



НАНОИНЖЕНЕРИЯ

«Технологии наноинженерии»

С.В.Токарев

НОЦ «Нанотехнологические системы и наноэлектроника»

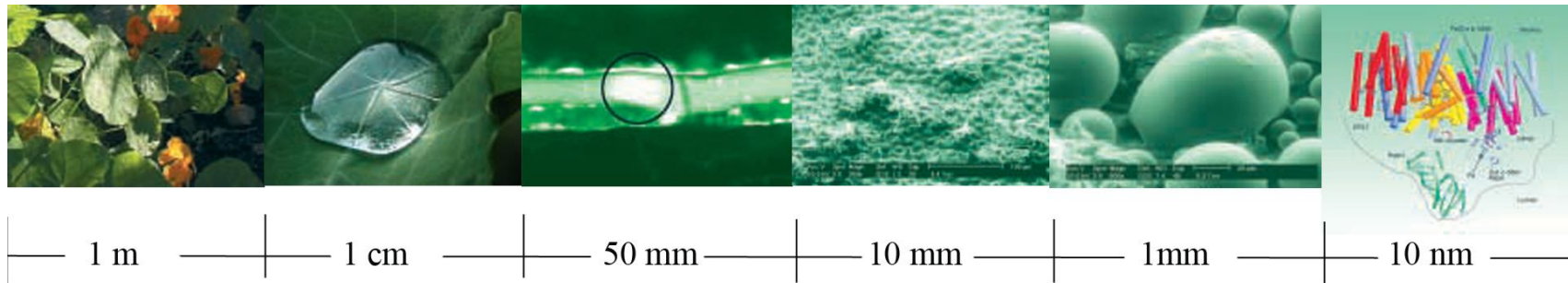
Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

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)

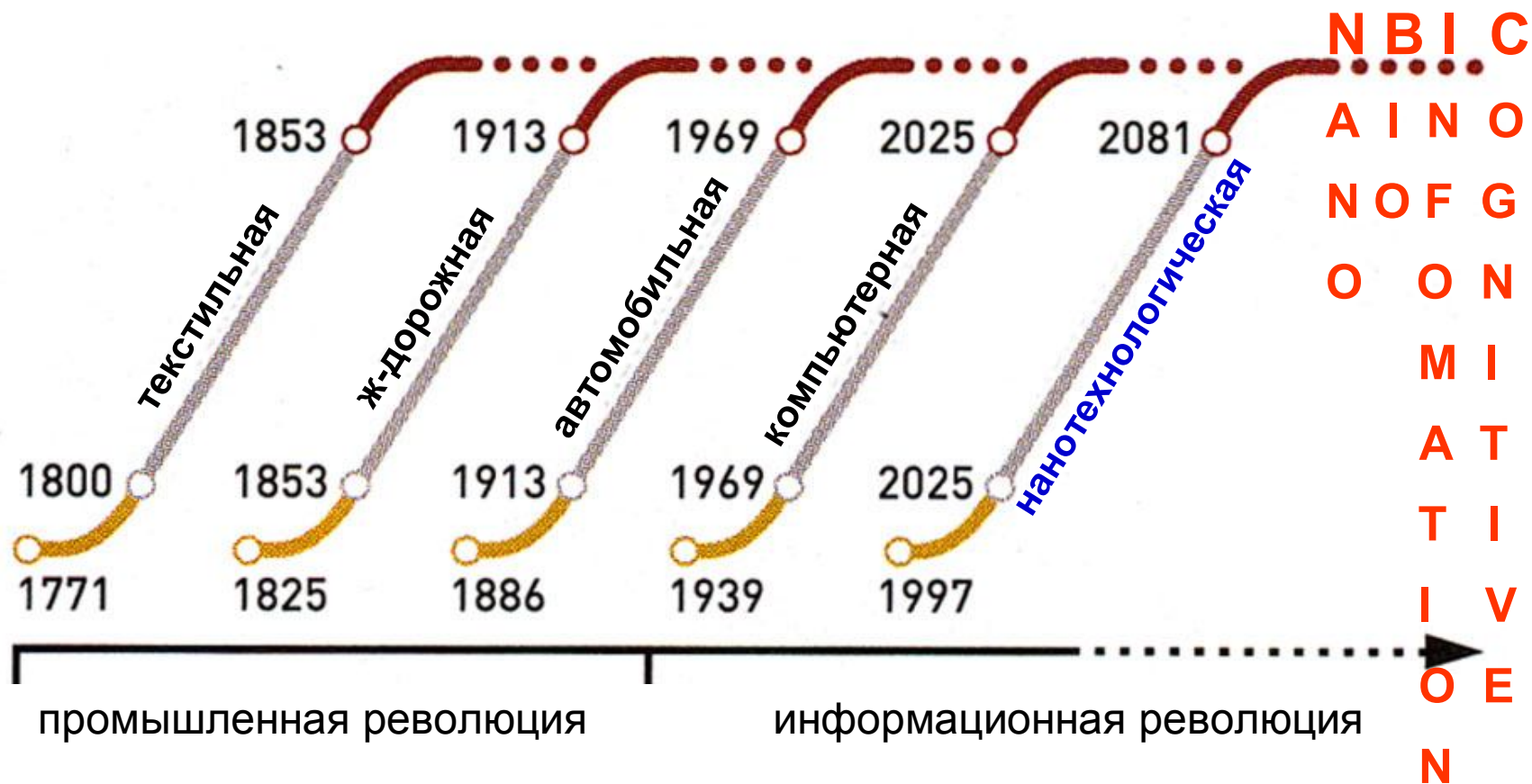
«**НАНО**» происходит от греч. «**НАНОС**» = карлик



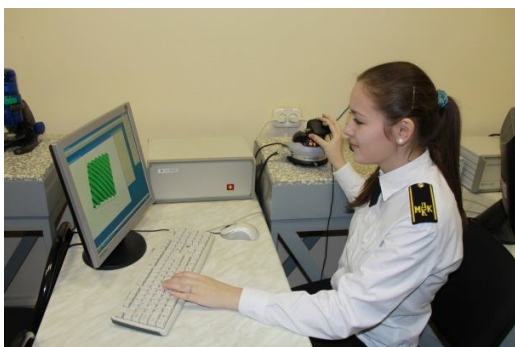
Нанотехнологии "совокупность приёмов и способов получения, обработки или переработки сырья, материалов, характерные размеры, либо точности изготовления которых составляют величины на уровне или ниже 100 нм.

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

НАНОТЕХНОЛОГИИ - ещё одна революция!



ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



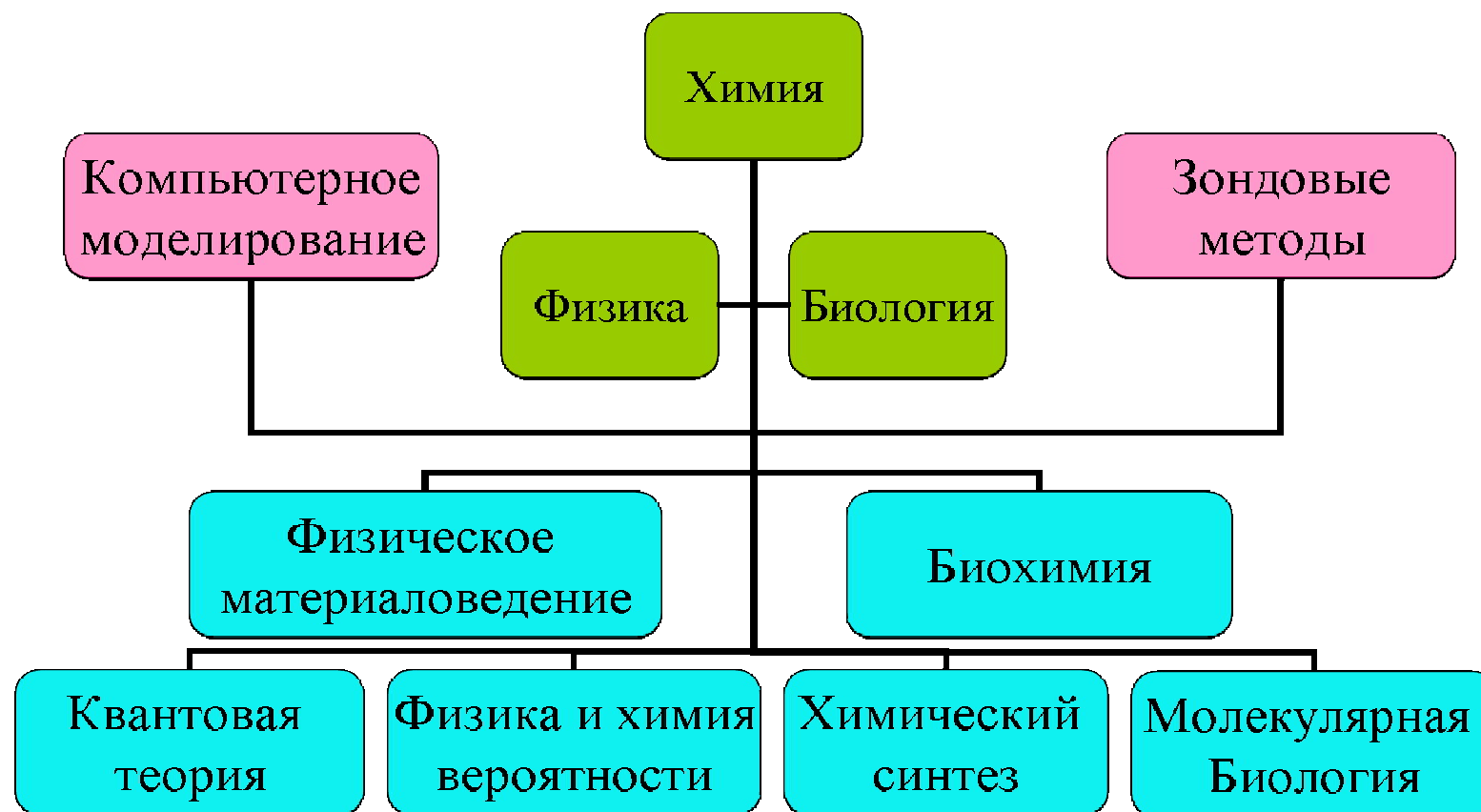
Лаборатория специализируется на проведении исследований микро и наноструктур.

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.

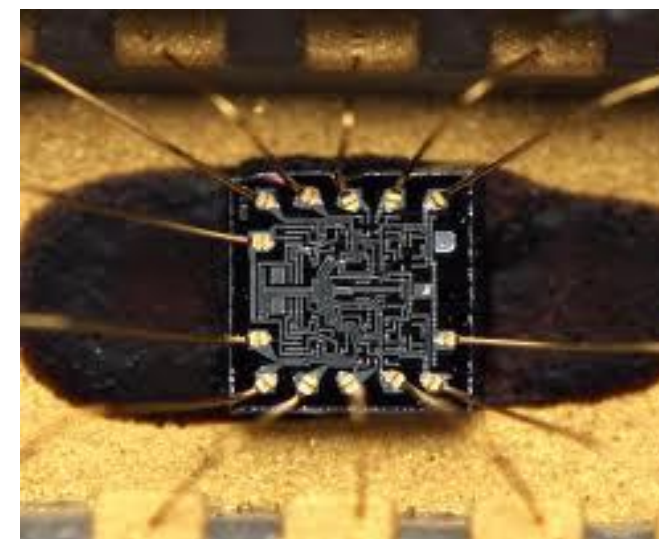
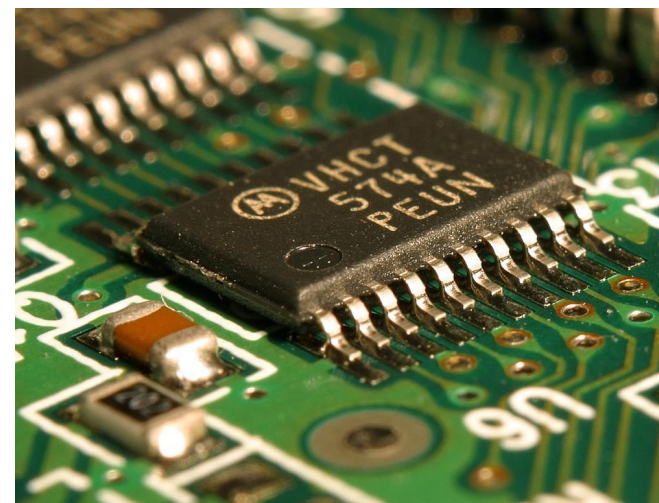


ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

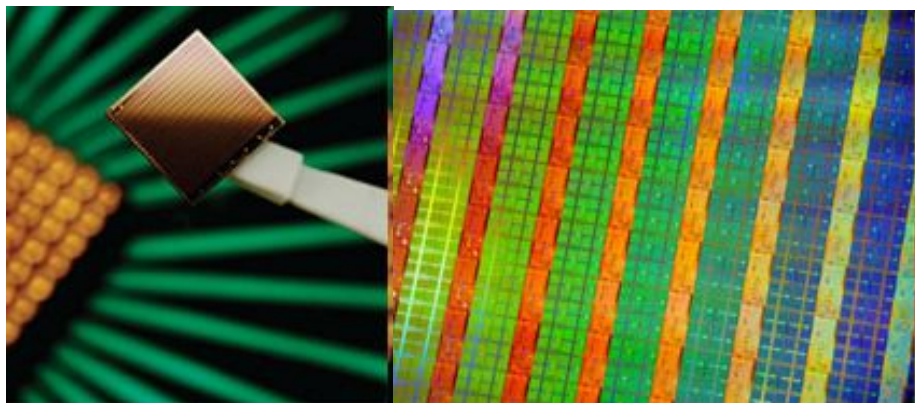
Кристалл микроэлектронике — размещённая на полупроводниковой пластине или плёнке электронная схема произвольной сложности.

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»

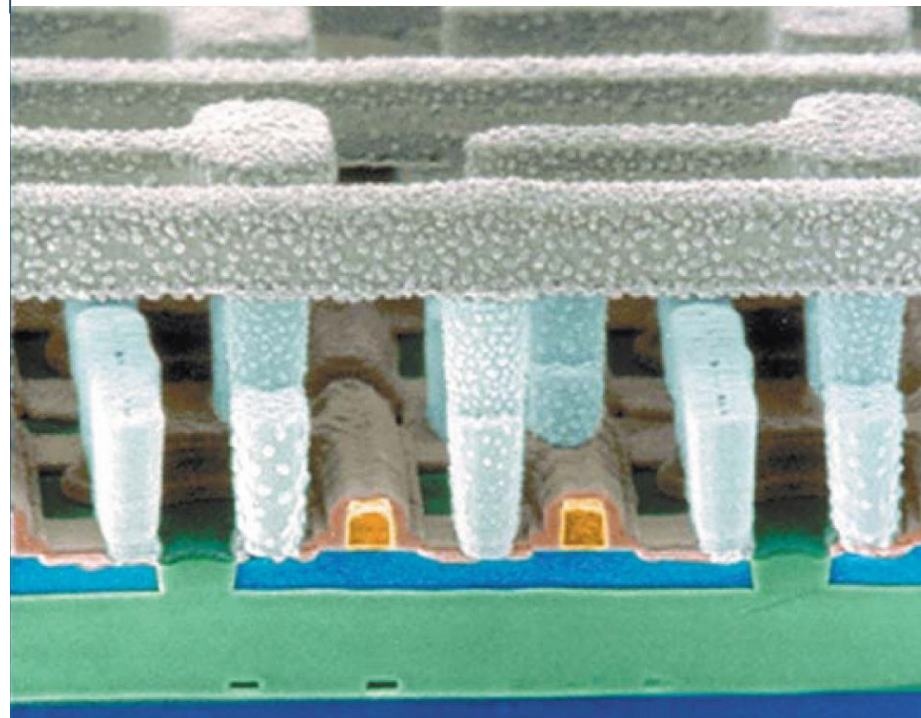


Тенденций развития ИС - миниатюризация функциональных устройств.

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

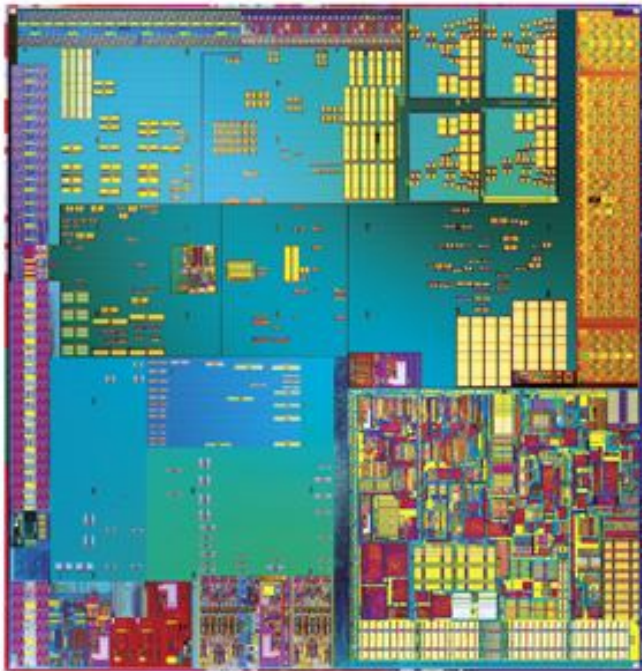
4 мкм



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.

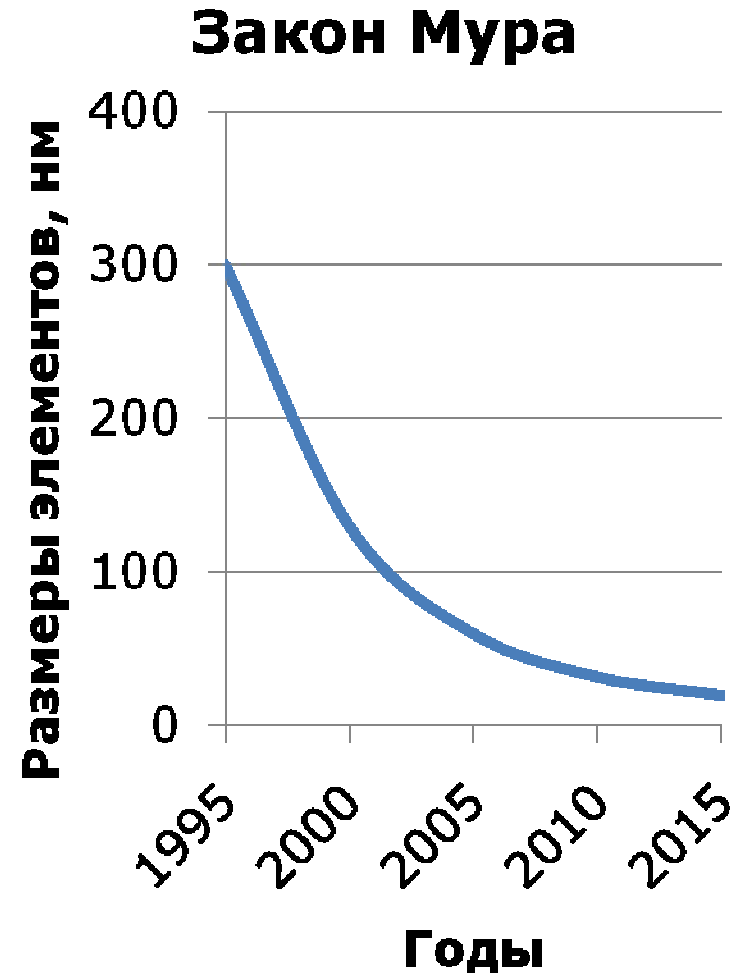
Устройство строится на базе встроенного компьютера, который в то же время не воспринимается пользователем устройства как компьютер.



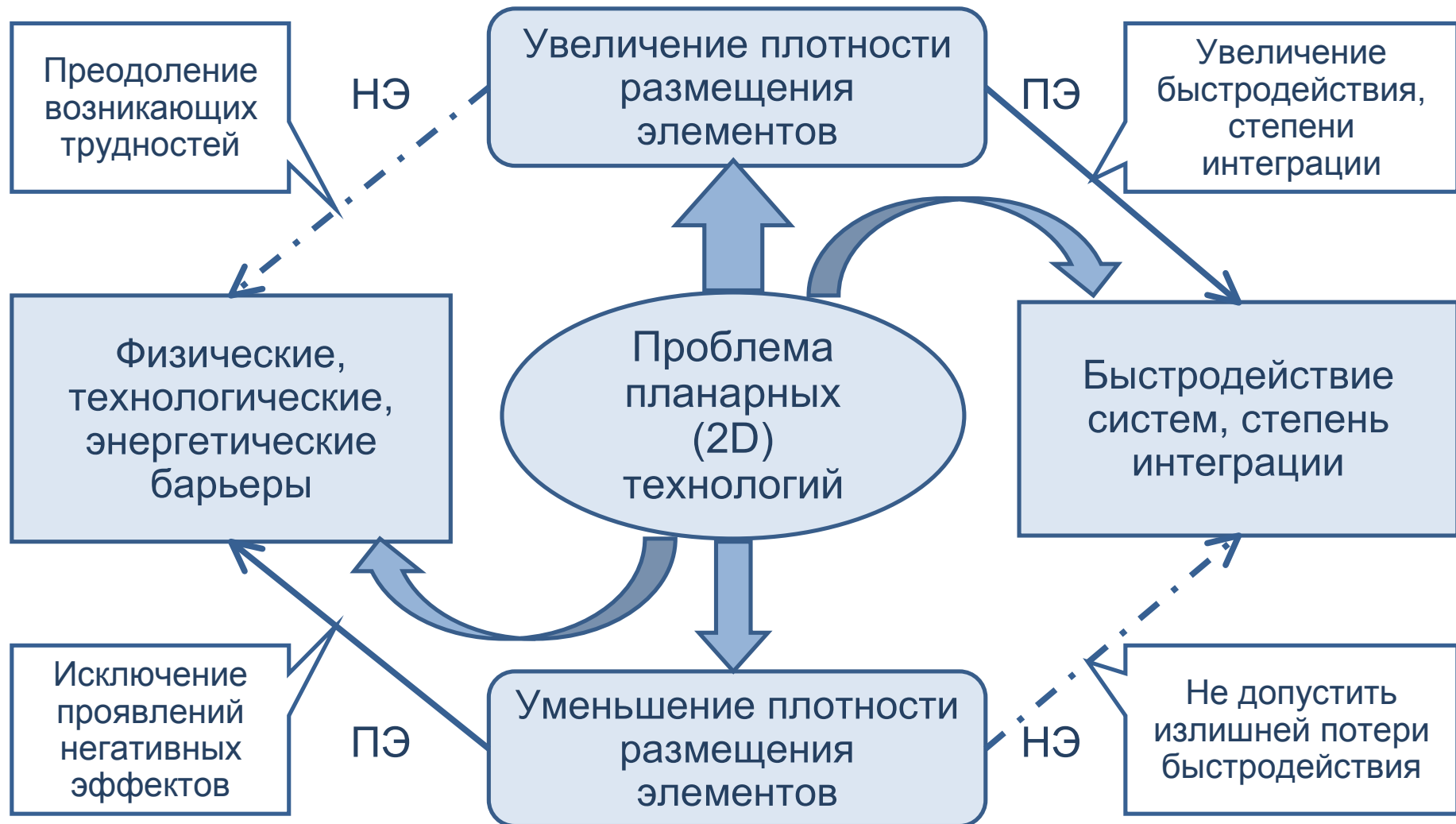
- минимальное собственное энергопотребление
- минимальные собственные габариты и вес;
- собственная защита (корпус) минимальна и обеспечивается прочностью и жёсткостью конструкции и применёнными элементами;
- функции отвода тепла (охлаждения) обеспечивают минимум требований тепловых режимов.
- микропроцессор 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^2
- Объемная плотность в 3D-системах может достигать до $1 \times 10^{14} - 5 \times 10^{14} \text{ см}^3$
- Трехмерные наноструктуры работают при плотности тока в 3-4 раза меньше, чем планарные системы

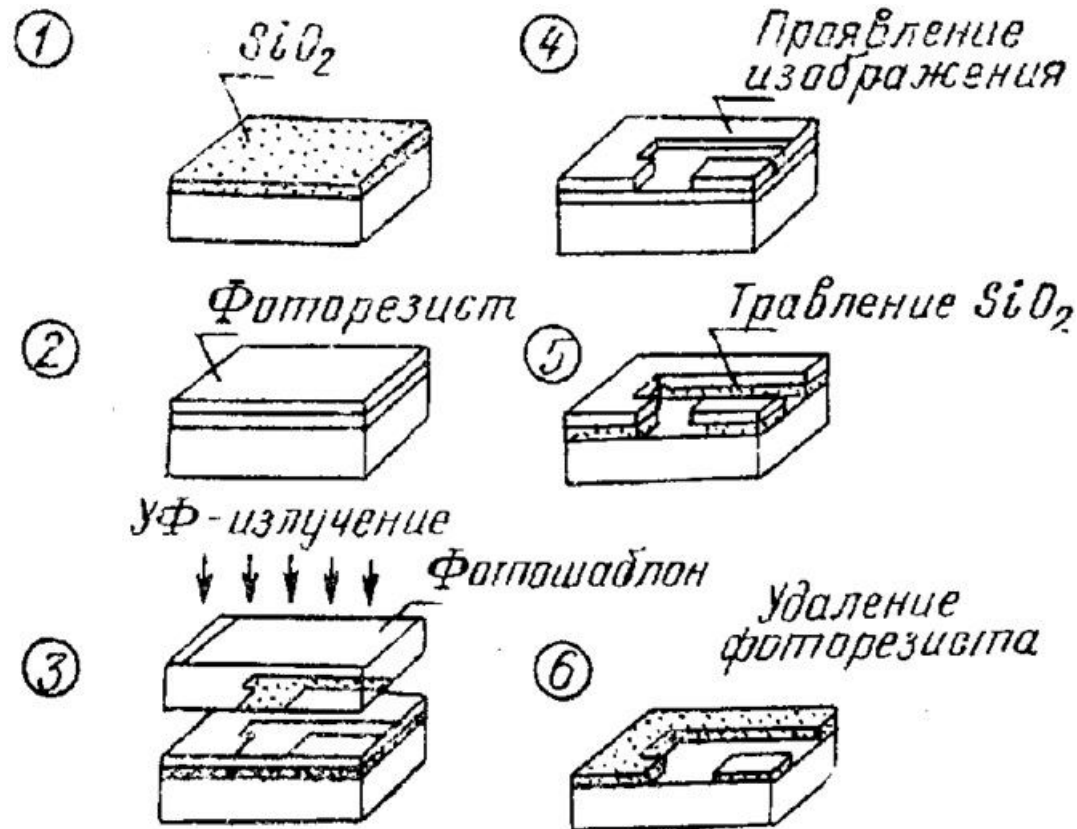


ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



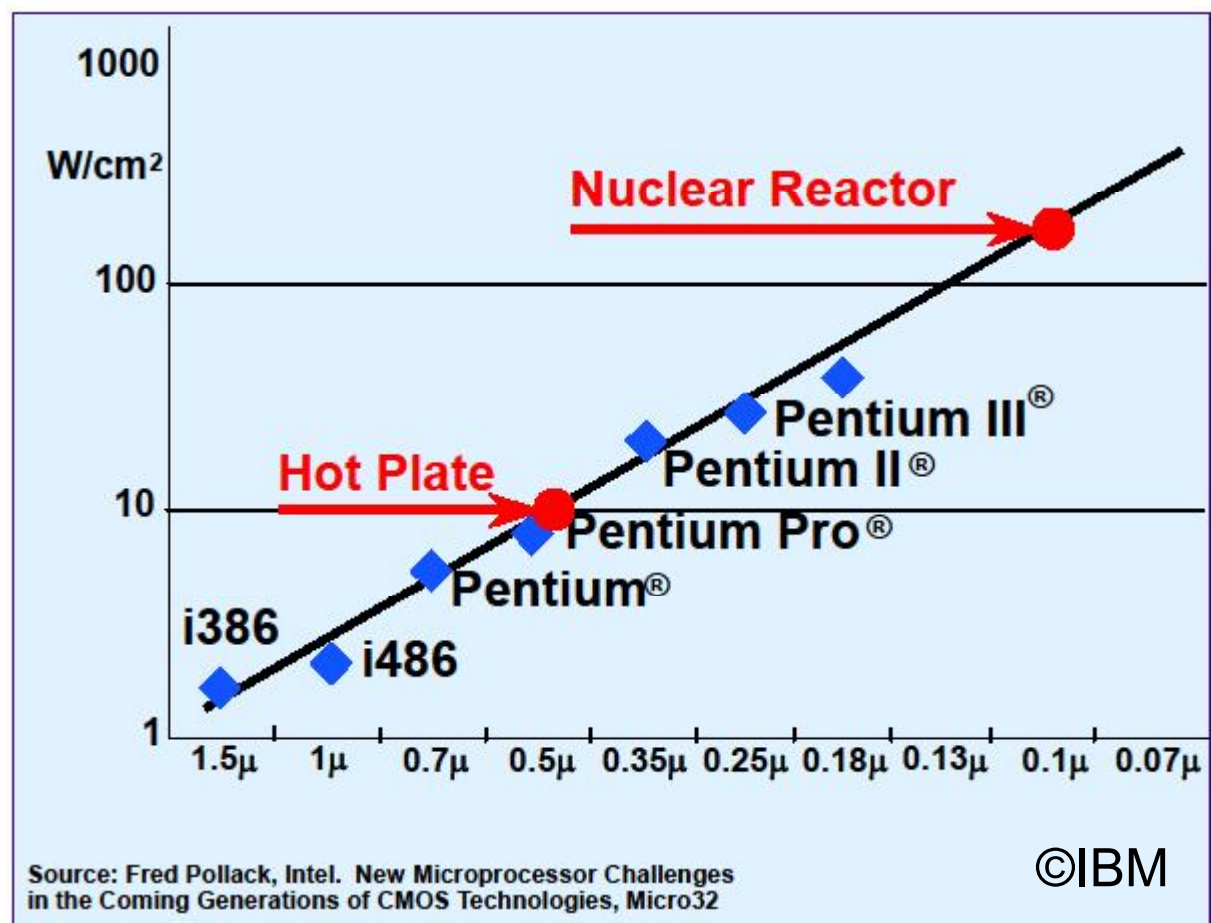
ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Технологические шаги процесса литографии



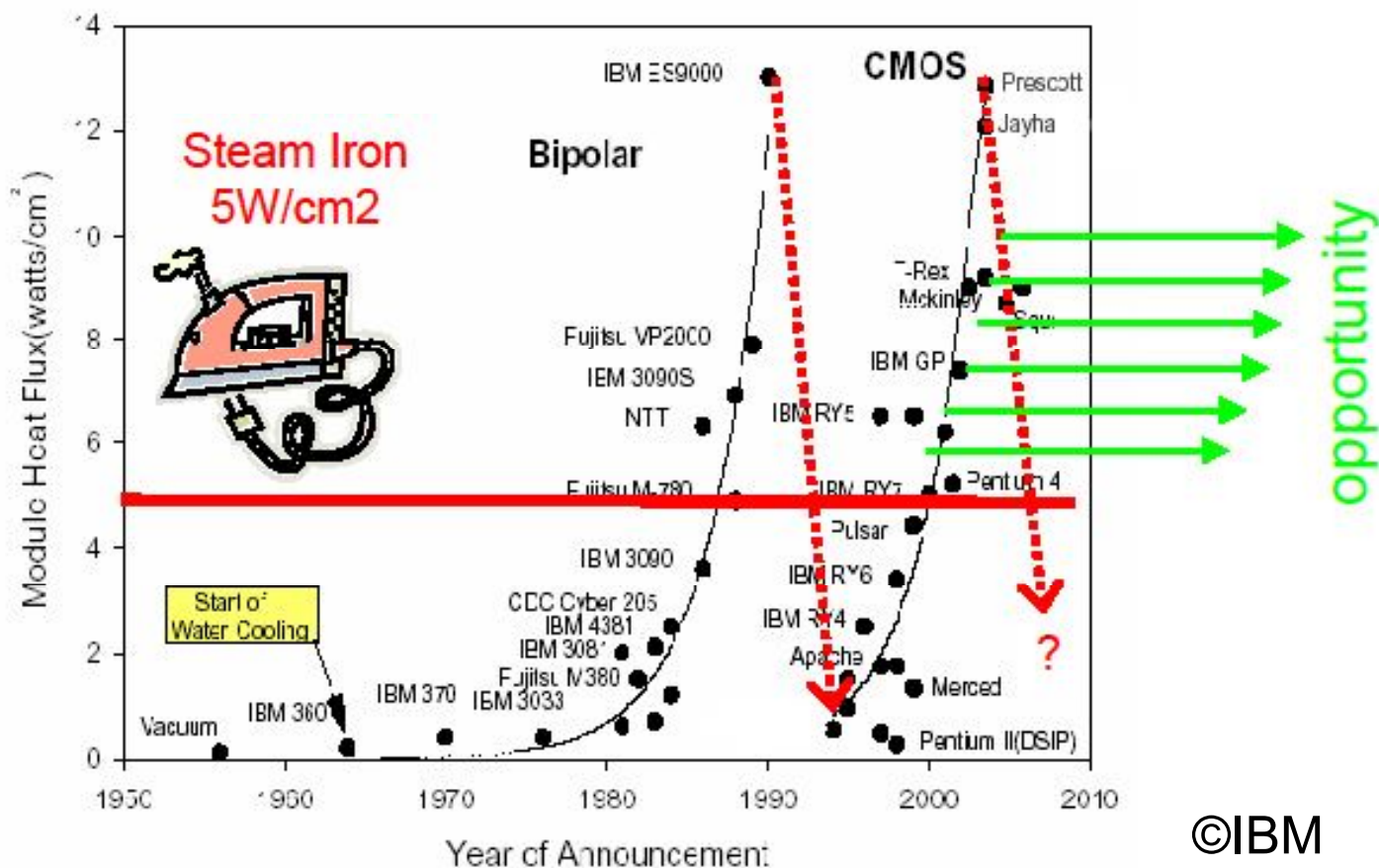
ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Плотность потребления энергии микропроцессоров

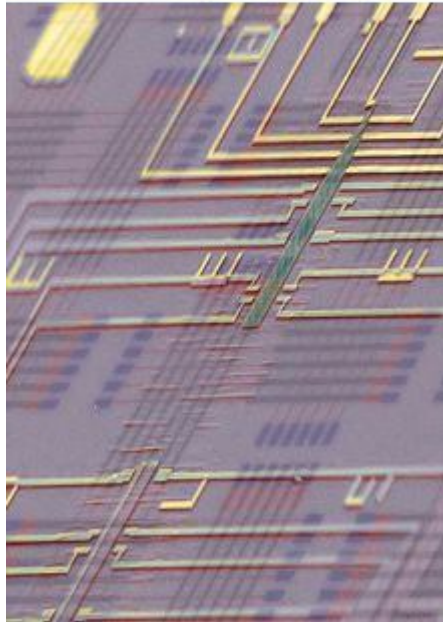
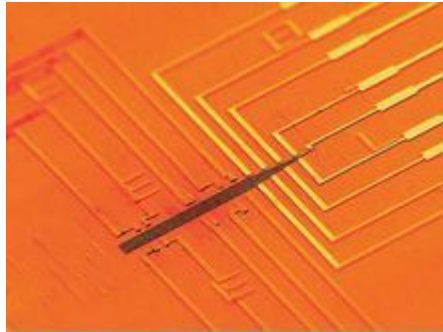


ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии нанотехнологии»

Плотность потребления энергии микропроцессоров



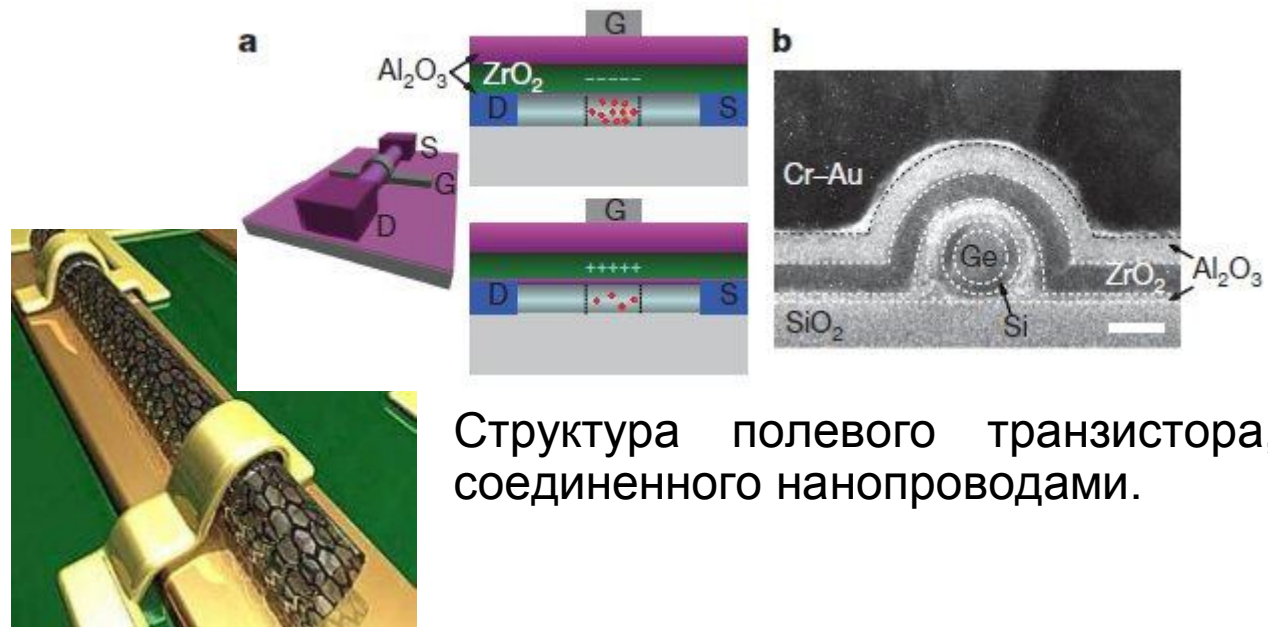
ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



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

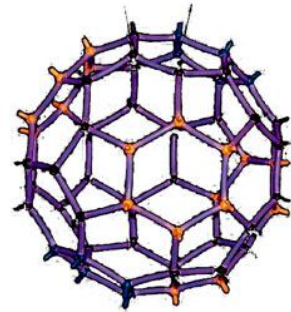


Структура полевого транзистора, соединенного нанопроводами.

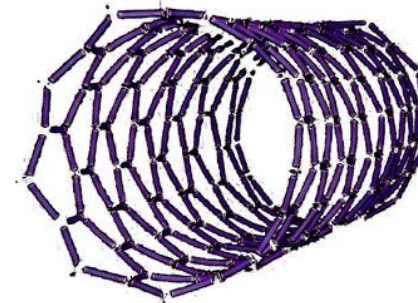
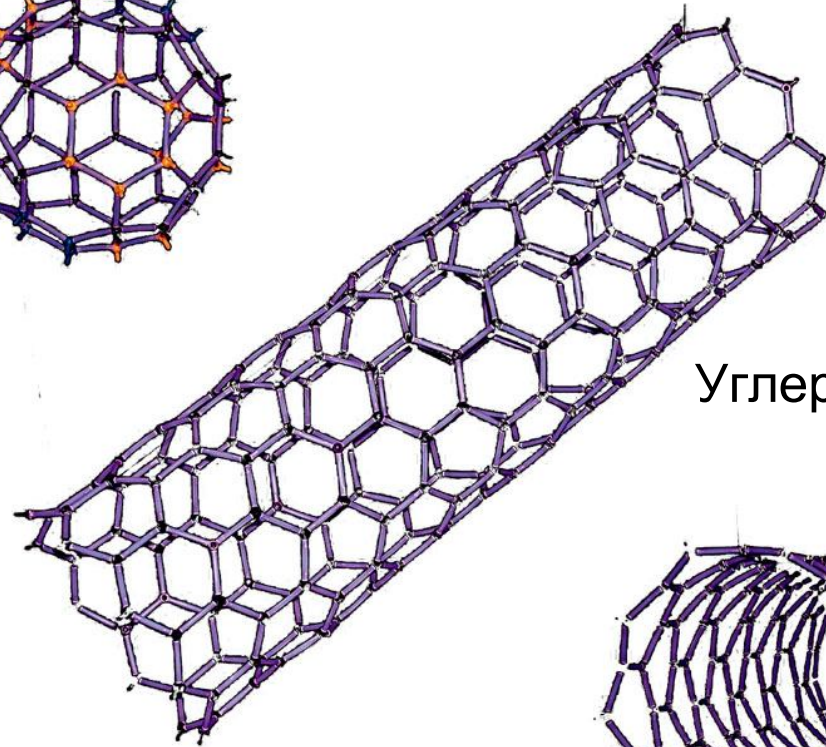
ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ
«Технологии наноинженерии»

Фуллерены – «нанокирпичи» из углерода

Шарик C_{60}



Углеродные нанотрубки

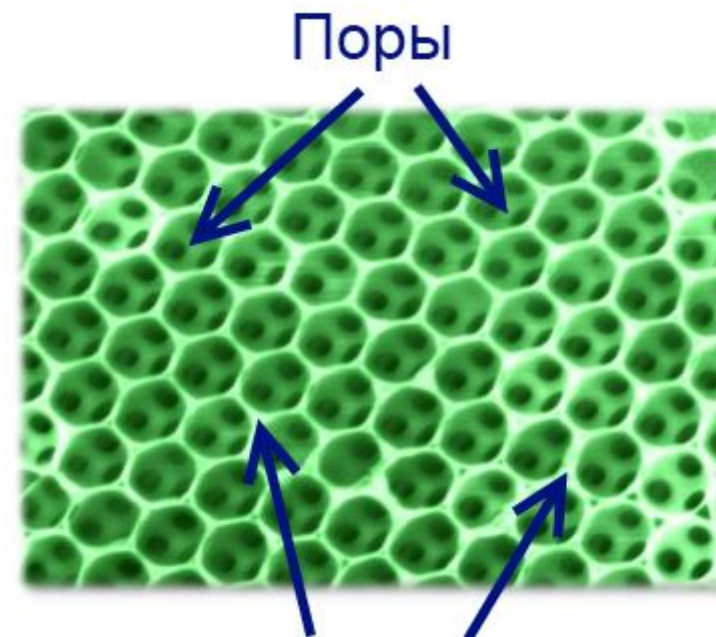


ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

- 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

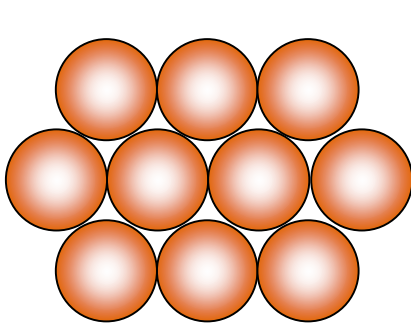


Оксид алюминия

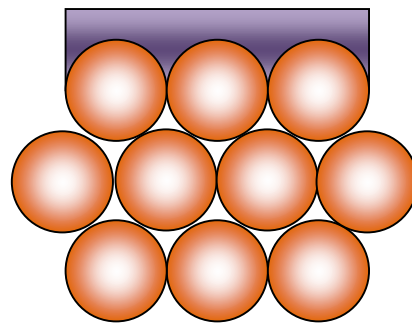
Фотонный кристалл на
основе оксида алюминия

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

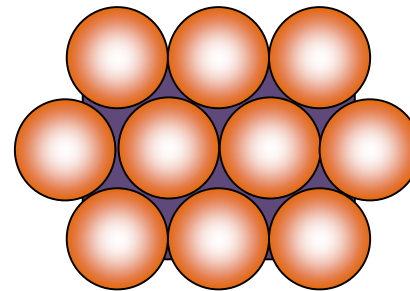
- Регулярная упаковка глобул SiO_2 представляет собой фотонный кристалл, содержащий структурные пустоты размерами от 160 до 400 нм.
- Для получения структур с заданными характеристиками проводят синтез композитных материалов за счет изменения структуры решетки опала.



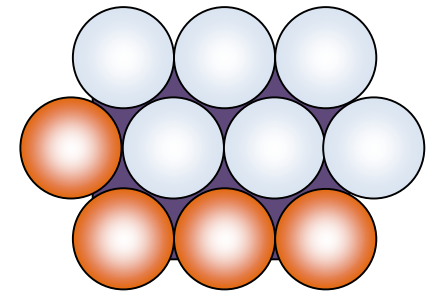
Чистый
опал



Опаловая
матрица с
тонкой пленкой



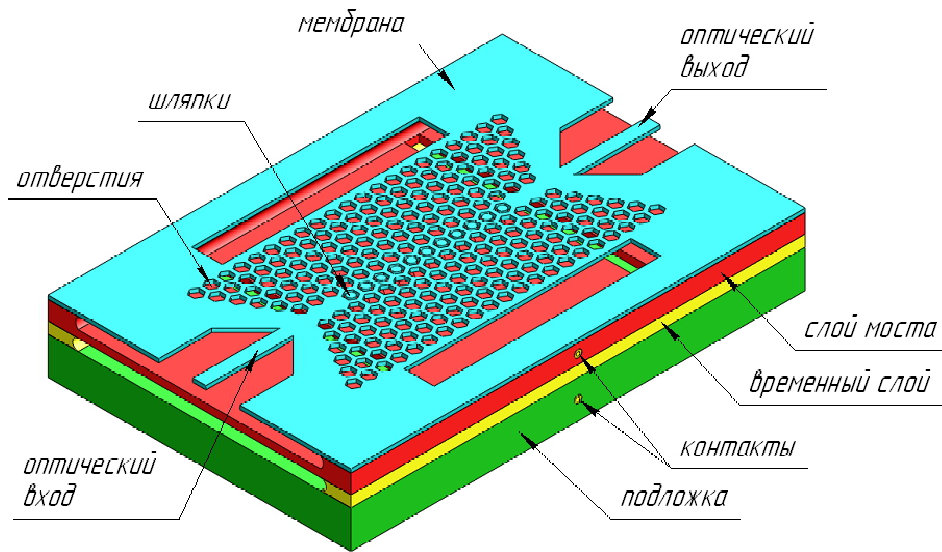
Опаловая матрица
с материалом
внедрения



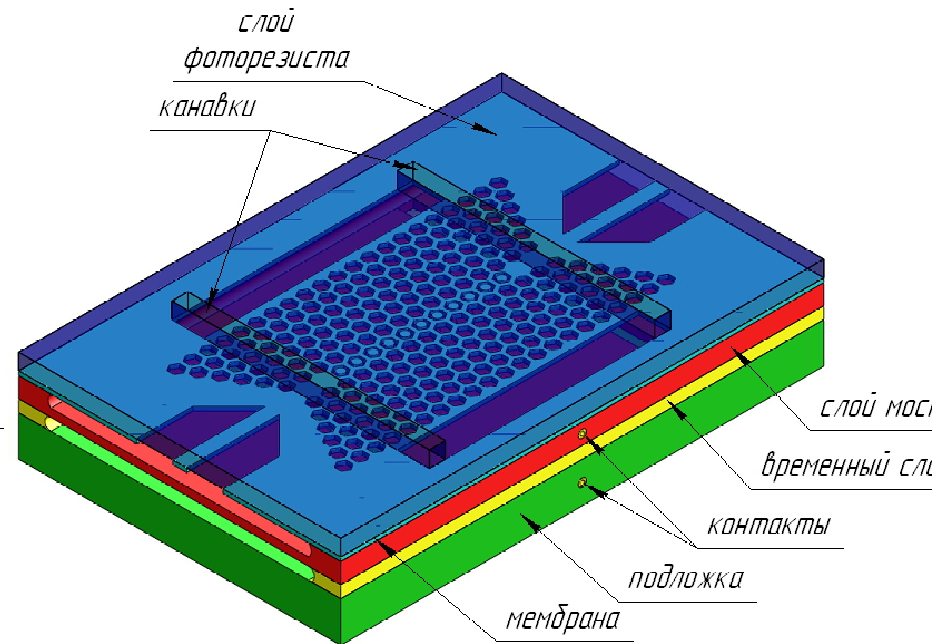
Инверсный
опал

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Фотонные системы с перестраиваемой кристаллической структурой



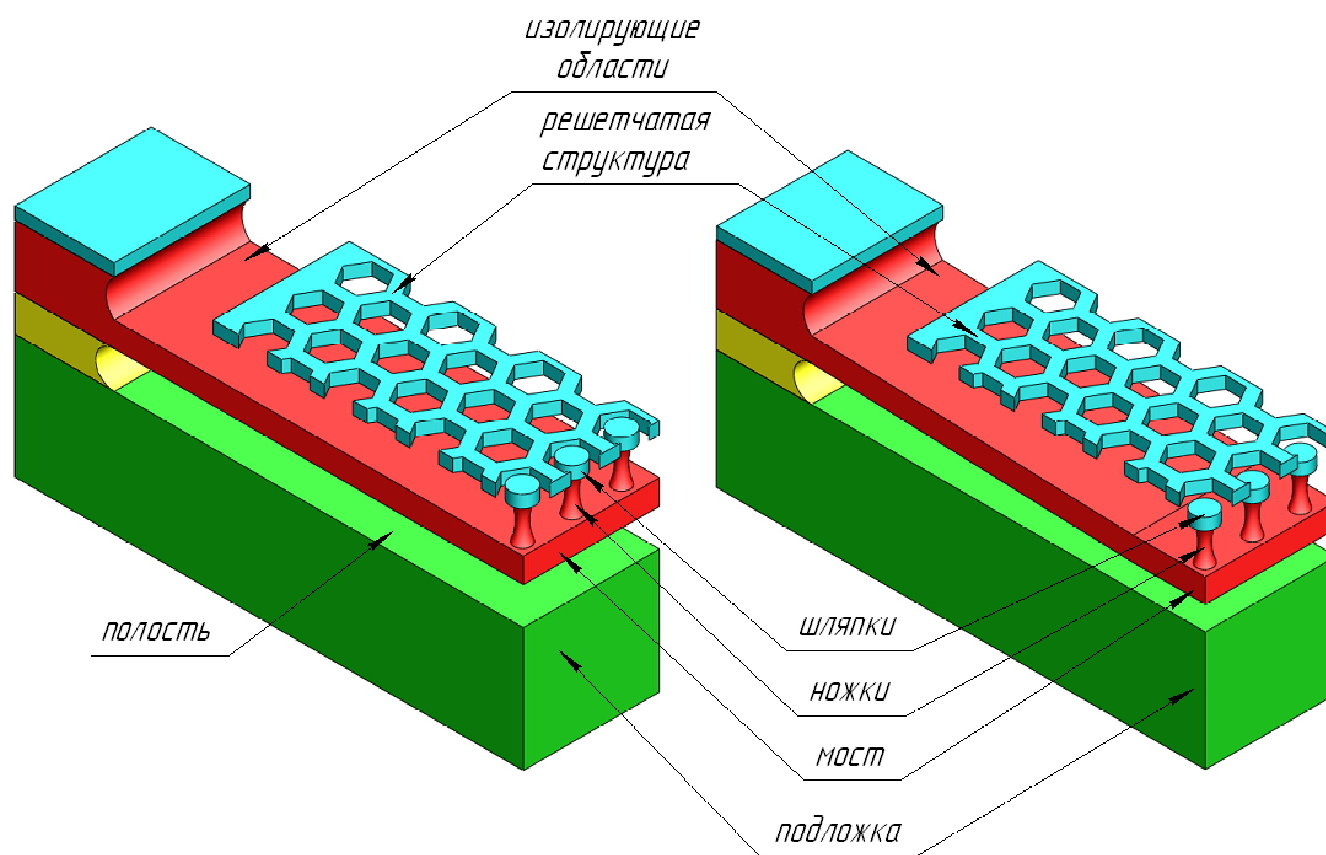
Общий вид перестраиваемой структуры



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»

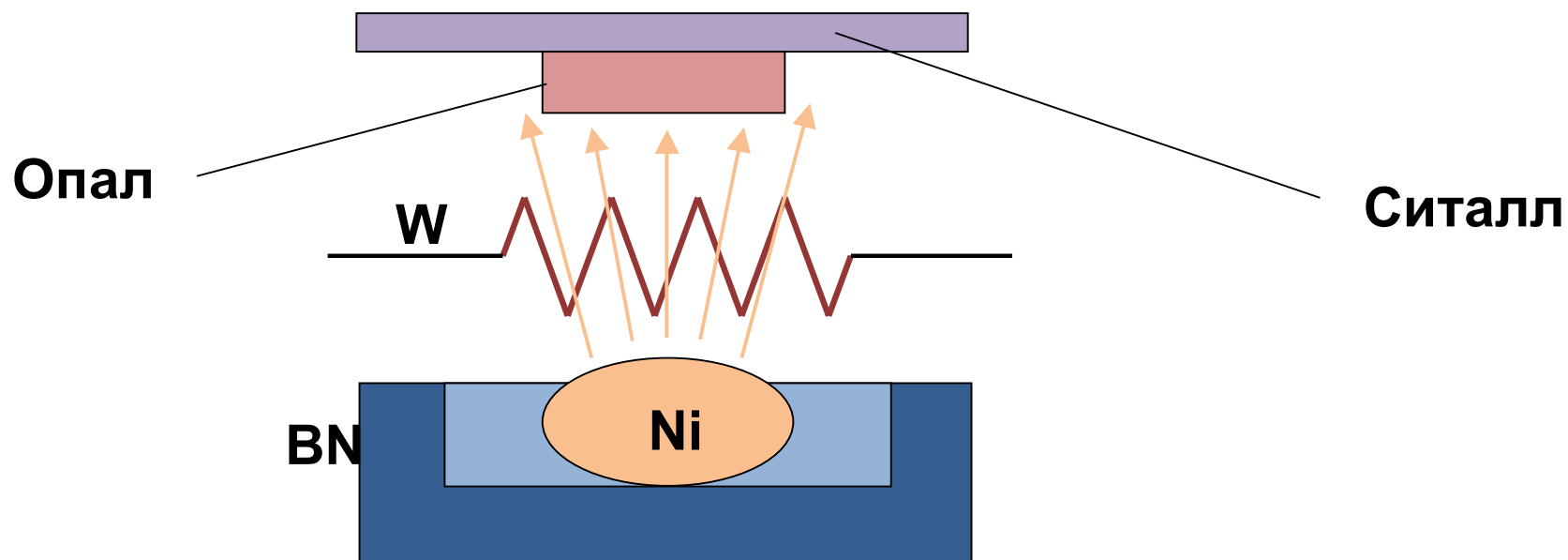
- Введение в виды микроскопии
- Базовые понятия о микро- нано- структурах
- Оптическая микроскопия
- Конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния света
- Сканирующая зондовая микроскопия
- Анализ методов микроскопии, по средствам оценки полученных результатов



ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Метод термовакуумного напыления

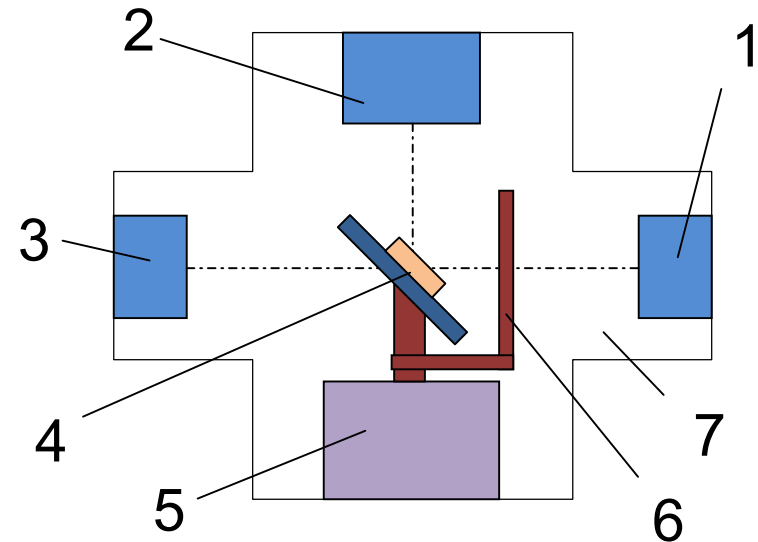
- Наиболее прост в реализации
- Имеет ограничения по наносимым материалам
- Обладает самой низкой энергией частиц при нанесении (kT_u)



ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Метод магнетронного распыления

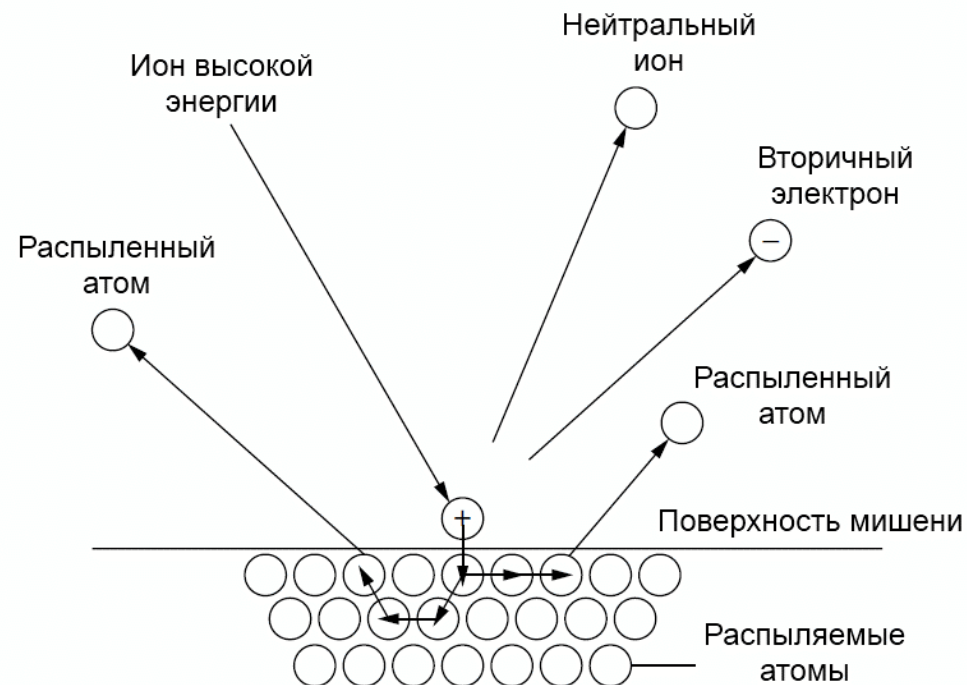
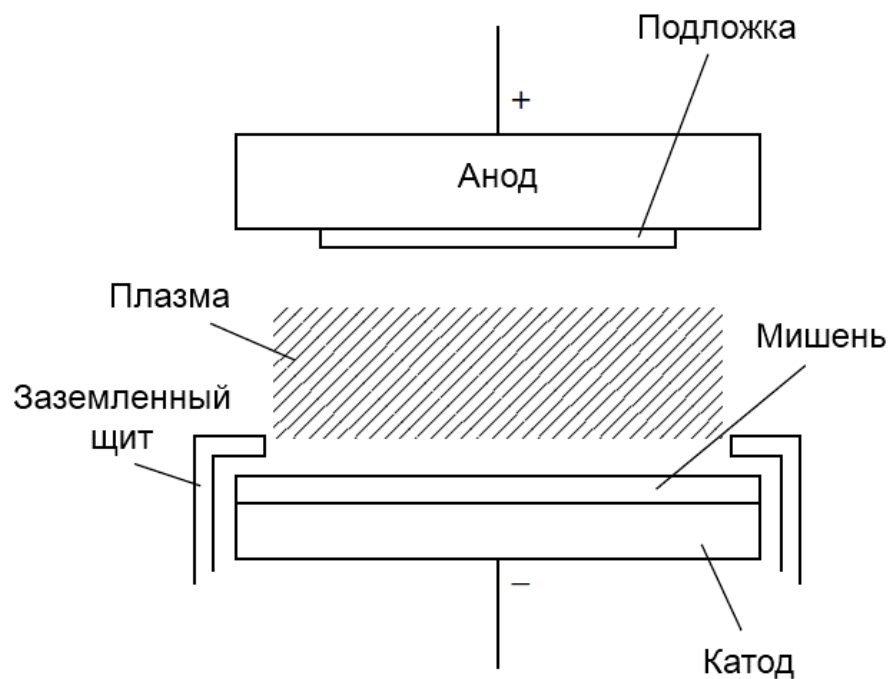
- Позволяют осаждать практически любые материалы тонких пленок
- Энергия осаждаемых частиц от единиц до сотен эВ
- Позволяют использовать подложки большего размера
- Возможно нанесение многослойных и многокомпонентных пленок



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»

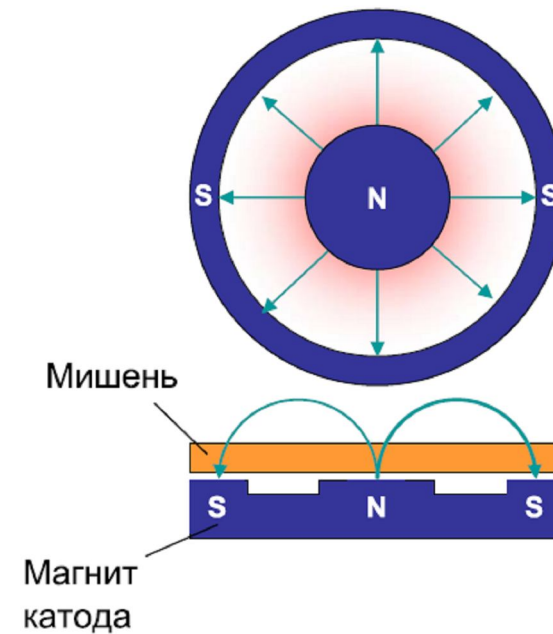
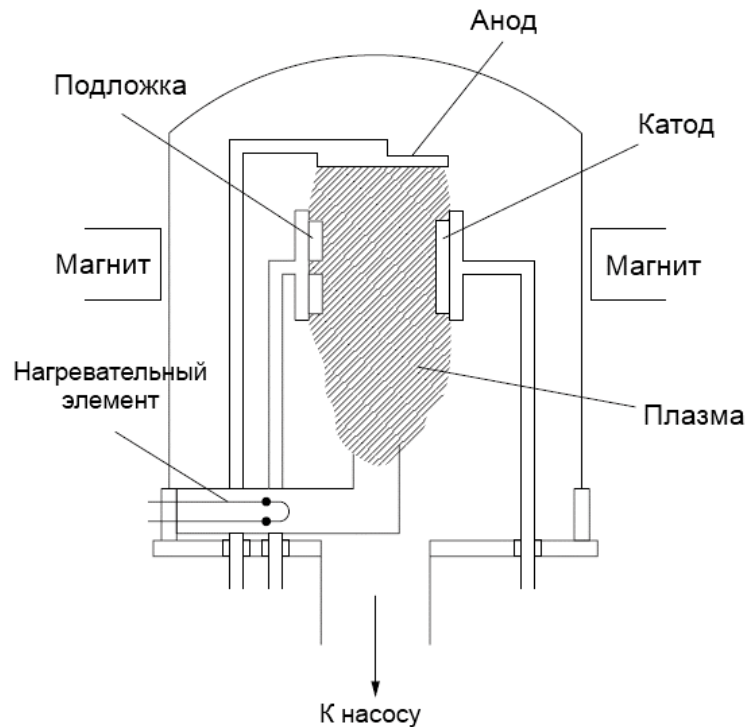
Метод магнетронного распыления



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

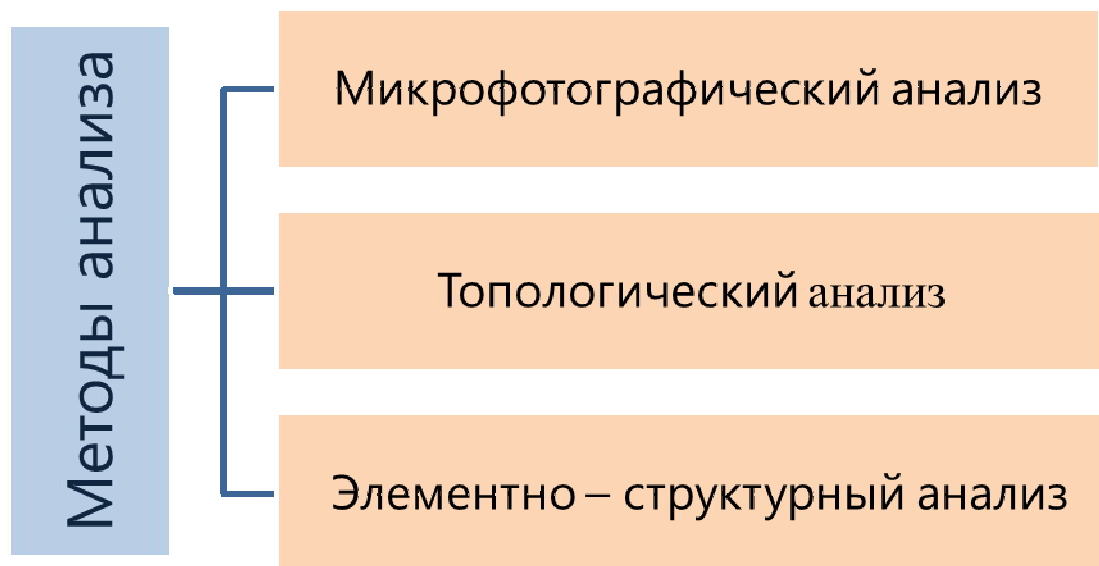


IntelPlay QX3

A2

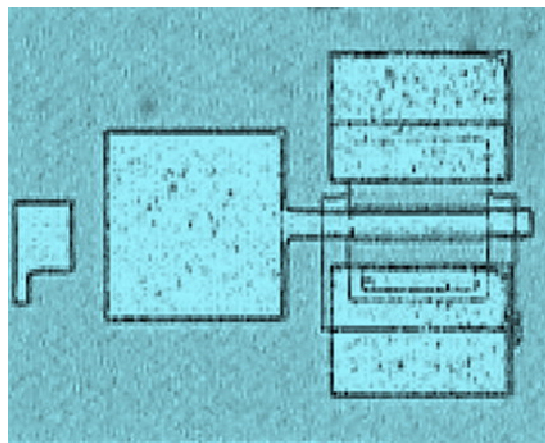
ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

- 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

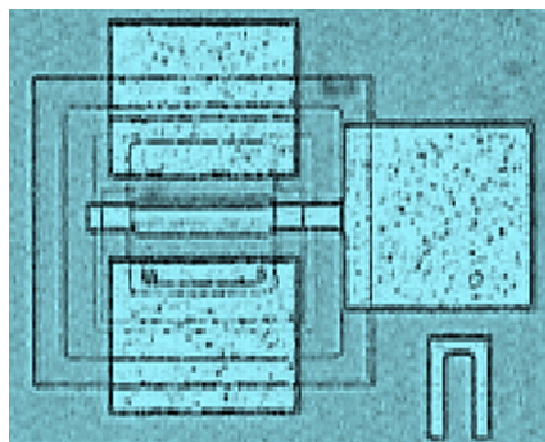
ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



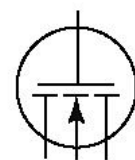
Микрофотография полевого
р – канального транзистора (x10)



р-канальный
с индуцированным
каналом



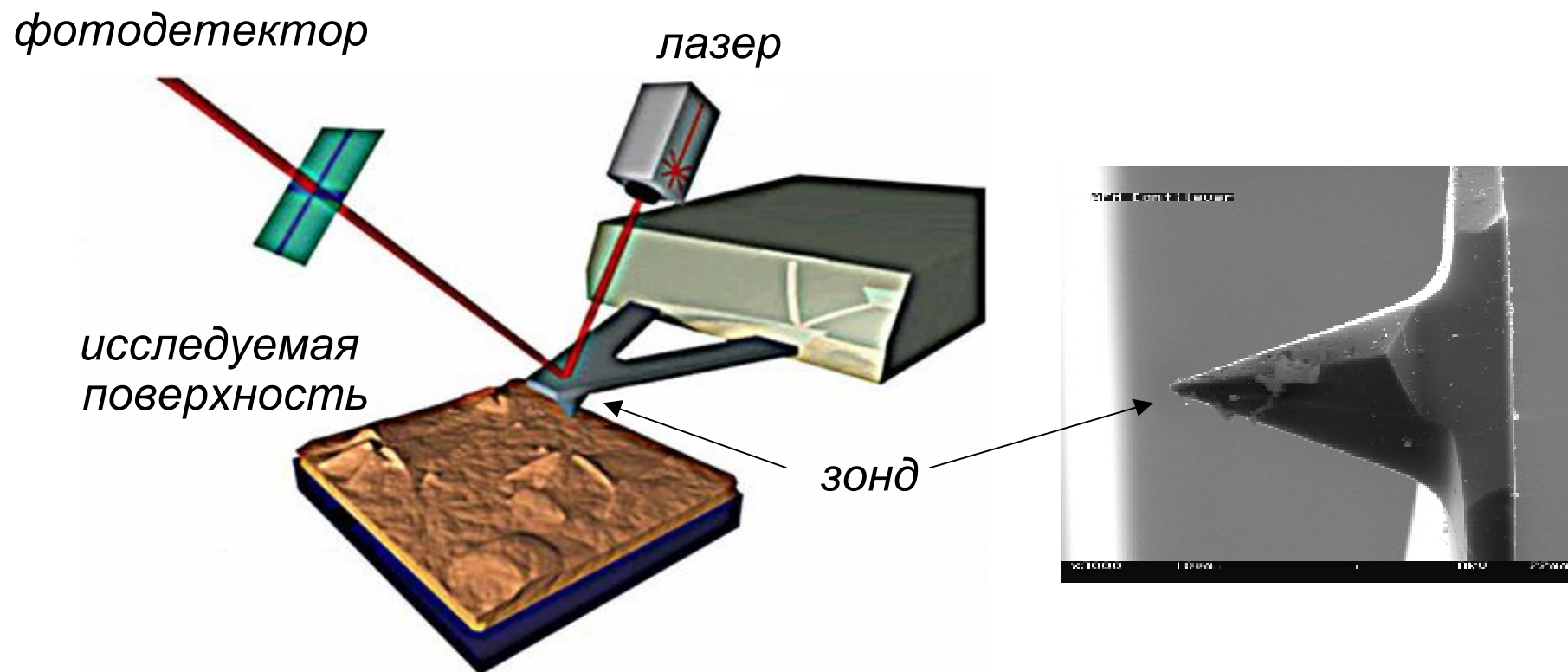
Микрофотография полевого
n – канального транзистора (x10)



n-канальный
с индуцированным
каналом

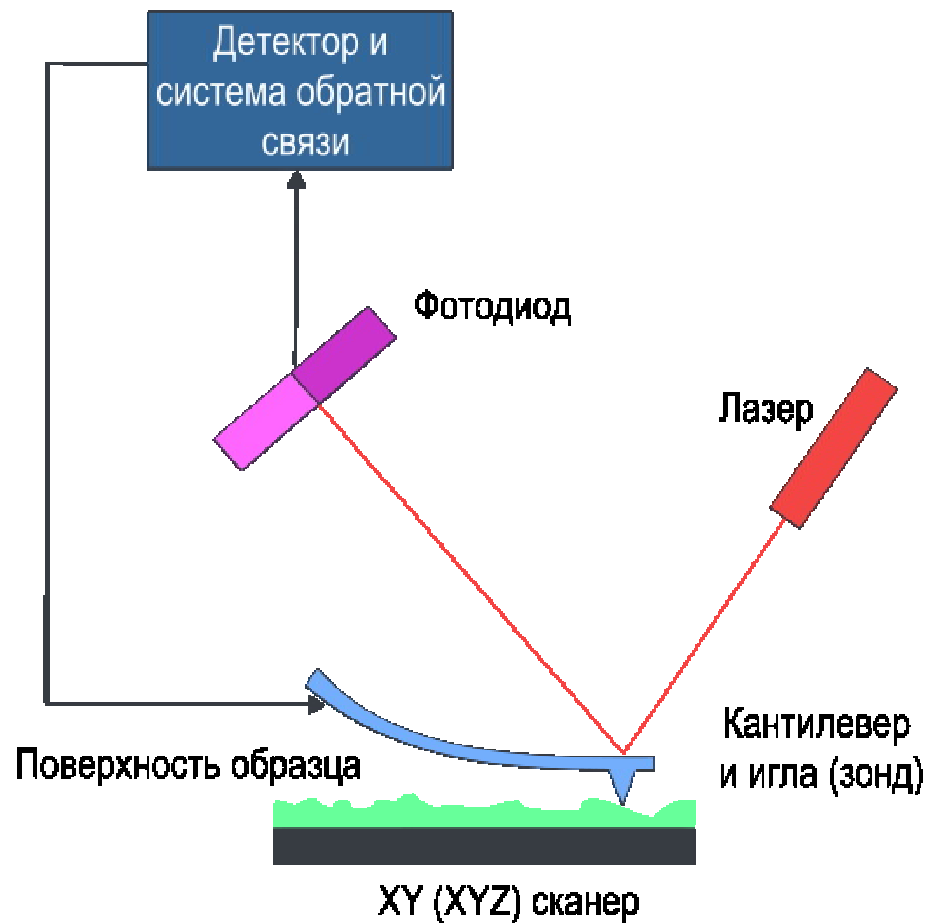


ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



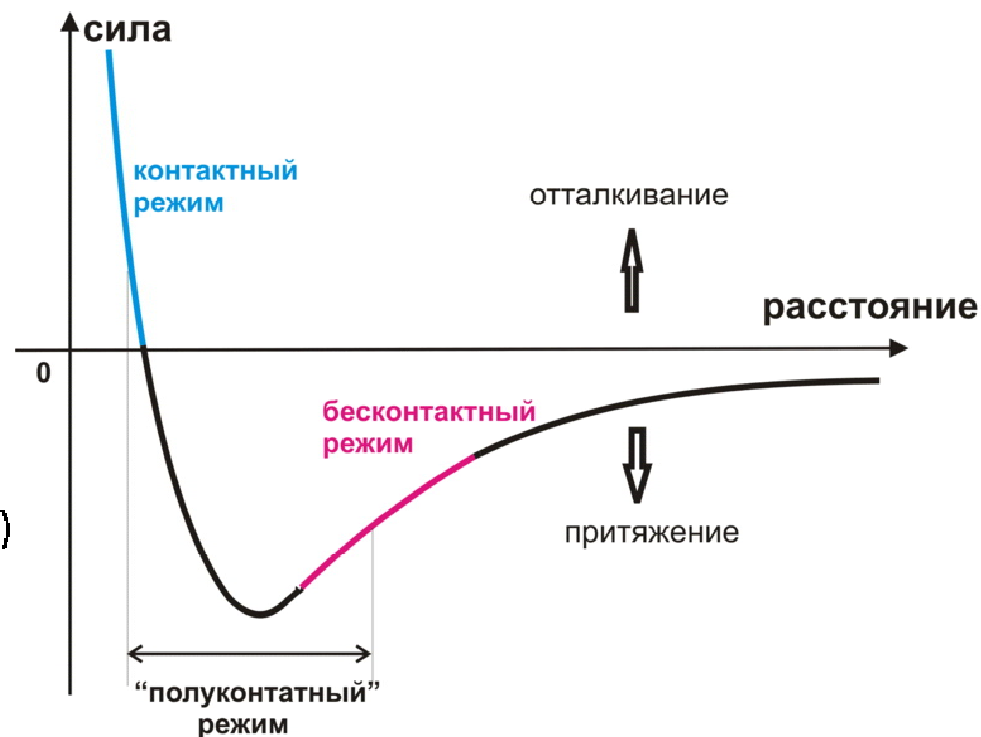
Отклонения зонда при действии близко расположенных атомов регистрируются при помощи измерителя наноперемещений, в частности используют оптические, ёмкостные или туннельные сенсоры. Добавив к этой системе устройство развёртки по осям X и Y, получают сканирующий АСМ.

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



Структура атомно-силового микроскопа

Максимальное разрешение – до атомарного уровня



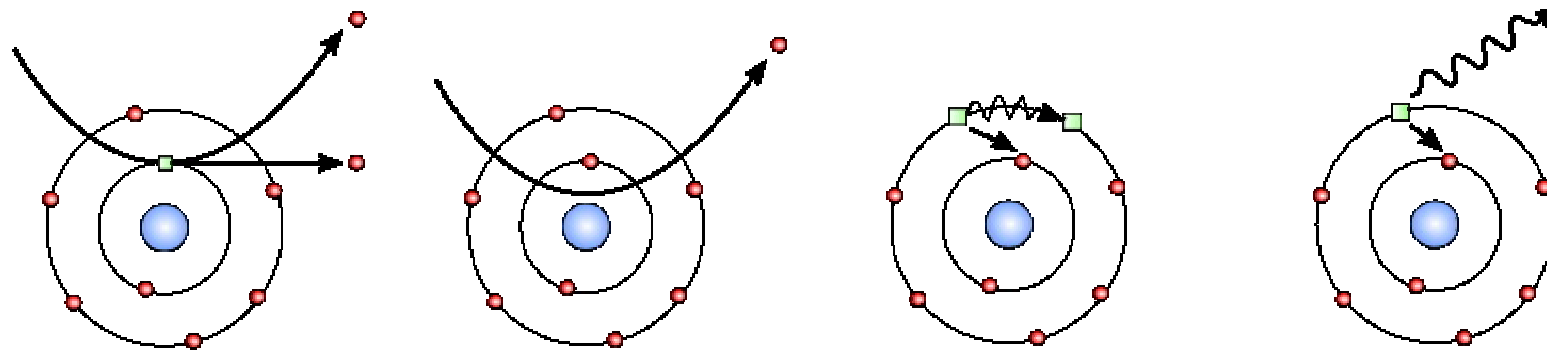
Режимы работы АСМ

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии нанотехнологий»



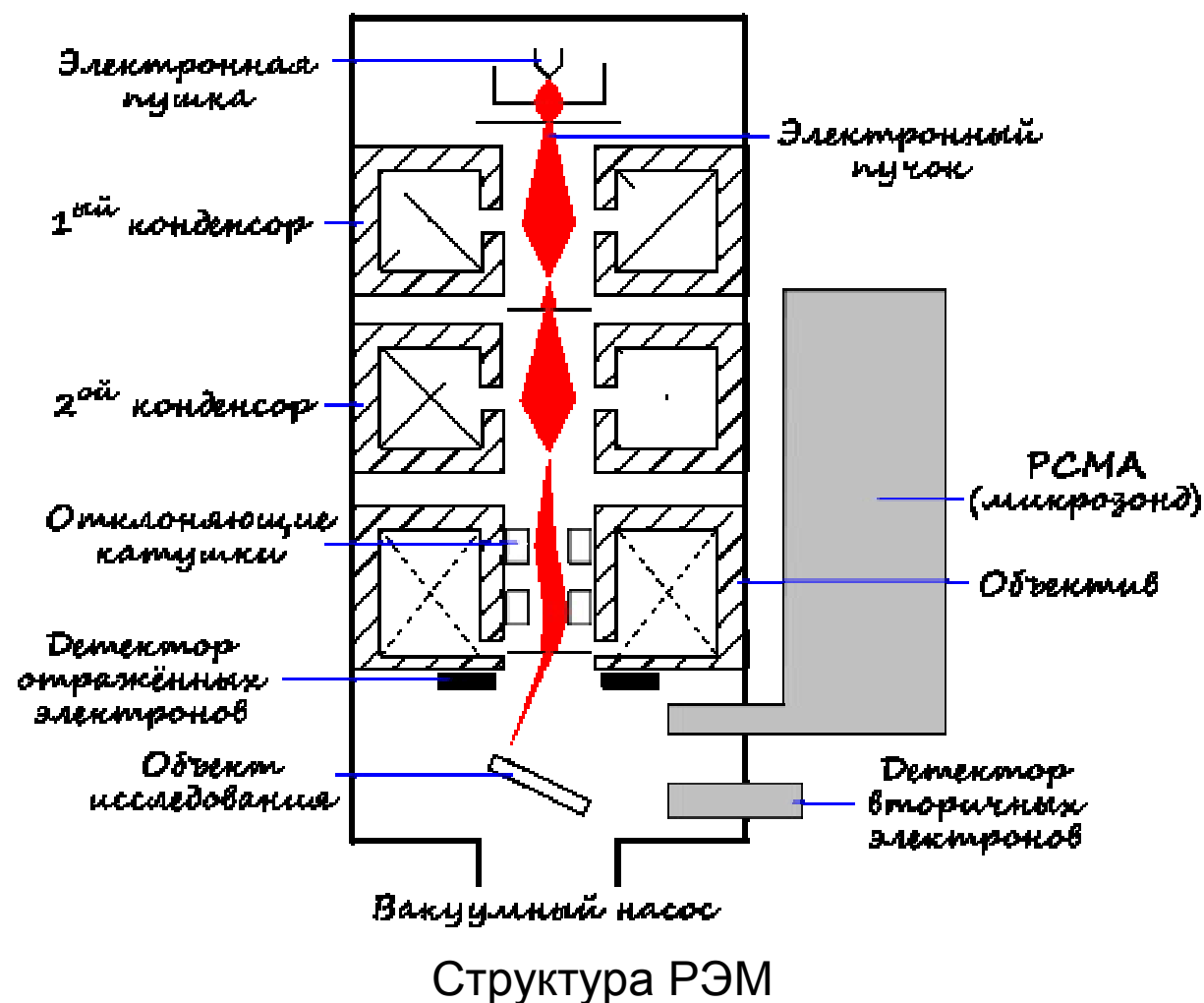
Растровый электронный
микроскоп Neon40

Максимальное разрешение –
до 0,4 нм

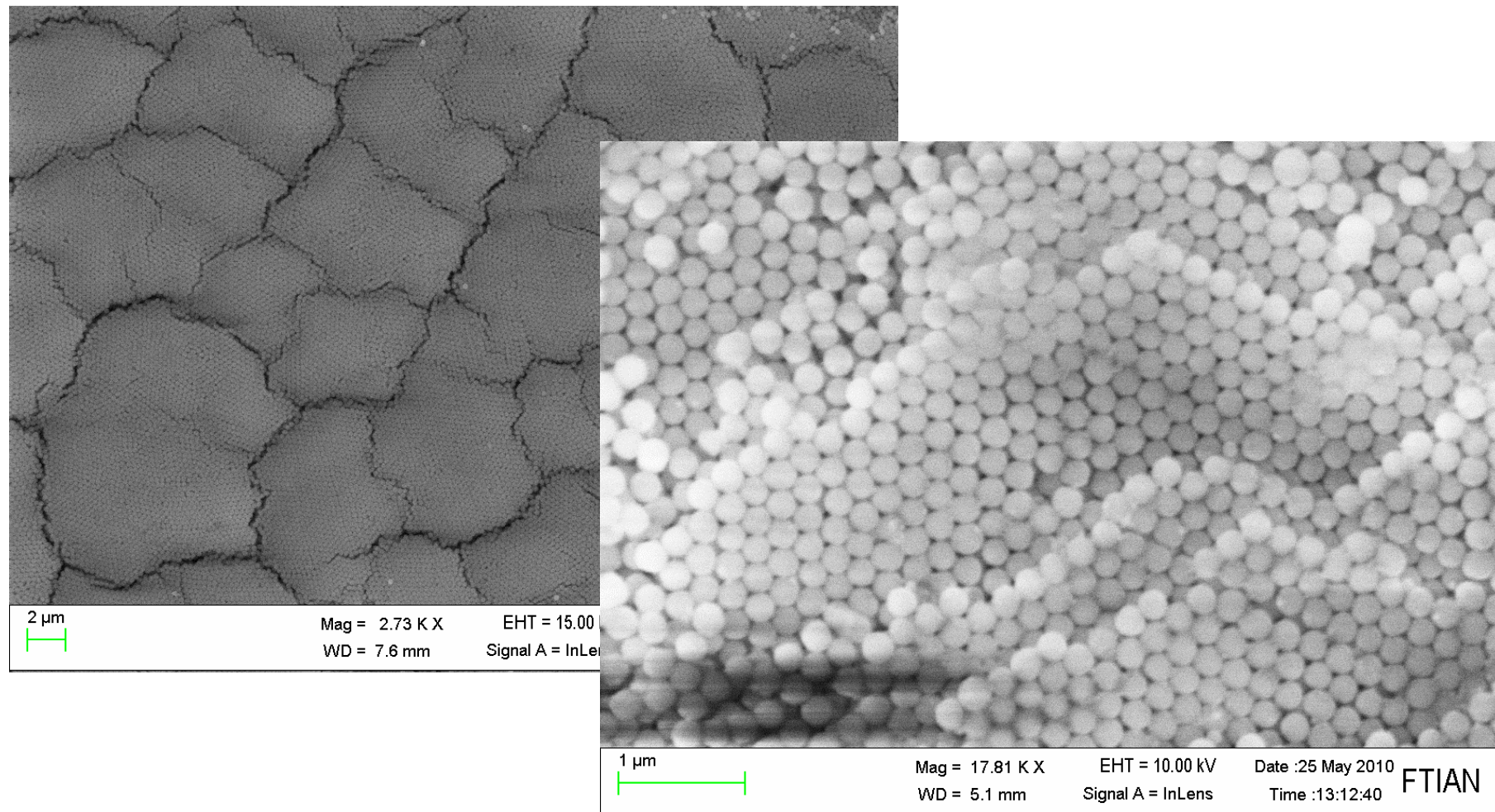


Виды взаимодействия электронов с веществом

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

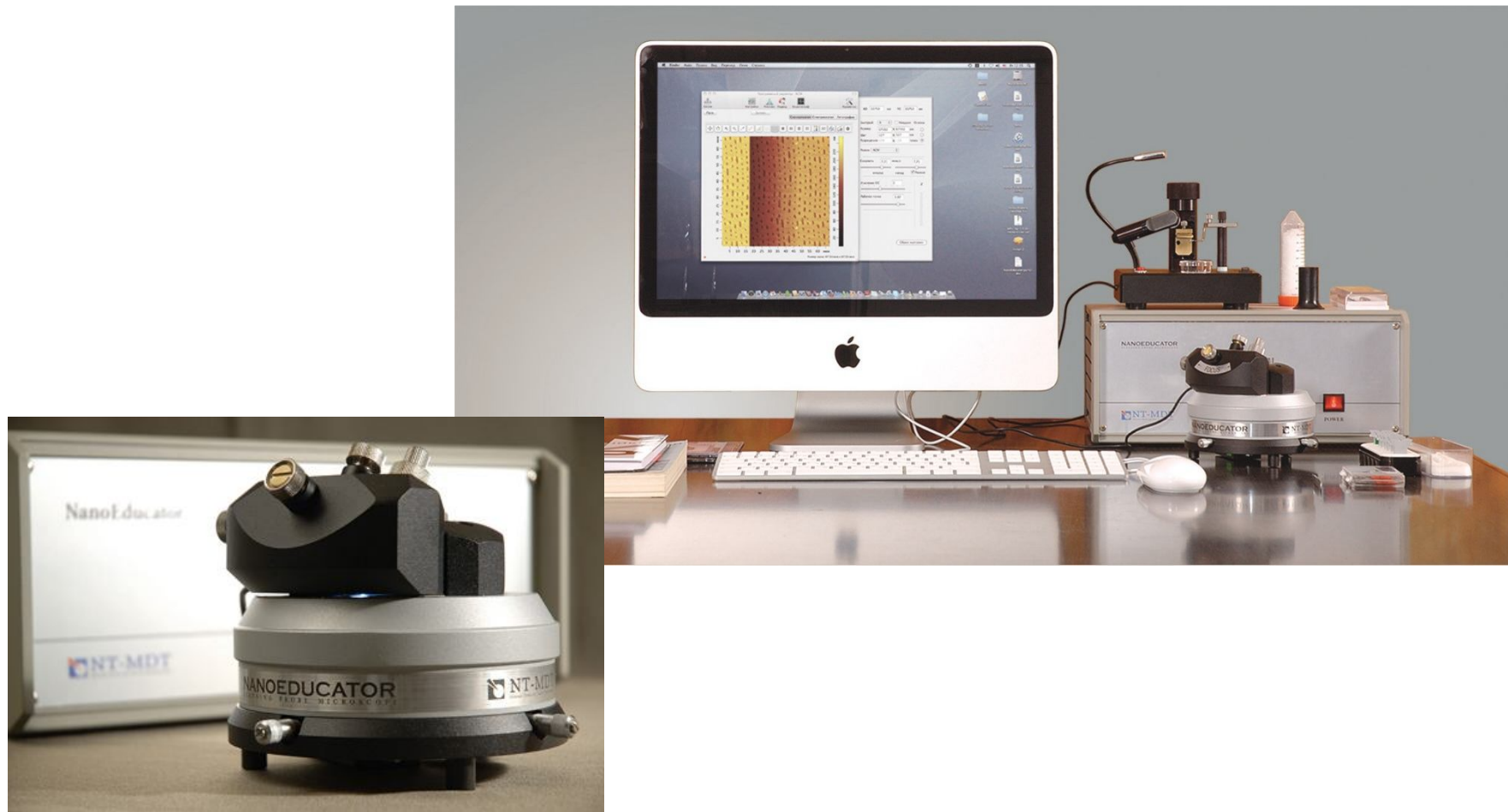


ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



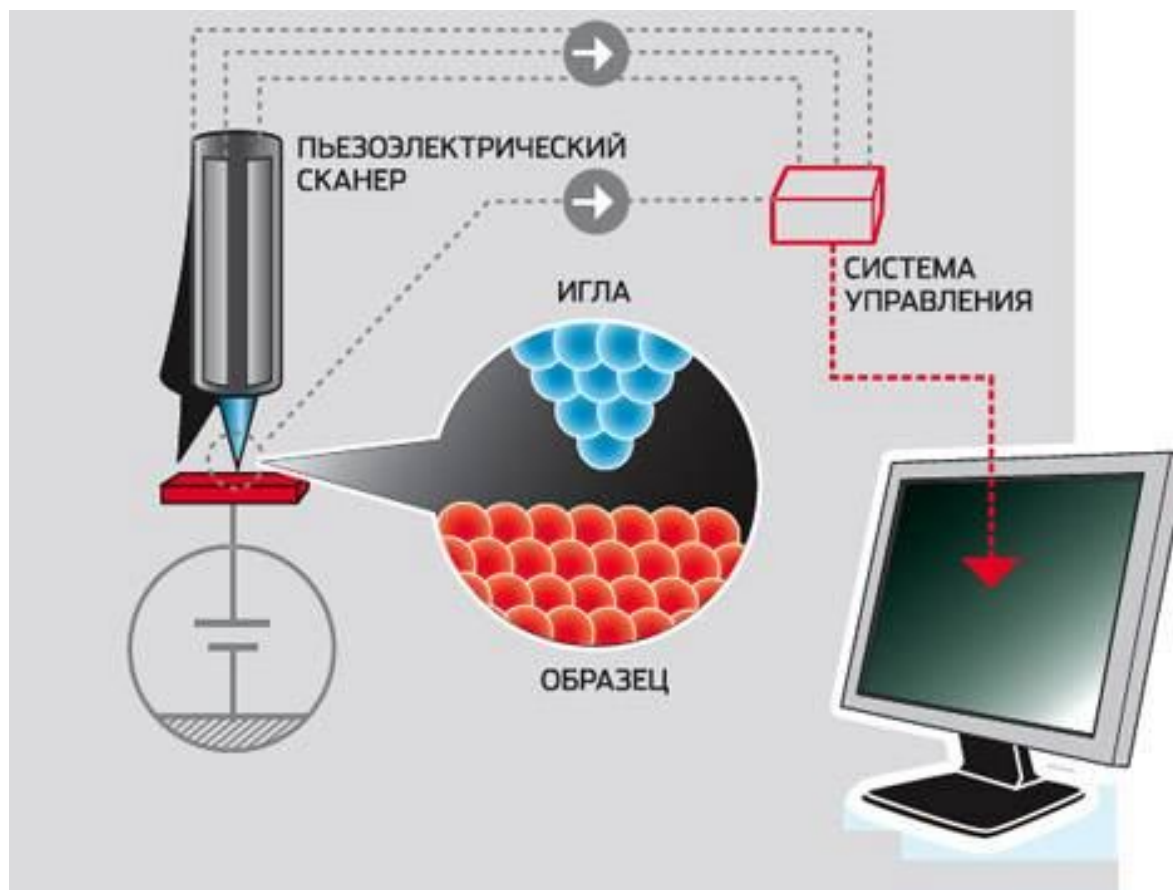
Фотографии фотонного кристалла, полученные с помощью РЭМ

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



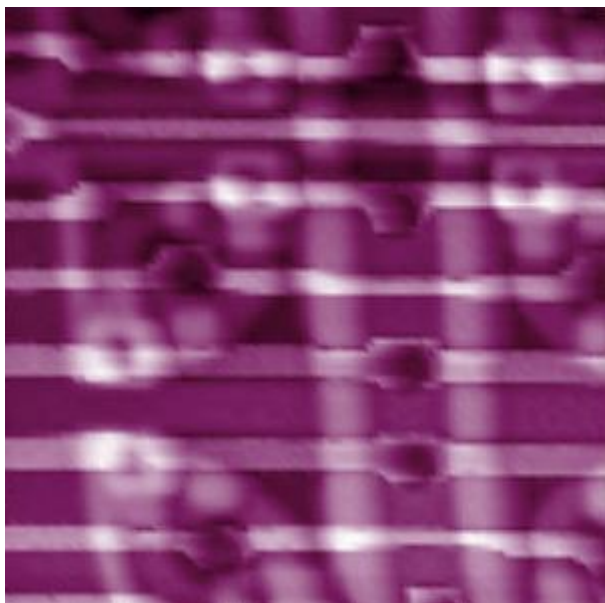
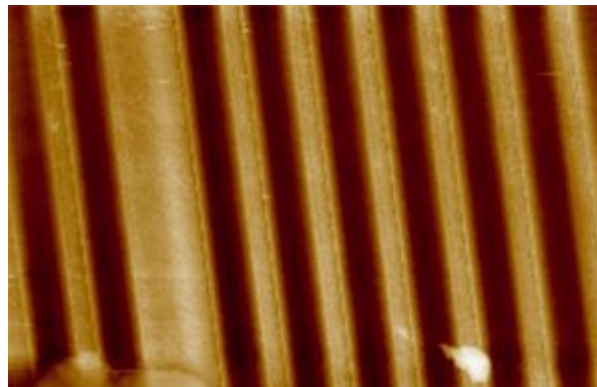
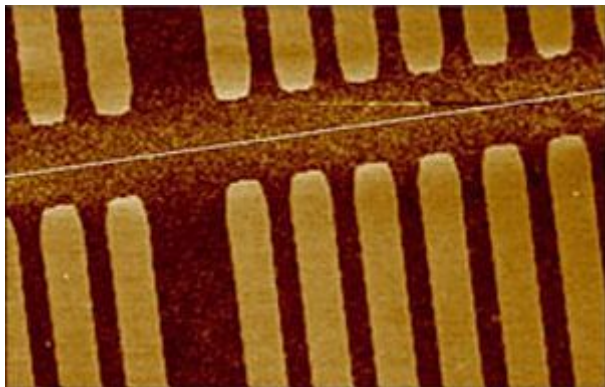
Сканирующий туннельный микроскоп

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



Структура СТМ

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



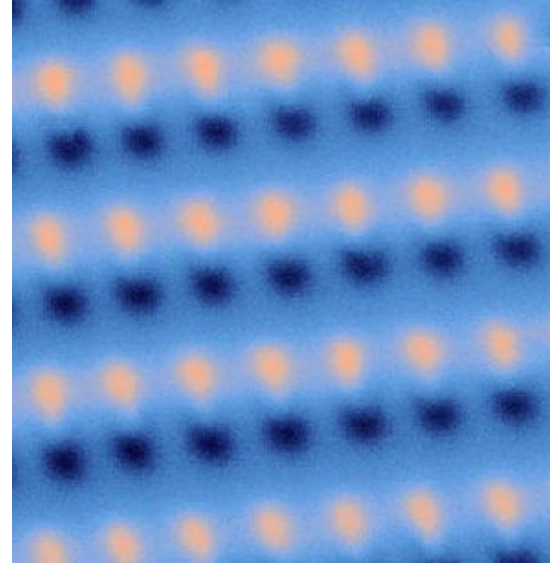
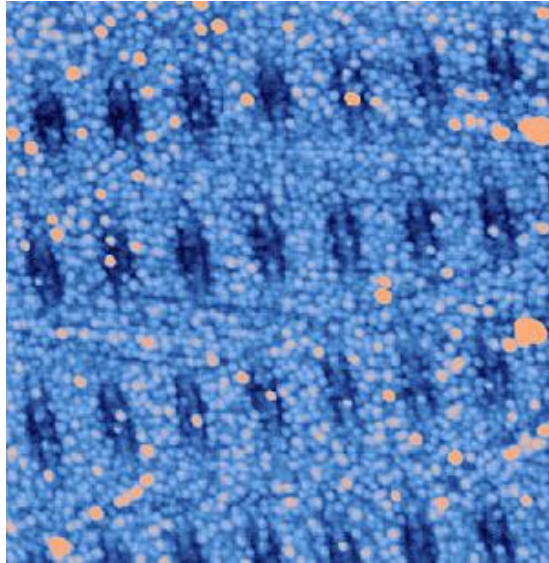
50x50 мкм

↑ Тестовая структура на основе решетки из полос 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 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»

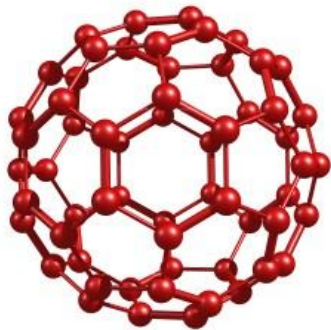


Рельеф поверхности (слева) и MFM изображение (справа) ферромагнитных островков в парамагнитной пленке. Магнитное изображение выглядит как массив субмикронных магнитных диполей. Светлые и темные участки соответствуют различным магнитным полюсам диполей.

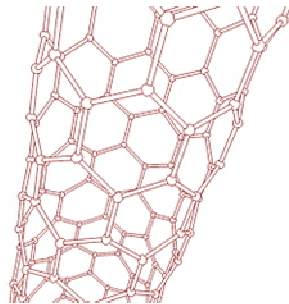
Накопители информации, изготовленные на основе массивов из магнитных диполей, являются одними из наиболее перспективных видов запоминающих устройств.

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

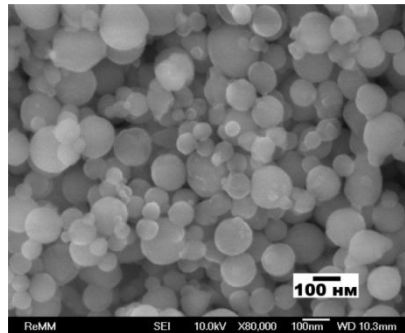
Спектроскопия комбинационного рассеяния света (или рамановская спектроскопия) — эффективный метод химического анализа, изучения состава и строения веществ по его спектральным характеристикам вторичного отражения света.



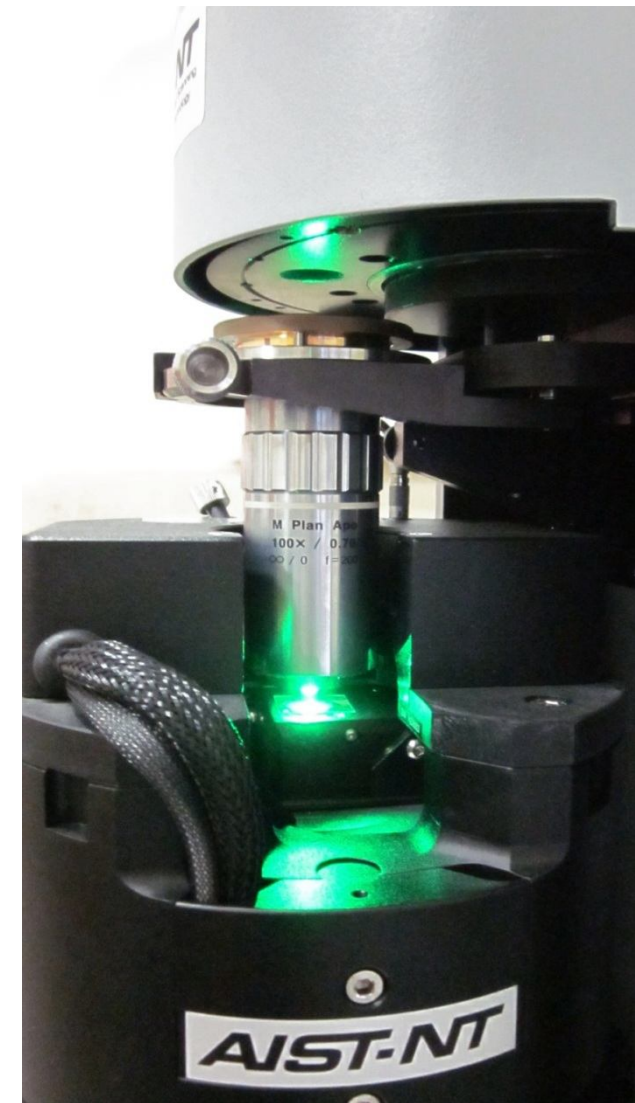
Фуллерен C60



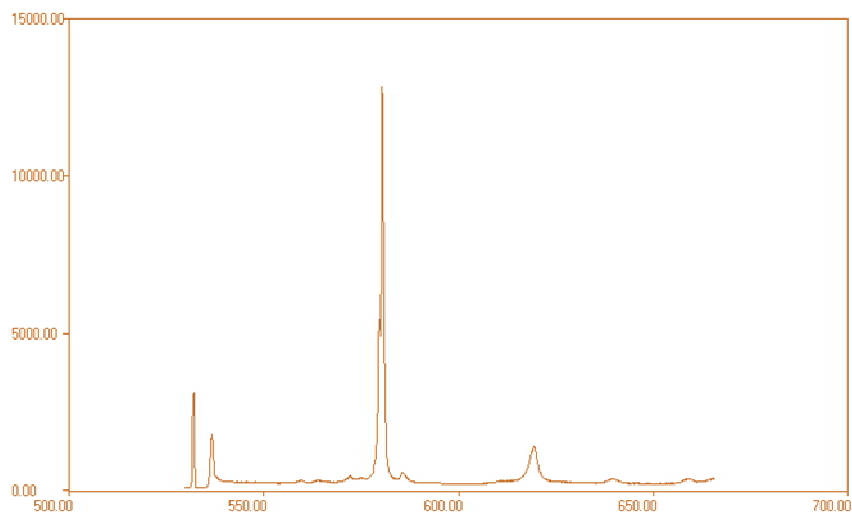
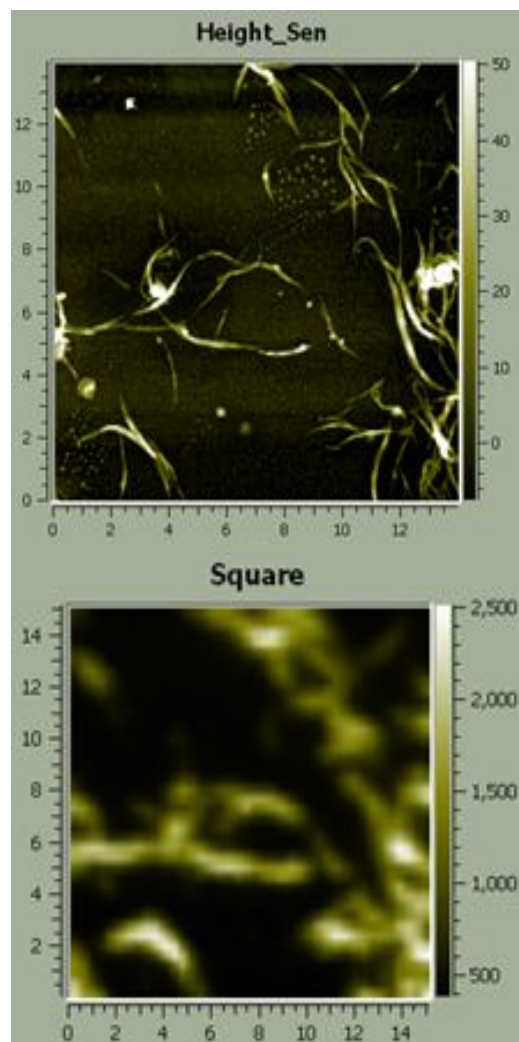
Схематическое изображение нанотрубки



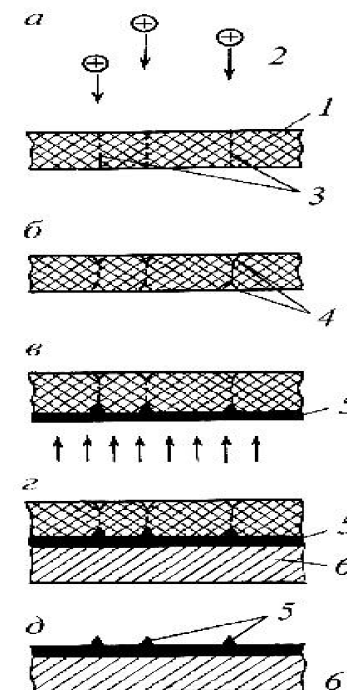
Микрофотография нанопорошка алюминия.



ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



Спектр КРС – Эффект ГКР яркость 15 000 ед.

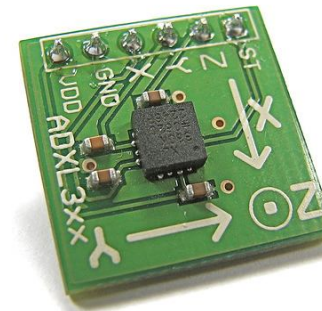
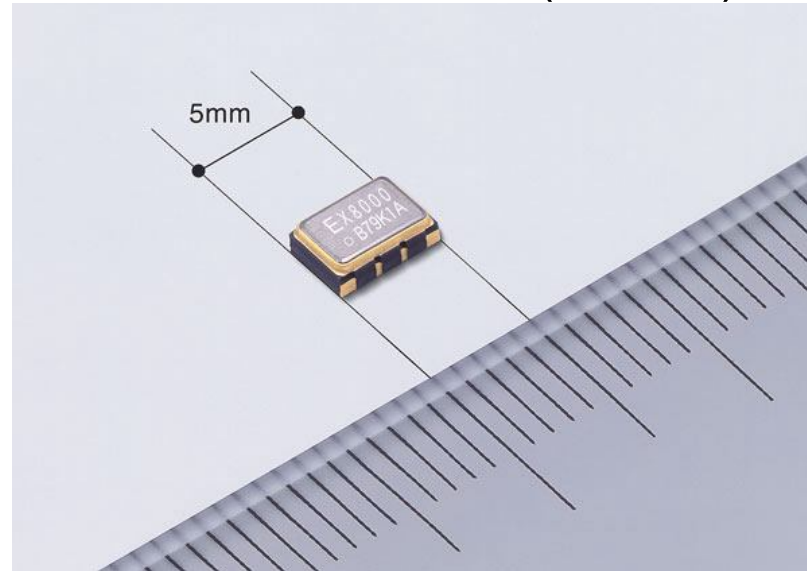
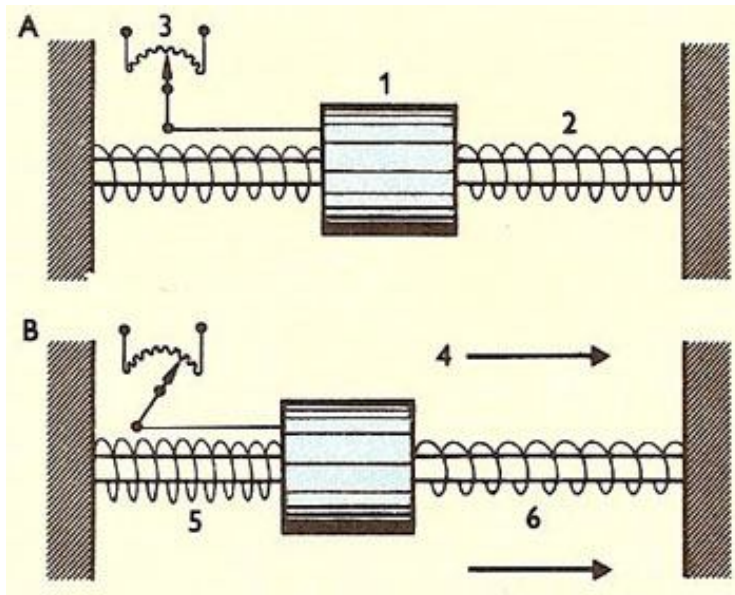


Возможность формирования ГКР-активных наноструктур

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»

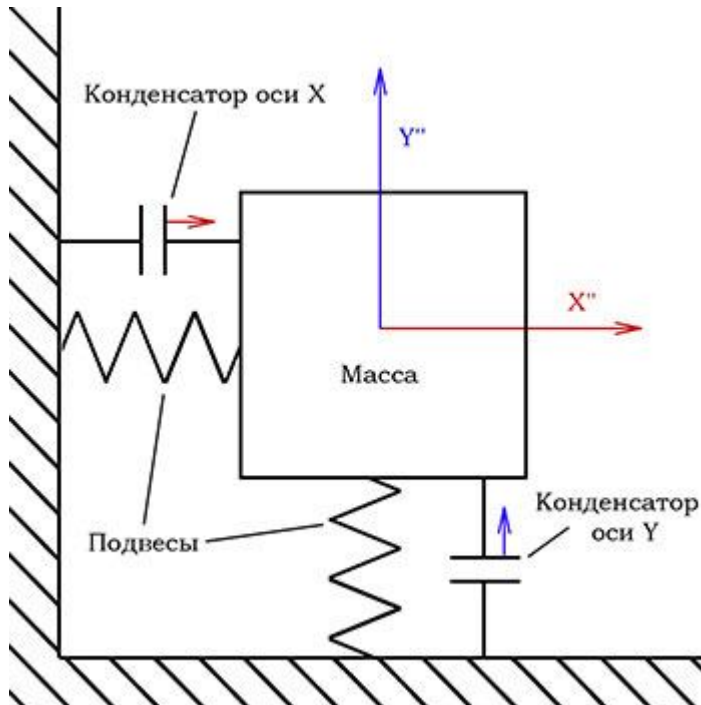
Микро-электромеханические системы (МЭМС)



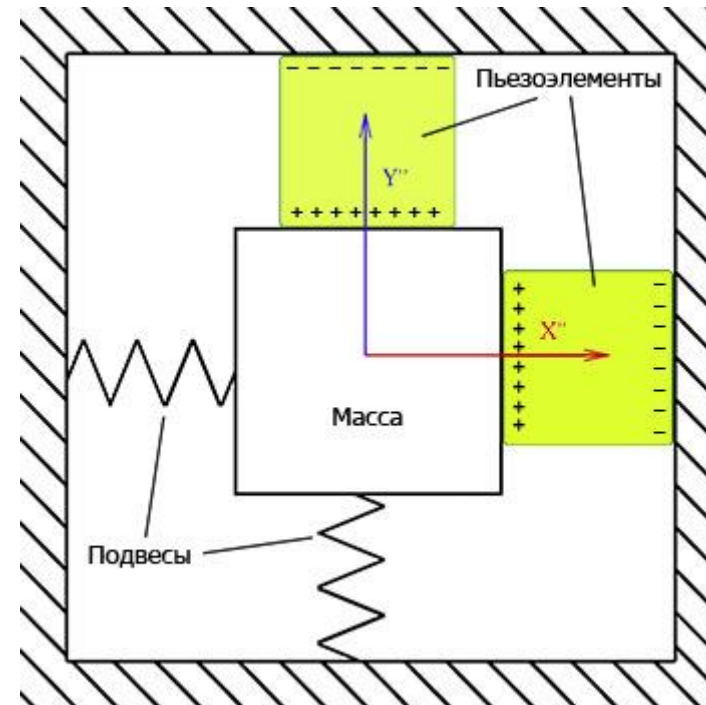
Принцип работы датчика ускорения и внешний вид МЭМС акселерометра

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

Методы детектирования отклонения подвижной массы акселерометра



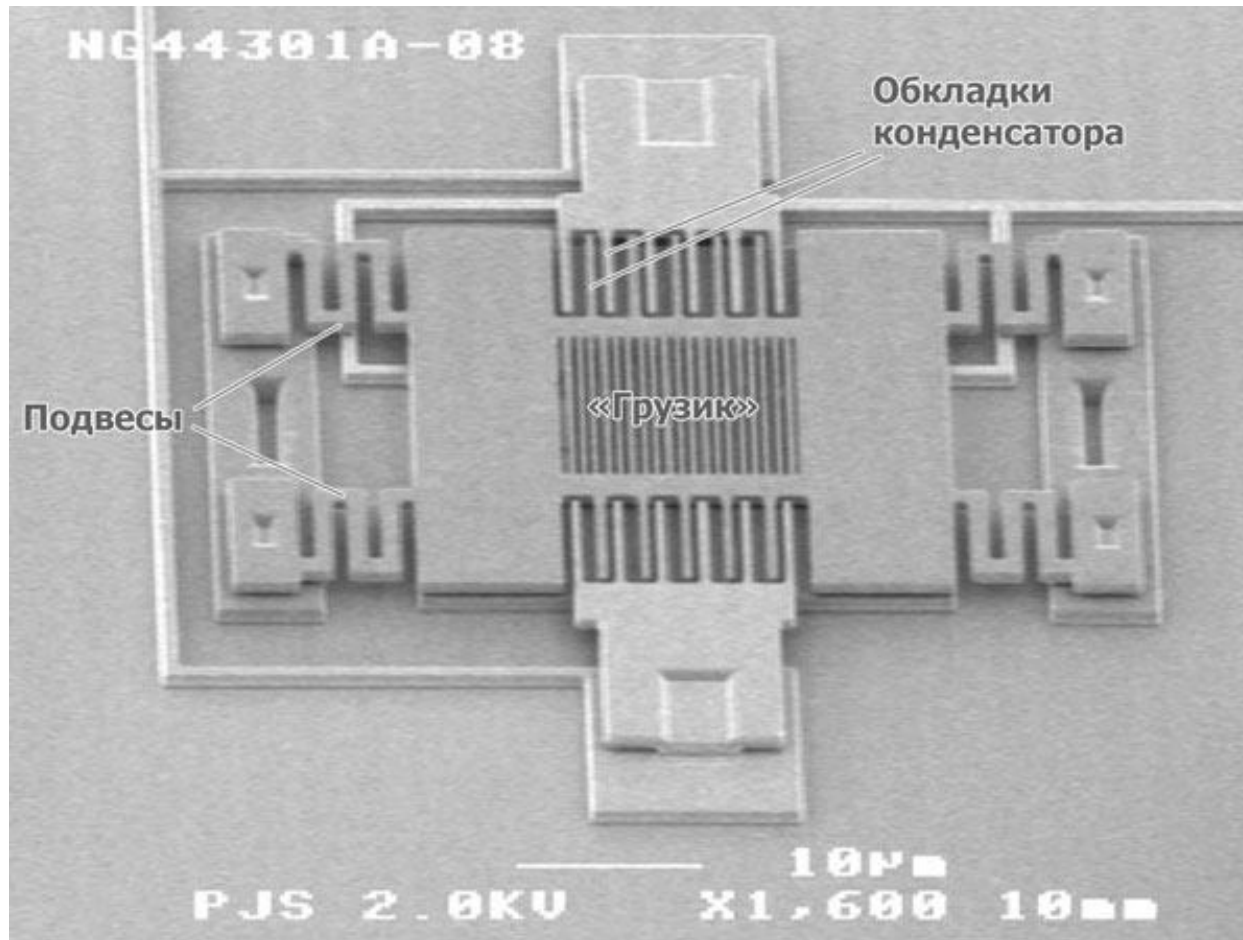
Использование конденсаторов



Использование
пьезоэлементов

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

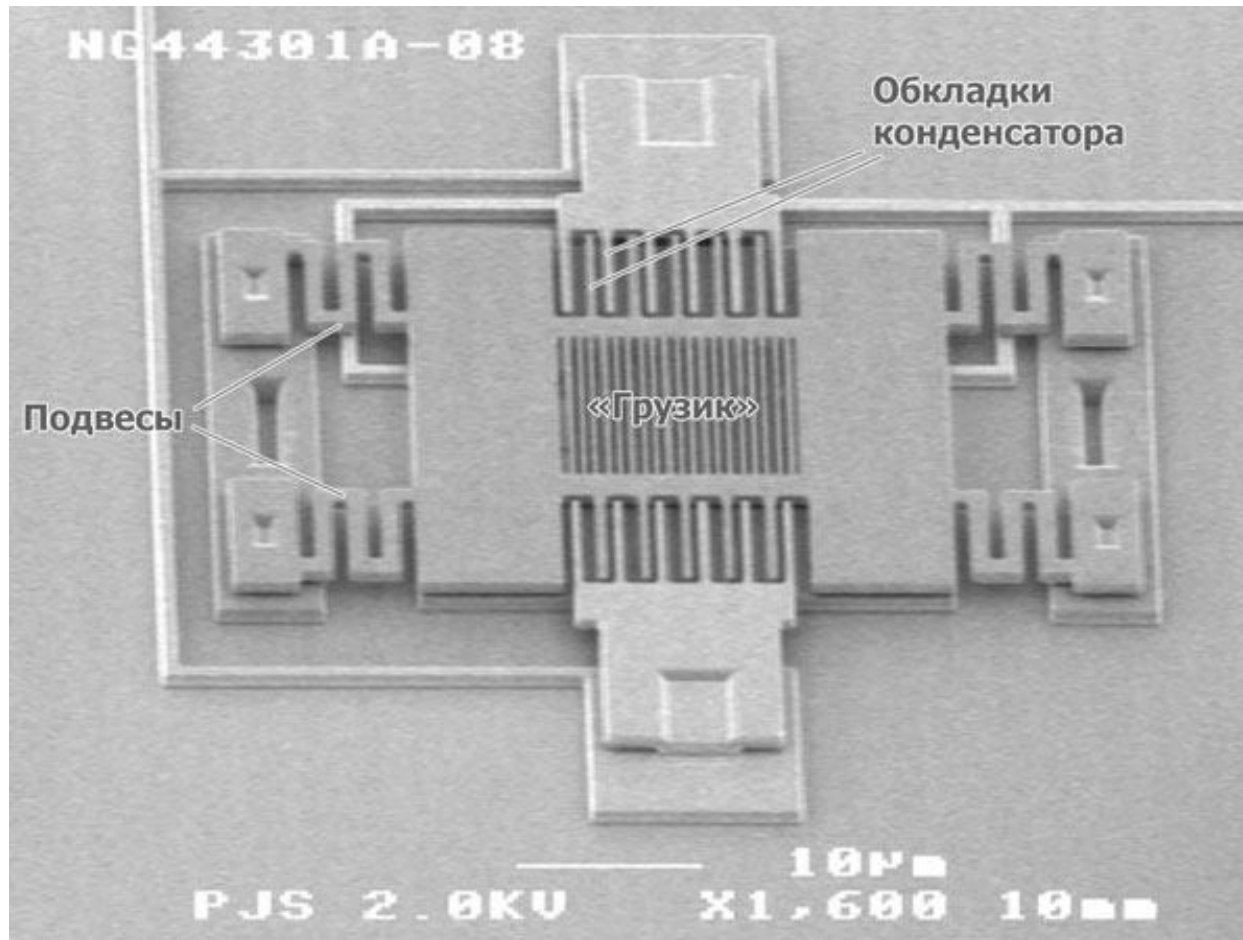
Простой миниатюрный MEMS-акселерометр разработки Sandia Labs



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

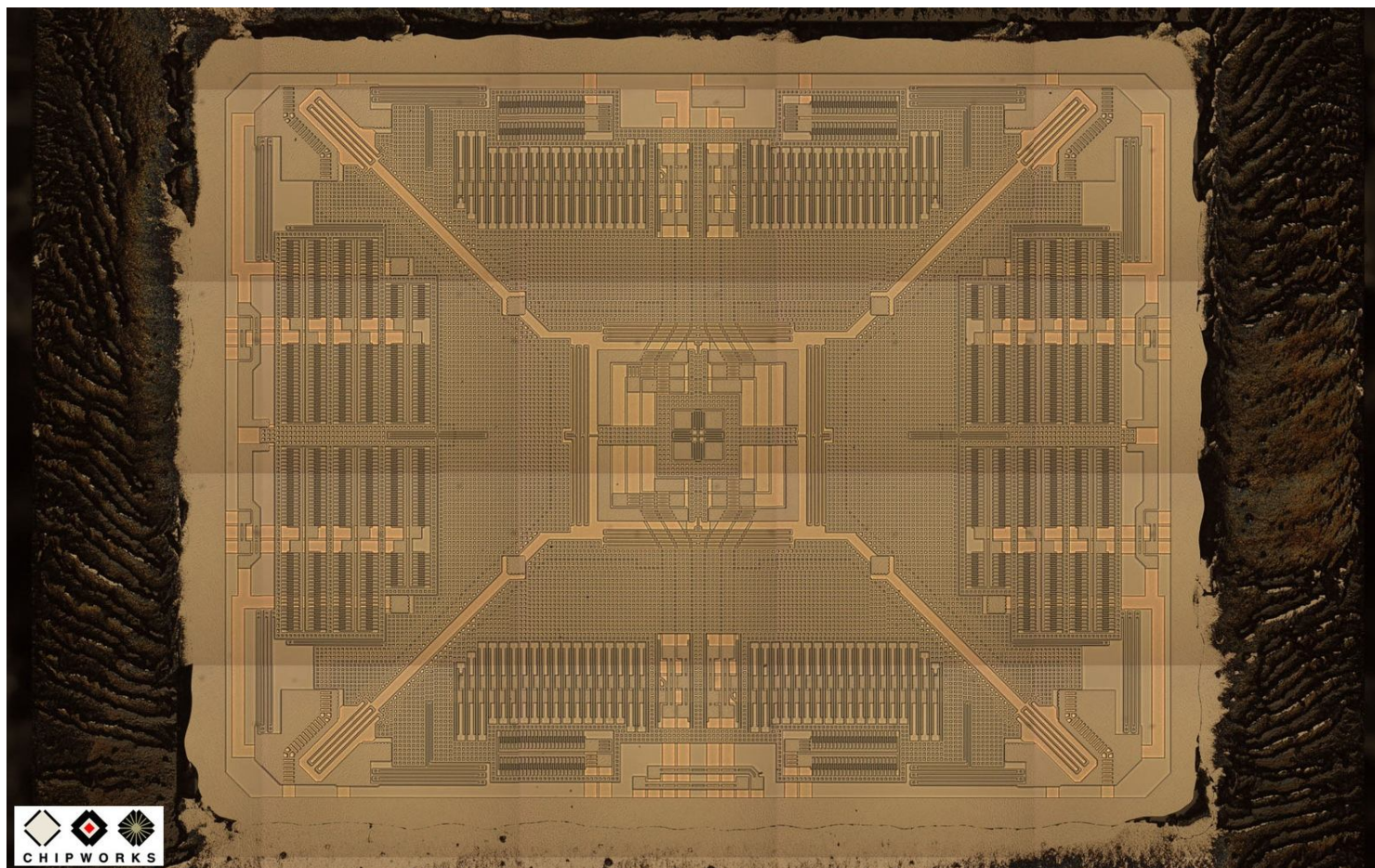
Простой миниатюрный MEMS-акселерометр разработки Sandia Labs



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

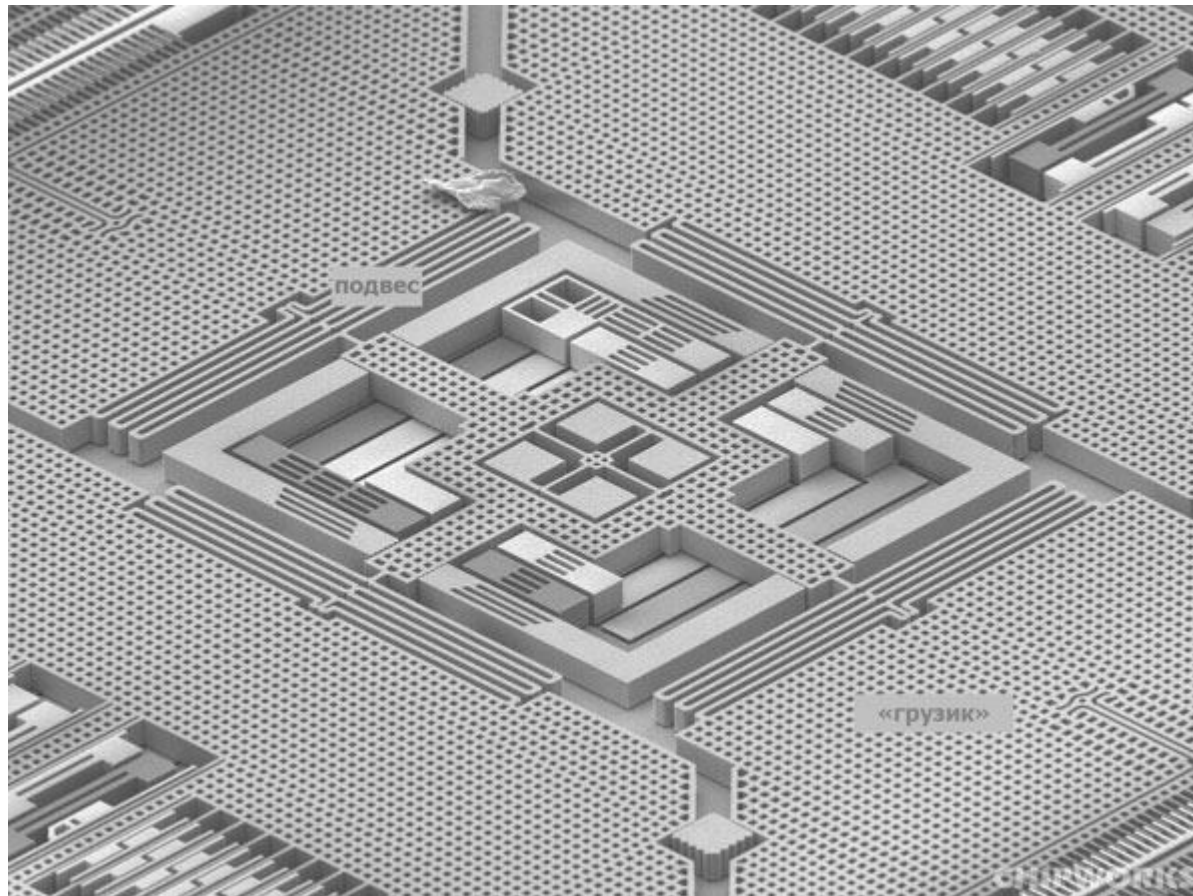
Гироскоп L3G4200D производства ST Microelectronics



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»

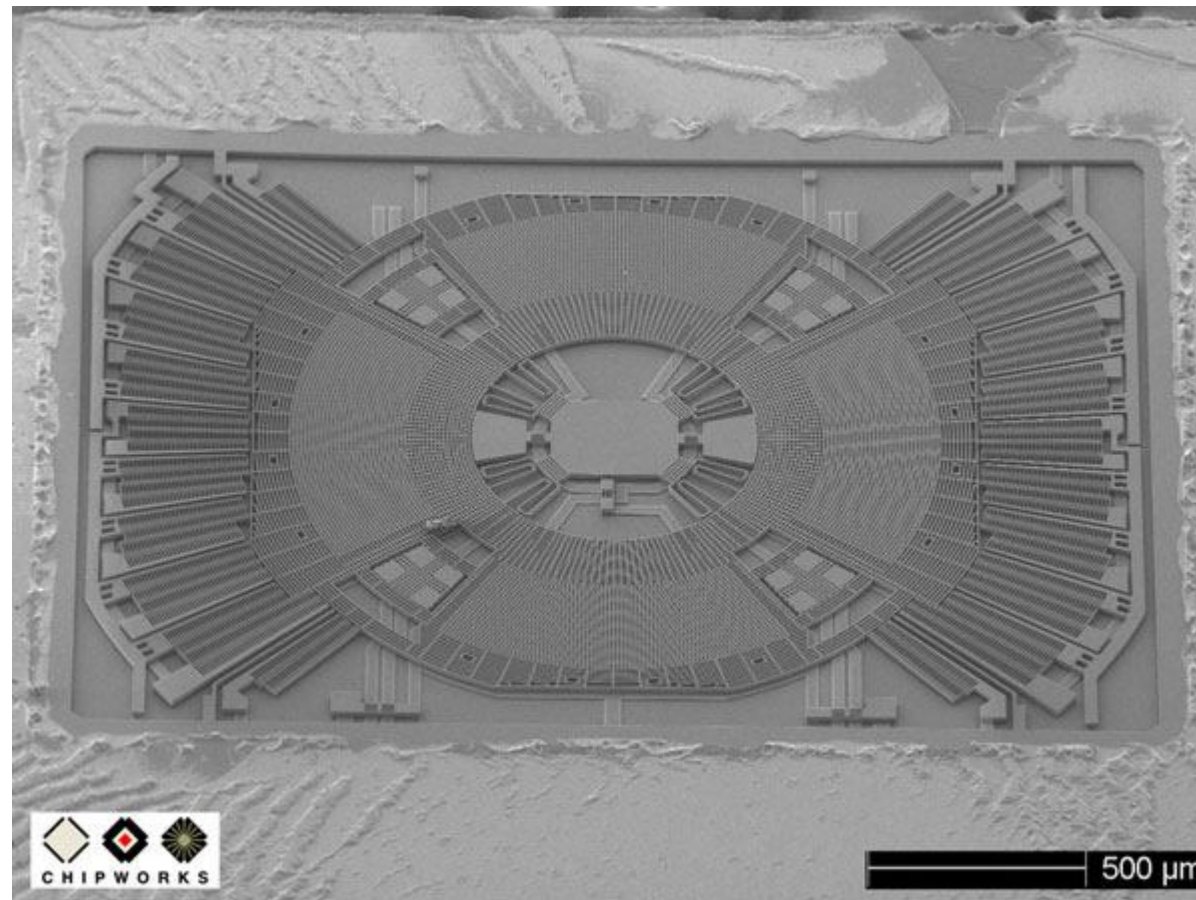
Гироскоп L3G4200D производства ST Microelectronics



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»

ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ
«Технологии наноинженерии»

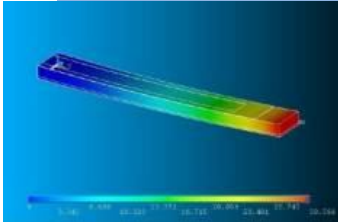
Гироскоп LYPR540AH фирмы ST Microelectronics



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»

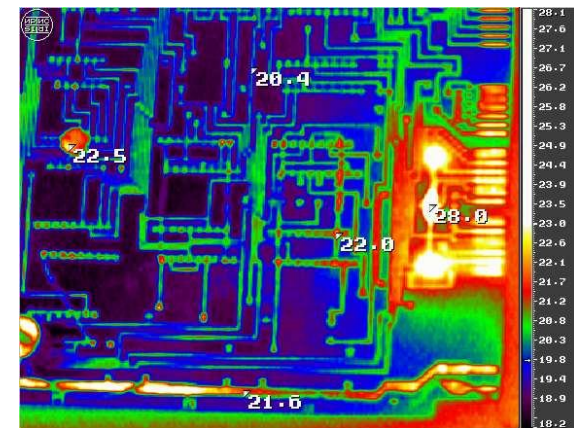
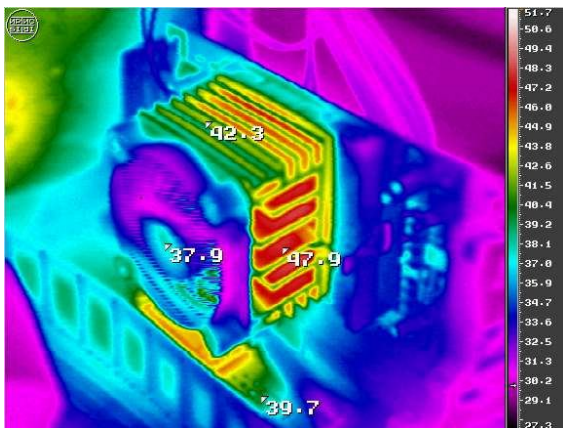
Для решения экспериментальных задач:

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

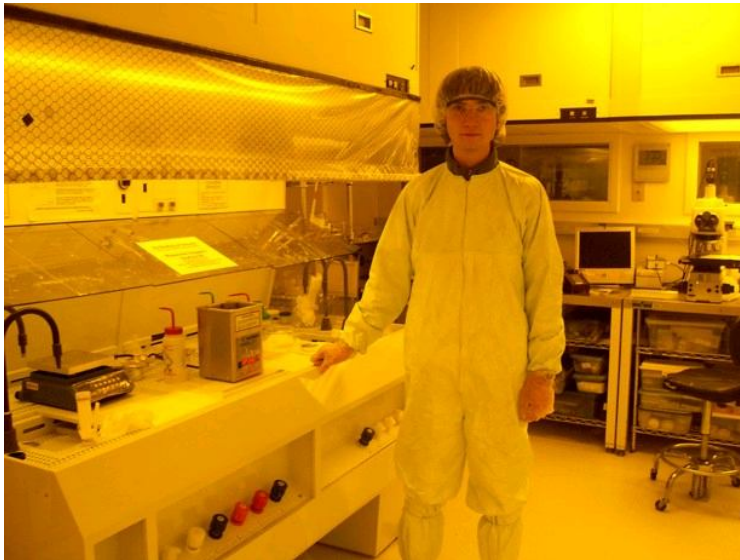
ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»




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



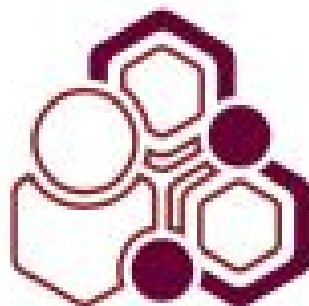
ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ «Технологии наноинженерии»



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



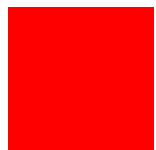
**ШКОЛА-ЛАБОРАТОРИЯ
«Технологии наноинженерии»**



НАНОИНЖЕНЕРИЯ

www.iu4.ru

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭА»



Вопросы

