

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**



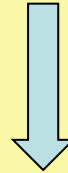
$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm}$$



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»

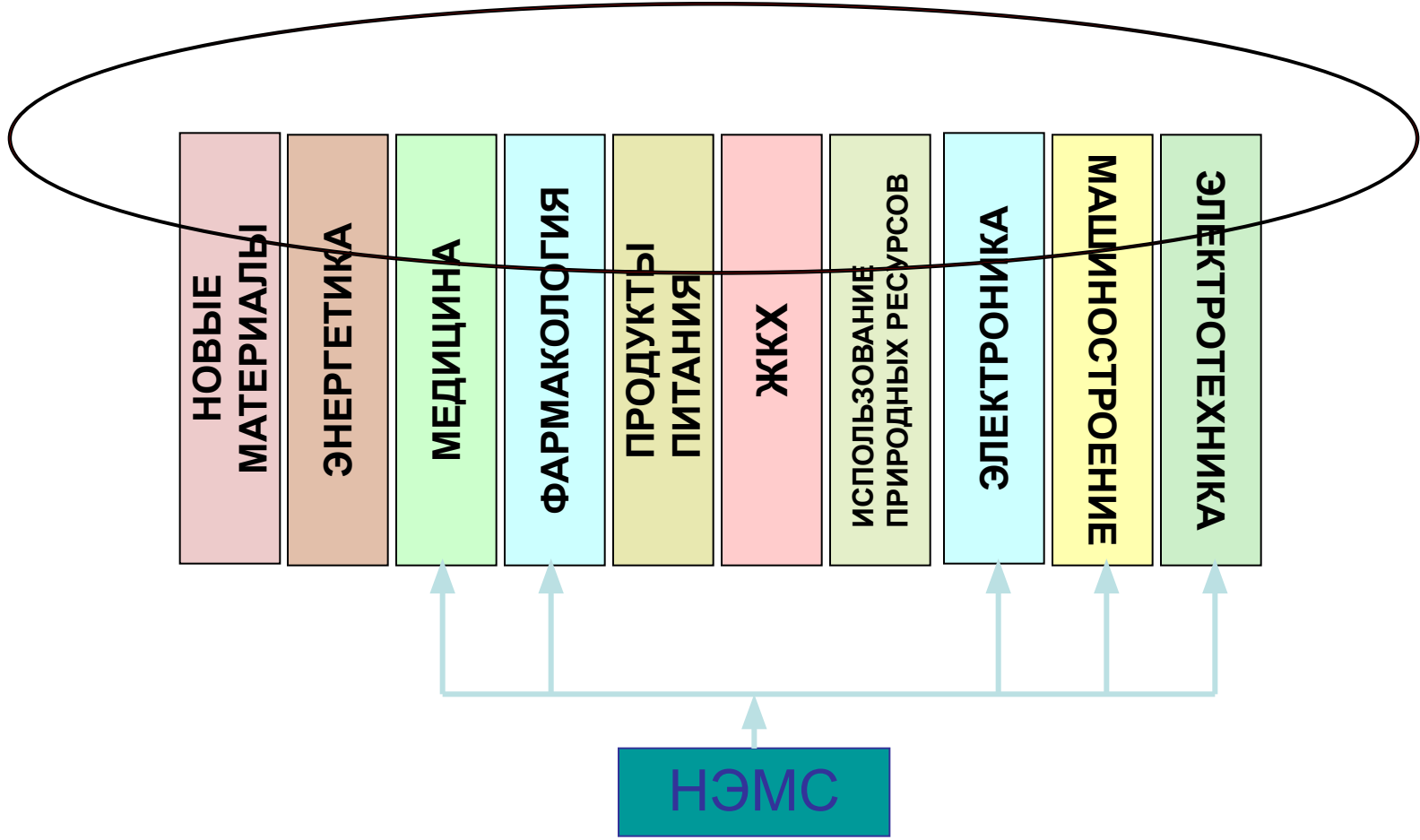


Соединение возможностей современных **технологий**, в первую очередь, микроэлектроники, с «**конструкциями**», созданными **живой природой**



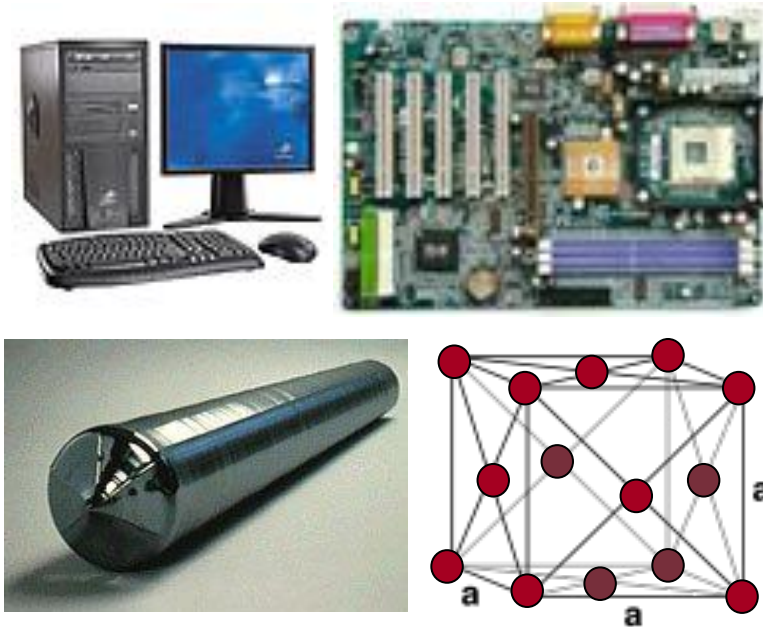
Создание **гибридных нанобиоматериалов и систем**

НАНОТЕХНОЛОГИИ



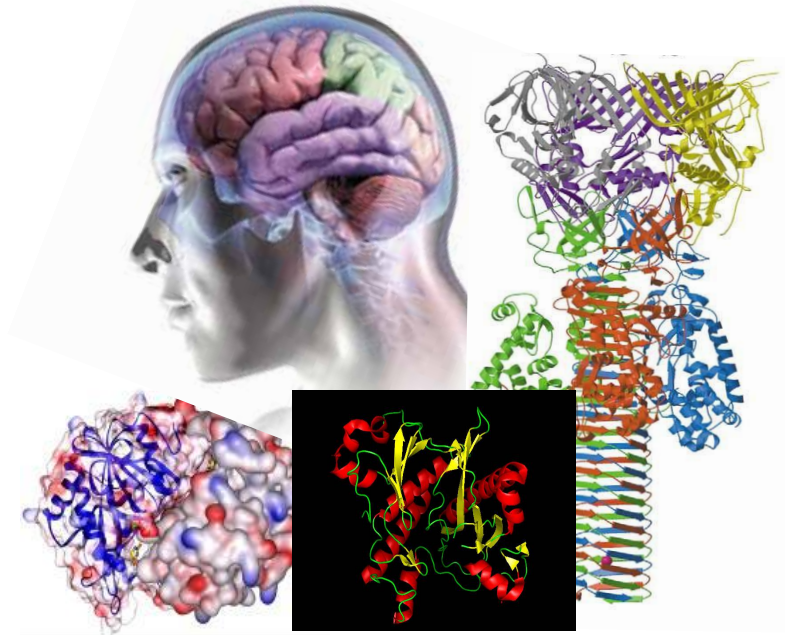
ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ОБЩЕСТВА – ИЗУЧЕНИЕ «УСТРОЙСТВА» И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА И ИХ КОПИРОВАНИЕ В ВИДЕ МОДЕЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

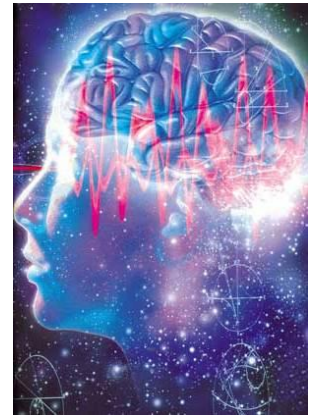
интеграция созданных на **1-ом** этапе
нано-биосенсорных платформ



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

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

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

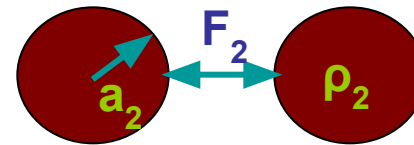
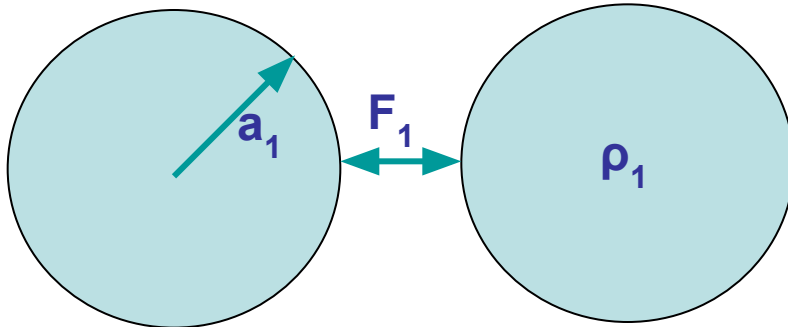
Рост (**Гулливвер**) = 12 Рост (**Лилипут**)

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

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


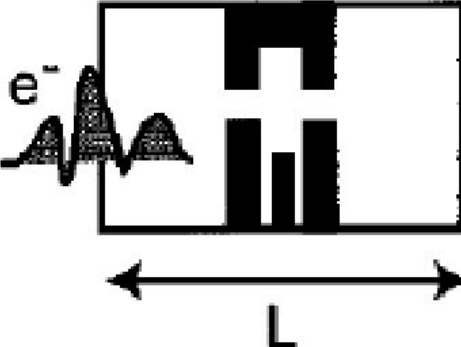
h - Planck constant, m^* - effective mass,
 E_F - Fermi energy.

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

Другая важная шкала

- Длина фазовой когерентности – l_ϕ
- 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>$L \gg l_e$ diffusive</p>	<p>$L \lesssim l_e$ ballistic</p>
<p>$L \gg l_\phi$ incoherent</p>	<p>$L \lesssim l_\phi$ phase coherent</p>
<p>$L \gg \lambda_F$ no size quantization</p>	<p>$L \lesssim \lambda_F$ size quantization</p>
<p>$e^2/C < k_B \Theta$ no single electron charging</p>	<p>$e^2/C \gtrsim k_B \Theta$ single electron charging effects</p>

Нанотехнологические исследования и разработки в МГОУ

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

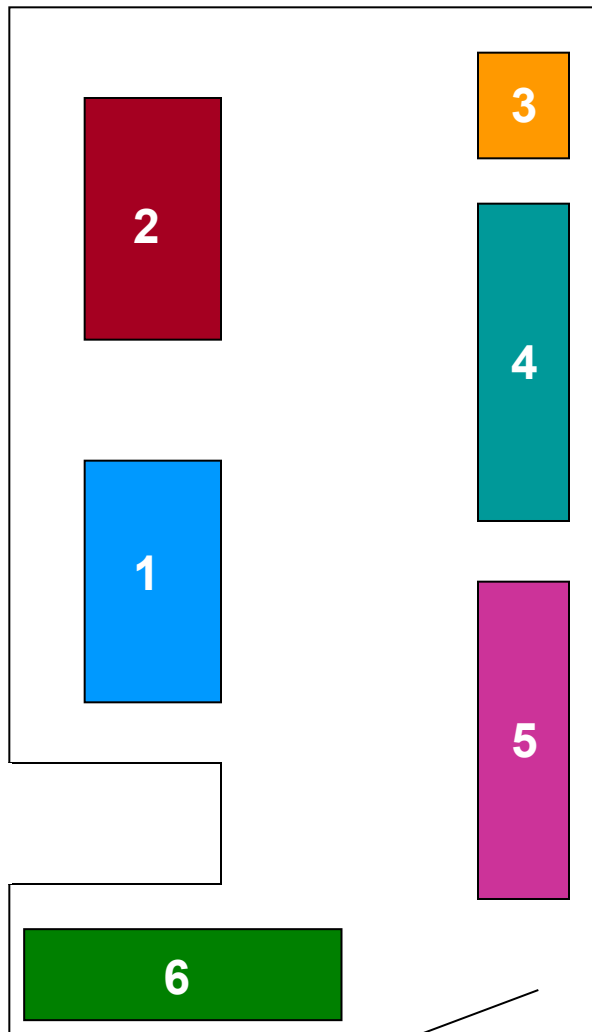
Планируемые объекты исследований

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.

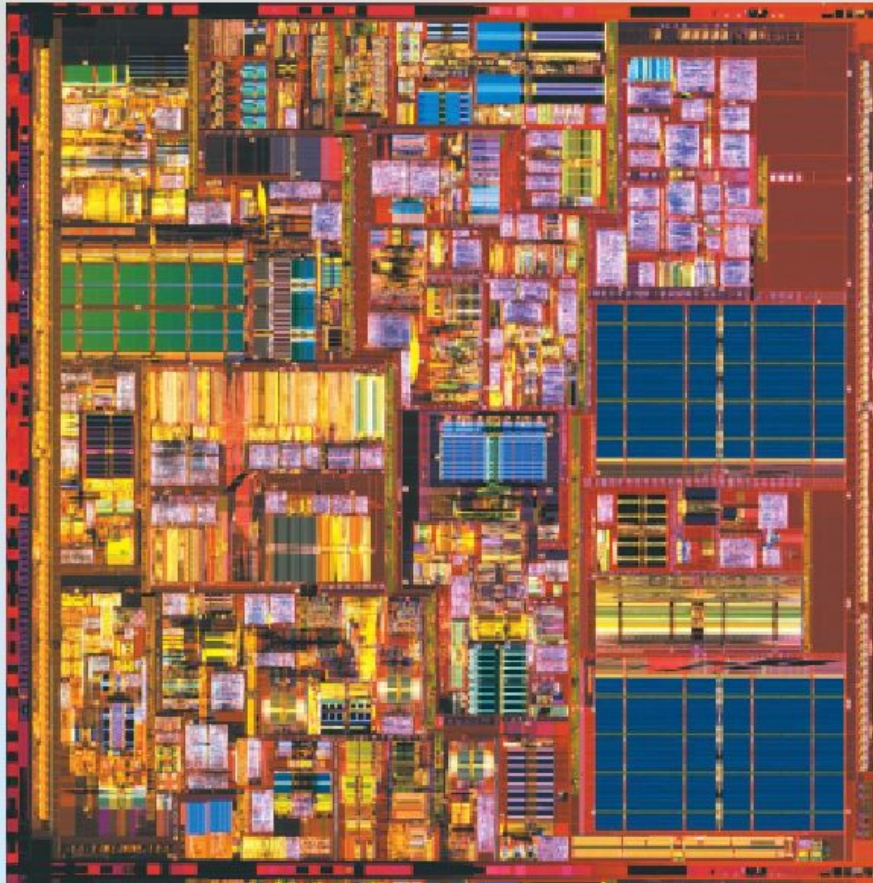
Б) Полимеры и композитные материалы на основе полимеров

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

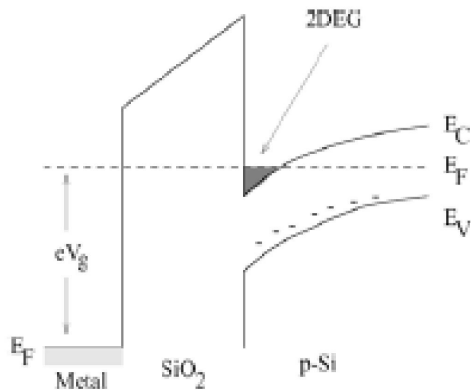
DRAM chips:

4 Gb chips demonstrated
($\sim 10^9$ transistors/cm²)

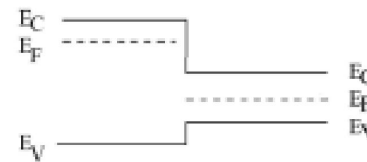
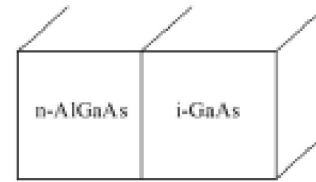
We were inside nanotechnology already in 2004!

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

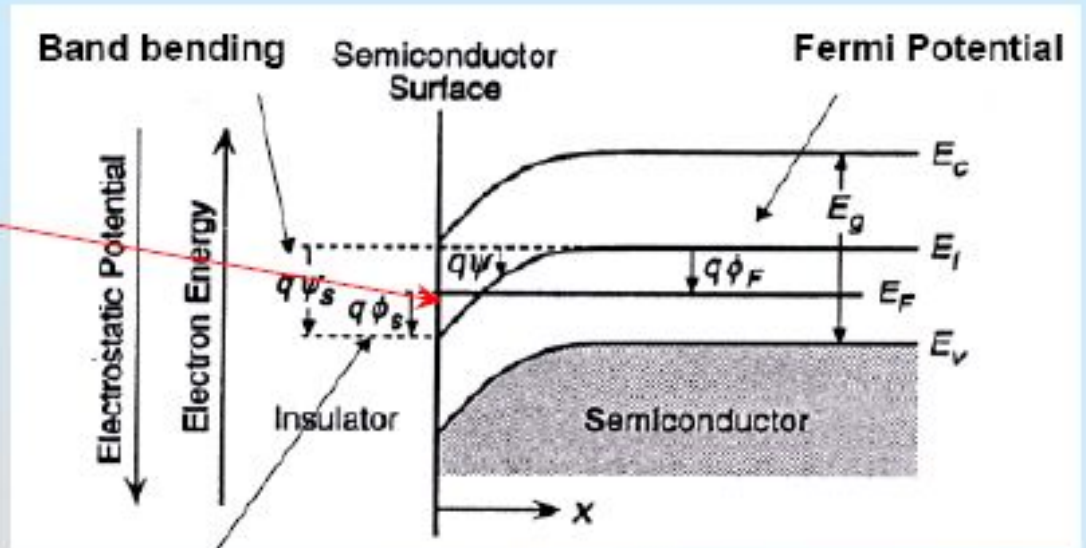


Nobel Prizes 1985, 1998, 2000

- Строительный блок новых электронных приборов

Quantum well

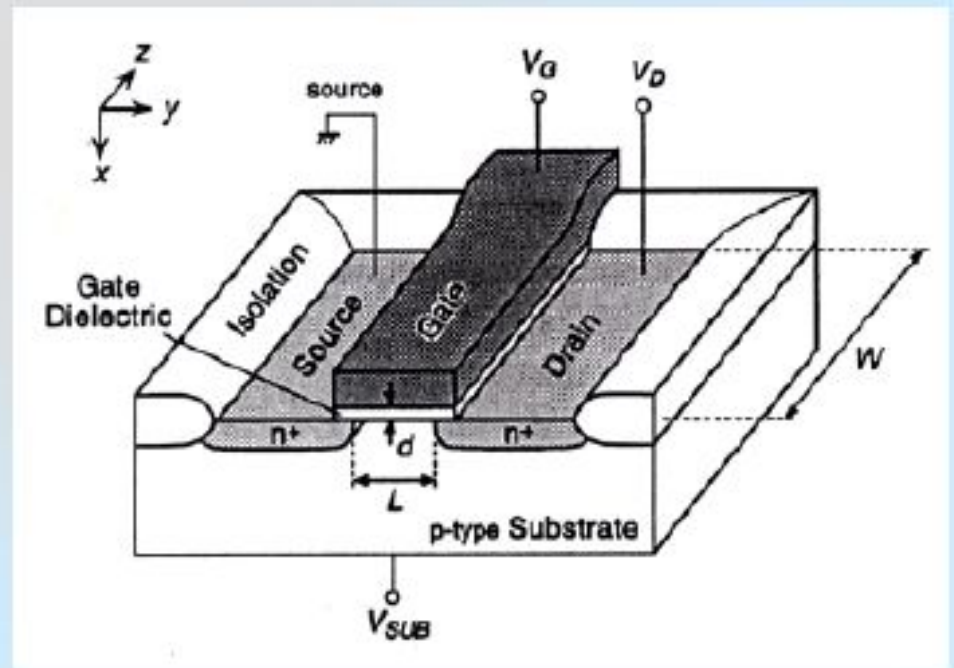
Квантовая яма



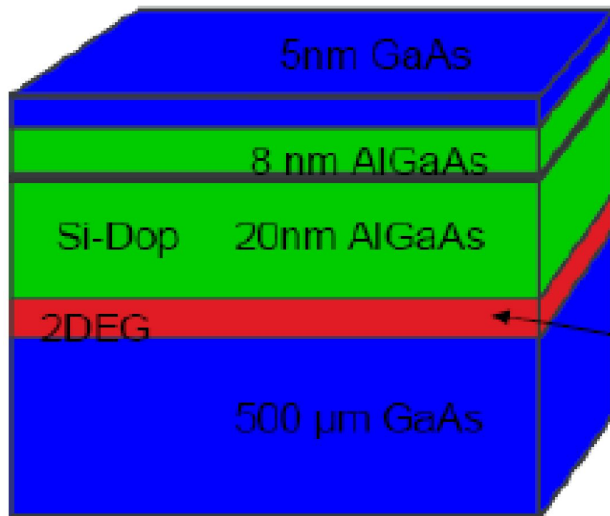
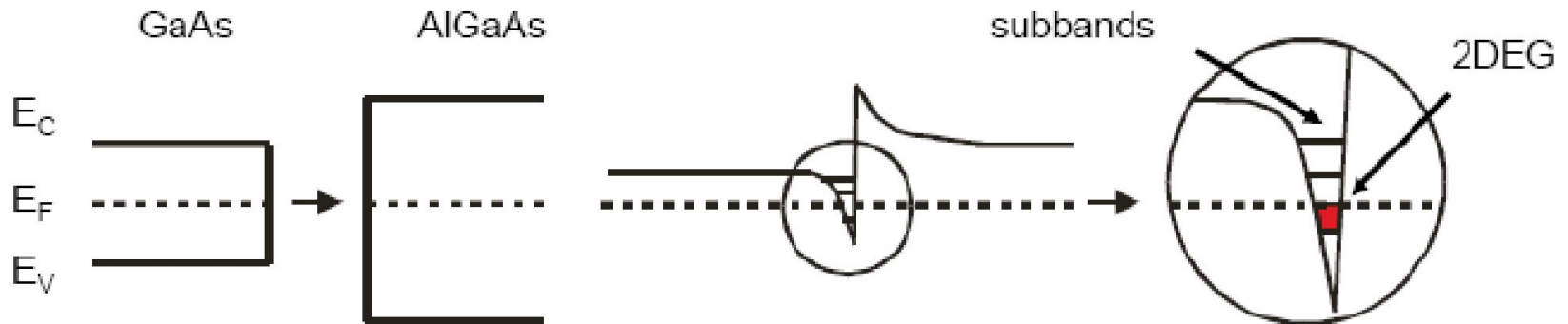
MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor

Полевой МОП-транзистор



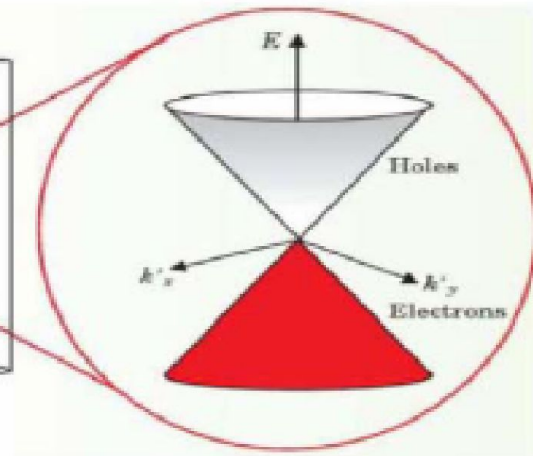
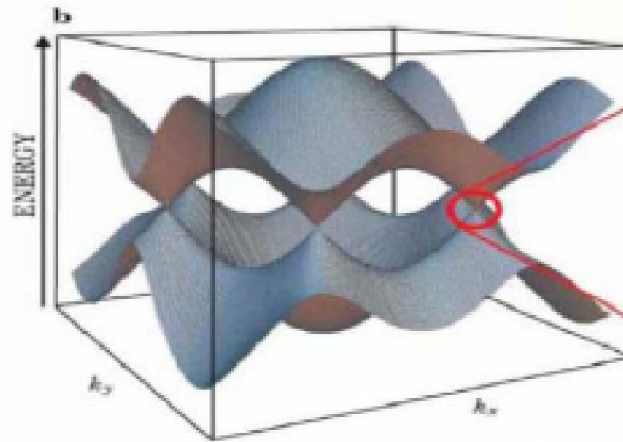
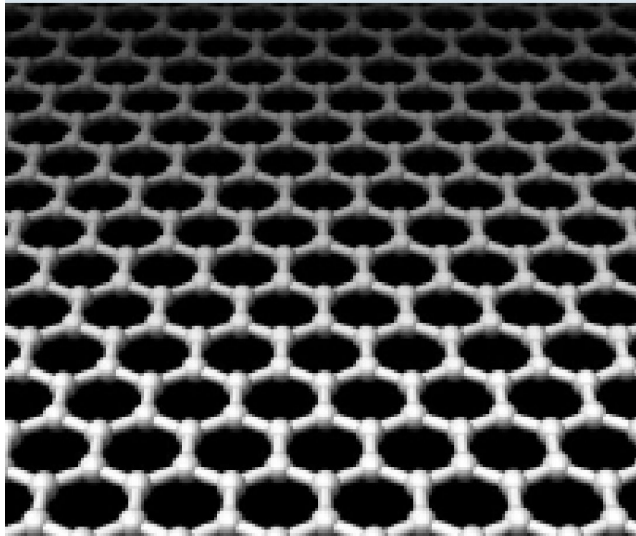
Полупроводниковые гетероструктуры



- Треугольная яма образуется при непрерывных краях зон \rightarrow **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^{1,2,3} & H. Y. Hwang^{1,3,4}

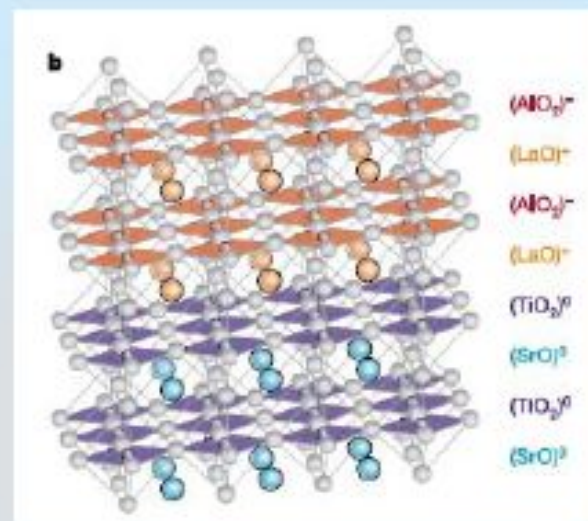
¹Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill, New Jersey 07974, USA

²Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, 980-8577, Japan

³Japan Science and Technology Agency, Kawaguchi, 332-0012, Japan

⁴Department 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. Caviglia¹, S. Gariglio¹, N. Reyren¹, D. Jaccard¹, T. Schneider², M. Gabay³, S. Thiel⁴, G. Hammerl⁴, J. Mannhart⁴ & J.-M. Triscone¹

