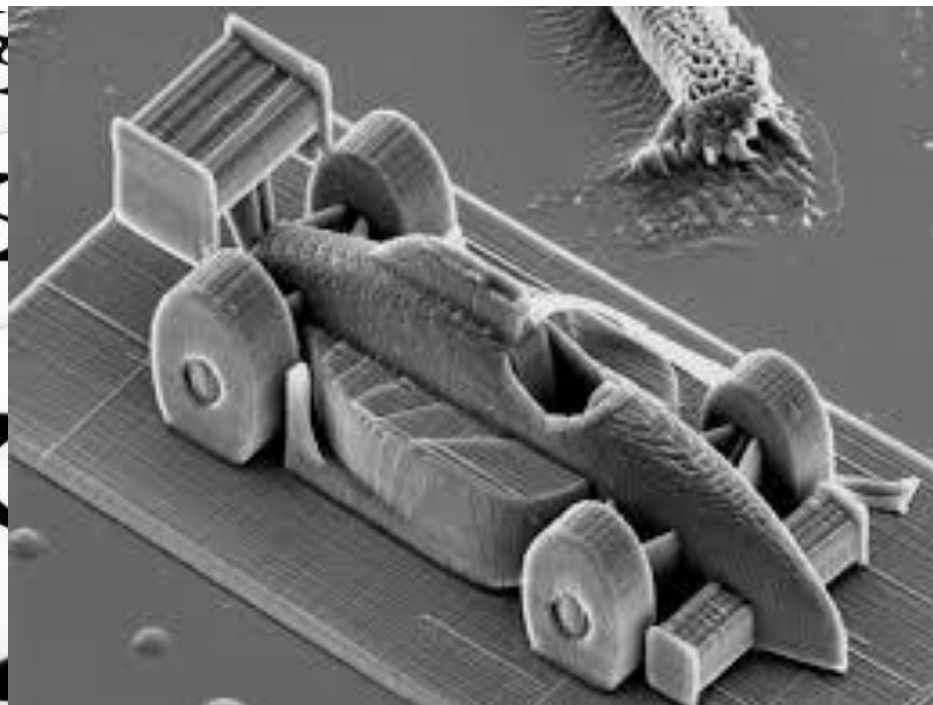
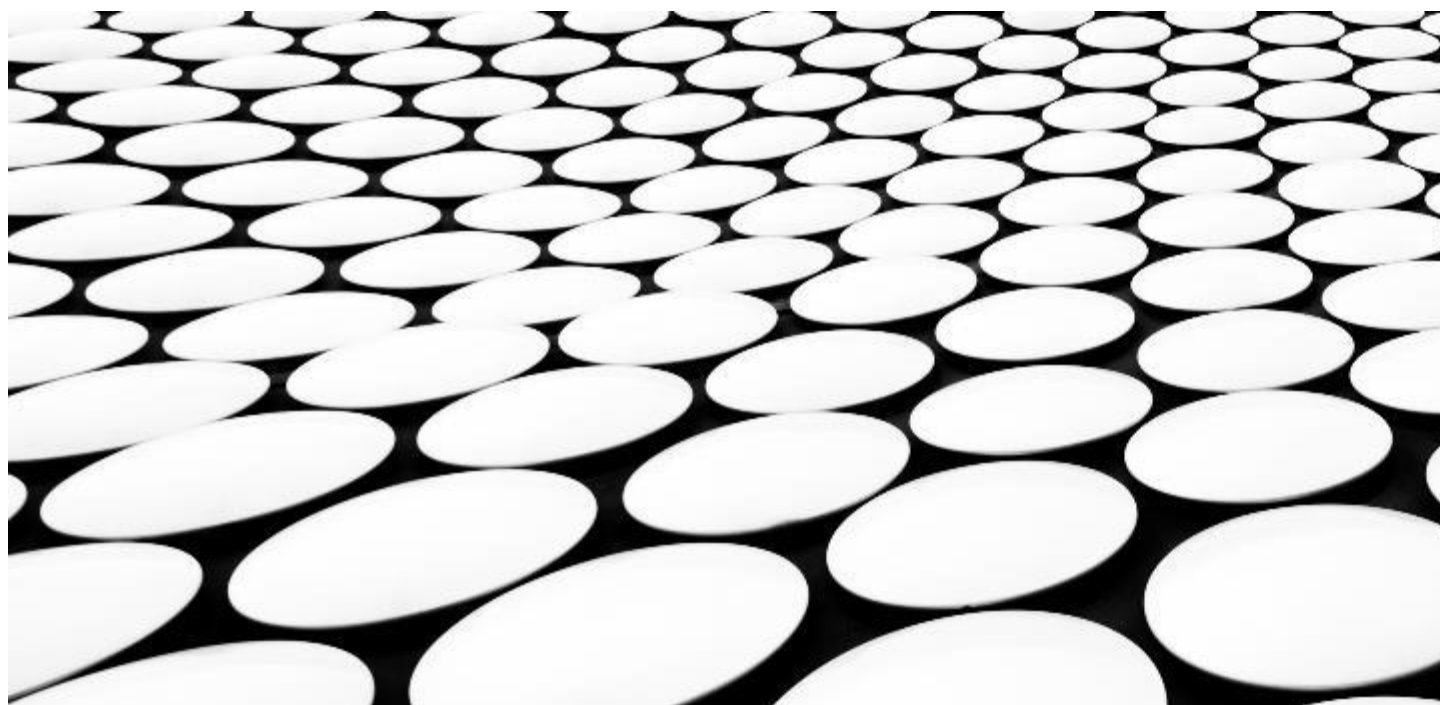


ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

БЛОК 1.1

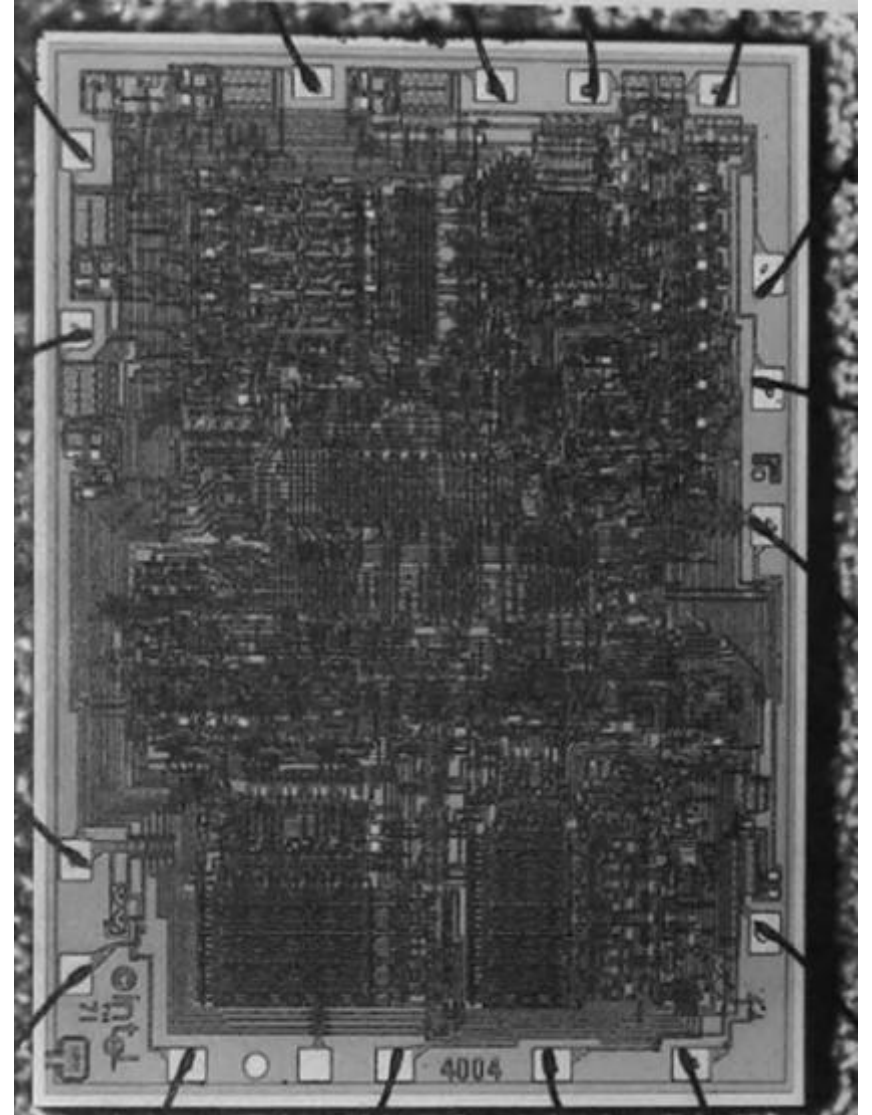
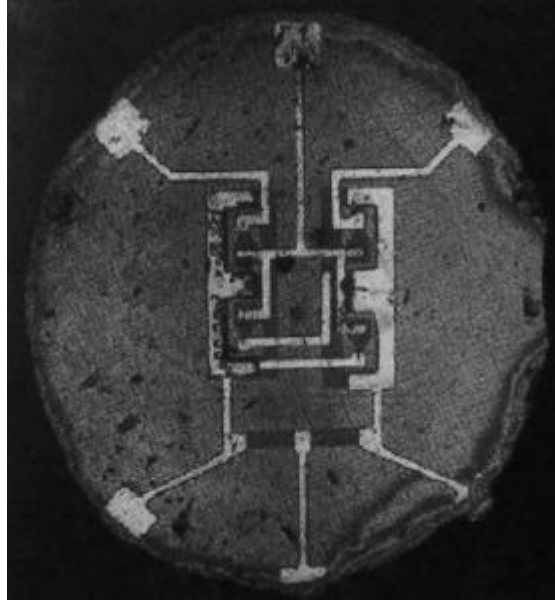
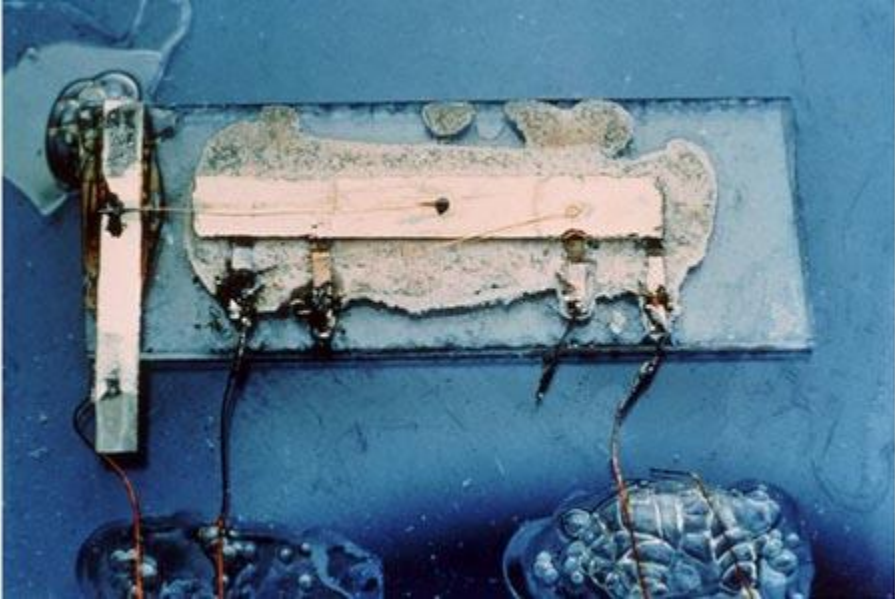
КРЕМНИЙ И ГЕРМАНИЙ: МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ТРАВЛЕНИЕ, ОКИСЛЕНИЕ, ОСАЖДЕНИЕ



БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ

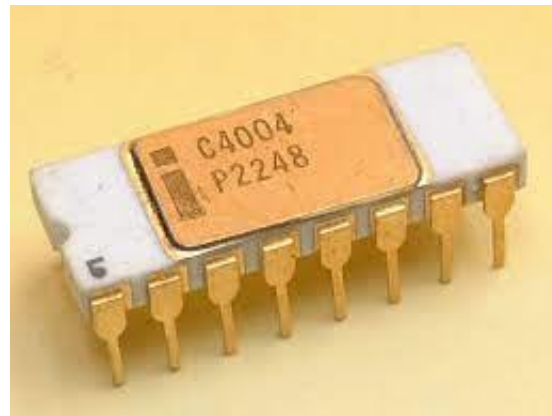
- Интегральная микросхема (ИС) (IC - Integrated Circuit) – микроэлектронное изделие, выполняющее определённые функции преобразования и обработки сигналов и (или) накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов.
- Групповой метод производства заключается в том, что (1) на одной пластине полупроводникового материала одновременно изготавливается большое количество ИС; (2) одновременно обрабатываются десятки таких пластин. После завершения цикла изготовления ИС пластина разрезается на отдельные кристаллы (chips), каждый из которых представляет собой ИС.
- Планарная технология - это такая организация технологического процесса, когда все элементы и их составляющие конструируются на плоскости единой полупроводниковой пластины. Трёхмерные компоненты могут относиться к планарной технологии.
- Плотность упаковки - это отношение числа элементов ИС к объёму ИС без учёта объёма выводов.

ОНИ БЫЛИ ПЕРВЫМИ



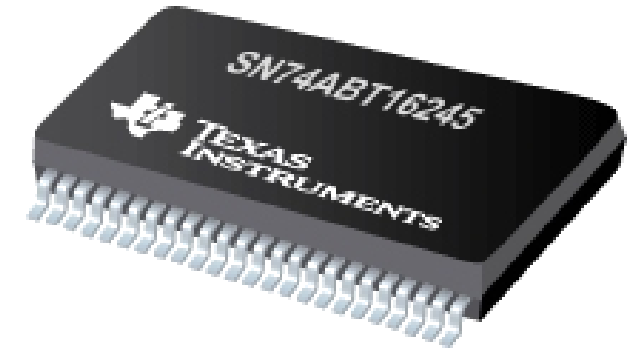
Первая микросхема создана в Texas Instruments в 1958 г.

Первый коммерческий микропроцессор Intel 4004, 1971 г.

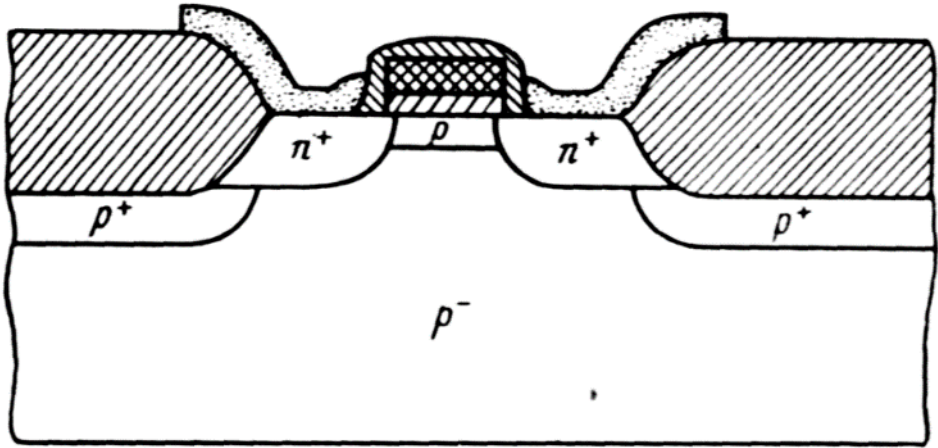


КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПО СПОСОБУ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

- Полупроводниковые ИС: все элементы и межэлементные соединения выполнены в объёме или на поверхности полупроводниковой подложки.
 - биполярные ИС
 - МОП и КМОП
 - БиКМОП
- Плёночные ИС: элементы выполнены в виде разного рода плёнок, нанесённых на поверхность диэлектрической подложки.
 - тонкоплёночные ИС (толщина плнок до 1-2 мкм)
 - толстоплёночные ИС (толщина плнок выше 10 мкм)
- Гибридные ИС: комбинация плёночных пассивных элементов, простых и сложных активных компонентов (в том числе в виде микрочипов), расположенных на общей подложке.
 - силовые микросборки (IGBT модули)
 - совмещённые ИС – различные технологии формирования компонентов на одном чипе

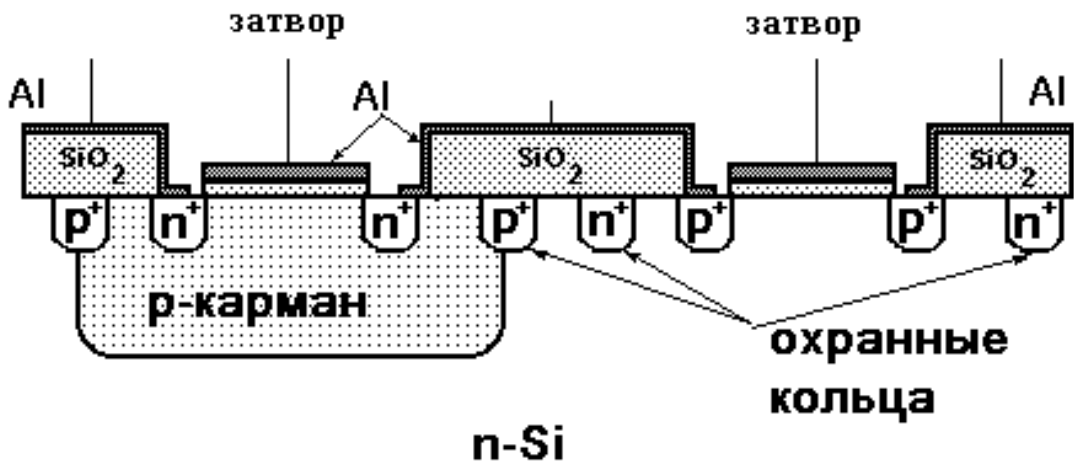


ПЛАНАРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ



биполярный *pnp*-транзистор

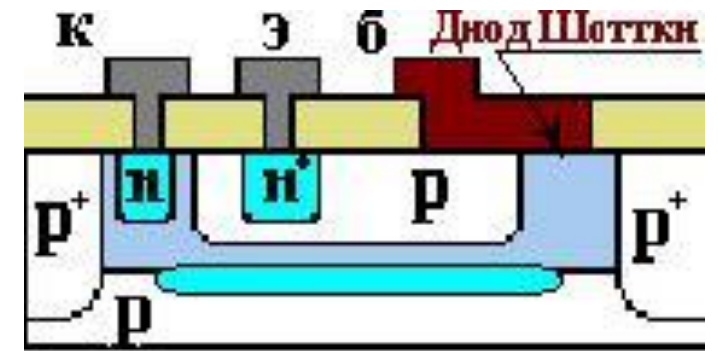
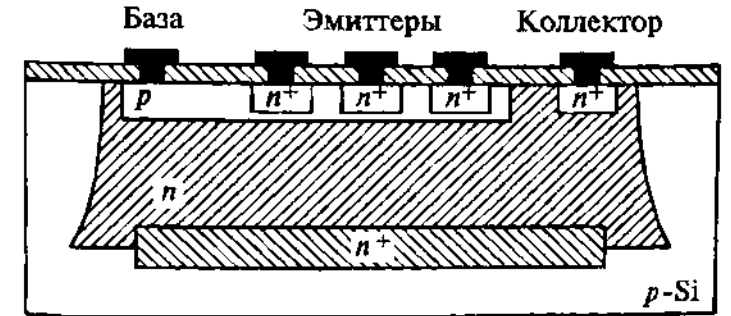
полевой транзистор с изолированным затвором



многоэмиттерный биполярный *pnp*-транзистор

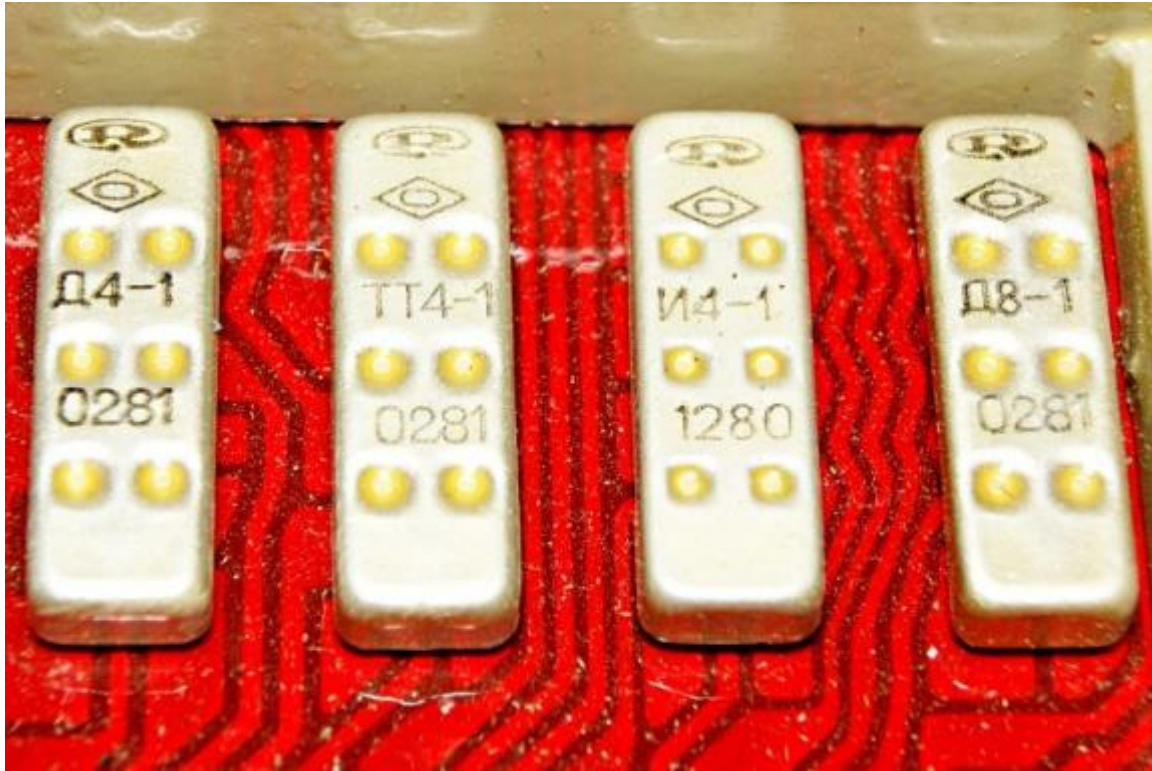
биполярный транзистор с диодом Шоттки

комплементарная пара полевых МДП-транзисторов



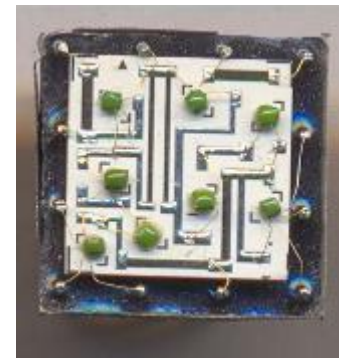
ПЕРВЫЕ РОССИЙСКИЕ ГИБРИДНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Резисторно-транзисторная логика



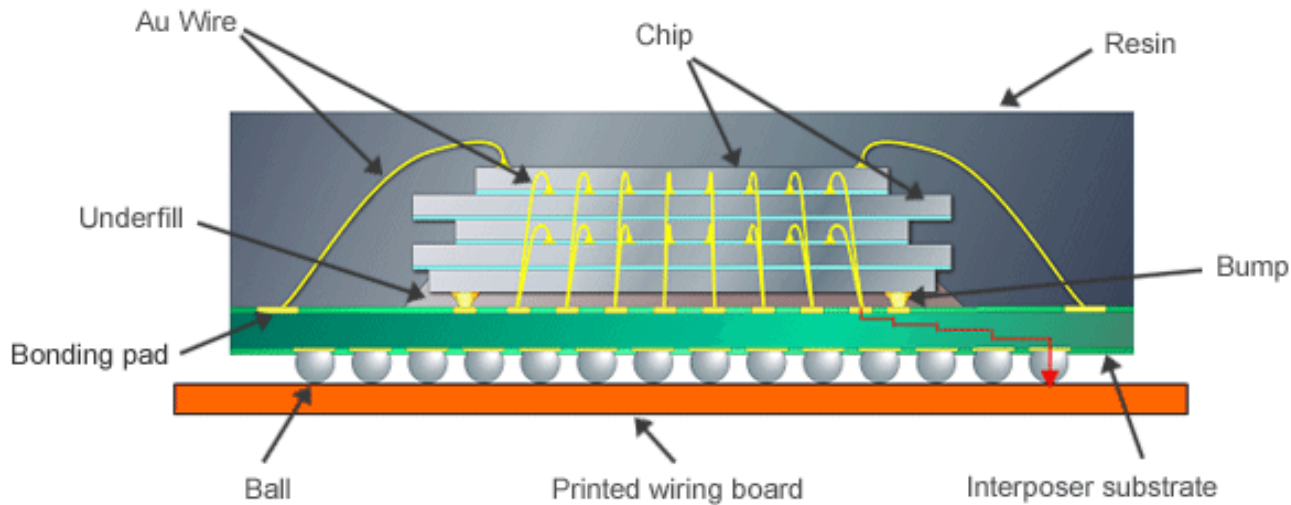
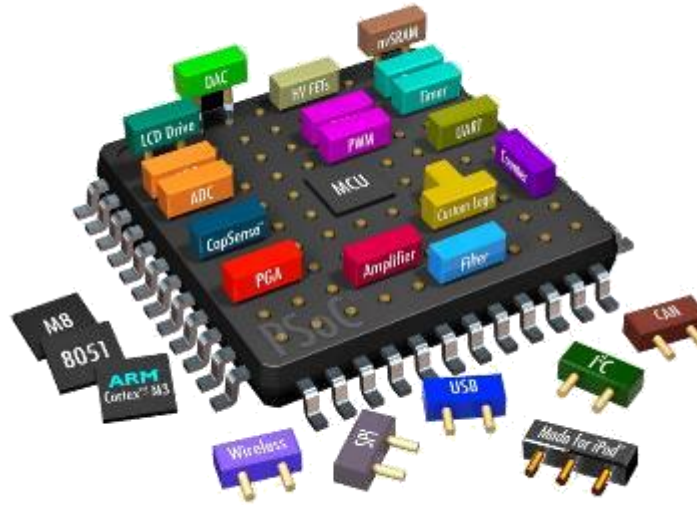
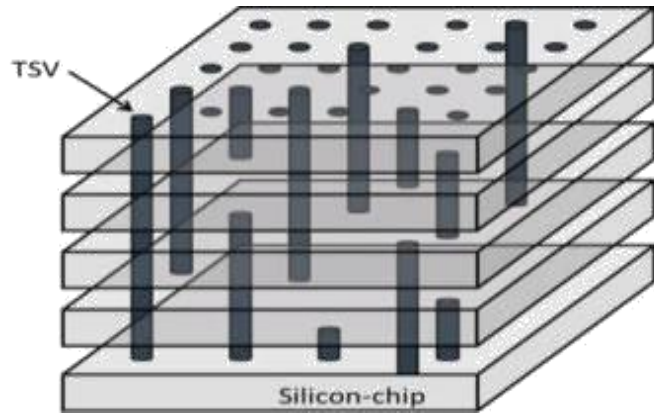
серия Р12-2,
1970-е годы

Диодно-транзисторная логика

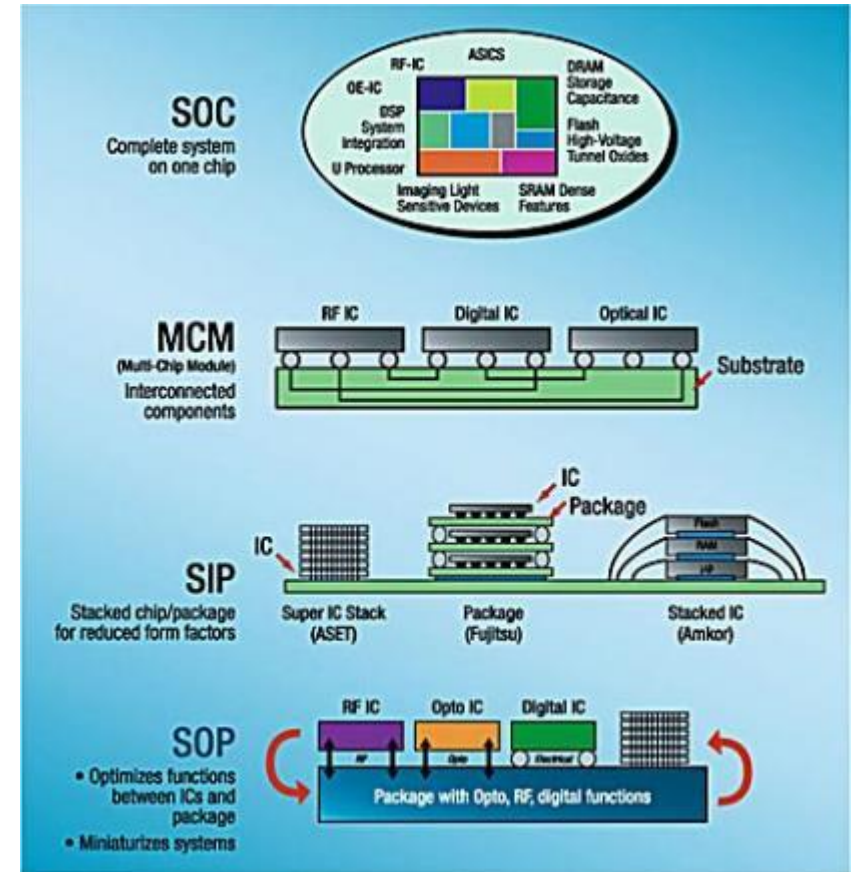


Микросхемы серии 217,
выполненные на тонких
пленках, 1970-е годы

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

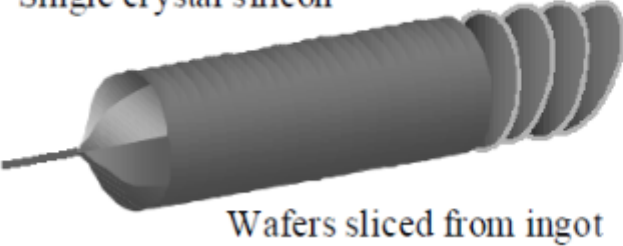
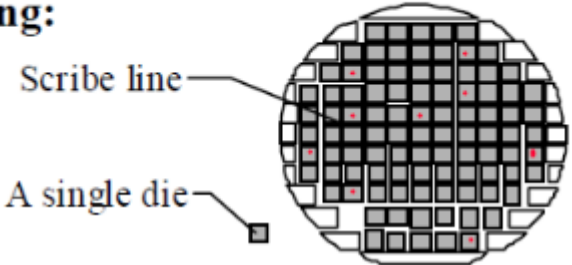
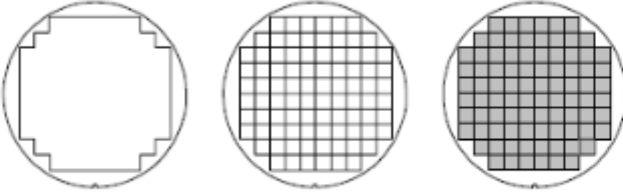
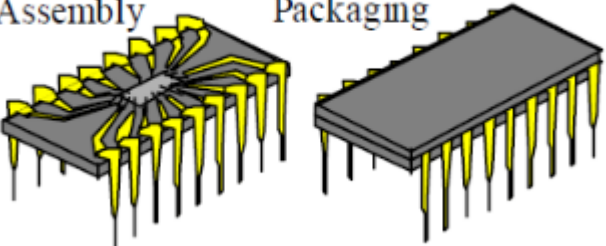
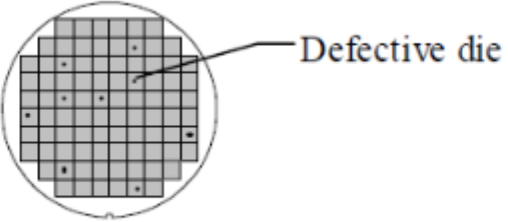
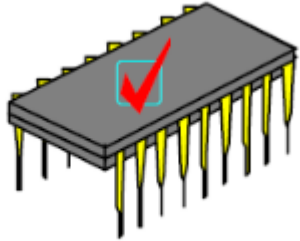


Example of SiP structure (SiP technology of 5 stacked chips)

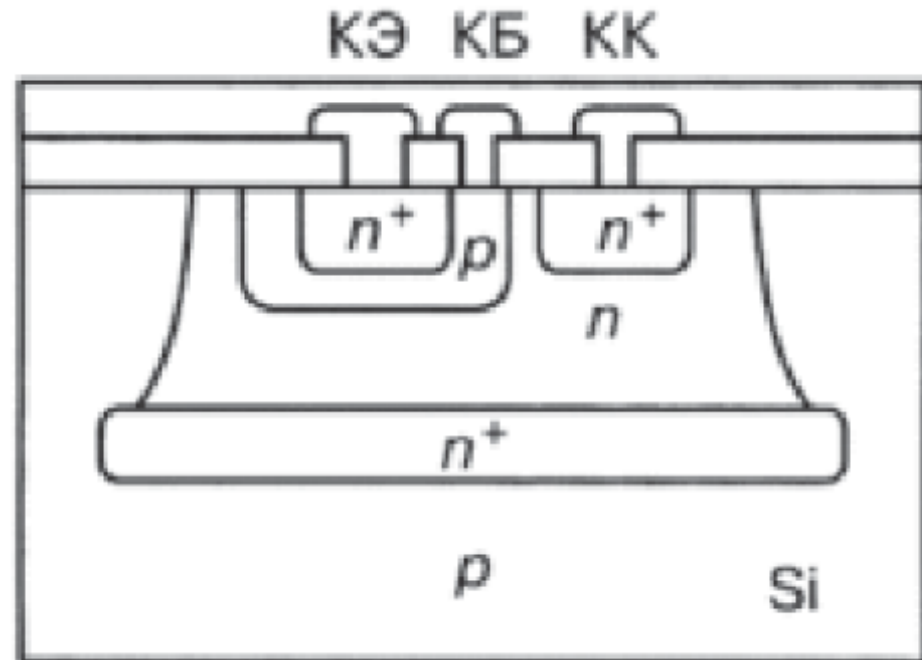
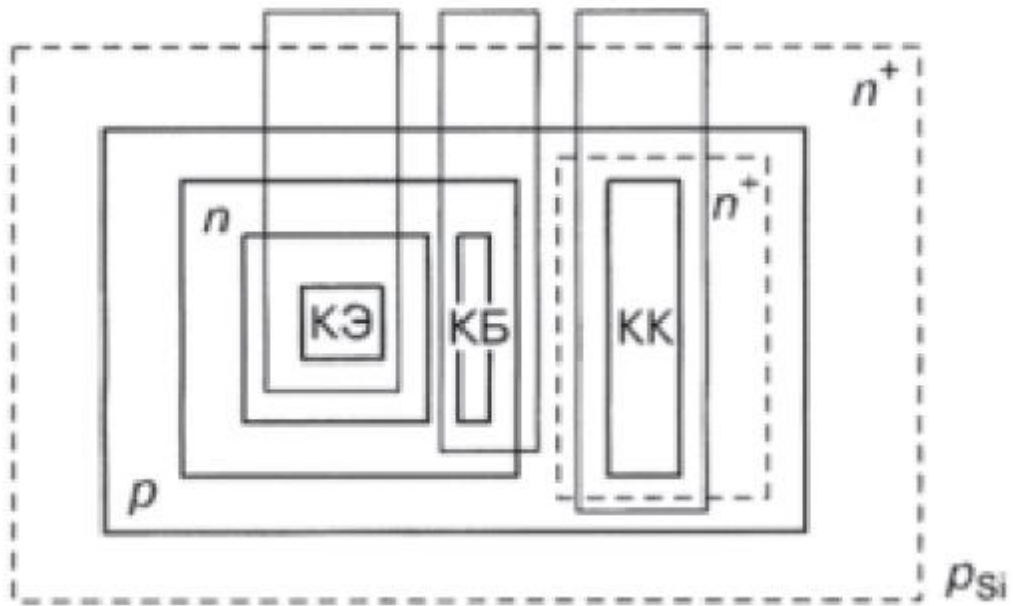


- System-on-a-Chip (SoC)
- System-in-a-Package (SiP)
- 3D-интеграция:
 - System-on-Package (SoP)
 - Through SiliconVia (TSV)

ОБЩИЙ ВЗГЛЯД НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

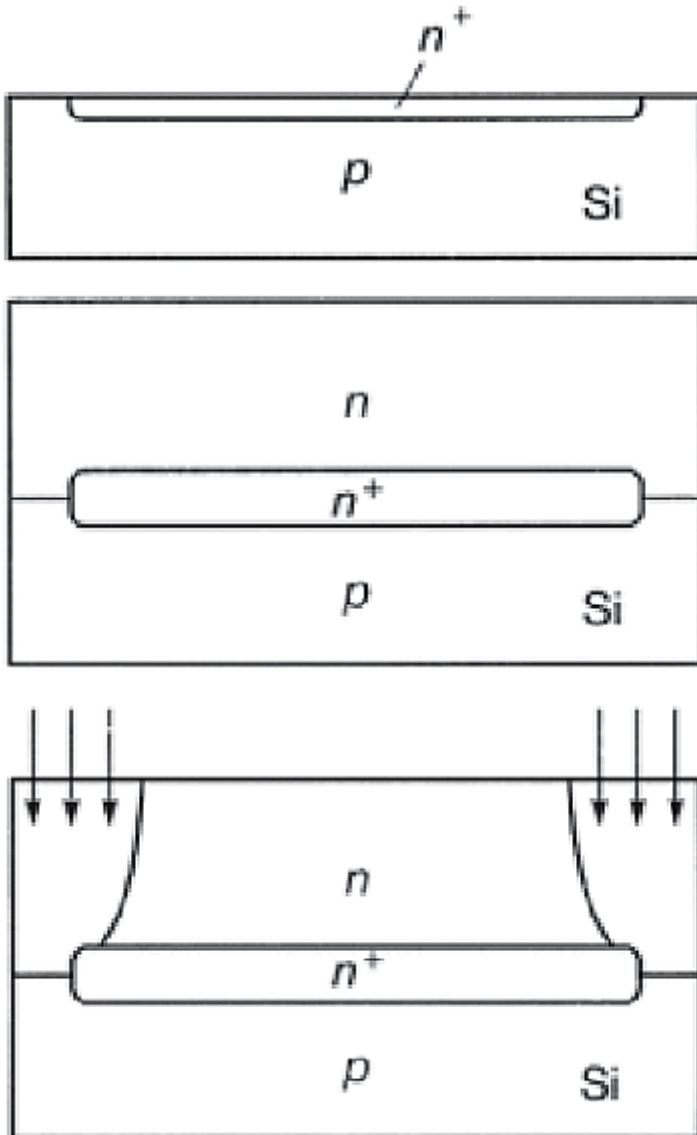
<p>1.</p>	<p>Wafer Preparation includes crystal growing, rounding, slicing and polishing.</p>	<p>Single crystal silicon</p>  <p>Wafers sliced from ingot</p>	<p>4.</p>	<p>Assembly and Packaging:</p> <p>The wafer is cut along scribe lines to separate each die.</p> 
<p>2.</p>	<p>Wafer Fabrication includes cleaning, layering, patterning, etching and doping.</p>			<p>Metal connections are made and the chip is encapsulated.</p> 
<p>3.</p>	<p>Test/Sort includes probing, testing and sorting of each die on the wafer.</p>		<p>5.</p>	<p>Final Test ensures IC passes electrical and environmental testing.</p> 

ПРИМЕР ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА



то, что должно получиться в результате

ЭТАПЫ ТЕХПРОЦЕССА

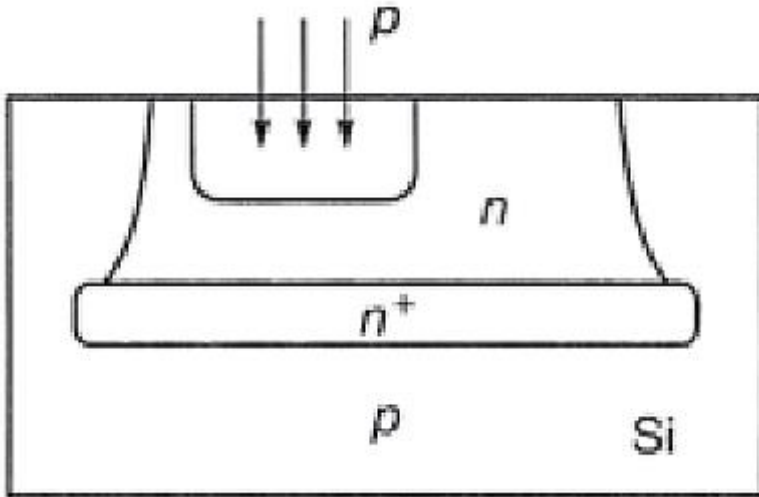


1. Диффузия примеси n^+ -типа ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) для уменьшения сопротивления коллектора на подложку p -типа ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) – так называемый "скрытый слой". Перед этим с помощью литографии создаются окна для диффузии. Далее "литография" включает в себя следующие этапы: *окисление, покрытие фоторезистом, облучение фоторезиста через фотошаблон, селективное травление фоторезиста, травление оксида через окна в фоторезисте*

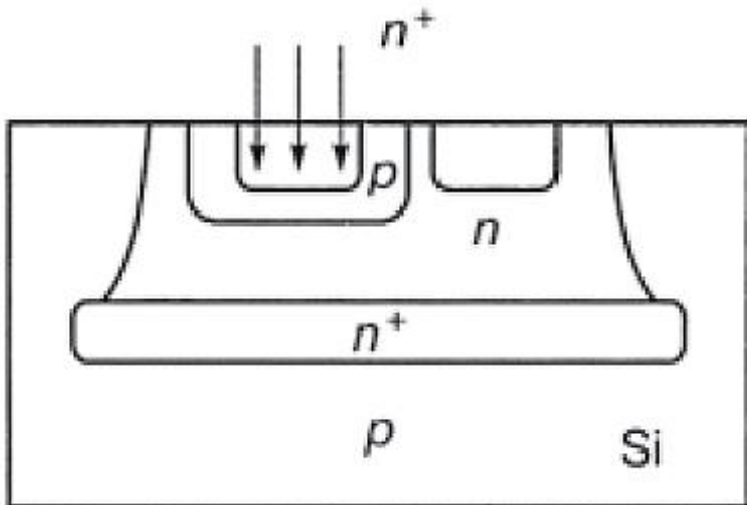
2. Эпитаксиальное наращивание кремния n -типа ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$)

3. Литография + диффузия примеси p -типа ($\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$) до смыкания с p -кремнием (разделительная диффузия): формируется n -карман для коллектора транзистора или тело резистора.

ЭТАПЫ ТЕХПРОЦЕССА

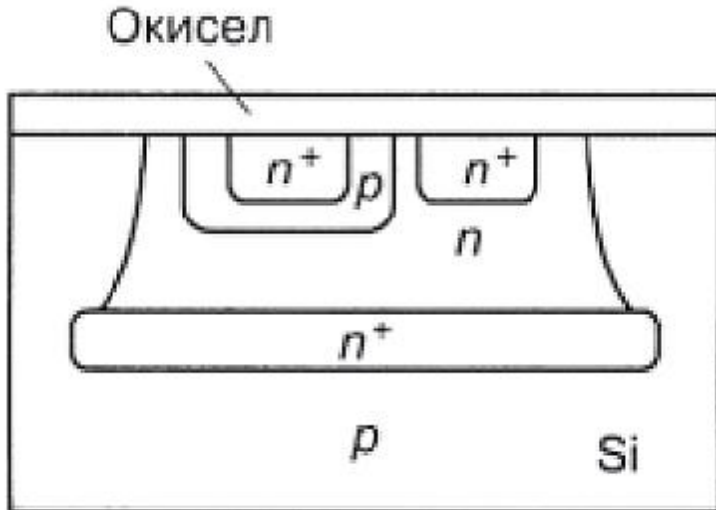


4. Литография + диффузия примеси p -типа ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) в карман n -типа для создания области базы транзистора (базовая диффузия)

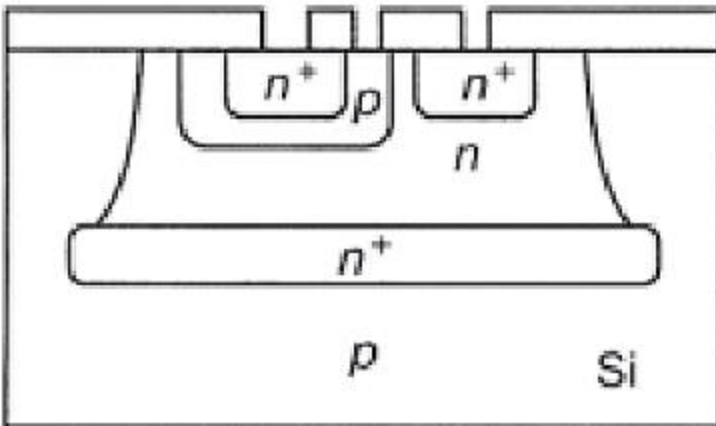


5. Литография + диффузия примеси n^+ -типа ($\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$) в базовую область для создания эмиттера и в коллекторные области для создания низкоомной области под коллекторным контактом

ЭТАПЫ ТЕХПРОЦЕССА

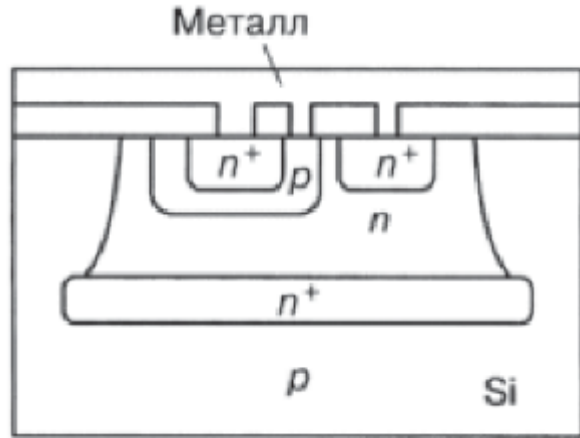


6. Окисление (выращивание диоксида кремния) для создания изолирующего слоя

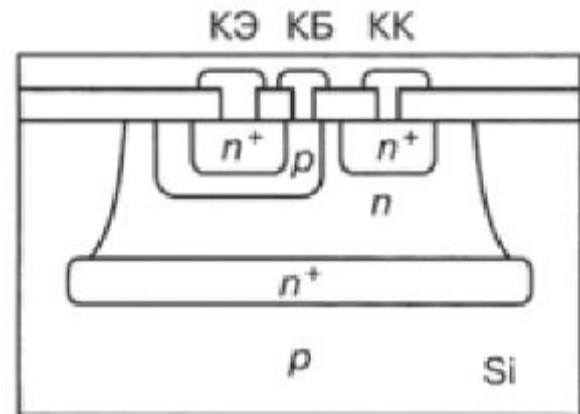


7. Литография + травление оксида для формирования контактных окон к эмиттеру, базе и коллектору (и в других необходимых местах)

ЭТАПЫ ТЕХПРОЦЕССА



8. Напыление металла (алюминий или медь)

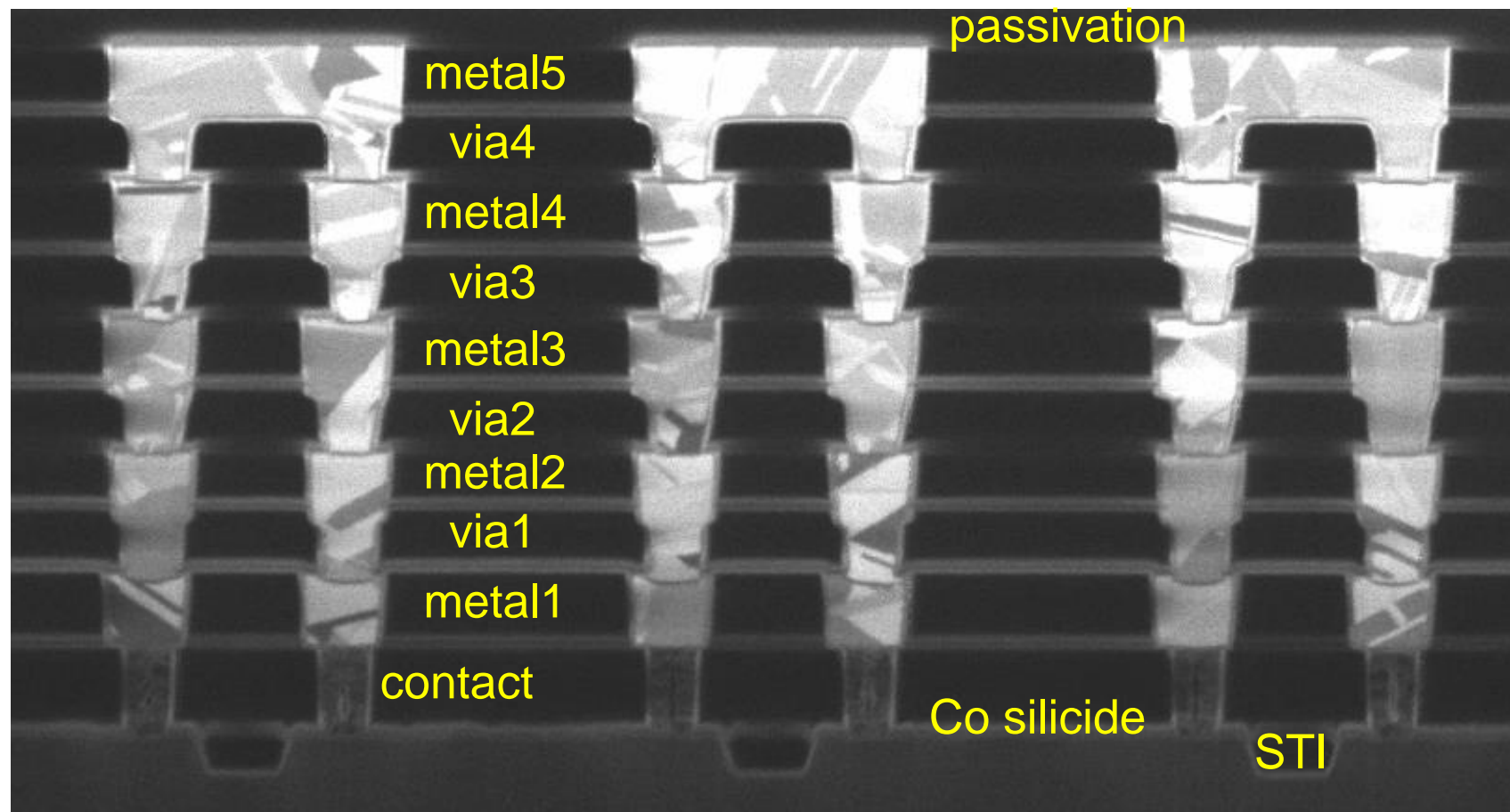


9. Литография + травление металла для формирования проводящих дорожек

10. Нанесение диэлектрика для изоляции слоя металлизации

11. Далее вытравливаются окна в диэлектрике и формируется новый слой металлизации.

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

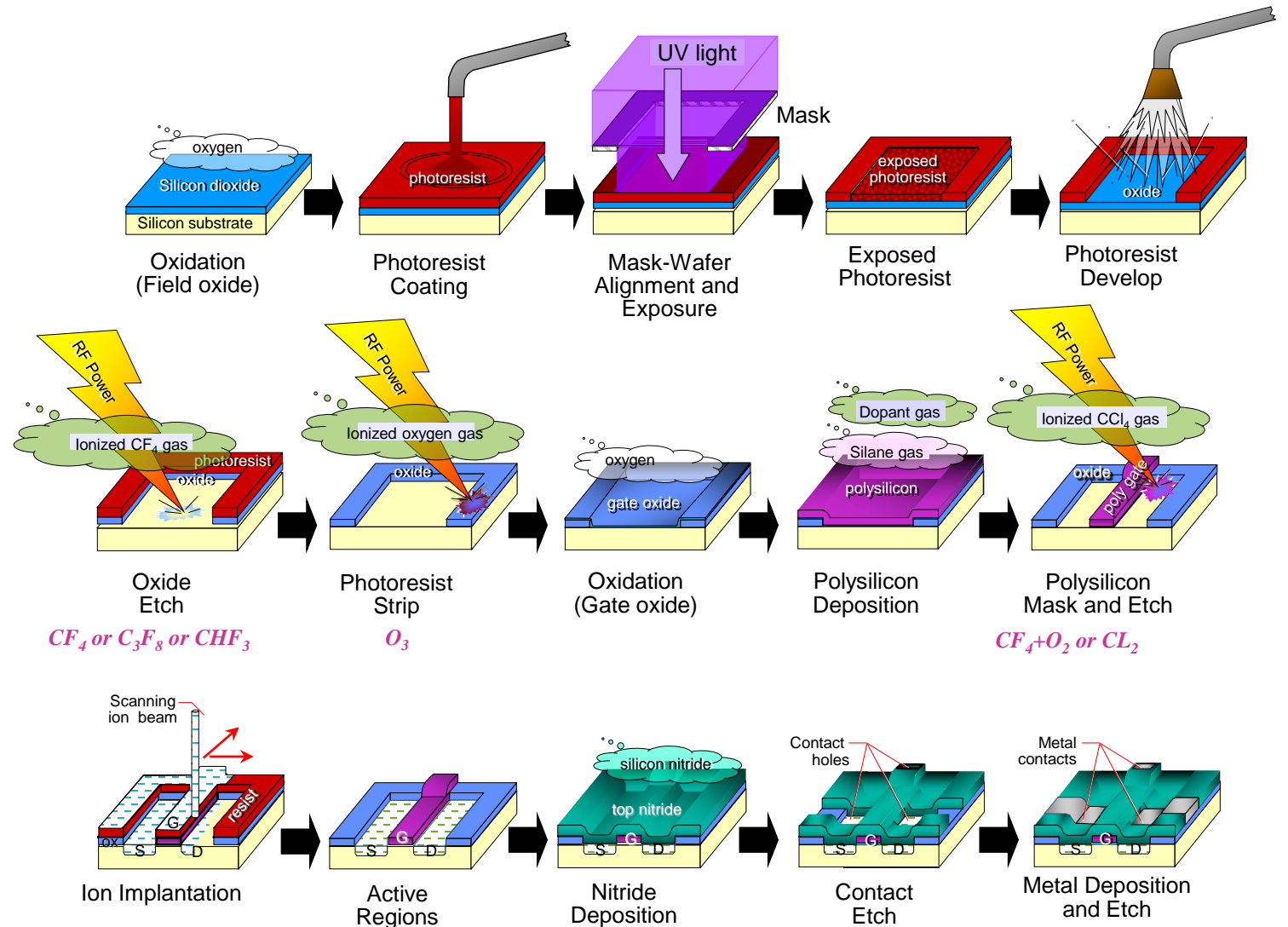


Кроме межсоединений необходимо предусмотреть систему "колодцев" для отвода тепла

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ MOSFET

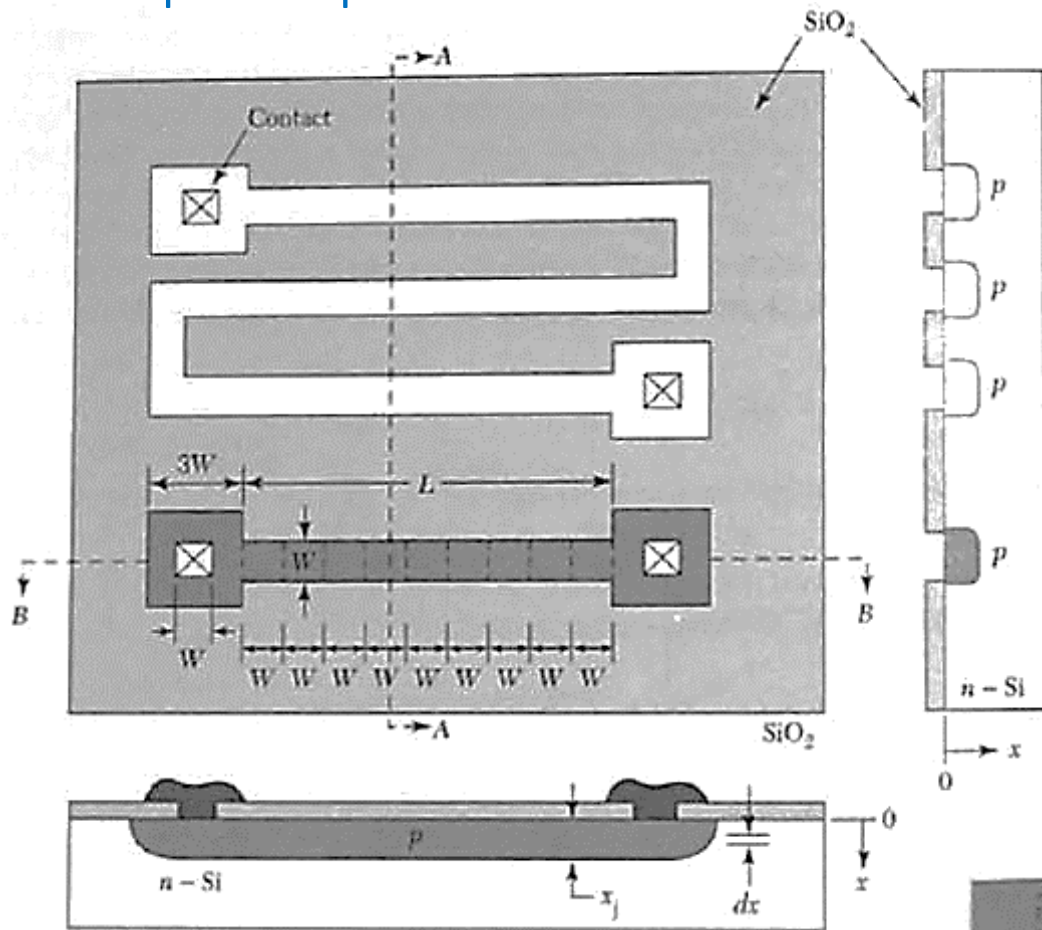
Кроме полевого транзистора как такового в интегральной схемотехнике реализуются:

- диоды – на базе полевого транзистора с замкнутыми истоком и стоком
- резисторы – фиксированное сопротивление между истоком и стоком
- ёмкости – используется ёмкость затвора полевого транзистора

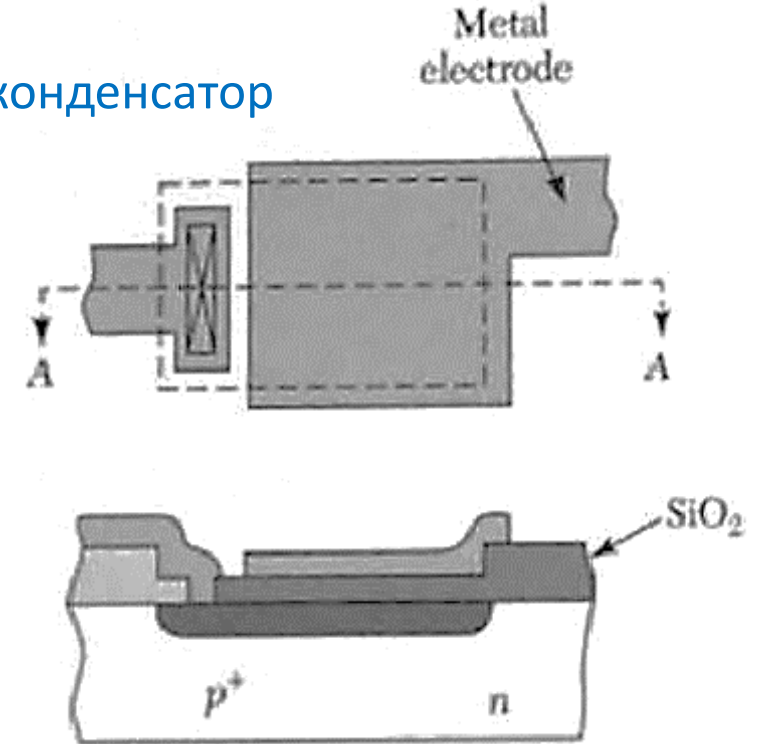


ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

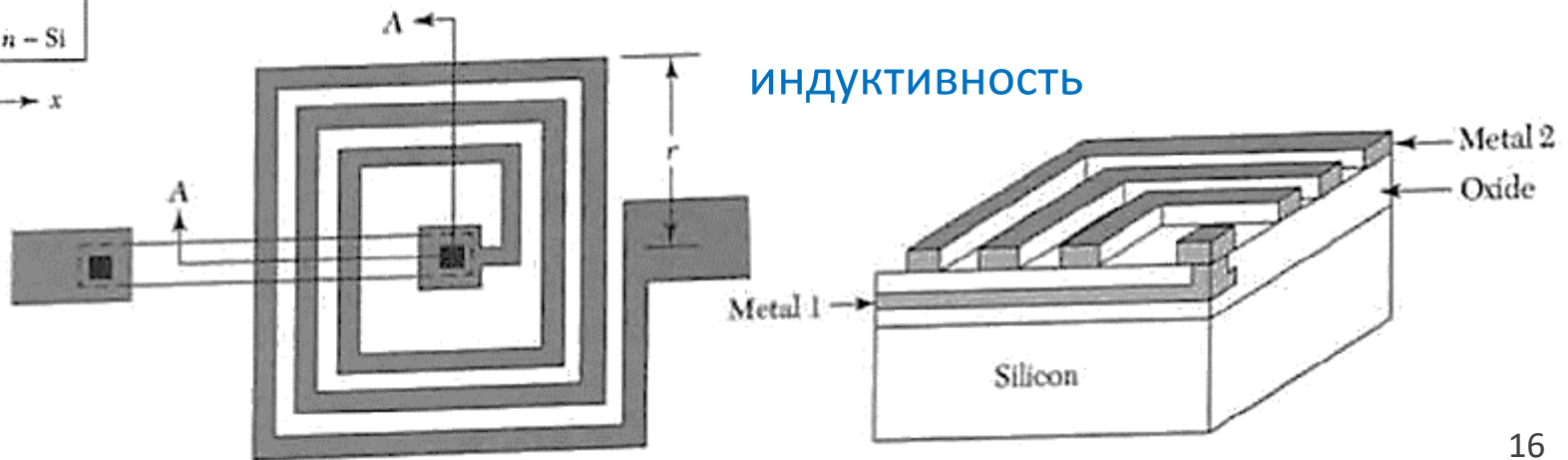
резистор



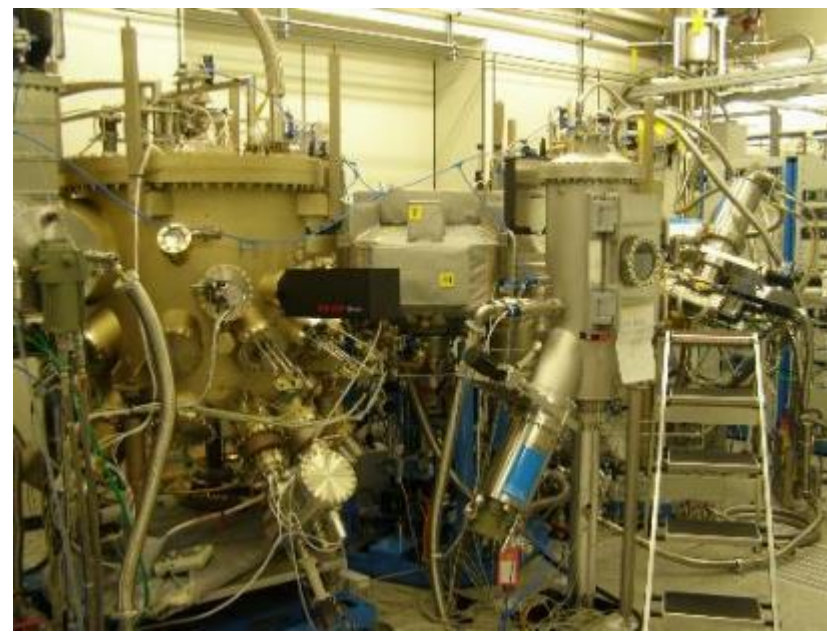
конденсатор



ИНДУКТИВНОСТЬ



СУММА ТЕХНОЛОГИЙ



ТРЕБОВАНИЯ К ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ МАТЕРИАЛАМ

- Монокристалличность структуры: однородный бездефектный материал в виде кристаллических слитков либо плёнок.
- Однородность распределения примесей и дефектов. Это требование обеспечивает малый разброс электрических параметров партии ИС.
- Стойкость к атмосферному воздействию. Материалы IV группы обладают высокой стойкостью, что нельзя сказать о многих структурах III-V (антимонид и арсенид алюминия).
- Неизменность физических свойств при изменении температуры. Это определяет диапазон рабочих температур (для кремния типично от -60 до 200 °C).
- Наиболее высокая подвижность носителей заряда в материале определяет верхний предел рабочей частоты полупроводниковых элементов ИС. В то же время легирующие примеси приводят к появлению энергетических уровней внутри запрещённой зоны полупроводника и росту количества дефектов. В зависимости от назначения прибора следует выбирать материал с определёнными свойствами.

КРЕМНИЙ И ГЕРМАНИЙ



■ Добыча и получение кремния

Кремний составляет примерно четверть веса земной коры. Многочисленные соединения кремния входят в большинство горных пород и минералов. Наиболее распространённым соединением кремния является SiO_2 , главным образом в виде минерала кварца. В свободном состоянии кремний в природе не встречается.

При комнатной температуре кремний химически устойчив. В воде нерастворим. Не реагирует с большинством кислот, однако хорошо растворяется в смеси плавиковой и азотной кислот. Окисляется при температуре > 900 °С. Расплавленный кремний отличается высокой химической активностью.

Монокристаллический кремний легируют мышьяком (n-тип), бором (p-тип), фосфором (n-тип), реже сурьмой (n-тип), алюминием (p-тип), золотом.



■ Добыча и получение германия

Содержание германия в земной коре около 0.001%. Он почти не имеет своих руд, поэтому добыча германия является сложным технологическим процессом. Больше всего германия содержится в бурых углях (до 100 г/т). В результате химической переработки получают GeCl_4 , который переводят в GeO_2 , а затем восстанавливают в среде водорода до элементарного Ge (порошок серого цвета).

Активно растворяется раствором перекиси водорода при комнатной температуре, в смесях кислот. Окисляется при температуре > 600 °С. В расплавленном состоянии не растворяет углерод и не взаимодействует с кварцем.

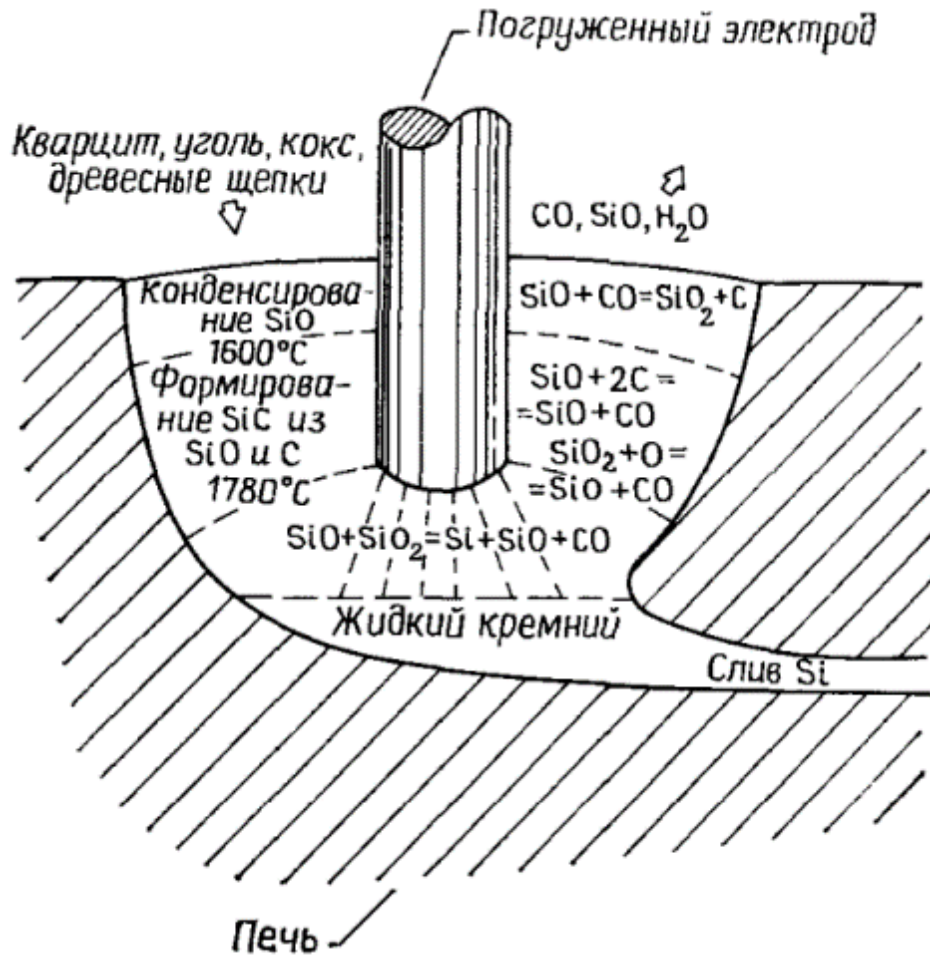
Монокристаллический германий легируют золотом (p-тип), галлием (p-тип), сурьмой (n-тип), реже – кремнием и мышьяком. Потери ценного материала при механической обработке слитков монокристаллического германия очень велики, поэтому германий предпочтительно использовать в виде эпитаксиальных плёнок.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ КРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

- Преимущества кремния:
 - Широко распространён в природе
 - Технологии выращивания монокристаллов хорошо отработаны и малозатратны
 - Механическая прочность монокристаллов
 - Простота формирования и высокое качество диэлектрика – SiO_2
 - Фоточувствительность
 - Простые способы и технологии легирования
- Недостатки кремния:
 - Низкая подвижность электронов и дырок
 - Отсутствует возможность оптической генерации излучения (в монокристаллическом состоянии)
 - Верхняя температурная граница $\sim 150^\circ\text{C}$

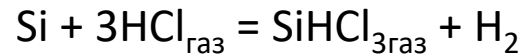
ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ

Этап 1. Получение металлургического поликремния

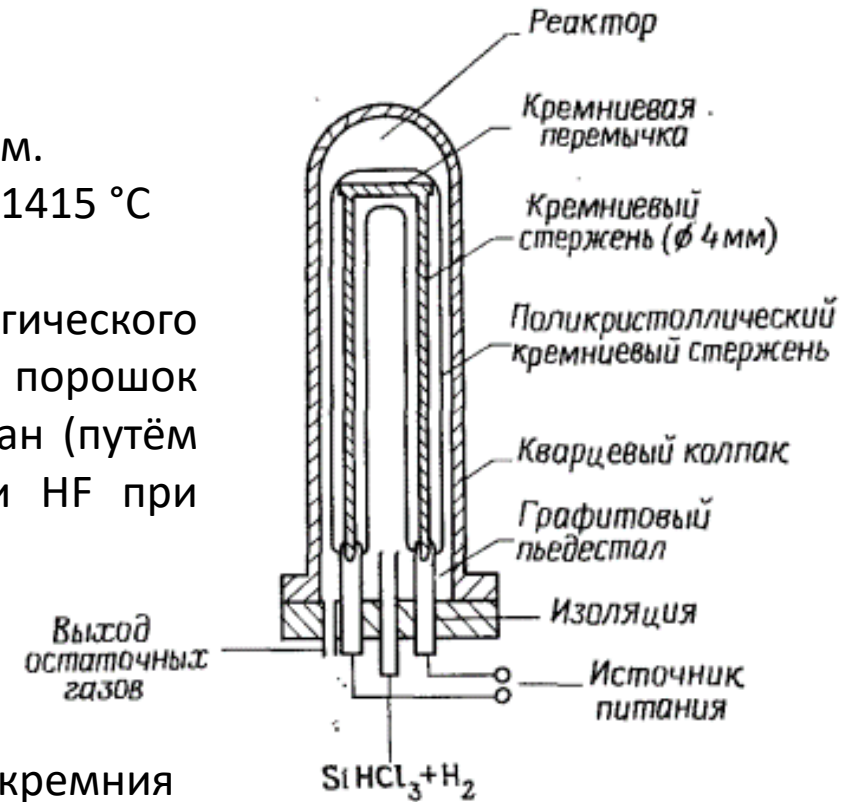


Печь загружается кварцитом.
Температура плавления Si: 1415 °C

После получения металлургического кремния его измельчают в порошок и переводят в трихлорсилан (путём взаимодействия с парами HF при 300 °C):

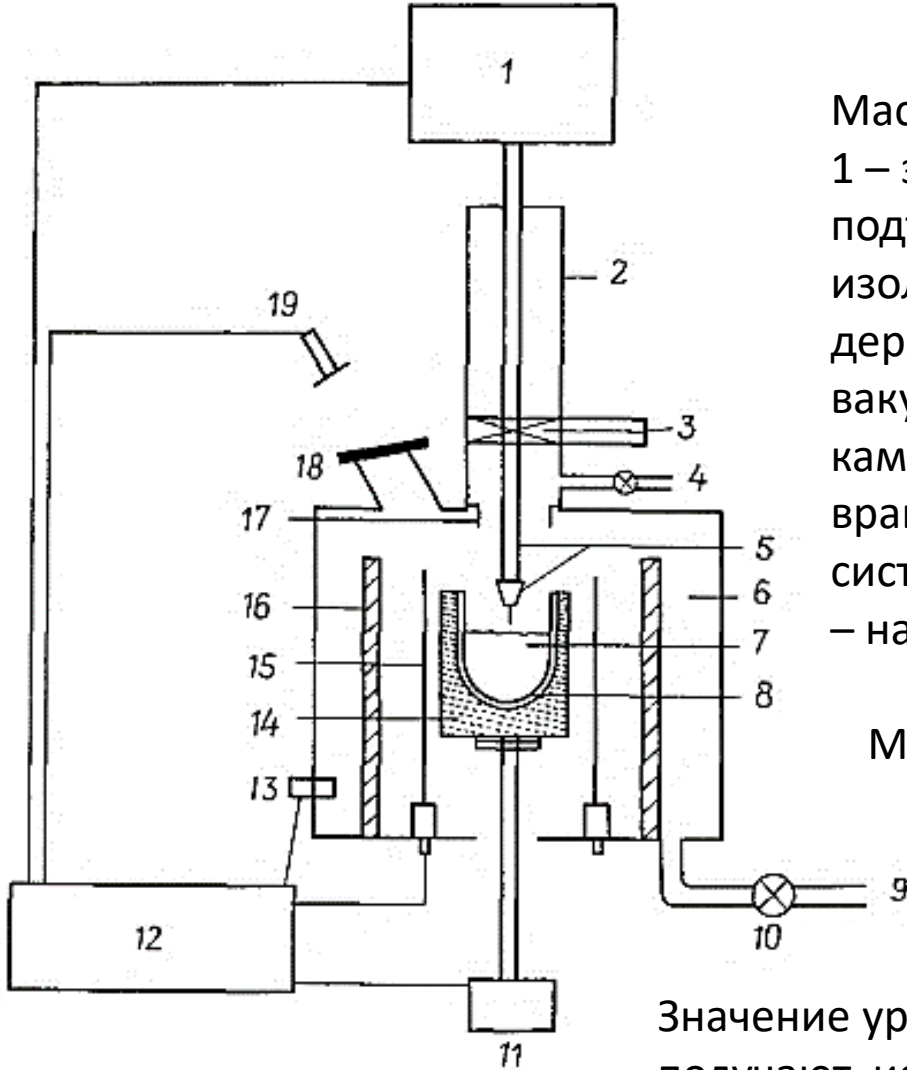


Далее происходит очистка кремния от примесей путём фракционной дистилляции при охлаждении и последующее осаждение на нагретые тонкие стержни из поликристаллического кремния.



ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ

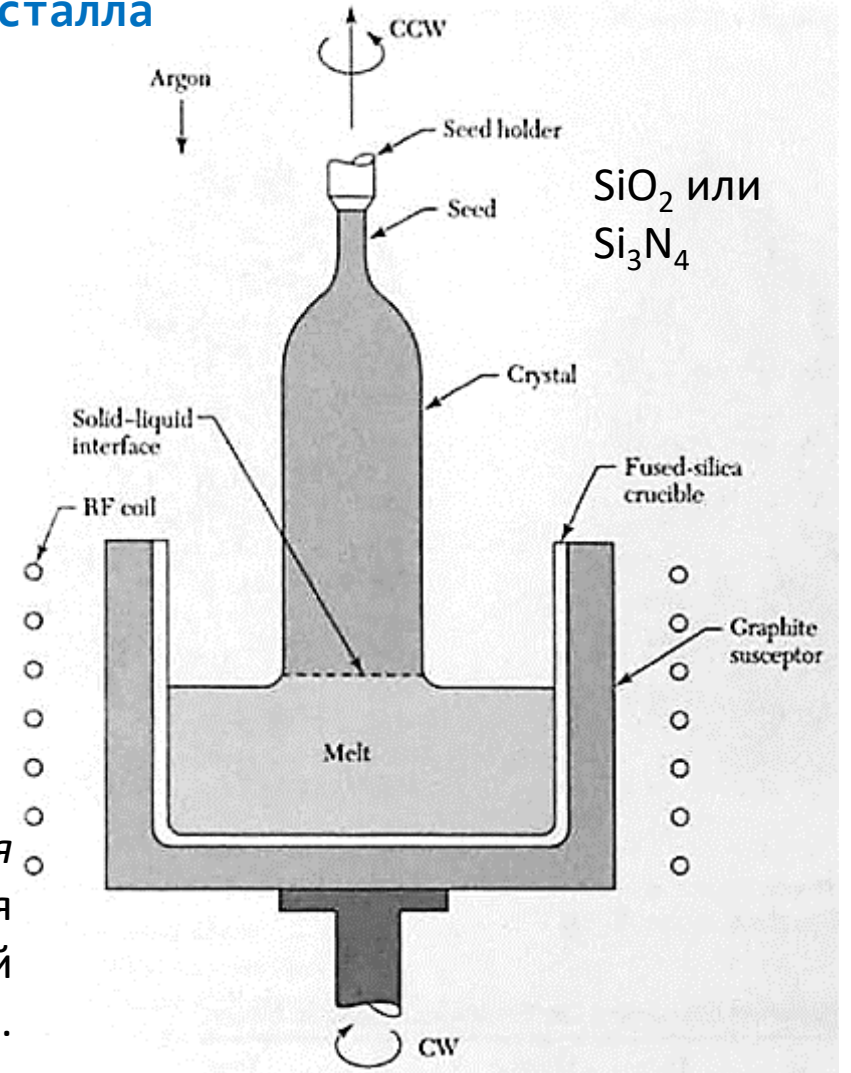
Этап 2.1 Выращивание монокристалла методом Чохральского



Масса установки 17 т, высота 6.5 м.
1 – затравочный шток, устройство подъёма и вращения; 3 – изолирующий клапан; 5 – держатель затравки и затравка; 6 – вакуумная высокотемпературная камера; 8 – тигель; 11 – устройство вращения и подъёма тигля; 12 – система управления и контроля; 15 – нагреватель.

Материал тигля – *нитрид кремния* или *кварц*. Для поддержки тигля используется графитовый контейнер.

Значение уровня фонового легирования получают, исходя из измерений удельного сопротивления тестовых слитков.



Оптимальная скорость вытягивания 2 мм/мин (минимальное количество дефектов)

ПРИМЕСИ И ДЕФЕКТЫ В КРЕМНИИ

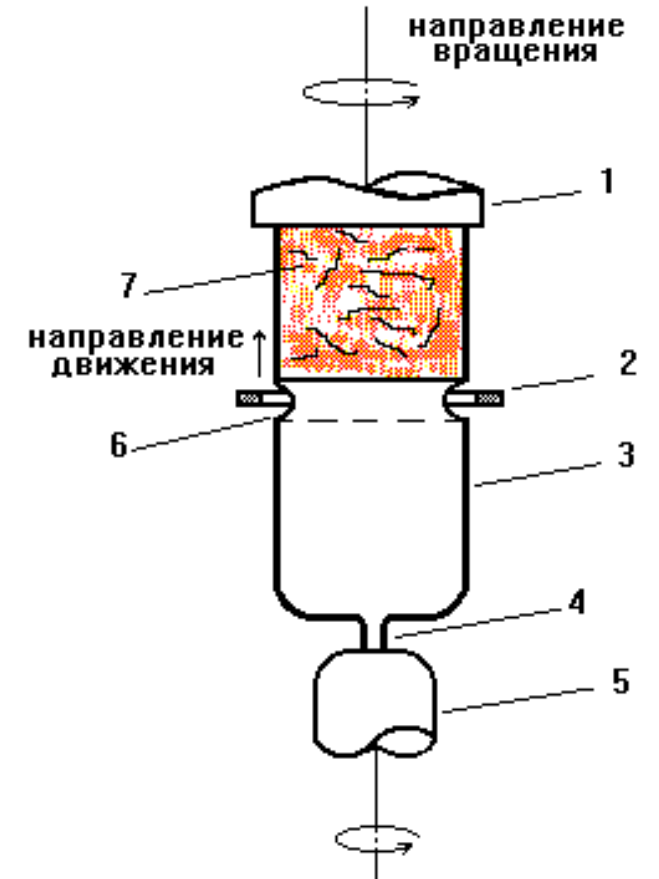
- **Кислород** – нежелательная примесь в кремнии, образующаяся в результате растворения материала тигля в расплаве кремния (скорость растворения кварца в кремнии составляет 5-10 мг/ч на 1 см² соприкосновения при 1500 °С.) и переходящая в монокристалл при его образовании. В выращенном кристалле ~ 95% атомов кислорода находятся в межузельном положении. Кислород объединяется в комплексы SiO₄, которые играют роль доноров. Соответствующие комплексы нестабильны при температурах > 500 °С, поэтому слитки требуется отжигать или использовать зонную плавку. Межузельный кислород также приводит к повышению предела текучести кремния на ~ 25%.
- **Углерод** – попадает в расплав с графитовых узлов установки для выращивания кристаллов. Обычно концентрация углерода в затравочной части кристалла менее 10¹⁶ см⁻³, а в хвостовой части > 10¹⁷ см⁻³. Является примесью замещения, увеличивает общую дефектность кристалла.
- **Примеси соединений металлов** (в основном элементы переходных групп, силициды) располагаются как в узлах, так и в междоузлиях кристаллической решётки. Действуют как генерационно-рекомбинационные центры для носителей заряда. Увеличивают собственную проводимость кремния. Для их удаления используется комплекс методов под общим названием "геттерирование". Один из вариантов – сегрегация примесей на приповерхностные дислокации.

ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ

Этап 2.2 Метод зонной плавки

В методе вертикальной зонной плавки (бестигельный вариант) стержень из поликристаллического кремния удерживается в вертикальном положении и вращается, в то время как расплавленная зона (высотой от 1 до 2 см) медленно проходит от нижней части стержня до его верха. Расплавленная область нагревается с помощью высокочастотного индукционного нагревателя и перемещается вдоль стержня от затравочного монокристалла. Поскольку большинство примесей обладает хорошей растворимостью в жидкой фазе по сравнению с твердой, то по мере продвижения зона плавления все больше насыщается примесями, которые скапливаются на конце слитка. Процесс зонной плавки повторяют несколько раз, а по окончании очистки загрязненный конец слитка отрезают.

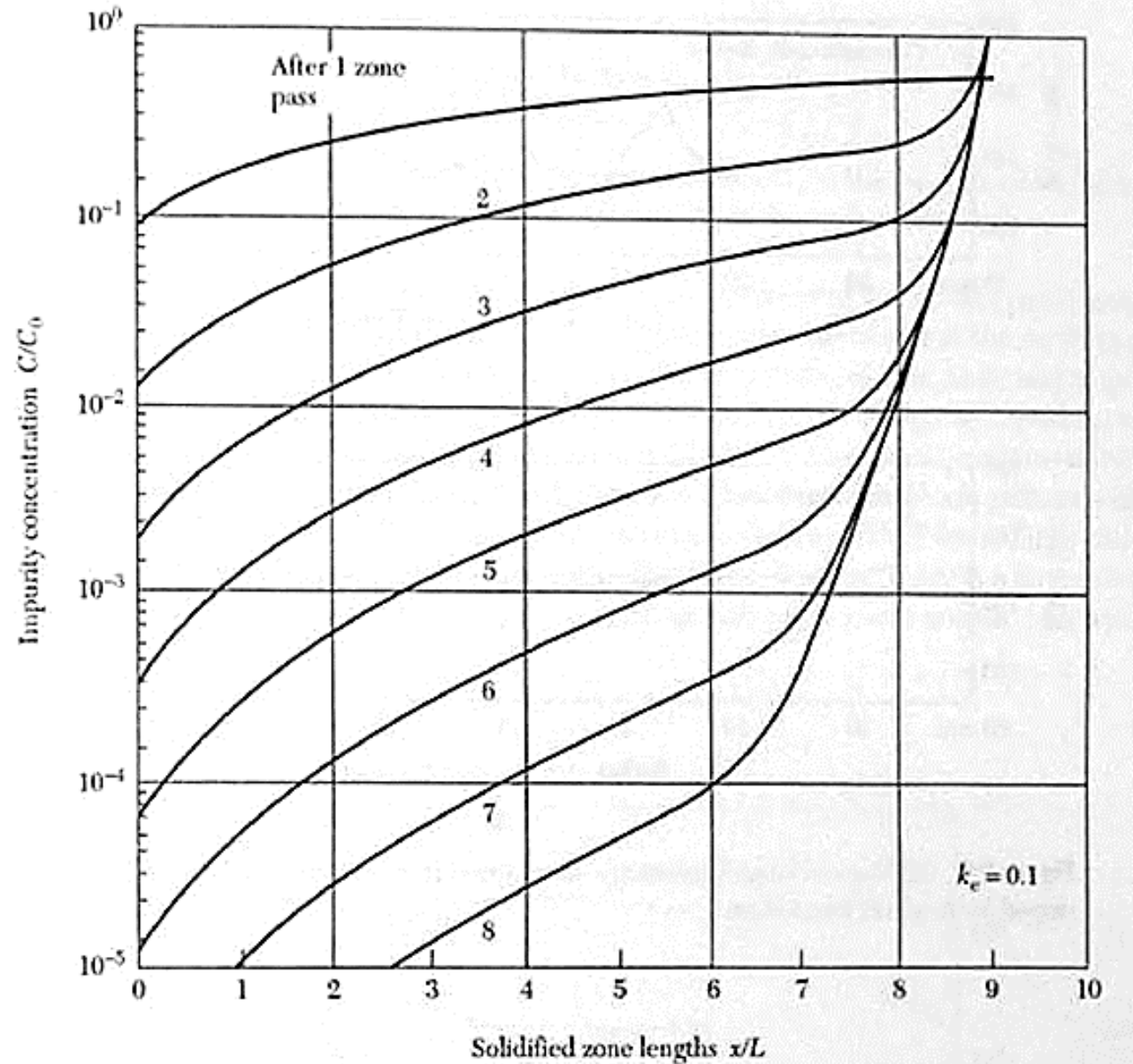
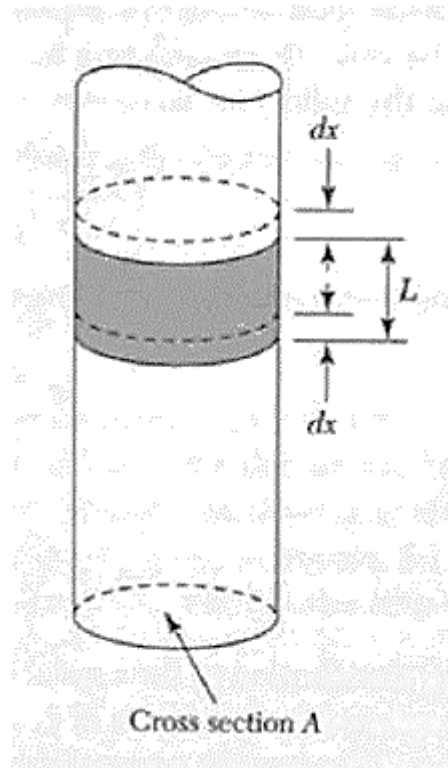
В современных установках диаметр индуктора делают меньше чем диаметр слитка – для поддержания стабильности узкой расплавленной зоны. Количество примеси кислорода и углерода в этом методе существенно ниже, чем в методе Чохральского. Получается кремний с предельно высоким удельным сопротивлением (10^5 Ом см).



- 1 - Держатель
- 2 - Обмотка нагревателя
- 3 - Монокристаллический кремний
- 4 - Затравочный монокристалл
- 5 - Держатель
- 6 - Расплавленная зона
- 7 - Стержень из поликристаллического кремния

SILICON FLOAT-ZONE PROCESS

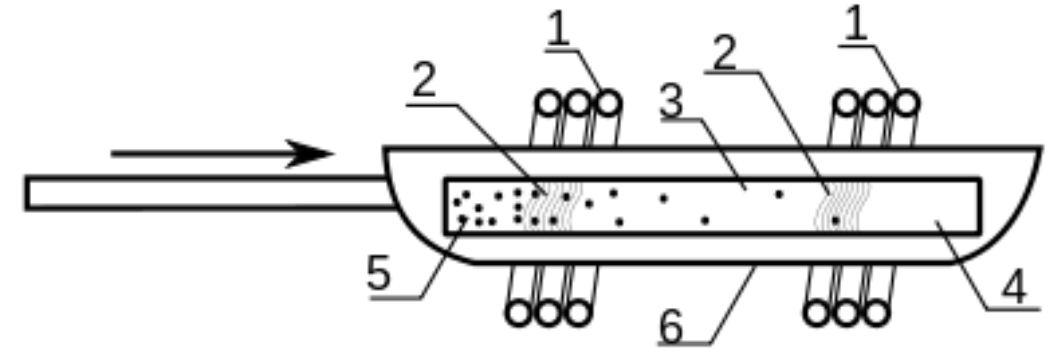
Зависимость относительной концентрации примесей в кремнии от количества успешных проходов методом зонной плавки (цифры на графике) вдоль длины слитка (в координатах x/L , где x – координата расплавленной области шириной L).



ПОЛУЧЕНИЕ ГЕРМАНИЯ

Для получения германия используется либо описанный ранее метод Чохральского, либо метод *горизонтальной тигельной зонной плавки* в потоке инертного газа.

Лодочки для зонной плавки изготавливают из графита высокой чистоты или из кварца. Кварцевые лодочки внутри покрывают слоем пироуглерода для предотвращения прилипания германия. Каждая индукционная катушка обычно состоит из трех-четырех витков, которые подключаются к высокочастотному (450 кгц) генератору мощностью 10 квт. Лодочки перемещаются относительно индукционных катушек со скоростью 1.5-2 мм/мин. Поскольку не происходит загрязнение примесями от тигля, возможно одновременно вести по слитку несколько расплавленных зон, что существенно увеличивает производительность процесса.



- 1 - индукционные катушки
- 2 - расплавленные зоны
- 3 - очищенный германий
- 4 - сверхчистый германий
- 5 - германий с повышенным содержанием примесей
- 6 - графитовая лодочка



ОПЕРАЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

- Зонная плавка слитка (були) для сегрегации примеси на его концах и на поверхности
- Отрезание концов слитка и обдирка поверхности
- Шлифовка базовых срезов вдоль заданного кристаллографического направления. Базовый срез делают вдоль выбранного кристаллографического направления.
- Резка на пластины
- Шлифовка поверхностей пластин
- Травление поверхностей пластин в растворе щелочей (KOH, NaOH)
- Полировка (химическая и механическая) одной стороны пластины
- Промывка в бидистиллированной воде



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Для механической обработки германия и кремния **не** могут быть использованы обычные токарные, фрезерные и сверлильные станки, поскольку обрабатываемые материалы являются очень твёрдыми и хрупкими. Поэтому основным способом их механической обработки является шлифование абразивными суспензиями, пастами и шлифовальными алмазными дисками.
- Для разрезания слитков используются: резка диском с алмазной внутренней или наружной режущей кромкой, резка металлическими пилами (или проволокой) с абразивом, лазерная резка импульсным лазером. Для разрезания пластин дополнительно используются алмазное скрайбирование, лазерное скрайбирование либо электронно-лучевое скрайбирование с последующим разламыванием. Резка проволокой (сталь, вольфрам, никель, нихром и др.) даёт высокое качество обработки поверхности и малую себестоимость процесса.
- Шлифовка свободным абразивом (суспензия, содержащая абразивный материал: алмаз, карбид кремния, карбид бора, корунд, оксид хрома, диоксид кремния) выполняется на станках одно- и двусторонней обработки пластин с использованием суспензий и паст. Шлифовка связанным абразивом предполагает наличие шлифовального круга с нанесённым алмазным покрытием, в зону шлифования подаётся охлаждающая жидкость.
- Полировка выполняется односторонней с использованием свободного абразива (водная суспензия) с наноразмерными зёрнами (алмаз, оксид алюминия, оксид хрома, диоксид кремния, диоксид циркония) и мягкого полировальника. Выбор полировочной ткани зависит от её совместимости с используемой абразивной средой: безворсовые материалы для предварительной полировки, ворсистые – для финишной.

ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА: ЖИДКОСТНОЕ ТРАВЛЕНИЕ

- В результате шлифовки поверхностный слой имеет значительное количество механических дефектов: хаотически расположенные выступы и впадины материала, одиночные глубокие трещины, упругие деформации и различные дефекты кристаллической решётки. Для устранения вышеперечисленных дефектов используется *химическое травление* дефектного поверхностного слоя.
- Скорость травления механически нарушенного слоя значительно выше, чем ненарушенного монокристаллического материала, так как растравливание всегда происходит по поверхностным дефектам.
- Для устранения неомогенности химического травления по поверхности пластины применяют активное перемешивание травителя непосредственно над поверхностью подложки и постоянное вращение подложки в объёме травителя (метод *химико-динамического травления*).
- Процесс *анодно-механического травления* подложек состоит в том, что на обрабатываемую пластину подают положительный потенциал, а на полировальный круг – отрицательный, а между подложкой и полировальным кругом помещают слой электролита. Наряду с механическим воздействием идёт процесс электролиза, при котором происходит анодное растворение материала (анод принимает электроны от ионов электролита, в результате на аноде идёт процесс окисления).
- Максимальная отбраковка негодных пластин после механической обработки гарантирует потенциальную надёжность проведения всего комплекса последующих технологических операций.

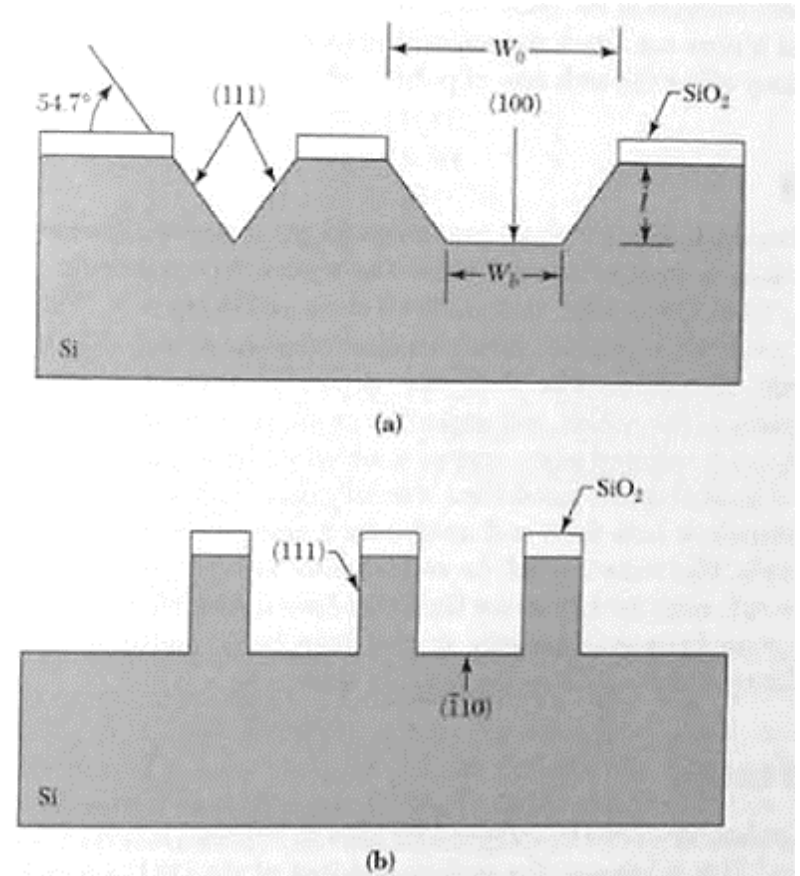
ПОВЕРХНОСТНОЕ ТРАВЛЕНИЕ ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ

- Травление германия в перекиси водорода происходит при 70-80 °С. Бром является ускорителем химической реакции, уксусная кислота – замедлителем. Примерный состав кислотного травителя для германия: 5 об.ч. HNO_3 + 3 об.ч. HF + 3 об.ч. CH_3COOH + 0.06 об.ч. Br_2 . Азотная кислота является сильным окислителем германия, а плавиковая хорошо растворяет диоксид германия.
- Химическая инертность кремния отчасти объясняется наличием на поверхности оксидной плёнки, которая растворима только в водных растворах щелочей и плавиковой кислоты. Поэтому для химической обработки используют либо кислотный, либо щелочной травители. Уксусная кислота в кислотных травителях служит в качестве растворителя и обеспечивает более высокую однородность и более лёгкий контроль процесса травления.
- В качестве кислотных травителей применяют различные смеси плавиковой и азотной кислот (1 мол. д. HNO_3 и 4.5 мол. д. HF). Уравнения реакции:



ПОВЕРХНОСТНОЕ ТРАВЛЕНИЕ ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ

- В растворах с большим содержанием плавиковой кислоты скорость процесса контролируется стадией окисления. При этом травление протекает анизотропно, поскольку окисление очень чувствительно к дефектам кристаллической структуры. В смесях с большим содержанием азотной кислоты процесс травления протекает изотропно, поскольку скорость реакции лимитируется стадией растворения.
- В качестве щелочных травителей кремния используют 10-20% водные растворы КОН либо NaOH, реакцию ведут при 90-100 °С. Щелочные травители, в отличие от кислотных, всегда являются анизотропными – скорость травления в углублениях поверхности выше. Скорость реакции определяется числом оборванных связей на поверхности.
- Карбид кремния чрезвычайно устойчив к химическому воздействию. Наиболее подходящий травитель получается на основе расплавленных солей либо щелочей, например – расплавленная при 900 °С NaOH либо КОН.



ПАРОГАЗОВАЯ ОБРАБОТКА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК

- **Обработка в смеси HCl + H₂.** Процесс проводят в герметичной камере при температуре 1200 °С. Кремниевые подложки располагают в реакторе рабочей камеры и прогревают в течение нескольких минут в потоке очищенного водорода. После этого в поток водорода добавляют небольшое количество (0.5-2% об.) безводного хлористого водорода. Идёт травление кремния в соответствии с реакцией: $Si_{ТВ} + HCl_{газ} = SiCl_{2пар} + H_{2газ}$. Скорость травления ~ 5 нм / мин.
- **Обработка в смеси H₂O + H₂.** Обработка проходит при температуре 1250-1270 °С. В рабочую камеру поступает поток водорода, в который добавляются пары воды в количестве 0.02-0.1%. При этом происходит окисление и подтравливание кремния: $Si_{ТВ} + H_2O_{пар} = SiO_{пар} + H_{2газ}$. Скорость травления ~ 1 нм / мин.
- **Обработка в смеси SF₆ + H₂.** Температура процесса 1000-1050 °С (одна из самых низких). В поток водорода вводят гексафторид серы в количестве 0.2%. Реакция имеет следующий вид: $5Si_{ТВ} + 2 SF_{6 пар} = 2SiS_{пар} + 3SiF_{4 пар}$. Процесс используют для локального травления кремния, так как получаются углубления (лунки) с плоским дном и перпендикулярными боковыми стенками.
- Наличие примесей в рабочих смесях приводит к образованию нежелательных посторонних включений (примесных дефектов) на поверхности подложки.

СУХОЕ ТРАВЛЕНИЕ

В общем случае под травлением понимают селективное удаление участков резиста, а также полупроводниковых и диэлектрических слоёв.

Виды травления:

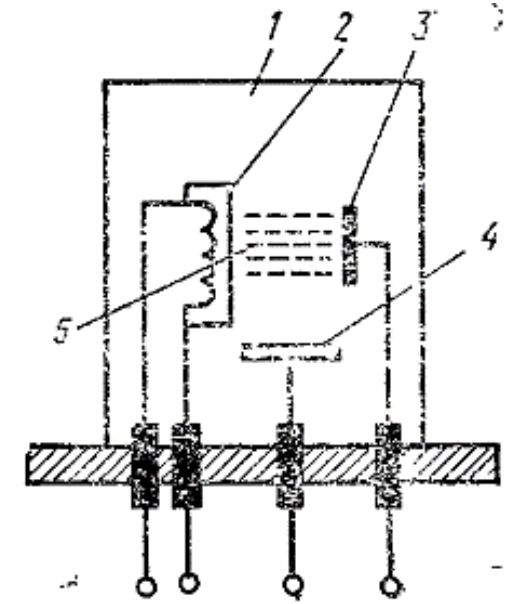
- **Влажное химическое** травление – для очистки и полировки пластин, для снятия фоторезиста
- **Сухое** травление
 - **Плазменное** – источником частиц является низкотемпературная газоразрядная плазма
 - **Ионное** – механическое распыление ионами 0.1-2 кэВ, обычно инертные газы (аргон)
 - **Ионно-плазменное** – обрабатываемый материал находится в непосредственном контакте с плазмой
 - **Ионно-лучевое** – зона процесса травления отделена от зоны генерации ионов (травление потоком ионов)
 - **Плазмохимическое** – плазма играет роль генератора химически активных частиц
 - **Реактивное ионное** – суперпозиция физического и химического факторов травления
 - **Реактивное ионно-плазменное** – материал подложки погружен в плазму, многофакторное воздействие
 - **Реактивное ионно-лучевое** – контакт поверхности образца с плазмой отсутствует

СУХОЕ ТРАВЛЕНИЕ

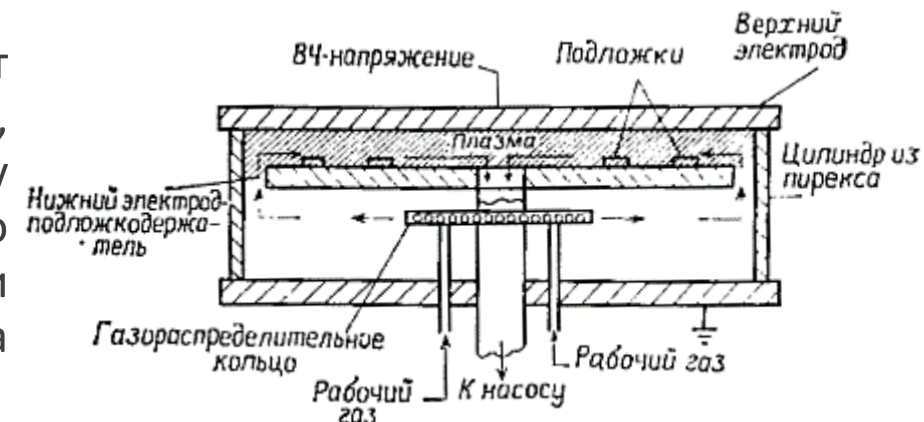
- Методы сухого травления хорошо подходят для различных этапов технологического процесса изготовления ИС благодаря анизотропному характеру травления, что обуславливает высокое разрешение при переносе рисунка.
- При использовании методов ионного травления, включающего ионно-лучевое и ионно-плазменное травление, процесс травления происходит исключительно по механизму физического распыления. Реактивные методы, включающие собственно плазменное травление, реактивное электронно-лучевое травление и реактивное ионно-плазменное травление, основаны на различной степени сочетаний химических реакций, в ходе которых образуются летучие или квазилетучие соединения, и физических взаимодействий, таких, как ионная бомбардировка.
- Как ионно-плазменное, так и ионно-лучевое травление основаны на использовании образующихся в процессе разряда высокоэнергетических (≥ 500 эВ) ионов инертного газа, например Ar^+ .

СУХОЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ

- Сущность процесса состоит во взаимодействии ускоренного потока ионов инертного газа (обычно – аргона) с поверхностью обрабатываемой подложки. Электроды, расположенные недалеко от подложки, формируют тлеющий разряд в инертном газе (давление $\sim 0.13-1.3$ Па). На подложку относительно плазмы подаётся значительное отрицательное напряжение (2-3 кВ). В результате положительно заряженные ионы плазмы бомбардируют поверхность подложки, выбивая атомы с её поверхности. Выбитые атомы переходят в объём рабочей камеры и осаждаются на её стенках.
- Процесс является универсальным: можно обрабатывать подложки из любого полупроводникового материала.
- Для поддержания плазмы тлеющего разряда используют эффекты автоэлектронной и ионно-электронной эмиссии, возникающих за счёт высокой напряжённости поля между электродами (при напряжении между электродами в несколько десятков вольт) и в результате бомбардировки поверхности катода положительными ионами плазмы. При этом температура газа примерно равна температуре окружающей среды!



- 2 – термоэмиссионный катод,
- 3 – анод,
- 4 – обрабатываемая подложка



ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ТРАВЛЕНИЕ

В методе ионно-лучевого травления источником ионов обычно является разряд постоянного тока, ограничиваемый магнитным полем, причём область разряда физически отделена от стравливаемой подложки системой сеток (электродов), которые выделяют ионный пучок из разряда, направляя его на подвергаемую травлению поверхность. Для нейтрализации ионного пучка на его пути размещается разогреваемая нить накала, инжектирующая в пучок электроны низких энергий. Для регулировки угла параллельного пучка падающих на подложку атомов Ar поворачивают держатель подложки.



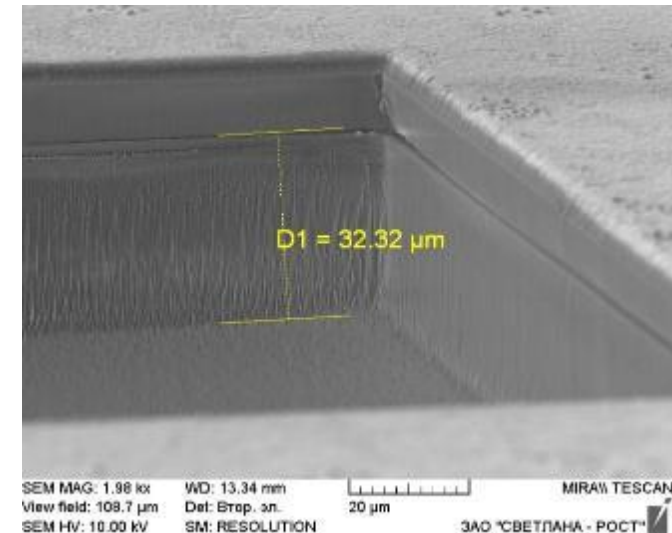
Аналогичный тип реактора используется и для плазмохимического травления

СУХОЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

- При плазмохимической обработке поверхности протекают химические реакции при взаимодействии с плазмой активных газов или смесей газов (т.н. *реактивное травление* материала подложки). Разрешающая способность метода обычно выше, чем в случае ионно-плазменного травления.
- При плазмохимической обработке можно совместить в одной камере несколько различных технологических операций: очистку поверхности, травление и осаждение новых слоёв.
- Для обработки кремниевых подложек в качестве реактивных плазмообразующих составов используются смеси кислорода со фтор- и хлорсодержащими газами.
- Пример $\text{CF}_4 + \text{O}_2 + \text{N}_2$. В низкотемпературной плазме происходит разложение CF_4 с выделением иона фтора. Молекулы кислорода, заполняющие рабочую камеру, ионизируются и легко взаимодействуют с поверхностью кремния, окисляя её. Ионы фтора взаимодействуют с окислом с образованием легколетучего соединения SiF_4 .
- Для осуществления плазмохимического метода обычно используют высокочастотную газоразрядную плазму низкого давления.

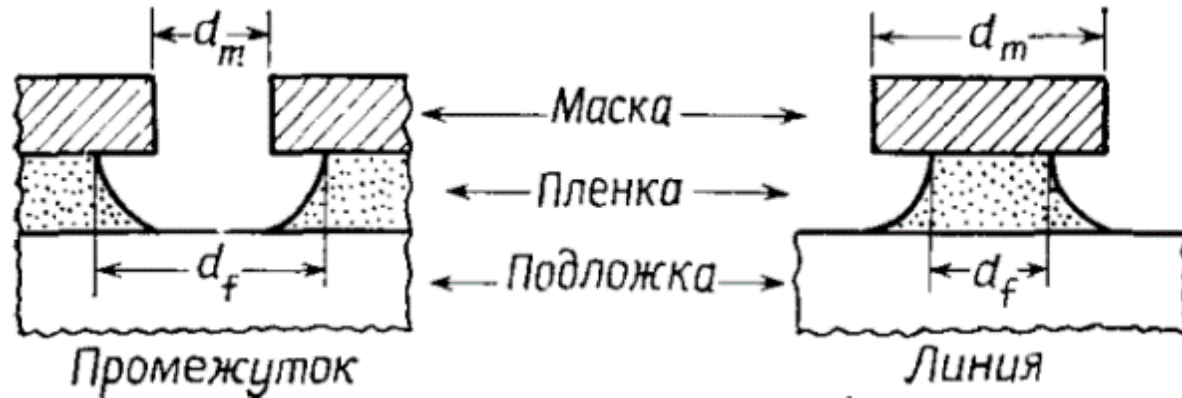


Индуктивно-связанная плазма (ICP)
+ емкостная плазма



кварц

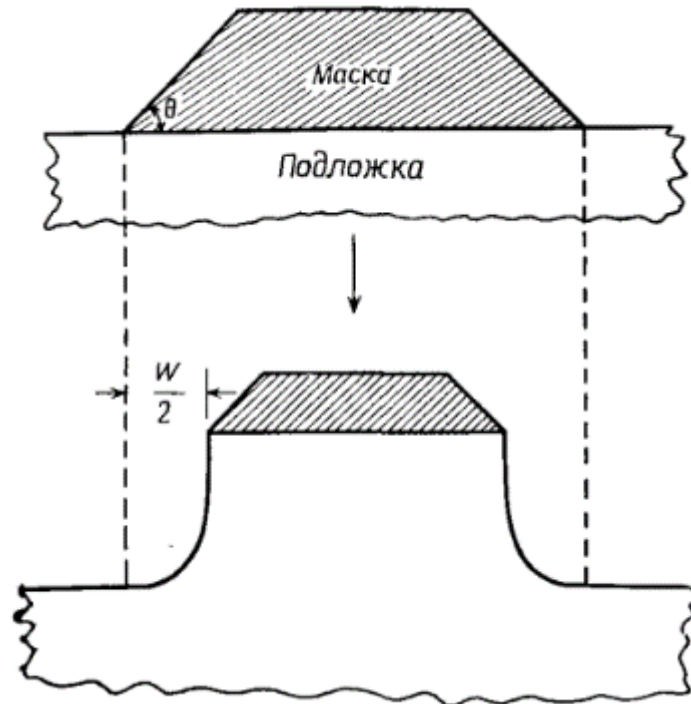
ТРАВЛЕНИЕ ЧЕРЕЗ МАСКУ



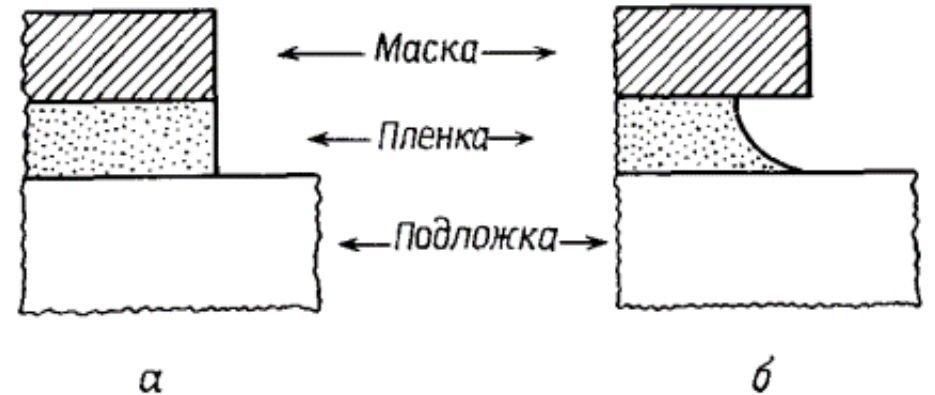
Селективность (избирательность) травления определяется как отношение скоростей травления различных материалов.

Формирование контура вытравливаемого элемента с учётом конечной скорости травления маски.

$$W/2 = (v_{\text{верт.}} \text{ctg } \theta + v_{\text{гор.}}) t_{\text{тр.}}$$



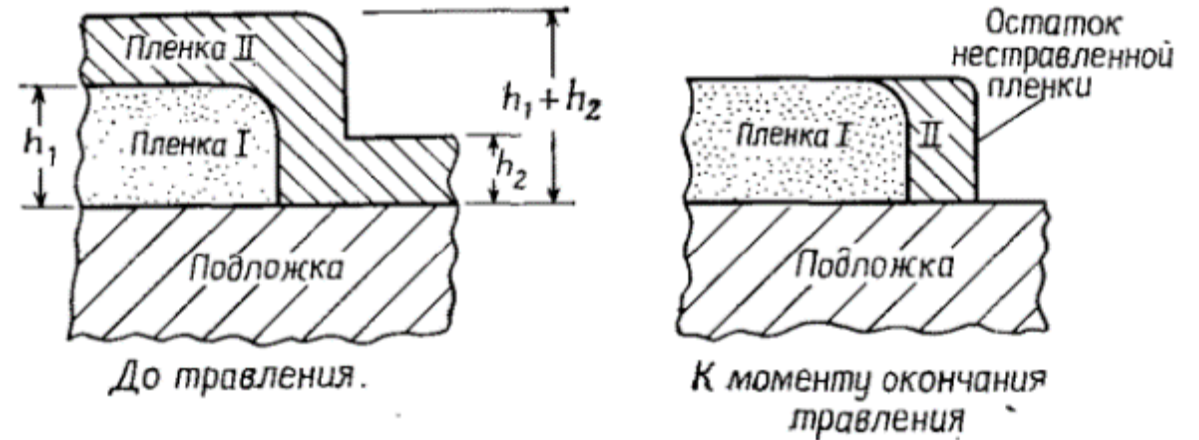
Если скорость травления не зависит от направления, к концу процесса формируется профиль края, имеющий контур четверти окружности.



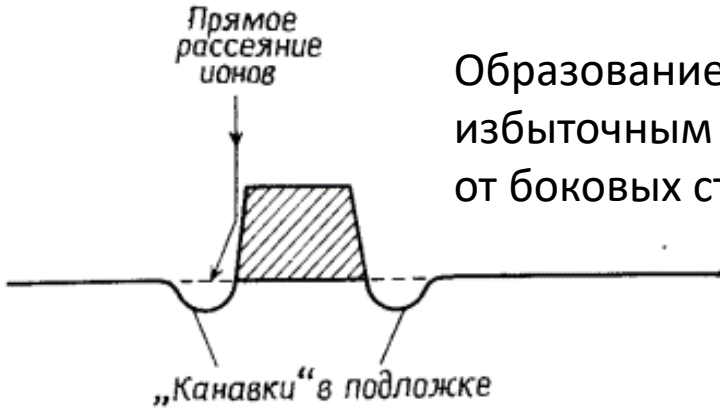
Идеальные профили травления для:
 а – полностью анизотропного травителя,
 б – изотропного травителя. Степень анизотропии $A_f = 1 - v_{\text{верт.}} / v_{\text{гор.}}$.

ПРОЧИЕ АСПЕКТЫ СУХОГО ТРАВЛЕНИЯ

При анизотропном травлении необходимо *перетравливание*, т.е. травление продолжается после того, как с планарной поверхности удалён наиболее медленно стравливаемый участок материала.



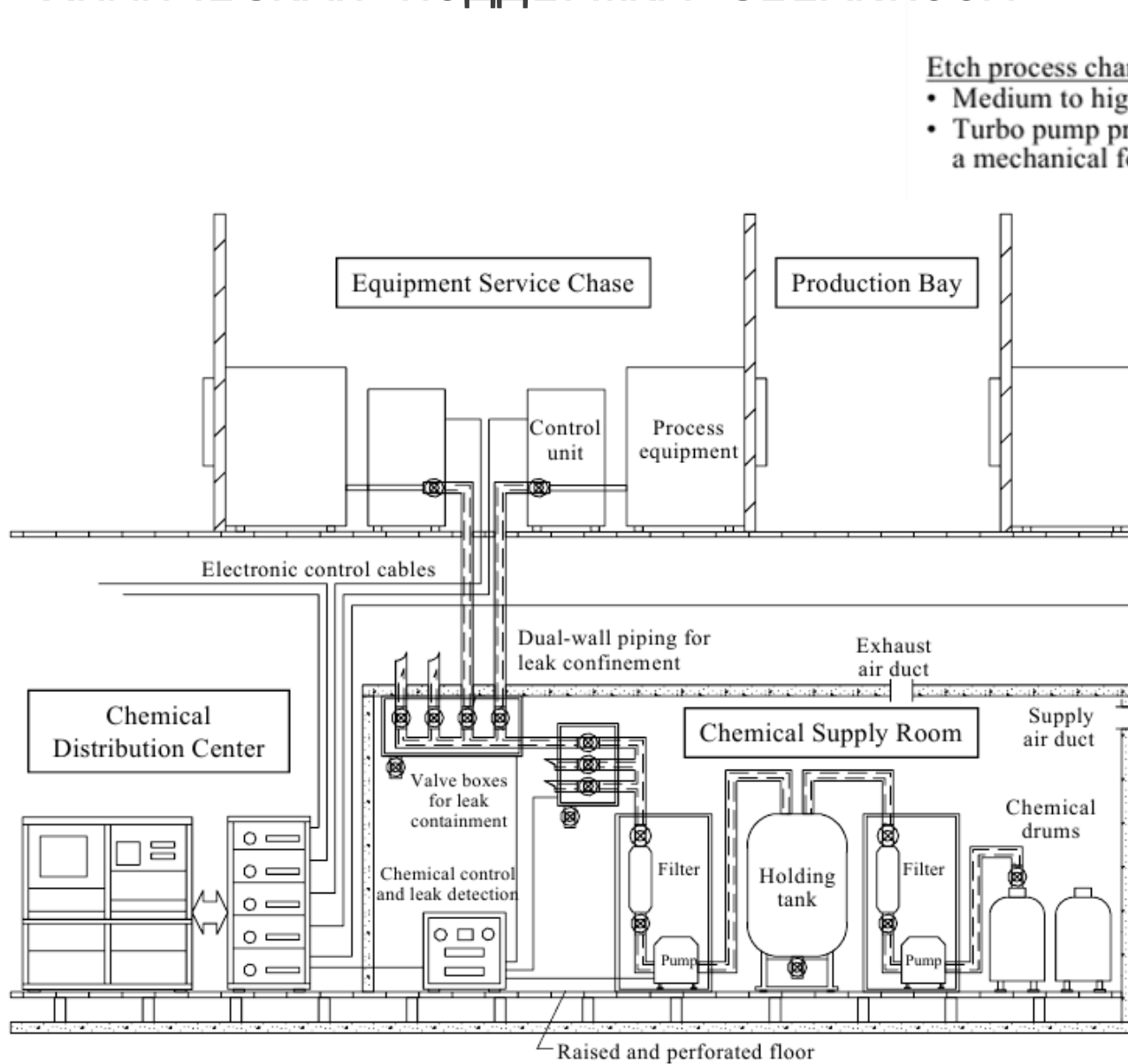
Образование канавок, связанное с избыточным потоком ионов, отражающихся от боковых стенок ступеньки.



Современные травители:

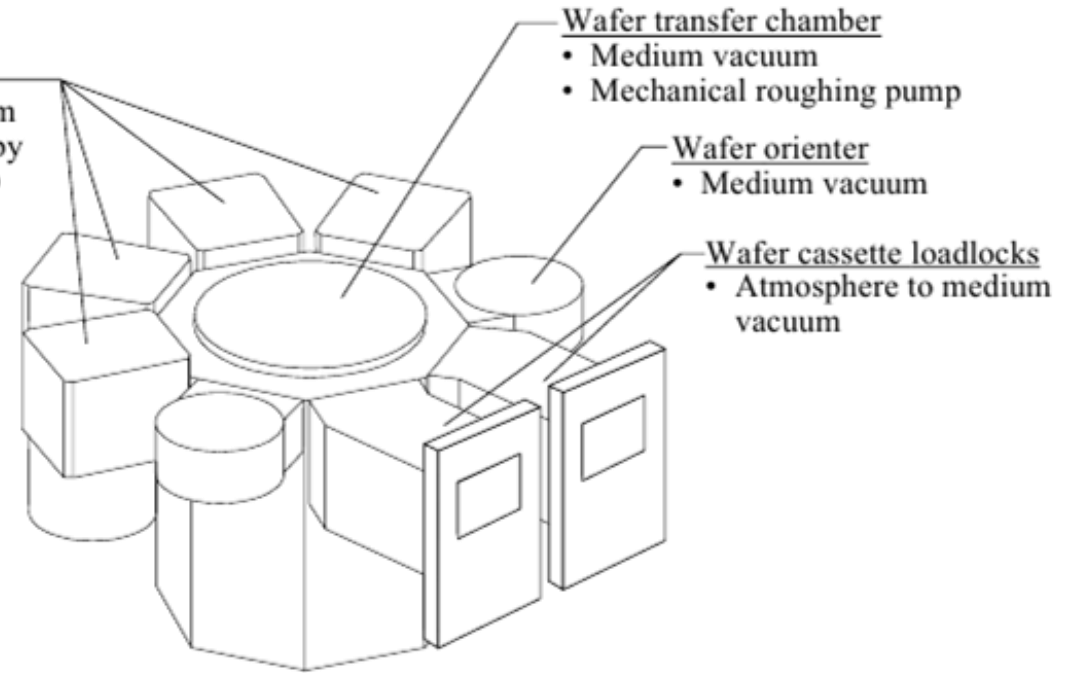
Material Being Etched	Etching Chemistry
Deep Si trench	HBr/NF ₃ /O ₂ /SF ₆
Shallow Si trench	HBr/Cl ₂ /O ₂
Poly Si	HBr/Cl ₂ /O ₂ , HBr/O ₂ , BCl ₃ /Cl ₂ , SF ₆
Al	BCl ₃ /Cl ₂ , SiCl ₄ /Cl ₂ , HBr/Cl ₂
AlSiCu	BCl ₃ /Cl ₂ /N ₂
W	SF ₆ only, NF ₃ /Cl ₂
TiW	SF ₆ only
WSi ₂ , TiSi ₂ , CoSi ₂	CCl ₂ F ₂ /NF ₃ , CF ₄ /Cl ₂ , Cl ₂ /N ₂ /C ₂ F ₆
SiO ₂	CF ₄ /CHF ₃ /Ar, C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , C ₄ F ₈ /CO, C ₃ F ₈ , CH ₂ F ₂
Si ₃ N ₄	CHF ₃ /O ₂ , CH ₂ F ₂ , CH ₂ CHF ₂

ХИМИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА CLEANROOM

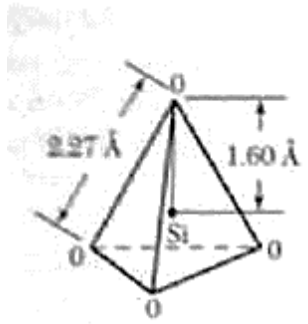


Etch process chambers

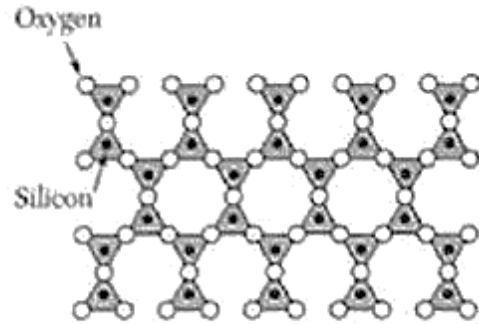
- Medium to high vacuum
- Turbo pump preceded by a mechanical forepump



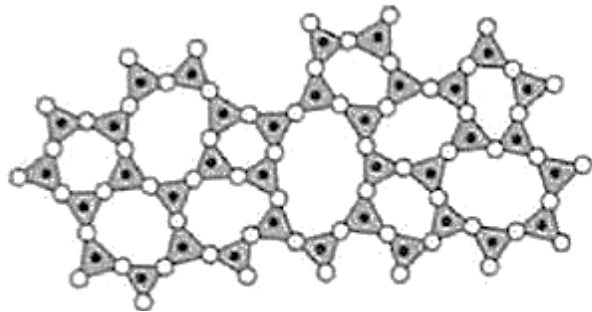
ДИОКСИД КРЕМНИЯ (SILICA)



(a)



структура кварца

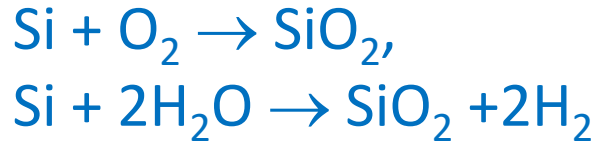


аморфная структура



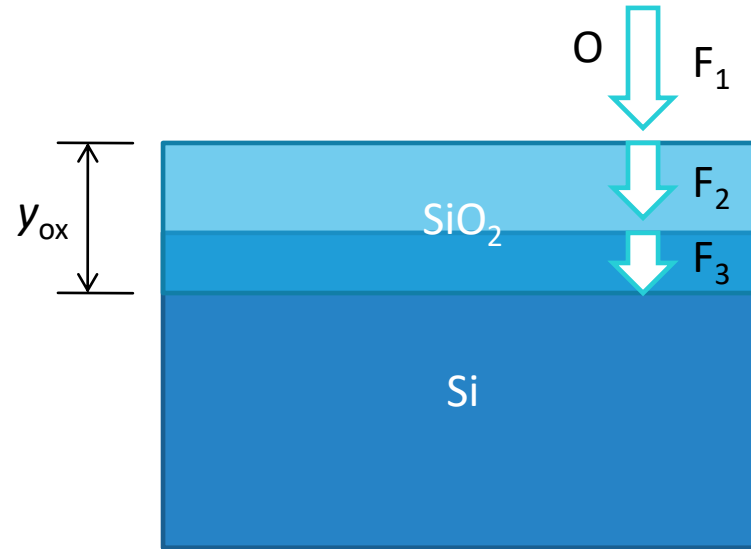
- Диоксид кремния является отличным изолятором: удельное сопротивление $10^{13} \dots 10^{17}$ Ом·см, электрическая прочность $\sim 10^7$ В/см.
- Диоксид кремния блокирует диффузию основных легирующих элементов (B, P, As) и многих нежелательных примесей – поэтому используется в качестве маски для локального легирования кремния.
- Стабилен при высоких температурах (до 1600 °C), применяемых в технологических процессах изготовления интегральных микросхем.

ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

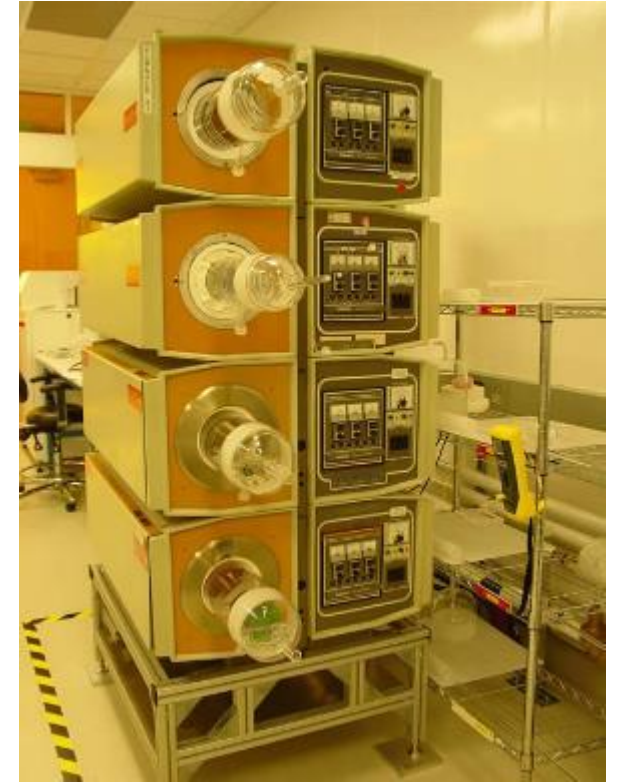


Виды окисления:

- термическое окисление:
 - сухое
 - влажное
 - в парах воды
 - хлорное
 - пирогенное
- анодное окисление
- пиролитическое окисление
- плазмохимическое окисление



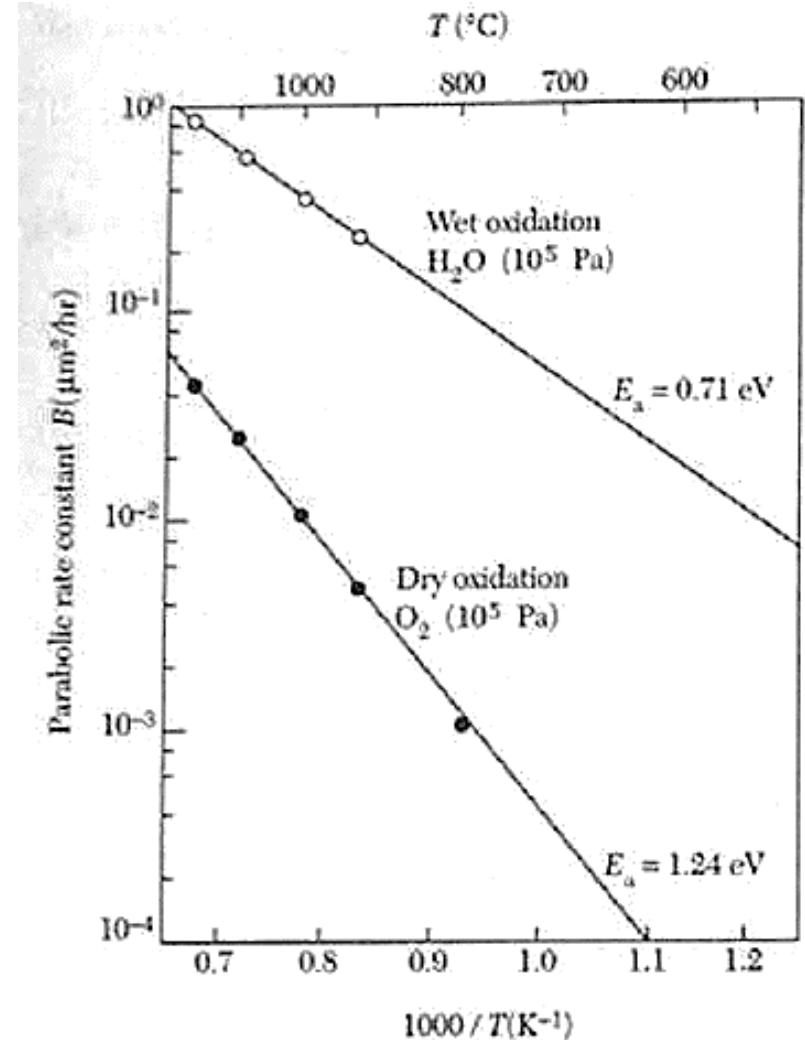
По мере окисления граница раздела вдвигается в кремний, поглощая все новые слои кристалла. Исходя из значений плотности и молекулярного веса Si и SiO₂ при формировании слоя толщиной y_{ox} поглощается слой кремния толщиной $0.44 y_{\text{ox}}$. Это справедливо для любой ориентации кремния, в т.ч. для поликристаллического кремния.



Наиболее распространённый метод окисления реализуется в кварцевых диффузионных трубах, где подложки кремния располагаются вертикально, типичные температуры процесса лежат в интервале от 800 до 1200 °C, точность удержания 1 °C.

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В ПАРАХ ВОДЫ

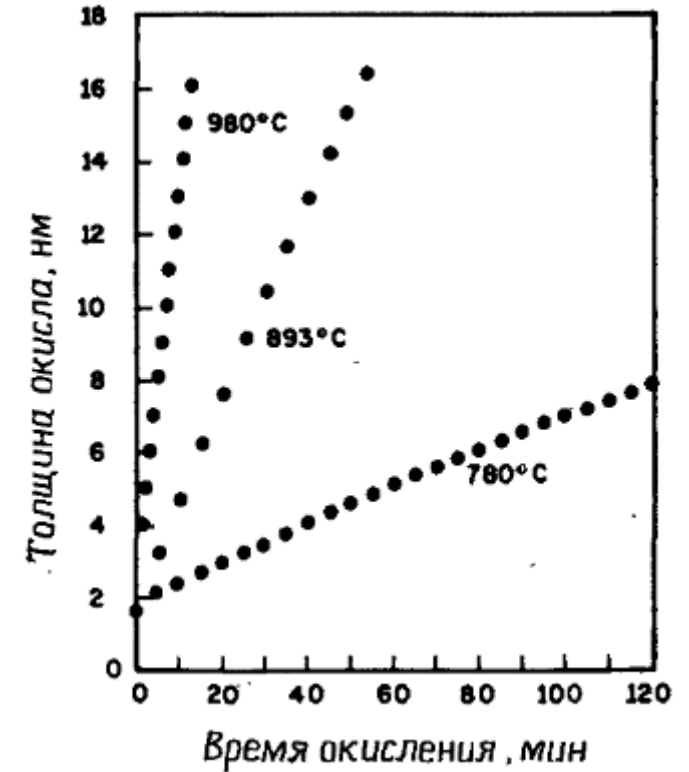
- Используется вода высокой чистоты. Формирование плёнки оксида происходит за счёт диффузионного переноса воды через слой оксида к поверхности кремния. Коэффициент диффузии воды $9 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$ при $1050 \text{ }^\circ\text{C}$. Экспериментальные данные свидетельствуют в пользу молекулярной природы диффундирующих частиц (выполняется закон Генри).
- При температурах выше $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ толщина оксида увеличивается со временем как $y = \sqrt{Bt}$, но чем ниже температура процесса, тем ближе к линейной соответствующая зависимость. При линейном росте скорость реакции определяется количеством свободных связей атомов кремния, которые могут реагировать с молекулами воды на границе раздела Si-SiO₂.
- Большое влияние на скорость роста оксида оказывают ориентация и тип проводимости подложки, и концентрация примесей и дефектов в приповерхностном слое. В современном микроэлектронном производстве метод является устаревшим.



Зависимость константы B от температуры для разных методик окисления

ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В СУХОМ КИСЛОРОДЕ

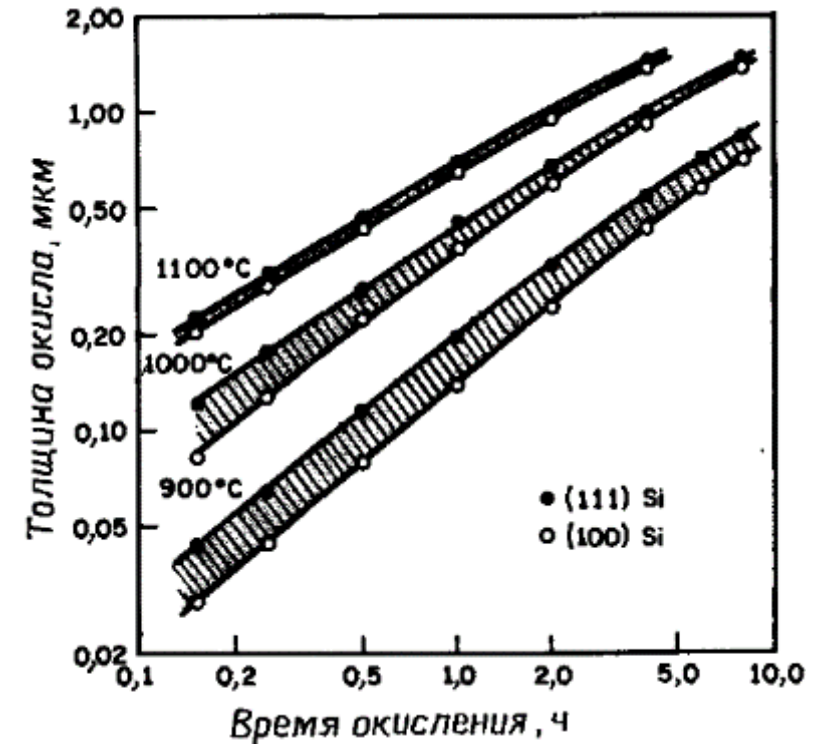
- Используют поток очищенного сухого кислорода при температурах от 700 до 1400 °С. Через плёнку окисла диффундируют ионы кислорода. Коэффициент диффузии кислорода $2.8 \cdot 10^{-14}$ см²/с при 1500 °С, т.е. существенно меньше, чем у водорода и воды.
- Методика используется для выращивания однородных тонких окисных плёнок высокого качества (в структуре окисла отсутствуют гидроксильные группы). На качество плёнки оказывают влияние применяемые методы очистки поверхности и степень чистоты используемых газов.
- Добавление HCl в окислительную атмосферу обычно применяется для пассивирования ионов натрия и геттерирования примесей и дефектов в кремнии.
- Для получения высококачественного окисла применяются двух- или трёхстадийные процессы окисления (например, сначала при 950 °С с добавлением HCl, затем пассивация при 1150 °С в сухом кислороде).



Зависимость толщины окисла от времени окисления в сухом кислороде

ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ ВО ВЛАЖНОМ КИСЛОРОДЕ

- Сухой и очищенный от примесей кислород пропускают через водяную баню, где он насыщается горячими водяными парами, и затем подают его в рабочую камеру. Так как скорость образования оксидного слоя в парах воды значительно выше, чем в сухом кислороде, то скорость процесса окисления зависит от содержания влаги, и эту характеристику в данном технологическом процессе можно изменять в широких пределах.
- Окисление во влажном кислороде может проводиться **пирогенным методом**, при котором образование паров воды происходит за счёт реакции H_2 и O_2 . Пирогенный метод гарантирует получение паров высокой чистоты. Повышение давления водяных паров приводит к дополнительному увеличению скорости роста.



Зависимость толщины окисла от времени окисления во влажном кислороде при парциальном давлении паров воды $8,5 \cdot 10^4$ Па

ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ: МОДЕЛЬ DEAL-GROVE

Эта модель основана на равенстве значений потока F_1 окислителя из газовой фазы на внешнюю поверхность окисла, потока F_2 окислителя, диффундирующего через окисел и потока F_3 , соответствующего реакции окисления на границе Si-SiO₂. Предполагается, что диссоциация молекул при движении через слой окисла отсутствует.

Поток частиц окислителя через окисел для любой точки слоя окисла описывается законом Фика (произведение коэффициента диффузии на градиент концентрации частиц окислителя в окисле для некоторой координаты y вглубь материала):

$$F_2 = -D \frac{dC}{dy}$$

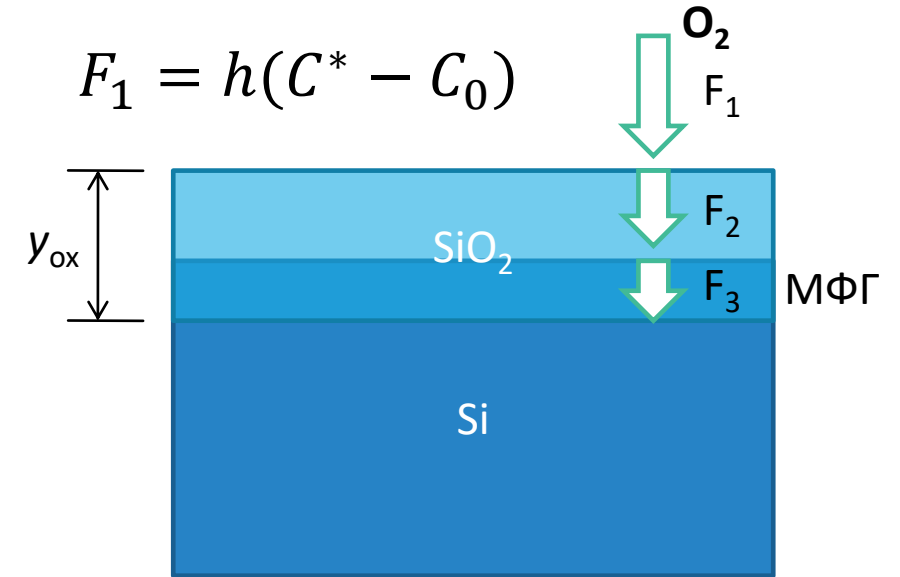
Для стационарного процесса:

$$F_2 = D \frac{(C_0 - C_{\text{МФГ}})}{y_{\text{ox}}}$$

Для потока на МФГ:

$$F_3 = k_s C_{\text{МФГ}}$$

k_s – константа скорости поверхностной хим. реакции окисления.



По мере окисления граница раздела вдвигается в кремний, поглощая все новые слои кристалла. Исходя из значений плотности и молекулярного веса Si и SiO₂ можно показать, что при формировании слоя толщиной y_{ox} поглощается слой кремния толщиной $0.44 y_{\text{ox}}$. Это справедливо для любой ориентации кремния, а также для поликристаллического кремния.

ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ: МОДЕЛЬ DEAL-GROVE

Определим N как число молекул окислителя, входящих в единичный объём окисного слоя. Поскольку окисел содержит $2.2 \cdot 10^{22}$ молекул SiO_2 на 1 см^3 , а на создание одной молекулы SiO_2 требуется одна молекула O_2 или две молекулы H_2O , то $N = 2.2 \cdot 10^{22}$ для окисления в сухом кислороде или удвоенное значение для окисления в парах воды. Тогда выражение для потока окислителя, достигающего МФГ, будет таким:

$$N \frac{dy_{ox}}{dt} = F_3$$

В итоге, выразив $C_{\text{МФГ}}$ и C^* через C_0 , получим уравнение:

$$N \frac{dy_{ox}}{dt} = \frac{k_s C_0}{1 + k_s/h + k_s y_{ox}/D}$$

– скорость роста окисла

Введём переменные:

$$A = 2D \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{h} \right) \quad B = 2D \frac{C_0}{N}$$

C_0 - концентрация окислителя на внешней поверхности окисла, k_s – константа скорости реакции окисления, h – коэффициент переноса из газовой фазы, D – эффективный коэффициент диффузии.

Получаем уравнение в виде:

$$\frac{dy_{ox}}{dt} = \frac{B}{A + 2y_{ox}}$$

Интегрируем уравнение методом разделения переменных

ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ: МОДЕЛЬ DEAL-GROVE

Результат интегрирования: $y_{ox}^2 + Ay_{ox} - B(t + \tau) = 0$

$$\tau = (y_0^2 + Ay_0)/B$$

Его решение:

$$y_{ox} = \frac{A}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{t + \tau}{A^2/4B}} - 1 \right)$$

Частные случаи:

1) При значительном времени окисления ($t \gg \tau$):

$$y_{ox} = \sqrt{Bt}$$

2) При очень коротком времени окисления ($(t + \tau) \ll A^2/4B$):

$$y_{ox} = \frac{B}{A}(t + \tau)$$

Модель Дила-Гроува обеспечивает очень хорошее совпадение теоретических расчётов с экспериментальными результатами для различных методов выращивания плёнок оксида кремния. Исключением являются плёнки SiO₂ толщиной менее 30 нм, выращенные в сухом кислороде. В этом случае наблюдаются аномально высокие скорости окисления по сравнению с результатами, предсказываемыми данной теоретической моделью.

Величина τ соответствует сдвигу по временной оси, который необходим для того, чтобы учесть **наличие начального окисного слоя толщиной y_0** .

Параболическая константа скорости B определяет ход реакции в целом при высоких температурах и толстых слоях окислов, линейная константа B/A определяет ход окисления в начальные моменты времени (тонкий окисный слой). Константа B прямо пропорциональна равновесной объёмной концентрации окислителя C^* в окисле, которая в свою очередь пропорциональна парциальному давлению окислителя в газовой фазе (закон Генри).

ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ: МОДЕЛЬ DEAL-GROVE

Константы скорости окисления кремния
в сухом кислороде

Температура окисления, °C	A, мкм	Параболическая константа скорости окисления B, мкм ² /ч	Линейная константа скорости окисления B/A, мкм/ч	τ , ч
1200	0,040	0,045	1,12	0,027
1110	0,090	0,027	0,30	0,076
1000	0,165	0,0117	0,071	0,37
920	0,235	0,0049	0,0208	1,40
800	0,370	0,0011	0,0030	9,0
700	0,00026	81,0

Температура окисления, °C	A, мкм	Параболическая константа скорости окисления B, мкм ² /ч	Линейная константа скорости окисления B/A, мкм/ч
1200	0,05	0,720	14,40
1100	0,11	0,510	4,64
1000	0,226	0,287	1,27
920	0,50	0,203	0,406

Абсолютная величина коэффициента A возрастает с уменьшением температуры окисления, в то время как B уменьшается с понижением температуры.

Константы скорости окисления кремния
во влажном кислороде

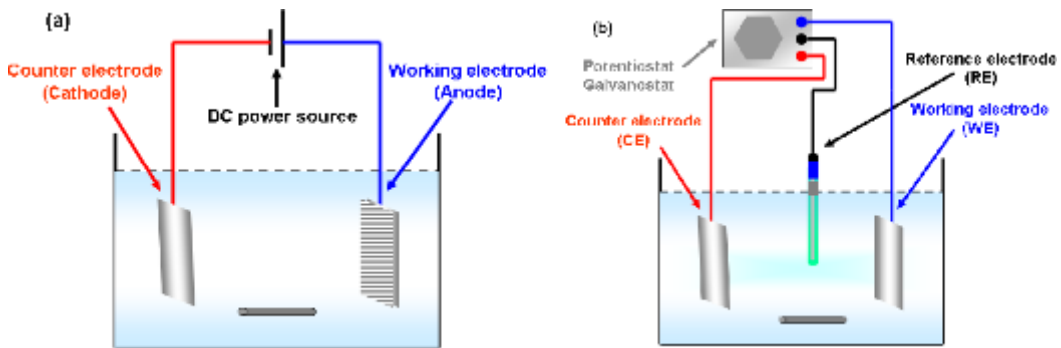
ЭФФЕКТЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ОКИСЛЕНИИ КРЕМНИЯ

Дополнительные эффекты, влияющие на результирующее распределение примеси и изменение свойств границы раздела Si-SiO₂:

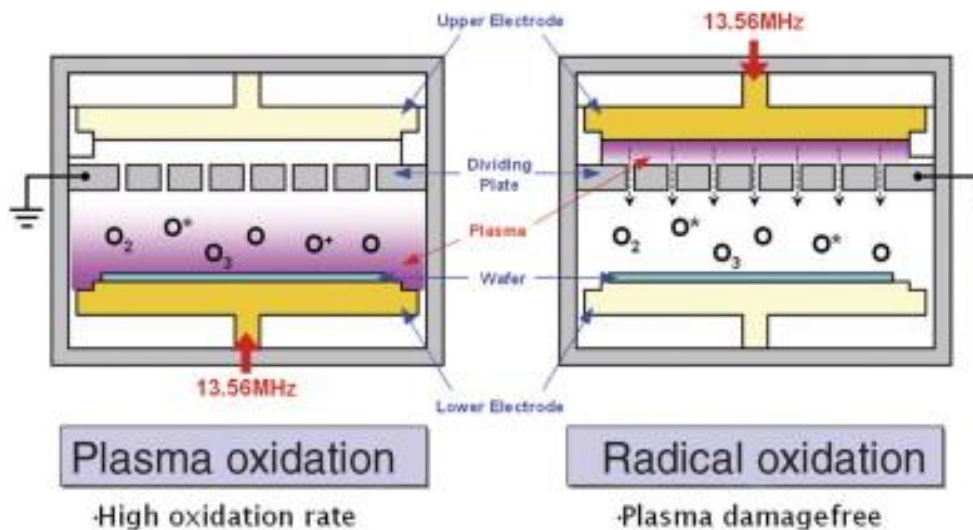
- Окисление при *отжиге* и перемещение в связи с этим границы Si-SiO₂ вглубь кристалла
- *Диффузия*, ускоренная окислением. Вследствие взаимодействия атомов примеси с точечными дефектами диффузия под окисленными участками поверхности идет значительно быстрее, чем под неокисленными
- Генерация дополнительного числа вакансий, часть из которых окажется заряженными
- Взаимодействие между заряженными ионами –кластеризация примеси
- Накопление локальных деформаций кристаллической решетки

АНОДНОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

- Метод анодного окисления включает две модификации: окисление поверхности кремния в жидком электролите (**электролитическое анодирование**, не используется в микроэлектронном производстве из-за плохого качества окисла) и окисление в газовой плазме (**плазменное окисление**).



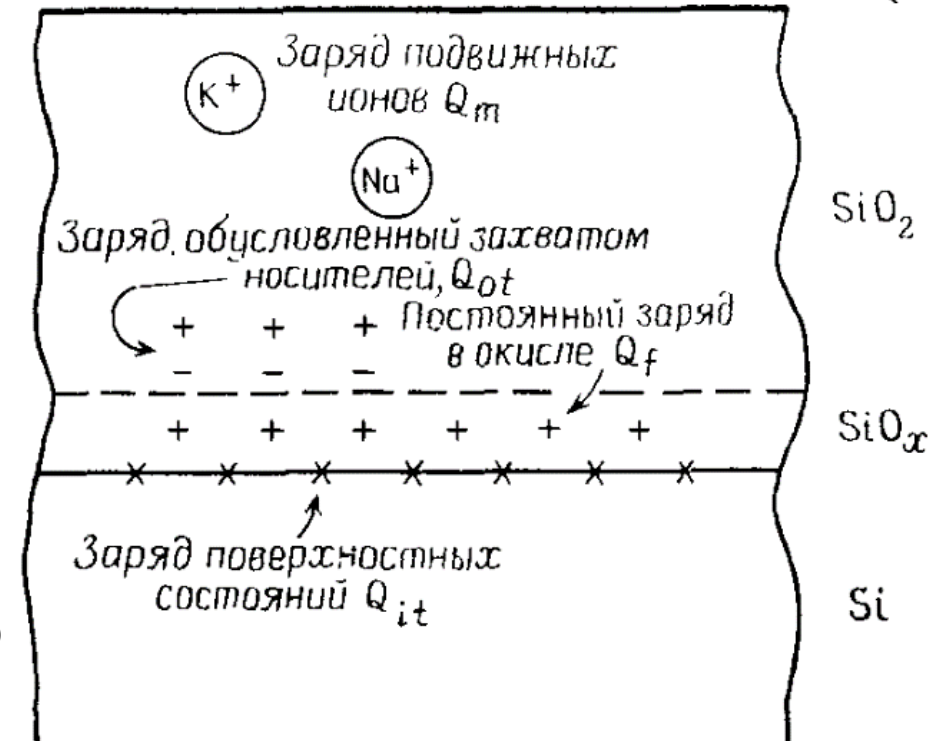
- Процесс выращивания анодных оксидных плёнок в электролите может быть представлен как перенос ионов кремния через границу раздела оксид-кремний и далее через границу оксид-электролит, где и идёт реакция окисления. Для поддержания постоянного ионного тока через оксид необходимо, чтобы с увеличением толщины оксидной (диэлектрической) плёнки возрастало падение напряжения в этой плёнке (плюс на кремнии). Анодное окисление будет продолжаться до тех пор, пока не произойдёт электрический пробой оксидной плёнки.



- Плазменное окисление – низкотемпературный процесс (от 600 °C до комнатной), проходящий в вакууме в тлеющем разряде чистого кислорода. Плазма формируется либо с помощью ВЧ разряда, либо с помощью ионизирующего пучка электронов. Подложка в методе плазменного анодирования находится под небольшим положительным потенциалом относительно плазмы. Плазменные оксиды кремния представляют собой стехиометрический SiO_2 . Их структура является аморфной, а свойства приближаются к параметрам плёнок, полученных методом термического окисления кремния.

СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ

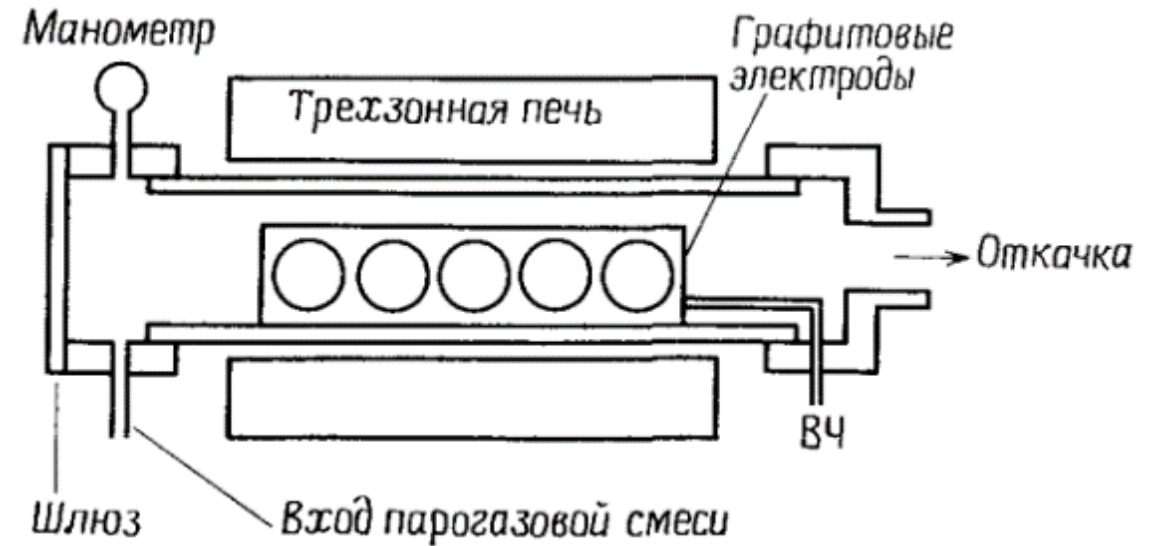
- Граница раздела Si-SiO₂ представляет собой переходную область между кристаллическим кремнием и аморфным кварцевым стеклом. Различные по своей природе ловушки носителей заряда сопутствуют термически окисленному кремнию, часть из них связана с переходной областью.
- Заряд поверхностных состояний в первую очередь связан со структурными дефектами в нестехиометрической области МФГ. Отжиг в водороде при 450 °С приводит к эффективной нейтрализации заряда на этих дефектах.
- Постоянный заряд в окисле (обычно положительный) расположен на расстоянии ~ 3 нм от МФГ. Величина заряда определяется режимом окисления и условиями отжига.
- Заряд подвижных ионов связан с ионами щелочных металлов (Na⁺, K⁺, Li⁺). При наличии электрического поля эти ионы могут перемещаться по слою окисла даже при комнатной температуре. Для уменьшения величины этого заряда требуется чистка поверхностей реакторов и использование хлорного окисления.
- Заряд, захваченный в окисле, может иметь разный знак, а его величина определяется концентрацией дефектов в слое SiO₂. Количество дефектов может увеличиваться со временем, например, при воздействии ионизирующего излучения. Отжиг помогает нейтрализовать этот заряд.



ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК

■ Материалы:

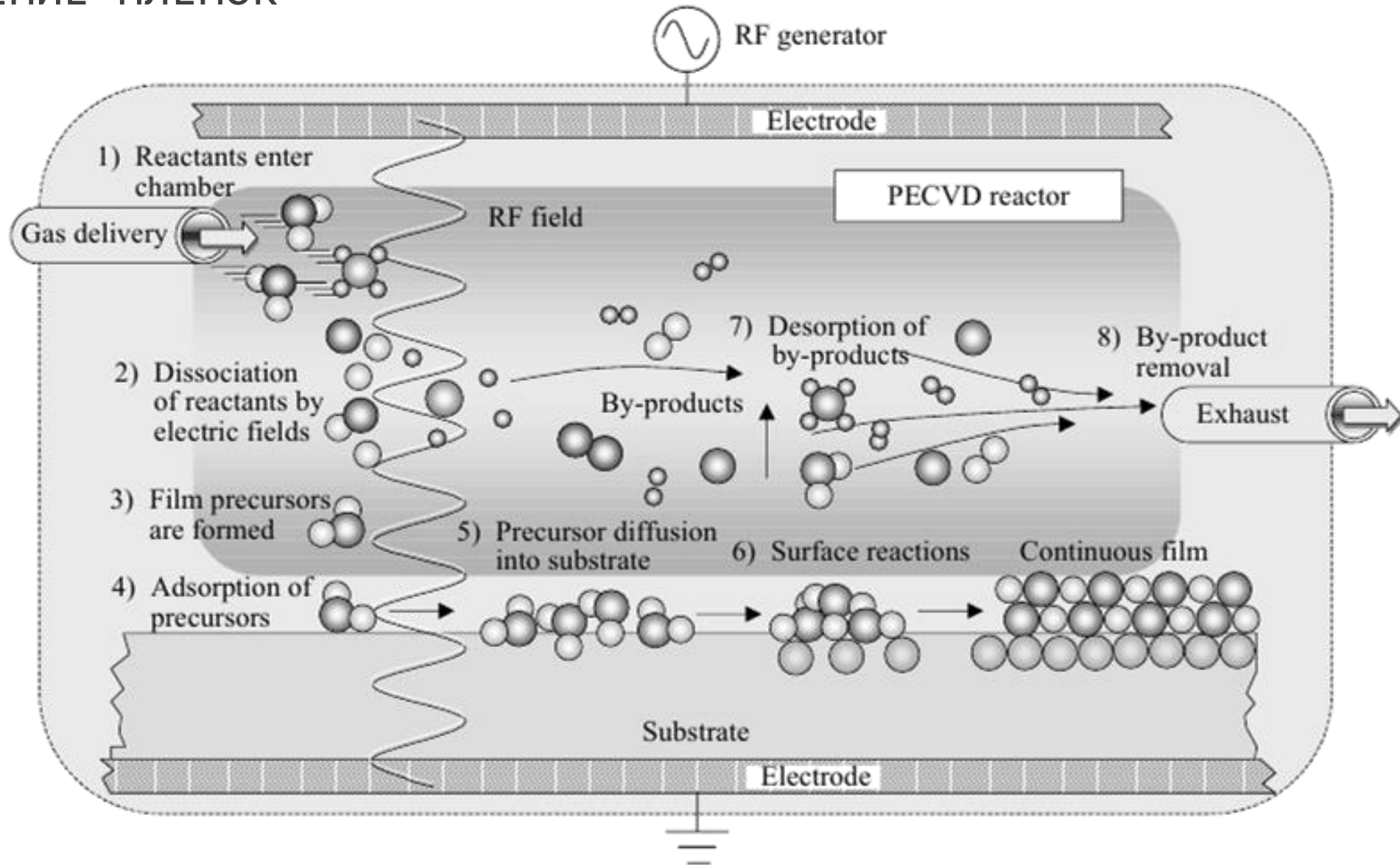
- Оксид кремния
- Нитрид кремния (Si_3N_4 и SiN)
- Поликристаллический кремний
- High-k диэлектрики
- Low-k диэлектрики



Плазмохимический реактор с горячими стенками

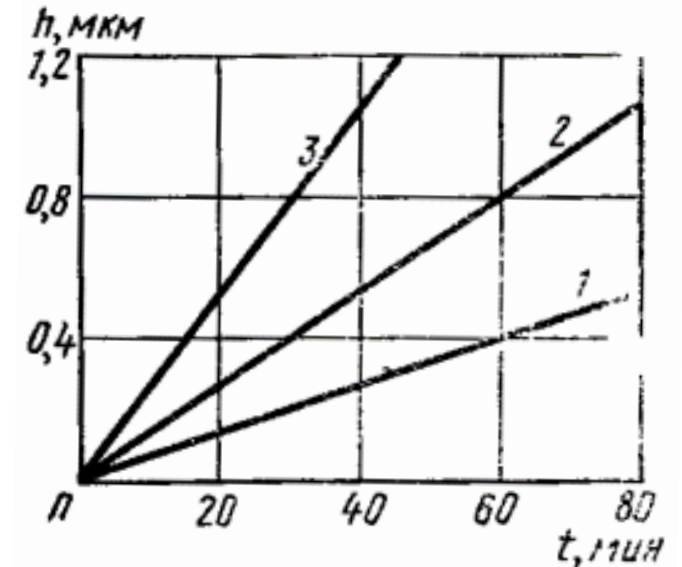
Процесс осаждения протекает в кварцевой трубе, нагреваемой в печи. Подложки устанавливаются вертикально, параллельно газовому потоку. Между электродами, на которые крепятся подложки, зажигается тлеющий разряд.

ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК



ПИРОЛИТИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК ОКСИДА КРЕМНИЯ

- С помощью этого метода получают оксиды на поверхности кремния без участия материалов подложки. Для этого используется пиролитическое разложение (т.е. при высокой температуре без подвода кислорода извне) различных кремнийорганических соединений. Температура пиролиза ниже, чем в методах окисления кремниевой подложки.
- Пример процесса – термическое разложение тетраэтоксисилана $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$. Температура 700-750 °С. В результате реакции выделяются SiO_2 , SiO , CO_2 и другие органические радикалы. Источником кислорода служит сам тетраэтоксисилан. Второй пример – окисление моносилана кислородом: $\text{SiH}_4_{\text{газ}} + 2\text{O}_2_{\text{газ}} \rightarrow \text{SiO}_2_{\text{тв.}} + 2\text{H}_2\text{O}_{\text{пар}}$. Температура реакции 150-300 °С, скорость осаждения 10-50 нм/мин.
- Процесс может проводиться непосредственно над поверхностью подложки либо в отдельной камере, из которой продукты реакции транспортируются к подложке. В последнем случае температура подложки может быть существенно снижена. Однако с уменьшением температуры подложки осаждение частиц происходит спонтанно, что ведёт к получению рыхлого пористого слоя оксида кремния.



Зависимость толщины плёнки SiO_2 , полученной пиролизом, от времени при различных температурах: 1 – 700, 2 – 725, 3- 750 °С

СВОЙСТВА ПЛЁНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ

Стехиометрический нитрид кремния используют для пассивации поверхности полупроводниковых приборов, сформированных на кремниевых подложках, а также в качестве маски при локальном окислении кремния.



Преимущества слоёв Si_3N_4 :

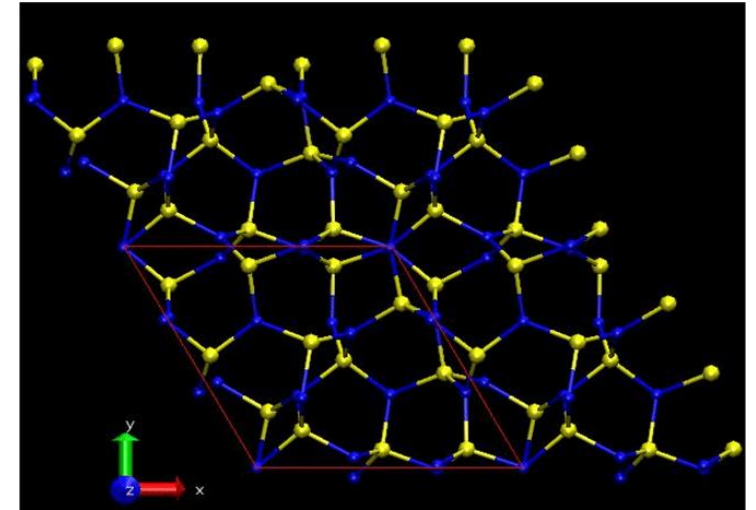
- Обладают меньшей проницаемостью для диффундирующих атомов и сравнимыми с SiO_2 диэлектрическими характеристиками, поэтому их можно делать более тонкими.
- Можно выращивать быстрее, чем плёнки оксида кремния, и при более низких температурах.
- Является барьером для проникновения в окисел кремния щелочных металлов (Na) и влаги и может служить защитой от воздействия внешней среды.

Способ осаждения	Осаждение из парогазовой смеси при пониженном давлении	Плазмохимическое осаждение
Температура, °C	700—800	250—350
Состав	$\text{Si}_3\text{N}_4(\text{H})$	SiN_xH_y
Отношение Si/N	0,75	0,8—1,2
Содержание H, ат. %	4—8	20—25
Коэффициент преломления	2,01	1,8—2,5
Плотность, г/см ³	2,9—3,1	2,4—2,8
Диэлектрическая постоянная	6—7	6—9
Удельное сопротивление, Ом·см	10^{16}	$1 \cdot 10^6$ — $1 \cdot 10^{15}$
Электрическая прочность, 10^6 В/см	10	5
Ширина запрещенной зоны, эВ	5	4—5
Упругие напряжения, ГПа	100 (растягивающие)	От 20 (сжимающих) до 50 (растягивающих)

НАНЕСЕНИЕ ПЛЁНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ

Способы получения Si_3N_4 :

- Реакция взаимодействия кремния с азотом: $3\text{Si} + 2\text{N}_2_{\text{газ}} \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$ при температуре 1100-1300 °С. Продувают азотом пластины кремния в открытом реакторе.
- Реакция взаимодействия силана с аммиаком (самый распространённый способ): $3\text{SiH}_4_{\text{газ}} + 4\text{NH}_3_{\text{газ}} \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4_{\text{тв.}} + 12\text{H}_2_{\text{газ}}$. Рабочая температура 700-1100 °С при атмосферном давлении. В реактор в потоке водорода подаются силан и аммиак в соотношении 1:20. Избыток водорода препятствует преждевременному разложению силана. Скорость роста плёнки нитрида кремния зависит от концентрации силана и температуры проведения процесса.
- Реакция взаимодействия тетрахлорида кремния с аммиаком. Реакция многостадийная, температура возрастает от 400 до 1100 °С.
- Реакция взаимодействия силана с гидразином (N_2H_4). Это позволяет снизить рабочую температуру процесса до 550 °С.
- Реактивное катодное осаждение. Осуществляется при комнатной температуре в газовом разряде. Чаще этот метод используется для осаждения нитрида кремния вида SiN , при этом получают плёнки с широким диапазоном удельных сопротивлений ($10^5 - 10^{21}$ Ом·см).

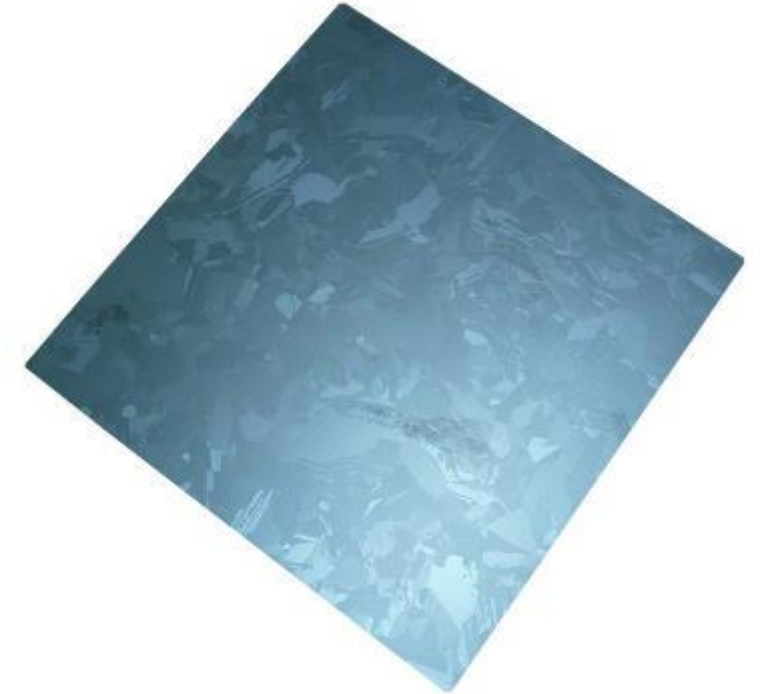


Нитрид кремния, химически осаждённый при 700-900 °С, представляет собой аморфный диэлектрик, содержащий до 8% водорода. Удельное сопротивление плёнок нитрида кремния при комнатной температуре $\sim 10^{16}$ Ом·см. Примеси водорода и кислорода уменьшают удельное сопротивление.

ОСАЖДЕНИЕ ПОЛИКРЕМНИЯ

Поликристаллический кремний используется в качестве затвора в МОП-транзисторах, для формирования высокоомных резисторов, для формирования проводящих дорожек и для обеспечения выпрямляющих контактов к монокристаллическому кремнию.

- Поликремний осаждается путём пиролиза силана при 600-650 °С в реакторах, работающих при пониженном давлении: $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$. Такие параметры, как расстояние между подложками и количество подложек в реакторе, оказывают лишь незначительное влияние на процесс осаждения.
- Первый вариант нанесения: 100% силан при давлении 25-130 Па.
- Второй вариант нанесения: смесь 20-30 % силана с азотом при давлении 25-130 Па.
- Скорость осаждения – 10-20 нм/мин. B_2H_6 вызывает увеличение скорости осаждения, арсин или фосфин (PH_3) резко снижают скорость осаждения.



Поликремний, осаждаемый при $T < 575$ °С, полностью аморфен. Выше 625 °С поликремний становится поликристаллическим и имеет столбчатую структуру доменов. Кристаллические зёрна получают отжигом при $T \sim 700$ °С

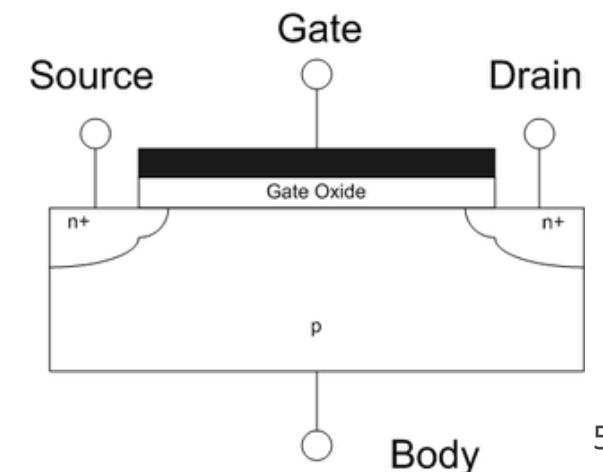
НАНЕСЕНИЕ HIGH-K ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

High-k — технология производства полупроводниковых приборов с подзатворным диэлектриком, выполненным из материала со статической диэлектрической проницаемостью большей, чем у SiO_2 (3.9). Необходимость использования таких материалов вызвана тем, что при уменьшении площади транзистора ёмкость затвора падает, что ограничивает протекающий через него ток. Одним из способов увеличения ёмкости затвора является уменьшение толщины подзатворного диэлектрика. Но при достижении толщины менее 3 нм возникает ток утечки, обусловленный туннелированием зарядов через диэлектрик. При дальнейшем уменьшении толщины диэлектрика ток утечки возрастает экспоненциально. Изготовление подзатворного диэлектрика из материала с высокой диэлектрической проницаемостью позволяет увеличить его толщину, одновременно увеличивая ёмкость затвора, при этом обеспечивая снижение тока утечки на несколько порядков по сравнению с более тонким диэлектриком из диоксида кремния, обеспечивающим равную ёмкость затвора.

- HfO_2 — диоксид гафния.
- ZrO_2 — диоксид циркония.

Диэл. проницаемость у обоих оксидов ~ 25 , технология нанесения — ALD.

$$C = \frac{\kappa \epsilon_0 S}{d}$$



НАНЕСЕНИЕ LOW-K ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

- **Low-k** — технология производства полупроводниковых приборов с диэлектриком, выполненным из материала с меньшей диэлектрической проницаемостью, нежели чем у SiO_2 . Основным эффектом является снижение паразитной ёмкости при замене оксида кремния на low-k диэлектрик той же толщины. Это увеличивает скорость переключения устройств и уменьшает рассеяние тепла. Однако по сравнению с high-k данная технология редко используется для создания подзатворных диэлектриков, но очень хороша для создания диэлектрических прослоек между активными элементами.
- При легировании SiO_2 фтором диэлектрическая постоянная снижается с 3.9 до 3.5.
- Легирование SiO_2 углеродом (органосиликаты, органосиликатные стёкла) снижает диэлектрическую константу до 3.0.
- Пористый кремний является весьма хорошим диэлектриком с диэлектрической постоянной $\sim 1-2$, которая на самом деле сильно зависит от пористости материала. Однако низкая механическая прочность пористокремниевого слоя является главным препятствием для его использования.
- Замечательным low-k диэлектриком является воздух (диэлектрическая постоянная ~ 1), однако использование воздушных карманов снижает механическую прочность и требует особых технологических ухищрений.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



meme-arcade.ru

Виталий Пикулев, 2022
scilink.ru