

# Элементная база наноэлектроники

## Лекция 1

## Основные термины

*Элементная база* – это система узлов, схем, устройств, блоков, а также способов и методов их соединения и взаимодействия, необходимых для построения соответствующих машин, устройств и других изделий.

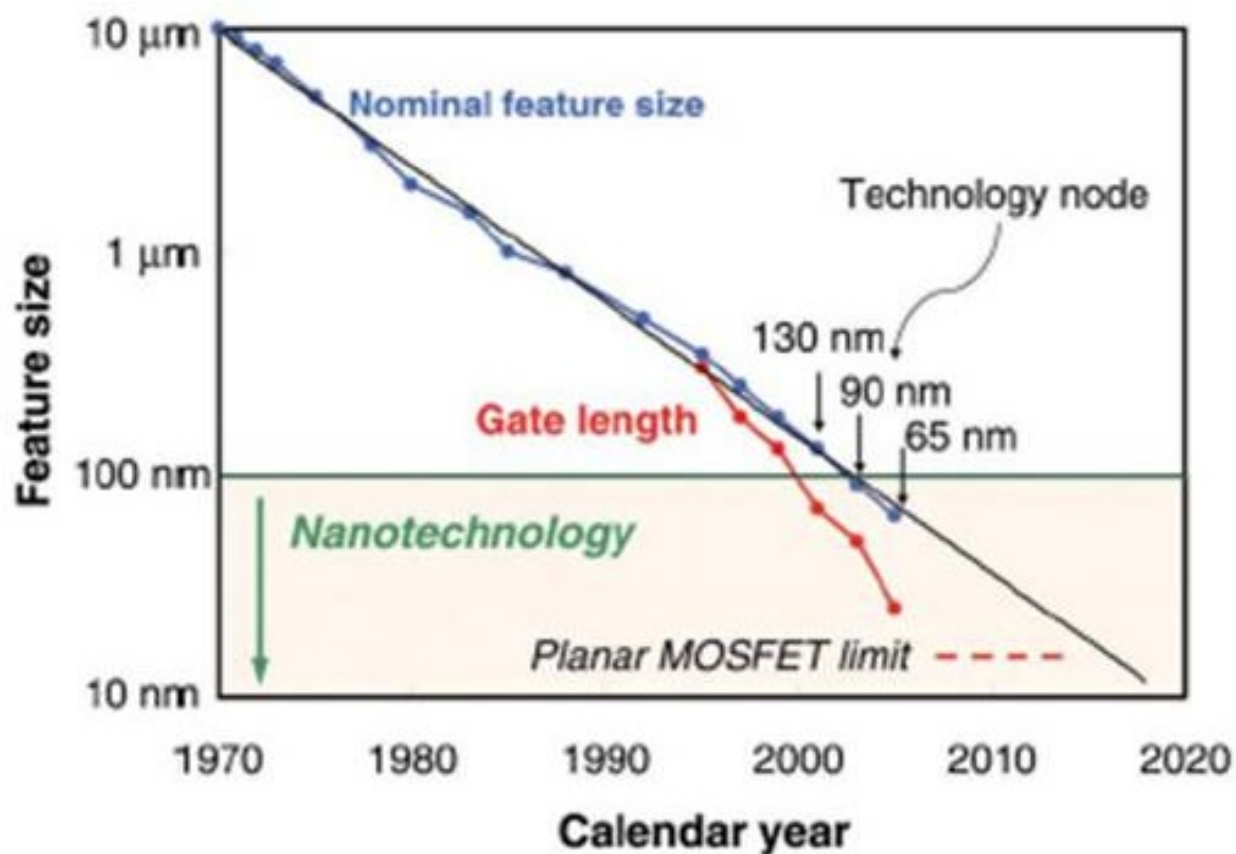
*Нанoeлектроника* – это раздел электроники, занимающийся разработкой физических и конструктивно-технологических основ создания интегральных электронных схем со структурными элементами нанометровых размеров – примерно от 1 до 100 нм.

*нанoeлектронная элементная база* – это система наноразмерных структурных элементов, способов и методов их соединения и взаимодействия, необходимых для построения технических средств. Это также научно-техническая дисциплина, изучающая и описывающая принципы построения нанoeлектронной элементной базы.

## Основные термины

**Нанoeлектроника** — область электроники, изучающая распространение информационного сигнала в веществе носителями, имеющими электронную природу, под воздействием различных полей, и разрабатывающая принципы создания на этой основе приборов с топологическими размерами менее 100 нм.

**2000 г.** —  
преодоление  
размера 100 нм.



## История.

**1908** г. — немецкий физик **Густав Ми (1869-1957)** разрабатывает теорию окрашивания стекла металлическими частицами различной природы и формы - дает полное решение уравнений Максвелла для рассеяния электромагнитных волн на сферических частицах размером от 10 нм. «Вопросы оптики мутных сред, в особенности коллоидных металлических растворов» («рассеяние Ми»)

**1928** г. — открытие **Г. А. Гамовым (1904-1968 гг)** туннельного эффекта, который лежит в основе современных методов исследования наноструктур. Показал, что частицы даже с не очень большой энергией могут с определенной вероятностью проникать через потенциальный барьер (туннельный эффект).

**1931** г. — немецкие физики **Макс Кнолл и Эрнст Руска** (Нобелевская премия 1986 г.) создают **просвечивающий** электронный микроскоп.

**1938** г. — создание **сканирующего** электронного микроскопа.

**1939** г. — компания Siemens, в которой работал **Эрнст Руска**, выпускает первый коммерческий электронный микроскоп с разрешающей способностью 10 нм.

**1956 г. – А.Улир** (A. Uhler), Bell System, открывает нанопористый кремний.

**1959 г. – американский физик Ричард Фейнман.** Выдвинул основные идеи нанотехнологии - возможность манипулирования на атомном уровне, исследование и контроль в нанометровом диапазоне, «Там внизу еще много места» (“There’s plenty of room at the bottom”). Днем рождения нанотехнологий считается **29 декабря 1959 г.**

**1966 г. – американский физик Рассел Янг** (Национальное бюро стандартов), изобретает **пьезодвигатель**. Сканирующие туннельные микроскопы и позиционирование наноинструментов с высокой точностью.

**1968 г. – Альфред Чо и Джон Артур**, сотрудники научного подразделения американской компании Bell, разрабатывают теоретические основы нанотехнологии при **обработке поверхностей с атомарной точностью**.

**1971 г. – Рассел Янг** выдвигает идею прибора Troughrafiner, послужившего прообразом зондового микроскопа. Столь длительные сроки разработки подобных устройств объясняются тем, что наблюдение за атомарными структурами приводит к изменению их состояния, поэтому требовались качественно новые подходы, не разрушающие исследуемое вещество.

## История.

**1974 г.** — японский физик **Норио Танигучи** (Токийский университет) вводит термин «нанотехнология» в отношении конструкционных материалов с наноразмерной структурой.

**1977 г.** — американский студент МІТ **Э.Дрекслер** (г.р.1955) вводит термин «нанотехнология», - гипотетическая сборка объектов из молекулярных цепочек.

**1981 г.** — реализован способ получения малых металлических кластеров.  
**Г. Глейтером** разработана концепция наноматериалов, главная роль в которой была отведена поверхностям раздела, позволяющим существенно изменить свойства твердых тел.

**1982 г.** — в Цюрихском исследовательском центре IBM физики **Герд Бинниг и Генрих Рорер** (Нобелевские лауреаты 1986 г.) создают сканирующий туннельный микроскоп (СТМ).

**1983 г.** — **В.Н.Лаповка и Л.И.Трусова**, нанокристаллический никель, с твердостью в два раза выше твердости поликристаллического образца.

## История.

**1985** г. — американские химики: профессор **Ричард Смэлли, Роберт Керл и Гарольд Крото** (Нобелевские лауреаты 1996 г.) открывают фуллерены — молекулы, состоящие из 60 атомов углерода, расположенных в форме сферы.

**1986** г. — немецкий физик **Герд Бинниг** разработал **сканирующий атомно-силовой** зондовый микроскоп — визуализация и манипулирование атомами любых материалов.

**1986** г. — американский ученый **Ким Эрик Дрекслер**, работавший в лаборатории искусственного интеллекта Массачусетского технологического института, издает книгу «Машины созидания» («Engines of Creation»), где предлагает идею **нано «ассемблера»**, молекулярных роботов, работающих по заданной программе и собирающих что угодно (в том числе и себе подобных) из подручных молекул.

**1987** г. — наблюдают квантовую проводимость на точечных контактах. **Т.А. Фултон и Г.Дж. Долан** создают первый **одноэлектронный транзистор**.

**1987–1988** гг. – В НИИ «Дельта» под руководством **П.Н. Лускиновича** запущена первая **русская нанотехнологическая установка**, осуществлявшая направленный уход частиц с острия зонда микроскопа под влиянием нагрева.

**1989** г. – **Дональд Эйглер**, сотрудник IBM выкладывает логотип атомами ксенона.

**1990** г. – В США **Эли Яблоновичем** создан первый **фотонный кристалл**.

**1991** г. – японский профессор **Сумио Лиджима** (компания NEC), использует фуллерены для создания **углеродных нанотрубок** диаметром 0,8 нм. На их основе в наше время выпускаются материалы в сто раз прочнее стали.

**1991** г. – В США заработана первая **нанотехнологическая программа** Национального научного фонда. В Японии – реализация государственной программы по развитию техники манипулирования атомами и молекулами (проект "Атомная Технология").

**1998** г. – голландский профессор **Сиз Деккер** (Дельфтский технологический университет) создает **транзистор на основе нанотрубок**. Технологии создания нанотрубок длиной 300 нм.



**1999** г. – американские ученые –профессор физики **Марк Рид** (Йельский университет) и профессор химии **Джеймс Тур** (Райсский университет) – разрабатывают единые принципы манипуляции как одной молекулой, так и их цепочкой. 2002 г. **Сиз Деккер** соединил углеродную трубку с ДНК, получив единый **наномеханизм**.

**2000** г. – принятие в США Национальной Нанотехнологической Инициативы

**2000** г. – Япония – создание Комитета по нанотехнологиям

**2003** г. – профессор Фенг Лю из университета Юты, используя наработки Франца Гиссибла, с помощью АСМ строит образы орбит электронов путем анализа их возмущения при движении вокруг ядра.

**2004** г. – **Андрей Гейм** (1958) и **Константин Новосёлов** (1974) (Нобелевские лауреаты 2010г.) **работы по графену. Двумерные кристаллы BN, MoS<sub>2</sub>, NbSe<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub>**

## РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Под «*размерным эффектом*» понимают зависимость физических и химических свойств наноматериала от размера составляющих его структур.

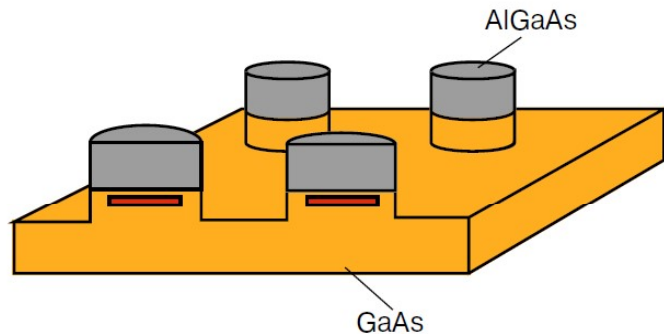
*Размерный эффект* – комплекс явлений, связанных с существенным изменением физико-химических свойств вещества вследствие:

- 1) непосредственного уменьшения размера частиц (зерен, кристаллитов);
- 2) вклада границ раздела в свойства системы;
- 3) соизмеримости размера частиц с физическими параметрами, имеющими размерность длины и определяющими свойства системы (размер магнитных доменов, длина свободного пробега электрона, длина волны де Бройля, размер экситона в полупроводниках и т.д.).

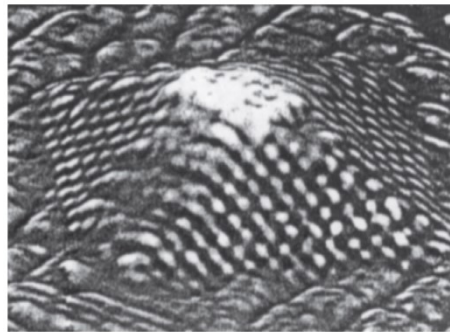
Такие эффекты появляются, когда средний размер кристаллических зерен не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо проявляются при размерах зерен менее 10 нм.

## Наноразмерные состояния

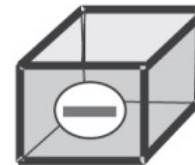
*нульмерное состояние* (0D-состояние) — квантовые точки, наночастицы, образующие самостоятельный композит или распределенные статистически в массивном материале — матрице. (Иначе говоря, объекты, размер которых по всем осям измерения не превышает 100 нм.)



Квантовая точка (искусственный атом) — нульмерный (0D) объект.



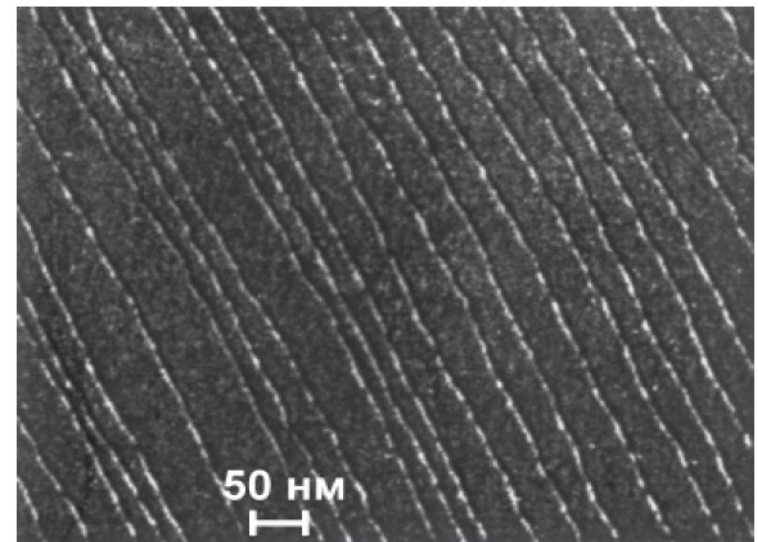
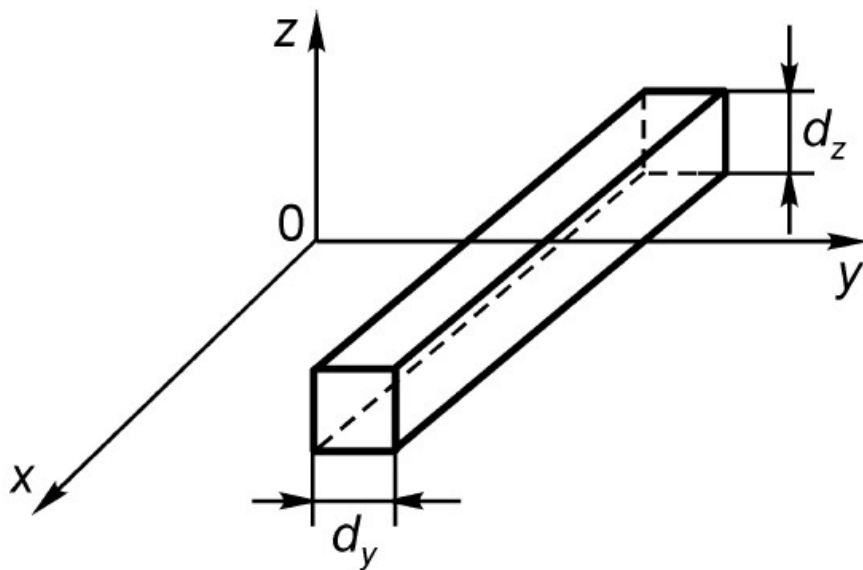
КВАНТОВАЯ  
ТОЧКА  
(0D)



## Наноразмерные состояния

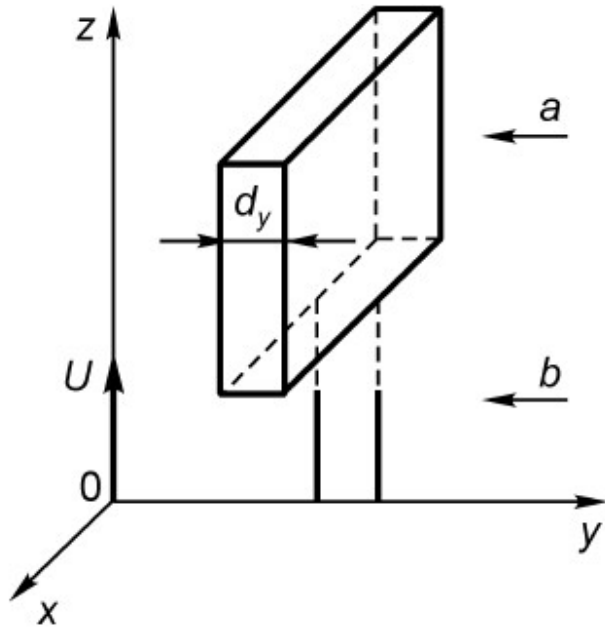
*одномерное состояние (1D-состояние)* – расположенные в линию 0D-нанобъекты (частицы, нити, волокна, трубки наноразмерного диаметра) в объеме массивного материала – матрицы. (Иначе говоря, объекты размер которых по одной из осей измерения превышает 100 нм.)

**Квантовая проволока (нить)** — одномерный (1D) объект, перемещение электронов не ограничено по координате  $X$ . 1D - электронный газ.



## Наноразмерные состояния

*двумерное состояние* (2D-состояние) – тонкие пленки, в которых нанометровый размер реализуется только по толщине; 0D- и 1D-объекты, упорядоченно расположенные в произвольно ориентированных нанослоях массивного материала. (Иначе говоря, объекты размер которых по двум осям измерения превышает 100 нм.)



**Квантовая яма (пленка)** — двухмерный (2D) объект, толщина  $d_y$  соизмерима с длиной волны де Бройля ( $d \sim \lambda_B$ ). Система электронов —двухмерный (2D) электронный газ.

## Наноразмерные состояния

*трехмерное состояние (3D-состояние)* – 0D-, 1D- и 2D- объекты, образующие массивные образцы с трехмерным упорядочением нанослоев. (Иначе говоря, объекты размер которых по трем осям измерения превышает 100 нм, т. е. макрообъект с пространственно упорядоченной наноструктурой). К последней разновидности можно также отнести 3D-структуры, имеющие микро- и макроскопические размеры, но тонкую объемную структуру, состоящую из наноразмерных частиц.

## **Качественные изменения свойств при переходе к наноразмерным элементам**

Общая направленность изменений в свойствах элементов состоит в том, что уменьшается удельный вес макроскопических взаимодействий (например, сводится практически к нулю роль сил тяготения) и вместе с тем возрастает удельный вес атомно-молекулярных взаимодействий (взаимодействий молекул, атомов, электронов и квазичастиц), хаотического теплового движения. Возрастает роль поверхностных явлений и поверхностных электронных состояний

## Качественные изменения свойств при переходе к наноразмерным элементам

*Длина волны де Бройля.*

$$E = eU,$$

$$\lambda_B \approx h / \sqrt{2m^* \cdot E}$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $m^*$ ,  $E$  — эффективная масса и энергия электронов

Для металлов  $\lambda_B \sim 0,1\text{--}1$  нм

Для полупроводников —  $\lambda_B \sim 0,1\text{--}100$  нм ( $E$  и  $m^*$  меньше в 10–100 раз)

Например, для Si, GaAs, Bi:  $\lambda_B = 8; 30; 80$  нм



# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОДАНИЯ И РАЗВИТИЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

1. Открытие углеродных нанотрубок и графена, разработка методов их формирования.
2. Разработка зондовых методов по-атомной сборки.
3. Появление спинтроники. Использование спинов в качестве носителей информации.
4. Создание транзисторов на гетеропереходах.
5. Открытие квантового эффекта кулоновской блокады, создание одноэлектронных устройств, работоспособных при комнатных температурах.
6. Появление молекулярной наноэлектроники.
7. Разработка химических методов получения нанокристаллов и упорядоченных наноструктур.

## Основные задачи современной наноэлектроники

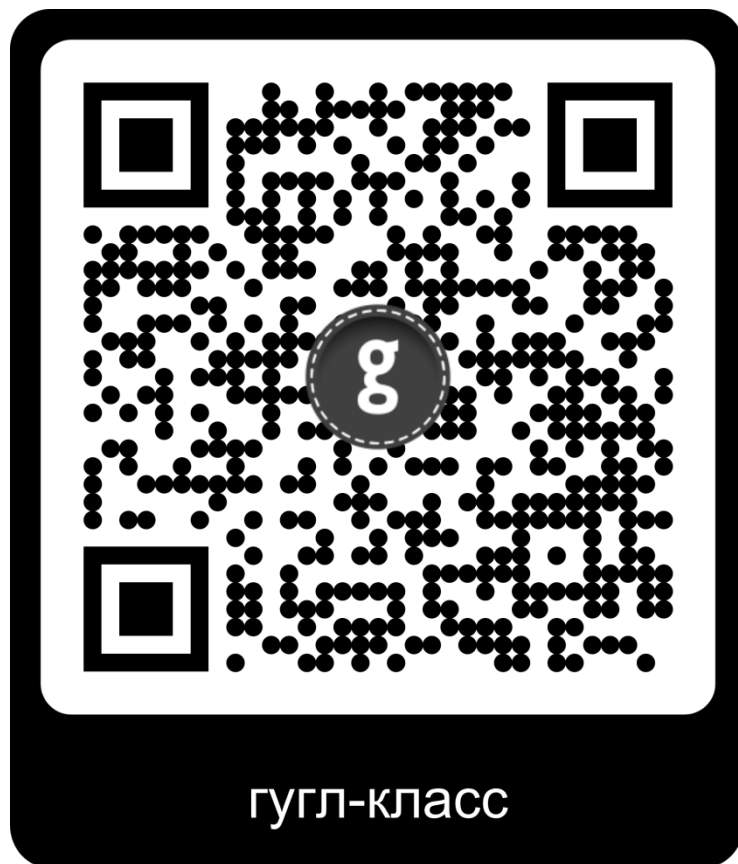
Наноэлектроника — это область электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных схем с характерными топологическими размерами элементов менее 100 нм.

- разработка физических основ работы активных приборов с нанометровыми размерами (в том числе — квантовых);
- разработка физических основ технологических процессов;
- разработка конструкций приборов и технологий их изготовления;
- разработка ИС и других изделий элементной базы с нанометровыми технологическими размерами.



## Элементная база нанoeлектроники

<https://classroom.google.com/c/MjY5NjA4NzYzNTk0?cjc=7hcau4a>



<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfENFNqmqp9h-Isy2a7VK69lwFsU15RmbdPRfzacSzWex3oGQ/viewform?usp=sharing>

