

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

Кафедра микро- и нанoeлектроники

ОТЧЕТ
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №6
по дисциплине “Технология изготовления полупроводниковых интегральных
микросхем”
МИКРОЛИТОГРАФИЯ

Выполнил: ст. гр. 140301

Казимирченко А.А

Проверила: Чернаусик О.М.

Минск 2023

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

Кафедра микро- и нанoeлектроники

ОТЧЕТ
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №6
по дисциплине “Технология изготовления полупроводниковых интегральных
микросхем”
МИКРОЛИТОГРАФИЯ

Выполнил: ст. гр. 140301

Кравченко Д.С.

Проверила: Чернаусик О.М.

Минск 2023

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

Кафедра микро- и нанoeлектроники

ОТЧЕТ
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №6
по дисциплине “Технология изготовления полупроводниковых интегральных
микросхем”
МИКРОЛИТОГРАФИЯ

Выполнил: ст. гр. 140301

Вансевич Д.А.

Проверила: Чернаусик О.М.

Минск 2023

1. ЦЕЛЬ

Изучить методы процесса литографии, его задачи и области применения каждого конкретного метода.

2. ЗАДАЧИ

2.1 Оптическая фотолитография.

2.1.1 Понятие фотолитографии.

2.1.2 Контактная печать.

2.1.3 Фотошаблоны.

2.1.4 Фоторезисты.

2.1.5 Дефекты при проведении процесса фотолитографии.

2.2 Электронная литография.

2.2.1 Процесс электронной литографии.

2.2.2 Характеристики электронно-лучевых установок.

2.2.3 Оборудование для ЭЛ экспонирования

2.2.4 Совмещение.

2.3 Рентгеновское и ионно-лучевое экспонирование.

2.3.1 Рентгеновское излучение.

2.3.2 Фотошаблоны

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 ОПТИЧЕСКАЯ ФОТОЛИТОГРАФИЯ

2.1.1 Понятие фотолитографии

Фотолитография - это совокупность фотохимических процессов, процесс формирования рельефного рисунка в актиночувствительном слое, нанесенном на поверхности подложки, с целью переноса этого рисунка на материал подложки. Актиночувствительный слой - слой, который изменяет свои свойства (растворимость) под действием актиничного излучения (например, УФ света или потока электронов). В настоящее время без фотолитографии

невозможно себе представить получение полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

К основным достоинствам фотолитографического процесса следует отнести:

- 1) возможность получения пленочных и объемных компонентов интегральных микросхем весьма малых размеров (до единиц и долей микрона) практически любой конфигурации;
- 2) универсальность метода: изготовление металлических масок для напыления пленок, селективное травление пленочных слоев, вытравливание "окон" в маскирующих пленках для локальной диффузии, эпитаксии и ионной имплантации, глубинное травление в полупроводниковых и диэлектрических подложках и т.д.;
- 3) возможность применения групповой технологии (за одну операцию и на одном виде оборудования - получение сотен и тысяч элементов интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов).

Существует 6 методов переноса изображения:

- Контактный(в том числе с микрозазором)
- Проекционный
- Проекционный с пошаговой мультипликацией единичного изображения
- Проекционно-сканирующий
- Сканирующий с пошаговой мультипликацией единичного изображения
- Непосредственная генерация всего изображения

При контактной печати шаблон, выполненный в масштабе 1:1, находится в физическом контакте с подложкой или отдален от нее на несколько микрометров в случае печати с зазором. Главными недостатками контактной печати являются повреждения шаблона и ограниченная совместимость.

В проекционных системах используются линзы или зеркала, позволяющие проецировать рисунок фотошаблона (масштаб 10:1, 5:1 или 1:1) на квадратное поле (20x20) или полосу (1,5 мм), которая затем сканируется по пластине.

2.1.2 Контактная печать

Метод фотолитографии при котором фотошаблон напрямую контактирует с подложкой, или же между ними присутствует небольшой, порядка 10 мкм зазор (метод с микрозазором). Прямой контакт шаблона и подложки негативно влияет на срок службы шаблона. Разрешающая способность такого метода до 0,1 мкм. Метод с микрозазором использовался для устранения контакта шаблон-подложка, но теряется разрешающая способность (до 3 мкм) из-за преломления света

2.1.3 Фотошаблоны

Фотошаблон - образец (шаблон), несущий информацию о конфигурации, взаиморасположении и геометрических размерах элементов изготавливаемой микросхемной схемы. Фотошаблон называется прямым, если его рисунок является позитивным отображением оригинала, и обратным, если его рисунок является негативным отображением оригинала.

Фотошаблон может быть изготовлен из любого непрозрачного для ультрафиолетового излучения материала, в котором можно было бы реализовать (выполнить) прозрачные участки или прозрачная для света пластина с нанесенным непрозрачным рисунком. Чаще всего в качестве фотошаблона применяют пластины из оптического стекла или кварца, на одной поверхности которых расположены непрозрачные (оптически плотные) участки, получаемые фотолитографическим или иным способом.

Технология изготовления фотошаблонов является одним из наиболее сложных процессов в микроэлектронике.

2.1.4 Фоторезисты

Фоторезисты являются светочувствительными слоями материала, состоящими из полимерной основы и различных добавок, который меняет свои физико-химические свойства под действием излучения. В качестве полимерной основы используются: поливиниловый спирт, полиэферы, полиамиды, фенолформальдегидные и эпоксидные смолы, поливинилацетат, каучуки и др. Добавки обеспечивают в первую очередь повышение светочувствительности полимеров, а также такие важные качества, как кислотостойкость, вязкость, смачивание и другие.

Три критерия определения пригодности фоторезиста для использования в технологии изготовления ИМС:

- Светочувствительность
- Разрешающую способность
- Кислотостойкость.

Светочувствительность фоторезиста - величина, обратная количеству поглощенной световой энергии, необходимой для получения в данном слое фоторезиста определенного фотохимического эффекта, который состоит в потере (в негативном фоторезисте) или приобретении (в позитивном фоторезисте) растворимости облученных участков фоторезиста:

$$S = \frac{1}{E \cdot t} = \frac{1}{H}$$

где E - интенсивность облучения слоя фоторезиста толщиной 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 фоторезист.

Разрешающая способность - максимально возможное число отдельно передаваемых одинаковых линий защитного рельефа на 1 мм поверхности подложки:

$$R = \frac{1000}{2^l}$$

где R - разрешающая способность, линий/мм; l - ширина отдельно передаваемой линии, мкм.

Иногда разрешающую способность определяют наименьшей шириной линий или наименьшим расстоянием между ними в микронах. Следует различать разрешающую способность фоторезиста и процесса фотолитографии.

Разрешающая способность процесса фотолитографии всегда ниже разрешающей способности фоторезиста. Это объясняется следующим (рисунок 1).

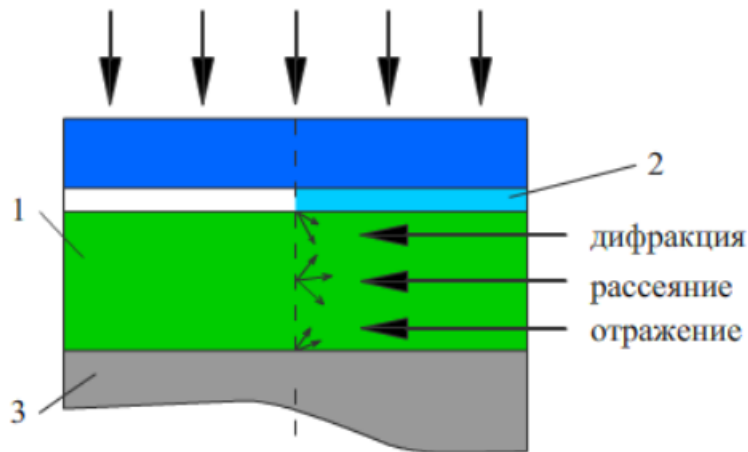


Рисунок 1—Оптические процессы в слое фоторезиста

Разрешающая способность процесса фотолитографии также снижается из-за бокового подтравливания (на некоторую величину x) под слоем фоторезиста на границах защитного рельефа при травлении материала подложки.

Очевидно, чем выше толщина слоя негативного фоторезиста, тем больше «ореол» при проявлении. Толстые слои фоторезиста хуже удерживаются на подложке по сравнению с тонкими, что увеличивает боковое подтравливание. Поэтому с увеличением толщины фоторезистивного покрытия падает разрешающая способность процесса фотолитографии.

Кислотостойкость - стойкость фоторезиста к химическим воздействиям. Фоторезисты должны обладать высокой устойчивостью к воздействию кислот и щелочей, так как в процессе травления защитный рельеф значительное время (до нескольких минут) контактирует с кислотами и щелочами. Кислотостойкость зависит как от химического состава его полимерной основы, так и от толщины и состояния фоторезистивного покрытия. Нестойкость фоторезиста определяют по следующим признакам:

- Частичное разрушение пленки;
- Отслаивание пленки от подложки;
- Локальное растравливание;
- Боковое подтравливание на границах защитного рельефа.

Первые два вида нарушения пленки фоторезиста при химической обработке свидетельствуют о полной его непригодности для изготовления микросхем и могут служить критериями забраковывания всей партии приготовленного фоторезиста. Два других вида нестойкости слоя

фоторезиста (локальное растравливание и боковое подтравливание) допустимы в определенных пределах.

Величина бокового подтравливания x зависит не только от глубины травления v , но и от адгезии слоя фоторезиста к подложке. Поэтому кислотостойкость фоторезистов часто оценивают фактором травления. Очевидно, что, чем лучше адгезия фоторезистивного слоя к подложке, тем меньше x и h и, следовательно, выше кислотостойкость. Адгезия фоторезиста зависит от его физико-химических свойств и условий проведения операций процесса фотолитографии (нанесение, сушка, экспонирование, термообработка и т.д.).

Выбор фоторезистов определяется вышерассмотренными критериями, окончательный же выбор фоторезиста определяют применяемые травители, материал подложки, подлежащий травлению, а также требования, предъявляемые к изделию.

Примером позитивного фоторезиста является фоторезист ФП-383, который представляет собой раствор светочувствительных продуктов новолачной смолы в диоксане.

Примером негативного фоторезиста является фоторезист ФН-11, который представляет собой раствор циклокаучука, фотосшивающего агента в смеси ксилола с толуолом.

2.1.5 Дефекты при проведении процесса фотолитографии.

Основные дефекты при проведении процессов фотолитографии:

- Наличие проколов в пленке фоторезиста;
- Неровности пленки фоторезиста по всей поверхности ВТСП пленки;
- Наличие клина в окисной пленке;
- Неровность края изображения пленки фоторезиста;
- Изменение заданных геометрических размеров;
- Наличие ореола по краю изображения.

Наличие проколов в пленке фоторезиста - наиболее распространенный вид фотолитографических дефектов. Возникают эти дефекты в результате использования некачественных или износившихся фотошаблонов, а также от наличия в фоторезисте пылинок, субполимерных частиц и других посторонних включений. Проколы в пленке фоторезиста могут также возникнуть в результате перегрева этой пленки при экспонировании. Количество проколов в значительной степени зависит от качества

смачивания поверхности рабочего образца фоторезистом. Плохое смачивание приводит к появлению большого числа проколов.

Неровности пленки фоторезиста по всей поверхности рабочего образца определяются как способом нанесения фоторезистивной пленки, так и предварительной обработкой поверхности рабочего образца. Основными параметрами предварительной обработки, влияющими на неровность пленки фоторезиста, является чистота обработки поверхности (класс чистоты), плоскостность и плоскопараллельность.

Наличие клина в окисной пленке - один из часто встречающихся в фотолитографическом процессе дефектов. Этот вид дефекта оказывает существенное влияние на размер создаваемой диффузионной области. Без клина в окисной пленке распространение диффузанта вбок строго определяется режимом диффузии и однозначно связано с глубиной диффузии. При наличии клина дополнительно увеличиваются размеры диффузионной области за счет проникновения диффундирующей примеси через тонкую область клина в исходный материал рабочего образца. Чем больше клин, тем шире его тонкая область и, следовательно, больше дополнительное неконтролируемое увеличение диффузионной области.

Неровность края изображения пленки фоторезиста появляется в тех случаях, когда плохо подобраны режимы экспозиции и проявления. Мельчайшие неровности края в виде периодических выступов и впадин могут возникнуть из-за наличия в фоторезистах субполимерных частиц размером 0,3 - 0,5 мкм. Наиболее часто этот вид дефекта возникает при употреблении металлизированных шаблонов, имеющих зубчатые края элементов изображения. Для предупреждения этого вида дефекта необходимо тщательно фильтровать фоторезист и проверять качество используемого фотошаблона.

Изменение заданных геометрических размеров изображения имеет место при плохом контакте между рабочим образцом и фотошаблоном. Плохой контакт между этими элементами приводит к появлению воздушного зазора, который при экспонировании изменяет характер и размер переносимого с фотошаблона изображения

Наличие ореола по краю изображения связано с рассеянием света, проходящего через фотошаблон при экспонировании. Рассеяние света приводит к образованию по краю изображения «нерезкой зоны», которая после проявления дает ореол. Этот вид дефекта приводит к ухудшению

геометрических параметров изображения и последующих технологических операций.

Все перечисленные дефекты оказывают большое влияние на последующие технологические операции изготовления приборов, ухудшая их электрические параметры.

2.2 ЭЛЕКТРОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ.

2.2.1 Процесс электронной литографии.

Электронный пучок, остросфокусированный с помощью магнитных линз на поверхность слоя полимера (резиста), чувствительного к электронному облучению, прорисовывает на нем изображение, которое обнаруживается после обработки резиста в проявителе. Обработка электронным пучком резиста меняет степень растворимости полимера в растворителе (проявителе). Участки поверхности, с записанным на них изображением, очищаются от резиста с помощью проявителя. Через полученные окна в плёнке резиста производится вакуумное напыление подходящего материала, например, нитрида титана или металлов или ионное травление. На последнем этапе технологического процесса неэкспонированный излучением резист также смывают другим растворителем. Перемещение электронного пучка по поверхности осуществляется с помощью компьютера изменением токов в отклоняющих магнитных системах. В некоторых установках при этом меняется форма и размеры пятна электронного пучка. На выходе многоступенчатого технологического процесса получается фотошаблон-маска для использования в фотолитографии и других нанотехнологических процессах, например, в технологии реактивного ионного травления.

2.2.2 Характеристики электронно-лучевых установок.

Разрешение зависит, в частности, от распределения интенсивности на краю луча еще до того, как он поглотится в резисте. Используются два типа пучков: гауссов пучок круглого сечения и пучок с квадратным или прямоугольным сечением. Для гауссова пучка пространственное разрешение d принимается равным ширине распределения интенсивности на полувысоте. Удовлетворительная точность передачи изображения получается, если величина d не превосходит по крайней мере $1/5$ минимальной ширины линии.

Разрешение r должно превышать толщину резиста t , а точность совмещения должна быть лучше $1/5$ разрешения. Для электронных пучков было достигнуто совмещение $+0.1$ мкм. В диапазоне энергий экспонирования 10-30 кВ основным фактором, ограничивающим разрешение, является обратное рассеяние электронов от подложки.

Использование гауссовых пучков или недостаточное перекрывание пятен может быть причиной появления неровностей на краю и размытости рисунка. Близко расположенные элементы получают избыточную дозу из-за обратного рассеяния от соседних элементов (взаимный эффект близости), что вызывает сужение неэкспонированных участков. Если берется более тонкая кремниевая пластина для ослабления обратного рассеяния, то взаимный эффект близости практически не наблюдается. Вот основные методы ослабления взаимного эффекта близости:

- а) коррекция дозы и размера пятна или применение мембран, протравленных с обратной стороны;
- б) использование многослойного резиста с барьерным слоем из металла и толщиной чувствительного слоя 0.1 - 0.2
- в) использование электронных пучков с энергией 50 - 100 кВ;
- г) обработка верхнего слоя резиста (толщиной 100 нм), в котором сформировано изображение, кремний- или металло-держущим мономером и последующее сухое проявление
- д) использование высококонтрастных резистов.

2.2.3 Оборудование для ЭЛ экспонирования

К любой литографической системе предъявляются следующие принципиальные требования:

- 1) контроль критического размера;
- 2) точность совмещения;
- 3) эффективность затрат;
- 4) технологическая гибкость;
- 5) совместимость с другими экспонирующими системами.

Существует несколько вариантов построения сканирующих установок ЭЛ экспонирования:

- 1. Гауссов пучок либо пучок переменной формы.
- 2. Пошаговое либо непрерывное перемещение столика

3.Источник электронов: вольфрамовая нить, эмиттер из гексаборида лантана, полевой эмиссионный катод (острие), простой либо составной источник.

4.Коррекция эффектов близости варьированием дозы, размеров экспонируемых областей либо и того и другого.

5.Ускоряющее напряжение (5-10 кВ).

Главные элементы экспонирующей ЭЛ системы- источник электронов, системы фокусировки и бланкирования луча, устройство контроля совмещения и отклонения, электромеханический стол и компьютерный интерфейс.

Блок бланкирования электростатического либо электронно-магнитного типа, который "выключает" электронный луч, отклоняя его за пределы отверстия коллимирующей диафрагмы.

2.2.4 Совмещение.

Общим для всех экспонирующих систем являются послойное совмещение и контроль ширины линии.

Метки для ЭЛ-совмещения обычно изготавливаются в виде канавок или выступов в кремнии, а для повышения уровня сигнала обратно рассеянных электронов – из металлов большой атомной массы. В качестве детекторов могут использоваться микроканальные умножители, сцинтилляторы или диффузионные диоды.

2.3 РЕНТГЕНОВСКОЕ И ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ЭКСПОНИРОВАНИЕ.

2.3.1 Рентгеновское излучение.

В рентгеновской литографии используется теневой шаблон. Недостатки такой схемы связаны с возникновением полутени, обусловленной размерами (неточностью) источника и зазором между шаблоном и пластиной; аналогичные эффекты наблюдаются при использовании диффузного оптического источника в фотолитографии.

Качественная печать обеспечивается при наличии четырех составляющих: высокоинтенсивного коллимированного источника; механического, электрического, оптического или ЭЛ-совмещения шаблона с заданной Библиотека БГУИР 35 точностью; прецизионного контроля зазора; недорогого мембранного либо трафаретного шаблона.

Субмикронная печать обеспечивается при зазоре шаблон – пластина порядка 1 мкм. При увеличении зазора между шаблоном и пластиной уход размера изображения на пластине и время экспонирования возрастают. Минимальный контраст между прозрачным и непрозрачным участками шаблона для экспонирования резиста составляет 4:1 (модуляция 60%). Вторичные электроны, испускаемые поглощающими элементами из золота, могут вызывать «размывание» края изображения. Для того чтобы рентгеновская литография стала технологичной, нужно решить ряд важных проблем. Для достижения хотя бы минимальной приемлемой производительности (2 – 5 пластин диаметром 125 мм в час) требуется резист с чувствительностью не хуже 1 мДж/см² для обычных (возбуждаемых электронным пучком) рентгеновских источников.

2.3.2 Фотошаблоны

В рентгеновской литографии шаблон при совмещении помещается над пластиной с зазором 10 мкм для увеличения его срока службы. Поскольку длина волны рентгеновского излучения мала, можно пренебречь дифракционными эффектами и оперировать простыми геометрическими представлениями при формировании рисунка на шаблоне.

Непрозрачные участки шаблона затеняют пластину под шаблоном, но край тени получается не совсем резким из-за конечных размеров (S) источника рентгеновского излучения (диаметр пятна сфокусированных на аноде электронов), находящегося на расстоянии D от шаблона. Если зазор между шаблоном и пластиной обозначить через d, то ширина области полутени равна:

$$\sigma = g(S/D)$$

Поскольку в качестве шаблона используется сплошная полупрозрачная мембрана, то, по крайней мере, 50% излучения поглощается шаблоном. Для сбалансированности между контрастностью проходящего пучка и временем экспонирования (интенсивность) литая малая часть рентгеновского излучения должна проходить сквозь непрозрачные участки шаблона. Минимальный контраст между прозрачным и непрозрачным участками шаблона для экспонирования резиста составляет 4:1 (модуляция 60%). Вторичные электроны, испускаемые поглощающими элементами из золота, могут

вызывать "размывание" края изображения. Для ослабления эмиссии вторичных электронов применяется покрытие из полиимида поверх золотого рисунка, поглощающее выбитые фотоэлектроны, иначе уход размера может достигать 0,2-0,4 мкм. При взаимодействии рентгеновского излучения с подложкой вторичные фотоэлектроны, имеющие небольшую длину пробега, рассеиваются в обратном направлении, что может вызывать уширение основания изображения в позитивном резисте. Для того чтобы рентгеновская литография стала технологичной, нужно решить ряд важных проблем. Для достижения хотя бы минимальной приемлемой производительности 2-5 пластин диаметром 125 мм в час требуется резист с чувствительностью не хуже 1 мДж/см² для обычных (возбуждаемых электронным пучком) рентгеновских источников

4. ВЫВОД

Микролитография — метод, используемый при производстве устройств микро- и нанoeлектроники, а также других микро- и наноразмерных структур. Он включает в себя создание узоров и рисунков на поверхности подложки с помощью света. Шаблоны можно использовать для создания интегральных схем, микропроцессоров, датчиков и других электронных устройств.

Оборудование для проведения фотолитографии включает источника света, маски и системы линз. Источником света часто является лазер или ртутная дуговая лампа, и он используется для экспонирования слоя фоторезиста на подложке. Маска представляет собой узорчатый шаблон, который определяет желаемый узор и помещается между источником света и подложкой. Система линз используется для фокусировки света на подложку и обычно состоит из нескольких линз.

Существует несколько методов микролитографии:

1. Оптическая литография. Этот метод использует свет для создания узоров на подложке. Это наиболее распространенный метод микролитографии, который используется для создания самых разнообразных микро- и наноразмерных структур.

2. Электронно-лучевая литография. Этот метод использует сфокусированный пучок электронов для создания узоров на подложке. Он

используется для формирования рисунка с высоким разрешением и часто используется в производстве полупроводниковых устройств.

3. Рентгеновская литография. Этот метод использует рентгеновские лучи для создания узоров на подложке. Он используется для создания паттернов с высоким разрешением и часто используется в производстве микроэлектромеханических систем (МЭМС) и других микромасштабных устройств.