

# Лекция 1

## ВВЕДЕНИЕ В КУРС

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СОВРЕМЕННЫХ ЭВМ

Факультет ВМК, 320, 321, 323-325, 327, 328 и 431 группы, 5-й и 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 при поступлении запроса по адресу [morozov@phys.msu.su](mailto:morozov@phys.msu.su); [kroky@kroft.ru](mailto:kroky@kroft.ru)*

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

# Лекция 1. Введение в курс

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



## Лекции и семинарские занятия (коллоквиумы)



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

# Лекция 1. Введение в курс



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

## **Семинарские занятия (коллоквиумы)**

*Оленин Андрей Николаевич,  
физический факультет МГУ, старший  
научный сотрудник  
andrej olenin@mail.ru, (495) 939-1934*



# Лекция 1. Введение в курс

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СОВРЕМЕННЫХ ЭВМ**

**Факультет ВМК, 3 и 4-й курс**

**Лекции 3 часа в неделю; семинары 1 час в неделю, зачет**

**Лекции**

**Пятница, 3-4 пары (начало 12-50), П-13**

**Семинары**

**(начало семинаров с 5 сентября)**

<b>Преподаватель</b>	<b>Группа</b>	<b>День недели</b>	<b>Неделя</b>	<b>Начало</b>	<b>Ауд.</b>
<b>Ожередов И.А.</b>	<b>441</b>	<b>понедельник</b>	<b>1</b>	<b>8:45</b>	<b>506</b>
<b>Ожередов И.А.</b>	<b>325</b>	<b>понедельник</b>	<b>2</b>	<b>8:45</b>	<b>506</b>
<b>Морозов В.Б.</b>	<b>321</b>	<b>вторник</b>	<b>1</b>	<b>8:45</b>	<b>506</b>
<b>Морозов В.Б.</b>	<b>323</b>	<b>вторник</b>	<b>2</b>	<b>8:45</b>	<b>506</b>
<b>Оленин А.Н.</b>	<b>320</b>	<b>вторник</b>	<b>1</b>	<b>10:30</b>	<b>506</b>
<b>Оленин А.Н.</b>	<b>327</b>	<b>вторник</b>	<b>2</b>	<b>10:30</b>	<b>506</b>
<b>Руденко К.В.</b>	<b>324</b>	<b>понедельник</b>	<b>1</b>	<b>12:15</b>	<b>506</b>
<b>Руденко К.В.</b>	<b>328</b>	<b>понедельник</b>	<b>2</b>	<b>12:15</b>	<b>506</b>

# 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

Физические основы ЭВМ - Windows Internet Explorer

http://comp.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

Физические основы ЭВМ

Google™ This page is in Russian. Translate it using Google Toolbar? Learn more Not in Russian? Help us improve Translate

## Физические основы ЭВМ

Главная Лекции Материалы Студенческие блоги! Работы студентов Блог Контакты

### Физические основы элементной базы современных ЭВМ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Факультет ВМК, 3-й курс, 5-й семестр.  
Лекции 3 часа в неделю; семинары 1 час в неделю, зачет

**Читают лекции:**

- проф. Шувалов Владимир Владимирович
- доцент Морозов Вячеслав Борисович
- доцент Руденко Константин Валентинович

**Ведут семинары:**

- Морозов Вячеслав Борисович
- Ожередов Илья Александрович
- Опенин Андрей Николаевич
- Руденко Константин Валентинович

[Программа курса и рекомендованная литература \(PDF, 2011\)](#)

[Программа семинаров \(PDF, 2011\)](#)

[Вопросы к зачету \(PDF, 2011\)](#)

**Дополнительная литература:**

- И.П. Степаненко, "Основы микроэлектроники"

Логин:   
Пароль:   
 Запомнить меня:   
[Забыли пароль?](#)

#### Облако тегов

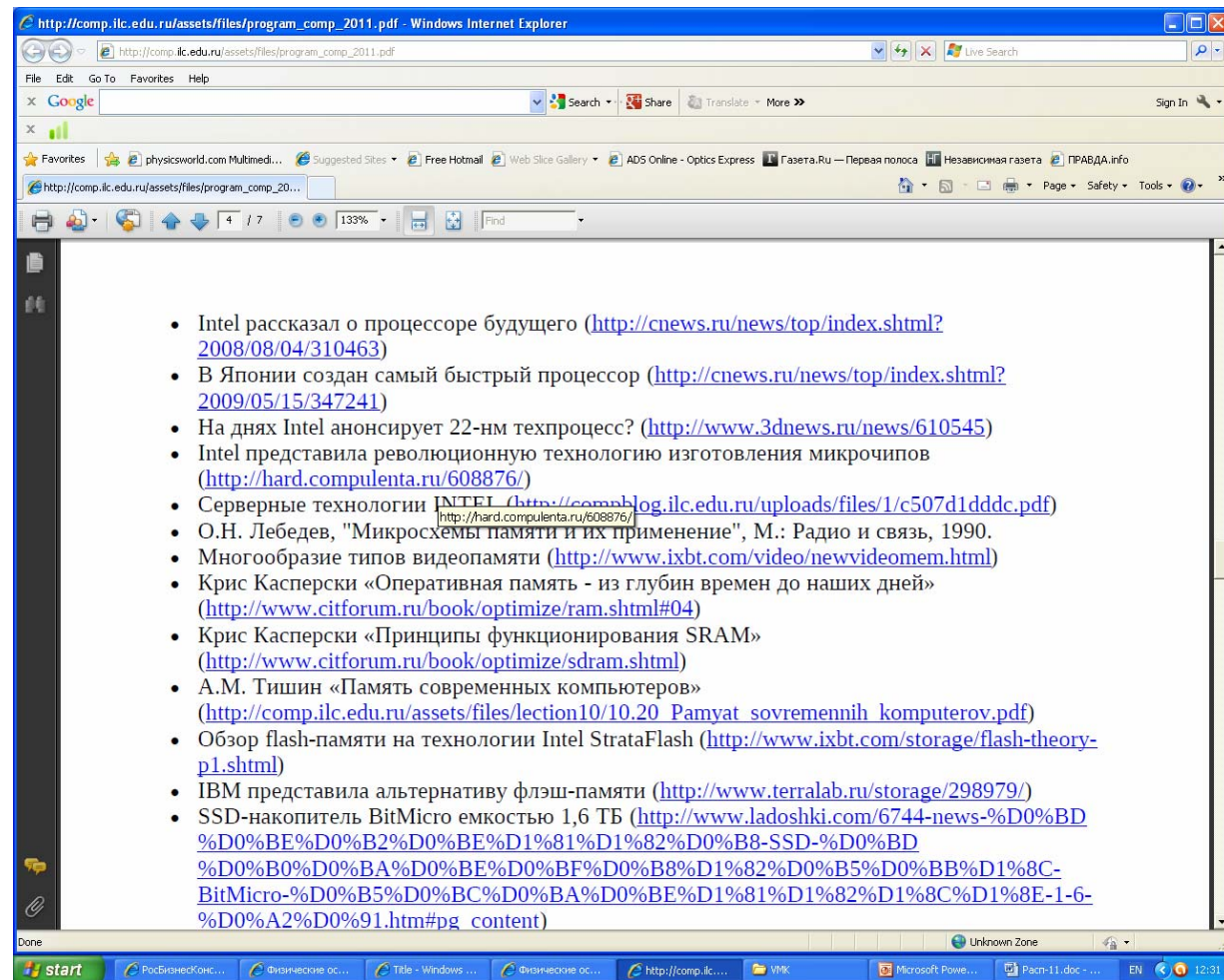
архитектура ЭВМ,  
многопроцессорные  
конфигурации, триггер,  
регистры, АЛУ, УУ, конвейер,  
микропрограмма, процессор,  
lq, архитектура фон Неймана,  
история ЭВМ, Джон фон  
Нейман, flash, запоминающие  
устройства, новости науки,  
Лебедев С.А., БЭСМ,  
**ПАМЯТЬ**, mram, ram,  
передача сигнала,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

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



# Лекция 1. Введение в курс

[http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program\\_comp\\_2015.pdf](http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program_comp_2015.pdf)



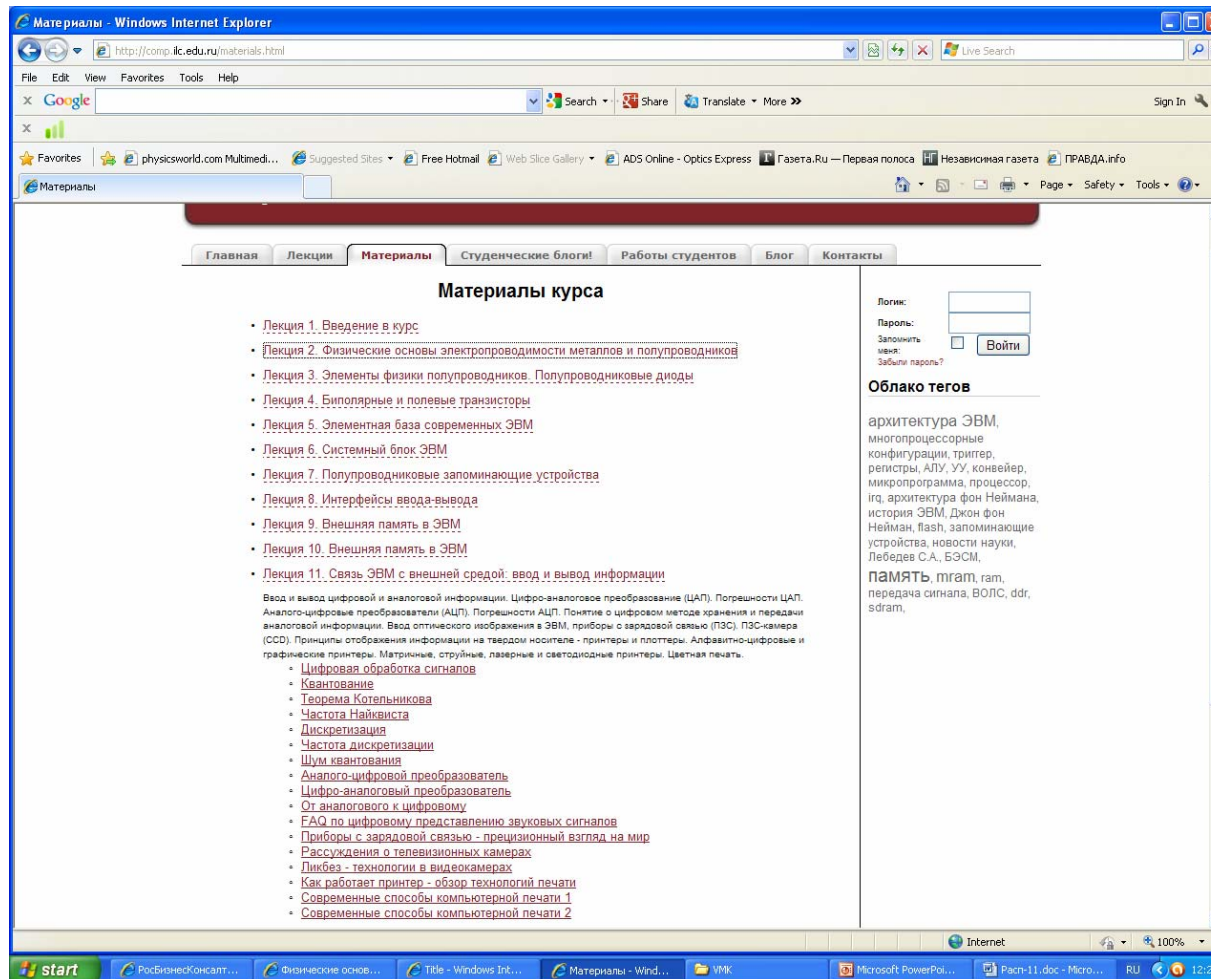
The screenshot shows a Windows Internet Explorer browser window with the address bar displaying [http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program\\_comp\\_2011.pdf](http://comp.ilc.edu.ru/assets/files/program_comp_2011.pdf). The main content area contains a list of links:

- 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://comp.ilc.edu.ru/uploads/files/1/c507d1dddc.pdf>)
- О.Н. Лебедев, "Микросхемы памяти и их применение", М.: Радио и связь, 1990.
- Многообразие типов видеопамати (<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



Материалы - Windows Internet Explorer

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

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

Материалы

Главная Лекции **Материалы** Студенческие блоги! Работы студентов Блог Контакты

### Материалы курса

- [Лекция 1. Введение в курс](#)
- [Лекция 2. Физические основы электропроводности 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 (CCD)). 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:   
Забудь 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, cdd, sdram,

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



# Лекция 1. Введение в курс

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

Лекции - Windows Internet Explorer

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

File Edit View Favorites Tools Help

Google Search Share Translate More Sign In

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

Лекции

Google This page is in Russian. Translate it using Google Toolbar? Learn more Not in Russian? Help us improve Translate

## Лекции

Главная Лекции Материалы Студенческие блоги! Работы студентов Блог Контакты

### Конспекты лекций

- Лекция 2. Морозов В.Б. [Основы теории электропроводимости металлов и полупроводников](#)
- Лекция 3. Морозов В.Б. [Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды.](#)
- Лекция 4. Морозов В.Б. [Биполярные и полевые транзисторы](#)
- Лекция 5. Руденко К.В. [Элементная база современных ЭВМ](#)
- Лекция 6. Руденко К.В. [Презентация к лекции "Системный блок ЭВМ"](#)
- Лекция 7. Руденко К.В. [Презентация к лекции "Полупроводниковые запоминающие устройства"](#)
- Лекция 8. Руденко К.В. [Презентация к лекции "Интерфейсы ввода-вывода"](#)
- Лекция 9. Шувалов В.В. [Презентация к лекции "Внешняя память в ЭВМ \(II\)"](#)
- Лекция 10. Шувалов В.В. [Презентация к лекции "Внешняя память в ЭВМ \(III\)"](#)
- Лекция 11. Шувалов В.В. [Презентация к лекции "Связь ЭВМ с внешней средой \(I\)"](#)
- Лекция 12. Шувалов В.В. [Презентация к лекции "Связь ЭВМ с внешней средой \(II\)"](#)
- Лекция 13. Шувалов В.В. [Презентация к лекции "Связь ЭВМ с внешней средой \(III\)"](#)
- Лекция 14. Шувалов В.В. [Презентация к лекции "Перспективы развития ЭВМ"](#)

Логин:   
Пароль:   
Запомнить меня:  Войти  
Забыли пароль?

#### Облако тегов

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

© 2009 MSU Phys. Dept. | DESIGN BY SUPER J MAN |

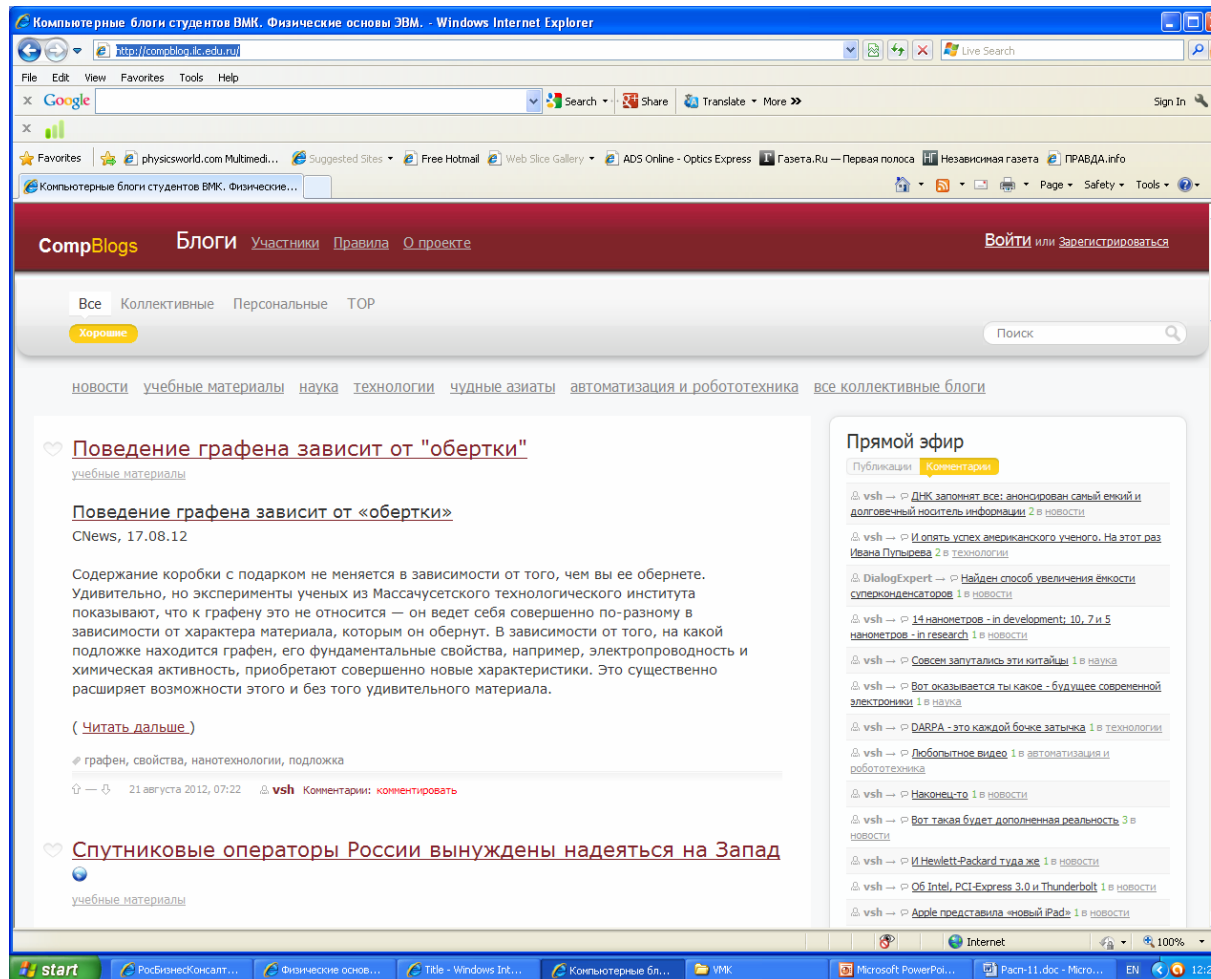
Internet 100%

start РосБизнесКонсалт... Физические основ... Tlfe - Windows Ink... Лекции - Windows ... VMK Microsoft PowerPol... Расч-11.doc - Микро... EN 12:25

Сайт курса  
материалы

# Лекция 1. Введение в курс

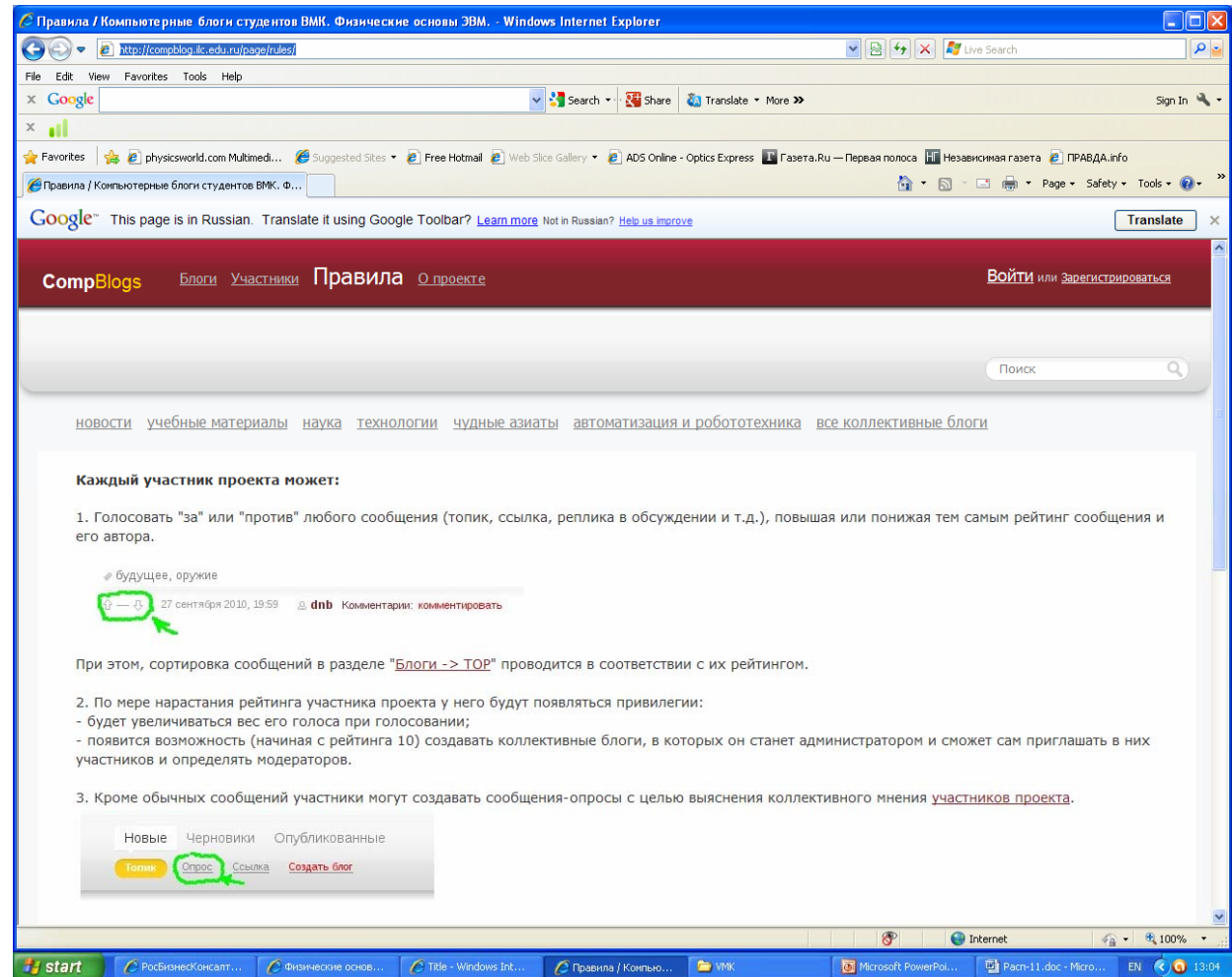
Сайт курса  
блог



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

# Лекция 1. Введение в курс

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



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  
Компания DEC, 1970-80-е годы*

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

В настоящее время аббревиатура ЭВМ используется больше как формальный и правовой термин, в то время как широко распространен термин компьютер

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



# Лекция 1. Введение в курс

## Компьютер и информация



*Процессор со снятым кулером*

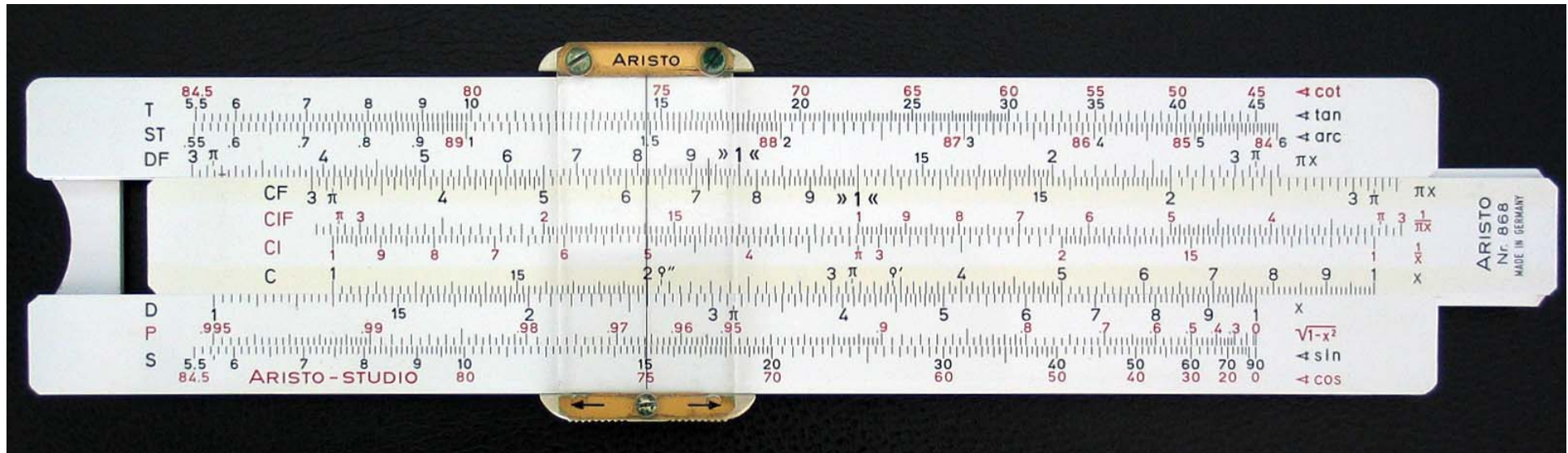
Компьютер может функционировать за счёт перемещения механических частей, движения электронов, фотонов, других частиц либо использования каких-то других физических эффектов

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



### Логарифмическая линейка

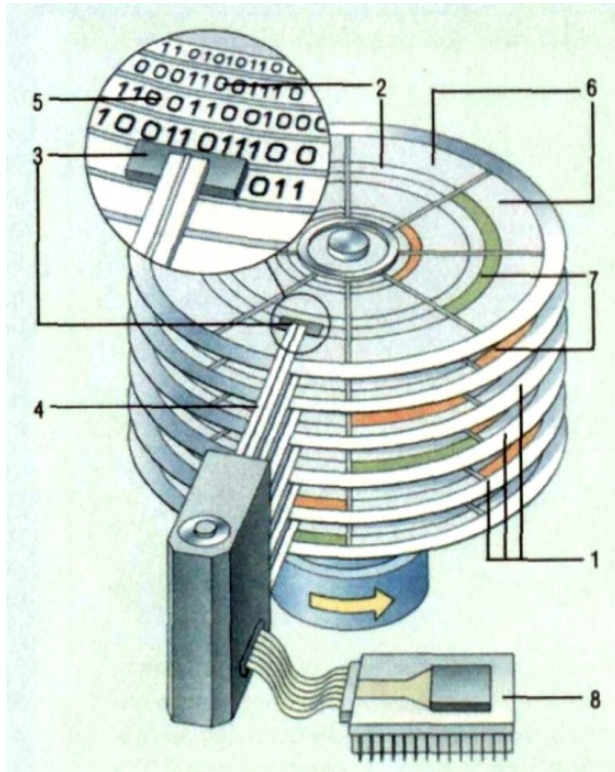
Принцип действия: умножение и деление чисел заменяется соответственно сложением и вычитанием их логарифмов. Первый вариант линейки разработал английский математик-любитель Уильям Отред в 1622 году. Использовались в инженерных расчетах вплоть до начала 1980-х, после чего были вытеснены калькуляторами



Часы Breitling Navitimer. 2000-е годы

# 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

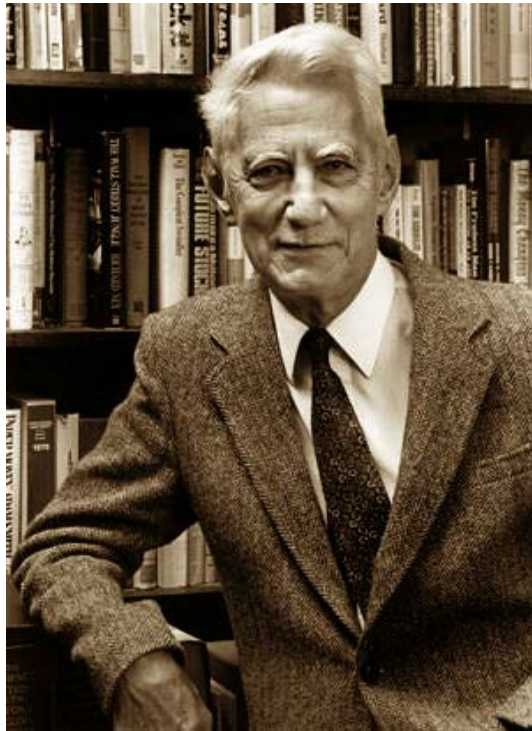
Информацию можно классифицировать, например, по

- 1) способу восприятия
  - визуальная - воспринимаемая органами зрения,*
  - аудио - органами слуха,*
  - тактильная - тактильными рецепторами,*
  - обонятельная - обонятельными рецепторами,*
  - вкусовая - 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 Элууд 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 возможных 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

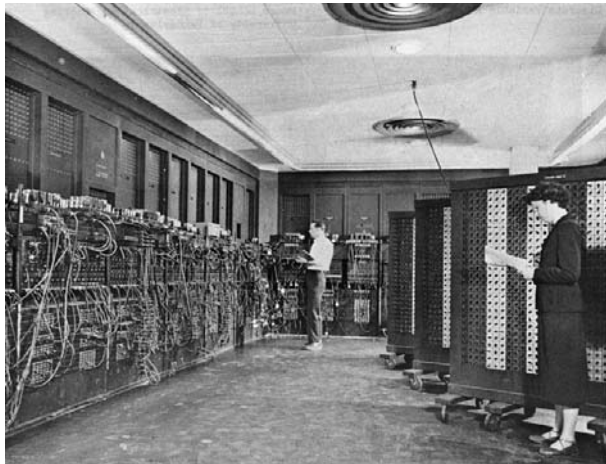
## История развития вычислительной техники

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

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



*Воссозданный Z3*



ЭНИАК

1943 год – Англия, вычислительная машина COLOSSUS (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 ENIAC **на электронных лампах** (для баллистических расчётов). По окончании работ сформулированы принципы архитектуры **фон Неймана**

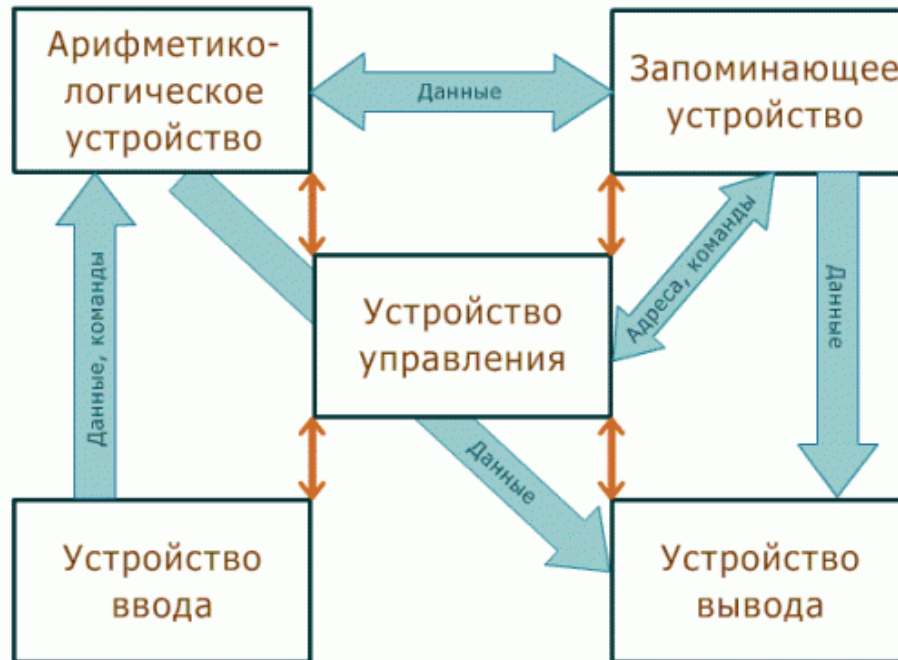
1949 год – MARK I (Англия) – один из первых полностью электронных компьютеров с хранимой в памяти программой, реализующий архитектуру фон Неймана



# Лекция 1. Введение в курс

## История развития вычислительной техники

Схема вычислительной машины фон Неймана



- Принцип двоичного кодирования.
- Принцип однородности памяти для команд и данных.
- Принцип адресуемости памяти.
- Принцип последовательного программного управления.
- Принцип условного перехода.

Принципы архитектуры фон Неймана сформулированы по результатам разработки вычислительной машины ENIAC



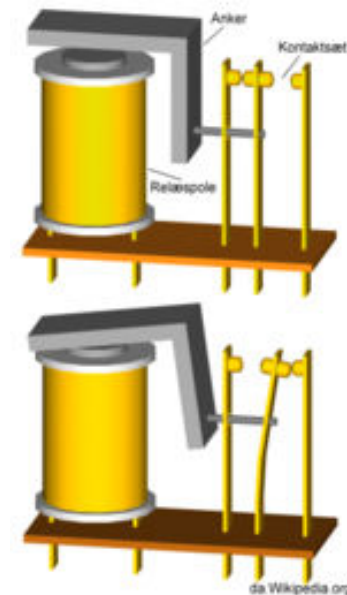
# Лекция 1. Введение в курс

## 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



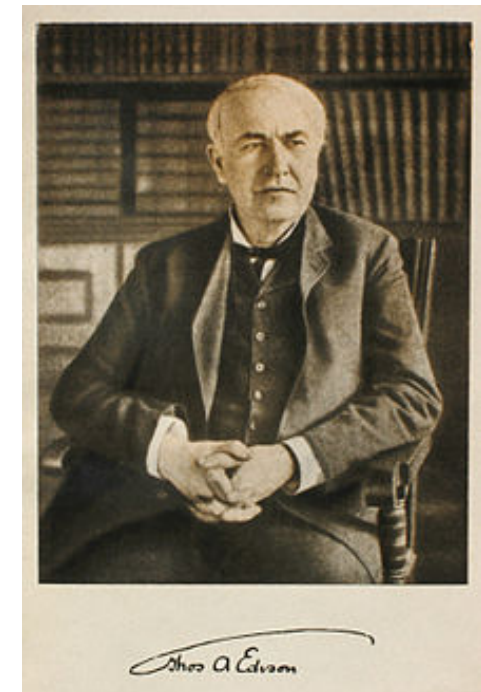
*«Пальчиковые» лампы*

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**

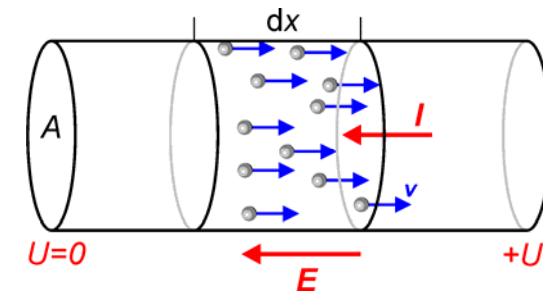
*Томас Эдиссон –  
открыватель явления  
термоэлектронной  
эмиссии*



# 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  
 $kT = 4,14 \times 10^{-21}$  Дж = 0,026 эВ  
 $1 \text{ эВ} = 1.6 \times 10^{-19}$  Дж  $\rightarrow 11\,600$  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



Электронная лампа - вакуумный электронный прибор, работающий за счет управления интенсивностью потока электронов, движущихся в вакууме или разреженном газе между электродами.

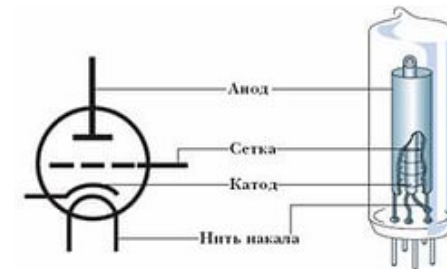
Электронные лампы массово использовались в XX веке как активные элементы электронной аппаратуры (усилители, генераторы, детекторы, переключатели и т.п.). В настоящее время практически полностью вытеснены полупроводниковыми приборами

### 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



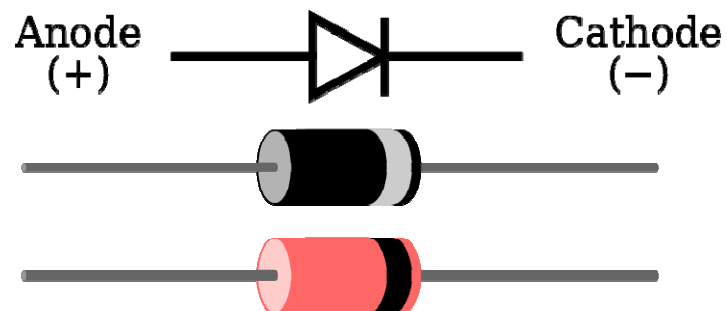
# Лекция 1. Введение в курс

## Поколения компьютеров и их элементная база

Первыми полупроводниковыми устройствами, нашедшими применение в детекторных радиоприемниках, были т.н. точечные диоды (открытые, но не объясненные К.Ф. Брауном еще в 1870-е), 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 полупроводниковые устройства на основе кремния (Si)



*Карл Фердинанд Браун*



*Полупроводниковые диоды*



# Лекция 1. Введение в курс

## Поколения компьютеров и их элементная база

**ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА**

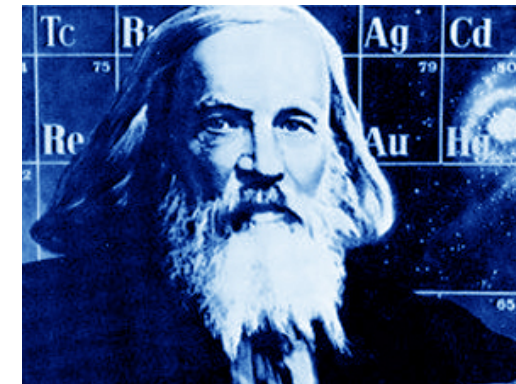
Период	№ атомного номера	Символ	Оболочка	Последняя заполненная оболочка	Ряд	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		№
						а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	
1	2				1	1	2														2	1
		1				1	2														2	1
2	8				2	3	6, 7	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		2				3	6, 7	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
3	8				3	11	23	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
		3				11	23	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
4	18				4	19	39, 41	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
		4				19	39, 41	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
5	18				5	37	85, 87	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
		5				37	85, 87	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
6	32				6	55	133	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
		6				55	133	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
7	32				7	87	219	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
		7				87	219	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102



# Лекция 1. Введение в курс

## Поколения компьютеров и их элементная база

Все перечисленные элементы находятся в одной колонке периодической системы 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

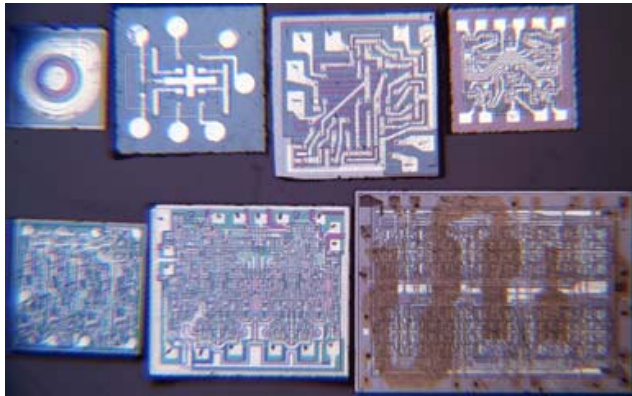
I																		VIII																																																																																																																																																																	
H																		He																																																																																																																																																																	
Li				Be				B				C				N				O				F				Ne																																																																																																																																																							
Na						Mg						Al						Si						P						S						Cl						Ar																																																																																																																																									
K								Ca								Sc								Ti								V								Cr								Mn								Fe								Co								Ni								Cu								Zn								Ga								Ge								As								Se								Br								Kr																																											
Rb										Sr										Y										Zr										Nb										Mo										Tc										Ru										Rh										Pd																																																																																									
Ag												Cd												In												Sn												Sb												Te												J												Xe																																																																																															
Cs														Ba														La														Hf														Ta														W														Re														Os														Ir														Pt																																																					
Au																Hg																Tl																Pb																Bi																Po																At																Rn																																																																			
Fr																		Ra																		Ac																		E-Hf																		E-Ta																		E-W																		E-Re																		E-Os																		E-Ir																		E-Pt																	
E-Au																		E-Hg																		E-Tl																		E-Pb																		E-Bi																		E-Po																		E-At																		E-Rn																																																					

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

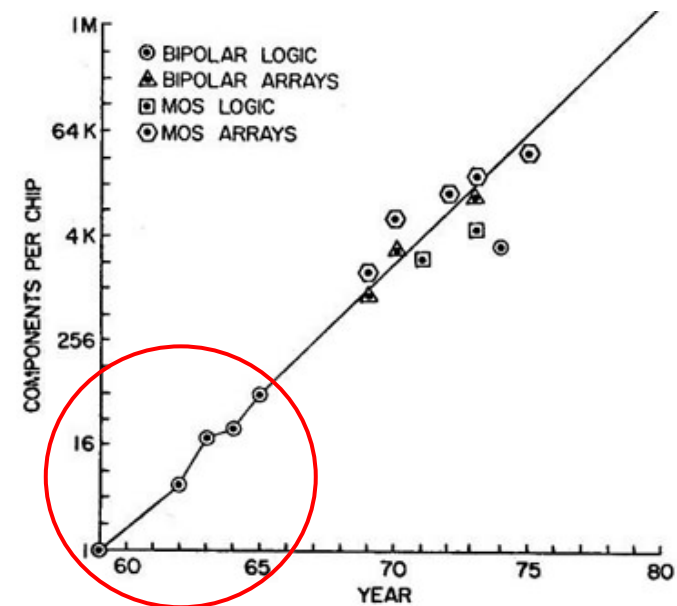
Основной эмпирический вывод Мура: «**Число компонентов на чипе удваивается каждый год**»

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»

В 1975 году Мур сделал уточнение, где говорится об удвоении каждые два года

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

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

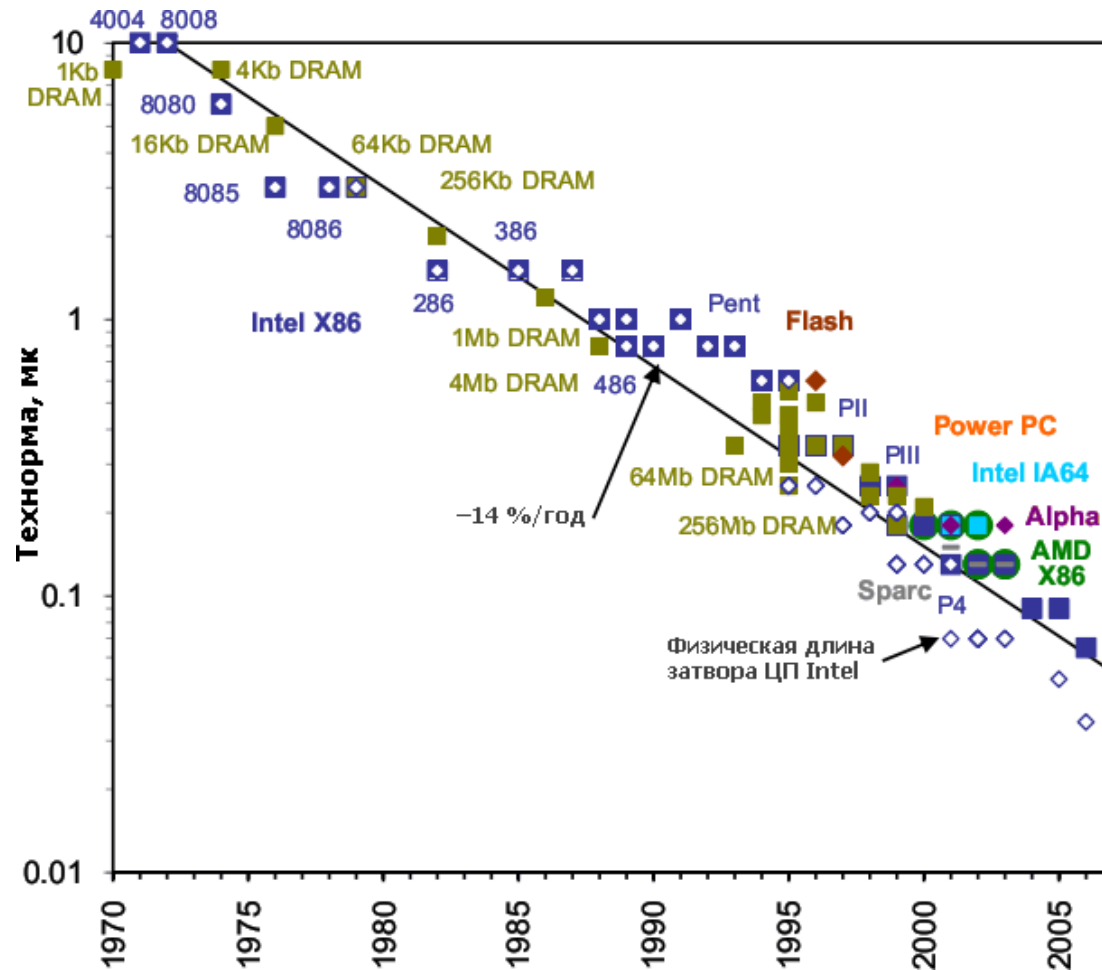
т.е. примерно 1,2 триллионов тонн

°	•	••	•••	••••	•••••	••••••	•••••••	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

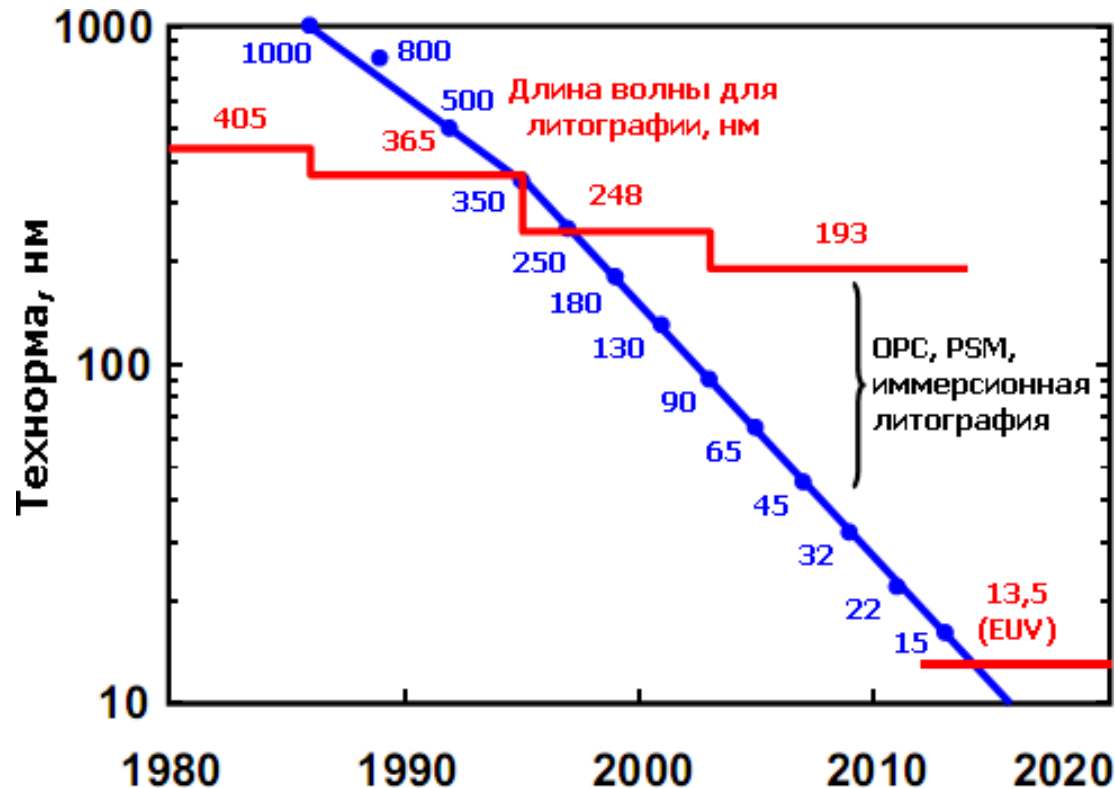


Технологические нормы сложных микросхем. Падает и их цена - правда, не вдвое, а примерно в 1,5 раза при каждом переходе на очередной техпроцесс



# Лекция 1. Введение в курс

## Экспоненциальное развитие и закон Мура

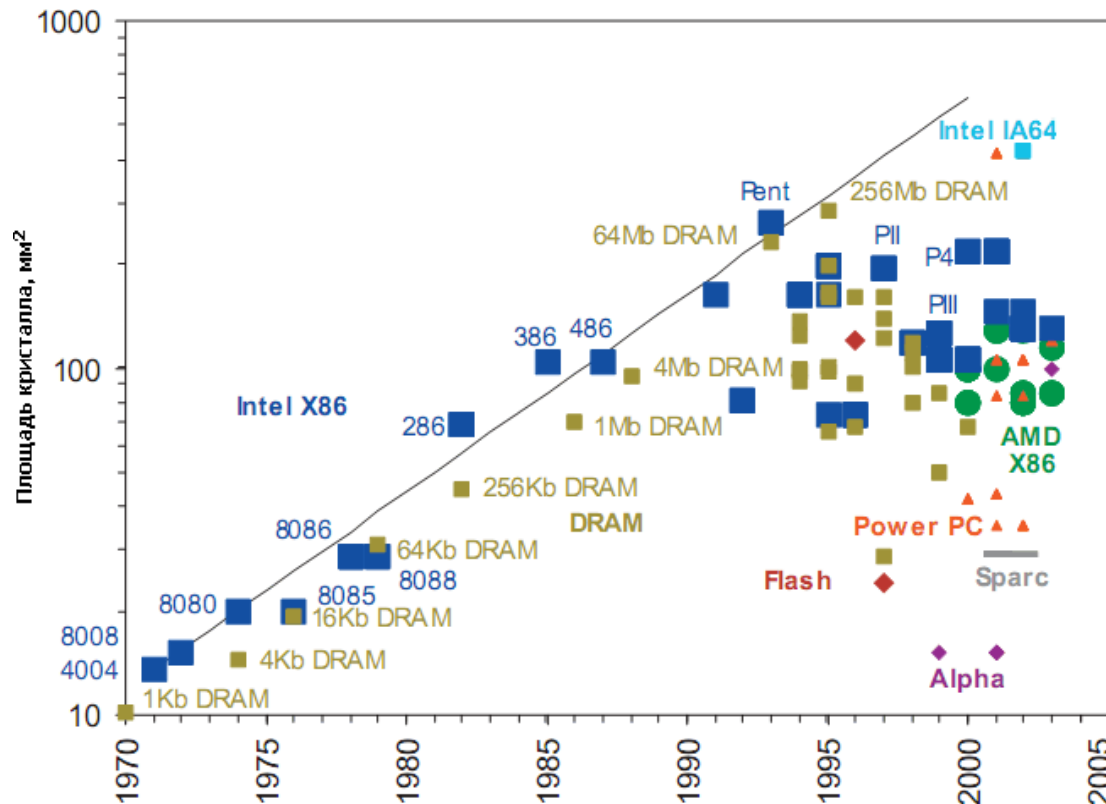


Технологические нормы для процессоров Intel.

Начиная с 15-нм техпроцесса, постепенно начинает использоваться экстремальный ультрафиолет (EUV) (13нм, излучение лазерной плазмы). Однако, не все просто в технологическом плане (малая эффективность, низкая когерентность, сложность изготовления фотомасок)

# Лекция 1. Введение в курс

## Экспоненциальное развитие и закон Мура

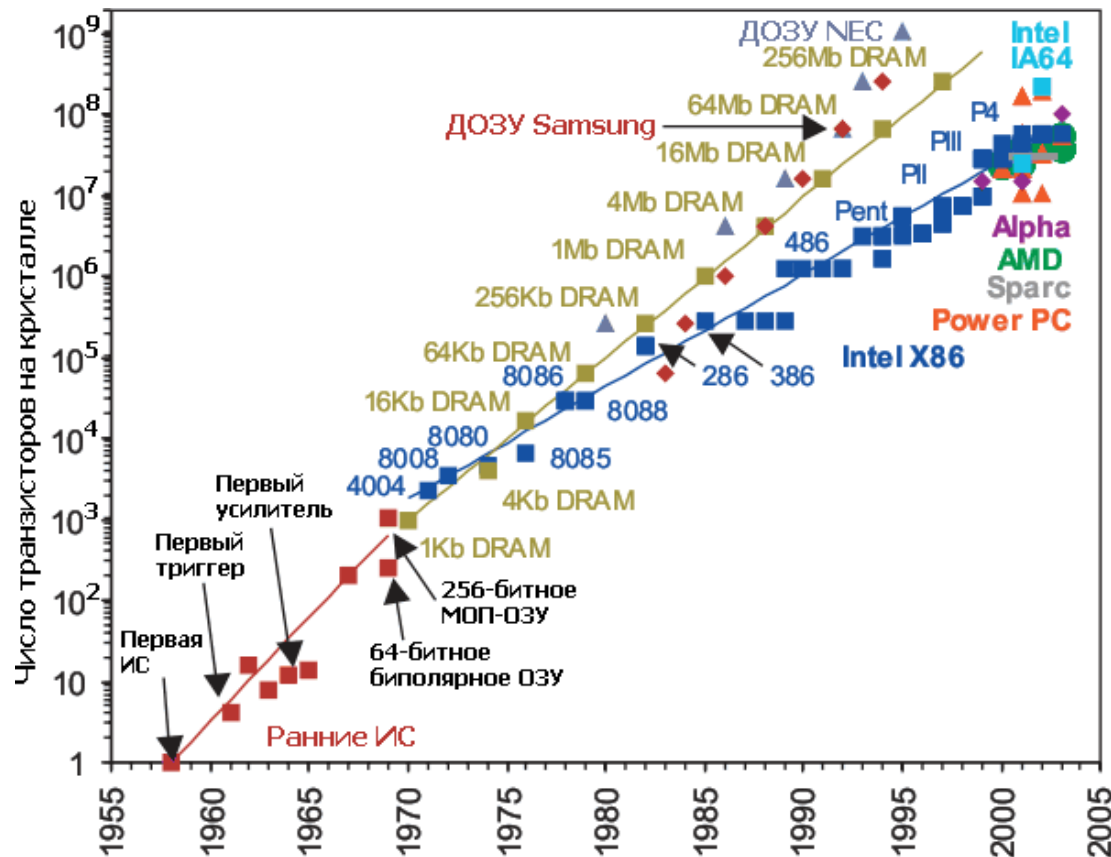


Площадь кристалла для наиболее сложных микросхем (процессоры и память) на указанный по оси абсцисс год.

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

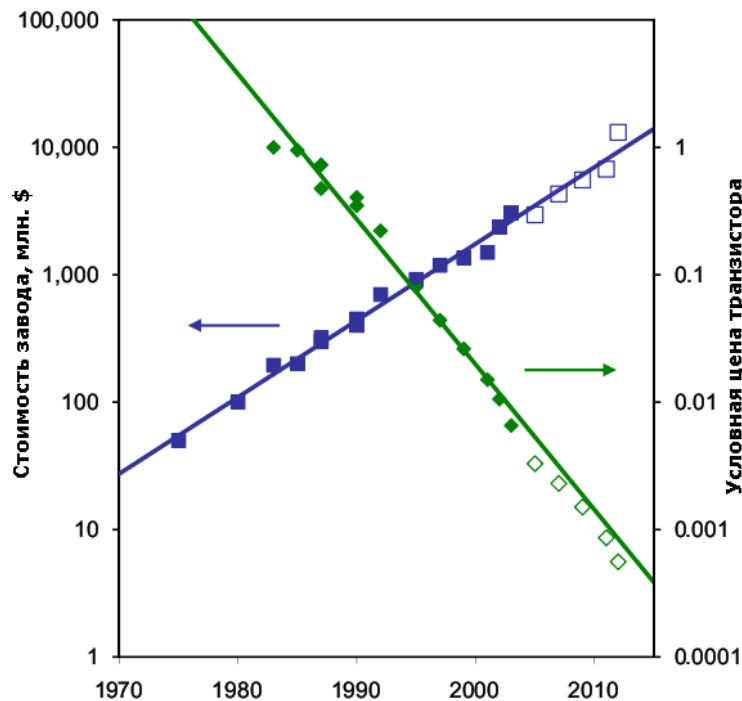


Экспоненциальный рост числа транзисторов на кристалле интегральной схемы.

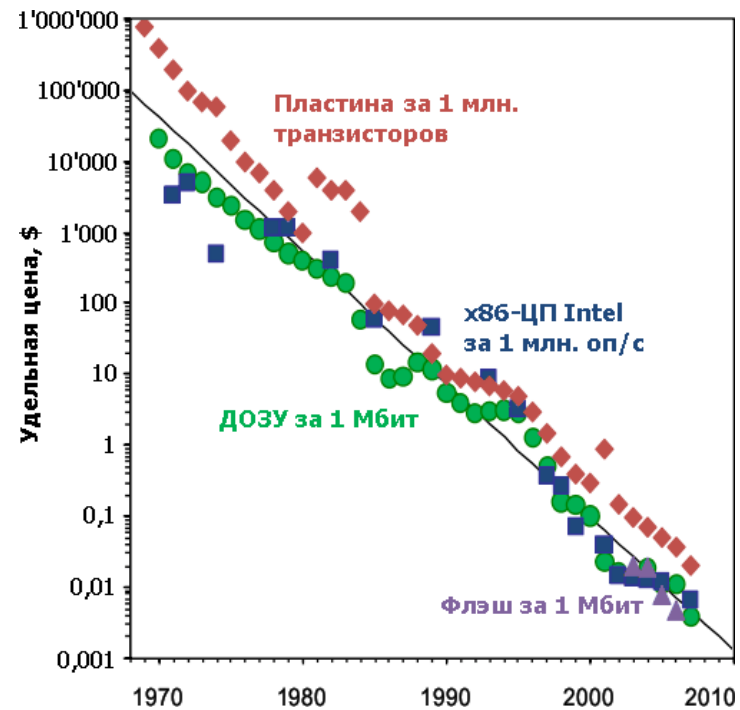
Начиная с 70-х годов этот рост для микросхем памяти и процессоров идет меньшими темпами - 58 % и 38 % в год

# 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)*

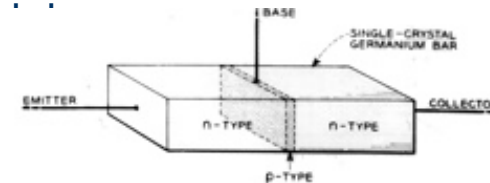
1952 - Bell Labs, продажа лицензий на выпуск биполярных транзисторов (\$ 25000, 26 фирм)



1947 – Дж.Бардин, У.Браттейн, Bell Labs, точечный транзистор

1951 - У. Шокли, Bell Labs, биполярный транзистор

1956 - У. Шокли, Нобелевская премия за открытие транзисторно



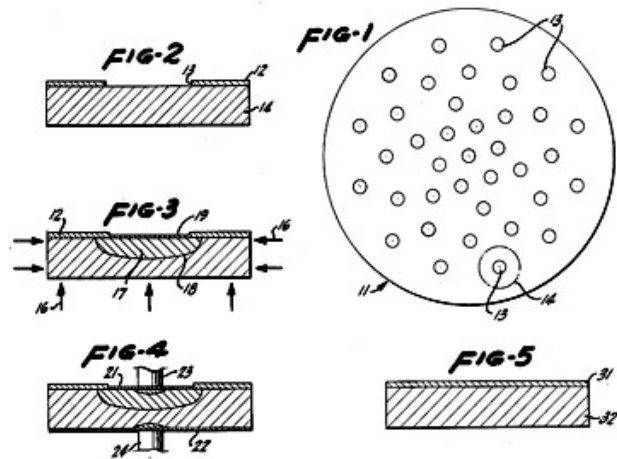
*Планарный транзистор (1951)*



# 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*

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

1955 - Bell Labs, первый полевой транзистор

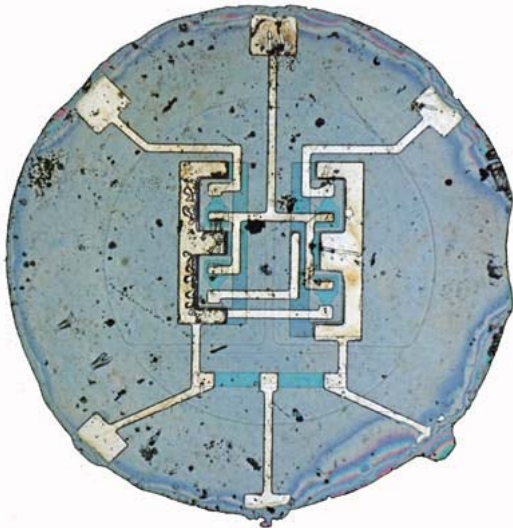


*Ручная нарезка маски для  
фотолитографии*

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

# 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

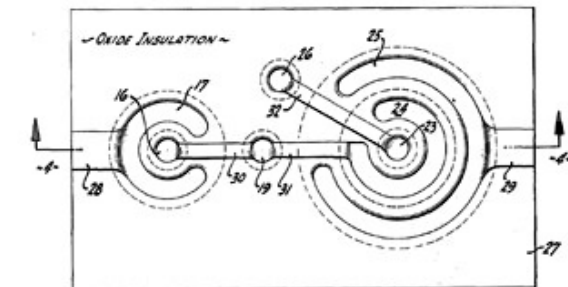


FIG-3

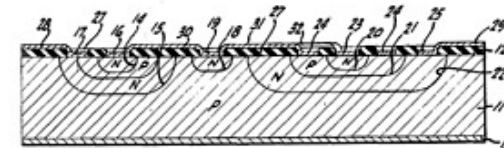


FIG-4

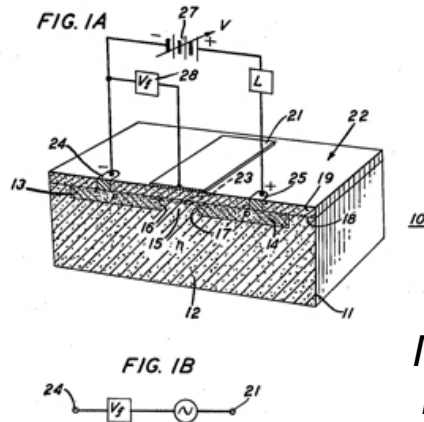
Патент Нойса на планарную  
интегральную схему (1959)

- 1952 - Джэффри Даммер, идея интегральной схемы («брусочек 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

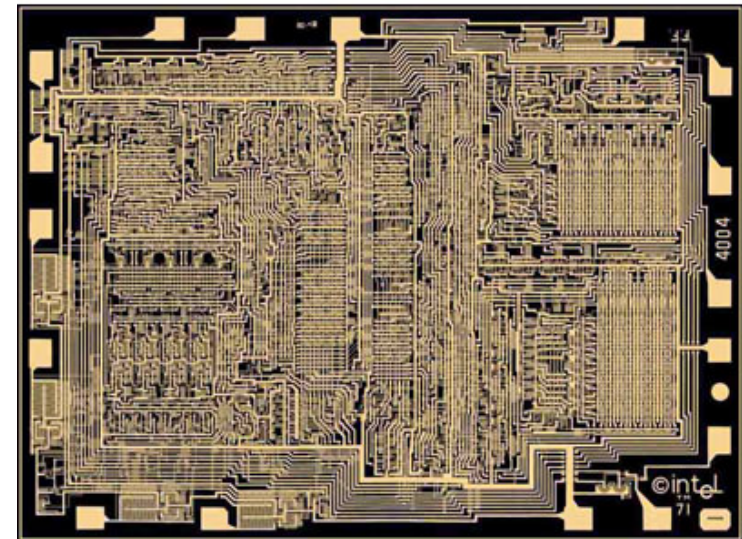
## Полупроводники в современных ЭВМ

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



*Патент на полевой транзистор (1960)*

1959 - Джон Аталла и Дэвон Канг, Bell Labs, полевой транзистор с изолированным затвором (МОП)

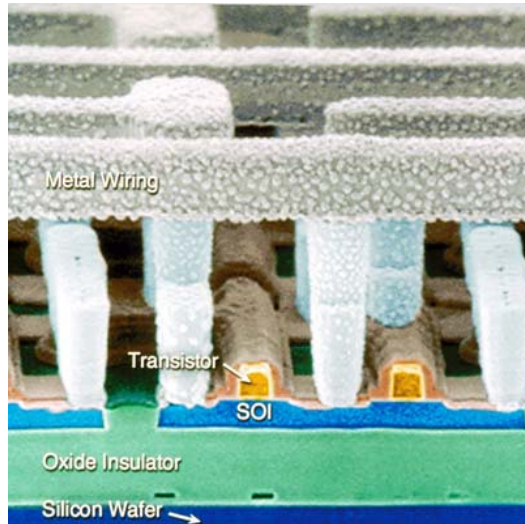


*4-битный ЦП Intel i4004*

1963 - транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ)  
1963 - Фрэнк Уанласс, Fairchild, использование комплементарных МОП (КМОП) структур уменьшает энергопотребление в статике ~1.000.000 раз

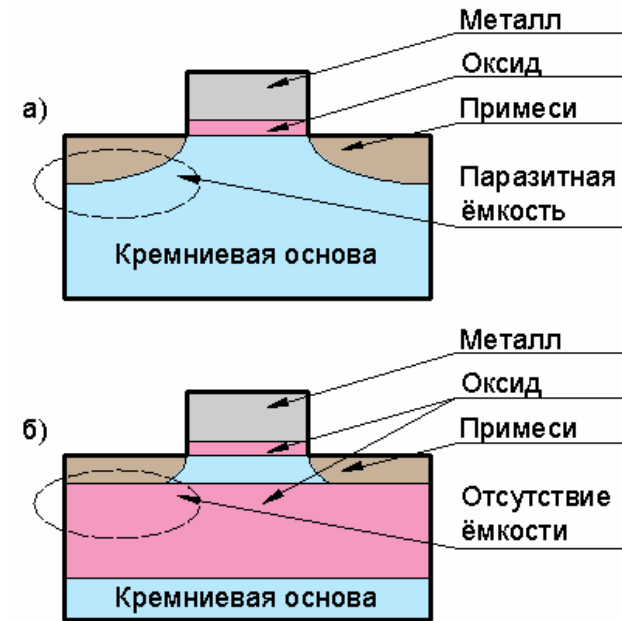
# Лекция 1. Введение в курс

## 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



«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



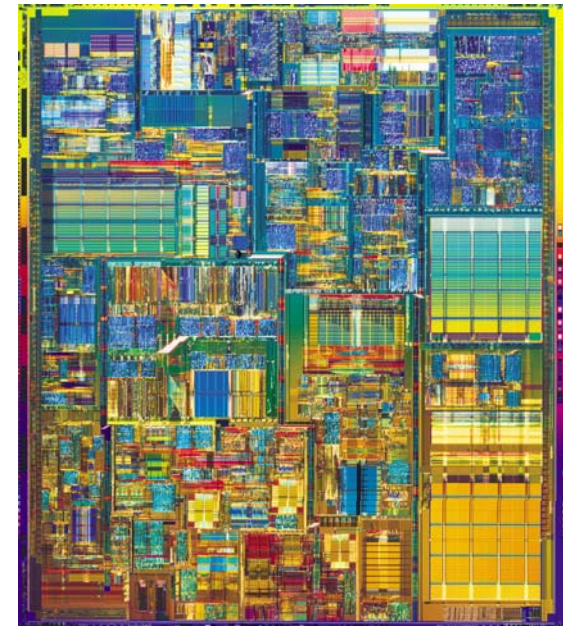
# Лекция 1. Введение в курс

## 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*

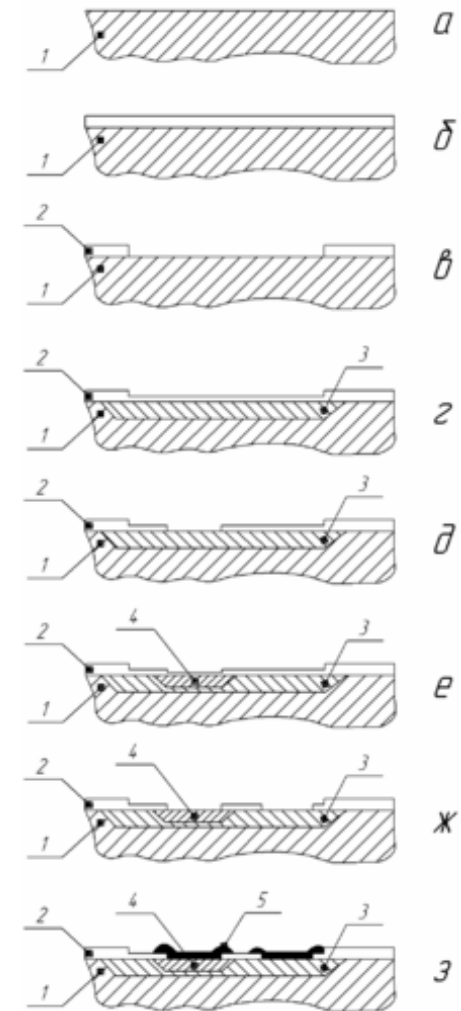


# Лекция 1. Введение в курс

## Планарная технология

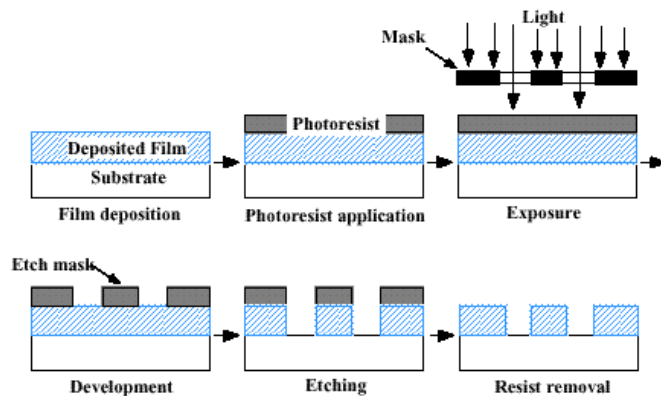
### Изготовление транзистора по планарной технологии

- а — исходная пластина;  
б — первое окисление;  
в — первая фотолитографическая обработка (нанесение фоторезиста, освещение через маску, травление);  
г — создание базовой области и второе окисление;  
д — вторая фотолитографическая обработка;  
е — создание эмиттерной области и третье окисление;  
ж — третья фотолитографическая обработка;  
з — металлизация.
- 1 — Полупроводник с электропроводностью n-типа;  
2 — маскирующая плёнка двуокиси кремния;  
3 — область базы;  
4 — область эмиттера;  
5 — металлическая плёнка (электроды)



# Лекция 1. Введение в курс

## Фотолитография



**Фотолитография** - процесс избирательного травления поверхностного слоя с использованием защитной фотомаски

### Литография (фотолитография)

- оптическая фотолитография (стандартная),  $\lambda=310-450\text{nm}$ ;
- ультрафиолетовая фотолитография на эксимерных лазерах,  $\lambda=248, \lambda=193\text{ nm}$
- фотолитография в глубоком ультрафиолете,  $\lambda=100-10\text{nm}$ ;
- рентгеновская литография,  $\lambda=0.1-10\text{nm}$
- *электронная литография*
- *ионная литография*



**Фотомаска**

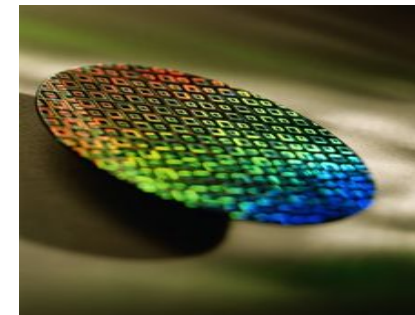
# Лекция 1. Введение в курс

## Фотолитография



*Современный литографический сканер ASML TwinScan 1950i*

*Полупроводниковая пластина со сформированным на ней массивом микросхем (диаметр до 450 мм)*



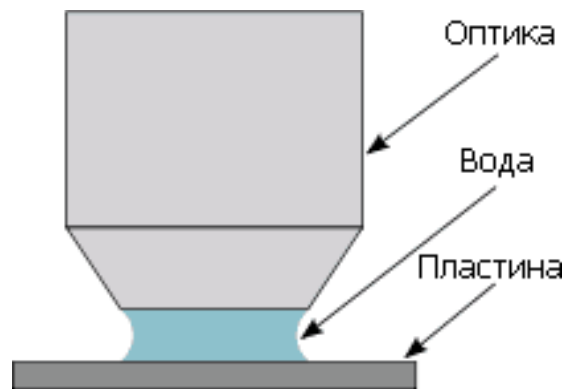
1982 - IBM, внедрение в фотолитографию эксимерных лазеров с длинами волн 248 (KrF) и 193 (ArF) нм.

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 завершится 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*

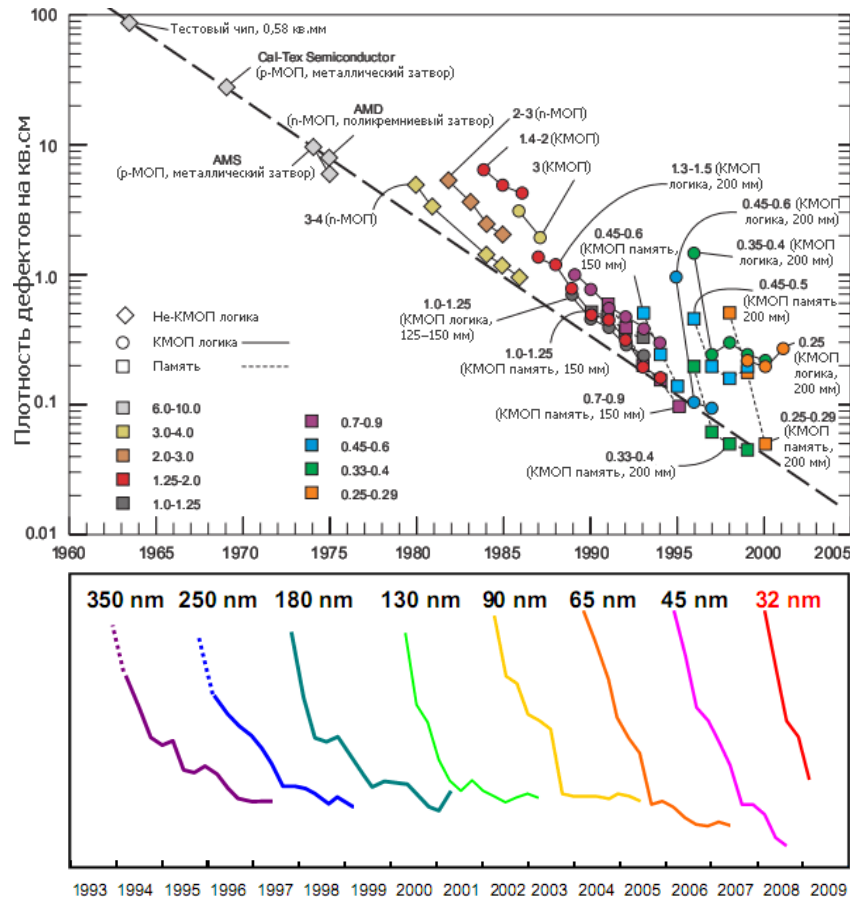
2006 - иммерсионная литография:

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



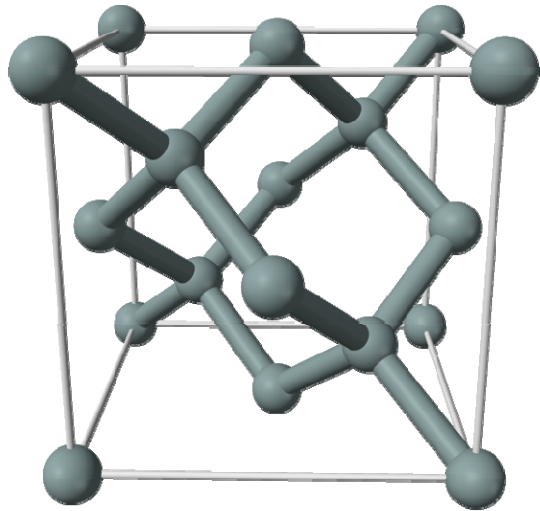
Число дефектов на 1 см<sup>2</sup> площади кристалла для самых продвинутых фабрик при финишном тестировании. Жирные цифры – технологические нормы в мкм, в скобках - диаметр пластин

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



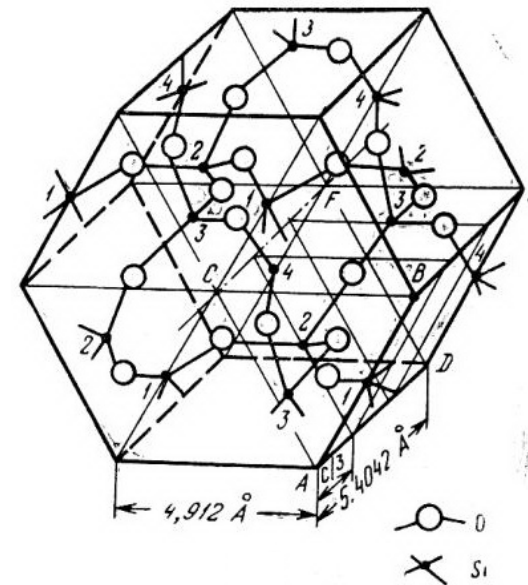
# Лекция 1. Введение в курс

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



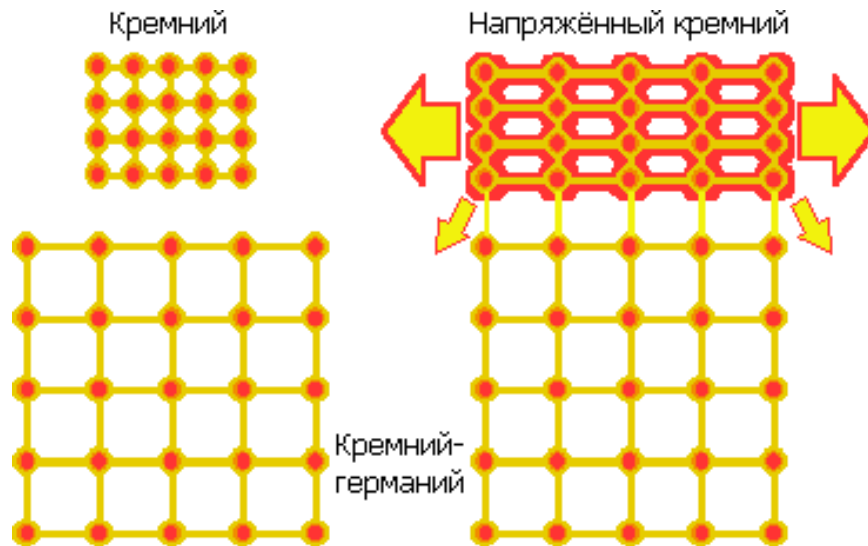
Кристаллическая решетка кремния кубическая гранецентрированная типа алмаза, параметр решетки  $a = 0,543 \text{ нм}$

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

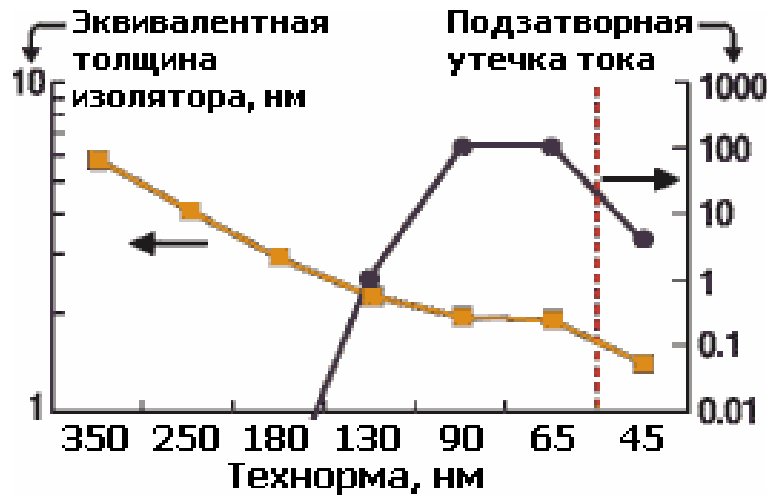


В 2004 технологию «напряженный» кремний» Intel и AMD применили для техпроцесса 90 нм. Для 65 нм была внедрена ионная имплантация германия и углерода в исток и сток. Германий «раздувает» концы транзистора и сжимает канал, что увеличивает скорость дырок (основных носителей заряда в р-канальных транзисторах). 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



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

$$C = \frac{\kappa \epsilon_0 S}{d}$$

При уменьшении площади транзистора ёмкость затвора падает, что ограничивает протекающий через него ток.

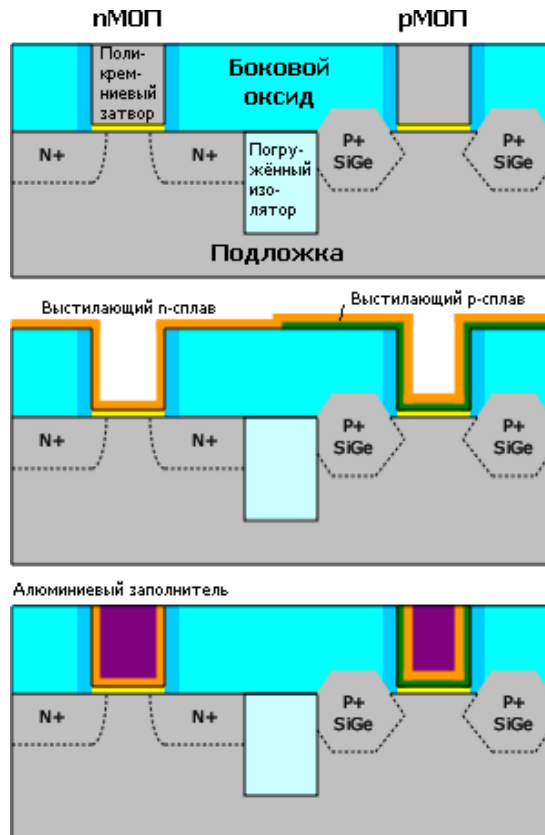
Использование High-k — технологии позволяет увеличить толщину, что способствует увеличению емкости и тока. При этом уменьшается ток утечки и дефекты при сопряжении диэлектрика с подложкой

**High-k** — технология производства МОП-полупроводниковых приборов с подзатворным диэлектриком, выполненным из материала с диэлектрической проницаемостью, большей, чем у диоксида кремния

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

# Лекция 1. Введение в курс

## «High-k» диэлектрики и металлический затвор



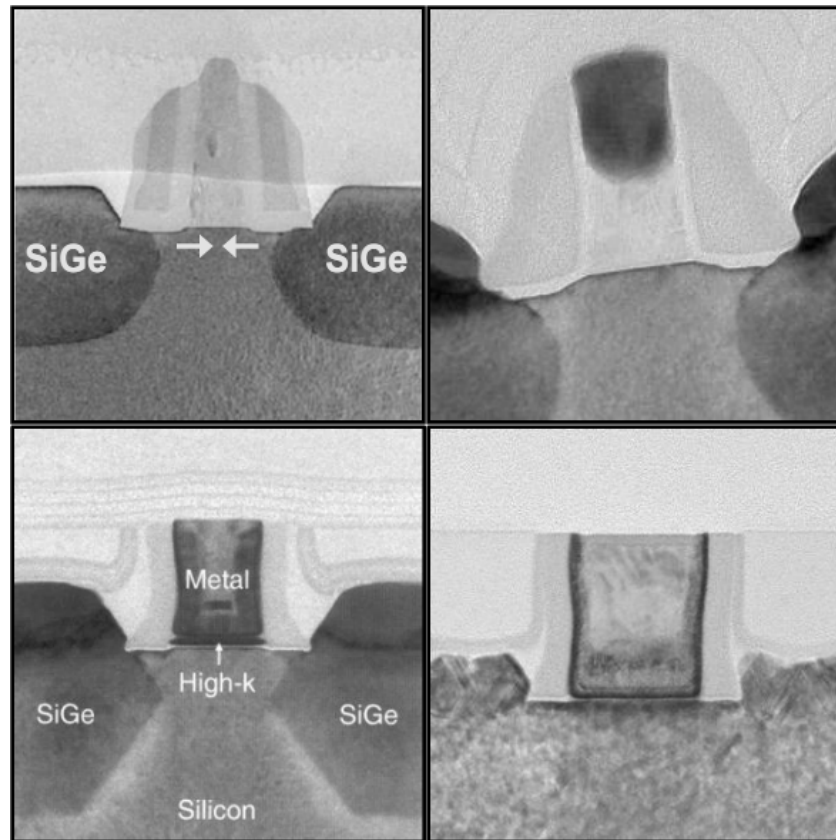
*Реализация металлического затвора (Intel)*

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  $k \sim 3,9$  ( $\text{SiO}_2$ ). 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),

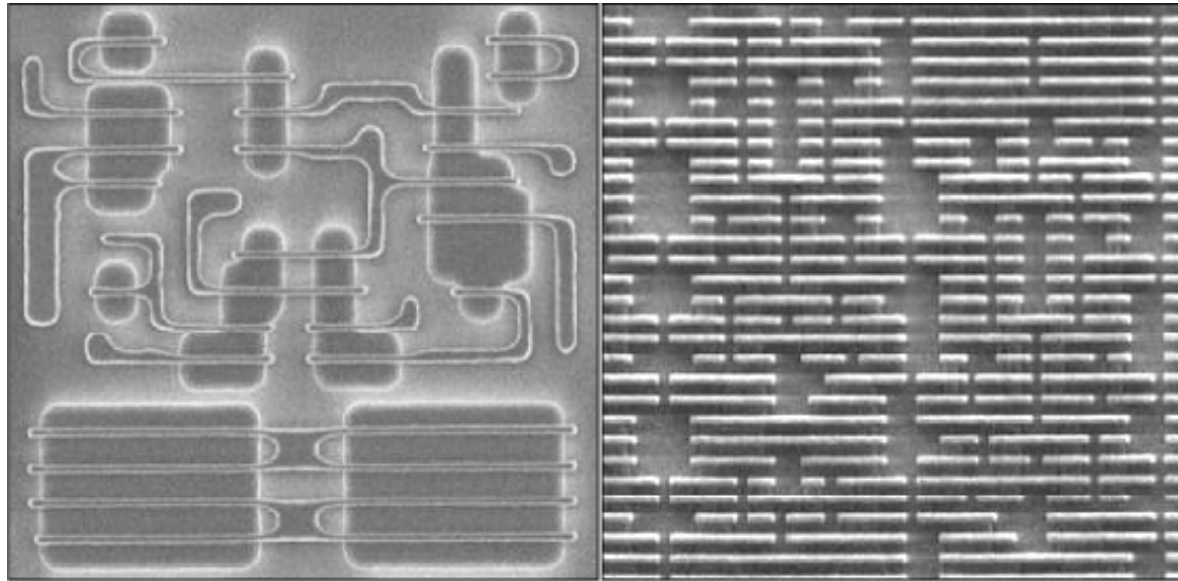
45-нм (2007, впервые используется  
HKMG)

32-нм (2009)



# Лекция 1. Введение в курс

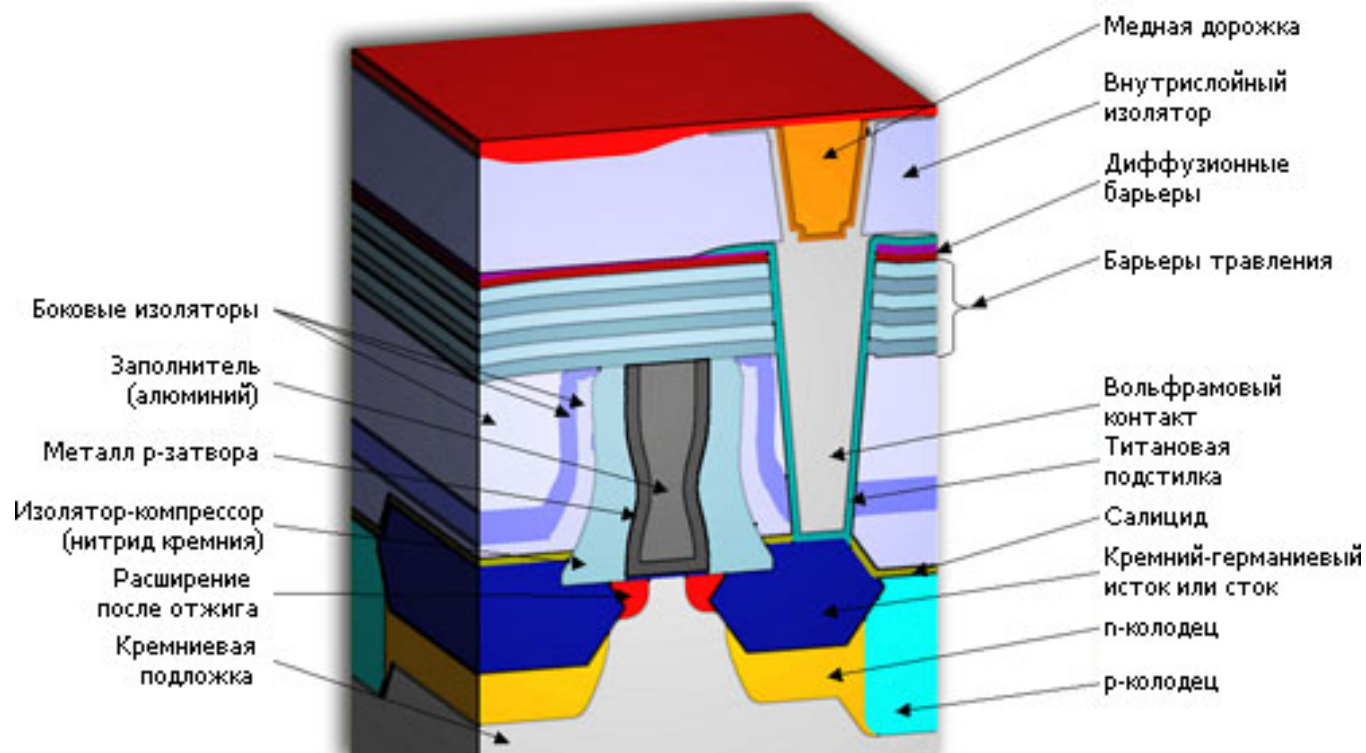
## Сравнение 65-нм и 32-нм техпроцессов



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



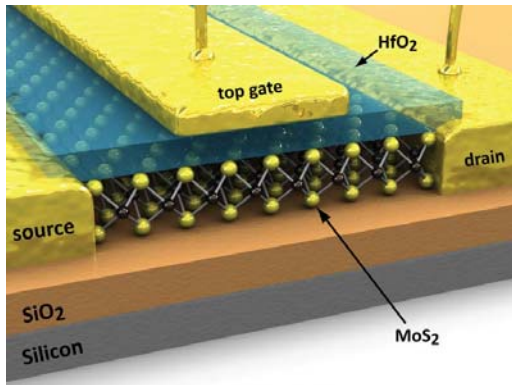
*Устройство 45-нм р-канального транзистора (Intel)*

# Лекция 1. Введение в курс

## Перспективные полупроводники



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



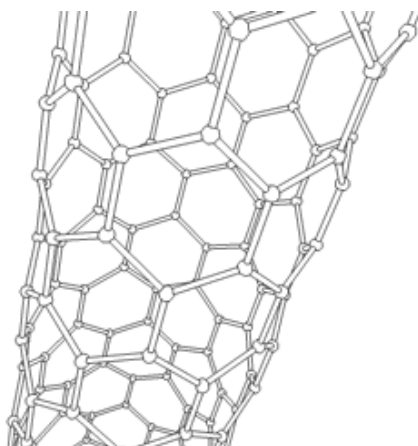
*Молибденит и транзистор на его основе*

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

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

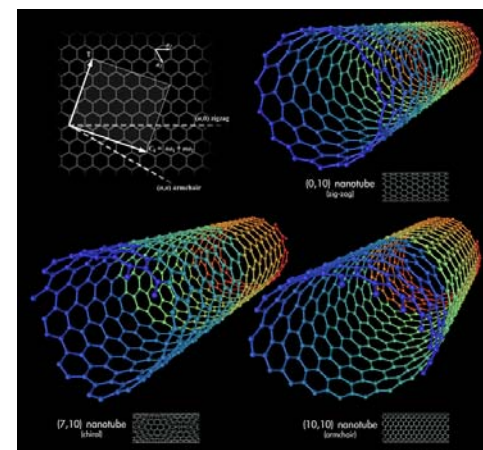


*Углеродная нанотрубка*

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.

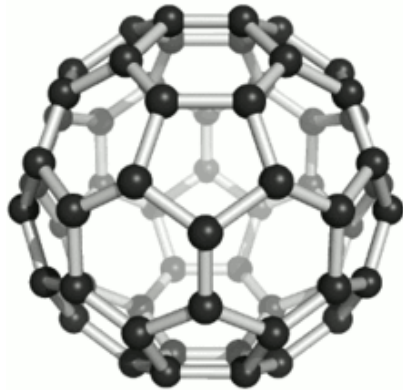
**Углеродные нанотрубки** - длинные цилиндрические структуры (диаметр от одного до нескольких десятков нанометров, длина до нескольких сантиметров), состоящие из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей и заканчивающиеся обычно полусферой, которая может рассматриваться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



*Типы нанотрубок*

# Лекция 1. Введение в курс

## Углеродные наноструктуры



Фуллерен  $C_{60}$

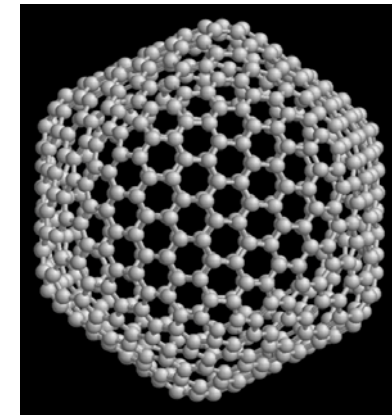
**Фуллерены** - класс молекулярных соединений, являющихся аллотропными формами углерода и представляющих собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода

Размер молекулы фуллерена **0,708 нм**

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

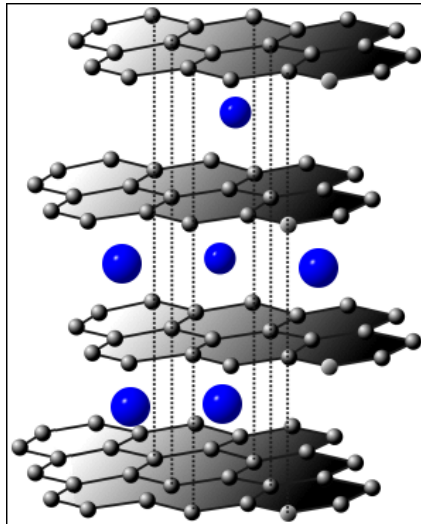


Фуллерен  $C_{540}$



# Лекция 1. Введение в курс

## Углеродные наноструктуры

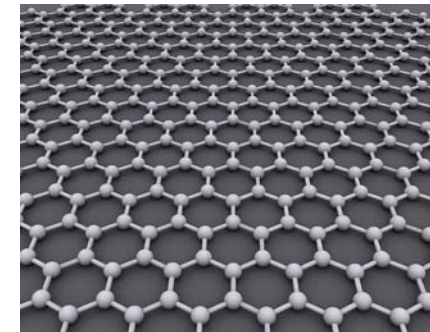


*Графит*

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

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

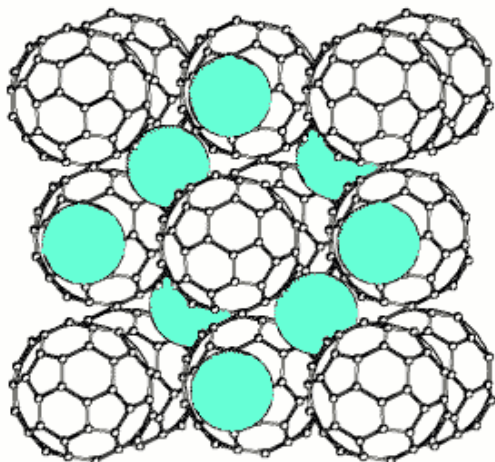
2010 - А.К. Гейм и К.С. Новоселов, Нобелевская премия по физике за «передовые опыты с 2D материалом - графеном»



*Графен*

# Лекция 1. Введение в курс

## Молекулярные кристаллы

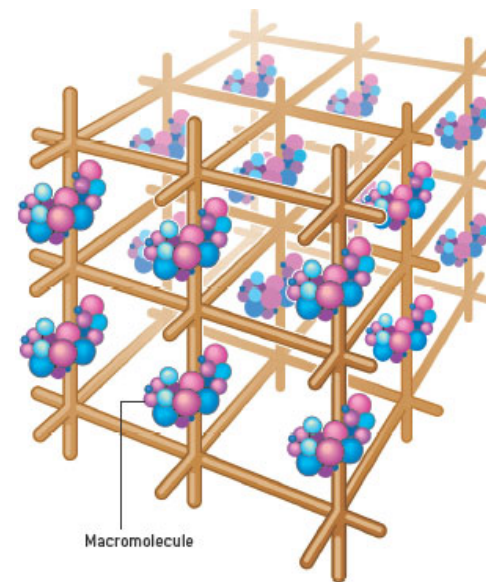


Молекулярный кристалл - кристалл, построенный из молекул. Молекулы связаны между собой слабыми Ван-дер-Ваальсовскими силами, внутри же молекул между атомами действует гораздо более прочная ковалентная связь

*Примеры молекулярных кристаллов*

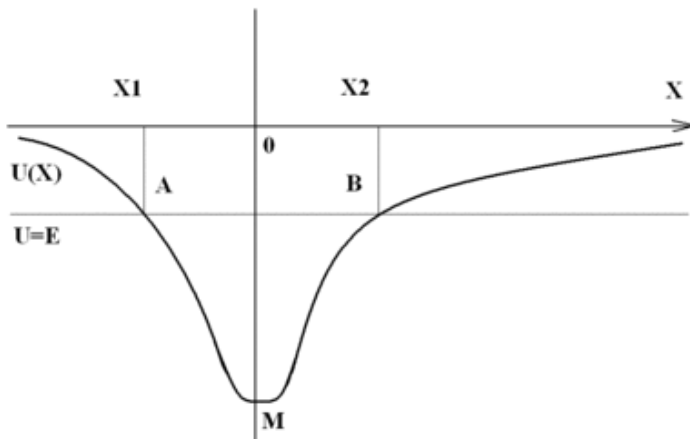
Большинство молекулярных кристаллов - это кристаллы органических соединений. К этому же классу относятся и кристаллы полимеров, белков, нуклеиновых кислот.

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



# Лекция 1. Введение в курс

## Устойчивые одно- и многоэлектронные состояния



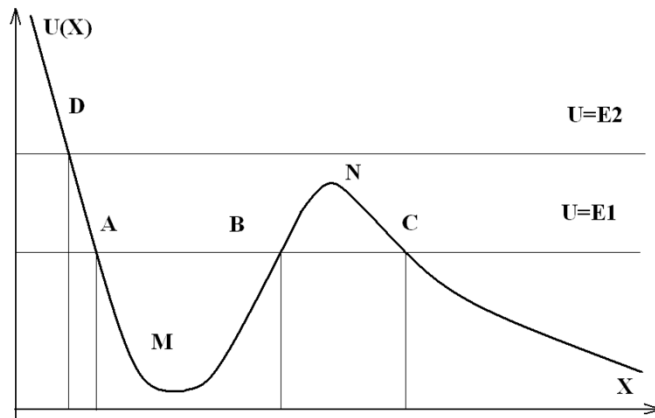
*Потенциальная яма*

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.

# Лекция 1. Введение в курс

## Устойчивые одно- и многоэлектронные состояния



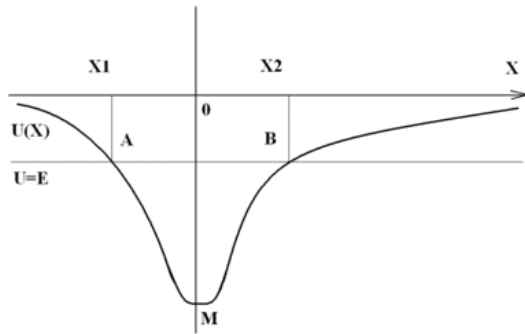
*Потенциальный барьер*

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

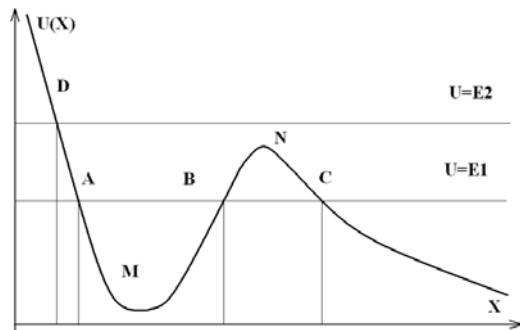
Если частица подчиняется квантовым законам, то даже несмотря на недостаток энергии она с определенной вероятностью может преодолеть потенциальный барьер (явление туннельного эффекта)

# 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

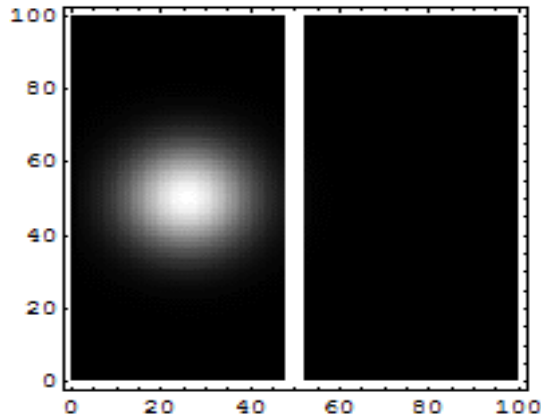
Минимальная глубина потенциальной ямы (высота потенциального барьера) определяется средней энергией теплового возбуждения частицы ( $3/2 kT$ ), которой должно быть недостаточно для покидания ямы

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



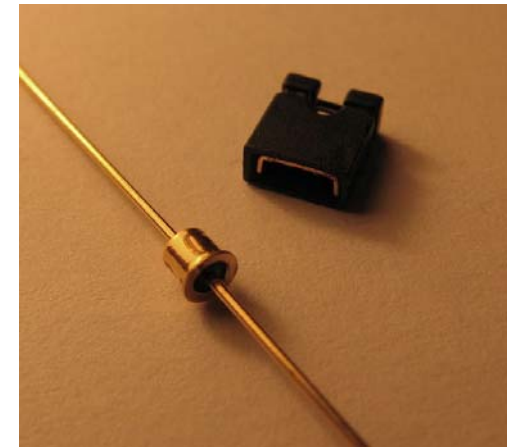
Туннельный эффект - преодоление частицей потенциального барьера в том случае, когда ее энергия (останется неизменной) меньше высоты барьера.

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

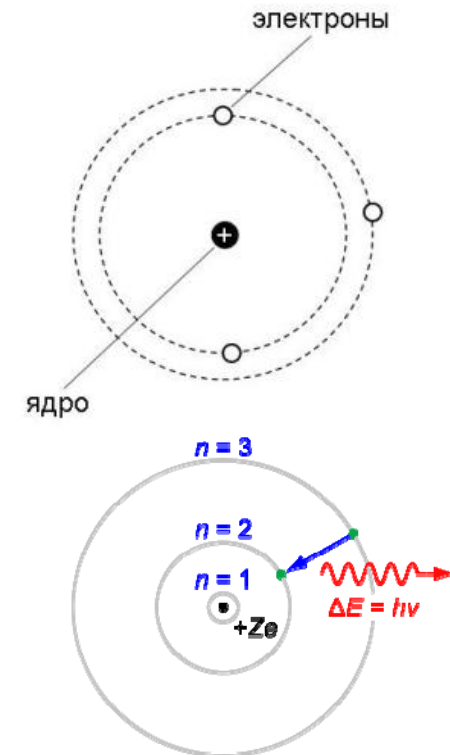
# Лекция 1. Введение в курс

## Квантовая механика



Нильс Бор

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



Стационарные состояния  
и электронные переходы

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

# 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

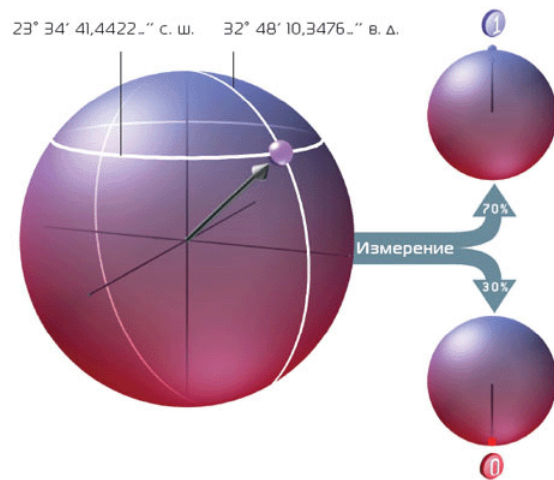
$$\hat{H}(a|\Psi_1\rangle + b|\Psi_2\rangle) = a\hat{H}|\Psi_1\rangle + b\hat{H}|\Psi_2\rangle,$$

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

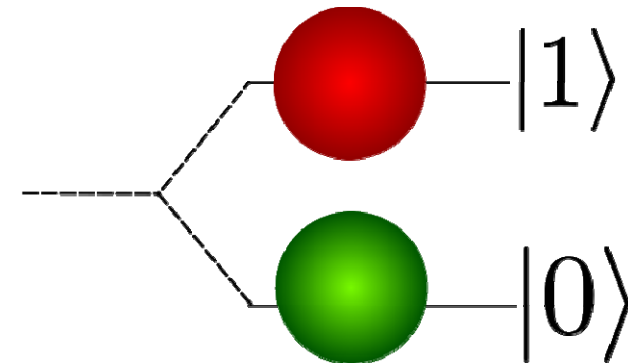
## Биты и кубиты



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

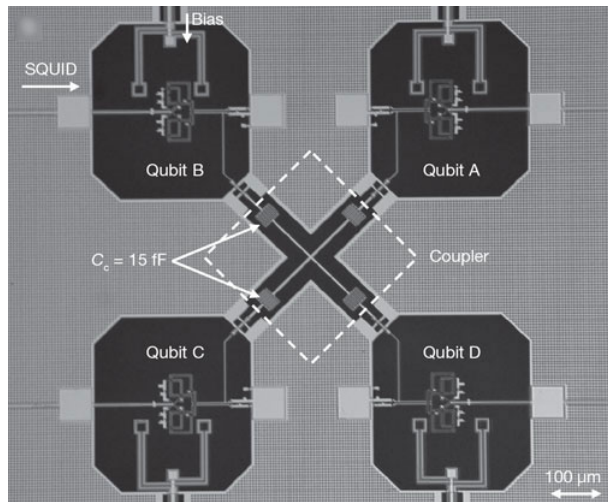
Как и бит, кубит допускает два собственных состояния, обозначаемых  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  (обозначения Дирака), но при этом может находиться и в их суперпозиции, т.е. в состоянии  $A * |0\rangle + B * |1\rangle$  где  $A$  и  $B$  любые комплексные числа, удовлетворяющие условию нормировки  $|A|^2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

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

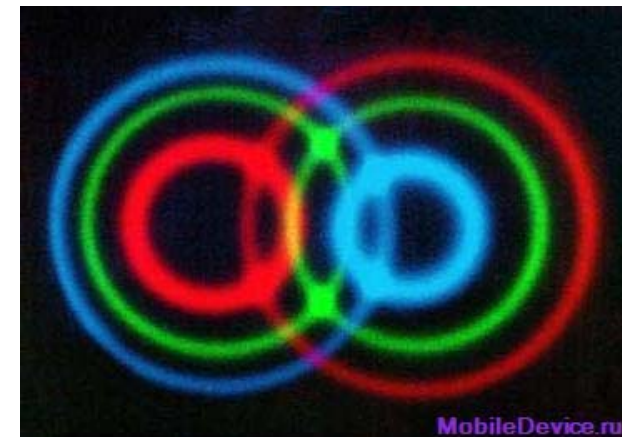
## Биты и кубиты



### *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*

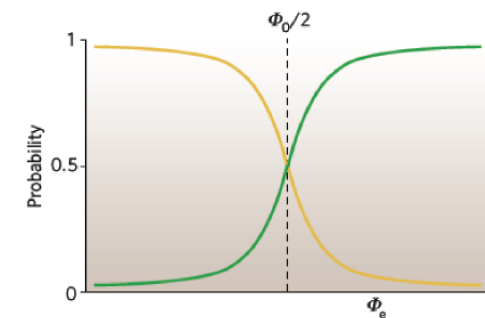
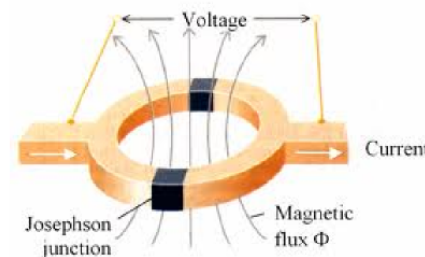
# Лекция 1. Введение в курс

## Реализация



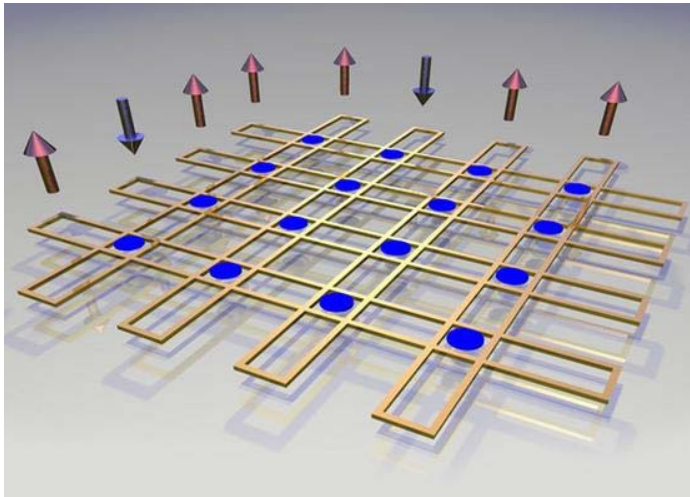
*D-Wave One*

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



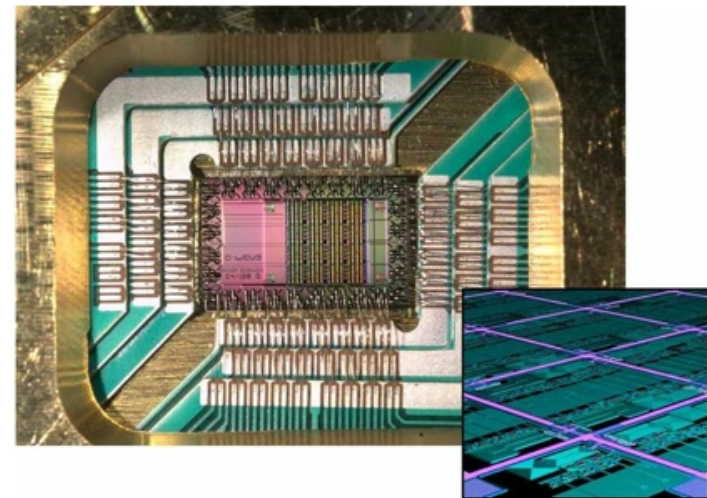
# Лекция 1. Введение в курс

## 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



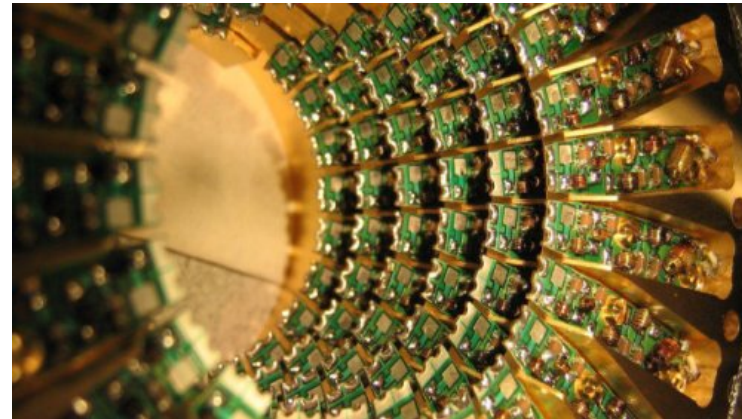
# Лекция 1. Введение в курс

## Реализация

**Выпущенный в 2014 году квантовый компьютер D-Wave Two (DW2), обладающий 512 квантовыми битами**

DW2 имеет приблизительно в 300 тысяч раз большую вычислительную мощность, нежели компьютер DW1. Если связать все 512 [509] джозефсоновских кубита, производительность вырастет на 100 порядков относительно DW1. Сейчас связаны в ячейки по 8 кубитов

При проведении тестов, в которых были задействованы 439 кубит для решения специализированных оптимизационных алгоритмов CPLEX, компьютер DW2 нашел 100 вариантов решений за половину секунды времени, что 3600 раз быстрее, чем необходимо суперкомпьютеру, который тратит на это приблизительно полчаса времени.



Потребляемая мощность 15 кВт  
Занимаемая площадь <10кв.м

## Лекция 2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

- **Краткие сведения из квантовой механики.** Электроны. Волны де Бройля. Соотношение неопределенности. Волновая функция.
- **Спектр электронных состояний атомов и кристаллов.** Частица в потенциальной яме. Спектр электронных состояний атомов. Квантовые числа. Электронные оболочки. Виды химической связи. Понятие о зонной структуре твердых тел. Принцип разделения веществ на проводники (металлы), полупроводники и изоляторы (диэлектрики).
- **Электропроводность твердых тел.** Модель электронного газа. Квантовая модель электропроводности. Трехмерный ящик. Энергия Ферми. Оценка числа состояний. Плотность энергетических состояний.
- **Распределение Ферми. Электроны и дырки.** Количество электронов в зоне проводимости. Собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике. Уровень Ферми в беспримесном полупроводнике.
- **Собственная и примесная проводимость полупроводников.** Полупроводники *n*- и *p*-типа. Положение уровня Ферми в электрически нейтральном полупроводнике. Технологии легирования полупроводников.