высококачественной оптической системы. Если себестоимость ИМС с развитием прогресса в технологии падает, то стоимость оптической системы при этом существенно возрастает.



1 – осветитель; 2 – конденсор; 3 – промежуточный ФШ; 4 – объектив;
5 – подложка со слоем фоторезиста; 6 – координатный стол

Рисунок 39 – Схема проекционного экспонирования с мультиплицированием изображения ФШ

В проекционных сканирующих системах экспонирование резиста производится последовательным впечатыванием уменьшенного изображения промежуточного ФШ на всю рабочую поверхность подложки. Сканирование изображения может идти непрерывно без остановок и в прерывистом (старт-стопном) режиме, когда в момент экспонирования не происходит перемещений компонентов оптической системы. После очередного экспонирования столик установки перемещают на один шаг и в новом положении подложки производят экспонирование следующего участка. Действия выполняются до полного экспонирования всей подложки.

Среди достоинств шагового проекционного экспонирования можно отметить высокую точность совмещения – до 0,1 мкм, относительно малую чувствительность к неплоскостности подложки и высокую разрешающую способность, позволяющую получать элементы менее 1 мкм (субмикронный диапазон).

Установка является сложным оптико-механическим комплексом, в состав которого входят: координатный стол, снабженный трехкоординатной лазерной измерительной системой на интерферометрах; система автофокусировки и выравнивания; фотоэлектрическая система совмещения промежуточного шаблона и подложки; блок загрузки полупроводниковых пластин и другие устройства.

2.2.3 Проявление фоторезиста

Процесс проявления негативных и позитивных ФР заключается в удалении после экспонирования ненужных участков ФР с поверхности подложки. В результате этого на поверхности остается защитный рельеф требуемой конфигурации. При проявлении негативных фоторезистов происходит растворение неэкспонированных участков фотослоя, а при проявлении позитивных – растворение экспонированных участков.

Проявители для негативных ФР представляют собой органические растворители: толуол, бензол, уайт-спирит, трихлорэтилен, хлорбензол, диоксан и др.

В случае неправильно выбранной экспозиции облученные участки при проявлении сильно набухают, что приводит к искажению рисунка. Недоэкспонирование негативных ФР приводит к увеличению набухания при проявлении и, следовательно, к уменьшению разрешающей способности всего процесса фотолитографии.

Отсутствие ионов щелочных металлов является важным фактором при проявлении негативных ФР.

При проявлении позитивных ФР используются растворы неорганических и органических оснований.

При проявлении ФР на основе НХД (нафтохинондиозид) идет химическая реакция превращения полученной при экспонировании инденкарбоновой

кислоты в хорошо растворимую соль, которая затем легко вымывается. После облучения поверхность позитивного ФР переходит из гидрофобного в гидрофильное состояние, поэтому облученные участки фоторезистивного слоя, в отличие от необлученных, хорошо смачиваются проявителем. В качестве проявителей применяются водные щелочные растворы (0,3–0,5%-й раствор едкого калия, 1–2%-й раствор тринатрийфосфата) или органические щелочи – этанамины.

С целью регулирования скоростей растворения в проявитель добавляют вещества, замедляющие процесс проявления. Такой проявитель называется буферным.

Экспонирование и проявление неразрывно связаны между собой.

Если для негативных фоторезистов точность воспроизведения рисунка зависит практически только от режимов экспонирования, то для позитивных фоторезистов режимы проявления являются определяющими (рисунок 40).

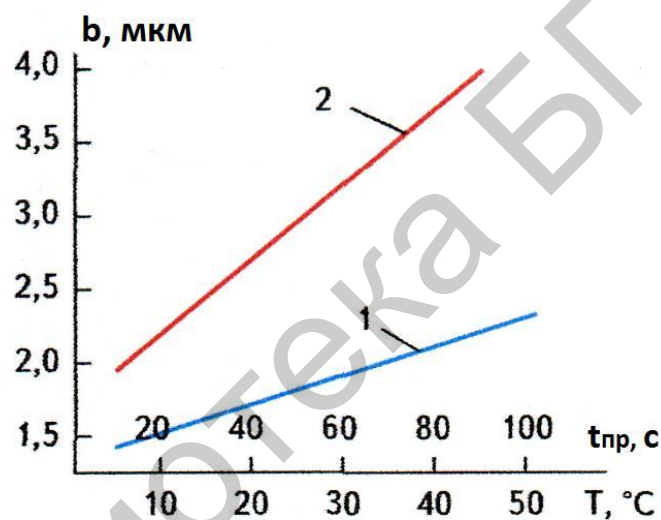


Рисунок 40 – Зависимость ухода ширины линии b проявленных элементов рисунка в слое позитивного ФР ФП-383 толщиной 0,6 мкм от температуры проявителя (1) и времени проявления (2)

Наилучшее качество изображения (при оптимальных значениях времени экспонирования и времени проявления) достигается в диапазоне температур 15–35 °C и $\text{pH} = 12,2–12,6$. При определенном времени проявления, pH и толщине фотослоя наблюдается зависимость между временем экспонирования и временем проявления, соответствующая наилучшему изображению (рисунок 41).

После проявления в защитном рельефе обнаруживается неидеальность перехода от участков, покрытых фоторезистом, к участкам, свободным от него. В результате паразитного облучения слоя фоторезиста за счет дифракции света на краю непрозрачного элемента фотошаблона, диффузионного рассеяния в слое и частичного отражения от подложки происходит экспонирование

незначительной части слоя, лежащего на границе прозрачных и непрозрачных элементов фотошаблона. Образующийся после проявления на границе защитного рельефа ореол снижает разрешающую способность.

Профиль края проявленного рельефа можно представить в виде «краевого клина», заменив истинную форму на треугольную (рисунок 42). При увеличении длительности экспонирования, исходной толщины слоя фоторезиста и отражающей способности подложки «краевой клин» будет увеличиваться.

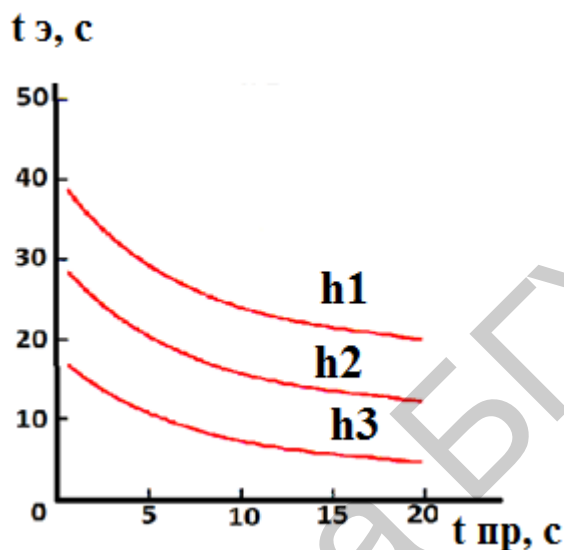
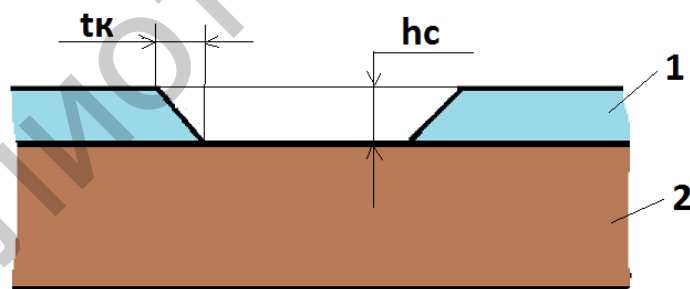


Рисунок 41 – Зависимость времени проявления $t_{пр}$ и времени экспонирования $t_{э}$ от толщины ФР ФП-383 (травитель буферный): $h_1 > h_2 > h_3$



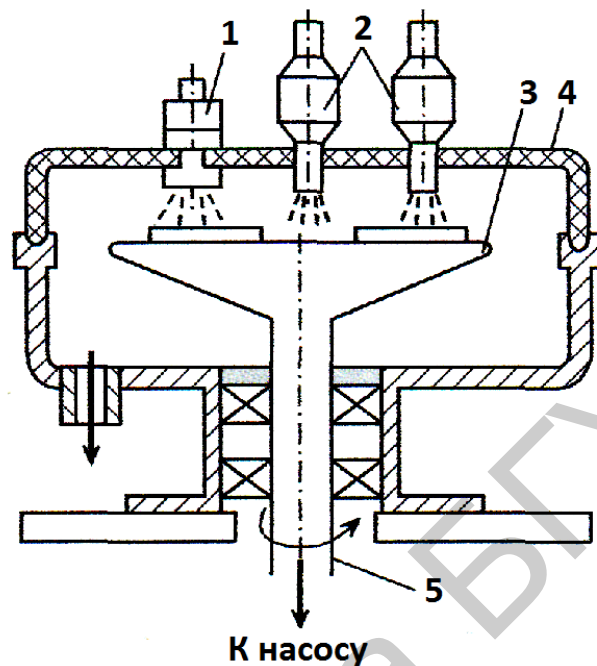
1 – ФР; 2 – подложка; t_k – ширина «краевого клина»; h_c – толщина слоя ФР

Рисунок 42 – Профиль края проявленного ФР

Распространенными способами проявления являются: погружение в раствор проявителя, выдержка в парах органического соединения, пульверизация.

Проявление погружением в раствор проявителя не требует специального оборудования и при высокой производительности позволяет воспроизводить элементы размером более 3 мкм при толщине пленки фоторезиста до 1 мкм.

При воспроизведении элементов размерами менее 3 мкм (особенно при толщине пленок фоторезиста более 1 мкм) данный способ не обеспечивает надежного удаления проявляемых участков ФР. В этих случаях эффективен способ пульверизации (струйного проявления) (рисунок 43).



1 – форсунка сушки; 2 – форсунки проявления и промывки;
3 – платформа с пластинами; 4 – съемная крышка; 5 – полый ротор

Рисунок 43 – Схема струйного проявления ФР

Метод пульверизации обеспечивает необходимую чистоту процесса, почти полное удаление продуктов реакции и высокую производительность, а также возможность объединения в едином цикле на одной установке операций проявления, промывки и сушки на центрифуге.

2.2.4 Сушка фоторезиста

Целью процесса жесткой сушки фоторезиста (задубливания) после проявления является испарение остатков проявителей, размягчающих слоев, и его дополнительная тепловая полимеризация. Температура сушки рельефа должна быть выше температуры сушки слоя фоторезиста при его нанесении на подложку. Одной из задач второй сушки является увеличение кислотостойких свойств ФР.

От температуры и характера повышения ее во время сушки зависит точность передачи размеров изображений. Резкий нагрев вызывает оплывание краев, поэтому для точной передачи малых (1–2 мкм) размеров следует применять плавное или ступенчатое повышение температуры.

При переходе к высокотемпературному этапу сушки происходит дополнительная пространственная полимеризация пленки, увеличивающая ее кислотостойкость, а также адгезию пленки к подложке.

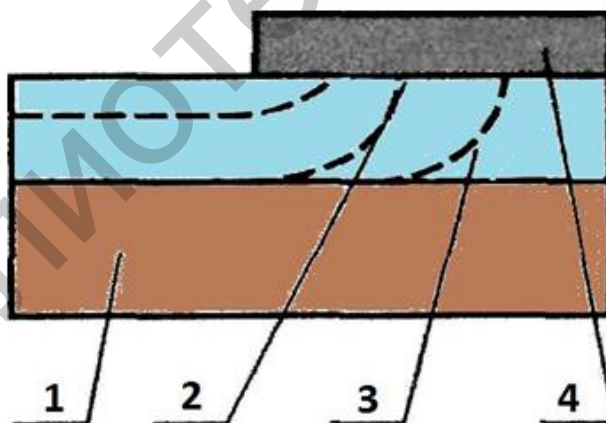
2.3 Этап 3. Перенос топологии фоторезиста на технологический слой

Этап состоит из следующих операций: травление маскирующих, диэлектрических, проводящих слоев через резистивную маску; удаление фоторезистивной маски; отмывка подложки перед следующей технологической операцией изготовления приборов.

Все эти операции осуществляются с применением *химических* (мокрых) или *плазменных* (сухих) методов обработки.

2.3.1 Химические (мокрые) методы обработки

При травлении используются водные растворы неорганических соединений (обычно кислот). Химический состав и концентрация травителя в растворе подбирается так, чтобы активно растворялся только материал технологического слоя без изменений нижележащего материала (селективных травителей). С травлением в жидких травителях связано явление подтравливания под фотомаску и разброс величины подтравливания по всем элементам одного слоя (рисунок 44).

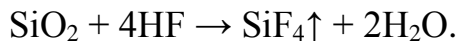
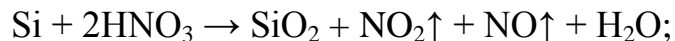


1 – подложка; 2 – фронт травления при нормальном режиме;
3 – фронт травления при «перетравливании»; 4 – фотомаска

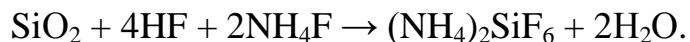
Рисунок 44 – Боковое подтравливание под фотомаску

Большую часть травителей для германия и кремния представляет собой смеси на основе плавиковой (HF) и азотной (HNO₃) кислот. В процессе травления кремний, взаимодействуя с азотной кислотой, образует оксид, который затем

растворяется в плавиковой кислоте:



Для травления SiO_2 часто применяют буферный травитель с замедляющей добавкой, которой является фтористый аммоний NH_4F . Процесс травления SiO_2 в таком травителе происходит следующим образом:



Рекомендуемый состав буферного травителя: плавиковая кислота (48 %), фтористый аммоний (40 %) и вода в соотношении 2:7:1.

Нитрид кремния (Si_3N_4) обладает высокой стойкостью к большинству химических реагентов. Пленки нитрида кремния слабо растворяются в соляной, серной, азотной кислотах, а также в водных растворах щелочей.

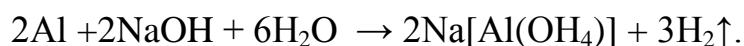
Для травления нитрида кремния используют 87%-ю ортофосфорную кислоту H_3PO_4 , насыщенную фосфорным ангидридом (P_2O_5) из расчета 9,5 г P_2O_5 на каждые 58 мл H_3PO_4 . Оптимальная температура травления составляет 180–200 °С, скорость ~ 10 нм/мин.

При изготовлении металлизированной разводки, формировании топологии контактных площадок приборов проводят фотолитографию по слою металла (алюминия, золота, хрома и др.).

При травлении алюминия наблюдается значительное изменение линейных размеров элементов, большой клин травления, низкая воспроизводимость процесса. Это объясняется плохой адгезией фоторезиста к алюминию вследствие значительного изменения краевого угла его смачивания (20–80°).

При создании масок из негативных фоторезистов для травления алюминия и алюминия с добавками кремния до 5 % (для уменьшения эффекта электромиграции) используют 20%-е щелочи KOH или NaOH , нагретые до 60–90 °С.

Химическая реакция алюминия со щелочью может быть представлена следующим уравнением:



При создании масок из позитивных фоторезистов для травления алюминия используют составы на основе ортофосфорной кислоты при 60–70 °С:



Для травления золота применяют смесь концентрированных кислот $\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 3:1$ (царскую водку), а также травитель, состоящий из йодистого калия (KI), йода (I_2) и воды в соотношении 4:1:1.

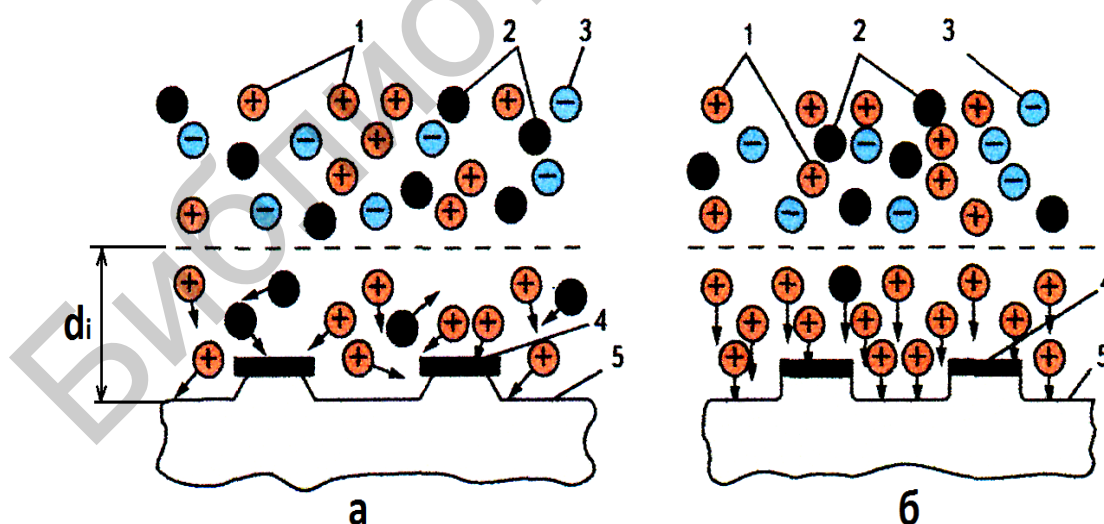
Химическое удаление фоторезиста чаще всего производят его растворением в кипящей концентрированной серной кислоте (2- и 3-кратное кипячение по 5–10 мин). При этом происходит химическая деструкция (разрушение) полимеров. После обработки в серной кислоте требуется тщательная отмывка подложек деионизованной водой.

Для подложек, взаимодействующих с серной кислотой, применяют кипячение или длительную выдержку в органических растворителях (ацетоне, метилэтилкетоне, целлозольве). После разбухания пленки фоторезиста ее удаляют влажным тампоном.

2.3.2 Плазменные (сухие) методы обработки

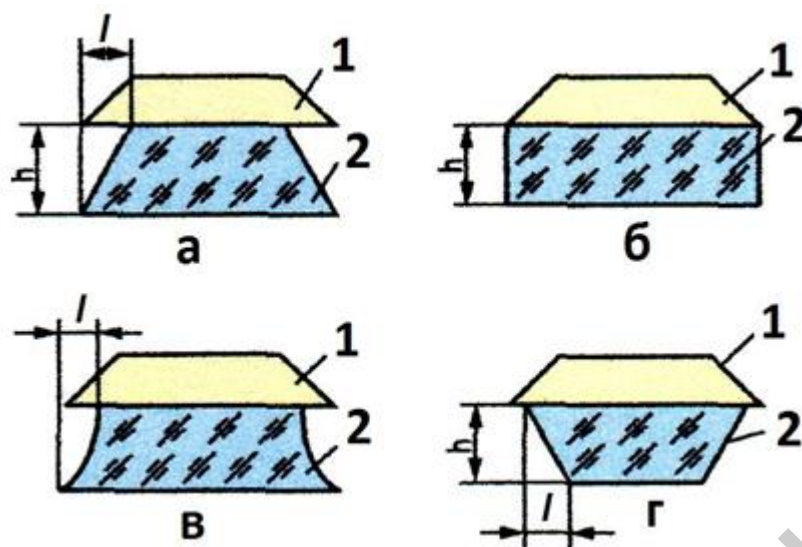
В методах плазменного травления используют низкотемпературную газоразрядную плазму (рисунок 45).

Неупругие столкновения молекул газа с электронами, разогнанными электрическим полем, приводят к образованию ионов и электрически нейтральных свободных радикалов, образующихся при диссоциации молекул рабочего газа и проявляющих высокую химическую активность. В зависимости от состава рабочего газа, давления и энергии ионов плазмы характер процессов может меняться от чисто физического (распыление) до чисто химического (травление). Профили травления после жидкостной и сухой обработки различные (рисунок 46).



1 – ионы; 2 – радикалы; 3 – электроны; 4 – маска; 5 – подложка

Рисунок 45 – Модель плазменного травления при $\lambda_i \leq d_i$ (а) и $\lambda_i > d_i$ (б)



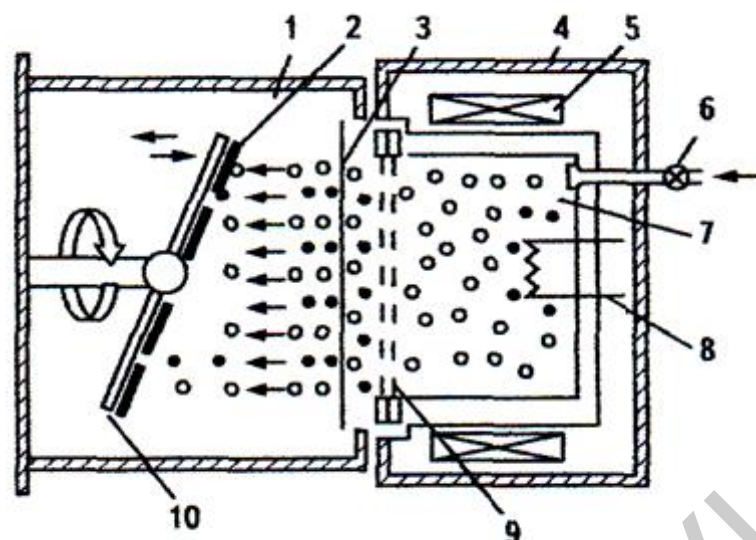
a – жидкостное травление; *б* – ионно-химическое травление;
в, г – плазмохимическое травление:

1 – слой ФР; 2 – технологический слой

Рисунок 46 – Профили элементов рисунка после травления

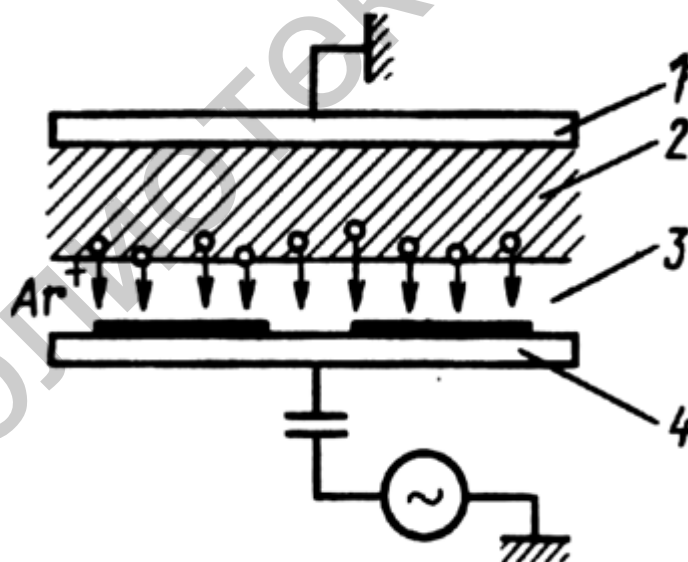
При физическом распылении используется высокая кинетическая энергия плазменных частиц. Они ускоряются электрическим полем до необходимых значений энергии и приобретают способность при соударении с поверхностью материала физически распылять его. При химическом характере процессов используется потенциальная энергия частиц, определяемая наличием ненасыщенных химических связей у свободных радикалов. Взаимодействие таких частиц с обрабатываемым материалом ведет к формированию летучих химических соединений.

В современных установках физического распыления используют ионно-лучевое травление, при котором ионный луч генерируется в источнике плазмы, изолированном от обрабатываемой поверхности (рисунок 47), а также ВЧ-травление, при котором подложки располагаются на катоде в зоне плазмообразующего разряда (рисунок 48).



1 – камера подложек; 2 – подложки; 3 – нейтрализатор (источник электронов);
 4 – ионный источник; 5 – соленоид; 6 – натекаТЕЛЬ; 7 – анод; 8 – термокатод;
 9 – вытягивающая система; 10 – вращающийся подложкодержатель

Рисунок 47 – Схема ионно-лучевого травления с автономным ионным источником



1 – анод; 2 – плазменный разряд; 3 – темное пространство;
 4 – катод с подложками

Рисунок 48 – Схема процесса ВЧ-распыления

В условиях серийного производства полупроводниковых приборов и ИМС наибольшее распространение получили установки ВЧ-травления. Основным

недостатком ионного травления является его низкая селективность. Плазмохимическое травление основано на возбуждении разряда в среде химически активных газов, ионы и радикалы которых, взаимодействуя с поверхностным слоем полупроводниковой пластины, способны образовывать летучие соединения, удаляемые из рабочей камеры через откачную систему.

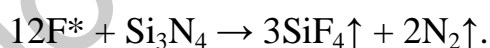
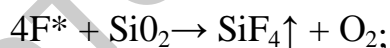
Плазмохимическое травление подразделяют на:

- плазменное (образцы находятся непосредственно в плазме химически активных газов);
- радикальное (образцы находятся в вакуумной камере, отделенной от газоразрядной с химически активной плазмой перфорированными металлическими экранами или магнитными и электрическими полями).

Радикальное травление осуществляется электрически нейтральными, но химически активными атомами или радикалами газоразрядной плазмы.

Для плазмохимического травления различных материалов и удаления фоторезиста используют, как правило, ВЧ-газоразрядную плазму. В качестве рабочей среды применяют галогеносодержащие газы (CF_4 , C_3F_8 , CHF_3 и т. д.).

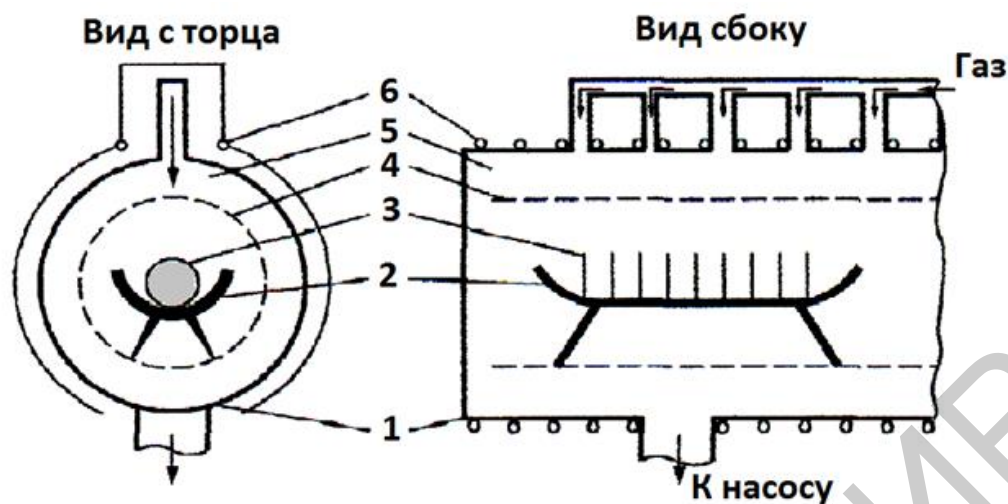
Основой плазмохимического травления кремния является химическая реакция между радикалом фтора (F^*) и кремнием, в результате которой происходит образование летучего соединения – четырехфтористого кремния SiF_4 . Аналогично происходит удаление кремния с поверхности при травлении его диоксида и нитрида. Реакции плазмохимического травления кремния и кремнийсодержащих соединений SiO_2 и Si_3N_4 в общем виде приведены ниже:



Для удаления фоторезиста используют низкотемпературную кислородную плазму при давлении $5 \cdot 10^2$ Па. В такой плазме происходит ряд химических превращений, в результате которых образуются активные частицы: атомарный кислород, озон, возбужденные молекулы кислорода. Взаимодействие кислорода с фоторезистом приводит к образованию CO_2 , NO_2 , H_2O и других летучих соединений.

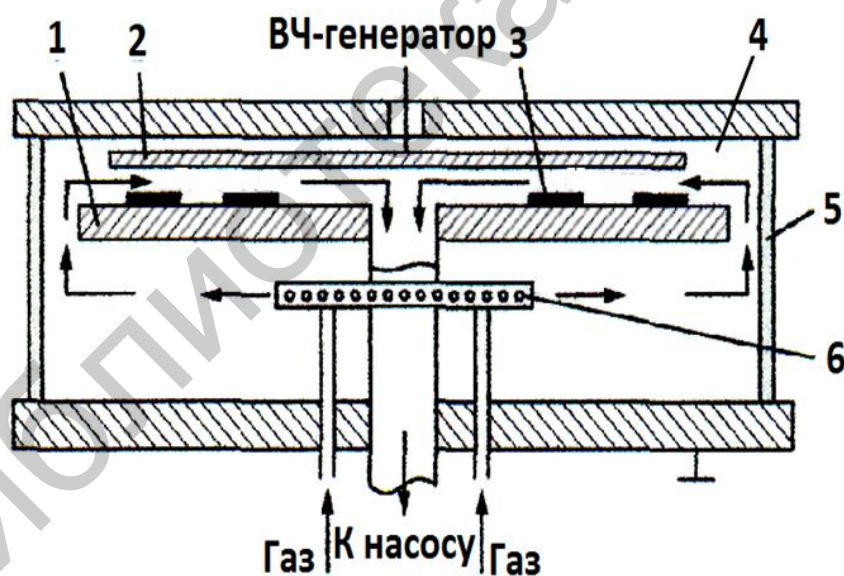
Для плазменного травления применяют два типа реакторов, в которых для генерирования плазмы используется ток с высокой частотой. Реактор первого типа – цилиндрический (рисунок 49), реактор второго типа – планарный (рисунок 50).

Ионно-химическое травление сочетает достоинства ионного и плазмохимического травления. Механизм ионно-химического травления – совместное воздействие распыления и химической реакции. Преимущество этого метода перед плазмохимическим травлением состоит в возможности удаления в том числе и тех материалов, которые не образуют летучих соединений с радикалами.



- 1 – стенки реактора (кварц); 2 – лодочка (кварц); 3 – подложки;
 4 – перфорированный цилиндр (металл); 5 – область ВЧ-разряда;
 6 – ВЧ-генератор

Рисунок 49 – Цилиндрический реактор плазмохимического травления с объемным расположением подложек



- 1, 2 – нижний и верхний электроды; 3 – подложки;
 4 – область плазменного разряда; 5 – цилиндрический корпус (стекло, кварц);
 6 – система газораспределения

Рисунок 50 – Планарный реактор с плоскими электродами

Ионно-химическое травление осуществляют в тех же установках, что и ионное травление, но в качестве рабочего используют не инертный, а химически активный газ.

ГЛАВА 3 ИММЕРСИОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Идея иммерсионной литографии заключается в том, что между шаблоном и технологическим слоем находится дополнительная среда – жидкость (рисунок 51). Согласно уравнению Рэля, разрешающая способность во многом определяется коэффициентом преломления среды, которая для всех оптических методов традиционно принималась равной единице (воздух). Скорость распространения света в веществе всегда меньше скорости распространения света в вакууме и зависит от коэффициента преломления этого вещества.

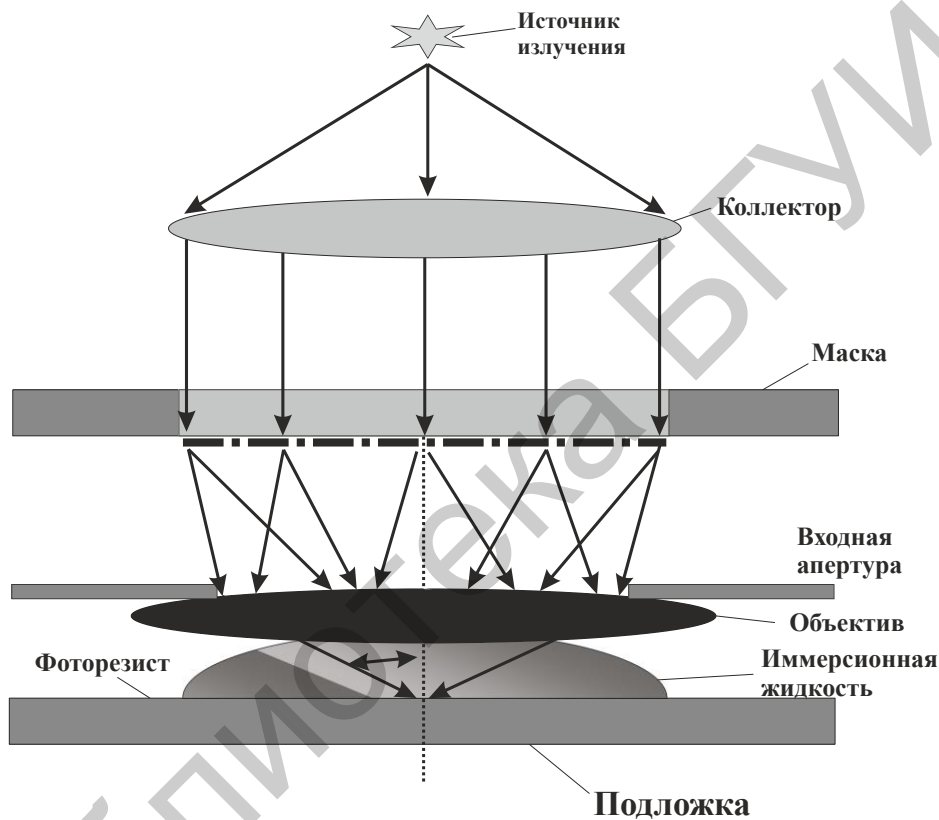


Рисунок 51 – Схема иммерсионной литографии

Фактически это равносильно тому, что свет, проходящий через материал с высоким коэффициентом преломления, имеет меньшую длину волны (эффективная длина волны уменьшается в n раз, где n – коэффициент преломления среды), поэтому может быть сфокусирован более точно (рисунок 52). Поскольку коэффициент преломления воды выше коэффициента преломления воздуха, можно добиться увеличения разрешающей способности литографии без изменения длины волны источника излучения.

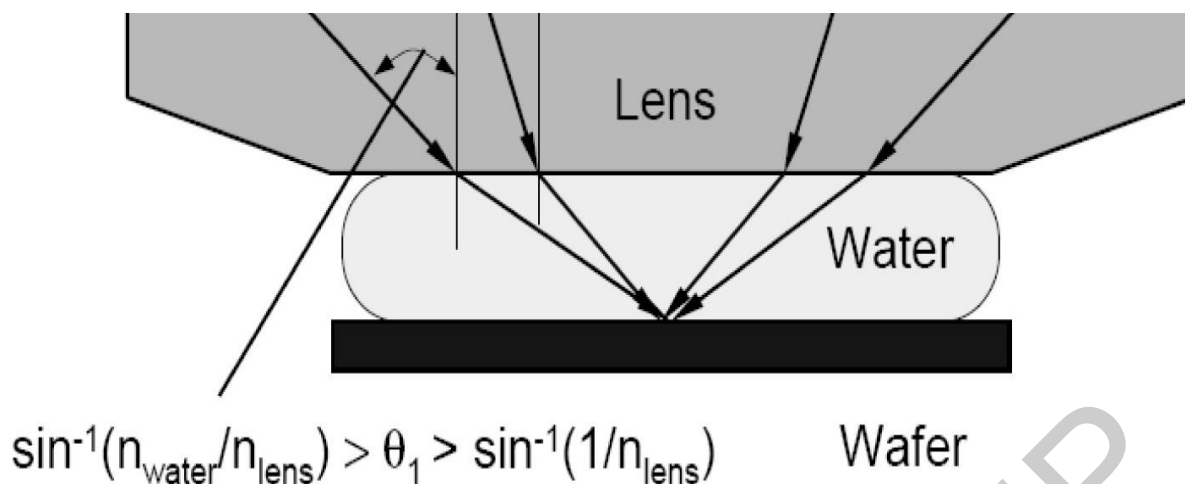


Рисунок 52 – Прохождение лучей через водную среду между линзой и слоем фоторезиста

3.1 Преимущества иммерсионной литографии

3.1.1 Увеличение числовой апертуры

Обычно фотолитографические процессы реализуют в воздухе или в вакууме для уменьшения поглощения света средой, т. е. используются среды с показателем преломления $n = 1$. Вследствие этого числовая апертура полностью определяется размером проекционной линзы и не может быть больше 1, а на практике чаще всего не более 0,93.

Иммерсионная технология обеспечивает увеличение NA путем увеличения n . Промежуток между конечной линзой и резистом может быть заполнен жидкостью, а все жидкости, как конденсированные среды, имеют намного более высокий показатель преломления n , чем воздух. Значение n лежит в пределах 1,28–1,75 при $\lambda = 589$ нм для типичных органических жидкостей. Показатель преломления воды обладает приемлемым значением 1,33 при длине волны 589 нм и 1,44 при 193 нм.

Если принять для воды показатель преломления $n = 1,45$, а максимально достижимое значение синуса апертурного угла $\sin\theta = 0,95$, получим $NA = 1,38$ и, положив $k_1 = 0,25$, разрешающую способность ~ 35 нм.

3.1.2 Увеличение глубины фокуса

Глубина фокуса (DOF) – другой важный параметр фотолитографической системы. Глубина фокуса есть величина чувствительности формирующей изображение системы к изменениям дистанции между линзой и плоскостью резистивной пленки.

Производительность литографического процесса существенно зависит от величины *DOF*. Резистивное покрытие не может быть совершенно планарным, и хотя для планаризации поверхностей часто применяется химико-механическая полировка, она не способна полностью исключить неоднородности топографии поверхности. Экспонируемая глубина фокуса должна быть больше любых неоднородностей поверхности настолько, чтобы поверхность подложки находилась на фокусном расстоянии по всей подложке, а размер создаваемых изображений (критический размер) можно было хорошо контролировать по подложке в пределах $\pm 10\%$.

Иммерсионные приемы могут улучшить экспонируемую глубину фокуса. Вода в промежутке между конечной линзой и подложкой изменяет оптические пути экспонируемых световых пучков.

Экспонируемые лучи проходят через воздушный или водный промежуток и фокусируются на поверхности подложки. Возникает преломление на границе «линза – воздух» для «сухого» экспонирования и на границе «линза – вода» для иммерсионного экспонирования. В соответствии с законом Снелля, углы преломления определяются исходя из следующего соотношения:

$$n_{\text{линзы}} \sin\theta_1 = n_{\text{воздуха}} \sin\theta_2 = n_{\text{воды}} \sin\theta_3 = NA, \quad (7)$$

где θ_1 – угол падения на границе раздела, а θ_2 и θ_3 – углы преломления, соответствующие «сухому» и иммерсионному экспонированию соответственно.

Из уравнения (7) видно, что сам по себе коэффициент преломления воды не меняет *NA*. Вода, однако, уменьшает угол преломления $\theta_2 > \theta_3$, что существенно увеличивает *DOF* изображения.

При высоком значении *NA* экспонируемый свет может падать на поверхность резиста под высоким углом, что не позволяет применять параксиальную аппроксимацию для расчета оптических путей. Необходимо учесть, что несфокусированные лучи, падающие под большими углами, претерпевают большее изменение фазы, чем лучи с меньшими углами падения. В результате разность фаз между лучом нулевого порядка и лучом первого порядка приведет к размытию изображения. Пусть лучи расфокусированы и пересекаются в точке *P*, лежащей на фокальной оси и отстоящей от фокуса на расстояние δ . Тогда разница оптических путей (*OPD*) между двумя лучами (*R₀P* и *RP*) составит

$$OPD = R_0P - RP = \delta - (R_0P \text{ и } RP) \approx \delta (1 - \delta). \quad (8)$$

Максимальное терпимое значение OPD не должно превышать четверти длины световой волны, т. е. $OPD \leq \frac{\lambda}{4}$. При $OPD = \frac{\lambda}{4}$ нулевой и первый дифракционные порядки обладали бы разностью фаз точно в 90° . DOF определяется как фокусное расстояние, обеспечивающее максимально допустимое значение OPD , соответственно:

$$DOF = 2\delta = k_2 \frac{\lambda}{2(1 - \cos \theta)}, \quad (9)$$

где k_2 – постоянный параметр;

$$k_2 < 1.$$

В случае водной иммерсии волна экспонируемого света уменьшается, значение $\lambda/n_{\text{воды}}$ и угол преломления θ можно заменить на NA .

DOF при высоких значениях NA :

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{2(n - \sqrt{n^2 - NA^2})}. \quad (10)$$

При низких значениях NA параксиальная аппроксимация может быть использована: $\sin \theta \ll 1$; тогда это уравнение можно привести к более привычной форме:

$$DOF = k_2 \frac{n\lambda}{NA^2} = k_2 \frac{\lambda}{n \sin^2 \alpha}. \quad (11)$$

Показатель преломления среды между проекционной линзой и подложкой влияет на значение DOF . Влияние параметров освещения, а также маски включены в параметр k_2 . Даже при определенных значениях NA и λ глубину фокуса можно улучшить использованием внеосевого освещения или технологией сдвига масок с чередующейся фазой. С помощью иммерсионного экспонирования получено увеличение около 1,8 DOF .

Иммерсионная литография, снижая эффективную длину волны экспонируемого излучения, не приводит к уменьшению глубины фокуса, а, наоборот, увеличивает ее, что существенно повышает четкость изображения и упрощает контроль за процессом. Иммерсионные приемы позволяют также достигать эффективных значений числовой апертуры больше 1, что приводит к дальнейшему увеличению эффективной длины световой волны и позволяет использовать линзы большого размера. Использование материалов с высоким показателем преломления для различных элементов иммерсионной системы позволяет еще сильнее увеличить числовую апертуру.

На сегодняшний день технология по-прежнему весьма актуальна.

3.2 Недостатки иммерсионной литографии

3.2.1 Выщелачивание фоторезиста

Кроме преимуществ в увеличении глубины фокуса, возможности использования hyper-NA-линз и т. д., технология 193i приносит в техпроцесс и множество проблем. Первой проблемой является выщелачивание, когда фотоинициатор (генератор фотокислоты), основной нейтрализатор и другие низкомолекулярные компоненты фоторезиста могут переходить в воду.

Такое выщелачивание не только ухудшает качество резиста, но и загрязняет воду. Загрязненная вода может далее загрязнять линзу и подложкодержатель сканера. Вода также может просачиваться в пленку резиста, приводя к его набуханию и изменяя его фотохимические свойства.

3.2.2 Необходимость использования поверхностного покрытия

Поверхностное покрытие наносится на резист центрифугированием и является прозрачным для волн света длиной 193 нм. Оно служит барьерным слоем, позволяющим использовать обычный 193-нм-резист (иными словами, «сухой» резист) во «влажном» процессе. Слой поверхностного покрытия удаляется после экспонирования/задубливания и до проявления. Основанные на растворителе поверхностные покрытия могут быть удалены только особыми растворителями. Для их удаления требуются дополнительные этапы процесса и трековые модули.

Нерастворимые в проявителе поверхностные покрытия неудобно использовать в крупномасштабном производстве, поэтому были разработаны растворимые в проявителе поверхностные покрытия, которые могут быть растворены обычным водным ТМАН-проявителем, соответственно, удаление маски может быть произведено в проявляющем модуле и интегрировано в процесс проявления. Резист и поверхностное покрытие должны быть совместимы, а параметры процесса необходимо рассчитывать и подбирать для получения лучших результатов литографического процесса.

3.2.3 Иммерсионные дефекты

Другой проблемой технологии 193i является связанное с ее применением возникновение дефектов. Вода между фронтальной линзой и резистом формирует мениск, который движется с экспонирующей головкой по поверхности резиста. Возникают различные физические и химические взаимодействия между водой и резистом, которые могут приводить к водным иммерсионным дефектам. Пузырьки в воде могут исказить экспонируемое изображение; водяные капельки, оставленные на поверхности подложки,

способны локально ухудшить качество резиста; вода также может переносить частички к поверхности подложки и внедрять их туда.

В неоптимизированном техпроцессе 193i в подложке может возникнуть примерно на 4–20 % больше дефектов, чем при использовании «сухой» 193-нм-литографии.

Эти иммерсионные дефекты ограничивают качество и производительность процесса, поэтому необходимо уменьшить их число перед внедрением 193i-процесса в широкомасштабное производство.

Библиотека БГУИР

ГЛАВА 4

ЛИТОГРАФИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА (EUVL)

Продвижение в сторону меньших масштабов и, соответственно, повышение степени интеграции микросхем мировое научное и технологическое сообщество связывает с кардинальным уменьшением рабочей длины волны, т. е. переходом в экстремальный ультрафиолетовый диапазон (см. рисунок 2).

Наличие коротковолновой границы (около 100 нм) пропускания света любыми материалами делает невозможным применение в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda < 100$ нм) привычной преломляющей оптики. Литограф в этом диапазоне может быть создан только на основе зеркальной (отражающей) оптики, причем зеркальная оптика должна быть многослойной для повышения коэффициента ее отражения. В этом состоит главное различие: обычная литография работает на принципе пропускания/поглощения света, EUVL-литография работает только на отражение (рисунок 53).

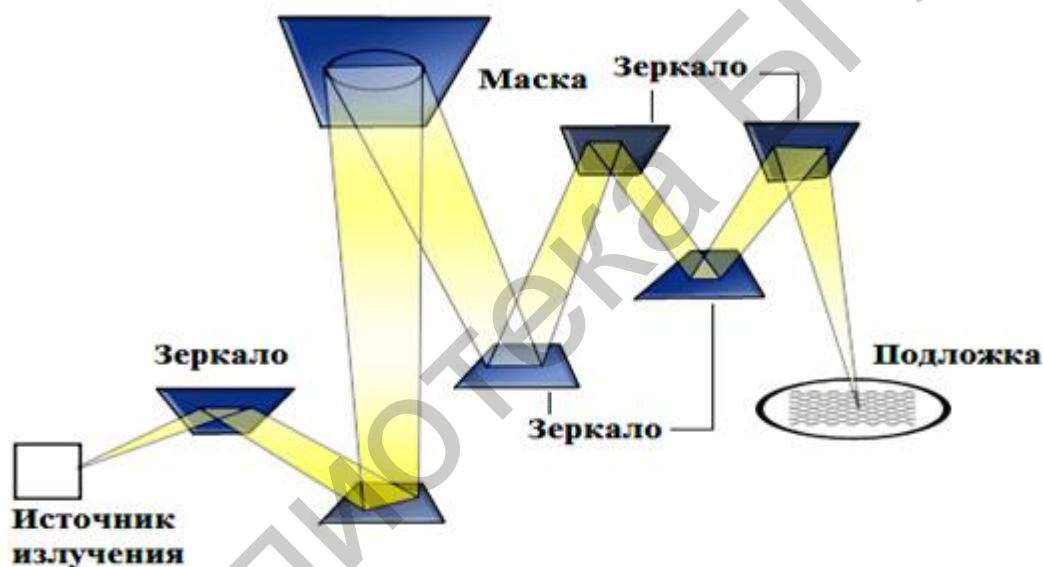


Рисунок 53 – Упрощенная схема EUVL-литографии

Это вносит принципиальные изменения в реализации техники исполнения оборудования. С целью повышения зеркальности отражения обычное зеркало на стеклянной подложке превращается в кусок слитка монокристаллического кремния (рисунок 54), покрытого многослойными нанопокрывтиями (рисунок 55).

В качестве рабочей была выбрана длина волны 13,5 нм, для которой многослойная интерференционная структура на основе молибдена и кремния обеспечивает в настоящее время коэффициенты отражения до 70 %. В типичных схемах проекционной литографии на длине волны 13,5 нм применяется 10-11 многослойных зеркал, включая 6-зеркальный объектив, систему освещения маски и саму многослойную зеркальную маску. Спектральная полоса

пропускания схемы обычно составляет около 2 % от длины волны ($\delta\lambda \sim 0,27$ нм). Кроме того, вся система должна находиться в вакууме, т. к. световые волны диапазона EUV поглощаются воздухом.

Число слоев молибден – кремний, молибден – бериллий составляет 40 пар. Толщина каждого слоя составляет 30 атомов. При толщине пары 13,5 нм отражающая способность достигает уровня 70 %.

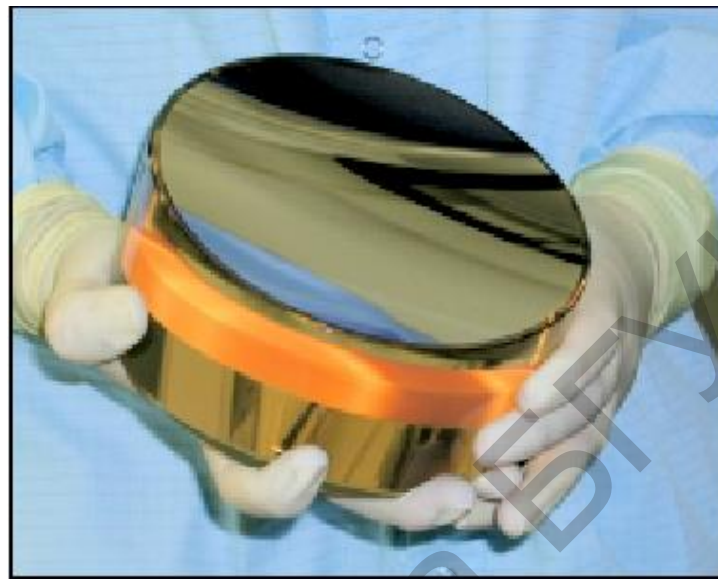


Рисунок 54 – Зеркало из куска монокристалла монокремния, покрытого многослойными нанопокрывтиями

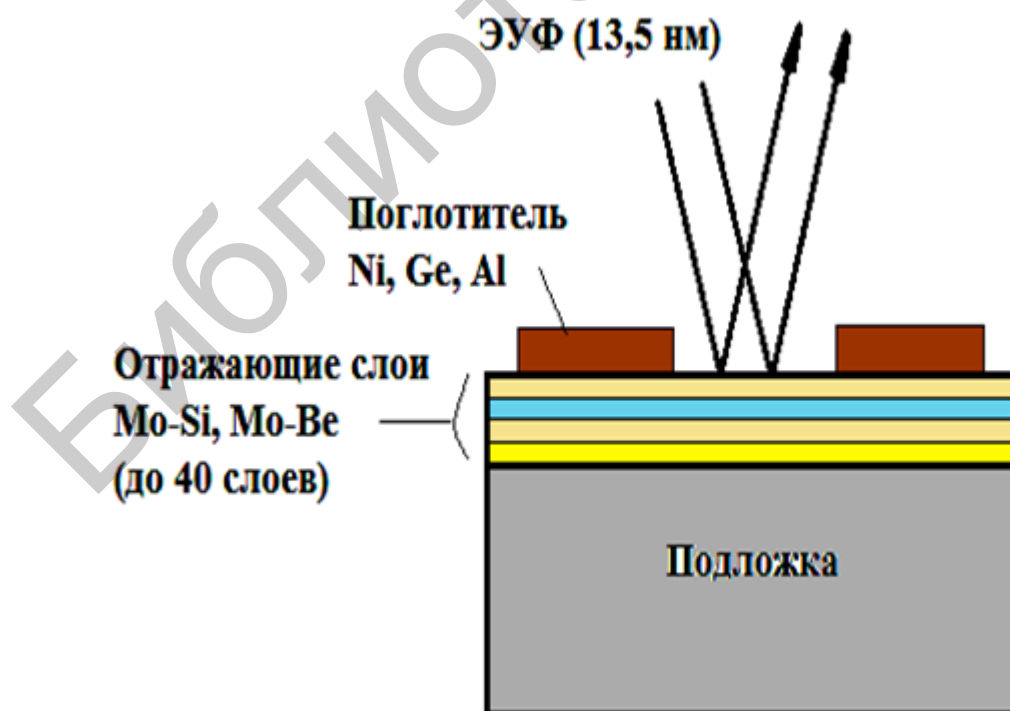


Рисунок 55 – Структура многослойного отражающего нанопокрывтия

Выбор спектрального диапазона для EUVL-литографии определяется возможностью получения в перспективе пространственного разрешения до 10–15 нм и наличием высокоотражающих многослойных покрытий.

Источниками излучения в EUVL-литографии на первом этапе развития подобных систем служило синхротронное излучение. Однако позже был разработан малогабаритный источник предельного ультрафиолета, принцип работы которого основан на использовании излучения из лазерной плазмы. Излучение стандартного Nd:YAG-лазера (длина волны – 1063 нм, мощность – 40 Вт, частота – 100 Гц, длительность – 5 нс) фокусируется на импульсной газовой струе ксенона. Образующаяся лазерная плазма содержит широкую спектральную полосу предельного ультрафиолета с длиной волны ~ 10–25 нм. Оптическая система (один из вариантов) содержит набор зеркал между источником света и маской. Набор зеркал между маской и подложкой обеспечивает уменьшение размера изображения в четыре раза.

Все отражательные оптические системы должны быть асферическими с размером неоднородностей ~ 10 Е. Каждое зеркало содержит до 80 отдельных металлических слоев с толщиной каждого слоя ~ ¼ нм (примерно в 12 атомов). Такое же сложное строение имеет маска для EUV-литографии. Переход к EUVL-литографии (рисунок 56) позволил пересечь рубеж в 100 нм, оставаясь в рамках традиционной фотолитографии. Однако сложная зеркальная оптика и технология изготовления фотошаблонов делает такой подход исключительно дорогим, оставляя место для разработки литографических процессов, основанных на иных физических принципах.



Рисунок 56 – Установка EUVL-литографии

ГЛАВА 5 КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ И РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Качество конечной продукции можно гарантировать только в том случае, если каждый промежуточный продукт и каждая технологическая операция подвергаются тщательному контролю по геометрической точности, чистоте и качеству рисунка.

С этой целью в электронной промышленности применяется целый ряд контрольно-измерительных приборов, при помощи которых можно своевременно обнаружить ошибки технологии и исключить дефектные изделия из дальнейшего технологического процесса. В фотолитографии для этого используют лупы, простые и универсальные микроскопы и различные координатометры.

Стереомикроскоп. Представляет собой оптический прибор, используемый для микростереоскопических исследований фотошаблонов и топологии рисунка на подложке.

Прибор имеет ряд важных особенностей: быстрая смена увеличения без расфокусировки; широкое поле зрения; возможность работы как в отраженном, так и в проходящем свете.

В стереомикроскопе (рисунок 57) непосредственно над большим передним объективом расположен линзовый барабан с двумя оптическими системами. Фокусное расстояние переднего объектива составляет 100 мм.



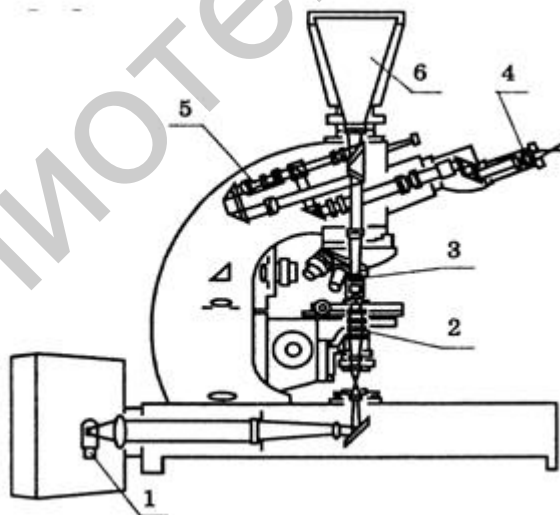
Рисунок 57 – Стереомикроскоп

Объектив имеет четыре линзы, его апертура равна 0,08. Используется при полном открытии отверстия без диафрагмирования.

Оптические системы на линзовом барабане используются как в режиме уменьшения, так и увеличения. Линзы каждого из тубусов имеют фокусное расстояние 160 мм. Призменная часть оптической системы в виде специальной призмы с крышей позволяет производить установку окуляра в удобном положении для глаз оператора, проводящего наблюдения. Кроме этого, она выполняет задачу поворота изображения.

Окуляры представляют собой специальные системы, позволяющие получить плоское изображение и широкое поле зрения. Фокусное расстояние окуляров 40 и 10 мм. На линзовом барабане нанесены значения увеличения, на которые рассчитан используемый объектив и оптические системы: 0,63; 1,0; 1,6; 2,5 и 4,0. Согласно этим значениям определяют общее увеличение микроскопа, умножая их на увеличение окуляра.

Большой универсальный экспериментальный микроскоп включает в себя оптическую систему с осветительными устройствами и камеру для микрофотографической съемки (рисунки 58, 59). Этот микроскоп позволяет наблюдать объект в проходящем свете, светлом и темном полях, в поляризованном свете, фотографировать объект и измерять отрезки на нем с помощью измерительного винта окуляр-микрометра. В таком микроскопе используется два источника света: проекционная лампа и ксеновая газоразрядная лампа сверхвысокого давления, являющаяся идеальным источником света для поляризационной микроскопии и микрофотографии.



1 – источник света; 2 – конденсор осветителя; 3 – объектив; 4 – окуляр;
5 – система плавного изменения увеличения; 6 – фотокамера

Рисунок 58 – Схема хода лучей в микроскопе Ну2-Е при наблюдении в проходящем свете

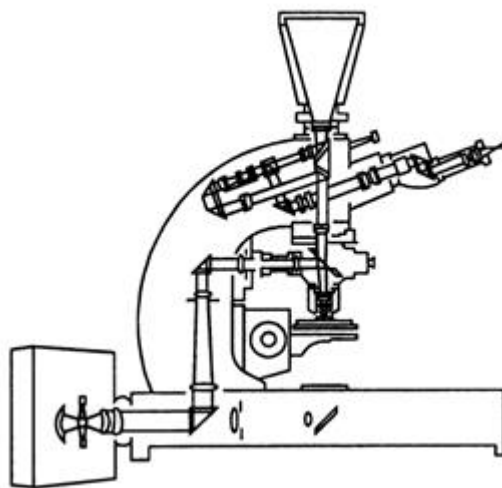
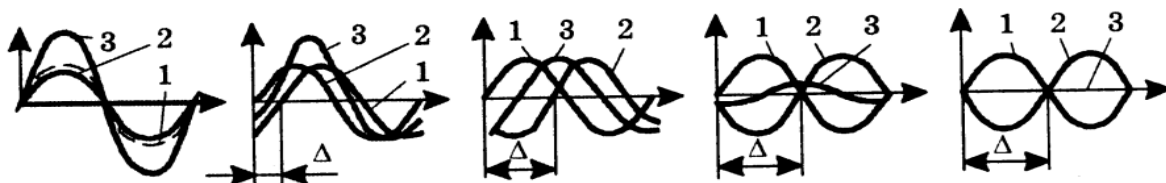


Рисунок 59 – Схема хода лучей в микроскопе Ну2-Е при наблюдении в отраженном свете

Интерференционный фазоконтрастный микроскоп. Используется для работы в отраженном свете. Представляет собой измерительный прибор высокого класса для визуального наблюдения топологии и измерения малых разностей хода света с помощью интерференционных методов. Вследствие того, что разность хода лучей при прохождении через микроскопические объекты может рассматриваться как мера их толщины, неровности или шероховатости, такое устройство очень хорошо подходит для количественного исследования самых малых структур. Поскольку этот микроскоп специально разработан для работы в отраженном свете, то с его помощью исследуются объекты полностью или частично светонепроницаемые. Он преимущественно используется при контроле фотошаблонов и измерении линейных размеров чрезвычайно малых элементов топологии интегральных микросхем.

Применяемые интерференционные методы дают наилучшие результаты измерений для структур, у которых резко ограниченные структурные детали находятся на однородном фоне. В основе работы микроскопа лежит интерференция, т. е. взаимодействие по крайней мере двух световых волн, связанное с усилением или ослаблением первоначальной интенсивности, причем изменение интенсивности происходит путем сложения взаимодействующих амплитуд с учетом относительной их фазы.

Если амплитуды интерферирующих волн равны, то результирующая амплитуда может колебаться (в зависимости от положения фазы) между нулем и удвоенным ее значением. На рисунке 60 показаны результирующие волны, возникающие при интерференции двух волн с одинаковой амплитудой при разности фаз от 0 до 180° .



1, 2 – интерферирующие волны; 3 – результирующая волна

Рисунок 60 – Результат интерференции двух световых волн с одинаковой амплитудой при различной разности фаз Δ

Интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому при интерференции двух волн с одинаковой амплитудой результирующая интенсивность может колебаться в диапазоне между нулем и учетверенной амплитудой одной волны. Каждой разности фаз, следовательно, соответствует совершенно определенная интенсивность.

Отдельные точки обычного источника света испускают свет не непрерывно, а как бы излучают отдельные короткие световые импульсы (цуги волн). Благодаря этому соотношение фаз между волнами, испускаемыми различными точками источника света, беспорядочно изменяется. Чтобы получить видимую картину интерференции, взаимодействующие составляющие света должны излучаться из одинаковых точек. Поэтому обычно расщепляют свет, исходящий от источника света, и его составляющие затем соединяют соответствующим образом.

Свойство света проявлять интерференционные эффекты называют когерентностью. Если соединить два когерентных пучка, которые исходят от двух изображений источника света и лежат на небольшом расстоянии друг от друга, то на экране, находящемся на большом расстоянии по сравнению с расстоянием от изображений источников света L_1 и L_2 , можно получить систему интерференционных полос (рисунок 61), которая в белом свете кажется цветной, а в монохроматическом – состоящей из светлых и темных полос.

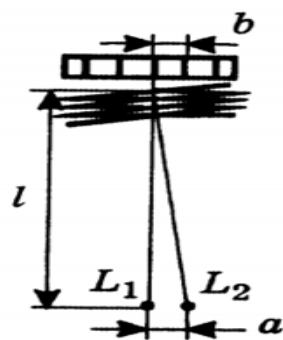


Рисунок 61 – Схема образования полос интерференции от двух когерентных источников L_1 и L_2

Расстояния от экрана до L_1 и L_2 при смещении точки отсчета m на расстояние между полосами b будут изменяться на длину волны λ . Разность между двумя расстояниями mL_1 и mL_2 называется разностью хода Δ . На симметричной линии, проходящей между двумя изображениями источника света к экрану, Δ всегда равна нулю (средняя светлая полоса). На месте первой темной полосы $\Delta = \lambda/2$ и на месте первой светлой полосы $\Delta = \lambda$.

Расстояние между двумя интерференционными полосами определяется по формуле $b = \lambda/a$. Если одна из интерферирующих волн имеет локально ограниченную разность хода, например, вследствие прохождения этой волной фазового объекта (рисунок 62), то в результате наблюдается смещение полос интерференции в месте изображения объекта, по которому можно определить разность хода.

Если расстояние между двумя изображениями источников света уменьшать, то расстояние b между интерференционными полосами будет увеличиваться.

Если $a = 0$, т. е. оба фронта волны параллельны друг другу, то расстояние между полосами бесконечно и весь экран вплоть до изображения объекта становится одного цвета или одинаковой яркости, которая изменяется соответственно изменению разности хода между интерферирующими волнами.

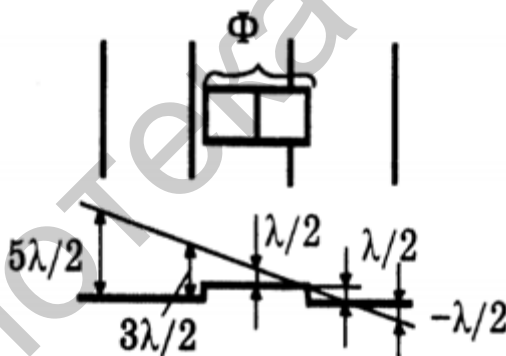


Рисунок 62 – Схема интерференции опорной волны 1 и волны, прошедшей через фазовый объект 2; вверху показано смещение полос интерференции на участке «Ф», соответствующем положению фазового объекта

Для получения очень контрастных полос интерференции протяженность источника света в направлении $L_1 - L_2$ должна быть настолько малой, чтобы разность расстояний $l_1 - l_2$ отличалась от расстояния $l'_1 - l'_2$ максимум на $\lambda/4$ (рисунок 63).

Это условие может выполняться, если источник света или его изображение ограничены узкой щелью, причем ширина щели изображения не превышает величину $S = \lambda/4a$. Если так называемое условие $\lambda/4$ выдерживается, то на экране некоторые составляющие луча усиливаются, а другие – ослабляются, в результате чего контрастность ухудшается.

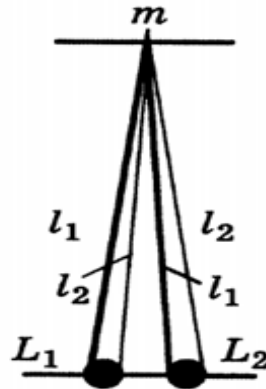


Рисунок 63 – Допустимая величина поперечного размера источников L_1 и L_2

Микроскопическое изображение возникает вследствие интерференции прямого и преломленного на объекте света в плоскости промежуточного изображения. При этом соотношения амплитуд и фаз в плоскости объекта передаются тем совершеннее, чем больше порядок преломленного света, т. е. чем больше дифракционных порядков охватывается объектом.

Под интерференционной микроскопией понимают наложение полного микроскопического изображения на когерентный с ним фон с целью получения и измерения слабоконтрастных изображений, так называемых фазовых объектов. Вследствие этого необходимо независимое от объекта расщепление хода луча, чтобы в плоскости промежуточного изображения волна от объекта могла интерферировать с когерентной ей опорной волной. Фазовые объекты отличаются от фона толщиной или показателем преломления. В отличие от них амплитудные объекты изменяют цвет или яркость луча. Из-за различного показателя преломления или толщины они обуславливают разность хода лучей света Δl относительно фона и, следовательно, смещение фазы φ . Разность хода Δl определяется как разность оптических расстояний dn , где d – толщина объекта, n – показатель преломления. Отсюда для $d = \text{const}$ $\Delta l = 2\Delta n$, где Δn – разность показателей преломления между фоном и объектом. Если разность хода кратна длине волны, то $\Delta l = d\Delta n/\lambda$.

Если произвести наложение микроскопического изображения, представленного на рисунке 64 в виде плоской волны с выраженным смещением фазы φ , на когерентный однородный фон (представленный на рисунке в виде волны, параллельной волне объекта), то волны от объекта и среды имеют взаимную разность фаз (φ – в среде, φ и ψ – в месте изображения объекта).

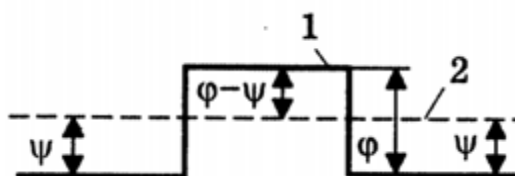
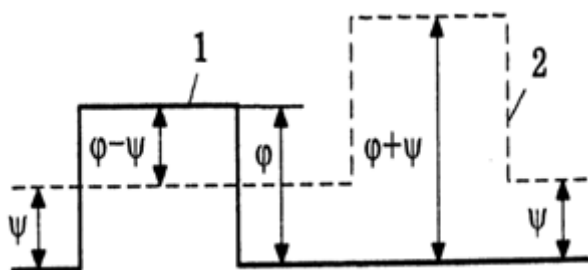


Рисунок 64 – Схема наложения плоской волны с местным смещением фазы (1) и когерентного гомогенного фона (2)

Так как любая разность фаз двух интерферирующих волн с одинаковой амплитудой соответствует определенной интенсивности, то для рассмотренного примера это означает, что объект имеет яркость, отличную от фона, и поэтому может наблюдаться на этом фоне. Плоскую опорную волну получают расщеплением хода лучей перед объективом и соединением их снова за объективом. Однако техническая реализация этого метода, обеспечивающая требуемое качество изображения, довольно трудна и требует использования дорогих приборов. Поэтому в интерференционном микроскопе лучи расщепляются за объективом. В рассматриваемом микроскопе это расщепление осуществляется методом «ширинг» или методом «интерфако».

Метод «ширинг». Если микроскопическое изображение расщепить на две равные составляющие и снова их соединить, точно совместив, то по полю изображения между двумя волнами будет постоянная разность хода и изображение получится в одном цвете или с одинаковой яркостью, включая структуры объекта. Если же, наоборот, соединить оба изображения с некоторым боковым смещением (рисунок 65), то между этими интерферирующими изображениями появятся разности фаз, изменяющиеся в зависимости от структуры волны. На месте левого изображения объекта (см. рисунок 65) возникает разность фаз $\phi - \psi$, на месте правого – разность фаз $\phi + \psi$, а на фоне – ψ . Эти разности фаз, в зависимости от ϕ , обуславливают получение более или менее контрастного изображения объекта. Именно этот принцип используется в методе «ширинг».



1 – основная волна; 2 – смещенная волна

Рисунок 65 – Боковое и фазовое смещение двух одинаковых волн, прошедших через фазовый объект, – «полное расщепление»

Если боковое смещение больше объекта, то говорят о полном расщеплении (рисунок 66).

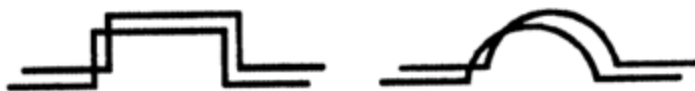


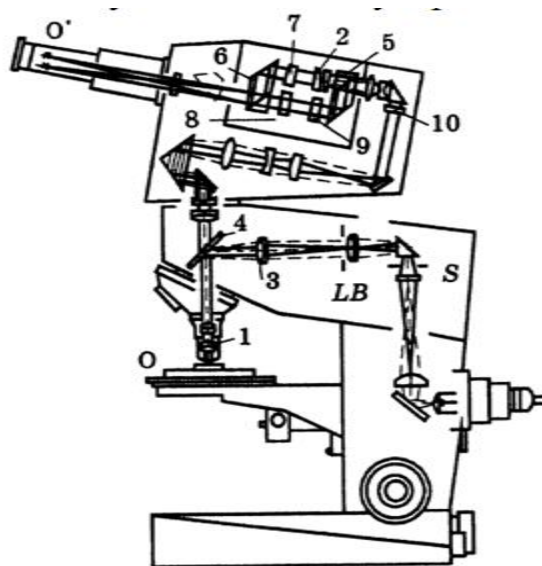
Рисунок 66 – Дифференциальное расщепление волн, прошедших через фазовый объект

Изменяя φ , можно для левого изображения фона или правого изображения объекта последовательно устанавливать различную затемненность или подбирать более выразительный цвет и измерять таким образом разность фаз или разность хода лучей от объекта относительно фона.

Если боковое смещение изображения очень мало, то говорят о дифференциальном расщеплении. В этом случае разности фаз уже не вызываются самим смещением фазы объекта, а определяются его местными изменениями. В результате видны и могут быть измерены градиенты показателей преломления и углы наклона профилей травления микроструктур. При использовании этого метода получается стереоскопическое изображение.

Метод «интерфако» особенно хорошо подходит для измерения разности хода на минимальных фазовых объектах вплоть до границы разрешения и обеспечивает очень высокое качество изображения. В этом случае опорная волна интерферирует с волной, деформированной объектом. Плоская опорная волна образуется при экранировании света, преломляемого объектом, т. к. в микроскопе один только прямой свет не может создать никаких структур. При относительно больших объектах невозможно полностью экранировать преломленный свет, вследствие чего метод «интерфако» должен применяться преимущественно для малых объектов, не более чем в 20 раз превышающих границу разрешения.

Ход лучей в микроскопе показан на рисунке 67. Источник света L конденсором проецируется в плоскость щели S , а затем призмой, системой линз и зеркалом – на заднюю фокальную плоскость объектива 1 через щель S . Объектив проецирует изображение щели в бесконечность и, после отражения на объекте O , в его заднюю фокальную плоскость через щель S , а затем через группу линз на поворотный клин 2. Диафрагма световой полосы LB проецируется линзой 3 через зеркало 4 с делениями в бесконечность, а объективом – в плоскость объекта. Вместе с объектом изображение диафрагмы световой полосы проецируется объективом в бесконечность, а затем оптической системой – в плоскость изображения O' , лежащую в области окуляра.



- 1 – объектив; 2 – поворотный клин; 3 – линза; 4 – зеркало с делениями;
 5, 6 – призмы; 7 – фазовращатель; 8, 9 – компенсационные пластины;
L – источник света; *S* – плоскость щели;
O – объект; *O'* – плоскость изображения

Рисунок 67 – Ход лучей в интерференционном фазоконтрастном микроскопе

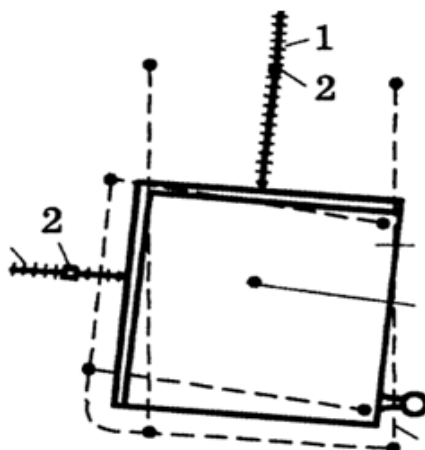
Сам интерферометр состоит из двух призм 5 и 6, поворотного клина 2, фазовращателя 7 и компенсационных пластин 8 и 9. На делительной поверхности призмы ход луча расщепляется на два, которые затем снова соединяются на делительной поверхности второй призмы 6 (см. рисунок 67).

При основной регулировке оба луча соединяются без бокового смещения или разности углов, а также без разности хода лучей. Поворотный клин состоит из двух одинаковых клиньев, вращающихся относительно друг друга, и отклоняет лучи от их направления. Это отклонение может принимать любое значение между нулем и удвоенным значением отклонения каждого клина. Если поворотный клин установлен на отклонение, то проходящие через него лучи немного отклоняются от своего направления и изображение, перенесенное верхним пучком лучей, несколько смещается по высоте по сравнению с изображением, перенесенным нижним пучком. В результате получается стереоскопическое изображение объекта.

Если произвести наложение двух составляющих света, исходящих из двух расположенных рядом стереоскопических изображений одного источника, возникают интерференционные полосы.

Координатометр. Служит для измерения по двум координатам наблюдаемых в проходящем свете объектов, имеющих общую площадь до 300×300 мм, с точностью измерения $\pm 0,0002$ мм.

Измерительный прибор снабжен стеклянными «масштабными линейками», расположенными таким образом, что выполняется принцип компаратора Аббе для обеих координат, т. е. продолжение линейки проходит через точку измерения (рисунок 68).



- 1 – масштабные линейки; 2 – отсчетные устройства;
 3 – координатный стол (пластинчатая рамка); 4 – точка измерения;
 5 – ручка перемещения стола; 6 – параллелограммные направляющие

Рисунок 68 – Схема перемещений координатного стола

Масштабные линейки при движении стола скользят мимо неподвижных устройств отсчета. Они перемещаются вместе с рамкой, которая удерживается направляющей в таком положении, что невозможен поворот вокруг перпендикулярной к плоскости измерения оси. Грубая установка производится вручную с помощью рычага 5 (см. рисунок 68) без поворота шпинделя. Масштабные линейки имеют деления в миллиметрах, которые, в свою очередь, могут быть подразделены на десятые доли микрометра при помощи спирального микрометра, находящегося в потоке лучей отсчета. Отсчет производится путем переключения того же окуляра, с помощью которого устанавливается объект измерения. На рисунке 69 показан вид в окуляр спирального микрометра.

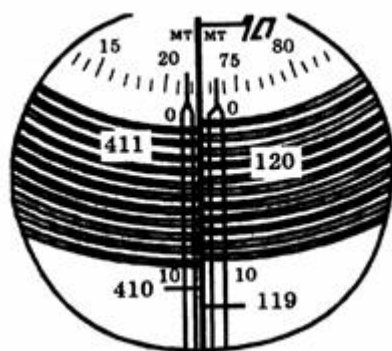


Рисунок 69 – Вид в окуляр отсчетных шкал спиральных микрометров

Идея его конструкции состоит в том, что основные детали, а именно: винт и барабан с делителями, с одной стороны, гайка с движком и стеклянная пластина с нанесенными на нее делениями, с другой, – объединяются в общий элемент. Этот элемент представляет собой стеклянный диск, разделенный по кругу на 100 частей и имеющий архимедову спираль, полюс которой совпадает с центром круга. Стеклянный диск перемещается в микроскопе на том месте, которое обычно занимает пластина с делениями (объект-микрометр), так что спираль и деления появляются в микроскопе одновременно с изображением штрихов объекта-микрометра (рисунок 70).

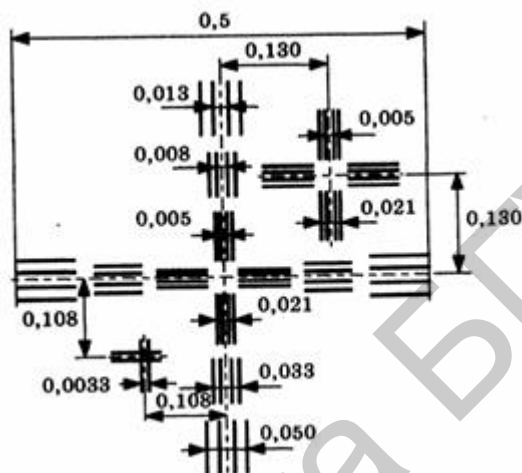


Рисунок 70 – Проверочная фигура для контроля малых размеров (размеры даны в миллиметрах)

Увеличение микроскопа настроено таким образом, что 10 витков спирали соответствуют одному перемещению на 1 мм. Приводом для вращения дисков со спиралью являются два маховичка – справа и слева от окуляра. Приводная кнопка служит для фокусировки отсчетного микроскопа.

Проекционный инструментальный микроскоп. Состоит из четырех основных узлов: станина, измерительный стол, измерительная головка и электрический блок питания.

Станина стоит на трех регулируемых установочных винтах. Внутри нее вмонтированы оптические системы освещения и электрооборудование для освещения проецирования масштабной шкалы.

Измерительный стол передвигается по двум координатам по шариковым направляющим с помощью грубого и точного приводных механизмов. Измерение производится сравнением с прецизионными стеклянными масштабными линейками, шкалы которых проецируются на матовые стекла одновременно с нониусом. Расположенный на измерительном столе круглый стол может поворачиваться на 360°. Измерительная головка состоит из бинокулярного микроскопа, проекционного устройства, фотоустановки и двойной призмы. Двойная призма передвигается вдоль оси z по рельсовой направляющей держателя микроскопа. При помощи этой направляющей можно

с очень высокой точностью измерять горизонтальные отрезки на образце на различной высоте.

Двойная призма позволяет использовать микроскоп также для точного измерения симметричных элементов фигур. При проведении измерений образец помещается в поток лучей осветительной установки и под микроскопом в бинокляр рассматривается теневое изображение. Для визирования измеренных на образце точек в поток лучей помещают в кассете пластину, на которую нанесены или соответствующие деления, или эталонные штриховые фигуры для сравнения с теневым изображением образца.

Для просмотра часто меняющихся фигур теневое изображение проецируется на экран, с которого рисунок, увеличенный в нужном соотношении, может быть зафиксирован на прозрачной бумаге. Если нужно произвести не только сравнение, но и измерение, то образец перемещается или поворачивается с помощью измерительного стола. Отдельные значения замеров могут при этом сниматься в x - и y -направлениях при цене деления шкалы 0,005 мм или 3'. Погрешность метода совмещения при использовании двойной призмы составляет для геометрических фигур с хорошим качеством их краев не более ± 5 мкм.

Библиотека БГУИР

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаrchук, В. В. Методы литографии в наноинженерии : учеб. пособие / В. В. Макаrchук, И. А. Родионов, Ю. Б. Цветков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
2. Лапшинов, Б. А. Технология литографических процессов : учеб. пособие / Б. А. Лапшинов. – М. : МГИЭИМ, 2011.
3. Родионов, Ю. А. Литография в производстве интегральных микросхем / Ю. А. Родионов. – Минск : Дизайн ПРО, 1998.
4. Моро, У. Микролитография: принципы, методы, материалы. В 2 ч. / У. Моро ; пер. с англ. ; под ред. Р. Х. Тимерова. – М. : Мир, 1990.
5. Химическая обработка в технологии ИМС / В. П. Василевич [и др.]. – Полоцк : ПГУ, 2001.
6. Franssila, S. Introduction to Microfabrication / S. Franssila. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2004.
7. Tauber, R. N. Silicon Processing for the VLSI Era. Vol. 1: Process technology / R. N. Tauber, S. Wolf. – Sunset Beach, California : Lattice Press, 2000.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Родионов Юрий Анатольевич
Котов Дмитрий Анатольевич
Плебанович Владимир Иванович
Ковальчук Наталья Станиславовна

**БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ
ФОТОЛИТОГРАФИИ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *А. К. Петрашкевич*
Корректор *Е. И. Герман*
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 21.04.2017. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,3. Уч. изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 65.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6