

# полупроводниковая микроэлектроника

---

---

Полупроводниковая микроэлектроника относится к числу наиболее быстро и эффективно развивающихся научно-технических направлений.

Трудно назвать другое научно-техническое направление, которое было бы сравнимо с полупроводниковой микроэлектроникой по темпам возрастания глубины и масштабов воздействия на самые различные стороны жизни нашего общества. Достижения полупроводниковой микроэлектроники носят «всепроникающий характер

---

Электронная промышленность во всех развитых странах существенно опережает другие отрасли как по относительным, так и по абсолютным темпам прироста производимой продукции, а также по темпам расширения и обновления собственной материально-технической базы.

# Начальный этап развития полупроводниковой электроники

---

Днем рождения полупроводниковой электроники, по-видимому, следует считать 7 мая 1895 г., поскольку фактически именно полупроводниковые свойства твердого тела были использованы А. С. Поповым для регистрации электромагнитных волн.

В первые годы нашего столетия было предложено несколько вариантов детекторов электромагнитных колебаний. В 1906—1908 гг. широкое распространение получили кристаллические детекторы, сердцем которых был контакт полупроводникового кристаллика с хорошо заточенной металлической провололочкой.

Появление кристаллических детекторов привело к созданию детекторных радиоприемников, использовавшихся в усовершенствованном виде практически до конца 20-х годов.

В 20-30-е годы XX ст. о полупроводниках почти забыли. Наука и техника того времени ~~еще не были готовы к тому, чтобы понять и по достоинству оценить потенциальные возможности~~

полупроводниковой электроники. Очень низким было качество полупроводниковых материалов. Работы в этом направлении проводились малыми силами и в плохих условиях. Понятия «полупроводниковая чистота» еще не существовало. Вопрос о широком развертывании работ, направленных на получение полупроводниковых монокристаллов высокого качества в промышленных масштабах, вообще не ставился.

И тем не менее именно в 20-е и 30-е годы XX века в физических лабораториях всего мира начинается серьезное экспериментальное и теоретическое исследование свойств кристаллов. Создается **квантовая теория твердого тела** — фундамент всей современной полупроводниковой микроэлектроники.

Одним из пионеров этих исследований является А. Ф. Иоффе, приступивший к экспериментальному изучению электропроводности кристаллов в лаборатории Рентгена еще до начала первой мировой войны.

---

Интерес к полупроводникам существенно возрос в самом конце 30-х годов в связи с развитием в Англии работ по радиолокации.

Важность решаемой задачи потребовала самого серьезного отношения к созданию элементной базы радиолокационных установок.

В США создаются монокристаллы германия достаточно высокого качества, а затем и монокристаллы кремния. Одновременно над электроникой впервые опустилась завеса секретности.



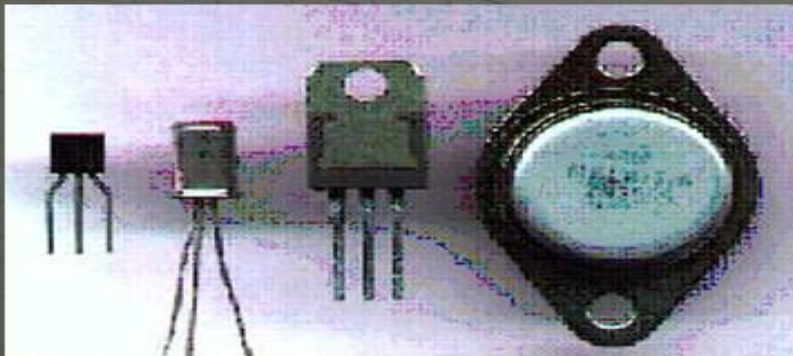
---

В середине 40-х годов в связи с быстрым развитием электронного оборудования самолетов и ракет, а также в связи с началом работ по созданию электронных вычислительных машин перед разработчиками электронных систем впервые со всей остротой встали вопросы надежности и габаритов этих систем, а также энергетики больших электронных систем.

---

Вопрос о создании малогабаритных, маломощных и надежных твердотельных усилительных элементов стал весьма актуальным. В этом направлении начались интенсивные поисковые исследования, завершившиеся блестящим успехом в 1948 г., когда американскими физиками Шокли, Бардиным и Браттайном был создан транзистор.

# Транзистор



**Транзистор** — трёхполюсный полупроводниковый электронный прибор, изменяющий своё сопротивление при приложении напряжения на управляющий электрод, что позволяет управлять мощной цепью слабым сигналом. Благодаря этому свойству, транзистор применяется для усиления, коммутации и преобразования электрических сигналов.

Транзисторы — основа всех современных электронных устройств, они применяются практически во всех современных бытовых приборах. Сейчас большая часть транзисторов используется в составе интегральных микросхем. Интегральная микросхема может содержать миллионы транзисторов на одном кристалле полупроводника (в основном кремния).

Первые транзисторы были, естественно, весьма несовершенными приборами в отношении как рабочих характеристик, так и технологичности изготовления и надежности. Однако перспектива замены хрупкой и, несмотря на успехи в миниатюризации вакуумных электронных приборов, все еще довольно громоздкой электронной лампы значительно более малогабаритными твердотельными приборами, не требующими для своей работы ни высокого вакуума, ни достаточно мощных источников питания нити накала катода, ни высоковольтного анодного питания, оказалась столь вдохновляющей, что 50-е годы XX столетия можно с полным правом назвать периодом полупроводниковой революции в электронике.

---

Уже первые опыты использования транзисторов и других полупроводниковых приборов в электронной аппаратуре показали, что применение этих приборов делает аппаратуру существенно надежнее и экономичнее, а также ведет к значительному снижению ее габаритов и веса. Эти на первый взгляд чисто количественные изменения характеристик электронной аппаратуры были столь значительными, что очень

скоро привели к принципиальным качественным изменениям ее основных параметров.

Рис. 1. Годовой объем выпуска (N) промышленностью США дискретных полупроводниковых приборов (1) и приемно-усилительных ламп

---



Постепенно полупроводниковая электронная аппаратура начинает проникать во все области человеческой деятельности

(навигационная аппаратура и аппаратура для управления технологическими процессами, медицинская электроника

и электромузыкальные инструменты, бытовая электроника и т. д.). Особо следует отметить, что только создание полупроводниковых электронных приборов сделало реальным дальнейшее успешное развитие вычислительной техники.

Создалась ситуация, когда без применения электроники трудно стало ожидать прогресса в той или иной области науки и техники

---

Начальный этап развития полупроводниковой электроники заканчивается в середине 60-х годов XX столетия, когда на смену дискретным германиевым и кремниевым диодам и транзисторам начинают приходить кремниевые интегральные микроэлектронные схемы.



---

Однако стало совершенно ясным и другое: прогресс в области полупроводниковой электроники возможен только на базе принципиально новой технологии и потребует весьма значительных дополнительных капиталовложений.

Технический и технологический уровень электронной промышленности 50-х годов не мог обеспечить реализацию целого ряда требований полупроводниковой электроники

---

Развитие полупроводниковой электроники потребовало прежде всего получения сверхчистых полупроводниковых веществ с содержанием нежелательных или неконтролируемых примесей, не превышающим в некоторых случаях  $10^{-7}$ ÷ $10^{-8}$  %. Содержание «вредных» примесей в химических реактивах и некоторых конструкционных материалах, используемых в полупроводниковой технологии, не должно было превышать, как правило,  $10^{-4}$ ÷ $10^{-5}$  %. Таких требований к чистоте материалов ранее не предъявляла ни одна отрасль науки или техники.

---

Наконец, третья серьезнейшая проблема, с которой столкнулась полупроводниковая электроника, это «проблема поверхности». По мере того как размеры полупроводниковых приборов становились все меньше и меньше, совершенно очевидным

становилось решающее влияние, которое оказывает на характеристики этих приборов состояние их поверхности.

В 50-е годы было выполнено большое число исследований, посвященных изучению влияния состояния поверхности германия и кремния на свойства полупроводниковых приборов, изготавливаемых из этих материалов, а также изучению специфических электронных процессов на поверхности германия и кремния. Важнейшим результатом этих исследований явилось создание физической теории поверхности полупроводника и открытие уникальных с точки зрения полупроводниковой электроники свойств межфазной границы кремний — пленка термической двуокиси кремния (система Si — SiO<sub>2</sub>).

---

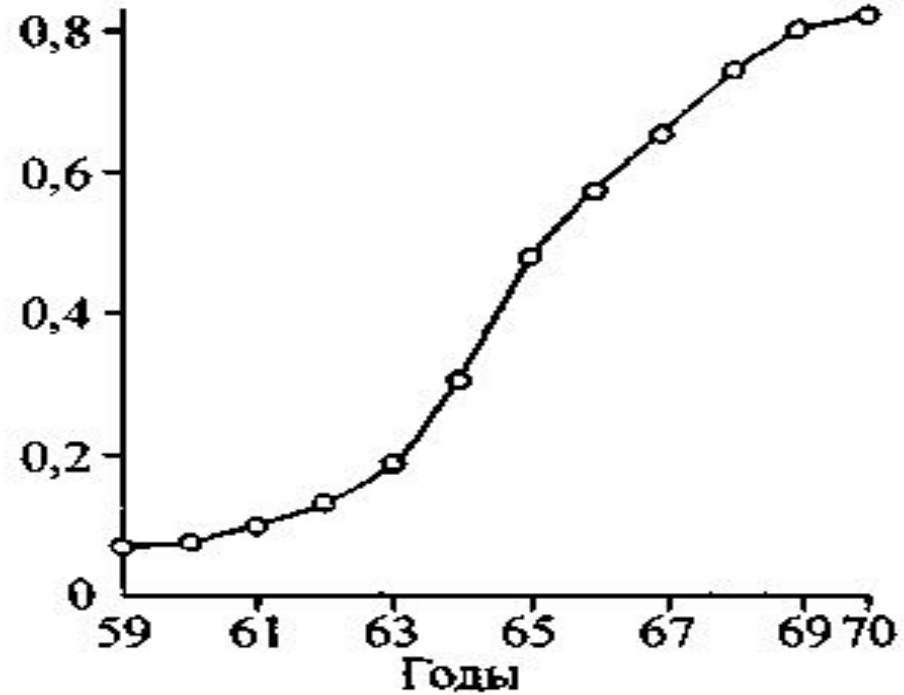
В результате совместных усилий химиков, физиков, инженеров и организаторов производства к началу 60-х годов была создана фактически новая электронная промышленность, располагающая необходимым набором сверхчистых веществ, новым технологическим оборудованием, «чистыми» технологическими помещениями и кадрами специалистов, осознавшими огромные потенциальные возможности полупроводниковой электроники и способными обеспечить дальнейший прогресс в этой области.

---

Основным полупроводниковым материалом в 60-е годы становится кремний. Качество монокристаллического кремния постепенно приближается к качеству монокристаллического германия. Соотношение объемов выпуска германиевых и кремниевых транзисторов решительно изменяется в пользу кремниевых приборов.

# транзисторов в полном годовом выпуске транзистора в США в 60-е ГОДЫ

---



Характеризуя ситуацию, сложившуюся к середине 60-х годов, д-р К. Л. Хоган, один из ведущих специалистов фирмы «Моторола» (США), писал: «Никто пока не может сказать, куда приведет наш путь, по которому мы идем, используя эту новую технологию (технологию производства кремниевых интегральных микросхем). Однако представляется очевидным, что мы находимся на грани грандиозной технической революции в области построения радиоэлектронных систем, революции, которая стала возможной после того, как человечество расширило свои знания по полупроводниковым материалам».



# Кремний полупроводник

- Солнечные батарейки
- Солнечные батареи
- Фотоэлементы
- Электроника



# Создание интегральных микросхем

---

Конкретные идеи в этом направлении инженеры начали разрабатывать лишь в начале 60-х годов, опираясь на успехи

групповой технологии производства полупроводниковых приборов.

Промышленный выпуск кремниевых интегральных схем был начат в США в середине 60-х годов.

---

Показателем сложности микросхемы является *степень интеграции*  $K$ , которая характеризуется числом содержащихся в ней элементов и компонентов  $N$ :

$$K = \lg N,$$

где  $K$  округляется до ближайшего большего целого числа.

Наибольшей степенью интеграции обладают полупроводниковые микросхемы, затем тонкопленочные и, наконец, толстопленочные (в том числе, гибридные).

В зависимости от степени интеграции применяются следующие названия интегральных схем:

малая интегральная схема (МИС) — до 100 элементов в кристалле,

средняя интегральная схема (СИС) — до 1000 элементов в кристалле,

большая интегральная схема (БИС) — до 10 тыс. элементов в кристалле,

сверхбольшая интегральная схема (СБИС) — более 10 тыс. элементов в кристалле.

К концу 60-х годов обычной считалась степень интеграции, при которой на одной пластине кремния диаметром около 30 мм

изготавливалось от 25 до 250 интегральных микросхем, содержащих от 10 до 30 элементов (диодов, транзисторов, конденсаторов) каждая. Надежность таких интегральных схем

приближалась к надежности дискретных полупроводниковых приборов.

## Применение кремния

Кремний находит применение в полупроводниковой технике и микроэлектронике, в металлургии в качестве добавки к сталям и в производстве сплавов.

Стив Джобс демонстрирует кремниевую пластину, на которой «сидят» десятки процессоров G5.



---

Но самое главное заключалось в том, что к этому времени ни у кого из специалистов, работающих в области полупроводниковой электроники, не было сомнений в том, что степень интеграции в кремниевых микросхемах может быть существенно увеличена. Считалось реальным достижение степени интеграции в несколько десятков тысяч элементов. Делались и более смелые прогнозы. Наступала эра больших интегральных схем. Родилась полупроводниковая интегральная микроэлектроника.

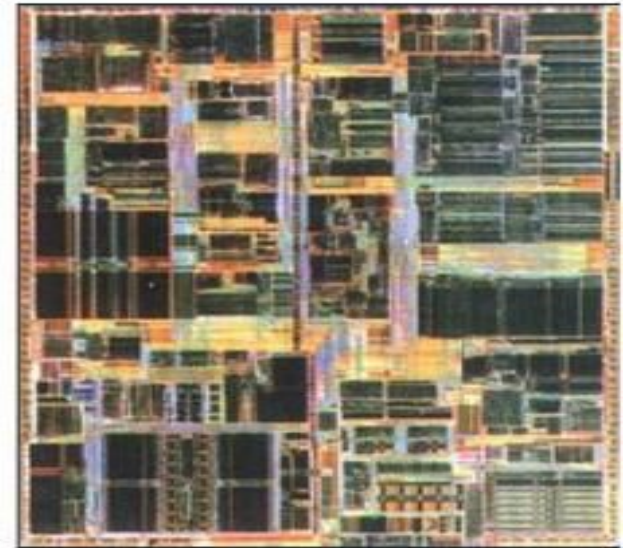
# Интегральные микросхемы

Это совокупность большого числа взаимосвязанных компонентов – **транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов**, соединительных проводов, изготовленных на одном **кристалле**.

На пластинку из полупроводника (кристаллы кремния) наносятся последовательно **слои примесей, диэлектриков, напыляются слои металла**. На **одном кристалле** формируется несколько тысяч электрических микроприборов.

Размеры такой микросхемы обычно 5,5 мм, а отдельных микроприборов – порядка  $10^{-6}$  м.

Современный процессор Pentium-4 состоит из 42 млн. транзисторов.



.Интегральные микросхемы- (две фотографии слева), и часть ядра Pentium MMX (фотография справа)

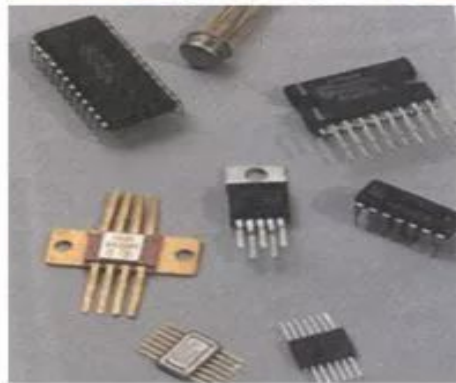
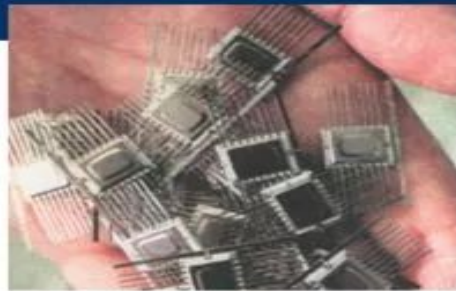


---

После того как в конце 60-х годов был создан полевой транзистор с изолированным затвором (МОП-транзистор), существенно возрос интерес исследователей к особенностям электронных и физико-химических процессов в структурах металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-система).

Важнейшими результатами этих исследований явились разработка технологии МДП-интегральных схем (МОП-технология, в дальнейшем и К/МОП-технология) и создание полупроводниковых элементов памяти на основе МДП-структур с двойным диэлектриком. Развитие исследований в этой области привело к созданию полупроводниковых запоминающих устройств большой емкости, была также показана возможность создания запоминающих устройств со стиранием информации ультрафиолетовым излучением и электрически-перепрограммируемых запоминающих устройств с произвольной выборкой информации.

## Интегральные схемы



- Полупроводниковые приборы миниатюрных размеров соединены на одном полупроводниковом кристалле
- Применяются ПК, системах управления, бытовой электронике и т.д.
- В мире ежегодно выпускается 50 млрд интегральных схем

---

Подлинным триумфом больших интегральных схем на основе МДП-структур явилось создание на базе таких схем в начале 1972 г. микроЭВМ, сердцем которых был микропроцессор.

Первые микроЭВМ представляли собой нечто среднее между набором кристаллов для электронной счетной машины и миниЭВМ. Однако, по существу, уже первые микропроцессоры были вполне законченными устройствами обработки информации, выполнявшими те же функции, что и центральные процессоры вычислительной системы любого размера.

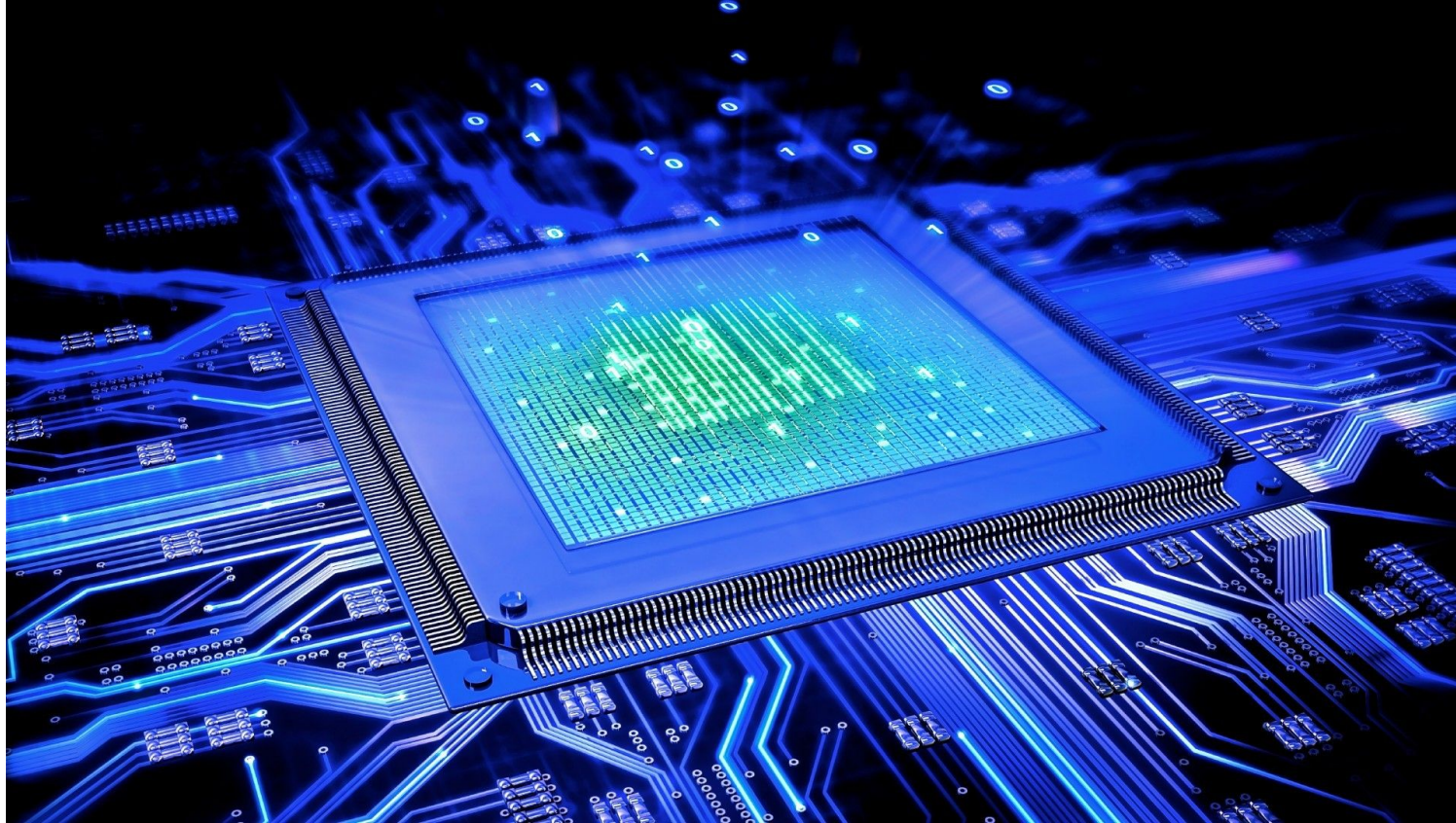
---

Микропроцессор имеет три основных отличия от обычного

процессора: микропроцессор изготавливается целиком как одна большая интегральная схема (или как несколько, но немного, таких схем);

микропроцессор обладает сравнимым быстродействием с миниЭВМ или большими ЭВМ ;

микропроцессор является дешевым устройством.



## ЗАКОН МУРА

**Закон Мура** — эмпирическое наблюдение, изначально сделанное Гордоном Муром, согласно которому количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца. Иными словами, мощность производимых процессоров удваивается каждые два года.



# Полупроводниковая фабрика Samsung





# Настоящее и будущее

---

Микроэлектроника стремительно меняет нашу повседневную жизнь. Так как еще 10-15 лет назад было сложно представить появление многих современных цифровых устройств. Среди неспециалистов мало кто понимал перспективы и скорость развития технологических новинок. Сегодня цифровые камеры заменили пленочные, IP-телефония - проводную связь, навигаторы - дорожные карты, а на смену бумажным письмам и книгам пришли электронные. Все это стало возможным благодаря развитию микроэлектроники.

---

Главные задачи технологии микроэлектроники следующие: создание в минимальном объеме (твердого тела или на его поверхности) максимального количества строго определенных областей с заданными геометрией, составом, структурой, а следовательно, и свойствами, способных выполнять определенные функции элементов или эквивалентов элементов электронных схем при высокой стабильности преобразуемой информации, малом расходе энергии и высокой надежности многократного повторения всех возложенных на данную ИС задач.

При этом обращают внимание на повышение рентабельности при снижении расхода материалов, на простоту и комплексность технологического производства, максимум выхода годных изделий при минимальном применении ручного труда. Только максимальная автоматизация может обеспечить дальнейшее развитие микроэлектроники. В настоящее время технология микроэлектроники прошла уже основные стадии своего развития и становления, а если учесть, что широкое производство ИС и дискретных приборов с использованием приемов и технологических процессов микроэлектроники перешагнуло рубеж 10-12 млрд. шт. в год, то становится ясным, что мы имеем дело с наиболее массовым современным производством весьма сложной продукции.

---

При этом темпы развития микроэлектроники находятся вне конкуренции с любыми другими отраслями современной промышленности. Это потребует использования новых материалов и их композиций, а также новых технологических процессов и их сочетаний

Главный технический директор фабрики Globalfoundries посвятил журналистов в некоторые подробности осваивания 7 нм техпроцесса. Согласно его заявлениям переход с 14 нм на 7 нм технологический процесс позволит практически в 3 раза уменьшить размеры кристаллов процессоров (точнее в 2.7 раза). Для лучшего понимания специалист привел в пример процессоры AMD Ryzen 7 1000-й серии. Площадь кристалла данных процессоров при 14 нм техпроцессе составляет 213 мм<sup>2</sup>, а переход на 7 нм техпроцесс позволит уменьшить площадь чипа до 80 мм<sup>2</sup>. Освободившееся на подложке место можно использовать под дополнительные ядра или увеличение кэш-памяти процессоров.

---

Помимо уменьшения физических размеров кристалла, 7 нм техпроцесс позволит еще и серьезно повысить рабочие частоты процессоров, повысив базовые частоты до отметки в 5 ГГц. Описанные главным техническим директором фабрики Globalfoundries перспективы очень интересны, осталось лишь дождаться их непосредственной реализации в будущих процессорах AMD.

---

Однако не менее интересным является анонсирование использования в этих процессорах новых материалов, включая нитрид галлия, что открывает новые возможности в повышении уровня автономности ноутбуков с подобными процессорами. Одной из причин проблем, возникших у Intel в последние годы, как раз являлось недостаточное внимание компании к изделиям для мобильных приложений. Являясь безоговорочным лидером в процессорах для стационарных приложений, Intel не уделяла

должного внимания продукции для планшетов, смартфонов и т. д.

Так, компании IBM, GlobalFoundries и Samsung разработали новый техпроцесс изготовления транзисторов с нанослоями кремния. Эти транзисторы, в отличие от FinFET, имеют

---

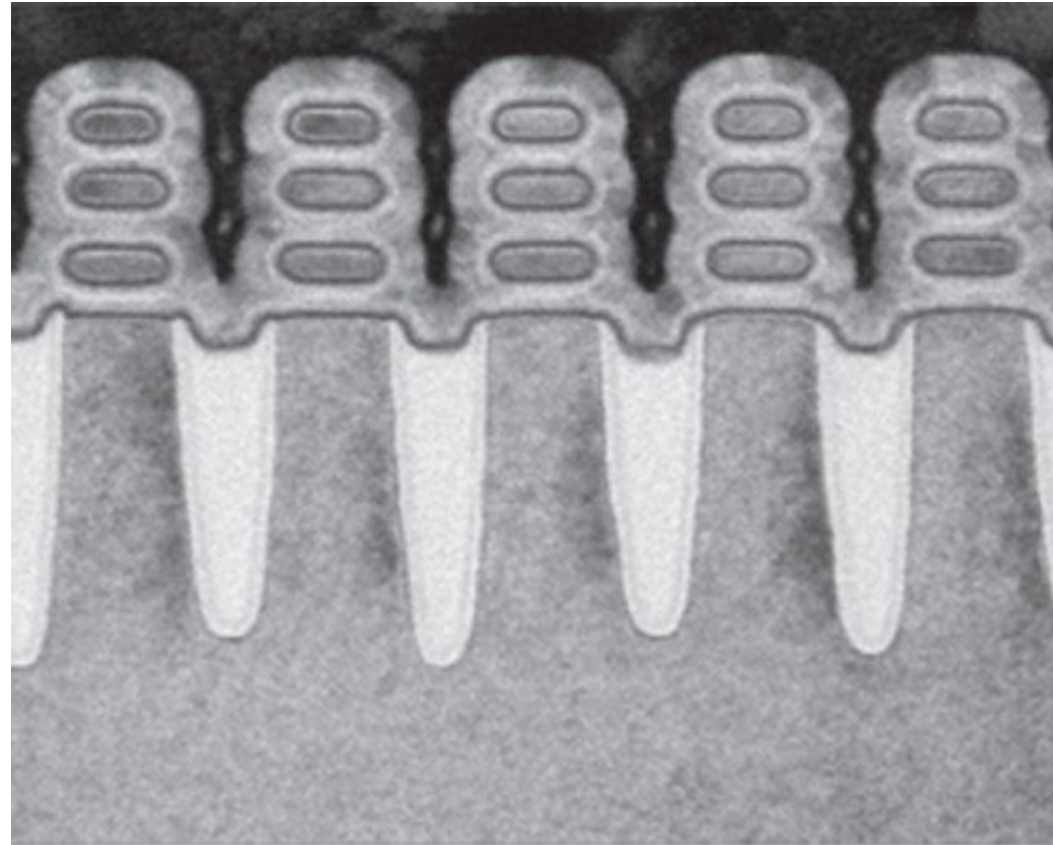
многослойную структуру затвора в виде нанолистов. Применение такого транзистора в 5-нм процессе позволяет увеличить количество транзисторов на чипе до 30 млрд против 20 млрд для 7-нм технологии.

Новая технология позволит повысить производительность и уменьшить потребление, благодаря чему ресурс работы батарей в смартфонах и других мобильных устройств может быть увеличен в два–три раза.



# Транзистор с нанослоями кремния для 5-нм техпроцесса

---

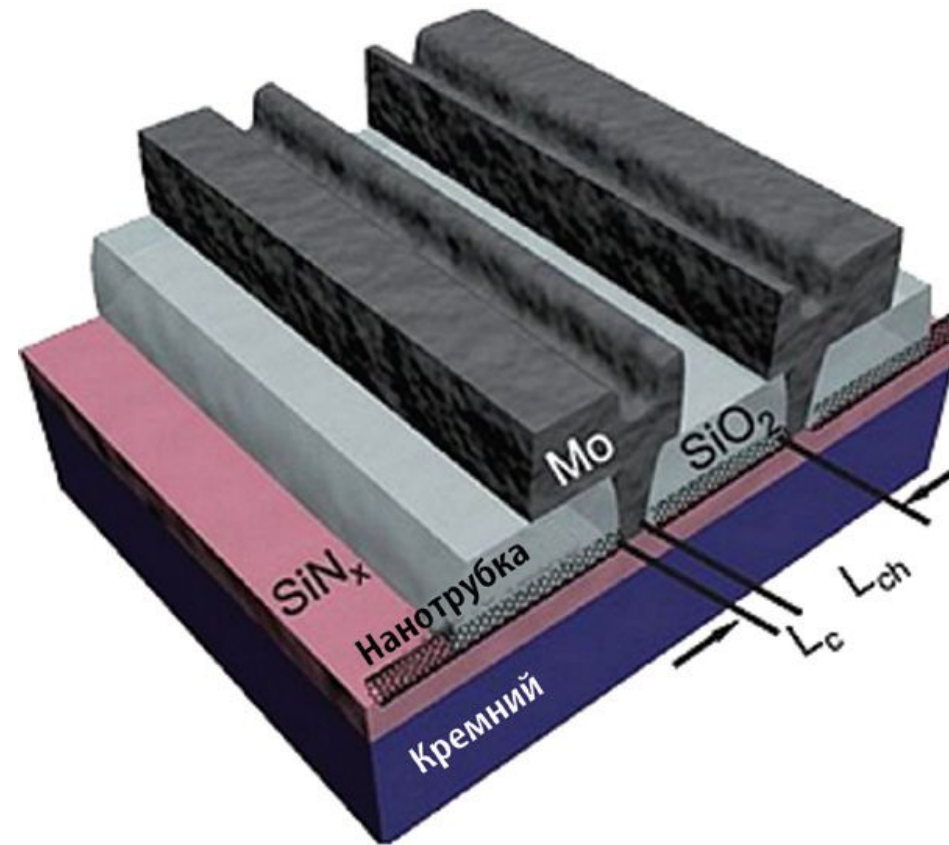


При нормах менее 5 нм из-за эффекта квантового туннелирования происходит резкий рост токов утечек, что делает кремний непригодным для создания транзисторов.  
Выходом

является использование новых материалов вместо кремния. Компания IBM разработала вариант 1,8-нм транзистора с углеродной нанотрубкой в качестве токопроводящего канала транзистора. Материалом управляющего электрода являлся молибден. В IBM заявили, что первые кристаллы

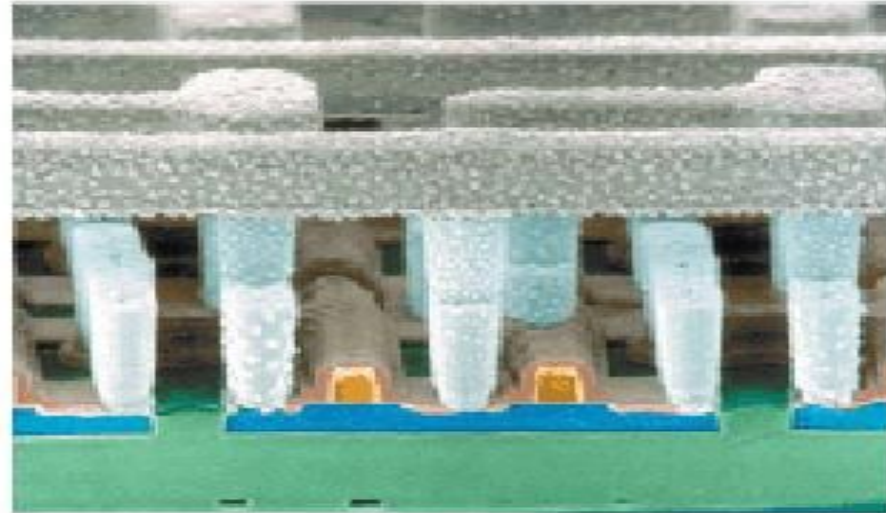
с углеродными нанотрубками должны появиться в 2020 г.

# Транзистор IBM, выполненный по проектной норме 1,8 нм, с каналом из углеродной нанотрубки



# Нанотехнологии в электронике

- Современная микроэлектроника уже не «микро», а давно «нано», т.к. производимые сегодня транзисторы, основа всех электронных схем, имеют размеры порядка 100 нм. Только сделав их размеры такими малыми, можно разместить в процессоре компьютера около 100 млн транзисторов.



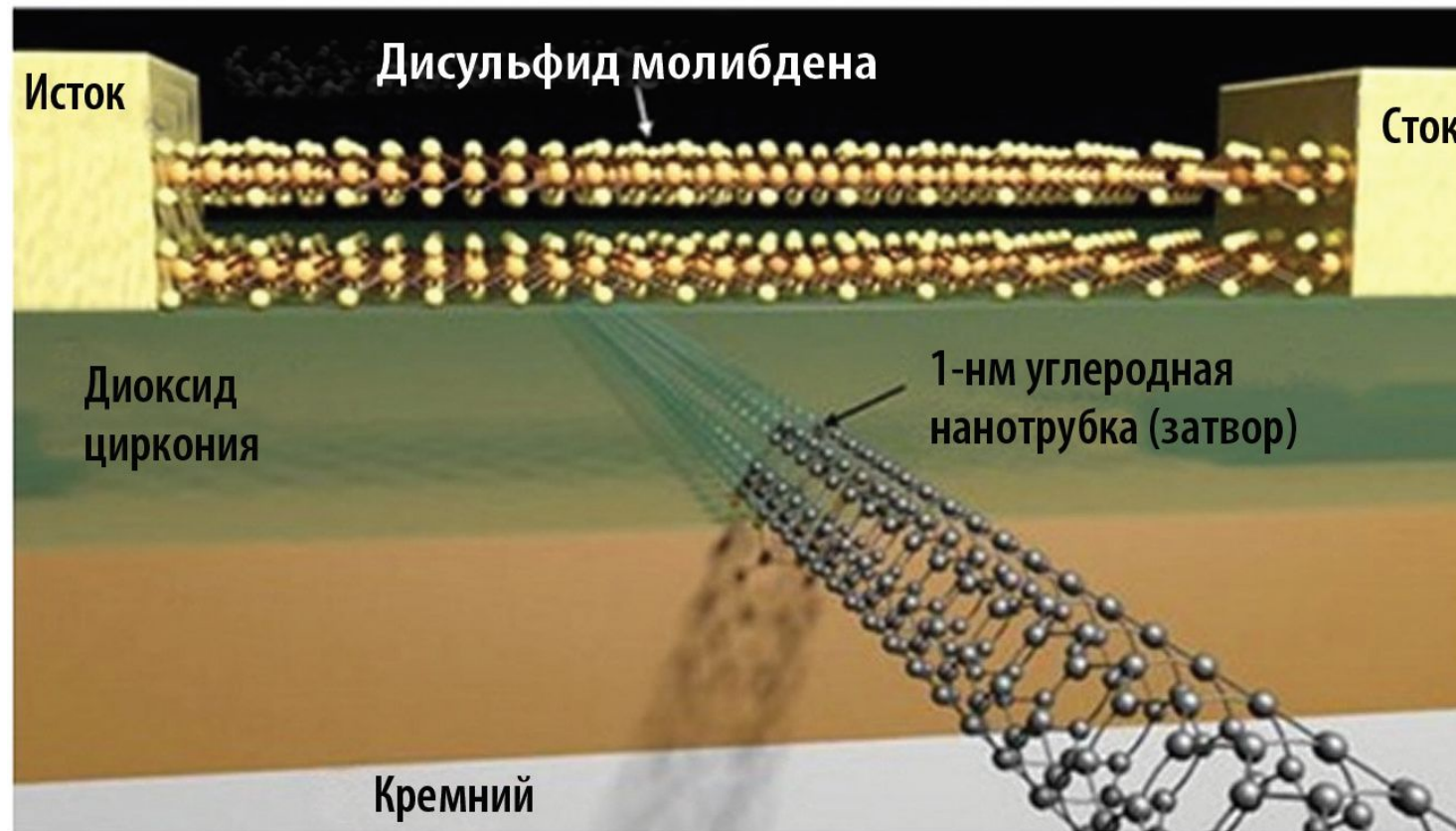
- Внутреннее устройство современной электронной схемы. Увеличено в 50 000 раз. Транзисторы образованы кристаллами кремния (голубые столбики). Зелёный слой – оксид кремния.

Ученые из Калифорнийского университета в Беркли анонсировали создание самого миниатюрного в мире 1-нм транзистора с использованием углеродных нанотрубок в качестве затвора,

а не канала транзистора. В таком транзисторе в качестве токо-

проводящего канала используется дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ). В отличие от кремния,  $\text{MoS}_2$  более устойчив к эффекту квантового туннелирования. Ученые из Беркли полагают, что их транзистор позволит продлить действие закона Мура, правомерность которого для норм менее 7 нм подвергается сомнению.

# университета, изготовленный по проектной норме 1 нм, с затвором из углеродной нанотрубки



## Наноэлектроника

**Электроника и наноэлектроника** — это область науки и техники, которая включает совокупность средств, способов и методов человеческой деятельности, направленной на теоретическое и экспериментальное исследование, математическое и компьютерное моделирование, проектирование, конструирование, технологию производства, использование и эксплуатацию материалов, компонентов, электронных приборов, устройств, установок вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой, оптической, микро- и наноэлектроники различного функционального назначения.

**Наноэлектроника** — это современный, четвертый этап развития электроники, уровень развития которой определяет облик современной цивилизации.

# НАНОПЛЁНКИ БОЛЬШИХ ПЛОЩАДЕЙ

- ▣ Новейший метод отличается простотой и будет использоваться при изготовлении солнечных батарей и в микроэлектронике будущего. После активного смешивания воды, полимерных нановолокон и плотного масла, смесь быстро распространяется по поверхности огромной площади и образует тончайшую пленку. Основным преимуществом этого метода является его простота.





# We Expect Technology Innovation to Continue

65nm  
2005

45nm  
2007

32nm  
2009

22nm<sup>\*</sup>  
2011<sup>\*</sup>

14nm<sup>\*</sup>  
2013<sup>\*</sup>

10nm<sup>\*</sup>  
2015<sup>\*</sup>

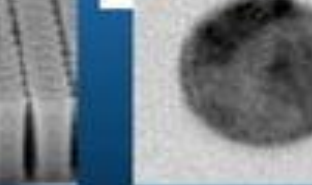
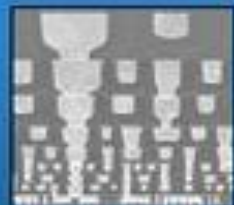
7nm<sup>\*</sup>  
2017<sup>\*</sup>

Beyond  
2019+

MANUFACTURING

DEVELOPMENT

RESEARCH



3-D

III-V

Optical Interconnect

Computational Lithography

High-K Germanium

Materials Synthesis

Interconnects

Dense Memory

Nanowires