

# Лекция 1. Введение в курс

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СОВРЕМЕННЫХ ЭВМ

Факультет ВМК, 4-й курс, 431 группа, 7-й семестр  
Лекции 3 часа в неделю (1 лекция в неделю);  
семинары 1 час в неделю (начиная с 3-ей недели); зачет

*Авторы курса:*

*доцент  
доцент  
профессор*

*В.Б. Морозов  
К.В. Руденко  
В.В. Шувалов*

*Программа курса может быть выслана по электронной почте (формат WinWord 7.0, файл \*.doc) при поступлении запроса по адресу [vsh@vsh.phys.msu.su](mailto:vsh@vsh.phys.msu.su)*

*либо загружена в формате Adobe Acrobat (файл \*.pdf) с сайта курса  
<http://comp.ilc.edu.ru>*

# Лекция 1. Введение в курс

## Лекции

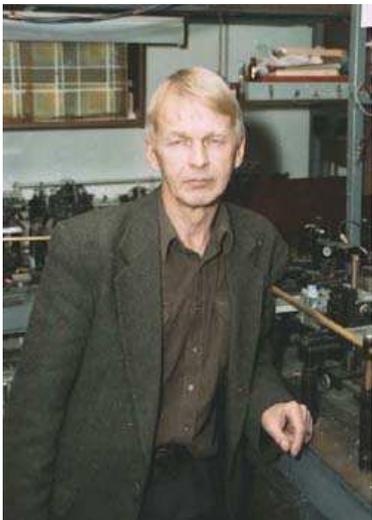
*Руденко Константин Валентинович,  
физический факультет МГУ, доцент  
kroky@kroft.ru, (495) 939-1980*



*Морозов Вячеслав Борисович,  
физический факультет МГУ, доцент  
morozov@phys.msu.ru, (495) 939-1934*



*Шувалов Владимир Владимирович,  
физический факультет МГУ, профессор  
vsh@vsh.phys.msu.su, (495) 939-503535*



# Лекция 1. Введение в курс

## Семинарские занятия (коллоквиумы)



*Ожередов Илья Александрович,  
физический факультет МГУ,  
старший преподаватель  
ilya@lasmed.phys.msu.ru, (495) 939-1106*

**Лекции:** Пятница, 2-я и первая половина 3-ей пары

начало 10-30, ауд. 6-09

**Семинары:** Пятница, вторая половина 3-ей пары (начиная с 3-ей недели)

начало 13-40, ауд. 6-09

# Лекция 1. Введение в курс

## Зачем?

Подход «домохозяйки»: работает и слава богу или не работает - значит не слава богу.

*Основной минус – отсутствуют ответы на элементарные вопросы:*

- что надо купить?*
- что с этим дальше можно будет делать?*
- чего с этим дальше нельзя будет делать?*
- когда все это придется выбросить?*

. . . . .

Квалифицированный подход предполагает оптимальное решение всех этих проблем, т.к.

Вы имеете нужную информацию для того, чтобы сделать разумный и оптимальный выбор

## Цель курса

Ознакомить слушателей с физическими принципами, элементной базой и основами функционирования современных ЭВМ (компьютеров)



# Лекция 1. Введение в курс

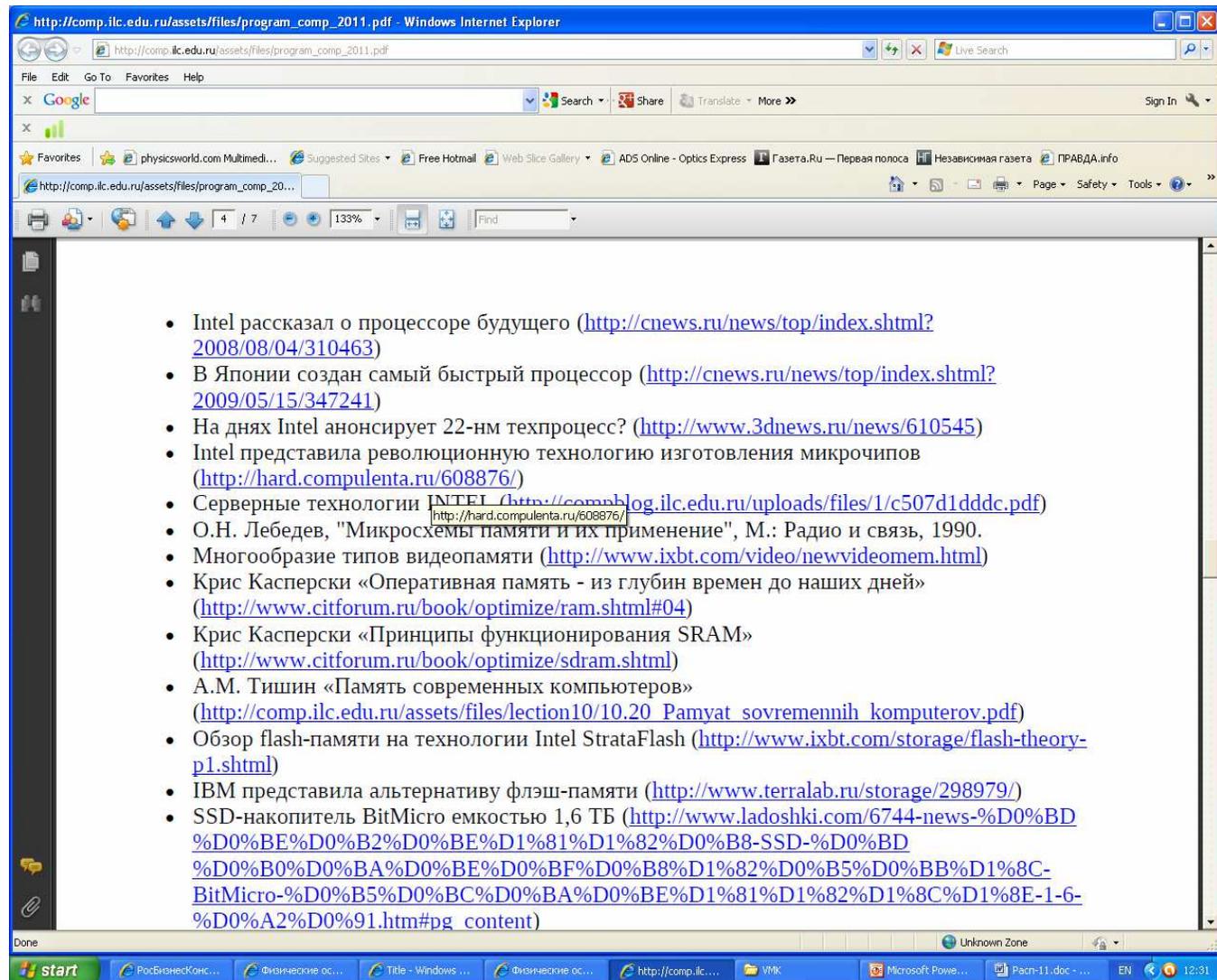
Сайт курса  
основная страница

The screenshot shows a Windows Internet Explorer browser window displaying the website 'Физические основы ЭВМ'. The browser's address bar shows the URL 'http://comp.ilc.edu.ru/'. The website has a dark red header with the title 'Физические основы ЭВМ'. Below the header is a navigation menu with tabs for 'Главная', 'Лекции', 'Материалы', 'Студенческие блоги!', 'Работы студентов', 'Блог', and 'Контакты'. The main content area is titled 'Физические основы элементной базы современных ЭВМ' and provides information about the course at Moscow State University, including the faculty, course level, and schedule. It also lists lecturers and seminar leaders. A sidebar on the right contains a login form with fields for 'Логин:' and 'Пароль:', a 'Войти' button, and an 'Облако тегов' (tag cloud) with terms like 'архитектура ЭВМ', 'многопроцессорные конфигурации', and 'память, mram, ram'. The Windows taskbar at the bottom shows the Start button and several open applications.

<http://comp.ilc.edu.ru/>

# Лекция 1. Введение в курс

[http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program\\_comp\\_2011.pdf](http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program_comp_2011.pdf)



The screenshot shows a Windows Internet Explorer browser window with the address bar displaying [http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program\\_comp\\_2011.pdf](http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program_comp_2011.pdf). The browser's address bar also shows the URL [http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program\\_comp\\_2011.pdf](http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program_comp_2011.pdf). The main content area of the browser displays a list of links related to computer memory technology, including:

- Intel рассказал о процессоре будущего (<http://cnews.ru/news/top/index.shtml?2008/08/04/310463>)
- В Японии создан самый быстрый процессор (<http://cnews.ru/news/top/index.shtml?2009/05/15/347241>)
- На днях Intel анонсирует 22-нм техпроцесс? (<http://www.3dnews.ru/news/610545>)
- Intel представила революционную технологию изготовления микрочипов (<http://hard.compulenta.ru/608876/>)
- Серверные технологии INTEL (<http://compblog.ilc.edu.ru/uploads/files/1/c507d1dddc.pdf>)
- О.Н. Лебедев, "Микросхемы памяти и их применение", М.: Радио и связь, 1990.
- Многообразие типов видеопамяти (<http://www.ixbt.com/video/newvideomem.html>)
- Крис Касперски «Оперативная память - из глубин времен до наших дней» (<http://www.citforum.ru/book/optimize/ram.shtml#04>)
- Крис Касперски «Принципы функционирования SRAM» (<http://www.citforum.ru/book/optimize/sdram.shtml>)
- А.М. Тишин «Память современных компьютеров» ([http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/lection10/10.20\\_Pamyat\\_sovremennih\\_komputerov.pdf](http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/lection10/10.20_Pamyat_sovremennih_komputerov.pdf))
- Обзор flash-памяти на технологии Intel StrataFlash (<http://www.ixbt.com/storage/flash-theory-p1.shtml>)
- IBM представила альтернативу флэш-памяти (<http://www.terralab.ru/storage/298979/>)
- SSD-накопитель BitMicro емкостью 1,6 ТБ ([http://www.ladoshki.com/6744-news-%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8-SSD-%D0%BD%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C-BitMicro-%D0%B5%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C%D1%8E-1-6-%D0%A2%D0%91.htm#pg\\_content](http://www.ladoshki.com/6744-news-%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8-SSD-%D0%BD%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C-BitMicro-%D0%B5%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C%D1%8E-1-6-%D0%A2%D0%91.htm#pg_content))

Сайт курса  
программа

# Лекция 1. Введение в курс

## Сайт курса материалы

The screenshot shows a Windows Internet Explorer browser window displaying the website <http://comp.ilc.edu.ru/materials.html>. The page features a navigation menu with tabs for 'Главная', 'Лекции', 'Материалы', 'Студенческие блоги', 'Работы студентов', 'Блог', and 'Контакты'. The main content area is titled 'Материалы курса' and lists 11 lecture topics. The first topic, 'Лекция 1. Введение в курс', is highlighted. Below the list, there is a detailed description of the course content, including topics like 'Цифровая обработка сигналов', 'Квантование', 'Теорема Котельникова', and 'Частота Найквиста'. On the right side of the page, there is a login form with fields for 'Логин:' and 'Пароль:', a 'Войти' button, and a 'Облако тегов' (tag cloud) containing terms like 'архитектура ЭВМ', 'память', 'ram', and 'ddr'.

Материалы курса

- Лекция 1. Введение в курс
- Лекция 2. Физические основы электропроводимости металлов и полупроводников
- Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды
- Лекция 4. Биполярные и полевые транзисторы
- Лекция 5. Элементная база современных ЭВМ
- Лекция 6. Системный блок ЭВМ
- Лекция 7. Полупроводниковые запоминающие устройства
- Лекция 8. Интерфейсы ввода-вывода
- Лекция 9. Внешняя память в ЭВМ
- Лекция 10. Внешняя память в ЭВМ
- Лекция 11. Связь ЭВМ с внешней средой: ввод и вывод информации

Ввод и вывод цифровой и аналоговой информации. Цифро-аналоговое преобразование (ЦАП). Погрешности ЦАП. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Погрешности АЦП. Понятие о цифровом методе хранения и передачи аналоговой информации. Ввод оптического изображения в ЭВМ, приборы с зарядовой связью (ПЗС), ПЗС-камера (ССД). Принципы отображения информации на твердом носителе - принтеры и плоттеры. Алфавитно-цифровые и графические принтеры. Матричные, струйные, лазерные и светодиодные принтеры. Цветная печать.

- [Цифровая обработка сигналов](#)
- [Квантование](#)
- [Теорема Котельникова](#)
- [Частота Найквиста](#)
- [Дискретизация](#)
- [Частота дискретизации](#)
- [Шум квантования](#)
- [Аналого-цифровой преобразователь](#)
- [Цифро-аналоговый преобразователь](#)
- [От аналогового к цифровому](#)
- [FAQ по цифровому представлению звуковых сигналов](#)
- [Приборы с зарядовой связью - прецизионный взгляд на мир](#)
- [Рассуждения о телевизионных камерах](#)
- [Ликбез - технологии в видеокамерах](#)
- [Как работает принтер - обзор технологий печати](#)
- [Современные способы компьютерной печати 1](#)
- [Современные способы компьютерной печати 2](#)

Логин:   
Пароль:   
 Запомнить меня.  
 Забыли пароль?

**Облако тегов**

архитектура ЭВМ, многопроцессорные конфигурации, триггер, регистры, АЛУ, УУ, конвейер, микропрограмма, процессор, Iq, архитектура фон Неймана, история ЭВМ, Джон фон Нейман, flash, запоминающие устройства, новости науки, Лебедев С.А., БЭСМ, память, mram, ram, передача сигнала, ВОЛС, ddr, sdram,

<http://comp.ilc.edu.ru/materials.html>

# Лекция 1. Введение в курс

<http://comp.ilc.edu.ru/conspect.html>

The screenshot shows a Windows Internet Explorer browser window displaying the website 'Лекции' (Lectures). The address bar shows the URL <http://comp.ilc.edu.ru/conspect.html>. The page has a red header with the word 'Лекции' and a navigation menu with buttons for 'Главная', 'Лекции', 'Материалы', 'Студенческие блоги!', 'Работы студентов', 'Блог', and 'Контакты'. The main content area is titled 'Конспекты лекций' and contains a list of 14 lecture topics, each with a link to a presentation. The right sidebar includes a login form with fields for 'Логин:' and 'Пароль:', a 'Войти' button, and a section titled 'Облако тегов' (Tag Cloud) with various computer-related terms like 'архитектура ЭВМ', 'многопроцессорные конфигурации', 'регистры', 'АЛУ', 'УУ', 'конвейер', 'микропрограмма', 'процессор', 'lq', 'архитектура фон Неймана', 'история ЭВМ', 'Джон фон Нейман', 'flash', 'запоминающие устройства', 'новости науки', 'Лебедев С.А.', 'БЭСМ', 'ПАМЯТЬ', 'mram', 'ram', 'передача сигнала', 'ВОЛС', 'ddr', 'sdram'. The footer of the page contains the text '© 2006 MSU Phys. Dept. | DESIGN BY SUPER J MAN' and a small search box.

Сайт курса  
материалы

# Лекция 1. Введение в курс

Сайт курса  
блог

Компьютерные блоги студентов ВМК. Физические основы ЭВМ. - Windows Internet Explorer

http://compblog.ilc.edu.ru/

File Edit View Favorites Tools Help

Google Search Share Translate More Sign In

physicsworld.com Multimed... Suggested Sites Free Hotmail Web Slice Gallery ADS Online - Optics Express Газета.Ru — Первая полоса Независимая газета ПРАВДА.info

Компьютерные блоги студентов ВМК. Физические...

CompBlogs Блоги Участники Правила О проекте Войти или Зарегистрироваться

Все Коллективные Персональные TOP

Хорошие Поиск

новости учебные материалы наука технологии чудные азиаты автоматизация и робототехника все коллективные блоги

Поведение графена зависит от "обертки"  
учебные материалы

Поведение графена зависит от «обертки»  
CNews, 17.08.12

Содержание коробки с подарком не меняется в зависимости от того, чем вы ее обернете. Удивительно, но эксперименты ученых из Массачусетского технологического института показывают, что к графену это не относится — он ведет себя совершенно по-разному в зависимости от характера материала, которым он обернут. В зависимости от того, на какой подложке находится графен, его фундаментальные свойства, например, электропроводность и химическая активность, приобретают совершенно новые характеристики. Это существенно расширяет возможности этого и без того удивительного материала.

( Читать дальше )

графен, свойства, нанотехнологии, подложка

21 августа 2012, 07:22 vsh Комментарии: комментировать

Спутниковые операторы России вынуждены надеяться на Запад  
учебные материалы

Прямой эфир

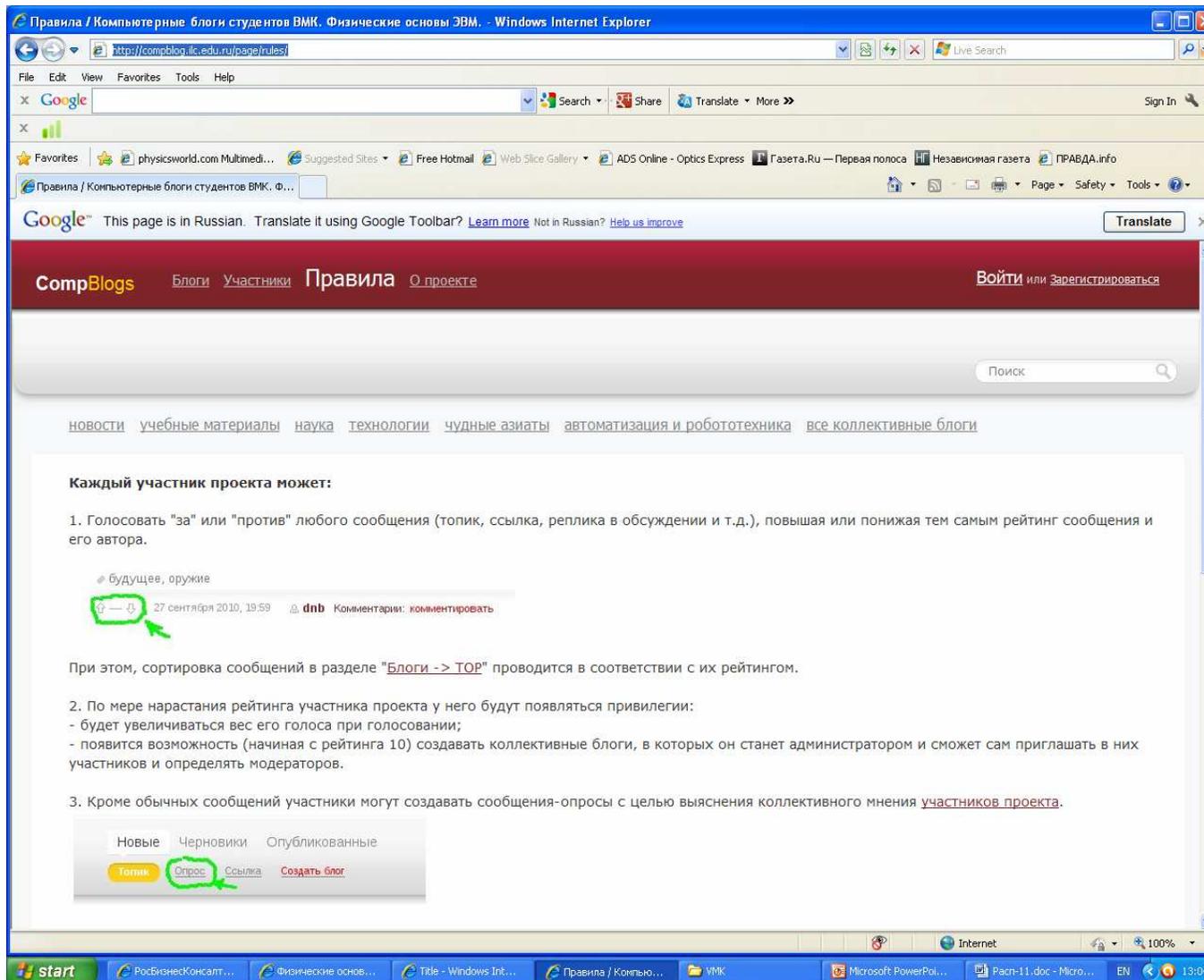
Публикации Комментарии

- vsh → ДНК заглянула: все: анонизирована самой емкой и долговечный носитель информации 2 в новости
- vsh → И опять: успех американского ученого. На этот раз Ивана Пупырева 2 в технологии
- DialogExpert → Найден способ увеличения ёмкости суперконденсаторов 1 в новости
- vsh → 14 нанометров - in development: 10, 7 и 5 нанометров - in research 1 в новости
- vsh → Совсем запутались эти китайцы 1 в наука
- vsh → Вот оказывается ты какое - будущее современной электроники 1 в наука
- vsh → DARPA - это каждой бочке затычка 1 в технологии
- vsh → Любопытное видео 1 в автоматизация и робототехника
- vsh → Наконец-то 1 в новости
- vsh → Вот такая будет дополненная реальность 3 в новости
- vsh → И Hewlett-Packard туда же 1 в новости
- vsh → Об Intel, PCI-Express 3.0 и Thunderbolt 1 в новости
- vsh → Apple представила «новый iPad» 1 в новости

<http://compblog.ilc.edu.ru/>

# Лекция 1. Введение в курс

<http://compblog.ilc.edu.ru/page/rules/>



Правила / Компьютерные блоги студентов ВМК. Физические основы ЭВМ. - Windows Internet Explorer

<https://compblog.ilc.edu.ru/page/rules/>

File Edit View Favorites Tools Help

Google Search Share Translate More Sign In

physicsworld.com Multimed... Suggested Sites Free Hotmail Web Slice Gallery ADS Online - Optics Express Газета.Ru — Первая полоса Независимая газета ПРАВДА.info

Правила / Компьютерные блоги студентов ВМК. Ф...

Google This page is in Russian. Translate it using Google Toolbar? [Learn more](#) Not in Russian? [Help us improve](#) Translate

CompBlogs Блоги Участники Правила О проекте Войти или Зарегистрироваться

Поиск

[новости](#) [учебные материалы](#) [наука](#) [технологии](#) [чудные азиаты](#) [автоматизация и робототехника](#) [все коллективные блоги](#)

**Каждый участник проекта может:**

1. Голосовать "за" или "против" любого сообщения (топик, ссылка, реплика в обсуждении и т.д.), повышая или понижая тем самым рейтинг сообщения и его автора.

◆ будущее, оружие

27 сентября 2010, 19:59 dnb Комментарий: [комментировать](#)

При этом, сортировка сообщений в разделе "[Блоги -> TOP](#)" проводится в соответствии с их рейтингом.

2. По мере нарастания рейтинга участника проекта у него будут появляться привилегии:
  - будет увеличиваться вес его голоса при голосовании;
  - появится возможность (начиная с рейтинга 10) создавать коллективные блоги, в которых он станет администратором и сможет сам приглашать в них участников и определять модераторов.
3. Кроме обычных сообщений участники могут создавать сообщения-опросы с целью выяснения коллективного мнения [участников проекта](#).

Новые Черновики Опубликованные

Топик **Опрос** Ссылка Создать блог

start РосБизнесКонсалт... Физические основ... Title - Windows Int... Правила / Компью... VМК Microsoft PowerPol... Расп-11.doc - Микро... EN 13:04

Сайт курса  
правила блога

# Лекция 1. Введение в курс

## Введение в курс

Компьютер и информация:

некоторые определения и история развития вычислительной техники, поколения компьютеров и их элементная база.

Экспоненциальное развитие и закон Мура.

Роль полупроводниковых (ПП) материалов в элементной базе современных ЭВМ.

Преимущества сверхбольших интегральных схем (СБИС) перед дискретными компонентами.

Технологическая база СБИС и степень интеграции. Фотолитография.

Воспроизводимость параметров и минимальный топологический размер.

Основные направления развития СБИС:

кремниевые МОП структуры,

арсенид - галлиевые и металл - полупроводниковые структуры.

Перспективы развития микроэлектроники.

# Лекция 1. Введение в курс

## Компьютер и информация



*Компьютер PDP-11/40*

Компьютер («вычислитель») = ЭВМ (электронная вычислительная машина) – вычислительная машина, предназначенная для передачи, хранения и обработки информации по заранее определенным алгоритмам

В настоящее время аббревиатура ЭВМ в основном используется как правовой термин, а также для обозначения компьютерной техники 1940-х - 1970-х годов, преимущественно советского производства

Компьютеры используются и для управления информацией, но и эти задачи также сводятся к неким последовательностям вычислений

# Лекция 1. Введение в курс

## Компьютер и информация

Компьютер может функционировать за счёт перемещения механических частей, движения электронов, фотонов, других частиц либо использования каких-то других физических эффектов



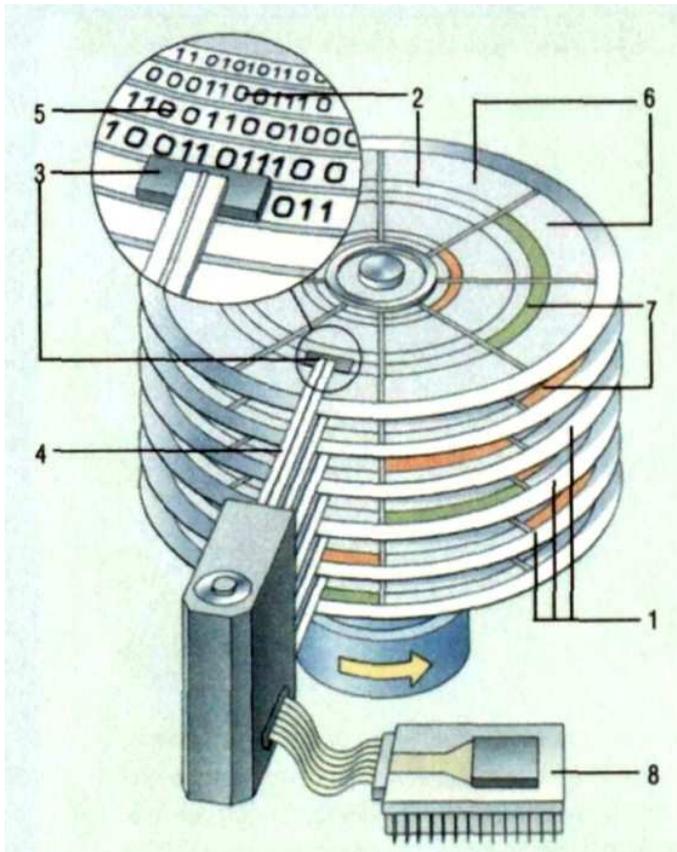
*Процессор со снятым кулером*

Архитектура компьютера может непосредственно моделировать решаемую проблему, максимально близко (в смысле математического описания) отражая исследуемые физические явления (пример - аналоговые компьютеры)

В большинстве современных компьютеров информация представляется в двоичной форме, после чего ее обработка сводится к применению простой алгебры логики (булевых операций)

# Лекция 1. Введение в курс

## Компьютер и информация



Информация на магнитном носителе

Информация (от *informatio* - осведомление, разъяснение, изложение) - абстрактное понятие, имеющее множество значений, зависящих от контекста. В узком смысле этого термина - сведения (сообщения, данные) независимо от формы их представления

Общего определения термина информация нет. С точки зрения разных областей знания он описывается своими специфическими наборами признаков. Достаточно часто этот термин можно трактовать, как совокупность данных, зафиксированных на каком-то носителе, сохраненных и распространяемых во времени и в пространстве

# Лекция 1. Введение в курс

## Компьютер и информация

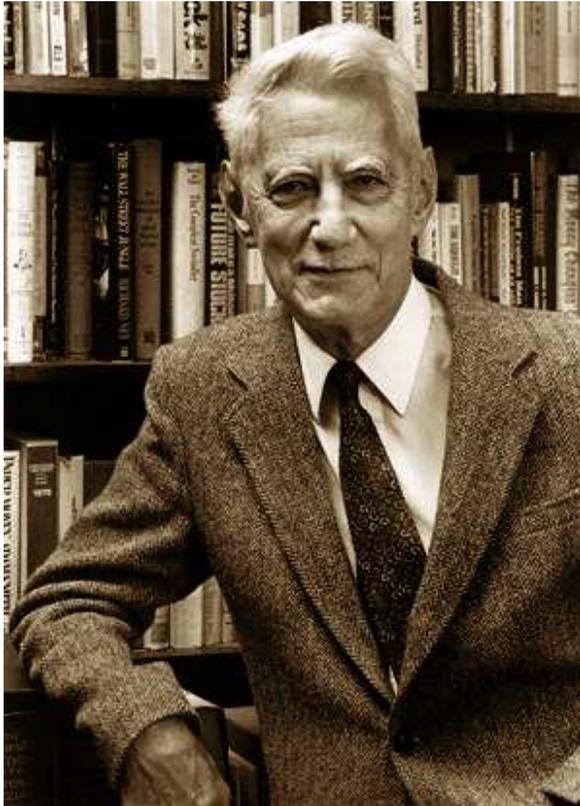
Информацию можно классифицировать, например, по

- 1) способу восприятия  
*визуальная - воспринимаемая органами зрения,  
аудио - органами слуха,  
тактильная - тактильными рецепторами,  
обонятельная - обонятельными рецепторами,  
вкуссовая - вкусовыми рецепторами и т.д.*
- 2) форме представления  
*текстовая - передаваемая в виде символов,  
обозначающих языковые лексемы,  
числовая - в виде цифр и знаков, обозначающих  
математические действия,  
графическая - в форме изображений,  
звуковая - в виде передачи языковых лексем аудио  
путём и т.д.*



# Лекция 1. Введение в курс

## Компьютер и информация



*Клод Элвуд Шеннон*

Пусть мы имеем некоторую неопределенность, и существует  $N$  вариантов разрешения этой неопределенности. Пусть каждый вариант имеет также некую вероятность разрешения, тогда количество информации можно рассчитать по формуле, предложенной Шенноном:

$$I = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \dots + p_N \log_2 p_N)$$

где  $I$  - количество информации;  $N$  - количество исходов;  
 $p_1, p_2, \dots, p_N$  - вероятности исхода.

Для равновероятных событий формула упрощается

$$I = \log_2 N$$

Количество информации измеряется в битах (Binary digit) и байтах. Обычно байт равен 8 битам. И если бит позволяет выбрать один равновероятный вариант из двух возможных, то байт – уже 1 из 256

# Лекция 1. Введение в курс

## История развития вычислительной техники

3000 лет до н.э. - Древний Вавилон, первые счеты – абак,

500 лет до н.э. - Китай, более прогрессивный вариант абака с косточками на соломинках – суаньпань,

XVI век – Россия, счеты с 10 деревянными шариками на проволоке



*Реконструкция абака, Рим*



*Логарифмический круг*

87 год до н.э. - Греция, механический астрономический вычислитель на основе зубчатых передач,

1492 год - Леонардо да Винчи, 13-разрядное суммирующее устройство с десятизубцовыми кольцами,

1623 год - Вильгельм Шиккард, устройство на базе зубчатых колес для сложения и вычитания шестиразрядных чисел.

1630 год - Ричард Деламейн, круговая логарифмическая линейка

# Лекция 1. Введение в курс

## История развития вычислительной техники

1642 год – Паскаль, механическое цифровое устройство для суммирования и вычитания пятиразрядных чисел

1673 год – Лейбниц, механический калькулятор для сложения, вычитания, умножения и деления в двоичной системе



*Устройство Паскаля*



*Станок Жаккара*

1723 год – Христиан Герстен, арифметическая машина с возможностью контроля за правильностью ввода данных

1786 год – Иоганн Мюллер, разностная машина на ступенчатых валиках Лейбница, выполняющая четыре арифметических действия над 14-разрядными числами.

1801 год – Жозеф Мари Жаккар, ткацкий станок с программным управлением, заданным с помощью перфокарт

# Лекция 1. Введение в курс

## История развития вычислительной техники

1820 год – Тома де Кальмар, промышленный выпуск арифмометров

1822 год – Чарльз Бэббидж, разностная машина для автоматического построения математических таблиц

1876 год – П.Л. Чебышев, суммирующий аппарат (т.н. арифмометр Чебышева)



*Арифмометр 1932 года выпуска*



*Часть разностной машины  
Бэббиджа*

1884 – 1887 годы – Холлерит, электрическая табулирующая система (переписи населения США и России)

1912 год – А.Н. Крылов, машина для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений

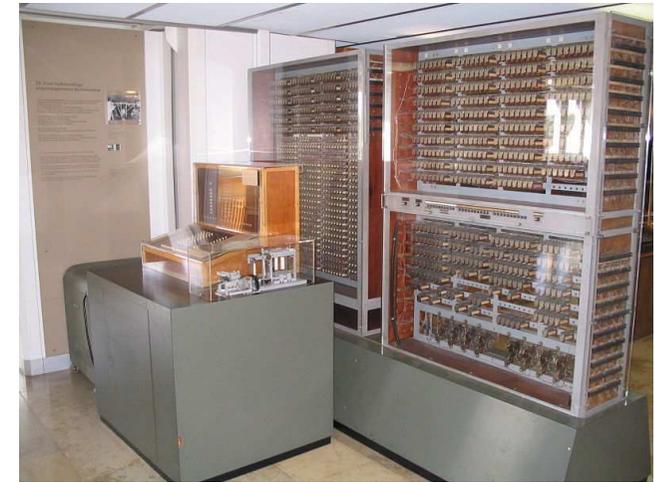
1927 год – Массачусетский технологический институт, аналоговый компьютер

# Лекция 1. Введение в курс

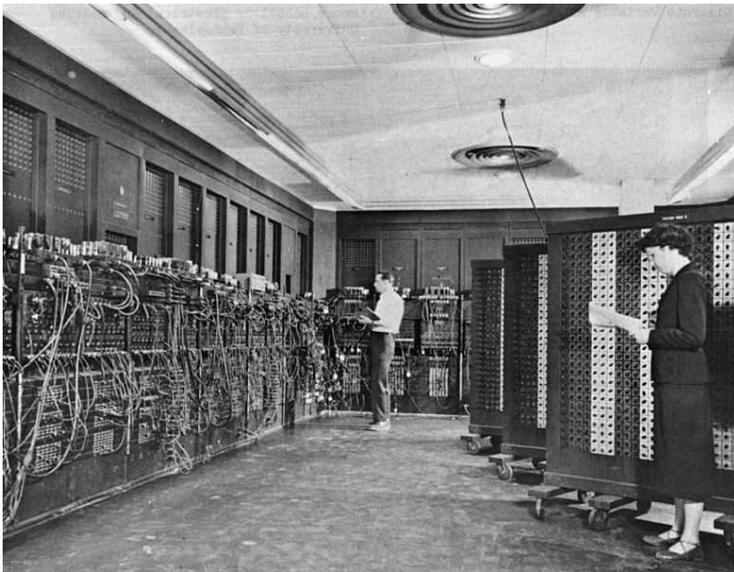
## История развития вычислительной техники

1938 год – Конрад Цузе, программируемые механические цифровые машины Z1 и Z2

1941 год - Конрад Цузе, Z3 - первая свободно программируемая в двоичном коде вычислительная машина, обладающая всеми свойствами современного компьютера



*Воссозданный Z3*



ЭНИАК

1943 год – Англия, вычислительная машина Колосс (расшифровка кодов фашистской Германии)

1944 год – Конрад Цузе, Z4 – первый компьютер с программированием на языке высокого уровня

1946 год - первая универсальная электронная цифровая вычислительная машина ЭНИАК

1949 год – США, вычислительная машина Марк 1 (для баллистических расчётов)

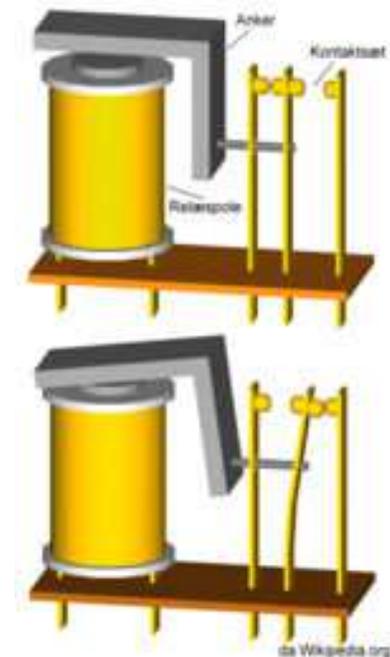
# Лекция 1. Введение в курс

## Поколения компьютеров и их элементная база

Классификацию поколений компьютеров проводят на основе технологий, используемых при их создании.

Первые вычислительные машины были чисто механическими устройствами. Однако уже в 30-х годах XX века в компьютерах начинают использоваться электромеханические компоненты – реле.

Механические и электромеханические системы относят к т.н. **нулевому поколению** компьютеров.



*Принцип действия реле*

# Лекция 1. Введение в курс

## Поколения компьютеров и их элементная база



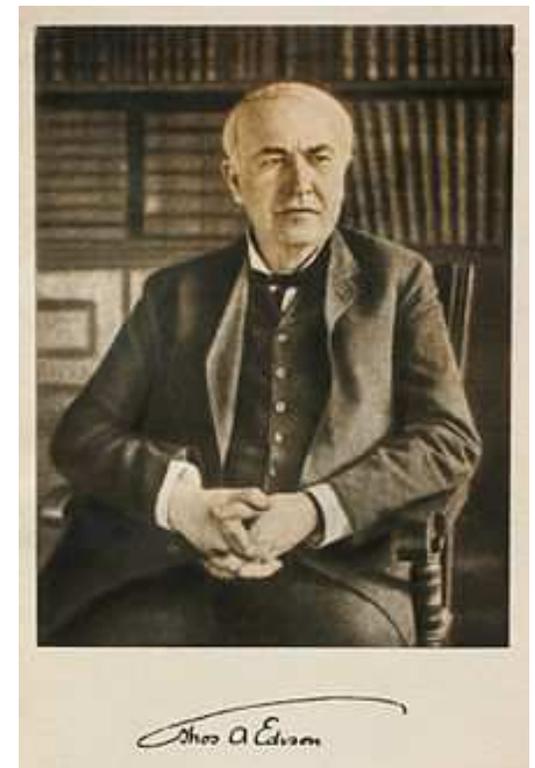
*«Пальчиковые» лампы*

В 40-х годах XX века появляются первые компьютеры на базе вакуумных электронных приборов - ламп (**первое поколение** компьютеров с архитектурой фон Неймана).

В 50-х – начале 60-х годов XX века на смену лампам приходят дискретные полупроводниковые устройства – транзисторы и диоды (**второе поколение**),

В конце 60-х начинают использоваться полупроводниковые ИС (чипы), в зависимости от степени интеграции говорят о **третьем и четвертом поколениях компьютеров**

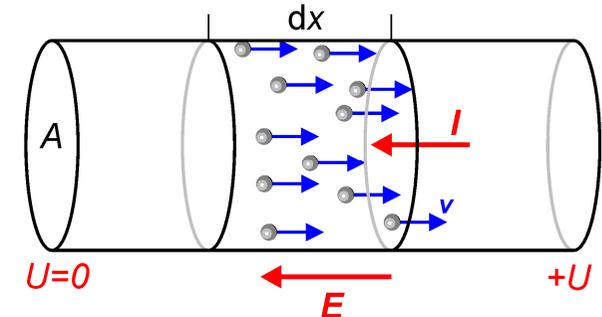
*Томас Эдиссон –  
открыватель явления  
термоэлектронной  
эмиссии*



# Лекция 1. Введение в курс

## Почему именно электроника ?

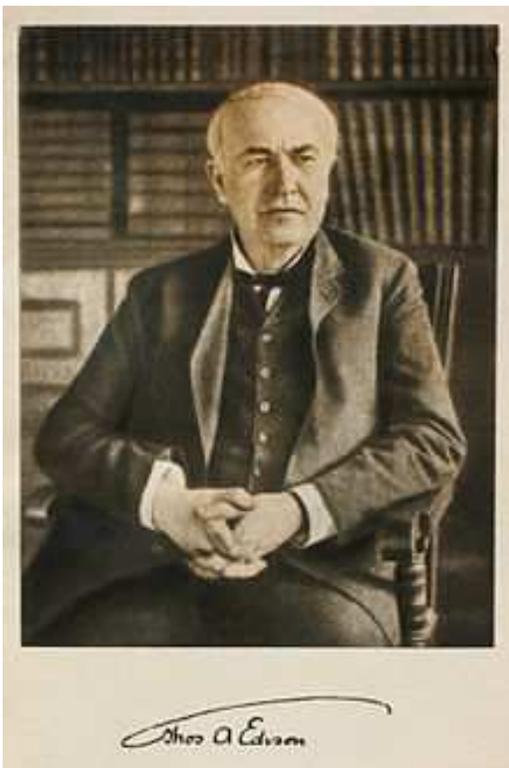
- 1) Бесконтактное воздействие на заряженные частицы электрическим / магнитным полем
- 2) Скорость распространения управляющих сигналов  
 $c = 3 \times 10^{10}$  см/сек
- 3) Малая масса заряженной частицы (электрон)  
 $m_e = 9 \times 10^{-28}$  грамм
- 4) Малая величина элементарного заряда  
 $q_e = 1.6 \times 10^{-19}$  Кулона
- 5) Малая энергия теплового движения элементарного заряда при  $T = 300$  К  
 $1 \text{ эВ} = 1.6 \times 10^{-19}$  Дж = 11 600 К
- 6) Малая энергия, нужная для записи бита информации.  
На сегодня это  
 $\sim 100 \times 1 \text{ эВ} = 1.6 \times 10^{-17}$  Дж



# Лекция 1. Введение в курс

## Поколения компьютеров и их элементная база

*Томас Эдиссон –  
открыватель явления  
термоэлектронной  
эмиссии*



Электронная лампа - электровакуумный прибор (точнее, вакуумный электронный прибор), работающий за счет управления интенсивностью потока электронов, движущихся в вакууме или разреженном газе между электродами. Электронные лампы массово использовались в XX веке как активные элементы электронной аппаратуры (усилители, генераторы, детекторы, переключатели и т.п.). В настоящее время практически полностью вытеснены полупроводниковыми приборами

### **Принцип действия:**

За счет термоэлектронной эмиссии электроны покидают поверхность металлического катода

За счет разности потенциалов между анодом и катодом электроны двигаются к аноду, возникает анодный ток во внешней цепи

Меняя потенциал дополнительных электродов (сеток), величиной анодного тока можно управлять

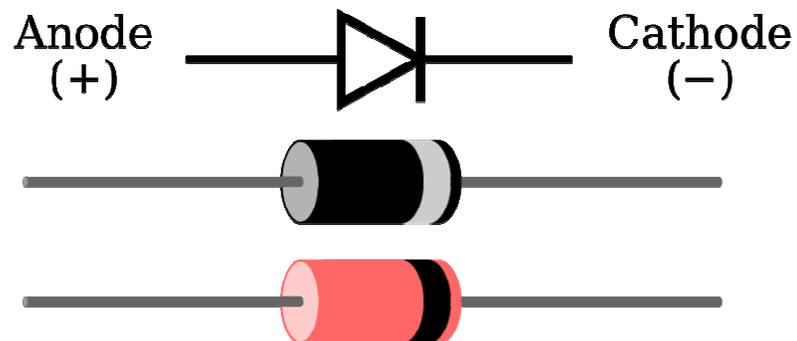
# Лекция 1. Введение в курс

## Поколения компьютеров и их элементная база

Первыми полупроводниковыми устройствами, созданными для применения в детекторных радиоприемниках, были т.н. точечные диоды (1899, К.Ф. Браун), которые изготавливали на основе сульфида свинца (Pb) и окиси олова (Sn). Позже были созданы полупроводниковые диоды и транзисторы на базе германия (Ge). Еще позже появились полупроводники на основе кремния (Si)



*Карл Фердинанд Браун*



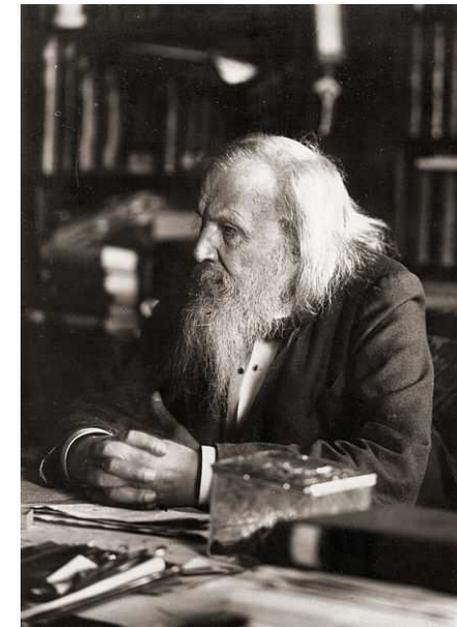
*Полупроводниковые диоды*

# Лекция 1. Введение в курс

## Поколения компьютеров и их элементная база

Все перечисленные элементы находятся в одной колонке периодической системе Менделеева и по мере развития электроники происходит движение по этой колонке вверх.

Логично допустить, что последующими востребованными полупроводниками станут материалы на базе углерода (C)



Д.И. Менделеев

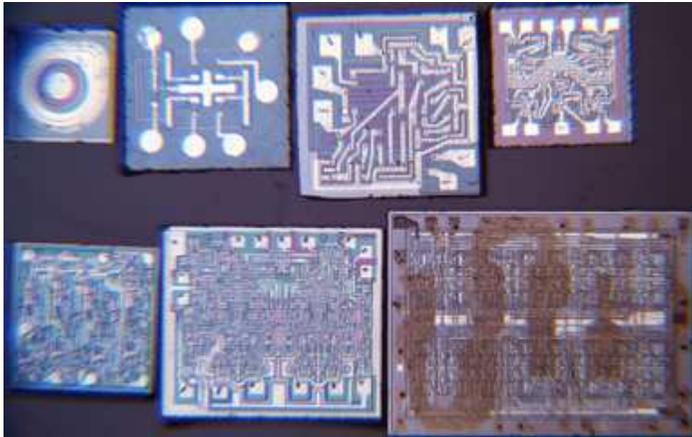
Периоды	Ряды	Группы элементов											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		0		
		- R <sub>2</sub> O	- RO	- R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RH <sub>4</sub> RO <sub>2</sub>	RH <sub>3</sub> R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	RH <sub>2</sub> RO <sub>3</sub>	RH R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>			RO <sub>4</sub>	-	-
1	I	1 H 1.00794 водород										2 He 4.00260 гелий	
2	II	3 Li 6.941 литий	4 Be 9.01218 бериллий	5 B 10.81 бор	6 C 12.011 углерод	7 N 14.0067 азот	8 O 15.9994 кислород	9 F 18.998403 фтор				10 Ne 20.179 неон	
3	III	11 Na 22.98977 натрий	12 Mg 24.305 магний	13 Al 26.98154 алюминий	14 Si 28.0855 кремний	15 P 30.97376 фосфор	16 S 32.06 сера	17 Cl 35.453 хлор				18 Ar 39.948 аргон	
4	IV	19 K 39.098 калий	20 Ca 40.08 кальций	21 Sc 44.9559 скандий	22 Ti 47.90 титан	23 V 50.9415 ванадий	24 Cr 51.996 хром	25 Mn 54.9380 марганец	26 Fe 55.847 железо	27 Co 58.9332 кобальт	28 Ni 58.70 никель		
	V	29 Cu 63.546 медь	30 Zn 65.38 цинк	31 Ga 69.72 галлий	32 Ge 72.59 германий	33 As 74.9216 мышьяк	34 Se 78.96 селен	35 Br 79.904 бром				36 Kr 83.80 криптон	
5	VI	37 Rb 85.4678 рубидий	38 Sr 87.62 стронций	39 Y 88.9059 иттрий	40 Zr 91.22 цирконий	41 Nb 92.9064 ниобий	42 Mo 95.94 молибден	43 Tc 99.9062 технеций	44 Ru 101.07 рутений	45 Rh 102.9055 родий	46 Pd 106.4 палладий		
	VII	47 Ag 107.8682 серебро	48 Cd 112.41 кадмий	49 In 114.82 индий	50 Sn 118.69 олово	51 Sb 121.75 сурьма	52 Te 127.60 теллур	53 I 126.9045 йод				54 Xe 131.30 ксенон	
6	VIII	55 Cs 132.9054 цезий	56 Ba 137.33 барий	57 La-Lu .. лантаноиды	58 Hf 178.49 гафний	59 Ta 180.9479 тантал	60 W 183.85 вольфрам	61 Re 186.207 рений	62 Os 190.2 осмий	63 Ir 192.22 иридий	64 Pt 195.09 платина		
	IX	79 Au 196.9665 золото	80 Hg 200.59 ртуть	81 Tl 204.37 таллий	82 Pb 207.2 свинец	83 Bi 208.9804 висмут	84 Po [209] полоний	85 At [210] астат				86 Rn [222] радон	
7	IX	87 Fr [223] франций	88 Ra 226.0254 радий	89 Ac-(Lr) [227] актиноиды	104 Ku [261] курчатовий	105 Ns [261] нильсборий							

Периодическая таблица элементов

В компьютерах живых существ (мозге) используются нейроны - длинные молекулы, одним из главных компонентов которых является именно углерод

# Лекция 1. Введение в курс

## Экспоненциальное развитие и закон Мура



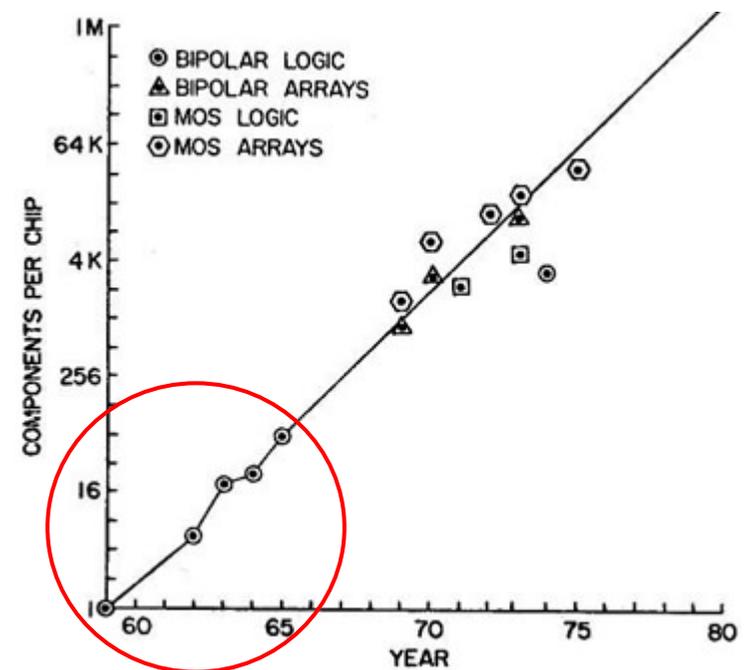
*Эти чипы - источник закона Мура*

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»

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



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

# Лекция 1. Введение в курс

## Экспоненциальное развитие и закон Мура



Учитывая полное число клеток (64), получаем число зерен

$$T_{64} = 1 + 2 + 4 + \dots + 2^{63} = \sum_{i=0}^{63} 2^i = 2^{64} - 1,$$

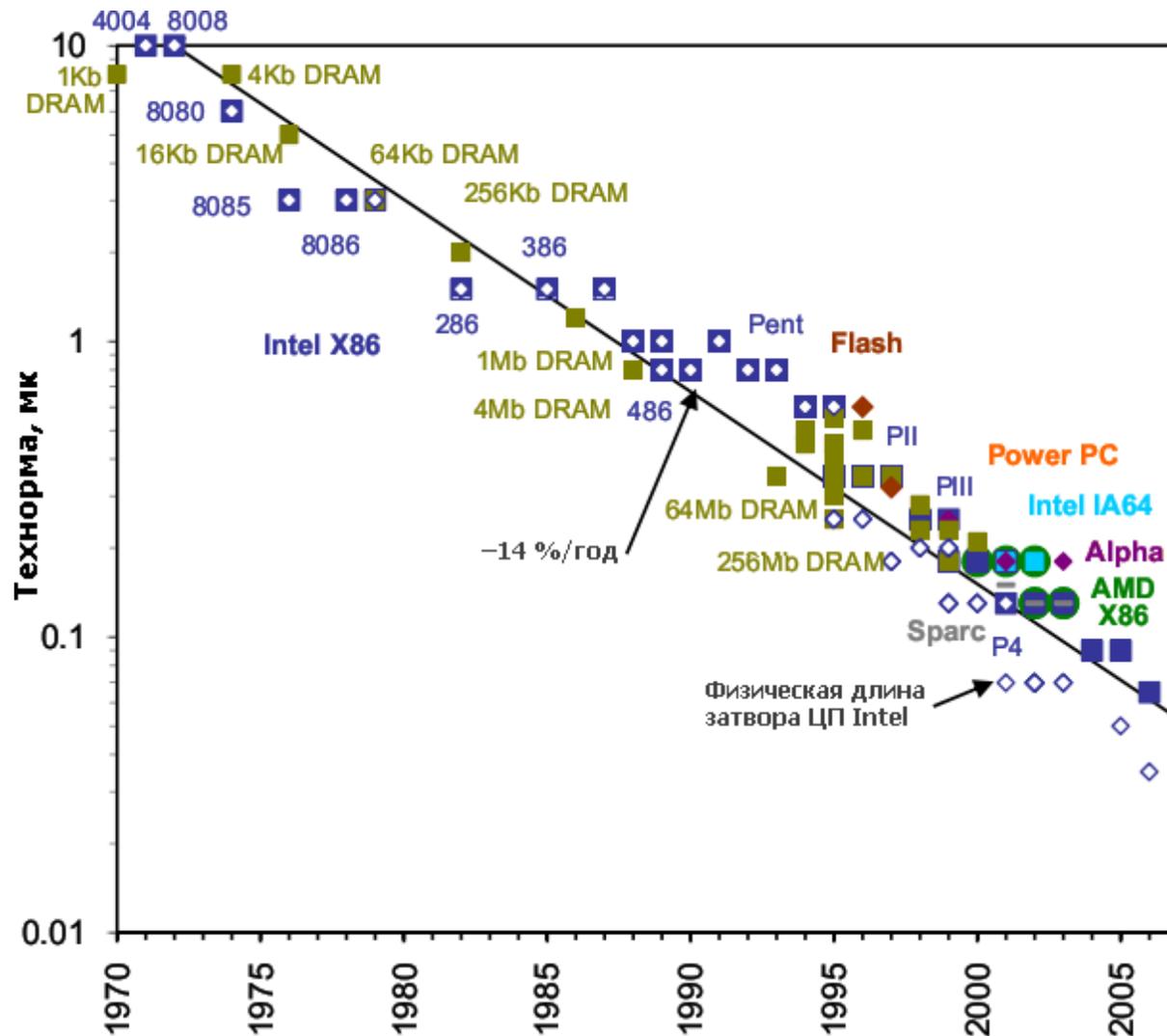
т.е. примерно 1,2 триллионов тонн

○	●	○○	○○○	○○○○	○○○○○	○○○○○○	○○○○○○○	128
256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768	
65K	131K	262K	524K	1M	2M	4M	8M	
16M	33M	67M	134M	268M	536M	1G	2G	
4G	8G	17G	34G	68G	137G	274G	549G	

*Изобретатель шахмат Сесса (Сисса) попросил за первую клетку шахматной доски заплатить ему одно зерно пшеницы (риса), за вторую - два, за третью - четыре и т.д., т.е. удваивая количество зёрен на каждой следующей клетке*

# Лекция 1. Введение в курс

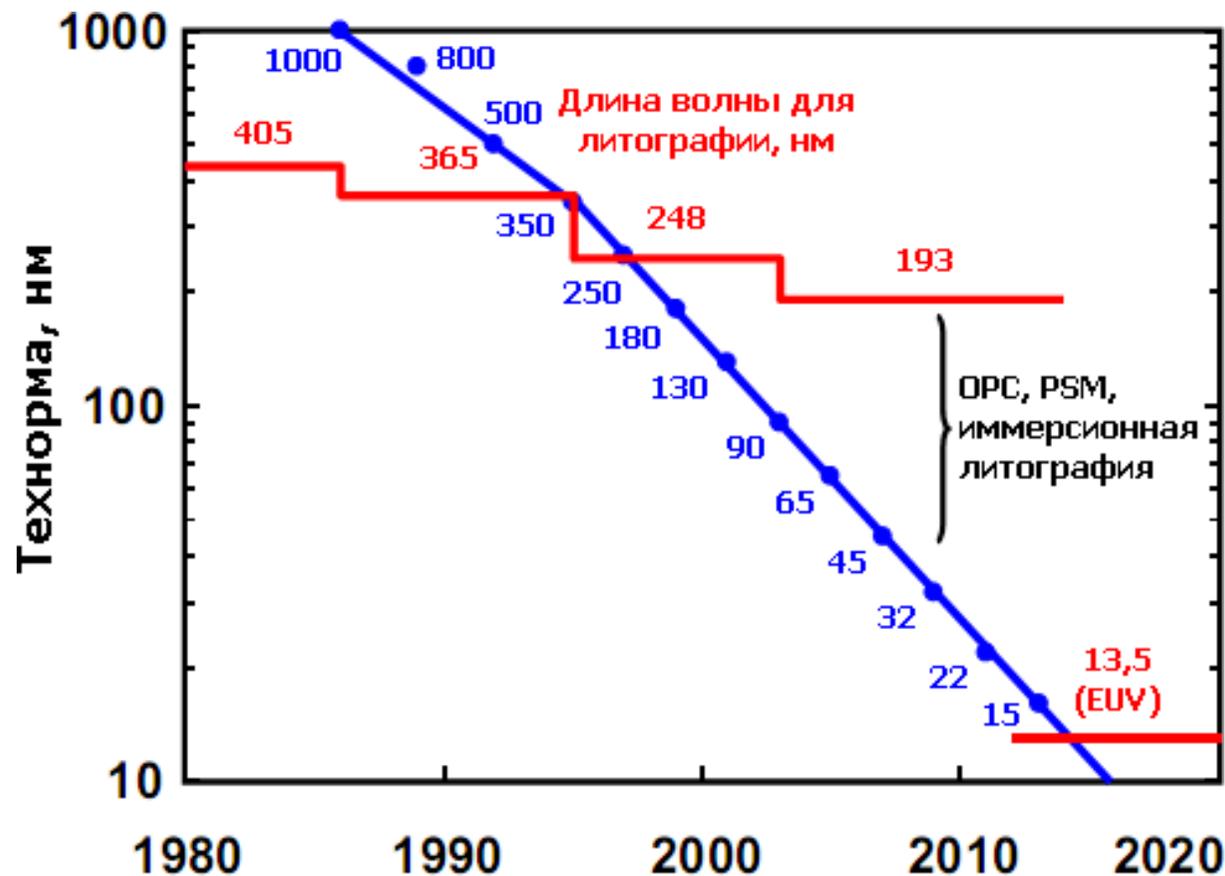
## Экспоненциальное развитие и закон Мура



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

# Лекция 1. Введение в курс

## Экспоненциальное развитие и закон Мура

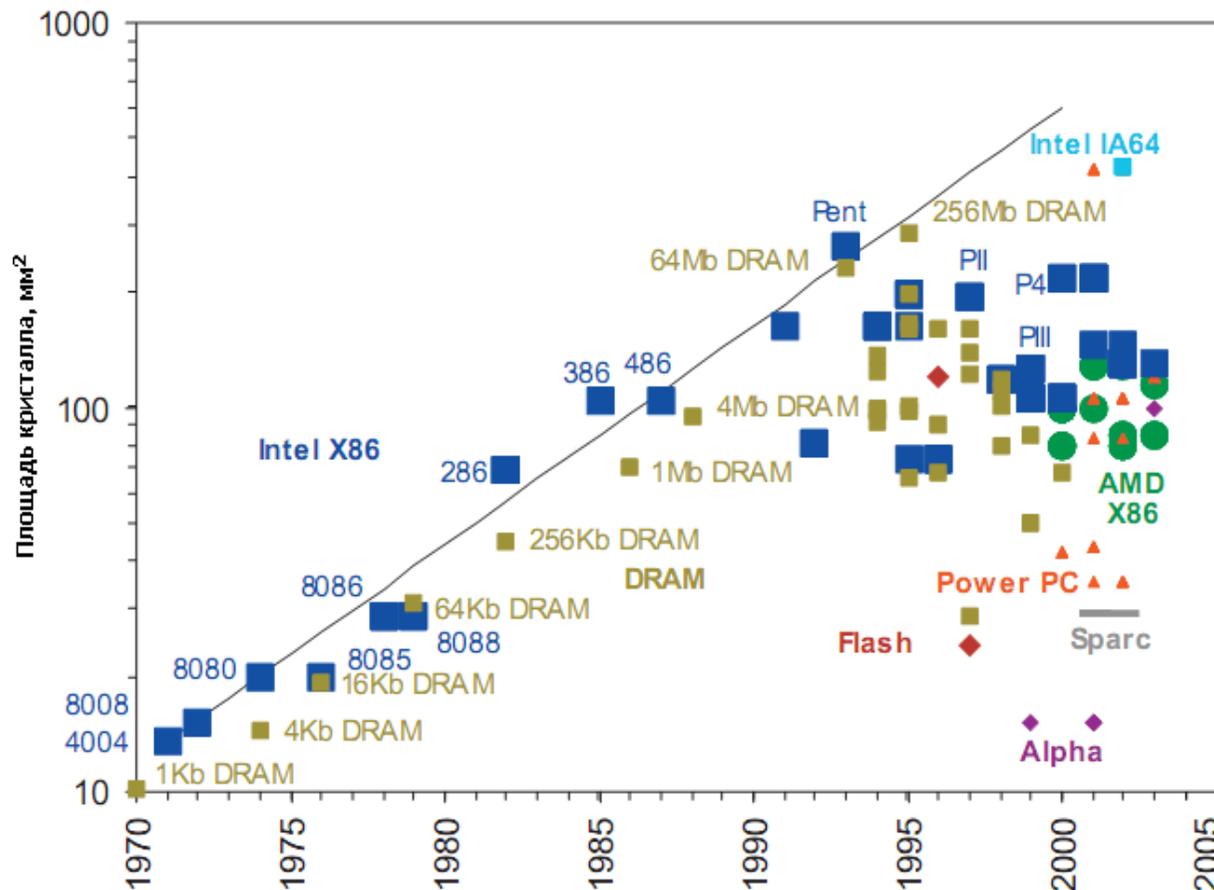


Технологические нормы для процессоров Intel.

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

# Лекция 1. Введение в курс

## Экспоненциальное развитие и закон Мура

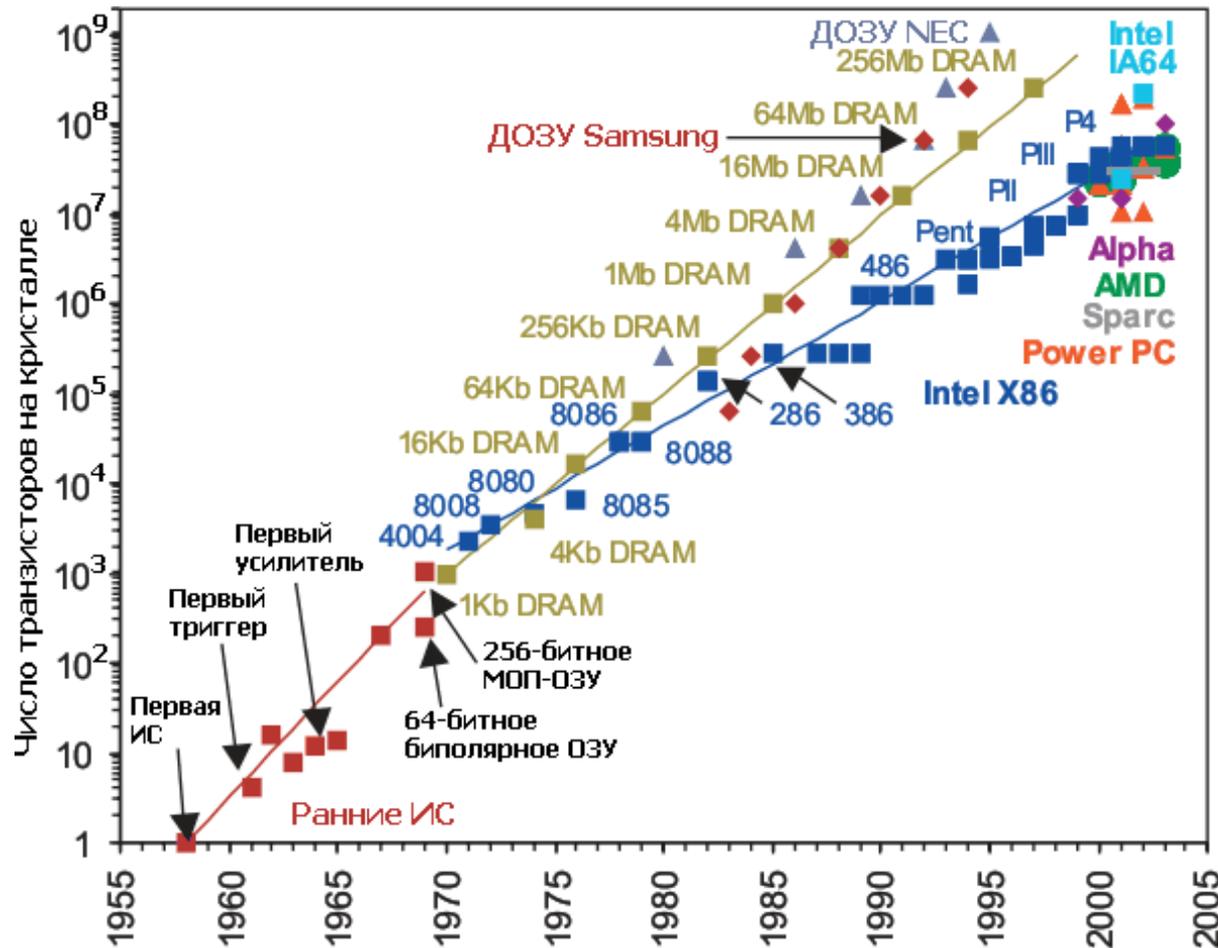


Площадь кристалла для наиболее сложных микросхем (процессоры и память) на указанный по оси абсцисс год.

Тенденция до 90-х годов - увеличение площади на 14% в год (прямая линия) - остановлена, но площадь самых сложных кристаллов достигает 400-500 мм<sup>2</sup>

# Лекция 1. Введение в курс

## Экспоненциальное развитие и закон Мура

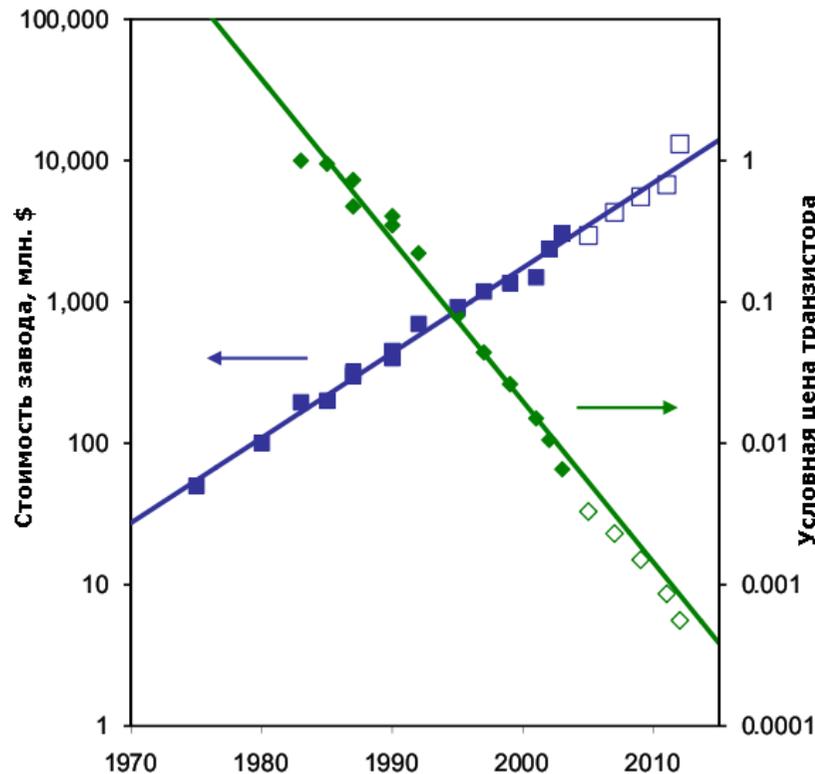


Экспоненциальный рост числа транзисторов на кристалле интегральной схемы.

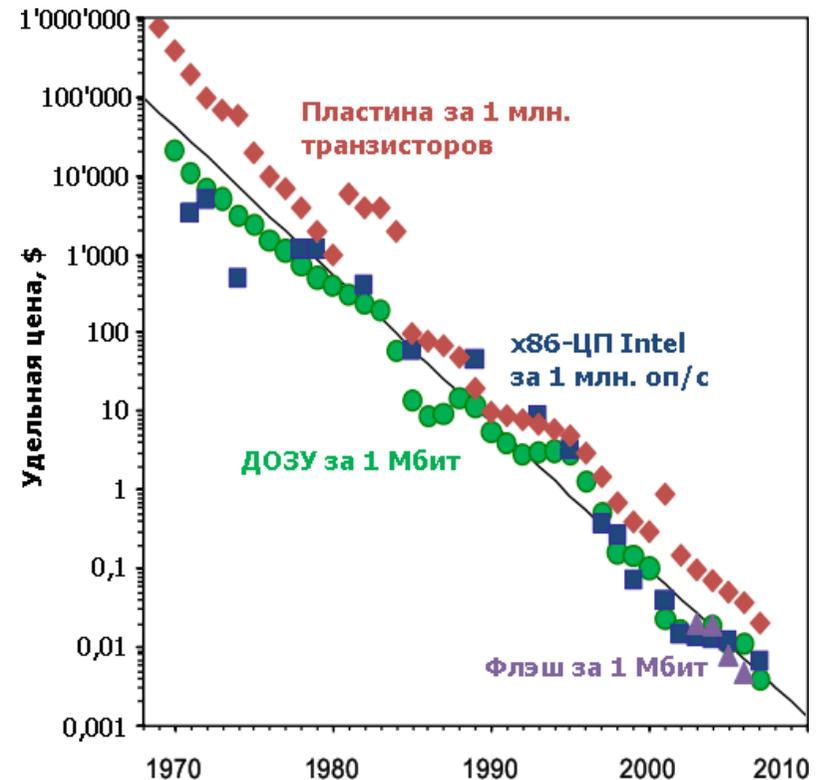
Начиная с 70-х годов этот рост для микросхем памяти и процессоров идет меньшими темпами - 58 % и 38 % в год

# Лекция 1. Введение в курс

## Экспоненциальное развитие и закон Мура



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)

# Лекция 1. Введение в курс

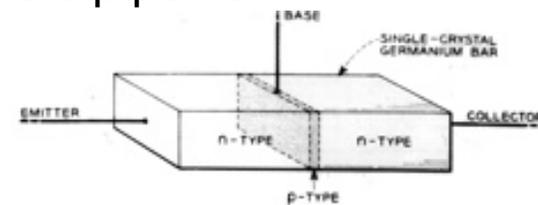
## Полупроводники в современных ЭВМ



*Точечный транзистор (1947)*

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

1947 - У. Шокли, Bell Labs, точечный транзистор  
1951 - У. Шокли, Bell Labs, биполярный транзистор  
1956 - У. Шокли, Нобелевская премия за открытие транзисторного эффекта



*Планарный транзистор (1951)*

# Лекция 1. Введение в курс

## Полупроводники в современных ЭВМ

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

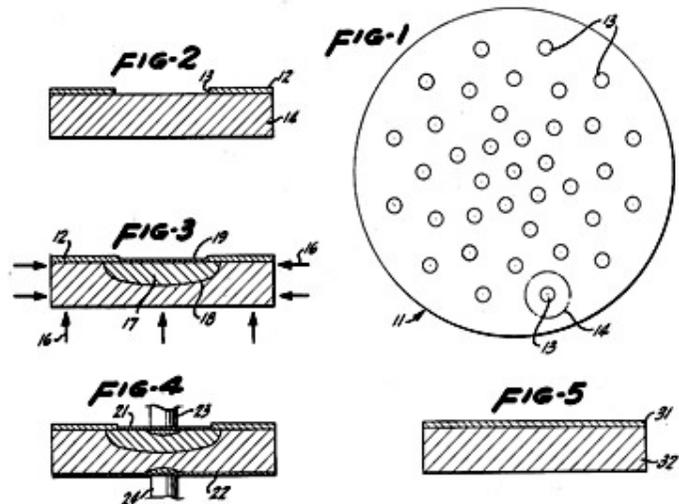


Схема из патента Эрни на  
планарный транзистор

1955 - Bell Labs, в производстве уже используются все основные технологические операции микроэлектроники: осаждение изолятора, фотолитография с масками (200 мкм), травление и диффузия

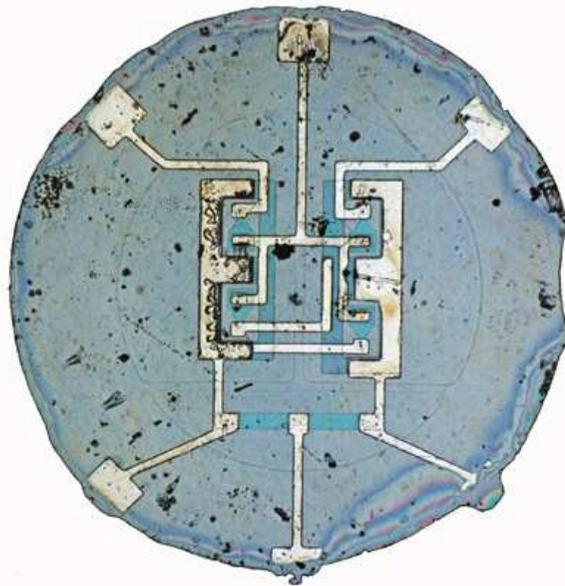
1954 - Bell Labs, транзистор с толщиной базы 1 мкм (частота 170 МГц)  
1955 - Bell Labs, первый полевой транзистор



Ручная нарезка маски для  
фотолитографии

# Лекция 1. Введение в курс

## Полупроводники в современных ЭВМ



Кристалл интегральной схемы  
(триггер, 1960)

April 25, 1961 R. N. NOYCE 2,981,877  
SEMICONDUCTOR DEVICE-AND-LEAD STRUCTURE  
Filed July 30, 1959 3 Sheets-Sheet 2

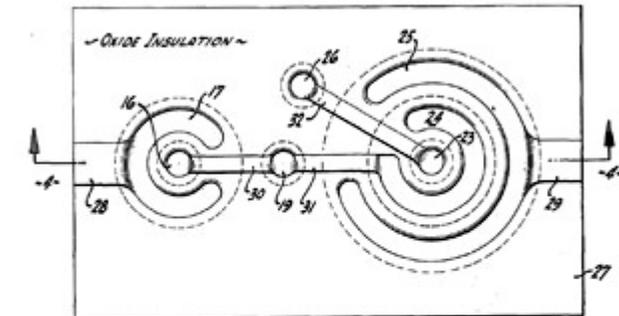


FIG-3

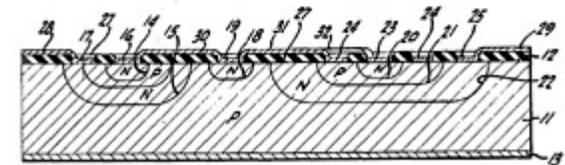


FIG-4

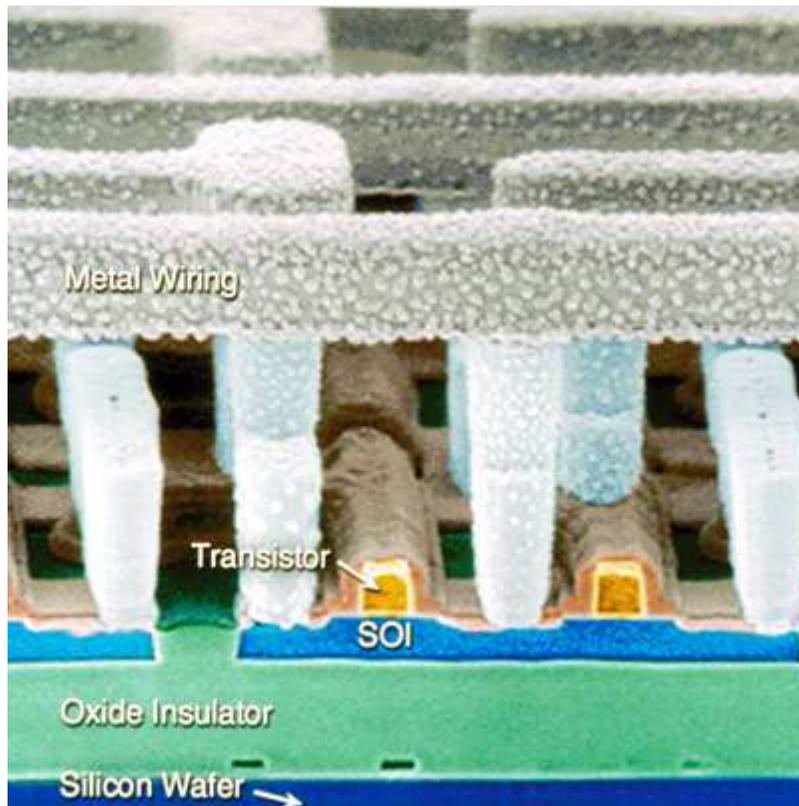
Патент Нойса на планарную  
интегральную схему (1959)

- 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



# Лекция 1. Введение в курс

## Кремний на изоляторе



Кремний на изоляторе (IBM, 1998)

1998 - IBM, технология «кремний на изоляторе» (КНИ, SOI): на кремниевой пластине формируется слой  $\text{SiO}_2$  (изолятор), а поверх него - тонкий слой Si

Строго говоря, «кремний на сапфире» (КНС) - это тоже КНИ, т.к. сапфир ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 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

# Лекция 1. Введение в курс

## Преимущества интегральных схем

Интегральной схемой (ИС) называют миниатюрное электронное устройство, выполняющее функции преобразования и обработки сигналов и содержащее большое число активных и пассивных элементов (от нескольких сот до миллиарда и более)

Преимущества ИС очевидны:

- 1) Снижение затрат (стоимость микросхемы гораздо меньше, чем общая стоимость составляющих ее элементов)
- 2) Надежность устройства (поиск неисправностей в схемах из огромного числа элементов – это очень сложная и трудоемкая работа)
- 3) Ввиду того, что элементы ИС во много раз меньше дискретных аналогов, их энергопотребление также намного меньше, а КПД гораздо выше



*CPU со снятым корпусом*

# Лекция 1. Введение в курс

## Фотолитография



*Современный литографический сканер ASML TwinScan 1950i*

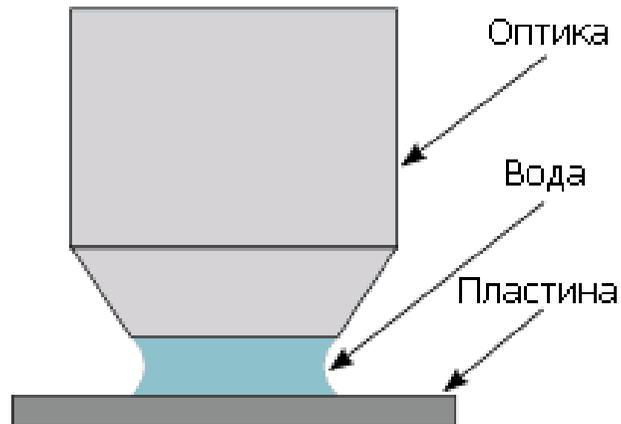
1982 - IBM, внедрение в фотолитографию эксимерных лазеров с длинами волн 248 (KrF) и 193 (ArF) нм.

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 (ЭУФ, EUV) с длинами волн 13,5 нм (и менее), что заставит использовать вакуумные камеры

# Лекция 1. Введение в курс

## Иммерсионная литография



*Иммерсионная литография*

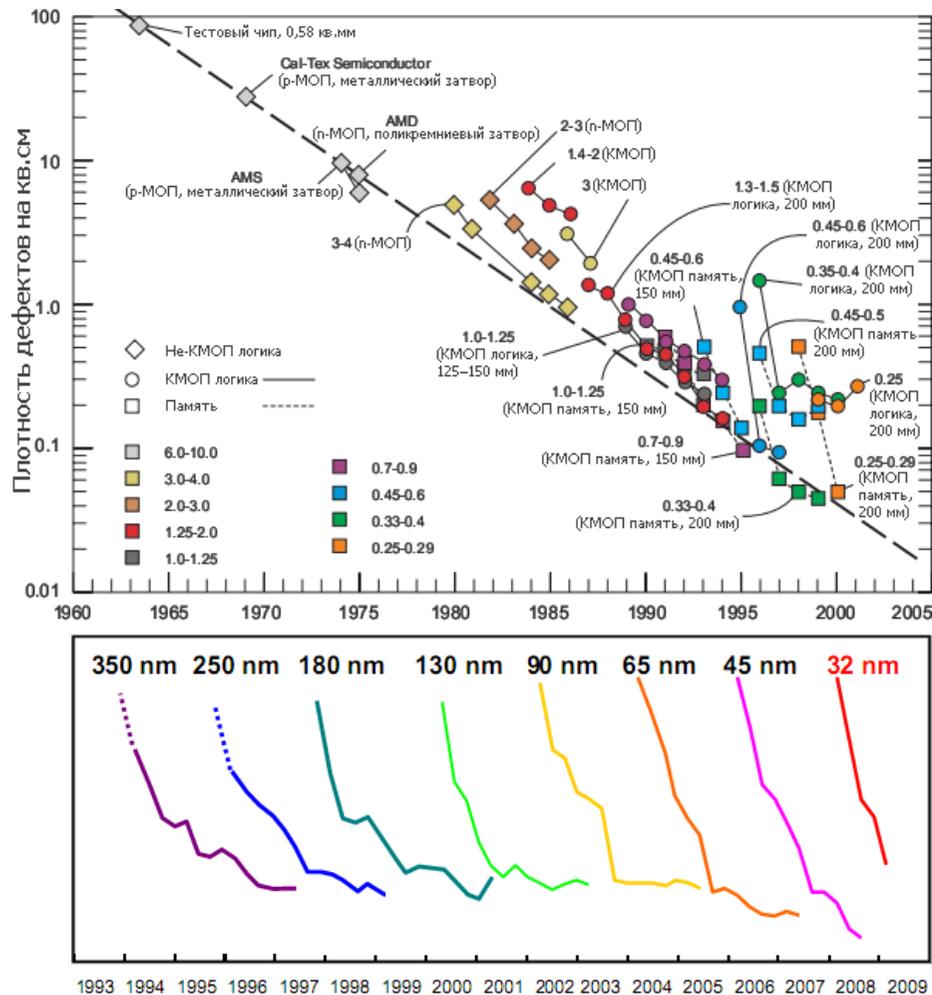
2006 - иммерсионная литография:

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 (NA) это улучшает разрешение на 30–40%.

Intel использует иммерсионную литографию, начиная с техпроцесса 32-нм, а AMD - уже с техпроцесса 45-нм.

# Лекция 1. Введение в курс

## Воспроизводимость и топологический размер

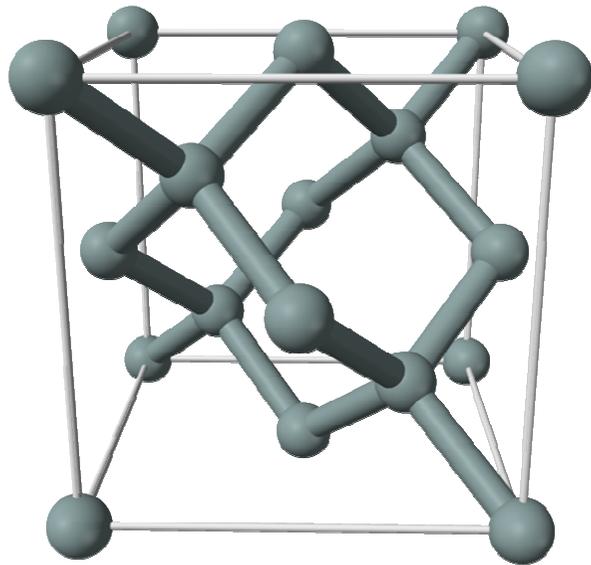


Число дефектов на 1 см<sup>2</sup> площади кристалла для самых продвинутых фабрик при финишном тестировании. Жирные цифры – технологические нормы в мкм, в скобках - диаметр пластин

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

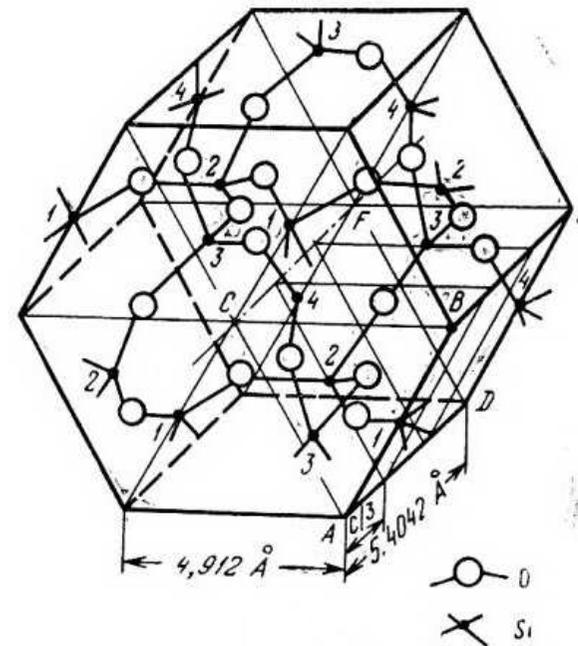
# Лекция 1. Введение в курс

## Кристаллические решетки Si и SiO<sub>2</sub>



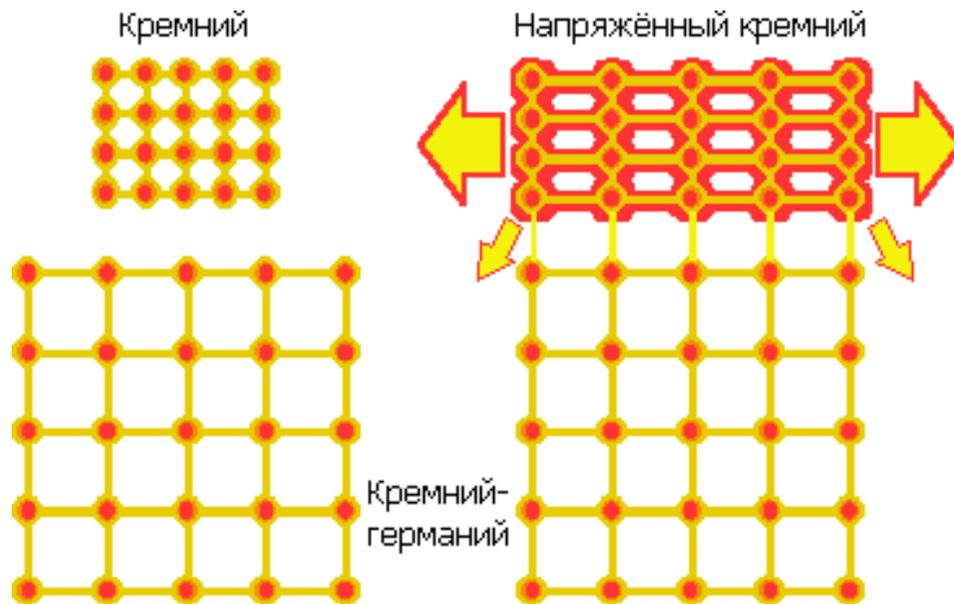
Кристаллическая решетка кремния  
кубическая гранецентрированная  
типа алмаза, параметр решетки  
 $a = 0,543 \text{ нм}$

Кристаллическая решетка  $\alpha$ -кварца  
(SiO<sub>2</sub>) ромбоэдрическая. На одну  
ячейку с параметрами  $a = 0,490 \text{ нм}$   
и  $c = 0,539 \text{ нм}$  приходится три  
молекулы SiO<sub>2</sub>



# Лекция 1. Введение в курс

## «Напряженный» кремний

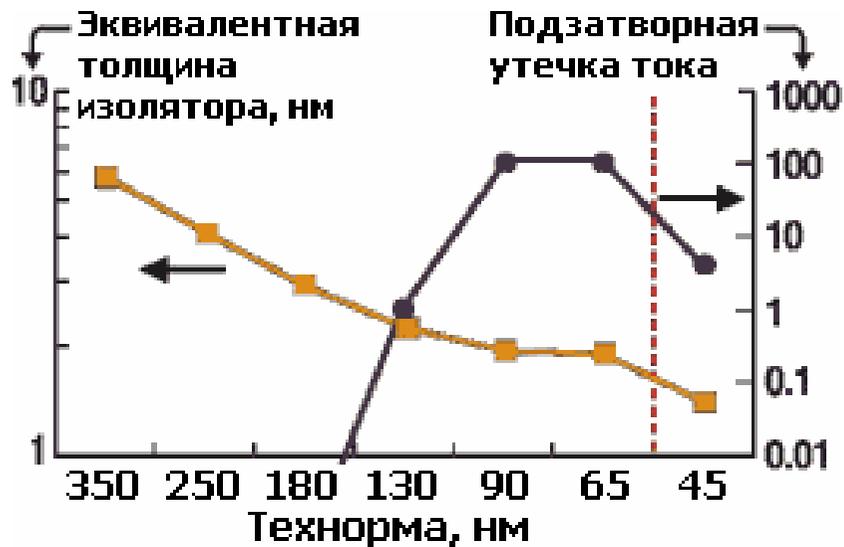


В 2004 технологию «напряженный» кремний» Intel и AMD применили для техпроцесса 90 нм. Для 65 нм была внедрена ионная имплантация германия и углерода в исток и сток. Германий «раздувает» концы транзистора и сжимает канал, что увеличивает скорость дырок (основных носителей заряда в р-канальных транзисторах). Углерод сжимает исток и сток, что растягивает n-канал, увеличивая подвижность электронов. Также весь р-канальный транзистор покрывается сжимающим слоем нитрида кремния

«Напряженный» кремний (IBM, 2001)

# Лекция 1. Введение в курс

## «High-k» диэлектрики

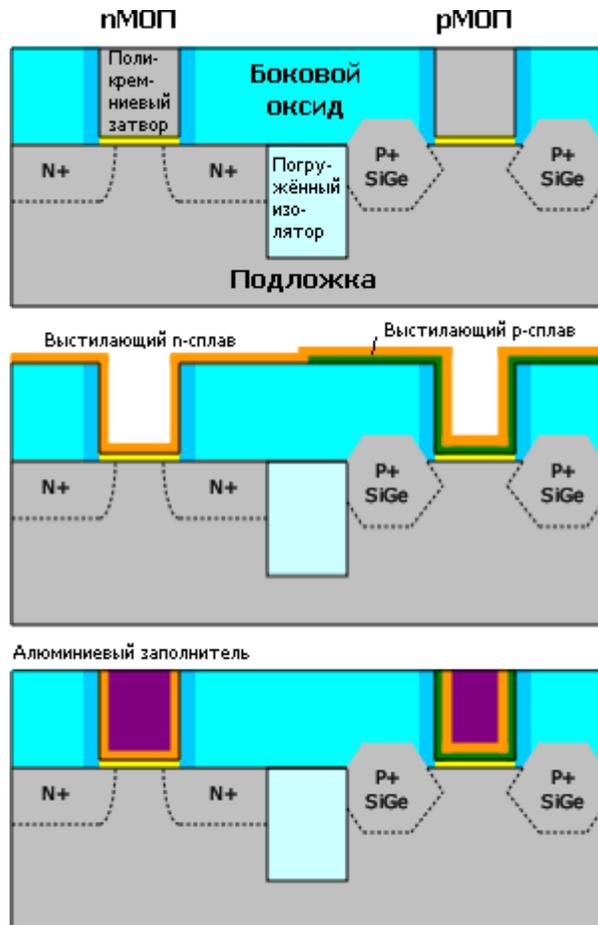


Для 90-нм техпроцесса толщина затвора уменьшилась до 1,2 (Intel) - 1,9 (Fujitsu) нм при периоде решетки кремния - 0,543 нм. В таких условиях электроны начинают туннелировать через диэлектрик, что приводит к утечке тока. Поэтому для 65-нм техпроцесса уменьшились все параметры транзистора, кроме толщины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

*Толщина подзатворного изолятора в  $\text{SiO}_2$ -эквиваленте и относительная утечка тока*

# Лекция 1. Введение в курс

## «High-k» диэлектрики и металлический затвор



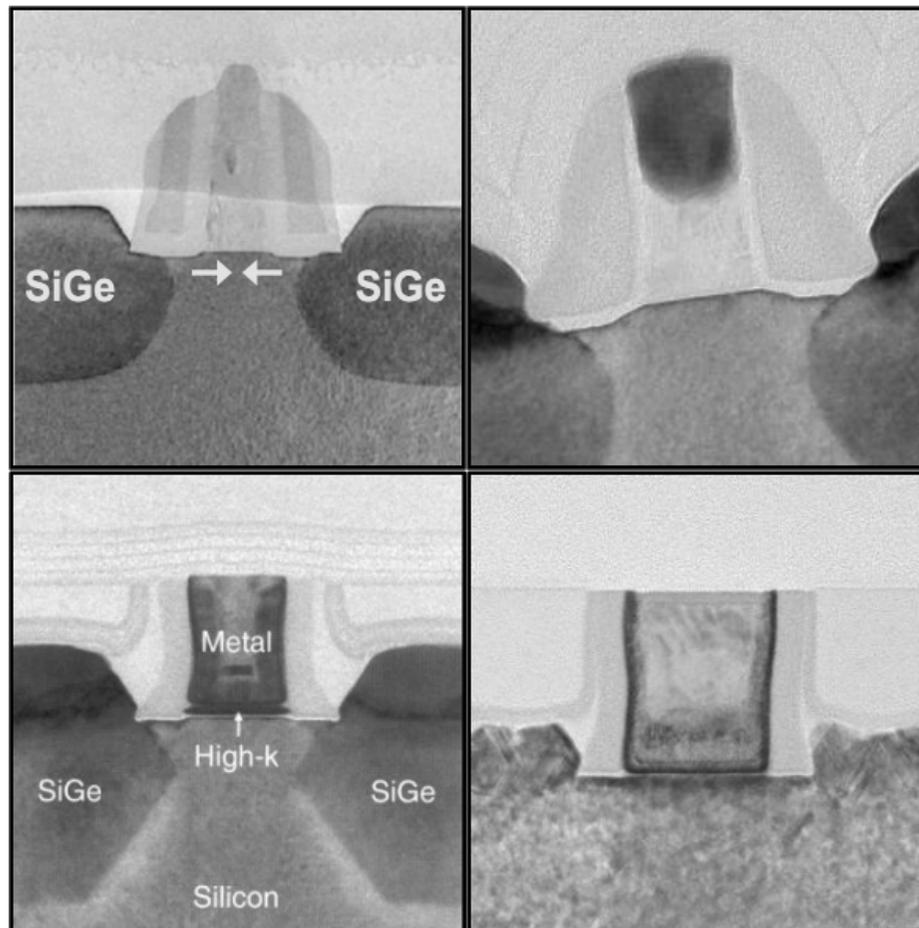
Реализация металлического затвора (Intel)

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

$k$  - относительная диэлектрическая проницаемость. В микроэлектронике «нормальным» считается  $k \sim 3,9$  ( $\text{SiO}_2$ ). Материалы с  $k > 3,9$  относятся к классу «high-k», а с  $k < 3,9$  - к «low-k»

# Лекция 1. Введение в курс

## 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),

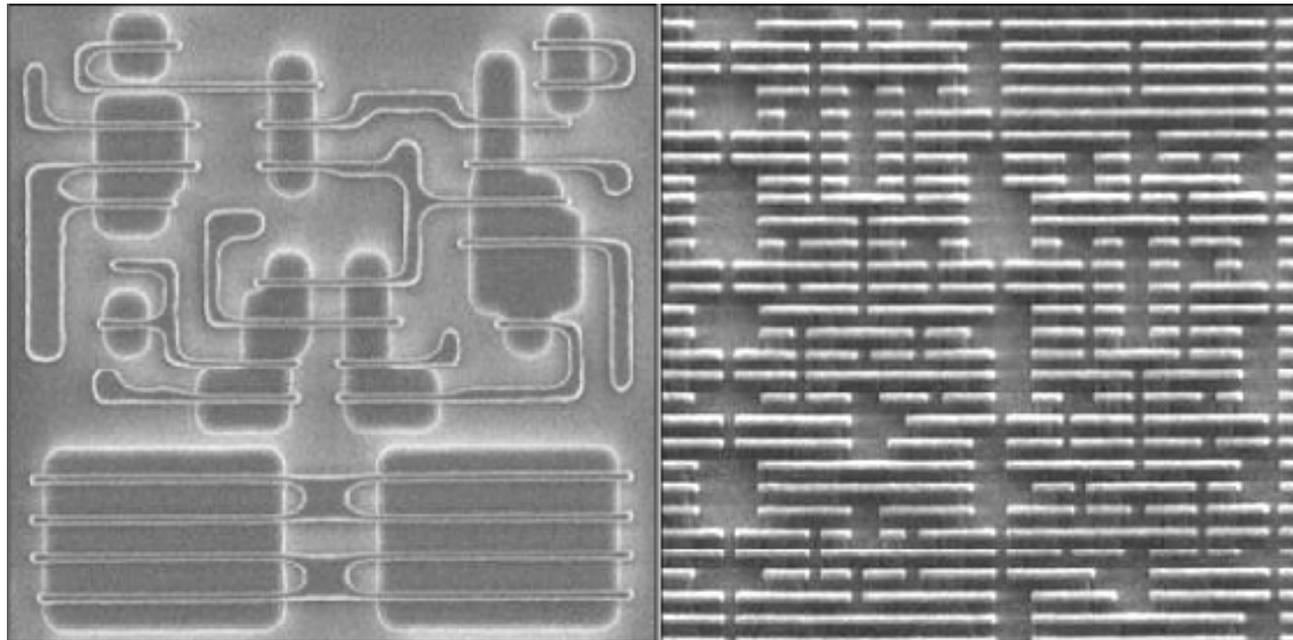
65-нм (2005),

45-нм (2007, впервые используется  
HKMG)

32-нм (2009)

# Лекция 1. Введение в курс

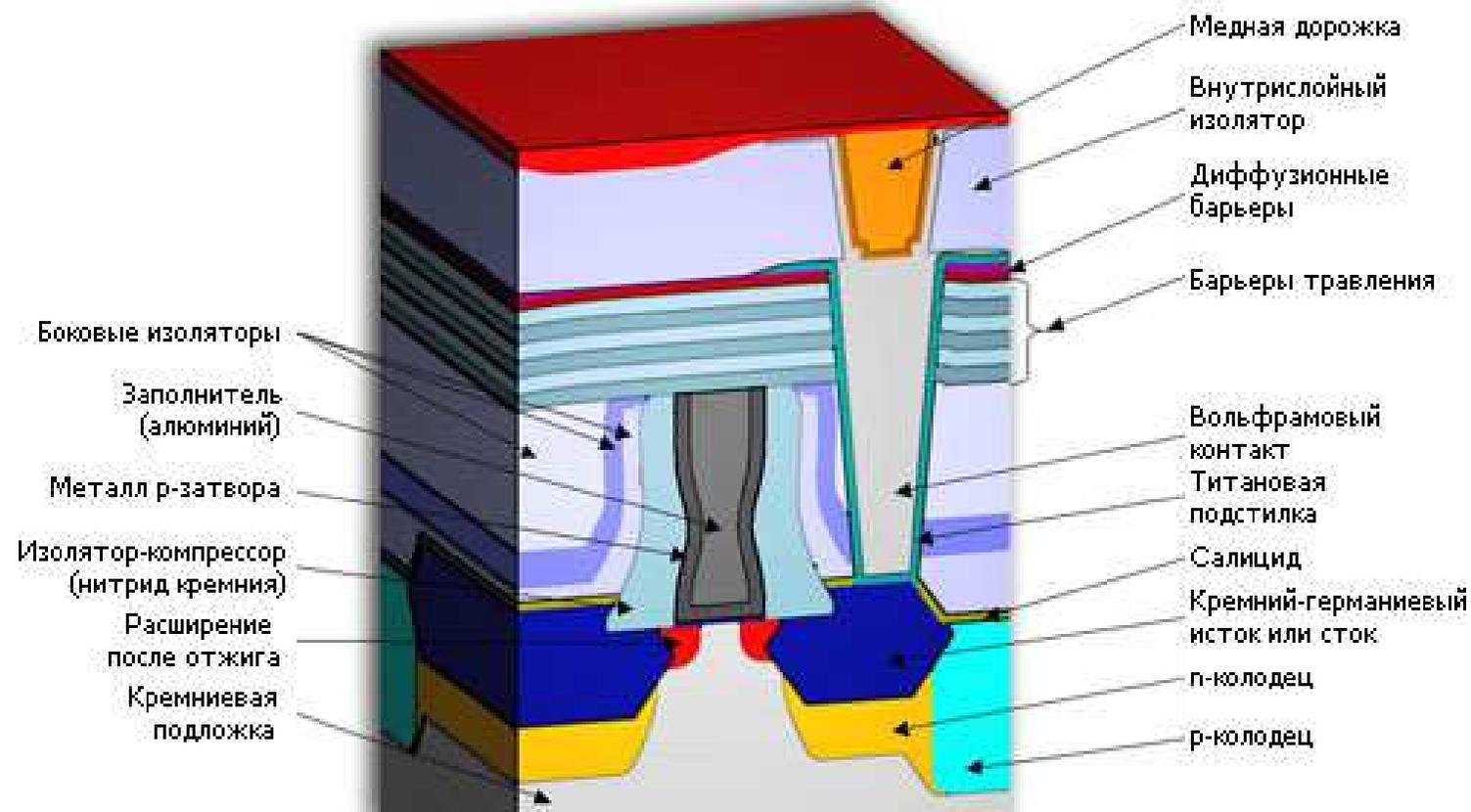
## Сравнение 65-нм и 32-нм техпроцессов



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

# Лекция 1. Введение в курс

## Результат



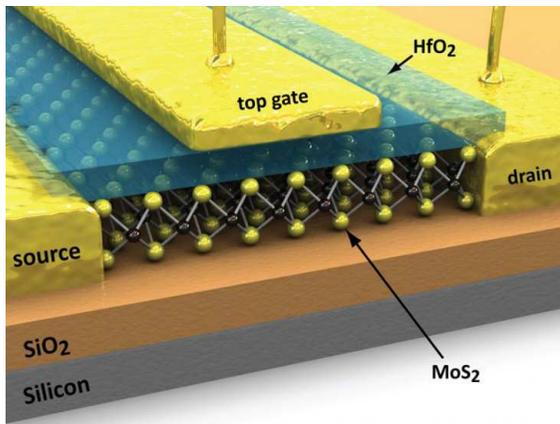
*Устройство 45-нм р-канального транзистора (Intel)*

# Лекция 1. Введение в курс

## Перспективные полупроводники



Арсенид галлия (GaAs) - полупроводник, третий по масштабам использования после Si и Ge. Запрещенная зона 1.424 эВ (300 К). Применяется в сверхвысокочастотных интегральных схемах и транзисторах, туннельных диодах, светодиодах, лазерных диодах, фотоприемниках и т.д.



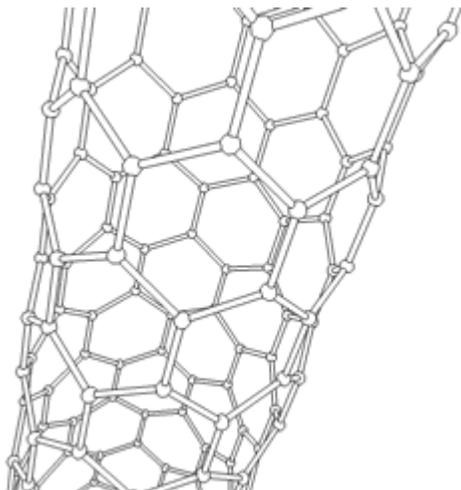
*Молибденит и транзистор на его основе*

Фосфид индия (InP) - прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 1.34 эВ (300 К). Используется для создания сверхвысокочастотных транзисторов и диодов. По высокочастотным свойствам превосходит GaAs

Молибденит ( $\text{MoS}_2$ ) - мягкий свинцово-серый минерал. Полупроводник, применявшийся в радиотехнике для изготовления детекторов. Недавно появились сообщения о создании транзисторов на его основе и первого чипа

# Лекция 1. Введение в курс

## Углеродные наноструктуры

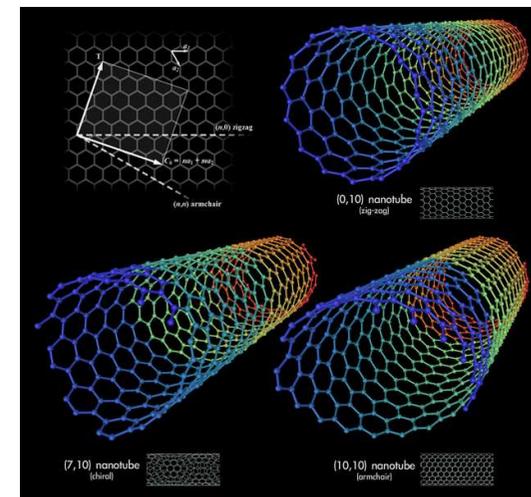


*Углеродная нанотрубка*

В зависимости от диаметра углеродные трубки проявляют металлические или полупроводниковые свойства.

Возможные применения в микроэлектронике: диоды, транзисторы, нанопровода, наноэлектроды (катоды SED), прозрачные проводящие поверхности, оптоэлектроника и т.д.

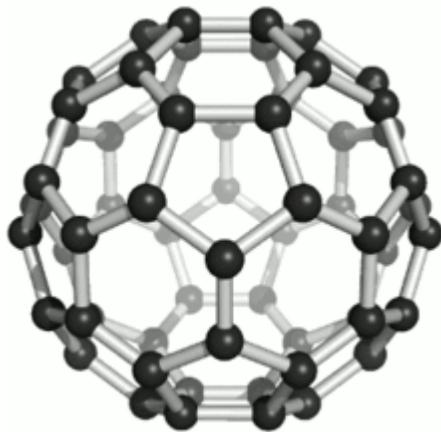
Углеродные нанотрубки - длинные цилиндрические структуры (диаметр от одного до нескольких десятков нанометров, длина до нескольких сантиметров), состоящие из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей и заканчивающиеся обычно полусферой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена



*Типы нанотрубок*

# Лекция 1. Введение в курс

## Углеродные наноструктуры



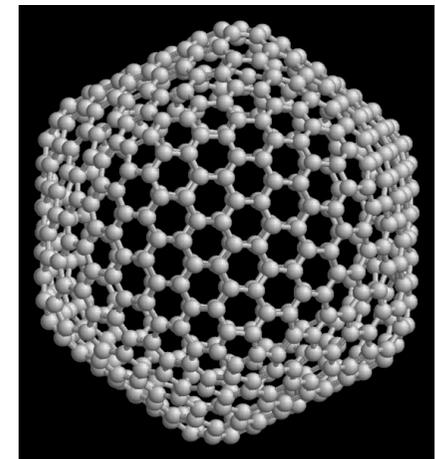
Фуллерен  $C_{60}$

Фуллерены - класс молекулярных соединений, являющихся аллотропными формами углерода и представляющих собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода

1996 - Крото, Смолли и Керлу, Нобелевская премия по химии за открытие фуллеренов

Кристаллы фуллерена - полупроводники с шириной запрещенной зоны  $\sim 1.5$  эВ. В микроэлектронике их главное преимущество по сравнению с кремнием - малое время релаксации фотоотклика (единицы нс).

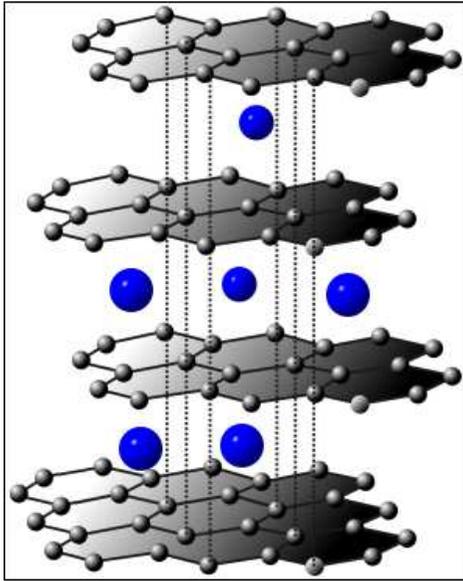
Наиболее перспективно использование молекул фуллерена в качестве самостоятельных наноразмерных устройств



Фуллерен  $C_{540}$

# Лекция 1. Введение в курс

## Углеродные наноструктуры

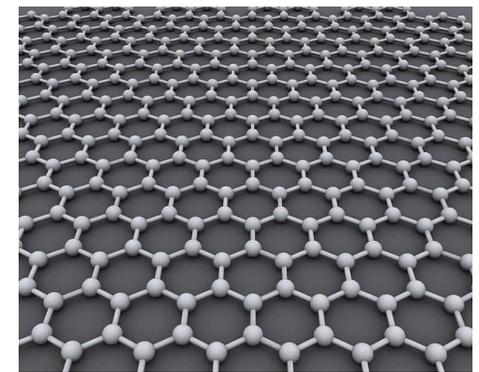


*Графит*

Графен - двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом. Атомы слоя упорядочены в гексагональную двумерную кристаллическую решетку, которую представляет собой одну плоскость графита, отделенную от объемного кристалла

2010 - А.К. Гейм и К.С. Новоселов, Нобелевская премия по физике за «передовые опыты с 2D материалом - графеном»

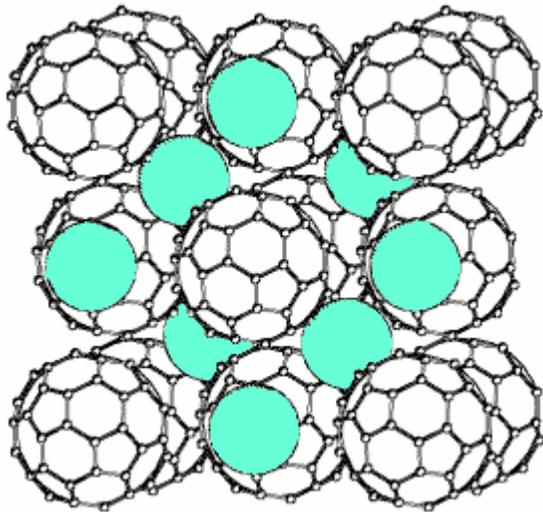
Максимальная (среди известных материалов) подвижность электронов делает графен одним из самых перспективных материалов для наноэлектроники и потенциальную замену кремния в интегральных микросхемах



*Графен*

# Лекция 1. Введение в курс

## Молекулярные кристаллы

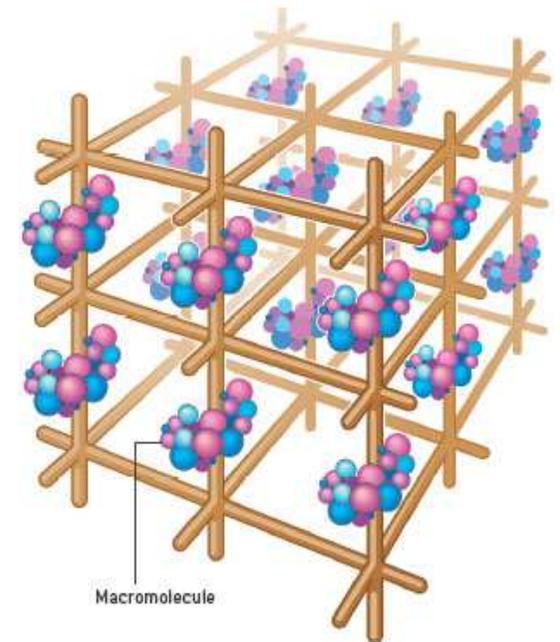


Молекулярный кристалл - кристалл, построенный из молекул. Молекулы связаны между собой слабыми Ван-дер-Ваальсовскими силами, внутри же молекул между атомами действует гораздо более прочная ковалентная связь

*Примеры молекулярных кристаллов*

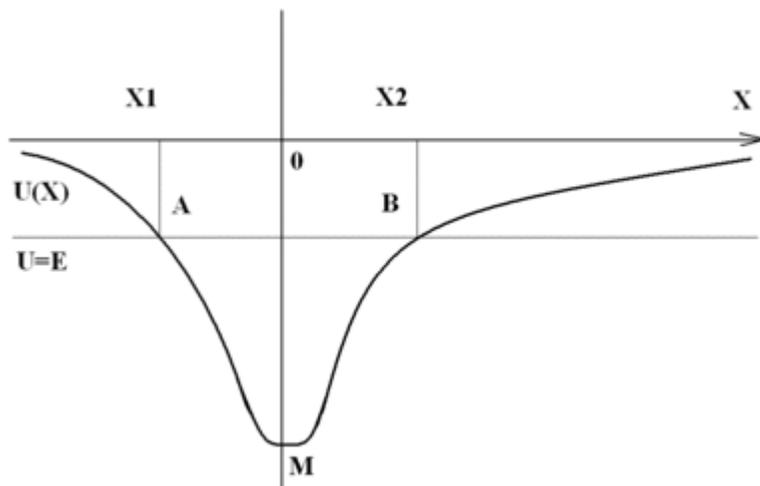
Большинство молекулярных кристаллов - это кристаллы органических соединений. К этому же классу относятся и кристаллы полимеров, белков, нуклеиновых кислот.

Большинство молекулярных кристаллов – диэлектрики, Однако некоторые, например, полимеры - полупроводники



# Лекция 1. Введение в курс

## Устойчивые одно- и многоэлектронные состояния



*Потенциальная яма*

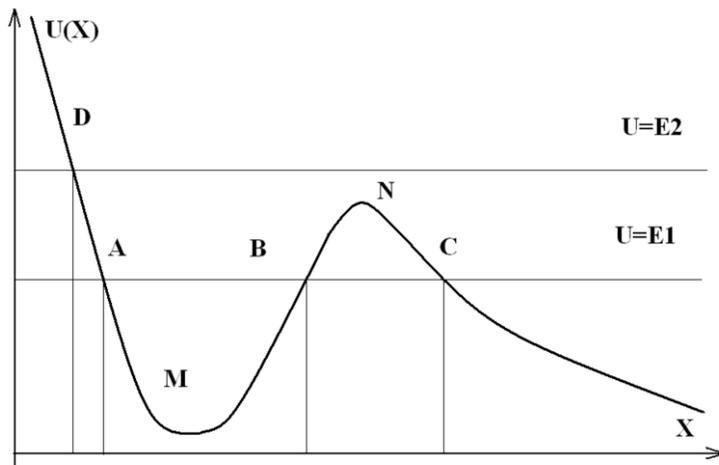
Потенциальная яма - область пространства, где присутствует локальный минимум потенциальной энергии частицы.

При отклонении частицы от точки, соответствующей минимуму потенциальной энергии возникает сила, направленная в противоположную отклонению сторону.

Если частица подчиняется законам квантовой механики, то даже несмотря на недостаток энергии она с определённой вероятностью может покинуть потенциальную яму (явление туннельного эффекта)

# Лекция 1. Введение в курс

## Устойчивые одно- и многоэлектронные состояния



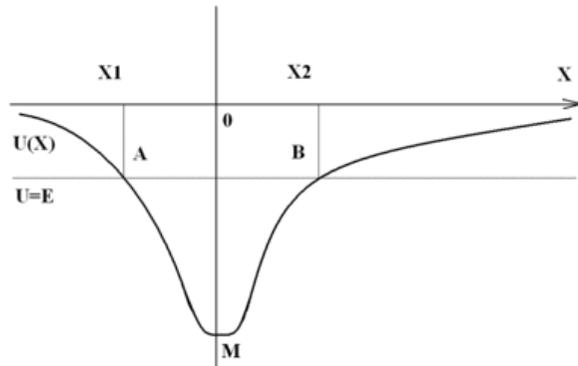
*Потенциальный барьер*

Потенциальный барьер - область пространства, разделяющая две другие области с различными или одинаковыми потенциальными энергиями. Характеризуется «высотой» - минимальной энергией классической частицы, необходимой для преодоления барьера

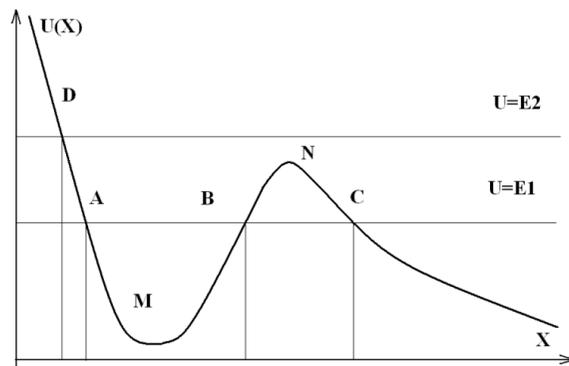
Если частица подчиняется квантовым законам, то даже несмотря на недостаток энергии она с определенной вероятностью может преодолеть потенциальный барьер (явление туннельного эффекта)

# Лекция 1. Введение в курс

## Предельные размеры, энергозатраты и выделение тепла



Потенциальная яма



Потенциальный барьер

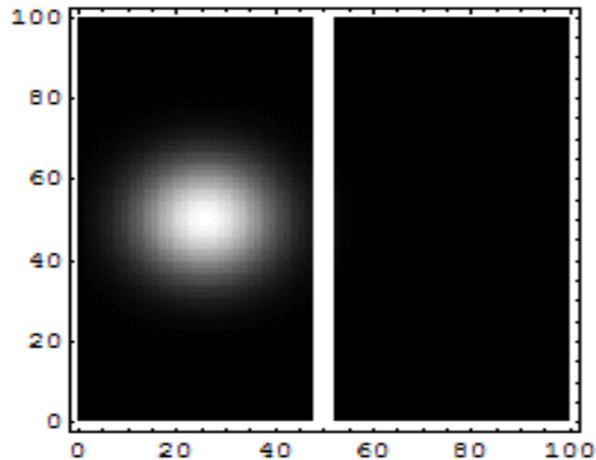
Минимальный размер потенциальной ямы определяется предельной локализацией частицы, которую можно оценить по периоду кристаллической решетки. Поскольку в современных системах на бит информации приходится  $> 100$  частиц, предельный размер на бит информации - 4-5 периодов решетки

Минимальная глубина потенциальной ямы (высота потенциального барьера) определяется средней энергией теплового возбуждения частицы ( $3/2 kT$ ), которой должно быть недостаточно для покидания ямы

Это же определяет минимальные затраты энергии ( $\sim 10^{-17}-10^{-18}$  Дж) и выделение тепла при перезаписи одного бита информации

# Лекция 1. Введение в курс

## Туннельный эффект



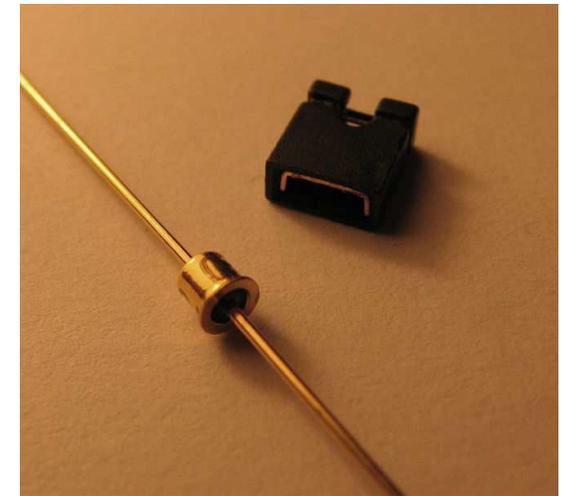
Туннельный эффект - преодоление частицей потенциального барьера в том случае, когда ее энергия (останется неизменной) меньше высоты барьера.

В классической механике это невозможно. Аналог в волновой оптике - проникновение света внутрь отражающей среды на расстояния порядка длины волны при полном внутреннем отражении

Эффект является следствием соотношения неопределенностей

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Ограничения по координате (рост определенности по  $x$ ) делают импульс  $p$  менее определенным. Это «добавляет» недостающую энергию и с некоторой вероятностью частица проникает через барьер, причем ее средняя энергия остается неизменной



*Туннельный диод*

# Лекция 1. Введение в курс

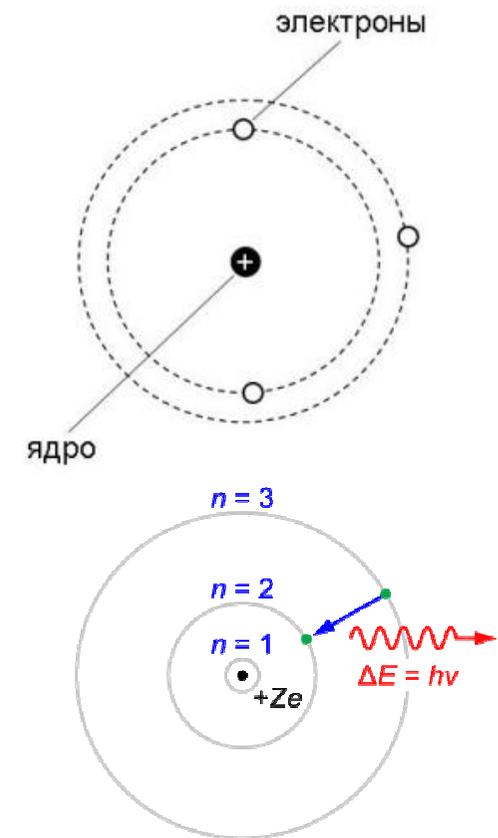
## Квантовая механика



*Нильс Бор*

Бор постулировал, что электроны в атоме могут двигаться только по определенным (стационарным) орбитам, находясь на которых они вопреки классической физике не излучают. Излучение и поглощение происходят только в момент перехода с одной орбиты на другую

Основа модели атома Нильса Бора (1913) – классическая планетарная модель атома Резерфорда



*Стационарные состояния и электронные переходы*

# Лекция 1. Введение в курс

## Квантовая механика и принцип суперпозиции

Основа квантовой механики – уравнение Шредингера, которое описывает эволюцию волновой функции квантовой системы

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle,$$

Из линейности оператора Гамильтона следует, что

$$\hat{H}(a|\Psi_1\rangle + b|\Psi_2\rangle) = a\hat{H}|\Psi_1\rangle + b\hat{H}|\Psi_2\rangle,$$

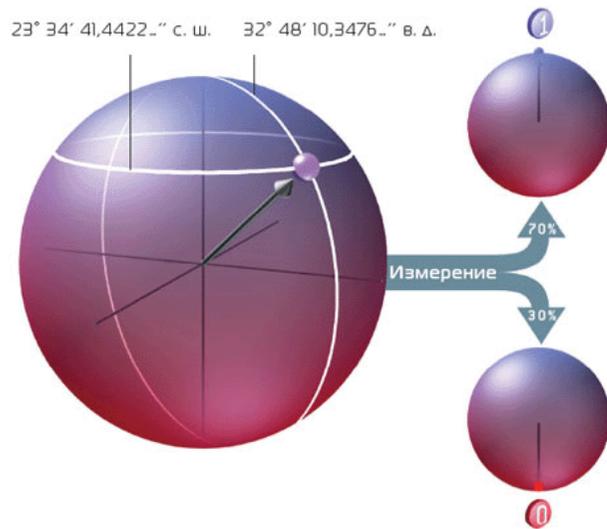
Квантовая (когерентная) суперпозиция - суперпозиция состояний, которые не могут быть реализованы одновременно (с классической точки зрения – взаимоисключающих состояний).

Если  $|\Psi_1\rangle$  и  $|\Psi_2\rangle$  описывают состояния квантовой системы, то их суперпозиция  $|\Psi_3\rangle = c_1|\Psi_1\rangle + c_2|\Psi_2\rangle$  также описывает состояние системы.

Причем если измерение физической величины  $\hat{f}$  в состоянии  $|\Psi_1\rangle$  дает результат  $f_1$ , а в состоянии  $|\Psi_2\rangle$  - результат  $f_2$ , то измерение в состоянии  $|\Psi_3\rangle$  даст результат  $f_1$  или  $f_2$  с вероятностями  $|c_1|^2$  и  $|c_2|^2$  соответственно

# Лекция 1. Введение в курс

## Биты и кубиты

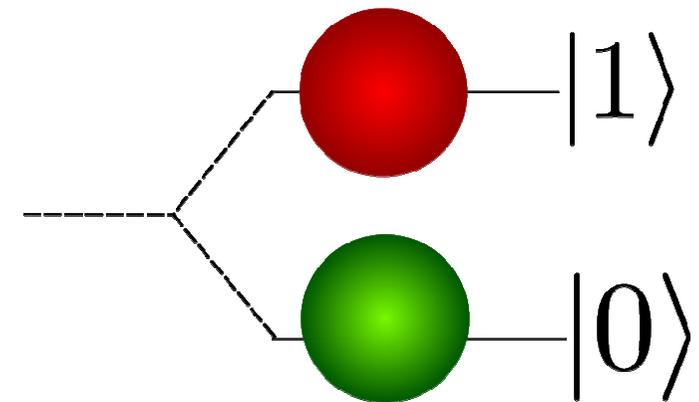


Кубит (quantum bit) - квантовый разряд или наименьший элемент для хранения информации в квантовом компьютере.

Как и бит, кубит допускает два собственных состояния, обозначаемых  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  (обозначения Дирака), но при этом может находиться и в их суперпозиции, т.е. в состоянии  $A * |0\rangle + B * |1\rangle$ , где  $A$  и  $B$  любые комплексные числа, удовлетворяющие условию нормировки  $|A|^2 + |B|^2 = 1$

При любом измерении состояния кубита он случайно переходит в одно из своих собственных состояний.

Вероятности перехода в эти состояния равны, соответственно,  $|A|^2$  и  $|B|^2$ , т.е. косвенно, по наблюдениям за множеством кубитов, мы все-таки можем судить об исходном состоянии



# Лекция 1. Введение в курс

## Квантовый компьютер



Ричард Фейнман

Квантовый компьютер - вычислительное устройство, которое работает на основе квантовой механики и принципиально отличается от классических компьютеров.

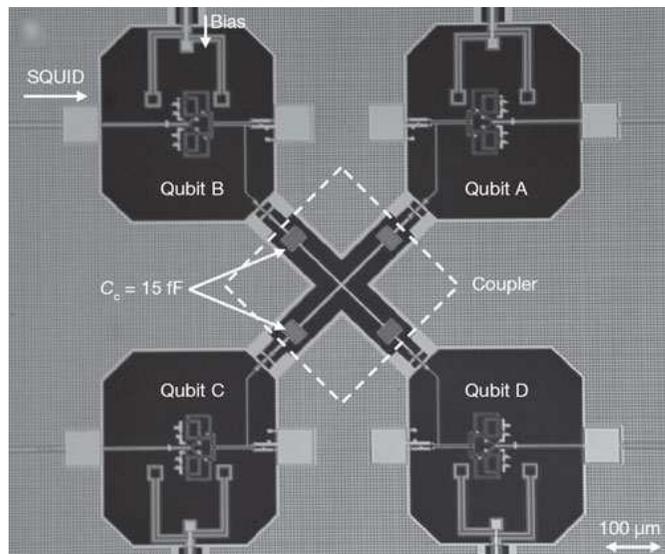
Для вычислений квантовый компьютер использует не обычные (классические) алгоритмы, а квантовые алгоритмы, реализуемые в процессах квантовой природы. За счет этого используются квантовый параллелизм и квантовая запутанность



Схема квантового компьютера

# Лекция 1. Введение в курс

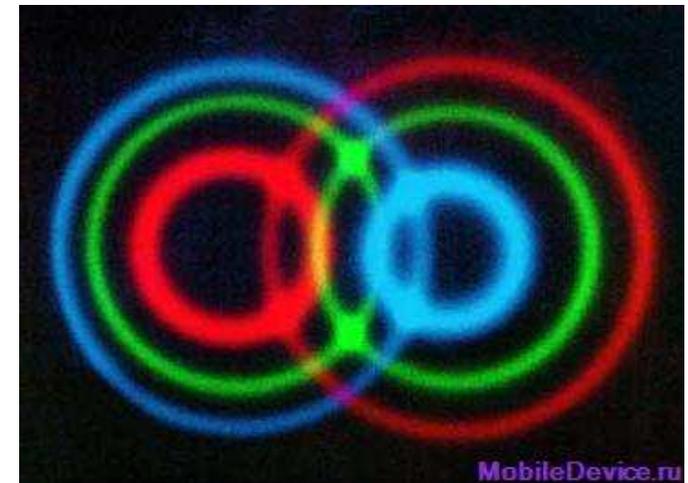
## Биты и кубиты



*Трехкубитная запутанность*

Как и отдельный кубит, квантовый регистр гораздо более информативен. Он может находиться не только во всевозможных комбинациях составляющих его битов, но и реализовывать всевозможные тонкие зависимости между ними.

Кубиты могут быть связаны друг с другом, т.е. на них может быть наложена ненаблюдаемая связь, выражающаяся в том, что при всяком измерении над одним из нескольких кубитов, остальные меняются согласованно с ним. Таким образом, совокупность перепутанных между собой кубитов может интерпретироваться как заполненный квантовый регистр



*Трехкубитная запутанность*

# Лекция 1. Введение в курс

## Квантовый компьютер



Ричард Фейнман

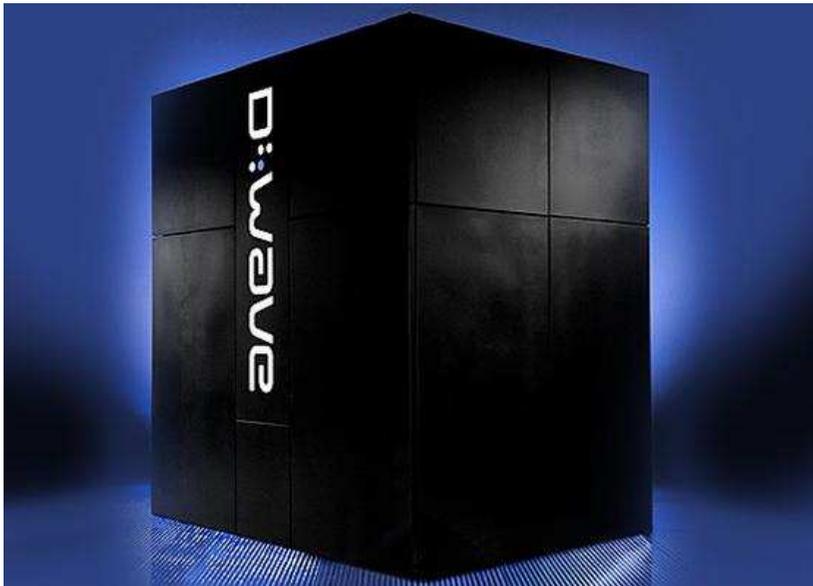
Квантовый параллелизм - главное преимущество квантовых вычислений по сравнению с цифровыми классическими. Например, имея систему (регистр) из двух кубитов мы одновременно оперируем со всеми возможными ее состояниями: 00, 01, 11, 10. Это соответствует  $2^2$  т.е. четырем вычислительным потокам. 16 кубитов позволят реализовать уже  $2^{16}$  т.е. 65 536 таких потоков



Схема квантового компьютера

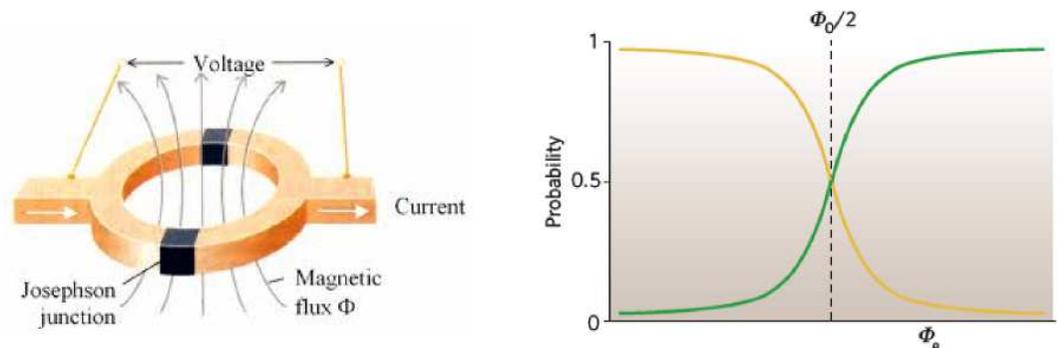
# Лекция 1. Введение в курс

## Реализация



*D-Wave One*

Джозефсоновский контакт с двумя диэлектрическими зазорами (слева) и вероятность изменения направления тока в зависимости от величины внешнего магнитного потока (справа)

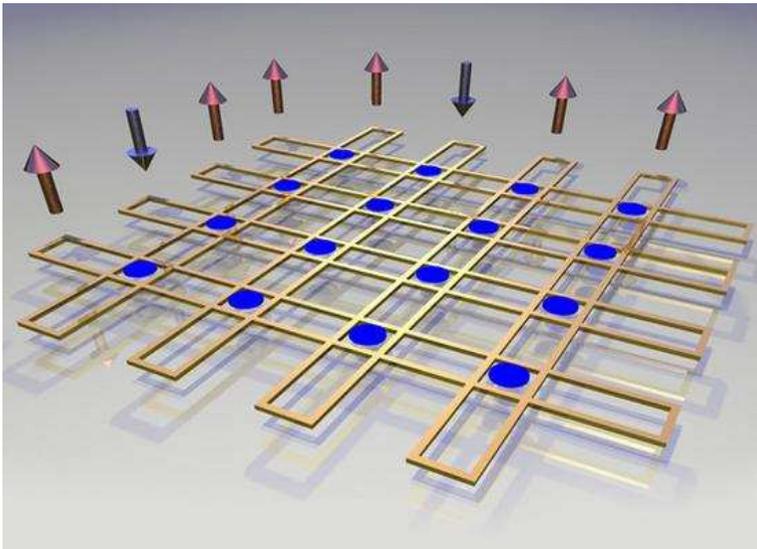


2011 - информация о создании канадской фирмой D-Wave первого в истории коммерческого квантового компьютера «D-Wave One».

Этот компьютер со 128 кубитной архитектурой был продан американской военной компании Lockheed Martin за 10 миллионов долларов

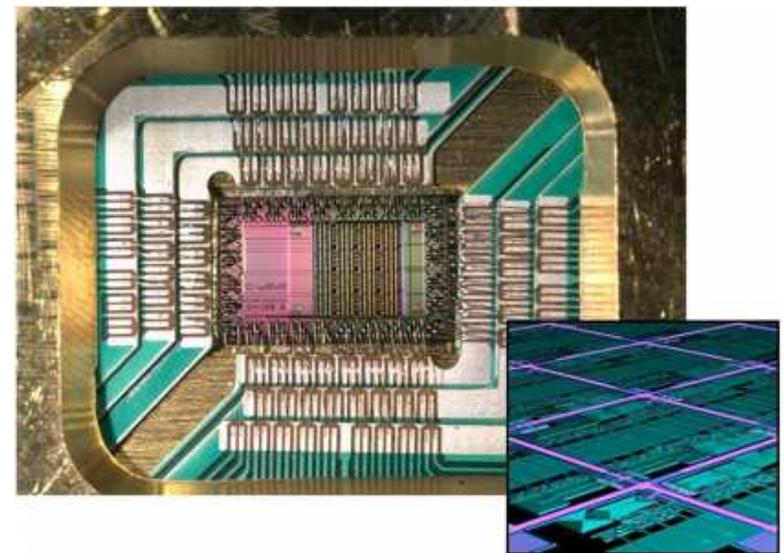
# Лекция 1. Введение в курс

## Реализация



128-ми кубитный чип от D-Wave Systems. Каждый кубит – крошечная петля из металла ниобия, находящегося в сверхпроводящем состоянии. По этой петле может курсировать незатухающий ток по или против часовой стрелки. Эти токи и соответствует базовым состояниям «0» и «1»

В процессоре 16 блоков по 8 кубитов в каждом. Система охлаждается до температуры в 10 мК для того, чтобы перевести все кубиты в сверхпроводящее состояние



# Лекция 2. Электропроводимость

## Физические основы электропроводимости

Краткие сведения из квантовой механики:

электроны, волны де Бройля, соотношение неопределенностей, волновая функция.

Спектр электронных состояний в атомах, молекулах и кристаллах:

частица в одномерной потенциальной яме, спектр электронных состояний атома водорода и многоэлектронных атомов, квантовые переходы.

Виды химической связи. Понятие о зонной структуре. Принципы разделения веществ на проводники (металлы), полупроводники и изоляторы (диэлектрики).

Электропроводность твердых тел:

модель электронного газа, квантовая модель электропроводности, трехмерный ящик, энергия Ферми, плотность энергетических состояний.

Распределение Ферми. Электроны и дырки. Концентрация электронов в зоне проводимости. Собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике.

Собственная и примесная проводимость полупроводников:

полупроводники n- и p-типа, положение уровня Ферми, технологии легирования полупроводников.