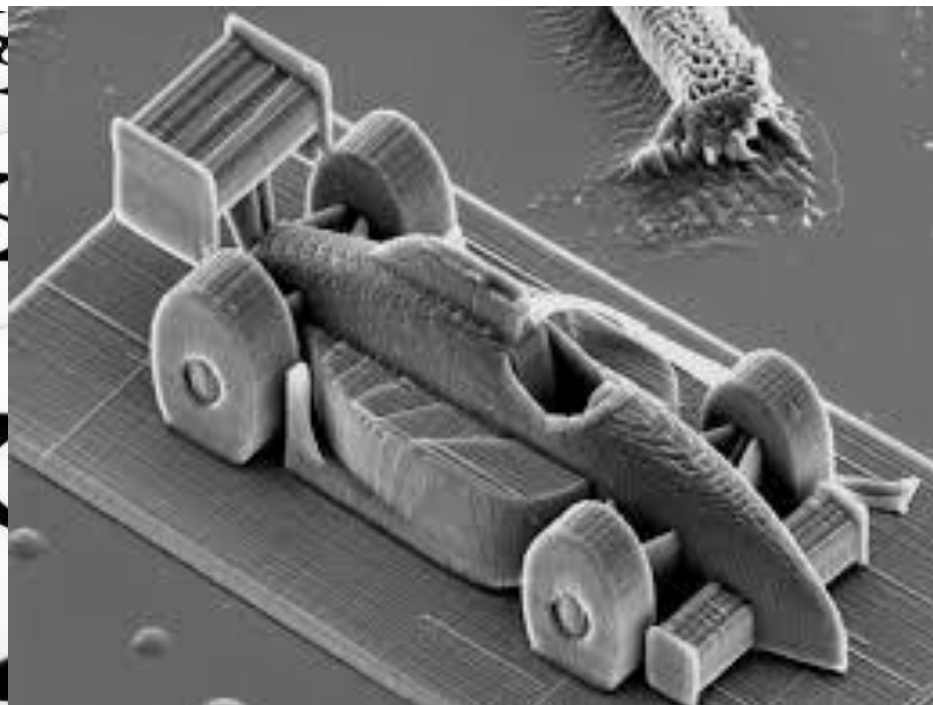
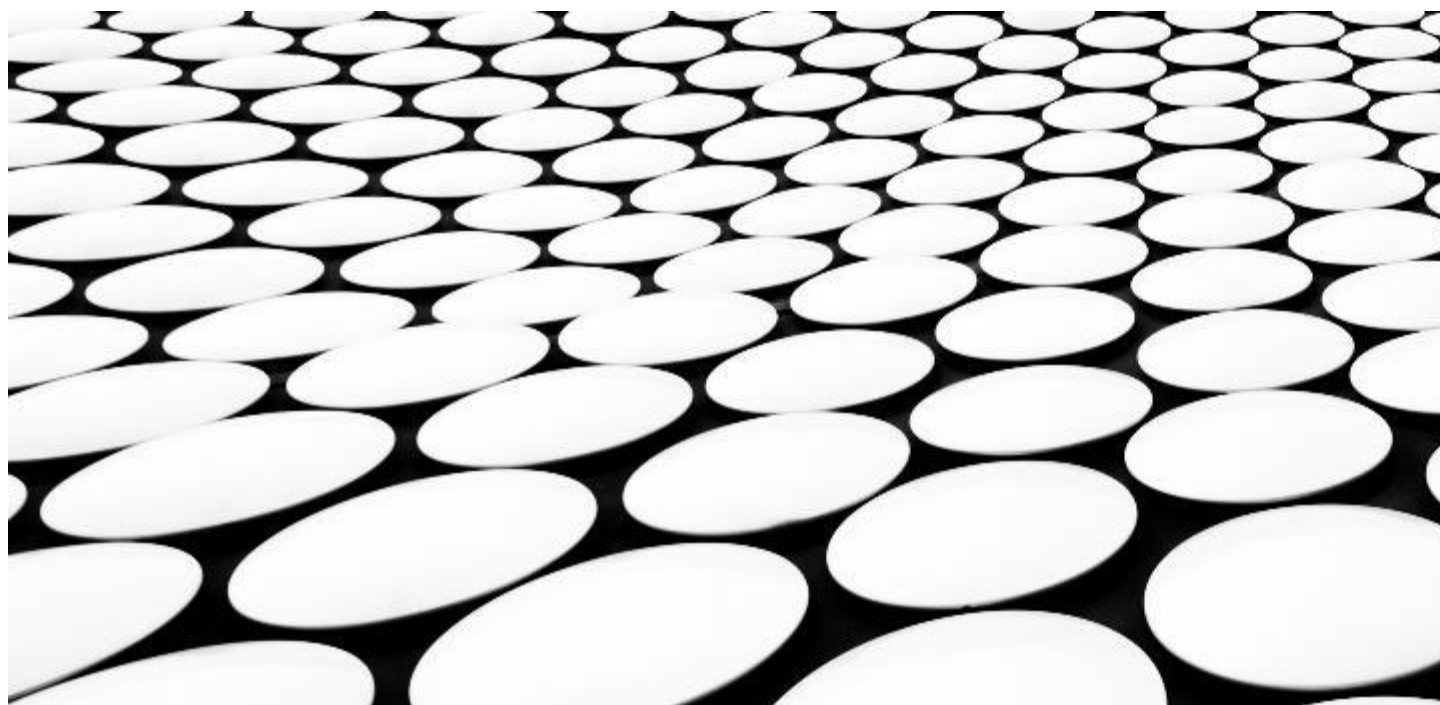


ФИЗИКА И СХЕМОТЕХНИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

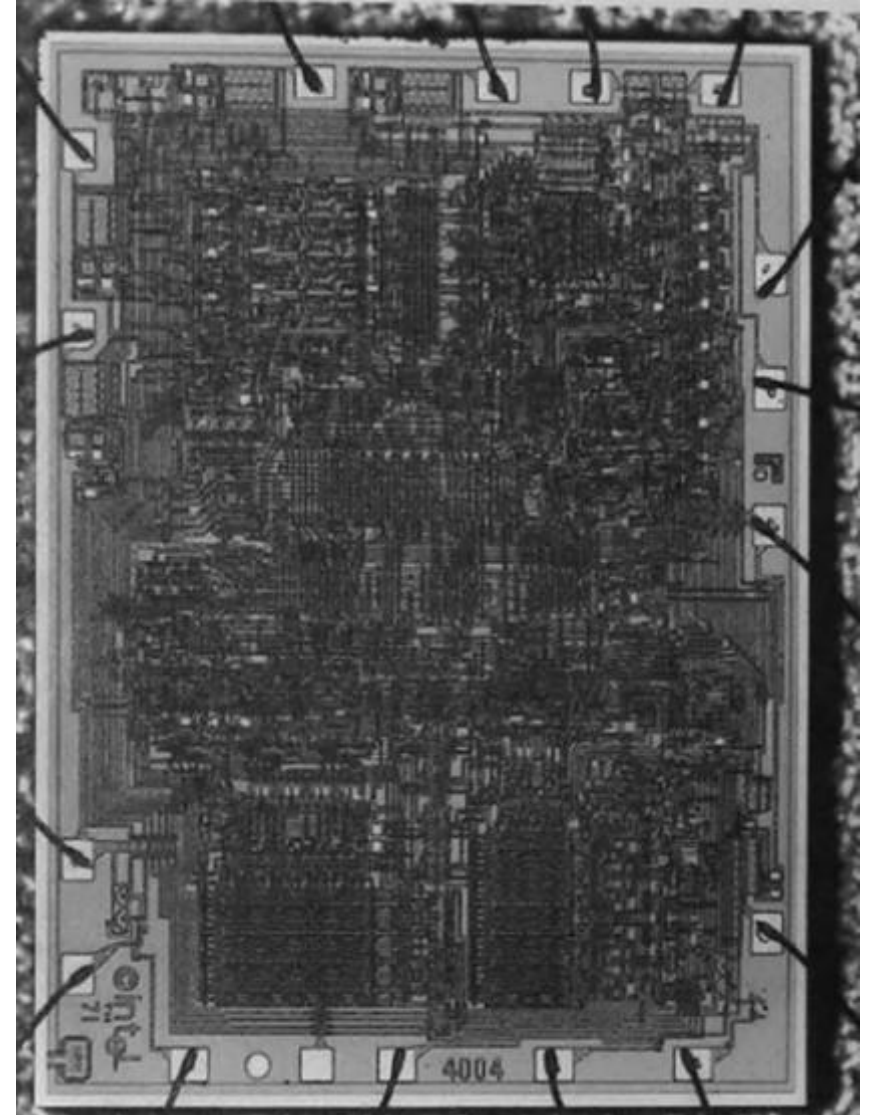
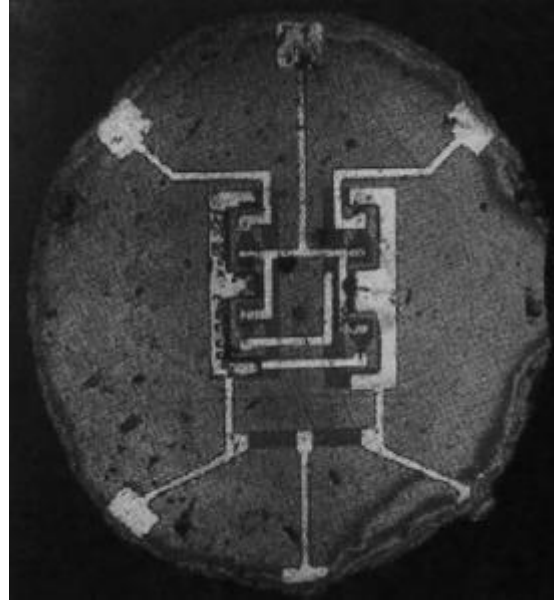
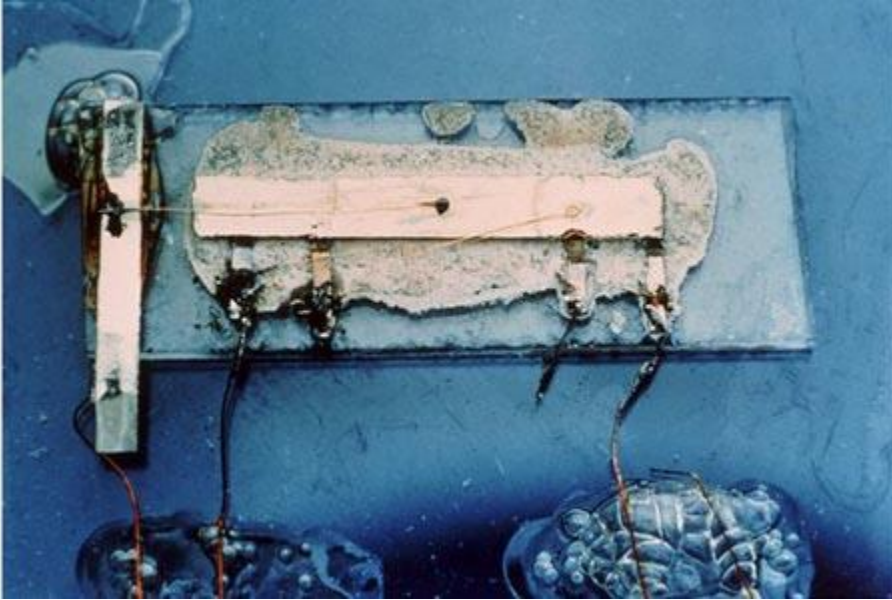
ТЕМА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.



БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ

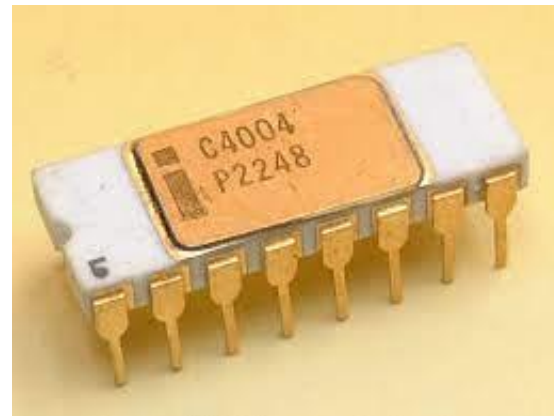
- Интегральная микросхема (ИС) (IC - Integrated Circuit) – микроэлектронное изделие, выполняющее определённые функции преобразования и обработки сигналов и (или) накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов.
- 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



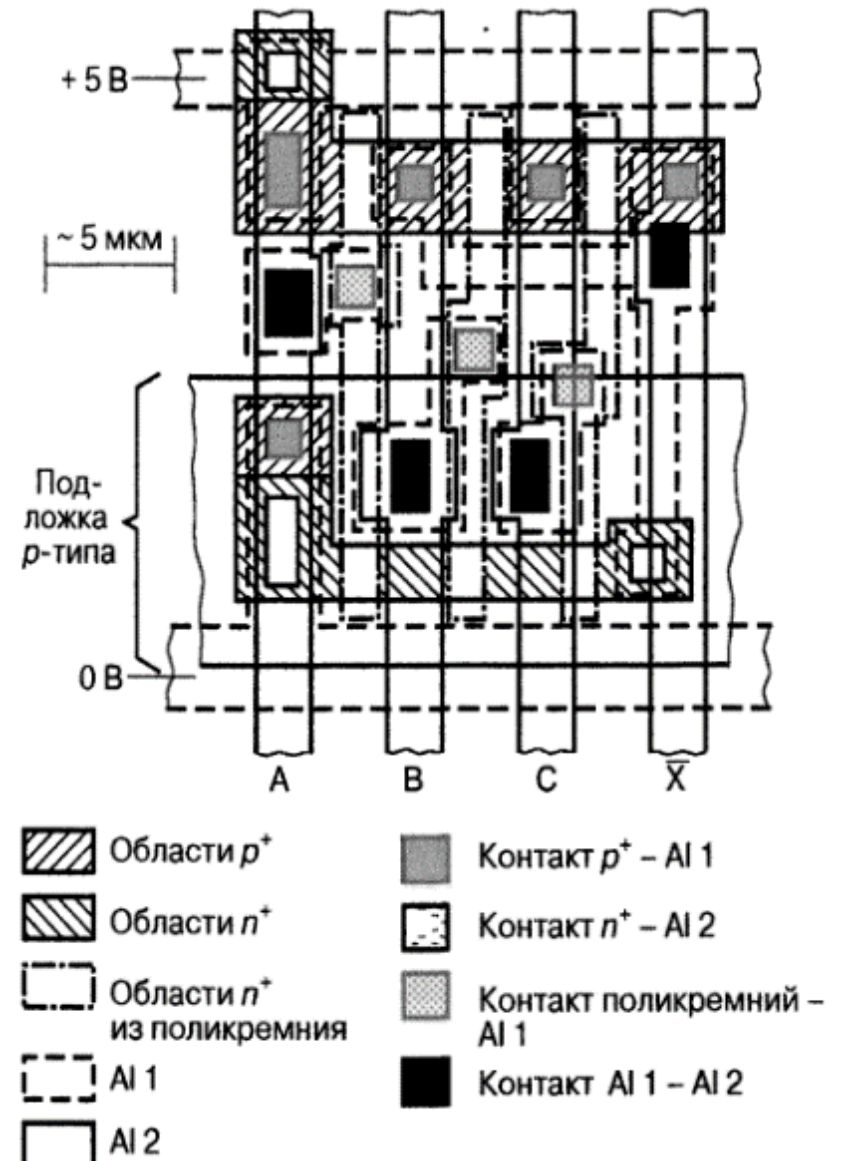
Первая микросхема создана в Texas Instruments в 1958 г.

Первый коммерческий микропроцессор Intel 4004, 1971 г.



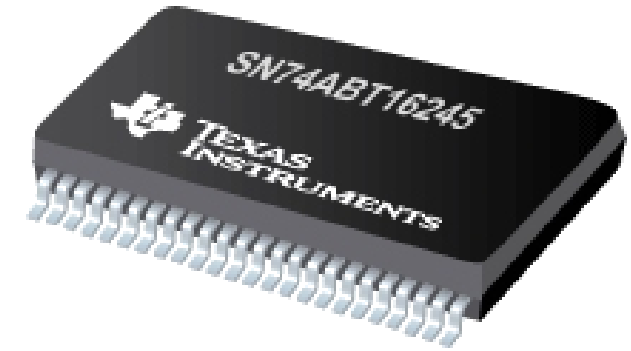
СПОСОБЫ КЛАССИФИКАЦИИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

- По технологии изготовления (биполярная, МОП, КМОП, Шоттки и т.д.)
- По внутреннему устройству (дискретные элементы, микросборки, ИС, СБИС и т.д.)
- По функциональному назначению (операционные усилители, микропроцессоры, элементы памяти, полевые транзисторы и т.д.)
- По области применения (аналоговые устройства, цифровые устройства, силовая электроника, обработка сигналов, оптоэлектроника и т.д.)
- По числу элементов на кристалле
- По рабочим токам и напряжениям
- По популярности



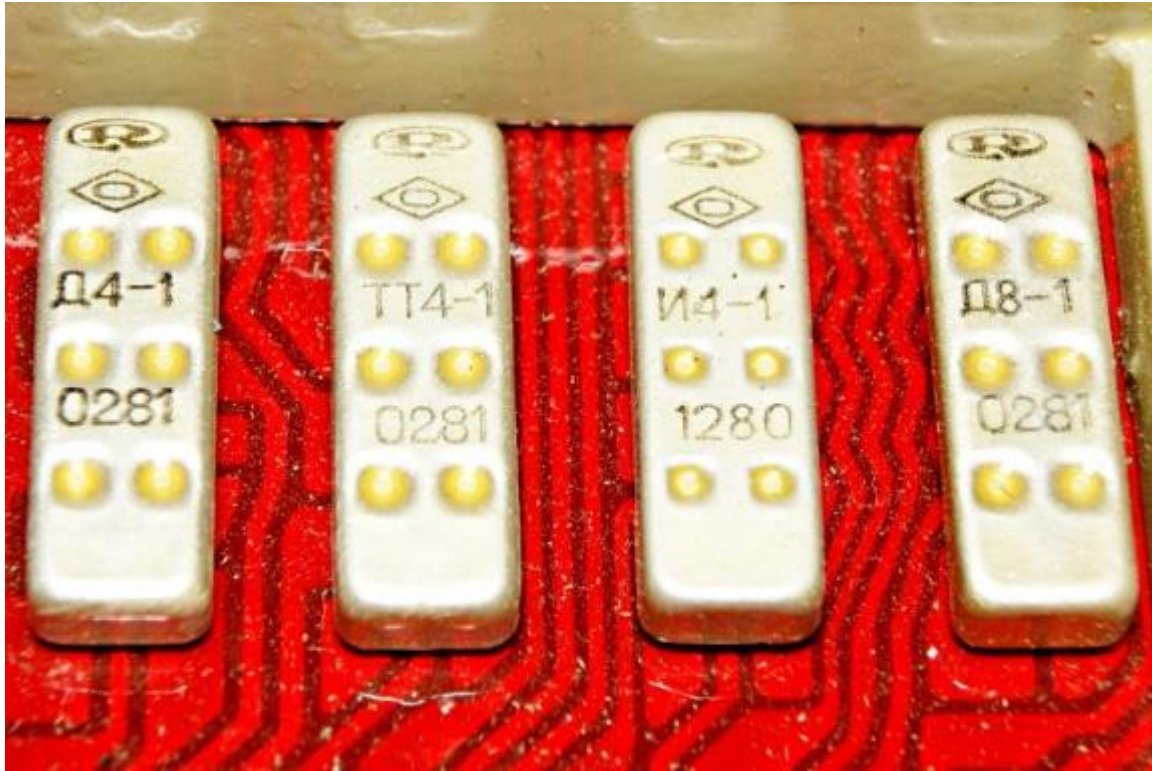
КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПО СПОСОБУ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

- 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 плёнок до 1-2 мкм)
 - толстоплёночные ИС (толщина плёнок 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



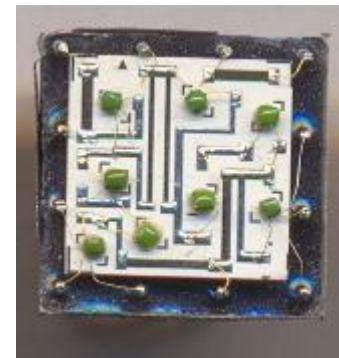
ПЕРВЫЕ РОССИЙСКИЕ ГИБРИДНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Резисторно-транзисторная логика



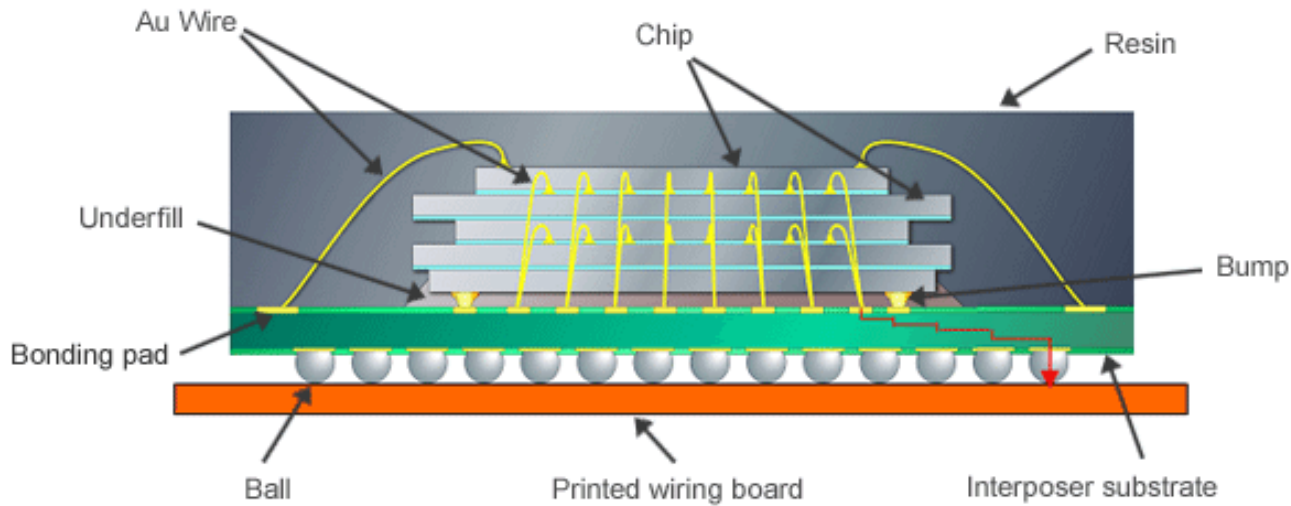
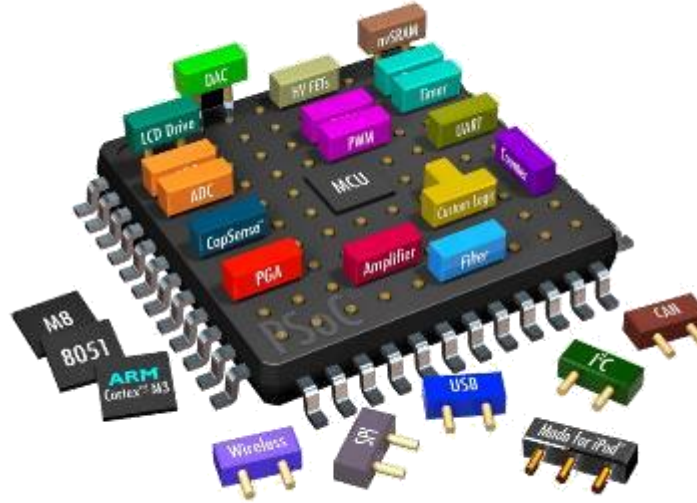
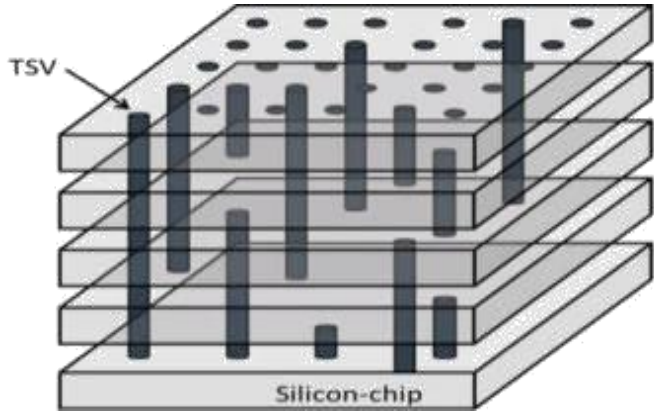
серия Р12-2,
1970-е годы

Диодно-транзисторная логика

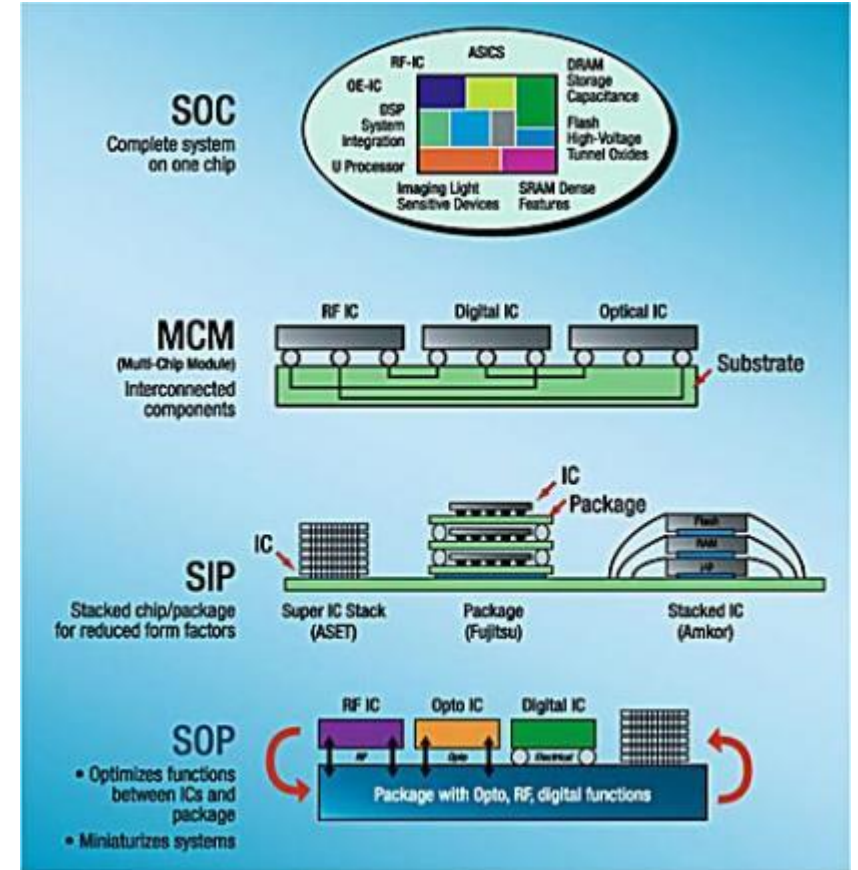


Микросхемы серии 217,
выполненные на тонких
пленках, 1970-е годы

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



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

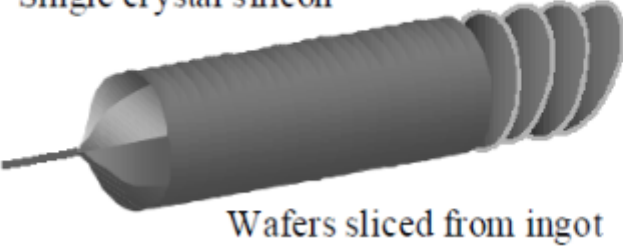
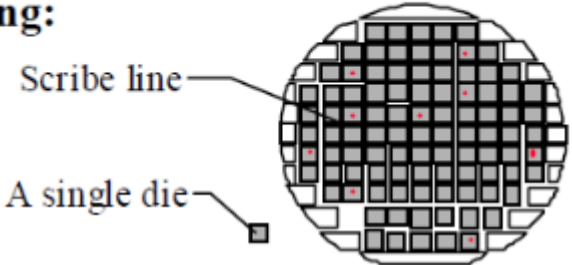
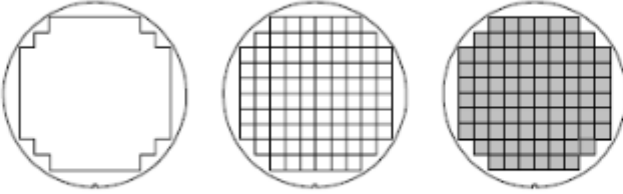
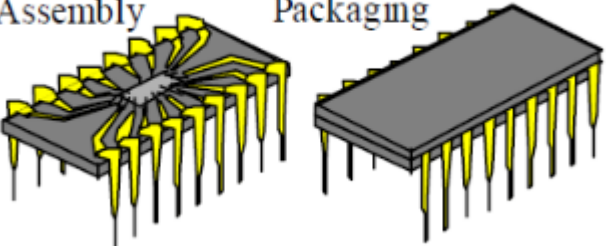
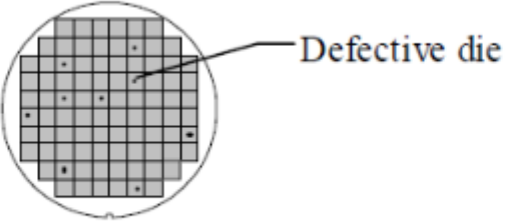
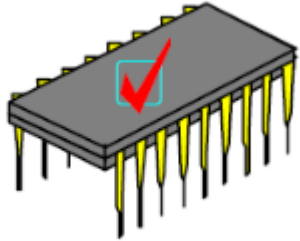


- System-on-a-Chip (SoC)
- System-in-a-Package (SiP)
- 3D-интеграция:
 - System-on-Package (SoP)
 - Through SiliconVia (TSV)

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники. В 3-х томах. - М.: Мир, 1993. – 413 с., 371 с., 367 с.
2. М. А. Шустов. Цифровая схемотехника. Основы построения. – СПб.: Наука и техника, 2018. – 320 с.
3. У. Титце, К. Шенк. Полупроводниковая схемотехника. В 2-х томах. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с., 942 с.
4. Б. Картер, Р. Манчини. Операционные усилители для всех. – М.:Додэка-XXI, 2011. – 544 с.
5. В. Я. Володин. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.
6. Полупроводниковая электроника. Справочник. Под ред. У. Шумахера. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 592 с.

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> 

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 $\sim 150^\circ\text{C}$

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.

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.

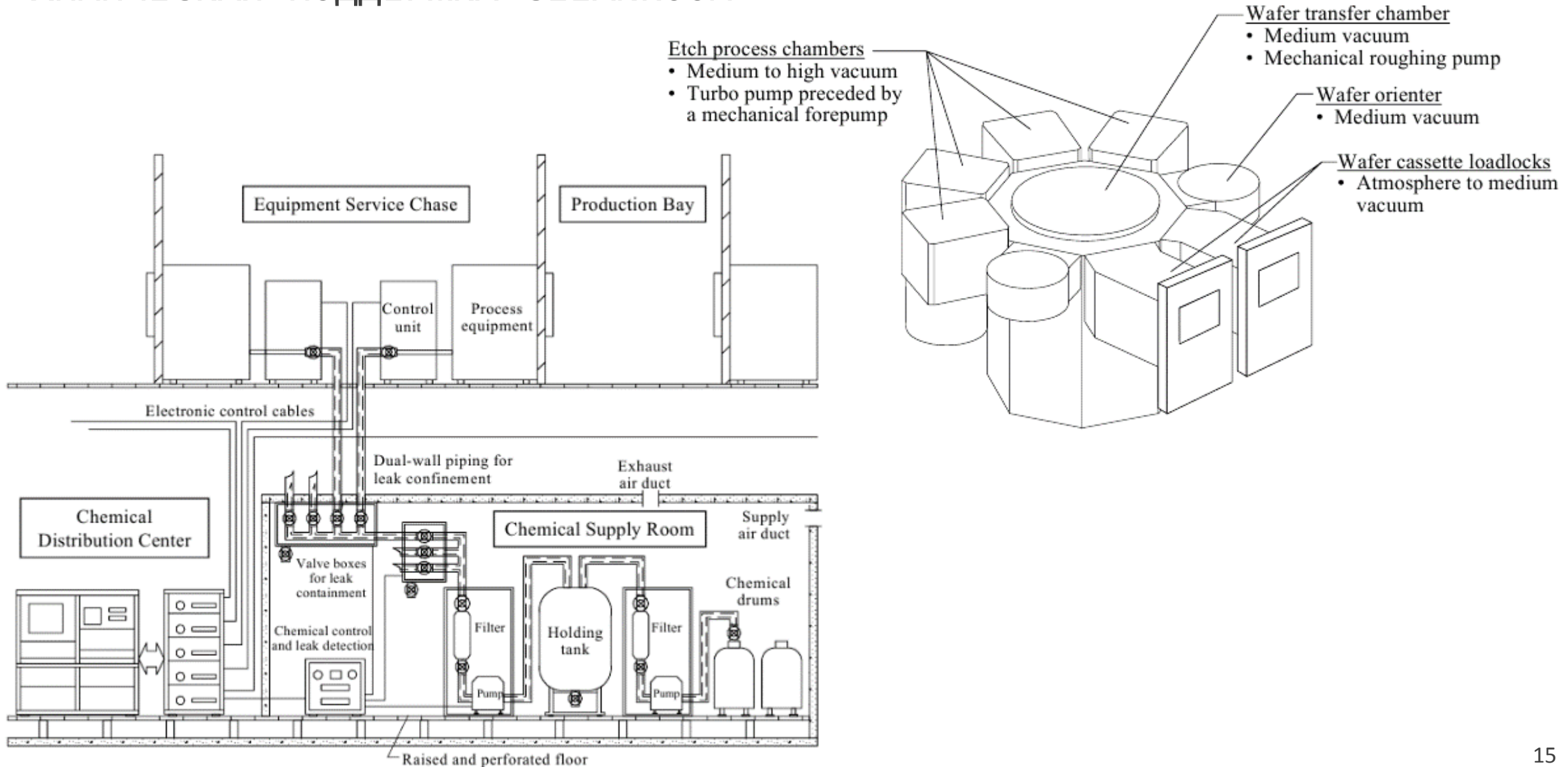
ВОЗДУХ И ВОДА

- Чистая комната: контролируется температура, влажность и количество пыли в воздухе. Воздух в cleanroom контролируется и классифицируется по содержанию в нём твёрдых частиц. Обычно отфильтрованный воздух входит в cleanroom ламинарным потоком через перфорацию потолка и удаляется через перфорацию пола, вновь попадая в систему фильтрации. Избыточное давление порядка 5 Па.
- При изготовлении ИС используется очень большое количество деионизованной воды. Контроль чистоты подаваемой воды проводится по её удельному сопротивлению: если $> 18 \text{ МОм}\cdot\text{см}$, то вода считается деионизованной. Воду пропускают через систему фильтров, пористых материалов и ультрафиолетовый стерилизатор.

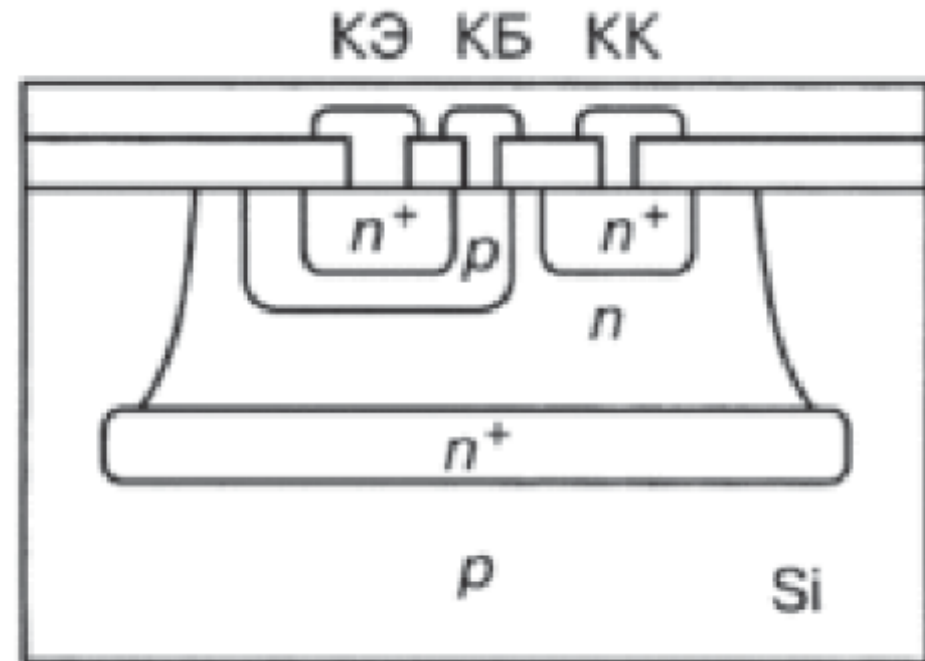
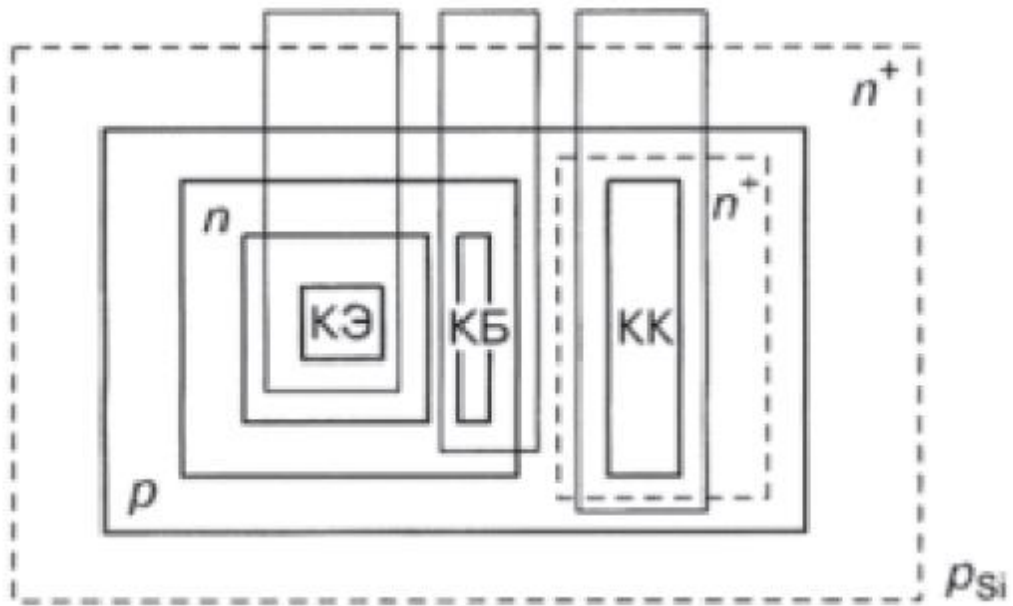
ISO 14644-1-2002	ГОСТ Р 50766-95	США 209E (метрический)	США 209D
1	P 1	-	-
2	P 2	-	-
3	P3 (1)	M 1.5	1
4	P4 (10)	M 2.5	10
5	P 5 (100)	M 3.5	100
6	P 6 (1000)	M 4.5	1000
7	P 7 (10000)	M 5.5	10000
8	P 8 (100000)	M 6.5	100000
9	P9 (1000000)	-	-

Класс	на 1 м ³ :	0.1 мкм	0.3 мкм	1 мкм
1		10	-	-
2		100	10	-
3		1000	102	8
4		10000	1020	83
5		100000	10200	832

ХИМИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА CLEANROOM

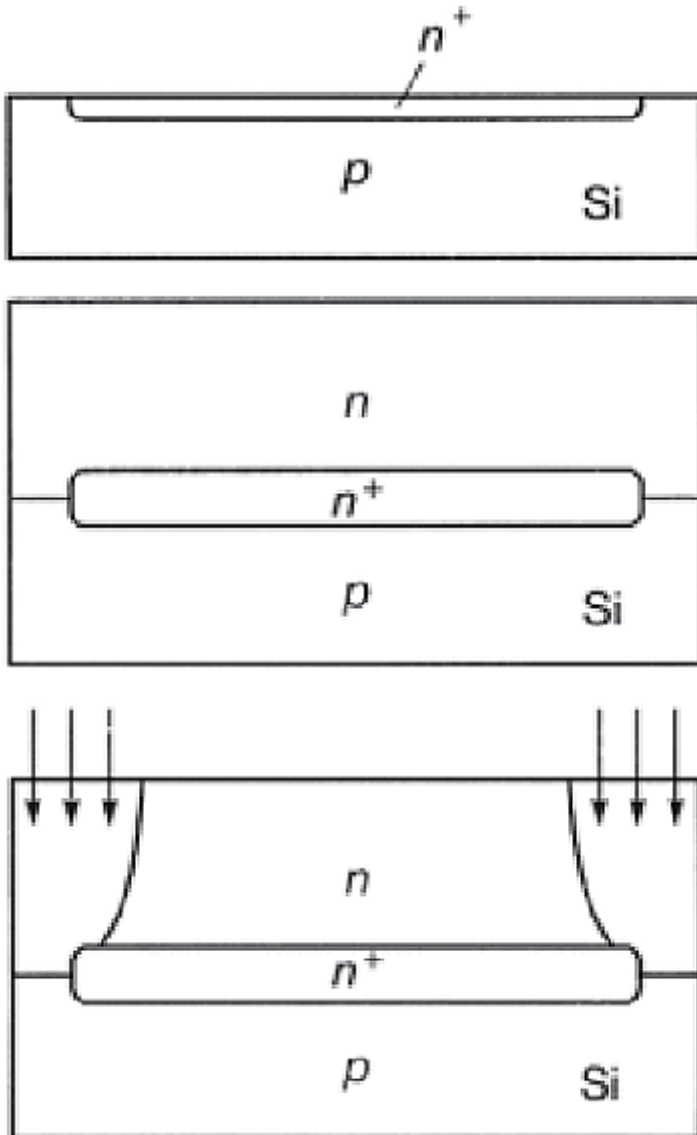


ПРИМЕР ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА



то, что должно получиться в результате

ЭТАПЫ ТЕХПРОЦЕССА

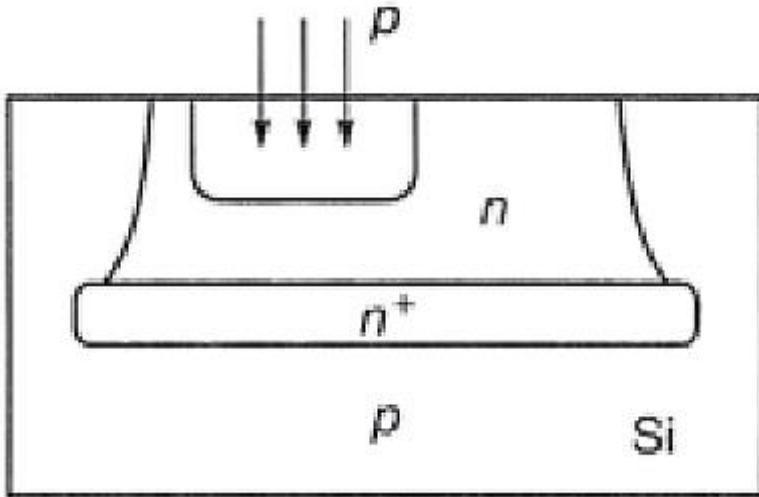


1. Диффузия примеси n^+ -типа ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) для уменьшения сопротивления коллектора на подложку p -типа ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) – так называемый "скрытый слой". Перед этим с помощью литографии создаются окна для диффузии. Далее "литография" включает в себя следующие этапы: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

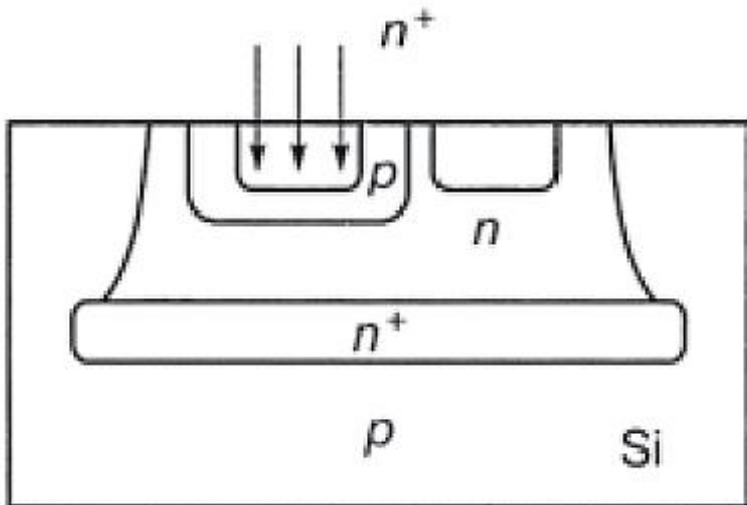
2. Эпитаксиальное наращивание кремния n -типа ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$)

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

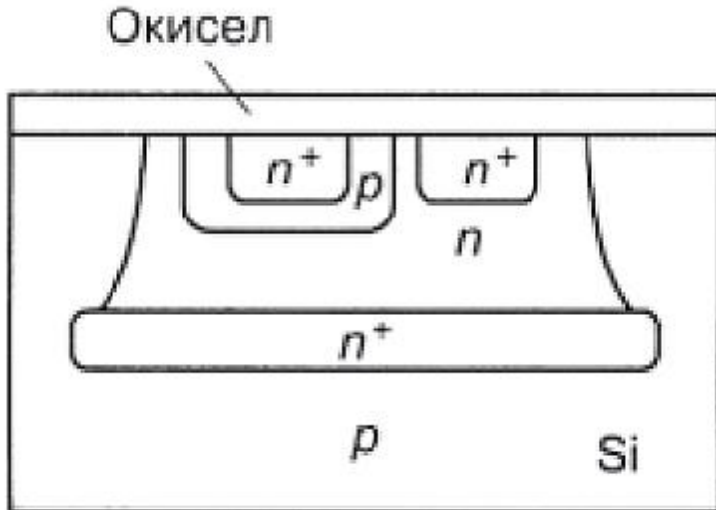


4. Литография + диффузия примеси p -типа ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) в карман n -типа для создания области базы транзистора (базовая диффузия)

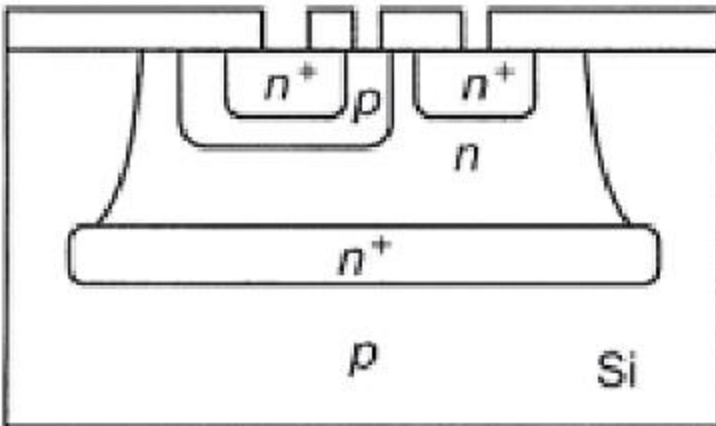


5. Литография + диффузия примеси n^+ -типа ($\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$) в базовую область для создания эмиттера и в коллекторные области для создания низкоомной области под коллекторным контактом

ЭТАПЫ ТЕХПРОЦЕССА

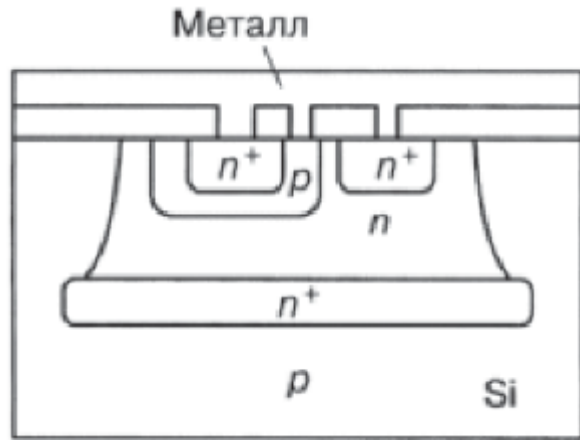


6. Окисление (выращивание диоксида кремния) для создания изолирующего слоя

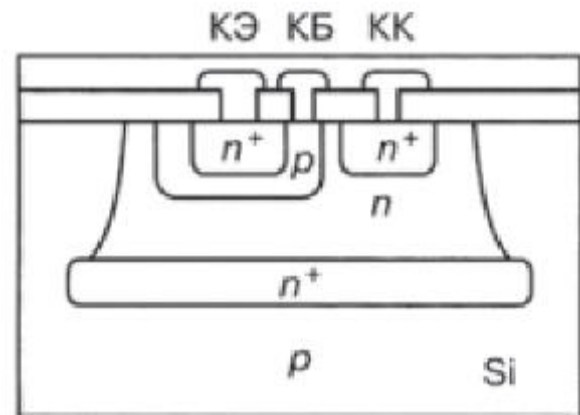


7. Литография + травление оксида для формирования контактных окон к эмиттеру, базе и коллектору (и в других необходимых местах)

ЭТАПЫ ТЕХПРОЦЕССА



8. Напыление металла (алюминий или медь)

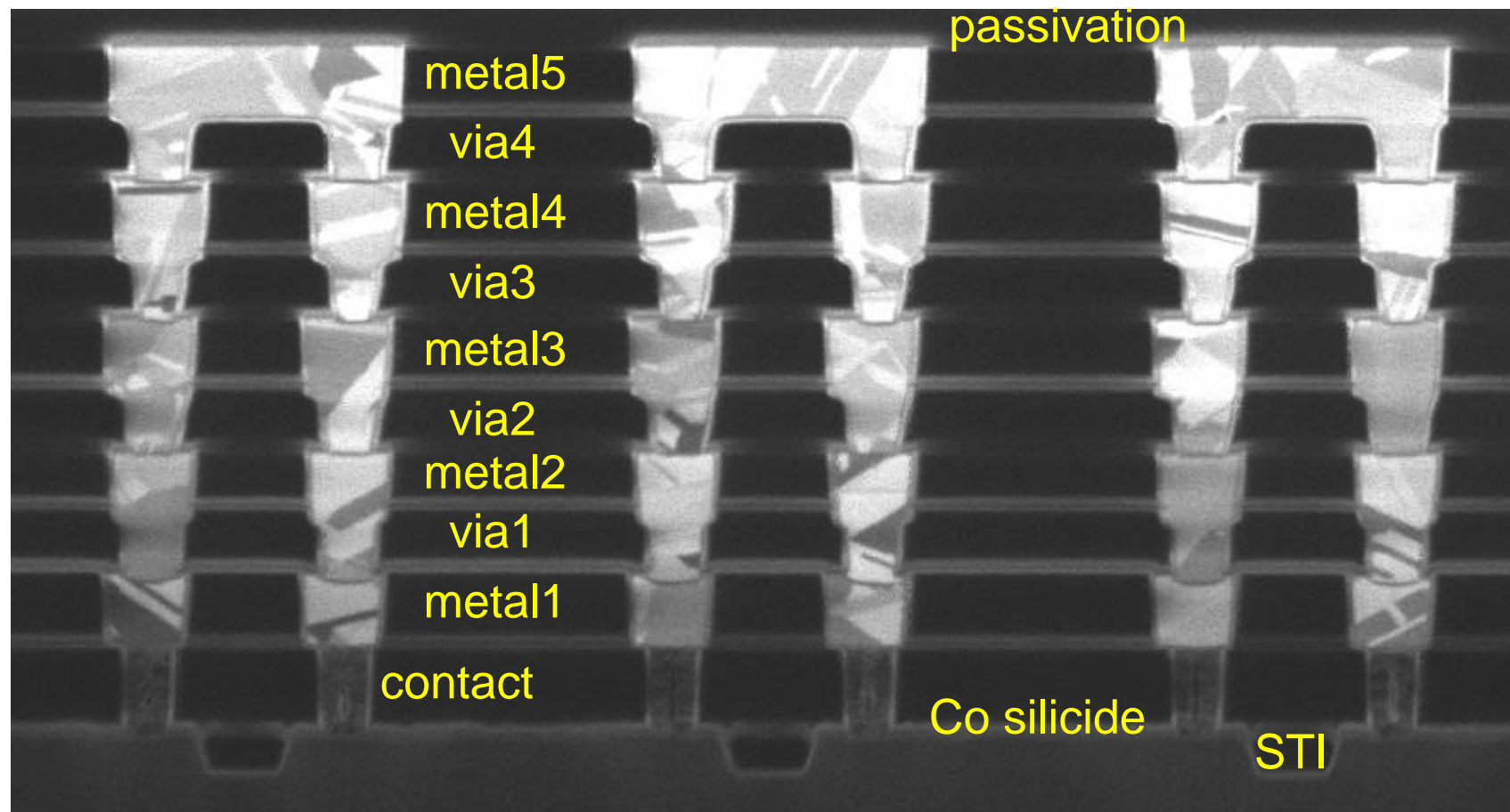


9. Литография + травление металла для формирования проводящих дорожек

10. Нанесение диэлектрика для изоляции слоя металлизации

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

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

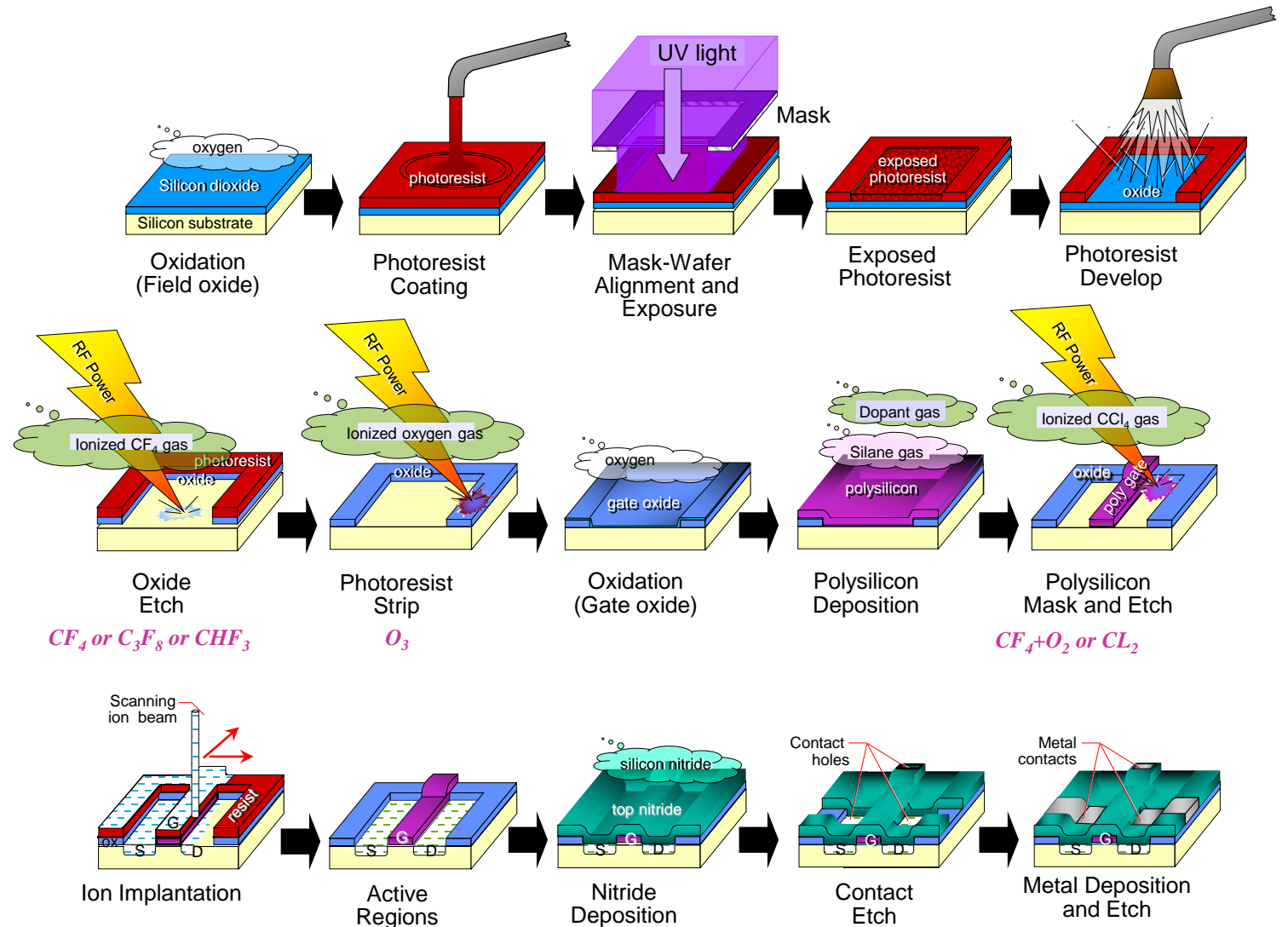


Кроме межсоединений необходимо предусмотреть систему "колодцев" для отвода тепла

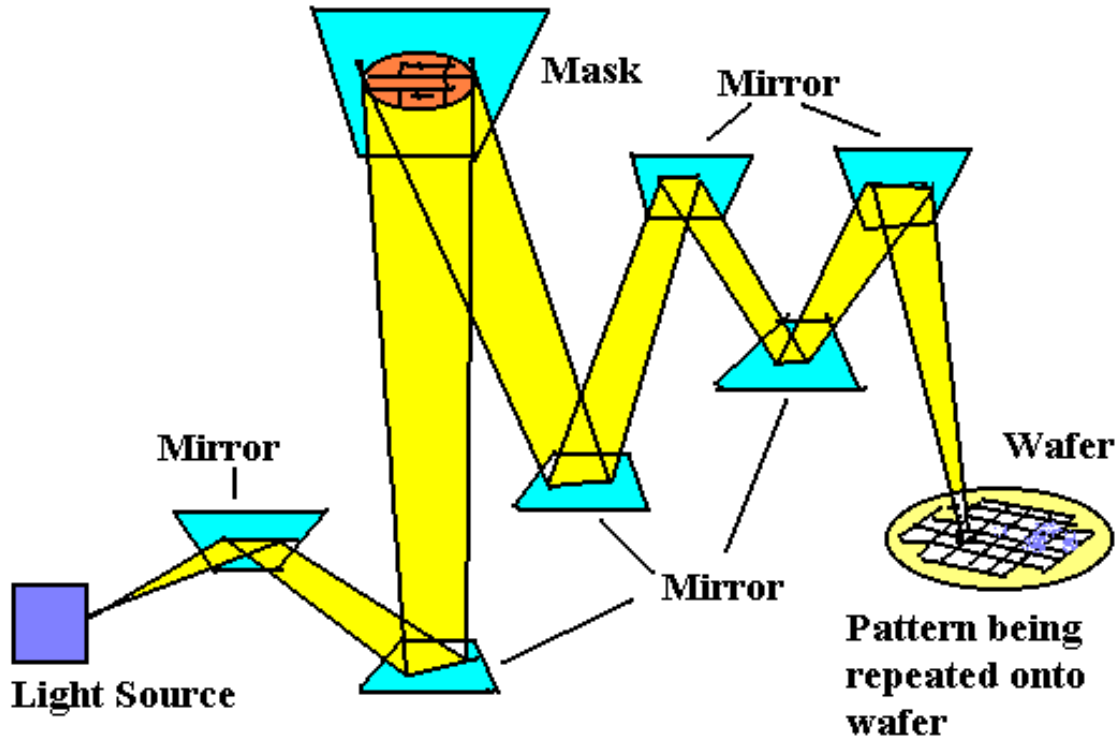
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ MOSFET

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



ФОТОЛИТОГРАФИЯ



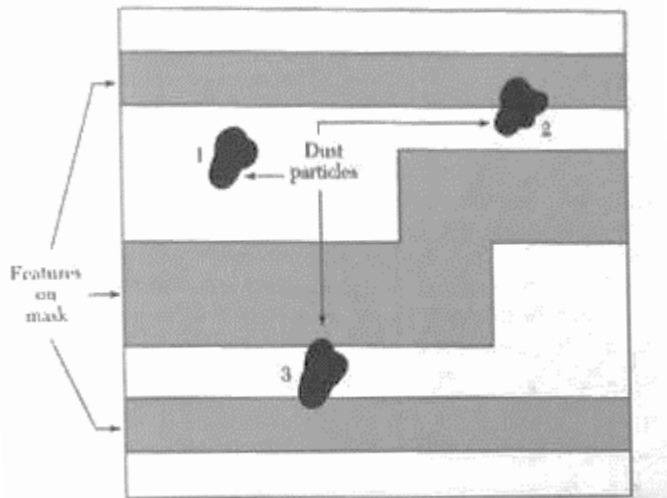
Оптическая схема и внешний вид
фотолитографической машины
экстремального ультрафиолета (EUV)



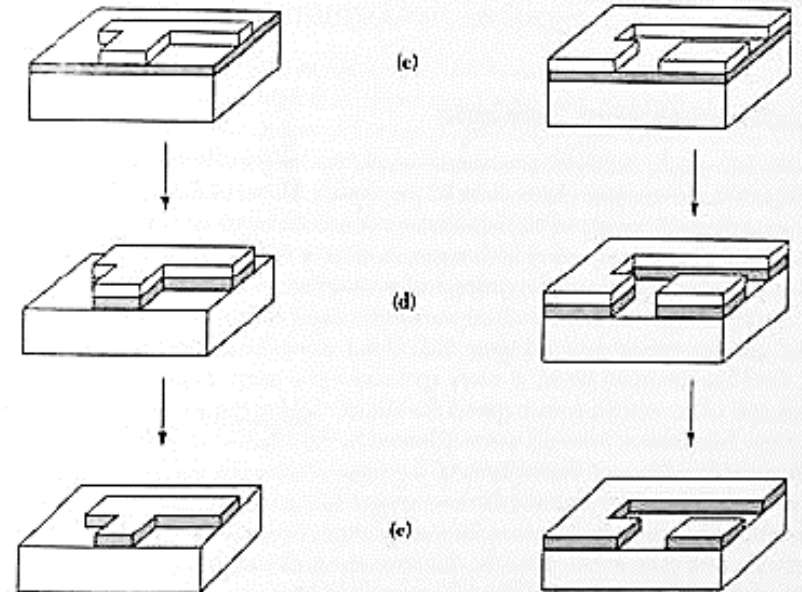
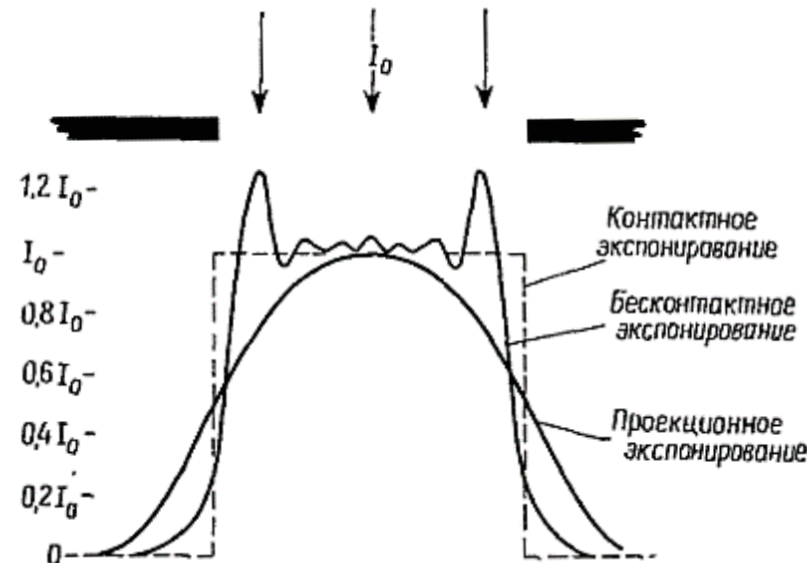
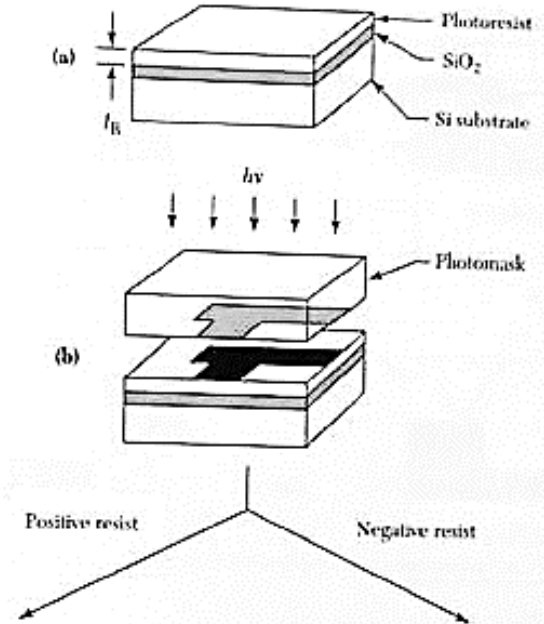
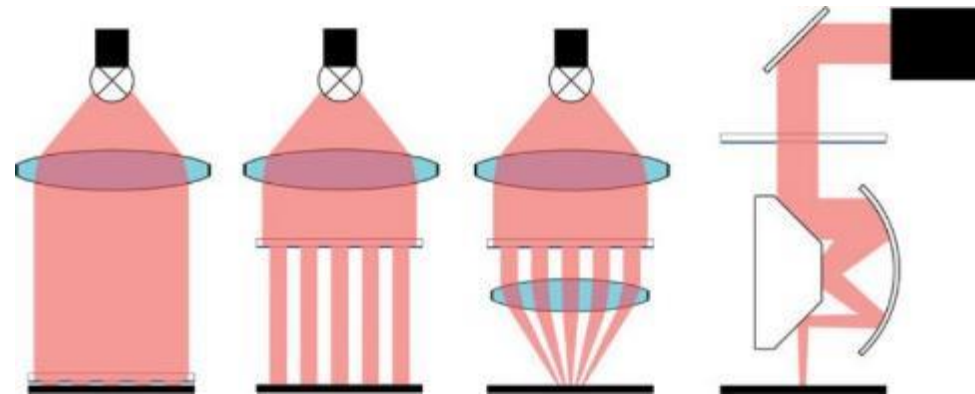
Данный вид литографии имеет максимальную производительность и удовлетворяет требованиям массового производства. Однако минимальные размеры элементов ограничены длиной волны используемого излучения и соответствующей оптикой.

ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Полный литографический процесс не должен приводить к появлению дефектных изделий. Если 10% будущих чипов будут дефектными на каждой стадии переноса изображения, то после 10 литографических операций окажутся годными только ~35% чипов.



Основными методами оптического экспонирования являются контактный, бесконтактный и проекционный



ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ НАНОСЛОЁВ

Могут быть использованы (в различных сочетаниях) следующие технологические методики:

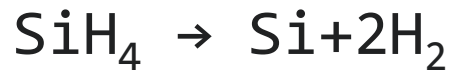
- **Молекулярно-лучевая эпитаксия (МВЕ):**
 - получение монокристаллических слоёв высокой чистоты, так как их рост осуществляется в сверхвысоком вакууме при высокой чистоте потоков веществ
 - выращивание многослойных структур с резкими изменениями состава на границах слоёв благодаря относительно низкой температуре роста, препятствующей взаимной диффузии
 - получение гладких бездефектных поверхностей при гетероэпитаксии
 - получение нанослоёв с контролируемой толщиной за счёт точного управления потоками и малых скоростей роста
 - создание структур со сложными профилями состава и легирования, а также одномерных и нульмерных наноструктур (в зависимости от особенностей агрегации атомов на поверхности подложки и условий осаждения)
- **Осаждение из газовой фазы (CVD)**
- Осаждение из газовой фазы **металл-органических реагентов (MOCVD)**
- **Химическое** осаждение из газовой фазы (ALD)
- **Плазменно-химическое** осаждение из газовой фазы (PE CVD)

ПРИМЕР ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Процесс проводится при атмосферном или пониженном давлении в специальных реакторах вертикального или горизонтального типа. Реакция идёт на поверхности подложек (полупроводниковых пластин), нагретых до 400—1200 °С (в зависимости от способа осаждения, скорости процесса и давления в реакторе).

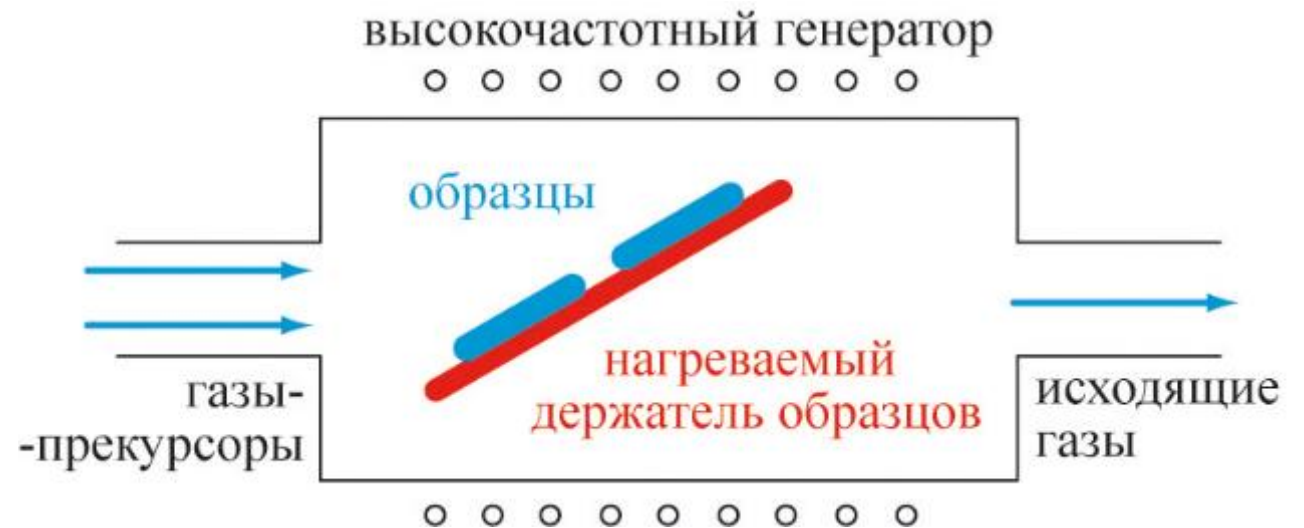


тетрахлорид кремния



силан

Кроме формирования эпитаксиального слоя, необходимо обеспечивать в нём определённую концентрацию примесей, для чего в процессе эпитаксии добавляют к газам один из гидридов примесных элементов: AsH_3 , PH_3 , B_2H_6

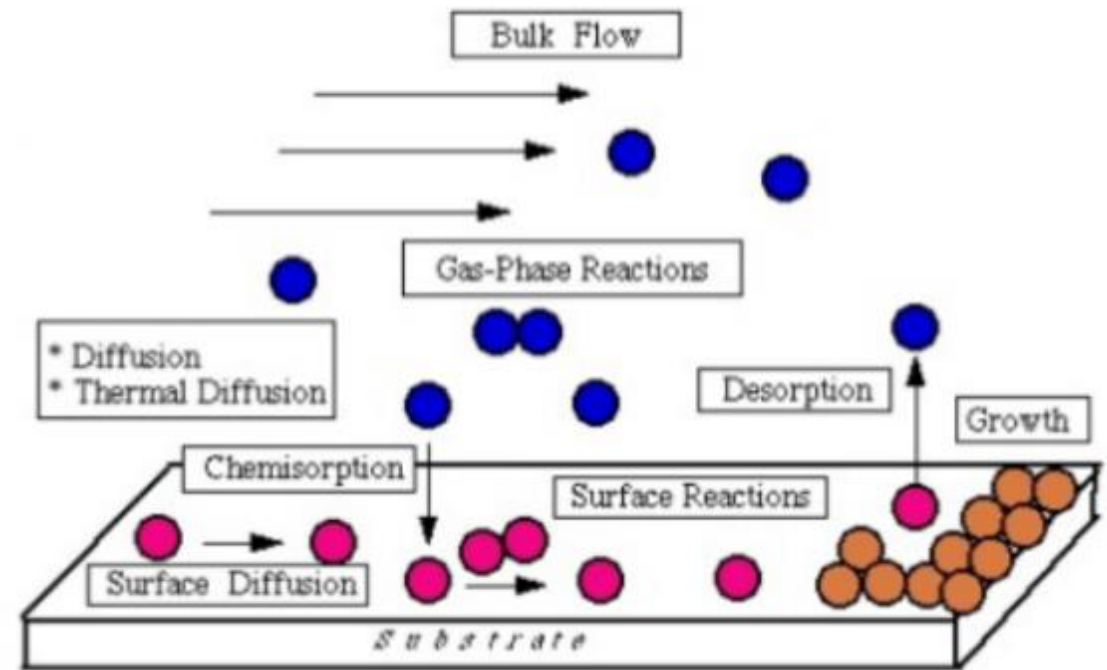


Газ разлагается на поверхности пластины и на нее осаждаются атомы кремния. Разложение кремний-содержащих компонент происходит пиролитически, т.е. только за счет тепла. Скорость роста пленки пропорциональна парциальному давлению рабочего газа.

ПРИМЕР ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Основным условием образования на поверхности зародышей роста является создания пресыщения, т.е. такого состояния, при котором количество поступающих атомов на поверхность больше количества покидающих её.

Наиболее благоприятные места для встраивания атомов в кристаллическую решётку расположены на боковой поверхности атомарных ростовых ступеней. При подходящих условиях на поверхности образуется мало растущих зародышей, вероятность их разориентации мала и атомы, присоединяясь к зародышам, образуют ростовые ступени, которые постепенно заполняют всю поверхность.

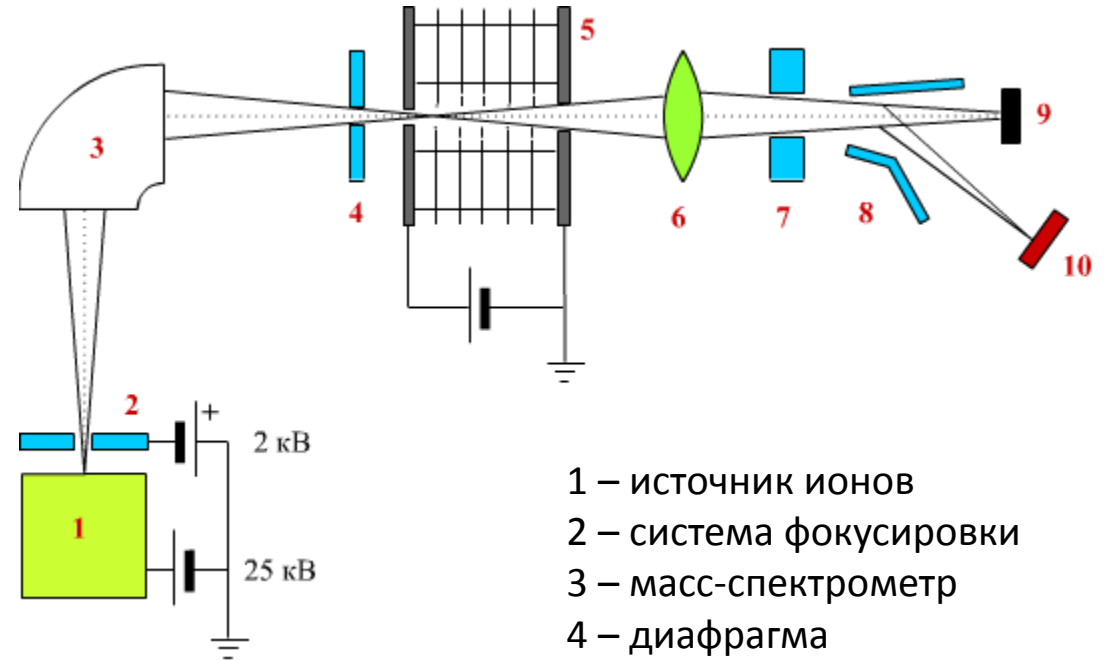


Хлоридный метод ($\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$) обеспечивает высокое совершенство плёнки, но требует повышенных температур. Гидридный метод (SiH_4) проводится при низких температурах, там, где критичными являются процессы автолегирования бором или мышьяком и необходимо слабое размытие профиля примеси скрытого слоя.

ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

- Ионная имплантация обеспечивает однородные и воспроизводимые профили концентрации, задаваемые посредством управления потоком ионов. Можно точно контролировать поверхностную концентрацию легирующей примеси и ионный состав.
- Ионная имплантация хорошо согласуется с планарной кремниевой технологией. Оксидные слои можно использовать и как маски, и как рассеиватели.
- Ионная имплантация является низкотемпературным процессом, хотя и требующим последующего отжига.

Ионной имплантацией называется процесс внедрения в мишень ионизованных атомов с энергией, достаточной для проникновения в ее приповерхностные области.

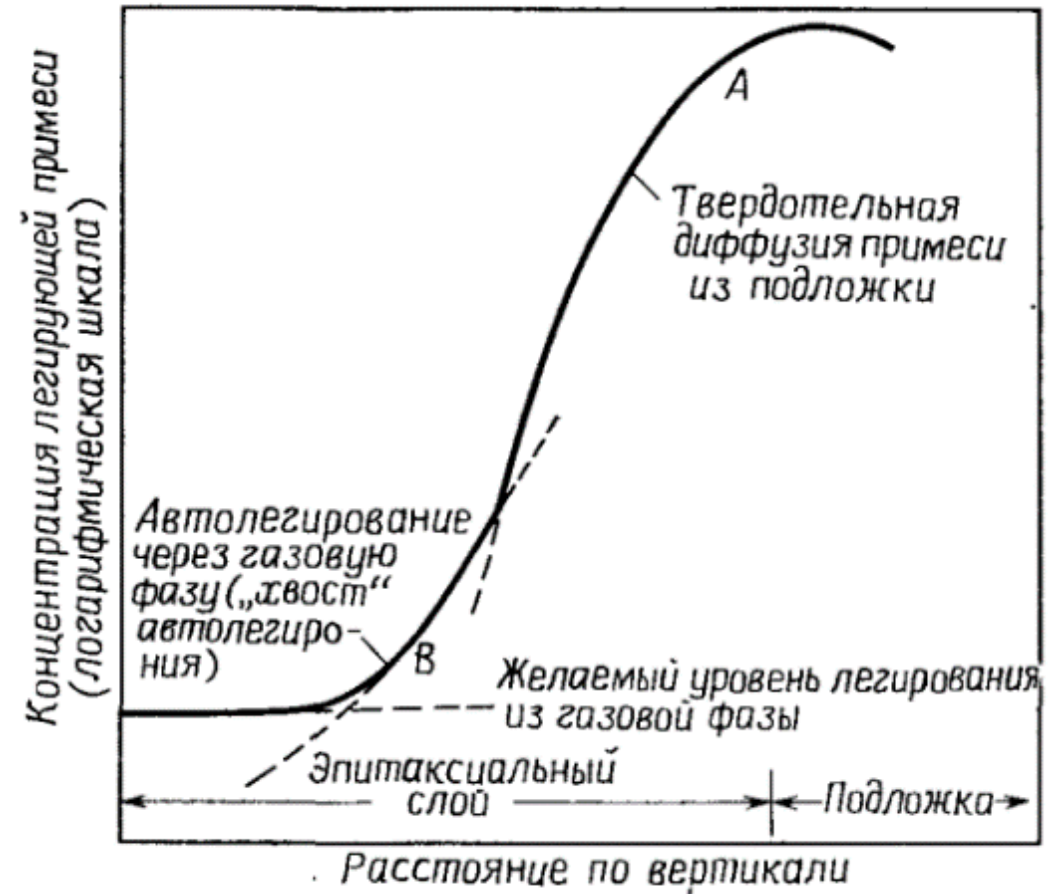
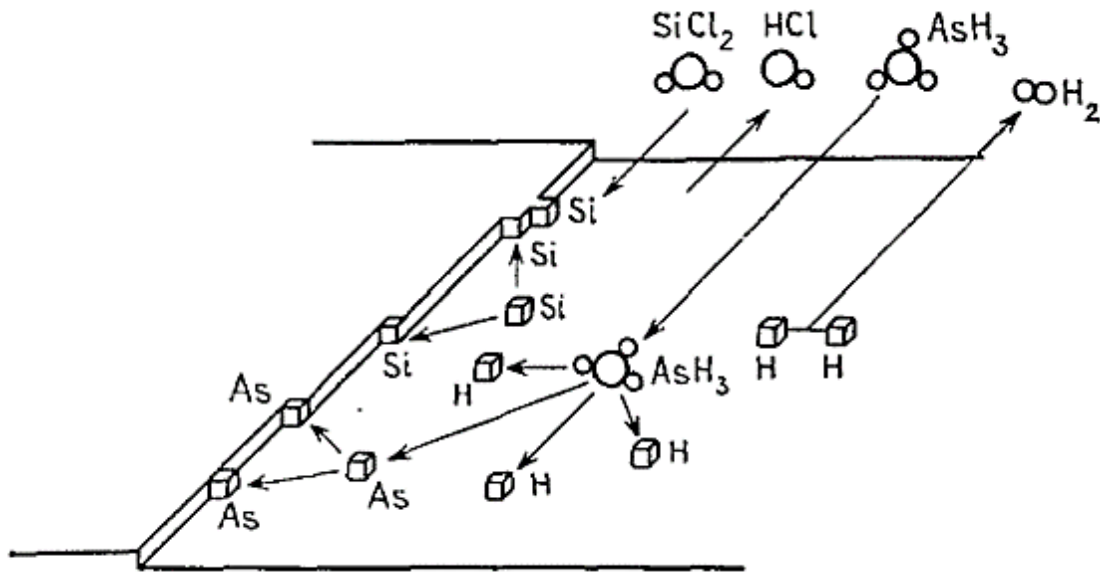


Уровень легирования и распределение примеси в полупроводнике определяются величиной потока и энергией ионов.

- 1 – источник ионов
- 2 – система фокусировки
- 3 – масс-спектрометр
- 4 – диафрагма
- 5 – ускоряющая трубка
- 6 – система фокусировки
- 7 – отклоняющая система
- 8 – система поворота пучка
- 9 – мишень для поглощения нейтральных частиц
- 10 – подложка + электрометр

ЛЕГИРОВАНИЕ ПУТЁМ ДИФфуЗИИ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Введение примесей в состав газообразных веществ производят с использованием гидридов примесных элементов - арсина AsH_3 , фосфина PH_3 , диборана B_2H_6 и некоторых других газов, добавляемых в водород.



Кроме намеренно вводимой примеси в растущий слой входят и неконтролируемые примеси – идёт *авталегирирование*. Примеси внедряются в растущий слой за счет твердотельной диффузии через границу слой-подложка, а также за счет испарения и переноса через газовую фазу.

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

ТРАВЛЕНИЕ



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

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

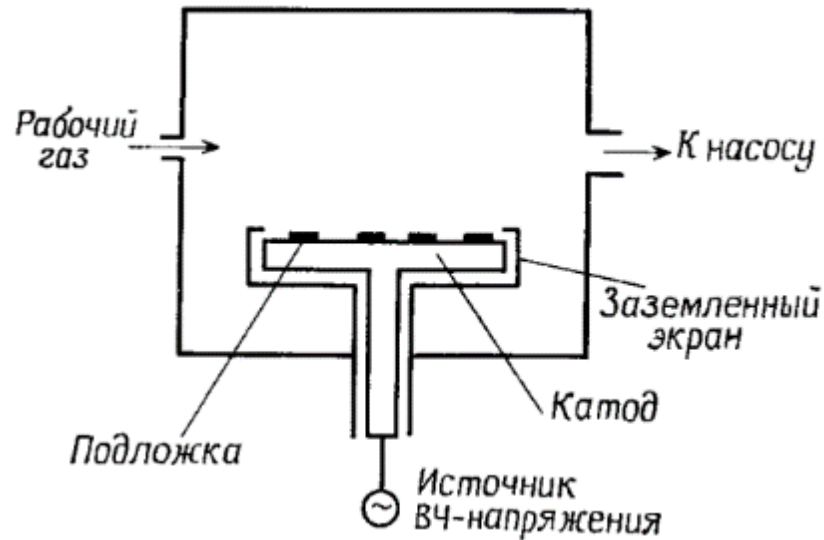
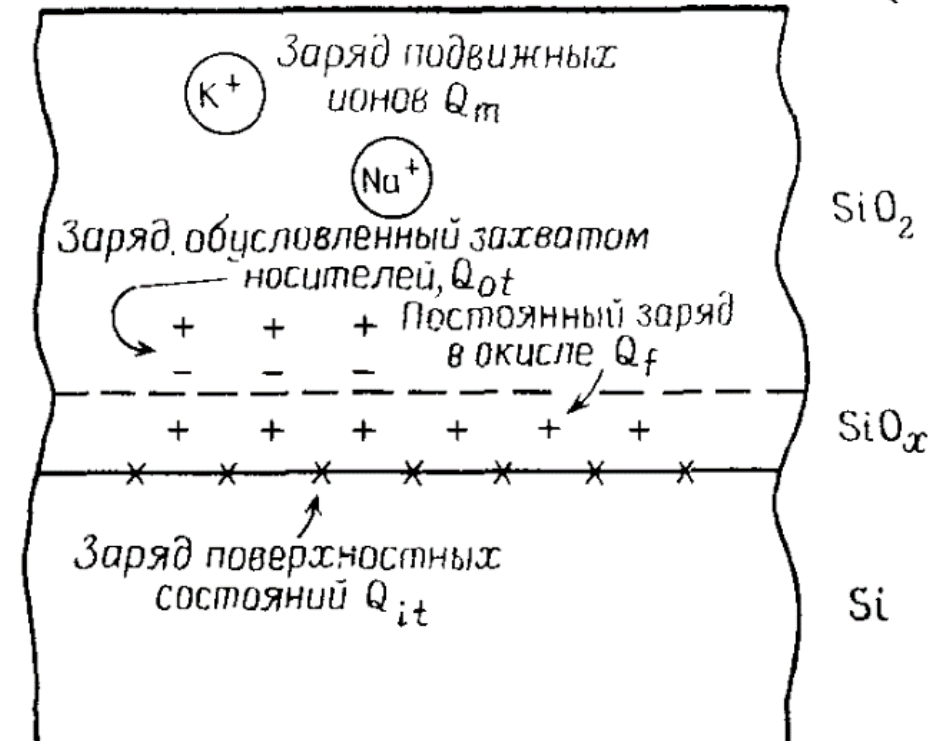


Схема системы реактивного ионного травления

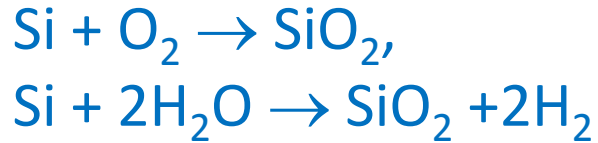
Материал	Газы
Si	CF ₄ , CF ₄ +O ₂ , SF ₆ , SF ₆ +O ₂ , NF ₃ , Cl ₂ , CCl ₄ , CCl ₃ F, CCl ₂ F ₂ , CClF ₃
SiO ₂ , Si ₃ N ₄	CF ₄ , CF ₄ +H ₂ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , CHF ₃
Al, Al-Si, Al-Cu	CCl ₄ , CCl ₄ +Cl ₂ , SiCl ₄ , BCl ₃ , BCl ₃ +Cl ₂

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.

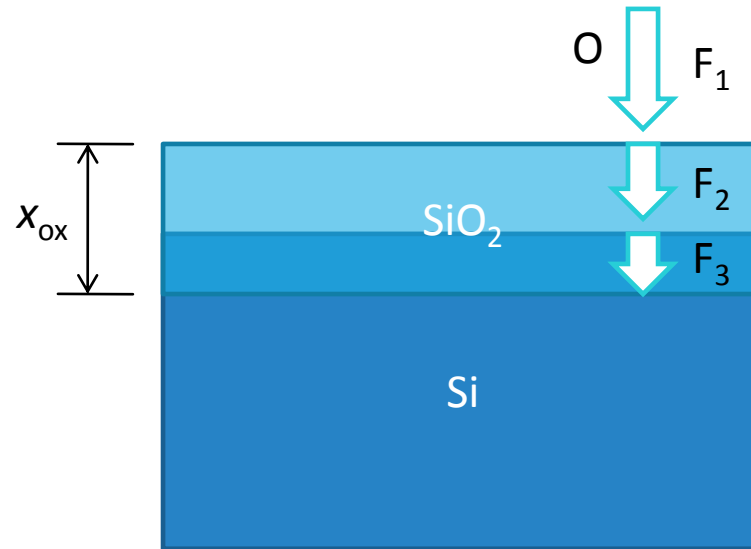


ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

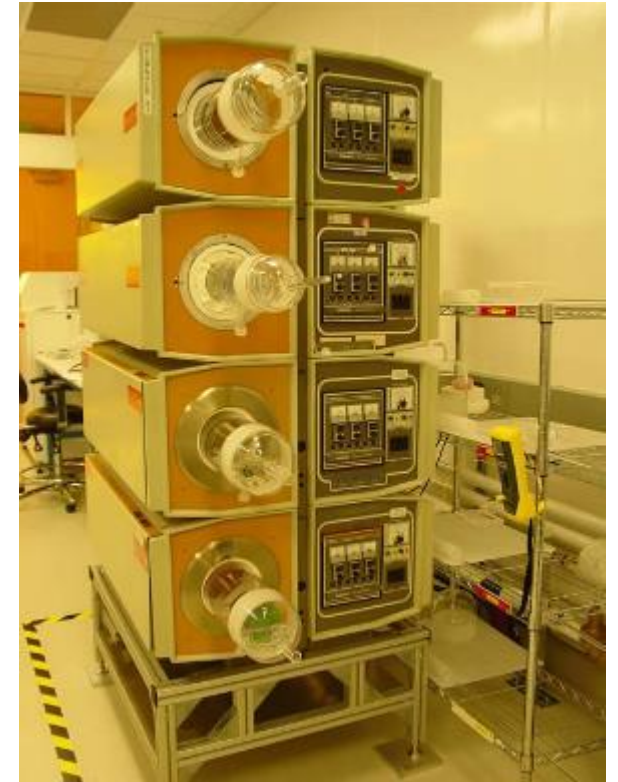


Виды окисления:

- термическое окисление:
 - сухое
 - влажное
 - 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 x_{ox} поглощается слой кремния толщиной $0.44 x_{\text{ox}}$. Это справедливо для любой ориентации кремния, в т.ч. для поликристаллического кремния.



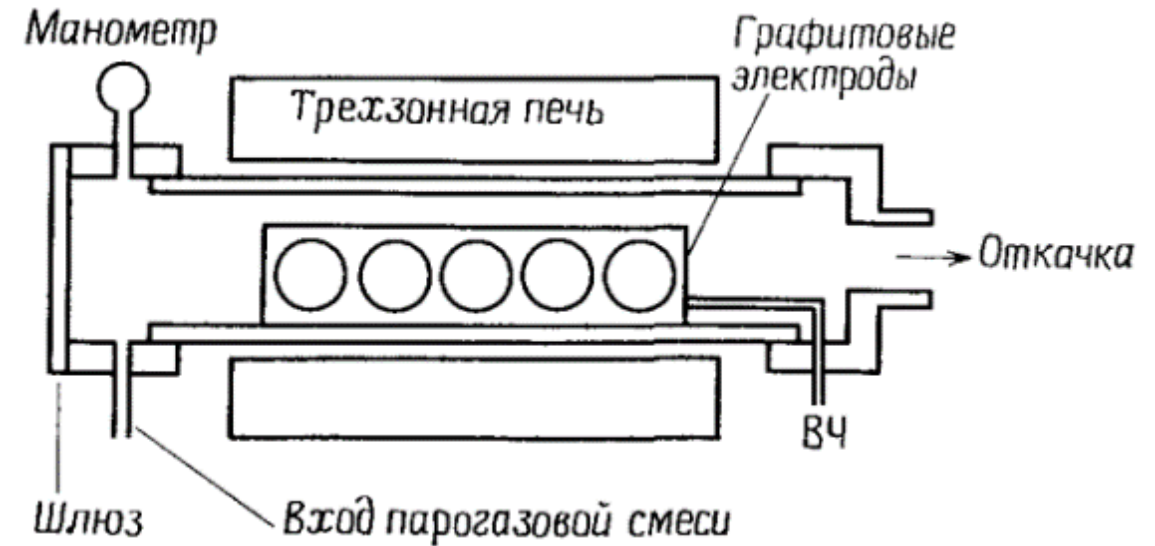
Наиболее распространённый метод окисления реализуется в кварцевых диффузионных трубах, где подложки кремния располагаются вертикально, типичные температуры процесса лежат в интервале от 800 до 1200 °С, точность удержания 1 °С.

ОСАЖДЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК И ПОЛИКРЕМНИЯ

- **Материалы:**
 - Поликристаллический кремний
 - Оксид кремния
 - Нитрид кремния (Si_3N_4 и SiN)
- **Технологии:**
 - Осаждение из парогазовых смесей при атмосферном и пониженном давлении
 - Плазмохимическое осаждение из парогазовых смесей

Стехиометрический нитрид кремния (Si_3N_4) осаждается при 700-900 °С, применяется в качестве маски для травления и как подзатворный диэлектрик

Плазмохимический нитрид кремния (SiN) осаждается при 200-350 °С, используется как пассивирующий слой и как защитный слой от механических повреждений.



Плазмохимический реактор с горячими стенками

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

КОРПУСИРОВАНИЕ

- Резка пластин и чистка кристаллов
- Монтаж кристалла
- Разводка соединений и пайка (микросварка, ультразвуковая сварка)
- Герметизация изделий
- Тестирование и контроль микросхемы



КОРПУСИРОВАНИЕ

- Основной целью герметизации корпуса является защита от внешних загрязнений во время функционирования прибора. Герметизацию выполняют стеклом, металлом, ближе к микросхеме используют эпоксидные смолы и кремнийорганические соединения.

$$P = K \cdot x \cdot G^{\beta}$$

K – среднее количество каналов ввода-вывода у одного вентиля;

G – количество вентиляей;

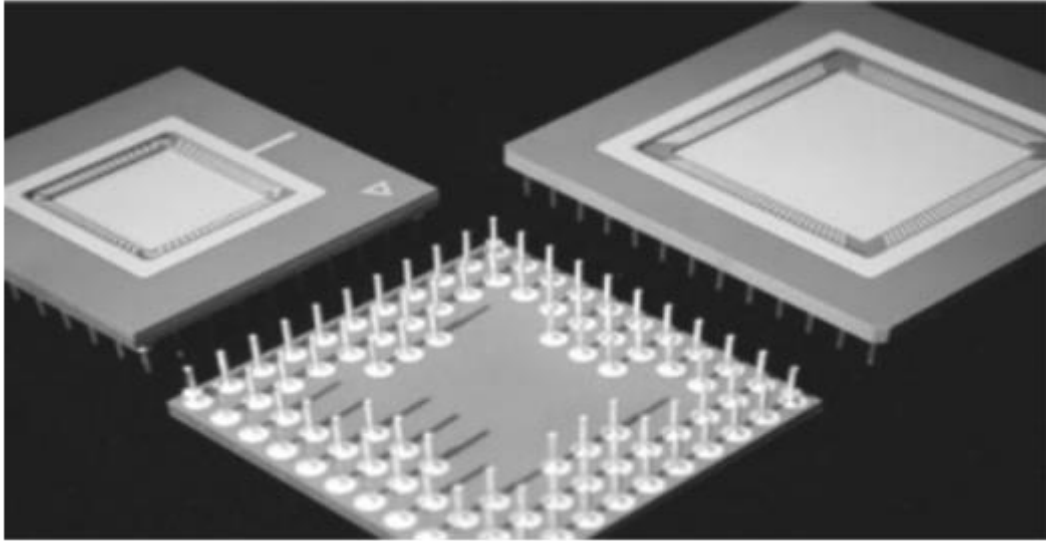
β – показатель степени Рента (от 0.1 до 0.7);

P – количество ножек ввода-вывода микросхемы.

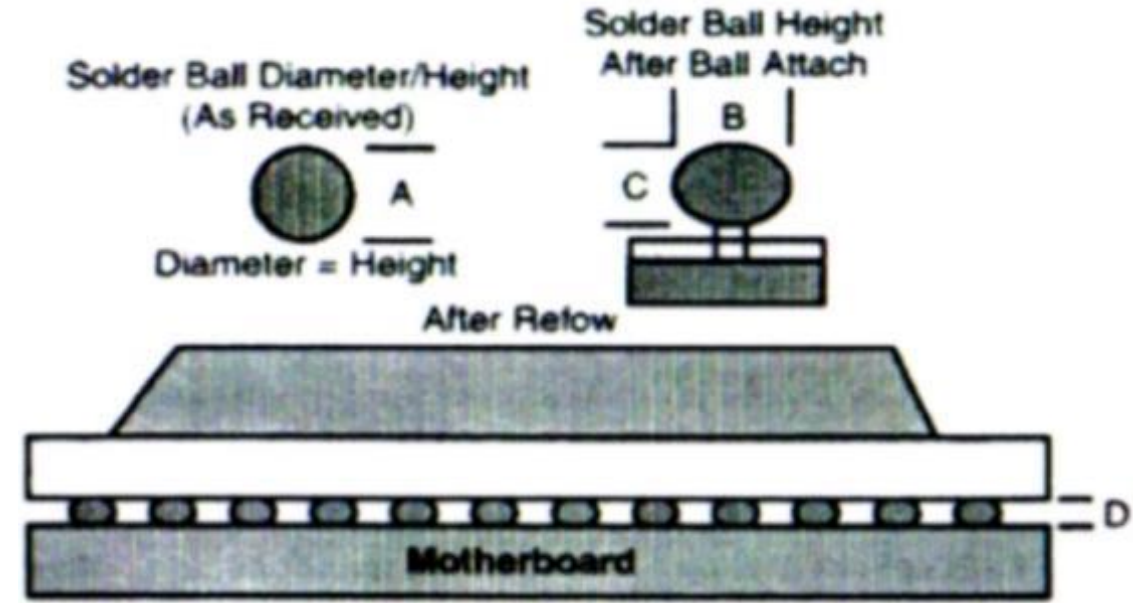


До 50% задержки быстродействия чипа обуславливается задержками в его корпусе.

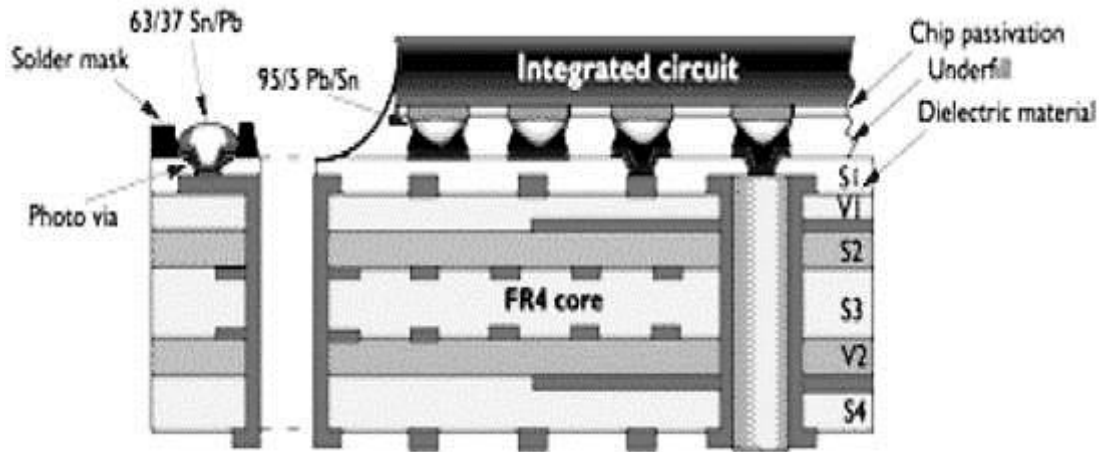
СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ КОРПУСИРОВАНИЯ



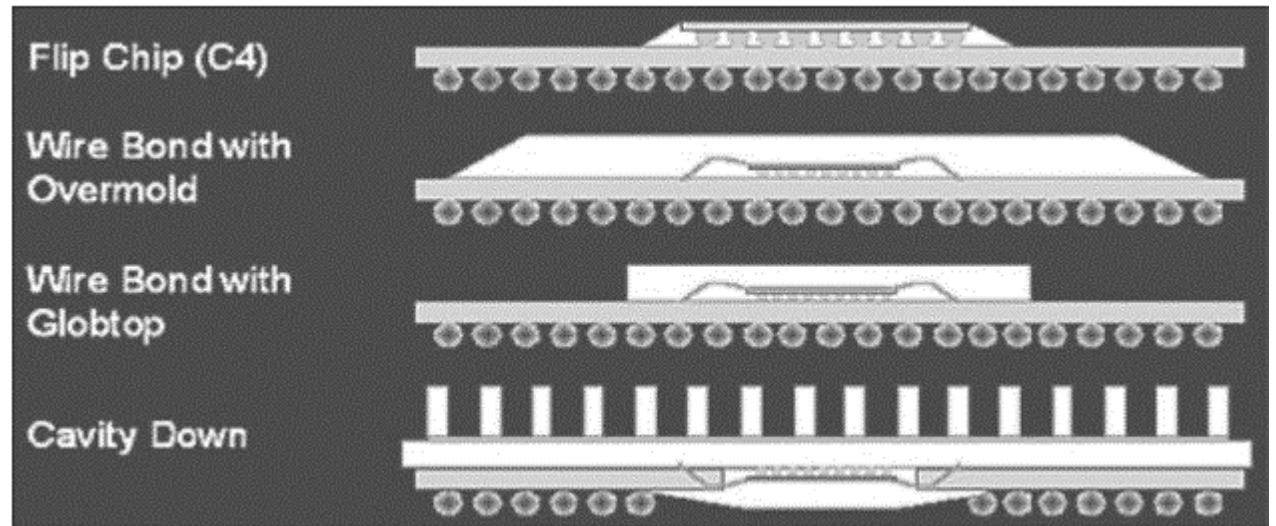
Pin Grid Array Package (PGA)



Ball Grid Array (BGA)

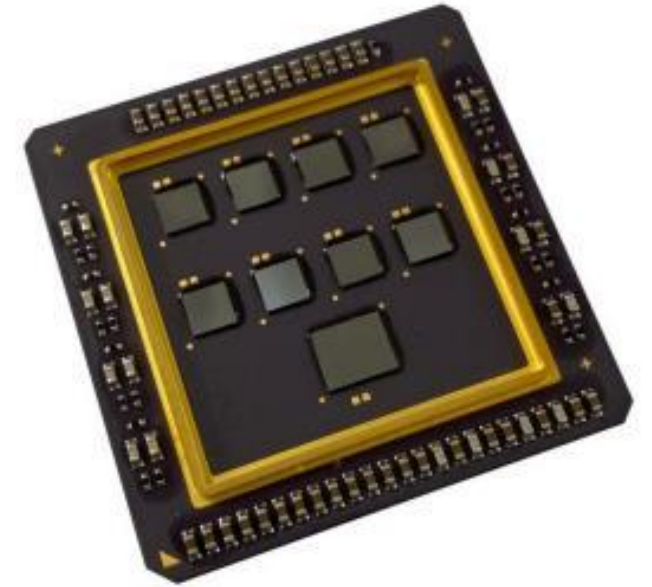


Flip Chip in package (FCIP PBGA)

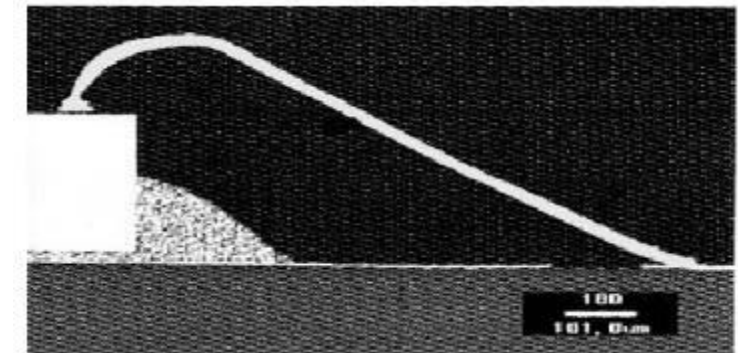


КОНТАКТЫ

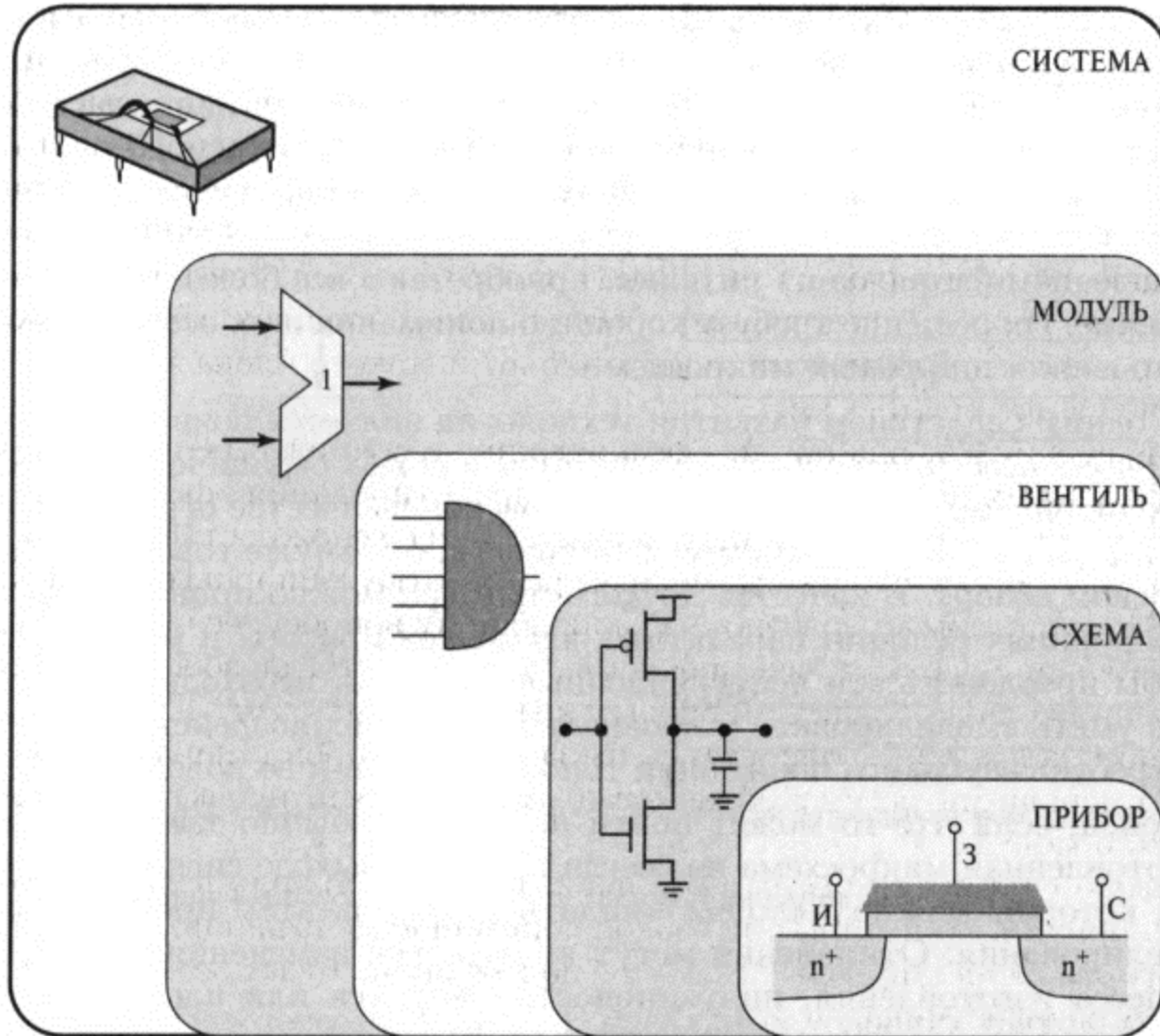
Для электрического соединения выводов кристалла с контактными площадками корпуса или платы используются в основном три метода подсоединения: проволочное, автоматизированное соединение на ленточном носителе и соединение методом перевернутого кристалла.



Properties	Al	Cu	Au
Thermal Conductivity (W/m-°K)	237	403	319
Melting point (°C)	660	1083	1064
Electrical resistivity (Ohm-m °C)	2.7×10^{-8}	1.7×10^{-8}	2.3×10^{-8}
Elastic modulus (Pa)	3.4×10^{10}	1.3×10^{10}	7.7×10^{10}
Yield strength (Pa)	1.0×10^7	6.9×10^7	1.7×10^8
Ultimate Tensile Strength (Pa)	4.5×10^7	2.2×10^8	2.1×10^8
Coefficient of Thermal Expansion (ppm/ °C)	46	16	14
Percentage Elongation (%)	50	51	4

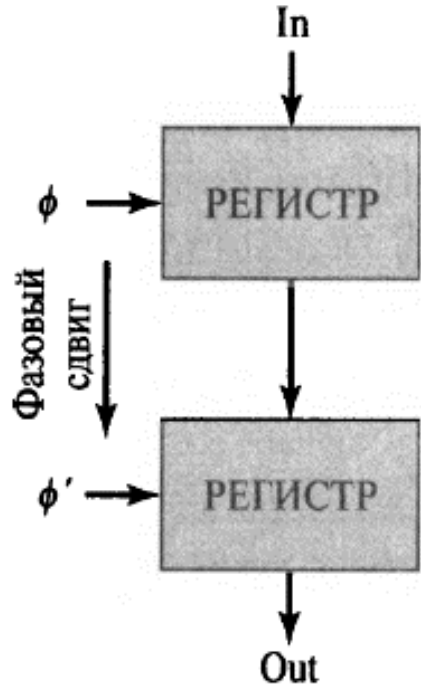


УРОВНИ АБСТРАГИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЦИФРОВЫХ ИС



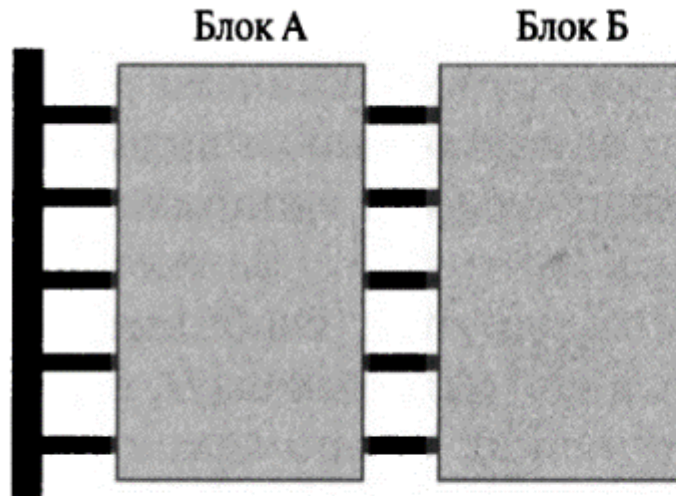
В настоящее время используется **иерархический подход** к проектированию: процессор представляет собой набор модулей, каждый из которых, в свою очередь, состоит из ячеек. В целях уменьшения трудозатрат на проектирование и увеличения шанса получения работоспособного решения с первого раза ячейки как можно чаще используются повторно.

ПРОБЛЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ И ПИТАНИЯ...



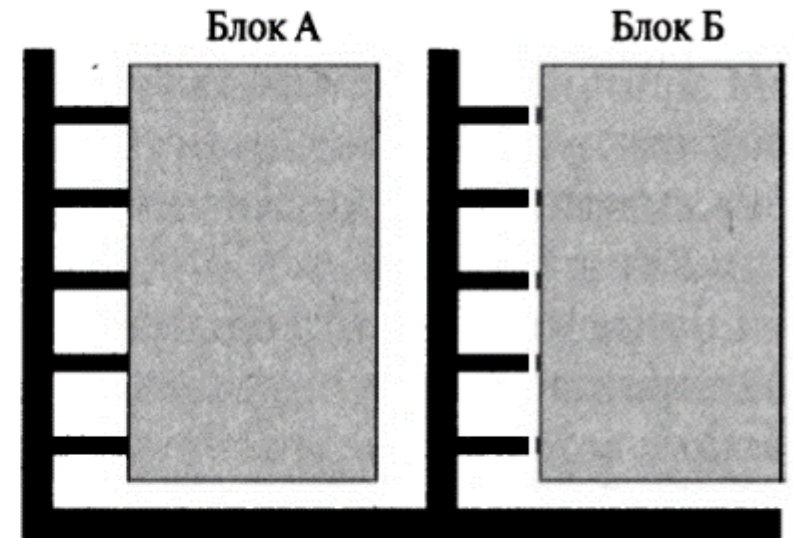
Требуется, чтобы на каждый клапан подавалось стабильное напряжение постоянного тока (2.5 ± 0.1 В).

При токе 100 А и напряжении 2.5 В сопротивление дорожки 0.00125 Ом приводит к 5% падению напряжения питания.



Трассировка сквозь блок

а



Трассировка вокруг блока

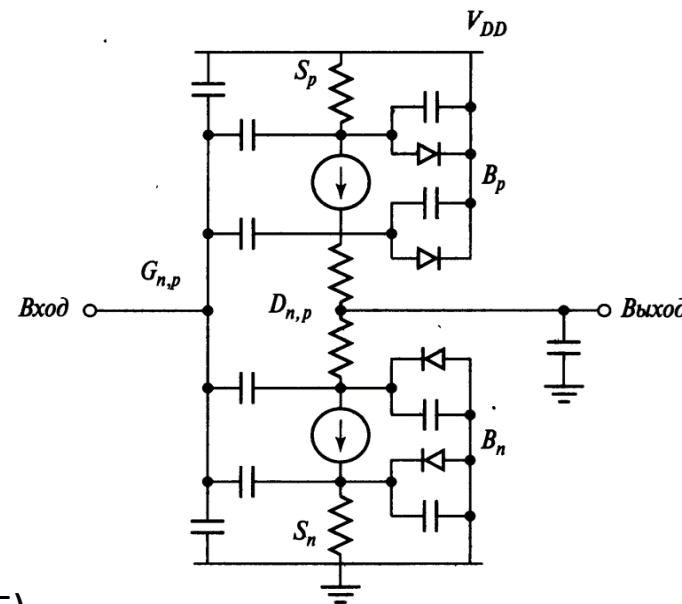
б

Вследствие задержки, возникающей из-за различий в трассировке линий тактового сигнала, тактовые сигналы окажутся рассогласованными по отношению друг к другу.

БАЗОВЫЙ ФУНКЦИОНАЛ САПР EDA

1. Редактор топологии. Базовая функция: размещение многоугольников в фотошаблонах.
2. Символьная топология. Разработчик только описывает создаваемые компоненты. Размещение компонентов и разводка осуществляются автоматически программой-компактором.
3. Проверка соблюдения норм проектирования (интерактивные и пакетные программы).
4. Восстановление принципиальной схемы по физической топологии, включая отображение паразитных ёмкостей.
5. Моделирование работы схемы (стандарт SPICE).

Изначально пакет SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) разрабатывался в Калифорнийском университете в Беркли. Позже появились различные модификации SPICE (например, PSPICE или HSPICE), предложившие коммерческую поддержку университетскому продукту.



С точки зрения разработки цифровых схем интерес представляют два режима работы SPICE:

- Развертка постоянной составляющей (например, последовательность значений источника напряжения)
- Анализ переходных процессов (задержка распространения сигнала, время нарастания и спада, рассеиваемая мощность)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



meme-arsenal.ru

Виталий Пикулев, 2022
scilink.ru