



**НАНОИНЖЕНЕРИЯ**

## **«NBIC технологии»**

**НОЦ «Нанотехнологические системы и наноэлектроника»**

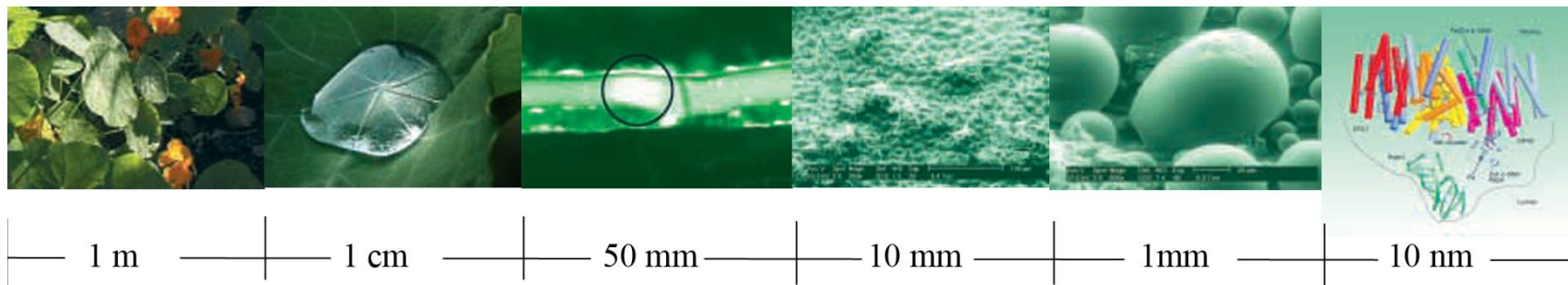
**Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»**

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Термин **Нанотехнология (Nanotechnology)** был введен в 1974 г. Норио Танигучи, который определил его как "технология производства, позволяющая достигать сверхвысокую точность и ультрамалые размеры порядка 1 нм".

Один нанометр (**нм**) – это одна миллиардная часть метра ( $10^{-9}$  м)

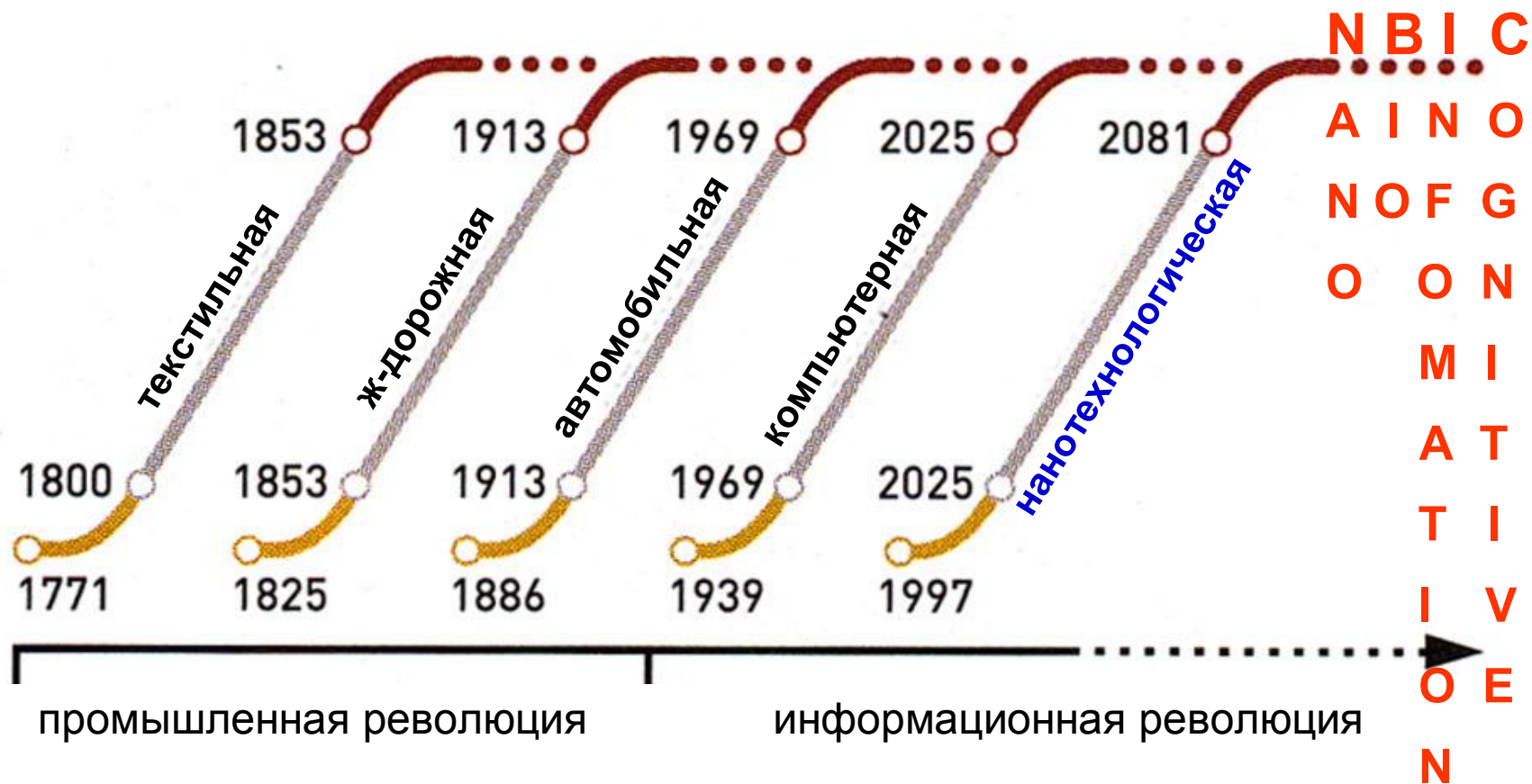
«**НАНО**» происходит от греч. «**НАНОС**» = карлик



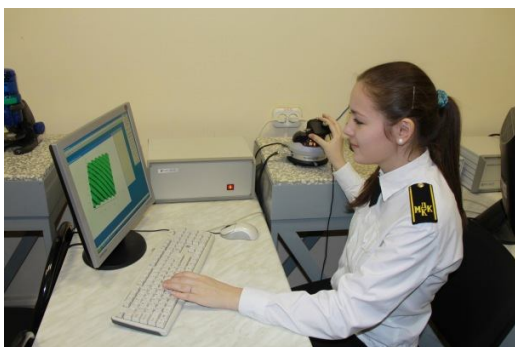
Нанотехнологии "совокупность приёмов и способов получения, обработки или переработки сырья, материалов, характерные размеры, либо точности изготовления которых составляют величины на уровне или ниже 100 нм.

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

НАНОТЕХНОЛОГИИ - ещё одна революция!



## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



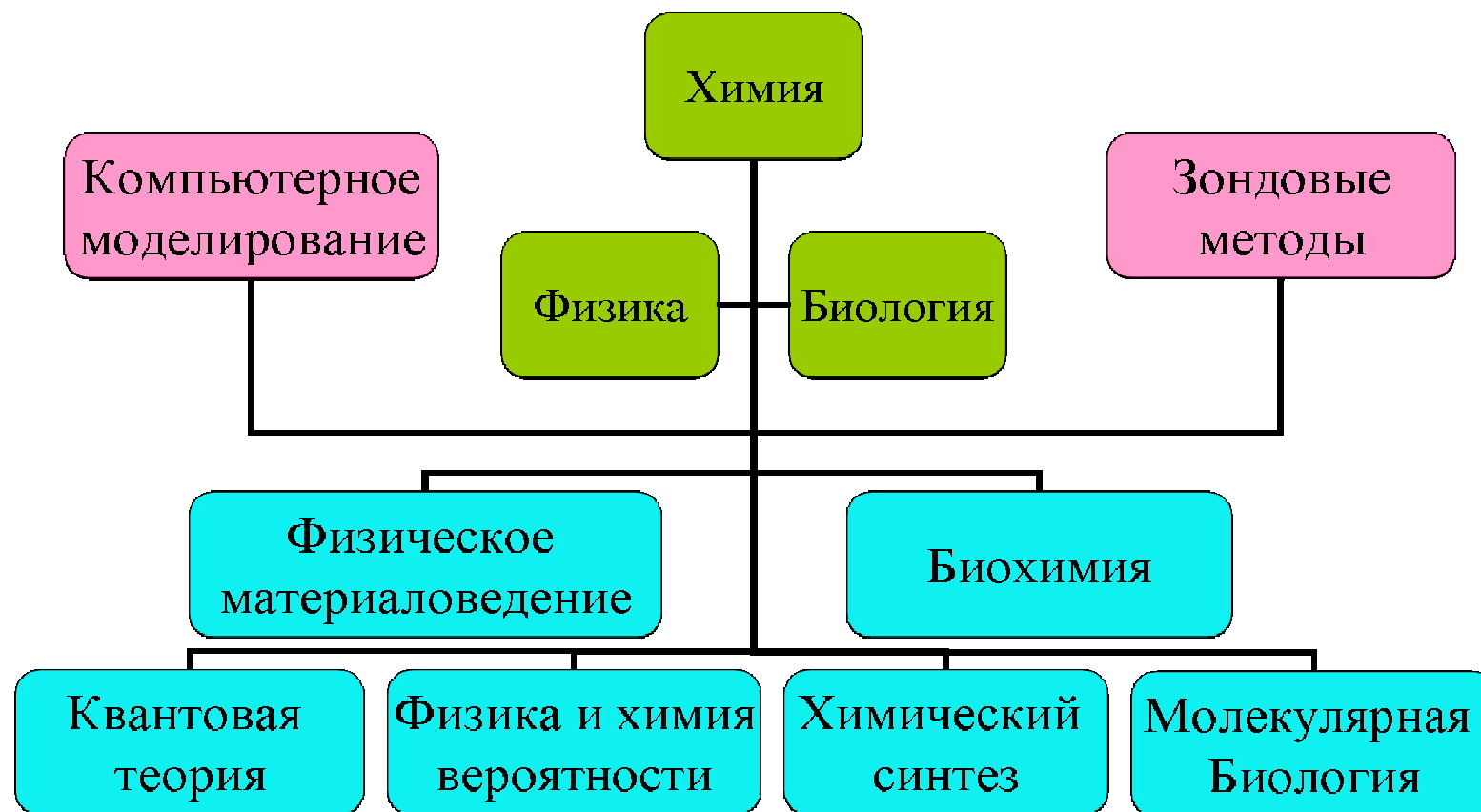
Лаборатория специализируется на проведении исследований микро и наноструктур.

Среди разработок лаборатории:

1. Углеродные материалы: графен, углеродные нанотрубки (УНТ).
2. Электрохромные покрытия оптических систем
3. Дефектоскопия CD/DVD дисков,
4. Фильтры Фабри Перо высокой разрешающей способности,
5. Разработка нейросетевых методов распознавания изображений при дефектоскопии проводящих микро- и наноструктур,
6. Разработка активных виброзащитных систем от низкочастотной вибрации нанотехнологических измерительных комплексов и т.п.

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Изучение наноструктур и наноматериалов, как направление нанотехнологических и нанонаучных изысканий, базируется на нескольких фундаментальных и прикладных науках, а также на исследовательских методиках.

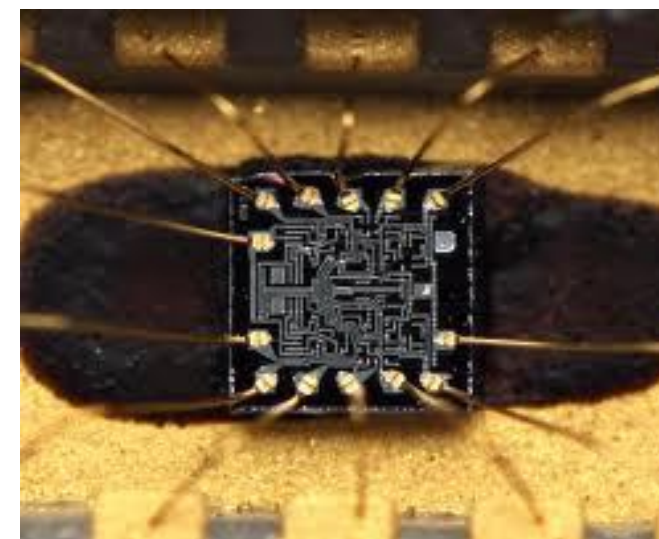
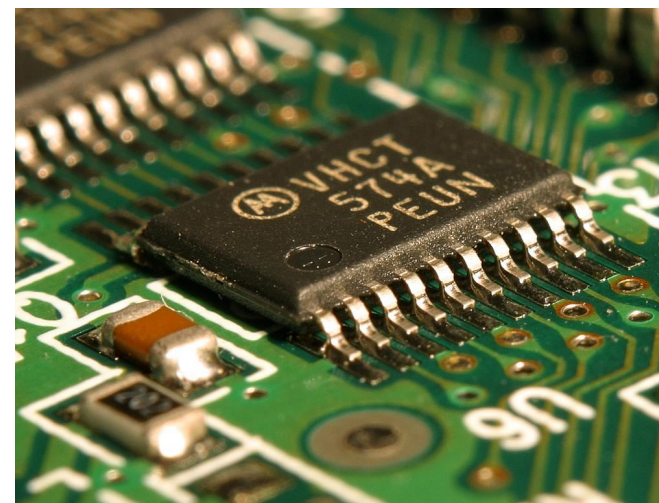


## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

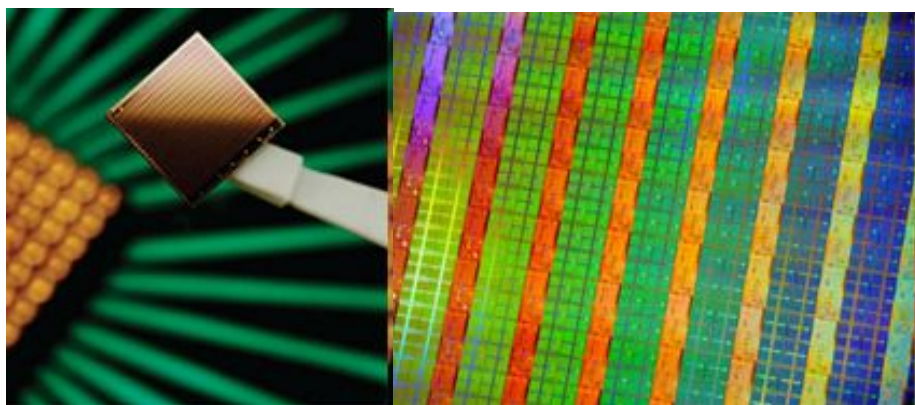
Кристалл микроэлектронике — размещённая на полупроводниковой пластине или плёнке электронная схема произвольной сложности.

В процессе сборки упаковывается в корпус и в результате образует готовое изделие — микросхему.

Интегральная (микро)схема — микроэлектронное устройство — электронная схема произвольной сложности (кристалл), изготовленная на полупроводниковой подложке (пластине или плёнке) и помещённая в неразборный корпус, или без такового, в случае вхождения в состав микросборки



## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

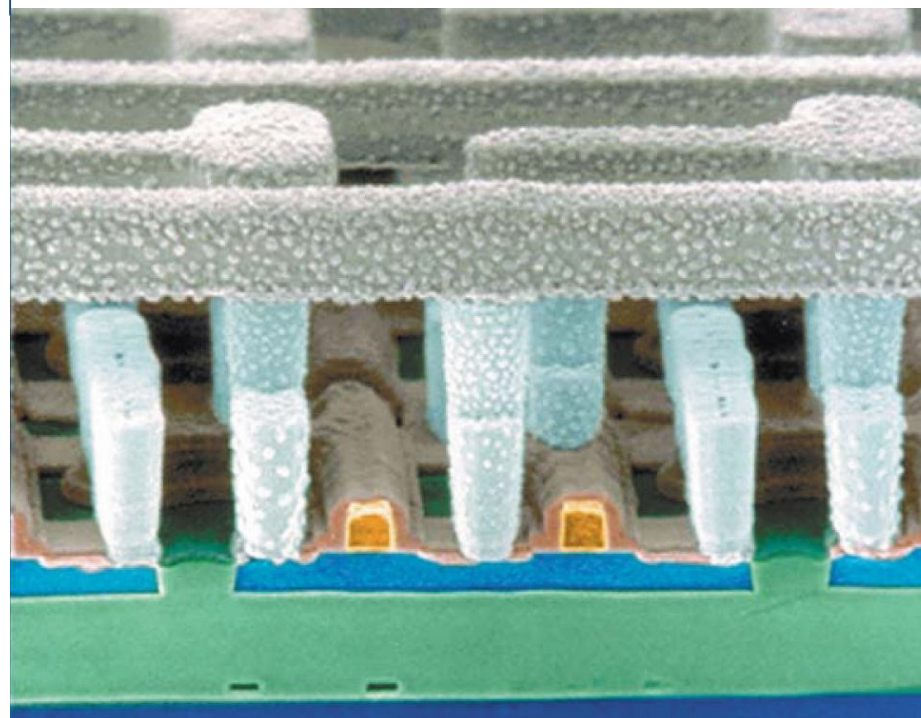


Тенденций развития ИС - миниатюризация функциональных устройств.

**ZEC12** микропроцессор сделанный IBM, 28 августа 2012 года, состоит из 2750 миллионов транзисторов, изготовленных по технологии 32-нм КМОП-кремний на изоляторе, поддержка скоростей от 5,5 ГГц, IBM заявила, что это самый быстрый микропроцессор в мире.

Технологии позволяют изготовить микросхемы, в которых характеристическая величина, равная половине расстояния между каждым элементом памяти составляет  $2^2$  нм

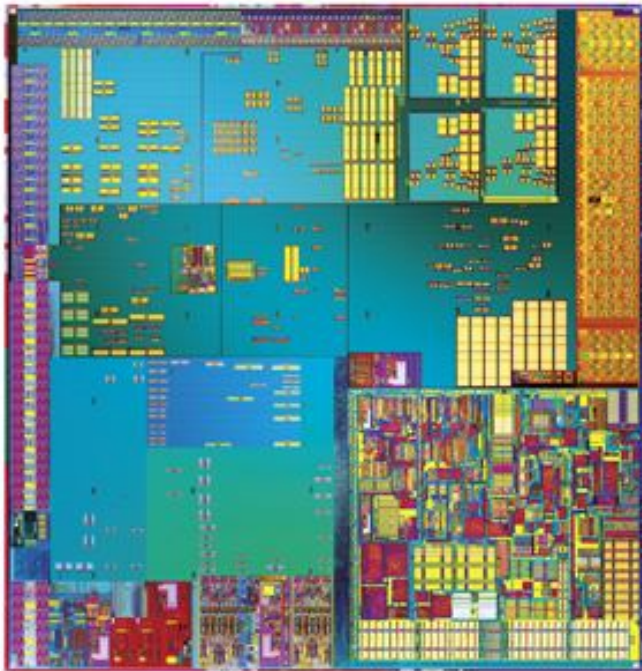
4 мкм



## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Встраиваемая система — специализированная микропроцессорная система управления, концепция разработки которой заключается в том, что такая система будет работать, будучи встроенной непосредственно в устройство, которым она управляет.

Устройство строится на базе встроенного компьютера, который в то же время не воспринимается пользователем устройства как компьютер.

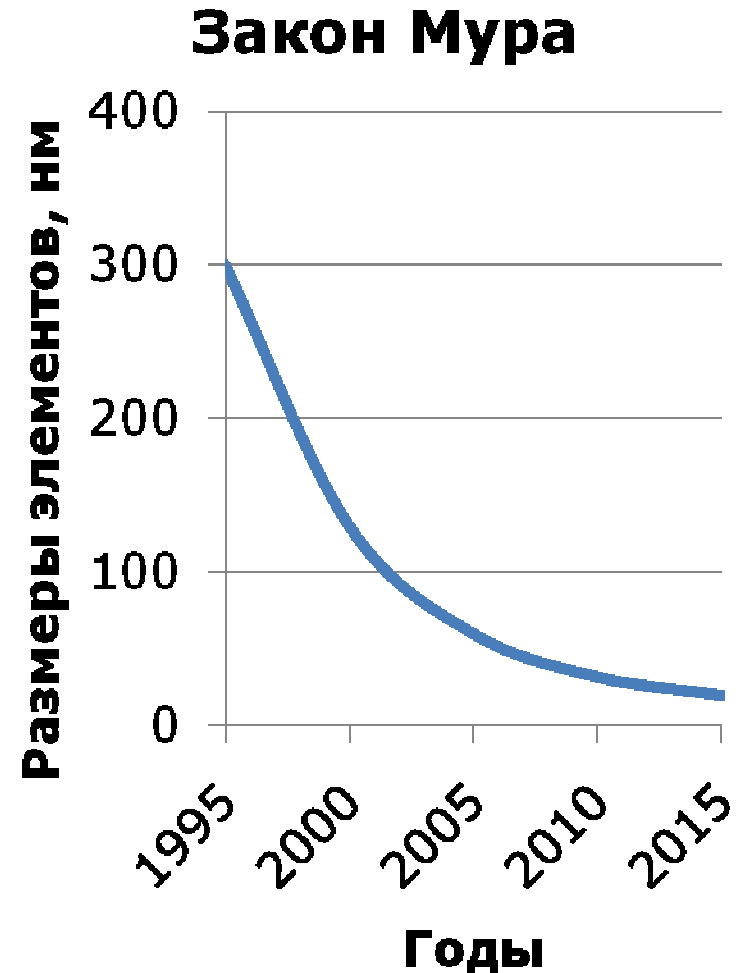


- минимальное собственное энергопотребление
- минимальные собственные габариты и вес;
- собственная защита (корпус) минимальна и обеспечивается прочностью и жёсткостью конструкции и применёнными элементами;
- функции отвода тепла (охлаждения) обеспечивают минимум требований тепловых режимов.
- микропроцессор и системная логика, а также ключевые микросхемы по возможности совмещены на одном кристалле

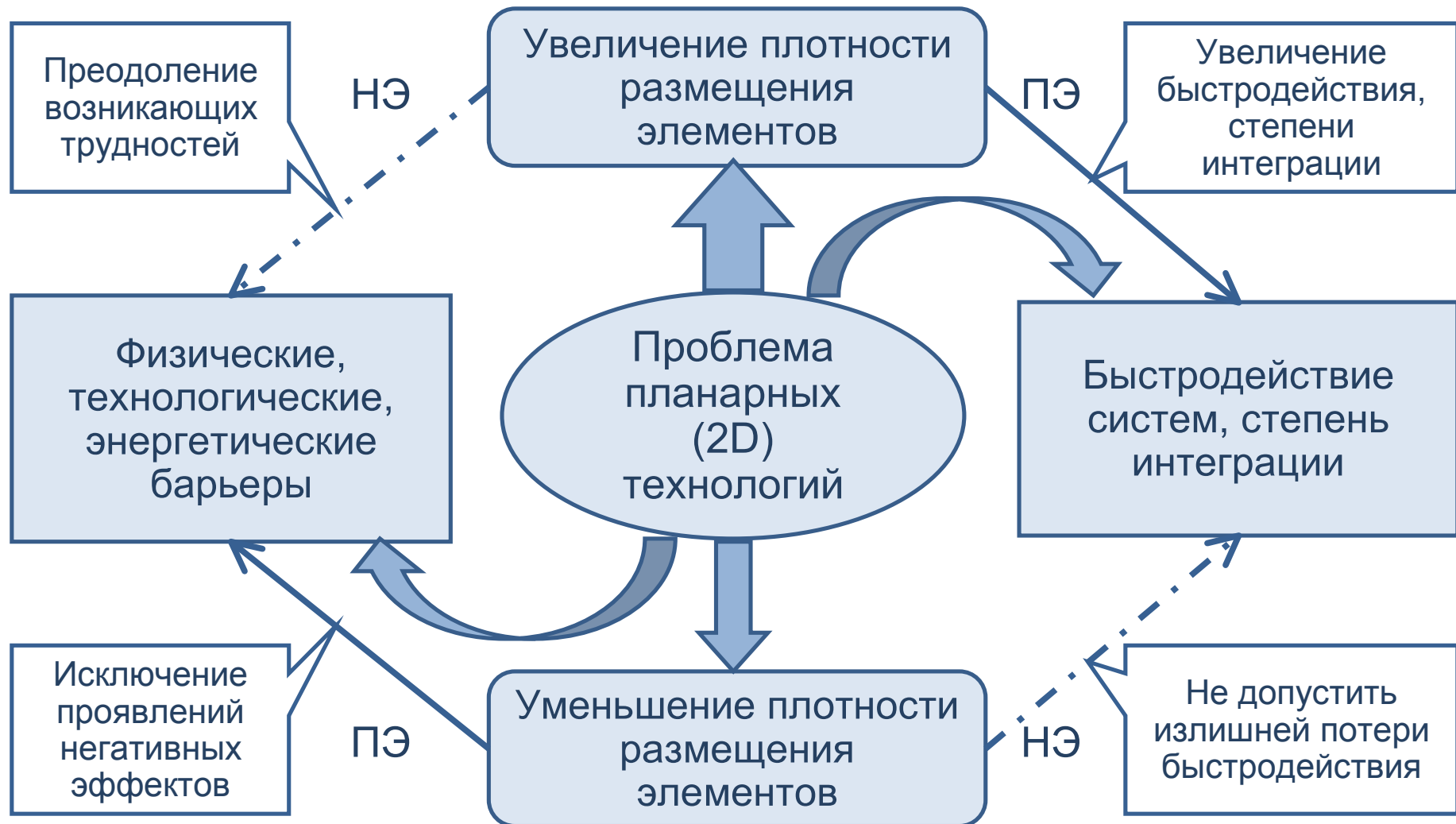


## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

- Плотность размещения элементов в интегральных схемах около  $10^8$  см<sup>2</sup>
- Объемная плотность в 3D-системах может достигать до  $1 \times 10^{14}$  –  $5 \times 10^{14}$  см<sup>3</sup>
- Трехмерные наноструктуры работают при плотности тока в 3-4 раза меньше, чем планарные системы

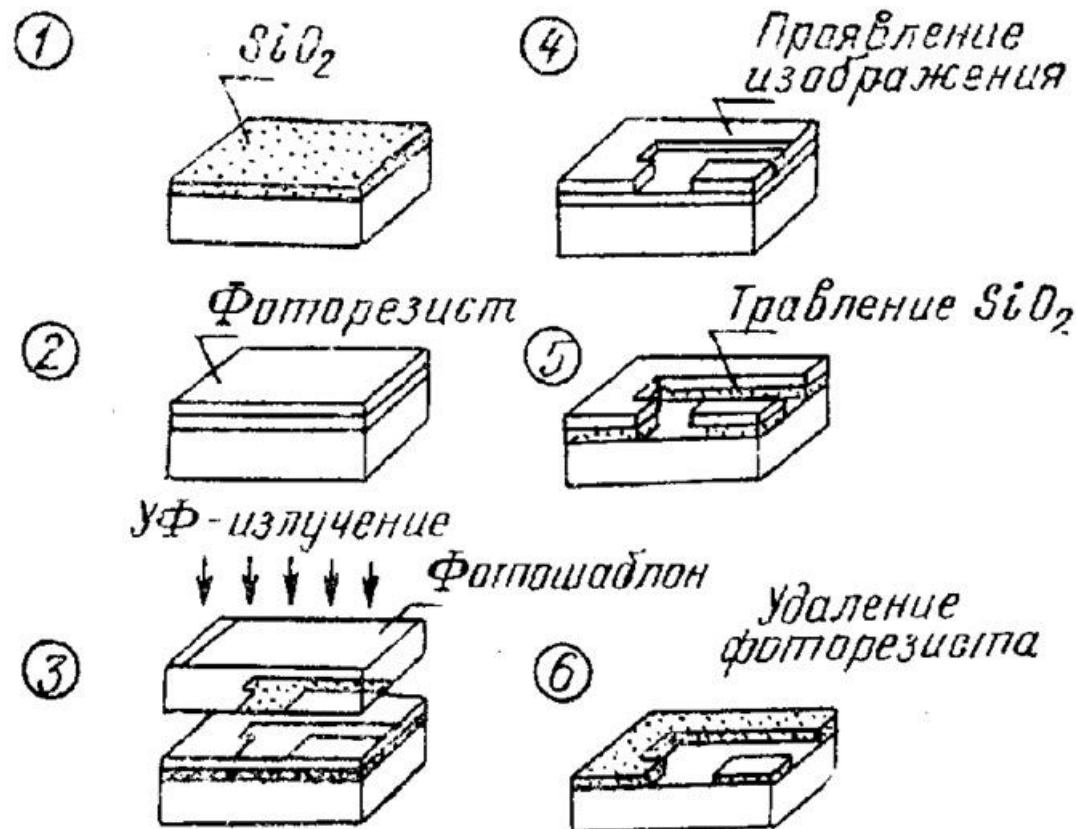


# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



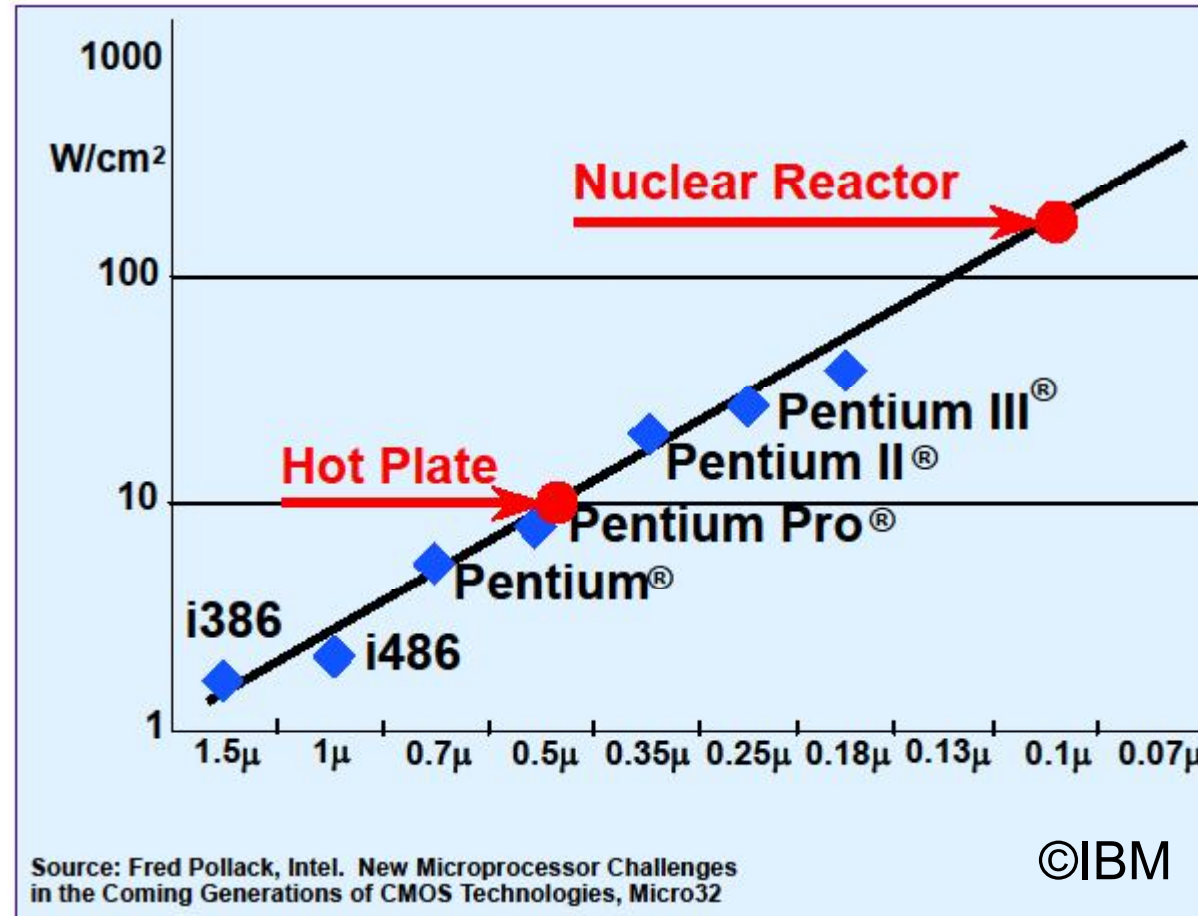
# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Технологические шаги процесса литографии



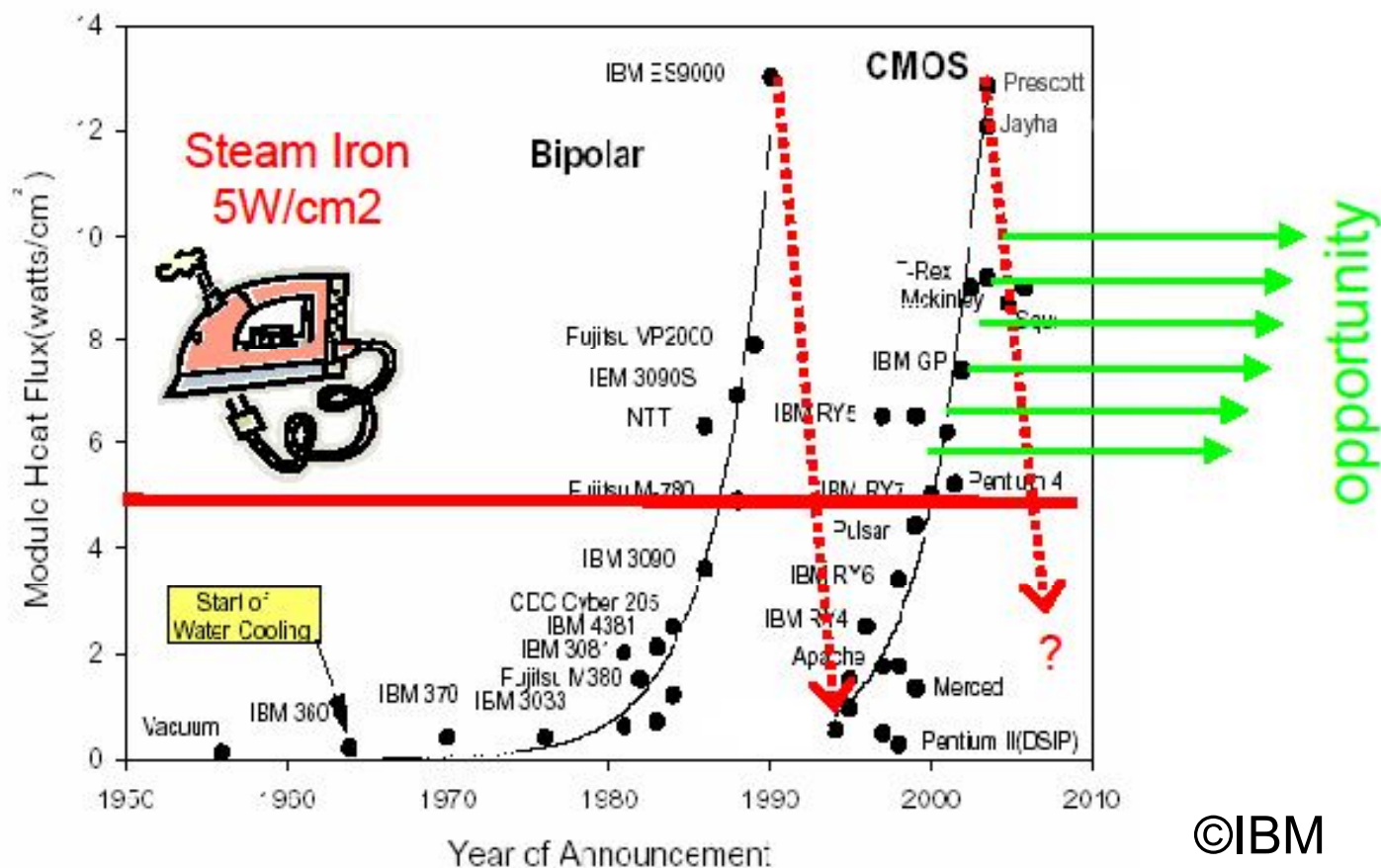
# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Плотность потребления энергии микропроцессоров

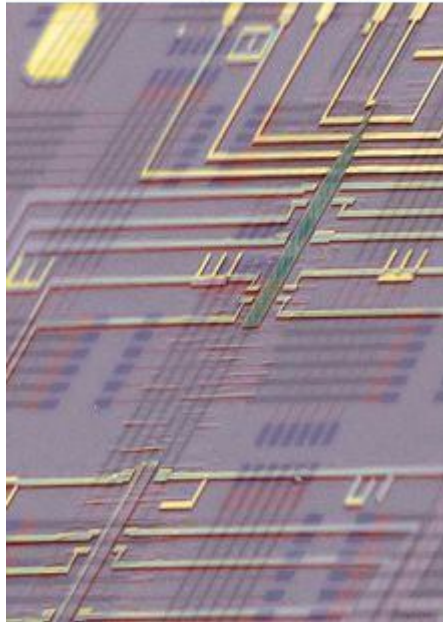
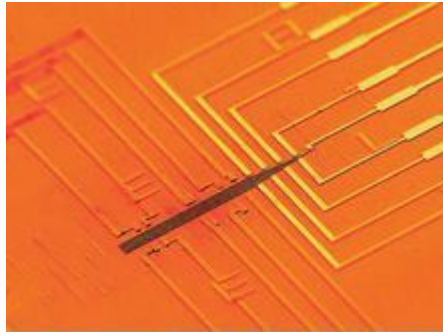


# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии нанотехнологий»

Плотность потребления энергии микропроцессоров



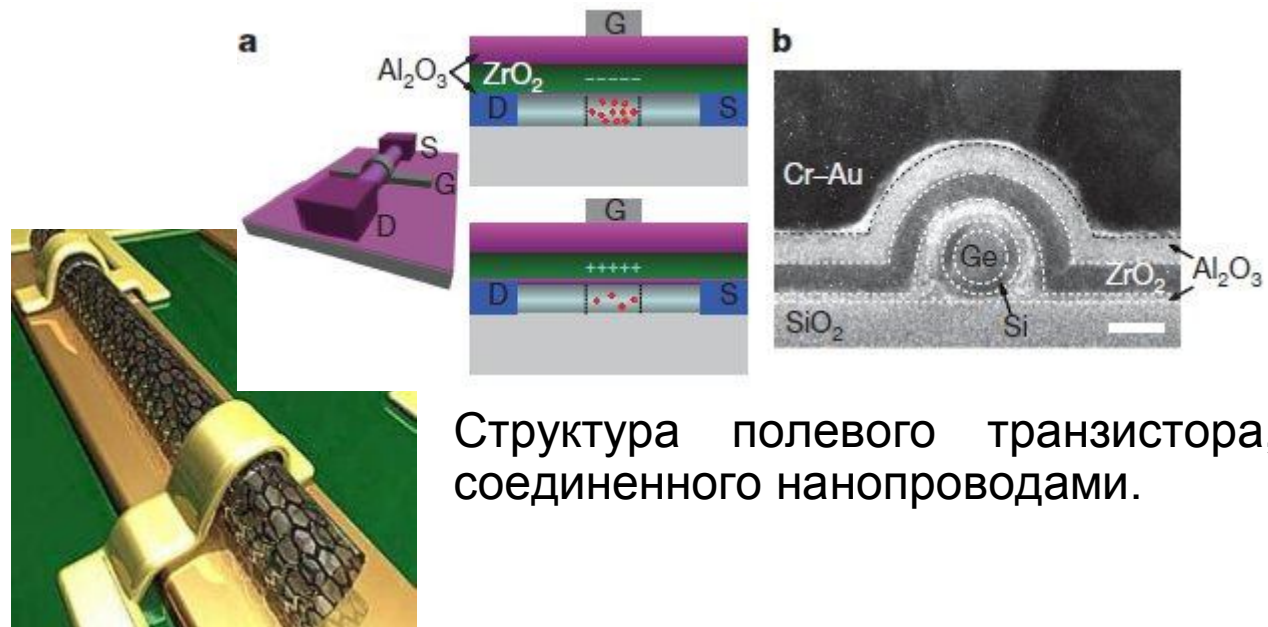
## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



Микросхемы из углеродных нано материалах в разы энергоэффективнее.

Одной из причин является появления квантовых эффектов, которые не позволяют току рассеиваться, как случается с обычными транзисторами.

Другая причина – быстроедействие

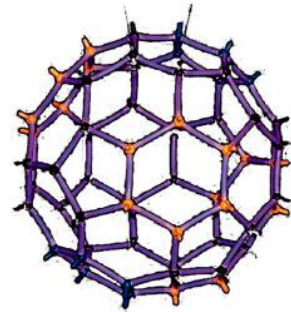


Структура полевого транзистора, соединенного нанопроводами.

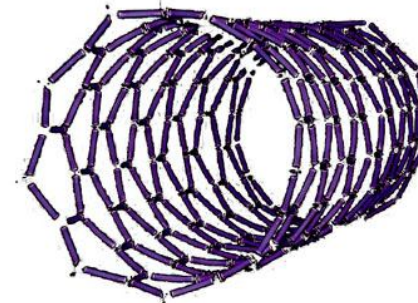
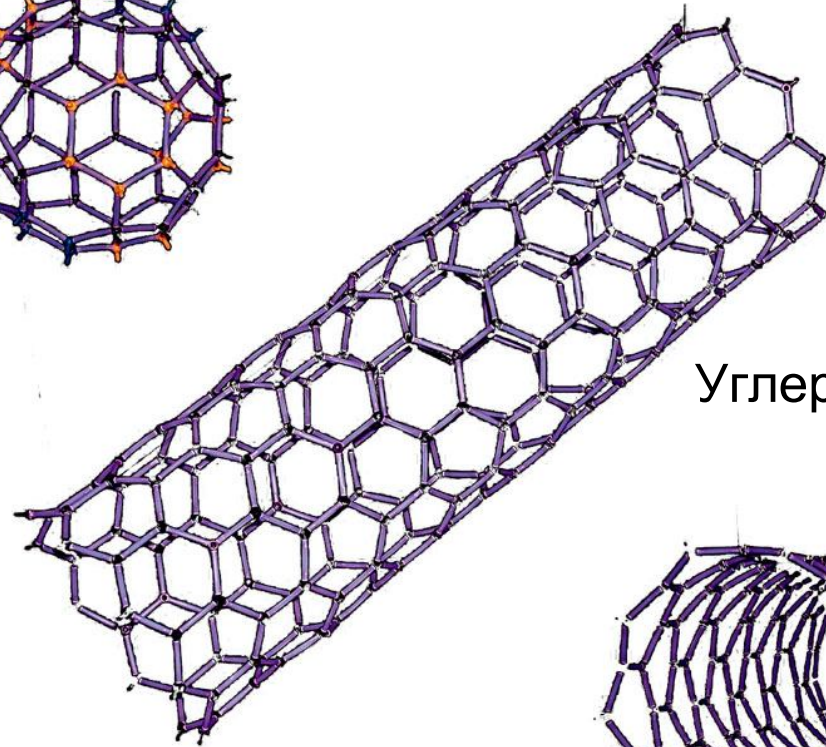
**ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ**  
**«Технологии наноинженерии»**

Фуллерены – «нанокирпичи» из углерода

Шарик  $C_{60}$



Углеродные нанотрубки

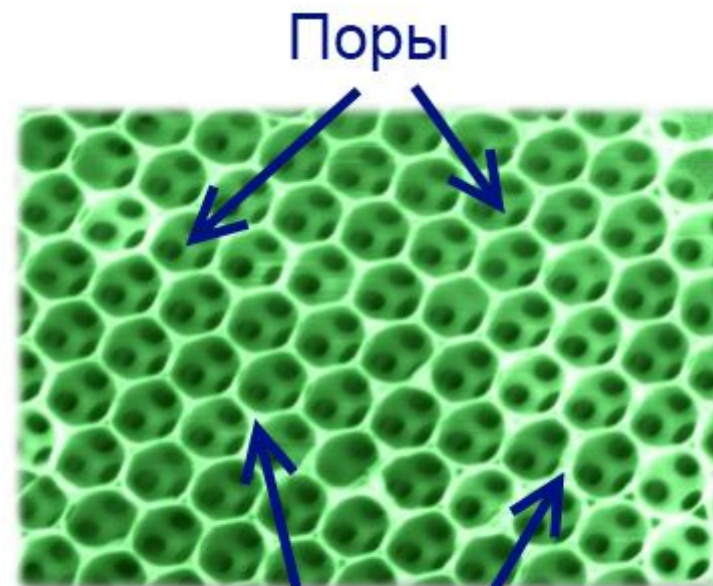


## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

- Фотонные кристаллы являются сверхрешеткой – средой с периодическими неоднородностями структуры. Период неоднородностей на порядки превышает период основной несущей решетки.
- В качестве трехмерных сверхрешеток может применяться опал, который представляет собой плотноупакованные наносферы  $SiO_2$  размером от 200 до 600 нм.



Природный опал



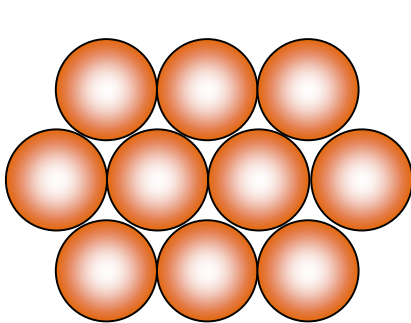
Оксид алюминия

Фотонный кристалл на  
основе оксида алюминия

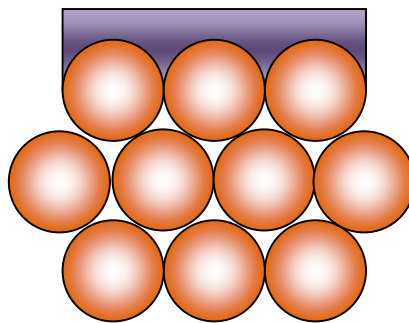


## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

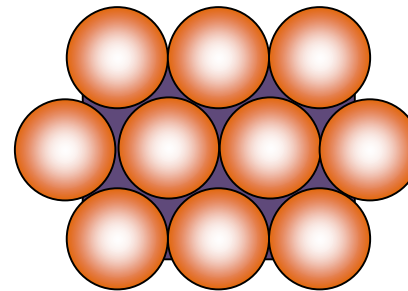
- Регулярная упаковка глобул  $SiO_2$  представляет собой фотонный кристалл, содержащий структурные пустоты размерами от 160 до 400 нм.
- Для получения структур с заданными характеристиками проводят синтез композитных материалов за счет изменения структуры решетки опала.



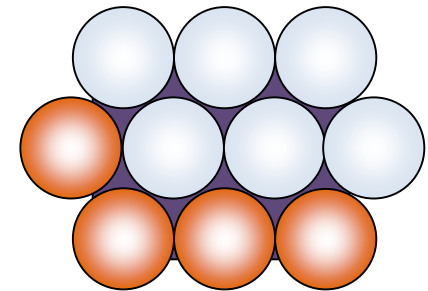
Чистый  
опал



Опаловая  
матрица с  
тонкой пленкой



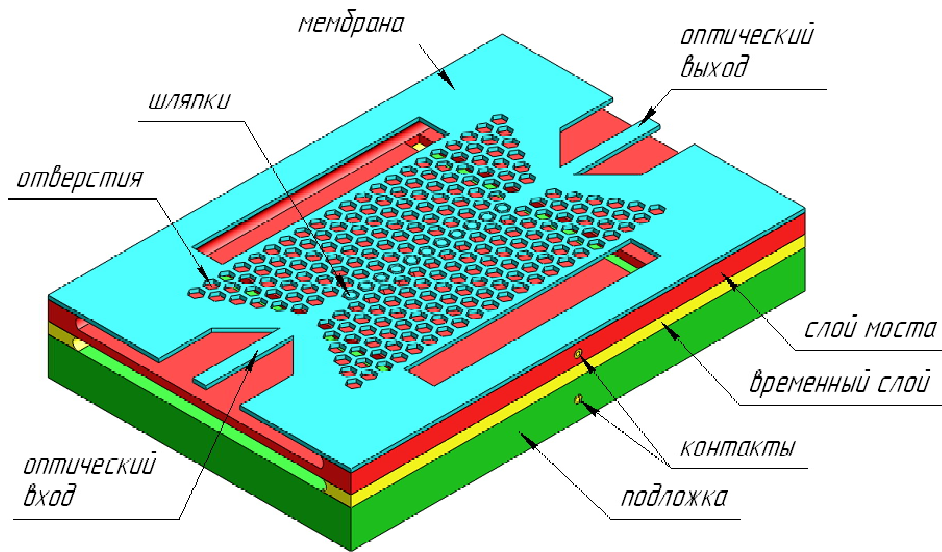
Опаловая матрица  
с материалом  
внедрения



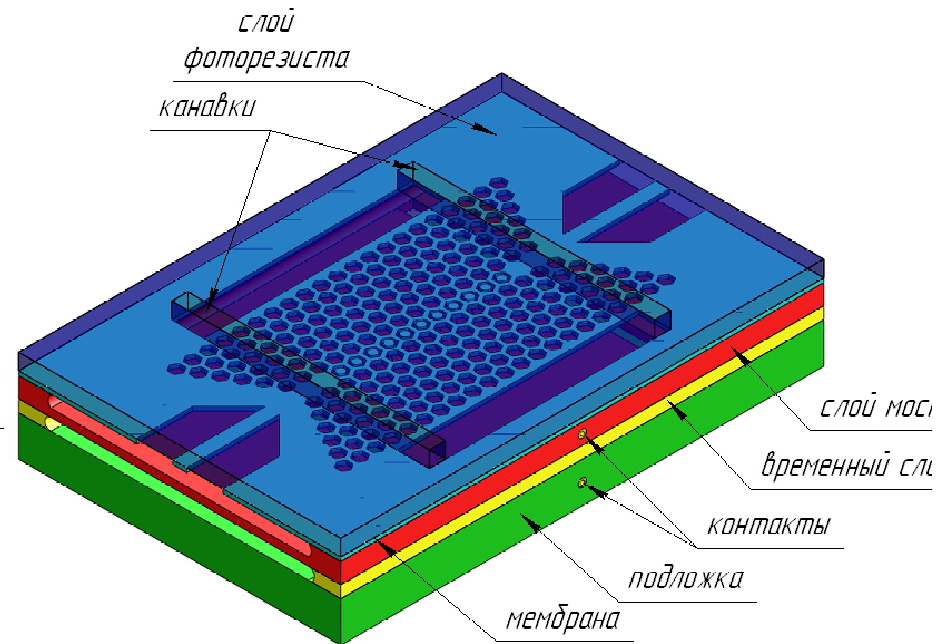
Инверсный  
опал

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

## Фотонные системы с перестраиваемой кристаллической структурой



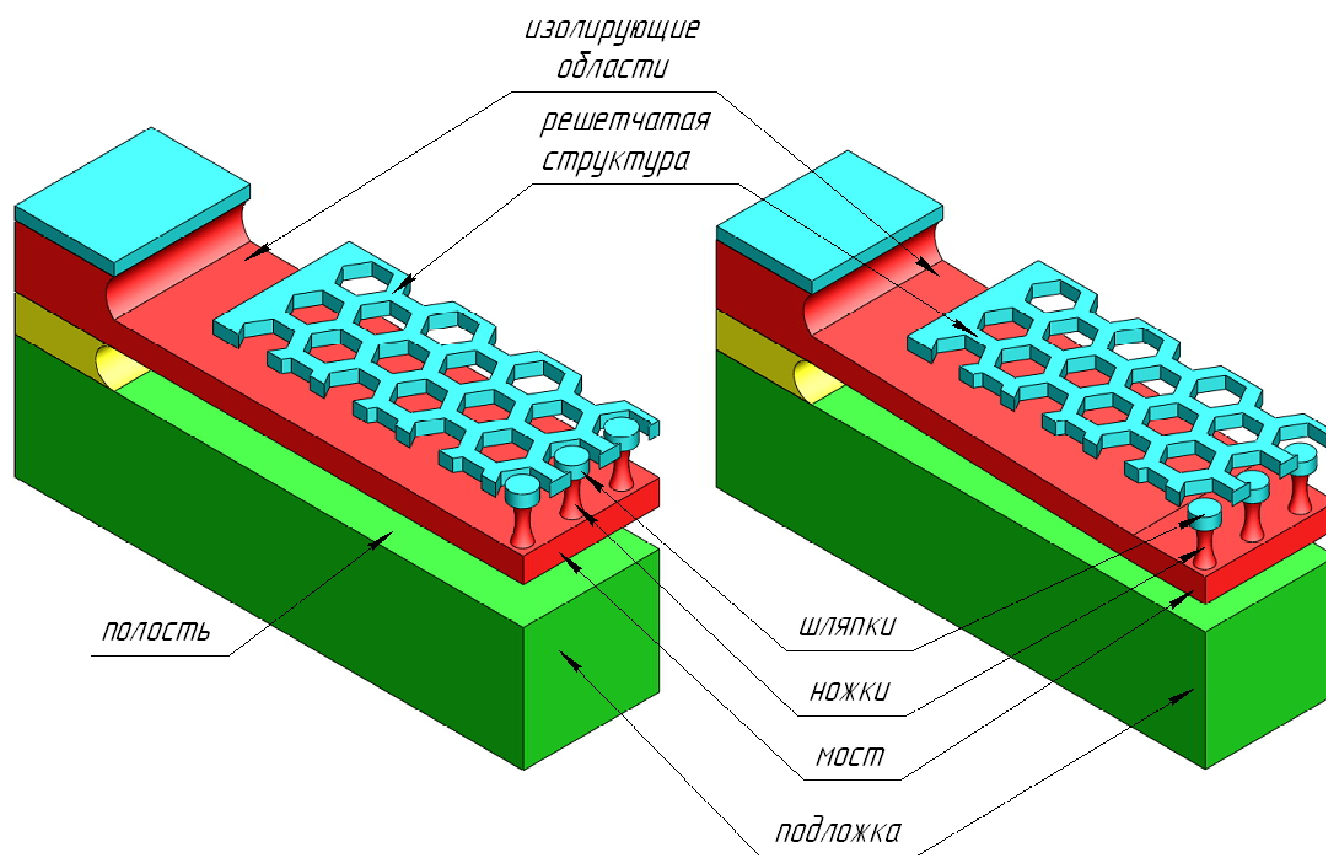
Общий вид перестраиваемой структуры



Перестраиваемое фотонное устройство с нанесенным слоем фоторезиста

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Фотонные системы с перестраиваемой кристаллической структурой



Изменение положения моста при подаче напряжения на электрические контакты (слева – до подачи напряжения, справа - после)

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

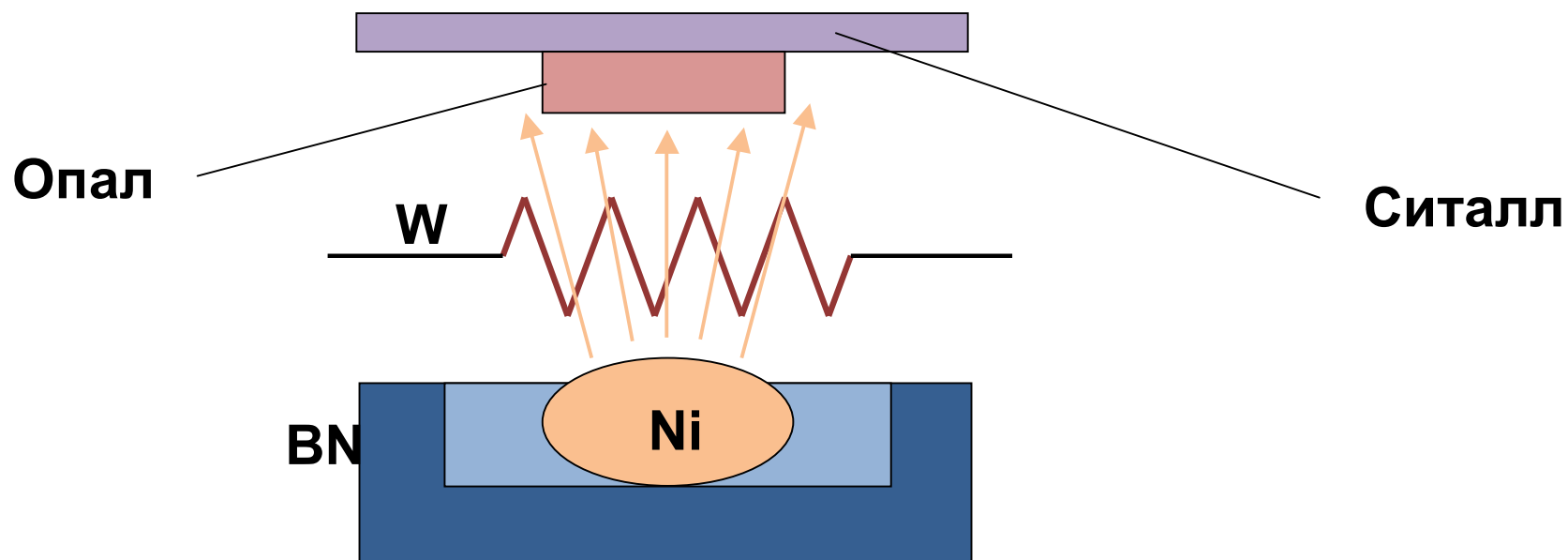
- Введение в виды микроскопии
- Базовые понятия о микро- нано- структурах
- Оптическая микроскопия
- Конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния света
- Сканирующая зондовая микроскопия
- Анализ методов микроскопии, по средствам оценки полученных результатов



# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

## Метод термовакуумного напыления

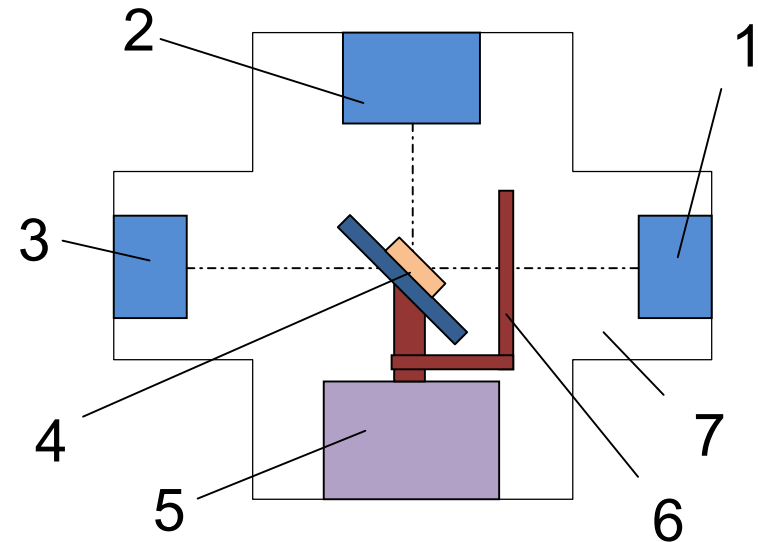
- Наиболее прост в реализации
- Имеет ограничения по наносимым материалам
- Обладает самой низкой энергией частиц при нанесении ( $kT_u$ )



# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

## Метод магнетронного распыления

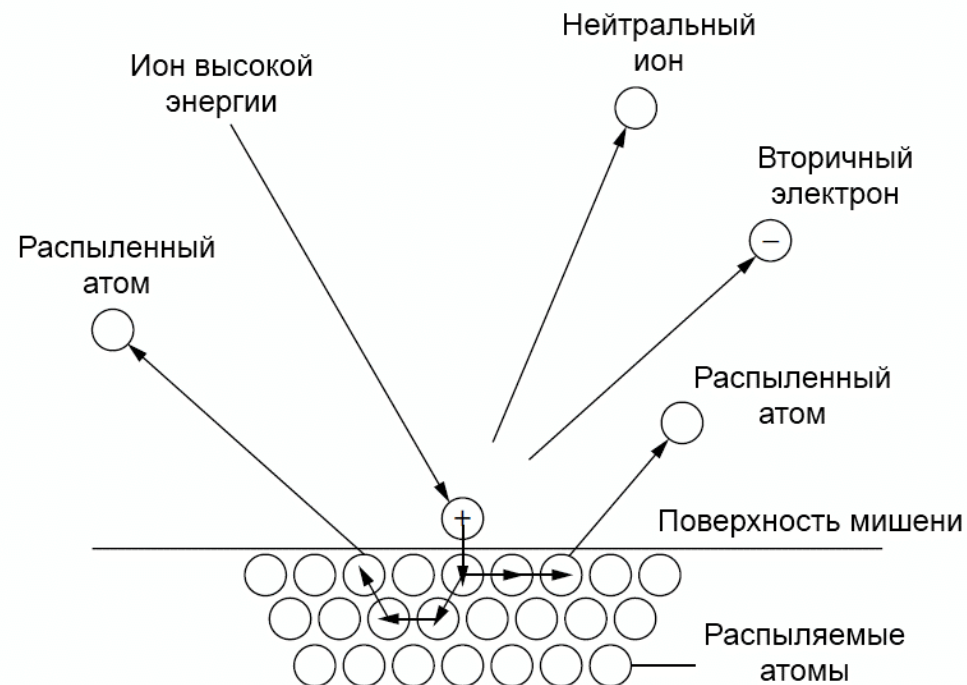
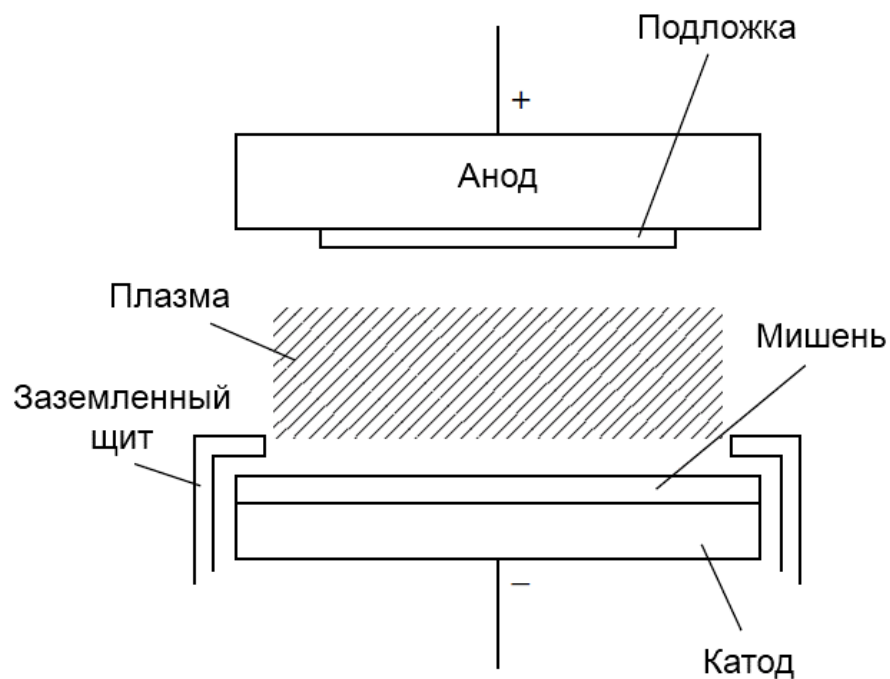
- Позволяют осаждать практически любые материалы тонких пленок
- Энергия осаждаемых частиц от единиц до сотен эВ
- Позволяют использовать подложки большего размера
- Возможно нанесение многослойных и многокомпонентных пленок



1 – дуговой источник; 2 – ионно-лучевой источник; 3 – магнетрон; 4 – наклоняемый нагреваемый столик с образцом; 5 – привод вращения столика и заслонки; 6 – заслонка; 7 – вакуумная камера

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

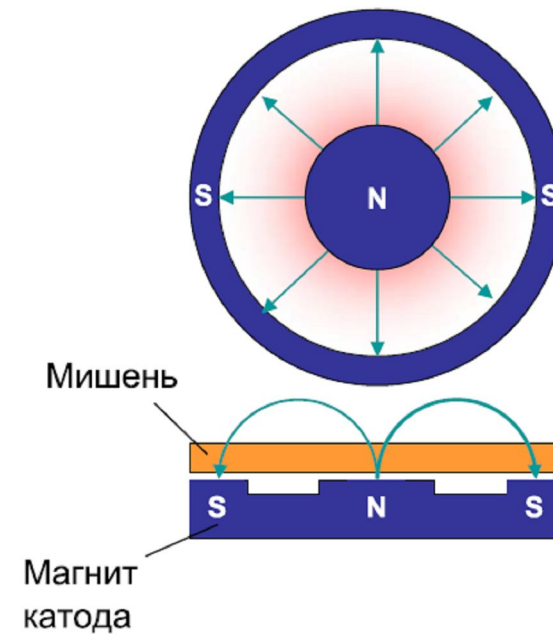
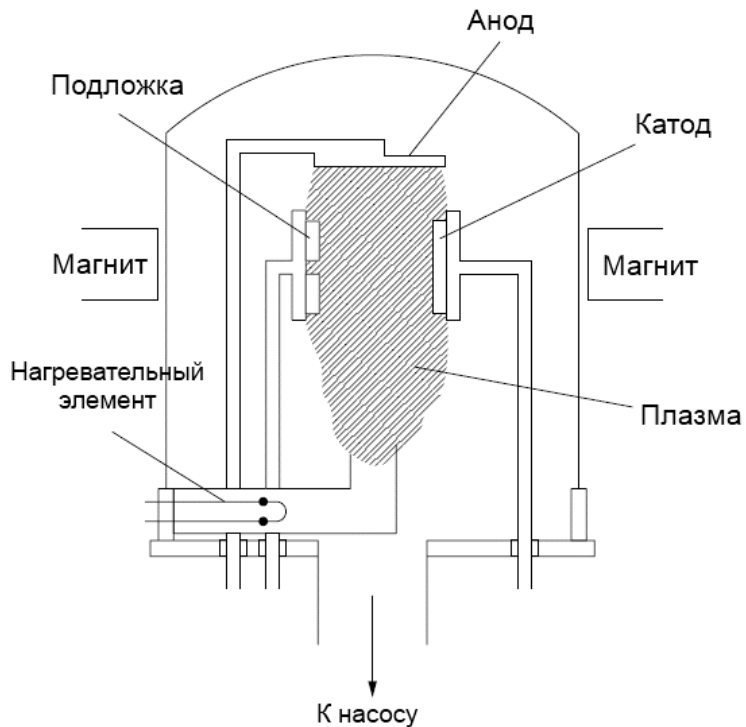
## Метод магнетронного распыления



Основные элементы установки распыления и процесс распыления

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

## Метод магнетронного распыления



Триодная система распыления и магнитное поле мишени магнетрона



# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Сканирующая  
зондовая  
микроскопия



C3M NanoEducator\_v.1 CTM «Умка-02-Е»



C3M SOLVER PRO-47

Конфокальная  
микроскопия



Измерительный  
комплекс AIST\_NT  
SmartSPM&Raman

Оптическая  
микроскопия



ZEISS SteREO Discovery. V8



ZEISS Axio Imager

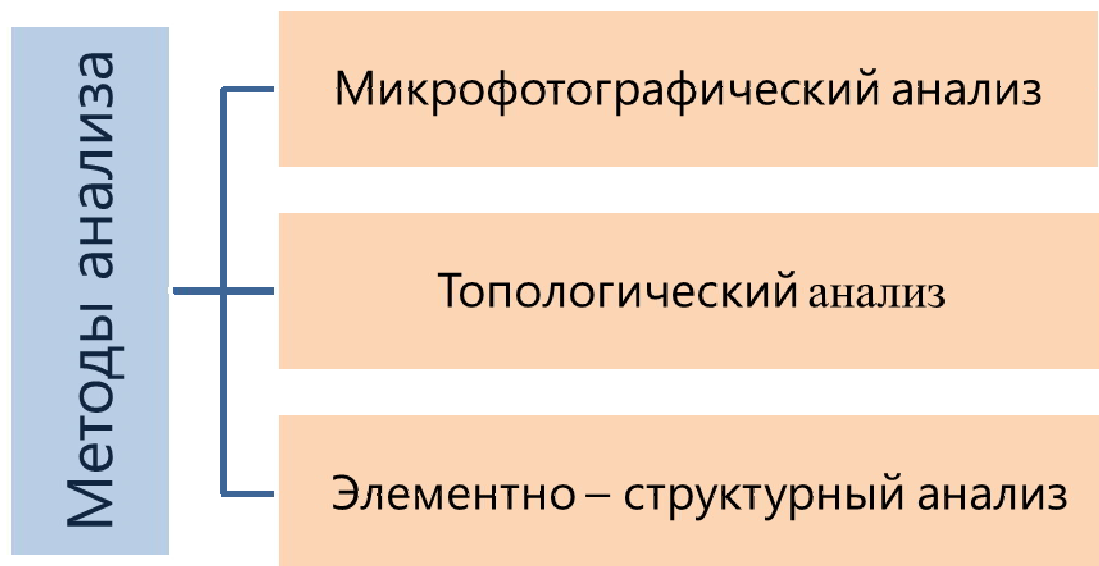


IntelPlay QX3

A2

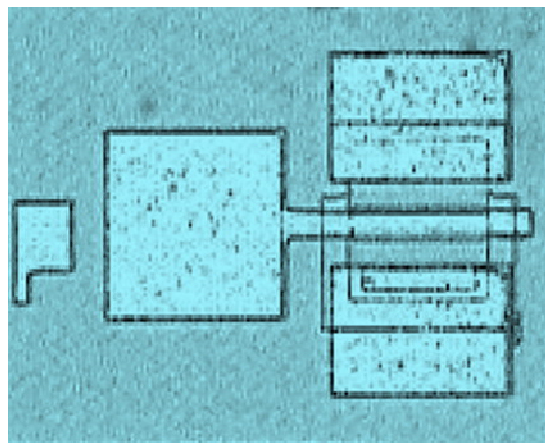
## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

- Изучить основные методы и средства измерений микро- и наноструктур.
- Получить представления какие из методов наиболее информативны при анализе той или иной структуры.
- Провести обработку и анализ изображений микро- и наноструктур полученных различными средствами микроскопии.



Методы анализа микро- и нано структурированных материалов

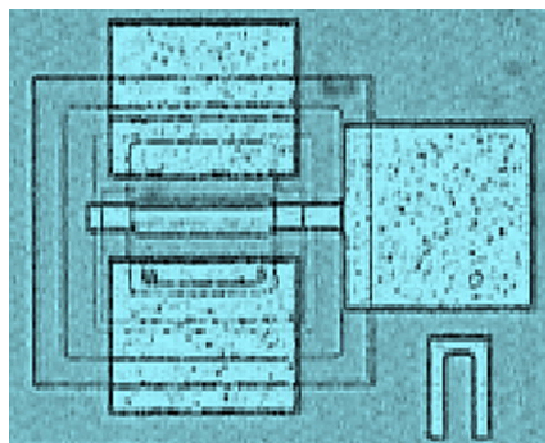
# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



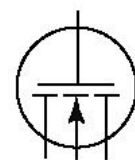
Микрофотография полевого  
p – канального транзистора (x10)



p-канальный  
с индуцированным  
каналом



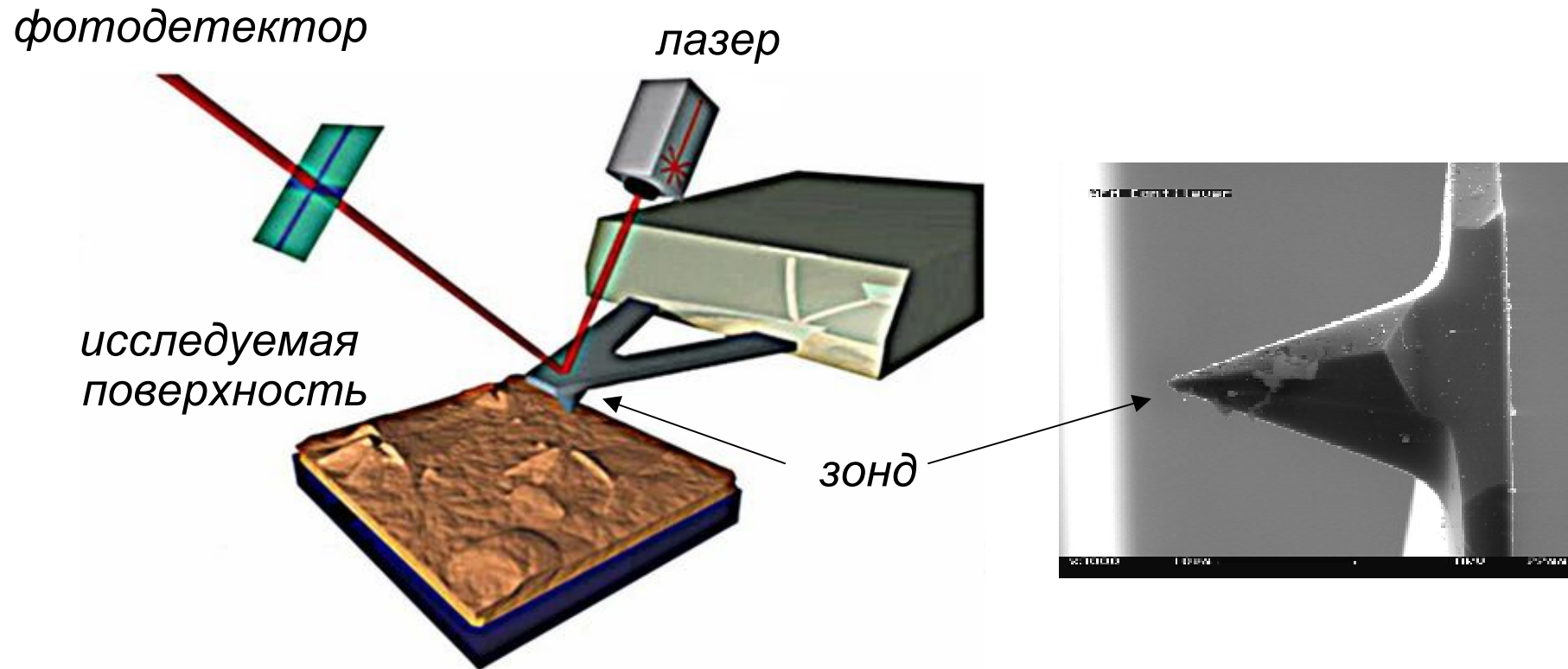
Микрофотография полевого  
n – канального транзистора (x10)



n-канальный  
с индуцированным  
каналом

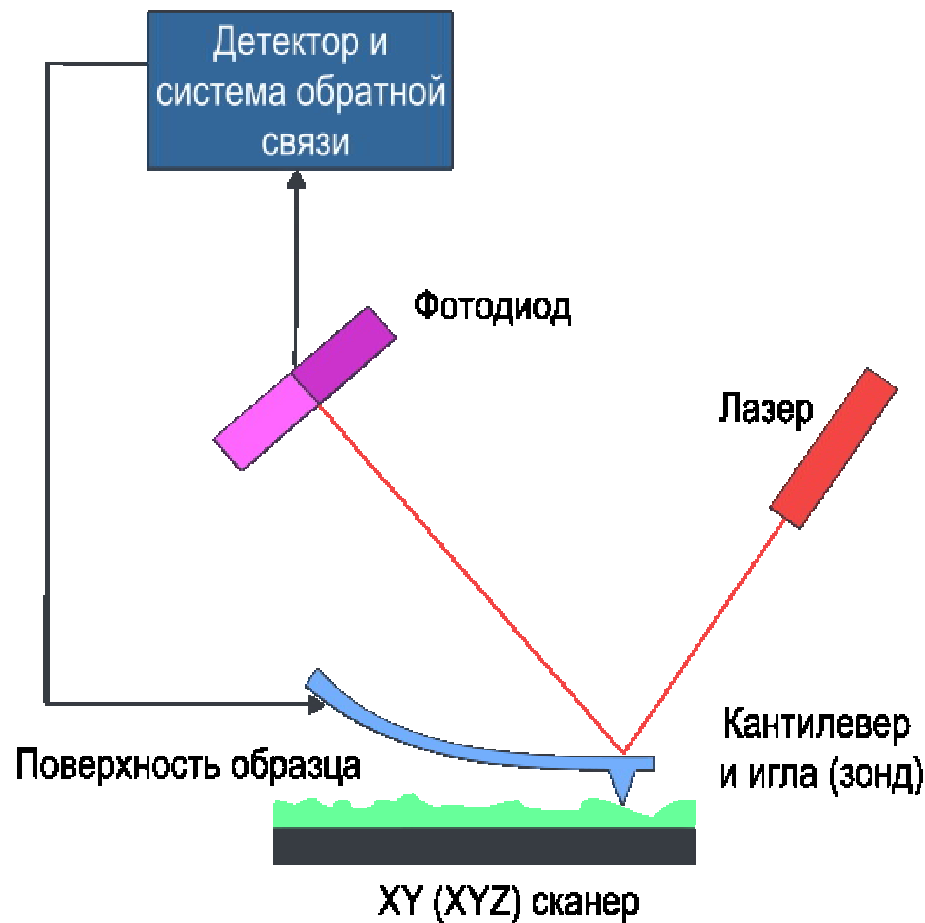


## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



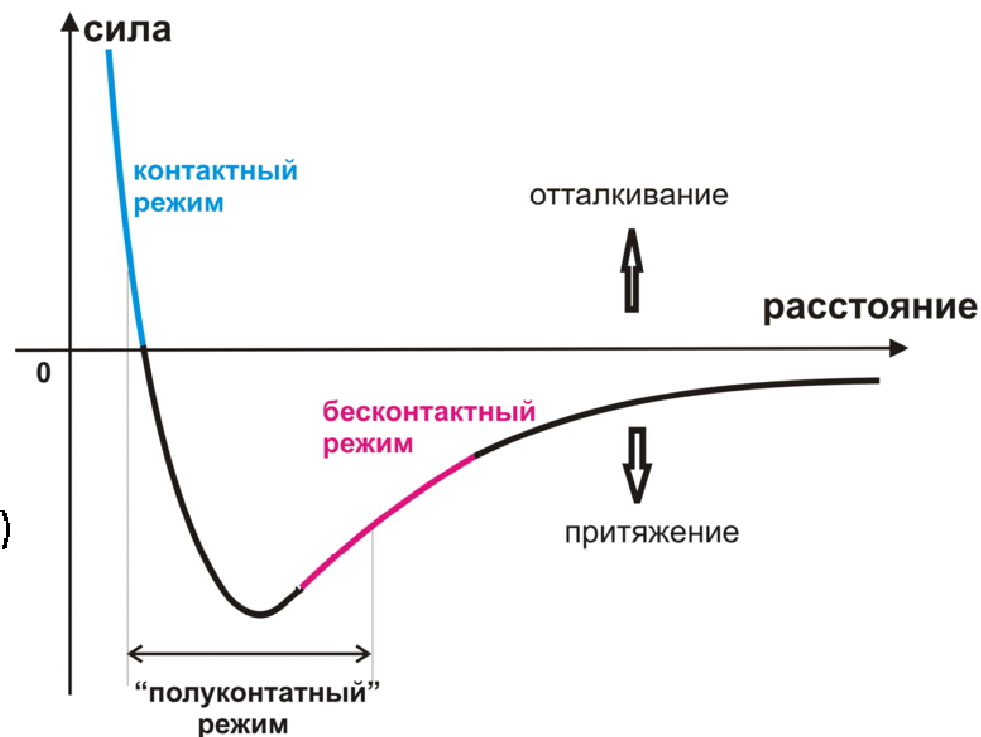
Отклонения зонда при действии близко расположенных атомов регистрируются при помощи измерителя наноперемещений, в частности используют оптические, ёмкостные или туннельные сенсоры. Добавив к этой системе устройство развёртки по осям X и Y, получают сканирующий АСМ.

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



Структура атомно-силового микроскопа

Максимальное разрешение – до атомарного уровня



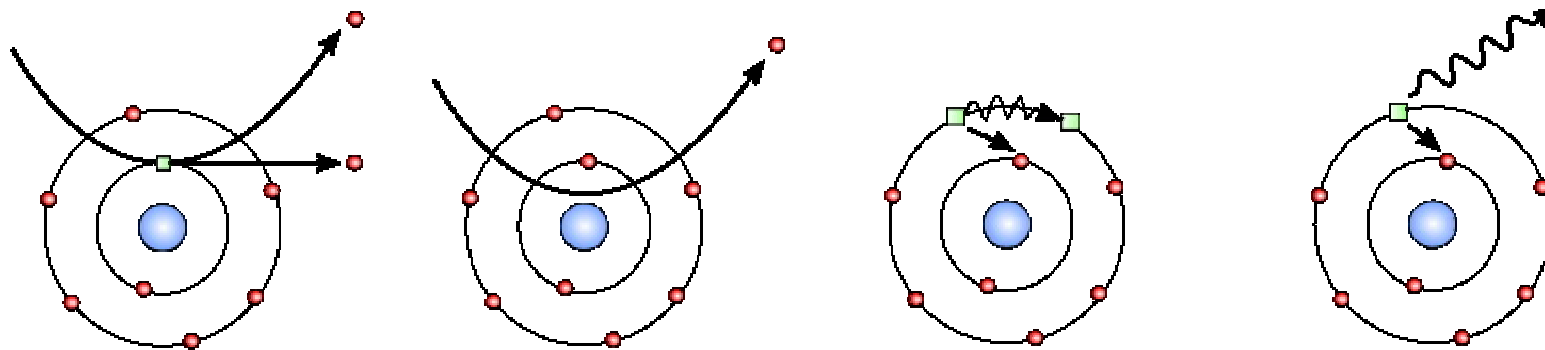
Режимы работы АСМ

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



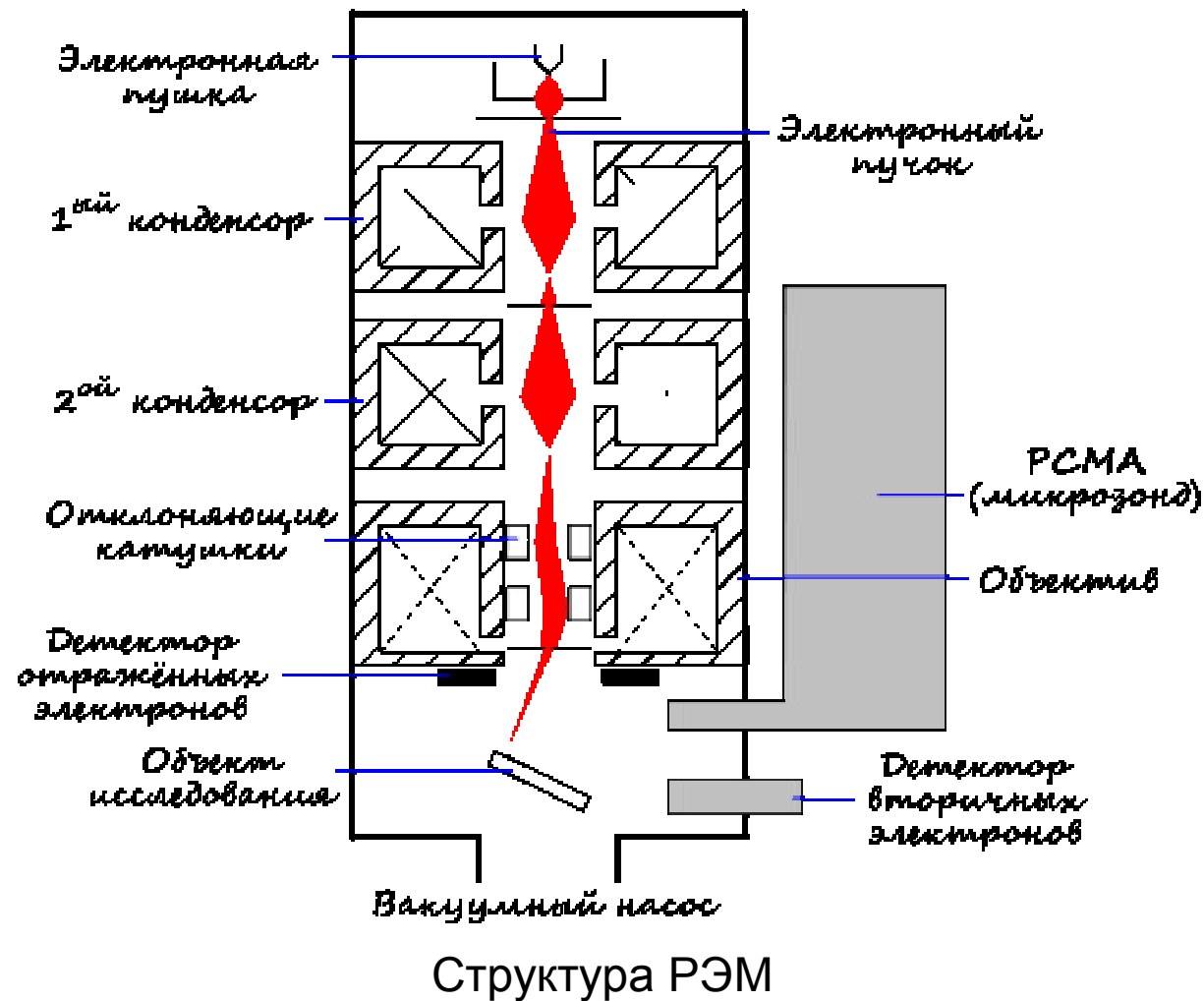
Растровый электронный  
микроскоп Neon40

Максимальное разрешение –  
до 0,4 нм

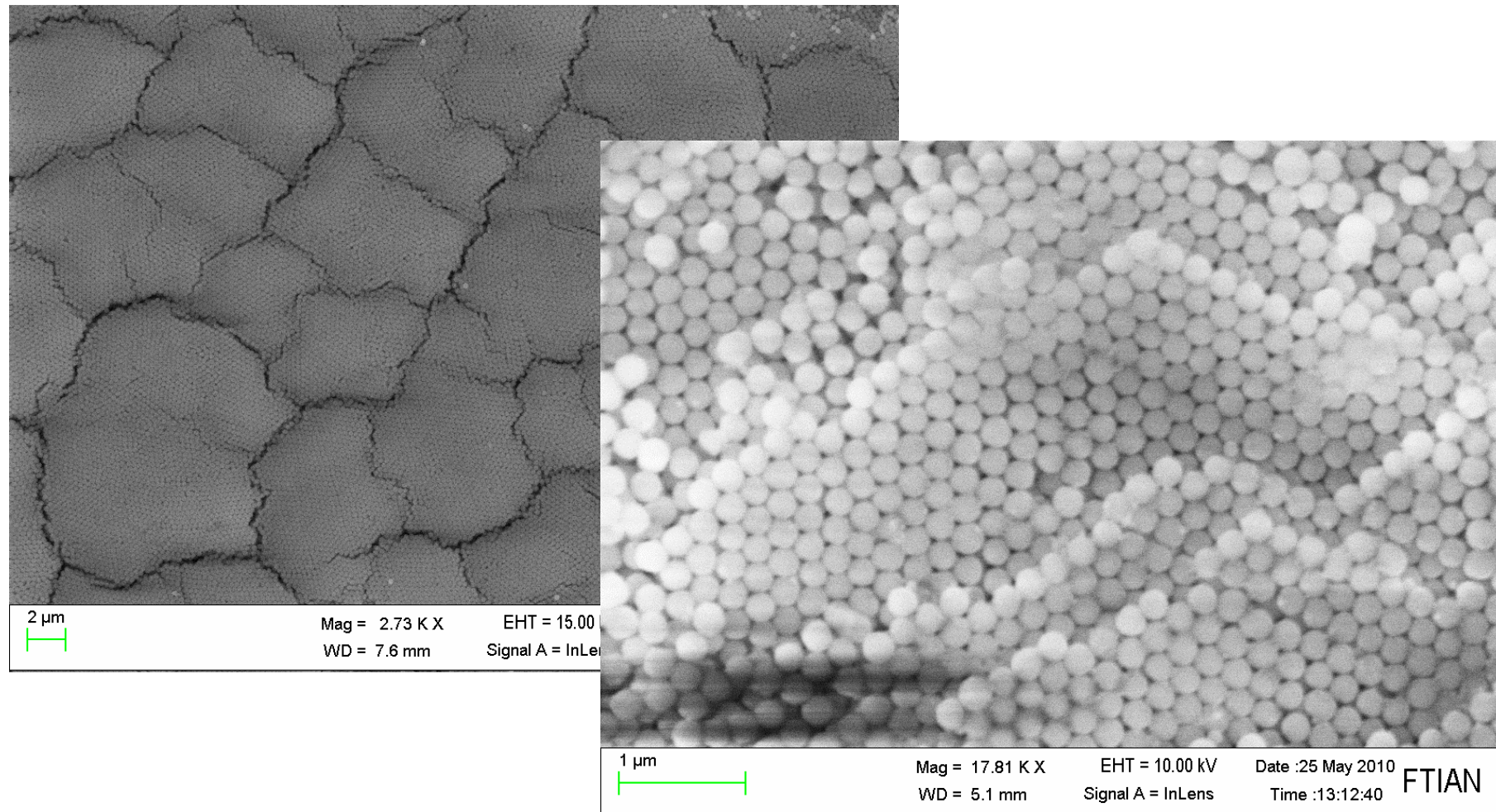


Виды взаимодействия электронов с веществом

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



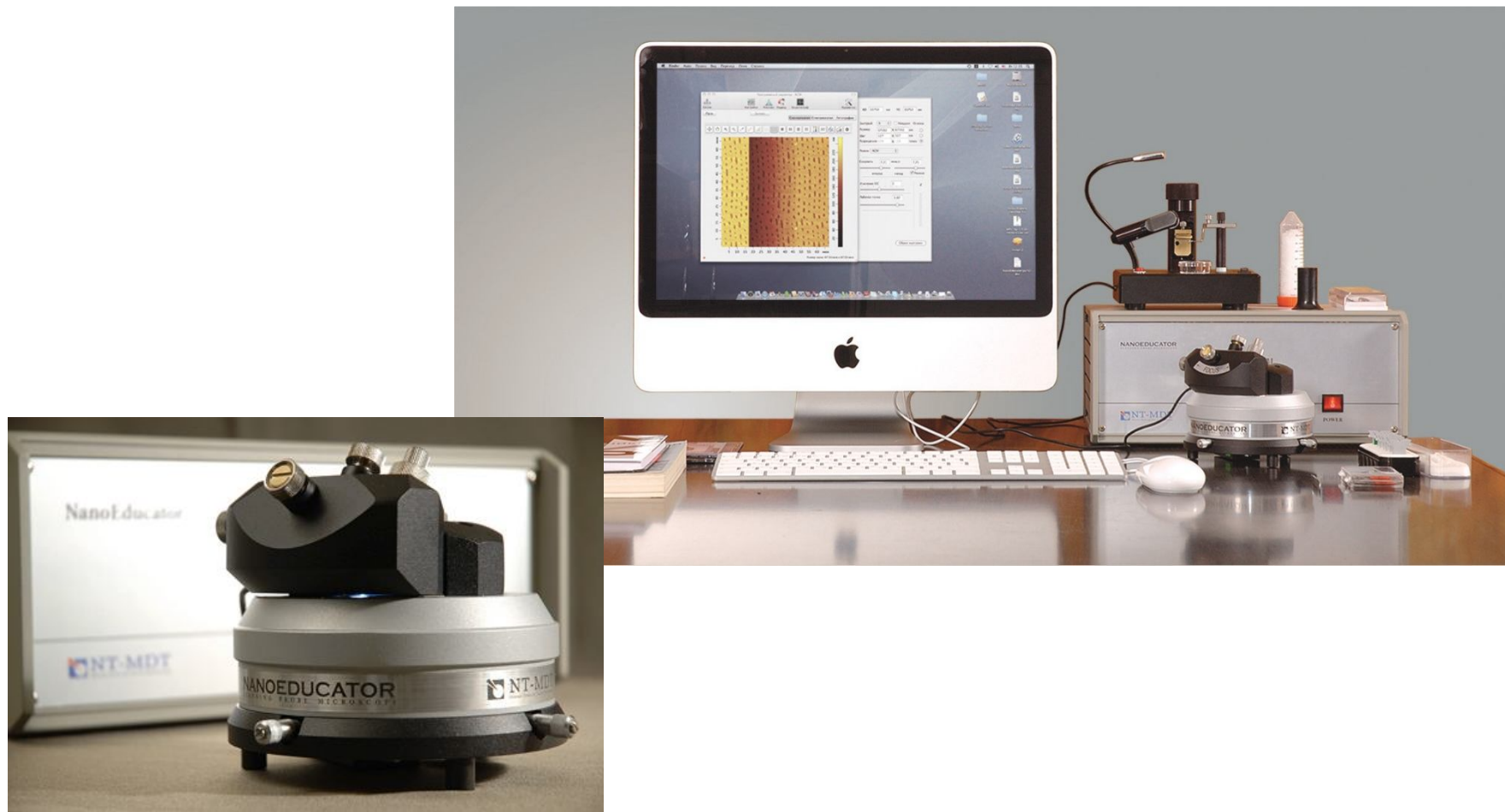
# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



Фотографии фотонного кристалла, полученные с помощью РЭМ

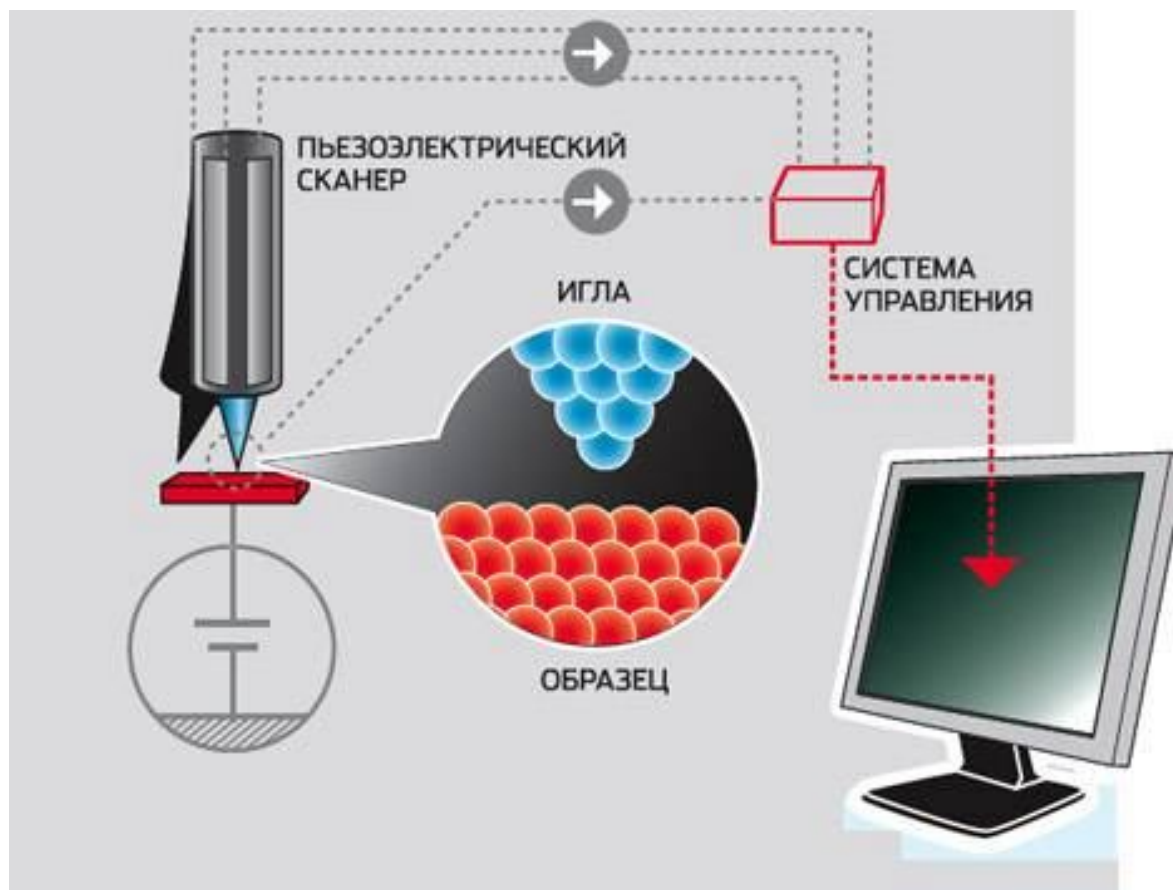


## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



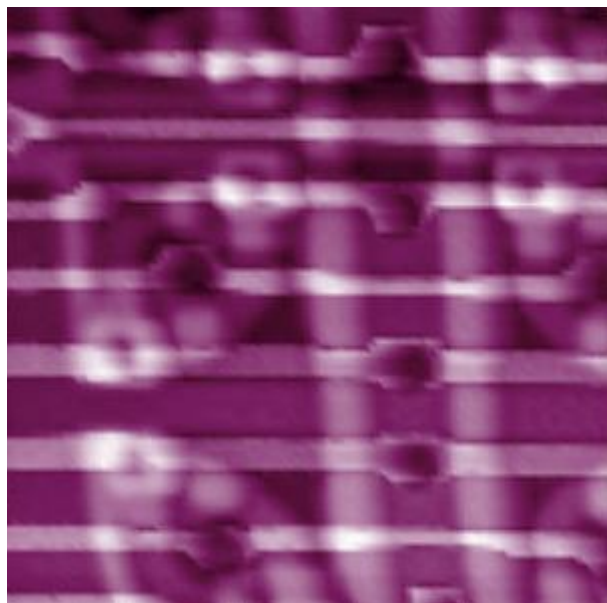
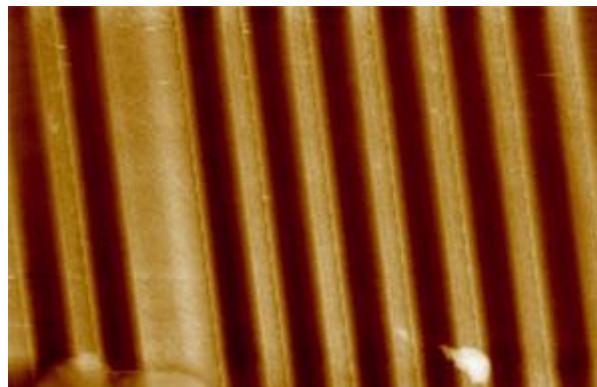
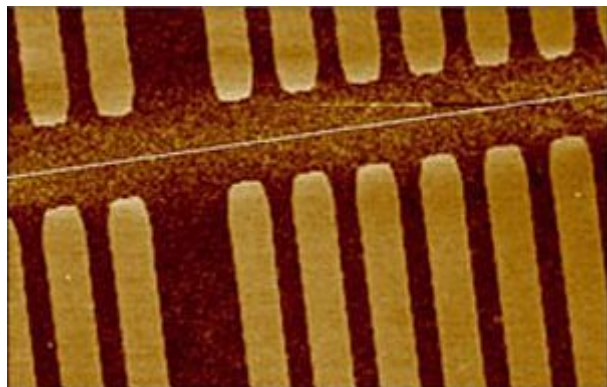
Сканирующий туннельный микроскоп

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



Структура СТМ

## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



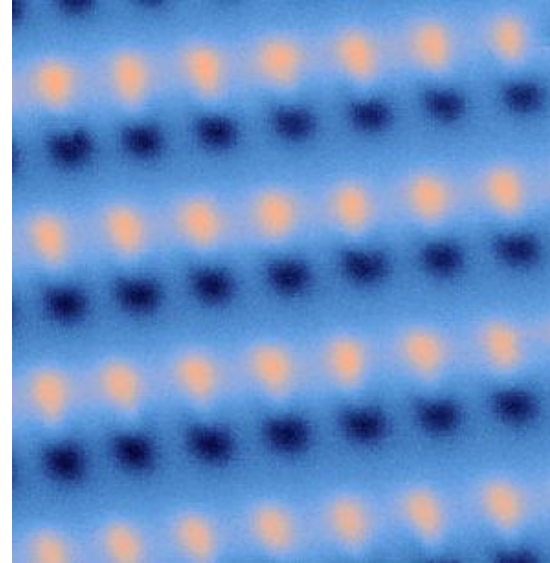
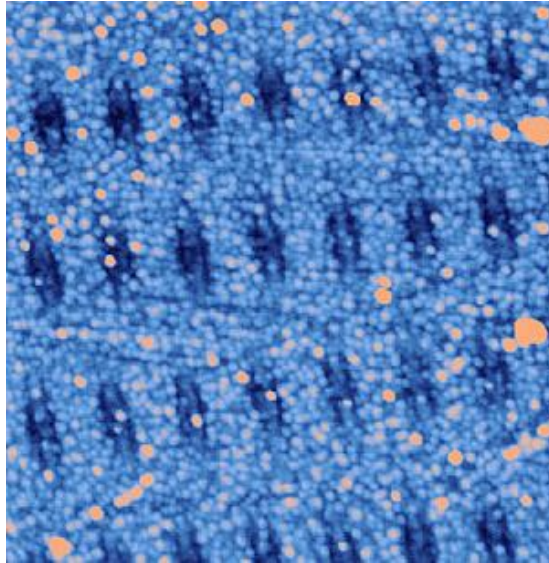
50x50 мкм

↑ Тестовая структура на основе решетки из полос  $\text{SiO}_2$  высотой 0,1 мкм с шагом 3 мкм на кремниевой подложке. Было проведено внедрение ионов бора с  $E=100$  кэВ, отжиг и травление слоя  $\text{SiO}_2$ .

На полученной структуре получены изображения рельефа поверхности и изображение, полученное с применением контактной СЭМ.

← Часть интегральной схемы ПЗУ на одной из стадий технологического процесса.

## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

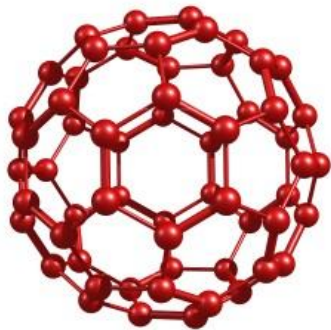


Рельеф поверхности (слева) и MFM изображение (справа) ферромагнитных островков в парамагнитной пленке. Магнитное изображение выглядит как массив субмикронных магнитных диполей. Светлые и темные участки соответствуют различным магнитным полюсам диполей.

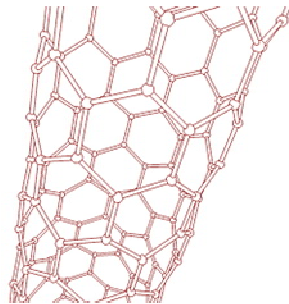
Накопители информации, изготовленные на основе массивов из магнитных диполей, являются одними из наиболее перспективных видов запоминающих устройств.

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

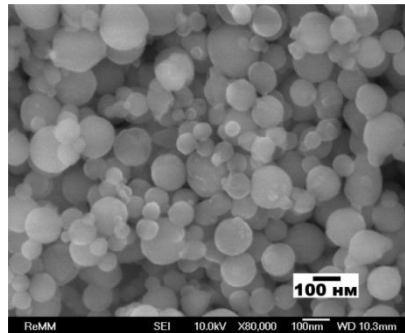
Спектроскопия комбинационного рассеяния света (или рамановская спектроскопия) — эффективный метод химического анализа, изучения состава и строения веществ по его спектральным характеристикам вторичного отражения света.



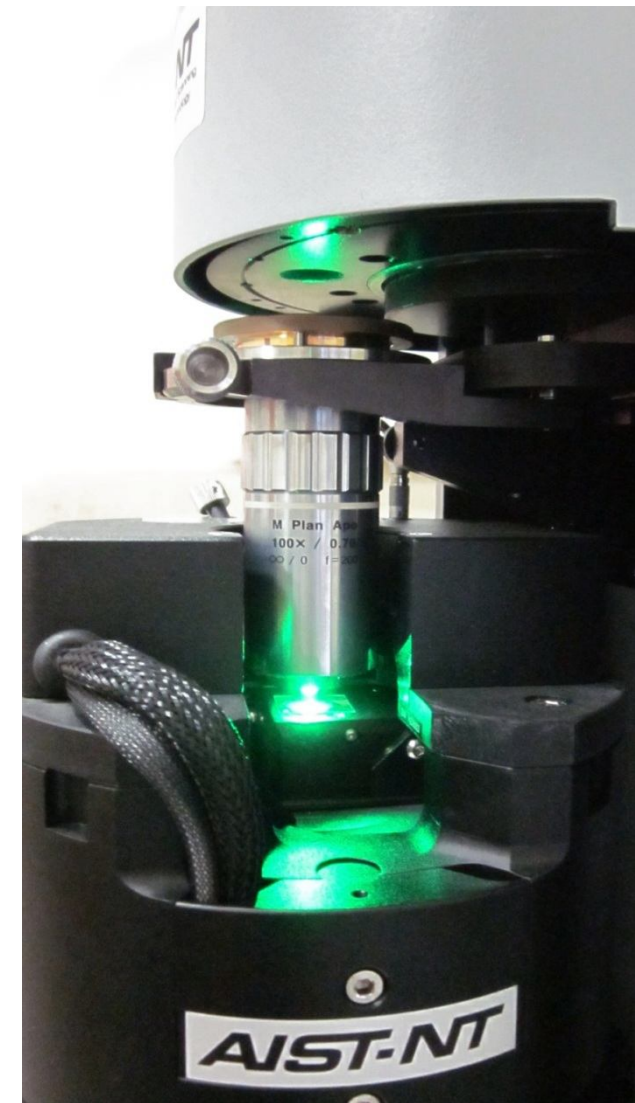
Фуллерен C60



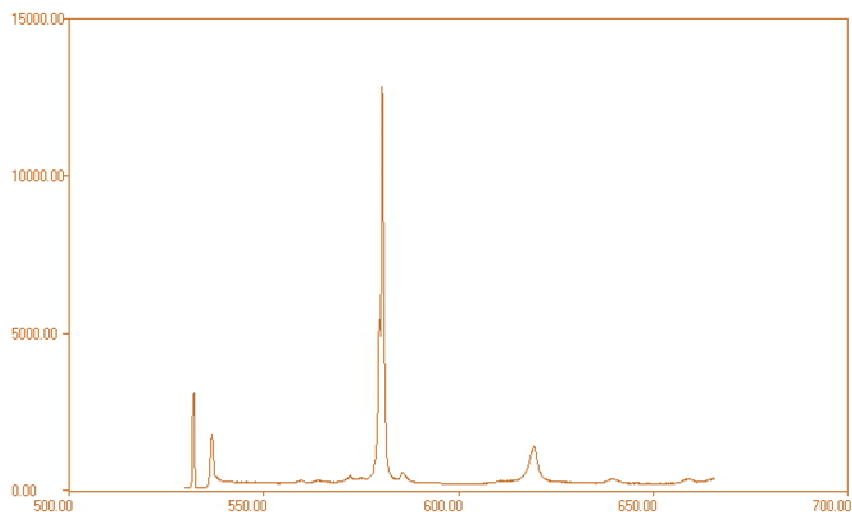
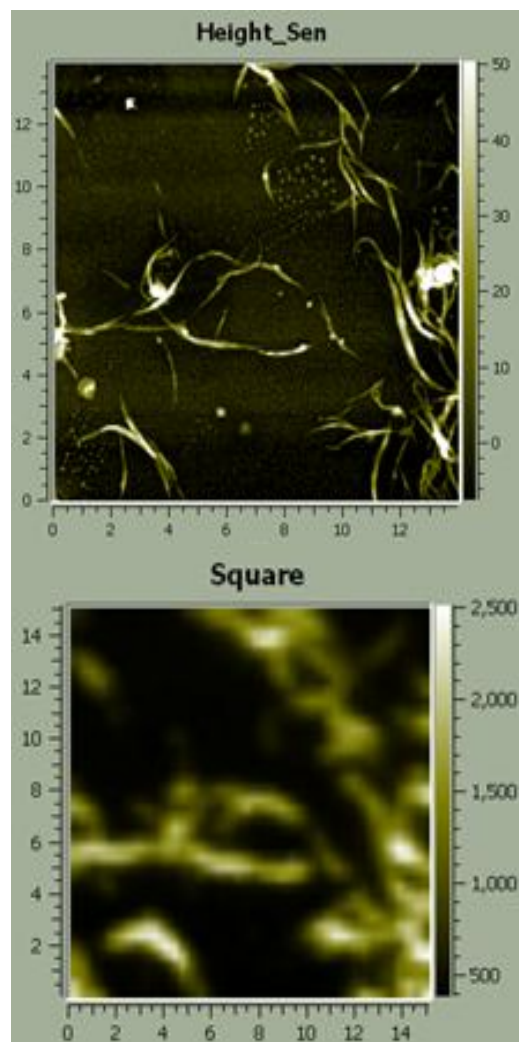
Схематическое изображение нанотрубки



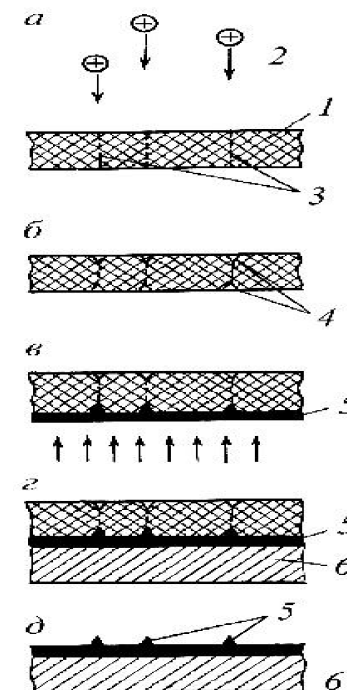
Микрофотография нанопорошка алюминия.



# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



Спектр КРС – Эффект ГКР яркость 15 000 ед.

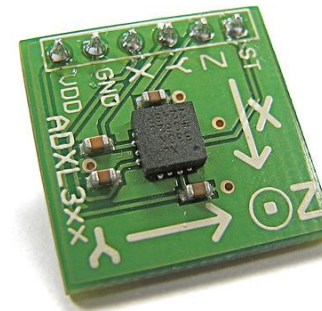
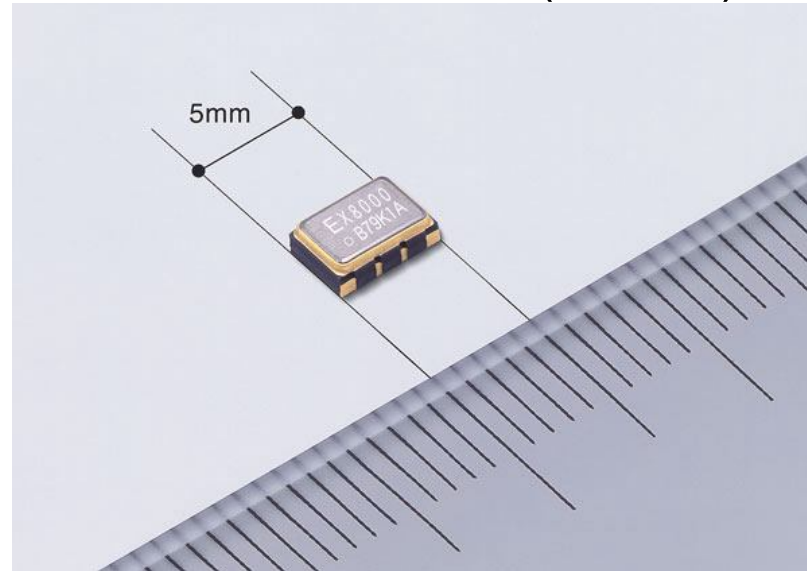
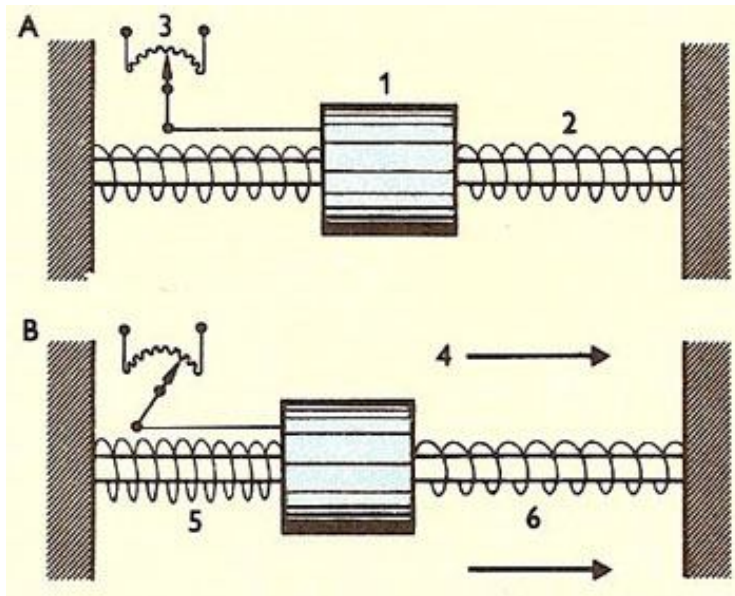


Возможность формирования ГКР-активных наноструктур

Нелинейно-оптические свойства нового класса ГКР-активных трековых наноструктур, формируемых по матричной технологии с использованием системы пор трековых мембран (острыйные структуры и системы полых нанотрубок).

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

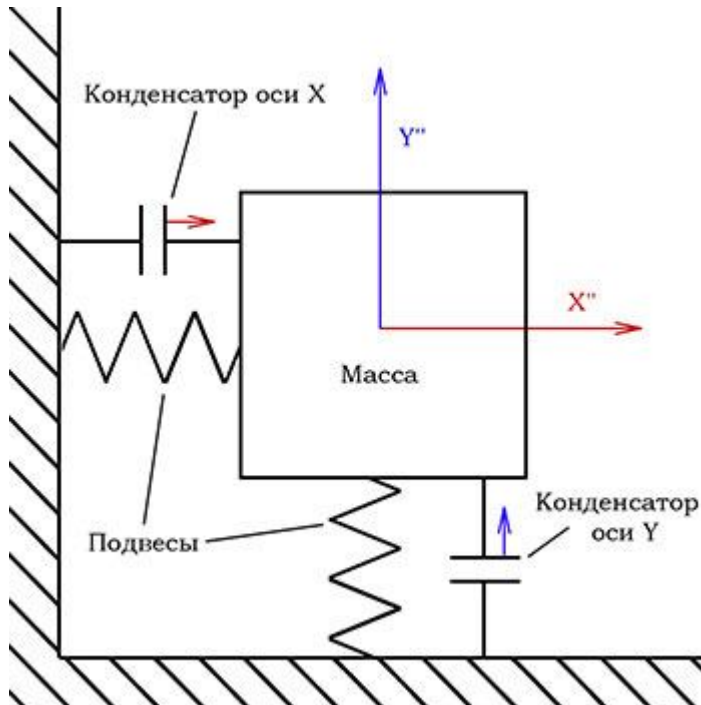
## Микро-электромеханические системы (МЭМС)



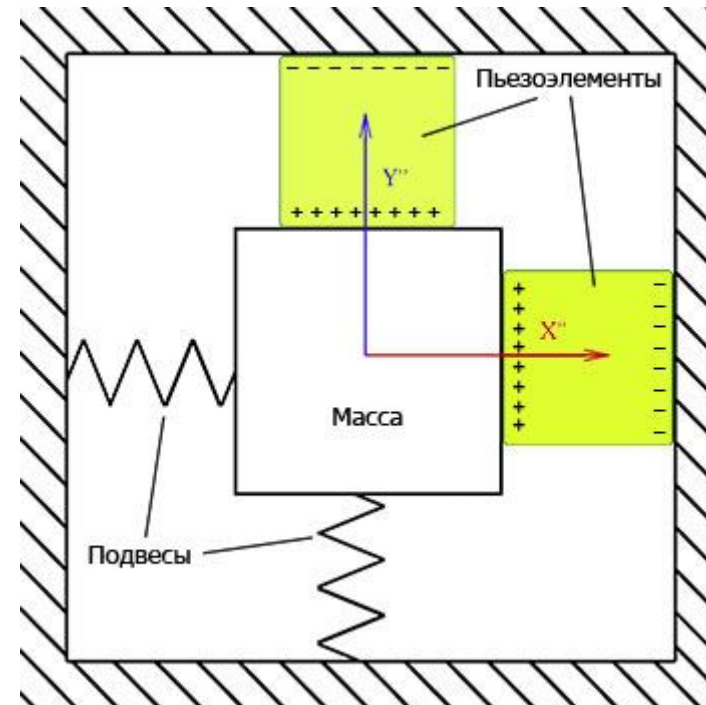
Принцип работы датчика ускорения и внешний вид МЭМС акселерометра

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Методы детектирования отклонения подвижной массы акселерометра



Использование конденсаторов

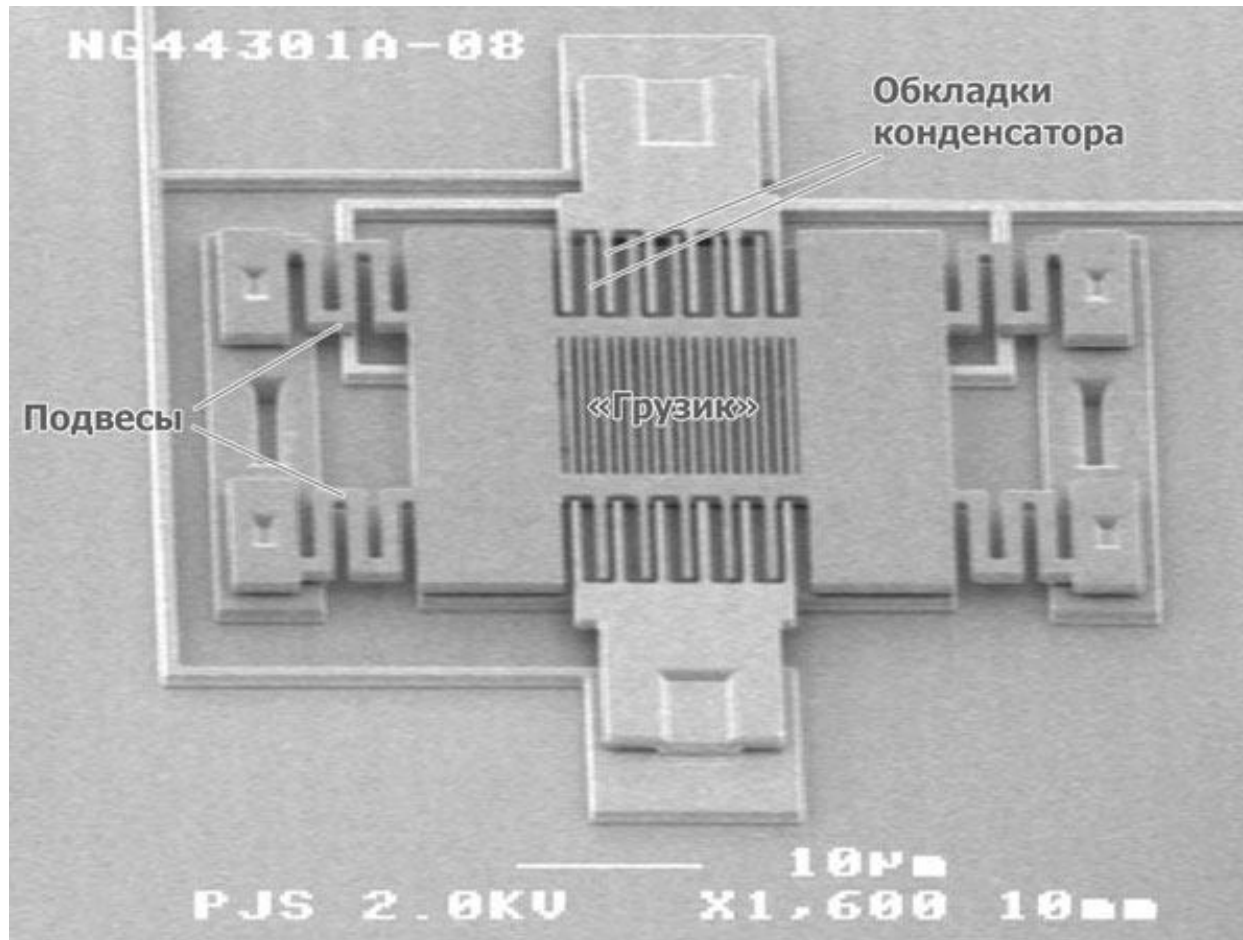


Использование  
пьезоэлементов



# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

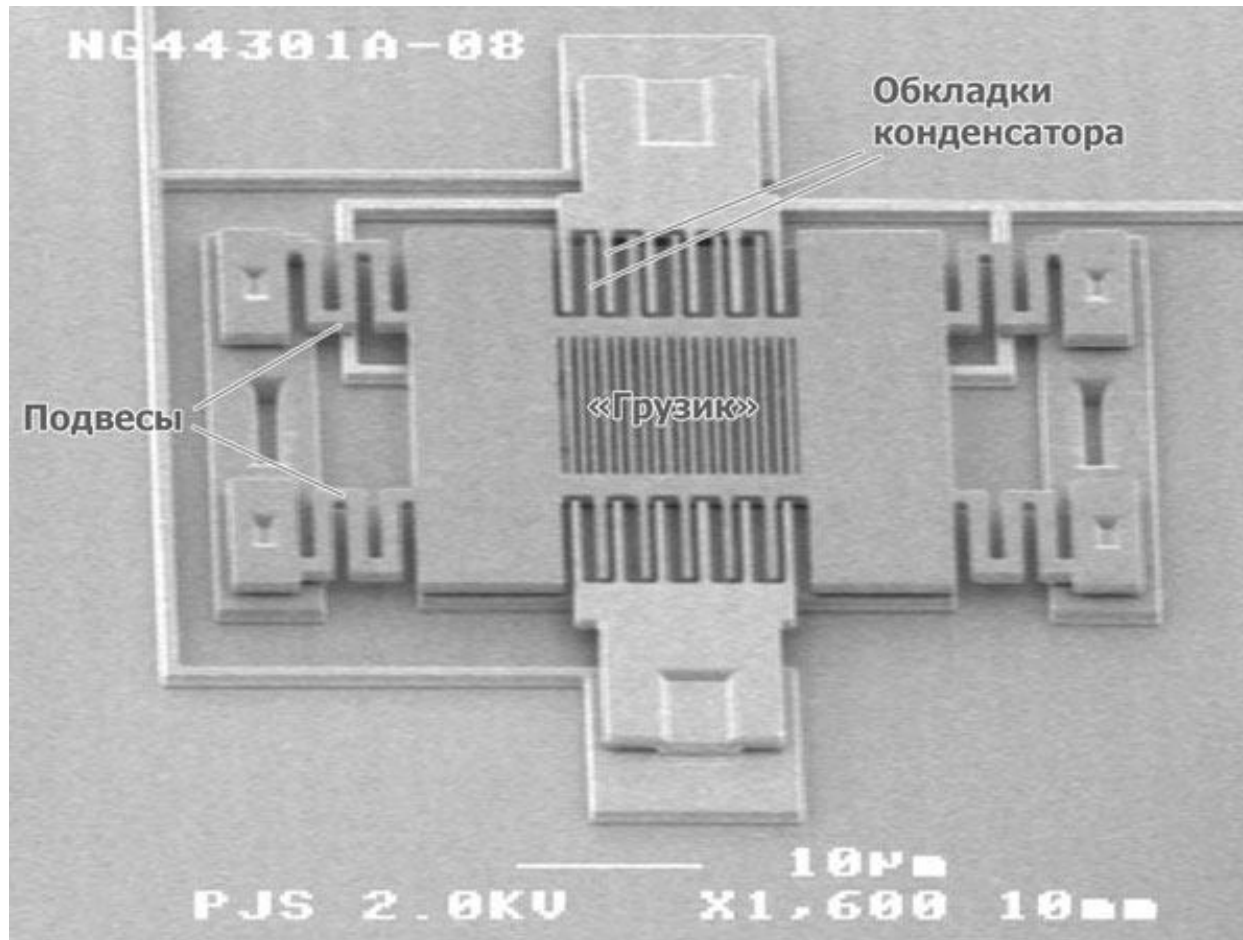
Простой миниатюрный MEMS-акселерометр разработки Sandia Labs



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

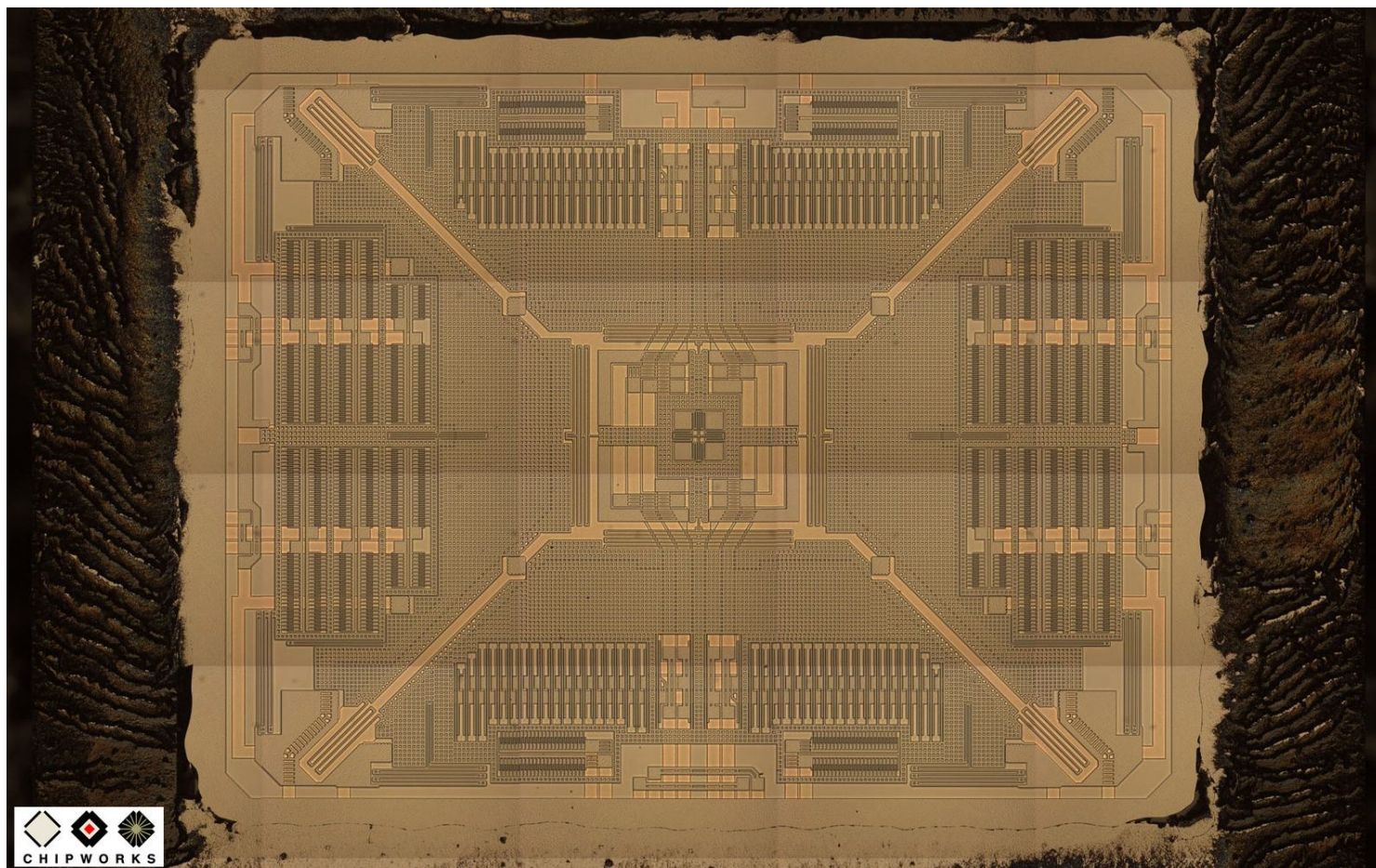
Простой миниатюрный MEMS-акселерометр разработки Sandia Labs



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

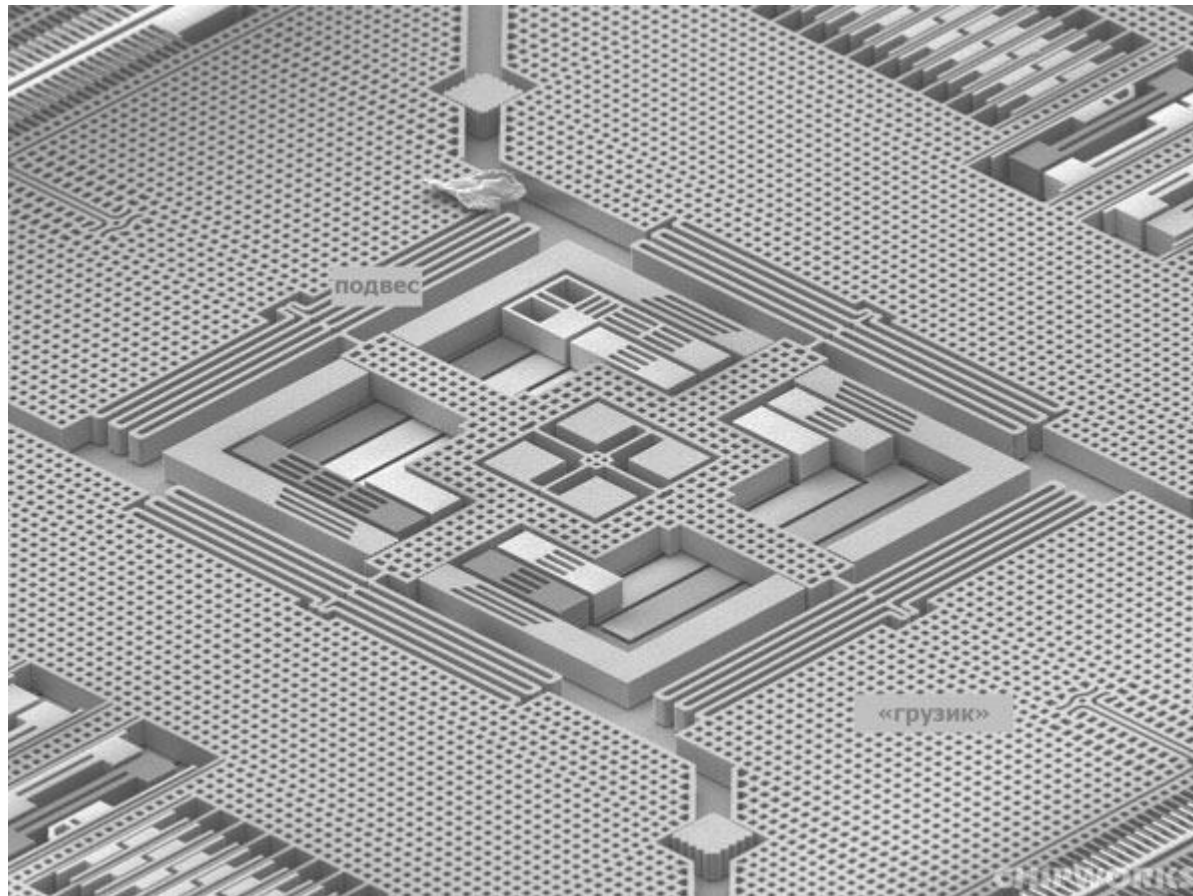
Гироскоп L3G4200D производства ST Microelectronics



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

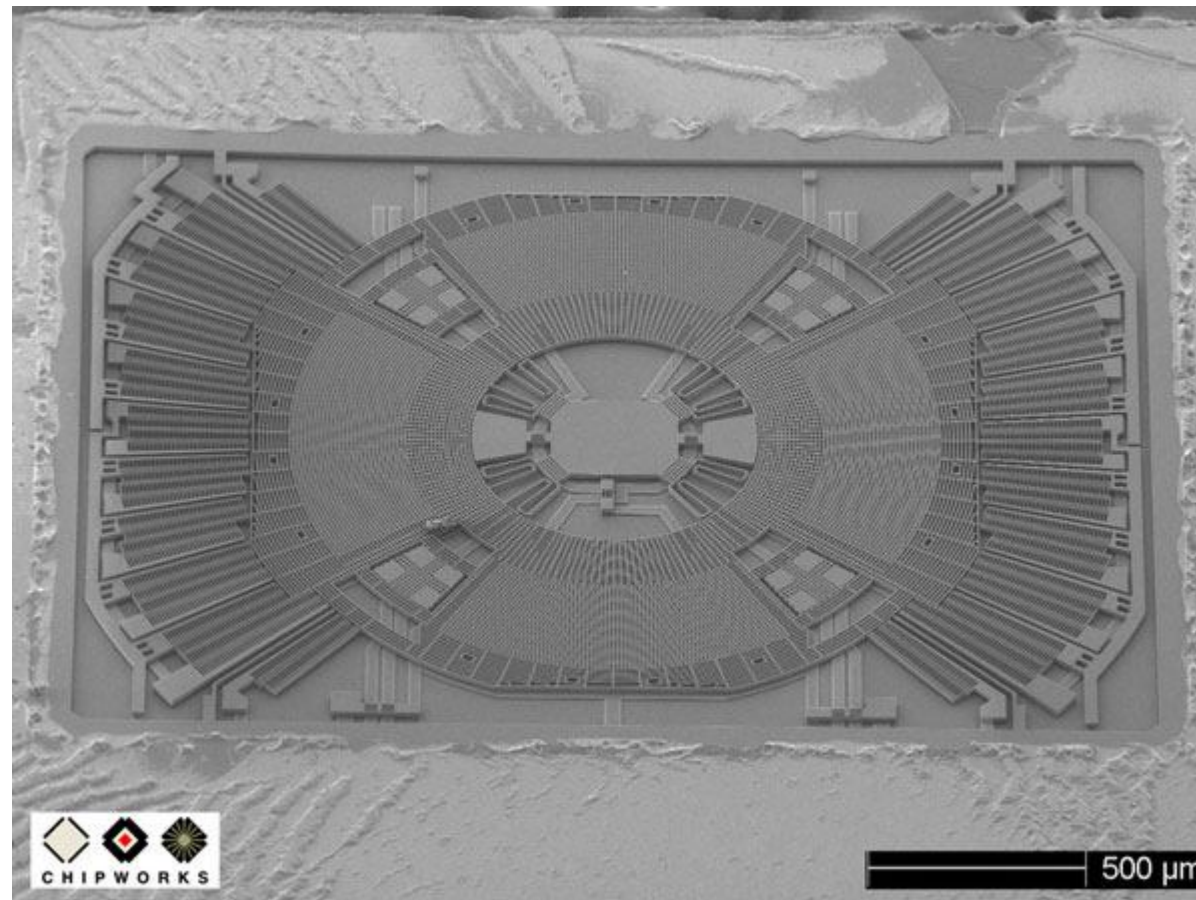
Гироскоп L3G4200D производства ST Microelectronics



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

**ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ**  
**«Технологии наноинженерии»**

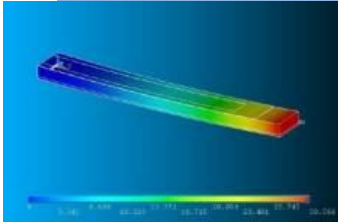
Гироскоп LYPR540AH фирмы ST Microelectronics



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Проектирование  
структуры компонентов  
наносистем



Функциональное  
тестирование  
(зондовая станция)



Формирование структуры  
(распыление)

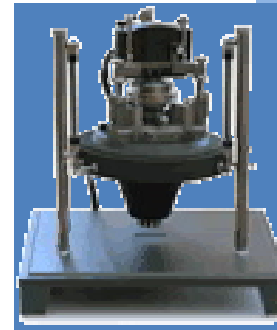


Формирование структуры  
(самоорганизация)



Формирование структуры  
(литография)

Измерения и контроль  
качества  
(микроскопия)



Испытания  
и сертификация





## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

### Для решения образовательных задач:

- проведение жидкостных процессов в рамках курсов по методам микроскопии, методам формирования структур
- подготовка образцов для работы
- выполнение вспомогательных работ
- применяется в следующих УМК:
  - УМК «Технологические процессы наноинженерии»
  - УМК «Методы литографии в наноинженерии»
  - УМК «Эллионные процессы и нанотехнологии»

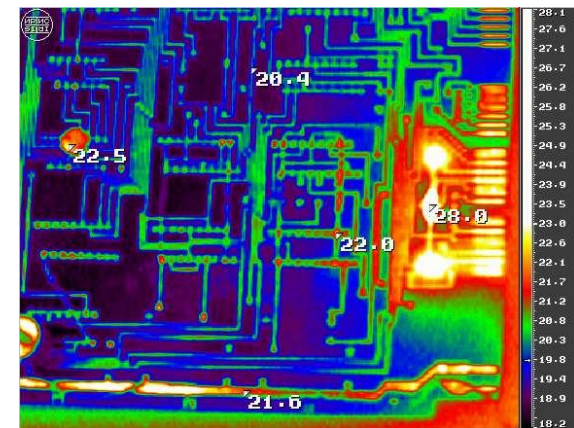
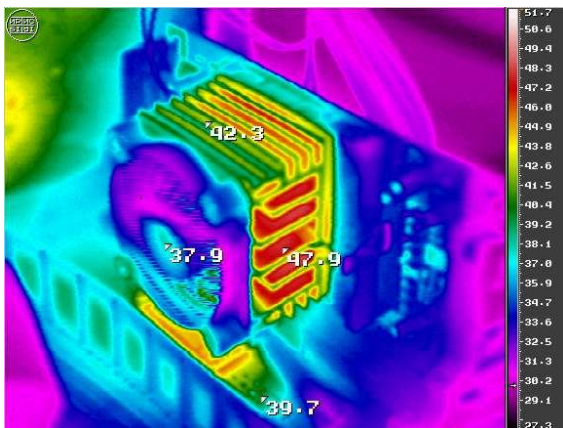
### Для решения экспериментальных задач:

- проведение жидкостных технологических процессов в рамках НИР по темам методы микроскопии
- подготовка подложек и образцов перед работой
- проведение вспомогательных процессов

# ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

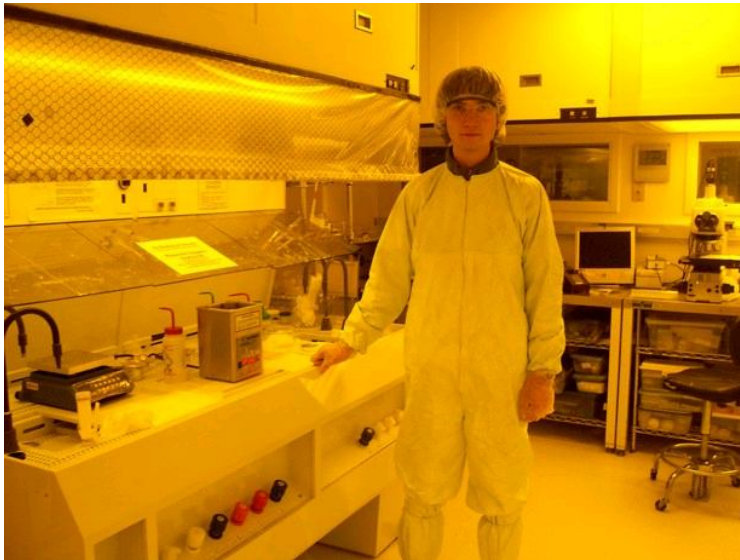


- Виброиспытания
- Испытания на воздействия температуры и влажности
- Дефектоскопия и мониторинг тепловых полей






## ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



- Обучение в магистратуре/аспирантуре университета Калифорнии, Санта Круз (США) (инженерная школа: [www.soe.ucsc.edu](http://www.soe.ucsc.edu), университет: [www.ucsc.edu](http://www.ucsc.edu))
- Эйндховенской Технологическом Университете (Нидерланды)
- Политехнический Институт г.Турина (Италия)
- Политехнический Институт г.Гренобль (Франция)



**ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ  
«Технологии наноинженерии»**

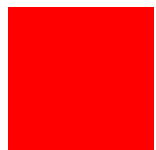


**НАНОИНЖЕНЕРИЯ**

**[www.iu4.ru](http://www.iu4.ru)**

---

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»



# Вопросы

