

«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Кафедра РЛ1 «Радиоэлектронные системы и устройства»



Радиоматериалы и радиокомпоненты

Физические основы микроэлектроники

Преподаватель: **Литун Яна Борисовна**

+7 916 938 37 16

LitunY@yandex.ru

Радиоматериалы и радиокомпоненты (РМ и РК)

Контрольные мероприятия:

РК №1

РК №2

РК №3

Основная литература:

1. Пасынков В. В., Сорокин В. С. «Материалы электронной техники»: Учеб. для студ. вузов по спец. электронной техники. 3-е изд. — СПб.: Издательство «Лань», 2001. — 368 с, ил.
2. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. В 2-х томах. Том 1 М: Издательство «Лань», 2015 - 448с.
3. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. В 2-х томах. Том 2 М.: Издательство «Лань», 2015 – 384с.
4. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. - 522 с.

Физические основы микроэлектроники (ФОМ)

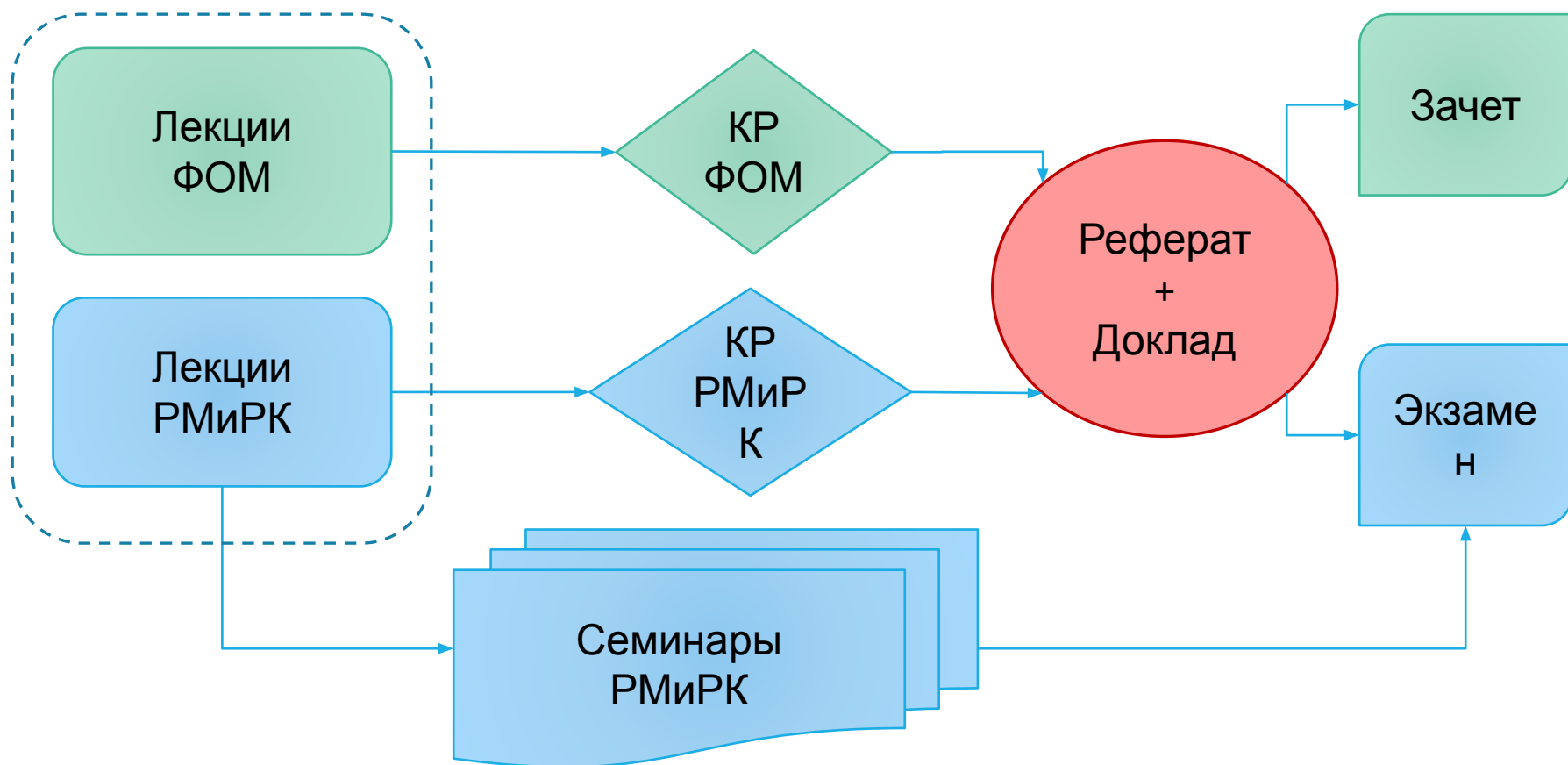
Контрольные мероприятия:

ПК №1	ПК №2	ПК №3

Основная литература:

1. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники, М.: Советское радио, 1971. — 376 с
2. Гуртов В.А. Твердотельная электроника М.: Техносфера, 2008. - 512 с. – ISBN: 978-5-94836-187-1 (3-е изд., доп.)
3. Мартинес-Дуарт Дж. М., Мартин-Палма Р.Дж., Агулло-Руеда Ф. «Нанотехнологии для микро и оптоэлектроники». М.: Техносфера, 2007. -368с.
4. Марголин В.И., Жабреев В.А., Турик В.А. Физические основы микроэлектроники, Учебник - М.: Издательский центр «Академия», 2008 – 400 с.
5. Ефимов Е.И., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники. Учебное пособие для вузов. Спб: Издательство «Лань», 2008 – 384 с.

Структура



Реферат



Выбрать
тему?

Структура реферата:

Титульный лист
Аннотация (на двух языках)
Содержание
Введение

1 Общие сведения о материале

- 1.1 Структура и строение материала
- 1.2 Свойства
- 1.3 Особенности

2 Применение материала в

- 2.1 Общие сведения
- 2.2 Конкретизация

3 Управление качеством изделия из этого материала

Заключение

Список используемых источников

(... должны присутствовать источники литературы выпущенные в ближайшие 10 лет)

Оформление реферата

Оформление текста по ГОСТ 7.32-2001

Страницы текста должны соответствовать формату А4

Текст должен быть выполнен на одной стороне листа белой бумаги, с соблюдением следующих размеров полей:

правое 10 мм; верхнее, и нижнее – 20 мм; левое – 30 мм.

Высота шрифта: $A = 12$ пт;

Высота букв в заголовках разделов: $A + 2$ пт = 14 пт;

Красная строка (абзац): 1,25;

Межстрочный интервал: Полуторный;

Расстояние между заголовками и текстом: Пропустить строку;

Расстояние между **таблицей и основным текстом** (до и после таблицы): Пропустить строку;

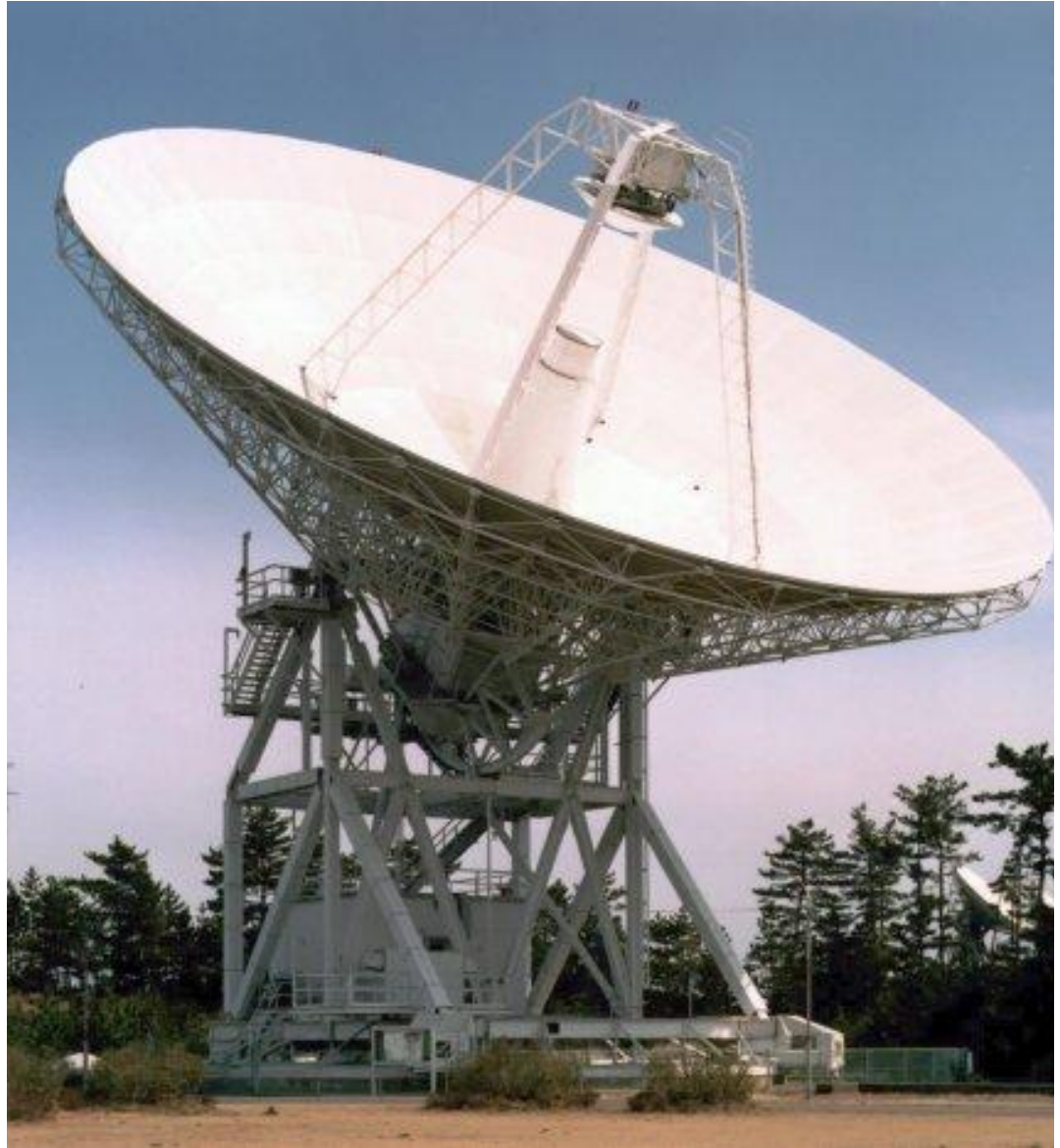
Расстояние между **рисунком и основным текстом** (до и после рисунка): Пропустить строку;

Расстояние между **формулой и основным текстом** (до и после формулы, уравнения): Пропустить строку;

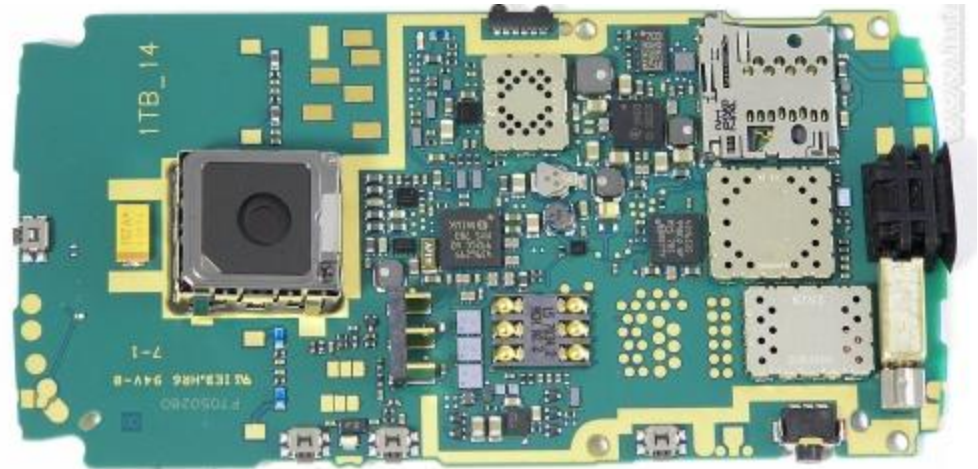
В тексте **не допускается применять подчеркивание**.

Лекция №1

Введение



1.1 Основные этапы развития электроники



Современный научно-технический прогресс неразрывно связан с расширением масштабов применения радиотехнических систем и систем телекоммуникаций.

Составной частью этих систем является радиоэлектронная аппаратура (РЭА), тоже содержащая огромное количество радиокомпонентов, для изготовления которых используются современные радиоматериалы.

Телефон Белла

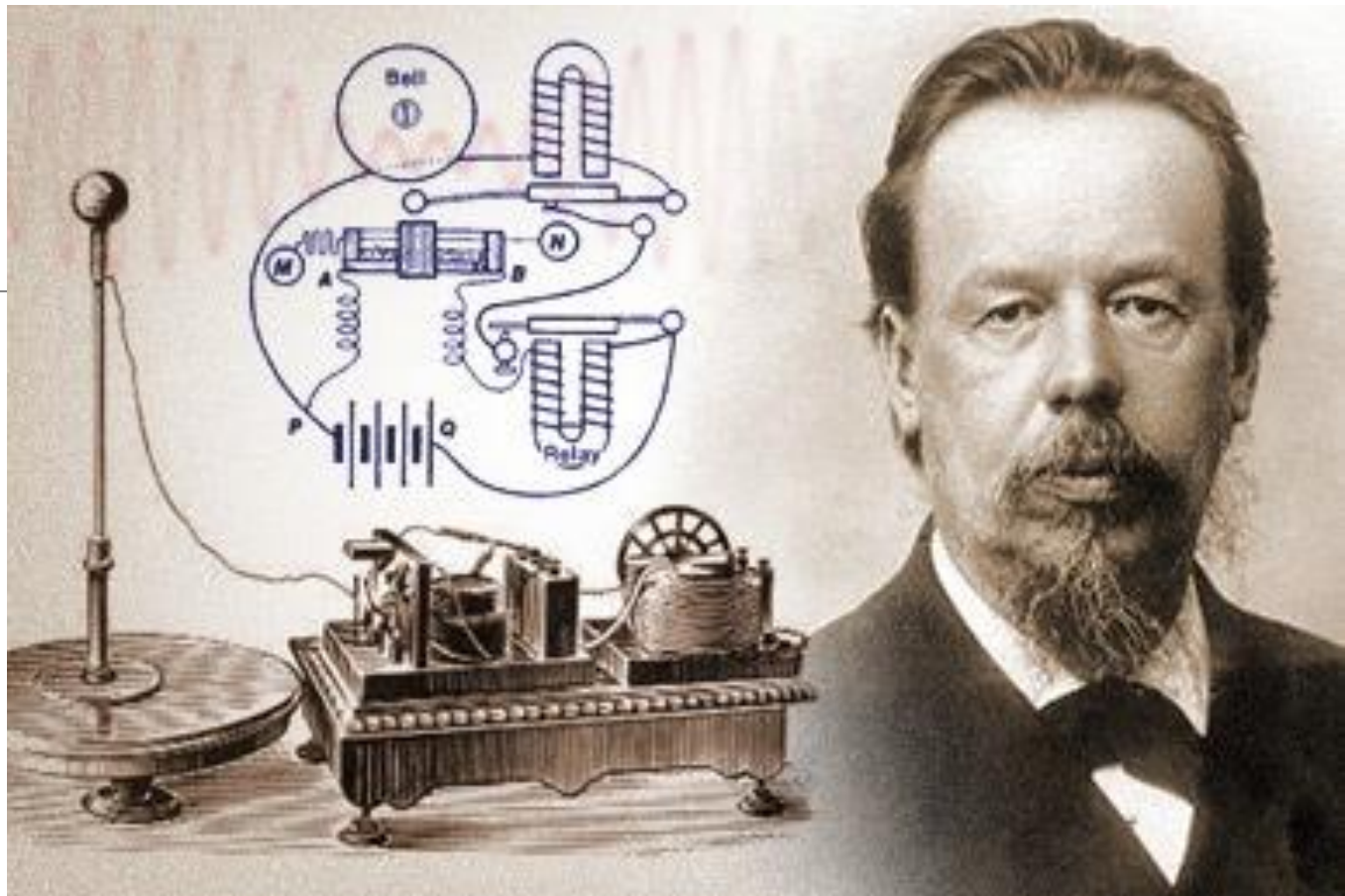


Прототип «прозрачного» телефона



Повышение эффективности систем и улучшение параметров РЭА невозможно без совершенствования элементной базы РЭА, разработки и освоения новых радиоматериалов.

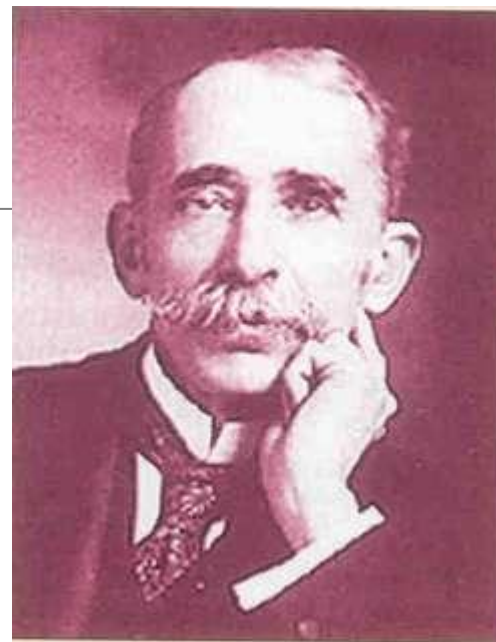
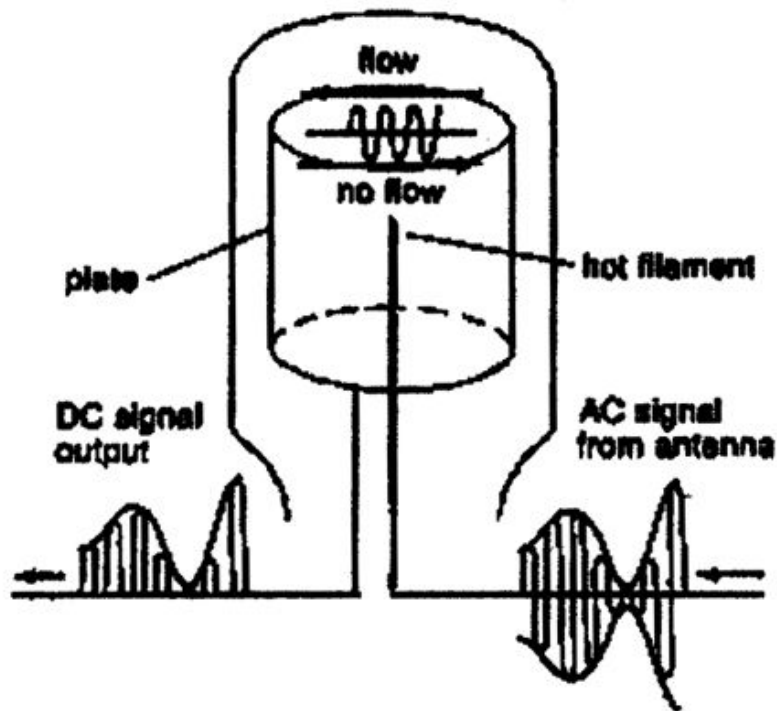
Именно радиоматериалы и радиокомпоненты стали ключевым звеном, определяющим успех многих инженерных решений при создании сложнейшей РЭА.



7 мая 1895 года
Александр Степанович **Попов**
первый в мире радиоприемник.

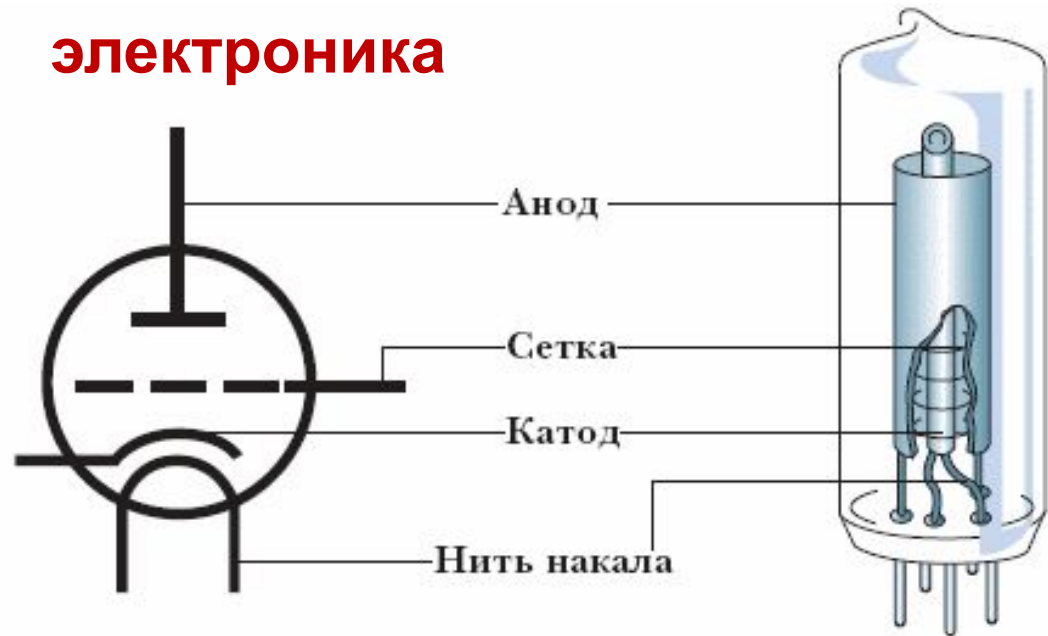
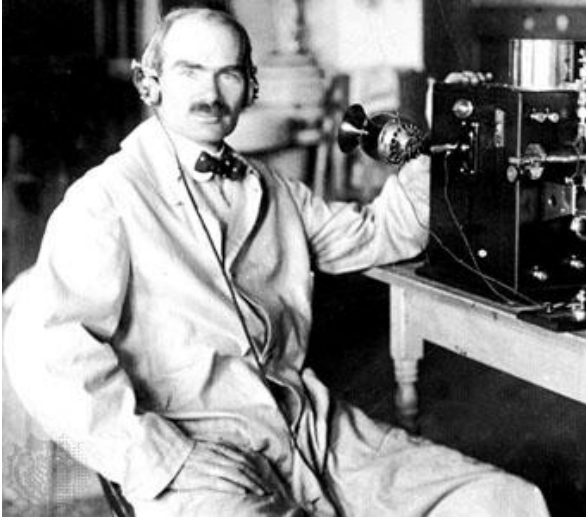
русский физик
продемонстрировал

Диод для детектирования высокочастотных колебаний

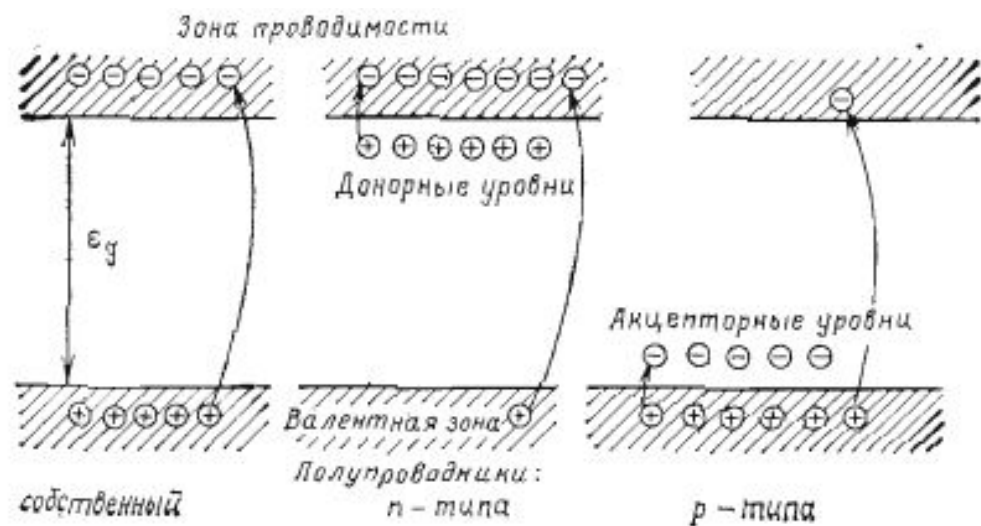


Использование электронных приборов в радиотехнике началось с того, что в 1904 году Д. Флеминг изобрел **двухэлектродную лампу (диод)** с накаливаемым катодом. В диоде использовалась **термоэлектронная эмиссия**, открытая в 1884 году Т. Эдисоном, сущность которой он, не зная об электронах, не мог объяснить. Диод был создан для конкретных технических нужд, а именно для детектирования высокочастотных колебаний.

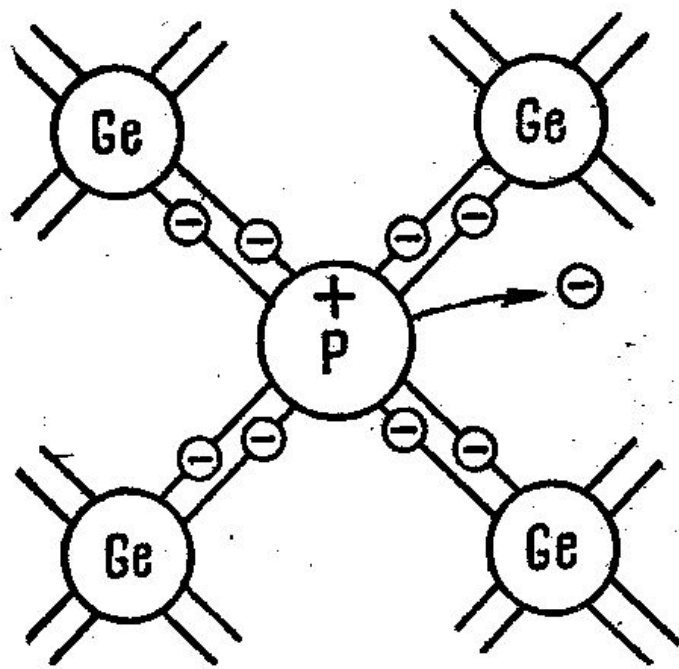
Ламповая электроника



В 1907 году Л. Форест ввел в лампу управляющую сетку, лампа стала трехэлектродной, появилась возможность управлять током, протекающим в лампе между катодом и анодом, что позволило решить проблему усиления электрических сигналов. К середине 30-х годов ламповая электроника была в основном сформирована.



В течение 30-х годов и позже интенсивно развивалась полупроводниковая электроника. Ученые исследовали физические процессы в полупроводниках, *влияние примесей* на эти процессы, *термоэлектрические* и *фотоэлектрические* свойства полупроводников, выпрямление переменного тока полупроводниковыми приборами. Олег Лосев - пионер твердотельной **полупроводниковой** электроники

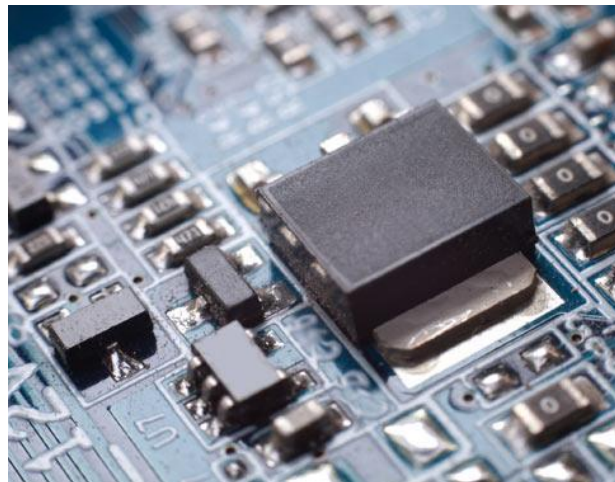


Была разработана квантовая теория полупроводников, введено понятие **подвижности свободных мест кристаллической решетки полупроводника**, получивших впоследствии название *дырок*, создана *теория генерации пар «электрон-дырка»*. Была экспериментально подтверждена теория полупроводников, созданная школой советского академика А. Ф. Иоффе.

Первые отечественные транзисторы на Ge



Современные планарные компоненты



Массовый отечественный транзистор на Si (КТ315А)

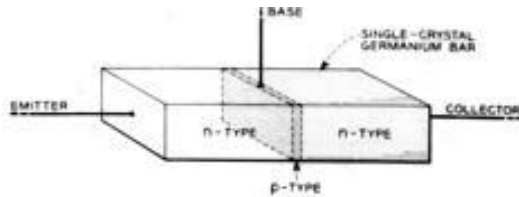
Изобретателями транзистора в 1948 г. являются Д. Бардин, У. Браттайн и У. Шокли. С изобретением транзистора начался новый этап в развитии радиоэлектроники — **этап микроминиатюризации РЭА**. Применение транзисторов вместо ламп позволило существенно сократить размеры радиокомпонентов, уменьшить массу и объем РЭА и, что не менее важно, снизить потребление электроэнергии и повысить надежность аппаратуры.

История

1947 — У. Шокли, Bell Labs, точечный транзистор

1951 — У. Шокли, Bell Labs, биполярный транзистор

1956 — У. Шокли, Нобелевская премия за открытие транзисторного эффекта



Точечный транзистор (1947)



Планарный транзистор (1951)

1952 — Bell Labs, продажа лицензий на выпуск биполярных транзисторов (\$ 25000, 26 фирм)

1954 — Bell Labs, транзистор с толщиной базы 1 мкм (частота 170 МГц)
 1955 — Bell Labs, первый полевой транзистор
 1955 — Bell Labs, в производстве уже используются все основные технологические операции микроэлектроники: осаждение изолятора, фотолитография с масками (200 мкм), травление и диффузия



Ручная нарезка маски для фотолитографии

March 20, 1962 J. A. HOERNI 3,025,589
 METHOD OF MANUFACTURING SEMICONDUCTOR DEVICES
 Filed May 1, 1959

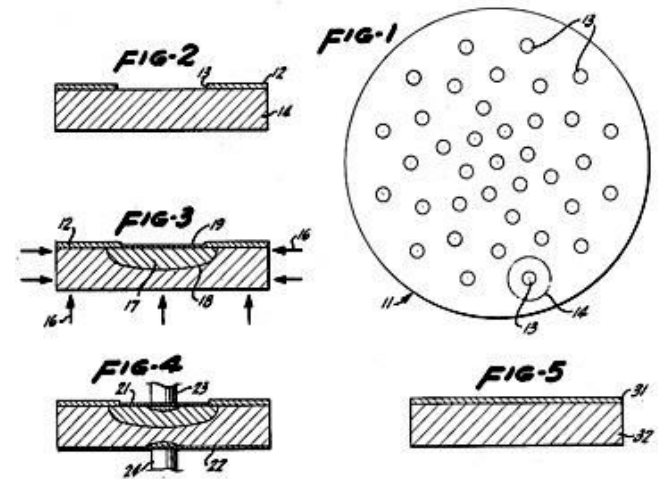
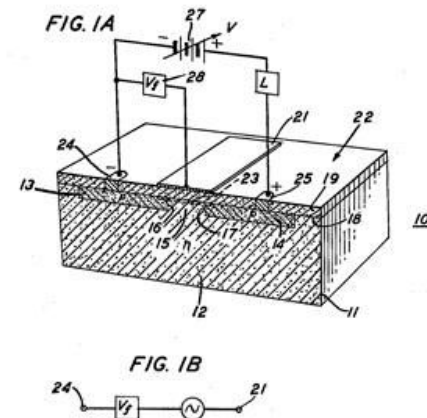


Схема из патента Эрни на планарный транзистор

Aug. 27, 1963 DAWON KAHNG 3,102,230
 ELECTRIC FIELD CONTROLLED SEMICONDUCTOR DEVICE
 Filed May 31, 1960



Патент на полевой транзистор (1960)

April 25, 1961

R. N. NOYCE

2,981,877

SEMICONDUCTOR DEVICE-AND-LEAD STRUCTURE

Filed July 30, 1959

3 Sheets-Sheet 2

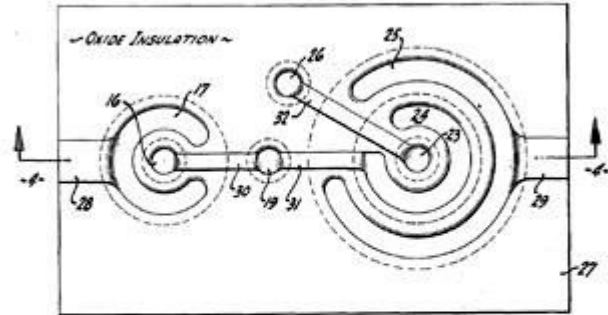


FIG-3

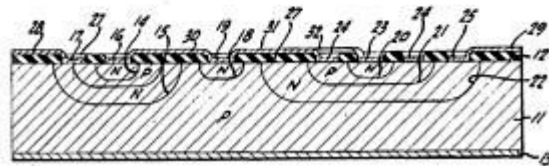
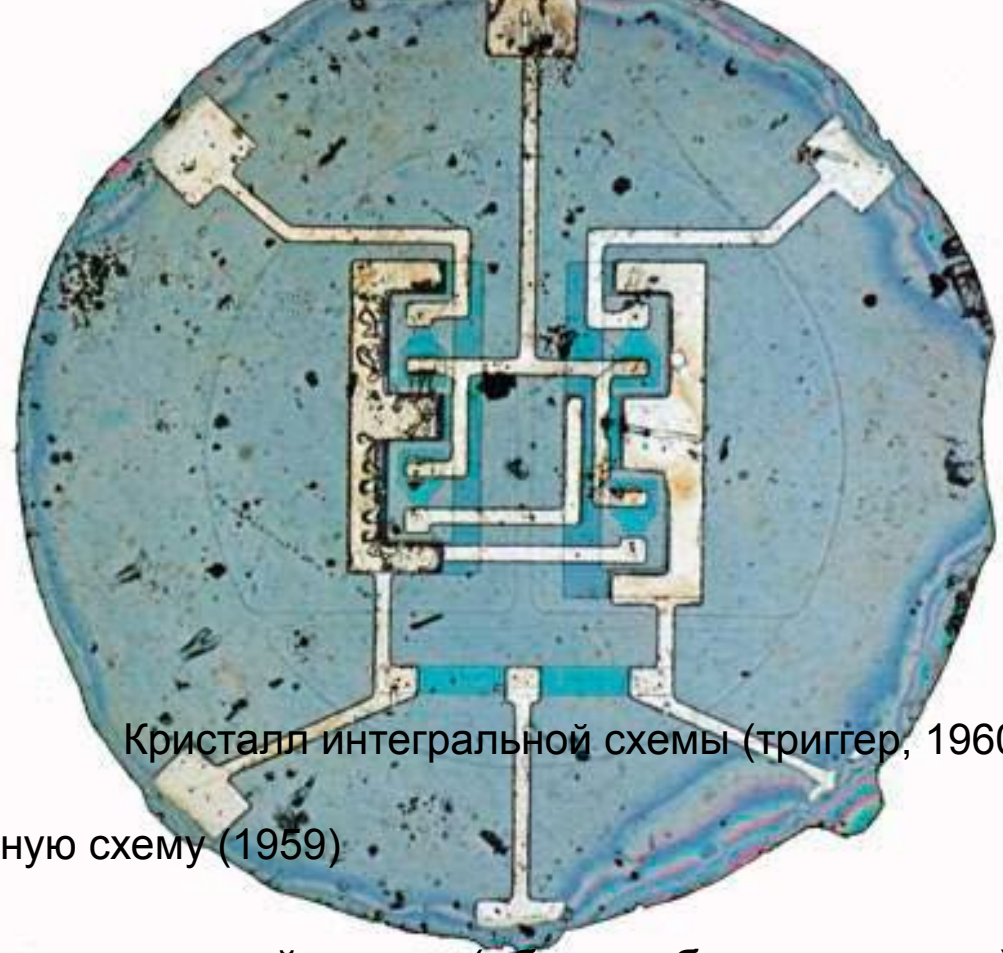


FIG-4



Кристалл интегральной схемы (триггер, 1960)

Патент Нойса на планарную интегральную схему (1959)

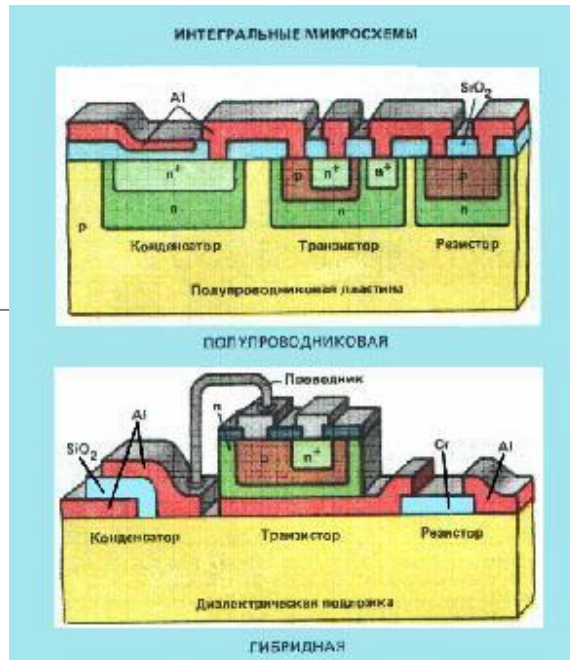
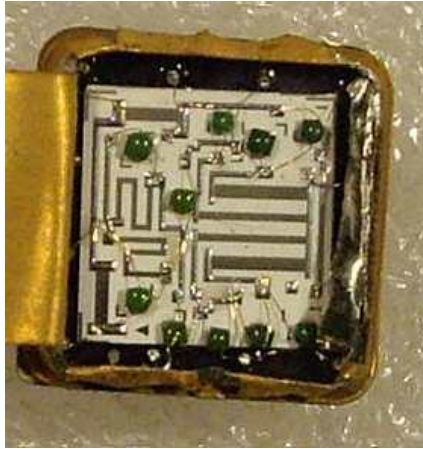
1952 — Джэффри Даммер, идея интегральной схемы («брусек без проводов»)

1958 — Джэк Килби, первая интегральная схема (пять элементов, генератор)

2000 — Джэк Килби, Нобелевская премия за создание интегральной схемы

1963 — Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ)

1963 — Фрэнк Уанласс, Fairchild, использование комплементарных МОП (КМОП) структур уменьшает энергопотребление в статике ~1.000.000 раз



Интегральные схемы в середине 60-х годов содержали до 100 элементов на полупроводниковом кристалле при размере элементов около 100 мкм. В начале 70-х годов появились большие интегральные схемы (БИС), содержавшие на кристалле от 100 до 10^4 элементов при размере элементов от 3 до 100 мкм. В конце 70-х годов созданы сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), содержащие от 10^4 до 10^6 элементов на кристалле при размере элементов от 1 до 3 мкм. Дальнейшее развитие микроэлектроники привело к освоению субмикронных размеров элементов микросхем.

Классификация ИС по степени интеграции

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.

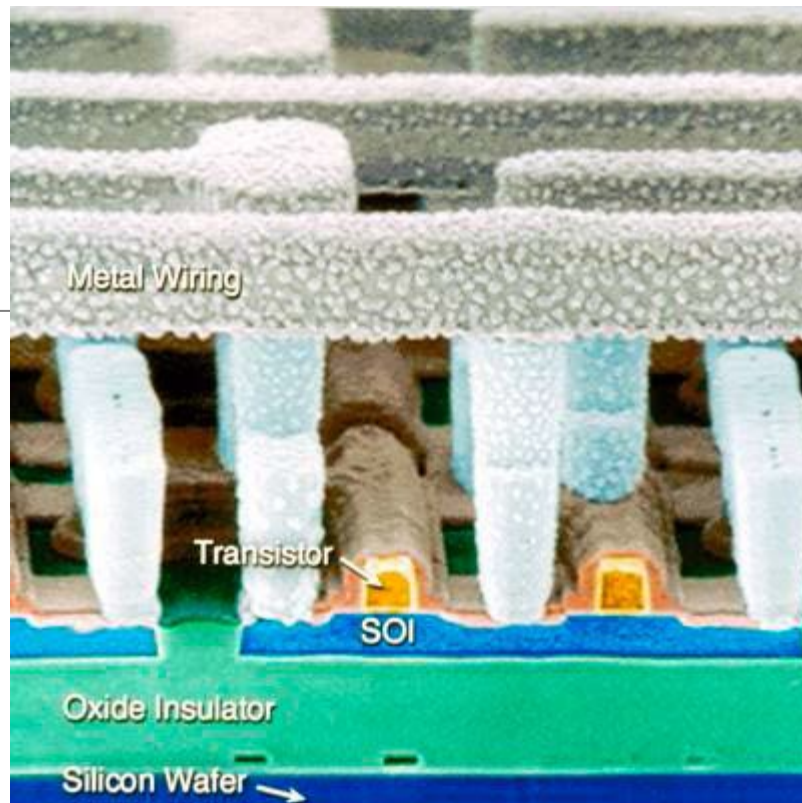
Ранее использовались также теперь устаревшие названия: ультрабольшая интегральная схема (УБИС) — от 1-10 млн. до 1 млрд. элементов в кристалле и, иногда, гигабольшая интегральная схема (ГБИС) — более 1 млрд. элементов в кристалле.

В настоящее время, в 2010-х, названия «УБИС» и «ГБИС» практически не используются, и все микросхемы с числом элементов более 10 тыс. относят к классу СБИС.

Кремний на изоляторе

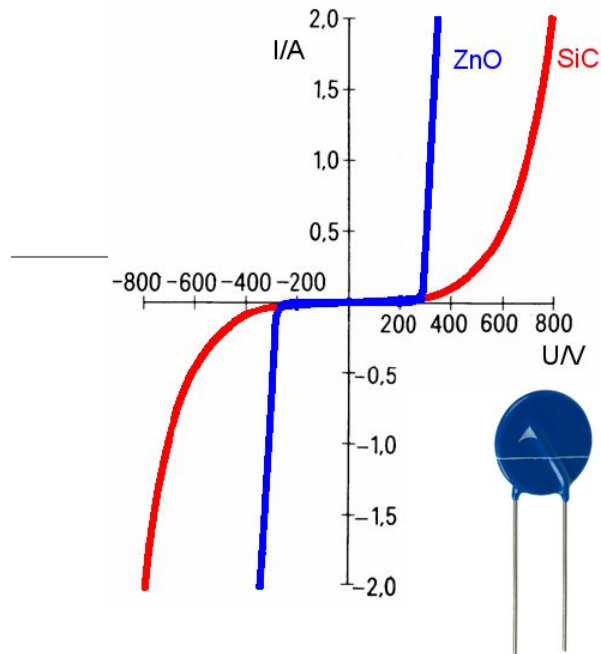
1998 — IBM, технология «кремний на изоляторе» (КНИ, SOI): на кремниевой пластине формируется слой SiO_2 (изолятор), а поверх него — тонкий слой Si.

Строго говоря, «кремний на сапфире» (КНС) — это тоже КНИ, т.к. сапфир (Al_2O_3) также является изолятором, но технология IBM дешевле и лучше приспособлена к имеющемуся оборудованию. Однако за 13 лет лидер полупроводниковой промышленности, Intel, так это и не заметил и продолжает использовать «bulk silicon», т. е. чистые кремниевые пластины, поскольку они дешевле.



Кремний на изоляторе (IBM, 1998)

Варисторы



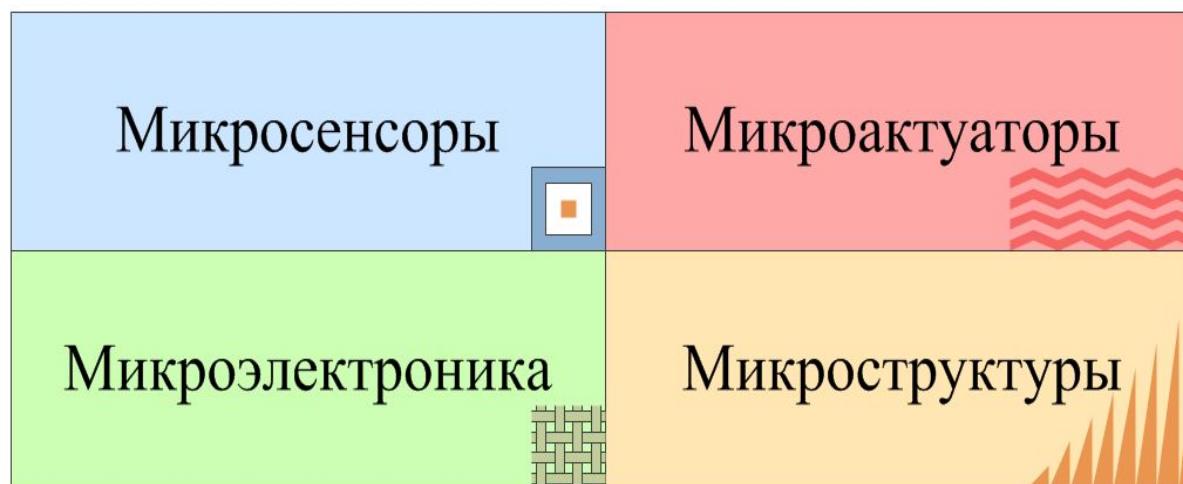
Оптоэлектронные преобразователи



Параллельно с интегральной микроэлектроникой в 80-е годы развивалась функциональная электроника, позволяющая реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов (диодов, резисторов, транзисторов и т. д.), базируясь непосредственно на физических явлениях в твердом теле. В функциональной электронике используются такие механизмы, как оптические явления (оптоэлектроника), взаимодействие потока электронов с акустическими волнами в твердом теле (акустоэлектроника) и ряд других.

Основные компоненты МЭМС

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – технологии и устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты.

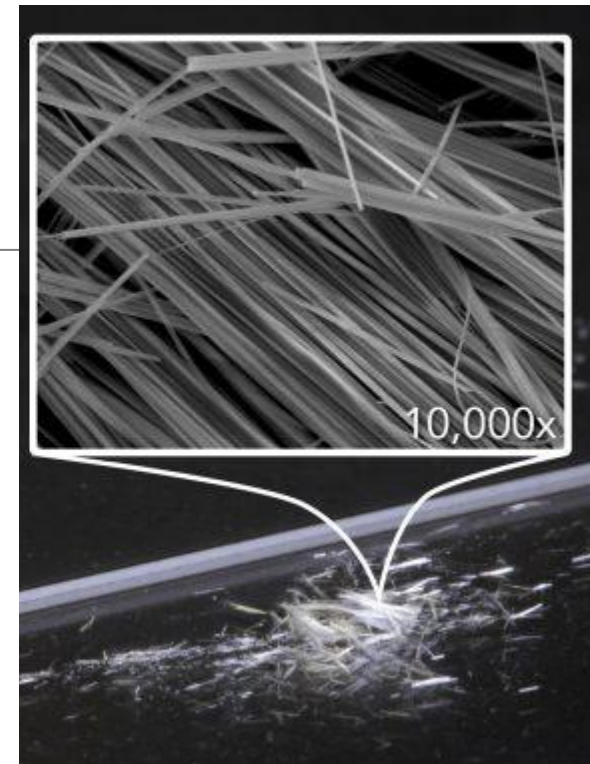
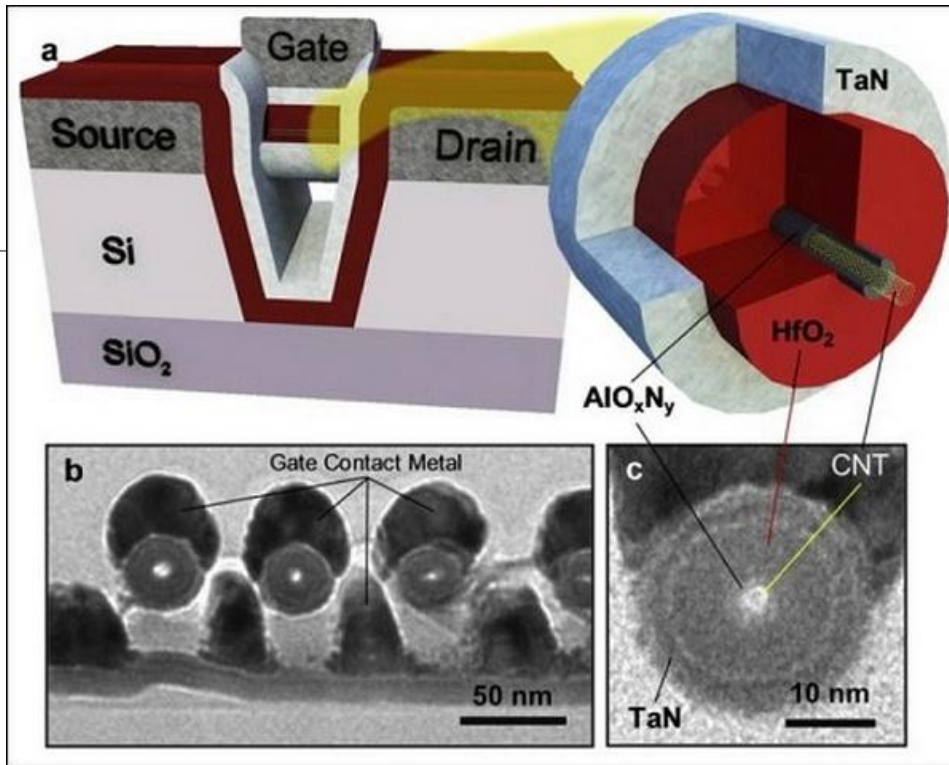


МЭМС состоят из компонентов в пределах от 1 до 100мкм,
МЭМС устройства находятся в диапазоне размером от 20мкм до 1мм.

МЭМС датчики с чувствительными элементами

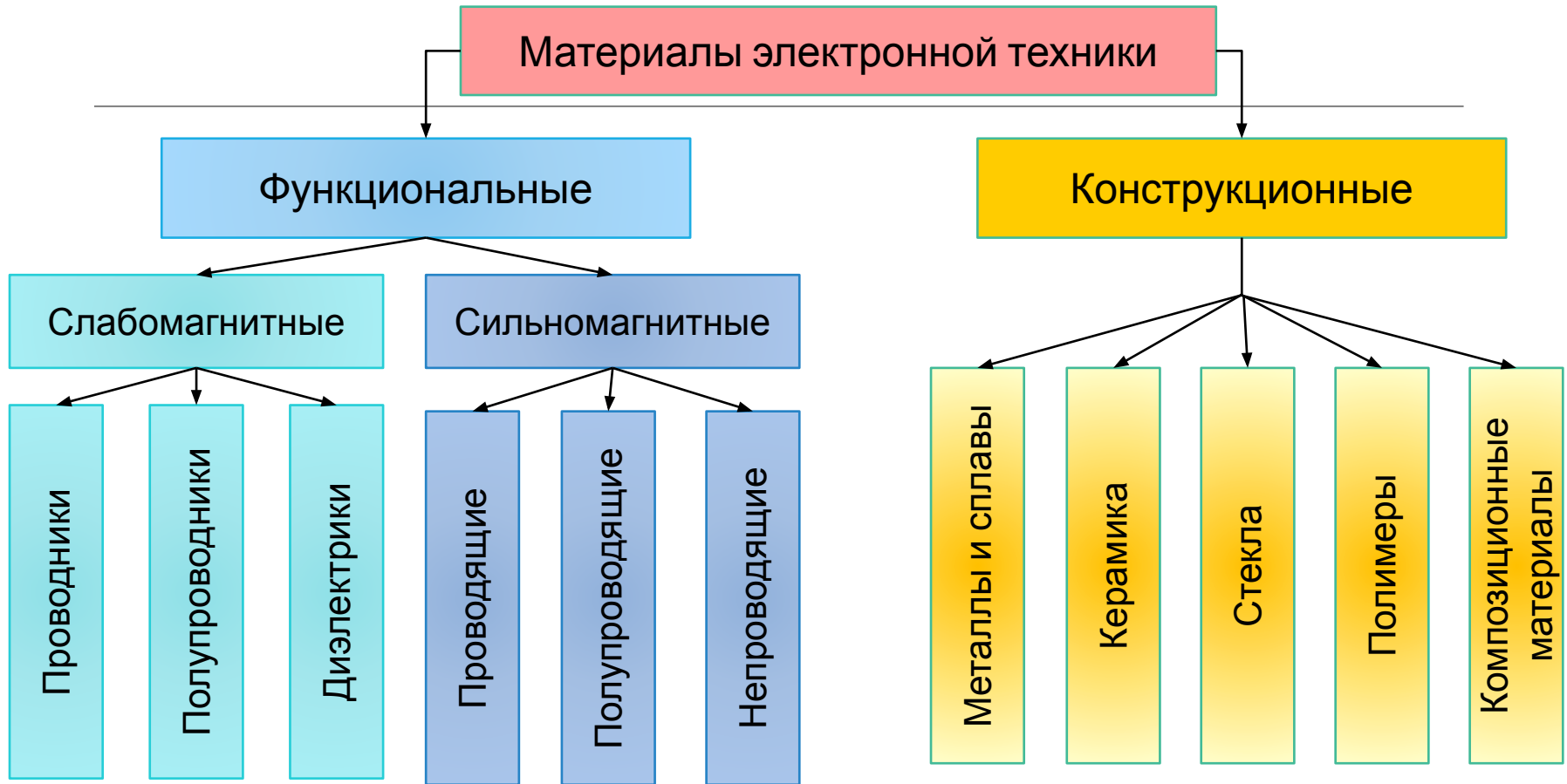
На основе МЭМС разрабатываются датчики с чувствительными элементами, такие как:

- ⊙ Акселерометры
- ⊙ Датчики угловых скоростей
- ⊙ Гироскопы
- ⊙ МЭМС-осцилляторы
- ⊙ Магнитометрические датчики
- ⊙ Барометрические датчики, датчики давления
- ⊙ Анализаторы среды, газовые датчики
- ⊙ Микрофоны
- ⊙ Фототехника



Новое направление — нанoeлектроника. В начале 90-х годов были созданы микроскопы, позволяющие не только наблюдать атомы, но и манипулировать ими. Нанотехнологии позволяют, последовательно размещая нужные атомы и атомные структуры в четком порядке и в точно определенном месте, конструировать качественно новые устройства электроники

Классификация материалов электронной техники



Классификация материалов электронной техники

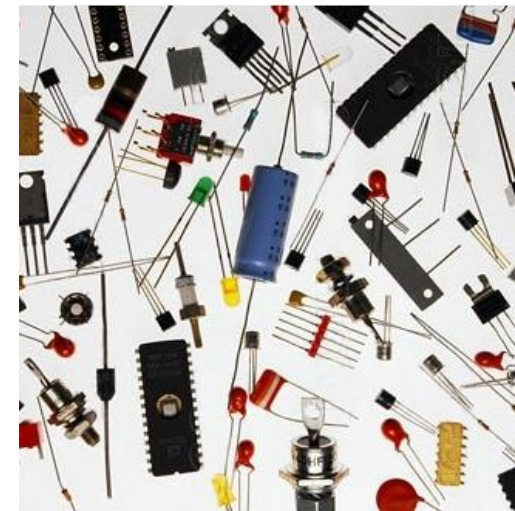
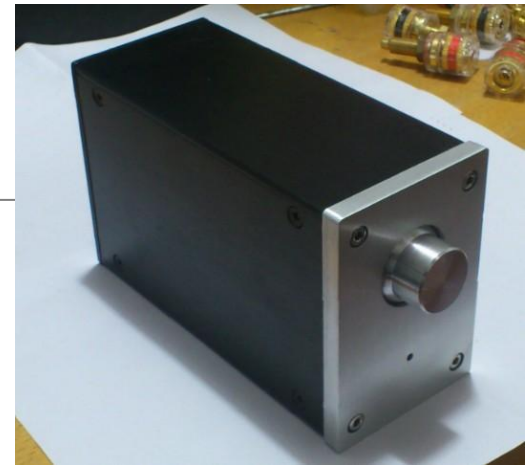


Общая классификация материалов

1. Конструкционные - вспомогательные элементы конструкций РЭС, такие как несущие конструкции, различные механизмы корпуса, крепления, изоляторы и др.

2. Радиотехнические материалы (радиоматериалы) – это материалы элементной базы РЭА; класс материалов, характеризующихся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемых в радиотехнике с учетом этих свойств.

3. Вспомогательные: отделочные, пропиточные, специального назначения и др.



Свойство – философская категория, выражающая такую сторону предмета, которая обуславливает его различность или общность с другими предметами и обнаруживается в его отношении к ним (ФЭС, стр. 568). Всякое свойство относительно: свойство не существует вне отношений к другим свойствам и вещам.—————

Параметр или характеристика – численная оценка свойства.

свойства материалов:

Механические, тепломеханические, оптические, физико-химические, электрические и магнитные, технологические, и т.п.

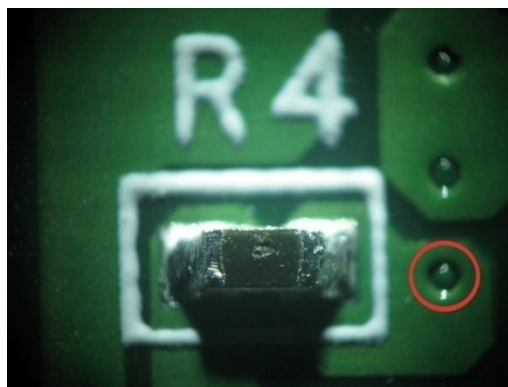
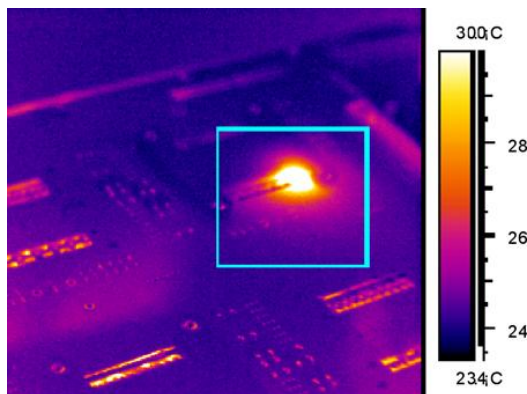
параметры материалов:

Твердость, теплопроводность, прозрачность, гигроскопичность, проводимость, магнитная проницаемость, обрабатываемость и т.п.

Каждая группа материалов имеет свои основные характеристики; для каждого конкретного материала они приводятся в справочниках.

Когда нужно выбрать материал для изготовления того или иного изделия берут справочник и подбирают по требуемым характеристикам материал. За каждым числовым значением каждого параметра стоит явление, свойство, поведение материала, которое проявляется в условиях, требуемых при эксплуатации данного элемента, прибора, устройства.

Качество материалов это способность его нормально без существенных изменений свойств функционировать при заданных воздействиях внешних и внутренних.



РАДИОМАТЕРИАЛЫ

СОСТАВ

1. Органический

$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$$
2. Неорганический
 $\text{Al}_2\text{O}_3; \text{SiO}_2$
3. Элементарорганический

$$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\ | \quad | \\ -\text{Si}-\text{O}-\text{Si}- \\ | \quad | \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$$

СТРУКТУРА

1. Кристаллическая

2. Аморфная

3. Жидкокристаллическая

4. Доменная


СРЕДА

1. Электромагнитное поле

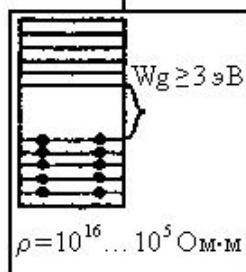
2. Тепловое поле, °C
3. Механическое поле

4. Световое поле

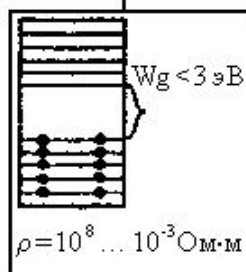
5. Радиационное поле


СВОЙСТВА

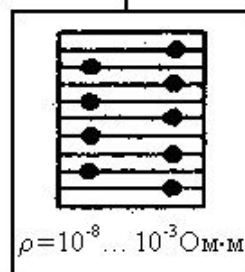
Диэлектрические



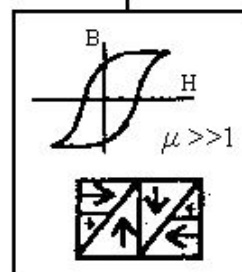
Полупроводниковые



Проводниковые



Магнитные



Конструкционные МЭТ

Конструкционными называются материалы, предназначенные для изготовления корпусов и деталей различных приборов и устройств электронной техники. Как правило, эти материалы выполняют **вспомогательные функции**, причем корпуса приборов и детали конструкций характеризуются большим разнообразием форм и размеров.

К ним предъявляются прежде всего жесткие эксплуатационные, технологические и экономические требования.

Конструкционные материалы принято подразделять на:

- материалы общего назначения (универсальные) и
- конструкционные материалы со специальными свойствами (специализированные).

Основные эксплуатационные требования к конструкционным материалам сводятся к достижению **высокой конструкционной прочности** изготавливаемых деталей и узлов, а также обеспечению устойчивого «иммунитета» к воздействию внешней среды.

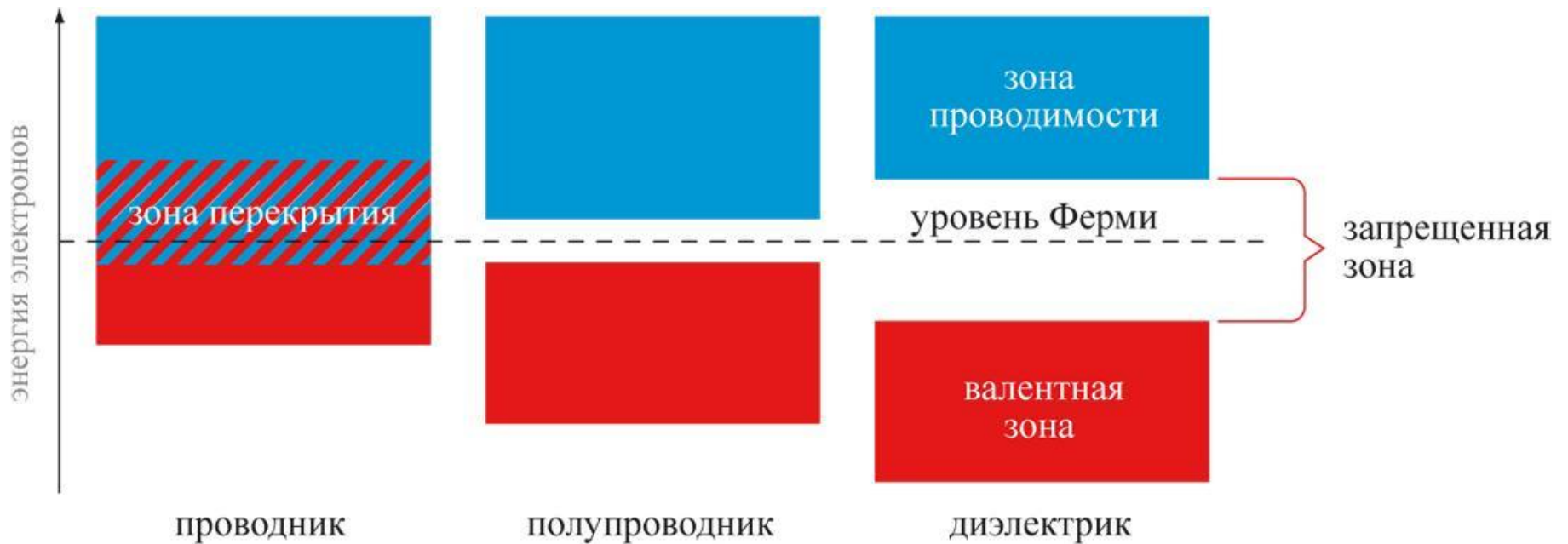
Под конструкционной прочностью понимают комплекс механических свойств, гарантирующих надежную и длительную эксплуатацию материала в заданных условиях.

Функциональные МЭТ

Под **функциональными МЭТ** следует понимать материалы, которые обеспечивают реализацию определенных функций в элементах электронной аппаратуры. При использовании таких материалов в приборах и устройствах электроники, в первую очередь, принимаются во внимание их **электрические свойства**.

В качестве примеров функциональных МЭТ можно назвать резистивные, конденсаторные и электроизоляционные материалы, высокопроводящие и сверхпроводящие вещества, материалы для хранения и записи информации, материалы с нелинейными электрическими свойствами, материалы для активных элементов полупроводниковой электроники, таких как диоды, транзисторы, лазеры, фотодетекторы и др.

Элементы зонной теории



По реакции на внешнее электрическое поле функциональные МЭТ принято подразделять на **проводники, полупроводники и диэлектрики**.

По реакции на электрическое поле материалы делят на:

Проводники
(удельное сопротивление
 $10^{-5} \dots 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}$)

Полупроводники
(удельное сопротивление
 $10^{-5} \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$)

Диэлектрики
(удельное сопротивление
 $10^8 \dots 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{см}$).

Объективным критерием, по которому определяют принадлежность материала к той или иной группе, является **удельное электрическое сопротивление ρ** в нормальных условиях эксплуатации.

Формально к проводникам относятся материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а к диэлектрикам — материалы, у которых $\rho > 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

При этом важно иметь в виду, что удельное сопротивление хороших проводников электрического тока может составлять всего лишь $10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а у лучших диэлектриков оно превосходит значения $10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Удельное сопротивление полупроводников в зависимости от строения и состава материалов, а также от условий их эксплуатации может изменяться в очень широких пределах — от 10^{-5} до $10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.



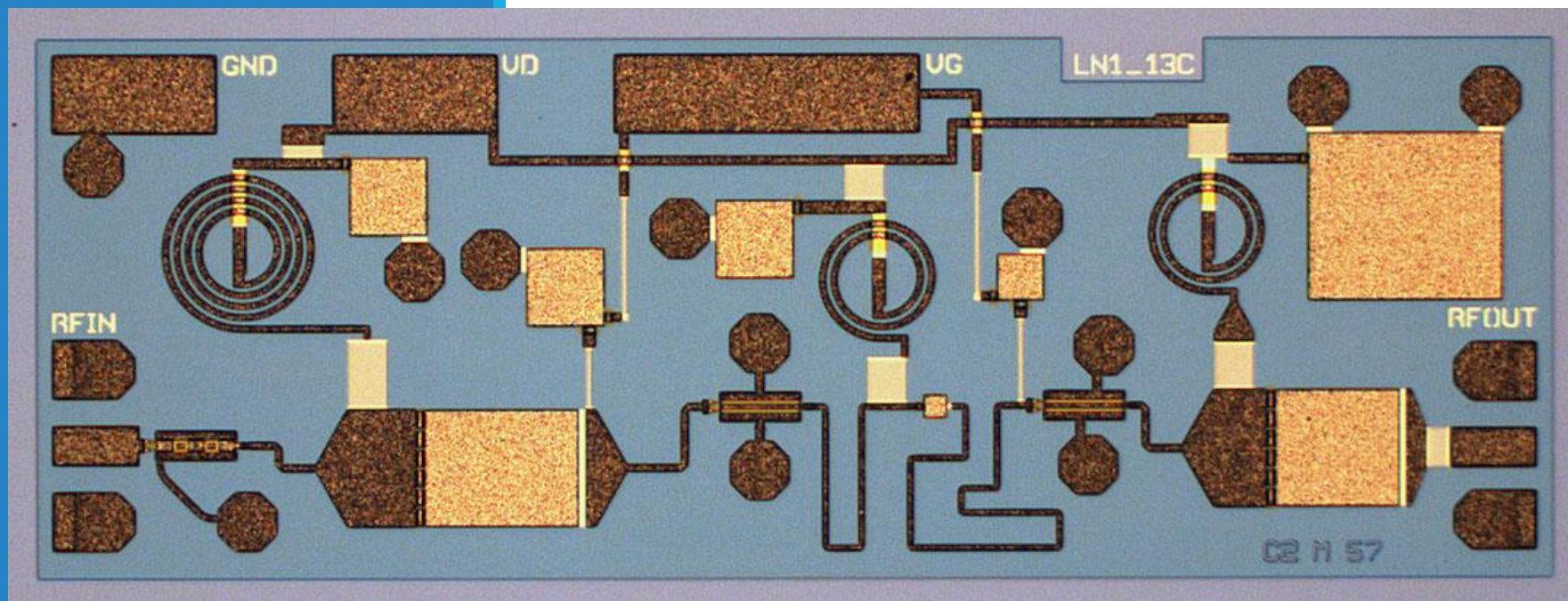
Качественное различие между материалами состоит в том, что для металлов проводящее состояние является основным, а для полупроводников и диэлектриков — возбужденным.

Развитие радиотехники потребовало создания диэлектриков, в которых **специфические высокочастотные свойства сочетаются с необходимыми теплофизическими и физико-механическими характеристиками**, а также с высоким удельным сопротивлением. Такие материалы получили название **высокочастотных диэлектриков**. Кроме того, в зависимости от функций, выполняемых диэлектриками в электронной аппаратуре, они подразделяются на активные и пассивные материалы. С помощью активных диэлектриков осуществляется преобразование различных сигналов и управление параметрами электрических цепей.

К пассивным относятся электроизоляционные и конденсаторные материалы.

Лекция №2

Введение

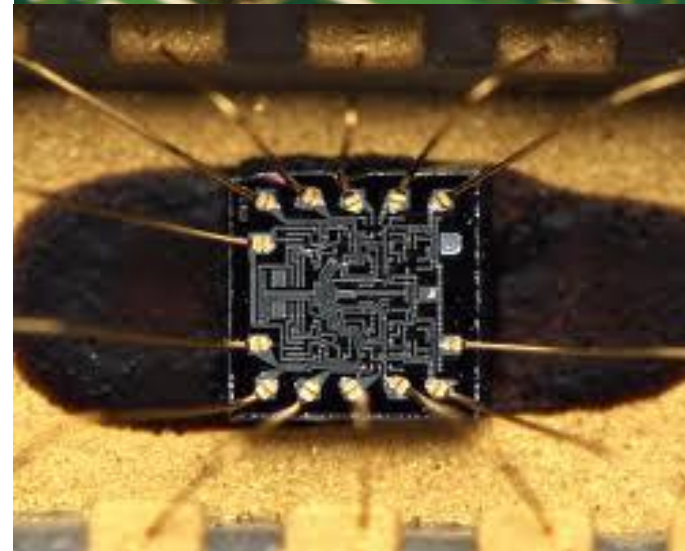
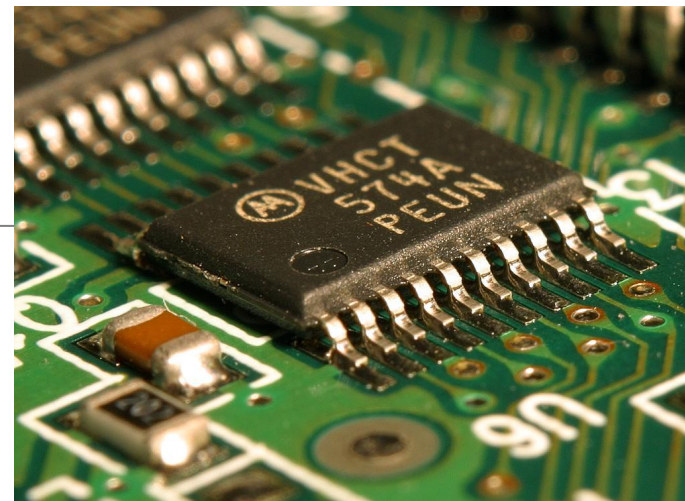


Микроэлектроника

Микроэлектроника — подраздел электроники, связанный с изучением и производством электронных компонентов с геометрическими размерами характерных элементов порядка нескольких микрометров и меньше.

Основная задача которого — создание высоконадежных экономичных микроминиатюрных электронных схем и устройств, которые могут иметь сложную функциональную структуру.

Большинство компонентов обычной электроники: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы, изоляторы и проводник — также применяются и в микроэлектронике, но уже в виде миниатюрных устройств в интегральном исполнении.



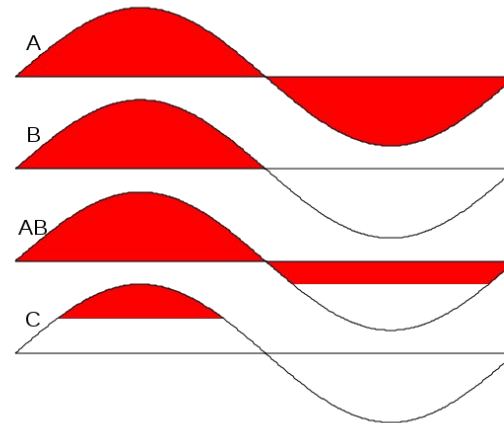
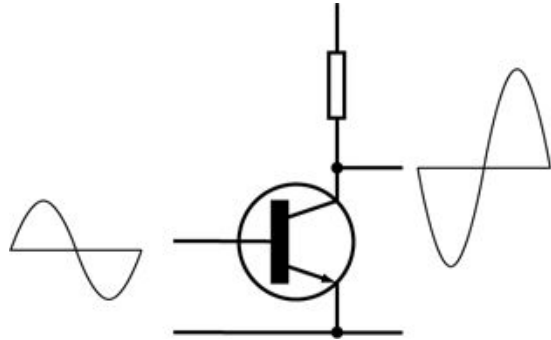
Классификация ИМС по виду обрабатываемого сигнала

Аналоговые

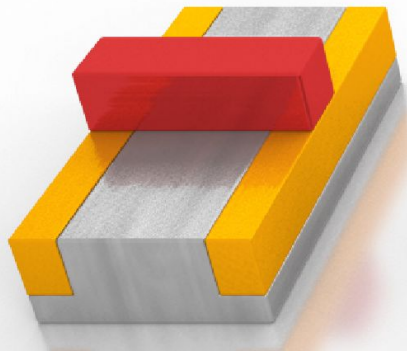
Цифровые

Аналого-цифровые

Аналоговые микросхемы — входные и выходные сигналы изменяются по закону непрерывной функции в диапазоне от положительного до отрицательного напряжения питания.

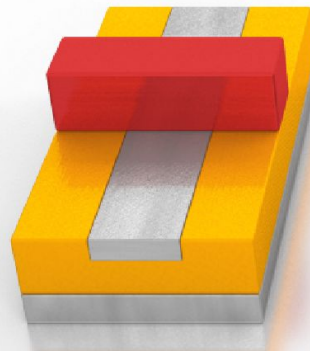


No end in sight for logic scaling



N20

Bulk CMOS:
Complementary
Metal Oxide
Semiconductor



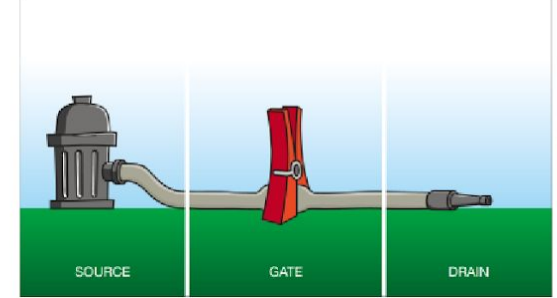
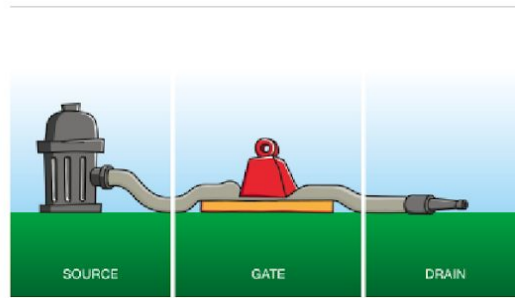
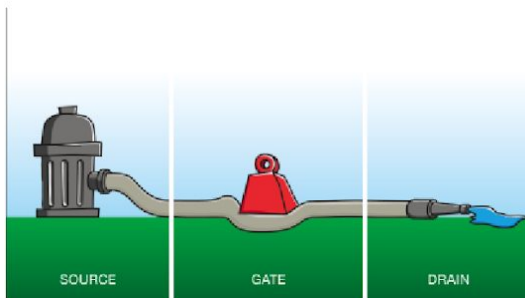
N20 / N14

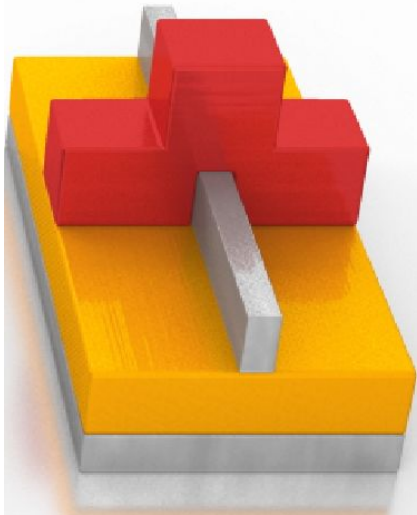
SOI:
Silicon on Insulator



N1x / N7

Bulk FinFet :
Fin field effect
transistor

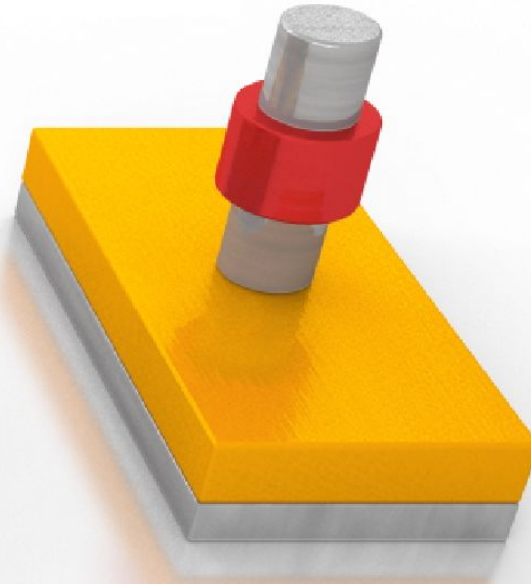




N7 / N5

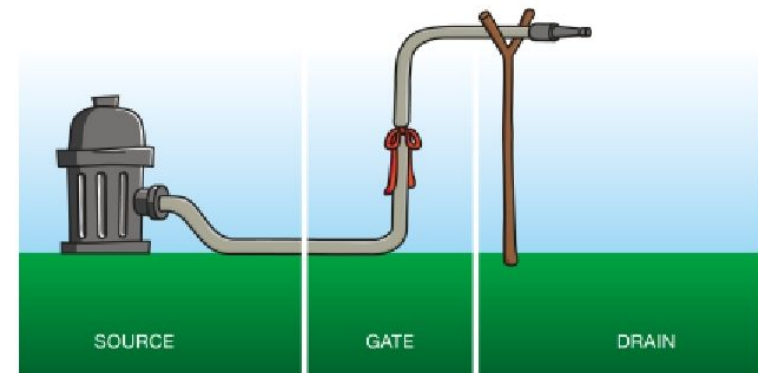
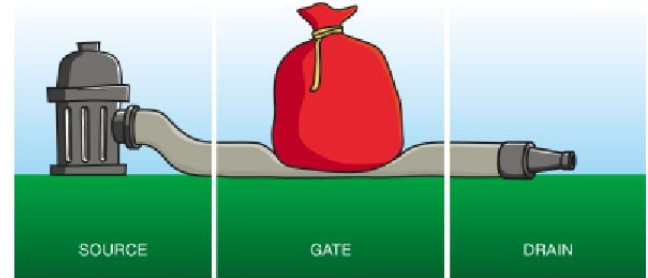
SOI FinFet :

Silicon on insulator
fin field effect
transistor, III-V



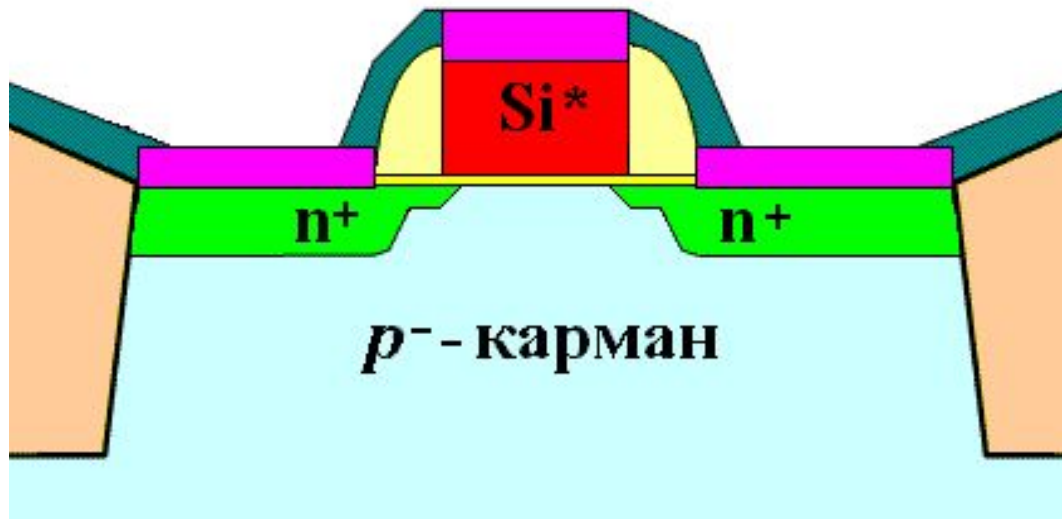
N5 / N3.5

Gate-all-around
transistor

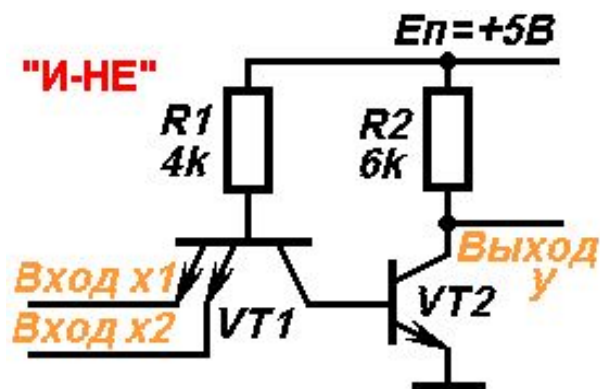
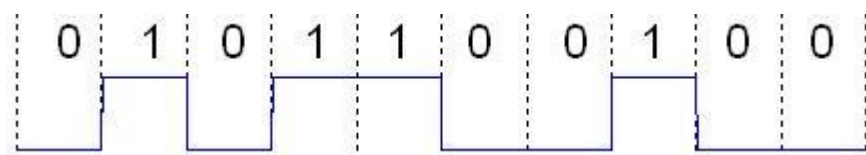


Структура ИМС

Это последовательность слоев в составе микросхемы по нормали к поверхности кристалла, различающихся материалом, толщиной и электрофизическими свойствами.



Цифровая электроника — входные и выходные сигналы могут иметь два значения: логический ноль или логическая единица, каждому из которых соответствует определённый диапазон напряжения.



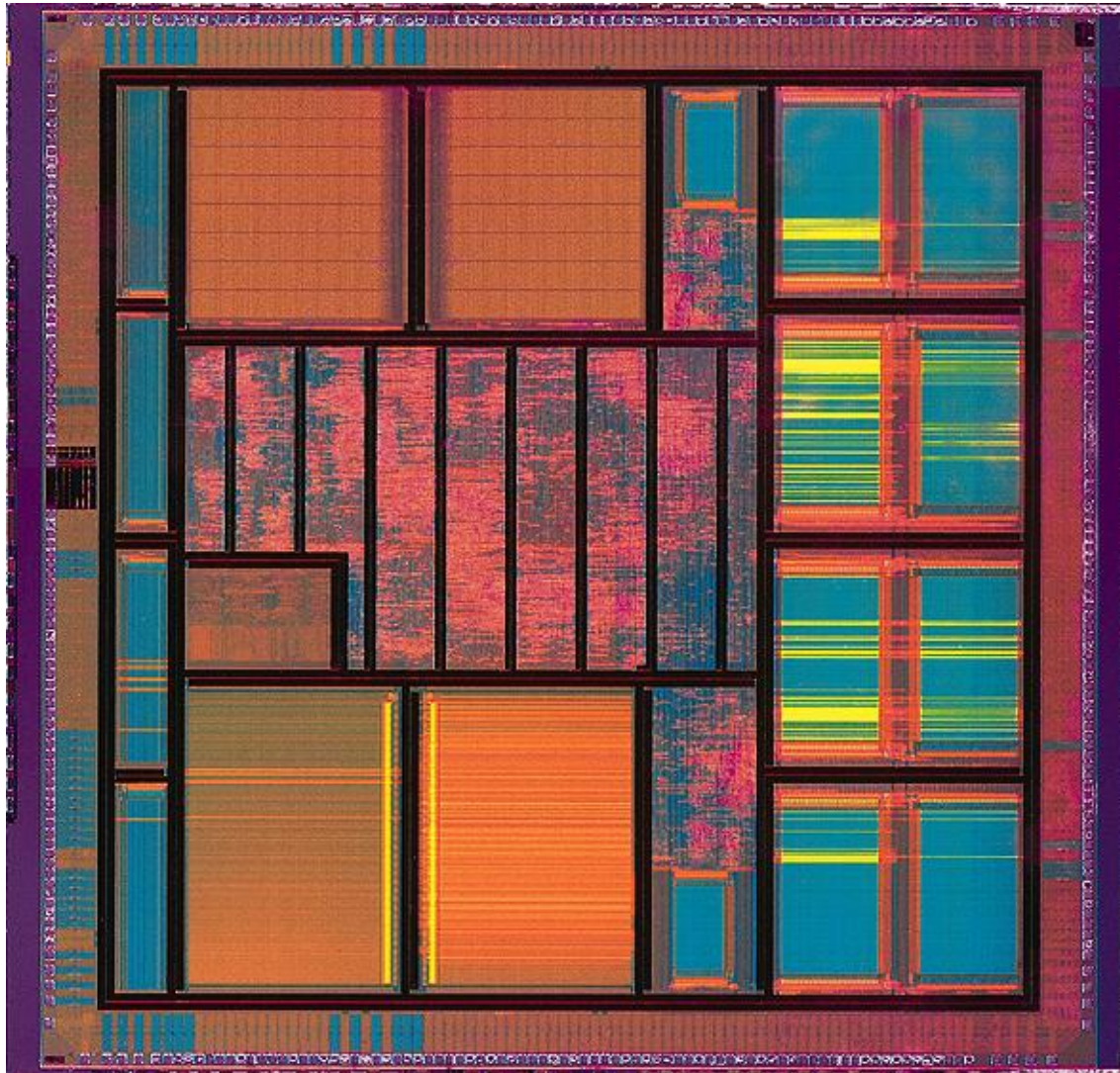
x_2	x_1	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



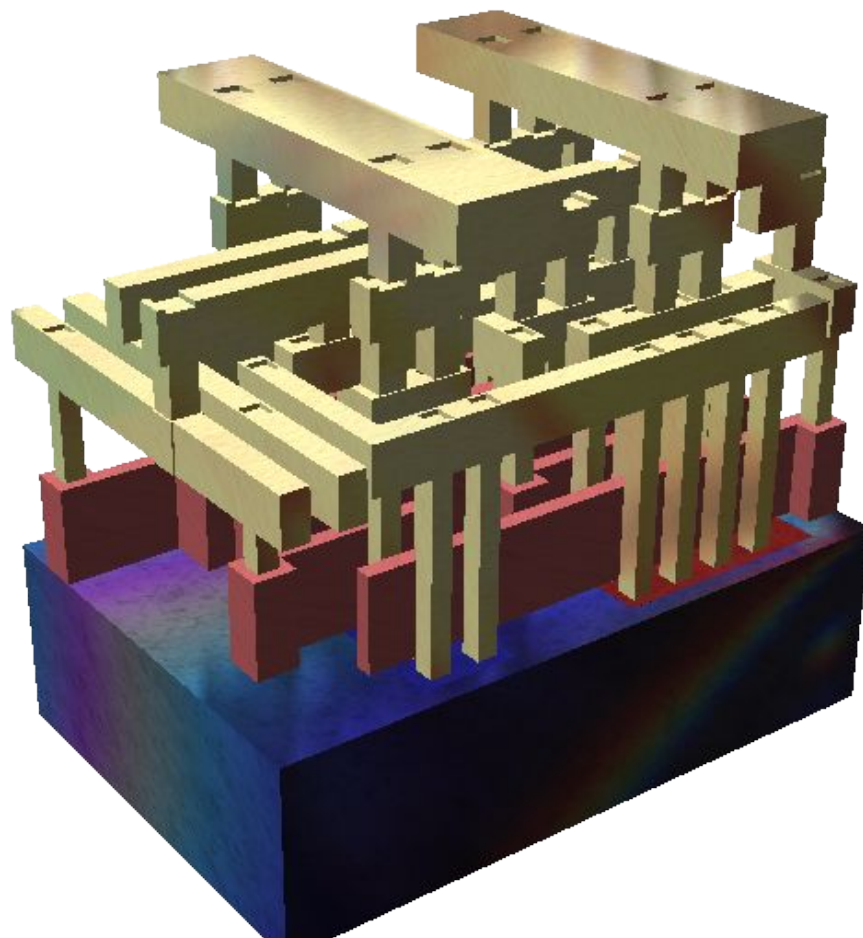
Например, для микросхем типа ТТЛ при напряжении питания $+5\text{ В}$ диапазон напряжения $0 \dots 0,4\text{ В}$ соответствует логическому нулю «0», а диапазон от $2,4$ до 5 В — логической единице «1».

Аналого-цифровые микросхемы совмещают в себе формы цифровой и аналоговой обработки сигналов, например, усилитель сигнала и аналого-цифровой преобразователь.

Общая топология БИС и СБИС

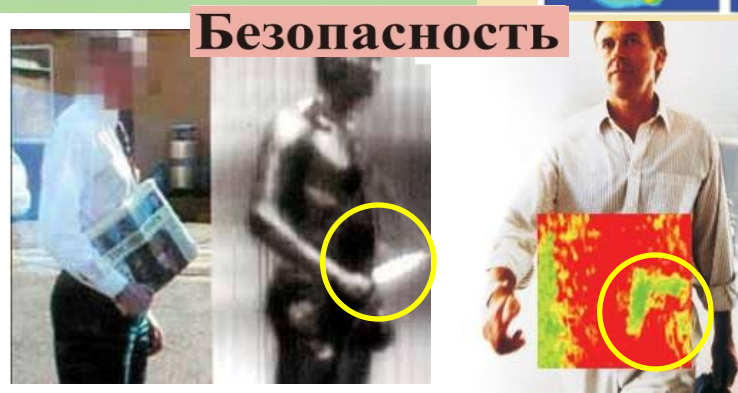
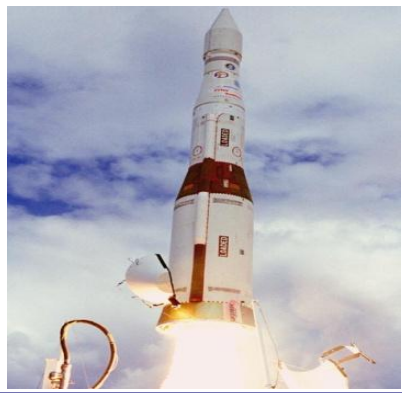
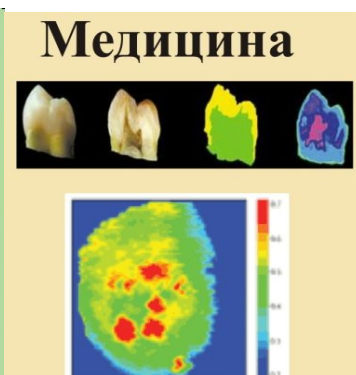


3D-модель кристалла ИМС

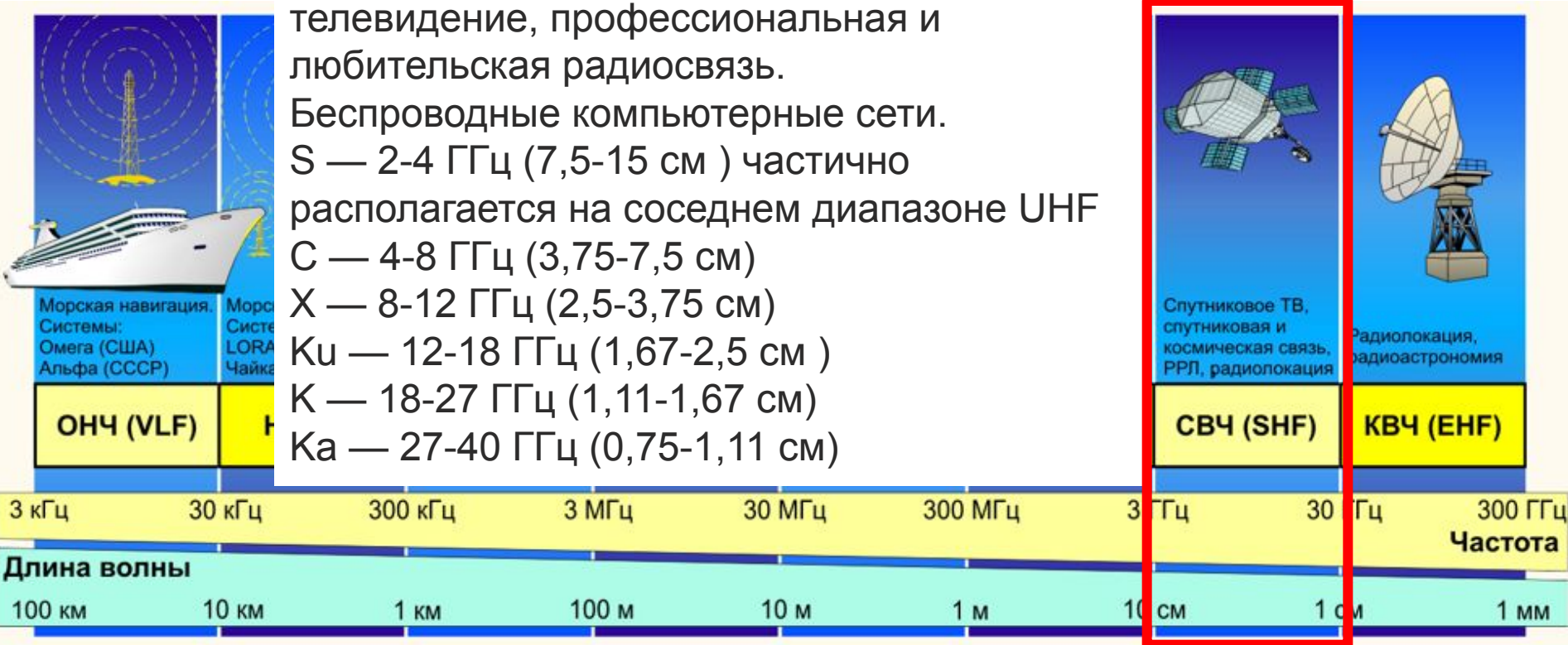


Прогресс электроники - важнейшая составляющая развития цивилизации

- ▶ вычислительная техника обработка информации
- ▶ связь передача потоков информации
- ▶ безопасность сканеры, распознавание веществ и угроз
- ▶ оборона радиолокация, оружие: РЭБ, ионосфера, лазер
- ▶ космические исследования радиоастрономия, исследования вселенной
- ▶ биология и медицина теравидение, молекулярная спектроскопия



УКВ (Ультра Короткие Волны),
 SHF/Сантиметровые/Сверхвысокие (СВЧ)
 Радиолокация, интернет, спутниковое
 телевидение, профессиональная и
 любительская радиосвязь.
 Беспроводные компьютерные сети.
 S — 2-4 ГГц (7,5-15 см) частично
 располагается на соседнем диапазоне UHF
 C — 4-8 ГГц (3,75-7,5 см)
 X — 8-12 ГГц (2,5-3,75 см)
 Ku — 12-18 ГГц (1,67-2,5 см)
 K — 18-27 ГГц (1,11-1,67 см)
 Ka — 27-40 ГГц (0,75-1,11 см)



Спутниковое ТВ, спутниковая и космическая связь, РРЛ, радиолокация

Радиолокация, радиоастрономия

СВЧ (SHF) **КВЧ (EHF)**

Рост рабочей частоты радиоэлектронных приборов



телекоммуникации,
связь, интернет



локация, метео-л.
радиоастрономия



сканеры
безопасности
диагностика

▶ возрастающие плотности потоков информации

▶ острофокусированные радиолучи. Особенности распространения в среде

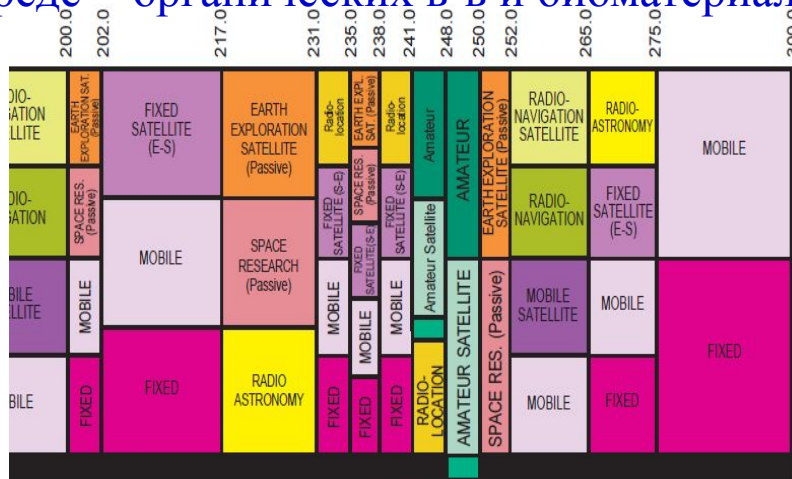
▶ прозрачность одежды в ТГц молекулярная спектроскопия органических в-в и биоматериалов

▶ Более низкие СВЧ частоты (до 50 ГГц) уже распределены по назначению и возможности их уплотнения исчерпаны.

▶ В США радиодиапазоны уже поделены вплоть до 300 ГГц.

▶ В России - отставание: ЭКБ только до 12-40 ГГц

▶ Для обеспечения растущей потребности в СВЧ необходимо **расширение диапазонов работы перспективных устройств в миллиметровый и субмиллиметровый (Терагерцовый) диапазоны длин волн**



ISM - 245.0 ± 1GHz

300 GHz

Расширение областей использования электроники

расширяется диапазон условий применения → требования к устойчивой и продолжительной работе в **СПЕЦИАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ**

- ▶ Электроника в космосе
- ▶ Военная ЭКБ
- ▶ Специальная электроника
- ▶ ЭКБ для атомной энергетики

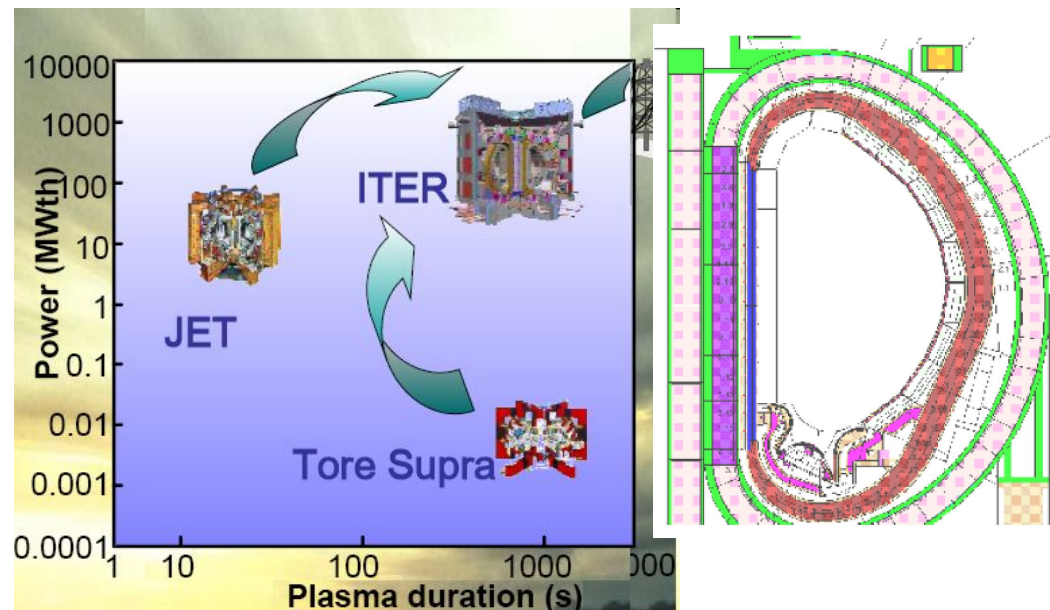
Ионизирующие излучения, корпускулы, p , e , $h\nu$, n , импульсы ЭМ поля
высокие/низкие температуры, ускорение

экстремальная температура



▶ **GaN транзистор**
работает при $T=1000\text{ }^\circ\text{C}$

экстремальная радиация



▶ контроль магнитного поля в системе удержания плазмы в **ITER** реакторе:
InAs сенсор магнитного поля
устойчив при флюенсе нейтронов $>10^{19}\text{ см}^{-2}$

Параметры твердотельной СВЧ электронной компонентной базы

Технологическая платформа СВЧ (2012):



В РОССИИ:

промышленность выпускает приборы ТТЭ на частоты до ~ 20 ГГц

▶ параметры текущей и плановой ЭКБ **отстают от зарубежного уровня** :

- в 5 – 50 раз по мощности,
- в 5 – 10 раз по частоте
- на ~ 5 – 10 лет по уровню промышленных технологий

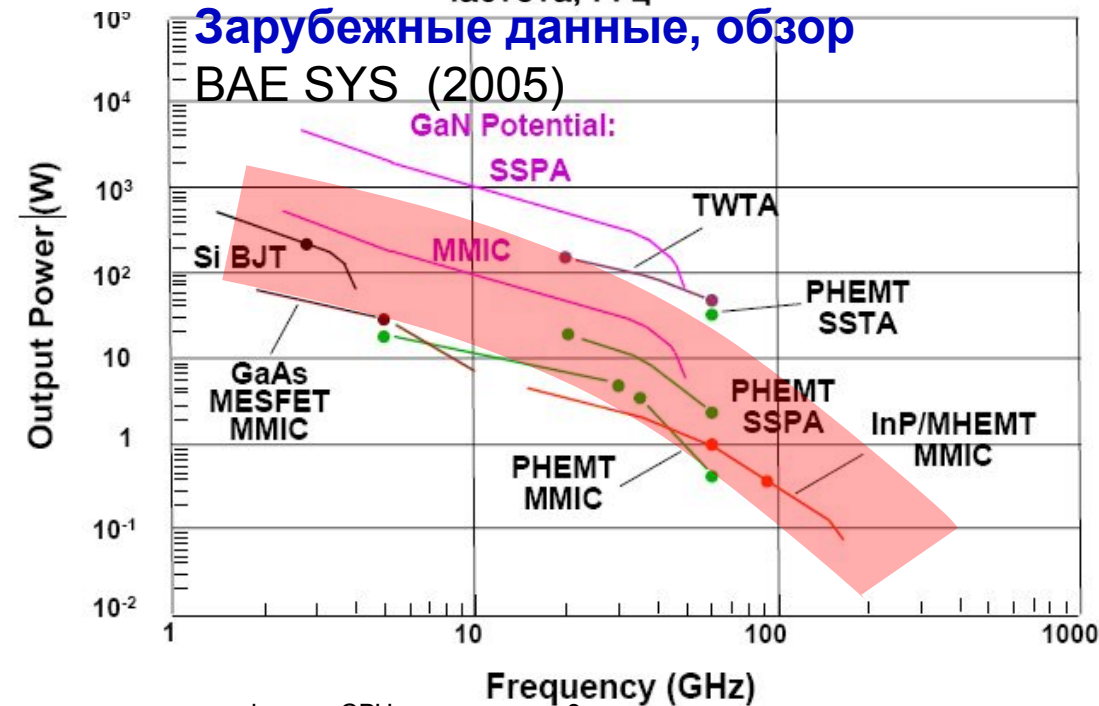
▶ **ОСТРО ВСТАЕТ ПРОБЛЕМА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ**

▶ Необходимы отечественная технология для ЭКБ на диапазоны 20 – 75 ГГц с быстрым достижением результата (1 - 2 года)

▶ и стратегические перспективы на 90-180 ГГц (2 - 4 года)

Зарубежные данные, обзор

BAE SYS (2005)



Тренды современной электроники

Радиоэлектроника

Радиолокация
Телекоммуникации и связь
Сканеры безопасности

Цифровая электроника

Процессоры
Контроллеры
Быстродействующая память

Увеличение частоты

проблемы

увеличение мощности и КПД
снижение шумов

увеличение интеграции
миниатюризация
снижение мощности

► Физика
и технология

задачи

Использование новых материалов и конструкций

Уменьшение длины затворов транзисторов
Совершенствование нанотехнологии создания
материалов

и топологических элементов

Увеличение диаметра пластин

Системная интеграция: система на одном чипе

► **Экономика**

► АЗВ5 гетероструктурные НЕМТ транзисторы

► кремниевая электроника, MOSFET транзисторы

► **каждый шаг вперед на пути улучшения современных приборов встречает колоссальные физические и технологические трудности**

СОВРЕМЕННАЯ НАНО- И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

► Развиваются следующие важнейшие направления разработок: перспективных

Материалов - на основе которых работает элемент?

Технологий - каким способом создать материал или прибор?

Приборов - как должен работать прибор?

Области применения - для СВЧ, квантовой и специальной электроники

МАТЕРИАЛЫ

- Гетероструктуры для
- СВЧ электроники
- силовой электроники
- светодиодов
- сенсоров
- **A3B5, A3N, SiC**

ТЕХНОЛОГИИ

- электронная наноитография с топологической нормой до 50 нм
- формирование квантовых устройств и нанотранзисторов

ПРИБОРЫ

- СВЧ транзисторы и прототипы схем МИС СВЧ до мм-диапазона
- светодиоды и фотодетекторы
- сенсоры магнитного поля и температуры
- радиационно-стойкие приборы и элементы

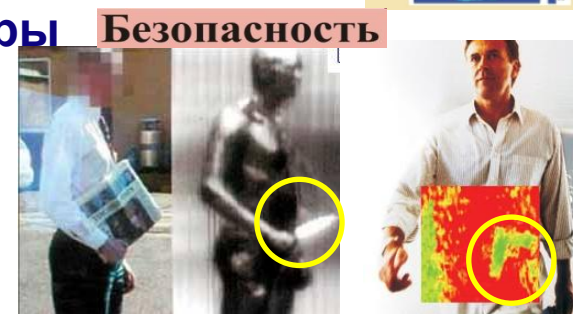
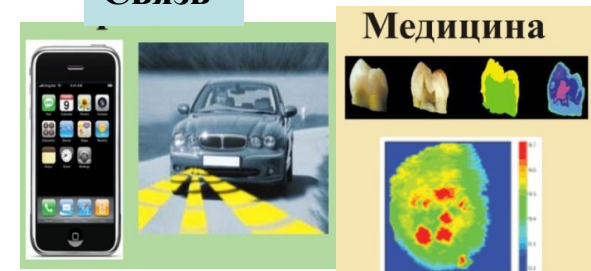
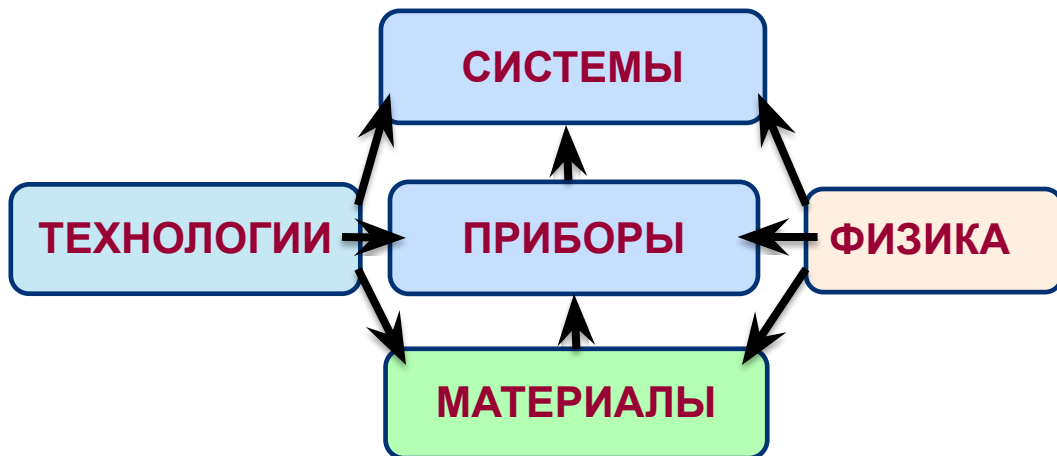
ИССЛЕДОВАНИЯ и АНАЛИЗ

- моделирование
- измерения физических параметров, ВАХ, СВЧ параметров, структурных свойств

НАНОЭЛЕКТРОНИКА и ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

- Все сферы человеческой деятельности сегодня используют электронику
- Микроэлектроника изменила облик мира и быт человека

ИНЖЕНЕРИЯ: разработка и создание материалов, приборов и систем с заданными свойствами



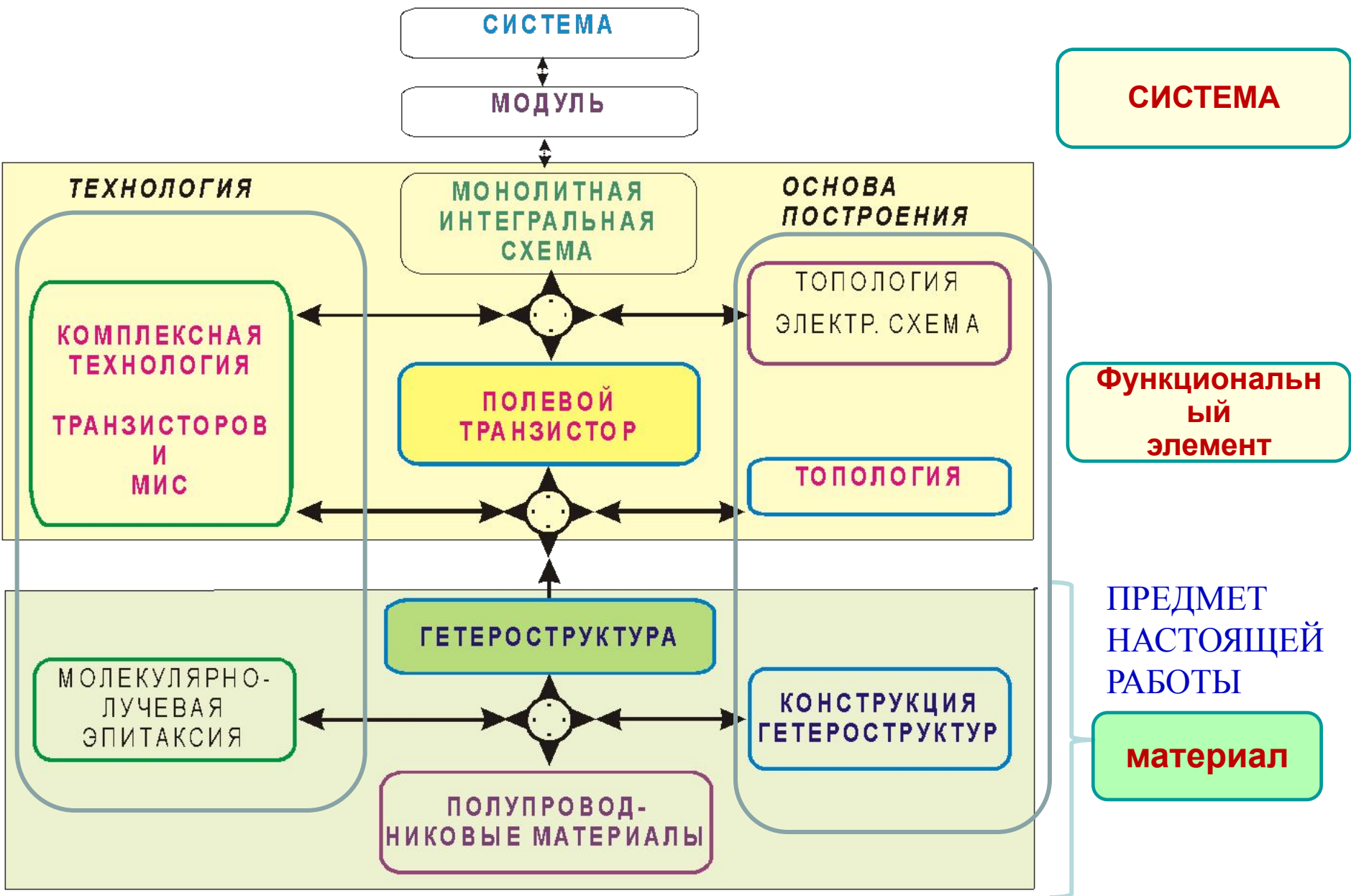
Будущий инженер должен хорошо знать физику и технологии, чтобы успешно применять знания на практике.

Современная наноэлектроника использует законы квантовой физики, поскольку размер области, где движется электрон, очень мал. Создать новые приборы можно только при овладении передовыми

ПРОБЛЕМЫ:

- достижение сверхвысоких частот (СВЧ) – для быстродействия, скорости передачи и обработки информации
- работа в экстремальных условиях (космос, высокие и низкие температуры, радиация)

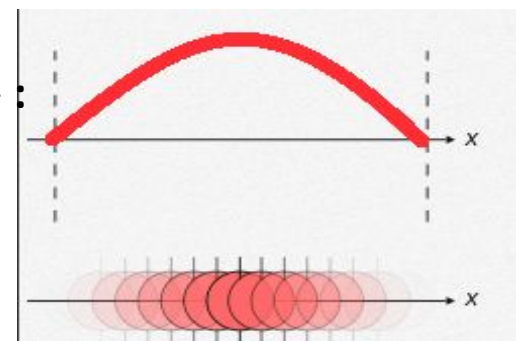
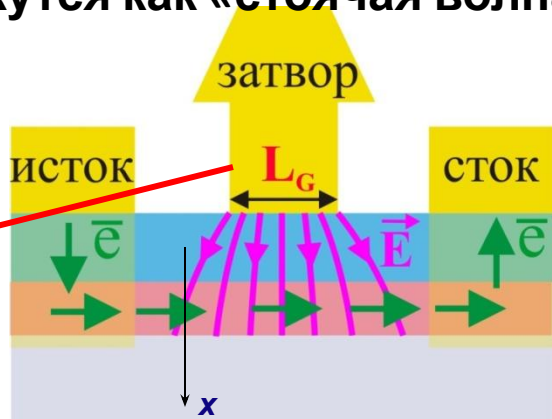
Иерархия объектов твердотельной СВЧ электроники



Полевой транзистор - основа современной электроники

Размеры активной области транзистора так малы, что электроны движутся в тонком слое ~10 нм – квантовой яме и подчиняются законам квантовой физики

Например, электроны движутся как «стоячая волна»:



Материал:
многослойная
полупроводниковая
структура

Предельная частота транзистора

► Как увеличить частоту?

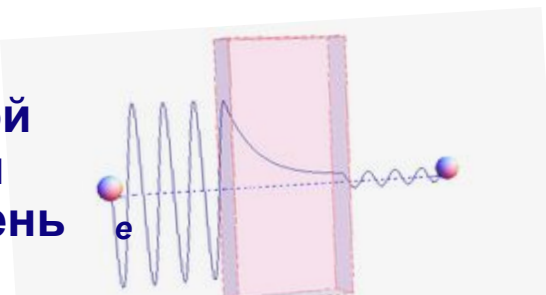
1 длина затвора

$$f_t = \frac{v_{sat}}{2\pi L_G}$$

2 скорость электронов

$L_g \rightarrow 0$ для увеличения частоты

Предел: ~ 6 ÷ 10 нм обусловлен квантовой физикой: электроны туннелируют через очень тонкий барьер:



увеличивать V_{sat} для увеличения частоты
⇒ В гетероструктурах достижима скорость V_{sat} в 3-5 раз больше, чем в кремнии

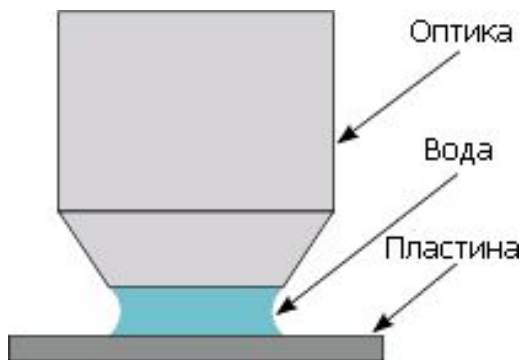
Фотолитография

1982 — IBM, внедрение в фотолитографию эксимерных лазеров с длинами волн 248 (KrF) и 193 (ArF) нм.

Поскольку воздух поглощает излучение на длинах волн короче 186 нм, в самых современных техпроцессах с нормами менее 30 нм по-прежнему используются ArF лазеры. Рано или поздно состоится переход на экстремальный ультрафиолет (EUV) с длинами волн 13,5 нм (и менее), что заставит использовать вакуумные камеры.



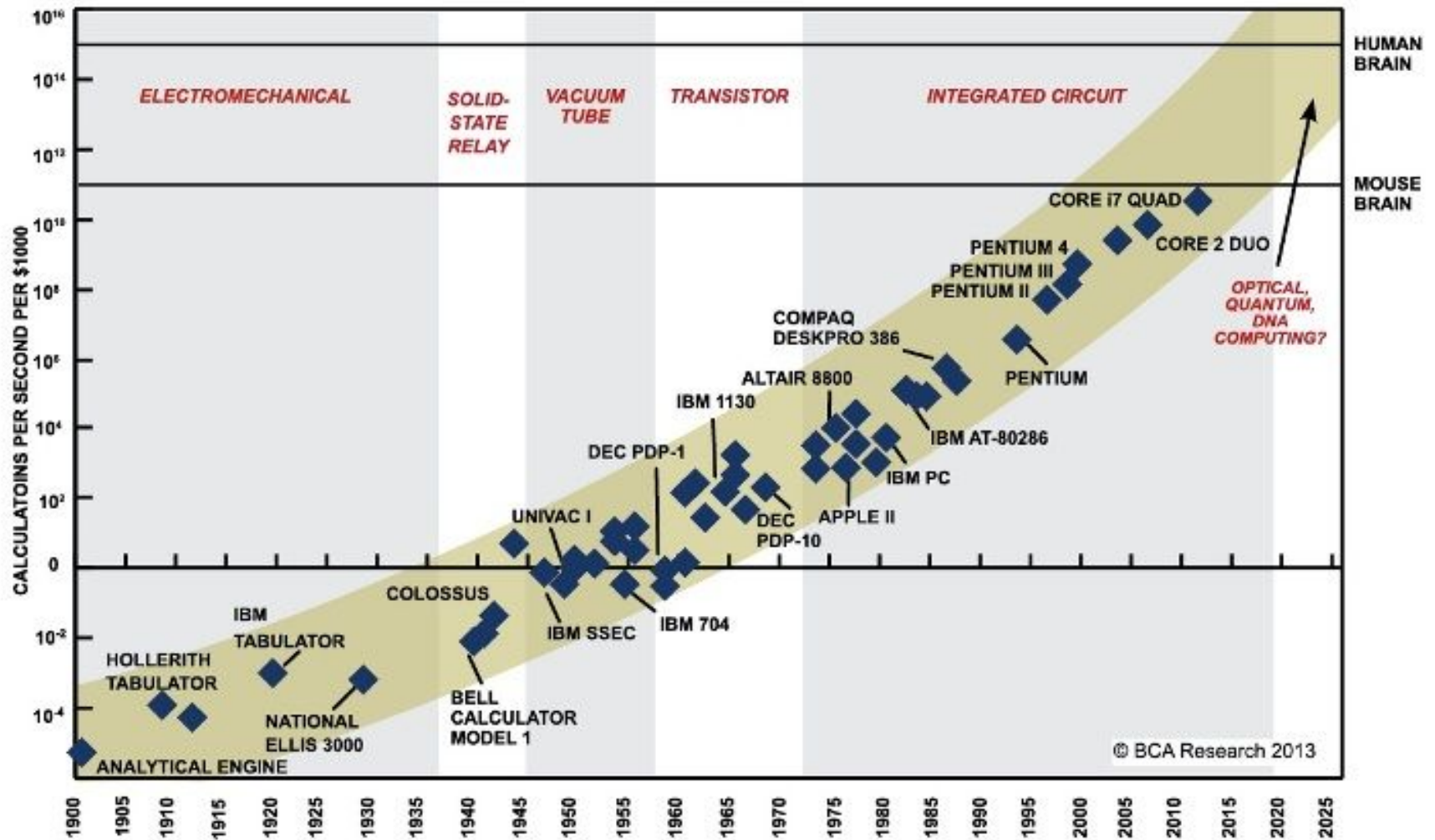
Современный литографический сканер ASML TwinScan 1950i



Иммерсионная литография

2006 — иммерсионная литография: пространство между последней линзой и экспонируемой пластиной заполняется не воздухом, а жидкостью (на сегодня — водой). Из-за большего показателя преломления жидкости (1 для воздуха и 1,33 для воды) и соответствующего роста числовой апертуры (N_A) это улучшает разрешение на 30–40%. Intel использует иммерсионную литографию, начиная с техпроцесса 32 нм, а AMD — уже с техпроцесса 45 нм.

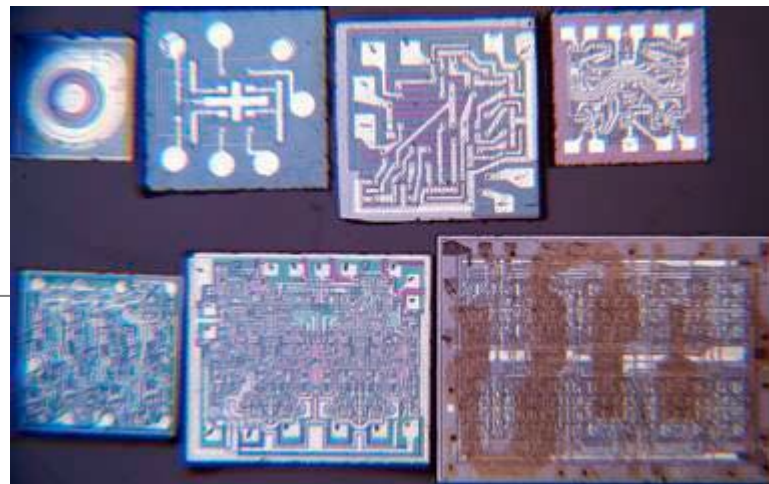
Закон Мура



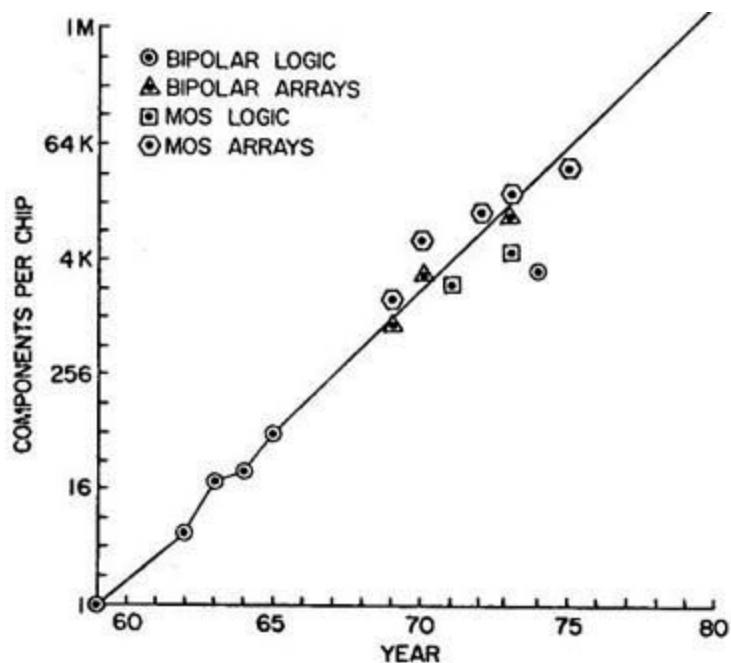
SOURCE: RAY KURZWEIL, "THE SINGULARITY IS NEAR: WHEN HUMANS TRANSCEND BIOLOGY", P.67, THE VIKING PRESS, 2006. DATAPOINTS BETWEEN 2000 AND 2012 REPRESENT BCA ESTIMATES.

Закон Мура

1965 — Гордон Мур, доклад «Будущее интегральной электроники», график (5 точек, период 1959–1964), связывающий число компонентов на чип (и их минимальную цену) и время



Эти чипы— источник закона Мура



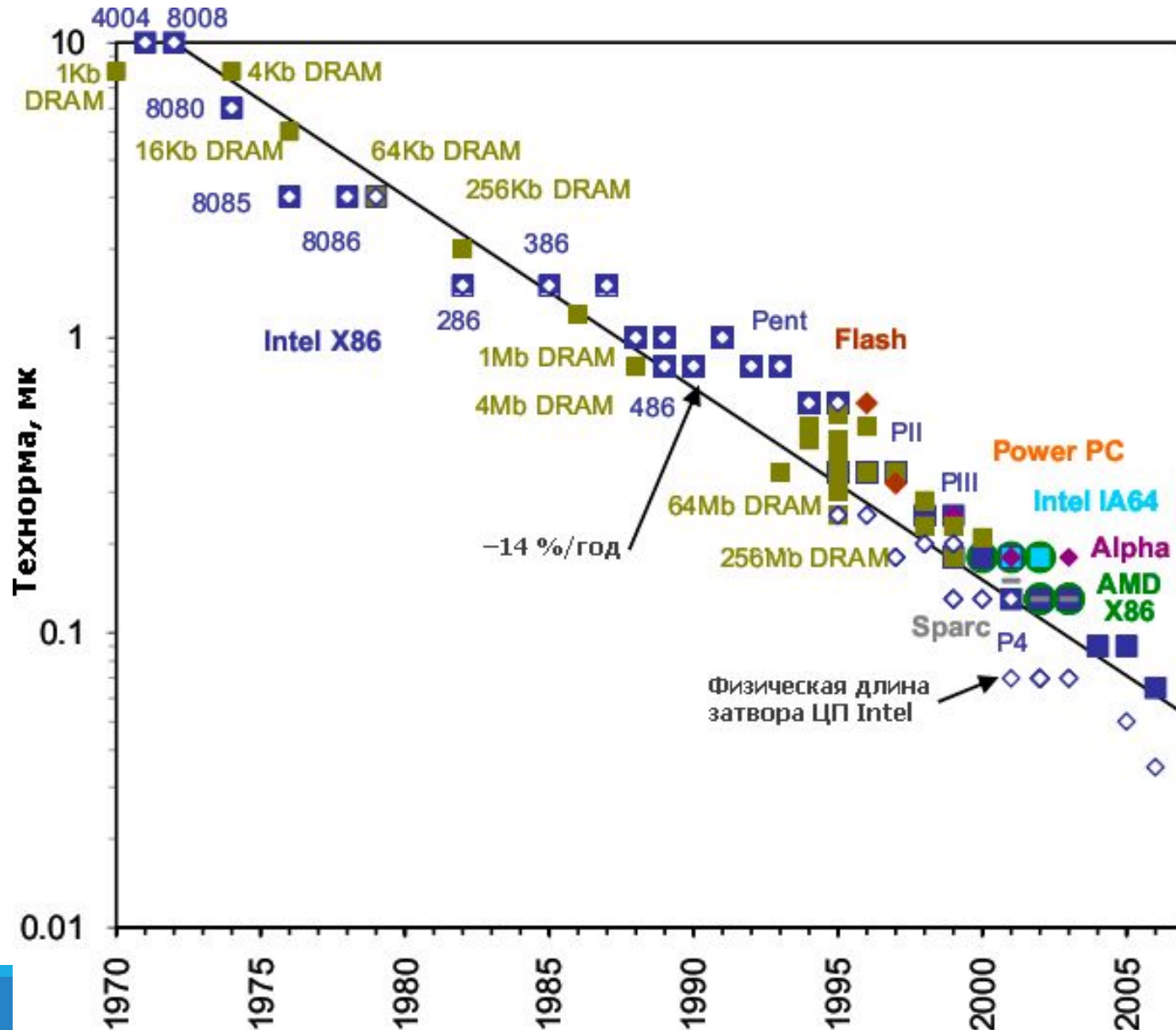
Основной вывод Мура: «Число компонентов на чипе удваивается каждый год»

На базе экстраполяции этой (экспоненциальной) зависимости был сделан прогноз развития микроэлектроники на следующие 10 лет, и этот прогноз оправдался.

19 апреля 1965 — отредактированная версия доклада публикуется в журнале «Electronics»

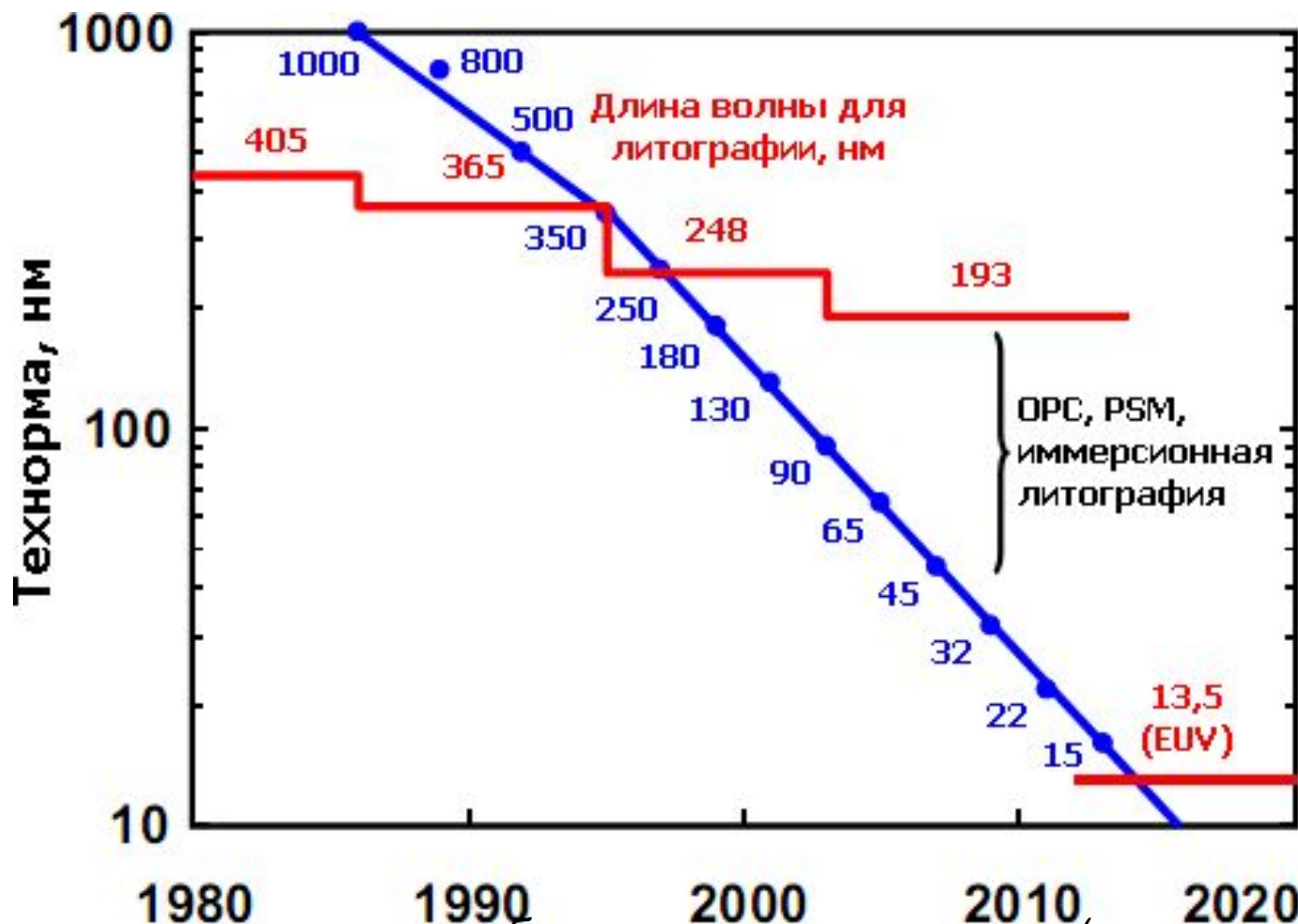
Закон Мура (биполярная и полевая логика, память, 1975)

Технологические нормы сложных микросхем. Падает и их цена — правда, не вдвое, а примерно в 1,5 раза при каждом переходе на очередной техпроцесс



Технологические нормы для процессоров Intel.

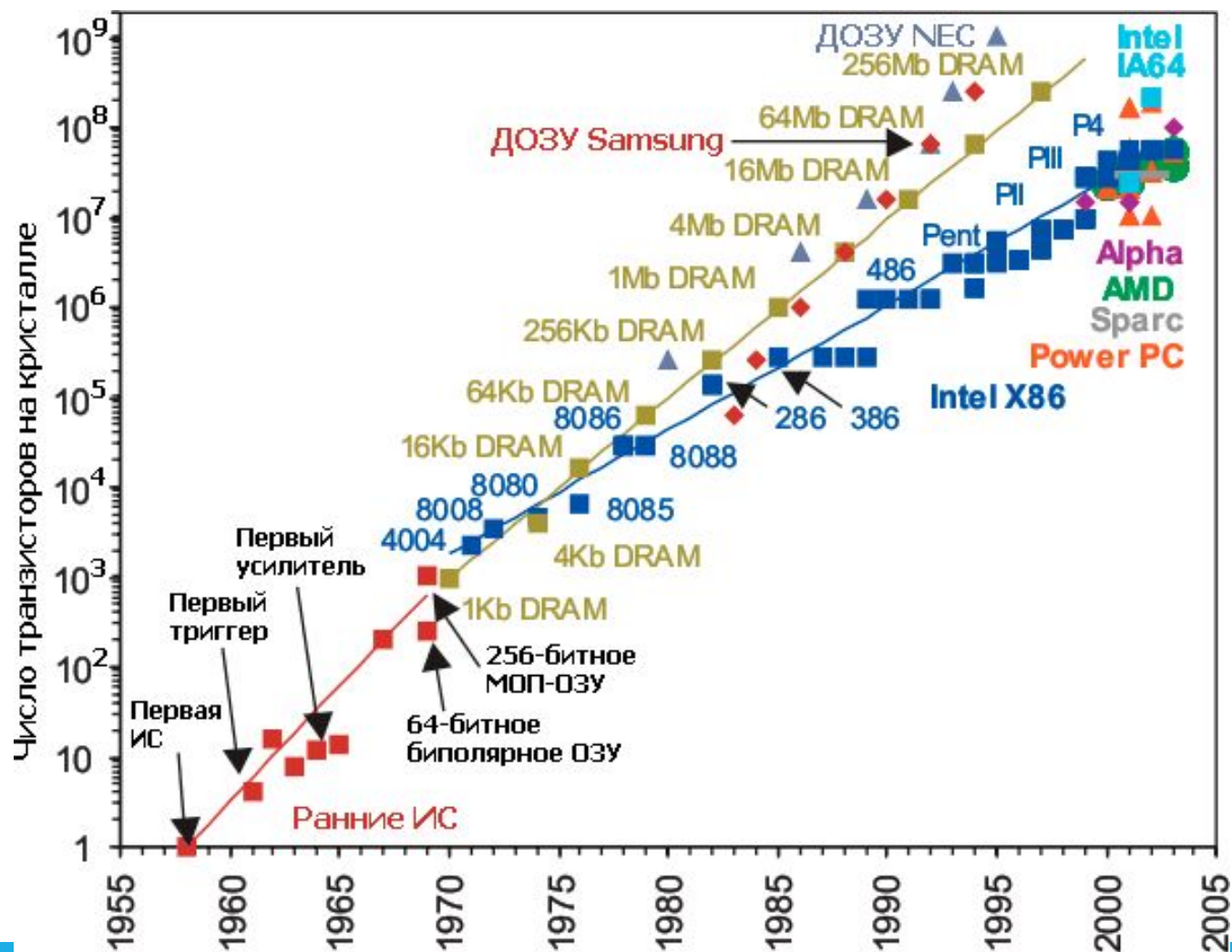
По мнению компании, 15 нм техпроцесс должен стать первым, где будет применен экстремальный ультрафиолет (EUV).



Площадь кристалла для наиболее сложных микросхем (процессоры и память) на указанный по оси абсцисс год.

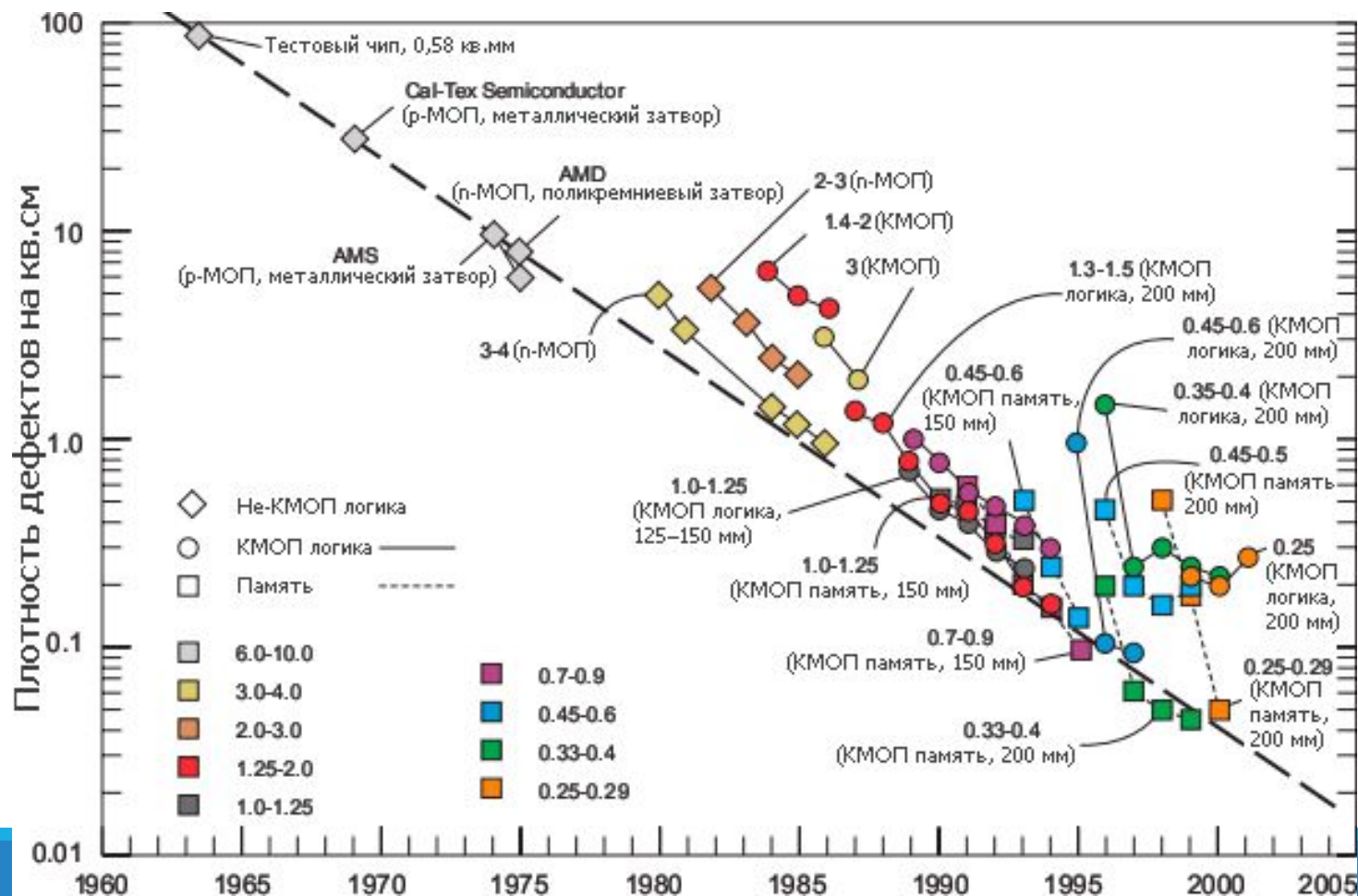
Тенденция до 90-х годов — увеличение площади на 14% в год (прямая линия) — остановлена, но площадь самых сложных кристаллов достигает 400–500 мм²

Экспоненциальный рост числа транзисторов на кристалле интегральной схемы. Начиная с 70-х годов этот рост для микросхем памяти и процессоров идет меньшими темпами — 58 % и 38 % в год.

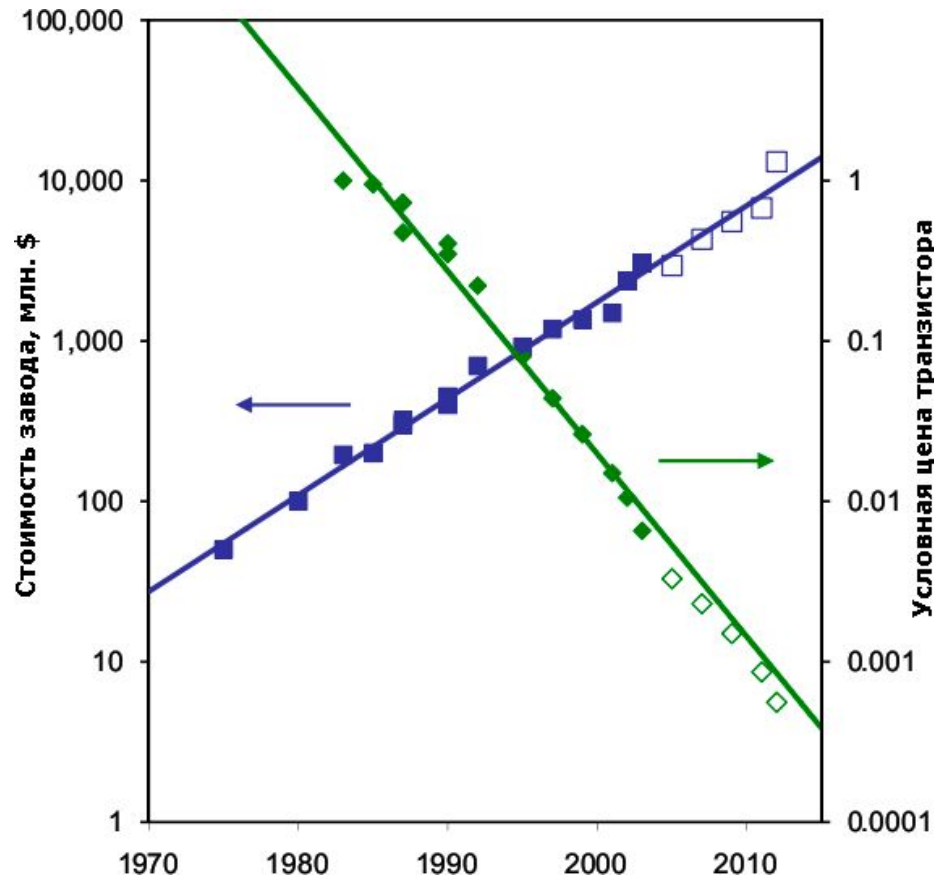


Число дефектов на 1 см² площади кристалла для самых продвинутых фабрик при финишном тестировании. Жирные цифры— технологические нормы в мкм, в скобках — диаметр пластин.

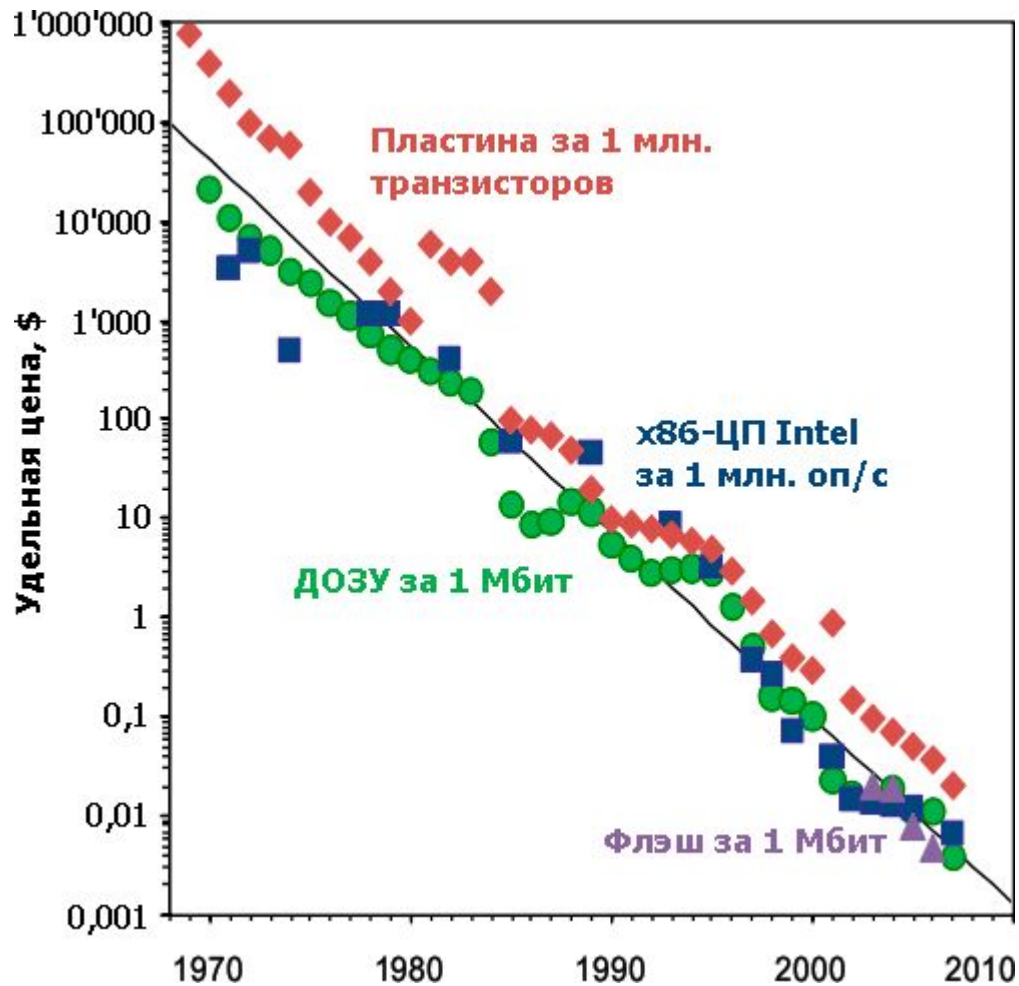
Плотность дефектов для чипов Intel, произведенных по разным технологическим нормам. По оси ординат также используется логарифмический масштаб.

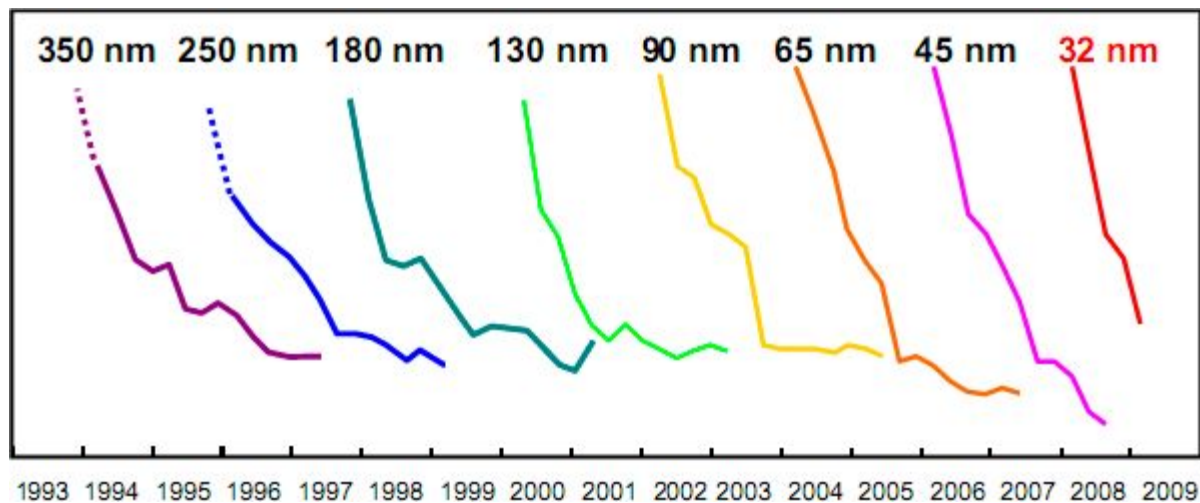


Стоимость современного завода (или его стоимость после обновления) выросла в 70 раз за 30 лет, а цена каждого транзистора упала в 2000 раз.



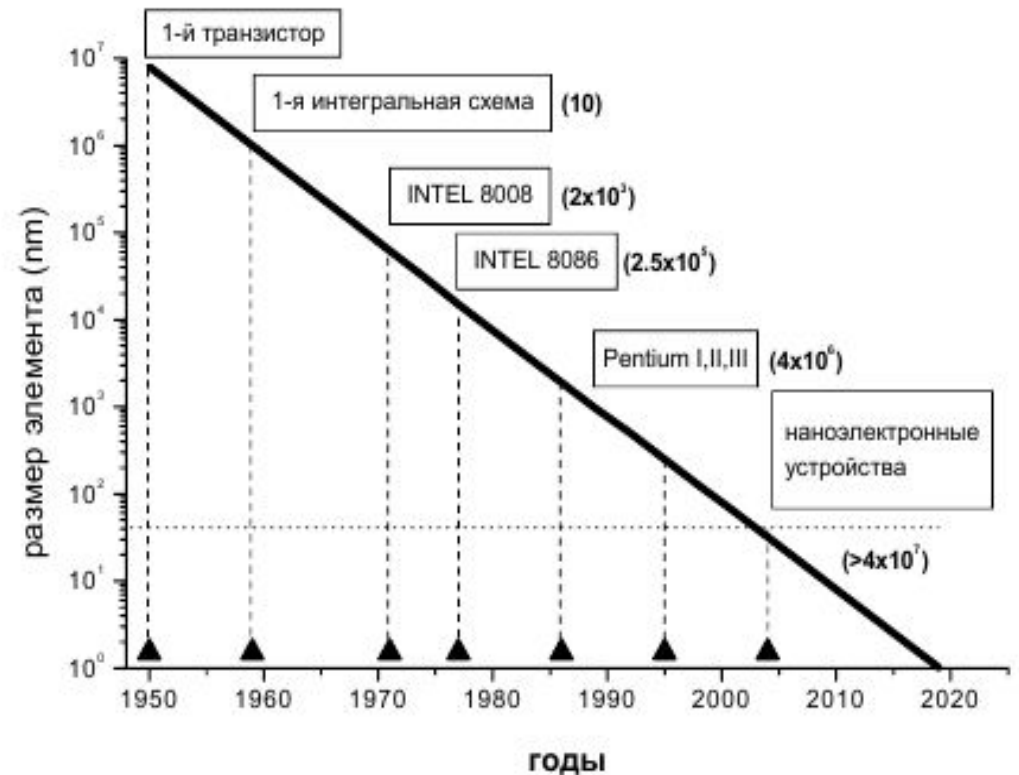
Удельные цены пластины и микросхем за единицу характеристики.
Линия соответствует ежегодному падению цены на 35% (в 1,54 раза).





Несмотря на некоторые колебания в периоде удвоения, закон Мура продолжает работать. Однако, в 2007 году сам Мур признал, что его закон перестаёт действовать уже из-за атомарных ограничений и влияния скорости света.

Как видно из рисунка к середине 90-х годов размер элементов интегральных схем уменьшился до нескольких сотен нанометров, а плотность активных (транзисторов) элементов достигла $4 \cdot 10^6$ см⁻². Возможности электронно-лучевой литографии позволяют еще на 1-2 порядка уменьшить размер элементов интегральных схем.



Динамика уменьшения размеров элементов интегральных схем

Технические и физические пределы дальнейшей миниатюризации полупроводниковых приборов.

1. При уменьшении линейного размера активного элемента в 10 раз плотность элементов в интегральной схеме возрастет по крайней мере в 100 раз. Очевидно, что отвод тепловой энергии в этом случае становится неразрешимой задачей, т.к. уже современные микропроцессоры выделяют мощность порядка 10 Вт/см^2 .

2. Существуют также принципиальные ограничения, связанные с физикой работы полупроводниковых приборов.

Размер полупроводникового элемента не может быть меньше длины экранирования Дебая, которая обратно пропорциональна концентрации электронов в зоне.

В полупроводниках с большой концентрацией электронов длина Дебая составляет десятки нанометров. С другой стороны максимальный уровень легирования (порог вырождения) у кремния составляет $10^{20}/\text{см}^3$.

При размере элемента (канала транзистора) 10 нм его объем составляет примерно $2 \cdot 10^{-19} \text{ см}^3$, тогда в одном элементе будет всего 20 атомов примеси, что приведет к недопустимо большому статистическому разбросу параметров полупроводниковых элементов.

В связи с этим представляются чрезвычайно актуальными исследования, направленные на создание альтернативных материалов и устройств с размерами 1-10 нм., способных обеспечить дальнейший рост производительности интегральных микросхем как за счет собственных нетривиальных электрофизических свойств, так и за счет возможности изготовления на их основе приборов, работающих на принципиально иных физических эффектах.

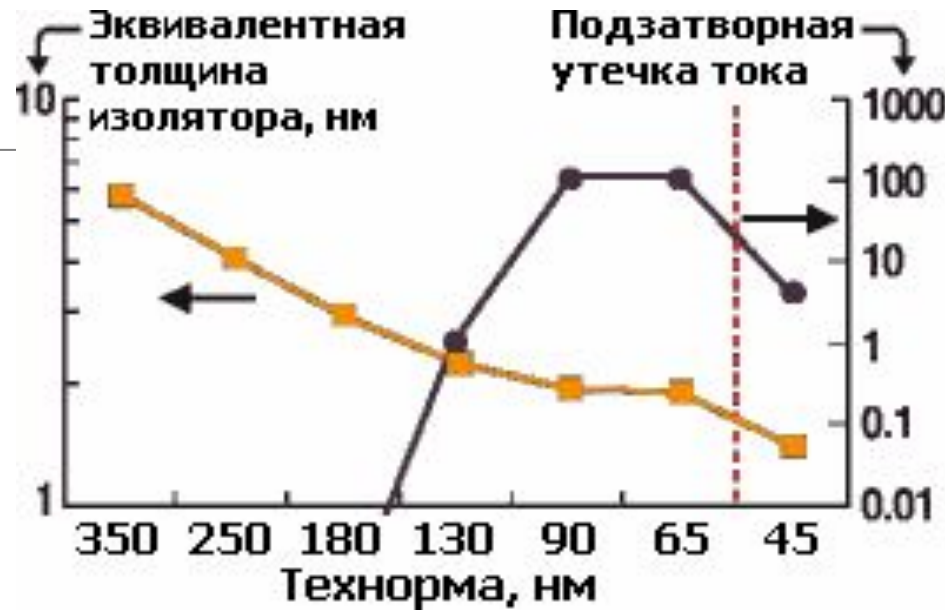
Такие наноразмерные устройства можно разделить на два вида:

1. Приборы на основе отдельных молекул (молекулярная электроника).
2. Твердотельные квантово-механические и одноэлектронные устройства (нанозлектроника)



«High-k» диэлектрики

Для 90-нм техпроцесса толщина затвора уменьшилась до 1,2 (Intel) — 1,9 (Fujitsu) нм при периоде решетки кремния — 0,543 нм. В таких условиях электроны начинают туннелировать через диэлектрик, что приводит к утечке тока. Поэтому для 65-нм техпроцесса уменьшились все параметры транзистора, кроме толщины затвора.



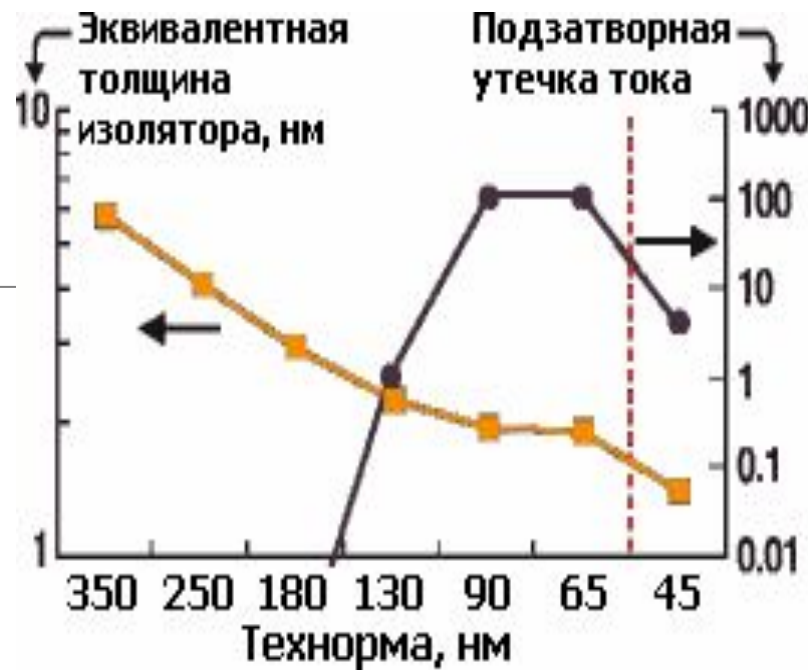
Толщина подзатворного изолятора в SiO₂-эквиваленте и относительная утечка тока

2007 (45-нм техпроцесс) — появление технологии НКМГ (high-k metal gate, изолятор с высокой диэлектрической проницаемостью и металлический затвор).

k — относительная диэлектрическая проницаемость. В микроэлектронике «нормальным» считается $k \sim 3,9$ (SiO_2). Материалы с $k > 3,9$ относятся к классу «high-k», а с $k < 3,9$ — к «low-k».

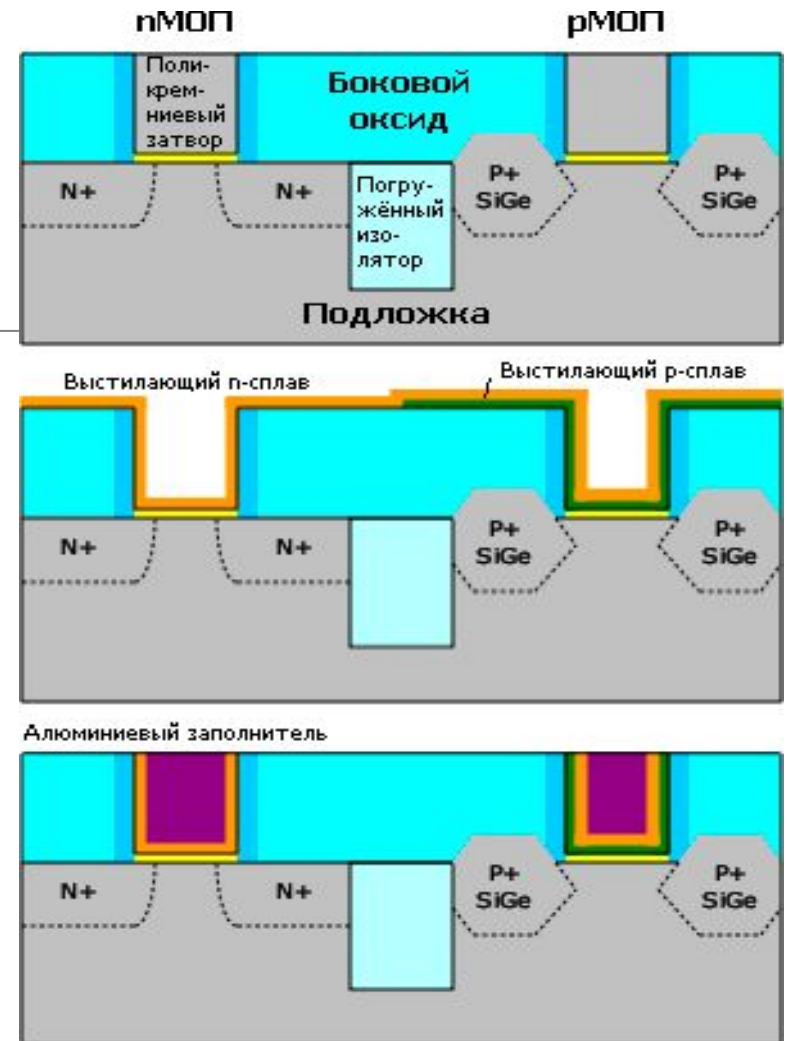
За счет использования слоя оксинитрида кремния-гафния (HfSiON , $k=20-40$), толщиной 3 нм в технологическом процессе 45-нм удалось уменьшить утечки тока в 20–1000 раз. Для получения такой же скорости работы старый затвор пришлось бы делать толщиной 1 нм, что было бы катастрофой из-за токов утечки.

Приводимые толщины подзатворных изоляторов менее 1 нм являются SiO_2 -эквивалентами и применяются только для расчета частоты, но не утечек.



Толщина подзатворного изолятора в SiO_2 -эквиваленте и относительная утечка тока

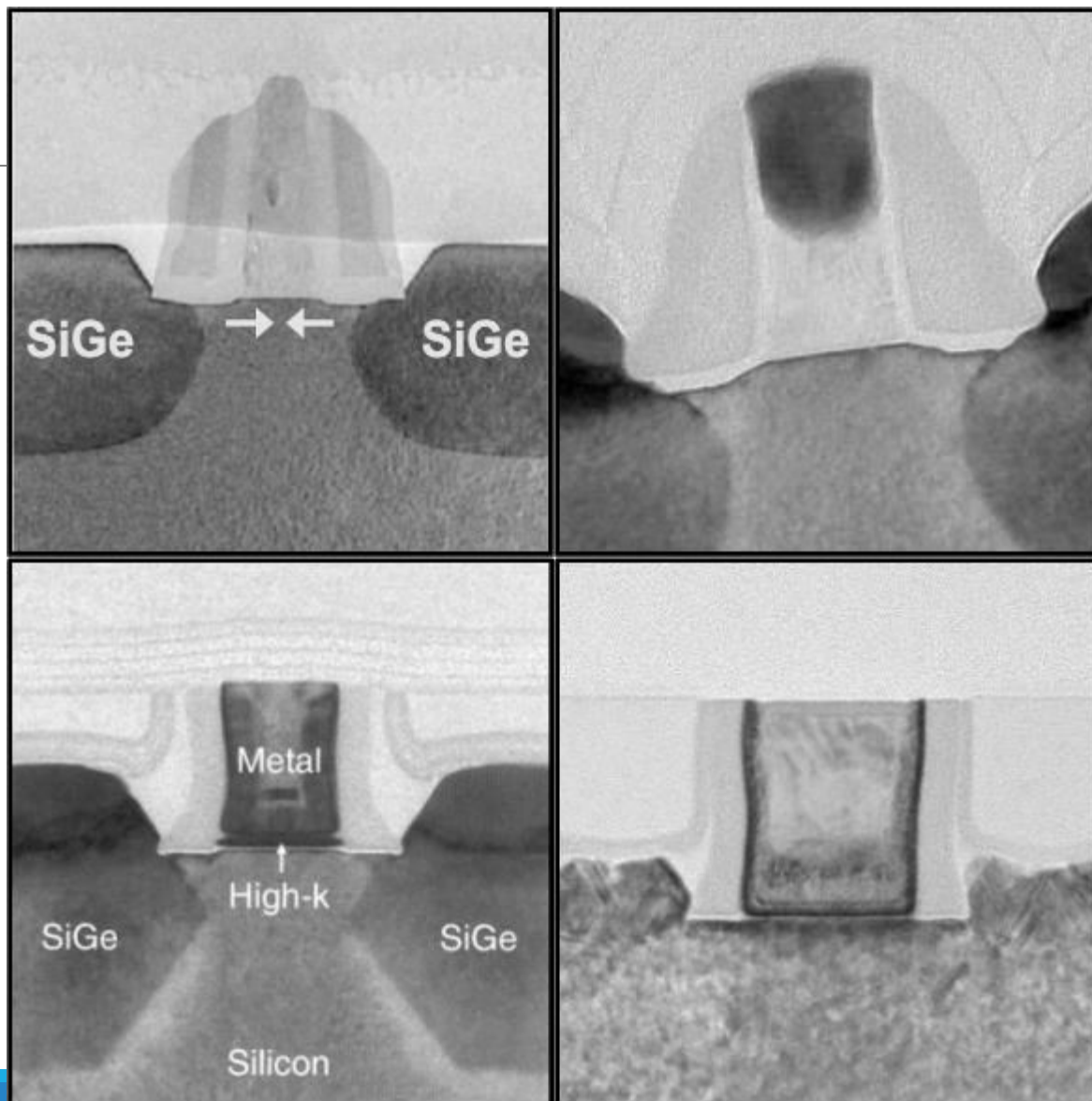
Гафниевый изолятор не совместим с поликремниевым затвором, так что пришлось менять и его — на металлический. Однако новый затвор не алюминиевый, как это было в 60-х, а сплав двух металлов. Его сопротивление ниже, что ускоряет переключение транзистора. Долгое время составы сплавов для p- и n-канальных транзисторов держались Intel в строгом секрете. Однако в 2008 г. инженеры IBM разработали свою версию этой технологии, которая теперь используется на заводах Global Foundries (ранее принадлежали AMD)



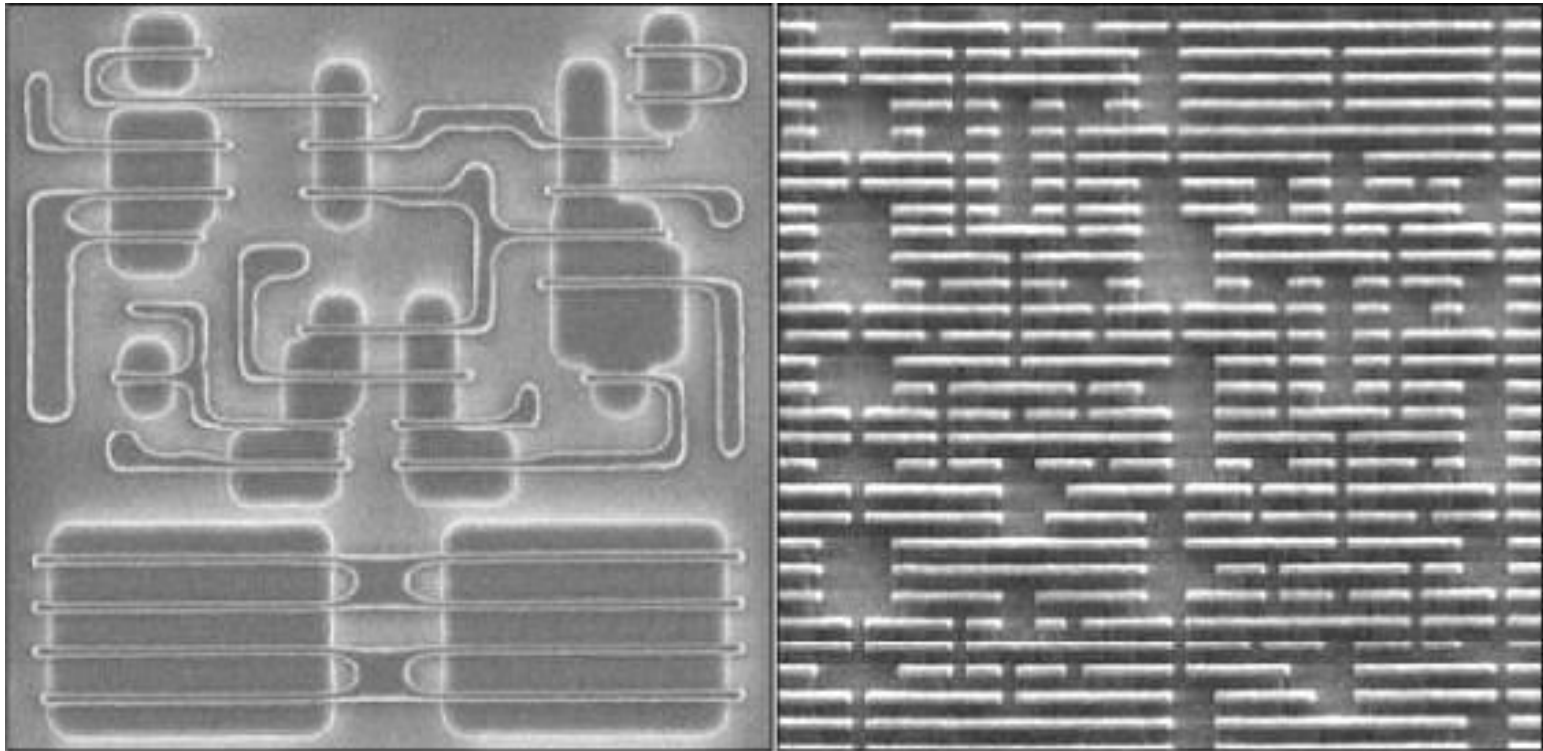
Реализация металлического затвора (Intel)

90-нм, 65-нм, 45-нм и 32-нм техпроцессы

4 поколения транзисторов Intel (слева направо, сверху вниз):
90-нм (2003, впервые используется напряженный кремний)
65-нм (2005)
45-нм (2007, впервые используется НКМГ)
32-нм (2009)

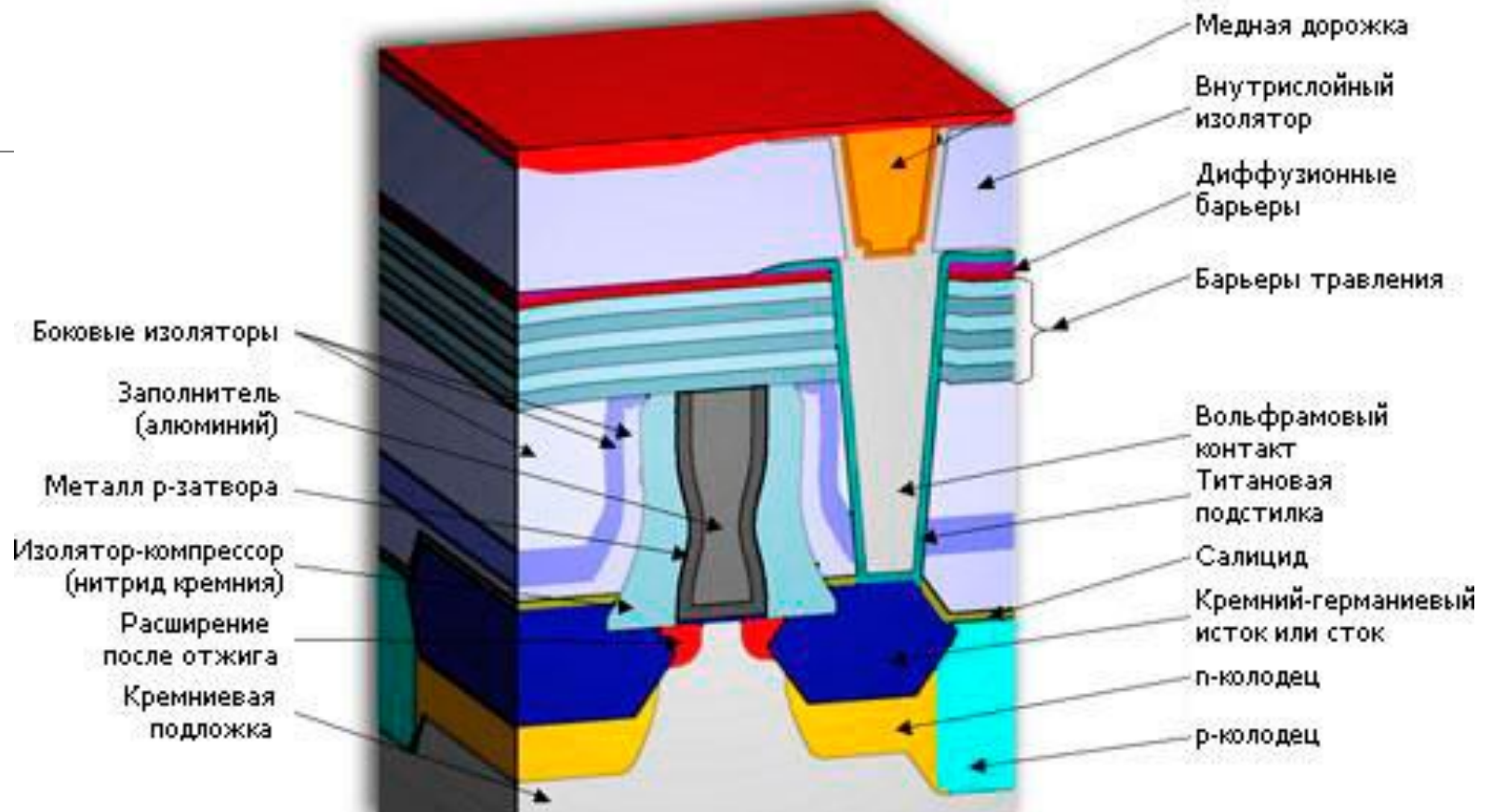


Сравнение 65-нм и 32-нм техпроцессов



В транзисторах 65-нм техпроцесса (слева) используются двунаправленные дорожки (вертикаль и горизонталь) и переменные размеры затворов и их шагов. Для 32-нм техпроцесса (справа) все это уже невозможно.

Результат



45-нм технологический процесс

Сухая литография (193 нм, двойное шаблонирование) на цельной пластине Si

Длина затвора — 35 нм (как в 65-нм техпроцессе), шаг затвора — 160 нм без (на 27% меньше) и 200 нм с изоляторами (на 9% меньше, чем в 65-нм техпроцессе)

Металлический затвор осаждается последним

Спрямление углов затвора за счет использования двух видов фоторезиста

Эквивалентная толщина «high-k» изолятора — 1 нм

30% легирование Ge стока и истока для p-канальных транзисторов (увеличение подвижности дырок и частоты на 51%)

Использование только сонаправленных по всему чипу каналов

Десятислойные соединения (со 2-го слоя — Cu) с изолятором из $\text{SiO}_2\text{:C}$, включая слой вольфрама (на истоках и стоках), служащего диффузионным барьером

Четные слои металла параллельны каналам, нечетные — перпендикулярны

Последний (самый толстый) слой металла — распределитель тепла по площади всего кристалла

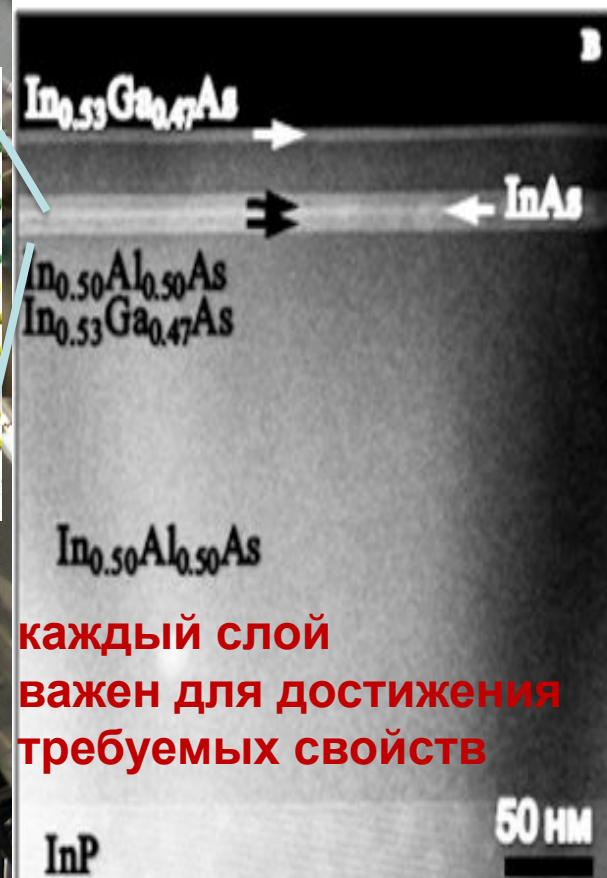
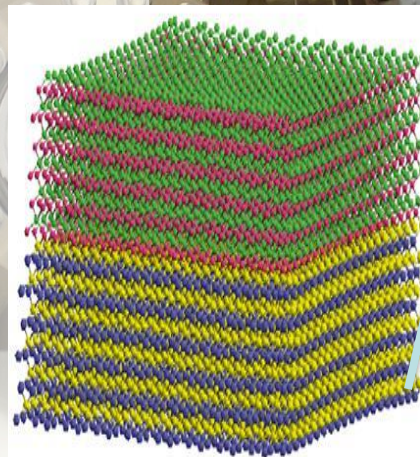
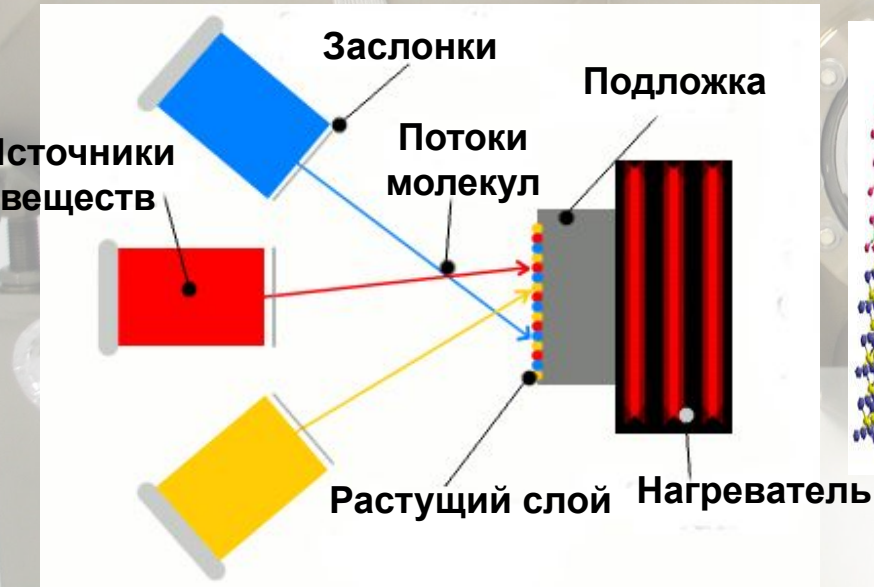
Широкое использование «фиктивных» структур (дорожек, затворов и т.д.) для выравнивания локальной плотности и теплопроводности

Бессвинцовая пайка кристалла в корпус

Разработка наноструктур для СВЧ электроники

Переход от простых объемных полупроводников к многослойным и составным дает простор для инженерии свойств материалов электроники

- Современная нанотехнология роста искусственных кристаллов - многослойных полупроводниковых гетероструктур с заданными свойствами для электроники и оптоэлектроники:
- Квантовая физика в основе конструкции слоев полупроводников
- Уникальная точность технологии: атомно-гладкие границы раздела и контроль толщины с точностью доли нанометра



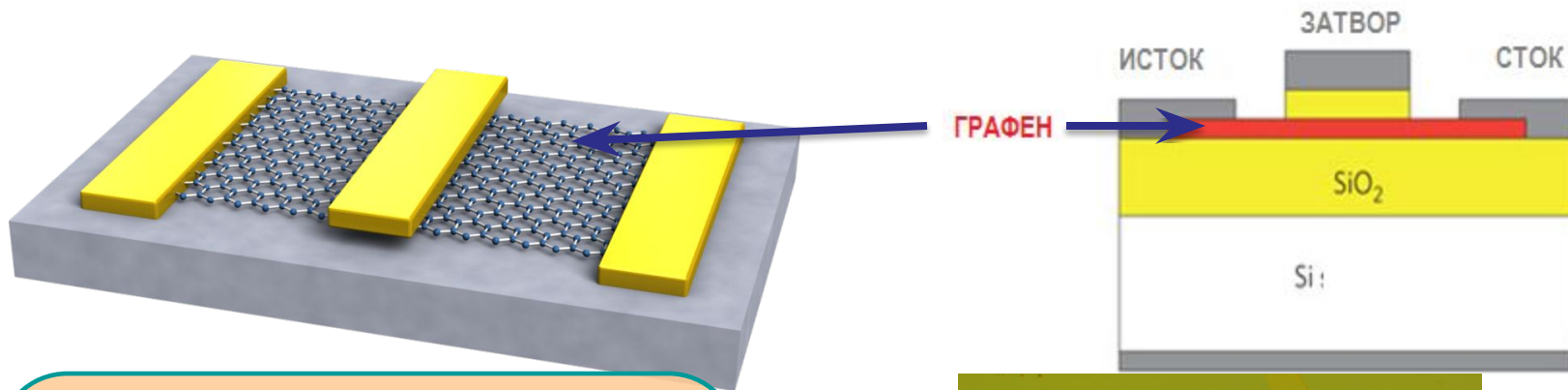
каждый слой важен для достижения требуемых свойств

Цель: создание материалов, обеспечивающих работу СВЧ транзистора в диапазоне свыше 150 ГГц

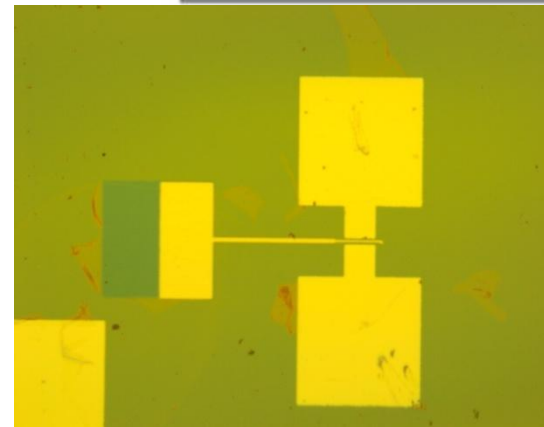
Схема и изображение слоев гетероструктуры

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Разработка графенового транзистора



- Графен – один атомный слой углерода
- Новый перспективный материал с уникальными свойствами для электроники и оптоэлектроники:
- Нанотехнология формирования



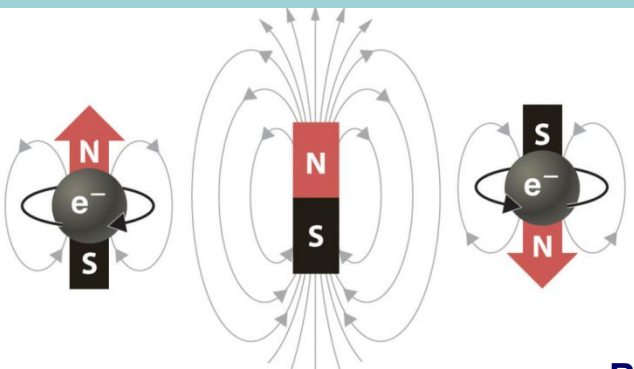
□Цель: создание и исследование графенового транзистора на различных подложках и оптимизация управления током

БУДУЩЕЕ:

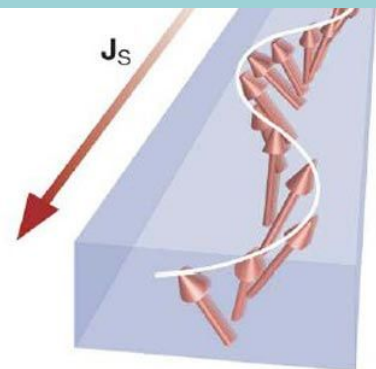
- приборы на новых материалах
- Гибкая электроника
- Гибридная электроника и фотоника

ПРИБОРЫ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

Разработка спиновой памяти-логики



Электрон имеет магнитный момент - спин

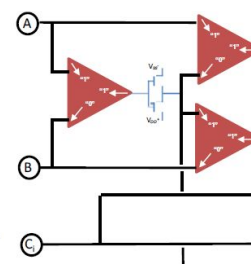
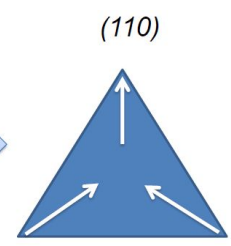
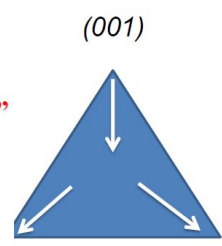
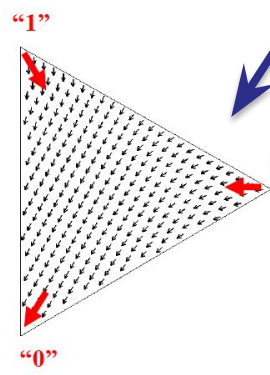


В тонких пленках магнетиков можно управлять волной намагниченности



Нанотреугольники из NiFe позволяют хранить и переключать состояния намагниченности

- Спинтроника основана на управлении магнитным моментом электронов, а не только их током
- Энергонезависимое хранение состояния
- Сочетание функций хранения информации и логических операций в одном элементе
- Нанотехнология формирования



Цель: создание и исследование наномагнитных элементов с сочетанием функций памяти и логики

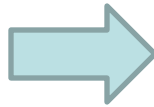
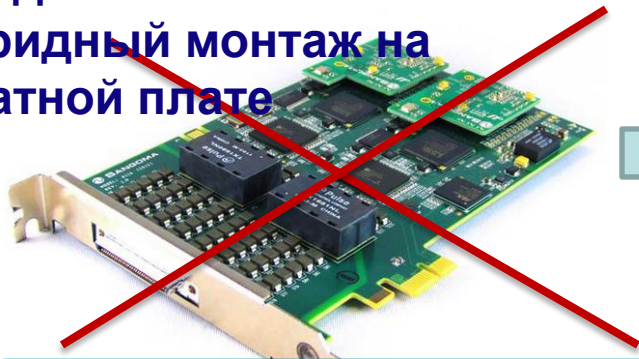
БУДУЩЕЕ:

- приборы на новых физических принципах
- бионанозлектроника
- системы с искусственным интеллектом

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Разработка высокоплотных электронных модулей (работа с концерном «ВЕГА»)

Сегодняшняя технология – гибридный монтаж на печатной плате



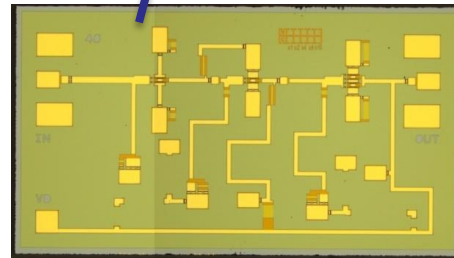
3D интеграция компонент



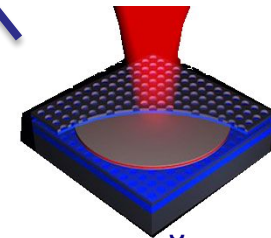
Компактный 3D модуль



- Размещение электронных компонент (чипов) совместно на тонкой многоуровневой подложке с высокой плотностью монтажа в монокристаллический модуль
- Трехмерные технологии формирования электронного модуля
- Интеграция цифровых, аналоговых, оптических элементов в единый модуль
- Повышение надежности и улучшение теплоотвода



Микросхема (чип)



Оптический чип для передачи данных

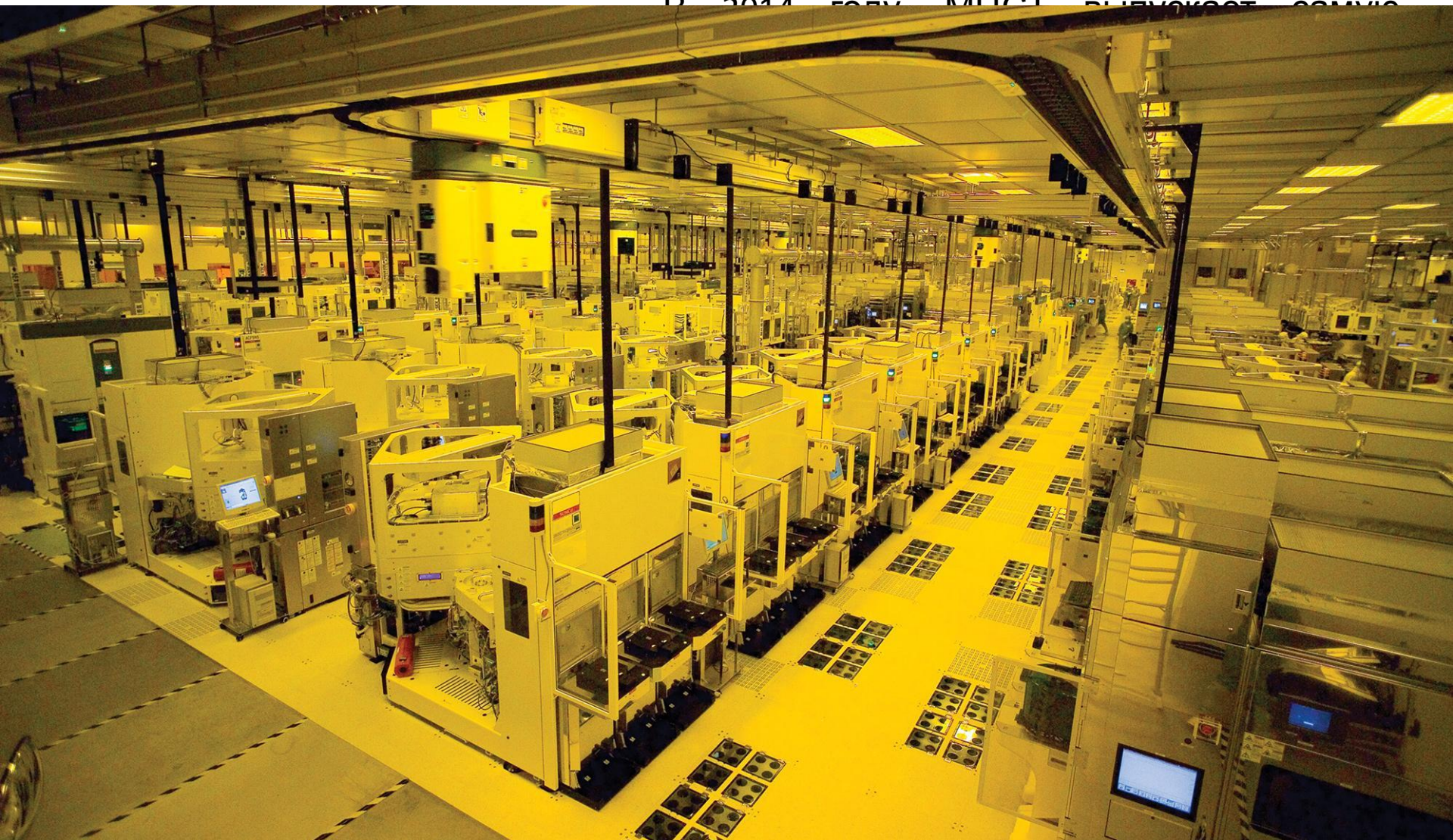
Цель: переход к надежной, легкой и компактной, энергоэффективной технологии электронных модулей и устройств

БУДУЩЕЕ:

- гибкая электроника
- миниатюрные сложнофункциональные системы
- микророботы

«Эльбрус» 2016

В 2014 году МЦСТ завершил разработку



10 тм «Эльбрус 100».

Структурная схема Центра

► Обеспечивается непрерывность исследовательского процесса и опытной технологии на полномасштабной линейке технологического оборудования

весь цикл «от фундаментальных исследований - к готовому прибору»



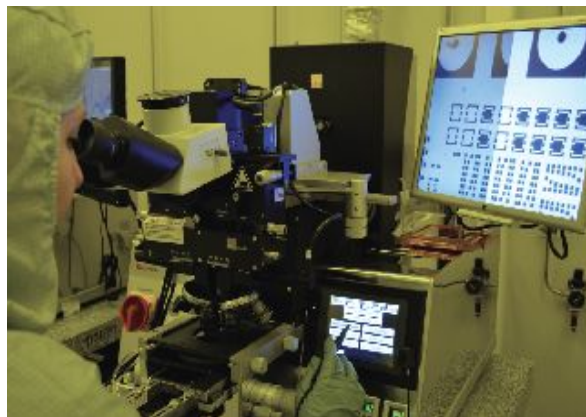
КАДРОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ
•опытные технологи,
исследователи и молодые
специалисты, 30 человек

Оснащение лабораторий Центра

- ✓ Общая площадь **1300 м²**, чистых производственных помещений **530 м²**
- ✓ Класс чистоты лабораторий ISO6 – ISO8, 9 технологических участков
- ✓ диаметр пластин – **3 дюйма** (эпитаксия), **4 дюйма** – комплексная технология



Эпитаксия АЗВ5,
нитридов и оксидов,
лазерная абляция



Оптическая шаблонная
и лазерная литография



Электронная нанолитография
Raith 150 TWO



Напыление металлов



Жидкостная химическая
обработка



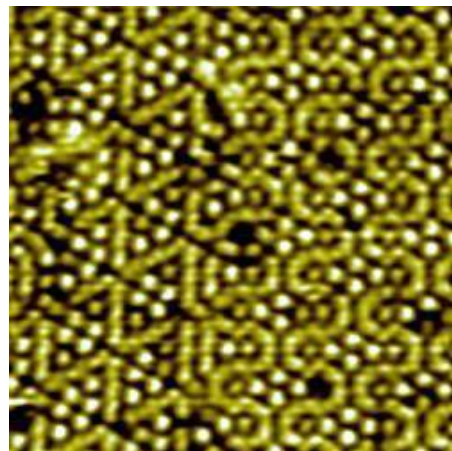
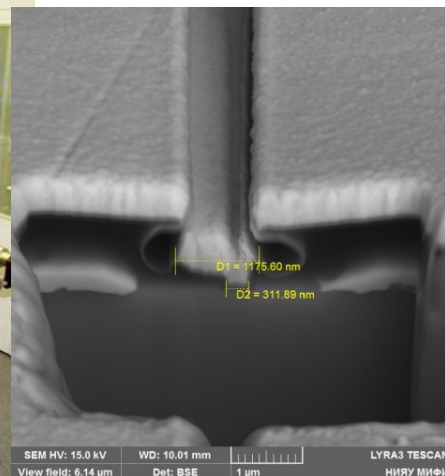
Плазмохимические процессы
(PECVD, ICP RIE)

Нанометрологическое обеспечение разработок в электронике

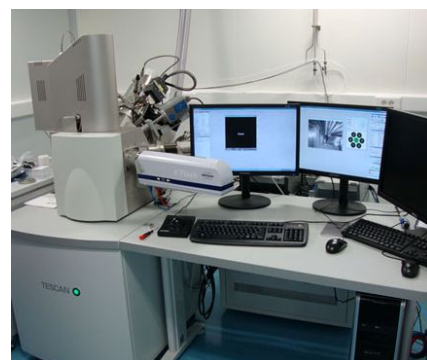
► Исследование рельефа поверхности, элементного состава, толщин слоев, структурного состояния гетероструктур и нанобъектов с суб-нм разрешением



Комплекс Omicron XMS

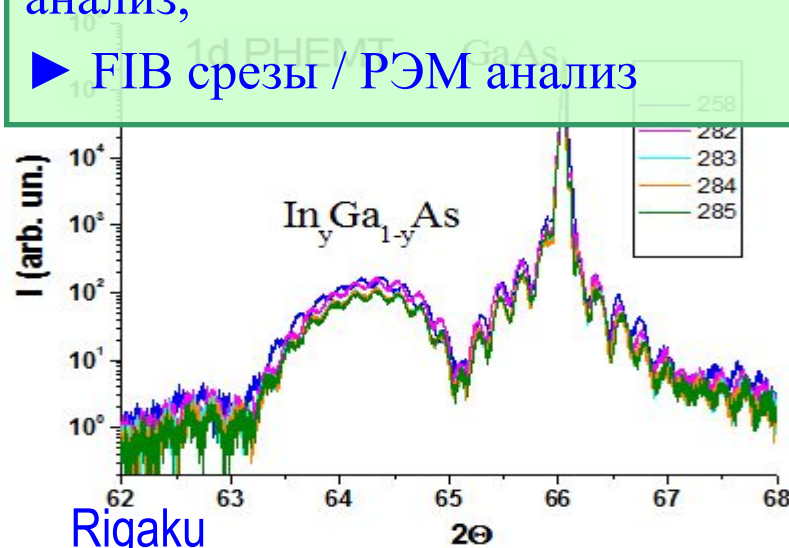


СТМ скан Si 7x7



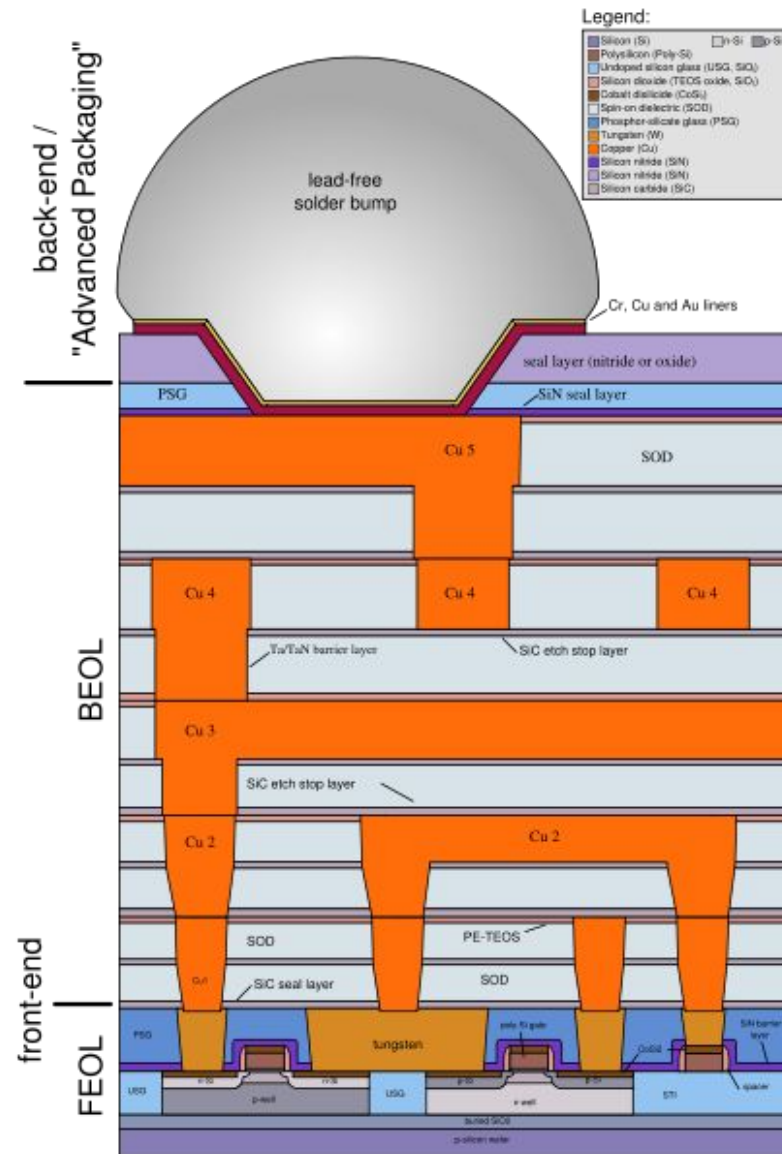
TESCAN
FIB/SEM анализ
анализ хим. состава

- Методики – сканирующая микроскопия (СТМ, АСМ),
- Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и рефлектометрия
- Рентгеновская фотоэмиссионная спектроскопия, Оже-электронный анализ,
- FIB срезы / РЭМ анализ

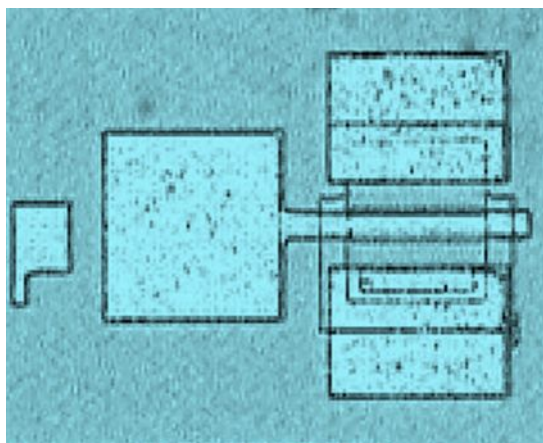


Rigaku
рентгеновская дифрактометрия

Структура БИС и СБИС



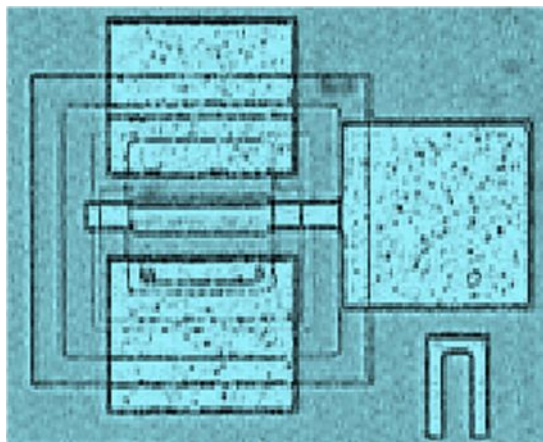
Топология транзистора



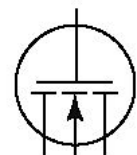
Микрофотография полевого p – канального транзистора (x10)



p -канальный
с индуцированным
каналом



Микрофотография полевого n – канального транзистора (x10)



n -канальный
с индуцированным
каналом

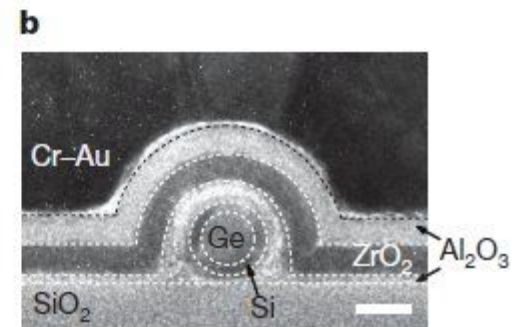
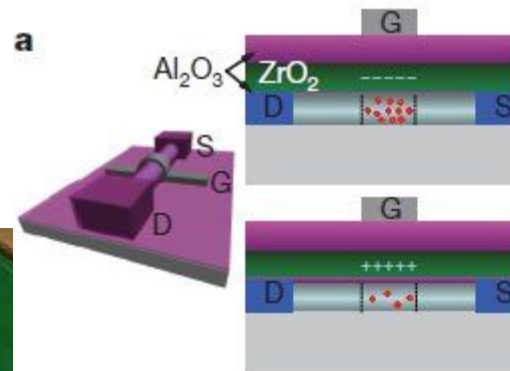
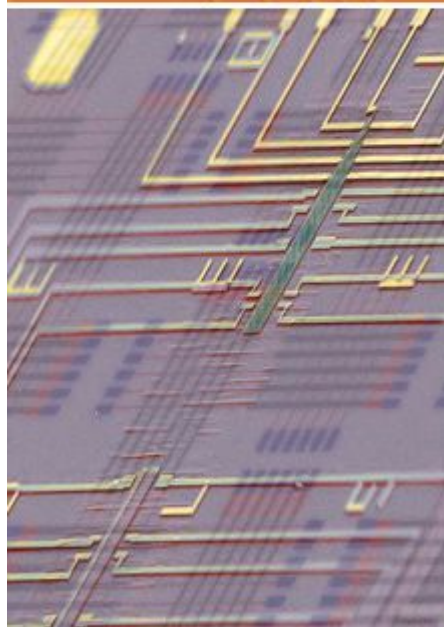
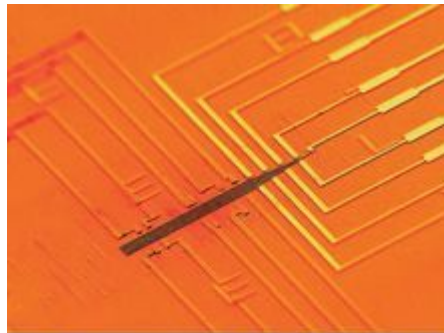


Микросхемы будущего

Микросхемы из углеродных нано материалах в разы энергоэффективнее.

Одной из причин является повеления квантовых эффектов , которые не позволяют току рассеиваться, как случается с обычными транзисторами.

Другая причина – быстроедействие



Структура полевого транзистора, соединенного нанопроводами.

Варианты исполнения

Корпусные ИМС

Бескорпусные ИМС

- Полупроводниковый кристалл, предназначенный для монтажа в гибридную микросхему или микросборку.

Корпус ИМС

Это часть конструкции микросхемы, предназначенная для защиты от внешних воздействий и для соединения с внешними электрическими цепями посредством выводов.

Шаг выводов корпусов ИМС

Российские

- 2,5 мм
- 1,25 мм

Импортные

- 1/10 дюйма (2,54 мм)
- 1/20 дюйма (1,28 мм)

В корпусах до 16 выводов эта разница не значительна, а при больших размерах идентичные корпуса уже несовместимы.

Корпуса для поверхностного монтажа

- 0,8 мм
- 0,65 мм

Классификация корпусов по материалам

Металлические.

Керамические.

Пластмассовые.

Варианты исполнения

Корпусные ИМС

Бескорпусные ИМС

- Полупроводниковый кристалл, предназначенный для монтажа в гибридную микросхему или микросборку.

Корпус ИМС

Это часть конструкции микросхемы, предназначенная для защиты от внешних воздействий и для соединения с внешними электрическими цепями посредством выводов.

Классификация корпусов по материалам

- ❖ Металлические
- ❖ Керамические
- ❖ Пластмассовые

Шаг выводов корпусов ИМС

Российские

- 2,5 мм
 - 1,25 мм
-

Импортные

- 1/10 дюйма (2,54 мм)
- 1/20 дюйма (1,28 мм)

В корпусах до 16 выводов эта разница не значительна, а при больших размерах идентичные корпуса уже несовместимы.

Корпуса для поверхностного монтажа

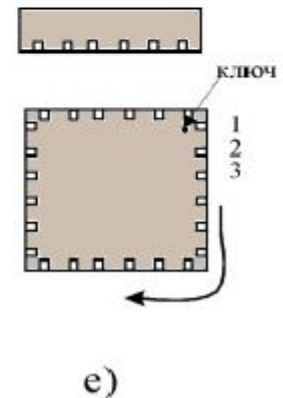
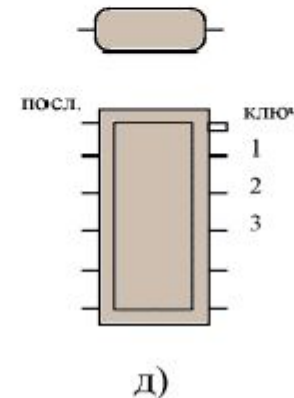
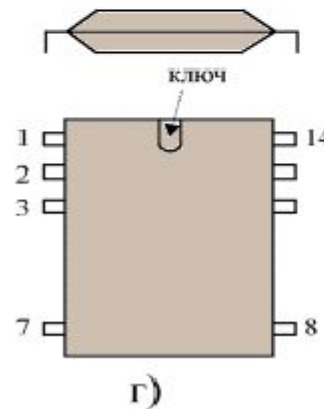
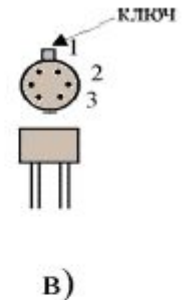
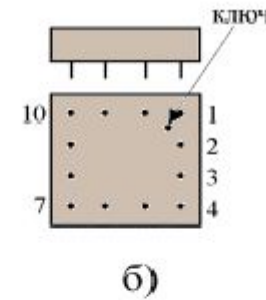
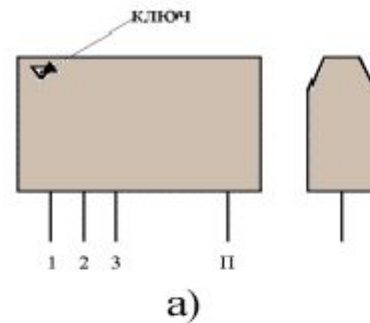
- 0,8 мм
- 0,65 мм

Отечественные корпуса

Типы корпусов (ГОСТ 17467-79) (ГОСТ Р 54844-2011)

8 типов корпусов микросхем

- а) Тип 1: выводы в плане проецируются внутрь корпуса;
- б) Тип 2: выводы перпендикулярны плоскости корпуса и проецируются за пределы контура корпуса;
- в) Тип 3: Аналогичен типу 1, но имеет круглую форму;
- г) Тип 4. Выводы в одной плоскости с корпусом (планарные);
- д) Тип 5: Безвыводный малогабаритный корпус (микрокорпус). Вместо выводов — металлизированные.



Обозначение корпусов (определяется ГОСТ 17 468-79)

Пример: 201.14 -2. Расшифровка:

- 2 - тип; 01 - типоразмер; 14 - число выводов; 2 - модификация.
-

Для обозначения материала корпуса перед цифрами ставится буква:

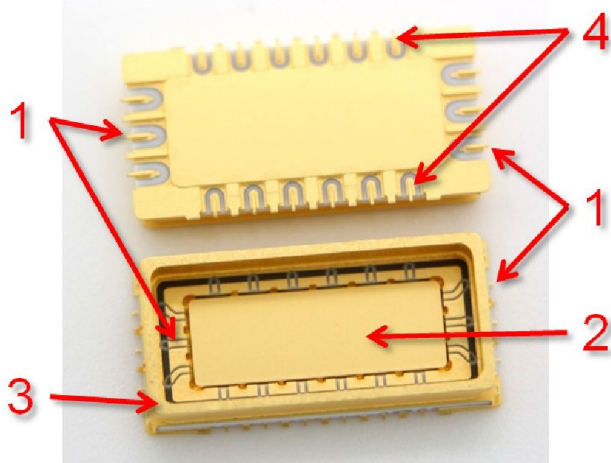
- Р — пластмассовый корпус типа 2;
- Е — металлополимерный корпус типа 2;
- А — пластмассовый корпус типа 4;
- М — керамико-стеклянный корпус типа 4;
- Н — кристаллоноситель керамический (микрокорпус) типа 5;
- Ф — кристаллоноситель пластмассовый типа 5.
- В остальных случаях буквенное обозначение отсутствует.

Корпуса ИС, относящиеся к одному и тому же типу могут отличаться по размерам, количеству выводов, их форме и расположению. Это отражается в обозначении корпуса путем введения вместо типа двухзначного “подтипа” (21, 22, 23 и т.п.).

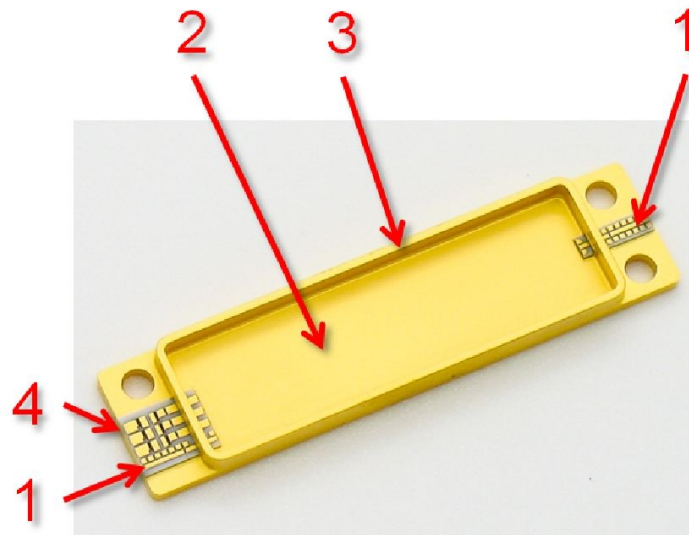
- Например: Р2201.14-2 (подтип 22)

Конструкция металлокерамического корпуса

HTCC (High Temperature Co-fired Ceramic)



Поверхностный монтаж
на печатную плату

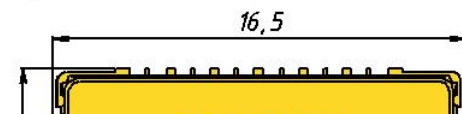
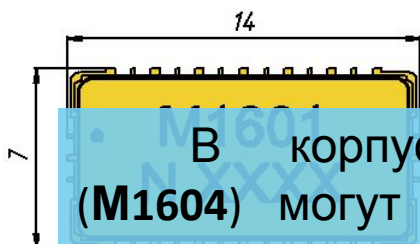
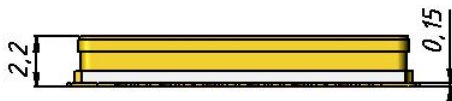


Корпус фланцевого
типа

Оба типа корпусов имеют **вводы/выводы СВЧ сигнала (1)**, теплоотводящее основание из сплава медь-вольфрам (2), обечайку из ковара (3) и низкочастотные вводы/выводы (4) для подачи питания и сигналов управления.

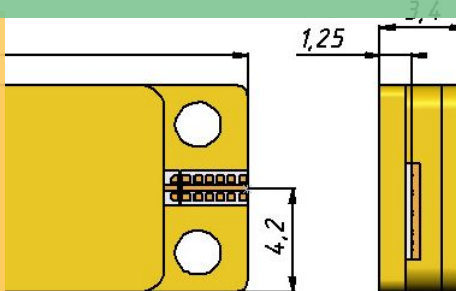
Микрокорпуса имеют герметичность не хуже $1,0 \cdot 10^{-9}$ м³·Па/с и могут герметизироваться различными способами.

Габаритные и присоединительные размеры разработанных микрокорпусов



В корпусах фланцевого типа (M1604) могут выполняться выходные одно- и многокаскадные арсенид-галлиевые и нитридгаллиевые

В корпусах фланцевого типа (M1604) могут выполняться выходные одно- и многокаскадные арсенид-галлиевые и нитридгаллиевые усилители с выходной мощностью до 20 Вт, в том числе с детектором огибающей



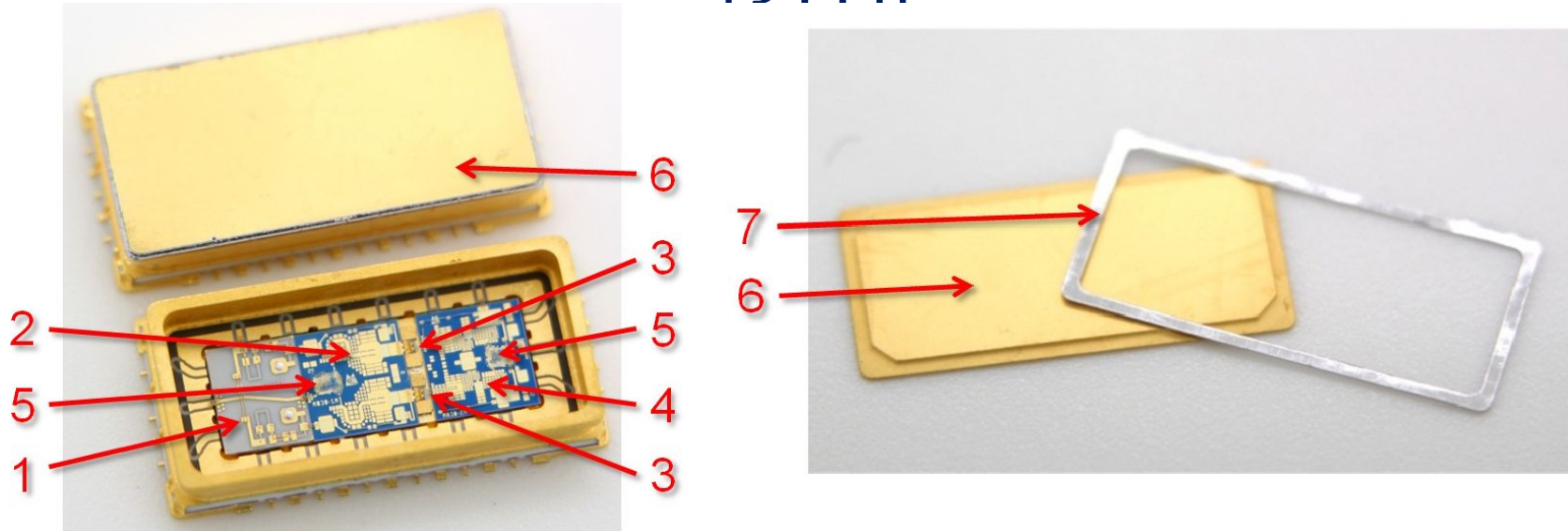
В многовыводных корпусах поверхностного монтажа (M1601 и M1603) возможно изготовление: малозумящих усилителей, усилителей средней мощности, аттенюаторов, фазовращателей, смесителей,

детекторов и др.

Ширина корпусов составляет от 8,2 мм до 10,8 мм, длина от 14 до 34 мм.

Высота корпусов с крышкой не более 3 мм.

Конструкция сверхширокополосного интегрального усилителя мощности диапазона 3,5 12 ГГц.

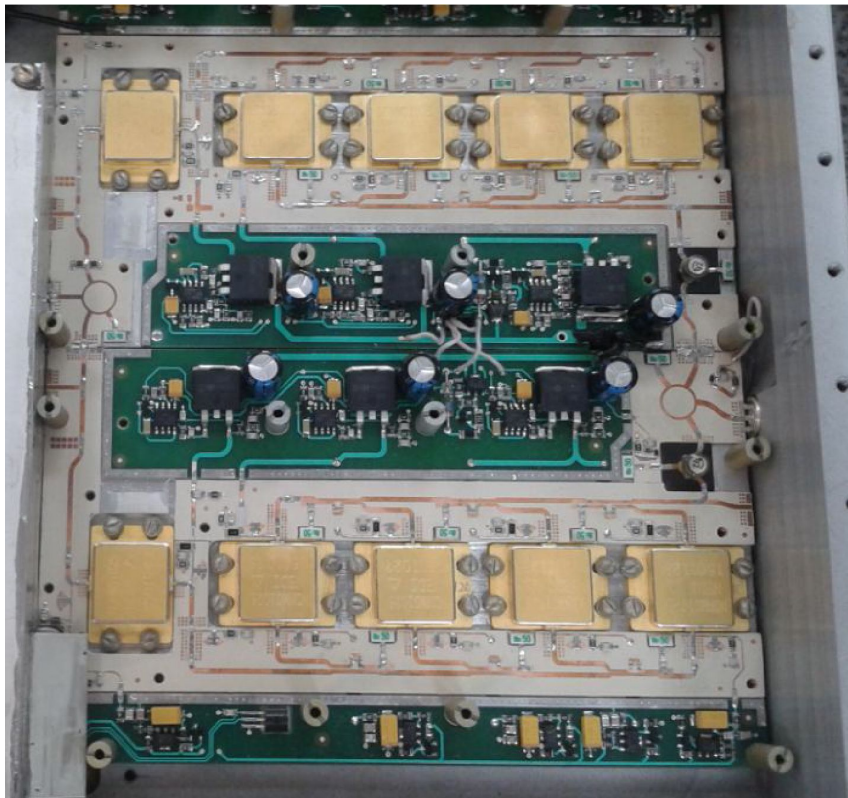


Усилитель построен на основе гибридно-монокристаллической технологии, по балансной схеме с согласующими цепями на основе полуизолирующего арсенида галлия толщиной 100 мкм (2, 4) и компактными квадратными мостами (5) с размерами 1,04·0,74 мм.

В качестве активных элементов используются рНЕМТ-транзисторы с шириной затвора 1200 мкм (3). На входе усилителя установлена поликоробовая плата (1) толщиной 0,127 мм с цепями задания режима транзисторов. Усилитель герметизируется при помощи экранирующей крышки (6) и специальной преформы (7) припоя, повторяющей контур обечайки корпуса.

Оплавление происходит в вакуумной печи с разреженным азотом при температуре 300 °С и затем герметизированный модуль можно устанавливать на печатную плату с использованием припоя типа Sn62.

Усилительный модуль X-диапазона с
выходной импульсной мощностью 400
ватт



Общий вид макета
усилителя

