

# **Введение в физику нанотехнологий**

Профессор, заведующий кафедрой теоретической физики,  
заведующий лабораторией теоретической и прикладной  
нанотехнологии МГОУ  
доктор технических наук  
Виктор Васильевич БЕЛЯЕВ



**В.В. Беляев**

- МФТИ в 1974 г.
- К.ф.-м.н. 1980.
- Д.т.н. 1996.
- Места работы:
- 2009-н.в. – МГОУ
- 2007-2009 – РНЦ «Курчатовский институт»,  
Руководитель Агентства по биомедицинским  
технологиям и ядерной медицине
- 2005-2007 – Исследовательский центр  
«Самсунг», Начальник лаборатории  
дисплейных технологий, главный инженер.
- 1986-2005 – ЦНИИ «Комета», вед.н.с.
- 1973-1986 – НИИ органических  
полупродуктов и красителей, м.н.с.

- Материаловедение и электроника
- **Научные общества**
  - Дисплейные устройства, системы и технологии
  - Физика и применение жидких кристаллов и полимеров
  - Российское отделение Международного дисплейного общества - Society for Information Display (SID)
  - Исследования рынка дисплеев
  - Обработка изображений
  - Зрительное восприятие
    - почетный директор,
    - первый заместитель председателя.
  - Биомедицинские технологии и ядерная медицина
    - член Комитета по долгосрочному планированию.
  - Жидкокристаллическое общество «Содружество» - член Правления
  - Член Международного Жидкокристаллического общества (ILCS) и Общества оптического приборостроения (SPIE)
  - Организатор мероприятий SID в России, СНГ, США

## □ **Научные интересы**

- Материаловедение и электроника
- Дисплейные устройства, системы и технологии
- Физика и применение жидких кристаллов и полимеров
- Информационные технологии
- Исследования рынка дисплеев
- Обработка изображений
- Зрительное восприятие
- Биомедицинские технологии и ядерная медицина

# Что такое нано?

- Нано – это **маленькое**



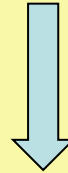
$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm}$$



# Нано – это **большое**?

- Наноразмерные объекты не полностью относятся к микрокосму

- В состав наночастиц входят много атомов, электронов и т.д.



- Количество степеней свободы велико

Размер

**Микро**

Ядра

Атомы

Малые молекулы

**Микро**

Нано-объекты



**Макро**

Жидкости

Кристаллы

Стекла

# Нанонаука – междисциплинарная наука (физика, химия, биология)

- Основа нанонауки – **мезоскопическая** физика
- «**Мезо**» отражает факт, что размер исследуемых систем – между **микроскопическим** (атомы) и **макроскопическим** масштабами.



Мой курс – **краткое введение** в  
основы нанофизики

## Определение нанотехнологий


- Согласно широкому определению

- нанотехнология есть совокупность методов и приемов,
  - обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты,
  - включающие компоненты с размерами менее 100 нм,
  - имеющие принципиально новые качества,
  - позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.


- Согласно узкому определению (Э. Дрекслер)

- нанотехнология есть конструирование вещества методом снизу вверх, с использованием нанороботов.


# НАНОТЕХНОЛОГИЯ



Новая технологическая культура, основанная на **конструировании макроматериалов** путем направленного **манипулирования атомами и молекулами**




Создание рынка **принципиально новой продукции** во всех отраслях экономики




**Изменение** технологического и, как следствие, социально-экономического **уклада общества**



«Запуск будущего»



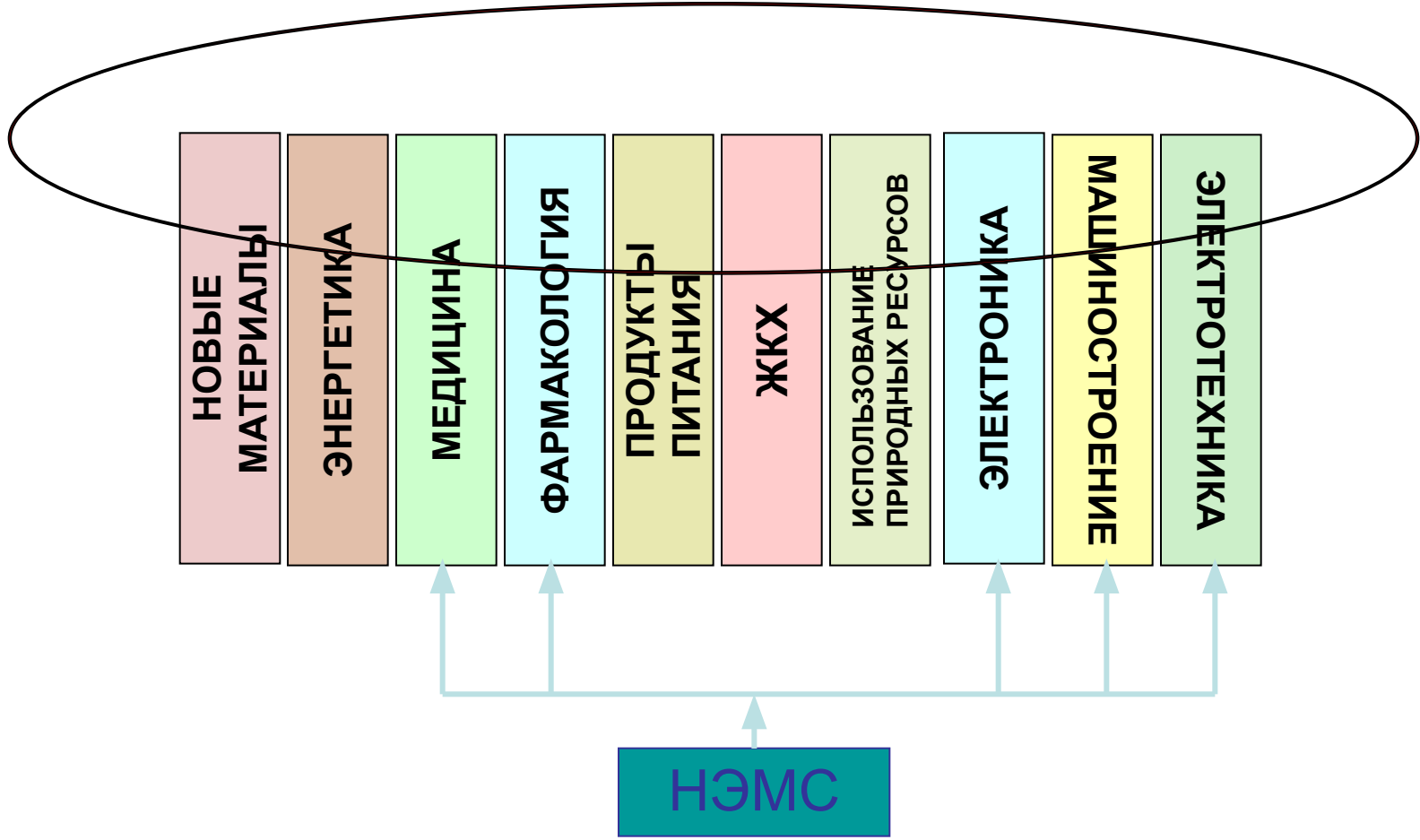
**Соединение** возможностей современных **технологий**, в первую очередь, микроэлектроники, с «**конструкциями**», созданными **живой природой**



Создание **гибридных нанобиоматериалов и систем**

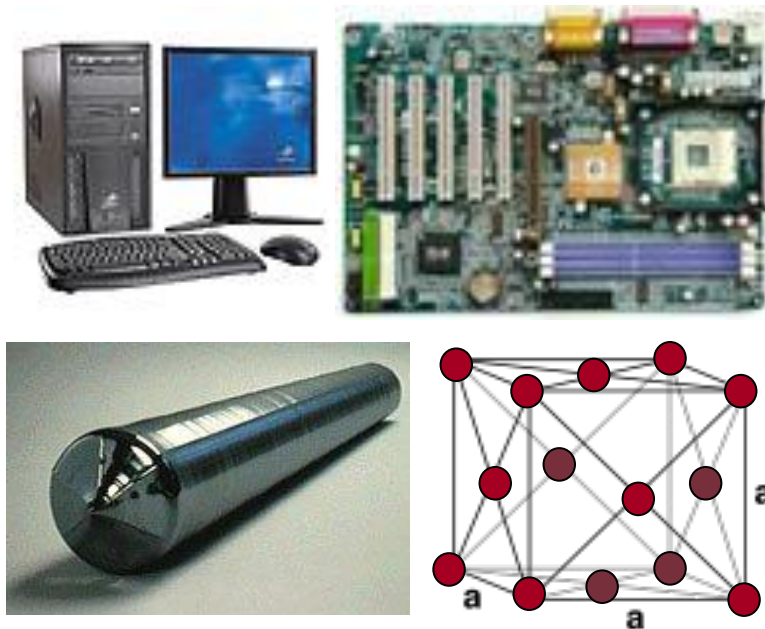


# НАНОТЕХНОЛОГИИ



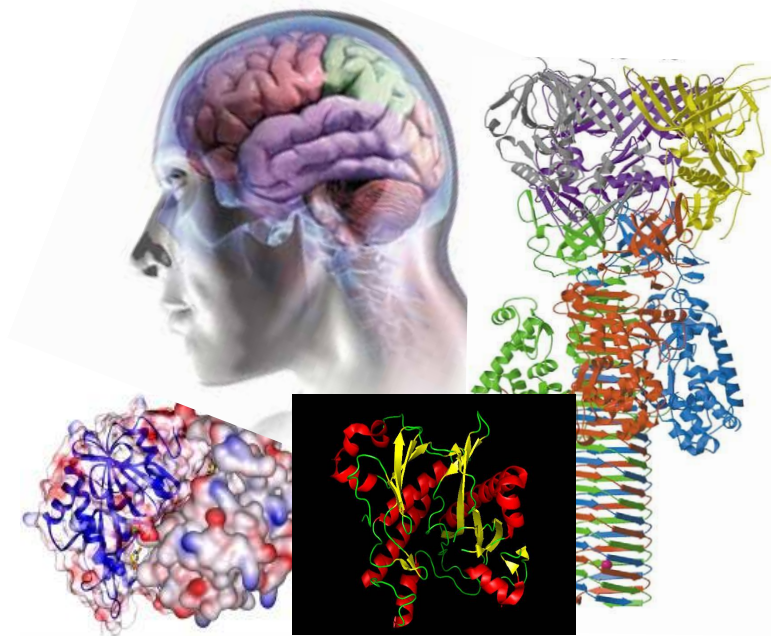
# ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ОБЩЕСТВА – ИЗУЧЕНИЕ «УСТРОЙСТВА» И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА И ИХ КОПИРОВАНИЕ В ВИДЕ МОДЕЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## *Модельный путь*



Главный технологический результат –  
твердотельная микроэлектроника,  
воспроизводимая в любой точке мира.

## *Живая природа*



**Био-робототехнические  
системы**

# **ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОГО ОБЩЕСТВА – ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СИСТЕМ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ**

**соединение технологических возможностей  
современной микроэлектроники с достижениями  
в области познания живой природы  
(нано-биотехнологии)**



**ЦЕЛЬ:  
создание гибридных, антропоморфных технических систем  
бионического типа**



**РЕЗУЛЬТАТ:  
платформы для создания нанобиосенсоров –  
принципиально новых гибридных систем «очувствления»  
бионического типа**



# ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОГО ОБЩЕСТВА – ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СИСТЕМ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ

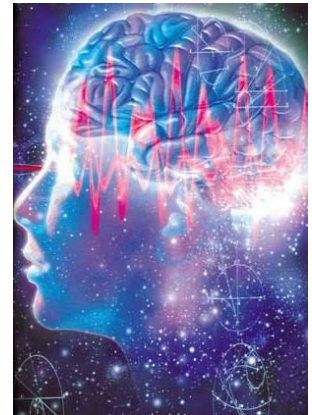
интеграция созданных на **1-ом** этапе  
нано-биосенсорных платформ



**ЦЕЛЬ:**  
создание технологий атомно-молекулярного  
конструирования и самоорганизации на основе атомов и  
биоорганических молекул



**РЕЗУЛЬТАТ:**  
био-робототехнические системы



# Размеры объектов макро-, микро- и наномира



# Масштабирование (размеры)



**Картошка**



Крупная

$m=1$  кг

$\varnothing=10$  см

$$N=V / V_1=6m / \rho\pi\varnothing^3=1 \text{ штука}$$

$$S=N\pi\varnothing^2 \approx 300 \text{ см}^2$$

Отходы (кожура = 1 мм) = 40 г

Мелкая

$m=1$  кг

$\varnothing=3$  см

$$N=V / V_1=6m / \rho\pi\varnothing^3=37 \text{ штук}$$

$$S=N\pi\varnothing^2 \approx 1000 \text{ см}^2$$

Отходы (кожура = 1 мм) = 130 г



## **Наночастицы**

$m=1$  кг

$\varnothing=10$  нм

$$N=V / V_1=6m / \rho\pi\varnothing^3=10^{21} \text{ штук}$$

$$S=N\pi\varnothing^2 \approx 3 \times 10^9 \text{ см}^2 = 0,3 \text{ км}^2$$

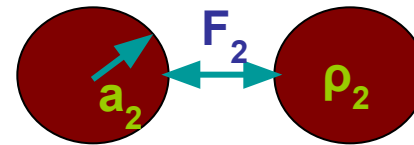
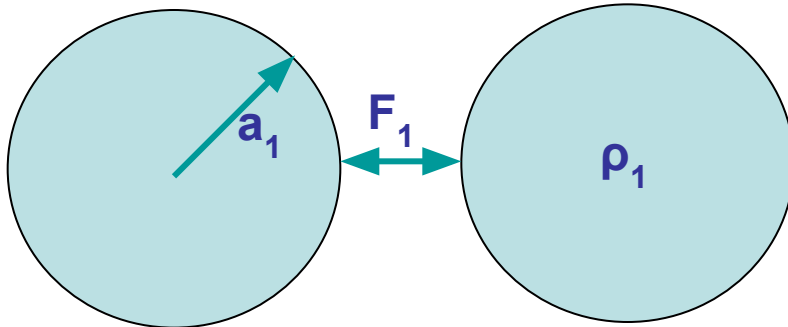
Рост (**Гулливвер**) = 12 Рост (**Лилипут**)

Объем (**Гулливвер**) =  $12 \times 12 \times 12 = 1728$  Объем (**Лилипут**)

# Масштабирование (силы)

Макро

Микро (Нано)



$$F = m a$$

$$\kappa = \frac{F_1}{F_2}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{ds}{dt} \quad \frac{a_1}{a_2} = \frac{\lambda}{\tau^2}$$

$\tau = t_1/t_2$  – отношение временных интервалов (длительности процессов)  
 $\lambda = L_1/L_2$  – отношение длин

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \lambda^3$$

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$\kappa = \frac{\lambda^4}{\tau^2}$$

- Если все размеры уменьшены в 10 раз, то сила, необходимая для динамического процесса, уменьшается в  $10^4$  раз
- Если сила остается той же, то время процесса уменьшается в 100 раз

# Подобие и характеристические числа

Для подобных динамических процессов отношение внешней силы и инерционной силы должно быть равным

Пусть  $t$  – длительность процесса, а  $L$  – типичный размер.  
Безразмерное число  $Ne$  – **число Ньютона**.

$$Ne = \frac{F t^2}{\rho L^4}$$

Безразмерное выражение такого вида называется **характеристическим числом**.

• Под **характеристическим числом** понимается безразмерное выражение, сохраняющее величину двух подобных процессов. В этом случае физические соотношения не зависят от выбранной системы единиц.



# Различие биологических и технических систем

	Биологические системы	Технические системы
Форма	Сферическая, цилиндрическая, яйцеобразная	Цилиндрическая, плоская, планарная, прямоугольная
Углы	Тупые	Прямые
Материалы	Мягкие, с малым модулем Юнга, не-металлические, композитные, анизотропные	Жесткие, с большим модулем Юнга, металлические, изотропные
Функции	Многофункциональные	Специализированные
Плотность	$\rho=1$	$\rho>1$
Температура	Низкий температурный градиент, низкая теплопроводность	Высокий температурный градиент, высокая теплопроводность
Диффузия	Высокие градиенты плотности	Низкая диффузия
Поверхность	Большая, структурированная	Ровная
Форма энергии	Химическая	Электрическая

## Физическая шкала наноразмера

- **Классическая длина** – средний путь свободного пробега электрона  $l_e$
- **Квантовая длина** – де-Бройлевская длина электрона с энергией Ферми

$$\lambda_F = h / \sqrt{2m^* E_F}$$


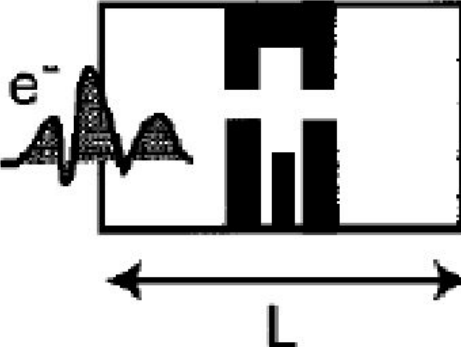
$h$  - Planck constant,  $m^*$  - effective mass,  
 $E_F$  - Fermi energy.

- Шкала относится к **квантованию размера** – квантовые пленки, проволоки, точки...

## Другая важная шкала

- Длина фазовой когерентности –  $l_\phi$
- Шкала определяется кулоновским взаимодействием и зависит от емкости прибора  $C$ 
  - Определяет одно-электронное туннелирование
- Взаимодействие двух шкал приводит к различным явлениям переноса в наносистемах

## Базовая классификация явлений переноса

<p>conventional device:</p> 	<p>mesoscopic device:</p> 
<p><math>L \gg l_e</math>      diffusive</p>	<p><math>L \lesssim l_e</math>      ballistic</p>
<p><math>L \gg l_\phi</math>      incoherent</p>	<p><math>L \lesssim l_\phi</math>      phase coherent</p>
<p><math>L \gg \lambda_F</math>      no size quantization</p>	<p><math>L \lesssim \lambda_F</math>      size quantization</p>
<p><math>e^2/C &lt; k_B \Theta</math>      no single electron charging</p>	<p><math>e^2/C \gtrsim k_B \Theta</math>      single electron charging effects</p>

# Нанотехнологические исследования и разработки в МГОУ

Учебно-научная лаборатория  
теоретической и прикладной  
нанотехнологии  
(УНЛ Нано)

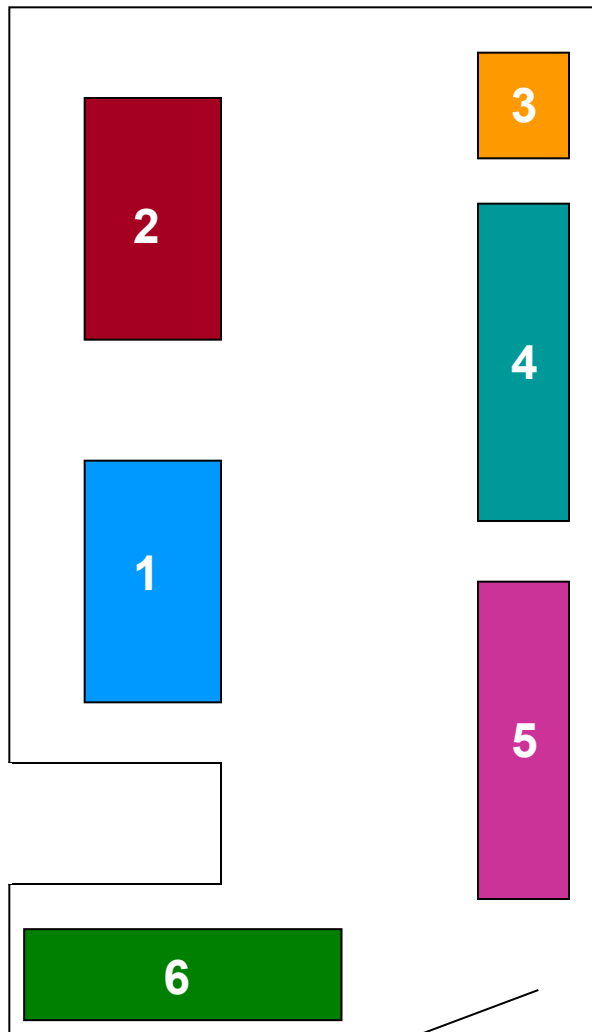
# Планируемые объекты исследований

А) Дисперсные и анизотропные среды –

- дисперсии,
- эмульсии,
- жидкости с характерным размером молекулярной структуры в нанометровом диапазоне, включая
- ✓ молекулярные жидкости,
- ✓ жидкие кристаллы,
- ✓ биологические объекты,
- ✓ феррожидкости,
- ✓ коллоиды и др.

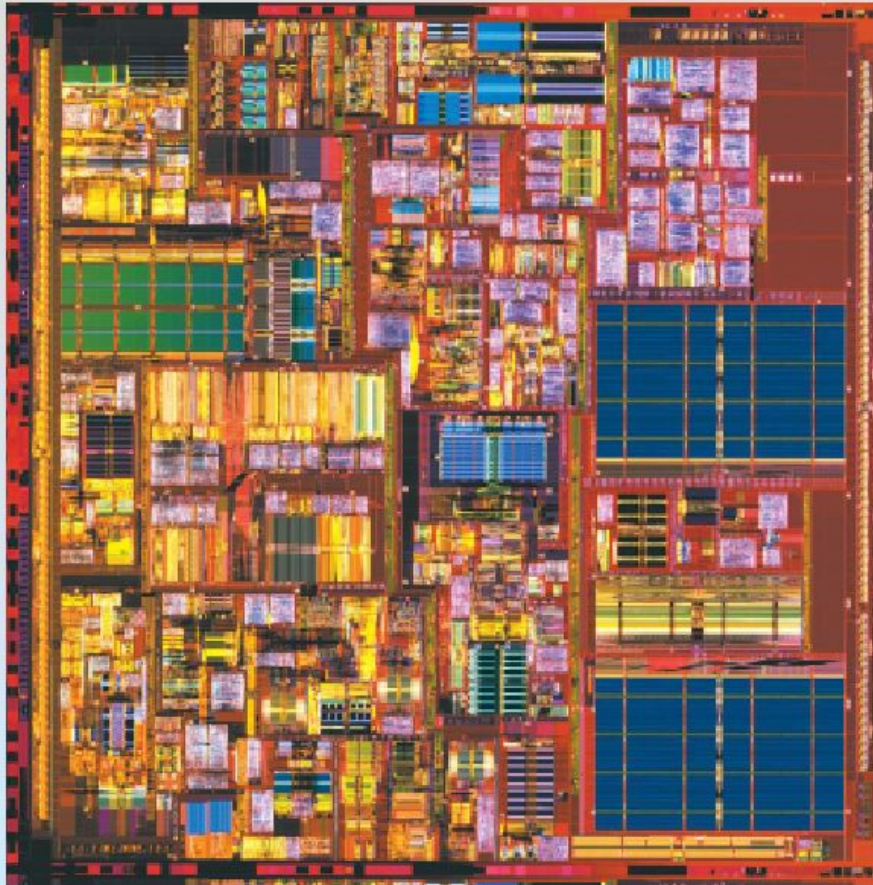
Б) Полимеры и композитные материалы на основе полимеров

# Планируемые установки



- *План к.102 корпуса 2*
- 1. Установка для исследования диэлектрических свойств дисперсных и анизотропных сред при атмосферном и повышенном (до 160 МПа) давлений в широком диапазоне частот
- 2. Установка для исследования акустических свойств дисперсных и анизотропных сред при атмосферном и повышенном (до 160 МПа) давлений в широком диапазоне частот
- 3. Установка для исследования дисперсных и анизотропных сред с помощью микроскопа
- 4. Установка для исследования физико-химических свойств жидкокристаллических веществ и материалов
- 5. Установка для исследования оптических свойств полимеров
- 6. Установка для приготовления образцов

# CMOS TECHNOLOGY



Intel's Norwood (Pentium 4 - 130 nm) processor

Intel's Prescott processor  
(released March 2004):

- 150 million transistors
- 90 nm design rules
- 3.4 GHz clock frequency

DRAM chips:

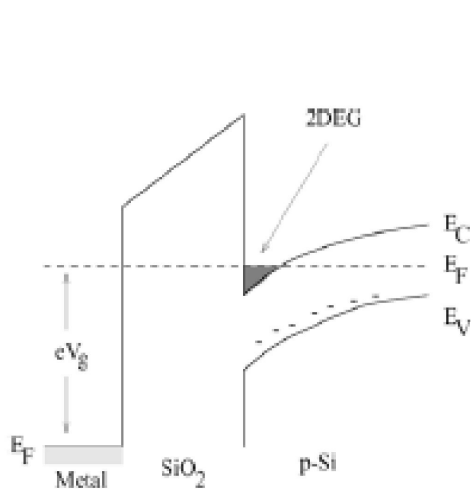
4 Gb chips demonstrated  
( $\sim 10^9$  transistors/cm<sup>2</sup>)

We were inside nanotechnology already in 2004!

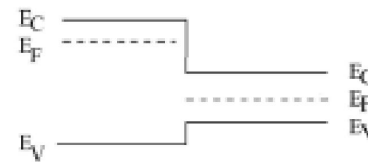
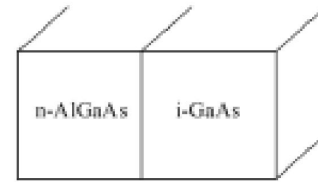


# Двумерный электронный газ (2DEG)

## Two-dimensional Electron Gas (2DEG)



- Структура **металл-окисл-полупроводник** (МОП)
- 2DEG формируется на границе раздела (interface) полупроводник-изолятор



- **Полупроводниковая гетероструктура**

- 2DEG формируется на границе раздела между двумя полупроводниками

- 2DEG – зародыш новой физики

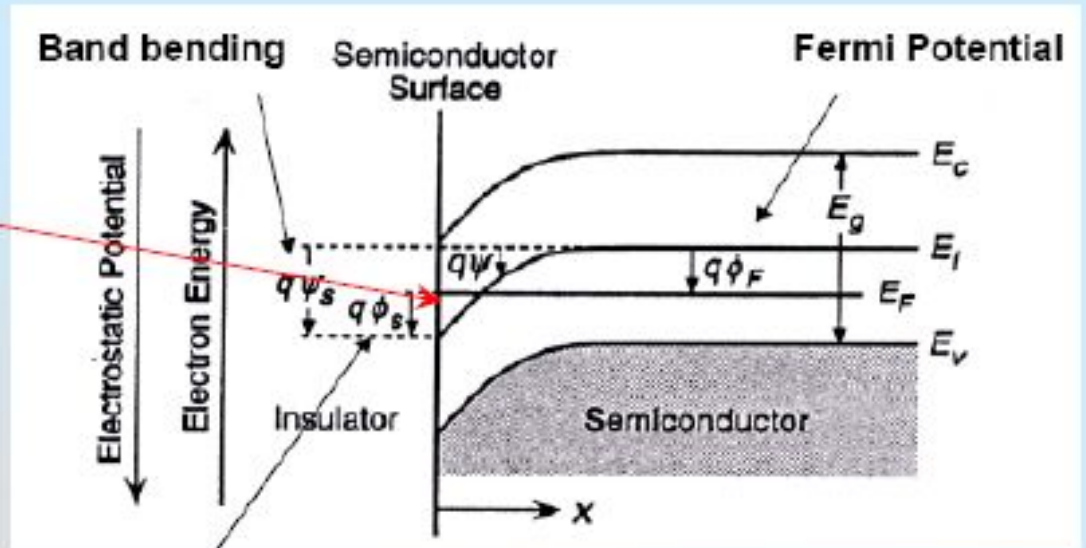


Nobel Prizes 1985, 1998, 2000

- Строительный блок новых электронных приборов

Quantum well

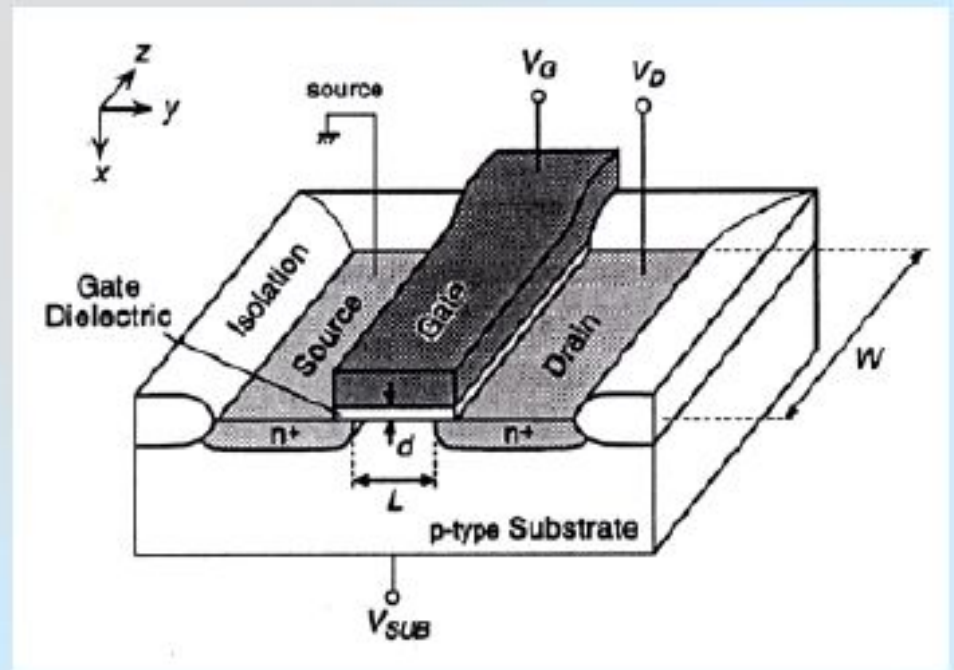
Квантовая яма



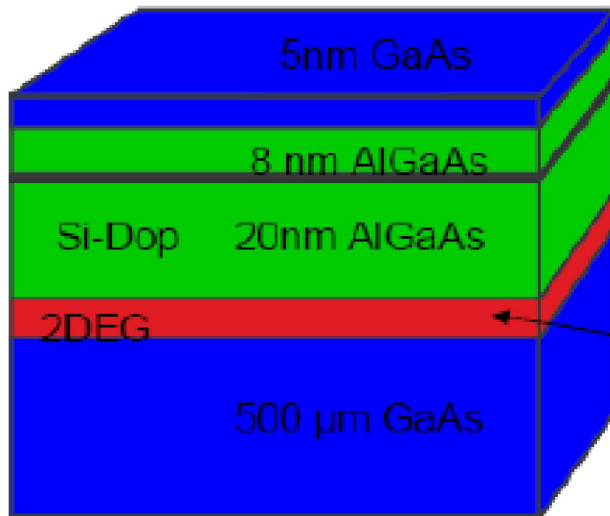
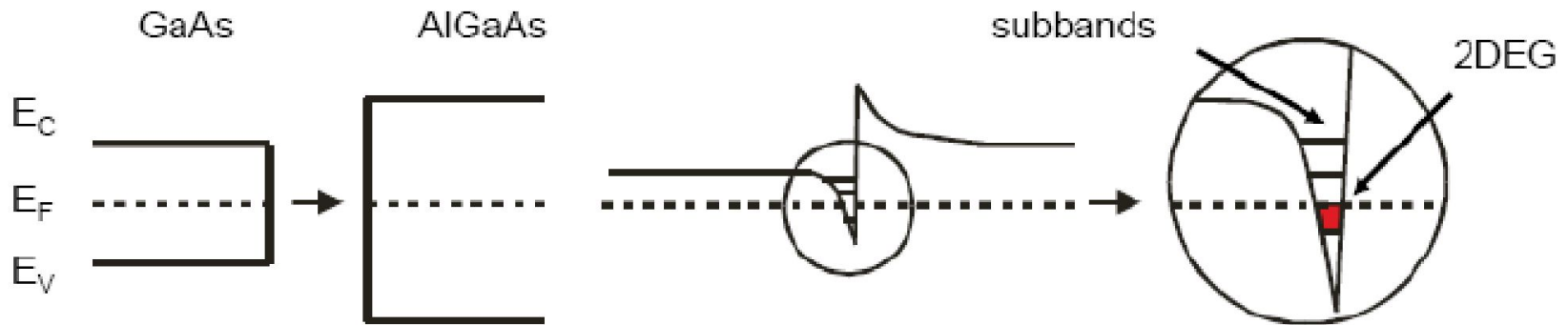
MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor

Полевой МОП-транзистор



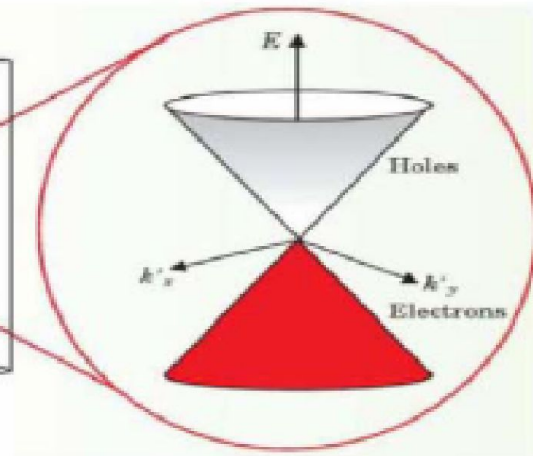
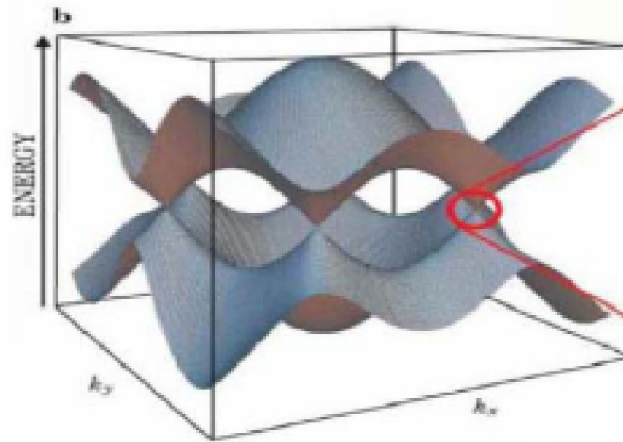
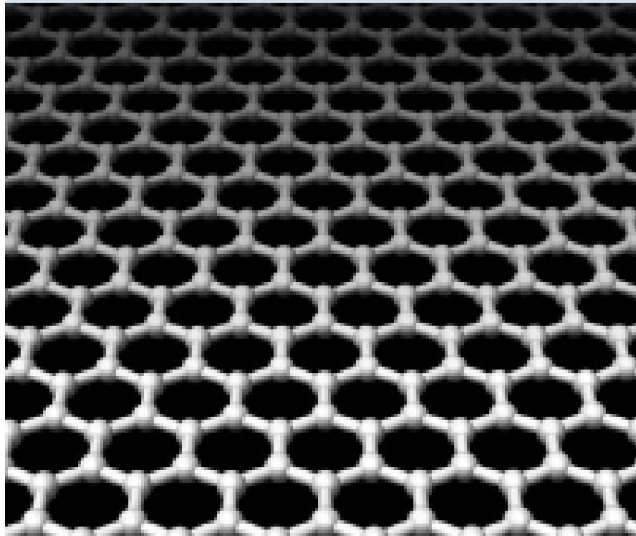
# Полупроводниковые гетероструктуры



- Треугольная яма образуется при непрерывных краях зон → **2DEG**
- 2DEG – металл с очень низкой плотностью электронов
- $n_{2DEG} - 10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$

# Графен

- **Графен** – плоский слой толщиной в один атом из атомов углерода ( $sp^2$ -гибридизация), плотно упакованных в сотовую кристаллическую решетку (решетка для гриля).
- Это **самый прочный** известный материал.
- Название **GRAPHITE + ENE**. Графит состоит из слоев графена, уложенных друг на друга.



# A high-mobility electron gas at the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ heterointerface

A. Ohtomo<sup>1,2,3</sup> & H. Y. Hwang<sup>1,3,4</sup>

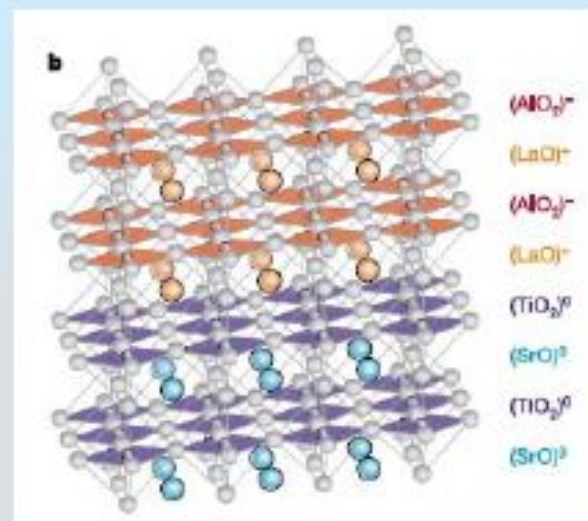
<sup>1</sup>Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill, New Jersey 07974, USA

<sup>2</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, 980-8577, Japan

<sup>3</sup>Japan Science and Technology Agency, Kawaguchi, 332-0012, Japan

<sup>4</sup>Department of Advanced Materials Science, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, 277-8651, Japan

NATURE | VOL 427 | 29 JANUARY 2004 | www.nature.com/nature



## Electric field control of the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ interface ground state

A. D. Caviglia<sup>1</sup>, S. Gariglio<sup>1</sup>, N. Reyren<sup>1</sup>, D. Jaccard<sup>1</sup>, T. Schneider<sup>2</sup>, M. Gabay<sup>3</sup>, S. Thiel<sup>4</sup>, G. Hammerl<sup>4</sup>, J. Mannhart<sup>4</sup> & J.-M. Triscone<sup>1</sup>

