

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ  
ФАКУЛЬТЕТ «ЭЛЕКТРОНИКА И АВТОМАТИКА»  
КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по дисциплине «ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ»

Направление образования:

5310800 – Электроника и приборостроение (Электроника)

Ташкент-2013 г.

Коллектив кафедры «Электроника и микроэлектроника» рассмотрев конспект лекций по курсу «Технология полупроводниковых приборов и интегральных схем» утверждает что она составлена на основе учебной программы бакалавра по направлению образования 5310800 – Электроника и приборостроение (Электроника)

Рецензенты: доц.Наркулов Н.

Доц. Назиров Д.Н.

Курс 4

Семестр 7, 8

Лекция 56 ч.

Лабораторные занятия. 28 ч.

Практические занятия 28 ч..

## Лекция №1

### Введение

Электроника и планарная микро электроника опираются на технологию. Технология изготовления интегральных микросхем представляет собой совокупность механических, физических и химических способов обработки различных материалов (полупроводников, диэлектриков, металлов), в результате которой создается интегральная схема (ИС).

Постоянное совершенствования технологии полупроводниковых приборов привело на определенном этапе ее развитие к созданию ИС.

Производство ИС началось примерно с 1959г. на основе предложенной к этому времени планарной технологии. Основой планарной технологии послужила разработка нескольких фундаментальных технологических методов:

- В 1957г. показана возможность локальной диффузии донорных и акцепторных примесей в кремний (Si) с использованием в качестве защитной маски пленки двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$ , выращенной на поверхности кремния при высокотемпературной обработке в окислительной среде (термическое окисление).
- В 1953г. разработан метод фотолитографии, позволивший создавать p-n-переходы малых размеров и сложных конфигураций с помощью локальной диффузии.
- В 1959г. на основе исследования поверхности полупроводников и методов стабилизации характеристик полупроводниковых приборов был разработан метод защиты p-n-переходов от окружающей среды пленками  $\text{SiO}_2$ .

Применяют два основных метода изготовления ИС:

- первый метод заключается в локальной обработке микро участков

полупроводникового кристалла и придании им свойств присущих функциям отдельных элементов и их соединений (полупроводниковые ИС).

- второй метод основан на использовании послойного нанесения тонких пленок различных материалов на общее основание (подложку) при одновременном формировании таких схемных элементов и их соединений (пленочные ИС).

В результате комбинирования этих двух методов созданы схемы нового типа - гибридные ИС,- в которых используются пленочные пассивные элементы (резисторы, конденсаторы) и микроминиатюрные активные элементы (транзисторы, диоды и их сборки).

Основные технологические процессы изготовления любой ИС:

1. Резка слитков Si на пластины и механическая обработка Si, состоящая из операции шлифовки и полировки для получения структуры поверхности, удовлетворяющей заданными требованиями.
2. Химическая обработка в разнообразных химических реактивах для очистки поверхности пластин.
3. Окисление пластин Si для получения на поверхности пленки SiO<sub>2</sub>, маскирующей поверхность Si при его локальном легировании.
4. Эпитаксиальное наращивание Si на кремниевые или инородные, (например, сапфировые) пластины.
5. Получение в Si слоев, легированных заданными примесями методом диффузии или комбинацией методов диффузии и ионного внедрения.
6. Нанесения тонких металлических пленок на рабочую поверхность пластины для создания омических контактов к слоям, образующим структуры элементов ИС, и соединительных металлических полосок между элементами.

7. Фотолитография, проводимая с целью, во-первых, образования окон в пленке  $\text{SiO}_2$  для проведения процессов локального легирования и, во-вторых, формирования металлических соединительных полосок.
8. Проверка параметров всех ИС, полученных на одной пластине, для отбраковки неработоспособных.
9. Разделения пластины на кристаллы и сборка годных ИС.
10. Технологические испытания на механическую прочность, устойчивость к циклическому воздействию температур, влагоустойчивость.
11. Окончательная проверка параметров ИС.

Для изготовления больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем СБИС (соответственно  $10^4$  и  $10^6$  элементов в одном кристалле) разработана изопланарная технология. Она включает дополнительные операции по получению рельефной поверхности на Si методом химического травления, нанесения пленки нитрида кремния.

При изготовлении БИС и СБИС для уменьшения размеров рисунков в пленке  $\text{SiO}_2$  может применяться не фотолитография, а другие методы - рентгенолучевая и электролитография. Для локального травления методы ионно-плазменного травления, что позволяет уменьшать размеры элементов.

Особенностью планарной технологии является ее универсальность. Технологический процесс состоит из трех повторяющихся операций (химическая обработка, термообработка и фотолитография). Плотность упаковки до 1000 элементов/мм, быстродействие временем задержки 0,1-0,2 нс. на один логический элемент. На одной пластинке одновременно изготавливается много ИС. Их число зависит от размера площади, занимаемой ИС и диаметра пластины. Сборка в корпус, присоединение выводов

ведется индивидуально для каждого кристалла поэтому стоимость сборки ИС составляет (40-65) % от всех затрат на изготовления ИС.

Для обеспечения чистоты (в 1 л воздух допускается не более 3 пылинок воздуха размером 0,3 мкм и более) создается система фильтрации воздуха на основе мощных кондиционеров. Ответственные технологические участки располагаются в чистых комнатах "комната в комнате". Специальная одежда не должна выделять пылевых частиц.

Для повышения выхода годных приборов автоматизируется технологические процессы что позволяет уменьшить численность персонала, снизить влияние субъективных качеств операторов, проводящих технологические процессы.

## Лекция №2

### Механическая обработка полупроводниковых материалов

Большинство полупроводниковых материалов получают в виде цилиндрических монокристаллических слитков неправильной формы, размеры которых для кремния Si могут достигать в диаметре 150 мм и иметь длину 1000 мм и более. Для изготовления большинства дискретных полупроводниковых приборов и ИС в качестве исходных заготовок используют дисковые срезы монокристаллических слитков или врезанные из них детали квадратной, прямоугольной, круглой или более сложной формы, называемыми кристаллами. Главной задачей механической обработки в производстве полупроводниковых приборов является получение заготовок, необходимых размеров формы и профиля с требуемым качеством поверхности. Это задача решается путем разрезания слитков на пластины, шлифования и полирования пластин, профилирования их поверхности различными механическими и механохимическими или физическими методами.

### **Методы ориентации монокристаллов.**

Различают 2 вида резания слитков на пластины: ориентированное и неориентированное. Для большинства ИС точности ориентации пластины имеет большое различие в выполнении практических всех технических операций. Лишь для ограниченного числа приборов направление резания произвольно.

### **Методы резания слитков на пластины и кристаллы.**

В технологии применяют несколько методов резание: дисками с алмазосодержащей наружной или внутренней крошкой; резание, стальными полотнами или проволокой с абразивной суспензией; скрайбирование: электрофизические способы (УЗ обработка с абразивами, электроэрозионная обработка, лучевые способы обработки с использованием электронного или лазерного луча). Для сравнения различных методов резания существует ряд критериев:

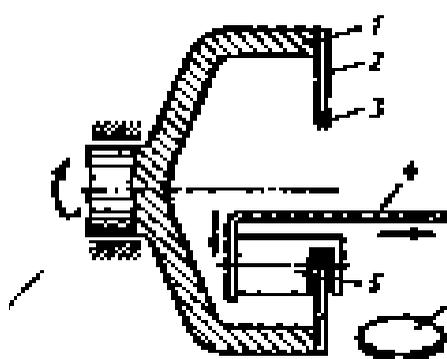
производительность, определяемая скоростью резания; глубина механически нарушенного слоя; выход полезного материала; возможность сбора и регенерации отходов полупроводниковых материала; возможность получения заготовок (кристаллов) различной конфигурации.

### **Резание слитков на пластины с использованием алмаза содержащих дисков.**

Алмазосодержащий диск представляет собой тонкий стальной диск, наружная или внутренняя крошка которого насыщена алмазосодержащей крошкой со средним размером зерна 20-40мкм. Насыщение крошка алмазом производят методом шаржирования или гальваническим методом, закрепляя алмазные зерна в наносимом слое никеля. Ширина алмазной крошки около 1,5-2мм, среднем на изготовление одного диска идет 0,2-0,5 карата алмазного порошка. Диски с наружной режущей крошкой имеют диаметр не более 50 мм при толщине 0,1-0,2 мм. Такие диски применяют для разрезания слитков небольшого диаметра (до 10 мм). Или для разрезания пластины на кристаллы. Алмазосодержащие

диски с внутренней режущей крошкой имеют диаметр отверстия до 50-60 мм и наружный диаметр 100-150 мм при толщине 0,1-0,15 мм. Эти диски позволяют резать слитки диаметром 30-60 мм. Резание происходит на больших оборотах (3000-5000 об/мин). При частотах вращения менее 3000 об/мин. Производительность процесса резки снижается, а при частотах выше 5000 об/мин. Возрастают вибрации станка, которые вызывают биение диска, что, в свою очередь, приводит к снижению чистоты обработки поверхности полупроводниковых пластин и резкому увеличению расхода полупроводникового материала. На процесс резания существенное влияние оказывает скорость подачи слитка (сила прижатия к алмазному диску). При малых скоростях подачи слитка производительность процесса резки слишком мала. С увеличением скорости подачи производительность повышается, а точность обработки снижается за счет прогибания алмазного диска. Отрезаемая пластина будет иметь искривленную поверхность. При малой толщине пластины это может привести к ее разлому в процессе резки. Поэтому для тонких (200 мкм) пластин скорость подачи 20 – 30 мм/мин., для толстых (400 мкм) 60 - 80 мм/мин. Более твердый материал (кремний) разрезают при меньших скоростях подачи, чем более мягкий (германий) материал.

При резке происходит выделение большого количества теплоты в месте соприкосновения алмазной кромки диска с поверхностью полупроводникового материала. Поэтому в течение всего процесса резки в область контакта диск – слиток непрерывно подают охлаждающую жидкость (3,5%-ный водный раствор кальцинированной соды), расход жидкости 2 – 4 л/мин. Резание слитков этим методом обеспечивает максимальную производительность, 7 – 8-й класс чистоты обработки, малый разброс по толщине пластин ( $\pm 20$  мкм).

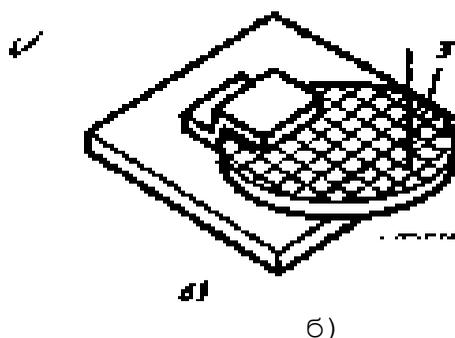
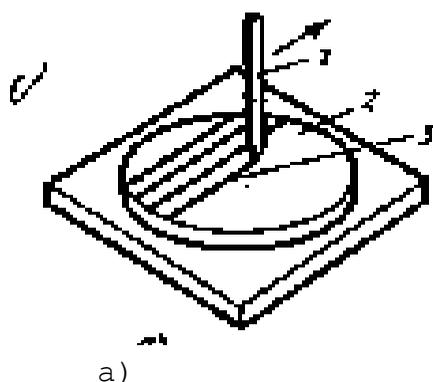


**Резка полупроводникового слитка с внутренней  
Режущей кромкой:**

1-шпиндель, 2- основа диска, 3- режущая кромка, 4-  
держатель слитка, 5,6- полупроводниковый слиток и  
пластина

**Скрайбирование пластины (а) и разламывание её  
на кристаллы (б):**

1-резец, 2- полупроводникова пластина, 3-риски



К недостаткам метода следует отнести большую толщину механически нарушенного слоя, обусловленный интенсивным воздействием алмазных зерен на поверхность пластины в процессе резания; сложность установки алмазного диска, его натяжение и центровка.

**Резание слитков и пластин стальными полотнами с абразивной  
суспензией.**

Стальные полотна толщиной 0,05-0,1 мм и шириной 5-10 мм изготавливают из термообработанных сталей марок ЮС2ХА, 65Г, У8А. Скорость резания полотнами слитков на пластин существенно ниже чем алмазными дисками. Главное преимущество метода: малая ширина реза и меньшая толщина механически нарушенного слоя (до 30мкм). При резании полотнами происходит одновременно шлифование поверхности пластин боковыми сторонами полотна. К недостаткам относится малый срок службы полотен вследствие их стирания и сложность их установки в кассету при обрыве полотна. И разрыв полотна в результате истирания

обычно приводит к поломке нескольких пластин.

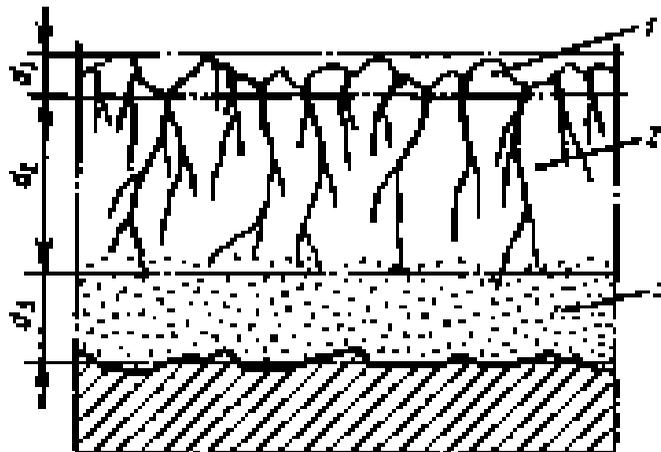
В основе метода резания проволокой с образивной суспензией лежит принцип предыдущего метода. Различие состояния только в геометрии носителя образива.

Преимущества метода резания проволокой состоит в еще меньше по сравнению с методом резания полотнами ширине реза и сравнительно высокой производительностью, обусловленной большой скоростью перемещения проволоки. Основной недостаток неровность резания на большую глубину из-за увода проволоки и нарушения размеров и геометрии пластин. В основном этот метод применяют при разделении пластин на кристаллы. В ряде случаев используют проволоку с нанесенным алмазным порошком, закрепленным связкой из эпоксидной смолы. Диаметр проволоки с покрытием приблизительно 0,15 мм.

При разрезании слитков на пластины слитки на стальные держатели закрепляют, приклеивая их. Для этого используют воск, парафин, шлак, пиццеин, глифталевые соли.

Скрайбирование- метод, сущность которого заключается в нанесении на поверхность пластины параллельных царапин (рисок), которые являются линиями концентрации механических напряжений, и в последующей ломке пластины на отдельные заготовки прямоугольной или квадратной формы. Риски наносят с помощью алмазного резца в форме 3-ех или 4-ех гранной усеченной пирамиды. Основными преимуществами этого метода является его высокая производительность и малая ширина реза, практически исключая потери материала. Вместе тем качество метода зависит от толщины пластины и ее отношения к размеру со стороны кристалла, от нагрузки на резец, формы его режущей крошки, скорости перемещения резца по пластине, угла его наклона к поверхности пластины, положения резки относительно выбранных кристаллографических направлений в плоскости пластины. Скрайбирование обычно производится на специальных установках

полуавтоматического типа. Установки снабжены шаговым двигателем, который обеспечивает измерения шага скрайбирования от 0,01-9,99 мм с интервалом 0,01 мм. Ломку, пластин после скрайбирования можно осуществить различными способами: валиком на мягкой подложке. Гибкой лентой на упругой стальной опоре, а также на сферической или цилиндрической опоре с помощью эластичной мембраны. Ломку пластин на мягкой подложке производят, прикладывая усилия последовательно 2х взаимно перпендикулярных направлениях. Во избежание смещения полосок и кристаллов в процессе ломки пластины со стороны скрайбирования покрывают нейтральным быстро высыхающим лаком. Усилия ломки прикладывают всегда со стороны, противоположной стороне скрайбирования. Получаемые результаты (кристаллы) в сечении имеют форму параллелограмма или трапеции в зависимости от ориентации поверхности исходной пластины.



**Структура наружного слоя:**

I, 2, 3 - рельефный, трещиноватый слой,

$d_1, d_2, d_3$ - толщина соответствующих слоёв

### Лекция №3

#### Ультразвуковая абразивная обработка.

Применяют в производстве для вырезания кристаллов сложной геометрической формы для профилирования поверхности пластин и кристаллов. Источник питания является ультразвуковой генератор, с выхода которого напряжение подается на обмотки вибратора выполненного в виде пакета тонких пластин, чаще всего из никеля. К торцу вибратора крепится акустический волновод (концентратор). Концентраторы изготавливают из материалов, в которых скорость звука велика чаще всего из углеродистых сталей марок Ст.45 и Ст.50. Качество поверхности после ультразвуковой обработки главным образом определяется размером зерен абразива и амплитудой колебаний инструмента чем меньше размер частиц абразива и амплитуда колебаний инструмента, тем выше качество поверхности. На производительность ультразвуковой обработки влияет целый ряд факторов мощность и частота генератора, к.п.д. вибратора, коэффициент трансформации концентратора, концентрация абразивной суспензии, вязкость жидкости, входящий в состав суспензии, тип и размер зерен абразива и т.д.

Электроэрозионная обработка включает в себя: электроискровую, электроимпульсную, электроконтактную и анодномеханическую. Электроэрозионная обработка в технологии полупроводников аналогично ультразвуковой, но точность воспроизведения профиля её качество обработки поверхности выше.

Лучевые способы обработки разделяются на 2 вида:

I. Обработка электронным лучом

II. Обработка лучом лазера.

При электронно-лучевой обработке поток электронов в вакууме, ускоренный мощным электрическим полем, фокусируется в узкий пучок, направленный на обрабатываемую поверхность. Кинетическая энергия

электронов преобразуется в тепловую, и материал разогревается до 6000-7000К. Важными преимуществами этой обработки является практическая независимость производительности, точность и качества обработки от свойств материала, отсутствие побочных загрязнений материала в процессе обработки, обусловленной применением вакуума.

В настоящее время в производстве лазерный луч применяют для разделения пластин на кристаллы (лазерное скрайбирование) для создания кристаллов и контактной сварки при вырезании заготовок различной формы из тонкого материала. Принцип заключается в тепловом воздействии света на непрозрачные среды. Этот процесс разделен на стадий поглощение света и передачи энергии тепловым колебаниям решетки твердого тела. Экспериментально установлено, что стадия разрушения в начале происходит за счёт испарения материала, в дальнейшем при образовании лунки, часть вещества удаляется в виде расплава основными параметрами, определяемыми обрабатываемость материала лазерным лучом, является полоса оптического поглощения материала и его теплофизическими, свойствами ( $t_{пл}$ ,  $t_{кип}$ ,  $C$ ,  $Q$ ). Преимуществом лазерной обработки перед предыдущими методами является возможность применения лазерного луча в любой среде.

Лазерный метод дает возможность получения резки с ровными чистыми краями, более глубокие резки без приложения усилия к материалу. Получается не только резки, но и полные разрезы без нарушения взаимной ориентации МС. Исключительно перспективно применение лазерного луча для скрайбирования пластин и химически нестабильных полупроводниковых соединений. Кратковременность взаимодействия луча с поверхностью пластины исключает возможность изменения структуры полупроводника и его состава вблизи зоны резания при высокой производительности и качестве обработки.

### **Шлифование и полирование пластин.**

Операции шлифования и полирования в технологии

полупроводниковых приборов выполняют для улучшения плоскостности и плоско параллельности пластин после резания, подгонки пластин в размер по толщине, получая требуемого класса чистоты поверхности и др.

Шлифование и полирование пластин осуществляют с применением абразивов. В качестве абразивных материалов используют: алмаз, карбид бора, карбид кремния.

Шлифование- обработка пластин на твердых шлифовальных дисках, выполненных из чугуна, стекла или латуни, абразивными микро порошками с крупностью зерен от 28 до 3 мкм или алмазными шлифовальными кругами зернистостью от 120 до 5 мкм. Шлифование полупроводников классифицируют:

По состоянию используемого абразива - свободным и связанным абразивом.

По характеру обработки - односторонние и двухсторонние

По качеству обработки поверхности - предварительно и окончательно

По способу базирования пластин - с наклейкой пластин на оправку, пластин со свободным положением, пластин в кассетах и сепараторах.

Наиболее распространенным видом - одностороннее шлифование свободным абразивом с наклейкой пластин на оправку. При шлифовании формируется нарушенный слой. Глубина слоя зависит от твердости и размера абразивных зерен Шлифование можно вести как сухим абразивом так и абразивной суспензией.

Полирование- производят на мягких подложках из ветра, велюра или батиста, пропитанных абразивными пастами на жировой основе с крупностью зерен абразива от 3 до 0,25 мкм. Механизм полирование рассматривается в рамках трех основных гипотез.

Согласно первой гипотезе, процесс полирования аналогичен шлифованию и рассматривается как супертонкое шлифование. Полирование происходит за счет снятия микро слоя с поверхности. Но нарушенный слой полностью не удаляется.

Вторая гипотеза носит название теории пластической текучести. То есть под действием образива наружный микрослой приобретает пластичность и способность к перемещению. В результате поверхность выравнивается.

Третья гипотеза использует химические процессы на поверхности обрабатываемого материала.

## **Лекция №4**

### **Химическая и электрохимическая обработка поверхности ПОЛУПРОВОДНИКОВ.**

В общем, виде задачи, решаемые с применением химической и электрохимической обработок, можно разбить на четыре группы:

1. Очистка и стабилизация поверхности
2. Профилирования поверхности
3. Контроль качества полупроводникового материала или р-п-перехода
4. Нанесение на поверхность полупроводника стабилизирующих, защитных или контактных покрытий.

К первой группе можно отнести:

1. Очистка поверхности от оксидных пленок и различного рода посторонних загрязнений, удаление механически нарушенного слоя.
2. Контролируемое удаление материала для получения пластины или кристалла необходимой толщины без механически нарушенного слоя (химическое профилирование).
3. Выявление дефектов кристаллической структуры: выходов дислокаций, границ блоков или зерен, границ р-п - переходов, преципитатов.
4. Химическое или электрохимическое осаждение металлических покрытий для создания контактов или контактной разводки приборов и

микросхем.

### **Кинетика процесса химического травления.**

В основном процесс травления можно представить в виде пяти стадий:

I. Перенос молекул (или ионов) травителя из объема раствора к поверхности полупроводника. В начальный момент после погружения пластины полупроводника в раствор вблизи ее поверхности за счет интенсивной реакции образуется слой б, обедненный молекулами травителя, что приводит к возникновению градиента концентрации травителя  $\text{grad}_x N$  и формированию диффузионного потока  $J_x$  этих молекул к поверхности полупроводника. Такой поток существует до установления равновесия, время наступления которого зависит от

- коэффициента диффузии компонентов травителя в растворе
- его вязкости
- температуры и некоторых других факторов

По истечении этого времени концентрация молекул травителя в объеме  $N_0$  и у поверхности полупроводника  $N_S$  выравниваются:  $N_S = N_0$

2.Адсорбция молекул травителя на поверхности полупроводника. В стадии адсорбции молекулы травителя вступают в контакт с поверхностью полупроводника. Этот контакт может быть либо химической адсорбцией (хемосорбцией) либо физической адсорбцией.

В первом случае между молекулами травителя и поверхностью полупроводника существуют силы кулоновского притяжения или обменного взаимодействия (ковалентной связи). Во втором случае молекулы травителя удерживаются на поверхности слабыми силами Ван-Дер-Вальса.

Соответственно энергия активации адсорбции при хемосорбции оказывается существенно выше, чем при физической адсорбции.

3.Кинетическая стадия процесса.

Это собственно химическое взаимодействия адсорбированных молекул

травителя с полупроводником: происходит разрыв химических связей между атомами расположенными в объеме, и поверхностными атомами полупроводника и удаления поверхностных атомов в раствор.

4. Десорбция продуктов реакции с поверхности полупроводника. В ходе кинетической стадии на поверхности полупроводника накапливаются продукты реакции, которые могут быть химически или физически связаны с поверхностью. Прежде чем перевести их в раствор, необходимо разорвать эти связи, в чем и состоит сущность десорбционной стадии.

5. Удаление продуктов реакции с поверхности полупроводника в объем раствора.

За счет химического взаимодействия полупроводника с травителем на расстоянии  $b$  накапливаются продукты взаимодействия –  $N'_0$ . На границе раздела полупроводник - раствор ( $x=0$ ) концентрация продуктов взаимодействия –  $N'_s$ .

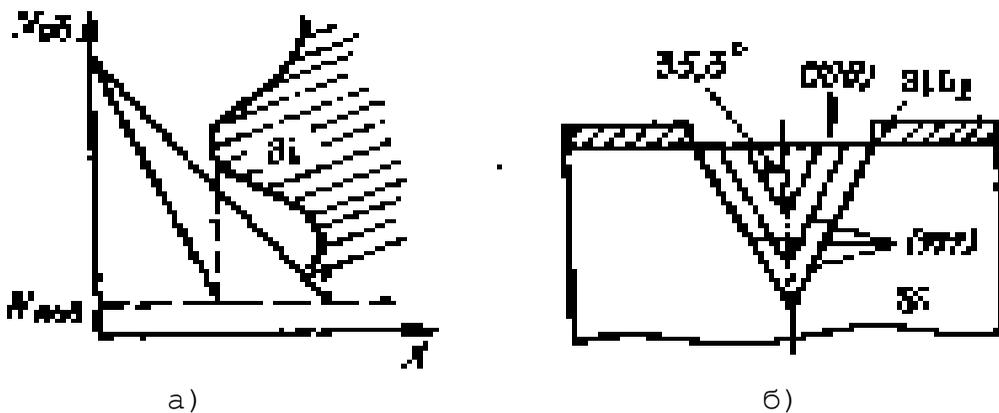
$N'_0 < N'_s$ : Градиент концентрации продуктов травления в растворе  $\text{grad}_x N'$  является причиной возникновения диффузионного потока молекул этих продуктов  $J'_x$ , направленного от поверхности полупроводника в объем раствора. Скорость процесса травления есть суммарная скорость этих 5 процессов травления:

Сорбционные стадии (2 и 4) процесса редко ограничивают скорость травления: В большинстве случаев скорость процесса травления ограничиваются в растворе либо скоростью диффузии компонентов травителя (1) или продуктов реакции (5) в растворе, либо скоростью поверхностной химической реакции (3). В зависимости от того, какая стадия процесса, диффузионная (1,5) или кинетическая (3), протекает наиболее медленно, и сам характер, и результаты процесса травления оказываются различными. Если наиболее медленно протекают диффузионные процессы, скорость процесса диффузии:

$V_E \approx V_d = A_d(N_0 - N_s)$  (1)  $A_d$ - коэффициент пропорциональности.  $N_0$ ,  $N_s$ - концентрация молекул травителя в объеме и вблизи поверхности полупроводника на границе с раствором.

Как видно (I), скорость процесса травления никак не связаны со свойствами поверхности полупроводника (в частности, с энергетическим барьером реакции) и, следовательно, травления в этом случае должно происходить изотропно, независимо от кристаллографического направления.

«Травители, характеризующиеся диффузионным контролем скорости травления, называются полирующими, а сам процесс травления – интегральным».



- а) – Градиент концентрации травителя вблизи впадин и выступов кремниевой поверхности  
 б) – Получение V-образных областей при локальном анизотропном травлении кремния

Полирующие свойства травителя улучшаются при увеличении его вязкости за счет добавки гликолей, глицерина, полиспиртов; уменьшение температуры раствора также приводит к большому выравниванию процесса за счет снижения скоростей диффузии компоненте травителя.

Интенсивное перемешивание раствора, наоборот разрушает диффузионный слой у поверхности полупроводниковой пластины и,

таким образом снимая диффузионные ограничения, ухудшает полирующие свойства травителя.

Рассмотрим случай, когда диффузионные процессы протекают настолько быстро, что не могут практически оказать влияния на суммарную скорость процесса травления. Здесь естественно предположить контроль процесса травления за счет кинетической стадии

$$(3), \text{ скорость которой } V_E \approx V_{TP} = A_{TP} N_s \exp\left[-\frac{\Delta E}{Kt}\right] \quad (2)$$

$A_{TP}$  - константа скорости поверхностной реакции

$N_s$  – концентрация молекул травителя вблизи поверхности

$\Delta E$  – энергетический барьер реакции.

Так как  $V_{TP} \approx f(\Delta E)$ , то  $V_{TP}$  должна быть различной для плоскостей кристалла с разной плотностью упаковки атомов и травления является анизотропным.

(Для алмазоподобных полупроводников с решеткой типа сфалерита? В основном наблюдается следующее соотношение скоростей травления:  $V_{[100]} > V_{[110]} > V_{[111]}$ ) для щелочных травителей и  $V_{[110]} > V_{[100]} > V_{[111]}$  для кислотных травителей.

Если на поверхности пластины имеются дефекты, например выходы дислокаций, то в этих местах за счет повешения энергии решетки барьер реакции снижен по сравнению с ненарушенной поверхностью и происходит локальное увеличение скорости травления. Дефектное место растравливаются с образованием фигуры (ямки) травления, форма которой определяется кристаллографической ориентацией поверхности пластины. В этом случае гладкую поверхность получить невозможно.

Травители с кинетическим контролем называются - дифференциальными а процесс травления - селективным.

Как следует из (2), характер селективного травления определяется в значительной степени температурой.

С ростом температуры селективность травителя менее выражается.

Поэтому для выявления картины дефектов поверхности желательно работать в холодных травителях.

Лучшими полирующими свойствами обладают травители с большим содержанием азотной кислоты.

Для уменьшения скорости травления к основным кислотам добавляют уксусную кислоту  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , которая замедляя окисление кремния и растворения анода облегчает управления процессом травления.

### **Получение деионизованной воды.**

При составлении травителей, электролитов и отмывке полупроводниковых пластин используют деионизованную воду.

Деионизованную воду обозначают двумя марками. Для получения воды марки Б вода должна пройти предварительную очистку дистилляцией и иметь удельное сопротивление не ниже 0,1 мОм см.

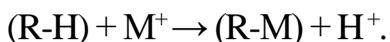
Для получения воды марки А предварительная очистка должна дать удельное сопротивление не ниже 0,2 мОм см.

Удельное сопротивление деионизованной воды при 20° С

марки А - 7 – 20 мОм см, марки Б – не менее 1 мОм см.

Собственное сопротивление воды при температуре 20° С составляет 24 мОм см.

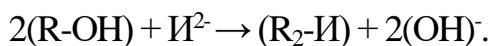
Для удаления неорганических примесей используют ионнообменных смол. Все неорганические примеси находятся в воде в виде ионов: катионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  или анионов  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и др. Существует два типа смол: катиониты (R-H)-связывающие катионы и аниониты (R-OH) связывающие анионы. Первоначально вода поступает в колонку с катионитовой смолой ( $\text{SO}_3\text{H}$ ), где происходит связывание положительно заряженных ионов металлов  $\text{M}^+$  ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) путем замещения ими протонов, входящих в состав смолы:



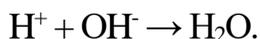
Если после этого процесса вода пройдет через вторую колонку, наполненную анионитовой смолой ( $\text{COOH}$ ), то произойдет связывание

отрицательно заряженных анионов ( $I^-$ ) хлоридов, сульфидов, бикарбонатов и т. д. путем замещения ими гидроксильной группы, входящей в состав анионитовой смолы.

Для двукратно отрицательно заряженных ионов  $I^{2-}$ :



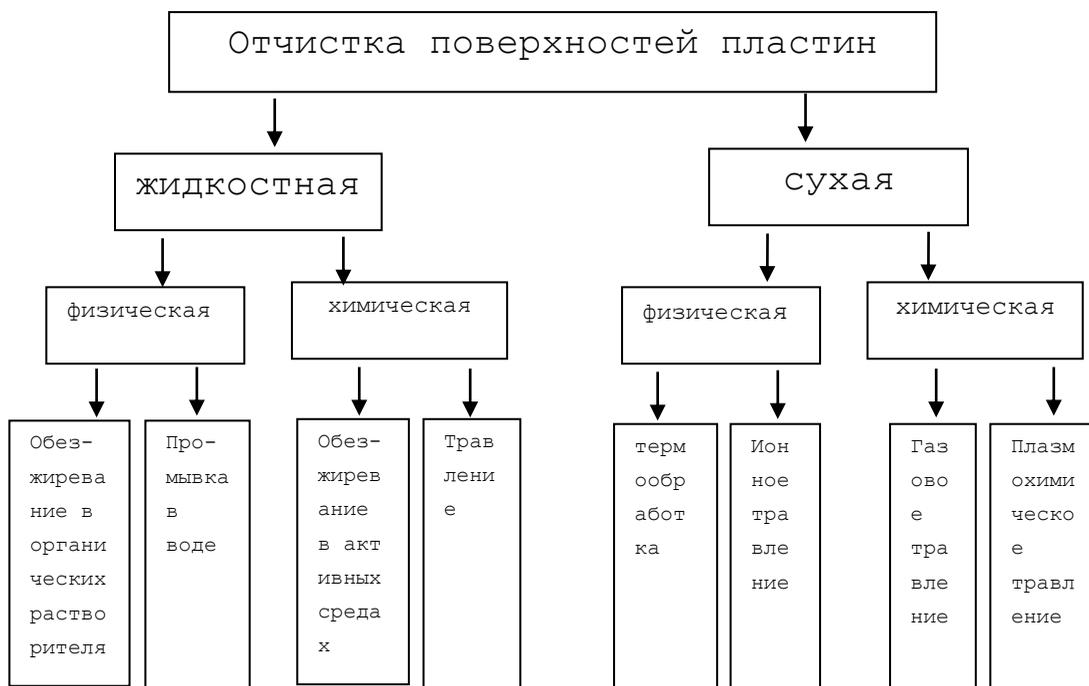
Протоны и гидроксильные группы соединяются в молекулу воды:



## Лекция №5

### Химическая обработка поверхности полупроводниковых пластин.

«Технологически чистой считается поверхность, на которой концентрация загрязнений не препятствует воспроизводимому получению заданных параметров приборов и интегральных схем (ИС) и их стабильности».



### Физические методы очистки:

- ультразвуковая
- смывание загрязнений потоком жидкости, щетками, кистями
- сдувание струёй газа (чистый азот)
- бомбардировка ионными электронными пучками
- обработка ионами в плазме
- обработка в вакууме или инертных средах при высокой температуре.

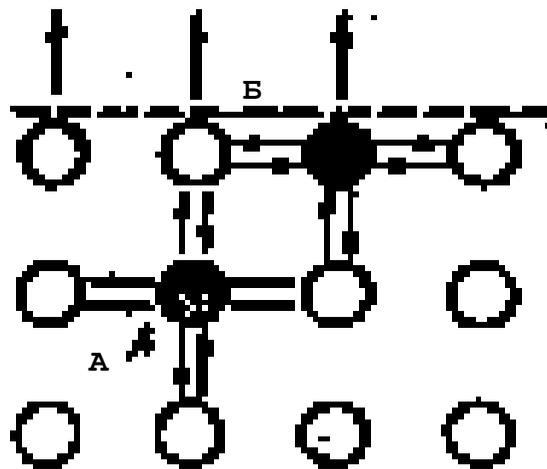


схема адсорбции

А-внутренний атом, Б- поверхностный атом

### Химические методы очистки:

- растворение загрязнений
- стравливание загрязнений вместе с тонкими приповерхностными слоями полупроводника.

### Физические загрязнения пластин.

Физические загрязнения, обусловленные физической адсорбцией, подразделяются на:

- неорганические (пыль различного происхождения, абразивные частицы).
- органические (жировые пленки, остатки ионнообменных смол из

промывочной воды, частицы фоторезиста, микроорганизмы размером от 1 до 20 мкм, частицы эпителия оператора и т.д.)

Физическая адсорбция загрязнений к поверхности полупроводникового материала происходит в результате межмолекулярного взаимодействия, вызываемого силами Ван-дер-Ваальса, а также электростатической поляризацией (кулоновского взаимодействия заряженных частиц) и является обратимым процессом.

Неорганические загрязнения удаляют гидромеханической очисткой или сдувают струей очищенного азота.

Органические загрязнения при термической обработке разлагаются с образованием атомов углерода, которые служат центрами дефектообразования. Органические загрязнения можно разделить на полярные и неполярные.

Полярные- жиры, белки, остатки поверхностно-активных веществ, молекулы которых, как правило, ориентированы на поверхности, и притягиваясь, способствует сокращению площади загрязнения.

Неполярные- минеральные масла, парафины, вазелины, молекулы которых имеют высокую поверхностную энергию и способны покрывать большие площади.

Нерастворимые в воде органические жировые загрязнения делают поверхность пластины гидрофобной, т.е. плохо смачиваемой водой. Для равномерной очистки поверхность необходимо перевести в гидрофильное, т.е. хорошо смачиваемое водой состояние. Удаление жировых загрязнений, сопровождаемое переводом поверхности из гидрофобного состояния в гидрофильное, называют обезжириванием растворителях или их парах. Сначала в неполярных или слабополярных растворителях (бензоле, толуоле, четыреххлористом углероде, некоторых фреонах) отмывают неполярные загрязнения, а затем - в спиртах, ацетоне, трихлорэтилене - полярные.

### **Химические загрязнения пластин.**

Химические загрязнения связаны с поверхностью полупроводникового материала силами химической адсорбции (хемосорбции). При хемосорбции образуются прочные ковалентные или ионные связи между атомами адсорбированного вещества и поверхности. Это необратимый процесс.

Химические загрязнения бывают ионными и атомными: - Ионными загрязнениями являются растворимые в воде соли, кислоты и основания, которые осаждаются на поверхности пластин из моющих и травильных растворов, полирующих суспензий, металлической основы режущих дисков, шлифовальных и полировальных. Атомные загрязнения осаждаются в виде микро зародышей из атомов Au, Ag (серебра), меди, железа, имеющихся в химических реактивах, и могут покрывать всю поверхность и даже образовывать микроскопические слои.

Химические загрязнения удаляют в кислотах, часто в смеси с сильными окислителями, комплексообразователях или поверхностно-активных веществах.

В первую очередь при очистке удаляют органические загрязнения и химически связанные с поверхностью пленки, а затем - ионные и атомные.

Основными источниками различных загрязнений являются абразивные и клеящие материалы, применяемые при механической обработке полупроводниковых пластин, пыль, находящаяся в воздухе производственных помещений; оборудование, оснастка, а также тара для транспортировки и хранения пластин; технологические среды; органические и неорганические реагенты; промывочная вода. Существенными источниками загрязнений являются одежда, эпителий, косметика, бактерии, вирусы и жировые отпечатки пальцев оператора.

Применяемые при очистке методы и составы должны быть инертны по отношению к обрабатываемому полупроводниковому материалу, минимально токсичными и пожара безопасными. Химические

реактивы, газы и вода должны иметь высокую степень чистоты, чтобы, в свою очередь, не вносить загрязнения. Оборудование, на котором выполняют очистку, должно конструироваться по принципу "бесконечного разбавления"(каскадные ванны, обработка в парах и др.).

### **Методы физического и химического обезжиривания.**

При физическом обезжиривании- растворении органических загрязнений в горячих или кипящих органических растворителях-молекулы жиров, отрываясь от поверхности пластин, равномерно распределяются в объеме растворителя. Одновременно происходит обратный процесс-адсорбция молекул жира очищенной поверхностью для снижения интенсивности которого используют каскадный метод отмывки.

Растворение загрязнений в органических растворителях весьма эффективный, однако, требует многократной очистки в растворителях и сопровождается их большими потерями, кроме того, некоторые из растворителей токсичны и огнеопасны.

Принцип «бесконечного разбавления» соблюдается и при очистке пластин, в парах растворителя. Пары кипящего растворителя конденсируются на очищенных поверхностях. Капли конденсата стекая с поверхности пластин, уносят загрязнения. При этом пластины непрерывно смываются свежим чистым конденсатом, а загрязненный стекает вниз. Такую очистку производят в парах изопропилового спирта, фреона-113 или хлорированных углеводородов. Наиболее эффективна очистка в фреоне-113- негорючий и нетоксичной жидкости, имеющей температуру кипения 47,6 °С и плотности 1,57 г/см<sup>2</sup>. В парах растворителей плохо удаляются мыла, растворимые масла, а также соединения, содержащие, воду. Недостаток этого метода очистки - значительные потери растворителя из-за испарения и необходимость высокой герметичности установок.

Химическое обезжиривание производят в составах, разрушающих молекулы жира и не действующих на обрабатываемый материал. Поэтому

в растворе отсутствуют молекул жира и исключается процесс их десорбции отчищенной поверхностью. Для химического обезжиривания используют горячий (75-80 °С) перекисно-аммиачный раствор, состоящий из водного раствора, перекиси водорода  $H_2O_2$  и гидроксида аммония  $NH_4OH$ . Атомарный кислород, выделяющийся при нагреве пергидроли, окисляет как органические, так и неорганические загрязнения, а щелочь ускоряет реакцию разложения  $H_2O_2$ , омыляет или эмульгирует жиры, а также связывает в хорошо растворимые комплексы ионы некоторых металлов.

Химическое обезжиривание по сравнению с физическим обезжириванием в органических растворителях менее токсично и трудоемко.

Очистку поверхности от атомов и ионов металлов, а также остатков плёнок оксидов, сульфидов, нитридов производят в кислотах. Удаление с помощью кислот ионов металлов основано на их вытеснении ионами водорода. При кислотной очистке следует тщательно соблюдать правила техники безопасности так как попадание кислот на кожу и в глаза вызывает ожоги.

## **Лекция №6**

### **Получение структур методом диффузии.**

Диффузия легирующих примесей в полупроводниковые кристаллы вошла в промышленное производство в 60-е годы и до сих пор является основным технологическим методом создания структур при изготовлении различных типов полупроводниковых приборов и ИС.

Отличительные особенности диффузии в планарной технологии состоят в том, что примесь вводят в полупроводниковую пластину локально в ограниченные защитной маской окна, а сам процесс

осуществляют в две стадии:

- предварительная загонка нужного количества примеси
- последующая разгонка на требуемую глубину и до необходимого уровня концентрации.

### **Распределение примеси при диффузии.**

В полупроводниковой технологии наибольший интерес представляют два случая распределения примесных атомов.

1. Если диффузия идет из источника с ограниченным содержанием примеси, находящейся в начальный момент в бесконечно тонком поверхностном слое, то профиль распределения концентрации имеет вид:

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (1)$$

где  $Q$ - плотность атомов примеси под единицей площадей поверхности, неизменная в любой момент диффузии, атом/см<sup>2</sup>.

$x$ - глубина, соответствующая данной концентрации, см.

$D$ - коэффициент диффузии примеси, см<sup>2</sup>/сек.

$t$ - длительность диффузии, сек.

На глубине  $x_{p-n}$   $C(x, t) = C_B$ . Концентрация  $C(x, t)$  на тонком **приповерхностном слое, то есть при  $x=0$  из формулы (1) равна  $C_0 = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}$**

Глубина залегания диффузионного p-n-перехода:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} * \sqrt{\ln \frac{C_0}{C_B}} \quad (2)$$

Где  $C_B$ - концентрация примеси в исходной пластине полупроводника.

При  $x=0$  поверхностная концентрация примеси:  $C_0 = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}$  (3)

Для многих практических случаев глубина p-n-перехода:  $x_j \approx 6\sqrt{Dt}$  (4)

2. Если диффузия идет из источника с постоянной поверхностной концентрацией примесных атомов  $C_0$ , то распределение имеет вид::

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (5)$$

### **Диффузия в планарной технологии.**

В планарной технологии диффузию проводят в две стадии, что особенно важно, если требуется получить хорошо контролируемую низкую поверхностную концентрацию. В начале осуществляют короткую диффузию из источника с постоянной поверхностной концентрацией - загонку (по формулу 5), Поверхностная концентрация ( $C_0$ ) при этом определяется либо предельной растворимостью примеси, либо содержанием примеси в источнике диффузанта. Затем пластины вынимают из печи и удаляют стеклообразный слой, большей частью, образующийся на поверхности кремния при загонке в окисляющей атмосфере и имеющий состав, близкий к составу боросиликатных или фосфорно-силикатных стекол.

Чистых пластин помещают в чистую печь для проведения второй стадии диффузии - разгонки, осуществляемой при более высокой температуре, так что  $D_2 \cdot t_2 \gg D_1 \cdot t_1$ .

Тонкий диффузионный слой, сформированный на первой стадии диффузии, является источником с ограниченным количеством примеси.

Планарные р-п-переходы имеют существенное отличие от простых плоскостных переходов, связанное с их геометрической конфигурацией.

В планарной технологии р-п-переход создают диффузией примеси в объем полупроводника через окно в защитном слое. Примесь при этом диффундирует не только в глубину, но и вдоль поверхности под защитную маску, чем достигается пассивация границы р-п-перехода, выходящей на поверхности пластины.

Образующийся р-п-переход состоит из плоской части и краевых областей, имеющих приблизительно цилиндрическую форму. Так как в защитной маске имеются углы, то форма перехода вблизи углов близка к

сферической.

Если р-п-переход получен диффузией через окно, имеющее конфигурацию узкой щели, ширина которой близка к глубине диффузии, то переход имеет форму полуцилиндра. Переход: созданной диффузией через - круглое окно, имеет форму полусферы, если радиус окна равен глубине перехода или меньше ее.

Вследствие малой глубины залегания планарных р-п - переходов, обычно не превышающей 10 мкм, они обладают большей кривизной под краем защитной маски, что вызывает стягивание линий тока, локальное возрастание электрического поля и уменьшение напряжения лавинного пробоя. Например, при концентрации  $C_B=10^{15}$  см<sup>-3</sup> напряжение пробоя плоского кремниевого перехода составляет 330 В, цилиндрического перехода с радиусом кривизны 1 мкм – 80 В, а сферического перехода такой же кривизны – 40 В. Еще одна особенность получения диффузионных р-п-переходов планарной технологии связана с наличием нескольких операций оксидирования, проводимых после операций диффузии.

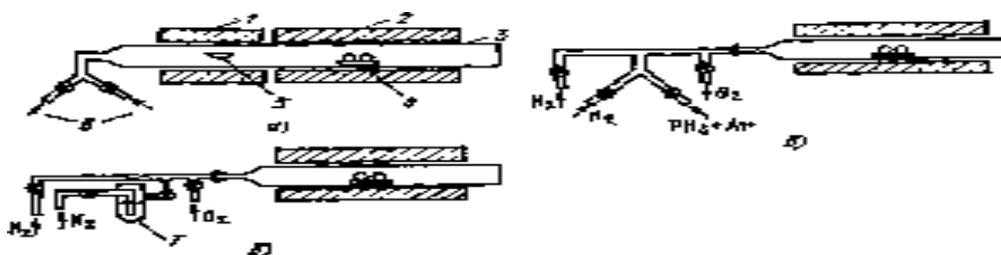
Вследствие различной растворимости диффундирующей примеси в кремнии Si и в образующемся диоксиде кремния SiO<sub>2</sub> происходит заметное перераспределение концентрации примеси на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>.

Растворимость В и Al в SiO<sub>2</sub> больше, чем в кремнии, поэтому поверхность кремния объединяется бором и алюминием, тогда как растворимость P, Sb и As выше в кремнии, чем в диоксиде кремния и поверхность кремния обогащен атомами этих элементов. Наличие обеднённых или обогащённых примесями слоёв кремния приводит к изменению электрических свойств диффузионных структур и прежде всего напряжение пробоя.

### **Практические способы проведения диффузии**

С тех пор, как метод диффузионного введения примесей в

полупроводник был впервые использован для создания р - п-переходов, и до настоящего времени идет постоянное его совершенствование. Оно направлено на повышение воспроизводимости основных параметров диффузионных слоев - поверхностной концентрации примеси и толщины, на расширение диапазона их регулирования, а также на общее снижение стоимости проводимых процессов. Поэтому к настоящему времени разработано уже достаточно большое число различных способов проведения диффузии. Здесь будет рассмотрен тот процесс диффузии донорных и акцепторных примесей в кремнии, который нашел наибольшее распространение в планарной технологии. Таким процессом является диффузия в потоке газа-носителя (диффузия по способу открытой трубы). При этом в качестве источников диффузانتов могут использоваться твердые, жидкие и газообразные вещества. Схемы установок для диффузии в потоке газа-носителя для твердых, жидких и газообразных источников примеси представлены на рис.



Схемы установок для диффузии в потоке газа-носителя для твердых

**(а), жидких (б) и газообразных (в) источников примеси:**

1, 2 — трубчатые печи; 3— кварцевая труба; 4— пластина кремния;

5— твердый

Различие в окрашивании может происходить либо из-за различной скорости химической реакции, либо вследствие осаждения металлов только на одну из областей р-п-перехода. Последнее обусловлено разницей электрохимических потенциалов полупроводника различного типа проводимости. Химическим окрашиванием можно установить

расположение не только р-п-переходов, но и  $n^+n$ - и  $p^+p$ - переходов.

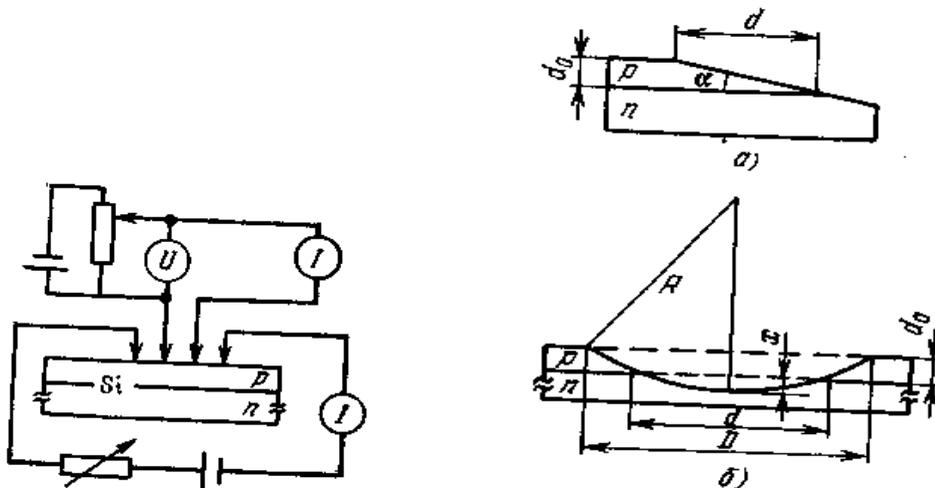


Рис.1. Схема измерения удельного сопротивления слоя четырехзондовым методом.

Рис.2. Поперечные сечения пластин с косым (а) и шаровым (б) шлифами.

Изготовление шлифов под небольшими углами ( $1-5^\circ$ ) позволяет расширить исследуемую диффузионную область. Поперечные сечения образцов с косым и шаровым шлифами представлены на рис.2. Глубина расположения р-п-перехода при изготовлении косого шлифа под углом  $\alpha$  и шарового (при  $2R \gg x$  и  $2R \gg d_0$ , рис.2, б) равна

$$d_0 = dtg\alpha; d_0 = \frac{D^2 - d^2}{4} \frac{1}{2R} = \frac{l^2}{2R}.$$

Наиболее распространенным окрашивателем является травитель, состоящий из концентрированной плавиковой кислоты HF с добавлением 0,1%  $HNO_3$ . При нанесении этого травителя на шлиф области р-типа темнеют, цвет п-областей остается неизменным. В качестве травителя может использоваться и чистая HF, но в этом случае шлиф необходимо интенсивно освещать.

Для определения поверхностной концентрации диффузионного слоя измеряют четырехзондовым методом удельное сопротивление слоя  $R_s$  и глубину залегания р-п-перехода  $d_0$ , что позволяет определить усредненную удельную проводимость, а зная ее, рассчитать поверхностную концентрацию

$$\frac{1}{R_8 d_0} = \frac{1}{d_0} \int_0^{d_0} q \mu(N) [N(x) - N_0] dx.$$

## Лекция №7

### Получение структур методом ионной имплантации

Создание биполярных и металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) сверхбольших интегральных схем СБИС с хорошими технико-экономическими характеристиками невозможно без использование метода ионной имплантации, освоенного промышленностью в 70-е годы. Пучок «+» заряженных примесных ионов в ионно-лучевом ускорителе бомбардирует кристалл полупроводника. Проникав в кристалл примесь легирует его и одновременно вызывает образование радиационных нарушений. При малых дозах облучение радиационные нарушения не изменяют кристаллической структуры полупроводника тогда как большие дозы облучение примесными атомами ведут к аморфизации кристалла. Для устранения нарушений и электрической активации внедрённой примеси необходим отжиг кристалла.

Наиболее широкое распространение ионная имплантация получила в технологии загонки строго дозированного количества примесных атомов, которое используется в качестве источника при последующей диффузионной разгонке для формирования примесного профиля. Так же, ионная имплантация используется для создания тонких базовых областей биполярных транзисторов, управления пороговыми напряжениями МДП-транзисторов и других целей.

Обычно энергия ускоренных ионов бывает в пределах 10-1000 кэВ.

Ускоренные ионы проникают в решетку, преодолевая отталкивающее противодействие «+» зарядов ядер атомов. Легкие ионы проникают более глубоко чем тяжёлые, однако траектория движения тяжёлых ионов более прямолинейна. При точной ориентации направления

падение пучка ионов вдоль одной из кристаллографических осей-[110] или [111] часть ионов движется вдоль атомных рядов, между которыми имеются достаточно широкие каналы, свободные от атомов. Это явление называется каналирование.

Если энергия, переданная атому решетки превышает энергию связи атомов в твердом теле, то атом покидает узел. В результате образуется вакансия и между узловый атом (дефект Френкеля). Атомы находящиеся в поверхностном слое, получив энергию от иона, могут отрываться от кристалла - происходит процесс распыления и образуется вакансия (дефект по Шоттки). Если энергия первично смещенного атома, называемой атомом отдачи, сравнительно велика, по этому пути своего движения атом отдачи образует целый каскад смещений, вследствие чего в кристалле возникают отдельные разупорядоченные зоны размером 3-10 нм. В процессе отжига происходит распад и аннигиляция радиационных дефектов, а внедренные примеси занимают вакантные узлы, в результате чего образуется слой с электропроводностью р- или п- типа.

Траектории отдельных ионов в кристалле подобны ломаным линиям, каждый прямолинейный участок ( $aa'$ ,  $a'b'$ ,  $bb'$ ,  $b'c'$ ) и полная длина ( $ac$ ) который отличаются друг от друга ( $ac < kd$ ).

Вся совокупность пробегов отдельных ионов ( $B_1^+$ ,  $B_2^+$ , ...  $B_n^+$ ) группируется по закону нормального распределения случайной величины со значением СРЕДНЕГО полного пробега  $R$  и СРЕДНЕКАДРАТИЧНЫМ отклонением пробега  $\Delta R$ .

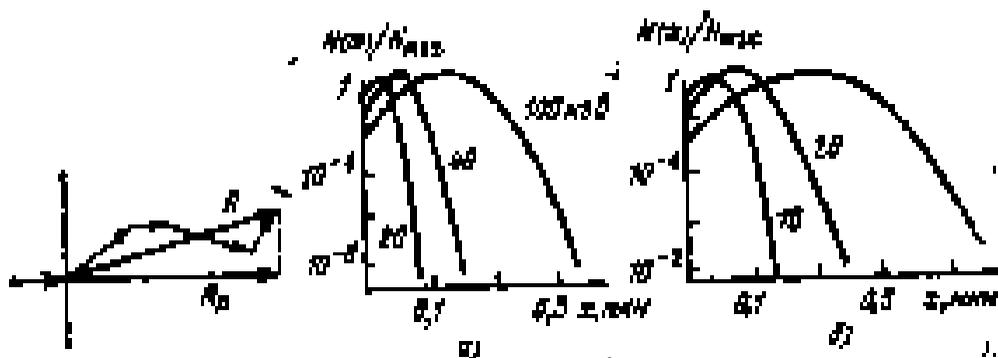


Схема для иллюстрации понятия проекции пробега	Распределение фосфора (а) и бора (б) при ионном внедрении
--	---

Практическую важность имеет проекция траектории среднего полного пробега на направлении первоначальной скорости иона средний нормальный пробег  $R_p$  и его среднеквадратичное отклонение  $\Delta R_p$ .

Если ионный пучок падает на произвольно ориентированную поверхность пластины относительно кристаллографических направлений с малыми индексами профиль распределения внедренных атомов описывается, как и для аморфных веществ, кривой Гаусса:

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p}\right)^2\right]$$

Максимум концентрации примеси в отличие от случая введение ее методом диффузии залегает не на поверхности, а на глубине  $x=R_p$ :

$$C_{\text{max}} = \frac{0,4N}{\Delta R_p}$$

## Лекция №8

### Принцип действия и конструкция ионно-лучевого ускорителя.

Ионно-лучевой ускоритель (ИЛУ) состоит из:

-Источника ионов (ИИ),

- Источника высокого напряжения,
- Ускорительной трубки,
- Магнитного сепаратора,
- Системы фокусировки и сканирования пучка ионов,
- Приемной камеры,
- Вакуумной системы откачки.

1. Источник ионов предназначен для ионизации паров рабочего вещества и первичной фокусировки ионного пучка. Он представляет собой газоразрядную камеру, при поступлении газа или паров рабочего вещества в которой происходит ионизация молекул и атомов путём бомбардировки электронами, эмитируемыми термокатодом. Поперечное магнитное поле в разрядной камере, создаваемое системой магнитного сепаратора, вызывает вращения двигающихся в нём электронов со спиралями, что увеличивает эффективность ионизации. В ионно-лучевых ускорителях типа “Везувий” предусмотрены два источника ионов: для фосфора  $U_{\text{ф}}$  и для бора  $U_{\text{б}}$ . Они различаются способом подачи вещества. В источник ионов бора поступает газ трехфтористый бор  $\text{BF}_3$  из баллона с микронатекателем (МН). Расход газа контролируется автоматически. В источник ионов фосфора подают пары фосфора, образующиеся в испарителе с нагревателем Н, в который загружают порошок красного фосфора. В процессе имплантации функционирует только один из источников ионов. Положительные ионы вытягиваются из разрядной камеры небольшим ускоряющим напряжением первой, ступени- до 20 кВ, подаваемым на вытягивающий электрод (ВЭ). Нормирование ионного пучка производят с помощью магнитного сепаратора (МС) и системы фокусировки и сканирования (ФС). Магнитный сепаратор предназначен для разделения пучка ионов в соответствии с их зарядом и массой, так как под действием силы Лоренца ( $F_{\text{л}}$ ) в области магнитного поля сепаратора ионы движутся по круговым траекториям, радиусы которых зависят от их массы  $M_1$ , ускоряющего напряжения  $U$  и магнитной индукции  $B$ :

$r = \sqrt{\frac{2M_1U}{qB^2}}$ , где  $q$ - заряд иона. Система фокусировки и сканирование формирует ионный пучок и осуществляет его сканирование в вертикальной плоскости. В систему входит электростатическая фокусирующая линза и два электрода электростатического сканирования. Между системой ФС (фокусировка- сканирования) и ускоряющей трубкой УТ находится заслонка 3 для автоматического перекрытия ионного пучка при наборе заданной дозы.

Ускорительная трубка состоит из последовательности изолированных электродов, между каждым из которых от источника напряжения ИИ прикладывается напряжения до 20 кВ так что крайние электроды имеют  $U=200$  кВ.

Приемная камера ПК служит для загрузки пластин, которые размещаются на кассете барабанного типа Б в несколько рядов.

Вакуумная система обеспечивает разряжение  $2 \cdot 10^{-3}$  Па. Перед кассетой стоит прямоугольная диафрагма Д, которая задает высоту и ширину облучаемой области.

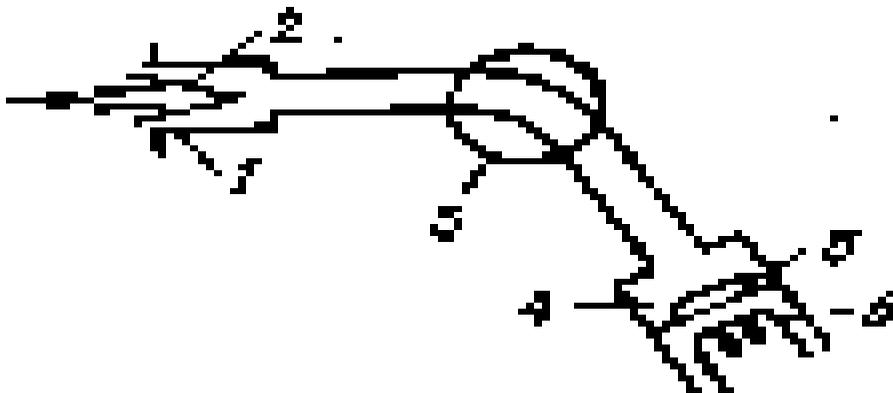


Схема установки для ионного внедрения:

- 1-камера источника примеси
- 2-термокатод
- 3- магнитный масс-анализатор
- 4-камера мишени
- 5- пластина мишени

б- спираль нагрева мишени

Источники ионов. Рабочие вещества для получения ионов могут находиться в газообразном, твёрдом и жидком состоянии.

Для получения ионов  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $Ne^+$ ,  $Ar^+$ ,  $F^+$ ,  $Cl^+$ , и т.п. используют соответствующий газ. А также газообразные вещества используются для получения ионов:

$BF_3$  для ионов  $B^+$

$CO_2$  для ионов  $C^+$

$H_2S$  для ионов  $S^+$

Широко применяются жидкие вещества:  $BCL_3$ ,  $BBr_3$ ,  $PCL_3$ ,  $CCl_4$ ,  $SiCL_4$ . Хорошо испаряющиеся при  $T=300K$ .

Наибольшие ионные токи обычно достигаются при употреблении твёрдых материалов в элементарном виде. Эти вещества требуют нагрева, чтобы получить достаточное давление паров:

$S$  и  $P$  (красный)  $\rightarrow 175^\circ C$

$As \rightarrow 266^\circ C$

$Zn, Se, Te \rightarrow 550^\circ C$

$Mg$  и  $Sb \rightarrow 580^\circ C$

Основные требования к источникам- большое парциальное содержание легирующего элемента в парах.

Вследствие выделения изотопной линии легирующего элемента в анализаторе масс в отличие от других методов легирования полупроводников к рабочим веществам не предъявляют жестких требований по чистоте. Основными параметрами режима ионной имплантации являются:

- энергия ускоренных ионов

- доза облучения.

1. Ион с зарядом  $q$  (кулон) под действием разности потенциалов  $U$  (вольт) приобретает энергию  $E$  (джоуль):  $E = qU$  или в килоэлектронвольтах (КЭВ).

2. Доза облучения- это количество частиц, бомбардирующих единицу поверхности за данное время. Доза облучения  $Q$  (Кл/м<sup>2</sup>) определяется

$$Q = j \cdot t \quad \text{отсюда найдём единицу измерений для } Q:$$

$$[(\text{мкА}/\text{см}^2) \text{ сек}] = [(\text{мкКл}/\text{сек}) (\text{сек}/\text{см}^2)] = [\text{мкКл}/\text{см}^2].$$

Чтобы выразить дозу облучения  $Q$  (Кл/м<sup>2</sup>) в количестве частиц, внедрённых на единицу поверхности (ион/м<sup>2</sup>), величину  $Q$  делят на заряд одного иона:

$$N = Q/q = j \cdot t / e \cdot k,$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}, k = 1 - 3 \text{ кратность заряда.}$$

$$N = Q/e \cdot k = 6,25 \cdot 10^{12} Q/k,$$

$$[\text{Кл}/\text{см}^2 \cdot \text{Кл}] = \text{ион}/\text{см}^2.$$

## Лекция №9

### Фотолиитография

Сущность процесса фотолиитографии заключается в следующем. На поверхность пластины наносят тонкий слой фото чувствительного лака-фоторезиста. После подсушки на пластину помещают фотошаблон - стеклянную фотопластинку с предварительно нанесенным по ней рисунком, который необходимо "перевести" на пластину. Освещение пластины с фоторезистом через фотошаблон приводит к задубливанию открытых участков фоторезиста, остальная часть фоторезиста легко смывается в соответствующих растворителях. Через образовавшиеся в фоторезисте окна производят химическую обработку (травление) незащищенных участков поверхности пластины полупроводника или пленок, нанесенных на нее.

### **Фоторезисты (ФР)**

Фоторезистами называют светочувствительные вещества, устойчивые к воздействию кислотных и щелочных травителей.

Актинорезисты (или резисты) представляют собой материалы, чувствительные к излучению определённой длины волны (актиничному излучению), и стойкие (резист-сопротивляются) к технологическим воздействиям, применяемые в процессе литографии. Под действием излучения происходящие в резистах процессы необратимо меняют их стойкость к специальным составам проявителя.

Резисты, растворимость которых в проявителе увеличивается после облучения, называют позитивными. Негативный резист после облучения становится практически не растворимыми в проявителе.

По способу образования рисунка на поверхности полупроводниковой пластины фоторезисты подразделяются на две основные группы: негативные и позитивные.

Негативные фоторезисты под действиям света образуют нерастворимые участки рисунка на поверхности пластины и после проявления остаются на ее поверхности. Рисунок фоторезиста на поверхности пластины представляет собой негативное изображение оригинала фотошаблона (ФШ). Позитивные фоторезисторы, наоборот, под действием света образуют растворимые участки, в этом случае рисунок оригинала в точности повторяется на поверхности пластины.

В качестве негативного фоторезиста в полупроводниковой технологии применяет составы на основе сложного эфира поливинилового спирта и коричной кислоты. Эти составы называют поливинилциннаматами (ПВЦ). Максимальная светочувствительность фоторезиста ПВЦ лежит в ультрафиолетовой области спектра (260 – 320 нм). Разрешающая способность негативных фоторезистов 100 – 300 лин/мм при толщине слоя от 0,3 до 0,5 мкм. Современные негативные фоторезисты обеспечивают формирование микроизображений с шириной линий 2 – 3 мкм. Готовый фоторезист ПВЦ представляет собой порошок белого или желтоватого цвета, растворяющийся в органических составах - растворах толуола с хлорбензолом, ацетата этиленгликоля с метаксилолом.

Проявителями для этих фоторезистов служит трихлорэтилен или его смесь с изопропиловым спиртом.

Кислотостойкость слоев фоторезиста ПВЦ по отношению к применяемым в полупроводниковой технологии травителям на основе HF и HNO<sub>3</sub> не очень высока.

На кремнии с защитным слоем фоторезиста ПВЦ толщиной 0,5 мкм удается выправить рельеф на глубину не более 10 мкм, а на германии - 40 мкм. Наибольшее применения фоторезист ПВЦ находит в планарной технологии для защиты диоксида кремния SiO<sub>2</sub> от травителя.

В качестве позитивного фоторезиста (ФР) используют смеси состоящие из сульфозэфиров нафтохинондиазидов (НХД) с фенолформальдегидными смолами в органических растворителях. Светочувствительной основой такого фоторезиста является НХД, а смола играет роль кислотостойкого полимера. При экспонировании в результате фотохимических реакций фотолиза гидрофобные производные НХД разрушаются и становятся гидрофильными, приобретая способность растворяться в слабых водных растворах щелочей, которые и являются проявителем для позитивных фоторезистов.

Растворителями служат спирты, кетоны, ароматические углеводороды, диоксан, ксилол или их смеси. Нередко используют смеси из нескольких растворителей с различными значениями упругости паров. Это в значительной мере улучшает процесс пленкообразования, снижает количество пор и напряжения в пленке. Ультрафиолетовое поглощение фоторезиста на основе нафтохинондиазидов (НХД) 250 – 450 нм, т.е. по сравнению с фоторезистом ПВЦ несколько сдвинуто в сторону длинных волн. Разрешающая способность их выше, чем негативных фоторезистов (500 – 600 лин/мм при толщине слоя фоторезиста 1 мкм), что позволяет формировать микроизображения с шириной линий 1 – 2 мкм. Позитивные фоторезисты обладают высокой кислотостойкостью; выдерживают действие концентрированных плавиковой и азотной кислот.

Для определения применимости фоторезистов в технологии изготовления полупроводниковых приборов используют при основных критериях: чувствительность, разрешающая способность и кислотостойкость. Критерием чувствительности для негативных фоторезистов является образование после экспонирования и проявления локальных участков задубленных или поляризованных областей пленки. Для позитивных фоторезистов полнота разрушенного локального участка пленки. Таким образом, критерием чувствительности служит четкость изображения, полученного в пленке фоторезиста после экспонирования и проявления. Для получения четкого изображения необходимо, чтобы пленка фоторезиста имела резка очерченную границу между областями вымытого и оставшегося на поверхности пластины фоторезиста.

Существует зависимость между толщиной пленки фоторезиста и экспозицией. При малых экспозициях (недодержках) свойства пленки фоторезиста ухудшаются. При больших экспозициях (передержках) качество края изображения ухудшается за счет рассеяния света на границах непрозрачных участков фотошаблона.

Разрешающая способность фоторезиста определяется числом линий равной толщины, которые могут быть получены (без слияния) на 1мм поверхности пластины в результате проведения процесса фотолитографии.

Для получения изображений элементов размером 5-10 мкм необходимо выбирать фоторезист с разрешающей способностью не менее 500 - 1000 линий на 1мм.

На величину разрешающей способности может оказывать влияние толщина исходной пленки фоторезиста. Обычно используют пленку фоторезиста толщиной 0,5 - 1 мкм.

Для определения разрешающей способности фоторезиста применяют штриховое миры. Миры представляет собой стеклянную пластинку с нанесенными на нее штрихами, ширина которых изменяется

от одного до нескольких десятков микрон. Определение разрешающей способности фоторезиста производится путем экспонирования его через мишу и подсчета числа задубленных линий, приходящихся на 1 мм поверхности пластины.

### **Кислотостойкость фоторезиста.**

Некислотостойкость фоторезиста определяют по следующим признакам: частичное разрушение пленки, отслаивание пленки от подложки, локальное подтравливание пленки на границе микроизображения. Первые два вида нарушения пленки фоторезиста при химической обработке свидетельствуют о полной его неприменимости для изготовления полупроводниковых приборов и могут служить критериями забраковывания всей партии приготовленного фоторезиста. Два других вида допустимы в определенных пределах. Критерием кислотостойкости фоторезиста в этом случае может служить величина краевого и локального растравливания. Степень локального растравливания и пористости слоя фоторезиста выявляют микроскопическим анализом:

измерением величины стравливания края изображения.

## **Лекция №10**

### **Фотошаблоны и способы их получения.**

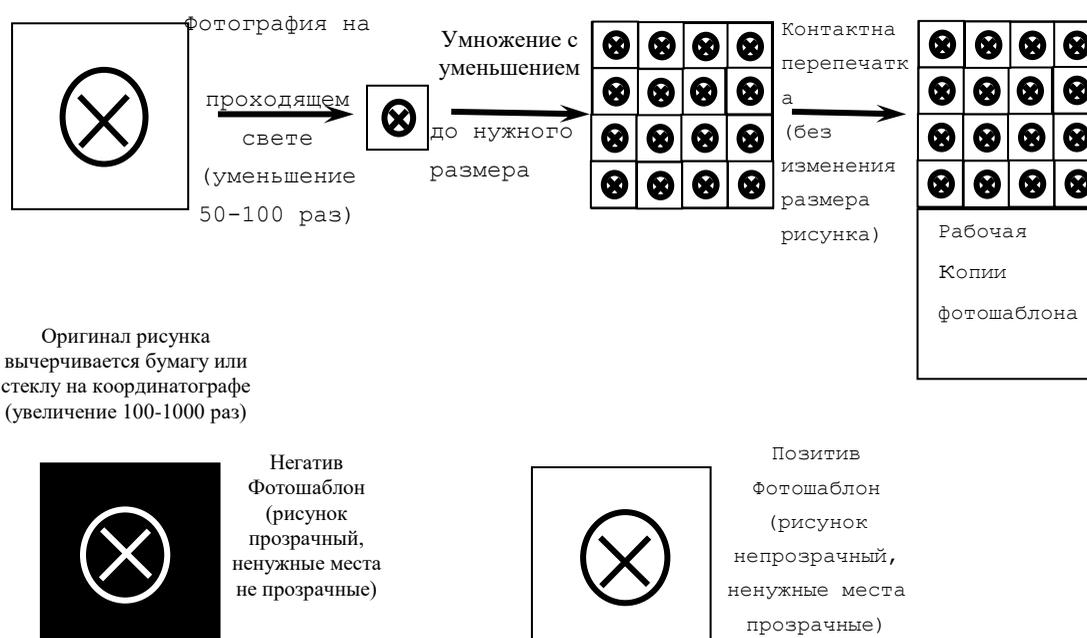
Фотошаблоны (ФС) являются основными инструментами фотолитографии, с их помощью производится локальное облучение (освещение) фотослоя (фоторезиста нанесённого на полупроводниковую пластину) в соответствии с топологией микросхемы.

Фотошаблон для изготовления структур микросхем - плоскопараллельная пластина (или гибкая плёнка) из прозрачного для ультрафиолетового излучения материала с нанесённым на её рабочую поверхность непрозрачным плёночным рисунком, соответствующим

топологии одного из слоёв структуры микросхемы и многократно повторенным со строго определённым шагом в пределах рабочей области пластины (или плёнки). Для основы фотошаблона применяют оптическое боросиликатное стекло или полимерные плёнки, которые хорошо обрабатываются и не изменяют свойств под действием излучения.

Для выполнения рисунка применяют галоидно-серебряную фотографическую эмульсию (эмульсионные фотошаблоны), металлы (металлизированные фотошаблоны) и полупрозрачные для видимого света оксиды или другие материалы (транспарентные, цветные фотошаблоны)).

Частое прижатие фотошаблона к полупроводниковой пластине приводит к его истиранию. Эмульсионные фотошаблоны выдерживают около 20 операций контактной печати, а металлизированные фотошаблоны до 500.



Фотошаблоны могут быть прямыми и обратными в зависимости от того, повторяет рисунок на фотошаблоне оригинал или является его негативным отображением.

**Существует несколько способов изготовления фотошаблонов.**

Оптико - механический способ создания фотошаблона начинают с вычерчивания увеличенного оригинала изображения. Вычерчивание производят на стекле, покрытом непрозрачным лаком. Резцом из алмаза или карбида вольфрама обводят контур оригинала изображения, и лишнюю пленку лака удаляют пинцетом. Вокруг оригинала обычно вычерчивают прямоугольную или квадратную рамку, ограничивающую область, которая принадлежит одному структурному элементу и является базой для расположения микроизображений.

Оригинал изображения фотографируют на фотопластинку с уменьшением в 50-100 раз в проходящем свете для повышения контрастности. Полученный фотооригинал помещают в проекционный автоматический Фотоштамп, где производится экспонирование изображения на фотошаблон с уменьшением до окончательных размеров и мультипликация (размножение) рисунка.

Столик фотошампа, на котором расположен будущий фотошаблон перемещается в двух направлениях с заданным шагом с точностью до 1мкм. При этом рамки, частично перекрываются, образуя прямоугольную сетку, облегчающую процесс совмещения фотошаблонов. Заключительной операцией технологического процесса изготовления фотошаблона является создание рабочих копий. Эту операцию осуществляют путем контактной перепечатки. Количество копий, которые можно снять с первого образца не превышает 20-30.

Для улучшения стойкости фотошаблона к истиранию изготавливают с эмульсионных эталонов металлизированных копий, нанесением тонкий

слой хрома толщиной около 1мкм на поверхности оптического стекла. Пленку хрома напыляют в вакууме или осаждают из металлоорганических соединений.

На стеклянные пластинки, покрытые пленкой хрома, наносят фоторезист и проводят контактную печать. После экспонирования и снятия фоторезиста для получения нужного рисунка осуществляют травление, открывшихся участков хрома. Готовые металлизированные фотошаблоны выдерживают несколько часов при повышенной температуре ( $T \sim 100-150^{\circ}\text{C}$ ) для упрочнения плёнки металла и улучшения сцепления её со стеклом.

### **Процесс Фотолитографии**

Применение методов фотолитографии в полупроводниковой технологии позволяет решать ряд сложных конструктивных проблем:

- воспроизводимость и точность геометрий р-п переходов в кристалле полупроводника.

- возможность создания интегральных схем.

- получения профилей сложней конфигурации, любых размеров на поверхности кристалла без нарушения структуры материала.

- осаждение металлов и сплавов на поверхности кристалла заданного рисунка известными методами (электролитическим, химическим, распылением в вакууме).

- создание омических контактов и выводов в конструкциях очень малых размеров

Технологический процесс фотолитографии состоит из нескольких основных операций:

- очистка поверхности пластин (обезжиривания и удаления грязи)

- нанесения слоя фоторезиста

- сушка фоторезиста

- экспонирования

- проявления
- задубливания фоторезиста
- контроль геометрических размеров изображения
- травления пленки  $\text{SiO}_2$  и промывка
- удаление пленки фоторезиста с поверхностью
- контроль обработанных пластин

1. С целью удаления загрязнений и обезжиривания промывается в жидком трихлорэтилене и его парах, а также в кипящей азотной кислоте. Промывку пластин можно проводить в толуоле, амилацетате, ацетоне и этиловом спирте.

2. Для нанесения фоторезиста используют методы центрифугирования, пульверизации, аэрозольного нанесения в раствор и т.д.

3. После нанесения слоя фоторезиста его подвергают сушке: сначала 15-30 минут подсушивают при  $T=300\text{ K}$ . затем 30-60 минут сушат при  $T=100-120^\circ\text{C}$ . В некоторых случаях используют инфракрасную (ИК) и вакуумную сушку.

4. Экспонирование осуществляют контактным способом. Фоторезистивную пленку облучают синим светом с сильной ультрафиолетовой составляющей для полимеризации экспонируемых участков пленки. Пластины при проведении процесса фотолитографии освещают красным или желтым светом, который не воздействует на фоторезист, но позволяет оператору наблюдать за процессом.

5. Процесс проявления полученного изображения для негативных фоторезисторов сводится к удалению неполимеризованных областей в тех же растворителях, которые используются для приготовления фоторезиста (толуол  $\text{C}_7\text{H}_8$ , трихлорэтилен  $\text{C}_2\text{Cl}_3\text{H}$ , хлорбензол  $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ -травится неосвещенные участки).

Для позитивных фоторезистов процесс проявления связан с химической реакцией превращения инденкарбоновых кислот в растворимые соли. Для проявления фоторезиста на основе хинондиазидов

(НХД) обычно используют сильноразбавленные водные растворы едкого натрия или тринатрийфосфата (травится освещенные участки).

6. Задубливание фоторезиста после его проявления проводят при более высоких температурах, чем сушку фоторезиста после его нанесения на пластину. Процесс задубливания осуществляют в две стадии:

-при комнатной температуре ( $T=300$  К) и при температуре 150-200°C в течение 1 час.

7. После задубливания дефекты выявляют, просматривая готовые пленки фоторезиста под микроскопом. Наиболее распространенные дефекты фотолитографии:

-наличие клина

-неровность края рисунка в виде выступов и впадин

-локальные проколы и нарушения пленки фоторезиста.

8. Процесс травления осуществляют для того, чтобы удалить пленку двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  или какого либо металла: Al, Ni, Cr и т.д. поверхности пластины не защищенной слоем задубленного фоторезиста.

Травление двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  проводят в плавиковой кислоте (HF). При выборе травителя учитывают, что чистый водный раствор HF быстро проникает под пленку фоторезиста, вызывая подтравливание окисла и образование клина между  $\text{SiO}_2$  и поверхностью пластины кремния Si. Для уменьшения этого явления в травильный раствор HF входят фтористый аммоний  $\text{NH}_4\text{F}$ . Наиболее часто используют травитель следующего состава:

30 гр. $\text{NH}_4\text{F}$ + 60мл  $\text{H}_2\text{O}$ +9 мл HF(48%)

(Поскольку скорость травления  $\text{SiO}_2$  в HF зависит от содержания в окисле примесей бор или фосфор после диффузии, то не следует проводить травления на чистой водной растворе HF. Окисель с примесью фосфора травиться быстрее чем - чистый или легированный бором окисель (Мартюшева. стр.99)).

После травления пластины подвергают тщательной промывке в

деионизованной воде.

Удаления задубленного слоя фоторезиста производят в горячей концентрированной серной кислоте ( $H_2SO_4$ ) или 10 % ном водном растворе щелочи (KOH или NaOH).

Для травления алюминий Al с негативным фоторезистом используют 5-20 % ные растворы. Травления проводят при температуре  $T=50-80^\circ C$ . Скорость травления составляет 200-500 Å/мин.

Для позитивных фоторезистов щелочное травления алюминия заменяют кислотным. Для травления применяют 50 %-ный раствор ортофосфорный кислоты нагретой до  $T=60-70^\circ C$ . Для травления алюминия можно использовать и другие травители. Например, состав:

3,8 л  $FeCl_3$ (хлорного железа) + 360 мл 38 % ного раствора HCl (соляной кислоты).

Травление Cr с защитным рельефом из позитивного фоторезиста проводят в разбавленной соляной кислоте HCl. Реакция травления идет достаточно быстро.

Травлению золота Au в Царской водке ( $HNO_3+HCl$ ) хорошо противостоят позитивные фоторезисты на основе нафтехинондиазида и новолака

Пленку тантала Ta с защитным рельефом из негативного фоторезиста сначала подвергают травлению в щелочных растворах для снятия слоя окиси тантала, затем в кислотном травителе, содержащем плавиковую кислоту HF.

## Лекция №11

### Контактная и проекционная оптическая фотолитография.

В процессе изготовления структур интегральных схем (ИС) литография проводится несколько раз.. Начиная со второй литографий,

необходимо совмещать рисунок шаблона с рисунком на подложке, полученном при формировании предыдущего технологического слоя с применением предшествующего литографического процесса.

Контактное экспонирование - метод передачи изображения с фотошаблона на слой фоторезиста на пластине - подложке.

Совмещение - выполняют визуально на той же установке, что и последующего экспонирования путем наложения при наблюдении под микроскопом рисунков фотошаблона и подложки.

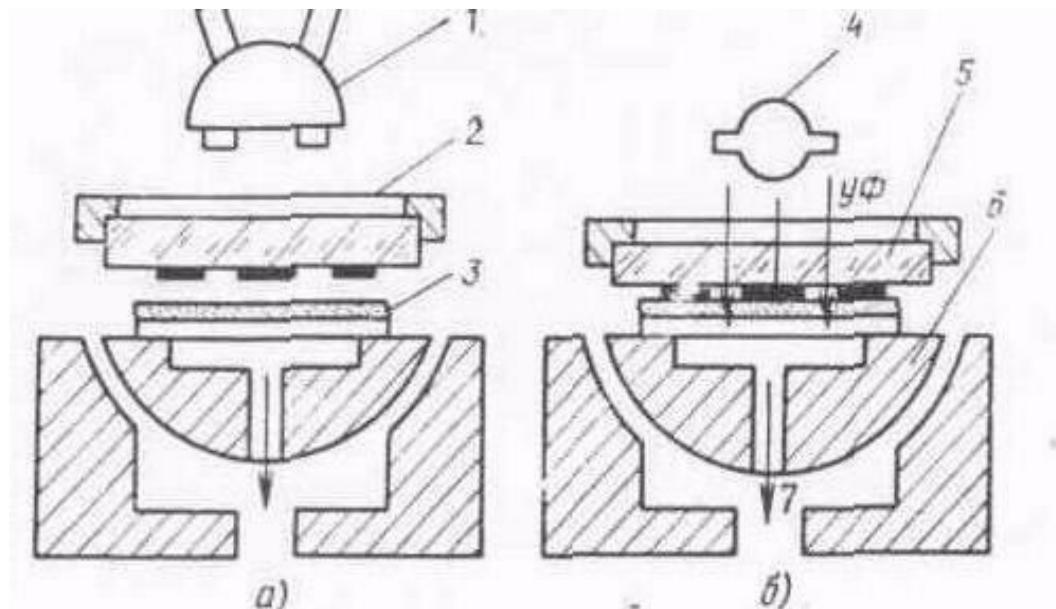


Схема совмещения (а) и контактного экспонирования (б) в процессе фотолитографии:

1-двухпольный микроскоп 2—шаблонодержатель. 3-подложка с фотослоем. 4-источник УФ излучения. 5-фотошаблон. 6-шаровой столик. 7-откатка

Для предотвращения царапанья, сколов и стирания поверхностей фотошаблона и фоторезиста, между ними устанавливают микрозазор (10-30 мкм). С увеличением требований к точности совмещения необходимы микроскопы с большим увеличением (100-200<sup>x</sup>), при этом соответственно микрозазор уменьшается. Двухпольные микроскопы позволяют наблюдать две отдельных друг от друга участка подложки.

(После установки микро зазора оператор, наблюдая в микроскоп, сначала, при сравнительно больших перемещениях совмещает соответствующие строки и столбцы изображений. Затем выполняет точное совмещение в пределах существенно меньших перемещений с помощью фигур совмещения с контролируемым зазором по контуру).

Экспонирование контактным способом выполняется после совмещения рисунков и устранения зазора до полного контакта фотошаблон - подложка. Нужное усилие контакта создается вакуумным или пневматическим прижимом. Для согласования спектров поглощения фоторезиста и излучения источника света применяют светофильтры. Параллельность пучка излучения, необходимая для равномерной освещенности экспонируемой поверхности фоторезиста, обеспечивается системой конденсоров, имеющих 1-5 кварцевых линз.

Необходимое время экспонирования обеспечивается электромагнитным затвором, время открывания и закрывания шторки которого составляет 0,05 - 0,1 секунд, что в интервале времени экспонирования (от 1 секунда до 2 минут) обеспечивает хорошую точность.

Существенным ограничением контактной фотолитографии является неизбежность механических повреждений рабочих поверхностей фотошаблона и подложка. Из-за механического износа плёночного (эмульсионного) рисунка необходима частая замена фотошаблона, которая требует остановок оборудования и делает нецелесообразным автоматизацию процесса экспонирования. При контактировании фотошаблон вдавливают в фоторезист пылинки, микрочастицы стекла и другие. На фотошаблон налипают фоторезист, кроме того, любые непрозрачные для ультрафиолетового излучения частицы, попавшие между фотошаблоном и фоторезистом, также являются причиной появления дефектов фотомаски.

Получение полного плотного контакта между фотошаблоном и

подложкой представляет собой практически неразрешимую задачу из-за изогнутости пластин (особенно эпитаксиальных структур), неидеальности плоскости контактируемых поверхностей, наличия между ними посторонних частиц, из-за неравномерности толщин различных пленок и слоя фоторезиста и др. Частичные воздушные зазоры приводят к усилению дифракционных эффектов и обуславливают дополнительное расширения размеров получаемого изображения.

Контактная фотолитография широко применяется в настоящее время и является наиболее отработанным методом, отличается высокой производительностью и невысокой стоимостью. Вследствие такого контакта фотошаблон - подложка достигает высокие разрешения.

**Проекционное экспонирование** отличается от теневых способов тем, что основано не на экранировании от равномерного потока света, а на проецировании, т.е. получении изображения, соответствующего топологии шаблона, на поверхности фоторезиста с помощью оптической системы со специальным объективом.

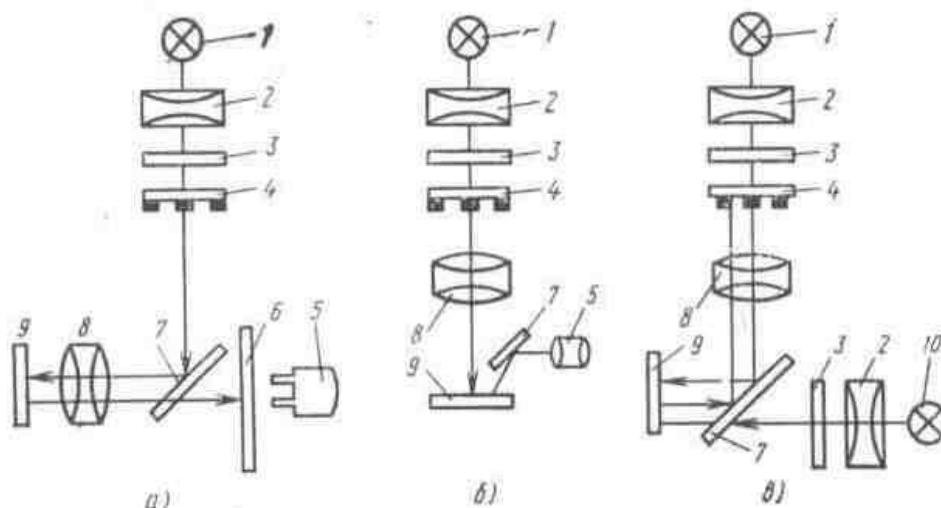


Схема оптической проекционной фотолитографии:

а) прямого проецирования; б) совмещения; в) обратного отображения

Фотошаблон расположен на значительном расстоянии от подложки,

его износ полностью исключен. Фотошаблон (1) освещается через конденсор (4) источником света (3). Изображения проецируется через фильтр (2) и фотошаблон (1) на полупрозрачное зеркало (5) и через проекционный объектив (6) на пластину (7). При обратном ходе лучей через объектив (6) и зеркало (5) с помощью микроскопа (8) в плоскости экрана (9) наблюдают расположенную на пластине структуру и спроецированное на нее изображение фотошаблона. Преимущество данной схемы в том, что ничего не требуется менять при переходе от операции совмещения к операции экспонирования. Основные ограничения проекционного экспонирования:

- сложность создания высокоразрешающих объективов с большими полями.
- невозможность сохранения плоскостности поверхности подложек на всех технологических обработках.

Высокие требования предъявляются к равномерности и воспроизводимости толщины фоторезиста.

## Лекция №12

### Защитные диэлектрические пленки в планарной

#### технологии.

Защитные диэлектрические пленки дают возможность:

- проводить локальную диффузию примесей;
- изолировать друг от друга элементов интегральной схемы;
- защищать р-п-переходы от внешних воздействий.

Защитным диэлектрическим пленкам предъявляют следующие основные требования:

-полная защита поверхности исходной подложки от проникновения в нее диффундирующих элементов;

-химическая стойкость и стабильность во времени;

- однородность и бездефектность;
- высокое удельное сопротивление и электрическая прочность;
- высокая механическая прочность;

Широкое промышленное применение нашли только диэлектрические пленки диоксид и нитрид кремния

### **Кинетика термического окисления кремния.**

Промышленных условиях для процесса термического окисления кремния используют принудительный поток окислителя  $F_1$  проходящий через рабочую камеру с определенной скоростью:  $F_1 = h(C_1 - C_2)$ ,

где  $h$ - константа скорости процесса газообразного массопереноса окислителя;

$C_1$ - равновесная концентрация окислителя в объеме газа;

$C_2$ - концентрация окислителя у поверхности оксида;

Окислитель, дошедший до поверхности оксида  $SiO_2$ , адсорбируется на этой поверхности и растворяется в ней.

При этом между концентрацией окислителя в газовой фазе и концентрацией окислителя, растворившегося в твердой фазе, устанавливается соотношение, определяемое коэффициентом распределения.

Движущей силой процесса растворения окислителя в оксиде является градиент концентрации окислителя в системе газ-поверхность оксида.

Поэтому поток окислителя  $F_2 = \delta(C_2 - C_3)$ ;

Где  $\delta$  - константа скорости процесса растворения окислителя в слое оксида;

$C_3$ - концентрация окислителя в слое оксида на границе с газовой фазой.

Растворившийся в слое оксида окислитель будет диффундировать от поверхности раздела газовая фаза – оксид (II) к границе раздела оксид –

подложка (IV).

Поток окислителя  $F_3$  в этом случае будет пропорционален разности концентраций на границах оксида и обратно пропорционален толщине слоя оксида:

$$F_3 = D \frac{C_3 - C_4}{x_0};$$

$D$ - коэффициент диффузии окислителя в оксиде.

$C_4$ - концентрация окислителя на границе оксид - подложка (IV)

$x_0$ - толщина слоя оксида

Продифундировавший через слой  $\text{SiO}_2$ , окислитель подходит к границе  $\text{SiO}_2$ - $\text{Si}$  и вступает в реакцию с кремнием. В результате окисления кремния образуется новый слой оксида.

Поток  $F_4$  характеризует скорость химической реакции окисления, который происходит на поверхности раздела оксид кремний.

Скорость окисления кремния пропорционально концентрации окислителя, следовательно,  $F_4 = kC_4$ , где  $k$ -константа скорости и реакции окисления.

Так как в установившемся режиме (при равновесии) все потоки равны, то есть  $F_1=F_2=F_3=F_4=F$ , то решение уравнения для потоков совместно, можно получить выражение для суммарного потока окислителя с учётом всех входящих в отдельные потоки величин:

$$F = \frac{\frac{r}{a} C_1}{1 + \frac{R}{\delta} + \frac{rx_0}{D}} = r_{\text{эф}} C_1, 0 < a < 1$$

$R_{\text{эф}}$ - эффективная константа скорости процесса окисления.

Если предположить, что на образовании единичного объёма оксида  $V$ - в результате реакции окисления пошло  $N$  частиц окислителя то скорость роста слоя оксида  $\frac{dx_0}{dt}$  будет выражаться следующим уравнением:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{F}{N} = FV = r_{\text{эф}} C_1 V ;$$

$$\frac{dx_0}{dt} \frac{\frac{1}{a} C_1 V}{\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\delta}\right) + \frac{x_0}{D}} = \frac{\frac{1}{a_1} C_1 V D}{\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{D}\right) + D X_0} .$$

Введём обозначения:  $A = 2\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\delta}\right)D$ ;  $B = 2\frac{1}{a} C_1 V D$ , тогда

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{B}{A + 2x_0}, (A + 2x_0)dx = Bdt ,$$

$$\int (FA + 2x_0)dx = \int Bdt \text{ или } x_0^2 + Ax_0 - Bt = 0$$

Решение этого квадратного уравнения:  $\frac{x_0}{\frac{A}{2}} = \sqrt{1 + \frac{t}{\frac{A^2}{4B}}} - 1$ ;

При большом времени окислительного процесса, когда  $t \gg \frac{A^2}{4B}$

получим:

$$\left(\frac{\frac{x_0}{\frac{A}{2}}}{2}\right)^2 = \frac{t}{\frac{A^2}{4B}} \text{ или } x_0^2 = Bt , \text{ то есть имеет место параболический}$$

закон процесса термического окисления.  $B$  - константа скорости окисления.

При условии  $t \ll \frac{A^2}{4B}$  получим:

$$\frac{x_0}{\frac{A}{2}} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{t}{\frac{A^2}{4B}}\right); x_0 = \frac{B}{A} t \text{ линейная зависимость.}$$

### Термическое окисление кремния в парах воды.

Структурное формирование пленки оксида происходит за счет диффузионного переноса воды через слой  $\text{SiO}_2$  с поверхности. На

структурное формирование пленки оксида оказывает влияние водород, образующийся в процессе реакции окисления и диффундирующий в глубь пластины. Так как коэф-т диффузии водорода ( $2 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/сек при 1050°С) значительно больше, чем коэффициент воды ( $9 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/сек при 1050°С), то образование гидроксильных групп у границы раздела SiO<sub>2</sub>-Si объясняется наличием не только молекул воды, но и водорода.

При температурах процесса окисления выше 1100°С окисление описывается выражением  $X^2 = Bt$ .

При  $T < 1100^\circ\text{C}$  закон образования оксидного слоя отличается от параболического и имеет вид  $X^2 + AX = Bt$ .

Чем ниже температура процесса окисления, тем ближе к линейному закон образования слоя оксида. Линейный закон имеет место в том случае, когда скорость окисления ограничена скоростью химической реакции на границе SiO<sub>2</sub>-Si. Скорость реакции зависит от количества свободных связей атомов Si, которые могут реагировать с молекулами воды на границе раздела SiO<sub>2</sub>-Si.

Высокая концентрация примеси в подложке влияет либо на скорость реакции окисления на границе раздела SiO<sub>2</sub>-Si, либо на коэффициент диффузии окислителей.

Поверхность кристалла с высокой концентрацией фосфора окисляется значительно быстрее, чем слаболегированная поверхность (это справедливо для  $T = 600 - 1100^\circ\text{C}$ ).

При термическом окислении растущий оксид оттесняет фосфор P в глубь кремния Si и, таким образом, в оксидном слое концентрация фосфора весьма мала.

Для бора картина обратная: растущий оксид включает в себя большое количество бора, что приводит к ускорению диффузии окисляющих веществ.

Поэтому кремний Si с высокой концентрацией бора B окисляется быстрее как в высокотемпературной, так и в низко

температурной области.

Скорость окисления в парах воды зависит от ориентации исходной пластины кремния только в низкотемпературной области, где рост не подчиняется параболическому закону.

## Лекция №13

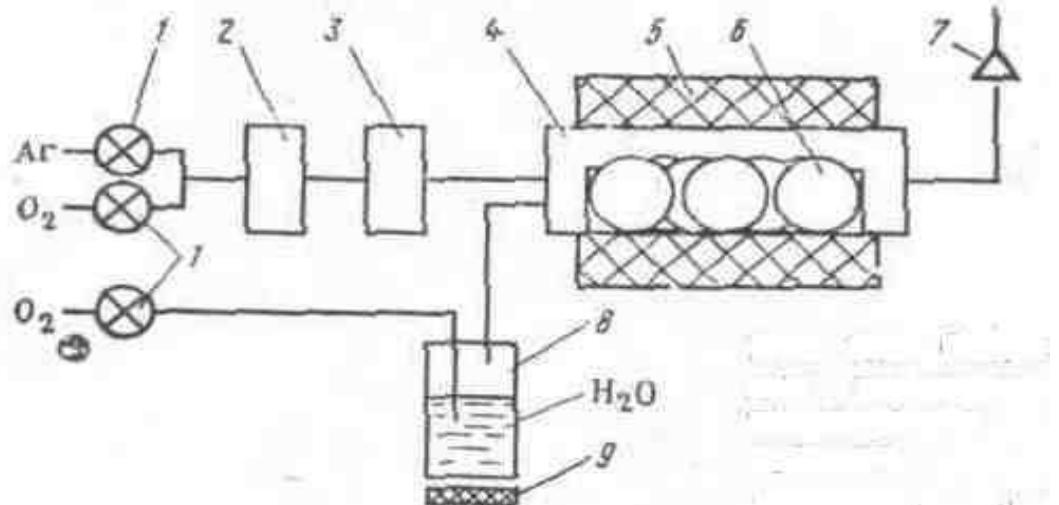
### Термическое окисления кремния в сухом кислороде

В случае окисления в сухом кислороде веществом, диффундирующим сквозь растущую пленку оксида кремния является ионы кислорода. Коэффициент диффузии кислорода в пленке оксида кремния ( $2,8 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/сек при 1050° С) значительно меньше, чем у водорода и воды при тех же условиях. Поэтому скорость роста оксидной пленки кремния в сухом кислороде меньше, чем в парах воды.

Высокая энергия активации процесса окисления кремния в сухом кислороде (O<sub>2</sub>) и отсутствие гидроксильных групп (ОН) приводят к образованию прочных связей кислорода с кремнием в структуре получаемого оксидного слоя кремния.

Кинетика окисления в области низких температур определяется в большей мере скоростью реакции на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>, чем диффузией кислорода.

Отклонение закона роста пленки оксида кремния (SiO<sub>2</sub>) в сторону линейности обычно имеет место при температурах ниже 1000°С.



1. кран
2. осушитель: используют вымораживающую ловушку, химический поглотитель
3. фильтр для удаления частиц пыли и механических загрязнений
4. рабочая камера
5. печь
6. пластины кремния
7. вытяжная вентиляция
8. увлажнитель
9. подогреватель

### Термическое окисление кремния во влажном кислороде.

Окисления кремния  $Si$  во влажном кислороде  $O_2$  является комбинацией процессов окисления кремния в парах воды и в сухом кислороде  $O_2$ .

Сухой и очищенный от примесей кислород  $O_2$  пропускают через водяную баню, где он насыщается горячими водяными парами, и затем подают его в рабочую камеру. Содержание влаги в потоке кислорода  $O_2$  определяется температурой водяной бани и скоростью потока кислорода  $O_2$ . Скорость процесса окисления кремния  $Si$  зависит от содержания влаги в потоке кислорода  $O_2$ .

Если необходимо иметь низкие скорости процесса окисления, то вместо кислорода можно использовать поток аргона или азота (температура водяной бани должна быть комнатной  $T=300\text{K}$ ).

Энергия активации реакции окисления кремния во влажном кислороде  $\text{O}_2$  уменьшается с увеличением концентрации паров воды  $\text{H}_2\text{O}$ . Энергия активации реакции окисления лежит в диапазоне от 1,3 эВ, что соответствует процессу окисления кремния в сухом кислороде, до 0,8 эВ что соответствует процессу окисления кремния в атмосфере водяного пара.

В производстве применяет трех ступенчатые способы окисления, которые основаны последовательном использовании в качестве окислителей сухого кислорода, влажного кислорода  $\text{O}_2$  или водяного пара и снова сухого кислорода  $\text{O}_2$ . Первая стадия направлена на получения тонкой плёнки двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  с совершенной структурой, вторая стадия применяется для ускорения процесса окисления кремния и наращивания достаточной по толщине пленки оксида на поверхности кремния, а третья стадия - вновь для получения совершенной структуры двуокиси кремния на поверхности кремния.

Предельная толщина термически выращенной пленки не превышает 1-1,5 мкм.

Для практических целей планарной технологии толщина защитных плёнок двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  должна составлять 0,2-0,8 мкм.

Это продиктовано тем, что при использовании пленок толщиной более 0,8 мкм клин травления при проведении процесса фотолитографии возрастает и ограничивает возможность получения микроизображения требуемого размера.

При использовании пленок двуокиси кремния толщиной менее 0,2 мкм увеличивается вероятность появления в ней сквозных отверстий и пор, которые при диффузии приводят к локальному проникновению диффузанта в подложку.

## Лекция №14

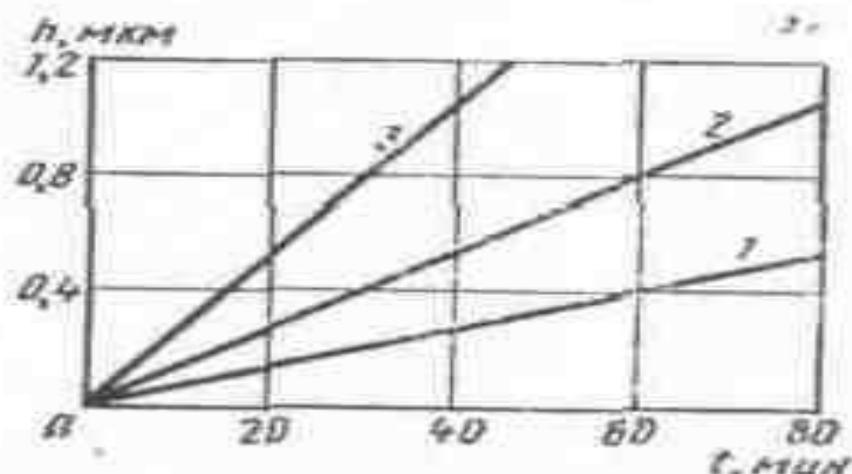
### Пиролитическое осаждение оксидных пленок кремния.

Наиболее простым и технологичным способом образования оксидов кремния  $\text{SiO}_2$  без участия материалов подложки является пиролитическое разложение различных кремний органических соединений. Другим важным преимуществом данного способа, является то, что он позволяет свести к минимуму перераспределение примесей которое имело место в исходной подложке, т.е. сохранить геометрические размеры и электрические параметра активных и пассивных областей подложки. Третьим достоинством способа является более низкая температура процесса.

### Термическое разложение тетраэтоксисилана

Реакция разложение тетраэтоксисилана  $\text{Si}(\text{CO}_2\text{H}_5)_4$  происходит при  $T=700-750^\circ\text{C}$ . В результате реакции выделяются диоксид кремния, оксид кремния, оксид углерода и органические радикалы в газообразной форме. Источником кислорода  $\text{O}_2$  в этой реакции служит сам тетраэтоксисилан, а не внешний источник.

Если реакция разложения тетраэтоксисилана. проводится в одной камере с подложкой, то температура подложки  $T_{\text{подложки}}$  соответствует температуре пиролиза  $T_{\text{пиролиза}}$ , если подложка находится в другой камере, то температура подложек может быть значительно снижена по сравнению с температурой пиролиза  $T_{\text{пиролиза}}$ .



Зависимость толщины (h) SiO<sub>2</sub> от времени пиролиза при T<sub>пиролиза</sub>:

1- T<sub>пиролиз</sub>=700° C

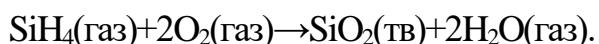
2- T<sub>пиролиз</sub>=725° C

3- T<sub>пиролиз</sub>=750° C

### Окисление силана кислородом

Преимущество реакции окисления силана (SiH<sub>4</sub>) кислородом перед реакцией разложения тетраэтоксисилана Si(CO<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub> заключается в том, что в этой камере не происходит образования газообразных органических радикалов и углерода, а сама реакция идет при более низкой температуре.

Для протекания реакции образования диоксида кремния SiO<sub>2</sub> внешний нагрев не требуется, однако для получения оксидных пленок кремния SiO<sub>2</sub> более высокого качества процесс проводят, при T=150-300° C



Исходными веществами для проведения процесса являются газовые смеси, которые включают в себя высокочистый моносилан, аргон Ar или азот N<sub>2</sub> (газы - носители) и кислород O<sub>2</sub>. Контролируемое окисление сильно разбавленного инертным газом силана (3-10 %) позволяет реализовать осаждение диоксида кремния SiO<sub>2</sub> в широком диапазоне температур со скоростью 10-50 нм/мин.

Температурный интервал осаждения оксидных пленок кремния определяется концентрациями моносилана от 0,8 до 0,015 об.% для постоянного отношения силан:окислитель=1:3 температура процесса

осаждения должна быть увеличена с 140 до 450°С.

Особое внимание следует обращать на минимальную температуру процесса осаждения. Нижний температурный предел лимитируется двумя факторами: монотонным увеличением пористости пленки SiO<sub>2</sub> и гомогенным окислением моносилана в газовой фазе

Монотонное увеличение пористости пленки связано с тем что по мере снижения температуры процесса  $T_{\text{осаждениеSiO}_2}$  уменьшается энергия поверхностной миграции адсорбированных подложкой молекул. Кристаллизация осаждаемых частиц при этом происходит в положениях, все более далеких от минимума свободной энергии системы. Это вызывает образование рыхлых, пористых плёнок с низкой электрической прочностью и невысокой адгезией к подложке.

Гомогенное окисление моносилана в газовой фазе связано с тем, что чем ниже температура осаждения оксидной пленки  $T_{\text{осаждениеSiO}_2}$ , тем большие концентрации моносилана необходимы для реализации механизма окисления и, следовательно, все большая часть моносилана окисляется в газовой фазе, засоряя реакционную камеру и ухудшая качество образующейся пленки.

В качестве окислителя кроме кислорода O<sub>2</sub> могут быть использованы кислородсодержащие соединения, такие, как закиси азота N<sub>2</sub>O, углекислого газа CO<sub>2</sub>, вода H<sub>2</sub>O. Использование в качестве окислителей закиси азота и углекислого газа позволяет практически исключить гомогенное окисление, однако при этом невозможно реализовать осаждение пленок диоксида кремния в диапазоне температур  $T=2000-350^\circ\text{C}$ .

Контролируемое окисление моносилана (кислородом), достаточно сильно разбавленного инертными газами, позволяет получать пленки SiO<sub>2</sub> в широком диапазоне температур ( $T_{\text{осак}}=200-500^\circ\text{C}$ ), при этом скорости осаждения пленок достигают значений порядка 50-100 нм/мин.

Следует отметить, что пленки SiO<sub>2</sub>, полученные данным методом,

равномерны по толщине по всей поверхности пластины, обладают достаточной сплошностью, стабильностью химического состава и хорошей маскирующей способностью при проведении процессов диффузии. Отличительным признаком пленок  $\text{SiO}_2$ , полученных этим методом, является более высокая скорость их травления.

### **Осаждение пленок оксида кремния термическим испарением.**

Используют два метода испарения монооксида кремния  $\text{SiO}$ .

В первом - используется технический порошкообразный  $\text{SiO}$ . Второй метод - кремниевый электрод нагревается в атмосфере кислорода  $\text{O}_2$ . При этом его поверхность покрывается монооксидом  $\text{SiO}$ , который легко испаряется, так как обладает более высоким, чем у кремния, давлением паров.

Оксиды, получаемые путем напыления на полупроводниковую подложку, представляют собой комплексы вида  $\text{Si-SiO-SiO}_2$ .

При первом методе наиболее важных моментов для получения однородной защитной оксидной пленки является конструкция лодочки для порошка  $\text{SiO}$ . Скорость испарения зависит от:

- геометрии лодочки
- температуры
- давления
- от однородности порошка  $\text{SiO}$ .

Подложка  $\text{Si}$  при этом нагревается до  $300^\circ\text{C}$  и выше, чтобы получить хорошую адгезию защитной пленки к исходной пластине. Если осаждение производится с малой скоростью, но при высоком парциальном давлении кислорода  $\text{O}_2$  то пленка обладает такими же характеристиками, как и пленка  $\text{SiO}_2$ . При больших скоростях осаждения или при более низком парциальном давлении кислорода оптические характеристики осажденной пленки сходны с характеристиками, присущими пленкам  $\text{SiO}$ .

Защитные пленки, обладающие свойствами пленок SiO<sub>2</sub>, получают обычно при температуре источника T=1300-1400°С и суммарном давлении менее 6,5\*10<sup>-4</sup> Па.

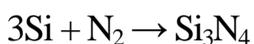
При втором методе определяющую роль играет реакция у поверхности кремния Si. Температура и парциальное давление кислорода O<sub>2</sub> у этой поверхности определяют скорость адсорбции кислорода O<sub>2</sub> на поверхности кремния Si и испарения SiO<sub>2</sub>. Кремний Si нагревается (электрод) до T=700-1000° С. Парциальное давление кислорода O<sub>2</sub> должна быть таким, чтобы на поверхности кремниевого источника обеспечивалась реакция Si + O → SiO. Указанным методом на исходной полупроводниковой пластине можно получить оксидную пленку толщиной 0,1мкм. При температуре T=900°С и давлении 1,3\*10<sup>-4</sup> Па в течение 30 минут. При подогреве подложки улучшаются адсорбция паров оксида и адгезия их к полупроводниковым пластинам. Во избежание испарения осажденной пленки оксида температура подложки должна быть на 100-200°С ниже температуры источника.

#### **Химическое осаждение пленок нитрида кремния.**

Пленки нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. обладают меньшей проницаемостью для диффузантов, чем пленки диоксида кремния SiO<sub>2</sub>.. Поэтому пленки нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. получают более тонкими. Это является важным фактором для фотолитографии, способствующим увеличению ее разрешающей способности. Существует несколько способов химического осаждения пленок нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

#### **Реакция взаимодействия кремния с азотом**

Для осуществления химической реакции нитрирования необходима температура T=1100 - 1300°С:

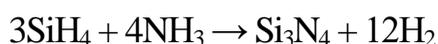


Пленки нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. могут быть получены методом открытой трубы. В рабочей камере располагают пластины кремния и

пропускают через нее поток азота. При температуре  $T=1200^{\circ}\text{C}$  и скорости потока азота  $300\text{ см}^3/\text{мин}$ , на поверхности пластин кремния образуется пленка нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

### **Реакция взаимодействия силана с аммиаком.**

Для протекания химической реакции азотирования силана аммиаком необходима температура  $T=700 - 1100^{\circ}\text{C}$ . В рабочую камеру с кремниевыми пластинами в потоке водорода со скоростью  $(3-5) \cdot 10^3\text{ см}^3/\text{мин}$  подаются силан и аммиак в соотношении 1:20. Избыток водорода препятствует преждевременному разложению силана. В рабочей камере при температуре выше  $500^{\circ}\text{C}$  происходит разложение силана и взаимодействие его с аммиаком:



Образовавшийся в результате реакции нитрид кремния осаждается на поверхности кремниевых пластин.

Скорость роста пленки нитрид кремния зависит от концентрации силана в рабочей камере и температуры проведения процесса. Обычно пленки нитрид кремния осаждают на подложки при температуре  $800 - 900^{\circ}\text{C}$  с использованием рабочей смеси, состоящей из водорода или аргона, используемых в качестве газов-носителей и реагентов:

- силана (до 1%)
- аммиака (до 3%)

Расход рабочей смеси устанавливают равным  $1000\text{ см}^3/\text{мин}$ .

## **Лекция №15**

### **Изготовление биполярных структур**

Элементы биполярных интегральных схем формируют в отдельных электрически изолированных друг от друга и от общей пластины областях - карманах. Для многих интегральных схем исходными заготовками являются эпитаксиальные структуры со скрытым p-областями, которые

уменьшают сопротивления коллекторов. В соответствии с принципом совместимости элементов одновременно с транзисторами формируют диоды, резисторы, конденсаторы.

На заключительных стадиях маршрута выполняют металлизацию: контакты к активным областям, проводящие дорожки между элементами, контактные площадки для внешних электрических соединений.

Контактные маски формируют из диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ . Пленки диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  из акцепторных примесей маскирует только от бора. Алюминий Al, индий In, галлий Ga имеют в пленке диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  высокий коэффициент диффузии. Для защиты от этих примесей при их диффузии в кремний используют маски из нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Из донорных примесей чаще применяют фосфор, он имеет больший коэффициент диффузии в кремнии чем сурьма Sb и мышьяк As, и большую предельную растворимость в Si, чем сурьма.

Донорные примеси, как правило, медленнее диффундирует и лучше растворяются в кремнии Si, чем акцепторные. Поэтому кремниевые биполярные транзисторы n-p-n более распространены, чем транзисторы p-n-p. Для создания эмиттерных областей применяют фосфор благодаря высокой растворимости которого обеспечивается концентрации примеси около  $10^{21} \text{ см}^{-3}$  и, следовательно высокий коэффициент инжекции. Одновременно с эмиттерными ( $n^+$ ) областями получают  $n^+$ -области у поверхности тела коллектора, которые уменьшают сопротивление омических контактов.

### **Изготовление биполярных интегральных схем с изоляцией**

#### **p-n - переходами.**

Изоляция создается с помощью диффузии на всю глубину эпитаксиальных слоев. В результате диффузии получают карманы, окруженные p-n - переходами. При работе интегральной схемы на

подложку подают наиболее отрицательный потенциал, поэтому переходы заперты и карманы с транзисторами или другими элементами изолированы от подложки и от других карманов.

Изготовление биполярных интегральной схемы методом разделительной диффузии насквозь эпитаксиального  $n$  - слоя состоит из двух этапов:

- изготовления эпитаксиальной структуры со скрытыми  $n^+$  областями
- изготовления биполярной интегральной схемы на этой структуре.

Легирующая примесь для скрытых  $n^+$ -областей должна иметь высокую растворимость в кремнии Si при малой глубине диффузии. В месте с тем чтобы не происходила передвижение границы скрытого коллекторного слоя при последующих термообработках, примесь должна иметь по возможности минимальный коэффициент диффузии. Поверхностная концентрация скрытого слоя не должна быть слишком высокой, так как это увеличивает диффузию в растущий эпитаксиальный слой, а также механические напряжения, и плотность дислокаций, вызванные несоответствием атомных радиусов кремния Si и примеси. В связи с этим для получения скрытого  $n^+$ -слоя применяют сурьму и мышьяк, которые имеют меньше чем фосфор коэффициенты диффузии. Однако при использовании мышьяка в скрытых слоях наблюдается большое количество дефектов. Поэтому для создания высоковольтных биполярных микросхем скрытые слои легирует преимущественно сурьмой. Типичное поверхностное сопротивление скрытого слоя 15-50 Ом/□ толщина слоев 2-5мкм. Эпитаксиальный  $n$  - слой выращивают обычно хлоридным методом. Толщина слоя 3-25мкм в зависимости от назначения интегральной схемы.

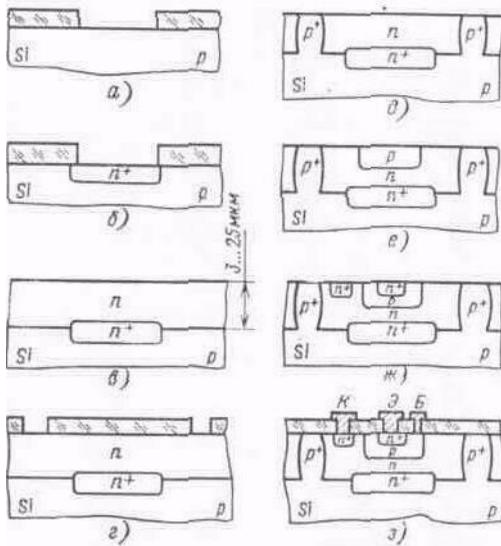


Схема изготовления эптаксиально-планарной биполярной ИМ с помощью разделительной диффузии:

а — термическое оксидирование и первая фото-литография; б — локальная диффузия. в — эпитаксия; г — термическое оксидирование и вторая фото-литография; д — разделительная диффузия; е — формирование базовых областей; ж — формирование эмиттерных и контактных областей; з — формирование коллекторов.

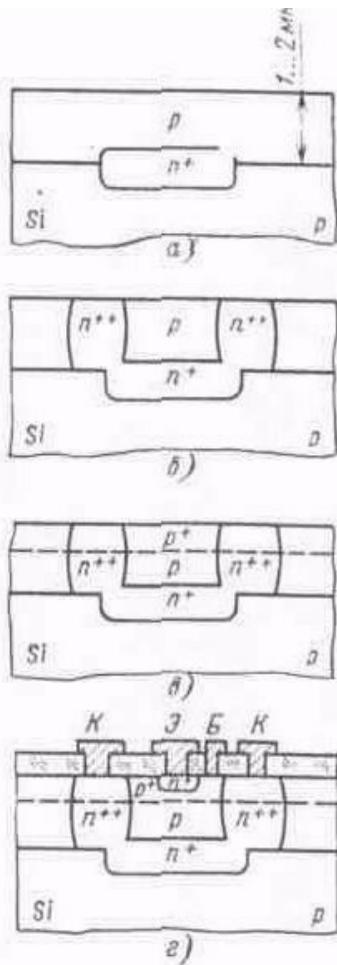


Схема изготовления биполярной ИМ с помощью коллекторной изолирующей диффузии:

а — исходная эптаксиальная структура; б — коллекторная изолирующая диффузия; в — базовая р+-диффузия; г — формирование эмиттерной и металлизации.

Плотность элементов интегральной схемы зависит от размеров

разделительных диффузионных  $p^+$  областей размер этих областей, т.е. расстояние между двумя изолирующими  $p$ - $n$  - переходами определяется размером вскрытого окна в маскирующей плёнке  $SiO_2$  и глубиной боковой диффузии примерно равной толщине эпитаксиального слоя.

В простых интегральных схемах это расстояние составляет 35-40 мкм (при толщине слоя приблизительно 10 мкм и ширине окна 10 мкм).

Получение более тонких эпитаксиальных слоёв (толщина 1-3 мкм) не только позволило повысить плотность элементов при изоляции  $p$ - $n$  - переходом но и привело к созданию новых методов изоляции. Одним из них является изоляция коллекторной диффузии –метод ИКД.

Распределения примеси выбирается равномерное, уровень легирования  $10^{15}$ - $10^{16}$   $см^{-3}$  Концентрация примеси выбирается оптимальной, чтобы с одной стороны не было большим сопротивление тела коллектора, а с другой стороны, не было большей паразитная емкость база-коллектор, ограничивающие быстродействие биполярного транзистора.

Изготовление структуры интегральной схемы на полученной заготовке включает разделительную диффузию акцепторной примеси и формирование транзисторов и других элементов в  $p$   $n^{++}$ - карманах.

Базовые, эмиттерные и приконтактные области формируется локальной диффузией с использованием контактных масок из  $SiO_2$ . Диффузионное распределения примеси в базе приводит к возникновению внутреннего электрического поля, ускоряющего движение не основных носителей от эмиттера к коллектору и благодаря этому увеличивающего быстродействие микросхем.

По рассмотренной технологии изготавливают интегральные схемы первой и второй степеней интеграции. Возможности процесса для получения более высоких степеней интеграции ограничены из-за ряда недостатков интегральной схемы:- наличия больших токов утечки, большей площади изолирующего  $p$ - $n$  - перехода, а следовательно, и

емкости паразитной связи сравнительно низких пробивных напряжений, наличия паразитных транзисторов р-n-р между базой и изолирующим р<sup>+</sup>-слоем, низкой радиационной стойкости.

### **Изготовление биполярных интегральных схем методом коллекторной изолирующей диффузии (КИД)**

На этой заготовке - изолированные карманы и одновременно коллекторные n<sup>+</sup> n<sup>++</sup>-области формируется в процесса диффузии донорной примеси сквозь тонкий (1-2мкм) эпитаксиальный р-слой. Для изолирующей диффузии необходимы окна в маске SiO<sub>2</sub>, перекрывающие скрытие n<sup>+</sup>-области. После диффузии получают изолированные n<sup>+</sup> р-карманы.

Базовая р<sup>+</sup>-диффузия проводится без маски SiO<sub>2</sub>, что исключает Фотолитографию и упрощает технологический процесс. Слой с повышенной концентрацией акцепторной примеси р<sup>+</sup> - толщиной 0,3-0,5 мкм в верхней части базы предотвращает инверсию р-Si за счет положительного заряда в SiO<sub>2</sub>.

В этом методе область коллектора сильно легирована, поэтому нет необходимости для повышения быстродействия интегральной схемы проводить дополнительную диффузию Au и др. понижающей время жизни неосновных носителей тока примеси.

Однако в эпитаксиальной базе дрейф носителей от эмиттера к коллектору уменьшен, что понижает быстродействие интегральной схемы.

### **Изготовление биполярных интегральных схем с диэлектрической изоляцией.**

Диэлектрическая изоляция обеспечивает лучшие параметры интегральной схемы. Изоляция пленкой диэлектрика с использованием поликристаллического кремния реализуется в эпик процессе. Исходной заготовкой является однослойная n n<sup>+</sup>-эпитаксиальная структура.

После локального травления на глубину около 15 мкм и удаления SiO<sub>2</sub> маски термически выращивают или осаждают из парогазовой фазы

ПГФ пленку  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 – 2 мкм. Поверх нее осаждают слой высокоомного поликристаллического кремния толщиной 175 – 200 мкм.

Для получения изолированных  $n^+n$  - карманов лишнюю часть монокристаллического кремния ( $n\text{-Si}$ ) сошлифовывают. Полученная при этом подложка из поликристаллического кремния структуры интегральной схемы, как и при изоляции  $p$ - $n$  - переходом, проводящая, хотя и имеет более высокое удельное сопротивление около  $50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Для улучшения изоляции слой  $\text{SiO}_2$  иногда заменяют слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$  нитрид кремния, двойными слоями  $\text{SiO}_2$ -  $\text{Si}_3\text{N}_4$  или  $\text{SiO}_2$ -  $\text{SiC}$ . Нитрид и карбид кремния обладают лучшими диэлектрическими свойствами. Карбид кремния  $\text{SiC}$  отличается высокой твердостью, что позволяет легко фиксировать момент со шлифовки.

Таким образом, получения монокристаллические кремниевые карманы в поликристаллической кремниевой подложке выполняется по меза-эпитаксиальной технологии. Элементы интегральной схемы далее формируются в этих карманах по планарной технологии. В целом процесс можно характеризовать как меза-эпитаксиально - планарной.

Наряду с приведенным маршрутом имеются его модификации. Например процесс получения комплиментарных биполярных интегральных схем, в составе которых имеются  $n$ - $p$ - $n$  и  $p$ - $n$ - $p$  транзисторы.

Диэлектрическая изоляция по сравнению с  $p$ - $n$  - изоляцией технологически сложнее, площадь, занимаемая элементами, больше. Паразитные емкости между отдельными элементами и емкость между элементами и подложкой снижают быстродействия интегральной схемы. Эти паразитные емкости можно существенно уменьшить заменой  $n$ - $p$  подложки диэлектриком.

## Лекция №16

### Биполярные интегральные схемы с комбинированной изоляцией.

Комбинированная изоляция обеспечивается у основания кармана (на «дне») р-п - переходом, а с боковых сторон диэлектриком.

Процесс «Изопланар-I» основан на применении локального оксидирования эпитаксиального слоя кремния по всей его толщине для получения боковой SiO<sub>2</sub> изоляции. При этом толщина эпитаксиального слоя не должна превышать 1мкм. Это ограничение обусловлено тем, что рост толстых слоёв SiO<sub>2</sub> при термическом окислении происходит по параболическому закону и получение слоёв SiO<sub>2</sub> толщиной более 1мкм является очень длительным технологическим процессом. Изоляция в нижней части кармана обеспечивается переходом скрытый слой (n<sup>+</sup>) - подложка (p-Si). Для локального травления и оксидирования кремния используется одна и та же Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>- маска. Это сокращает число операций.

Процесс «Изопланар-II» позволяет получать структуры с эмиттерными областями, выходящими боковой стороной на слой изоляции. Приконтактные n<sup>+</sup>-области коллекторов расположены в самостоятельных карманах соединенных с эмиттер-базовыми карманами, скрытыми n<sup>+</sup>-областями: Этот процесс предъявляет менее жесткие требования к точности совмещения слоёв, так как окно смещается в диоксид, диффузия эмиттерной примеси в который не происходит. Базовую диффузию можно проводить по всей площади карманов, что так же упрощает процесс.

Изопланарная технология совмещает преимущества планарной и меза технологии, она позволяет избежать неоднородности электрического поля на периферии планарного р-п - перехода, снизить паразитные емкости между активными областями структуры, повысить качество изоляции и степень интеграции интегральной схемы.

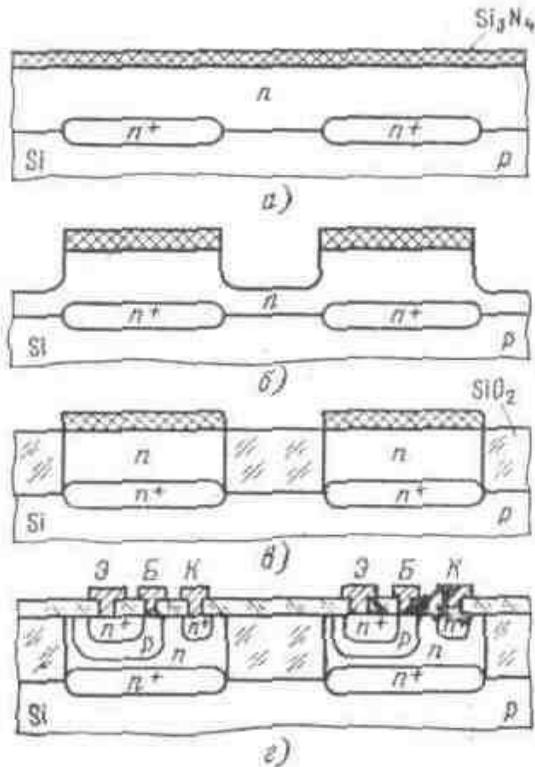


Схема процесса «Изопланар-1» изготовления биполярных интегральных схем с комбинированной изоляцией:

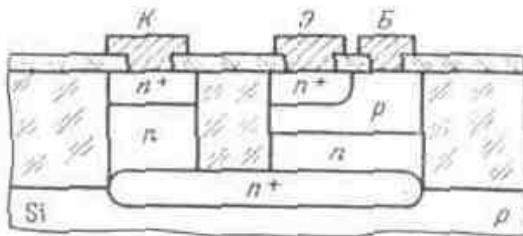
а-осаждение пленки нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;

б-фотолитография и локальное травление  $\text{SiO}_2$ ;

в-локальное термическое оксидирование;

г-удаление маски  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и формирование элементов.

### Структура «Изопланар-II»



## Лекция №17

### Изготовление МОП – интегральных схем

МОП – интегральные схемы изготавливаются по планарной и эпитаксиально - планарной технологии. Благодаря более простой конструкции МОП - транзистора и самоизоляции элементов общее количество технологических операций уменьшается по сравнению с биполярной технологией. Это повышает выход годных и уменьшает стоимость интегральных схем.

Наиболее ответственные моменты в технологии МОП-интегральной схемы:

- создание подзатворного оксида
- точное совмещение затвора с каналом
- получение структур с малой длиной канала.

Под затворный оксид является составной частью активного элемента интегральной схемы, к нему предъявляются более жесткие требования, чем к материалу контактной маски:

- высокая электрическая прочность;
- минимальный заряд в объеме и на граница Si-SiO<sub>2</sub>;
- максимальная стабильность свойств и др.

Плотность поверхностного заряда для кремния с кристаллографической ориентацией плоскости [100] составляет  $1,4 \cdot 10^{-8}$  кл/см<sup>2</sup>, для кремния с кристаллографической ориентацией плоскости [111]  $8 \cdot 10^{-8}$  кл/см<sup>2</sup>. Именно поэтому предпочтительным является кремний с кристаллографической ориентацией плоскости [100].

Затвор не должен перекрывать области истока и стока, так как возникающие при этом паразитные ёмкости уменьшают быстродействие интегральной схемы. Если же длина затвора меньше длины канала, цепь исток - сток разомкнута.

Длина канала определяет время пролета носителей тока от истока к стоку и, следовательно, быстродействие МОП-ИС.

Повышение быстродействия МОП-ИС расширяет области их применения, а малая площадь на один элемент и простота технологии позволяют реализовывать высокую степень интеграции. МОП-структуры составляют основу большинства больших и сверхбольших интегральных схем.

### **Изготовление толсто оксидных р-МОП - ИС и n-МОП - ИС**

МОП-ИС с р - каналами изготавливают по планарной технологии.

Локальная диффузия и выращивание толстого оксида могут проводиться одновременно или раздельно. Во втором случае оксид осаждает из парогазовой фазы.

Толщина конечного оксида над активными областями истоков и стоков около 1 мкм, над исходной поверхностью n-Si пластины - 1,5 мкм. Наиболее сложным является проведение фотолитографии для вскрытия окон под тонкий оксид и последующее травление толстого оксида.

Благодаря созданию толстого оксида под металлизацией параметры интегральной схемы существенно улучшаются. Однако проблема получения минимального перекрытия областей истоков и стоков затворами не решается, так как совмещение каналов с затворами здесь выполняется с помощью фотолитографии и затруднено: 1) из-за неопределенности расположения боковых границ p-n - переходов истоков и стоков, а так же 2) из-за необходимости травить толстый оксид.

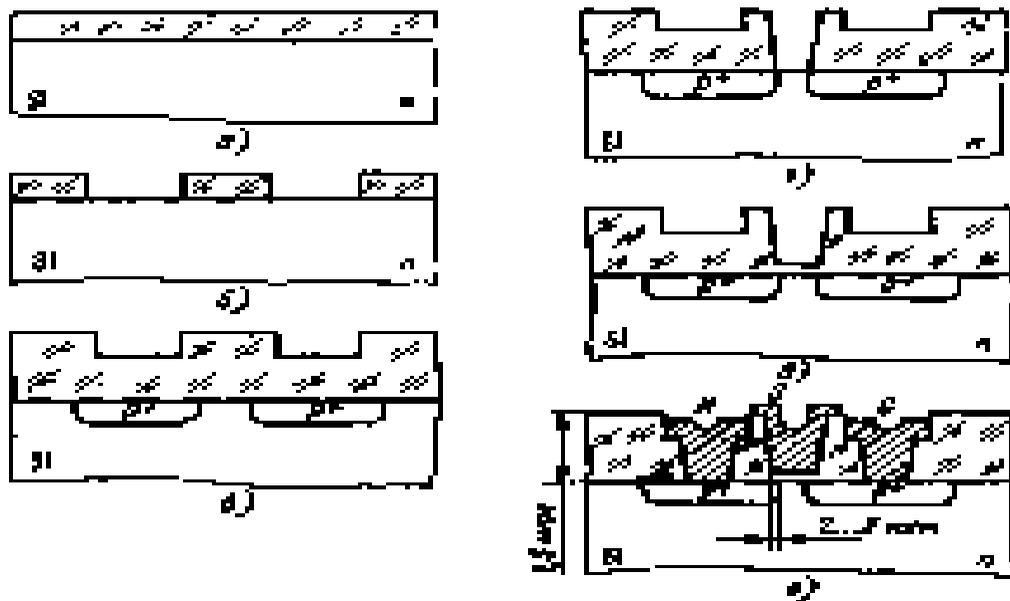


Схема изготовления толстооксидных МОП-ИС с р-каналами:

- а) выращивание маскирующего оксида; б) первая фотолитография; в) локальная диффузия, выращивание толстого оксида; г) вторая фотолитография;
- д) выращивание тонкого прозрачного оксида; е) третья фотолитография, формирование затворов и металлизация.

При толщине под затворного оксида 0,1 мкм перекрытие канала затвором составляет 2-3 мкм. Вместе с тем технология изготовления р-МОП - ИС сравнительно простая обеспечивает большой процент годных и низкую стоимость изделий. МОП-ИС с р-каналами широко используются в недорогих калькуляторах.

МОП-ИС с n - каналами технологически сложнее р-канальных. Также необходимы специальные меры для ограничения влияния n - инверсных слоев на изоляцию элементов друг от друга и на пороговое напряжения транзисторов (1).

Процесс изготовления n-МОП - ИС структур отличается от рассмотренной технологии р-МОП - ИС тем, что после получения областей истоков и стоков с их внешней стороны внедряют ионы бора (2). При выращивании толстого оксида одновременно происходит отжиг и получается р<sup>+</sup>-область, ограничивающая распространение под оксидом n - инверсного слоя. Этим исключается электрическая связь между элементами.

Второе отличие состоит во внедрении ионов бора в область канала после термического выращивания тонкого под затворного оксида (3) с целью получения определенного значения порогового напряжения транзисторов. Без этого в канале был бы инверсный n - слой. Окончательная структура n-МОП - ИС отличается обязательным наличием ограничительной р<sup>+</sup>-области (2). Легирование канала уменьшает подвижность электронов и увеличивает емкость "канал-подложка". Поэтому, когда необходимо обеспечить высокое быстродействие интегральной схемы, канал не легируют, а подают на подложку обратное относительно истока смещение.

Рисунок

## Лекция №18

### КМОП-КНС-ИС

Такие структуры отличаются низкими паразитными емкостями и токами утечки;

уменьшение размеров элементов и внутренних емкостей существенно повышает быстродействие, стойкость к радиации, степень интеграции, снижает рассеивания мощности.

При изготовлении КМОП-КНС-ИС применяются те же технологические методы, что при изготовлении монокристаллических МОП-ИС.

В связи с несовместимостью структур сапфира и кремния необходима тщательная подготовка поверхности сапфира к гетероэпитаксии. В отличие от кремниевых пластин сапфировые подложки практически не деформируются при высокотемпературных обработках. Их можно вторично обрабатывать, т.е. возможно исправление брака.

Процесс состоит в получении на поверхности исходной гетероэпитаксиальной структуры кремний на сапфире (КНС) островков p-Si и n-Si и в формировании в них n- и p-канальных МОП-транзисторов соответственно.

Основные факторы ограничивающие стоимость и качество КМОП-КНС-ИС:

- высокая стоимость сапфира;
- сложность его механической обработки, связанная с большой твердостью;
- жесткие требования к качеству подготовки поверхности из-за несовместимости кристаллической решетки сапфира с кремниевой.

Все это привело к проявлению структур «кремний на аморфных подложках».

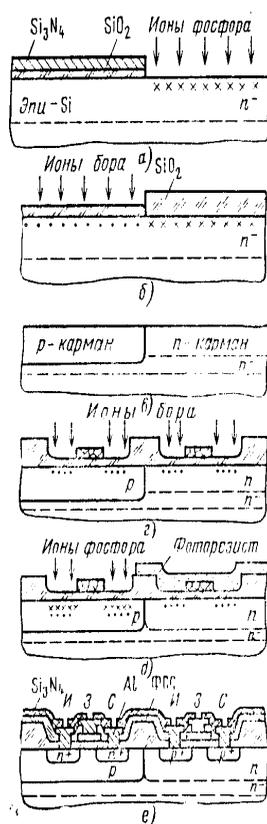


Схема изготовления КМОП-ИМ на эпитаксиальной структуре с двойными р-, п-карманами

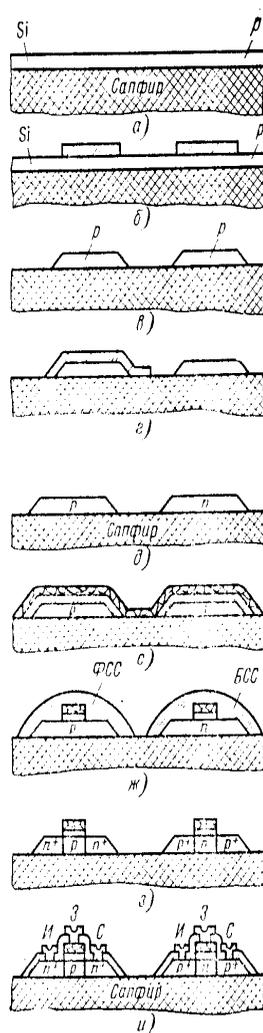


Схема изготовления КМОП-КНС-ИМ с поликремниевыми затворами:  
 а- очистка поверхности структуры КНС;  
 б- формирование  $\text{SiO}_2$ -маски;  
 в- локальное травление удаление маски;  
 г- маскирование и диффузия (или ионное легирование) фосфора;  
 д- удаление маски;  
 е- нанесение тонкого подзатворного диэлектрика и слоя поликристаллического кремния;  
 ж- фотолитография, нанесение ФСС и БСС;  
 з- диффузия и удаление стекла;  
 и- металлизация;

## Лекция №19

### Металлизация структур

Металлизация завершает процесс формирования полупроводниковых структур. Все системы металлизации, применяемые в настоящее время в производстве кремниевых интегральных схем или навесных активных элементов, можно разделить на следующие типы:

- однослойная;

- многослойная;
- многоуровневая;
- объемная (объёмные выводы).

Однослойная алюминиевая (Al) металлизации применяется преимущественно в интегральных схемах малой и средней степени интеграции, не слишком мощных работающих на частотах до 1 ГГц, не рассчитанных на высокие требования к надежности.

Алюминий больше, чем другие металлы, отвечает требованиям, предъявляемым к металлизации. Он имеет высокую электропроводность, низкоомный контакт к p-Si и n<sup>+</sup>-Si, хорошую адгезию к Si и SiO<sub>2</sub>. Он технологичен, не дорог, пластичен и поэтому стоек к изменениям температуры. Интегральные схемы с алюминиевой металлизацией стойки к радиации.

Процесс получения алюминиевой металлизации состоит в нанесении пленки, литографии по пленке и защите поверхности. Перед нанесением пленки на поверхности структуры формируют SiO<sub>2</sub> -маску с окнами в местах будущих контактов с активными областями.

Нанесение пленки алюминия можно выполнять методом термовакuumного напыления (ТВН), магнетронным распылением, осаждением из парогазовой фазы (ПГФ).

Получить качественные незагрязненные пленки методом термовакuumного напыления сложно, на поверхности алюминия имеется затрудняющая испарение пленка оксида алюминия. Расплавленный алюминий образует летучие сплавы с материалами испарителей.

Электронно-лучевое испарения, уменьшающее загрязнение пленок и повышающее. производительность процесса, усложняет конструкцию установок:

Менее активно взаимодействует расплавленный алюминий с тиглями из нитрида бора (BN), нитрида алюминия (AlN) и борида титана.

Срок службы этих индукционно нагреваемых тиглей высок.

Магнетронное распыление в настоящее время начало широко применяться для нанесения пленок алюминия и его сплавов. Оно обеспечивает высокую скорость до 1мкм/час и хорошее качество металлизации.

Осаждение алюминия из парогазовой фазы пока применяется в лабораторных условиях.

Режимы нанесения алюминия подбирают так, чтобы обеспечить хорошую адгезию металлизации, упорядоченную структуру пленки, минимальный электрический заряд в нижележащей SiO<sub>2</sub> пленке, а так же минимальные механические напряжения системы Si-SiO<sub>2</sub>-Al.

Литография по пленке алюминия необходимо для получения топологии проводящих дорожек, контактов к активным областям и контактных площадок. Для удаления фоторезистивной маски нельзя использовать кислоты, фоторезист удаляют в горячем диметилформамиде или в кислородной плазме.

Недостатки алюминиевой металлизации:

- высокая растворимость кремния в алюминии в твердой фазе (около 1% при T=500°C) при охлаждении кремний осаждается по границам зерен и уменьшает механическую прочность контакта Al-Si;
- низкая температура эвтектики контакта Al-Si, 577°C;
- низкая механическая прочность алюминиевой металлизации из-за мягкости алюминия;
- большой температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) алюминия по сравнению с температурным коэффициентом линейного расширения Si и SiO<sub>2</sub>;
- химическое взаимодействия алюминия с SiO<sub>2</sub>, которое начинается при 45°C и идет интенсивно при 500°C:  $3\text{SiO}_2 + 4\text{Al} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Si}$ ;
- низкая стойкость алюминия по отношению к кислотам, щелочам и

- склонность к коррозии;
- образование при повышенных температурах хрупких интерметаллических соединений с золотом  $Au_2Al$  и  $AuAl_2$ . При образовании этих соединений алюминий диффундирует в золото Au быстрее чем Au в Al, образующиеся пустоты и трещины еще более ослабляют место подсоединения золотой проволочки к алюминиевой контактной площадке, а интерметаллические соединения золота с алюминием растворяют кремний;
  - трудность подсоединения выводов к пленке алюминия обычными методами пайки и невозможность электролитического осаждения алюминия.

## Лекция № 20

### Многослойная металлизация

Контактный слой - первый по порядку нанесения на кремний, должен выполняться из металла, мало проникающего в кремний, не вступающего с ним в нежелательный взаимодействия имеющего малую растворимость и коэффициент диффузии в кремний и в тоже время хорошую адгезию как к кремний, так и к  $SiO_2$ , низкое переходное сопротивление.

Для контактного слоя могут быть использованы вольфрам, молибден, хром, никель, алюминий, титан, палладий, силициды тугоплавких металлов, платины, палладия, поликремний.

Силициды тугоплавких металлов по сравнению с поликремнием имеют на порядок большую проводимость, стойкость при термообработках, стабильность свойств, совместимость операции получения силицидов с общей технологией изготовления интегральной схемы.

Силицидные пленки получают:

- катодным распылением силицидной мишени, одновременным термовакуумным напылением кремния и металла;
- осаждением из парогазовой фазы;
- нанесением тугоплавкого металла на кремний с последующим их взаимодействием при термообработке, например, при лазерном облучении.

Проводящий слой - последний по порядку нанесения слой металлизации, должен иметь хорошую электропроводность и обеспечивать качественное надежное подсоединение контактных площадок к выводам корпуса. Для проводящих слоев применяют медь, алюминий, золото.

Двухслойные системы превосходят алюминиевую металлизацию по максимальной плотности тока и времени наработки на отказ при аналогичных условиях эксплуатации.

Разделительный (барьерный) слой - применяются в случаях, когда сложно подобрать хорошо согласующиеся материалы контактного и проводящего слоев. Барьерный слой предотвращает образование интерметаллических соединений между верхним и нижними слоями, например между Cr и Au, а так же препятствует диффузии металла одного слоя в другой, приводящей к ухудшению механической прочности и изменению сопротивления контакта.

В качестве барьерного слоя применяют серебро, золото, молибден, вольфрам, никель, палладий. Последний обладает более совершенными свойствами.

### **Многоуровневая металлизация**

Многоуровневая металлизация применяется в больших интегральных схемах (БИС) и сверхбольших интегральных схемах (СБИС). Увеличение числа элементов увеличивает и площадь межэлементных соединений, поэтому их размещают в нескольких

уровней, разделенных изолирующими слоями и соединёнными и между собой в нужных местах. Металлические слои многоуровневых систем могут быть одно- или многослойными и должны отвечать тем же требованиям что и слои одноуровневых систем. Изолирующие диэлектрические плёнки должны иметь высокое напряжение пробоя, низкие диэлектрическую постоянную минимальное химическое взаимодействие с прилегающими пленками, низкий уровень механических напряжений, низкую плотность связанного электрического заряда.

Технология металлизации включает: формирование первого уровня металлизации, получение изолирующего слоя с последующим вскрытием межуровневых контактных окон, формирования 2-го уровня металлизации и т.д.

Многие серийно выпускаемые большие интегральные схемы БИС изготавливаются на основе алюминиевой Al металлизации с изолирующими слоями  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и др.

Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Al металлизация более надежна из-за лучших изолирующих свойств  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В отличие от  $\text{SiO}_2$  - пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - пленки не пропускают ионы натрия, менее чувствительны к воздействиям атмосферы, паров воды, стойки к радиации.

### **Объемные выводы**

Выполняет одновременно роль контактов к активным областям и роль выводов от контактов, т.е. контакт и вывод представляет собой единое конструктивное целое. Их формируют на кристаллах для гибридных интегральных схем ГИС.

## **Лекция № 21**

### **Технологические процессы изготовления гибридных интегральных схем**

В плёночных интегральных схемах элементы создаются осаждением тонких плёнок на диэлектрические подложки. Подложка служит механическим основанием интегральной схемы и, будучи диэлектриком, изолирует её элементы.

По тонкоплёночной технологии в настоящее время изготавливаются только пассивные элементы (в основном, резисторы и конденсаторы) микросхем. Дополненные активными элементами (диодами, транзисторами, полупроводниковыми интегральными схемами) плёночные интегральные схемы принято называть гибридными интегральными схемами. Активные элементы в них укрепляются на подложке методом навесного монтажа. Пассивные и активные элементы гибридных интегральных схем создаются в двух независимых друг от друга циклах, что обеспечивает им следующие преимущества:

Простота изготовления, малая трудоёмкость, непродолжительность производственного цикла, низкая стоимость.

Использование в качестве активных элементов полупроводниковых интегральных схем и многоуровневого расположения пассивных элементов расширяет схемотехнические возможности при создании больших гибридных интегральных схем.

#### **Материалы подложек**

Размеры подложек выбираются в соответствии со степенью интеграции микросхем. Что касается материалов, то их выбор определяется влиянием их свойств на параметры и характеристики плёночных элементов и подложек:

- Боросиликатное стекло -  $\text{SiO}_2$  (80%),  $\text{B}_2\text{O}_3$  (12%) и ряда других оксидов ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

- Алумосиликатное стекло-  $\text{SiO}_2$  (60%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20%) и других окислов ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ).
- Алумооксидная керамика типа “Поликор” -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (99,8%),  $\text{B}_2\text{O}_3$  (0,1%),  $\text{MgO}$  (0,1%).
- Бериллиевая керамика –  $\text{BeO}$  (от 98 до 99,5%).
- Ситаллы-стеклокерамические материалы, получаемые в результате термообработки (кристаллизации) стекла. Большинство ситаллов характеризуются следующим составом окислов:
  - 1)  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ ;
  - 2)  $\text{RO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$  (RO- один из окислов  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  или  $\text{BaO}$ ).
- Сапфир чистый монокристаллический  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\alpha$  - модификации. Сравнительный анализ этих материалов позволяет сделать следующие выводы:

**Стекла** имеют не достаточную прочность, недостаточную химическую стойкость, для них характерно сильное газовыделение при нагреве. Из - за содержания окислов щелочных металлов в них возможно образования ионов этих металлов, обладающих повышенной миграцией при приложении электрического поля и обуславливающих не стабильность свойств подложек и элементов микросхем. Стекла имеют низкую теплопроводность.

**Керамика**, особенно бериллиевая по сравнению со стеклами: имеет значительно большую теплопроводность и механическую стабильность. Большие размеры зерен керамических материалов не позволяет получить удовлетворительный микрорельеф поверхности для тонкопленочных микросхем. Керамика широко используются для подложки толстопленочных микросхем.

**Ситаллы** в 2-3 раза превосходит стекла по механической прочности. Они хорошо прессуются, вытягиваются, прокачиваются. По диэлектрическим свойствам ситаллы превосходят стекла и практически не

уступает керамике.

**Сапфир** характеризуется хорошими диэлектрическими свойствами, однако имеет более высокую стоимость по сравнению с ситаллами.

По совокупности диэлектрических и механических свойств, микрорельефу поверхности, стойкости к химическому воздействию наиболее применяемыми материалами подложек для тонкопленочных микросхем являются ситаллы для толстопленочных – 96%-ная алюмооксидная керамика.

### **Материалы плёнок в тонкоплёночных микросхемах**

Основными элементами тонкопленочных микросхем являются резисторы и конденсаторы.

Тонкопленочные индуктивности практически не применяются из-за сложности их изготовления. Материалы, используемые для тонкопленочных резисторов, можно разделить на три группы:

- металлы;
- металлические сплавы;
- металлодиэлектрические смеси - керметы.

При осаждение в виде тонких пленок удельное сопротивление металлов ( $\rho$ ) может значительно увеличиваться. Наиболее существенный вклад в повышение  $\rho$  вносится дефектами структуры и примесями. Учитывая это, в процессе осаждения некоторых металлических пленок намеренно создаются условия для газопоглощения.

Наиболее широкие распространения для изготовления металлических резисторов имеют хром и тантал. Большой интерес к танталу как материалу для тонкопленочных резисторов обусловлен его способностью легко окисляться при химическом анодировании. Частично окисляя пленку тантала, можно тем самым уменьшать толщину резистивного слоя и одновременно обеспечивать защиту поверхности резистора. Кроме того, установлено, что танталовые пленки при введении

в них ряда примесей приобретают высокое поверхностное сопротивление слоя при низком температурном коэффициенте. Особенно хорошие результаты в качестве примеси дает азот.

Тонкой пленки полупроводниковых материалов не используются для изготовления резисторов силу большого отрицательного температурного коэффициента сопротивления.

Помимо металлов для изготовления резисторов широко используются металлические сплавы, обладающие более высоким  $\rho$  даже в объёмных образцах. К таким сплавам, в первую очередь, относятся сплав никеля (Ni) и хрома (Cr) – нихром с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Керметы представляют собой металлodieлектрические смеси. Созданию таких материалов и их широкому использованию для получения резисторов способствовали положительные результаты, полученные при окислении, азотировании и других методах введения примесей в металлические пленки при их отжигах. Намеренное изготовление смесей металлов и диэлектриков позволило получить наиболее высокие значения  $\rho$ . Удельное сопротивление пленок керметов в большой степени зависит от их состава. Поэтому точное воспроизведение состава кермета в пленке играет исключительно важную роль. Обычно для напыления применяют метод взрывного испарения.

Изучено большое число комбинаций металл – диэлектрик: Cr – SiO, Al – SiO<sub>2</sub>, Pt – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и другие. Наилучшие результаты получены для комбинации Cr – SiO (кермет).

## Лекция № 22

### Материалы для тонкопленочных конденсаторов

Тонкопленочный конденсатор имеет трехслойную структуру металл-диэлектрик-металл распложенную на изолирующей подложке. Параметры тонкопленочного конденсатора определяются, в основном,

диэлектрическим материалом. Однако следует иметь в виду, что на свойства диэлектрика могут оказывать существенные влияние металлические обкладки. Например может уменьшаться напряжение пробоя из-за миграции атомов металла в слой диэлектрика.

К основным характеристикам диэлектрических материалов для конденсаторов относятся

1) удельная ёмкость  $C_{уд} = \frac{\epsilon E_0}{h}$ , ( $\epsilon E_0$  – диэл. постоянная и  $h$  – толщина слоя диэлектрика)

2) электрическая прочность  $E_d U_d = E_d h$  ;  $E_d = \frac{U_d}{h}$ ; ( $U_d$  – напряжение пробоя).

Из-за сложности получения бездефектных пленок на большой площади максимальная площадь конденсатора ограничивается. Минимальная площадь ограничивается заданной точностью. Поскольку существует предел и для минимальной толщины пленок (из-за влияния проколов в пленке диэлектрика на ее электрическую прочность), то при изготовлении тонкопленочных конденсаторов к диэлектрическим материалам предъявляются определенные требования по диэлектрической проницаемости. Если ограничить толщину пленки значением  $h=0,1\text{ мкм}$ , а максимально допустимую площадь соответственно  $10\text{ мм}^2$ , то для получения емкости  $10^6\text{ пФ}$  требуемая диэлектрическая проницаемость составит более 10.

Электрическая прочность диэлектрического материала определяет напряжение пробоя  $U_d = E_d h$ , а следовательно, диапазон рабочих напряжений конденсатора.

Диэлектрические материалы должны обладать минимальной гигроскопичностью, высокой механической прочностью при циклических изменениях температуры, хорошей адгезией к подложкам.

Диэлектрические материалы, используемые для тонкопленочных

конденсаторов в основном, представляют собой окислы полупроводников и металлов.

Из окислов полупроводников наиболее распространение в тонкопленочной технологии получили окисел кремния  $\text{SiO}_2$  и окисел германия  $\text{GeO}_2$ , имеющие высокую диэлектрическую проницаемость. Плёнки двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  существенно реже используются в тонкопленочной технологии, что отчасти связано с более низкими значениями диэлектрической проницаемости, а также с невозможностью использования для осаждения  $\text{SiO}_2$  метода вакуумного термического испарения, поскольку давление паров  $\text{SiO}_2$  при  $T=1600^\circ\text{C}$  приблизительно на пять порядков ниже, чем у  $\text{SiO}$ .

Наибольший интерес представляет ряд окислов тугоплавких металлов, таких как,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ . Эти материалы по сравнению с другими окислами обладает наиболее высокими значениями диэлектрической проницаемости. Наиболее отработана технология пленок  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

### **Тонкопленочные проводники**

Тонкопленочные проводники в микросхемах служат для соединения пассивных тонкопленочных элементов и создания контактных площадок для присоединения активных навесных элементов и внешних выводов. Тонкопленочные проводящие материала должны иметь следующие свойства:

- высокую электропроводность;
- хорошую адгезию к подложке;
- способность к сварке или пайке;
- химическую инертность.

К материалам с высокой электрической проводимостью относятся золото (Au), серебро (Ag), алюминий (Al). Однако пленки этих металлов не удовлетворяют всей перечисленной совокупностью свойств. Например, благородные металлы (Au, Ag) имеют плохую адгезию к подложке,

алюминиевые плёнки плохо поддаются пайке и сварке, медь легко окисляется.

Поэтому для получения тонкопленочных проводников используются многослойные композиции. Эти композиции включают:

- подслоя толщиной  $(1...3)10^{-2}$  мкм из материала, обеспечивающего хорошую адгезию;
- слой из материала с высокой электропроводностью толщиной 0,4...0,8 мкм;
- покрытие толщиной  $(5...8)10^{-2}$  мкм из химически инертного материала с хорошей способностью к сварке или пайке.

**При использовании в качестве подслоя нихром:**

Материалы для слоя	Материалы для покрытия	Сопротивление слоя (Ом/□)
Золото (Au)		0,03.....0,04
Медь (Cu)	Никель (Ni)	0,02.....0,04
Медь (Cu)	Серебро (Ag)	0,02.....0,04
Алюминий (Al)	Никель (Ni)	0,1.....0,2

## Лекция № 23

### Типовые маршруты технологии тонкопленочных структур

**Изготовление тонкопленочных структур с помощью свободных масок.**

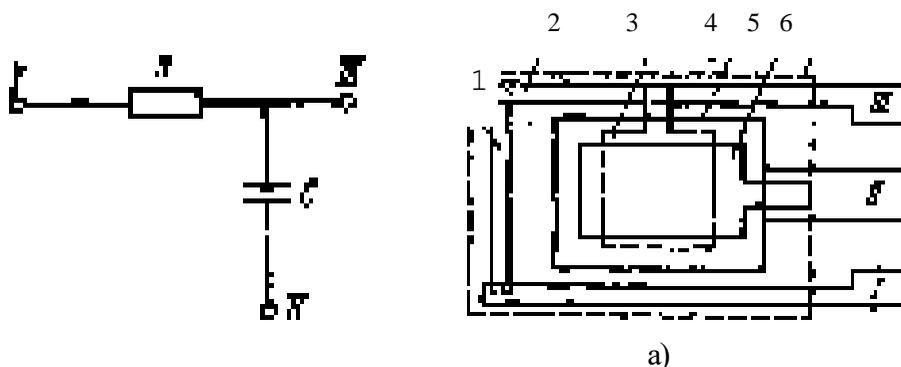
Свободные металлические маски для получения топологии элементов можно использовать только в сочетании с методами термовакuumного напыления и ионно-плазменного распыления. При получении тонких пленок методом катодного распыления применять металлические свободные маски нельзя, так как они искажают

электрическое поле между катодом и анодом. В результате энергия бомбардирующих катод ионов аргона или другого ионизированного газа резко уменьшается, что приводит к значительному уменьшению скорости осаждения пленок или к полному прекращению процесса. Применения не искажающих электрическое поле свободных масок из диэлектрических материалов, например, из фотоситалла, пока ограничено сложностью их технологии. Изготовление тонкопленочных структур может выполняться в непрерывных, отдельных и комбинированных вакуумных процессах.

При непрерывных вакуумных процессах все технологические слои структуры получают в одной установке без разгерметизации вакуумной камеры. Исключается взаимодействие наносимых плёнок с воздухом. Общее время процесса напыления уменьшается. Однако непрерывный способ требует сложной внутрикамерной арматуры, работа которой в условиях повышенных температур и высокого вакуума затруднена. Для уменьшения взаимного загрязнения плёнок необходима надежная экранировка подложек и испарителей, кроме того, контроль пленок затруднен.

При отдельных вакуумных процессах каждая пленка наносится в отдельной вакуумной установке. Этим уменьшается взаимное загрязнение пленок. Внутрикамерные устройства более просты по сравнению с устройствами для непрерывного напыления. Возможен межоперационный контроль. Совмещение слоев упрощается, так как производится на воздухе. К недостаткам отдельного способа относятся возможность загрязнения пленок при переносе в следующие вакуумные камеры и длительность общего процесса из-за неоднократной откачки и разгерметизации.

Комбинированные вакуумные процессы применяются наиболее часто. Рассмотрим такой процесс на примере изготовления тонкопленочной структуры РС-ИМ.



б)

**Принципиальная электрическая схема а) и топология б) тонкоплёночной RC-ИМ:**

1-резистор (хром), 2- проводящие дорожки и контактные площадки (медь с подслоем хрома), 3- нижняя обкладка конденсатора (алюминий), 4- диэлектрик конденсатора (монооксид германия), 5- верхняя обкладка конденсатора (алюминий), 6- защитный слой (монооксид кремния)

Процесс изготовления тонкопленочной RC – структуры с помощью свободных масок может быть разделен на два этапа (рис.):

I. Напыление резистивных и проводниковых пленок выполняется в одной вакуумной камере в непрерывном процессе.

В процессе напыления хром (Cr) активно взаимодействует с остаточным кислородом, что позволяет получать высокие удельные сопротивления пленок. Напыления хрома ведут на подогретые до температуры 200-250°C подложки. При достижении требуемой температуры подложек испаритель хрома подводят на позицию испарения и падают на него напряжение. При нагреве испарителя вакуум в камера ухудшается, так как с поверхностей испарителя и навески хрома (Cr) происходит выделение газов. После окончания газовой выделение и восстановления вакуума открывают заслонку и напыляют пленку Cr на подложку и «свидетель». При достижении требуемой толщины пленки заслонку закрывают, на позицию испарения переводят следующую подложку и так процесс продолжают для напыления пленки на все

подложки.

Медь, в отличие от хрома, испаряют из жидкого состояния. Она практически не взаимодействует с тугоплавкими материалами. Из которых для испарителей предпочитают молибден, так как он хорошо обрабатывается механически и хорошо проводит тепло. Для предотвращения разбрызгивания меди ее нагрев выполняют ступенчато: сначала доводят до расплавления, а затем ток через испаритель плавно увеличивают до рабочего значения, открывают заслонку и ведут напыление на подложку.

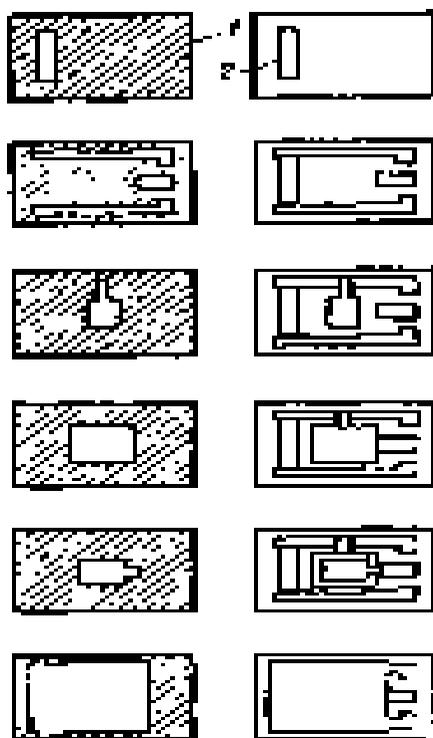


Схема изготовления тонкоплёночной РС-ИМ с помощью свободных масок:  
 а) напыление резисторов проводников и контактных площадок  
 б) напыление слоев конденсатора и защитной пленки  
 1-свободная маска  
 2- подложка

Напыление слоев конденсатора и защитного слоя выполняют в другой установке. Такое построение процесса позволяет после напыления проводников и контактных площадок выполнять контроль параметров резисторов и подгонку номиналов. (Защитный слой SiO- монооксида кремния обычно испаряют из танталовых или молибденовых испарителей, монооксид кремния отличается высокими адсорбционными свойствами, поэтому перед напылением на подложки его тщательно обезгаживают до полного восстановления вакуума в рабочей камере).

## **Изготовление тонкопленочных структур с применением фотолитографии**

Фотолитография – сложный и дорогостоящий процесс, поэтому ее применяют только тогда, когда с помощью свободных масок нельзя получить сложную топологию и высокую точность номиналов элементов.

## Лекция № 24

### Монтаж кристаллов и присоединение выводов

При сборке п/п приборов и ИС кристалла или платы устанавливают на основания корпусов и выполняют эл.соединения. Эл.соединения создают между контактными площадями, представляющими собой металлизированные участки кристаллов, и гибкими или жесткими выводами. Основные трудности выполнения таких эл.-х соединений связаны :

- с небольшой толщиной (0,25 - 2,0 мкм) и сравнительно не высокой прочностью нанесенных пленок
- малыми размерами контактных площадок и большой толщиной или диаметром (25-180 мкм) выводов .

Таким образом, из-за большой разницы толщины происходит либо порог тонкопленочных площадок, либо не достаточный нагрев выводов и образуется не прочные соединения.

Клеевые соединения- выполняют, используя токопроводящие клеи. Контактторы изготавливаются на основе эпоксидных или полиэфирных смол с наполнителем из мелко дисперсного (около 1 мкм) металлического порошка и имеют низкое объемное удельное эл. сопротивление  $\rho = (2 - 100)10^{-4} \text{ Ом.м}$

Однако 1) Неоднородность состава контактора от капли к капле. малый 2) Малый срок годности. 3).Плохая устойчивость к влаге и тем-ре. 4).недостаточная адгезия к некоторым металлическим поверхностям. 5).Наличие внутренних напряжения. 6).Усадка при охлаждении.7). Высокий ТКЛР, резко отличающиеся от ТКЛР соединяемых деталей, и большая площадь соединений.(0,2-0,3 мм<sup>2</sup>).

Ограничивают применение этого или контактирование.

Пайка- это процесс соединения двух металлических деталей в твердом состоянии с помощью припоя, заполняющего пространство между ними. При пайке место соединения деталей и припоя разогревают

до тем-ры выше его плавления. Расплавленный припой, смачивая соединяемые поверхности, диффузирует в них на небольшую глубину, а соединяемые поверхности частично растворяется в припое. Образующиеся шов после остывания прочно соединяет детали.

Обычно пайку выполняют без флюса или используя пассивные флюсы, предохраняющие детали и припой окисления. Более широкое распространение получила пайка прикреплении подложек и кристаллов к основаниям корпусов. Так пайка с использованием мягких припоев или эвтектических сплавов обеспечивает:

- малое сопротивление соединений
- и хорошее согласование по ТКЛР с материалом корпуса
- достаточные теплопроводность и механическую прочность.

Для этих целей применяют припои, например Au –Si и Pb- Sn- Ag. температура плавления соответственно 280-300 С. Установочную плотность кристалла покрывают слое металлизации, а основания корпусов слоем Ni или Ag.

Эвтектический сплав Au-Si (94 и 6 мас.%), имеющий, темп-ру плавления 370 С, используют в виде фольговых которые помещают между кристаллами и основаниями корпусов. Для создания надежных соединений и температура должна быть в пределах 390-420 С, а давление 1-3 Н/мм. поддерживаться в течение 3-5 сек.

Пайку стеклом применяют только при монтаже кристаллов в корпуса. Легкоплавкие стёкла С84-1, С88-1, С89-3, С90-1 имеют ТКЛР, равный  $(8,4-9,0) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  и температуру размягчения не более 550 С . использование стекла исключают электрический контакт кристаллов с корпусами.

Микросварка - это процесс образования неразъемных соединений деталей их сплавлением или деформированием в результате чего возникают побочные связи между атомами соединяемых материалов. Сварка отличается от пайки меньшими загрязнениями и газона-

насыщением мест контактированием что обусловлено отсутствием примеси.

Сварка давлением основана на одновременном действии темп-ры и давления на соединяемые детали, которые при этом не расплавляются, а лишь увеличивается их пластичность. В результате пластической деформации одной или обеих соединяемых деталей между их поверхностями вследствие металлических связей возникает физический контакт и происходит взаимная диффузия.

Соединение металлических деталей с металлическими или не металлическими под действием высоких, давления и т-ры называют термокомпрессией. Этим методом можно сваривать круглые и плавкие проводники с тонкими металлическими пленками, нанесенными на хрупкие подложке.

Так, при соединений золотой проволокой алюминиевых контактовых площадок кристаллов с выводами корпусов режим термокомпрессии следующий,

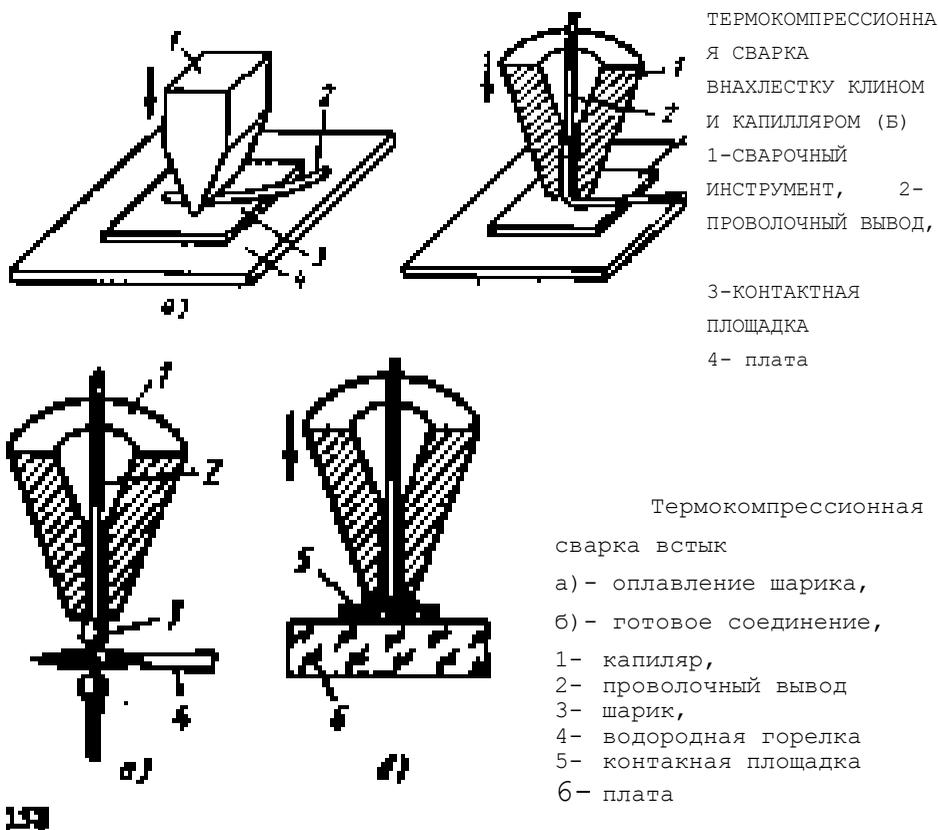
Температура 350 С

Давление  $10^8$  Н/м<sup>2</sup>

Время 0,5-3 сек

При этом деформация присоединяемой детали составляет 30-60%

Сварочный инструмент обычно выполняют в виде иглы или капилляра и твердых сплавов ВК-6М.ВК-15,оксида бериллия иди синтетического корунда.



## Лекция № 25

### Микросварка

Не все материалы свариваются термокомпрессией. Кроме этого, соединяемые поверхности не обходимо предварительно тщательно готовить.

В тех случаях, когда свариваемые поверхности покрыты достаточно прочной оксидной пленкой, соединение может быть не прочным, если не активизировать процесс сварки и не разрушить пленку. Сварочный инструмент из металлокерамического сплава или карбида титана прижимает с усилием  $P=20-150$  Н/мм кж. Вывод 4!к контактной площадке. При амплитуде ультразвуковых колебаний 0,5-5 мкм и частоте 20-60 кГц

микро неровности свариваемых поверхностей смекаются и сливаются, оксидная пленка разрушается и в результате в зоне контакта интенсивно выделяется теплота. Достоинство этого метода - возможность сварки деталей из различных материалов, значительно отличающихся по толщине.

- нем высокие требования к чистоте свариваемых.
- отсутствие структурных изменений в зоне сварки вследствие незначительного перегрева.

Ультразвуковую сварку выполняют на установках с автоматической подстройкой частоты, что позволяет выбирать оптимальные режимы.

Сварка плавлением - основана на нагревании свариваемых деталей до температуры плавления. При сварке сдвоенным электродом учитывается особенность выполнения соединений в ИС, которая предопределяет одностороннее расположение эл.-ов 2, объединенных в жесткую конструкцию с электроизоляционной прокладкой 1, толщина которой равна 30-220 мкм. В зависимости от диаметра проволочного вывода 3 длина и ширина терца каждого электрода соответственно составляют 20-100 и 80-600 мкм. Изготавливают электроды из вольфрама, молибдена или твердого сплава ВК-8. Такие электроды выдерживают до 30-40 тыс. сварок. В процессе сварки участок вывода контактная площадка является частью эл.-ой цепи и место контакта при прохождении через него электрического тока в результате выделения теплоты разогревается. Усилие прижатия электрода составляет 3-10 Н, время сварки от 0,005 до 0,02 сек. При лазерной сварке материалы соединяемых деталей под действием электромагнитного излучения высокой интенсивности расплавляются, а после охлаждения образуют сварной шов. Основное достоинство лазерной сварки:

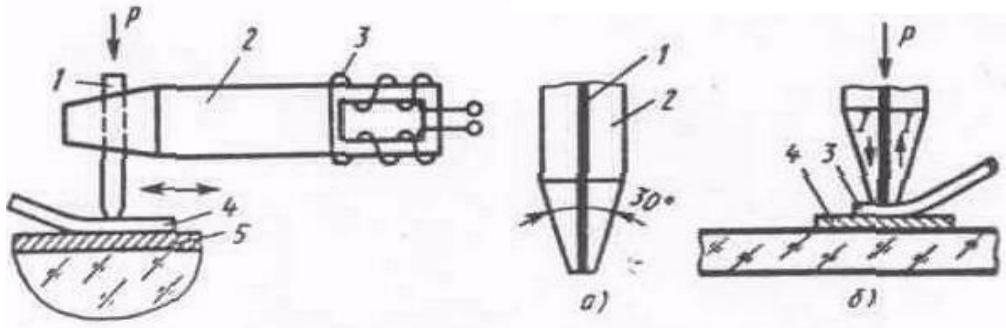


Схема ультра звуковой сварки:  
 1-сварочный инструмент, 2- волновод,  
 3- преобразователь, 4- вывод, 5- контактная  
 площадка

Сдвоенный электрод а) и схема б)  
 1- прокладка, 2-лектрод, 3- проволоочный  
 4-контактна площадка

- Возможность концентрации больших энергий на малых площадях в короткие промежутки времени. Это позволяет соединять лазерное сваркой практически любые металлы в непосредственной близости от металло-стеклянных и металл-керамических спаев.

- Отсутствие специальных средств, легкость фокусировки лазерного луча до диаметра 0,25-1 мм и возможность его проникновения через оптически прозрачные вещества делают этот метод наиболее перспективным для использования в микроэлектронике технологии. Электронно-лучевая сварка основана на тех же физических принципах, что и электронно-лучевые испарители.

### Герметизация п/п приборов и ИС

Герметизация является завершающим технологическим процессом изготовления п/п приборов и ИС.

Герметизацию проводят для полной изоляции элементов, компонентов, кристаллов и электрических соединений от окружающей среды, содержащей влагу, а также активные вещества, способные вызвать коррозию, химические взаимодействия и, как следствие, привести к выходу изделий из строя.

Различают:

- корпусную

- безкорпусную
- комбинированную герметизацию

Выбор способа герметизации зависит от конструкции прибора и должен обеспечить 1) механическую прочность изделия при его эксплуатации, 2) исключить чрезмерный нагрев элементов и выделение газов, паров металлов внутри корпуса в процессе герметизации, 3) выполнять в чистой и неактивной среде (инертный газ, осушенный воздух и т.п.) 4) допускать механизацию и автоматизацию.

### **Корпусная герметизация**

Предварительно изготавливают элементы корпусов- основания с изолированными выводами, крышки и вспомогательные детали.

После монтажа прибора, кристалла или платы на основание корпуса и микроконтактирования выводов присоединяют крышку, в результате образуется замкнутый объём.

В металлостеклянных корпусах основание и крышку выполняют из металла, а выводы изолируются от основания стеклом.

Металлокерамические корпуса состоят из керамического основания с выводами и металлической крышки, рамки.

Так-как из-за высокой температуры спекания керамики армировать основание металлическими выводами невозможно, их в специальной технологической рамке впаивают в него стеклом. Кроме того, к бортику керамического основания стеклом припаивают металлическую рамку, к которой саркой или пайкой присоединяют металлическую крышку. Так как рамка и крышка должны при пайке хорошо смачиваться припоем на основе олова, их предварительно покрывают тонким слоем никеля, Cu или Au. Выводы можно также присоединять к керамическому основанию с помощью проводящих паст.

## Литература

1. З.Ю. Готра “Технология микроэлектронных устройств” справочник 1991г
2. Курносков А.И., Юдин В.В. “Технология производства п/п-ковых приборов и ИС” высшая школа 1986г
3. Черняев В.Н. “Физико-Химические процессы в технологии РЭА” Высшая школа 1987г
4. Зи С “Технология СБИС” Мир 1985г
5. “Плазменная технология в производстве СБИС “ под редакцией П. Айнспрука и Д.Брауна Мир 1987г
6. Тилл У., Лаксон Дж “Интегральные схемы Материалы, Приборы, Изготовлени” Мир 1988г

## Оглавление

Лекция №1 Введение.....	3
Лекция №2 Механическая обработка полупроводниковых материалов.....	6
Лекция №3 Ультразвуковая абразивная обработка.....	11
Лекция №4 Химическая и электрохимическая обработка поверхности полупроводников.....	14
Лекция №5 Химическая обработка поверхности п/п-ковых пластин.....	19
Лекция №6 Получение структур методом диффузии .....	25
Лекция №7 Получение структур методом ионной имплантации.....	29
Лекция №8 Принцип действия и конструкция ионно-лучевого ускорителя (ИЛУ).....	32
Лекция №9 Фотолитография.....	36
Лекция №10 Фотошаблоны и способы их получения.....	40
Лекция №11 Проекционная оптическая Фотолитография.....	46
Лекция №12 Защитные диэлектрические пленки в пленарной технологии.....	50
Лекция №13 Термическое окисления кремния в сухом кислороде.....	54
Лекция №14 Пиромитическое осаждение оксидных пленок кремния.....	58
Лекция №15 Изготовления биполярных структур.....	64
Лекция №16 Биполярные ИС с комбинированной изоляцией.....	69
Лекция №17 Изготовление МОП- структур.....	72
Лекция №18 КМОП-КНС-ИС.....	74
Лекция №19 Металлизация структур.....	76
Лекция №20 Многослойная металлизация.....	79

Лекция№21	Технологические процессы изготовления гибридных интегральных микросхем.....	81
Лекция№22	Материалы для тонко пленочных конденсаторов.....	84
Лекция№23	Типовые маршруты технологии тонкопленочных структур.....	85
Лекция№24	Монтаж кристаллов и присоединение выводов.....	90
Лекция№25	Микросварка.....	93
Литература.....		98