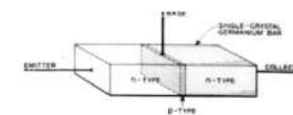


# **Основы проектирования интегральных микросхем**

Интегральные схемы.  
Технология полупроводникового  
производства

# История развития электроники

- **1925 г.** Julius Lilienfeld предложил идею полупроводникового полевого транзистора (патент получил в 1928 г.).
- **1927 г.** Бельгийская компания «Bell Telephone Manufacturing Company» (с января 2016 г. часть финской транснациональной корпорации Nokia) выпустила первую промышленную телевизионную установку на электронных лампах. Началась эра ламп.
- **1948 г.** Bell Laboratories (AT&T): John Bardeen, Walter Brattain, William Shockley изготовили первый (точечный) транзистор на Ge. Позже Шокли предложил слоёную структуру транзистора.
- **1948 г.** Herbert Franz Mataré и Heinrich Johann Welker (Париж) представили **транзитрон** – точечный Ge транзистор собственной разработки.
- **1951 г.** Джефф Даммер из «Royal Radar Establishment» выдвинул предположение о создании электроники в виде единого блока при помощи полупроводниковых слоёв одного и того же материала, работающих как усилитель, резистор, ёмкость и соединённых вырезанными в каждом слое контактными площадками.
- **1952 г.** Шокли создал полевой транзистор
- **1954 г.** Чарлз Ли из «Bell Laboratories» изготовил транзистор с базой толщиной всего в 1 мкм и обнаружил, что он может работать на частоте до 170 МГц.
- **12.09.1958** Texas Instruments: Jack Kilby продемонстрировал работу первой [гибридной] микросхемы – 5-элементный осциллятор (транзистор на *p-n* переходе, 2 резистора, 2 конденсатора). Реализация идеи Даммера.
- **1963 г.** Фрэнк Вонлас из «Fairchild Semiconductors» продемонстрировал КМОП пару
- **1968 г.** первая КМОП микросхема.
- **1990 г.** КМОП выигрывает гонку у ТТЛ за счёт степени интеграции и низкого энергопотребления.
- **2000 г.** Нобелевская премия по физике присуждена Дж. Килби «за вклад в изобретение интегральных схем».



# Развитие интегральной схемотехники

- Составные транзисторы: транзистор Дарлингтона, каскодный транзистор, пара Шиклаи, КМОП.
- Объединение элементов в единую схему.
- Дублирование типичных схем (сборки).
- Объединение (либо разделение) цифрового и аналогового трактов.
- Планарная технология (сменяется 3D).
- Металлизация, увеличение слоёв.
- Уменьшение паразитной ёмкости.

# Планарная технология

## Производство **планарных (плоских, поверхностных)** полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Пара **Si/SiO<sub>2</sub>** – основа современной электроники.

### *Ода оксиду кремния*



SiO<sub>2</sub> – великолепный диэлектрик ( $E_g = 8-10$  эВ), термически и химически устойчив, хорошо защищает от атмосферных воздействий (даже тонкая плёнка).

Допускается **селективное травление**: химическое разрушение SiO<sub>2</sub> при нетронутости Si.

Экранирование от примесей.

КТР (Si) = КТР (SiO<sub>2</sub>).

Метод получения: **термическое окисление** Si => нет дефектов на границе Si/SiO<sub>2</sub>.

Технологическая цепочка: **окисление, литография, легирование.**

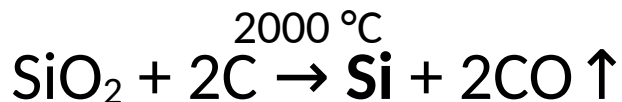
# Получение монокристаллов Si

Кремний получается из... оксида кремния 😊

Требуется:

очень чистый песок: 2 места на земле

1. Спрус Пайн (Spruce Pine, Северная Каролина)  
Unimin (Covia с 2018), Quartz Corp ;),
2. В Иркутской обл. (программа «Кремний России»).



**металлургический кремний** (чистота 98-99,9%)

\$2/кг.



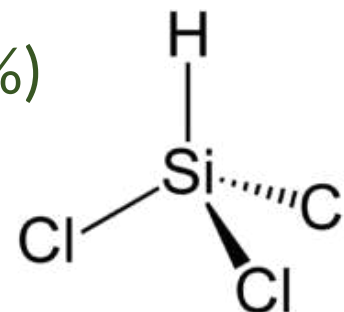
**трихлорсилан** [кремния]



**Поликристаллический (электронный) кремний**  
(кристаллиты 1-10 мкм) (чистота 99,9999999%)

Для п/п и тиглей  
нужен песок класса  
Iota-8 чистотой  
99,9992%.

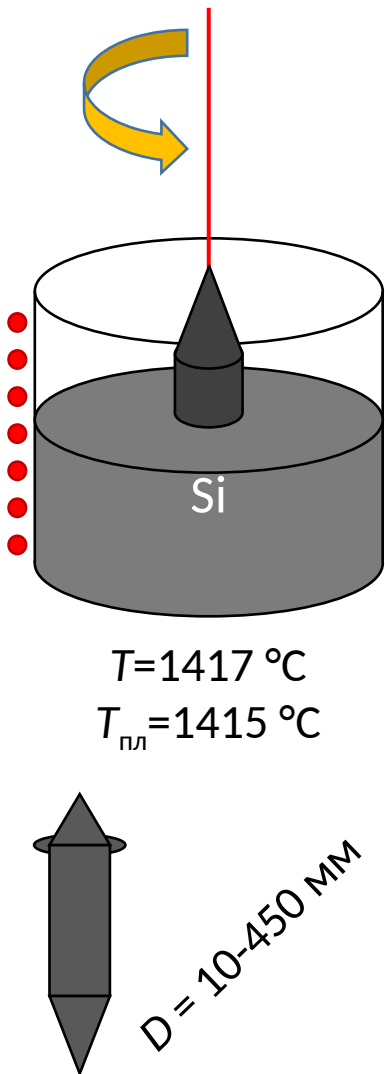
Цена 1 тонны Iota-8:  
\$10000.



\$35/кг.

# Получение монокристаллов Si

## Метод Чохральского



- Затравочный кристалл с нужной ориентацией,
- тигель из сплавленного кварца ( $T_{пл}=1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),
- дроблённый поликристаллический кремний (навеска шихты, 10-50 мм).

Создаётся нейтральная аргоновая атмосфера с давлением не более 30 Торр.

Навеска шихты расплавляется, нагрев снизу и с боков (при оплавлении навески сверху вниз расплав стекает вниз и кристаллизуется на более холодной шихте с риском разрушения стенок тигля.

- Выставляется положение уровня расплава относительно нагревателя, при котором создаются необходимые условия для начала кристаллизации исключительно в центре расплава вблизи от его поверхности.
- Система выдерживается в состоянии стабилизации потоков и распределения температуры. Время выдержки от 15 минут до нескольких часов.
- Подвеска с затравочным кристаллом необходимой структуры и ориентации опускается вниз, затравочный кристалл приводится в контакт с поверхностью расплава и выдерживается там для прогрева и оплавления зоны контакта.

Начинается вытягивание затравочного кристалла вверх в холодную зону. В ходе вытягивания сначала формируется цилиндр диаметром в несколько миллиметров — продолжение затравочного кристалла, особенно важное при выращивании бездислокационных кристаллов. Диаметр оттяжки ступенчатый. Длина цилиндра от нескольких миллиметров до нескольких сотен миллиметров.

За счёт снижения температуры и скорости вытягивания диаметр призатравочного цилиндра увеличивают до необходимой величины, после чего вытягивают цилиндр максимально возможной длины. При этом предусматривается оставление некоторого запаса расплава для финишных операций процесса роста. Для вытягивания кристаллов большого веса формируются утолщения в верхней части кристалла для поддерживающих устройств.

Перед завершением процесса за счёт увеличения температуры расплава и за счёт некоторого увеличения скорости вытягивания диаметр кристалла постепенно уменьшают (длина формируемого конуса для слитков кремния диаметром более 300 мм и более может достигать 2-х диаметров).

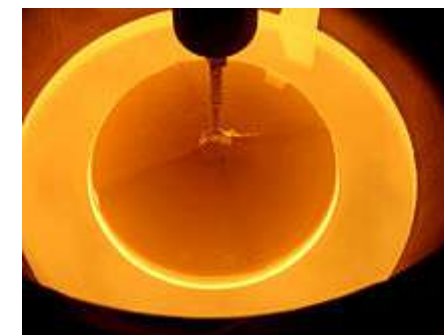
После завершения конуса и исчерпания остатков расплава производится отрыв слитка от расплава и постепенное охлаждение слитка до заданной температуры.



Круглый затравочный кристалл кремния с фрагментом начала оттяжки



Кварцевый тигель, заполненный дроблённым кремнием

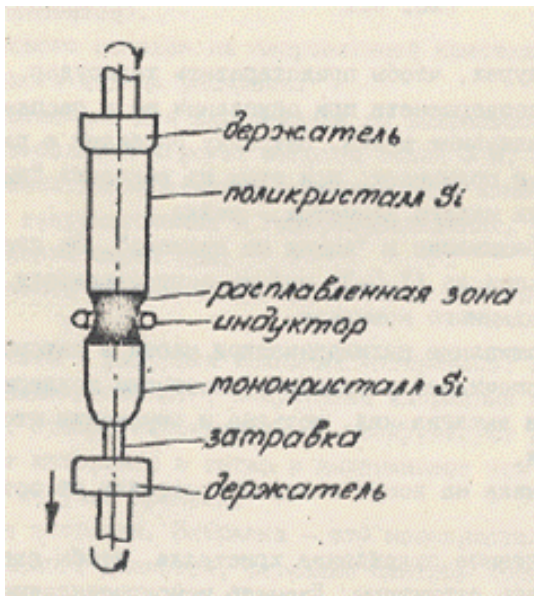


Начальная стадия выращивания цилиндрической части монокристалла кремния в направлении (100)

# Получение монокристаллов Si

## Бестигельная зонная плавка

1952 г.



- Затравочный кристалл с нужной ориентацией;
- заготовка из переплавляемого материала (поли- или монокристаллический кремний, ;
- СВЧ индуктор (нагревает 1-2 см).

Нейтральная аргоновая атмосфера.

Заготовка и затравочный кристалл в виде стержней устанавливаются соосно, их концы оплавляются и приводятся в соприкосновение. Далее удержание расплавленной зоны между заготовкой и затравочным (частично готовым) кристаллом за счёт сил поверхностного натяжения.

Заготовку и затравочный кристалл с формирующимся на нём готовым кристаллом, разделённые расплавленной зоной, медленно перемещают вниз относительно зоны нагрева, чтобы расплавленная зона постепенно поглощала всё новые участки заготовки, а внизу из зоны постепенно вытягивался уже готовый кристалл. Заготовка постепенно расплавляется, а готовый кристалл постепенно растёт из расплава. Готовый кристалл также представляет собою стержень.

В случае большого диаметра итогового кристалла форма зоны имеет вид двух капель связанных друг с другом тонким перешейком. Индуктивный нагревательный элемент имеет плоскую часть, располагаемую непосредственно над периферическими областями монокристалла вокруг перешейка.

**Легирование:** легирующие элементы в газовой среде установки.

Оптическая зонная плавка используется для выращивания особо чистых кристаллов диэлектриков (оксидных кристаллов).

**Чистка:** примеси собираются на 1 конце (вверх) из-за растворения примесей в жидкой среде.



# Получение пластин Si

## Базовый срез

Монокристаллы, выращенные методом Чохральского или БЗП, имеют стандартную ориентацию  $[111]$  и  $[100]$  с отклонением до  $2^\circ$  и по спецзаказам –  $[110]$  и  $[011]$ .

На монокристалле определяют плоскость **базового** и **дополнительного срезов**. Базовый и дополнительный срезы получают методом шлифовки монокристаллического слитка вдоль образующей.

Самый большой базовый срез называют основным. Его обычно располагают определённым образом относительно некоторого кристаллографического направления.

Основной базовый срез служит для :

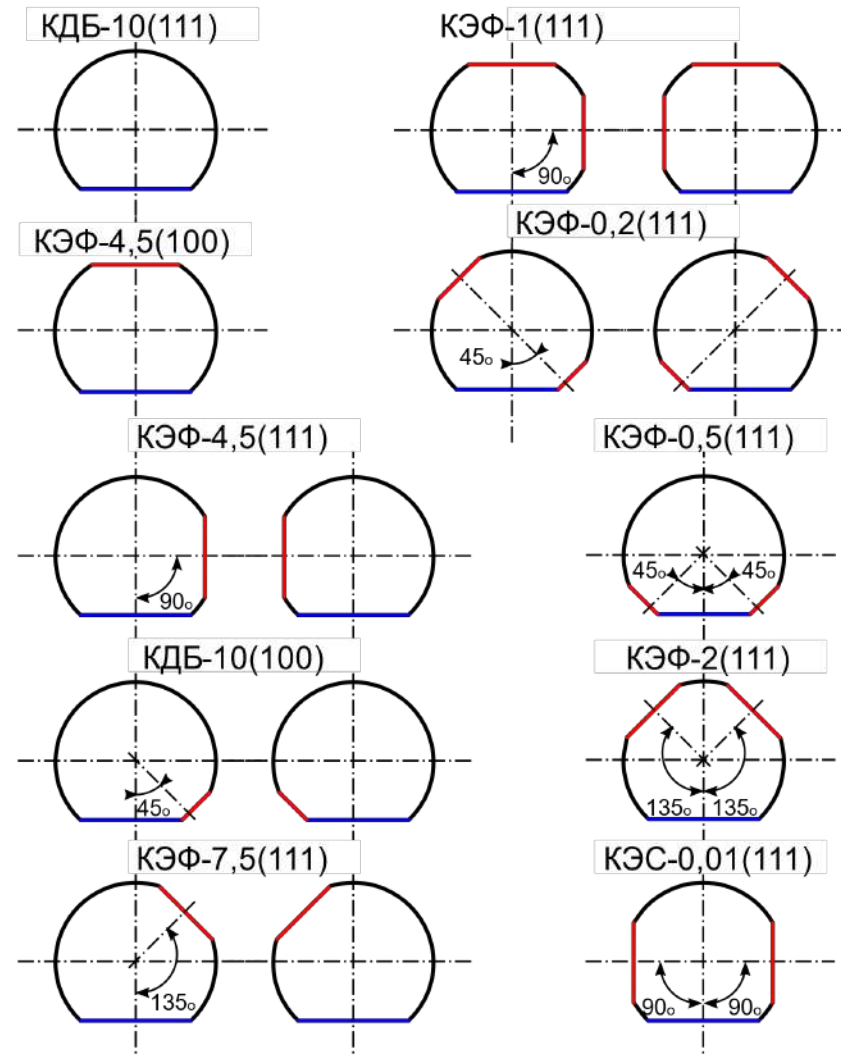
- ориентации пластины одинаковым образом в технологических установках с автоматизированным ориентированием;
- ориентации ИС относительно кристаллографических направлений строго определённым образом.

Малые базовые срезы называются дополнительными и предназначены для распознавания ориентации и типа проводимости подложек.

Базовые срезы обеспечивают быструю сортировку и идентификацию пластин при их случайном перемешивании.

КЭФ – кремний  $n$ -типа (электронный), легированный фосфором.

КДБ – кремний  $p$ -типа (дырочный), легированный бором



После калибровки цилиндрической поверхности на слитке выполняют базовый и маркировочные срезы. Базовый срез делают для ориентации и базирования пластин на операциях литографии. Дополнительные срезы обозначают кристаллографические срезы и тип проводимости. Ширины базового и маркировочных срезов регламентированы и зависят от диаметра слитка. Срезы изготавливают шлифованием на плоскошлифовальных станках чашечными алмазными кругами по ГОСТ 16172-80 или кругами прямого профиля по ГОСТ 16167-80.



# Получение пластин Si

## Пластины

Слитки монокристаллов с базовыми срезами шкурятся «нулёвкой» и пилятся на пластины алмазной пилой на пластины (wafer, «вафля»).

Поверхности пластин химически травятся, далее шлифуются и полируются до появления зеркальных поверхностей.

Чистка поверхности:

- RCA-1 ( $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OH} + \text{HF}$ ),
- RCA-2 ( $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{HCl} + \text{сушка}$ ).

### Стандартные размеры:

Диаметр круглой пластины – толщина

- 0,5 дюйма.
- 1 дюйм.
- 2 дюйма (50,8 мм) – 275 мкм.
- 3 дюйма (76,2 мм) – 375 мкм.
- 4 дюйма (100 мм) – 525 мкм.
- 5 дюймов (127 мм) и 125 мм (4,9 дюйм) – 625 мкм.
- 5,9 дюйма (150 мм, часто называются «6 дюймов») – 675 мкм.
- 7,9 дюйма (200 мм, часто называются «8 дюймов») – 725 мкм.
- 11,8 дюйма (300 мм, «12 дюймов» или «Пластина размером с пиццу») – 775 мкм.
- 18 дюймов (450 мм) – 925 мкм.

## Получение пластин Si



# Планарная технология

Производство планарных (плоских, поверхностных) полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Основные технологические операции основаны на процессе литографии (фотолитографии). Применяются следующие методы:

- **оптическая фотолитография (стандартная),  $\lambda=310—450$  нм;**
- **ультрафиолетовая фотолитография на эксимерных лазерах,  $\lambda=248$  нм,  $\lambda=193$  нм**
- **фотолитография в глубоком ультрафиолете,  $\lambda=100—10$  нм;**
- рентгеновская литография,  $\lambda=0,1—10$  нм;
- электронная литография;
- ионно-лучевая литография;
- нанопечатная литография.

Приёмы фотолитографии: сканирующие и проекционные; контактными, бесконтактными, на микрозоре.

Может быть применён метод радиационно-стимулированной диффузии.

# Планарная технология

Изготовление транзистора по планарной технологии

а — исходная пластина;

б — первое окисление;

в — первая фотолитографическая обработка;

г — создание базовой области и второе окисление;

д — вторая фотолитографическая обработка;

е — создание эмиттерной области и третье окисление;

ж — третья фотолитографическая обработка;

з — металлизация.

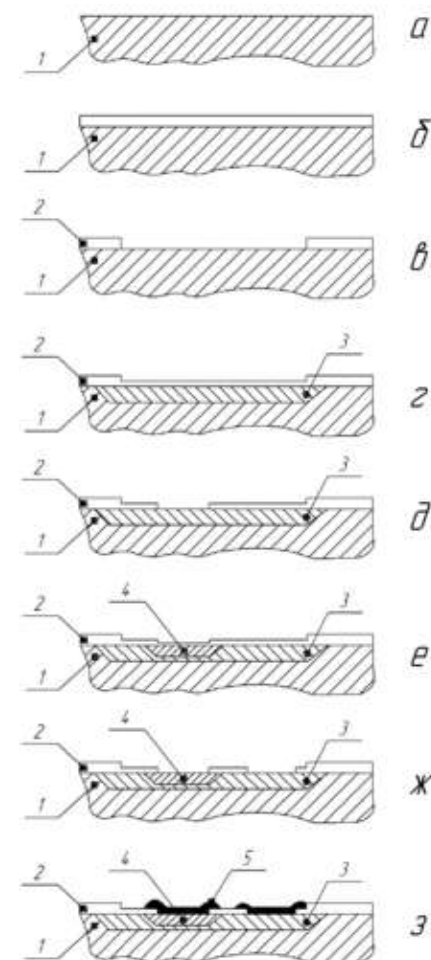
1 — Полупроводник с электропроводностью n-типа;

2 — маскирующая плёнка диоксида кремния;

3 — область базы;

4 — область эмиттера;

5 — металлическая плёнка (электроды).



# Планарная технология

## Термическое окисление

При  $T = 300 \text{ K}$  на поверхности Si образуется плёнка  $\text{SiO}_2$  толщиной  $d_{\text{ox}} = 2 \text{ нм}$  – естественный окисел.

Рабочие толщины  $\text{SiO}_2$ : 2,5 нм – 1 мкм.

Термическое окисление , 0,3 мкм/4,5 ч.

Окисление в парах воды , 0,3 мкм/11 мин.

$$d_{\text{ox}} = (Bt)^{1/2}, B = \text{const.}$$

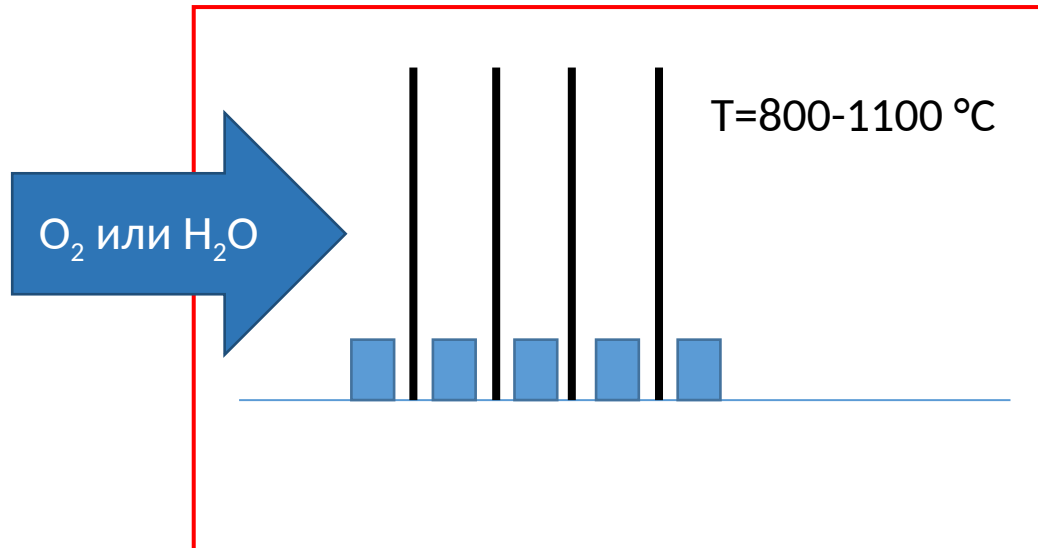
$$N(\text{SiO}_2) = 2,2 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$$

$$N(\text{Si}) = 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$$

Затраты

$$d_{\text{Si}} = 0,44 d_{\text{SiO}_2}$$

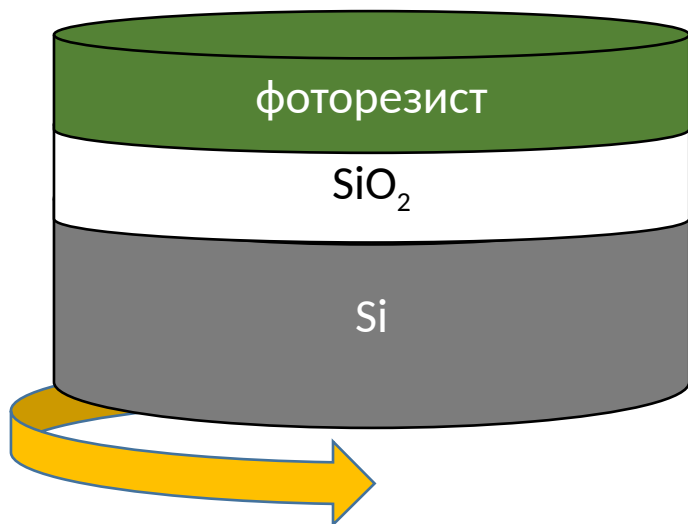
$$d_{\text{SiO}_2} = 2,27 d_{\text{Si}}$$



# Фотолитография

## Фоторезист

Плётку  $\text{SiO}_2$  покрывают фоторезистом: на закрученную пластину 1 капля по центру, далее центробежные силы распределяют фоторезист по поверхности.



Позитивный фоторезист:

полимер -> мономер

(нераств.) (раств.)

ПММА – полиметилметакрилат

Негативный фоторезист (высокая чувствительность):

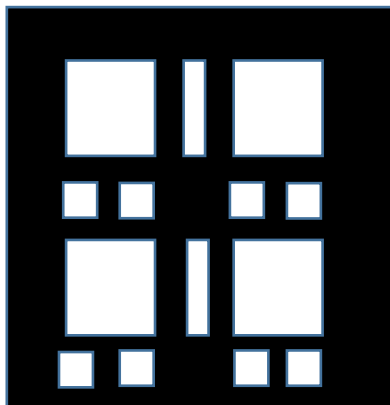
мономер -> полимер - полимеризация

(раств.) (нераств.)

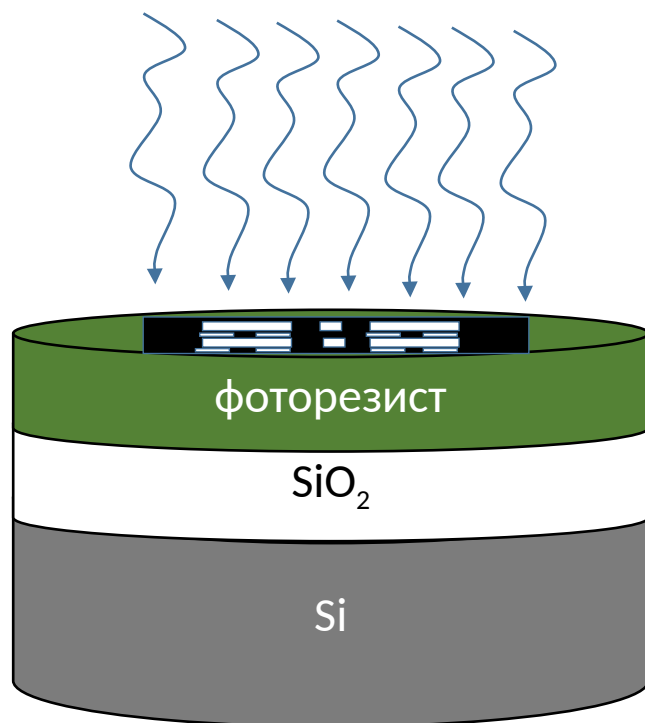
ПВЦ - поли(винил циннамат)

# Фотолитография

## Маска, экспонирование



Маска, или **фотошаблон** накладывается на фоторезист.

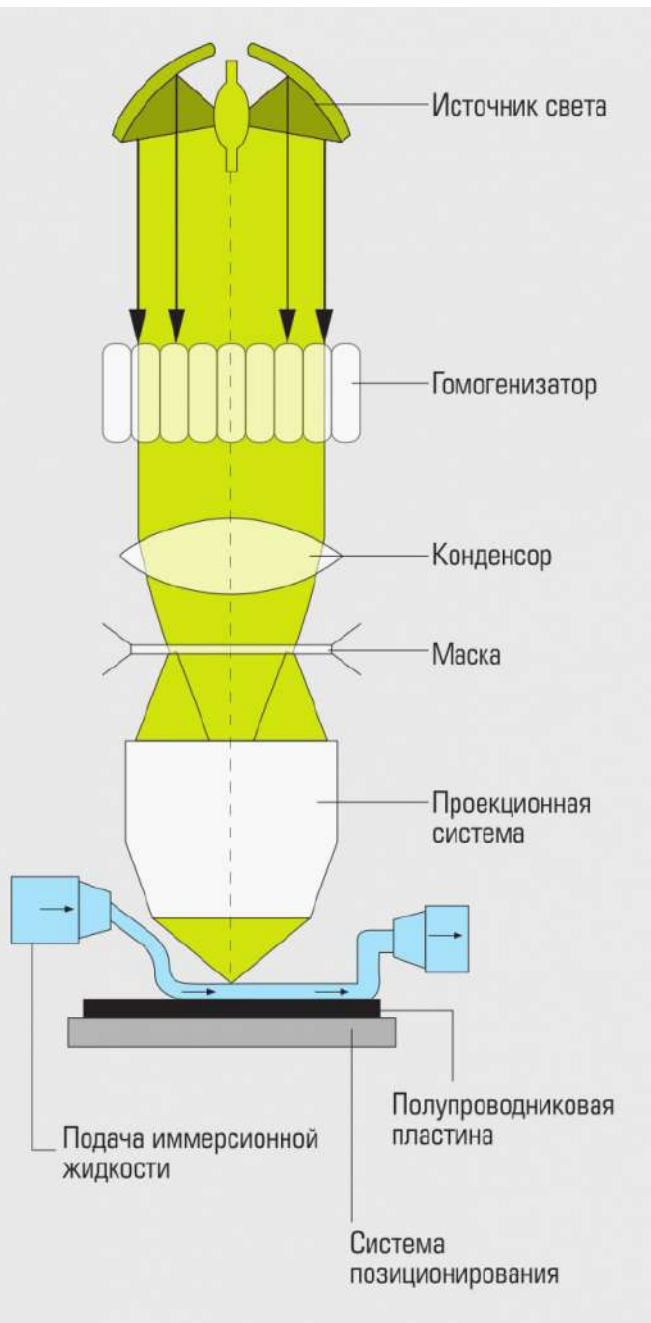


Фоторезист экспонируется светом.

Мономерные области травятся.



# Оптическая схема традиционной фотолитографии



Проекционная фотолитография с источником света в ближней ультрафиолетовой области спектра, оборудование которой было одним из самых сложных, точных и дорогих устройств в машиностроении до появления следующего поколения фотолитографии. Такого типа проекционная фотолитография позволяет достичь проектных норм до 28 нм и ниже. Применение иммерсии на длине волны 193 нм и технологии многократного экспонирования позволяет получать технологические нормы до 10 нм. Проблема в стоимости такой литографии и производительности. Цена таких установок выросла за последние десятилетия с десятков тысяч долларов до 300 миллионов.

Литографические объективы фирмы Carl Zeiss (монополизировала рынок высокоразрешающих литографических объективов и фактически является их единственным производителем) имеют высоту до 170 см, диаметр до 600 мм, содержат около 40 чрезвычайно высококачественных линз и отражающих оптических элементов и весят до 800 кг.

# Фотошаблоны

Ручная нарезка маски из рубилита применялась до 70-х гг. Маски изготавливались переносом чертежей с прозрачной плёнки.



# Фотошаблоны

Стеклянная либо  
полимерная плёнка.

## Типы фотошаблонов

- **Негативный фотошаблон (темнопольный)** — фотошаблон, на котором изображение элементов схемы представлено в виде светлых участков на непрозрачном фоне.
- **Позитивный фотошаблон (светлопольный)** — фотошаблон, на котором изображение элементов схемы представлено в виде непрозрачных для актиничного излучения участков на светлом прозрачном фоне.
- **Металлизированный фотошаблон** — фотошаблон, на котором изображение элементов схемы сформировано тонкой металлической плёнкой.
- **Транспарентный (цветной) фотошаблон** — фотошаблон, на котором изображение элементов схем сформировано покрытием, не пропускающим актиничное излучение и пропускающим неактиничное (видимая область спектра) для фоторезиста излучение.
- **Эмульсионный фотошаблон** — фотошаблон, на котором изображение элементов схемы образовано галоидо-серебряной фотографической эмульсией.

Стоимость одного фотошаблона для заказчика составляет \$k1-10 (оценки от 2007 года) или до 200 тысяч (оценка SEMATECH от 2011 года), в зависимости от требований. Наиболее дорогими являются фазосдвигающие маски для самых тонких техпроцессов. Для производства микросхемы на старом техпроцессе требуется набор из 20-30 масок различной стоимости или более. Для техпроцессов 22 нм требуется более 50 масок.

Длительность изготовления и проверки одной маски от 5-7 до 23 дней в зависимости от использованных технологий.

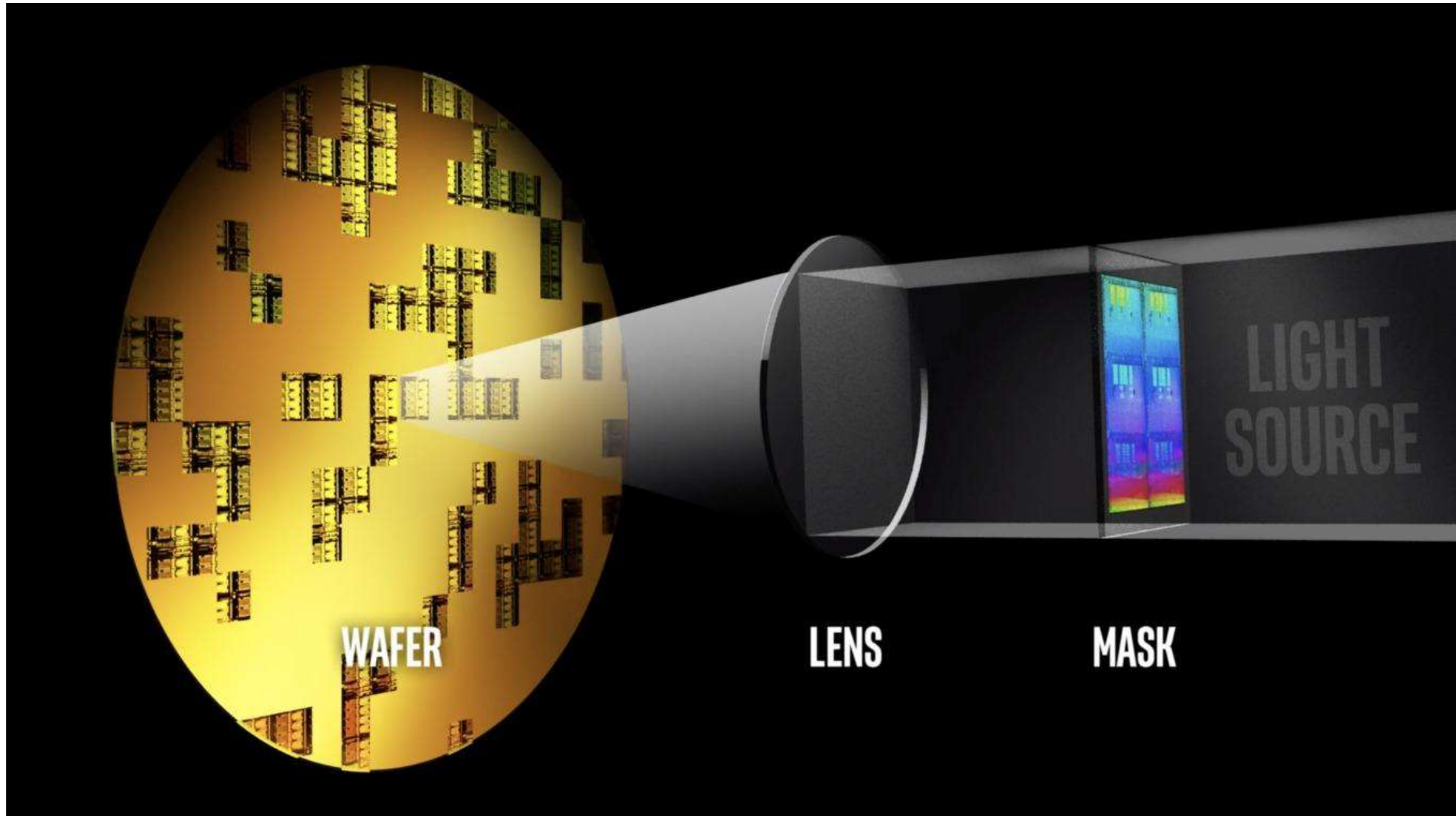
Одна маска, по исследованиям SEMATECH, используется для изготовления 0,5-5 тыс. полупроводниковых пластин.



Первый  
вытравленный  
рисунок по методу  
фотолитографии  
(1955, Bell Labs.).

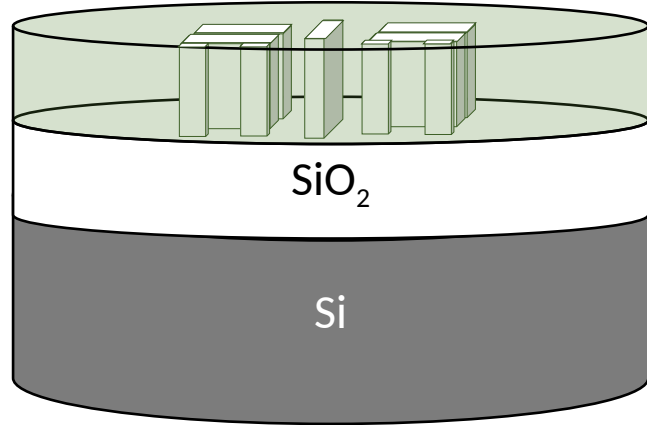
# Фотошаблоны

Intel производит маски в Санта-Кларе (Калифорния, США).  
Шаблоны 152,4×152,4×6,35 мм из идеального кварца. На кварц с помощью электронной литографии переносится определенная часть дизайна

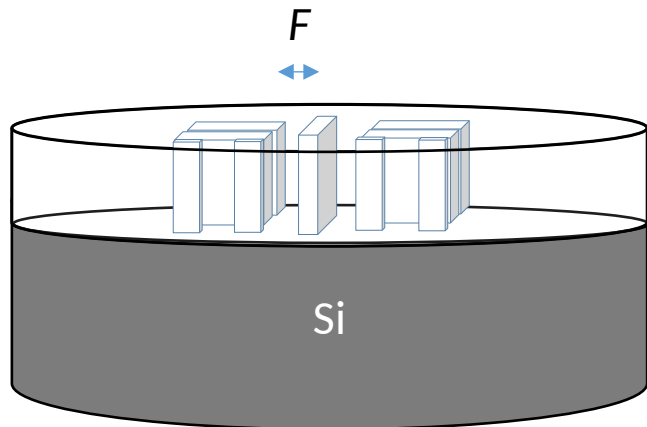


# Фотолитография

## Травление $\text{SiO}_2$



$\text{SiO}_2$  травится плавиковой кислотой  $\text{H}_2\text{F}_2$  (сухое травление).



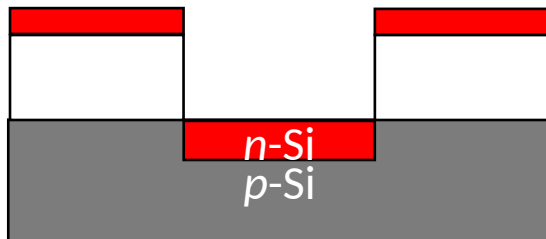
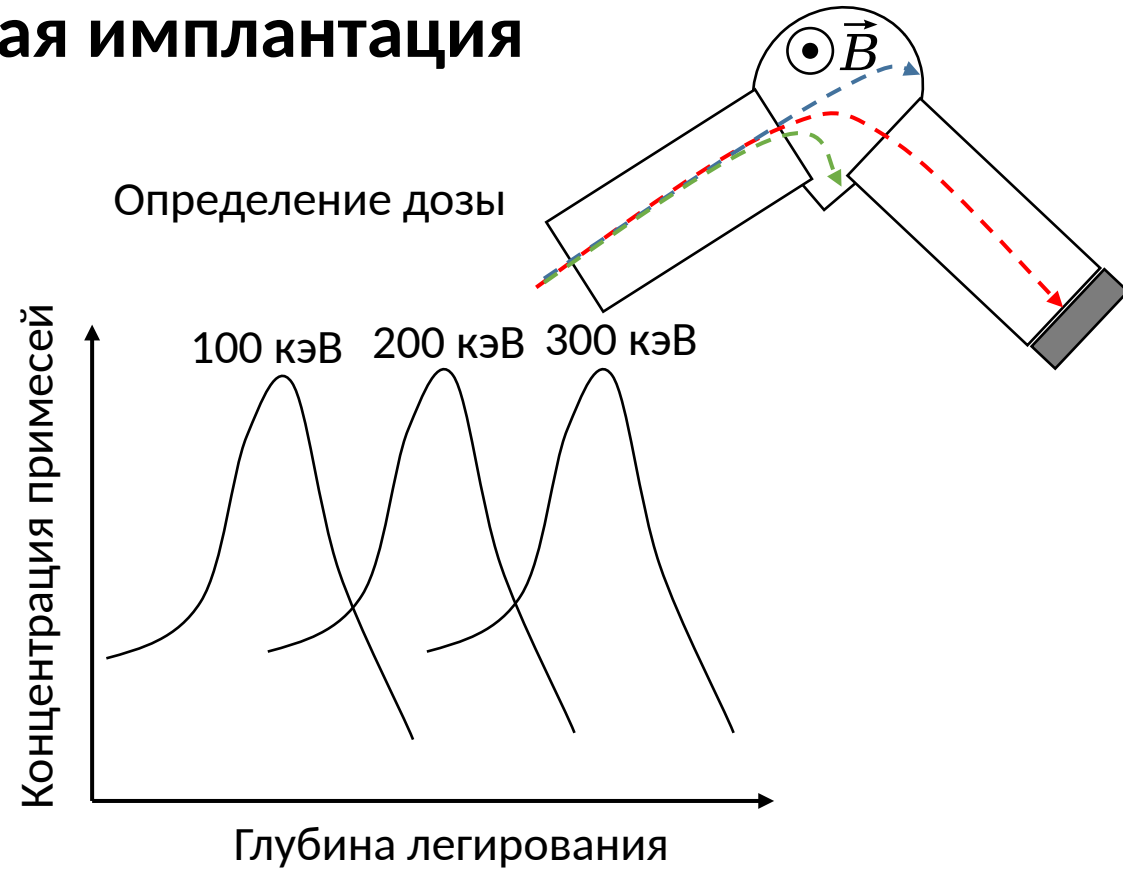
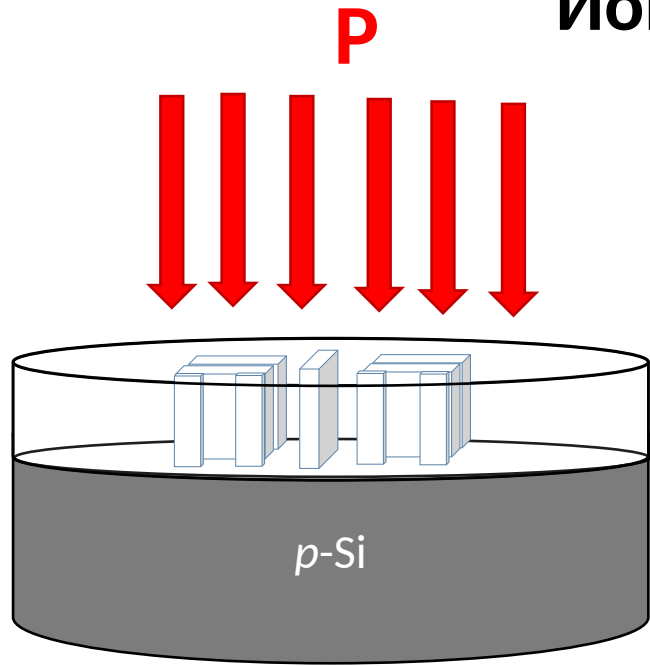
Далее растворяются остатки фоторезиста (сухое травление).

$F$  – проектная норма.



# Легирование

## Ионная имплантация



Примеси не стоят на своих местах.  
Требуется отжиг, чтобы атомы примесей  
встроились в кристаллическую решётку.

# Планарная технология

Изготовление транзистора по планарной технологии

а — исходная пластина;

б — первое окисление;

в — первая фотолитографическая обработка;

г — создание базовой области и второе окисление;

д — вторая фотолитографическая обработка;

е — создание эмиттерной области и третье окисление;

ж — третья фотолитографическая обработка;

**з — металлизация.**

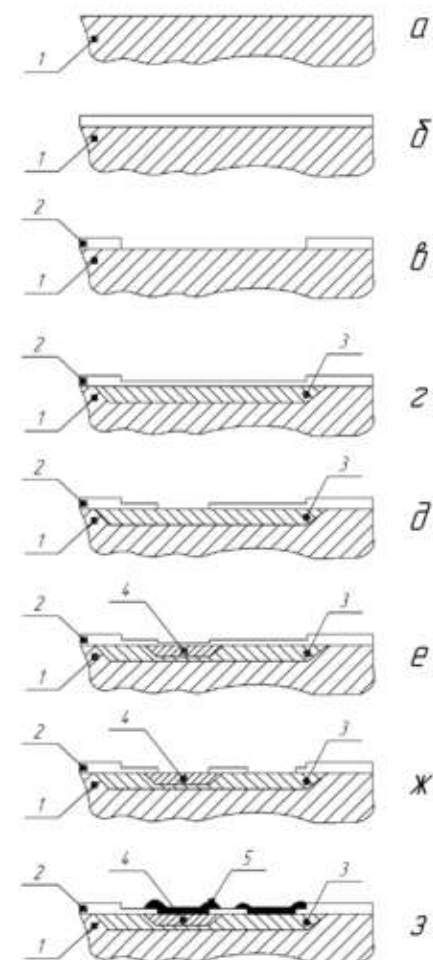
1 — Полупроводник с электропроводностью n-типа;

2 — маскирующая плёнка диоксида кремния;

3 — область базы;

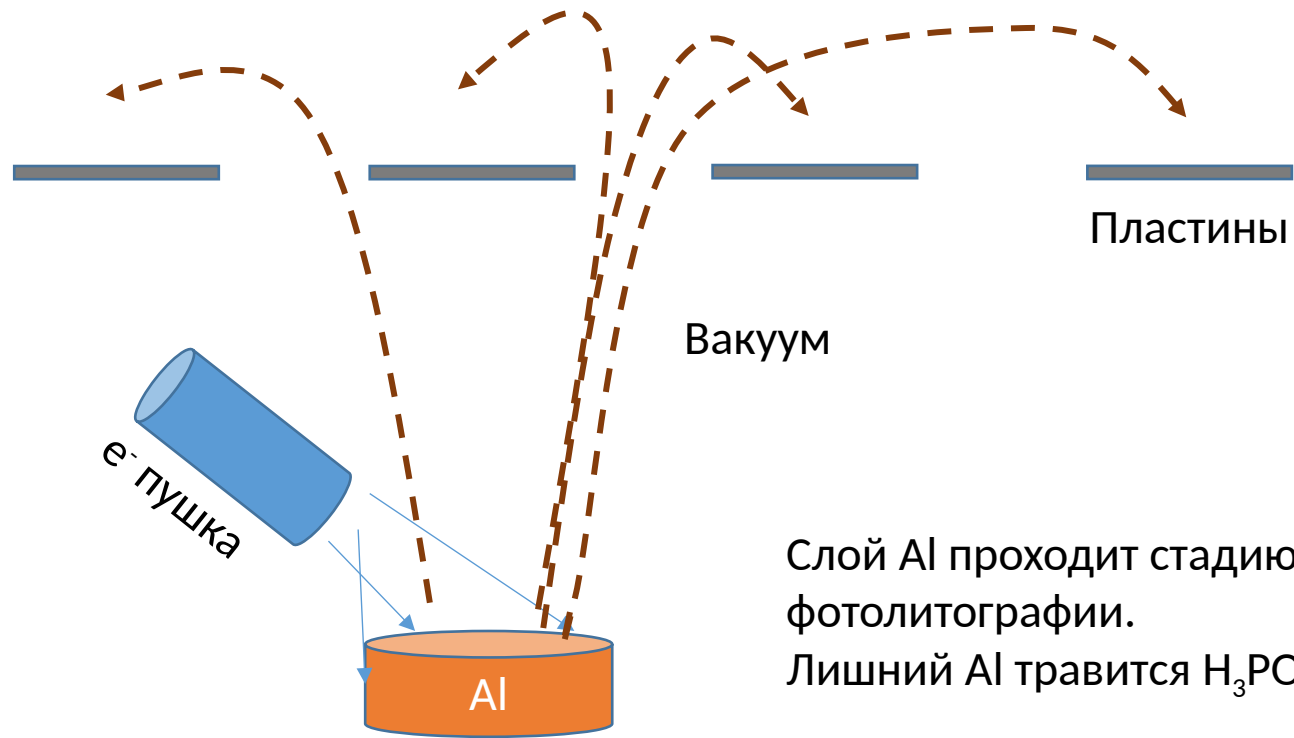
4 — область эмиттера;

5 — металлическая плёнка (электроды).



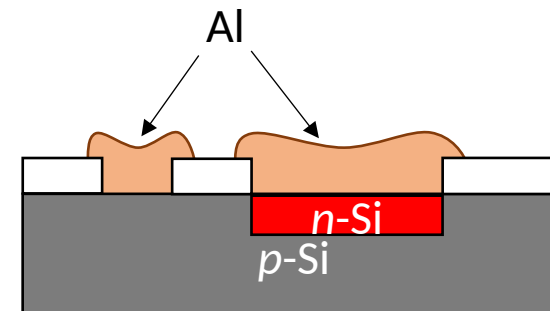


# Металлизация Распыление



Слой Al проходит стадию  
фотолитографии.  
Лишний Al травится  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

В результате получается контакт.

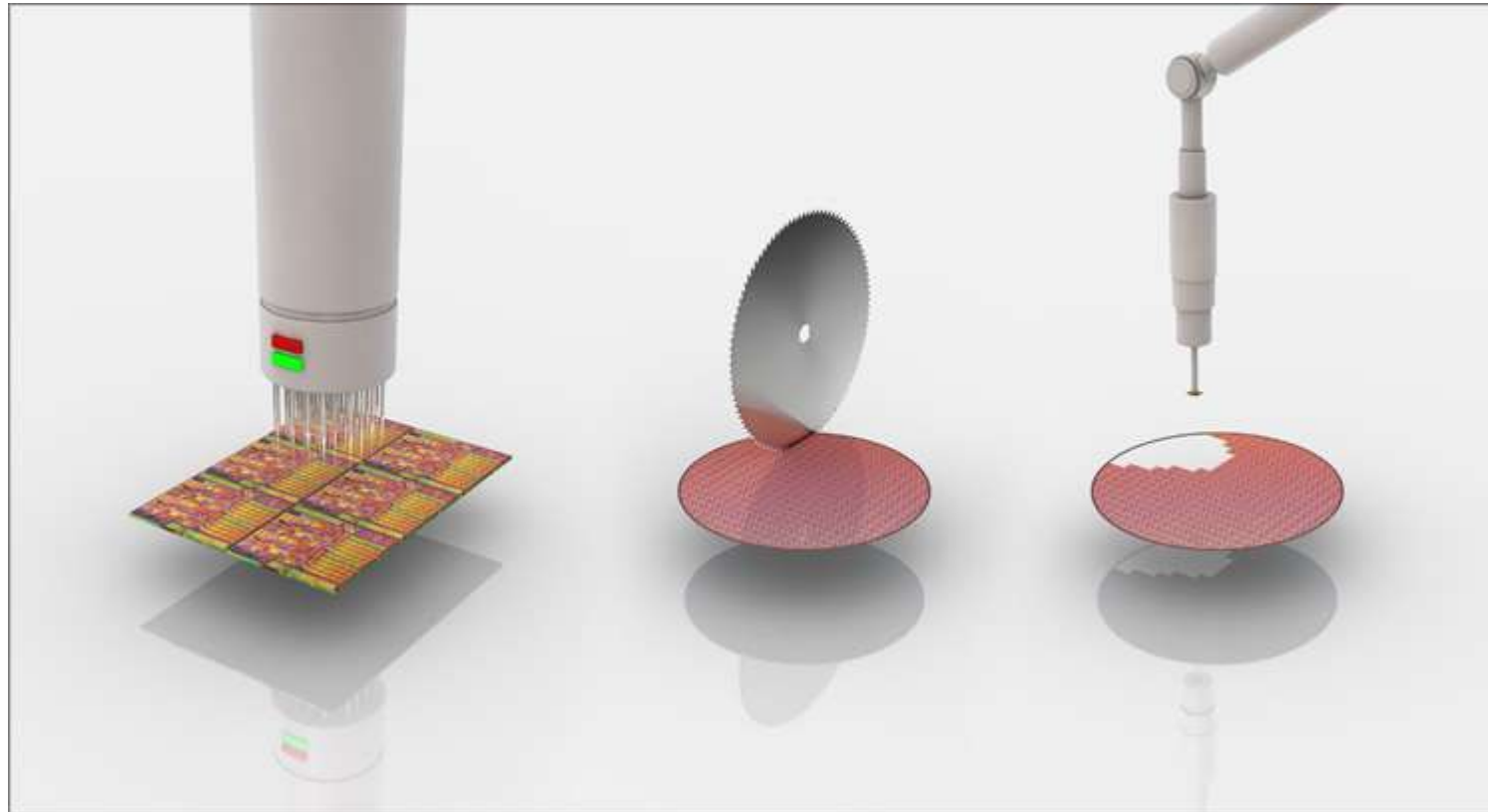


## Финальная стадия

Тестирование, испытание и отбраковка микросхем.

Распил пластины на чипы.

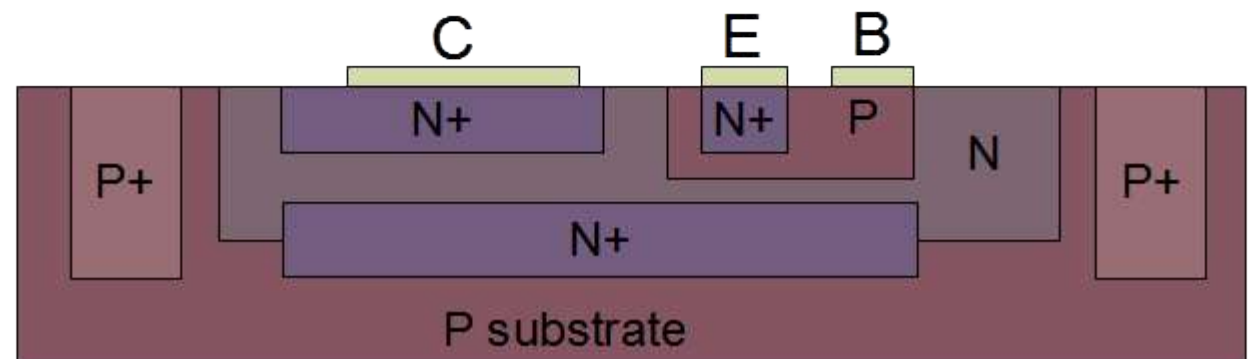
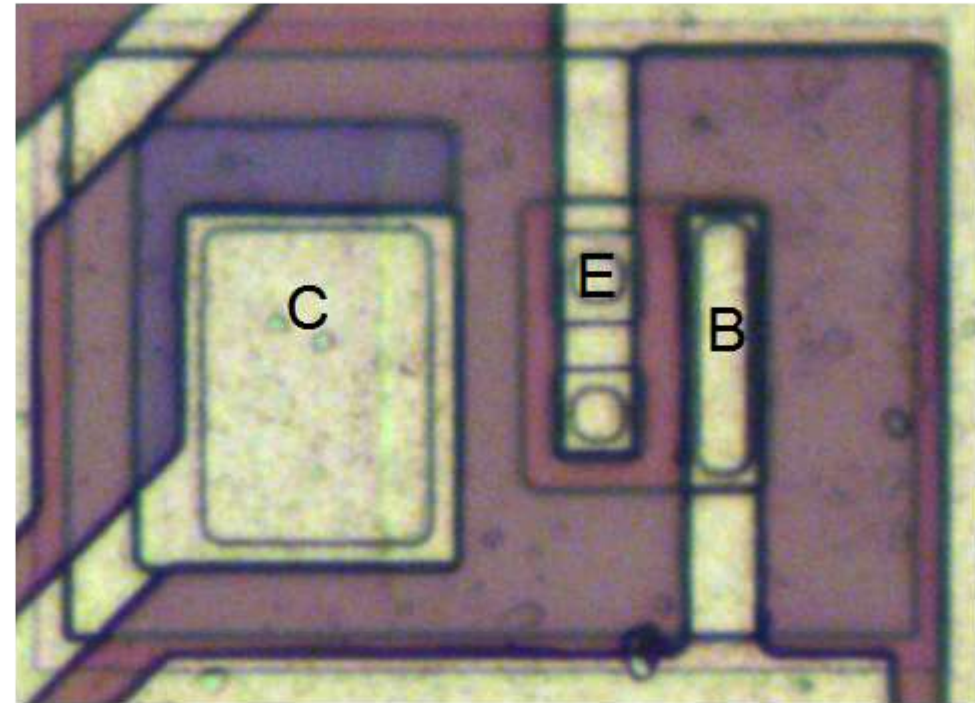
Корпусирование.



# Планарная технология

Топология  $n$ - $p$ - $n$  транзистора

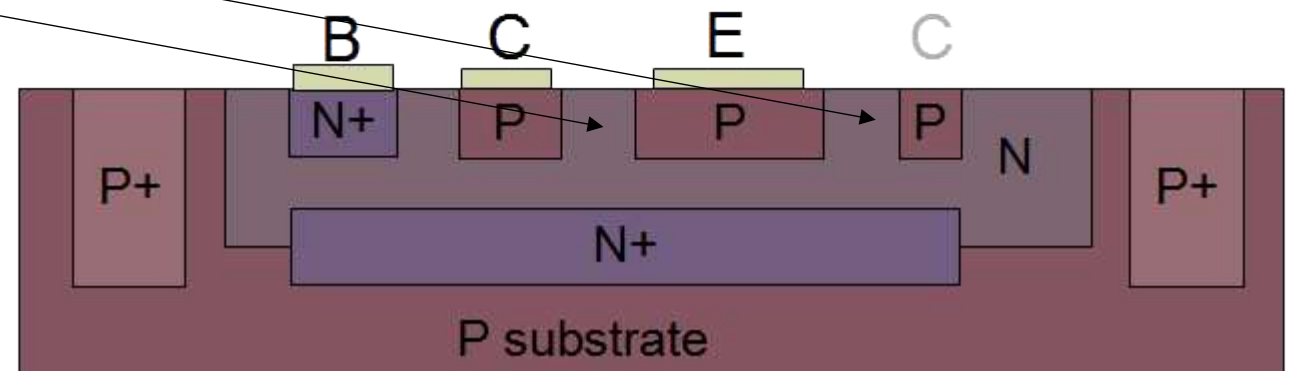
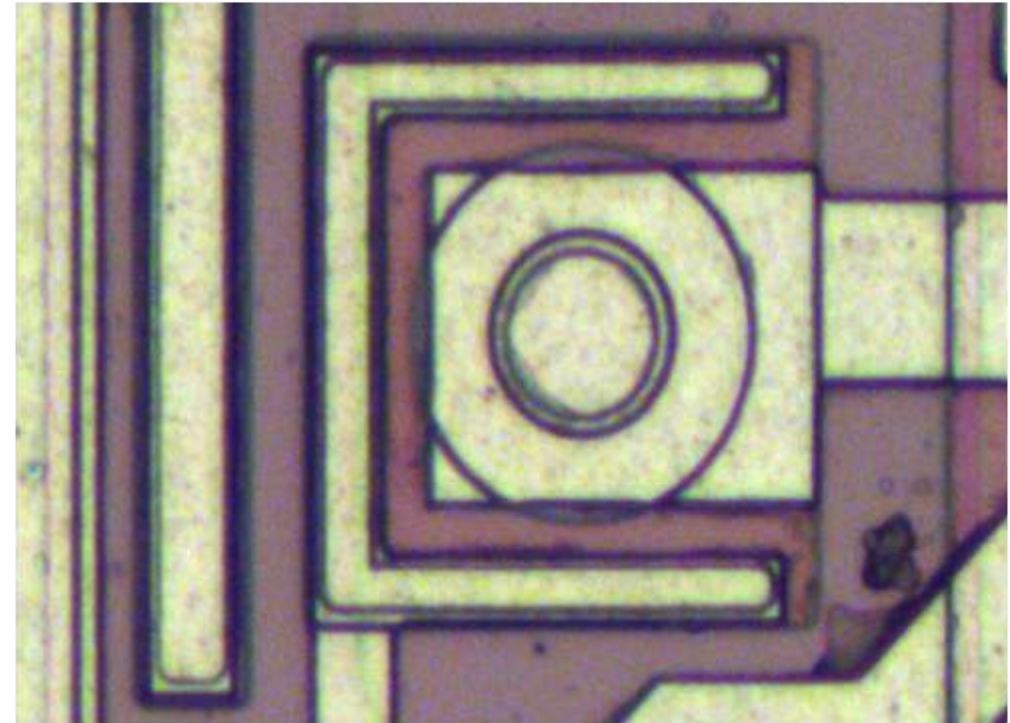
(кристалл микросхемы TL431)



# Планарная технология

Структура  $p$ - $n$ - $p$  транзистора.

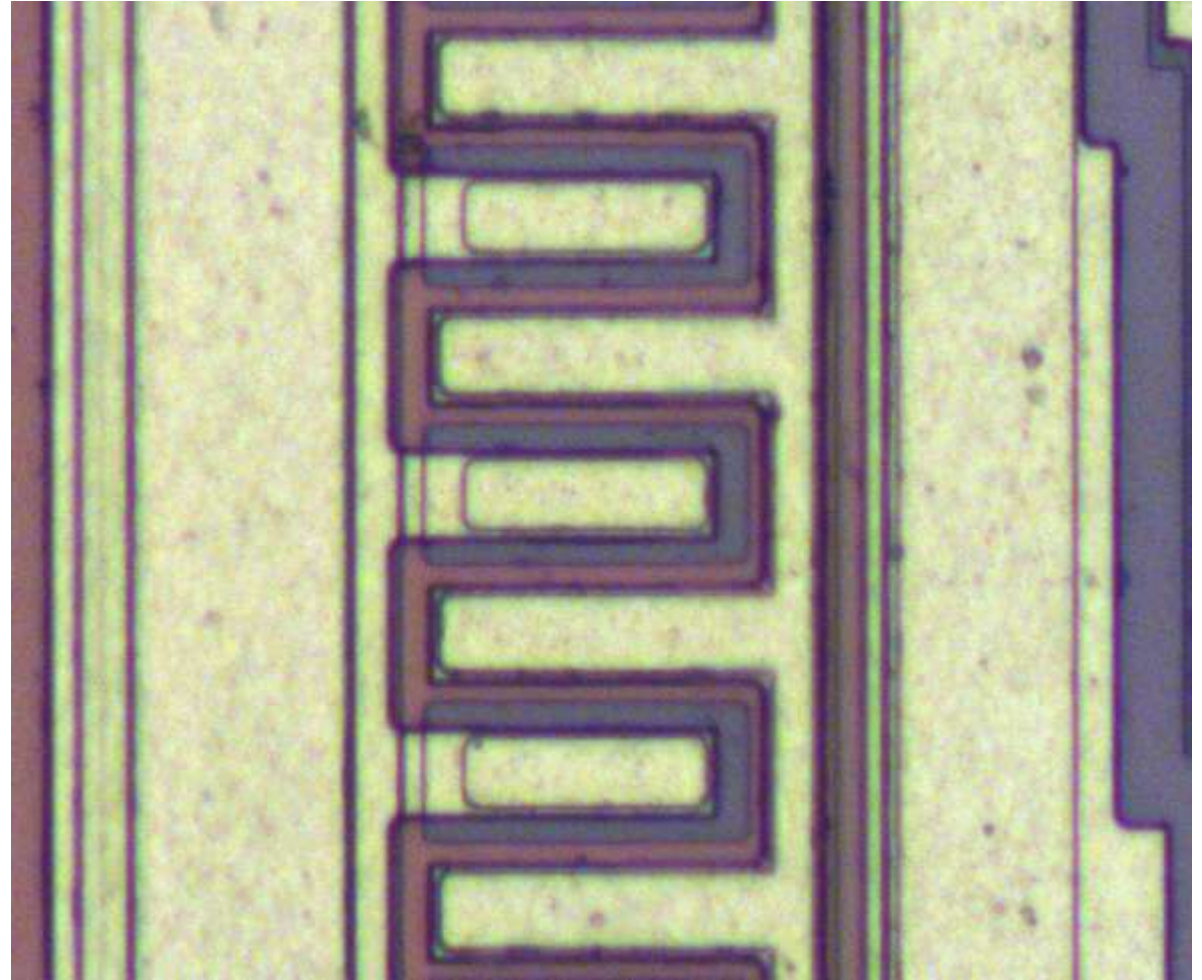
Хотя металлический контакт базы находится в углу транзистора, он электрически соединен через  $n$  и  $n^+$  области с активным кольцом, пролегающим между коллектором и эмиттером.



# Планарная технология

Топология выходного транзистора сильно отличается от других  $n$ - $p$ - $n$  транзисторов. Он создаётся, так сказать, боком, планарная структура вместо глубинной, и база располагается между эмиттером и коллектором. Металл слева подсоединён к десяти эмиттерам (синеватый кремний  $n$ -типа), каждый из которых окружен розовым  $p$ -слоем, который является базой (средний проводник). Коллектор (правая часть) имеет только один большой контакт. Проводники эмиттера и базы образуют вложенную «гребёнку».

Металл коллектора становится шире сверху вниз для того, чтобы поддерживать большие токи на нижней части транзистора.

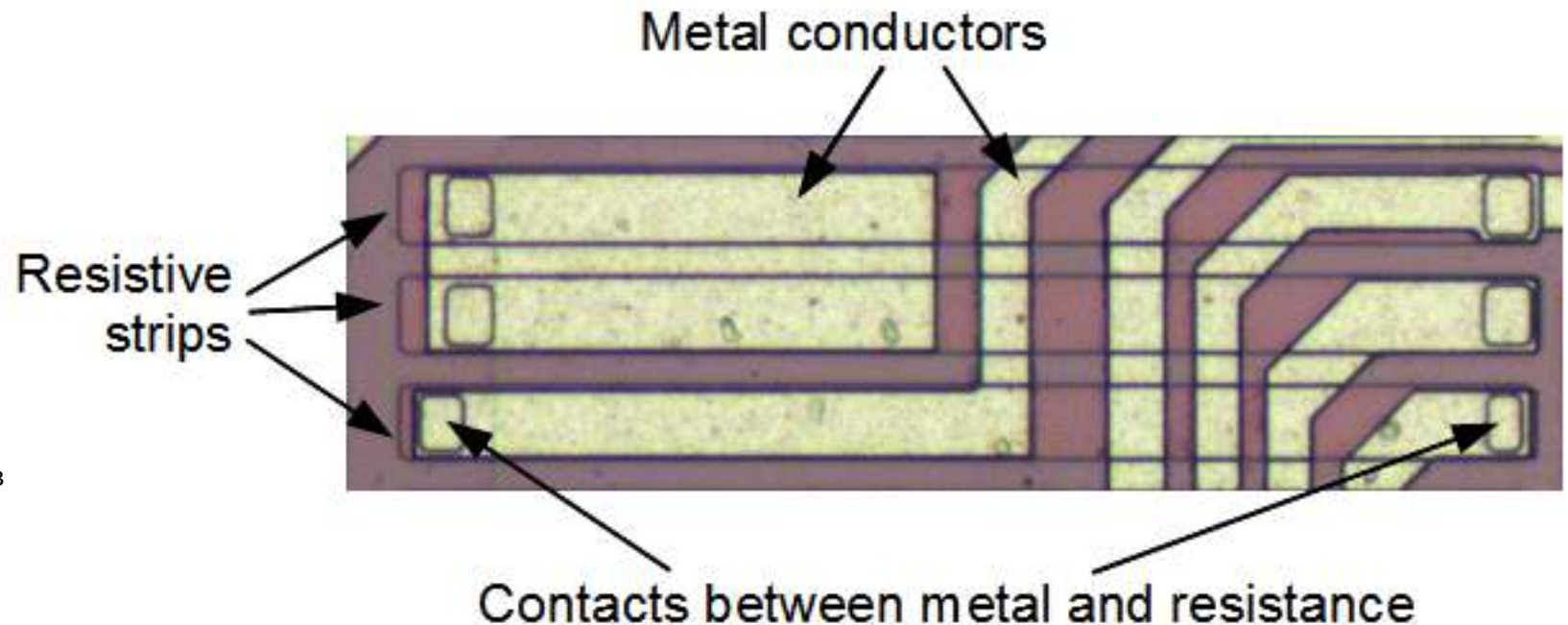




# Планарная технология

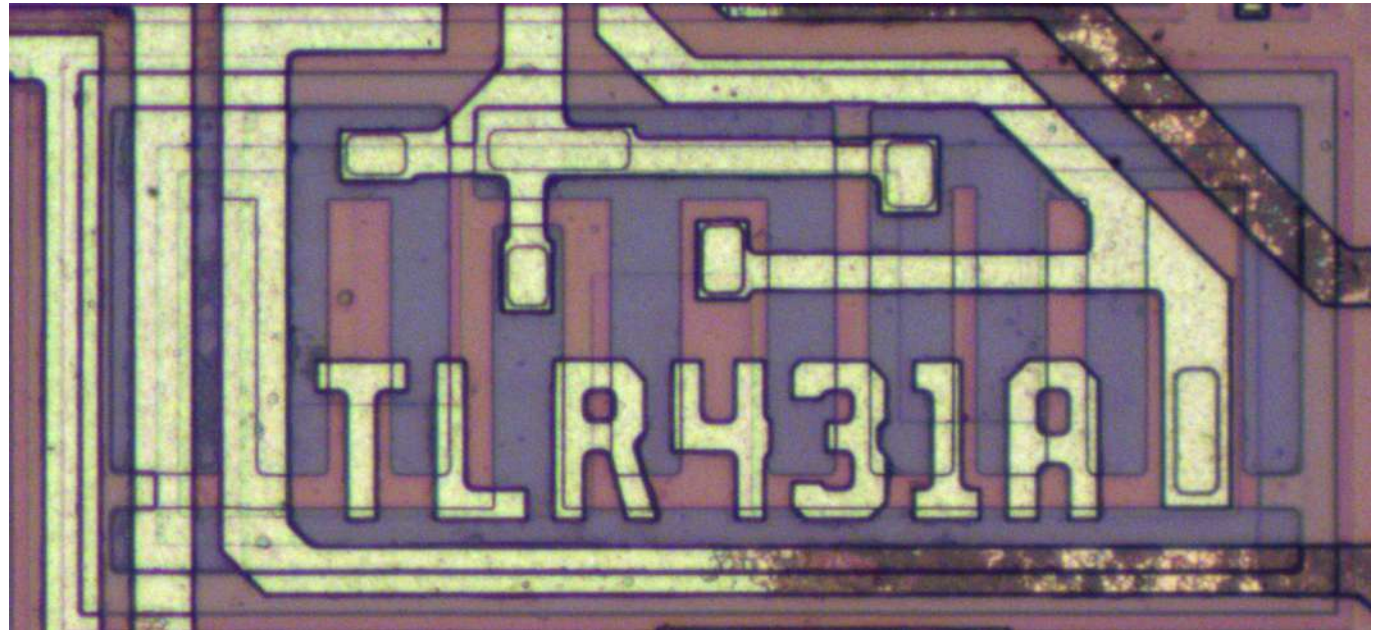
Три резистора — их формируют три длинных горизонтальных полосы кремния. Желтоватые металлические проводники проходят через них. Места соединения металлического слоя и резистора выглядят как квадраты. Расположение этих контактов и задаёт длину резистора и, соответственно, его сопротивление. К примеру, сопротивление нижнего резистора немного больше остальных потому, что контакты расположены на большем расстоянии. Верхние два резистора объединены в пару металлическим слоем сверху слева.

Резисторы в микросхемах имеют очень плохой допуск — сопротивление может различаться на 20% между микросхемами из-за вариаций в производственном процессе. Это серьезная проблема для точных микросхем. Поэтому их спроектируют таким образом, что важной характеристикой является не абсолютное сопротивление, а отношение сопротивлений (значения сопротивлений не сильно важны, если сопротивления меняются в одной пропорции). Вторым методом уменьшения зависимости от эффекта изменчивости является сама топология микросхемы. Резисторы располагаются на параллельных дорожках одинаковой ширины для снижения эффекта от любой асимметрии в сопротивлении кремния. Кроме того, они размещены рядом друг с другом для минимизации отклонений в свойствах кремния между разными частями микросхемы.



# Планарная технология

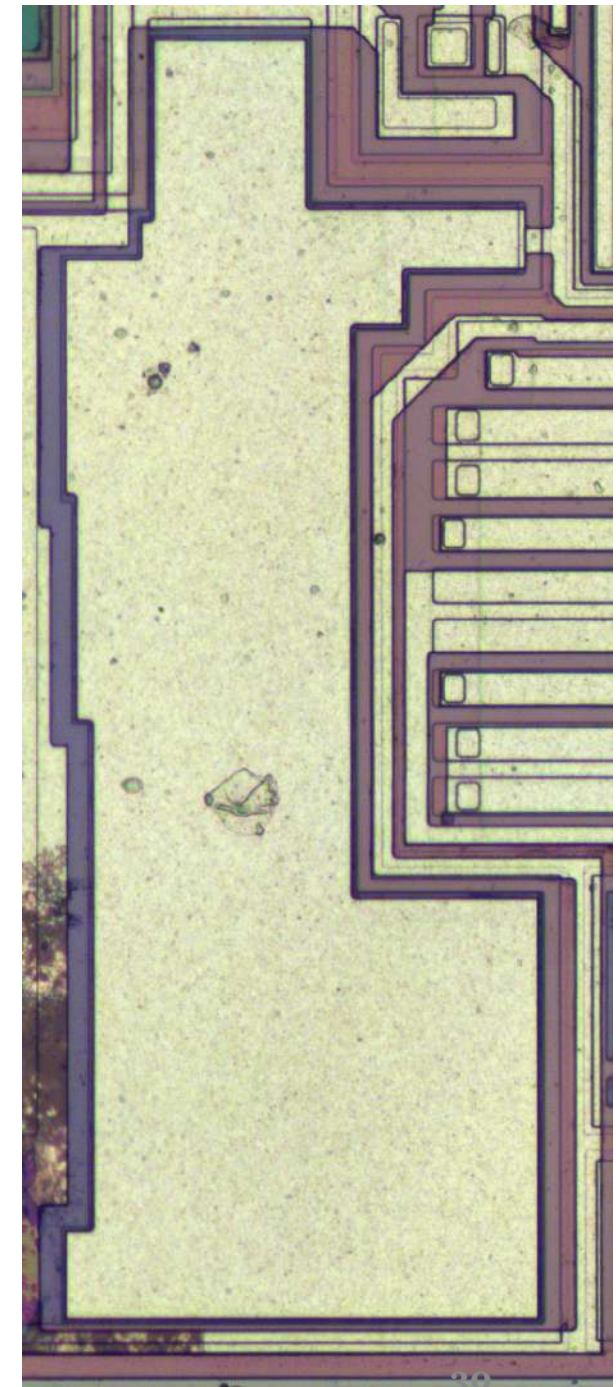
Конденсатор (под текстом «TLR431A») сформирован обратносмещённым диодом (красноватые и фиолетовые полосы). У инверсного слоя в диоде есть ёмкостное сопротивление, которое может быть использовано для формирования конденсатора. Главное ограничение такого типа конденсаторов в том, что ёмкостное сопротивление разнится в зависимости от напряжения, потому что меняется ширина инверсного слоя.





# Планарная технология

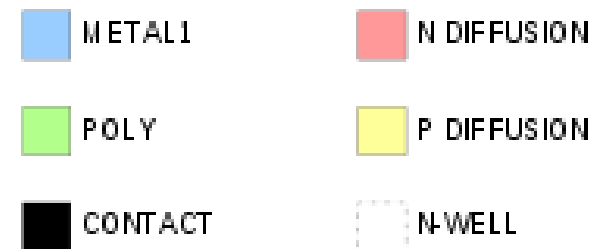
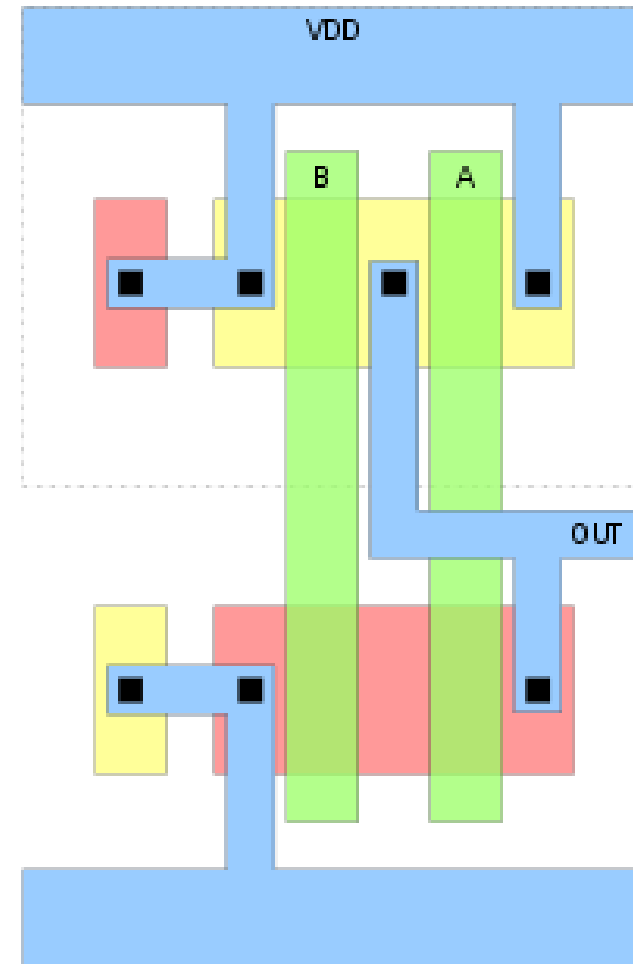
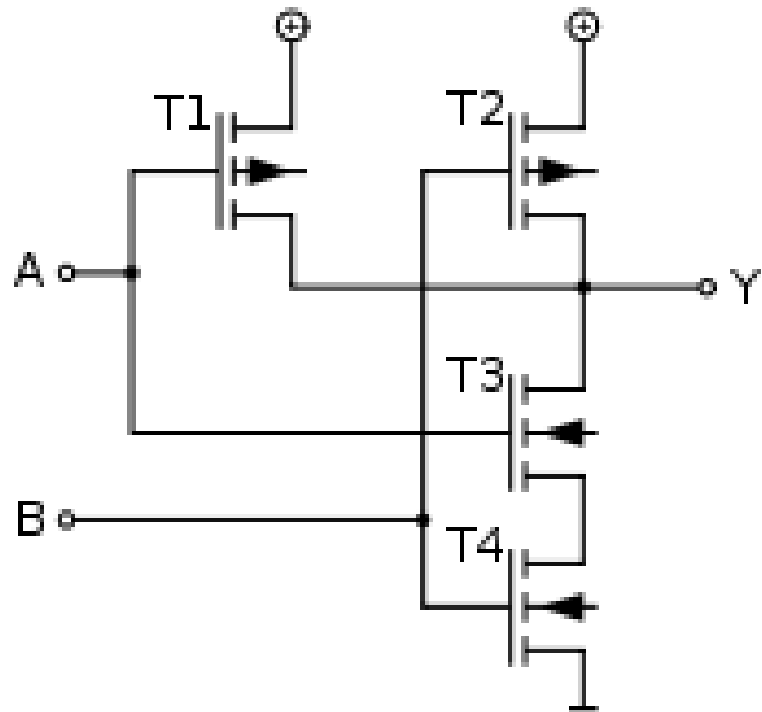
Конденсатор больше похож на обычный конденсатор с двумя пластинами. Он состоит из большой металлической пластины с подложкой из  $n^+$  кремния в качестве второй пластины. Для того чтобы уместиться рядом с другими частями цепи, он имеет неправильную форму.



# Планарная технология

## КМОП

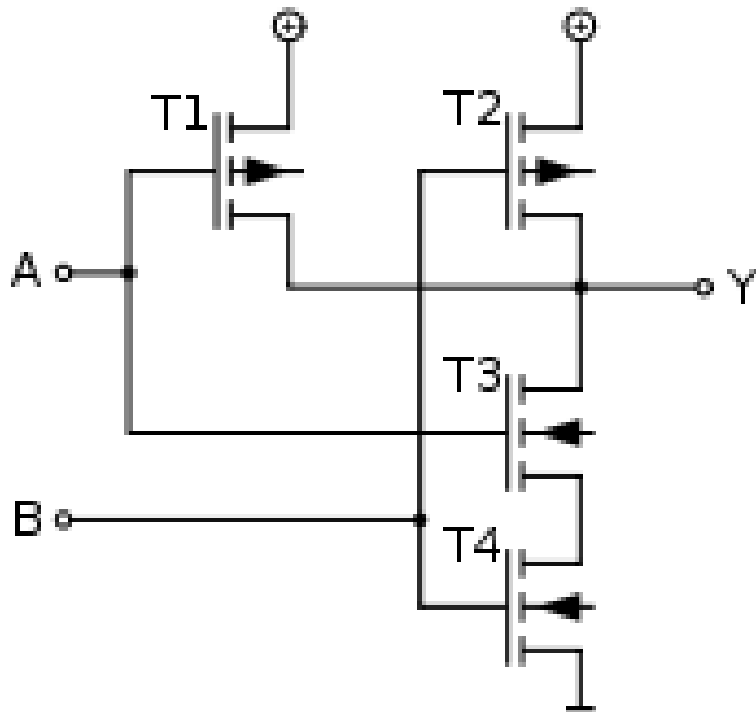
### Логический элемент 2И-НЕ



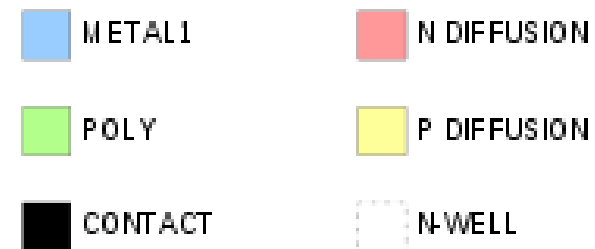
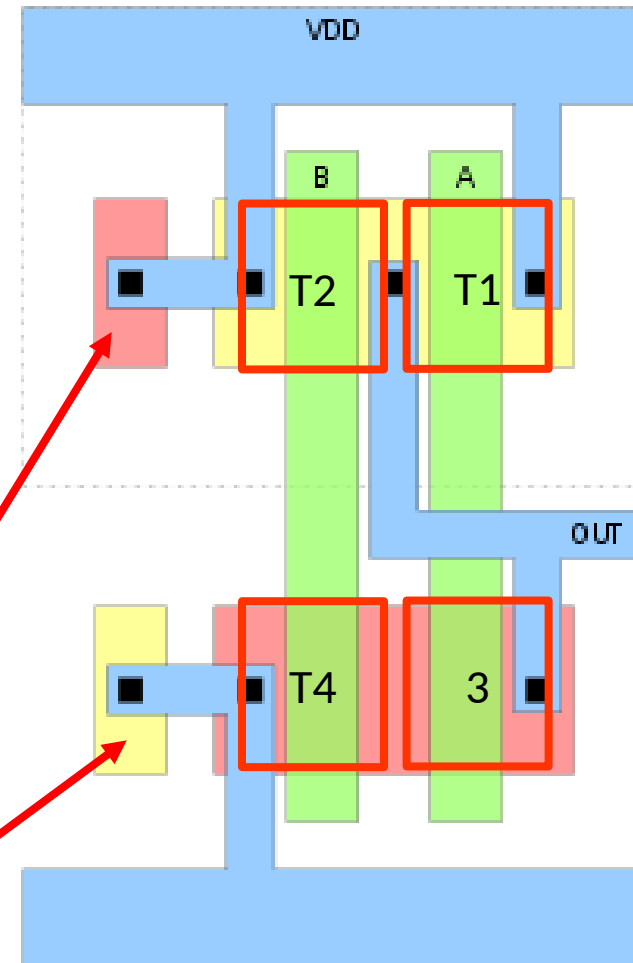
# Планарная технология

## КМОП

### Логический элемент 2И-НЕ

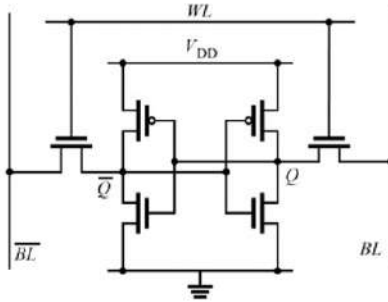


«Карманы» справа нужны для  
обратного смещения  $p$ - $n$   
переходов под транзисторами

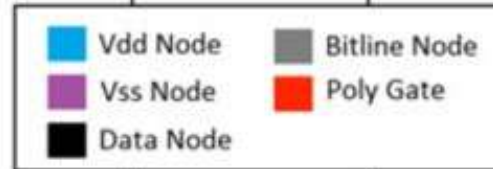


# Планарная технология

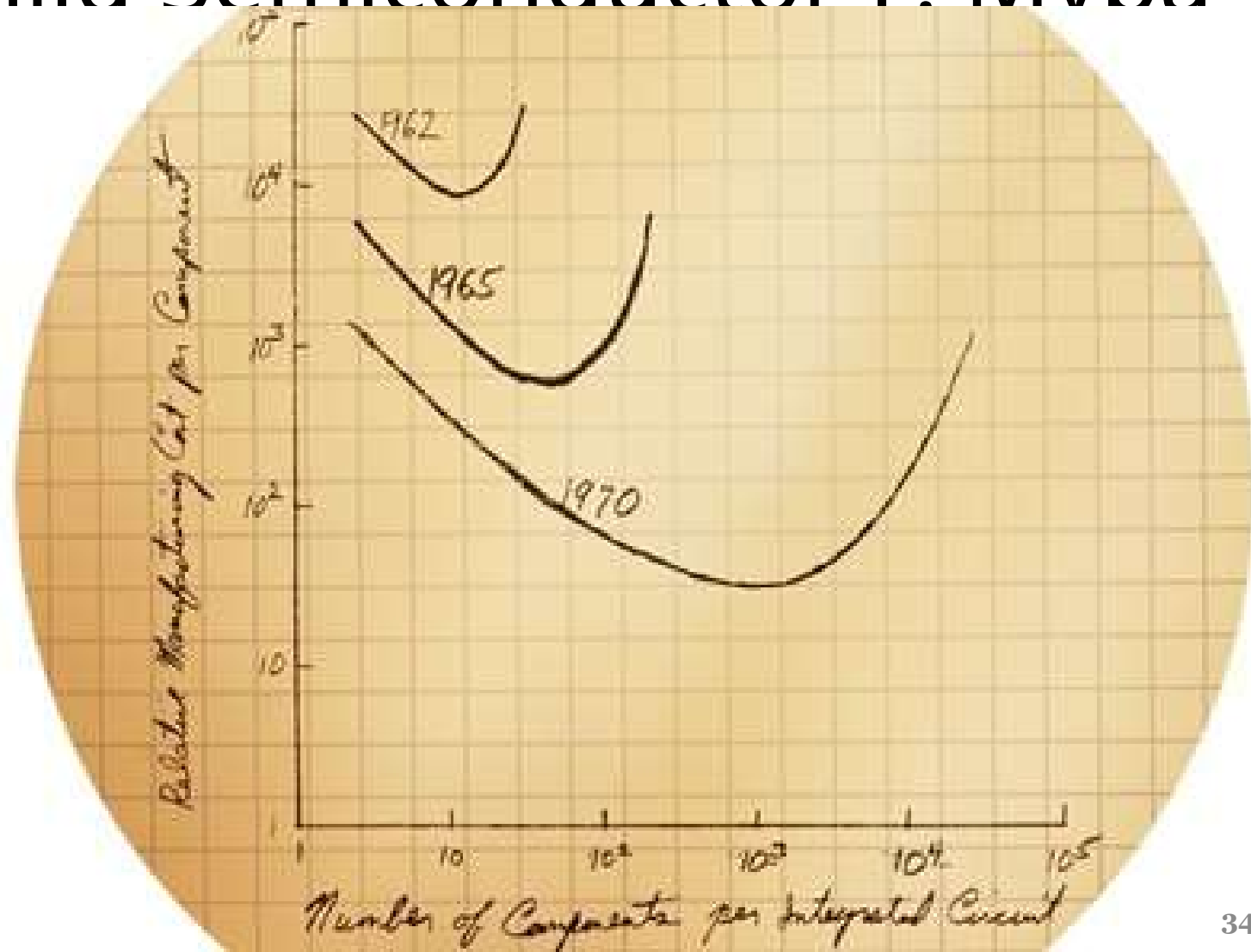
## SRAM



|                       | Category 1       | Category 2      | Category 3      | Category 4      | Category 5      |
|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Layouts of Inverters  |                  |                 |                 |                 |                 |
| Layouts of SRAM Cells | <br>Type-1a cell | <br>Type-2 cell | <br>Type-3 cell | <br>Type-4 cell | <br>Type-5 cell |



# 1965 г. Заметка в записной книжке директора по НИОКР Fairchild Semiconductor Г. Муна



# Cramming more components onto integrated circuits

Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965

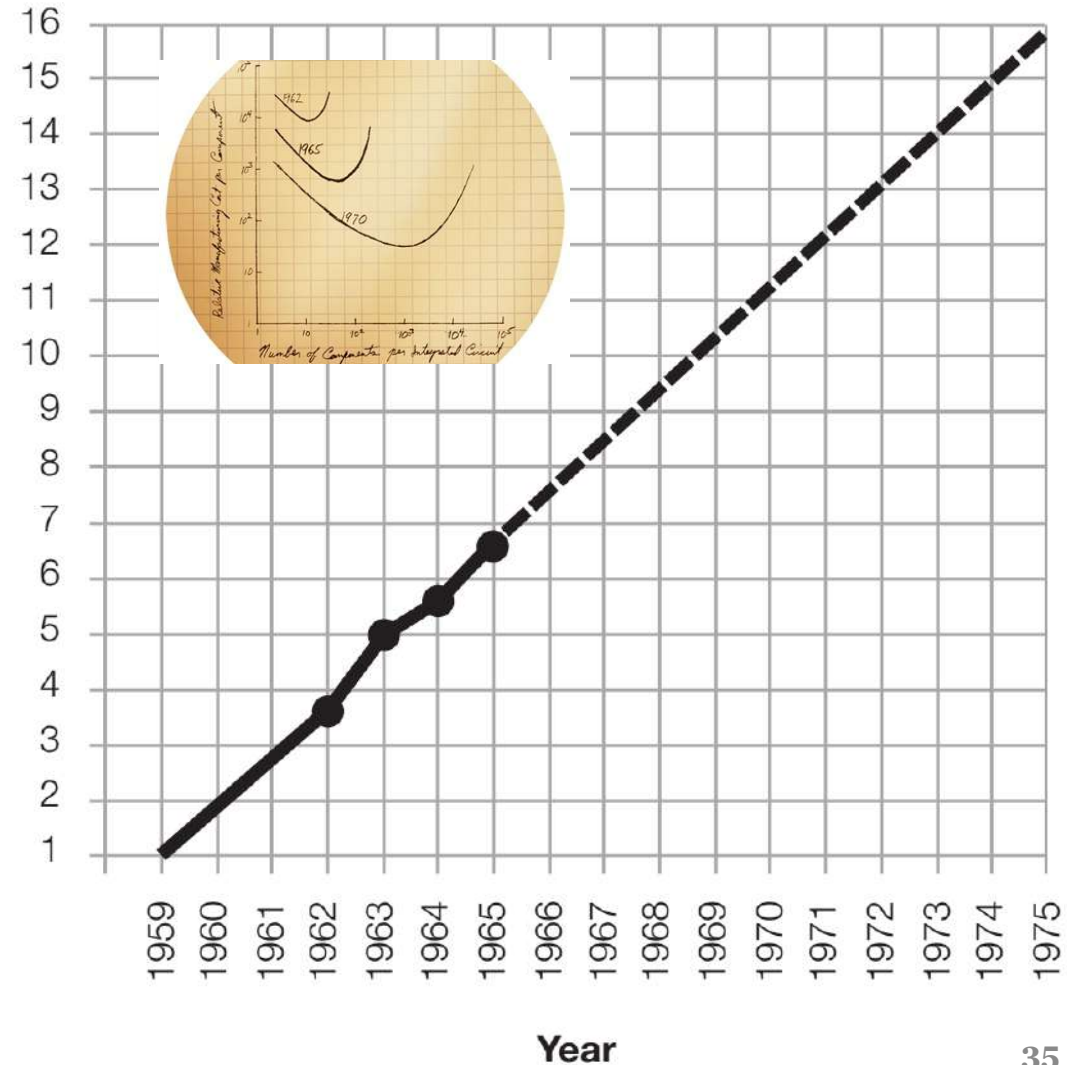
With unit cost falling as the number of components per circuit rises, by 1975 economics may dictate squeezing as many as 65,000 components on a single silicon chip

By Gordon E. Moore

Director, Research and Development Laboratories, Fairchild Semiconductor division of Fairchild Camera and Instrument Corp.

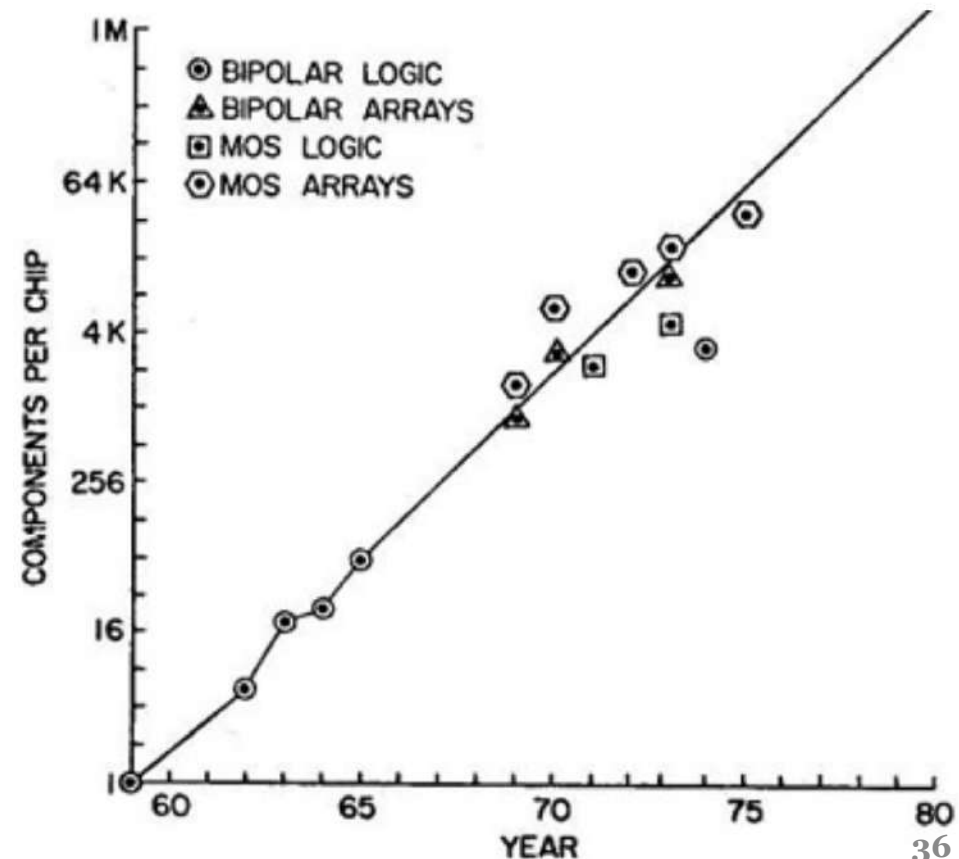
Dr. Gordon E. Moore is one of the new breed of electronic engineers, schooled in the physical sciences rather than in electronics. He earned a B.S. degree in chemistry from the University of California and a Ph.D. degree in physical chemistry from the California Institute of Technology. He was one of the founders of Fairchild Semiconductor and has been director of the research and development laboratories since 1959.

Log<sup>2</sup> of the Number of Components  
Per Integrated Function



# В 1975 году на ежегодной встрече Международной Организации Инженеров Электронщиков (IEEE)

Мур добавил к первоначальным отметкам новые (биполярные и полевые логика и память), убедившись, что рост числа компонентов сохраняется.



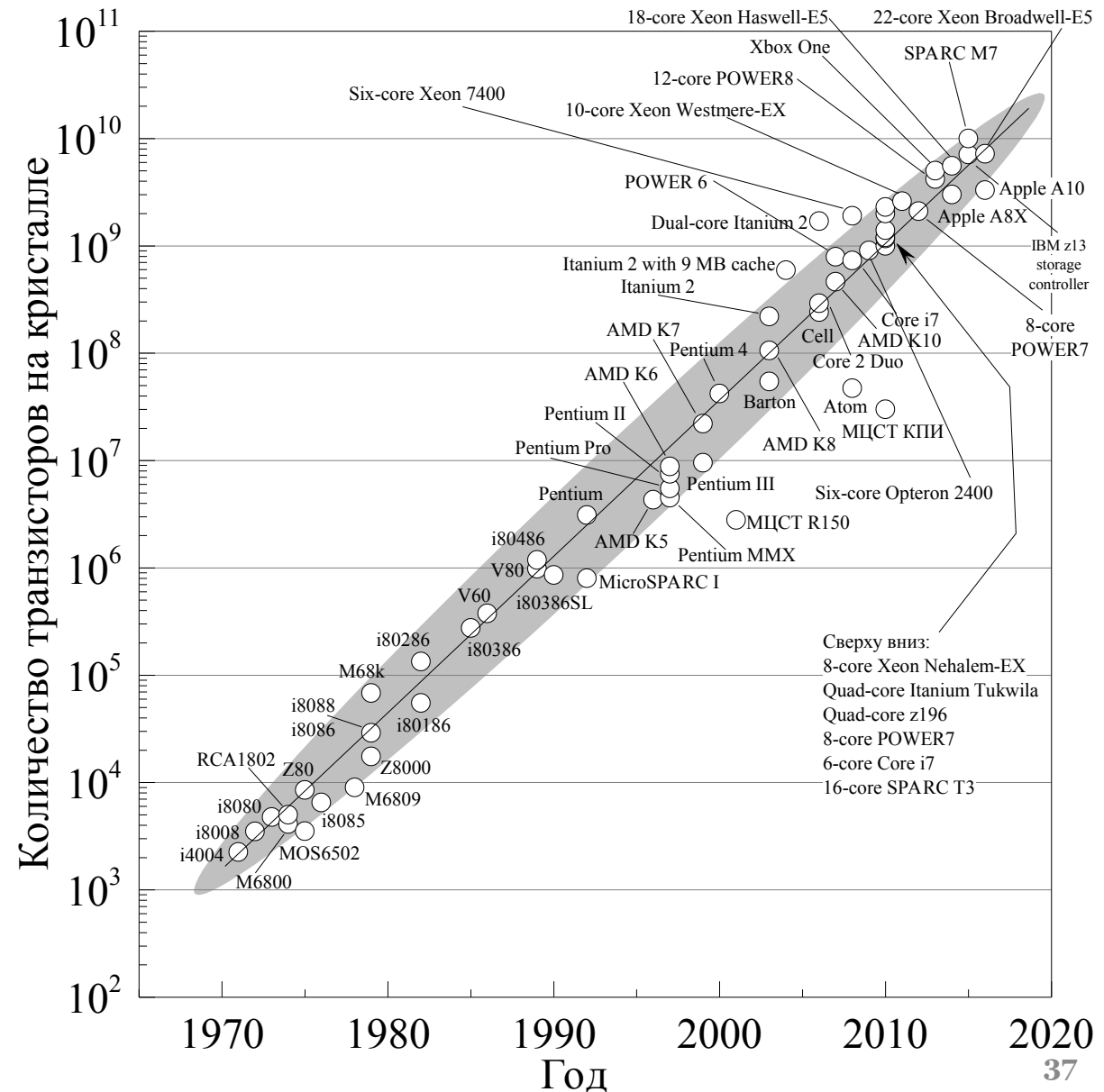


# Самоподдерживающееся предсказание

Сейчас Гордон Мур уже не наносит на свой график очередные достижения.

Это делают различные фирмы (и сама Intel).

Закон Мура: удвоение числа транзисторов на кристалле каждые 24 месяца.

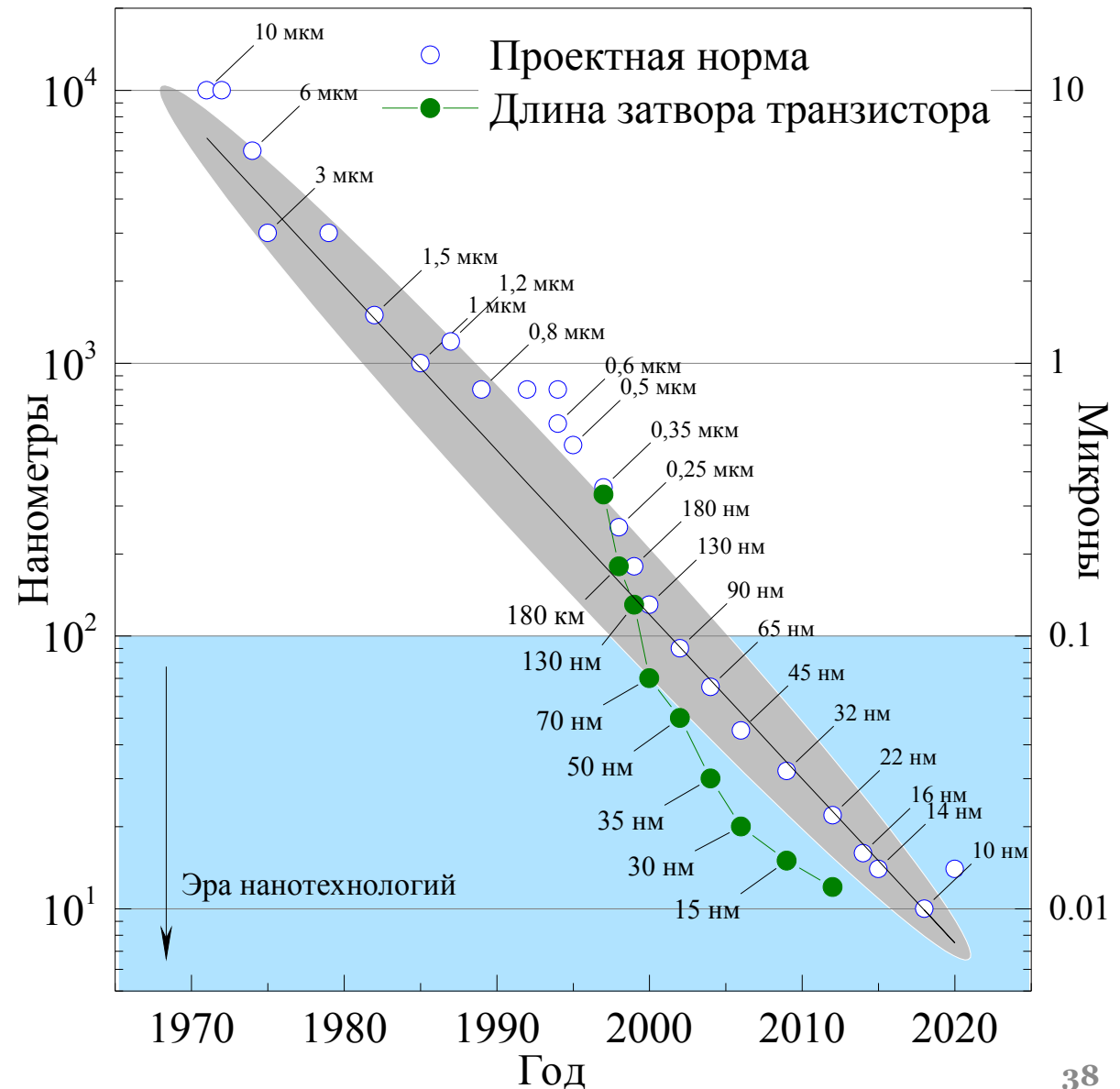


# Самоподдерживающееся предсказание

Сейчас Гордон Мур уже не наносит на свой график очередные достижения.

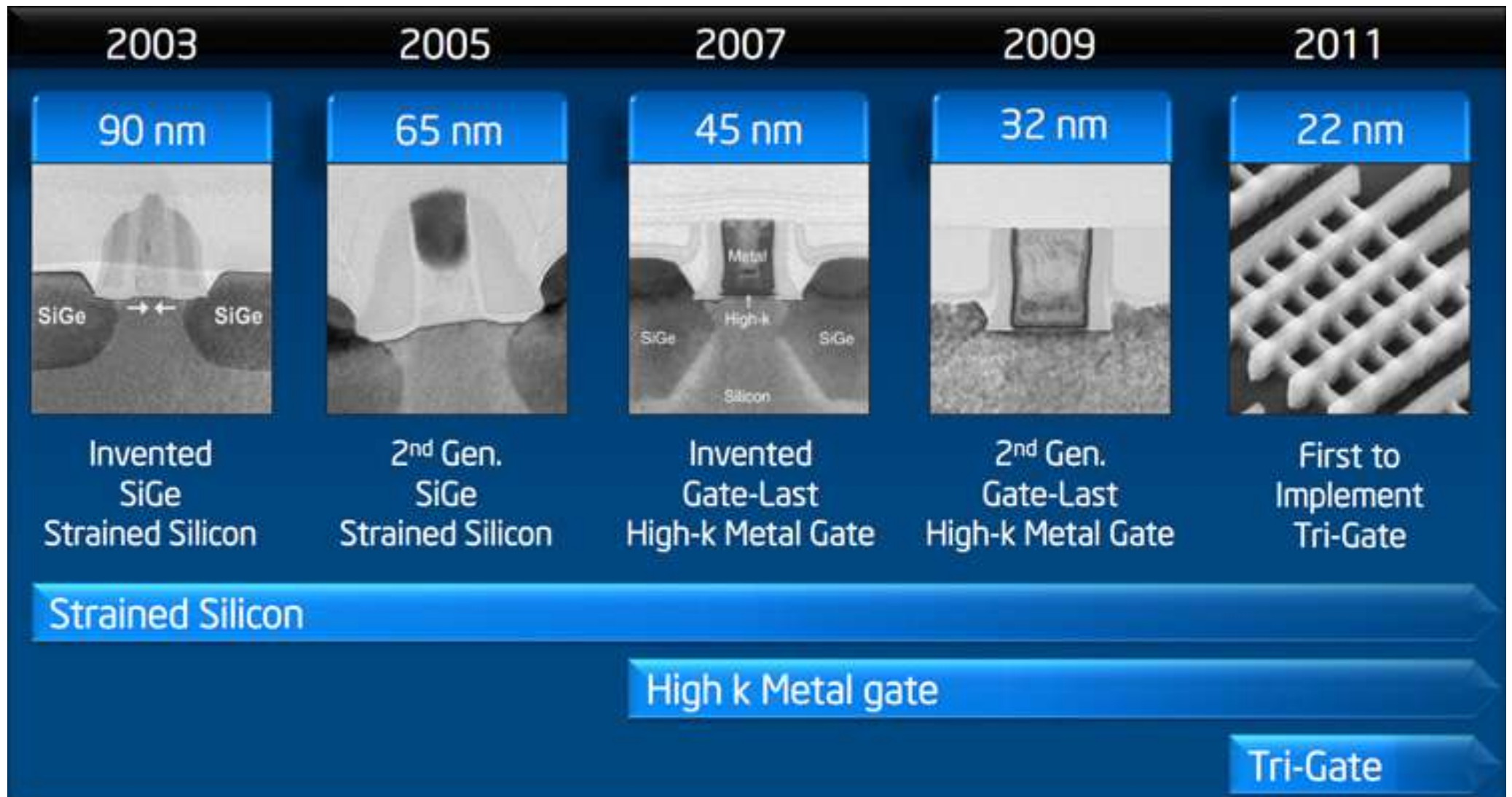
Это делают различные фирмы (и сама Intel).

Закон Мура: удвоение числа транзисторов на кристалле каждые 24 месяца.

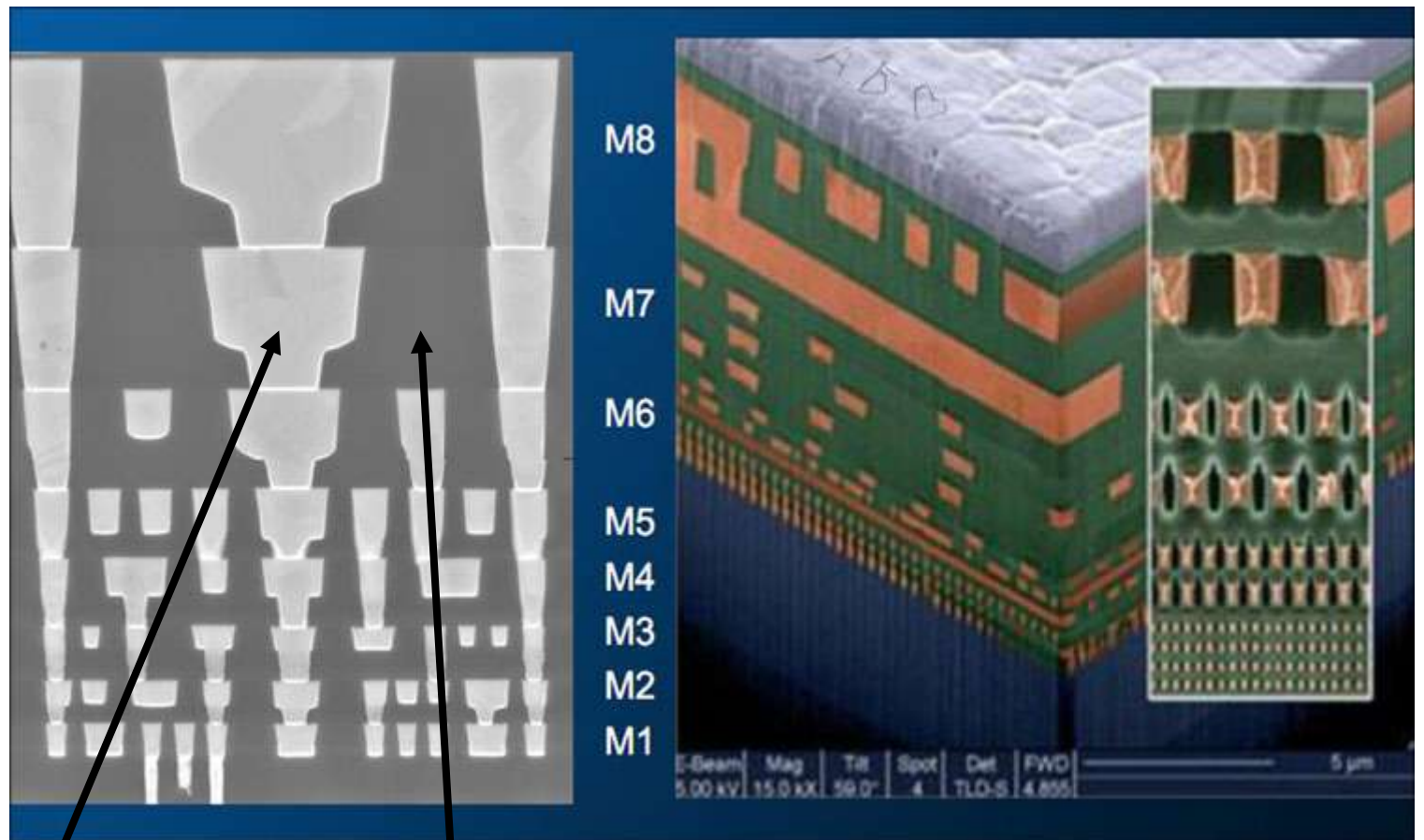
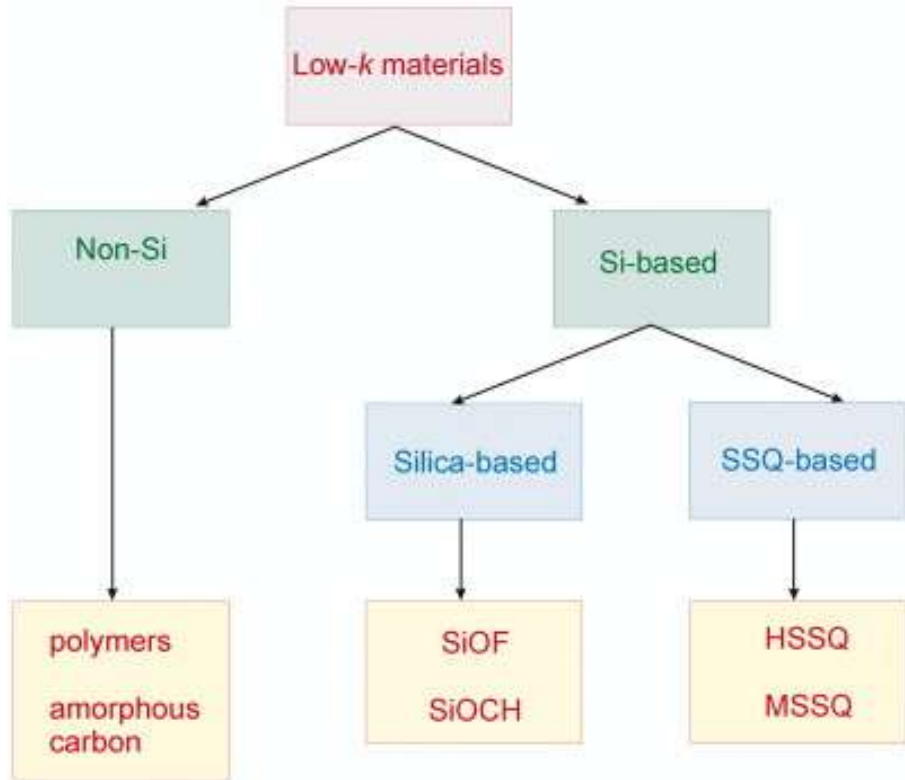


# SiGe

## Поиск новых материалов



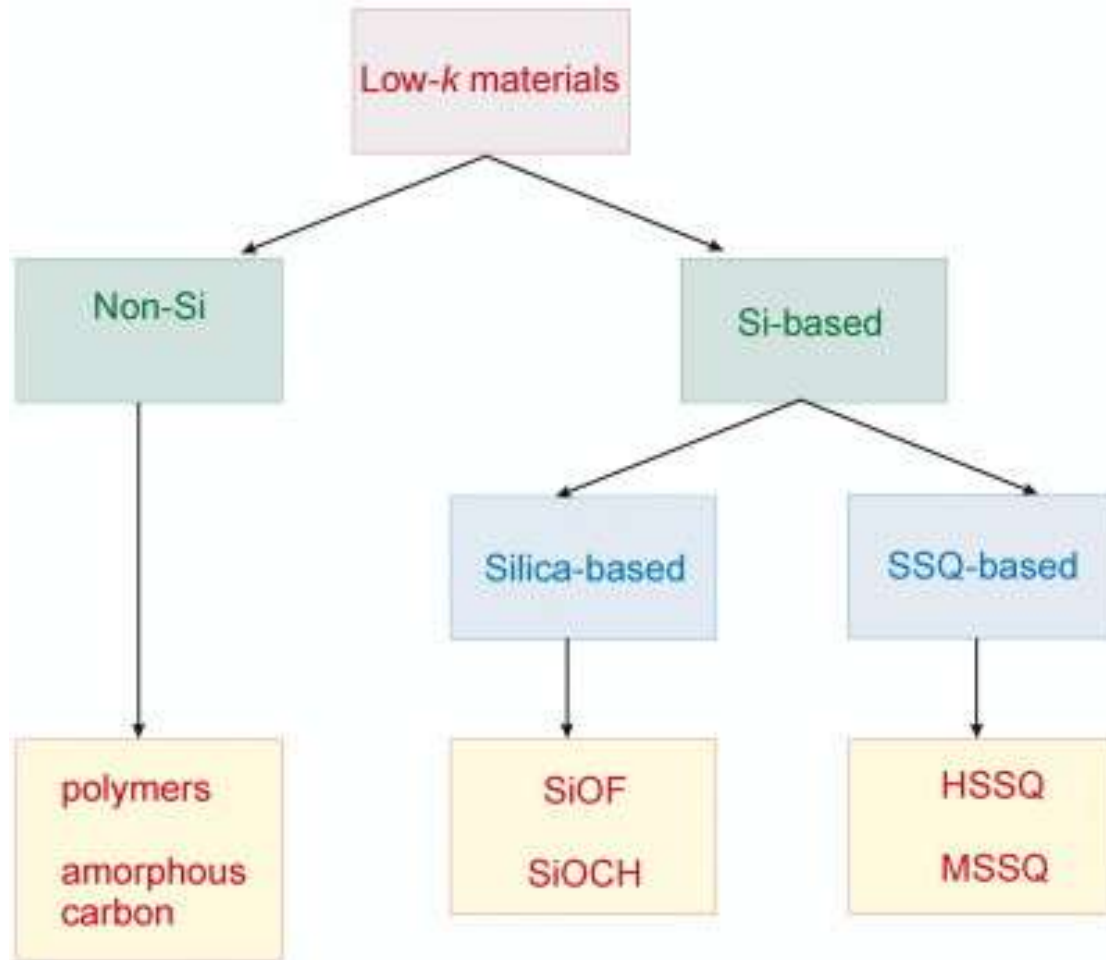
# 3D, Low-k



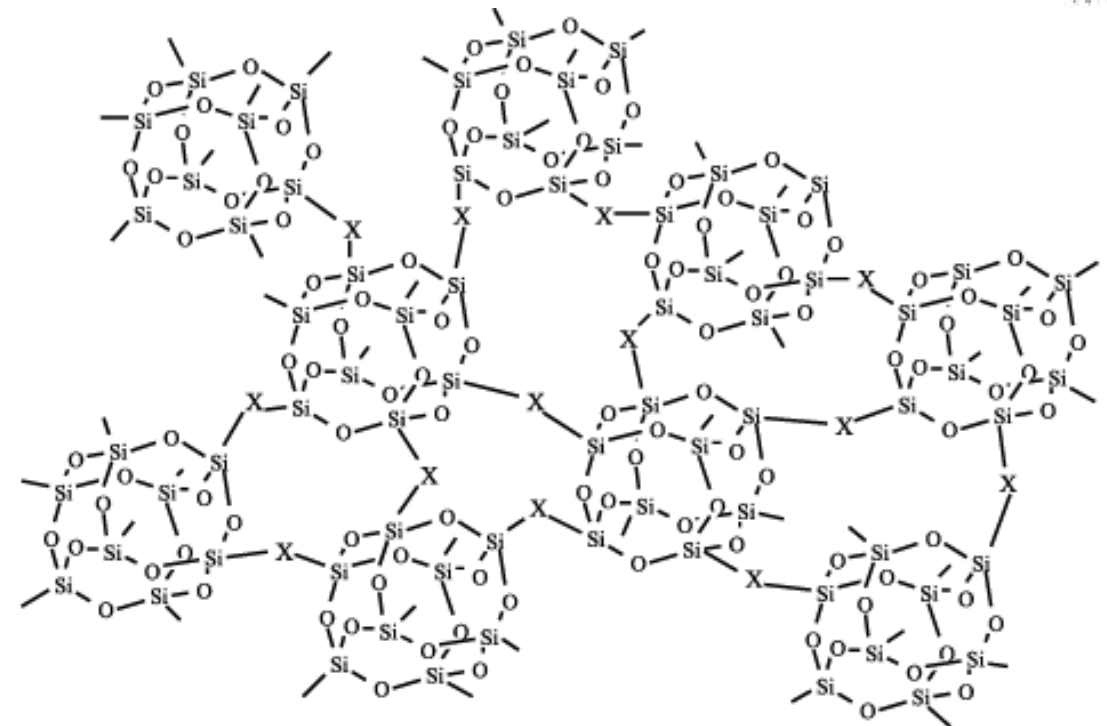
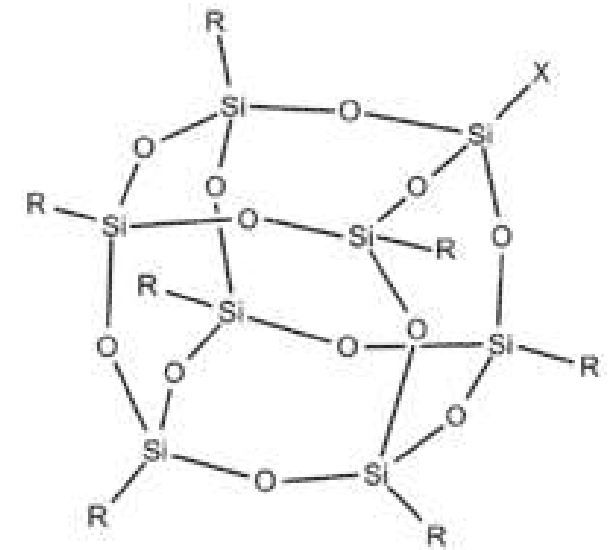
9 слоёв металлизации Cu

Изолятор: Low-k диэлектрик для уменьшения паразитной ёмкости.

# LOW-K



Кубический  
silsesquioxane  
(SSQ)

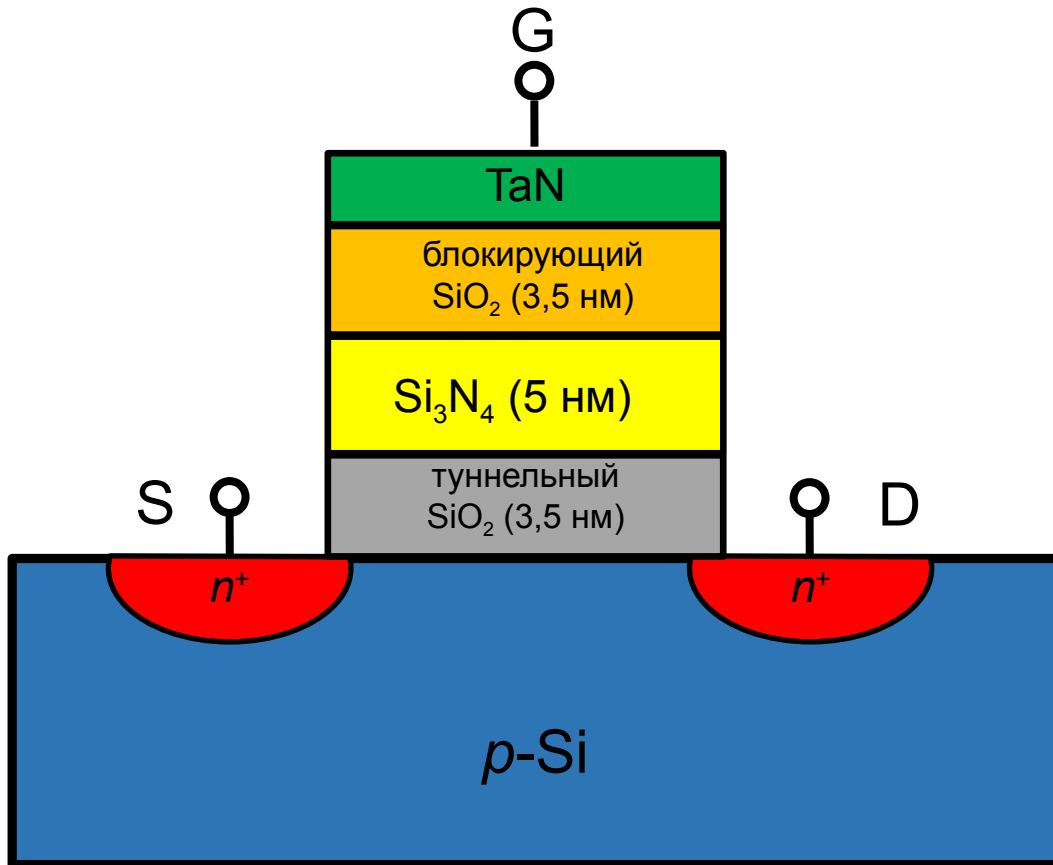


**Figure 4.** Scheme of a general representation of composites with discontinuous organic-organic phases from cubic silsesquioxane. X = links between cubes.

# High-κ диэлектрики

SiO<sub>2</sub>: κ=3,9

$$C = \varepsilon_0 S \frac{\kappa}{d}$$



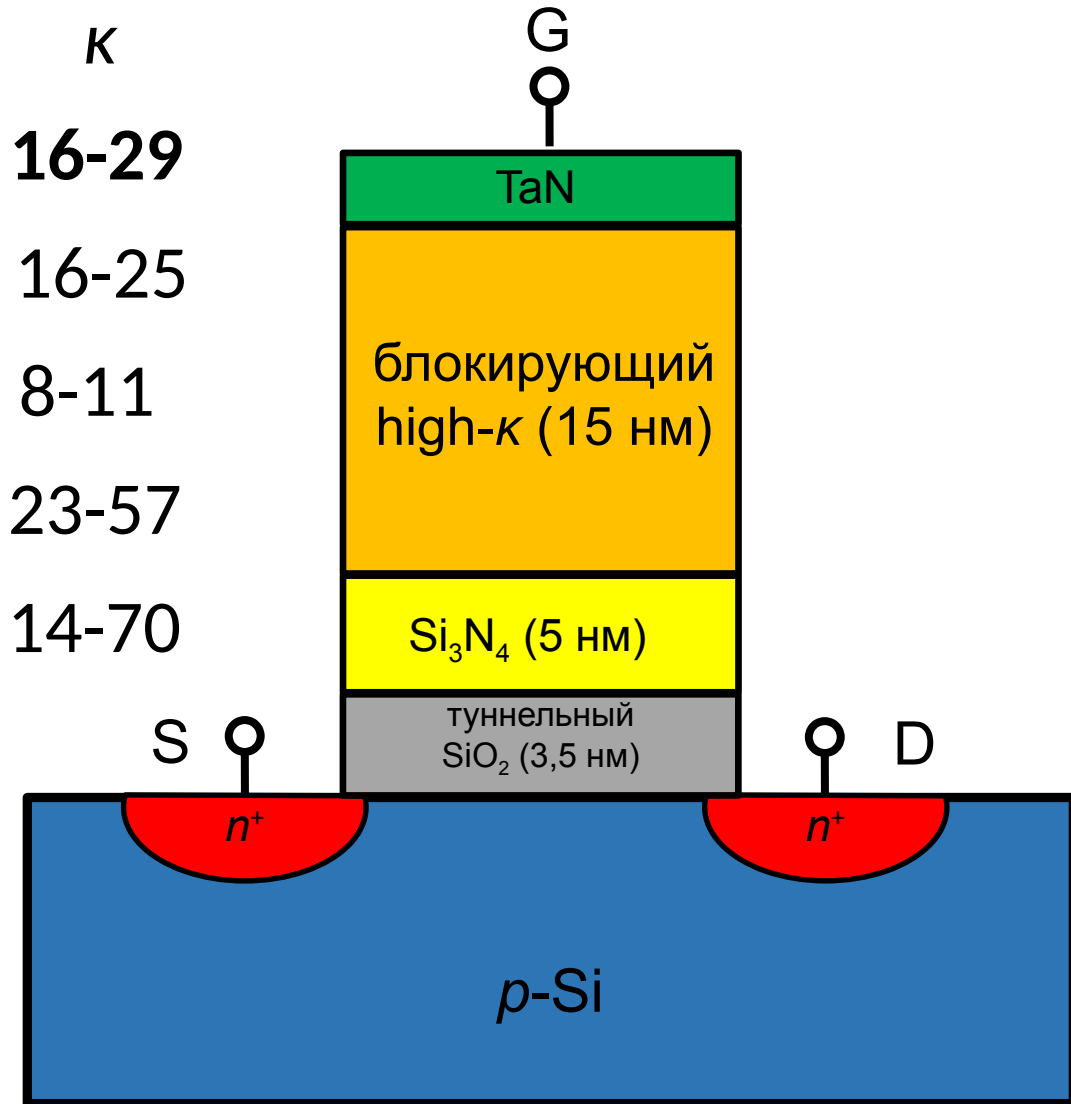
$\kappa$   
HfO<sub>2</sub>: 16-29

ZrO<sub>2</sub>: 16-25

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 8-11

Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 23-57

TiO<sub>2</sub>: 14-70







Применение:

- Титановые белила
- Пластические массы с термической стойкостью (оконные пластики)
- Бумага (цв. б., картон, обои)
- Оптиковолокно, огнеупорное покрытие сварочных стёкол
- Катализатор в фармацевтике
- ReRAM

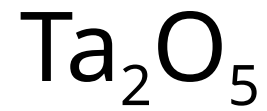


- Косметика (крема, мыло)

- Пищевая промышленность (отбеливание фарша и мяса птицы, сахара-рафинада и др.)

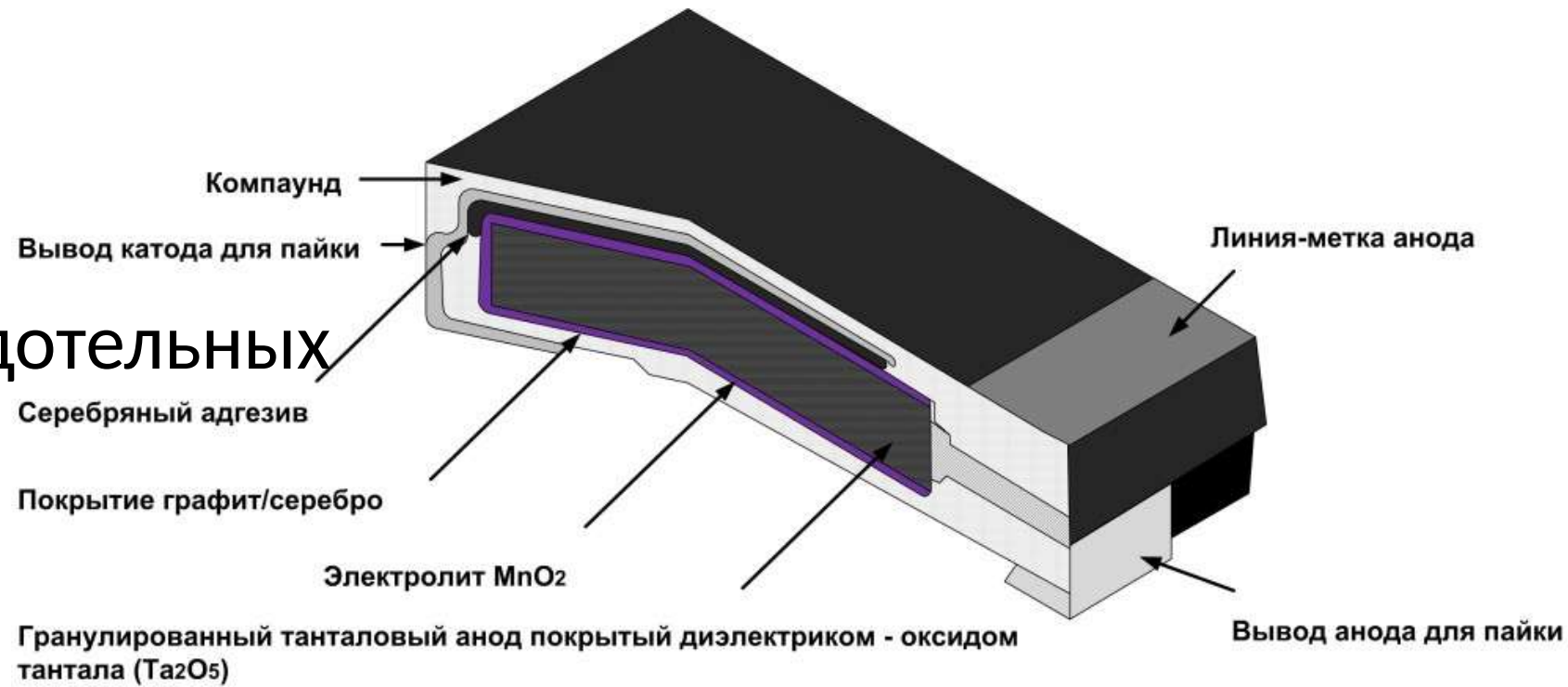




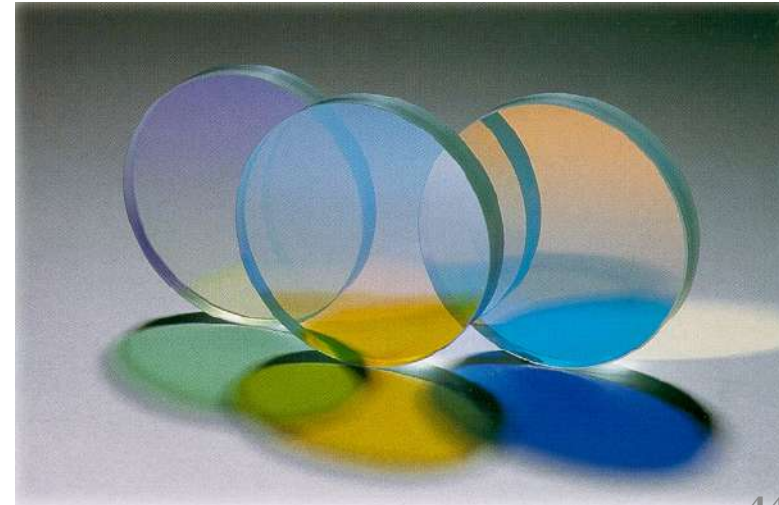


Применение:

- Диэлектрик в твердотельных электролитических конденсаторах



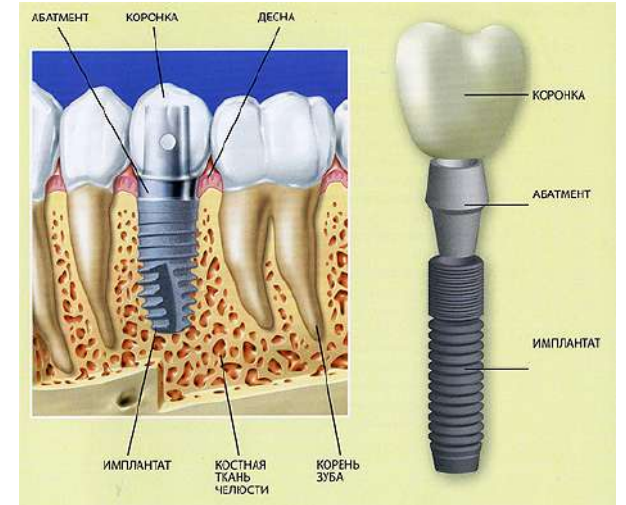
- Интерференционные светофильтры
- RRAM





## Применение:

- Стоматология (керамика для зубных коронок)
- Ювелирная промышленность (фианиты)
- Сверхтвёрдые материалы
- Высокоогнеупорные изделия, жаростойкие эмали, тугоплавкие стёкла
- RRAM





- 2006-2007: 45 nm/40 nm

Вместо  $\text{SiO}_2$ /poly-Si

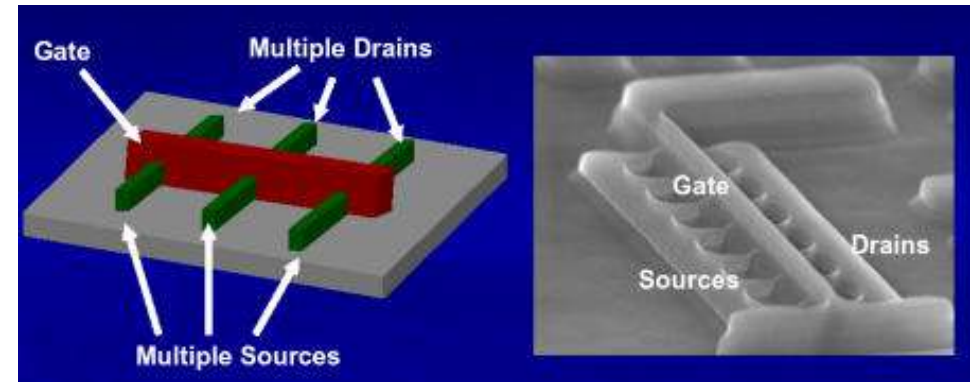
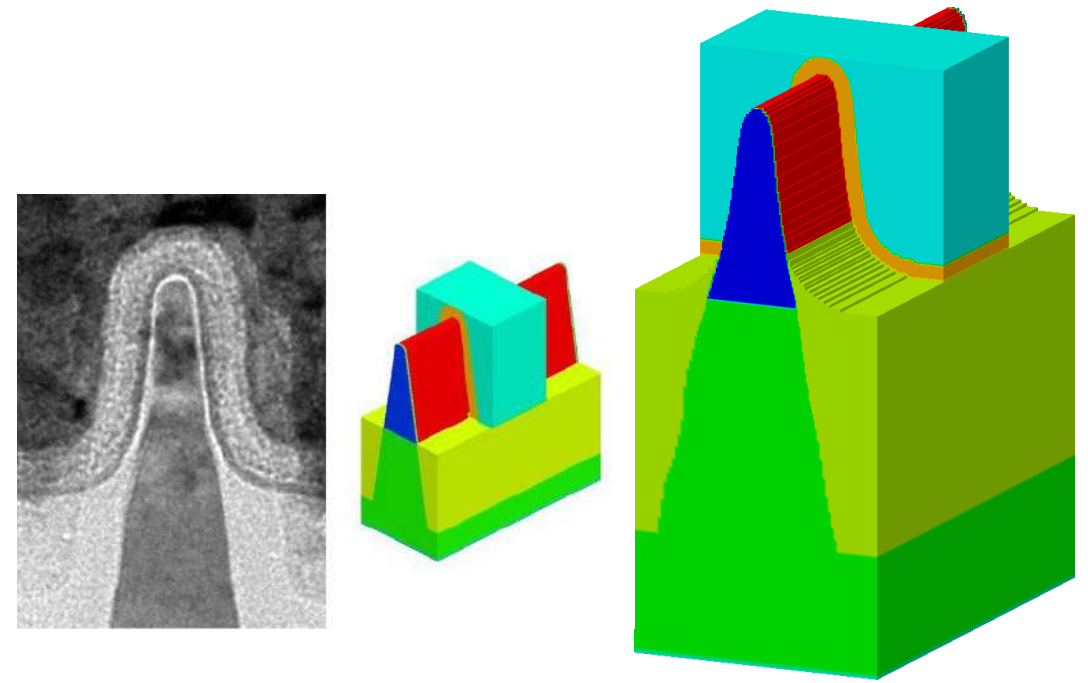
HfSiON/TaN (high-k/metal gate)

- 2009-2012: 22 nm/20 nm

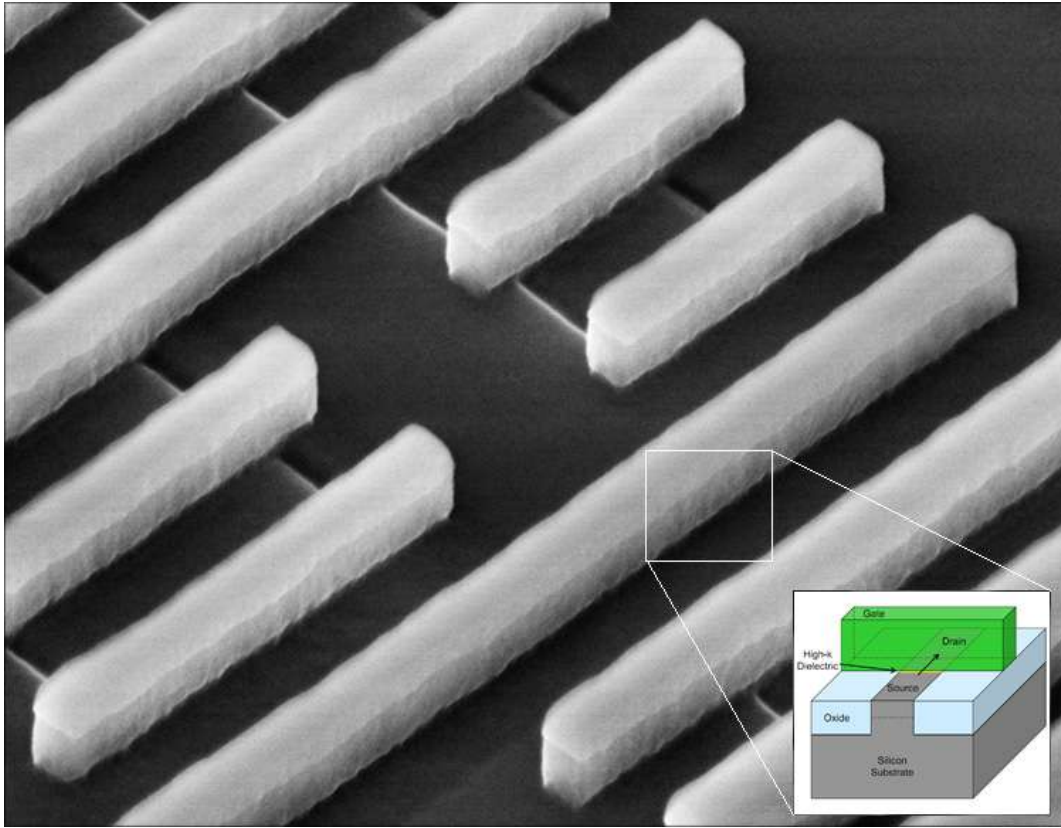
FinFET:

HfSiON/Hf (high- $\kappa$ /metal gate)

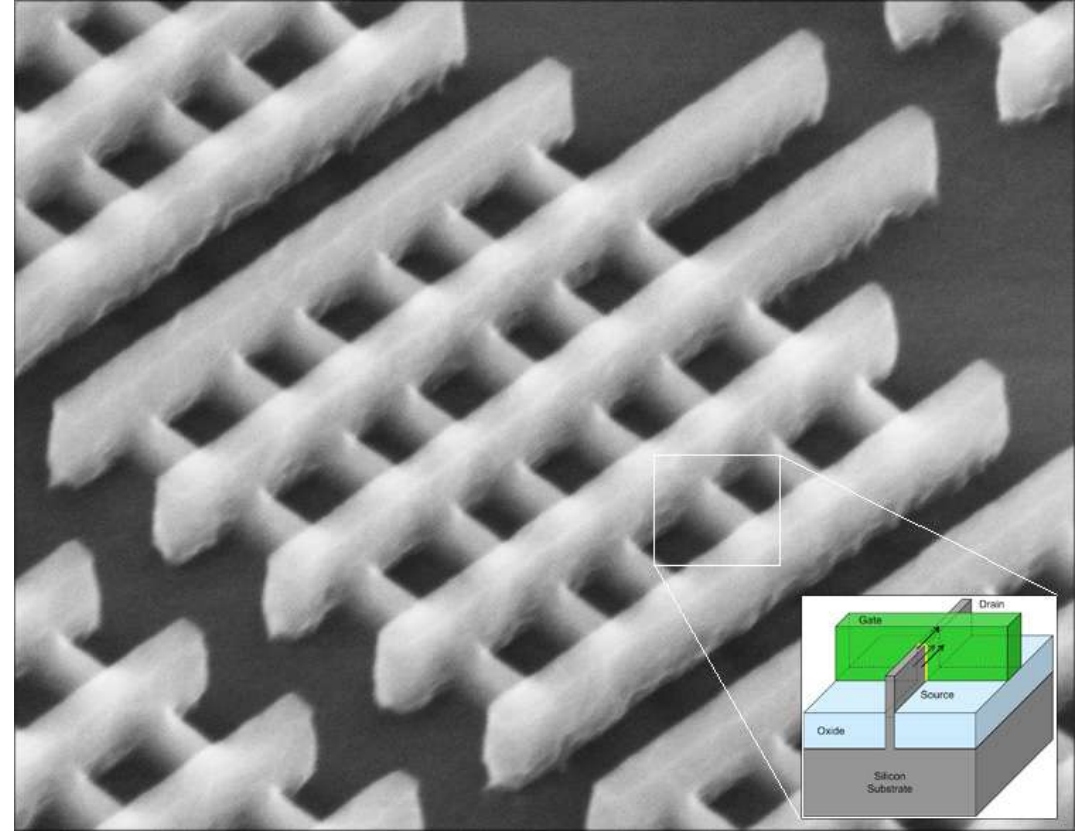
Intel, IBM, AMD, Toshiba, TSMC, Samsung



# FinFET



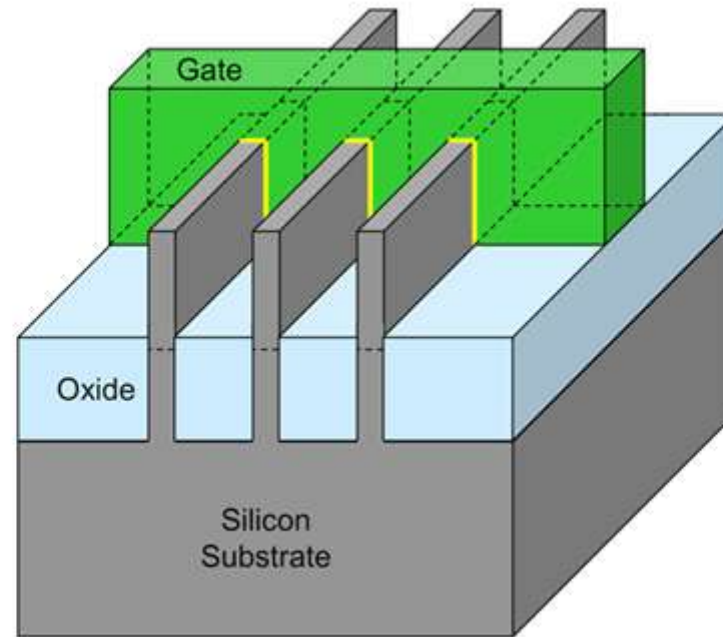
Транзистор, 32-нм



Транзистор Tri-Gate, 22-нм

# FinFET

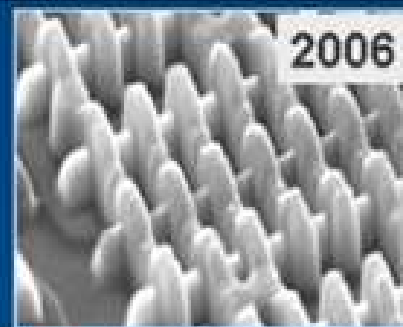
Переход от планара к  
3D



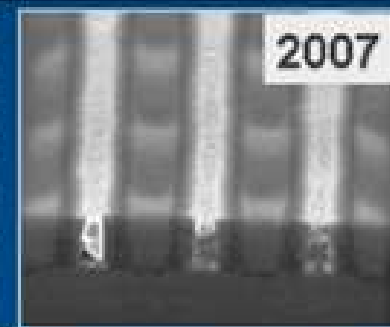
Single-fin  
transistor  
demonstrated



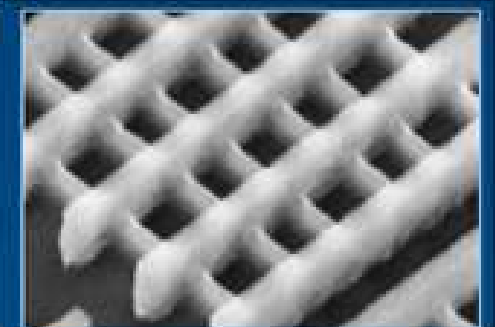
Multi-fin  
transistor  
demonstrated



Tri-gate  
SRAM cells  
demonstrated



Tri-gate RMG  
process flow  
developed



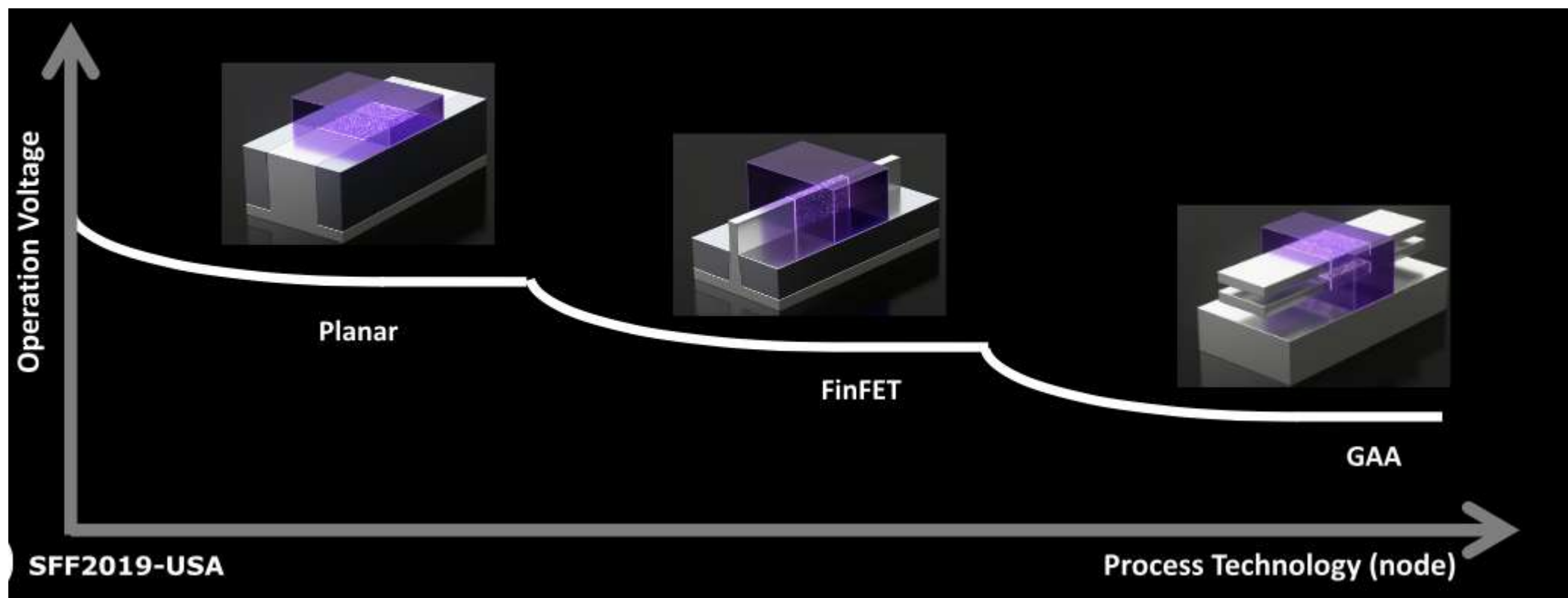
Tri-gate optimized  
for HVM



# От 7 нм до 3 нм: поиск новых форм

Пример: нанослойные FET относятся к архитектуре транзисторов с круговым затвором (gate-all-around, GAA). И это не единственный из возможных вариантов.

<https://habr.com/ru/post/461875/>

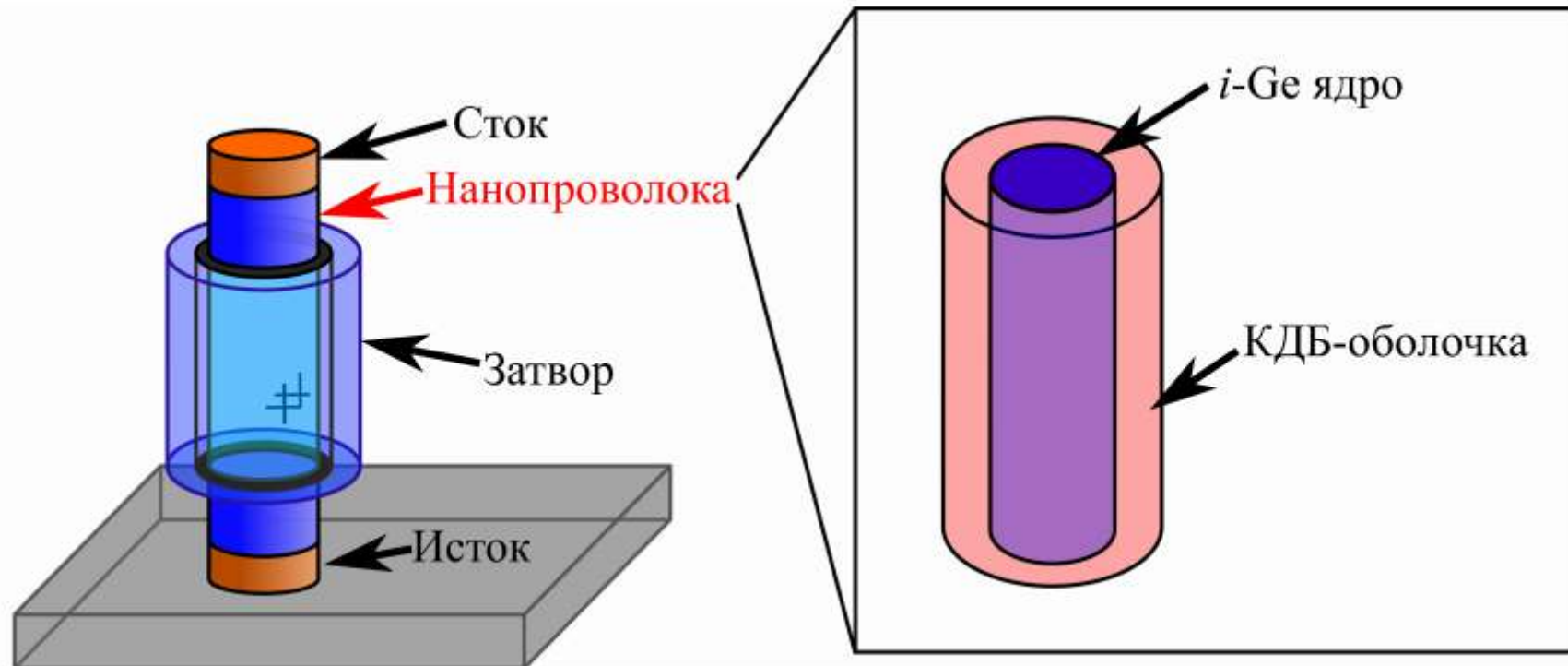




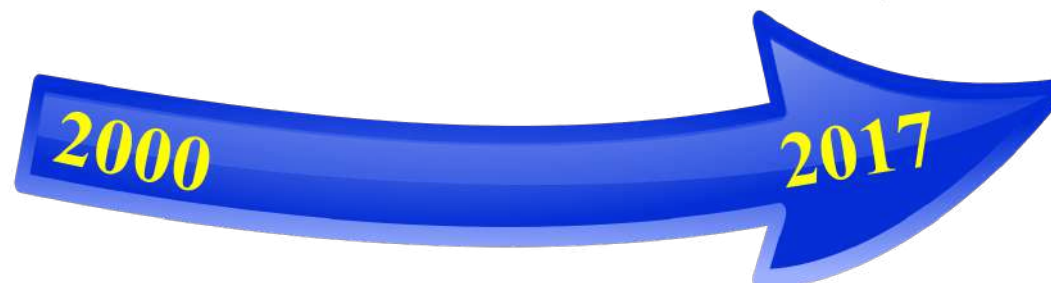
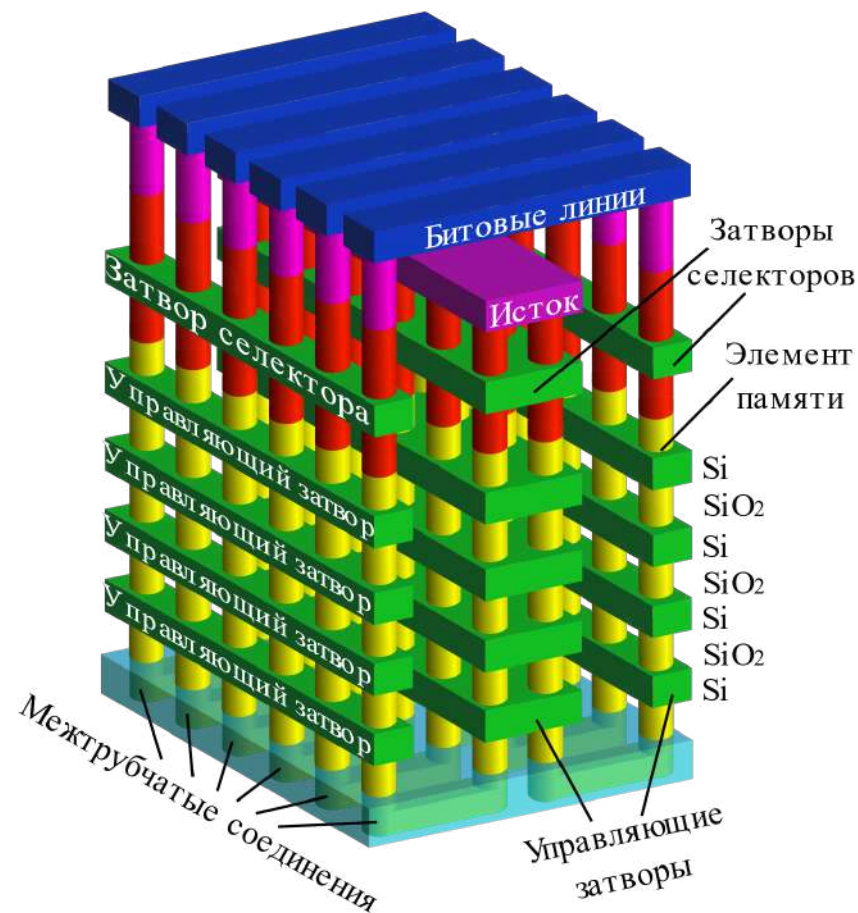
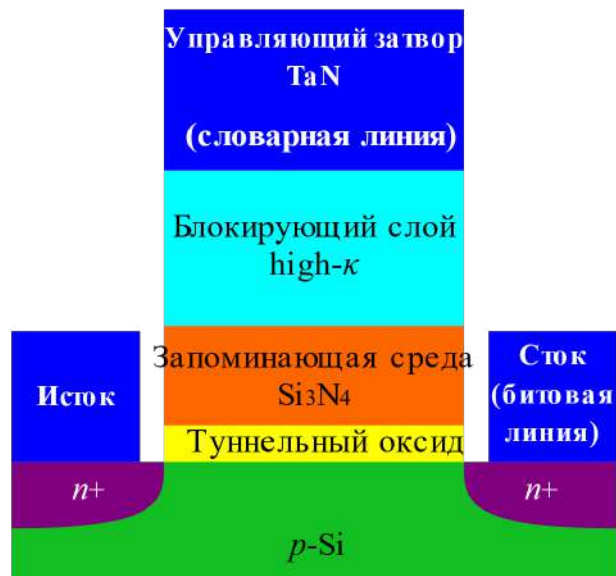
# От 7 нм до 3 нм: поиск новых форм

Пример: нанопроволочный транзистор: в качестве канала выступает нанопроволочка диаметром несколько нанометров, подзатворный диэлектрик и затвор цилиндрической формы.

<https://www.sciencedaily.com/releases/2016/01/160113145501.htm>

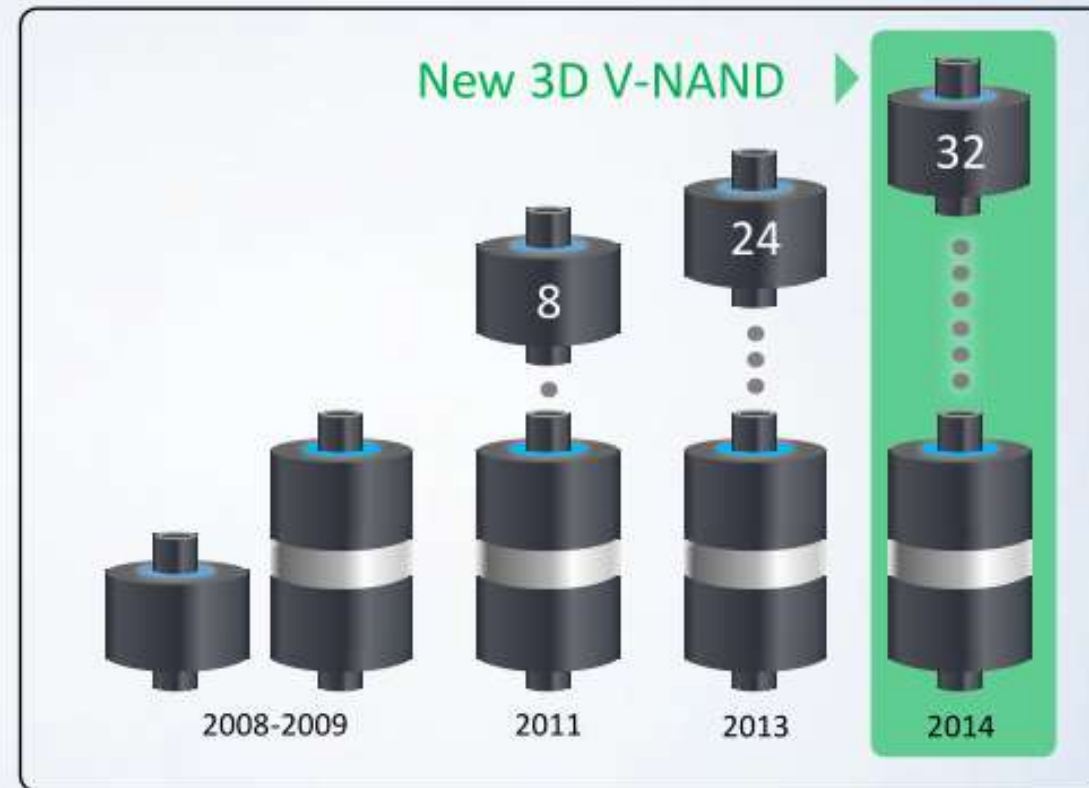


# От планара к 3D архитектуре



# 3D VNAND (Samsung)

## Integration Innovation

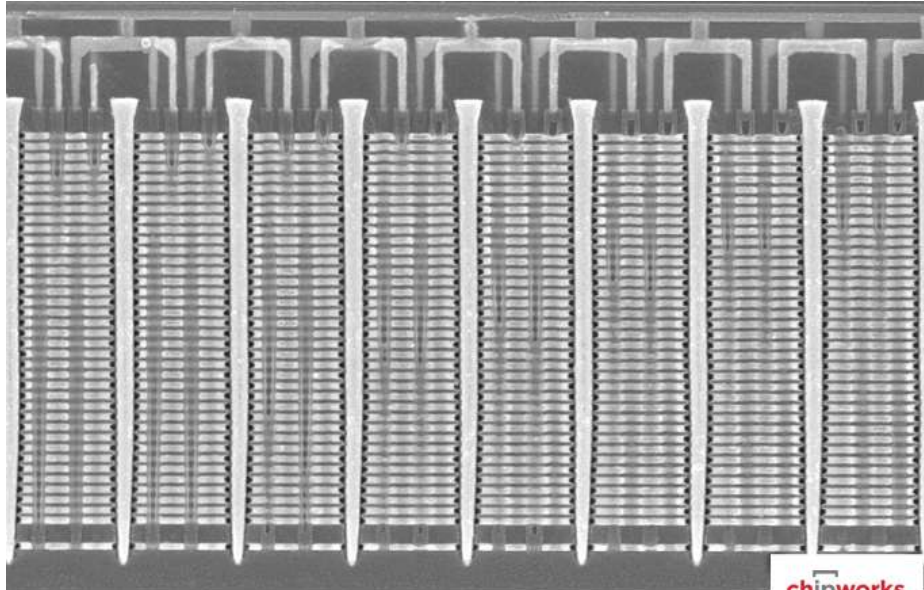


Scaling Continues

SAMSUNG

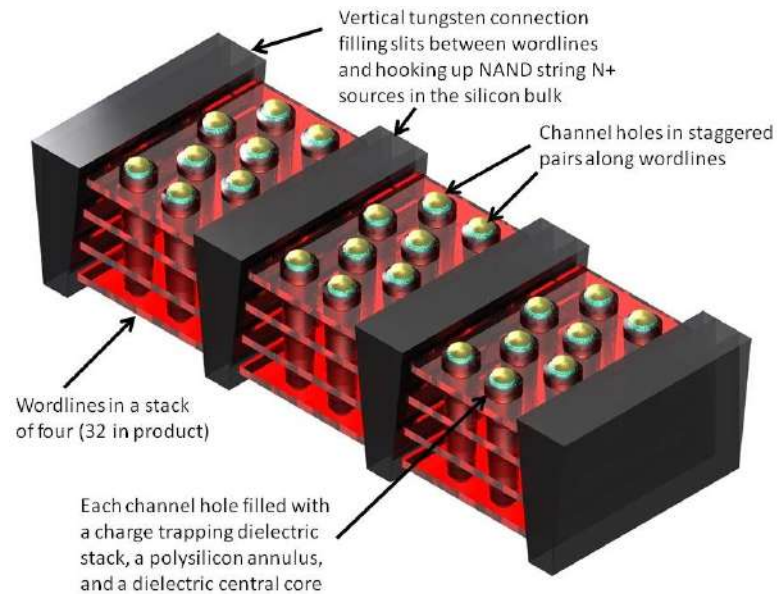


# 3D VNAND (Samsung)



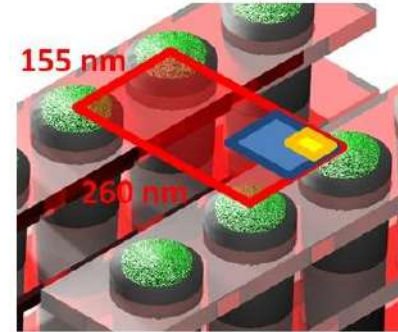
Close-up image of V-NAND flash array

chipworks

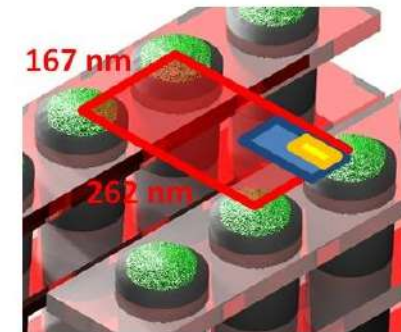


2D 40 nm

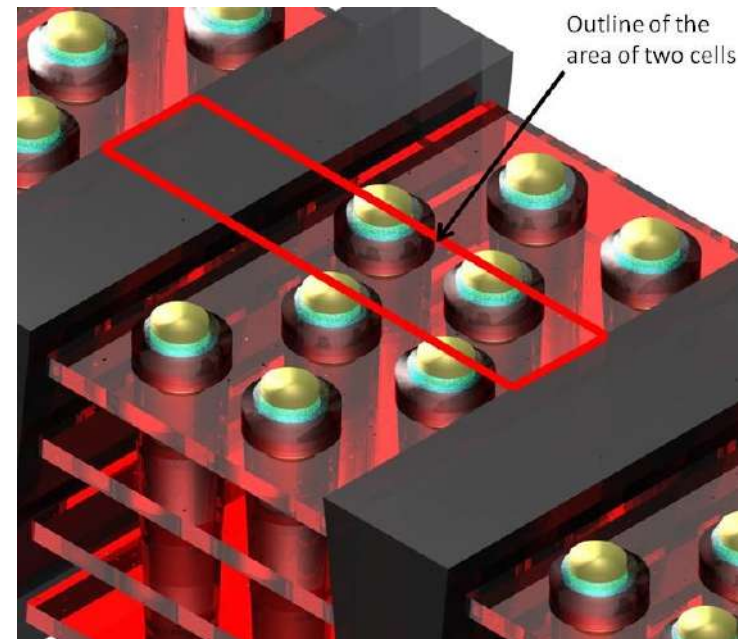
2D 16 nm



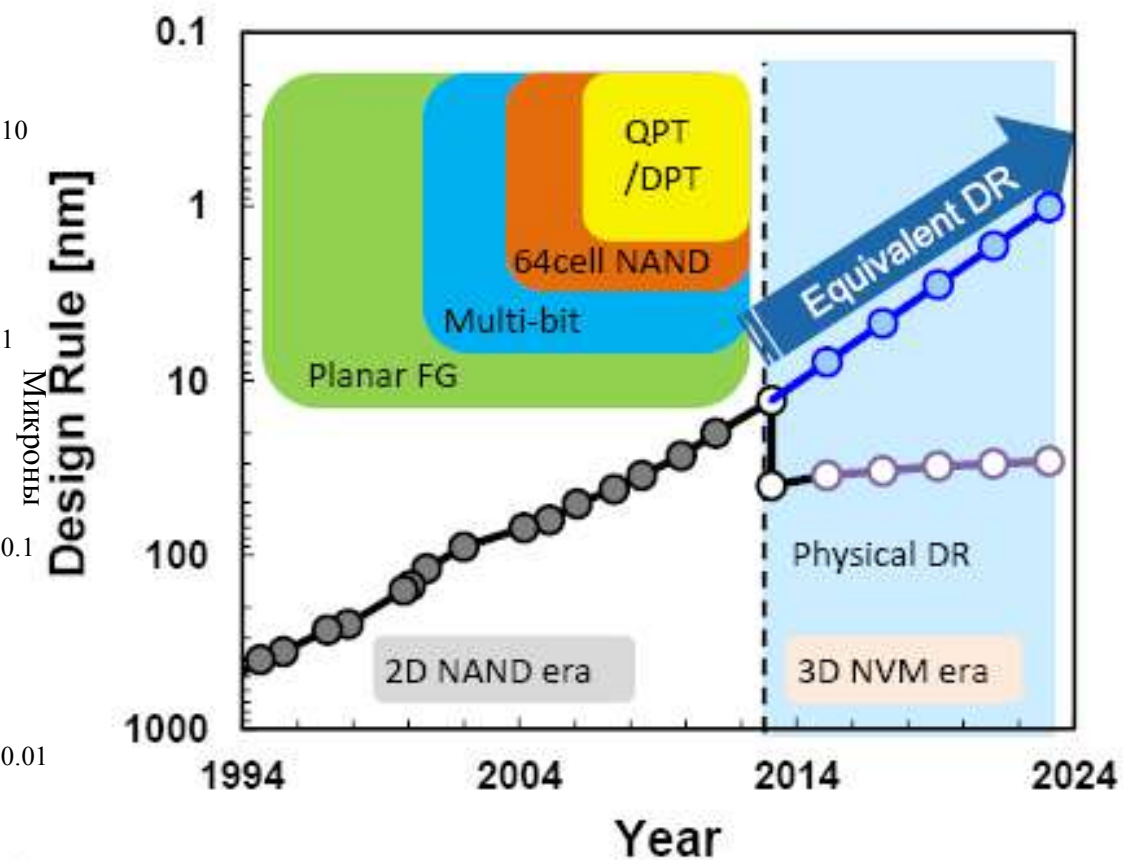
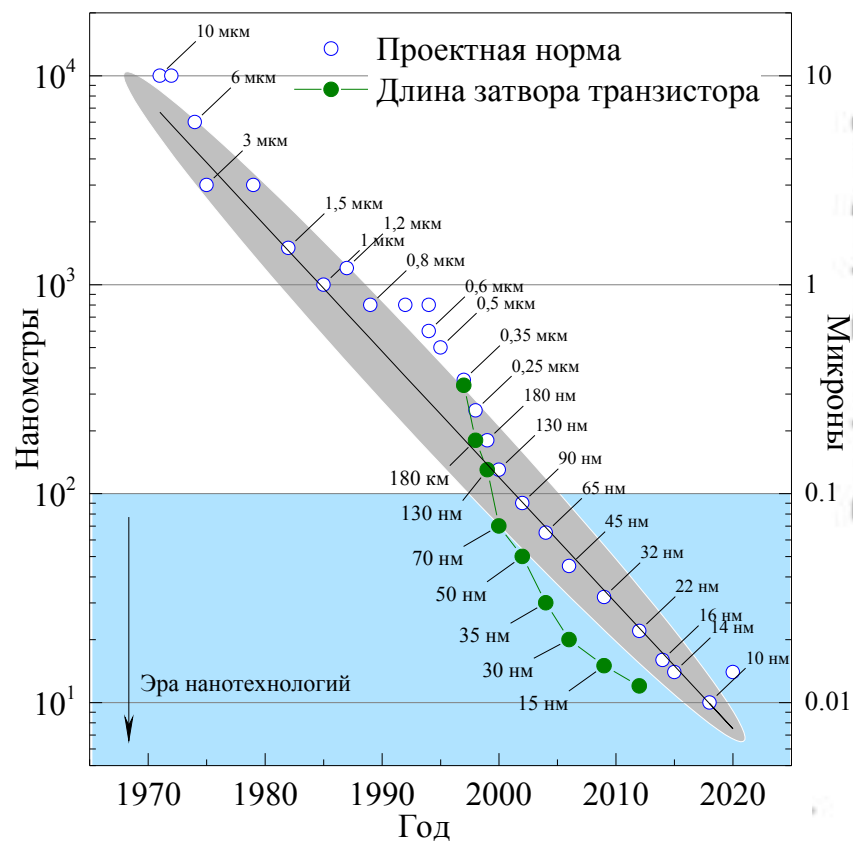
128 Gbit 24-Layer 1<sup>st</sup> Gen.



86 Gbit 32-Layer 2<sup>nd</sup> Gen.



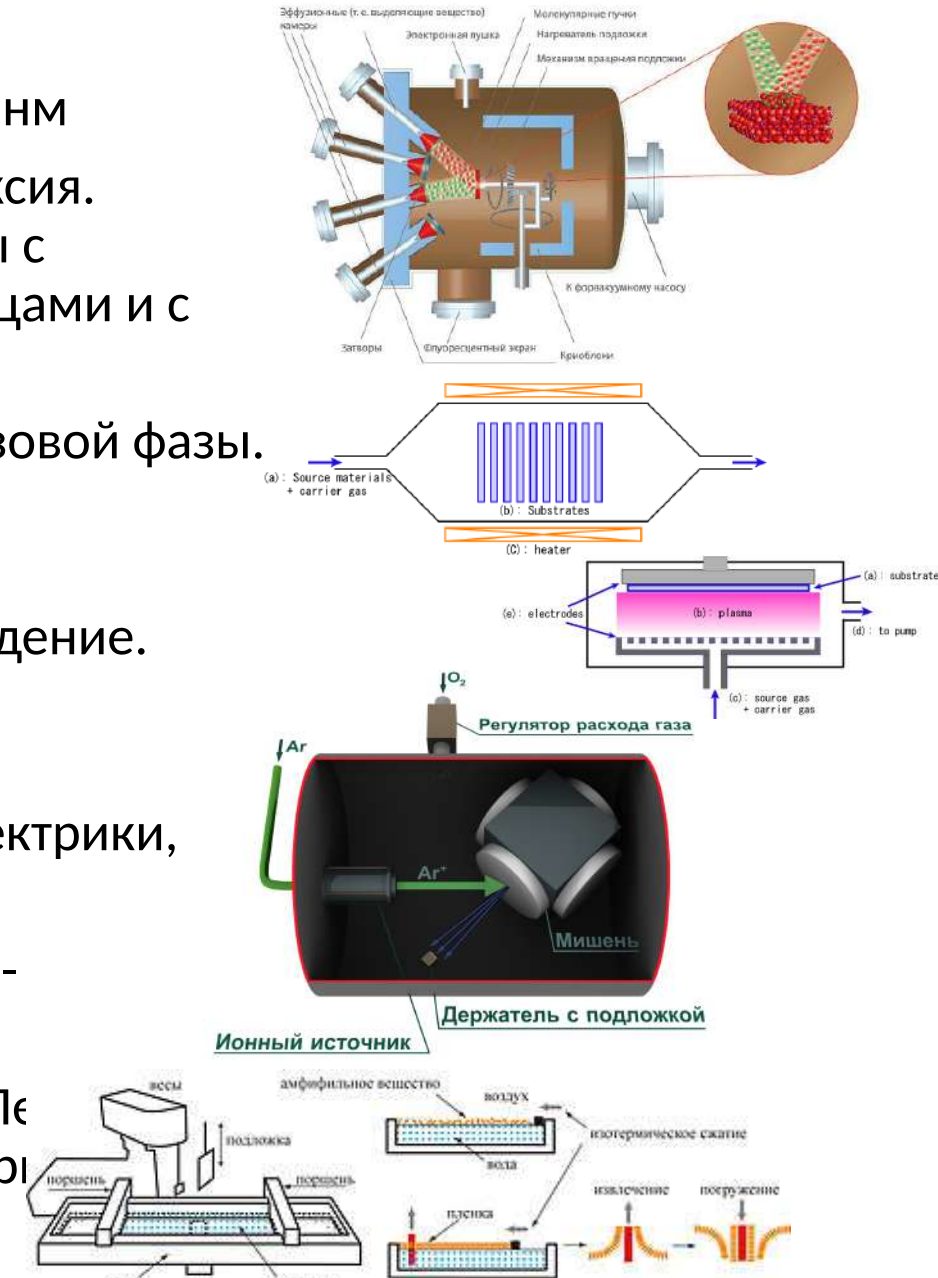
# Закон Мура



# Получение тонких плёнок

Однородные плёнки толщиной 1-100 нм

- **МЛЭ** – молекулярно-лучевая эпитаксия. Гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования;
- **CVD** – химическое осаждение из газовой фазы. Металл-органика и неорганические прекурсоры. Быстро;
- **ALD, ALCVD** – атомно-слоевое осаждение. Металл-органика и неорганические прекурсоры. Медленно;
- **PVD** – вакуумное напыление. Диэлектрики, металлы;
- **IBSD** – ионно-лучевое перепыление-осаждение. Диэлектрики, металлы;
- **LB**, Langmuir-Blodgett – технология Лё Блоджетт, моно- и мультимолекулярные плёнки на поверхности.





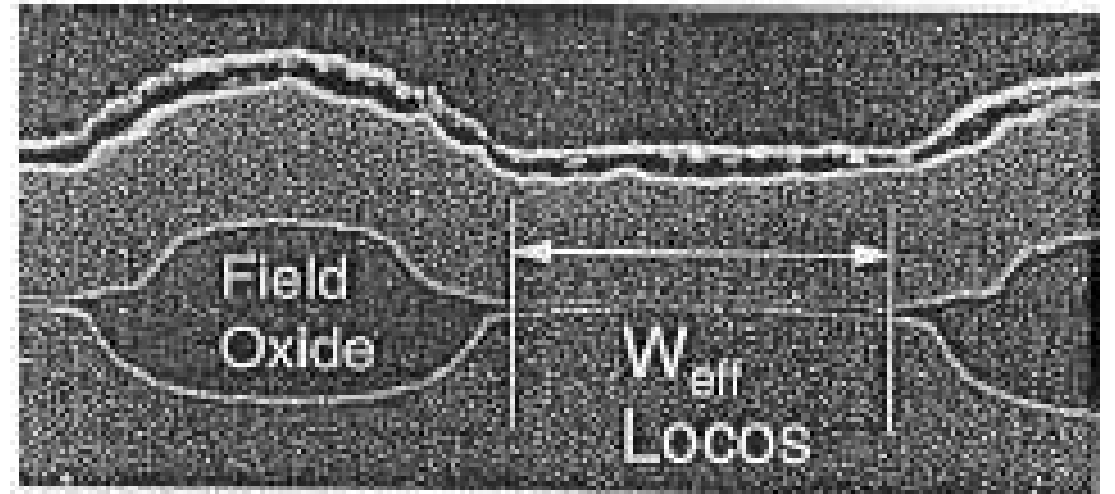
# Боковая изоляция типа LOCOS и STI

Боковая изоляция намного толще, чем подзатворный диэлектрик. Различие картинок (а) и (б) связано с различными методами изготовления изоляции и играет важную роль в радиационной стойкости транзистора.

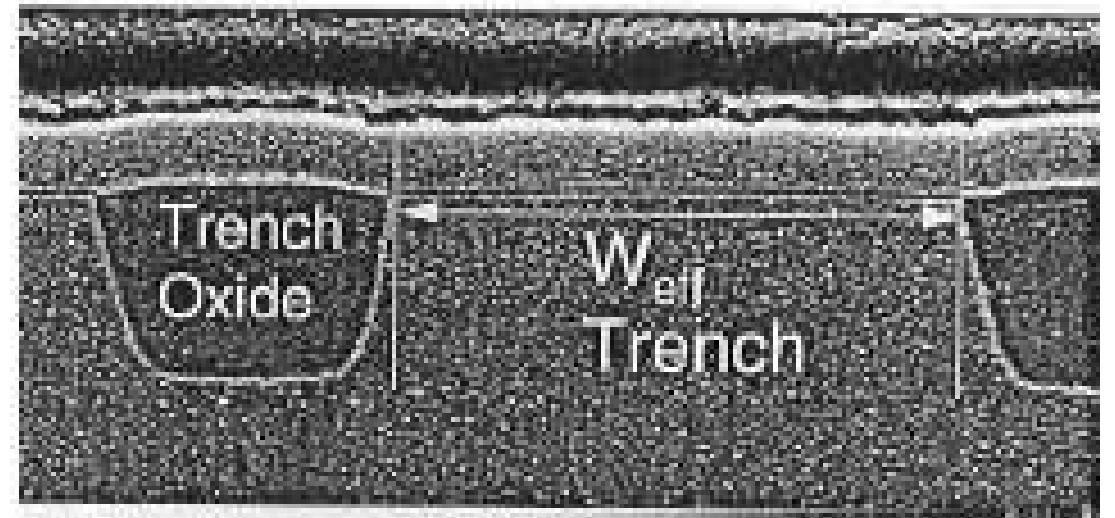
LOCOS: локальное окисление.

STI: травление ямы и нанесение  $\text{SiO}_2$  методом CVD.

<https://habr.com/ru/post/189066/>  
<https://habr.com/ru/post/156049/>



(a)



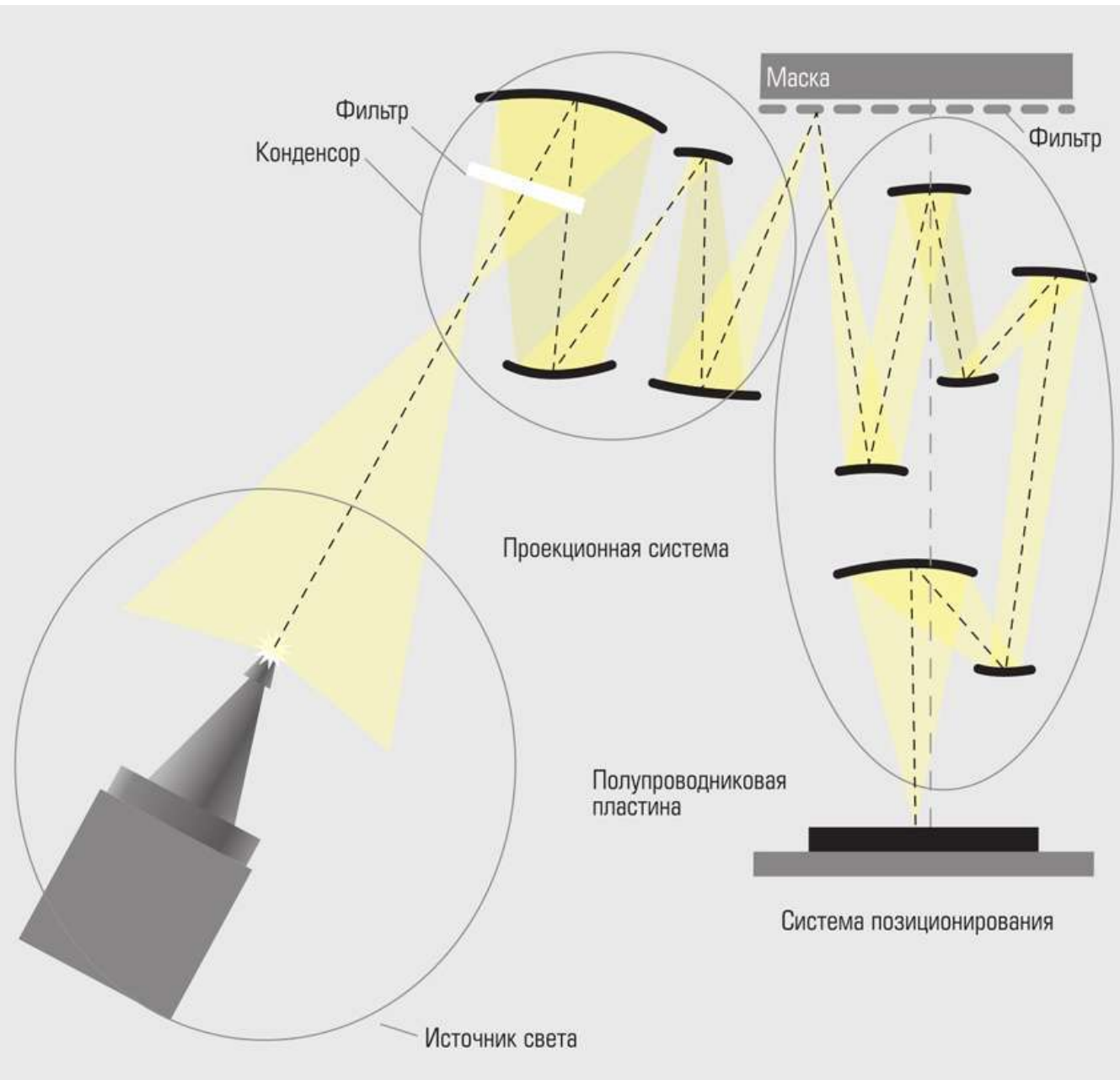
# Литография

- оптическая фотолитография (стандартная),  $\lambda=310—450$  нм;
- **ультрафиолетовая фотолитография на эксимерных лазерах,  $\lambda=248$  нм (KrF),  $\lambda=193$  нм (ArF).** Применение фазовращателей и масок смещения;
- **фотолитография в глубоком ультрафиолете,  $\lambda=100—10$  нм – до сих пор нет мощных источников;**
- **рентгеновская литография,  $\lambda=0,1—10$  нм;**
- электронная литография – очень медленная операция;
- ионно-лучевая литография (ионное травление);
- нанопечатная литография – механическая деформация резиста пресс-формой с последующим травлением деформированного покрытия.  $F < 10$  нм.

Приёмы фотолитографии: сканирующие и проекционные; контактными, бесконтактными, на микрозазоре.

Может быть применён метод радиационно-стимулированной диффузии.

## EUV /X-Ray литография: схема



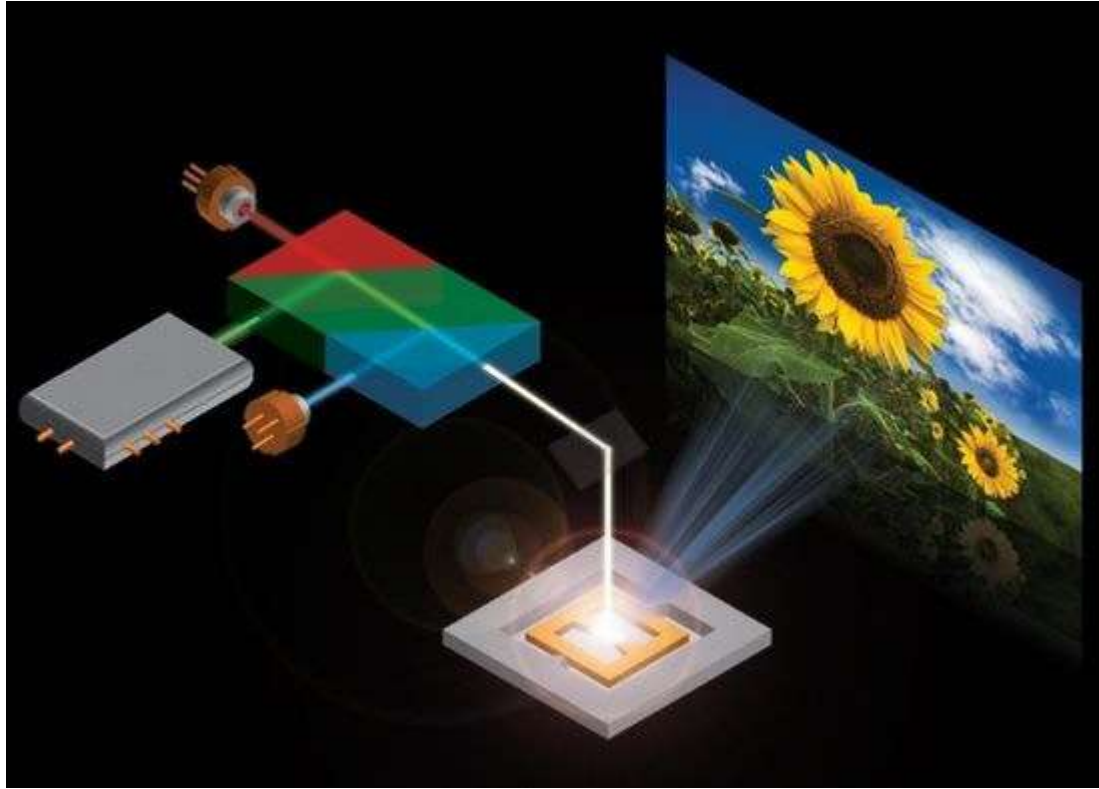
EUV-фотолитография на длине волны 13,5 нм. Проблема при создании установок для EUV-литографии состоит в том, что на этой длине волны нельзя использовать традиционные источники света и традиционную оптику из-за интенсивного поглощения такого излучения всеми известными оптическими материалами.

Поэтому в подобных оптических системах используют отражающую многослойную оптику, то есть зеркала с соответствующим интерференционным покрытием.

Вторая важная проблема состоит в том, что с уменьшением проектных норм повышаются требования к точности системы позиционирования.

В результате сложность этих установок такова, что их стоимость уже превосходит 300 млн долларов.

## EUV /X-Ray литография: МОЭМС



Функцию фотошаблона (маски) выполняет микрооптическая электромеханическая система микрозеркал (МОЭМС). В этой технологии топология кодируется состоянием пикселей (микрозеркал) МОЭМС, отражающих или пропускающих рентгеновское излучение. Для смены проецируемого изображения достаточно поменять программу, а динамическая маска сама формирует изображение, которое необходимо получить на резисте.

Как и в традиционной литографии, динамическая маска стационарна, а пластина с резистом сканируется по двум координатам.

# EUV/X-Ray литография

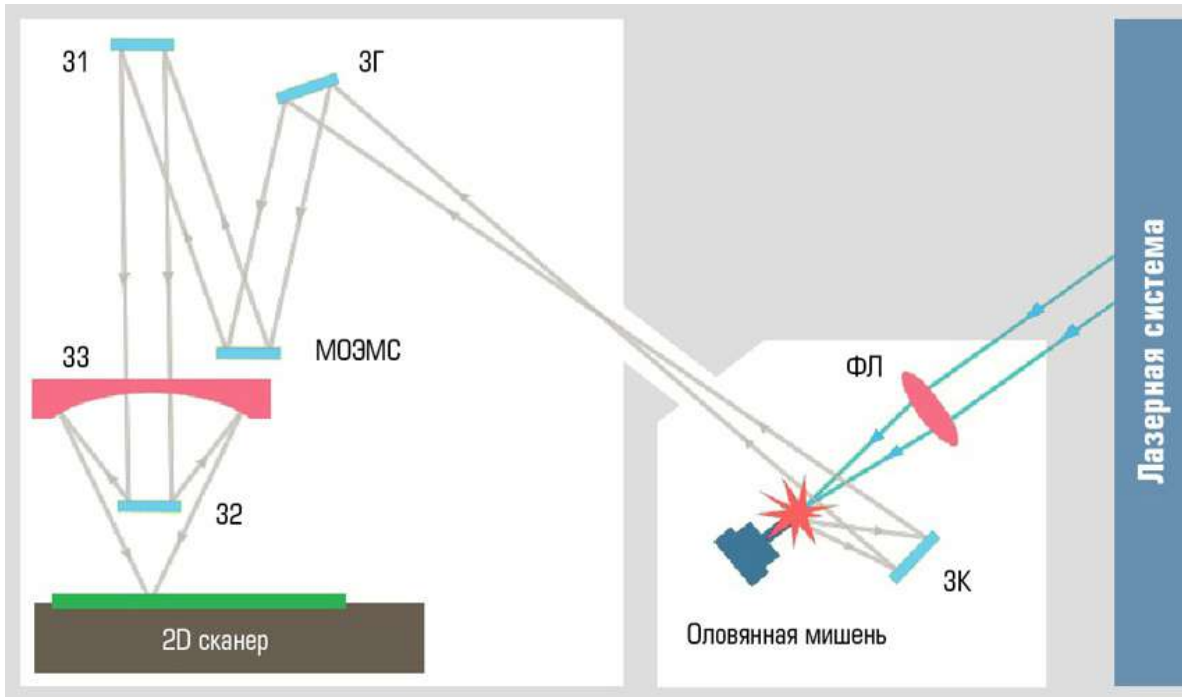


Схема установки безмасочной рентгеновской литографии с управлением **коэффициентом отражения** рентгеновского излучения

Фотолитограф с управлением коэффициентом отражения рентгеновского излучения. Излучение лазера фокусируется с помощью линзы на вращающуюся жидкую оловянную мишень. В результате лазерного пробоя паров олова и нагрева электронов в световом поле лазерного излучения образуется высокотемпературная плазма.

В варианте конструктивного исполнения динамической маски «на отражение» излучения она является матрицей подвижных МЭМС-структур с гладкой поверхностью (микрозеркал), отражающих рентгеновские лучи в сторону проекционного объектива рентгенооптической системы или перенаправляющих излучение в область за его пределами. Угол наклона микрозеркал, характеризующий их открытое/закрытое состояние, регулируется электростатическим путём подачи напряжения на соответствующие управляющие электроды, что позволяет контролировать угол отражения рентгеновского пучка и тем самым точность формирования границ топологии элементов микросхем.

Образовавшиеся в плазме ионы олова интенсивно излучают в относительно узком спектральном диапазоне с максимумом излучения на длине волны 13,5 нм.

Это излучение отражается зеркалом-коллектором (ЗК). и перенаправляется на зеркало-гомогенизатор (ЗГ), обеспечивающее однородное освещение МОЭМС, которая формирует увеличенное изображение топологии чипа. Отражённое от МОЭМС излучение падает на первое зеркало трехзеркального проекционного объектива и далее с помощью зеркал 32 и 33 уменьшенное в 400 раз изображение сформированное МОЭМС переносится на пластину с фоторезистом, установленную в плоскости изображения на системе позиционирования.



# EUV /X-Ray литография

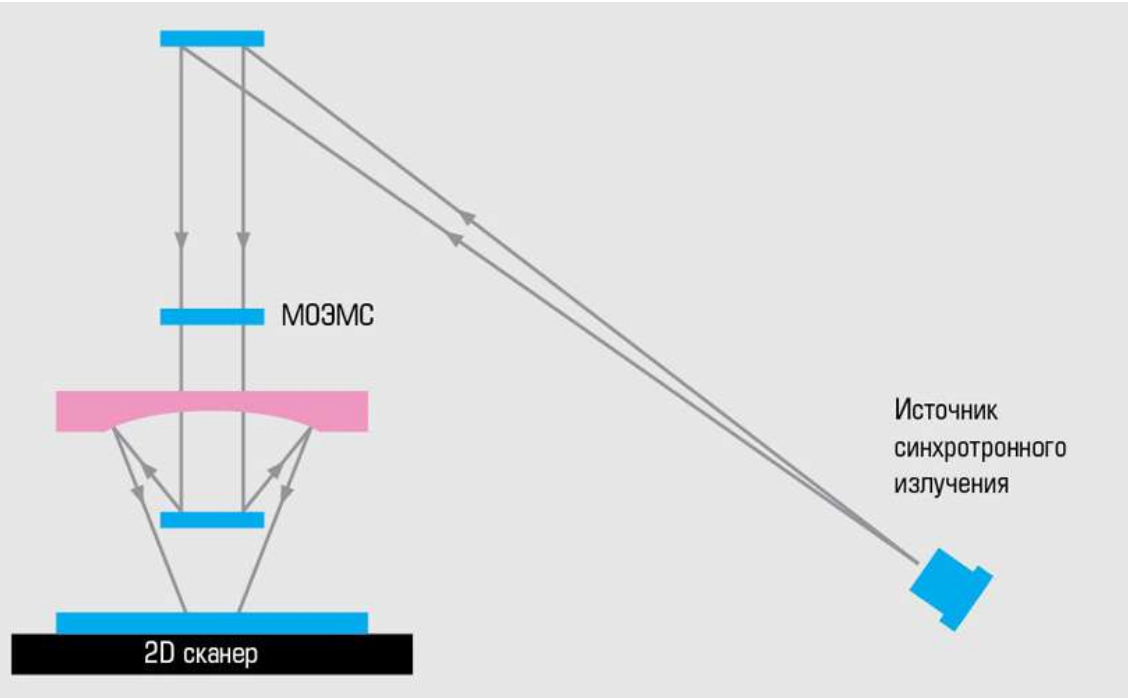


Схема установки безмасочной рентгеновской литографии с управлением **коэффициентом пропускания** рентгеновского излучения

В варианте конструктивного исполнения динамической маски «на пропускание» излучения она представляет собой кремниевую мембрану с матрицей отверстий и расположенных над ними электростатически управляемых оптических МЭМС-затворов — многослойных подвижных элементов, открывающих/закрывающих отдельные отверстия в мембране для пропускания/блокировки прохождения (отражения или поглощения) рентгеновских лучей, что обеспечивает формирование топологии чипа по заданному рисунку. Каждое отверстие в мембране отвечает за формирование единичного пикселя изображения на пластине. Управление открытием/закрытием оптических затворов осуществляется электрическим полем от специальных электродов — управляющих шин, расположенных на МЭМС-динамической маске вблизи каждого из отверстий.

Оптическая система микроскопов уменьшает изображение на выходе с МЭМС-динамической маски (в зависимости от используемой технологии, кратность уменьшения может варьироваться от 10х до 400х). Если диаметр отверстий в маске равен 200 нм, при кратности уменьшения 10х это позволяет сжать единичный пиксель до размера 20 нм. Далее проекционный объектив переносит уменьшенное изображение с МЭМС-динамической маски на пластину с резистом, также расположенную на системе позиционирования.