

Методы исследования неорганических веществ и материалов

Ю.Д.Третьяков

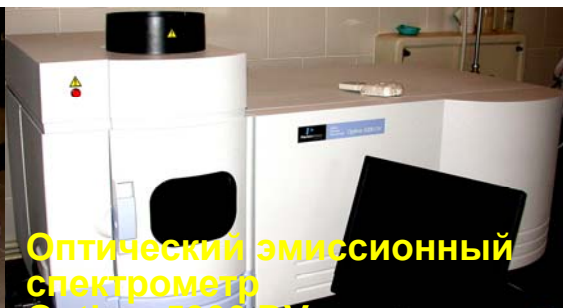
А.В.Шевельков

Е.А.Гудилин

Очень
короткий
обзор



Вакуумный пост
BOC Edwards



Оптический эмиссионный
спектрометр



Анализатор
поверхности



Просвечивающий
электронный
микроскоп JEM 2000



Оптический
Микроскоп с
термостатом
Nikon Eclipse 600



Сканирующий Зондовый Микроскоп Интегра-Аура
<http://www.hsms.msu.ru/ckp.html>



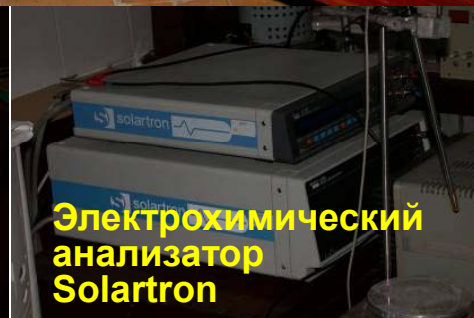
Лиофилизатор
Labconco Freezone



Термоанализатор
Perkin Elmer
Pyris Diamond



Спектрометры
PerkinElmer
Spectrum One (IR),
Lambda 35 (UV),
LS 55 (люминесц.)



Электрохимический
анализатор
Solartron



Цифровой электронный
микроскоп Leo Supra 50 VP
SEM / EDX / WDX

Типы методов исследований

Характеризация соединений – неотъемлемая часть **всех** исследований в неорганической химии

Различают (условно) методы исследования:

1. химические:
хим. анализ, реакционная способность
2. физические:
идентификация индивидуальных соединений и измерение их свойств
3. физико-химические:
получение диаграмм "состав–свойство" в системах соединений

Основная информация

1. Состав соединения
2. Идентификация соединения и фазовый анализ
3. Строение молекул
4. Кристаллическая структура соединений
5. Строение электронных оболочек и энергия электронов
6. Распределение зарядов в молекуле и кристалле
7. Особенности химической связи в молекуле и твердом теле
8. Динамика атомов и молекул в соединении
9. Термодинамические характеристики соединения
10. Реакционная способность соединений
11. Кинетика образования и распада соединений

Основные группы методов

Химический анализ

Дифракционные методы

рентгенография, нейтронография, электронография

Спектральные методы

колебательная спектроскопия (ИК, КР), резонансная спектроскопия (ЯМР, ЯКР, ЭПР, ЯГР), электронная спектроскопия (УФ-вид., ФЭС, РЭС, Оже)

Термические методы

термография (ДТА, ДТГ), калориметрия (ДСК)

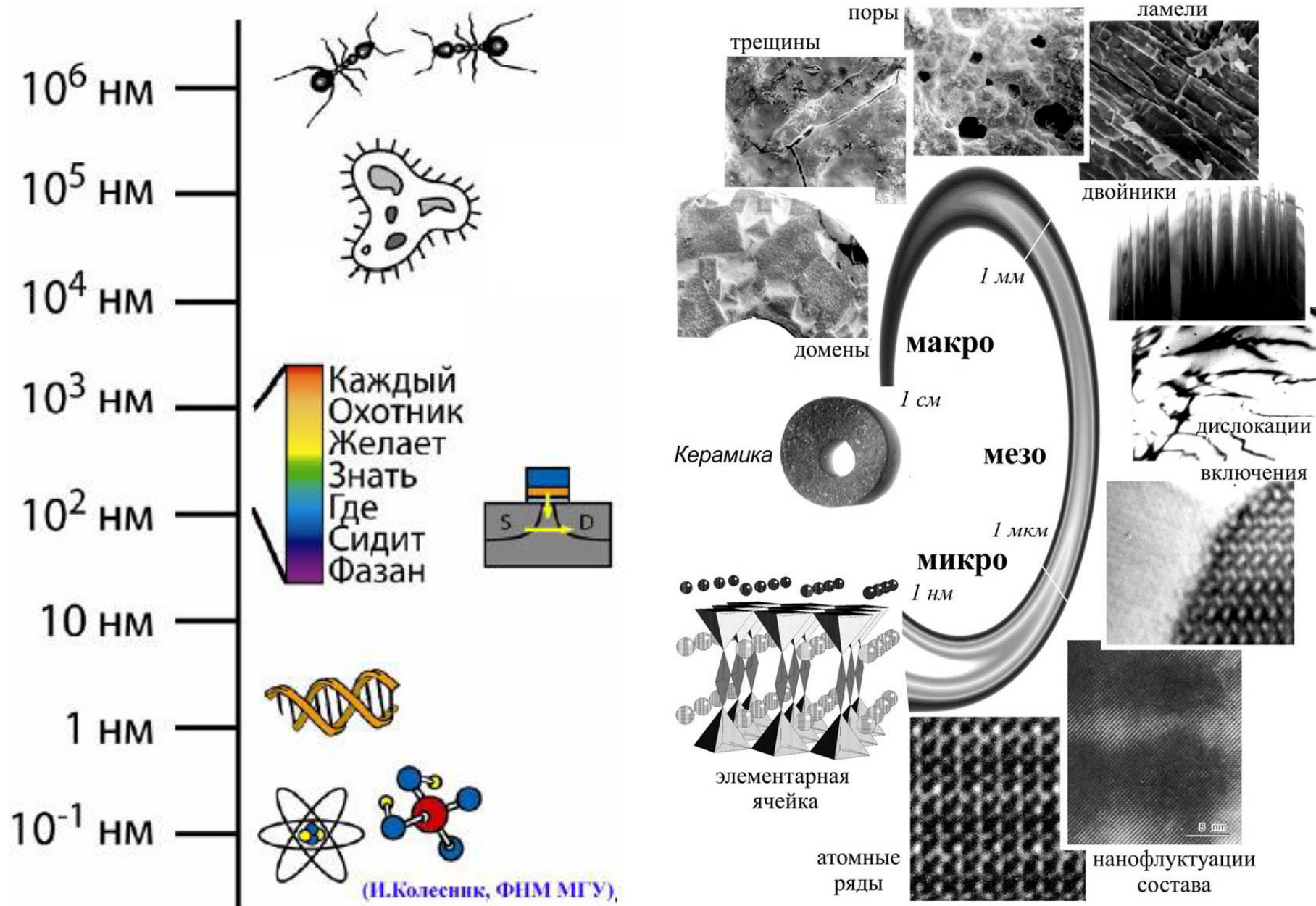
Микроскопия

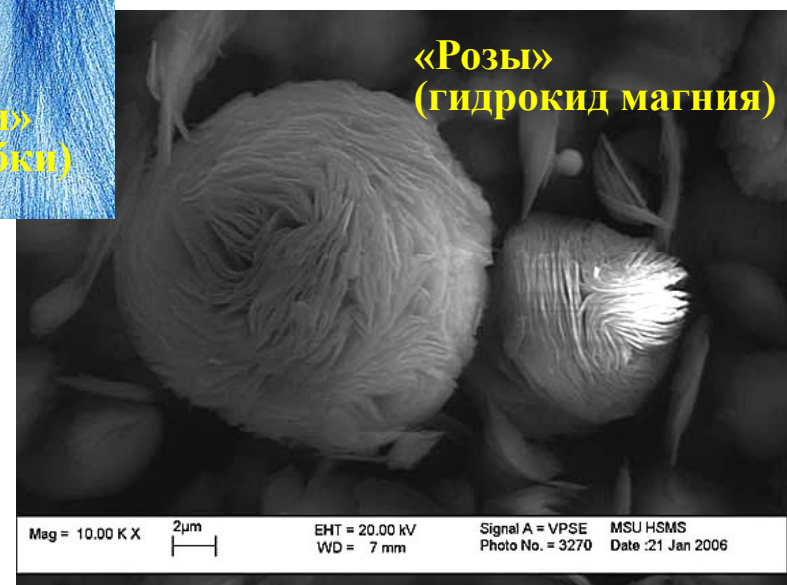
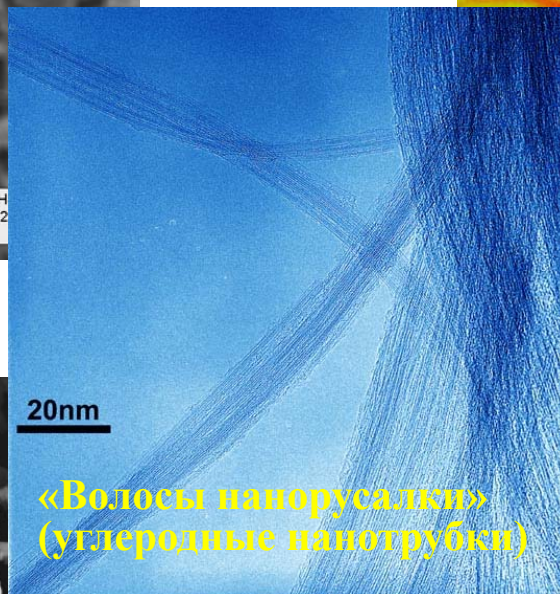
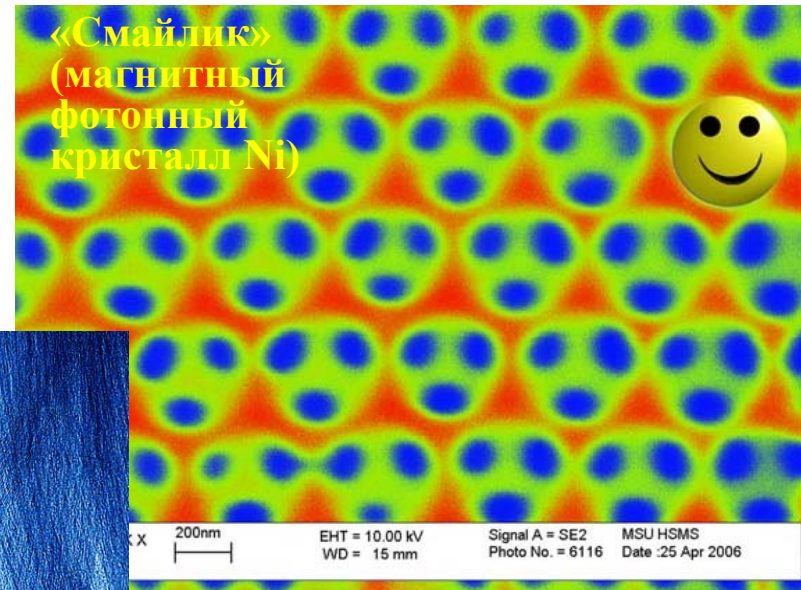
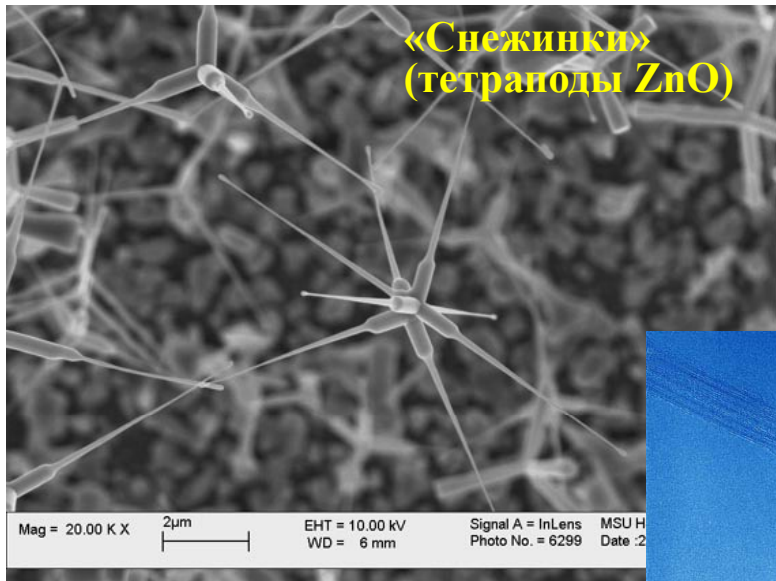
электронная микроскопия (ПЭМВС, АСМ, СЭМ), оптическая микроскопия

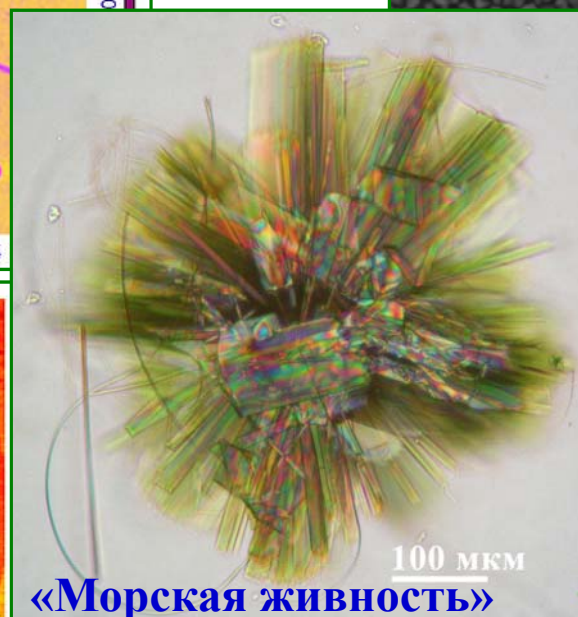
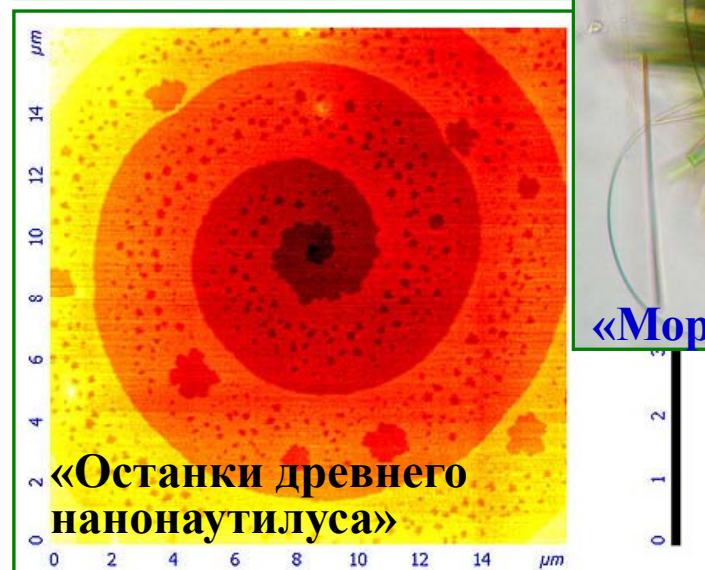
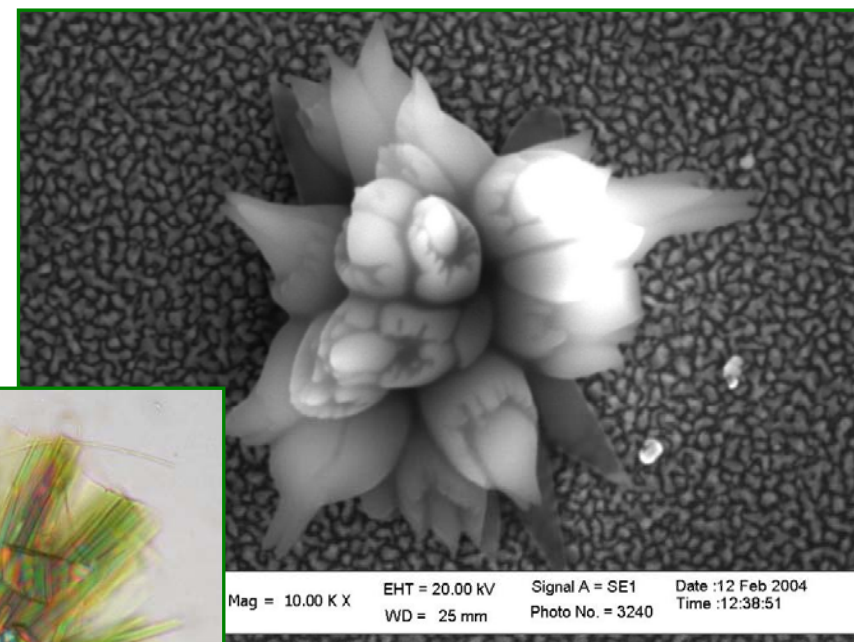
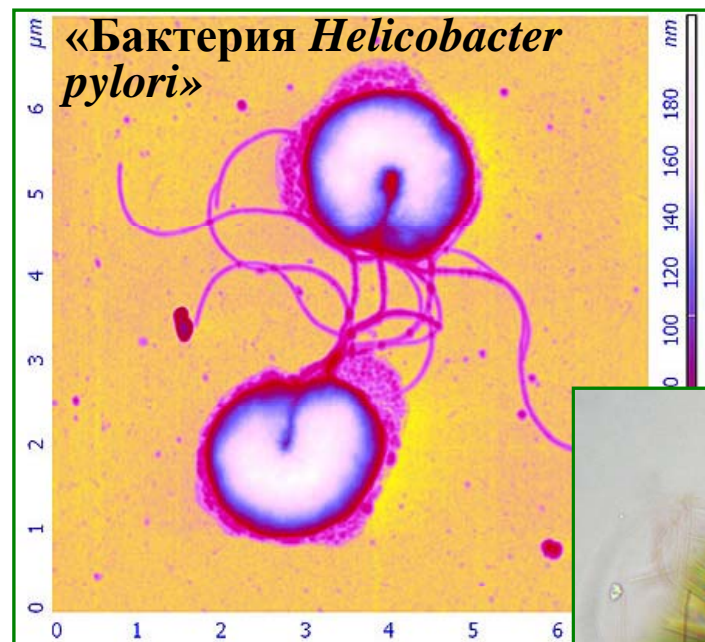
Электрофизические и магнитные методы

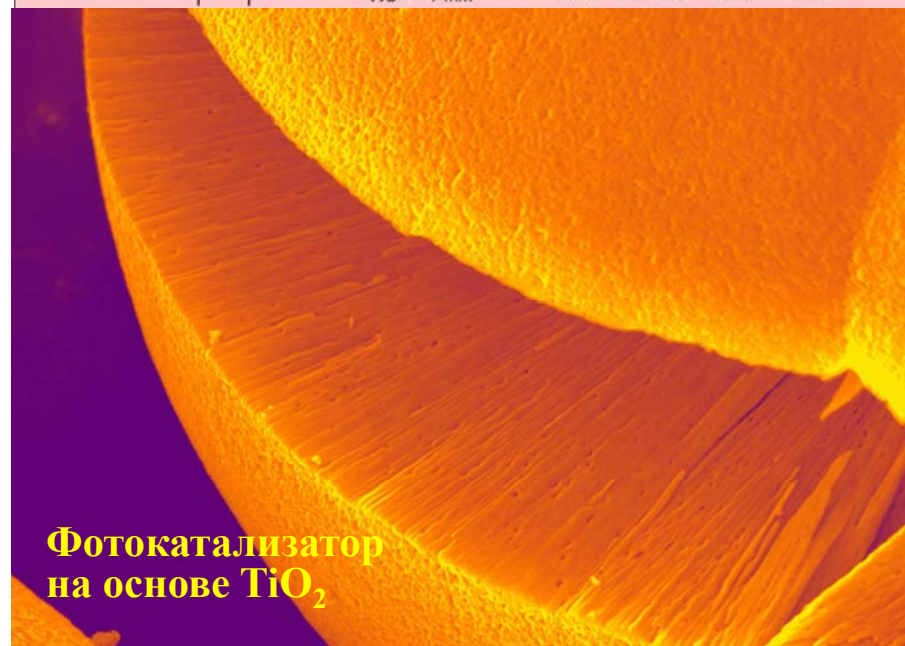
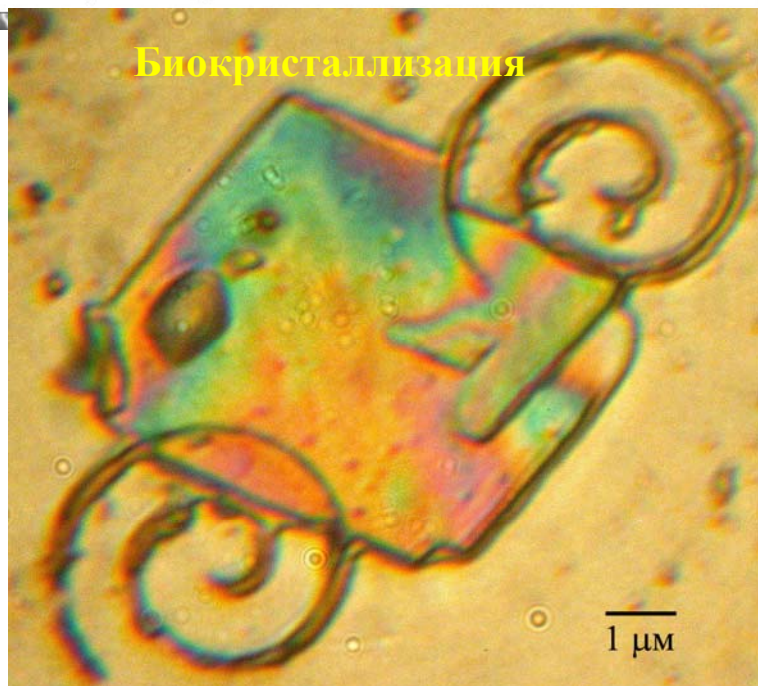
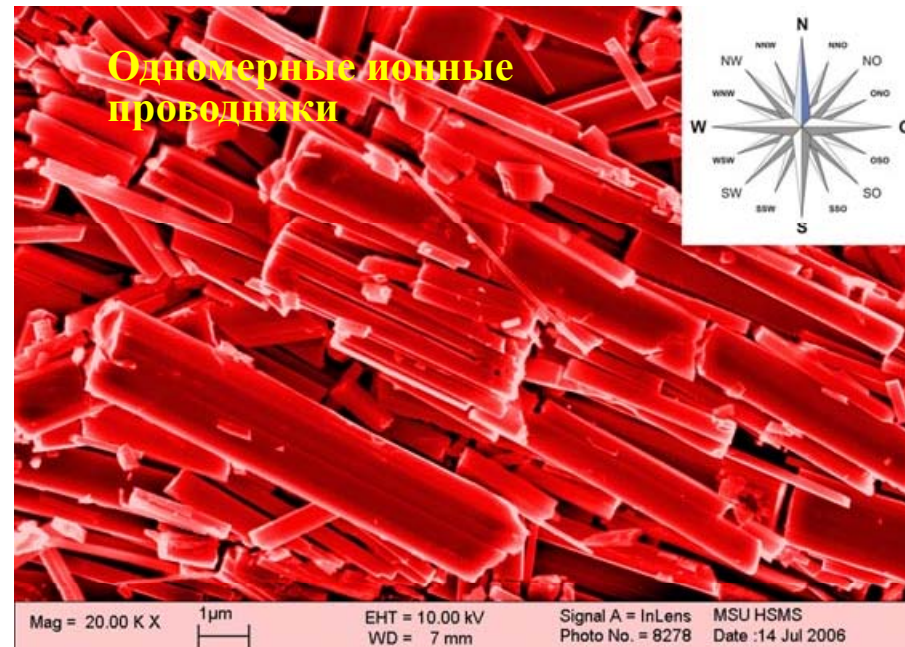
резистивные измерения, магнетохимия

Шкала масштабов

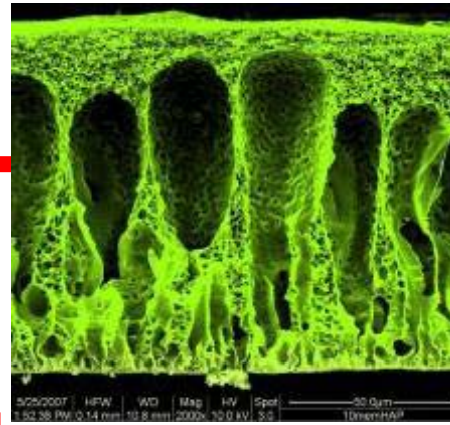




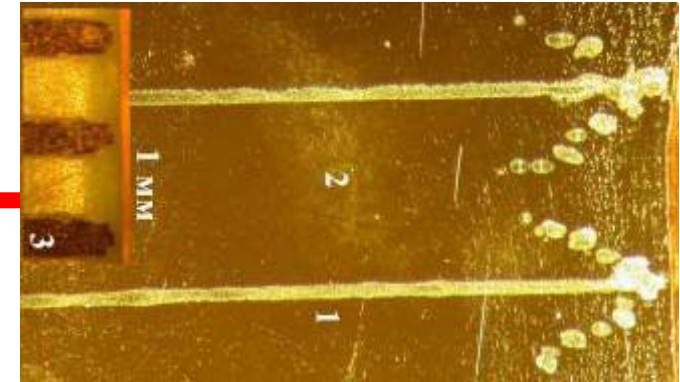




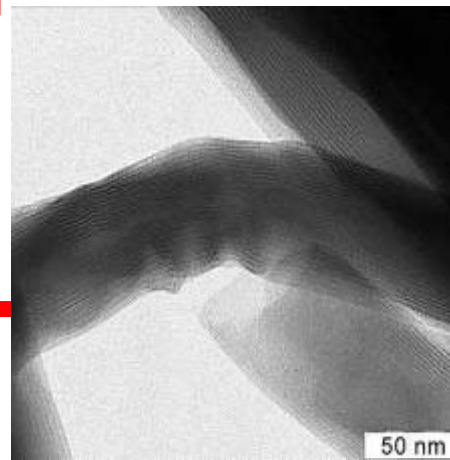
- Объемные (3D)
наноструктурированные
материалыЖ: **металлы и сплавы**
с ультрамикрзернистой
структурой, нанокерамика



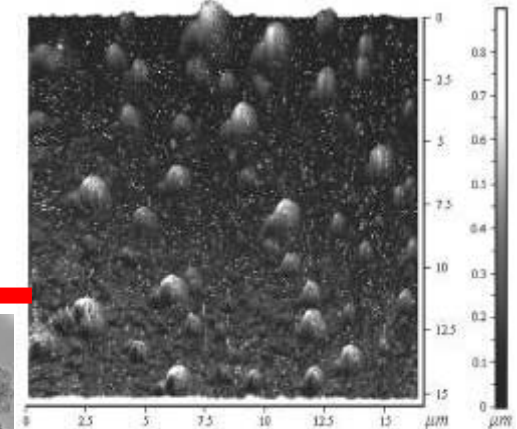
- Наноструктурированные
планарные материалы
2D: пленки и покрытия,
нанопечатная литография,
самособирающиеся монослои



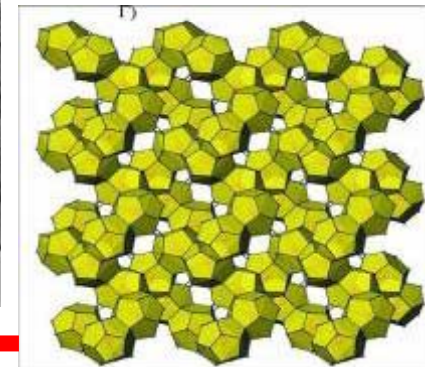
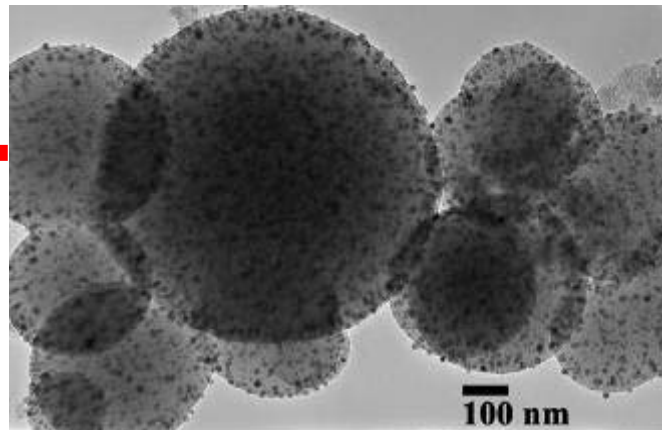
- Наноструктурированные
(1D): нанотрубки, нановолокна,
наоагрегаты и нанопроволоки



- Нанодисперсные (0D)
материалы: нанопорошки,
нанокристаллы, квантовые точки

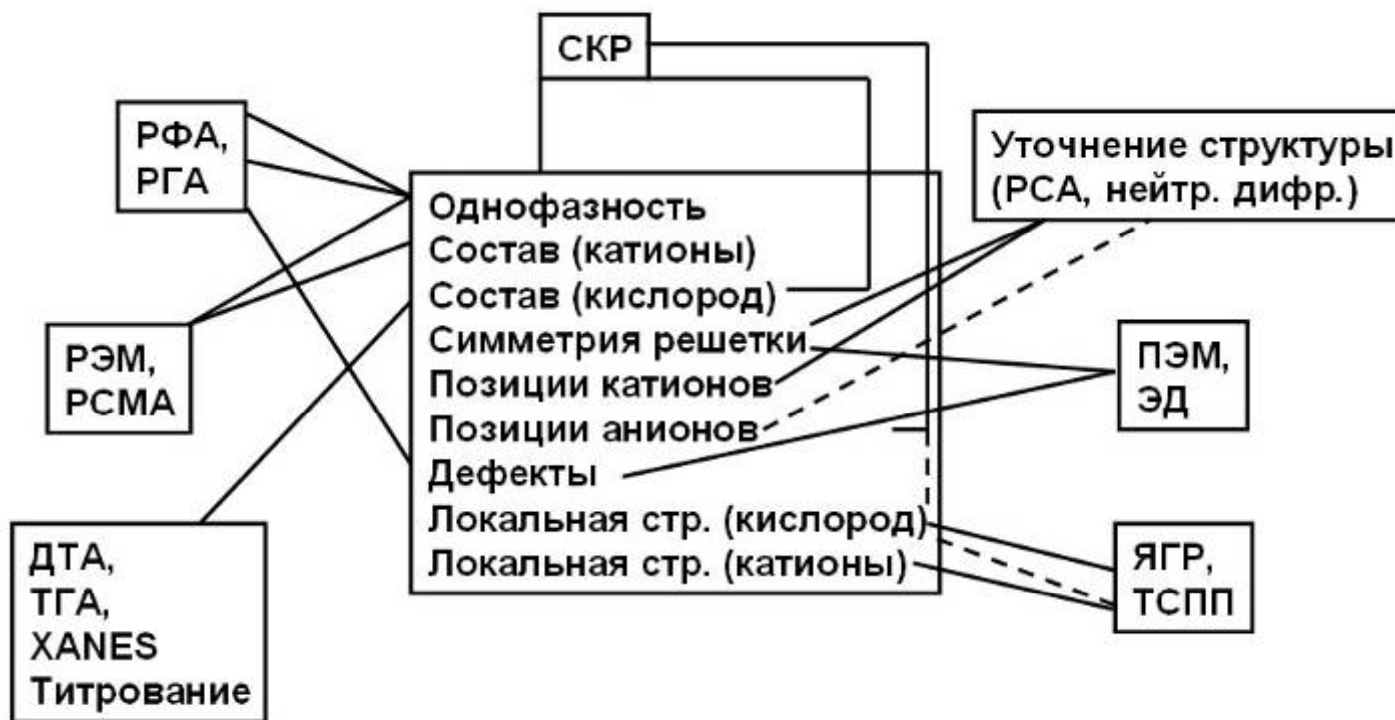


- Наноккомпозиты:
наноструктурированные
матрицы, наночастицы в
керамической, металлической
или полимерной матрице



- Супрамолекулярные материалы

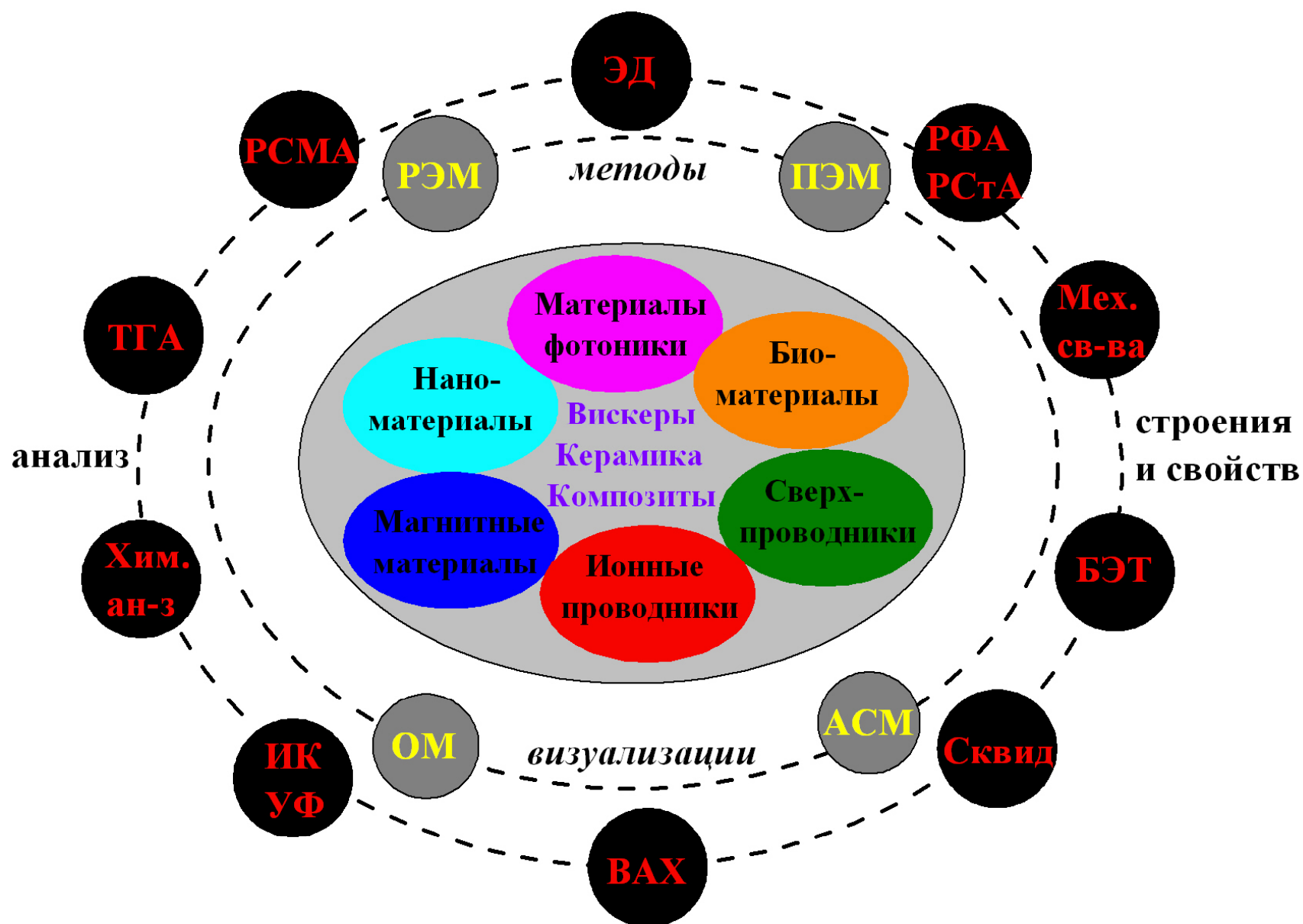
Центр коллективного пользования



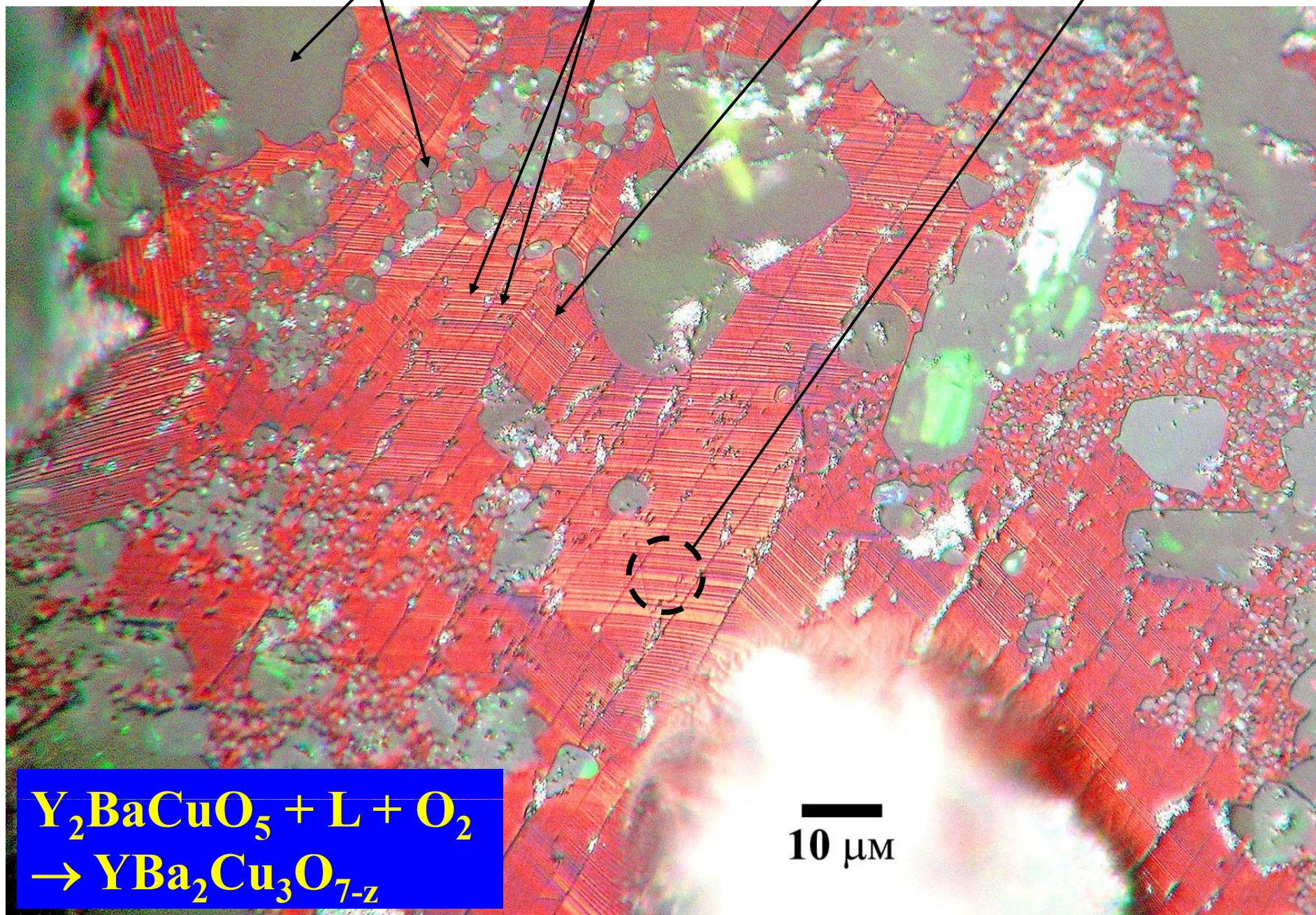
<http://www.hsms.msu.ru/ckp.html>

Центр коллективного пользования Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова «Технологии получения новых наноструктурированных материалов и их комплексное исследование» (ЦКП МГУ) создан весной 2003 г. на базе лабораторий физического, химического факультетов и факультета наук о материалах с целью объединения усилий ученых МГУ по разработке и совершенствованию нанотехнологий и для расширения возможностей использования имеющегося в МГУ аналитического и технологического оборудования.

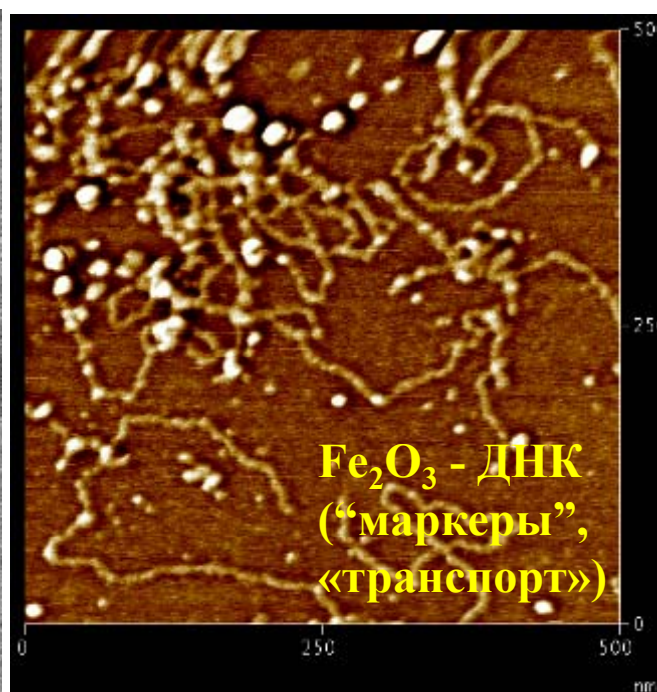
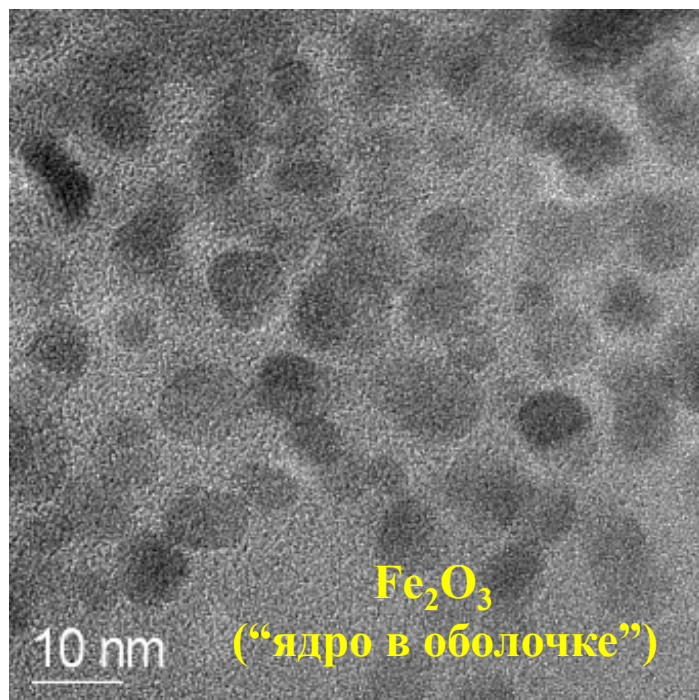
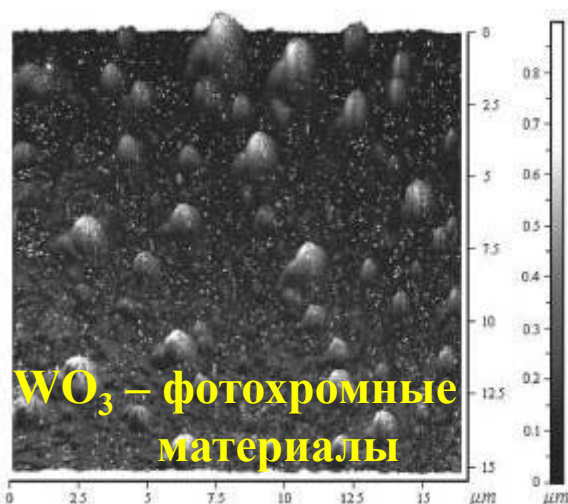
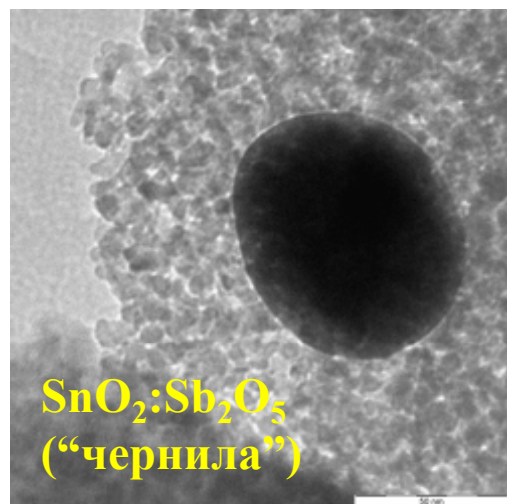
Комплексный подход



включения ламели границы зерен двойники

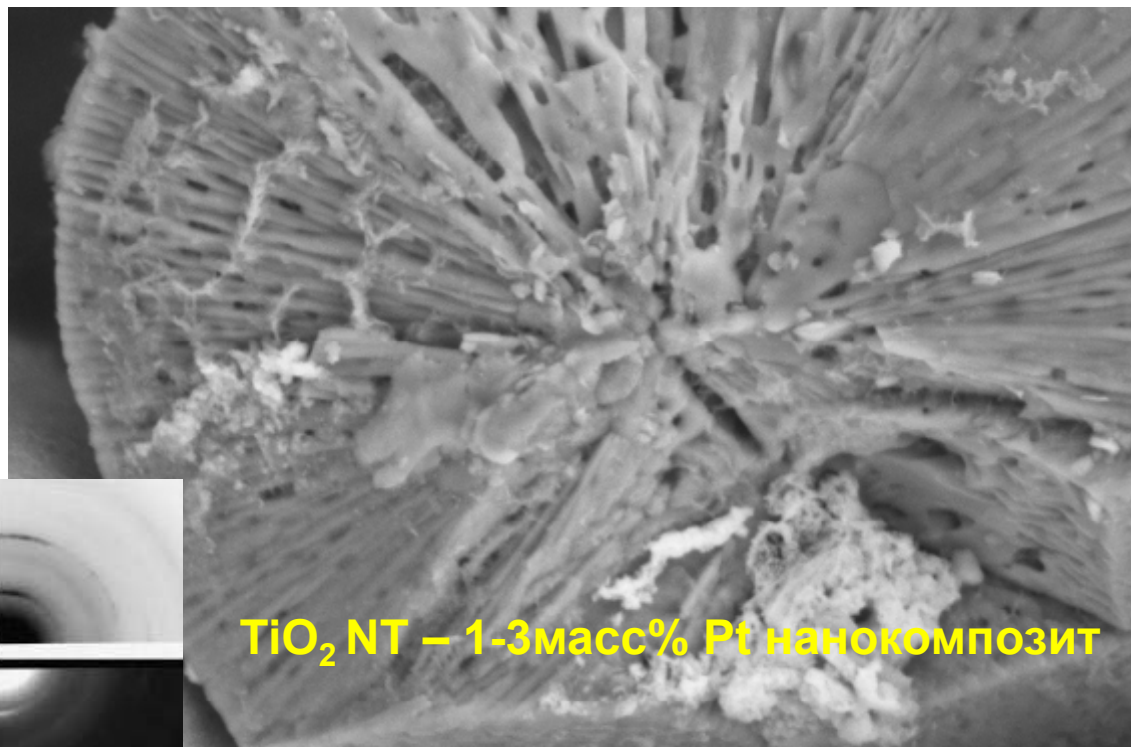
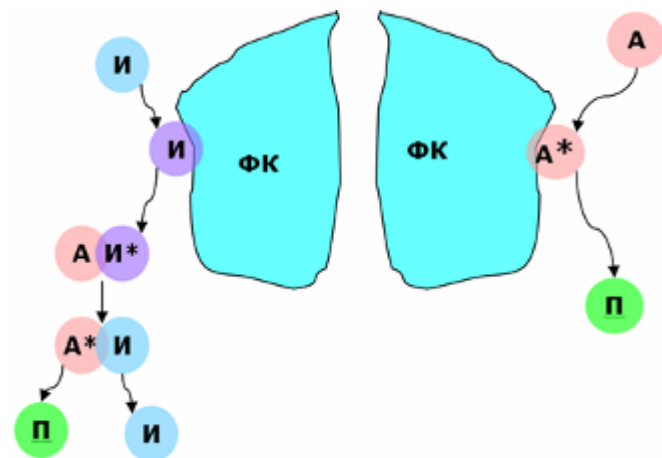


Наночастицы

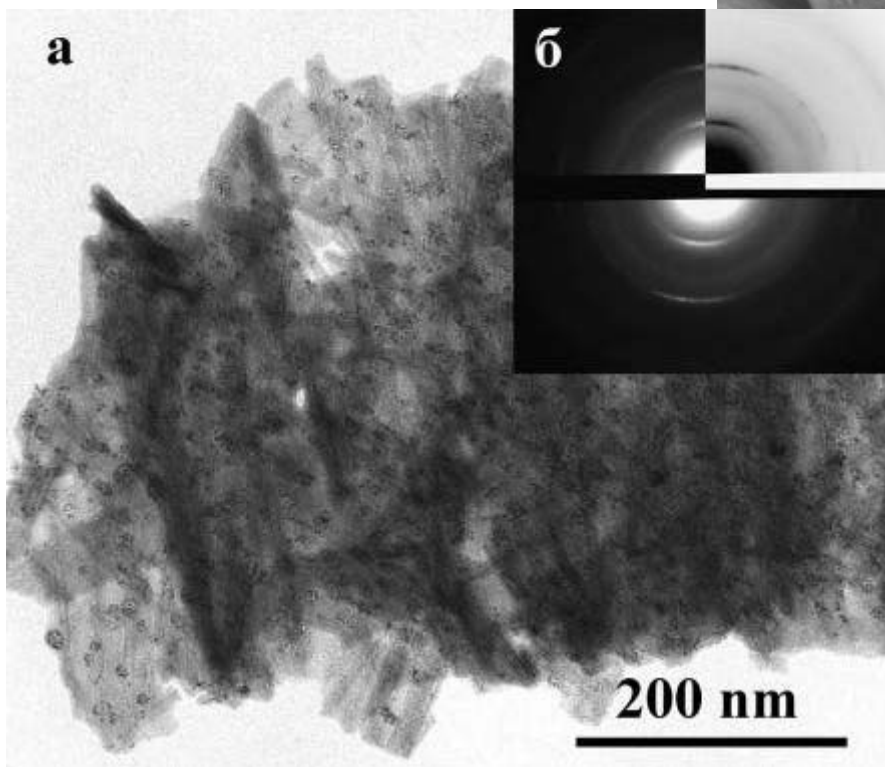


В России
смерть
от рака –
каждые 2
минуты!

Экология



TiO₂ NT – 1-3масс% Pt нанокompозит



Конверсия CO при комнатной температуре

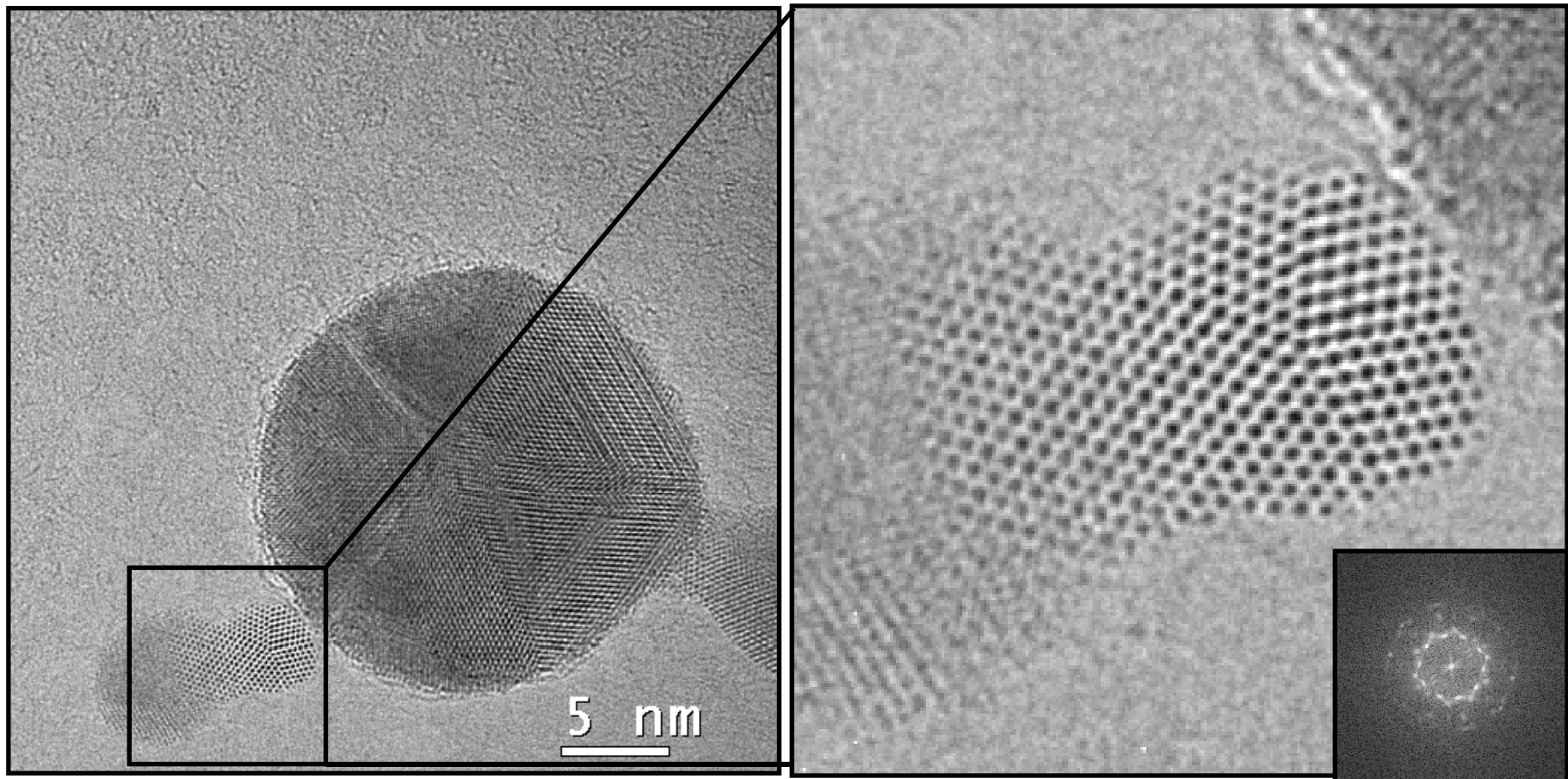
Фотокатализ (экология)

15 15

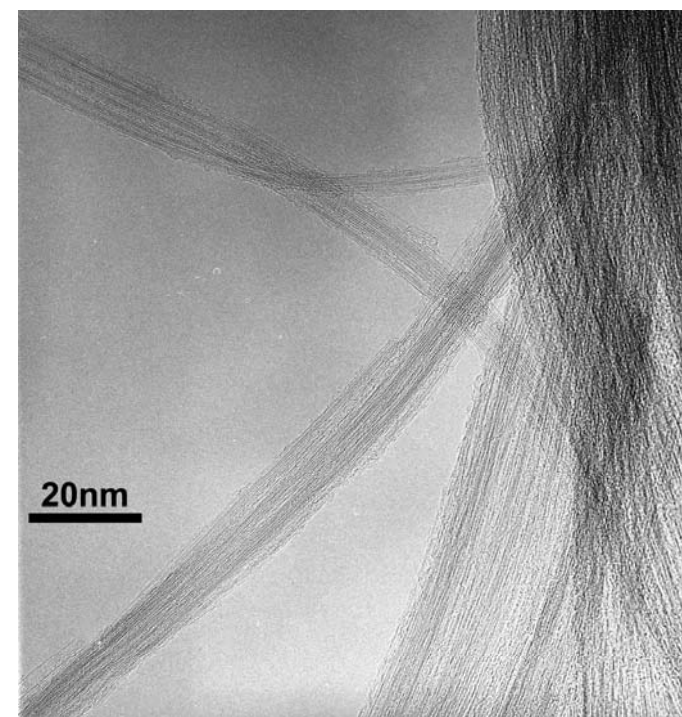
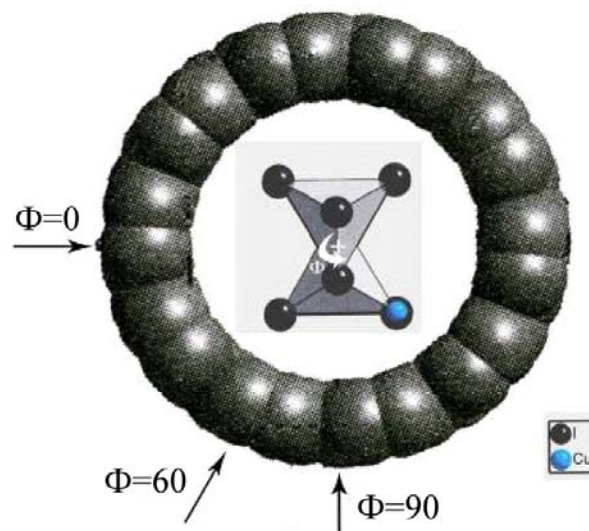
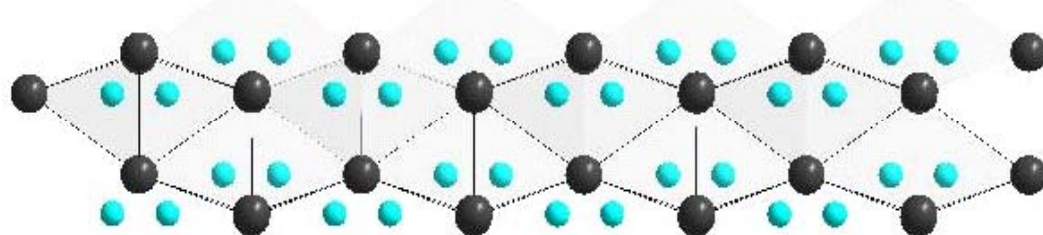
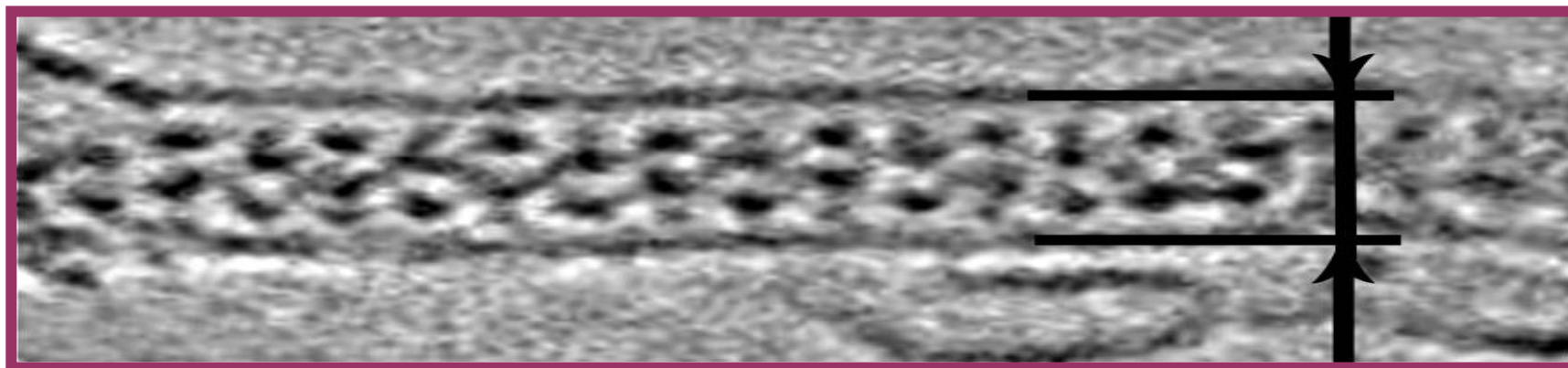
Субангстремный электронный микроскоп высокого разрешения FEI Titan



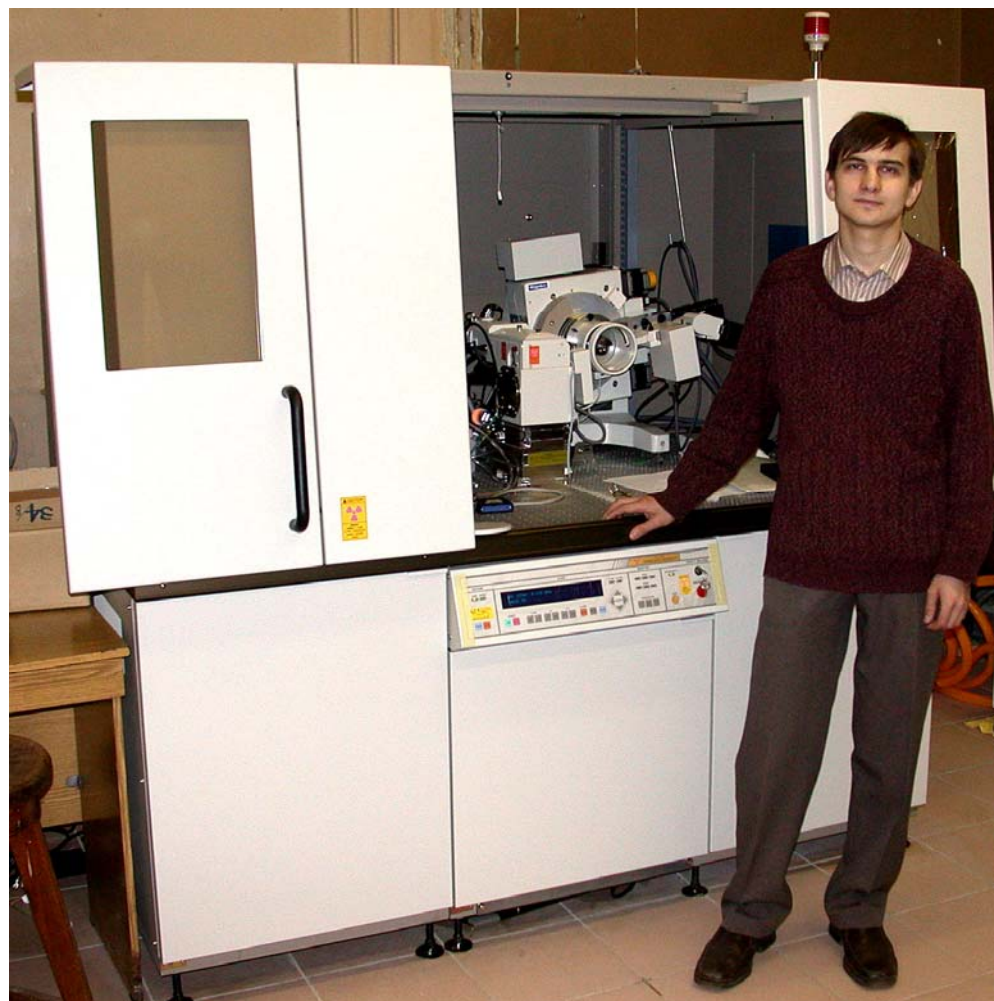
Наночастицы золота



Интеркаляция в углеродные нанотрубки



Рентгеновский дифрактометр с высокотемпературной приставкой



(Rigaku, Япония, 2006 г.)

Дифракционные методы

*наиболее важные методы при исследовании
кристаллических твердых тел!*

Методы:

РФА, РСА, РГА

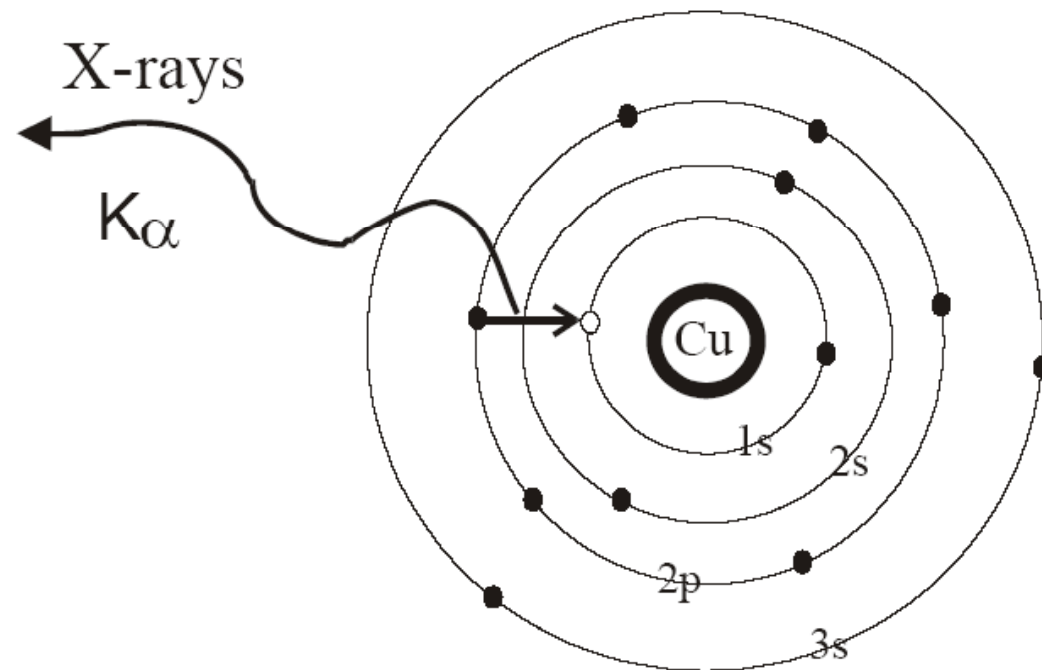
1. дифракция рентгеновских лучей
2. дифракция электронов
3. дифракция нейтронов

Получаемая информация:

1. фазовый состав смеси (продуктов реакции)
2. идентификация твердых тел
3. параметры элементарной ячейки
4. размер частиц и степень аморфизации
5. кристаллическая структура твердого тела

Рентгеновские «лучи»

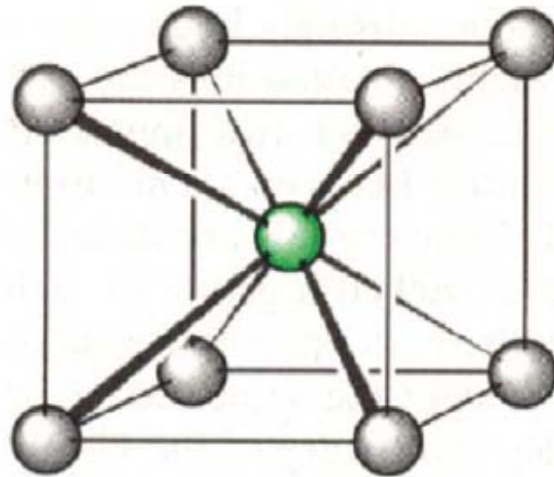
- ✓ Рентгеновские лучи образуются при бомбардировке металлической мишени электронами высокой энергии
- ✓ Электроны высокой энергии выбивают электроны внутренних оболочек атомов
- ✓ На место выбитых электронов перемещаются электроны с более удаленных оболочек, испуская при переходе рентгеновские лучи
- ✓ Длина волны рентгеновского излучения зависит от природы мишени



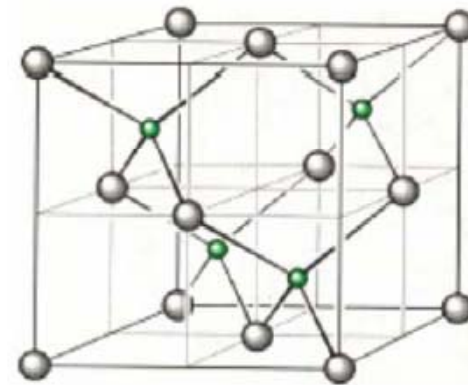
| | |
|-----------|-------------------|
| Cr | 0.22909 nm |
| Fe | 0.19373 nm |
| Cu | 0.15418 nm |
| Mo | 0.07107 nm |
| Ag | 0.05608 nm |

Дифракция

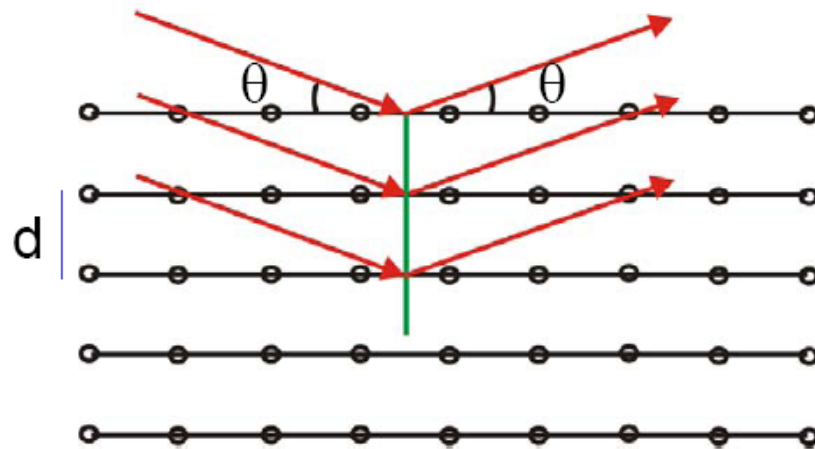
Рентгеновские лучи рассеиваются электронными оболочками атомов. Лучи, рассеянные разными атомами, интерферируют, складываясь или вычитаясь.



CsCl



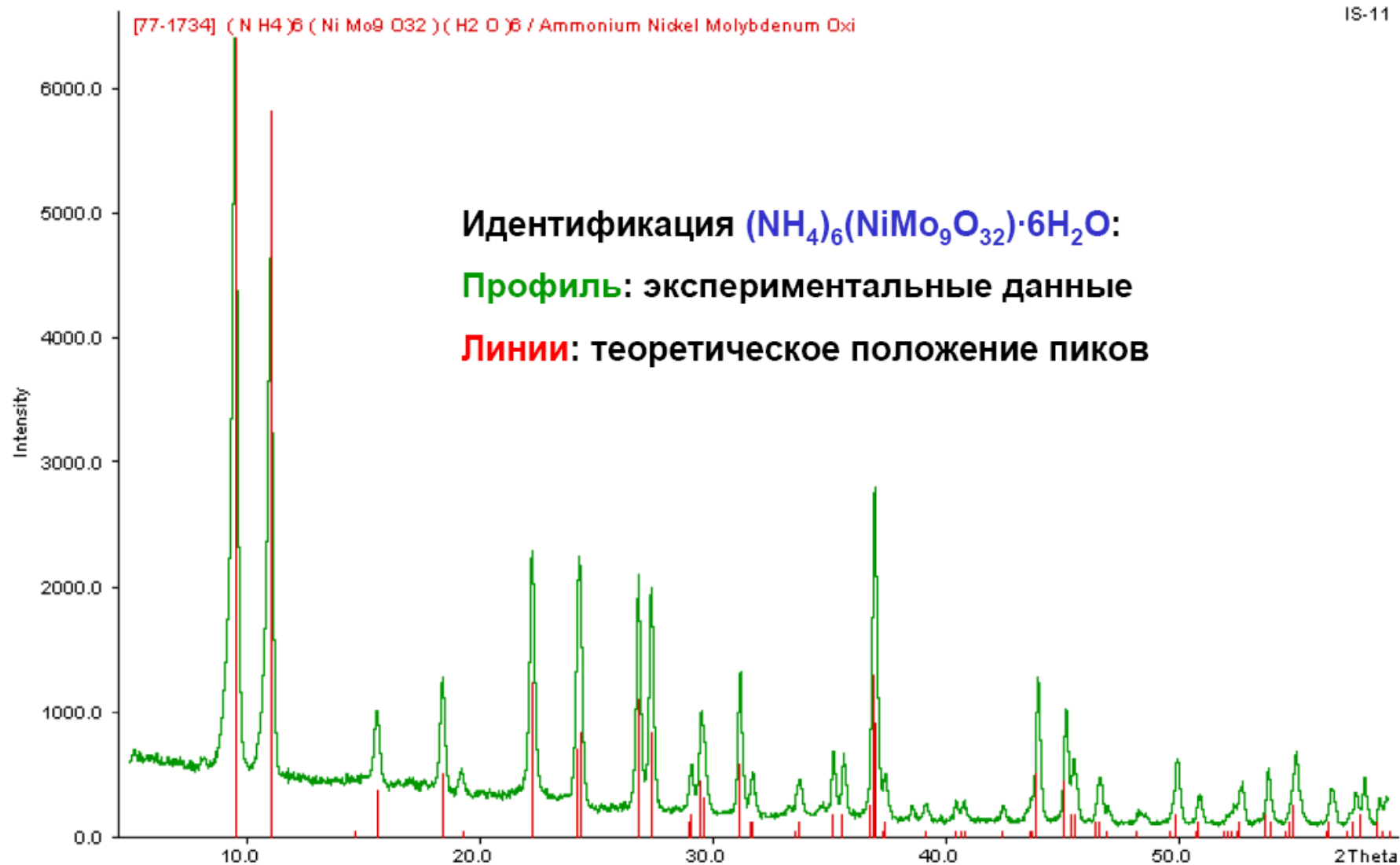
ZnS



Закон Брэгга:
 $2d \sin \theta = n\lambda$

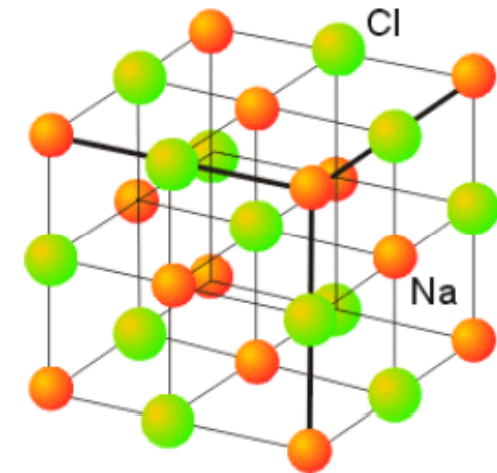
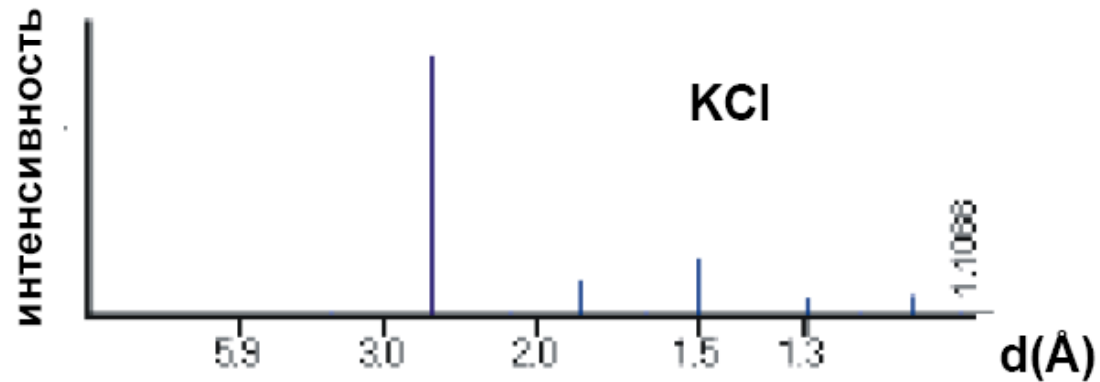
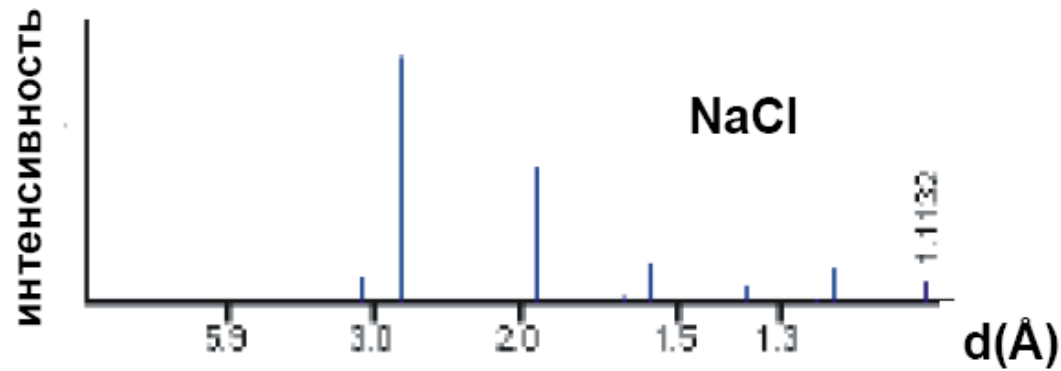
Идентификация

IS-11

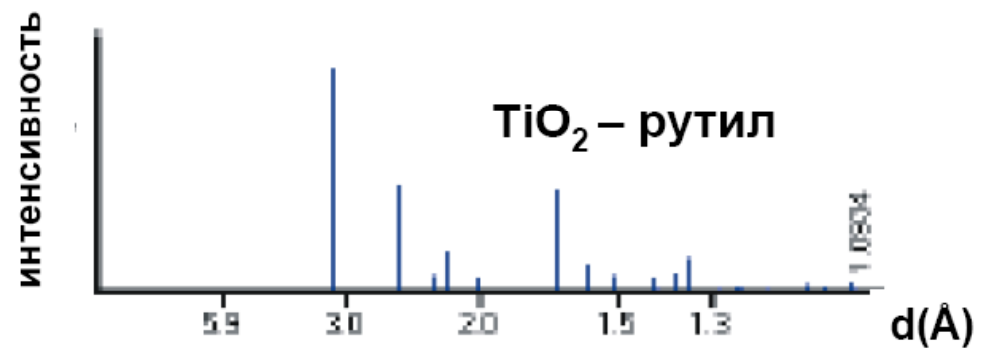
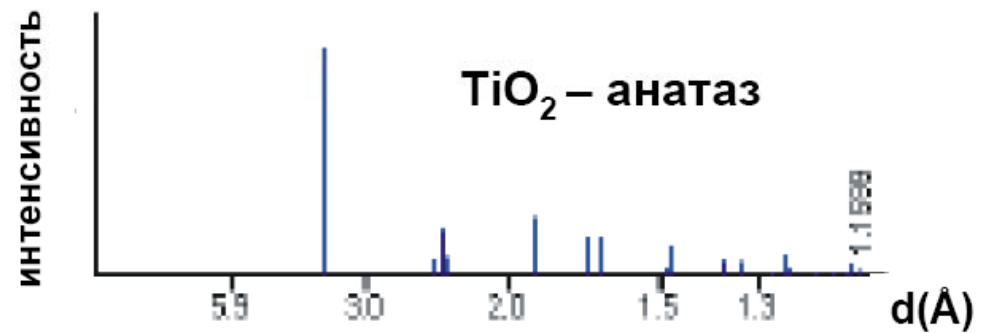
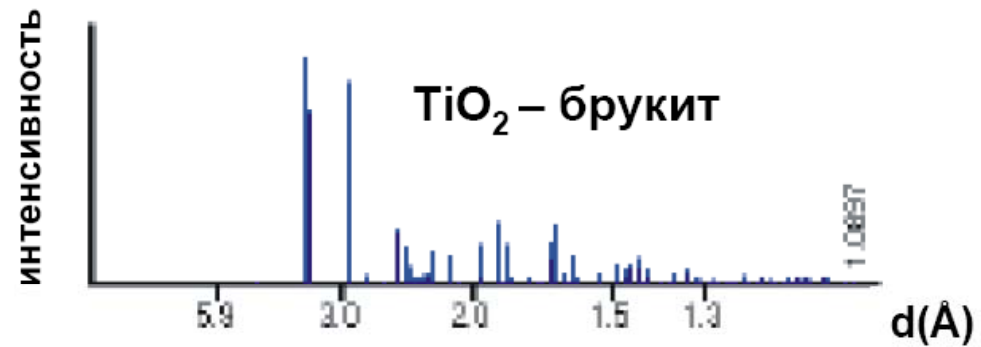


Фазовый анализ

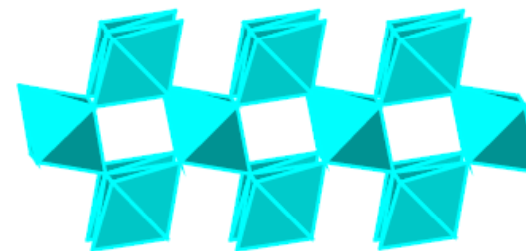
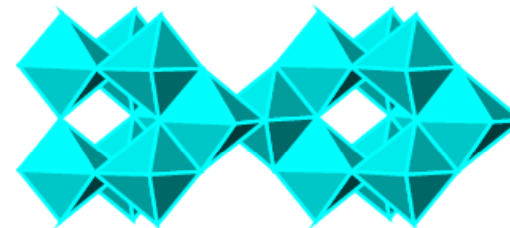
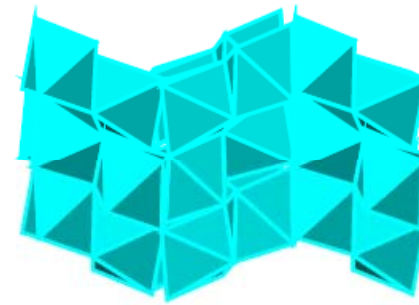
Фазы с разным составом,
но одинаковой структурой



Фазовый анализ



Фазы с одинаковым составом, но разными структурами



Индицирование

Формулировка закона Брэгга с учетом особенностей кристаллического строения:

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

h, k, l – индексы Миллера, определяющие, на сколько частей соответствующая их набору плоскость делит элементарную ячейку.

Для *ортогональных* ячеек: $1/d^2 = h^2/a^2 + k^2/b^2 + l^2/c^2$

(в частности для *кубической* ячейки $1/d^2 = h^2/a^2$)

Для *гексагональной* ячейки: $1/d^2 = (4/3)(h^2 + k^2 + hk)/a^2 + l^2/c^2$

Процедура присвоения индексов Миллера каждому межплоскостному расстоянию для данного вещества называется индицированием. В результате процесса определяются параметры элементарной ячейки.

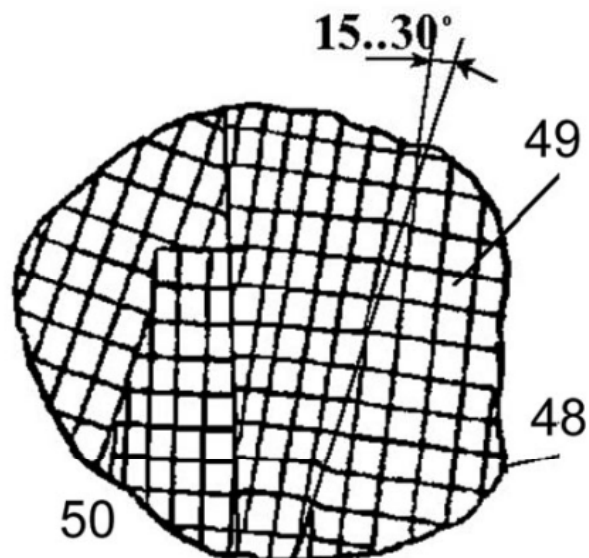
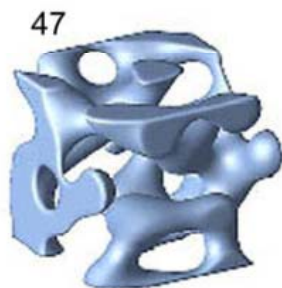
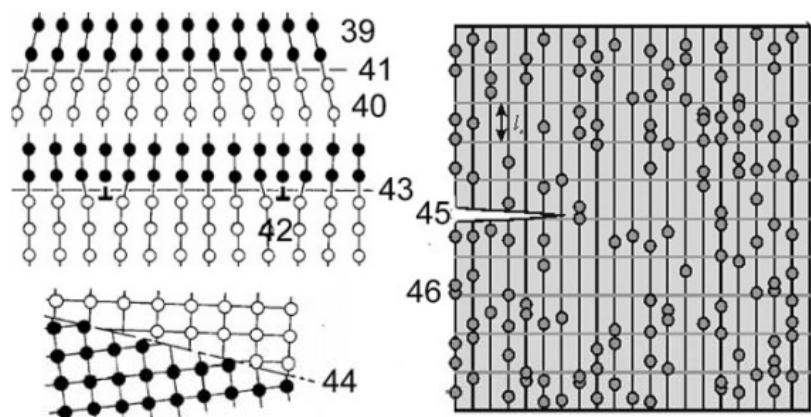
Как индцировать рентгенограмму?

Пример – рентгенограмма NaBr

Кубическая симметрия: $1/d^2 = h^2/a^2$

| d (Å) | $10^4/d^2$ | $h^2 + k^2 + l^2$ | hkl | a (Å) |
|---------|------------|-------------------|-----|----------|
| 3.449 | 840.65 | 3 | 111 | 5.973843 |
| 2.987 | 1120.80 | 4 | 200 | 5.974000 |
| 2.112 | 2241.88 | 8 | 220 | 5.973638 |
| 1.801 | 3082.99 | 11 | 311 | 5.973241 |
| 1.725 | 3360.64 | 12 | 222 | 5.975575 |
| 1.493 | 4486.22 | 16 | 400 | 5.972000 |
| 1.370 | 5327.93 | 19 | 331 | 5.971692 |
| 1.336 | 5602.57 | 20 | 420 | 5.974774 |
| 1.219 | 6729.65 | 24 | 422 | 5.971856 |
| 1.149 | 7574.60 | 27 | 333 | 5.970379 |
| 1.055 | 8984.52 | 32 | 440 | 5.967981 |
| 1.009 | 9822.40 | 35 | 531 | 5.969325 |

$$a = 5.9723 \pm 0.0005 \text{ Å}$$

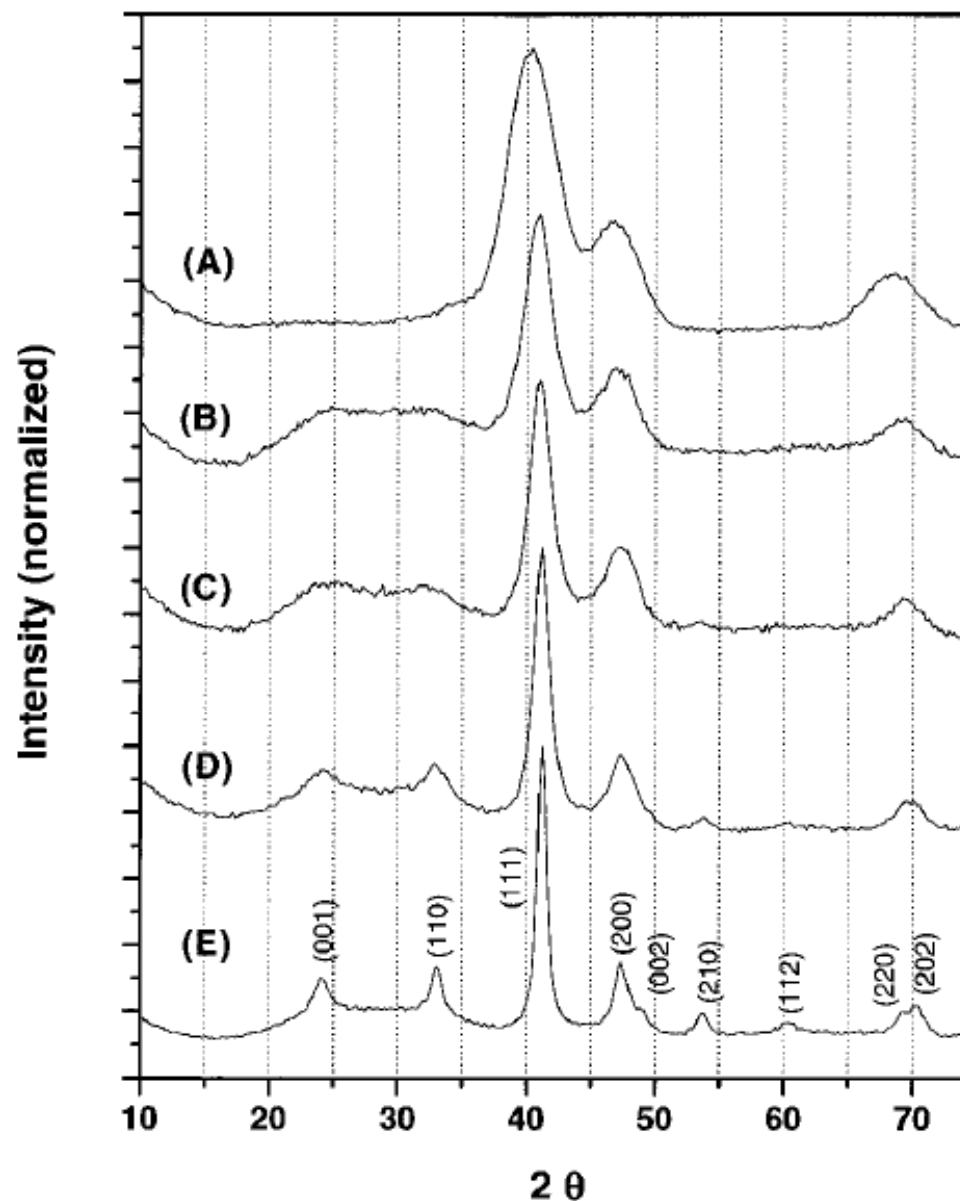


Включения и мозаичная структура.

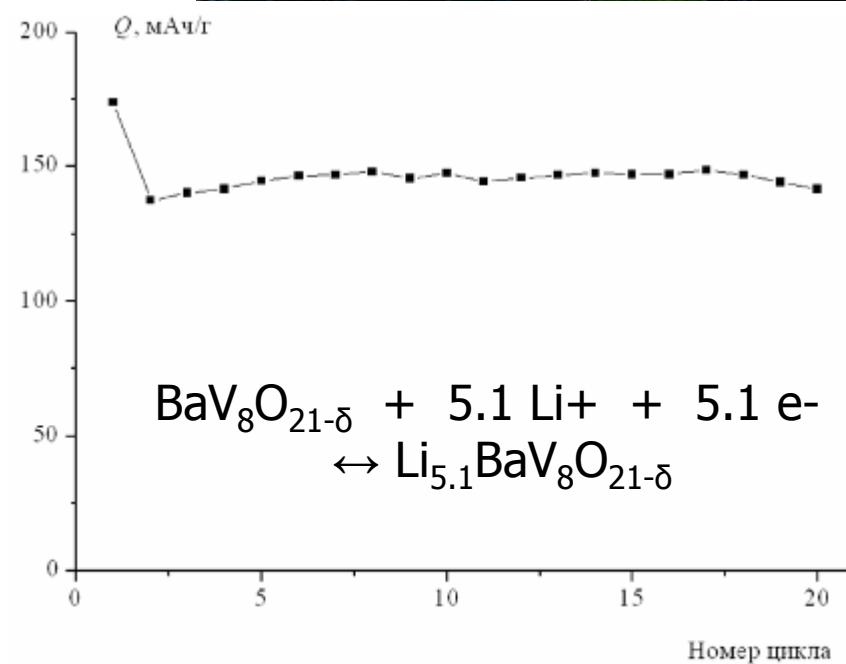
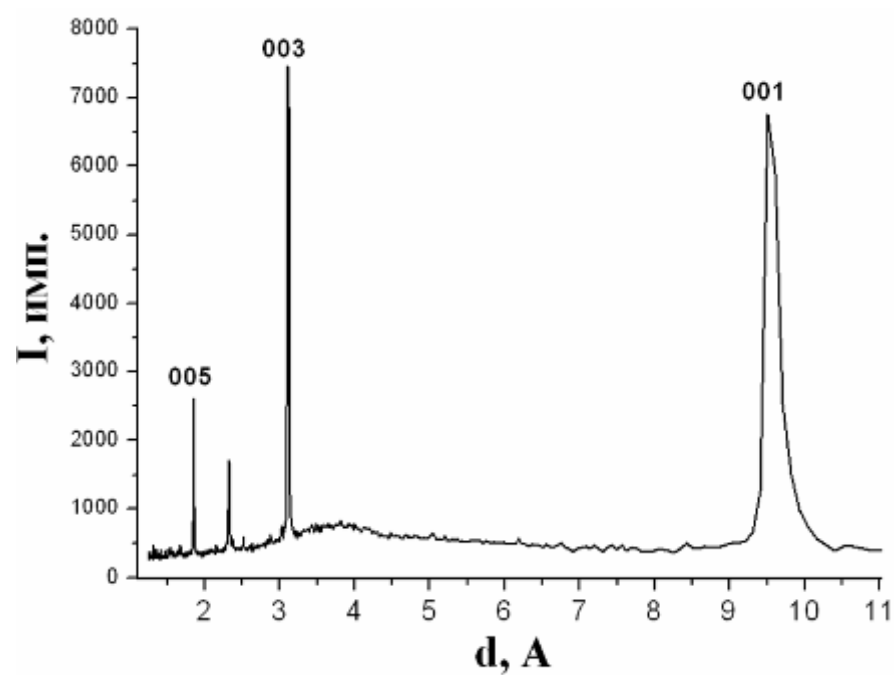
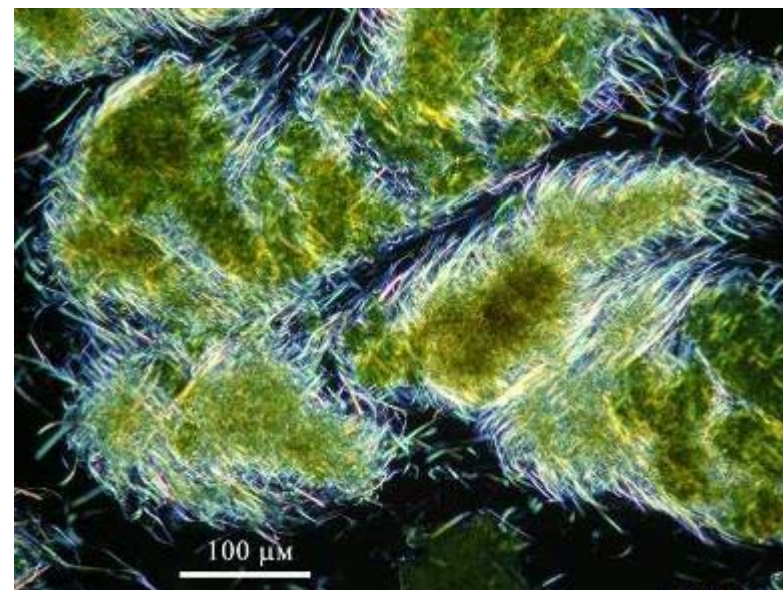
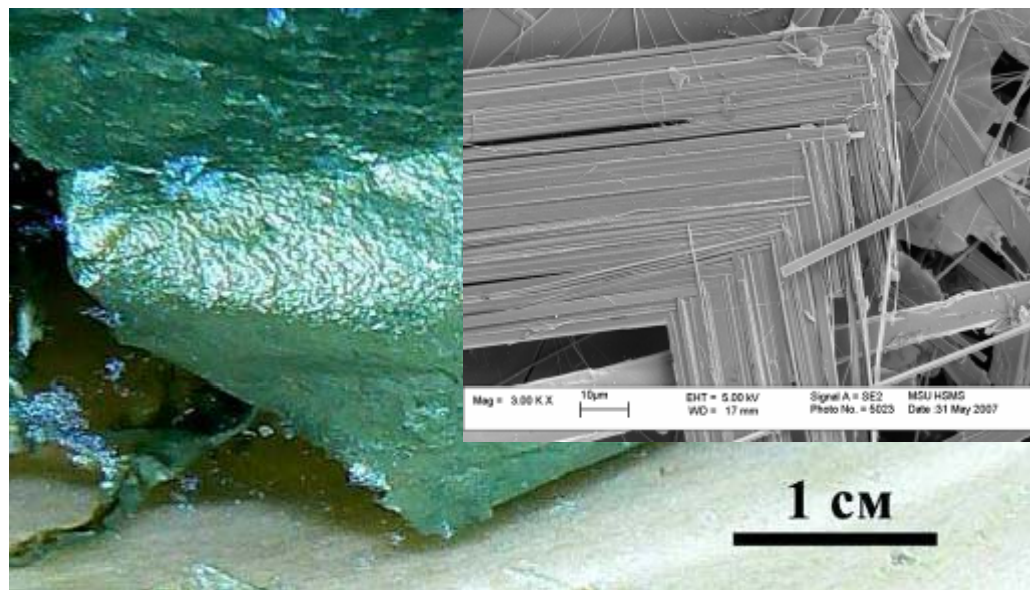
39 – 44 – строение границ раздела около включений, 39 – 41 – граница (41) когерентного включения, 39 – матрица, 40 – атомные ряды включения, 42 – дислокации несоответствия для полукogerентного включения (43), 44 – граница раздела некогерентного включения, 45-46 – включения (46) как стопор развития микротрещин (45), 47 – объемная реконструкция областей спиновального распада (флуктуации состава), 48-50 – доменное (мозаичное) строение зерен поликристаллического материала, 48 – поверхность зерна (высокоугловая граница), 49 – блоки мозаики (области когерентного рассеяния), 50 – низкоугловые границы между блоками.

Уширение рентгеновских пиков

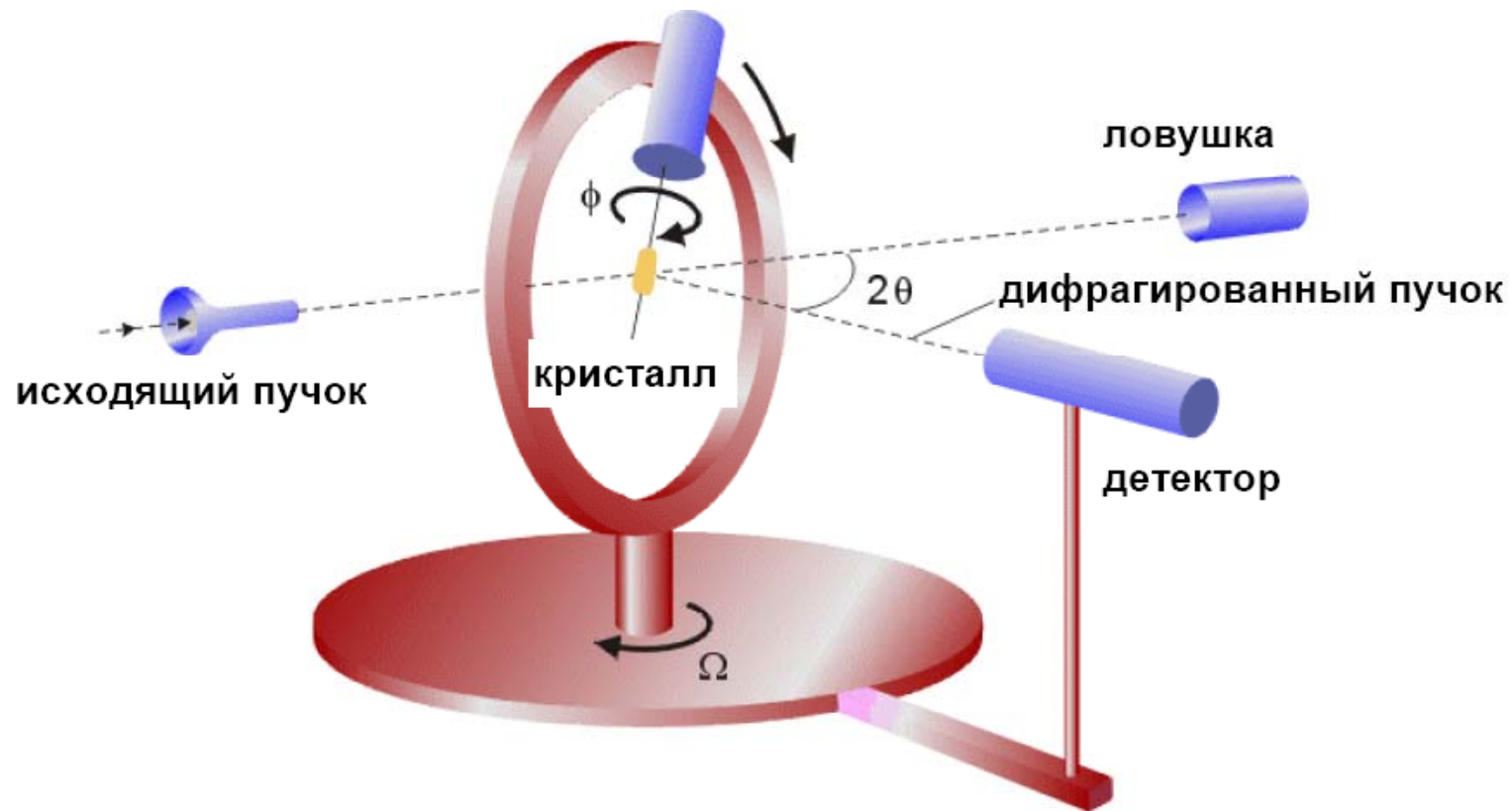
Fig. 2. XRD patterns (A) of as-synthesized 4-nm $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$ particle assemblies and a series of similar assemblies annealed under atmospheric N_2 gas for 30 min at temperatures of (B) 450°C, (C) 500°C, (D) 550°C, and (E) 600°C. The indexing is based on tabulated fct FePt reflections (25). The diffraction patterns were collected with a Siemens D-500 diffractometer with $\text{Cu K}\alpha$ radiation (wavelength $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$).



Наноионика



Уточнение структуры

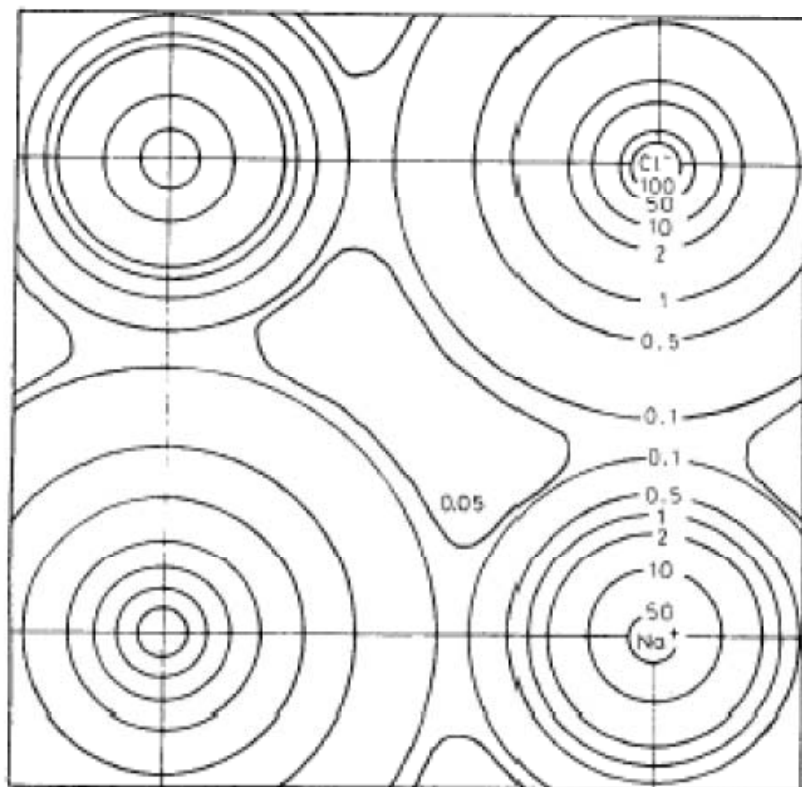


Основные параметры кристаллической структуры:

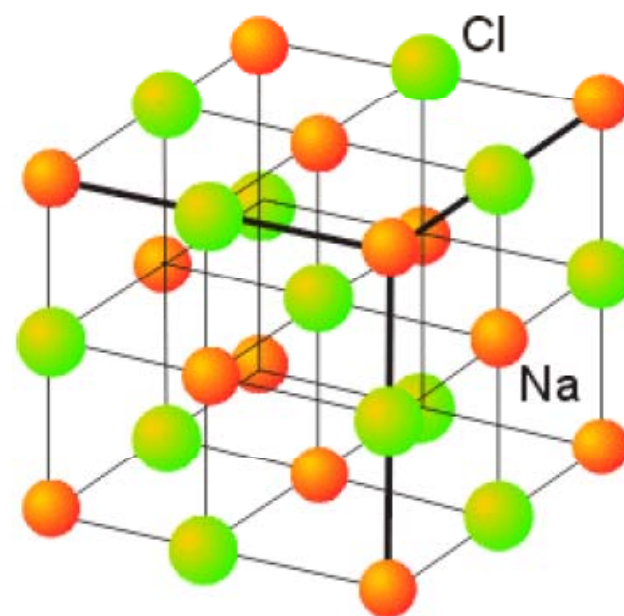
1. Сингония и параметры элементарной ячейки
2. Координаты атомов, длины связей и величины валентных углов
3. Фактор недоуверности

Электронная плотность

Электронная плотность по данным
рентгеновской дифракции



Карта электронной плотности NaCl



Особенности дифракции нейтронов

1. Нейтроны очень дороги – требуются реакторы для их получения
2. Используется для анализа кристаллических структур, содержащих легкие атомы – H, Li, B
3. Единственный метод для анализа магнитной структуры

Особенности электронной дифракции

1. Можно использовать для очень малого количества вещества
2. Используется для анализа особенностей кристаллической структуры на очень тонких образцах

Раман - спектрометр



Рамановский спектрометр Renishaw inVia Reflex (Англия) 19 млн. руб.

Спектроскопия

Что такое спектр?

1) Система атомов устойчива в определенных состояниях, которым соответствуют значения энергии $E_0 < E_1 < E_2 < E_3 < \dots$

2) Переход из состояния с E_i в состояние с E_j связан с электромагнитным излучением или поглощением, причем

$$\Delta E = E_i - E_j = h\nu = hc/\lambda = hc\tilde{\nu} = kT$$

h – постоянная Планка, $6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с

ν – частота излучения (с⁻¹, Гц)

c – скорость света, $2.997 \cdot 10^8$ м/с

λ – длина волны излучения (м, см, нм)

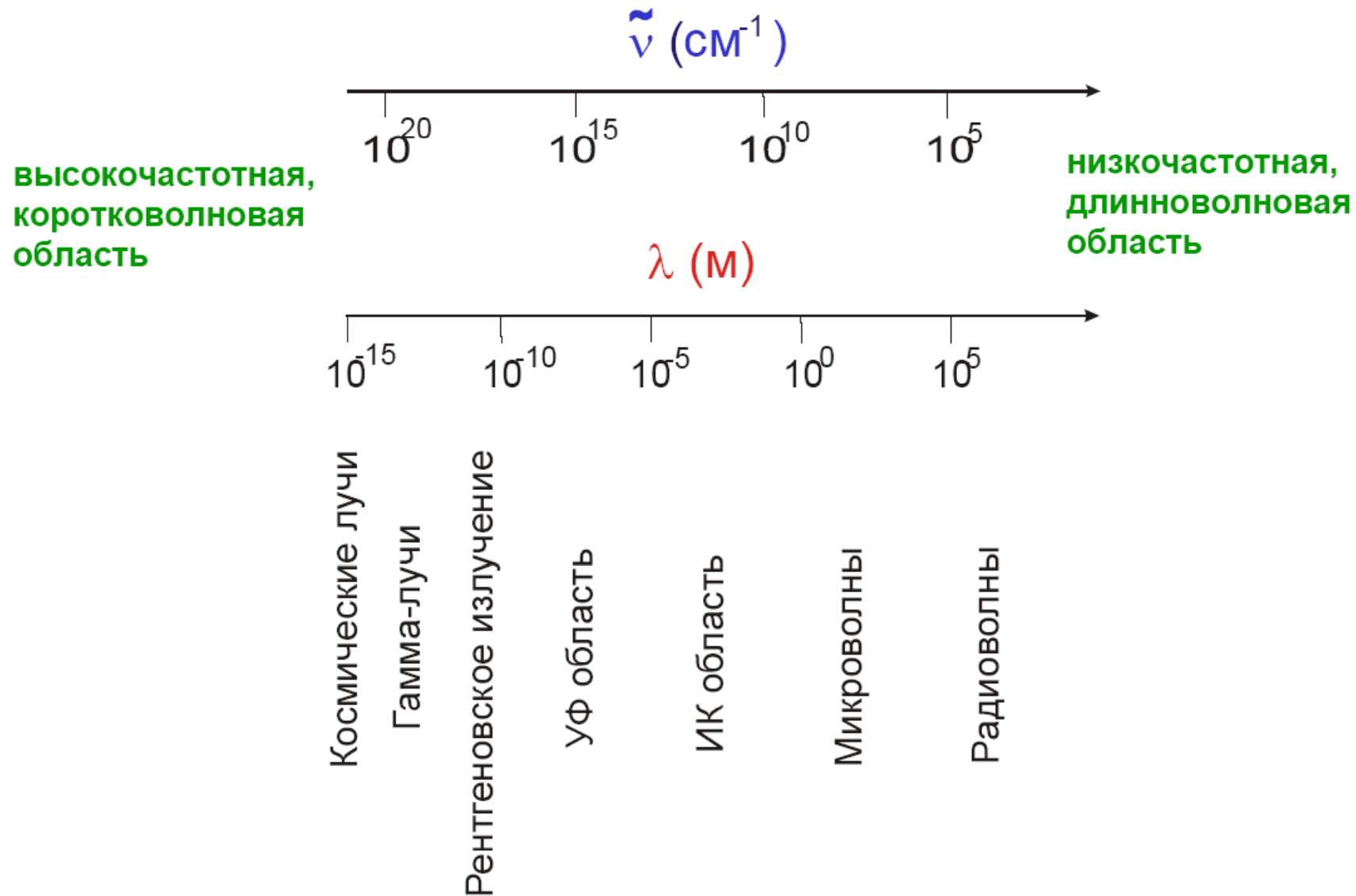
$\tilde{\nu}$ – волновое число (см⁻¹)

k – константа Больцмана, $1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

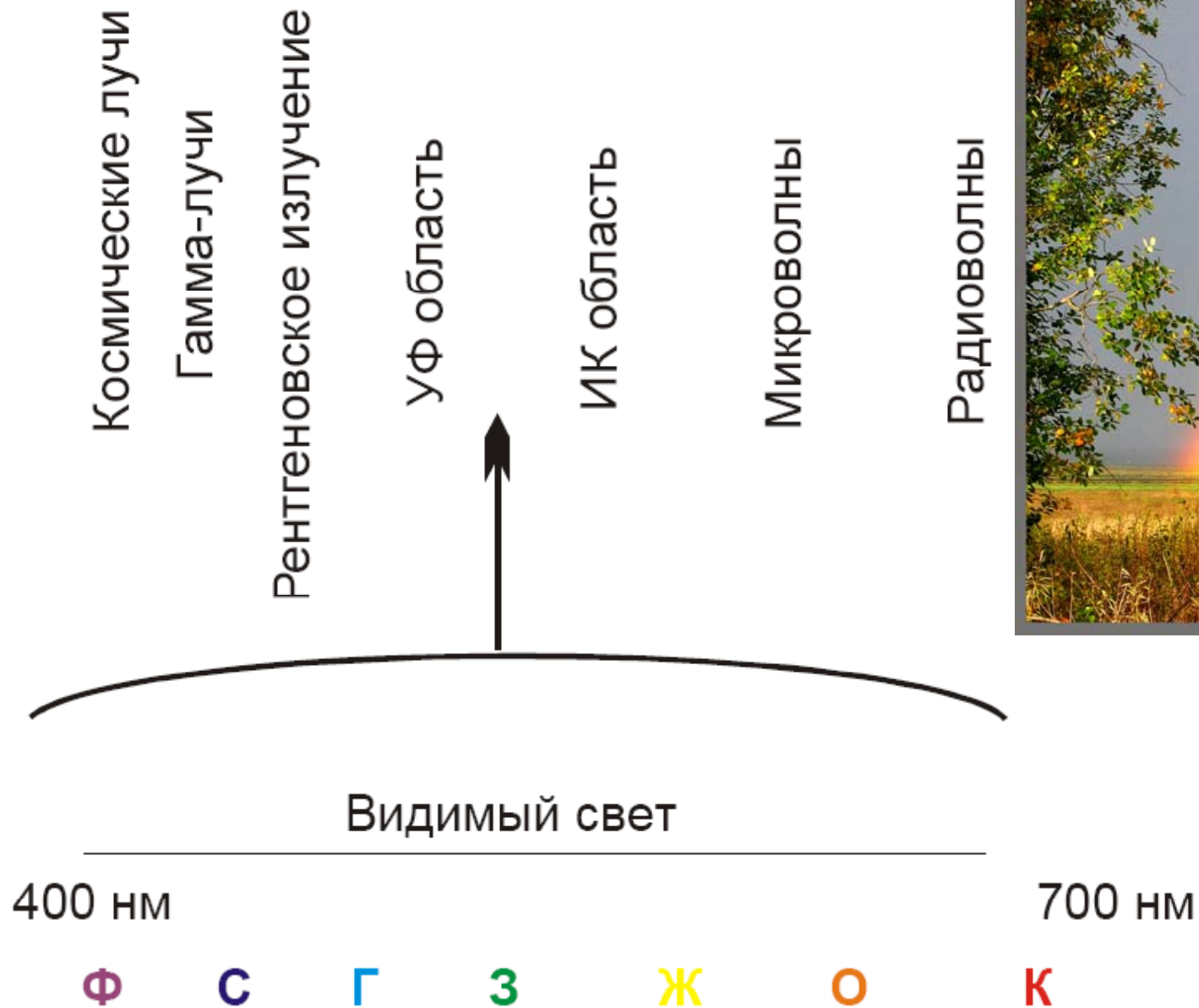
T – абсолютная температура (К)

3) Набор дискретных переходов на разных частотах называется **спектром**

Шкала частот



Радуга



Шкала

| Шкала / спектр | гамма-лучи | X-лучи | УФ область | видимый свет | ИК область | микро-волны | радиоволны |
|----------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| частота, Гц | $10^{20}-10^{18}$ | $10^{18}-10^{17}$ | $10^{17}-10^{15}$ | 10^{14} | $10^{13}-10^{12}$ | $10^{12}-10^9$ | 10^9-10^7 |
| волновое число, см^{-1} | $10^{10}-10^8$ | 10^8-10^7 | 10^7-10^5 | 10^4 | 10^3-10^2 | 10^2-10^{-1} | $10^{-1}-10^{-3}$ |
| длина волны, см | $10^{-10}-10^{-8}$ | $10^{-8}-10^{-7}$ | $10^{-7}-10^{-5}$ | 10^{-4} | $10^{-3}-10^{-2}$ | $10^{-2}-10^1$ | 10^1-10^3 |
| энергия, эВ | 10^7-10^5 | 10^5-10^3 | 10^3-10^1 | 1 | $10^{-1}-10^{-2}$ | $10^{-2}-10^{-5}$ | $10^{-8}-10^{-7}$ |
| спектроскопия | ЯГР | РФЭС | УФ-вид. | | ИК, КР | ЭПР | ЯМР, ЯКР |

УФ-видимая спектроскопия

Электронные спектры обусловлены переходами между электронными энергетическими уровнями.

Чем определяются электронные спектры?

Для **атомов**

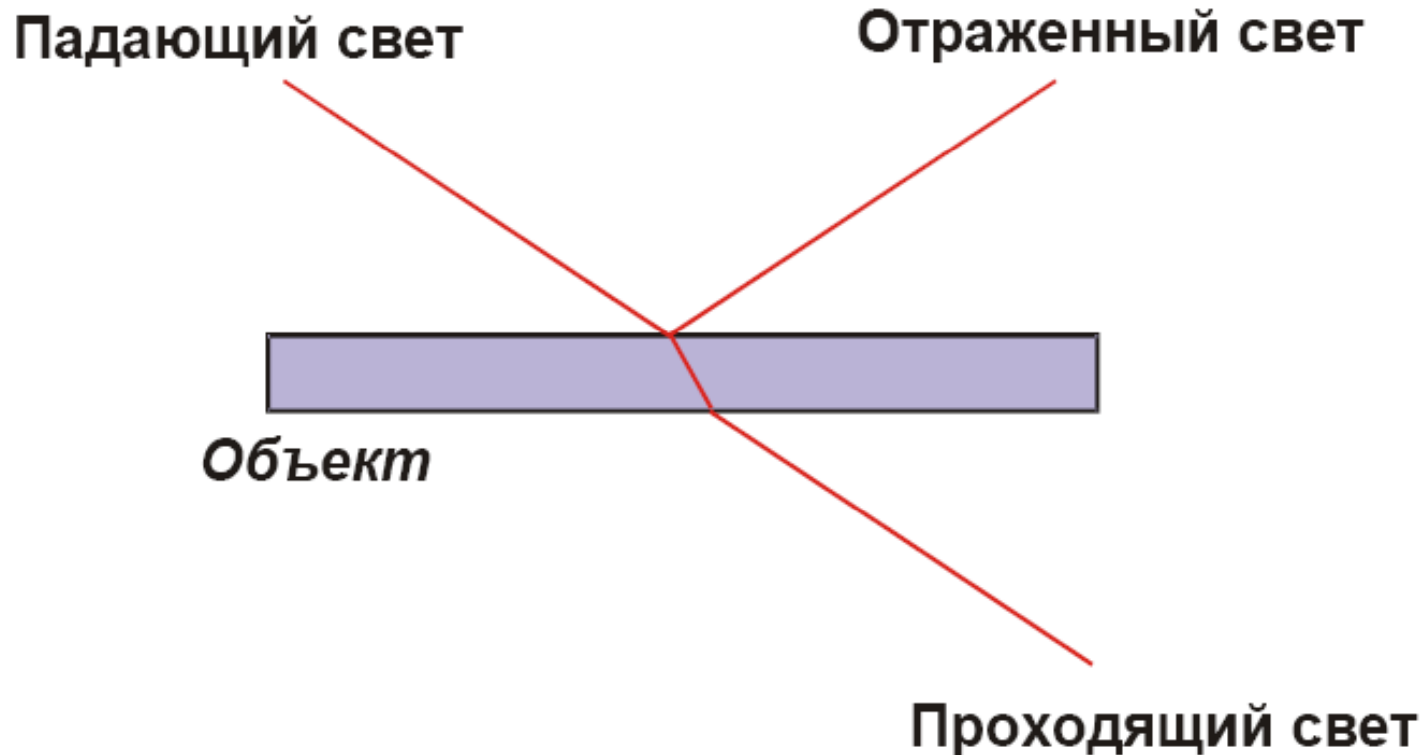
- электронной конфигурацией атомов

Для **комплексов**

- электронной конфигурацией центрального иона и его окружением

Электронные переходы в **комплексах** имеют энергию, соответствующую **УФ** и **видимой** областям электромагнитного спектра

Дополнительные цвета

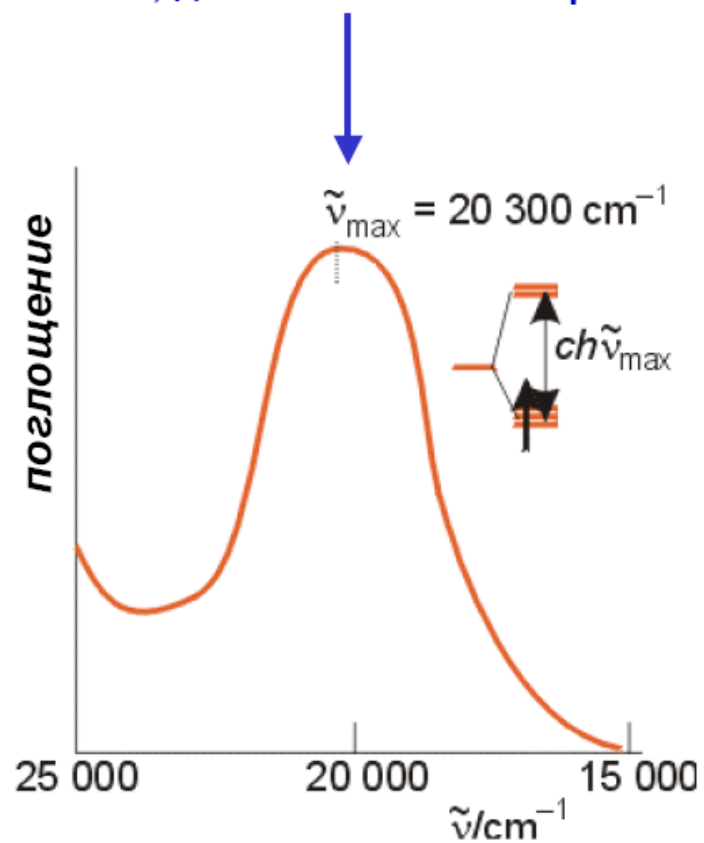


Комплексы, поглощающие в видимой области спектра, имеют разную окраску в проходящем и отраженном свете

Окраска комплексов



желтый; дополнительный – фиолетовый



$$E = ch\tilde{\nu}_{\text{max}}N_A \text{ (кДж/моль)}$$



Иоханнес Иттен

Колебательная спектроскопия (ИК, КР)

Каждая молекула представляется как набор
шариков (атомы) и пружин (связи между ними)

Применяется модель **гармонического осциллятора**:

При отклонении от равновесного положения возникает возвращающая сила **F**:

$$F = -kx$$

k – силовая константа, **x** – параметр смещения.

Энергия колебания гармонического осциллятора:

$$E \sim h\nu = (h/2\pi) (k \cdot \mu)^{1/2}$$

(μ – эффективная масса)

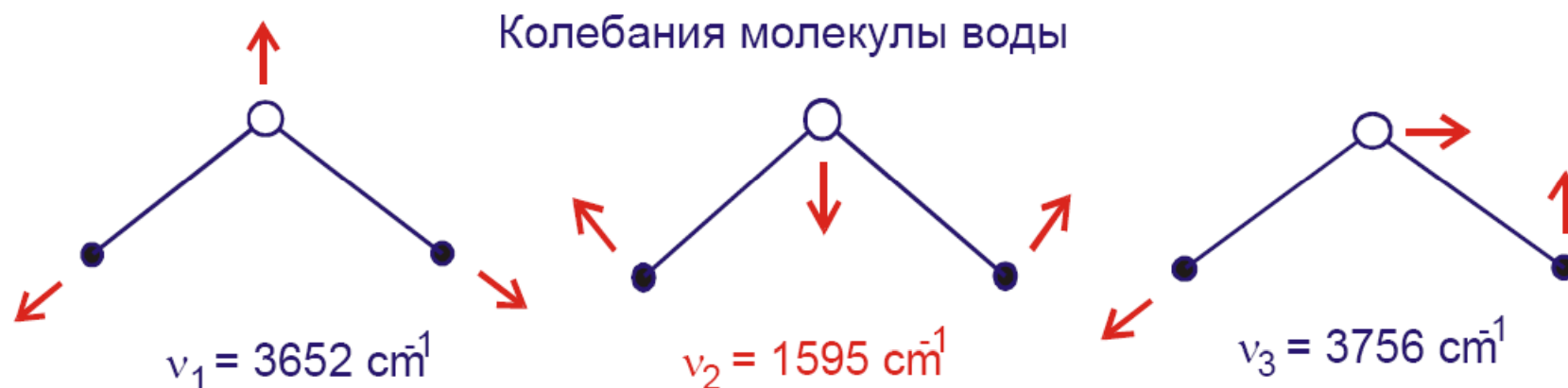
Колебания проявляются в диапазоне **40 – 4000 см⁻¹**

соответствует **ИК-области**

Колебания молекул воды

Для каждой молекулы есть свой набор колебаний
с характеристическими частотами

Их число определяется формулой $3N-6$
или $3N-5$ для линейных молекул



Частоты смещаются, если вода – лиганд. Смещение зависит от:

- 1) природы и степени окисления ц.а.
- 2) дентатности воды как лиганда

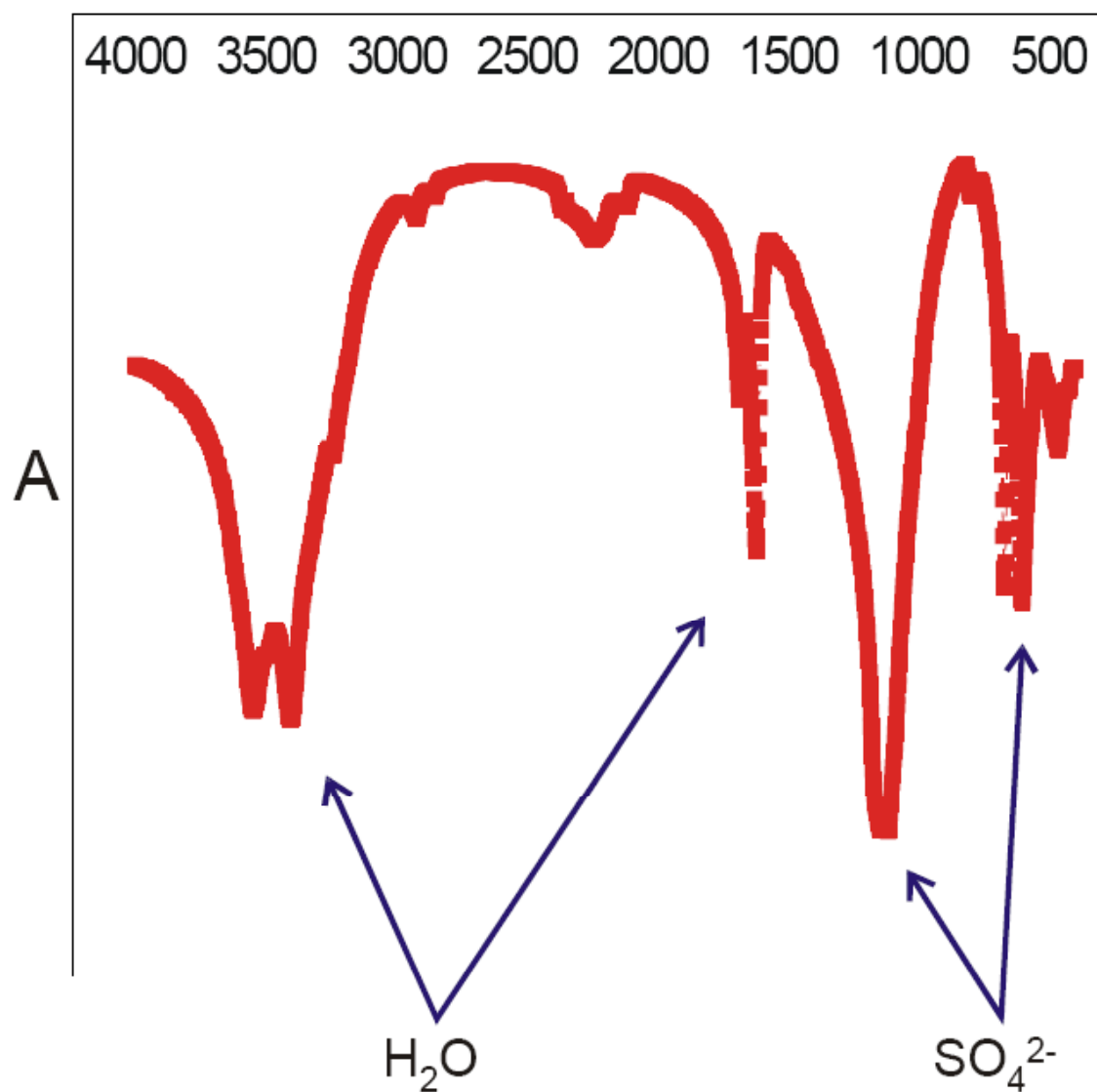
| | | |
|---------|---------|-------------|
| ν_1 | ν_3 | 3600 - 3320 |
| ν_2 | | 1650 - 1600 |

Типичные частоты колебаний

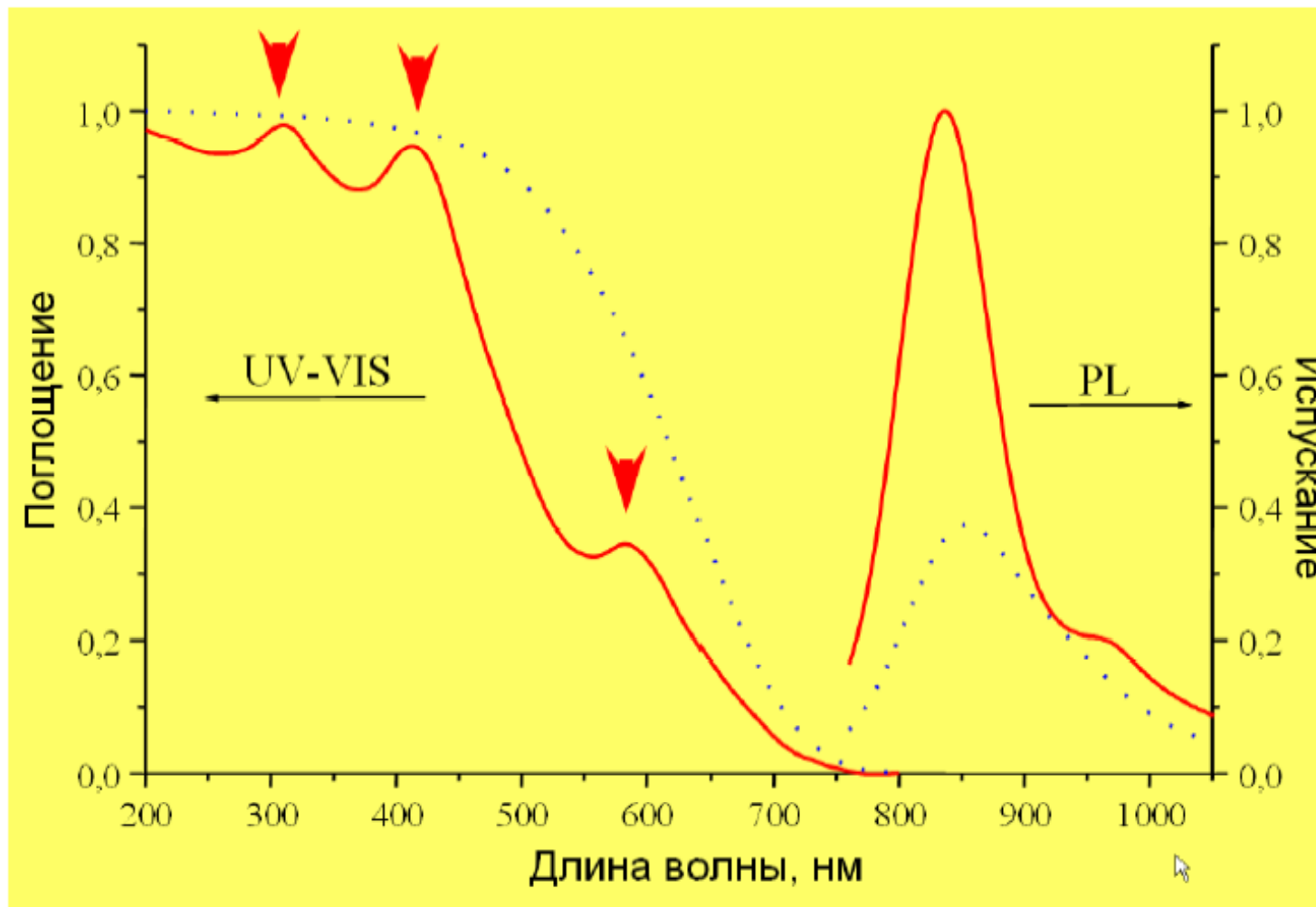
| Тип колебания | Диапазон частот | Тип колебания | Диапазон частот |
|--|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| Валентные колебания | | Деформационные колебания | |
| ν (O–H) | 3600–3000 | δ (O–H), δ (N–H) | 1650–1550 |
| ν (C \equiv C), ν (C \equiv N) | 2400–2100 | δ (C–H) | 1450–1250 |
| ν (P–H), ν (C–H) | 2250–2100 | δ (C–O), δ (C–N) | 1300–1000 |
| ν (C=O) | 1850–1650 | δ (C–H), δ (N–H) | 950–800 |
| ν (C=C), ν (N=O), | 1750–1600 | δ (Si–O), δ (P=O) | 700–550 |
| ν (C=N) | | | |
| ν (N=N) | 1650–1450 | δ (S–O) | 650–450 |
| ν (Si–O), ν (P=O) | 1300–1000 | | |
| ν (S–O) | 1000–800 | | |
| ν (C–Cl) | 750–690 | | |

Гипс

cm^{-1}



Квантовые точки



Спектры поглощения и люминесценции нанокompозита PbS/СДГ,
полученного УФ-облучением $[\text{Pb}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{2-}$ при $T = 77\text{K}$

«Кальмар»



СКВИД-магнетометр S700 производства компании Cryogenic
(Англия) 12 млн.руб.

Магнетохимия

При наличии неспаренного электрона возникает
парамагнетизм

Соединения с неспаренным электроном парамагнитны

Соединения без неспаренных электронов диамагнитны

Парамагнитные вещества втягиваются магнитным полем,

Диамагнитные вещества выталкиваются магнитным полем

В веществе, помещенном в магнитное поле напряженностью H , развивается намагниченность $M = \chi H$,

где χ – магнитная восприимчивость.

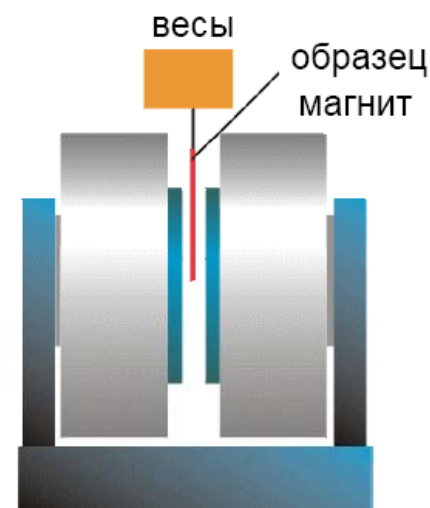
χ мала и отрицательна для диамагнетиков,

χ мала и положительна для парамагнетиков

а также

χ велика и положительна для ферромагнетиков

χ велика и отрицательна для сверхпроводников



Магнитные измерения

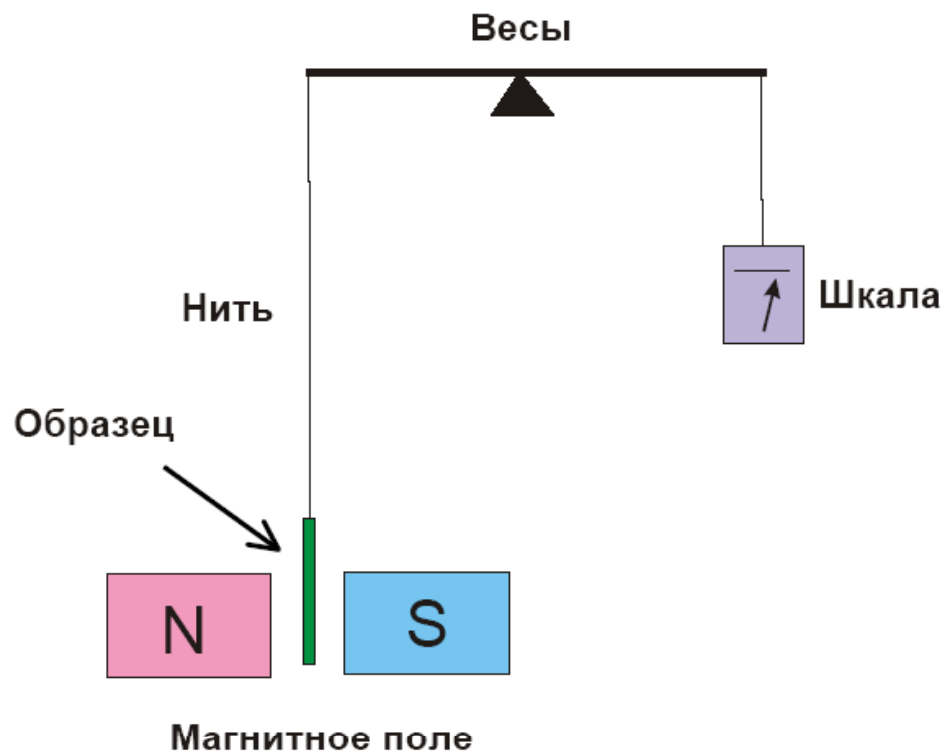


Схема измерения магнитной восприимчивости

Измеряется магнитная восприимчивость χ

Рассчитывается магнитный момент μ

$$\mu = \frac{\sqrt{3R}}{N_A} \sqrt{\chi T}$$

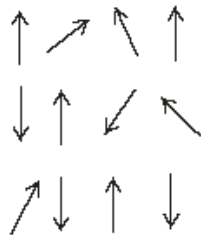
Магнитный момент выражается в магнетонах бора (мБ)

Предсказание для d-металлов:

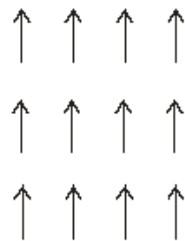
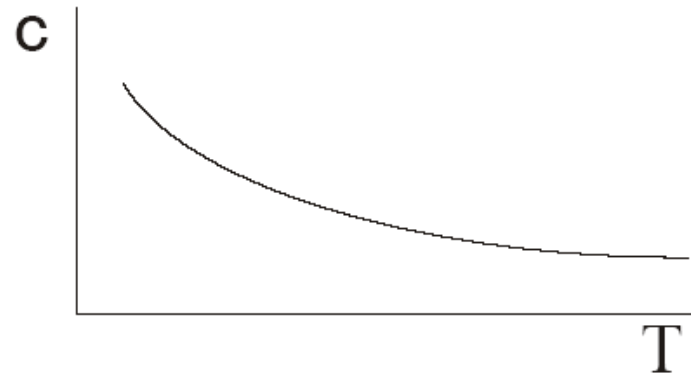
$$\mu = \sqrt{n(n+2)} = 4 \sqrt{S(S+1)}$$

n – число неспаренных электронов; S – суммарный спин

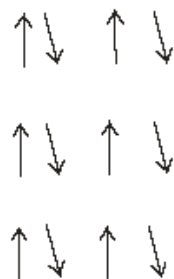
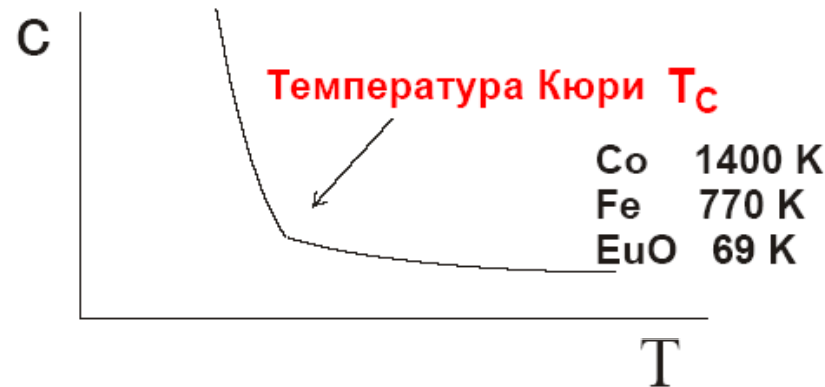
Магнитные материалы



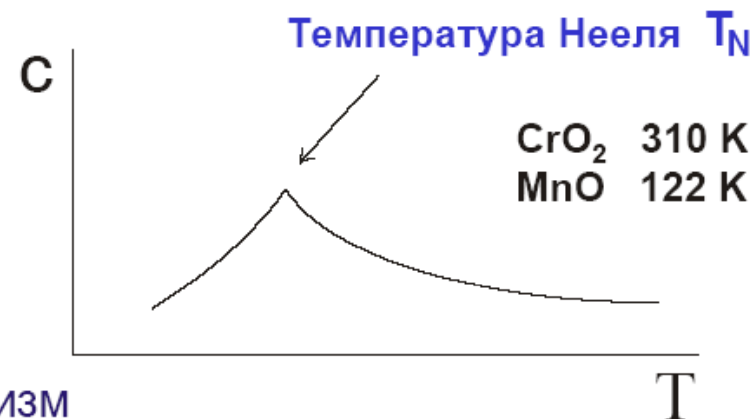
Парамагнетизм
Кюри-Вейса



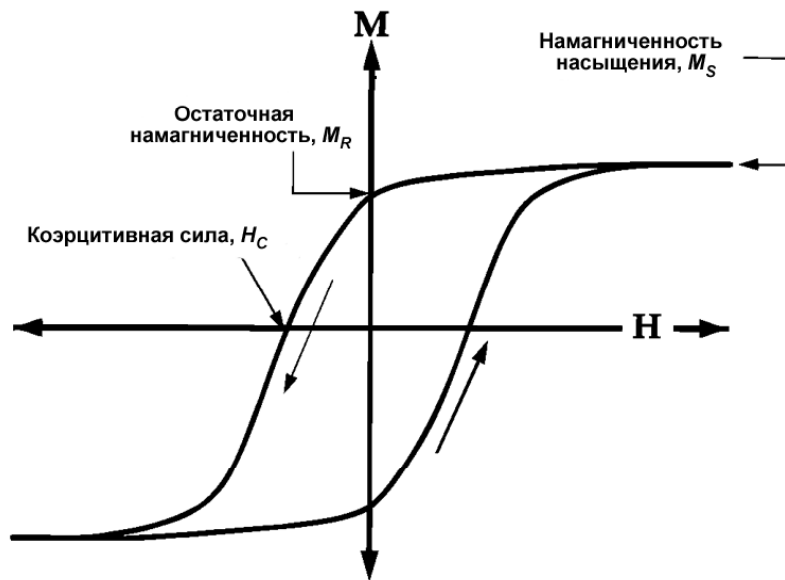
Ферромагнетизм



Антиферромагнетизм

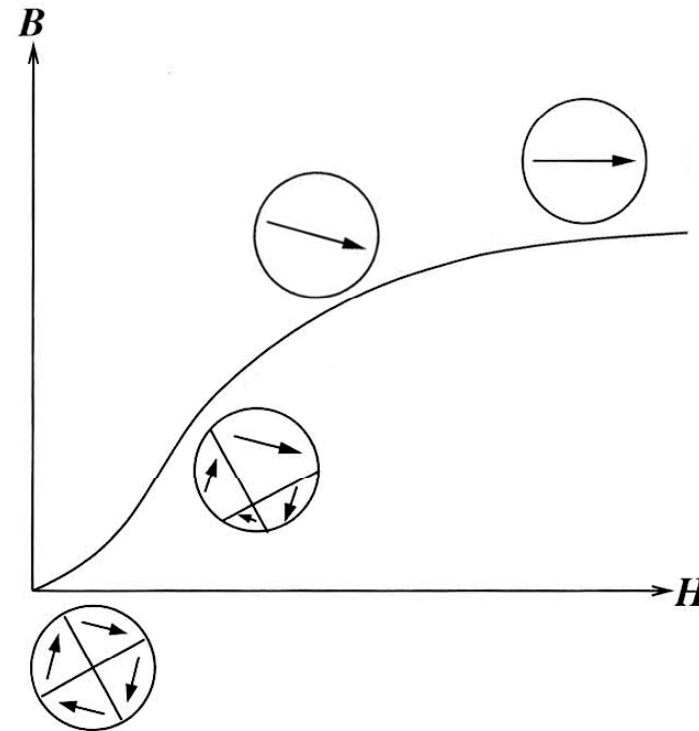


Петля гистерезиса



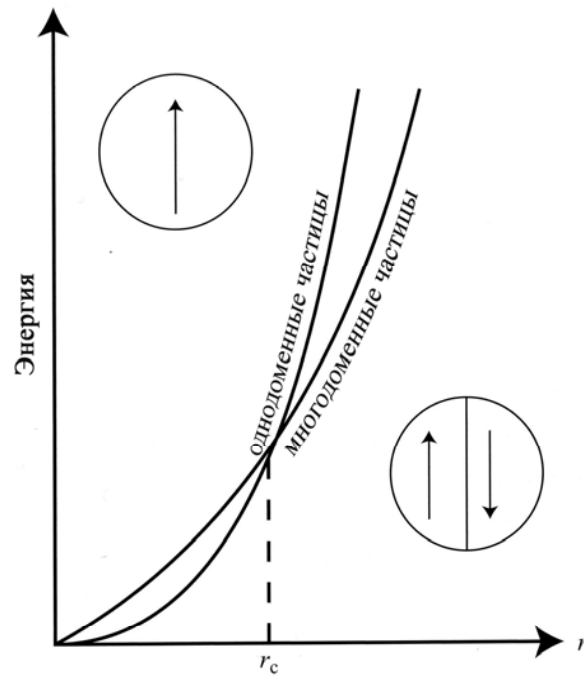
$$\bar{\mu} = \mu \left(\operatorname{cth} \left(\frac{\mu H}{kT} \right) - \frac{kT}{\mu H} \right),$$

Петля гистерезиса и основные параметры магнитных материалов.

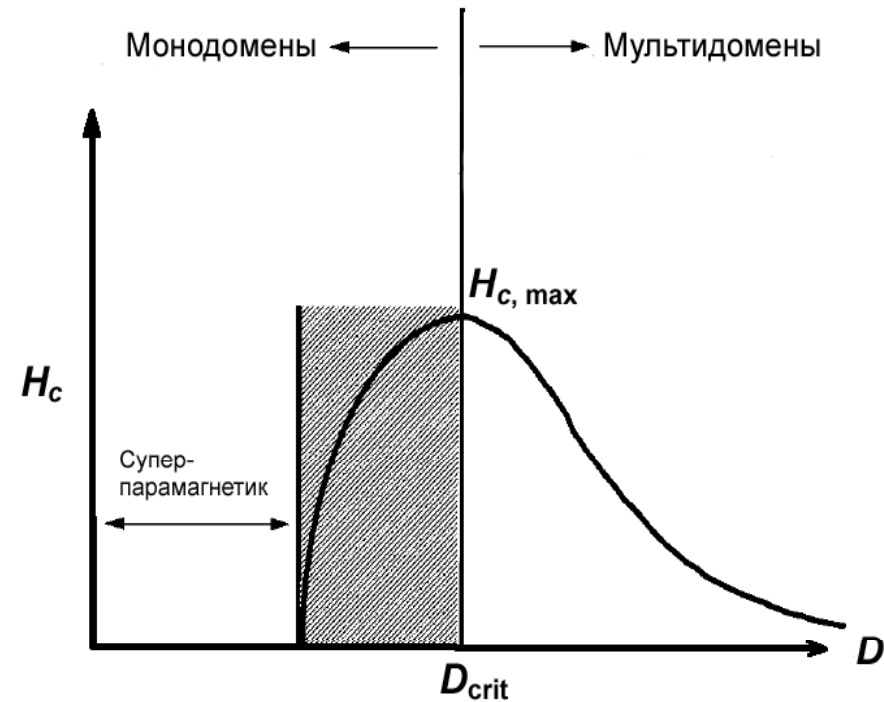


Изменение доменной структуры в процессе намагничивания ферромагнитного материала.

Суперпарамагнетизм



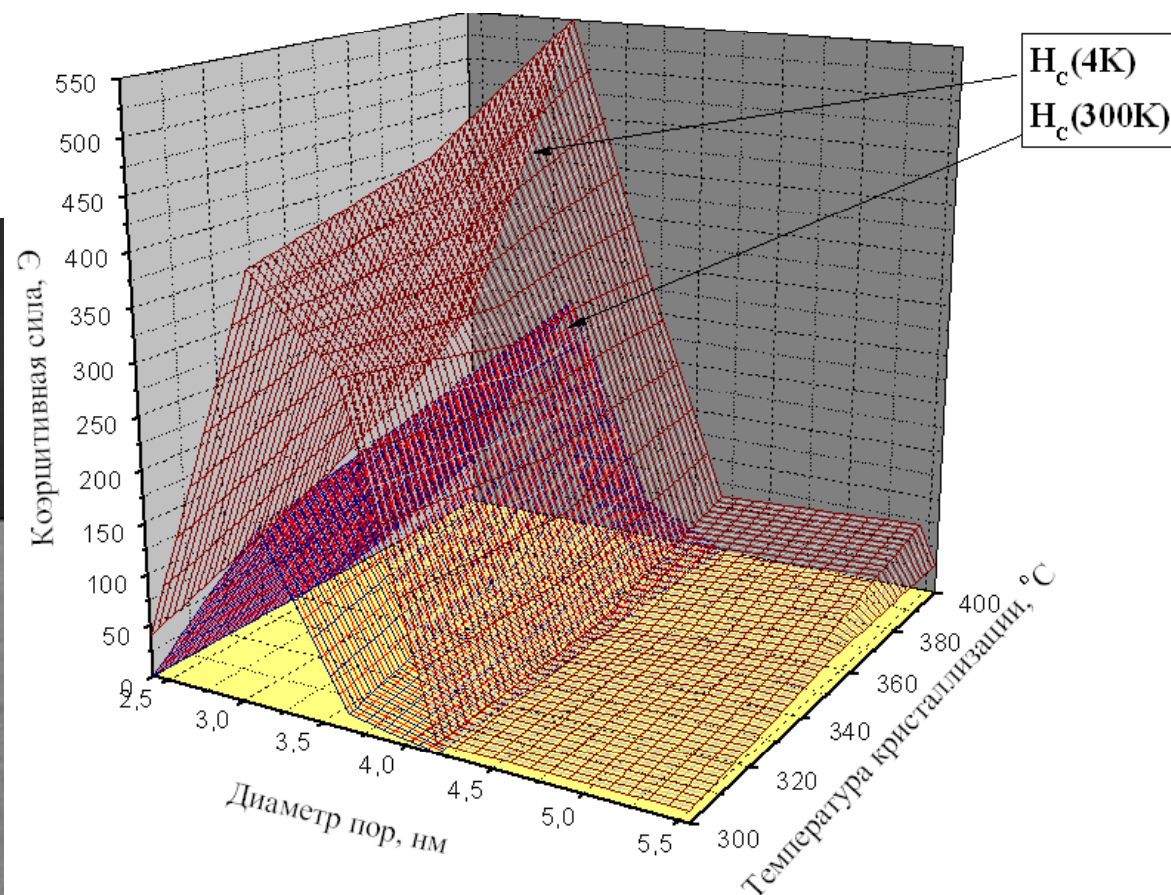
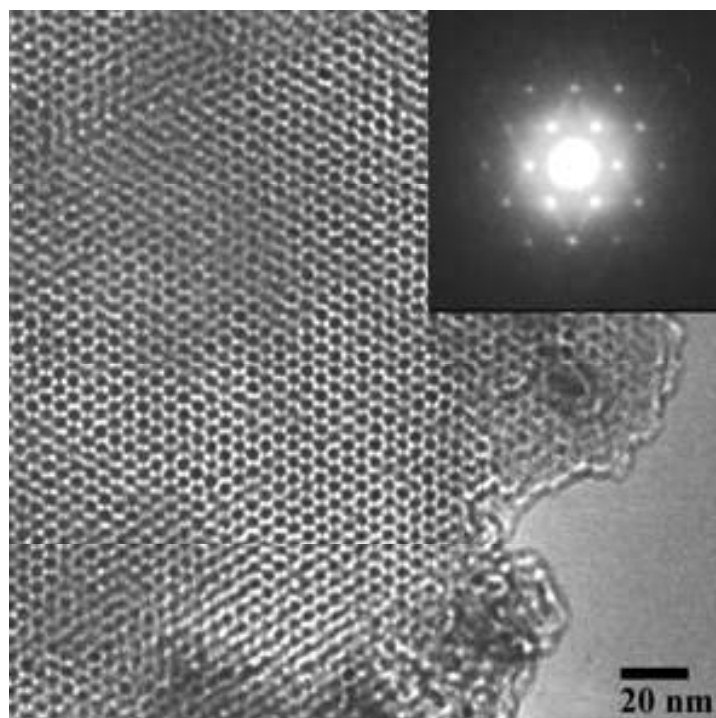
Относительная стабильность
одно- и многодоменных частиц.



Зависимость коэрцитивной
силы от размера частиц.

Магнитные наноконпозиты SiO₂-Fe

Сверхвысокая плотность
записи информации
(1-10 Тбит/кв.дюйм)

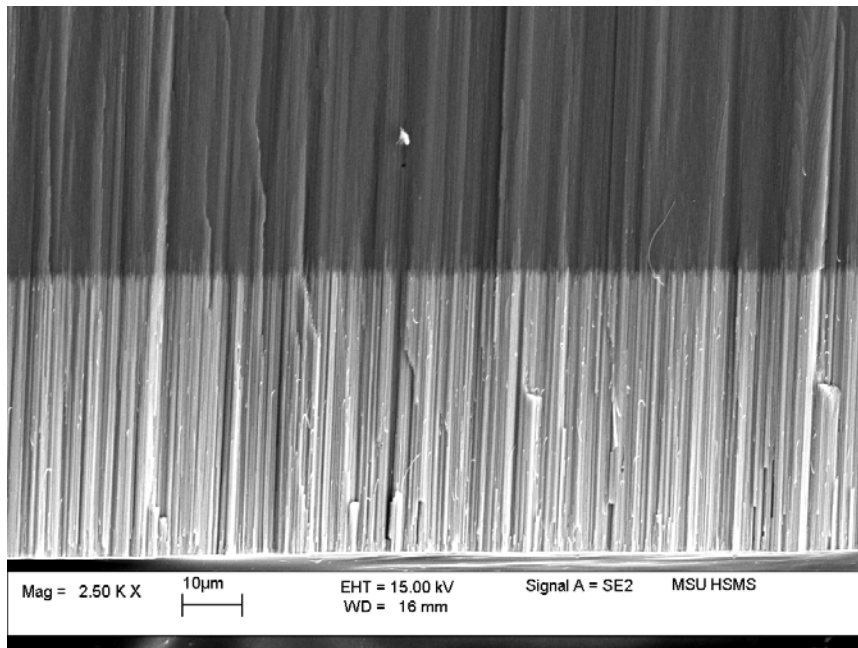


Нано-
провода
Fe в
мезо-
пористом
SiO₂

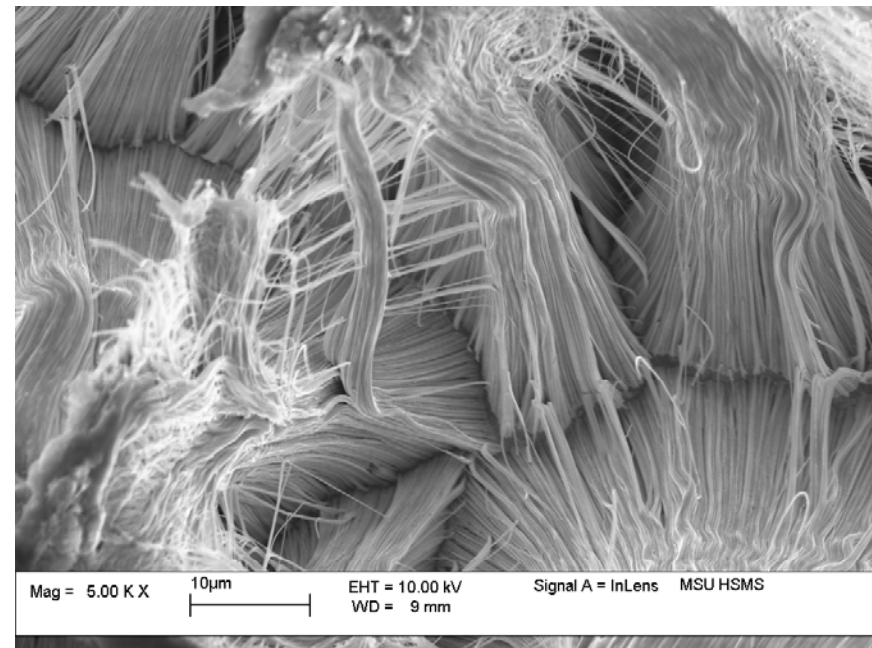
| Т _{крист} , °С | Т _{блок} , К | Анизотропия | Коэрцитивная сила, Э | | Намагн.-насыщ., 300К, э.м.е./г |
|-------------------------|-----------------------|-------------|----------------------|------|--------------------------------|
| | | | 4К | 300К | |
| 350 | 260 | 32 | 464 | 201 | 0,53 |
| 375 | >300 | >40 | 536 | 222 | 0,61 |
| 400 | 280 | 35 | 532 | 185 | 0,76 |

Ферромагнитные нанопроволоки

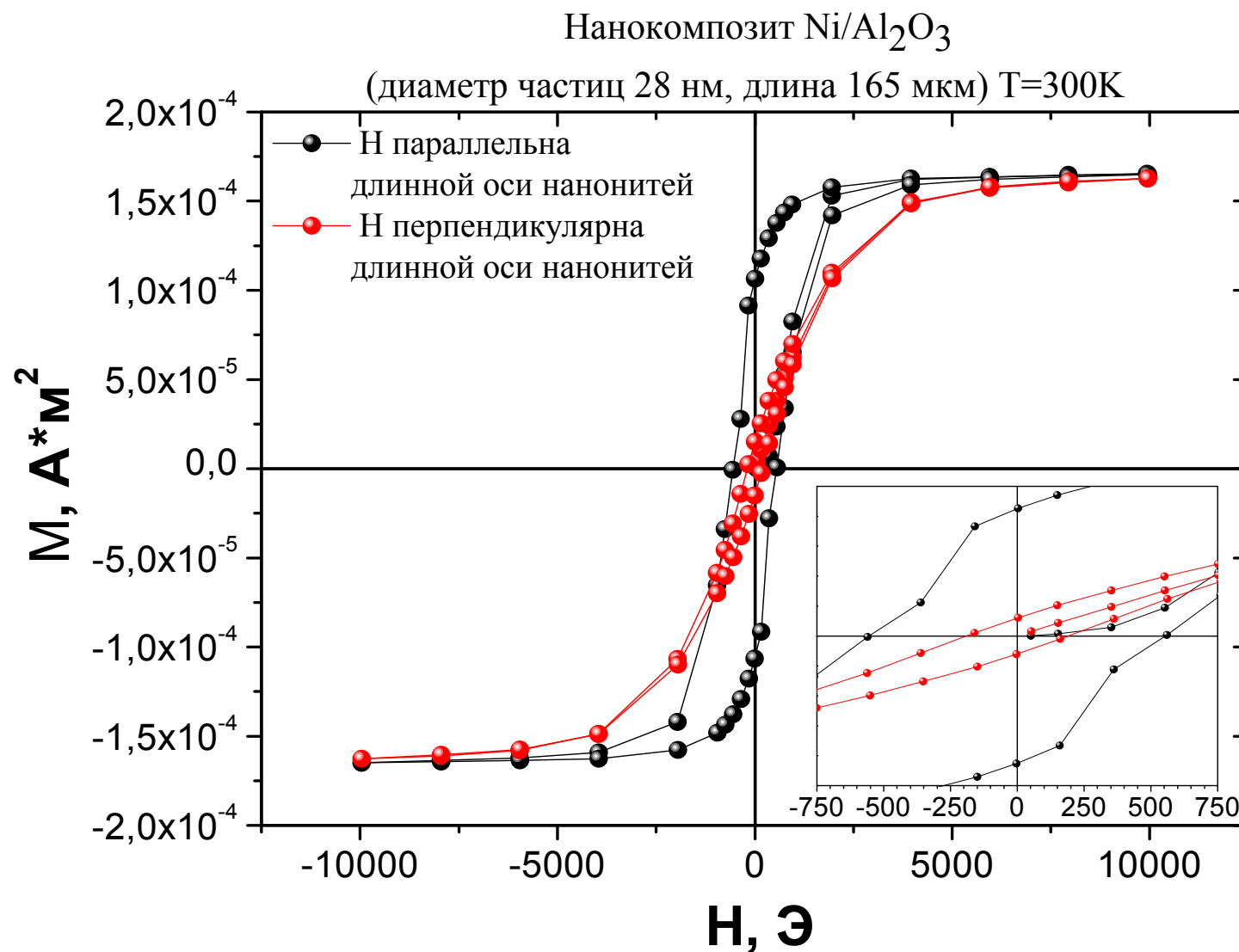
«Разрез»



Растворение пористой матрицы



Анизотропия свойств



Термический анализ



(Perkin Elmer США, 2002)

Диапазон температур – 20 - 1300⁰С

Скорость нагрева - от 0.01 - 100 ⁰С/мин

Масса навески – от 5 до 200 мг

Материал тиглей - Pt

Чувствительность весов - 0.2 мкг

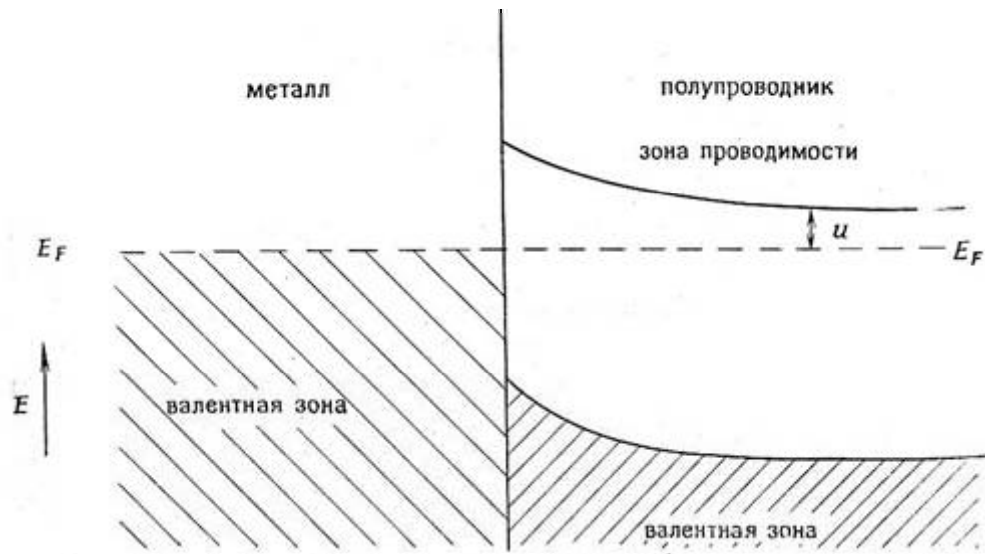
Атмосфера: воздух, инертный газ или вакуум (до 2 Торр)

Скорость потока газа - до 1000 мл/мин

Формат вывода: Excel файл

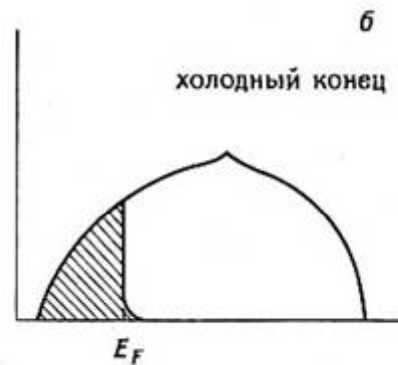
Термоанализатор Perkin Elmer Pyris Diamond

Эффекты Пельтье и Томсона

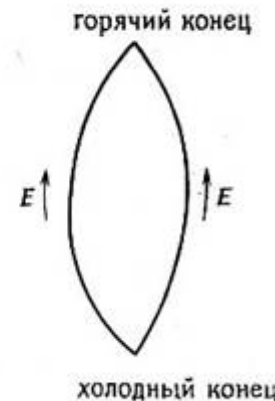


Зонная структура на границе металл — полупроводник, приводящая к возникновению э. д. с. Пельтье.

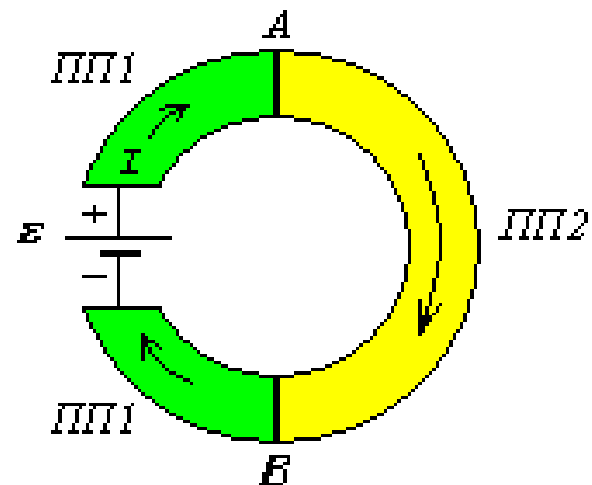
При пропускании электрического тока в определенном направлении на границе двух разнородных проводников выделяется теплота (или поглощается в зависимости от направления пропускания тока) — электроны переходят из одного проводника в другой, пока не возникнет эдс, препятствующая дальнейшему переходу (разные положения уровней Ферми).



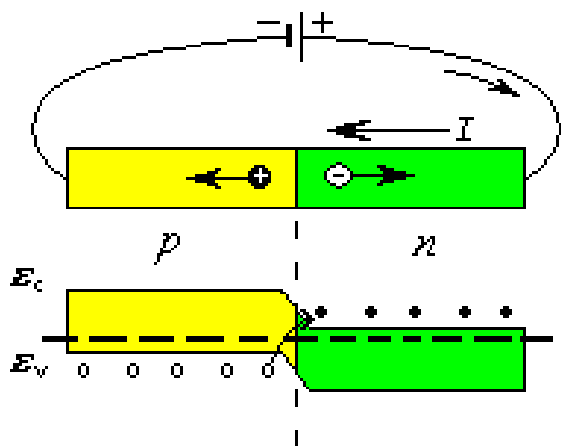
Эффект Томсона.



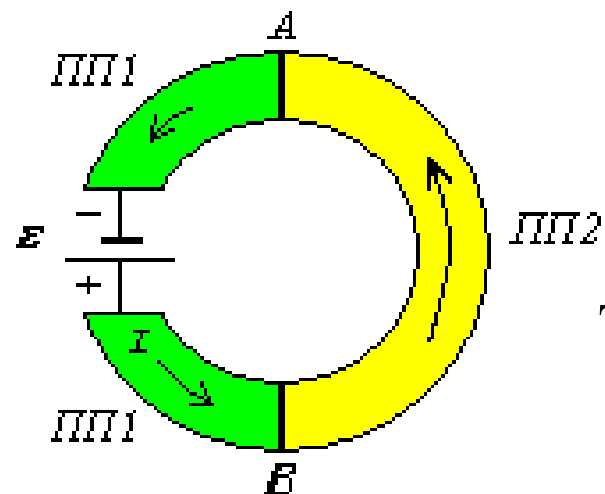
Наличие градиента температуры вдоль однородного проводника приводит к эдс — из-за разности распределений электронов проводимости по энергиям на холодном и горячих концах проводника.



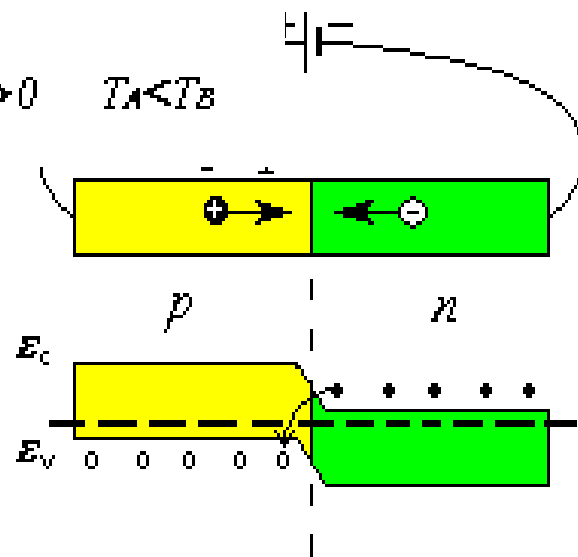
$$Q_p(A) > 0 \quad Q_p(B) < 0 \quad T_A > T_B$$



Поглощение тепла Пельтье на
границе двух полупроводников
(n и p - типа)



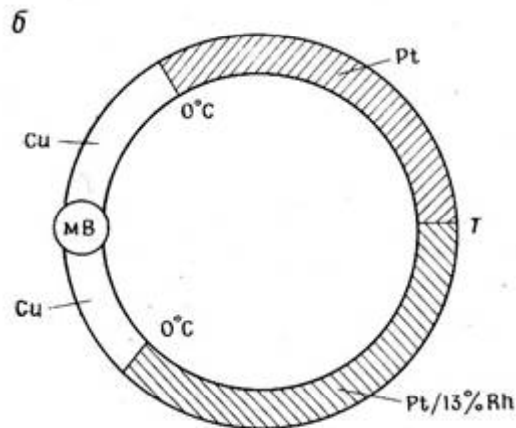
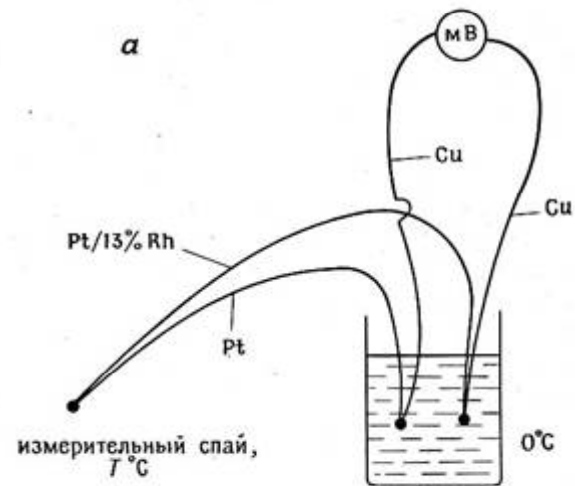
$$Q_p(A) < 0 \quad Q_p(B) > 0 \quad T_A < T_B$$



Выделение тепла Пельтье на
границе двух полупроводников
(n и p - типа)

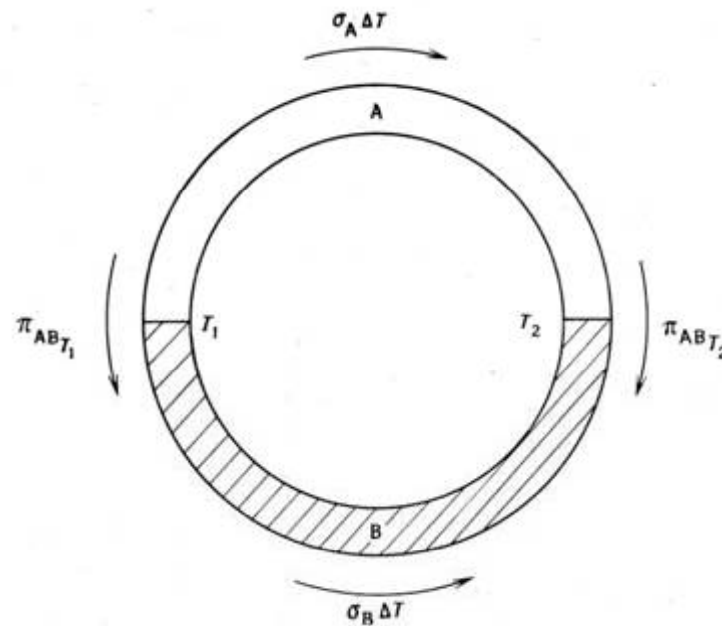
Термоэлемент

Термопары



При 0°C : $\pi_{\text{Pt,Cu}} - \pi_{\text{Pt}/13\% \text{Rh,Cu}} = \pi_{\text{Pt,Pt}/13\% \text{Rh}}$

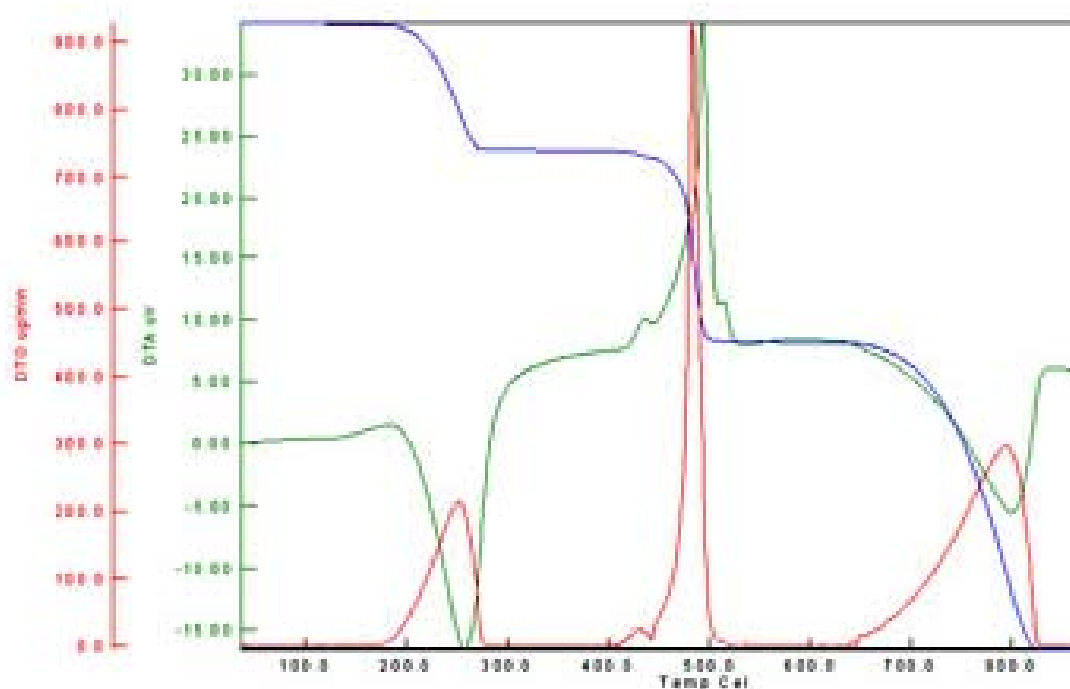
Схема цепи с термопарой.



Эффект Пельтье и Томсона в термопаре.

В обоих контактах (измерительный и холодный спаи) возникает как эдс Пелтэе, так и эдс Томсона (различны температуры и температурные градиенты). Результирующая по всему контуру эдс равна их алгебраической сумме и, как правило, отлична от нуля. В результате по контуру будет идти ток, зависящий от разности температур спаев (эффект Зеебека).

Термогравиметрия, ТГА - ДТА



Термический анализ $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (красная - DTG, синяя - TG, зеленая - DTA)

Сканирующий Зондовый Микроскоп NT-MDT NTEGRA Aura



Атмосфера: съемка на воздухе или в вакууме до 10^{-2} Торр
Температура съемки: от комнатной до 150°C
Внешнее магнитное поле: до 0.2 Тл
Максимальное поле сканирования: 110×110 мкм
Минимальные достижимые шумы: менее 1 \AA

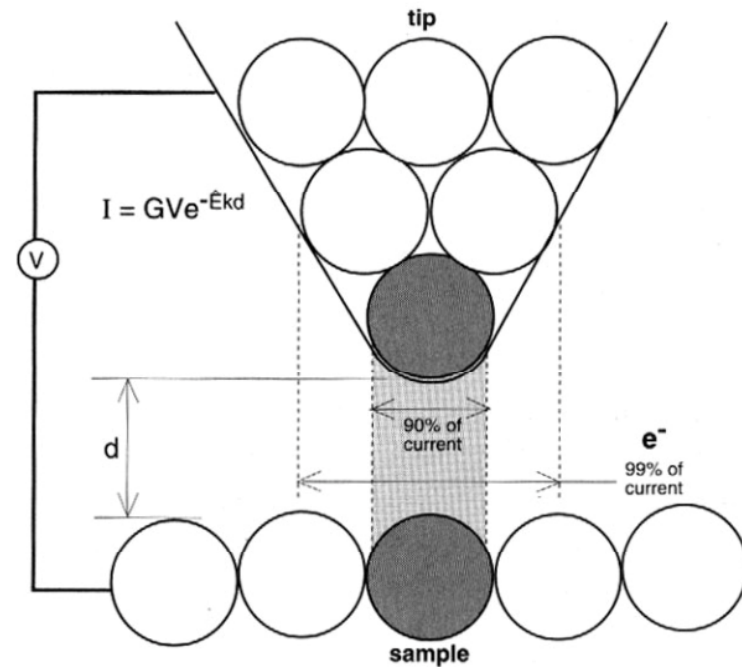
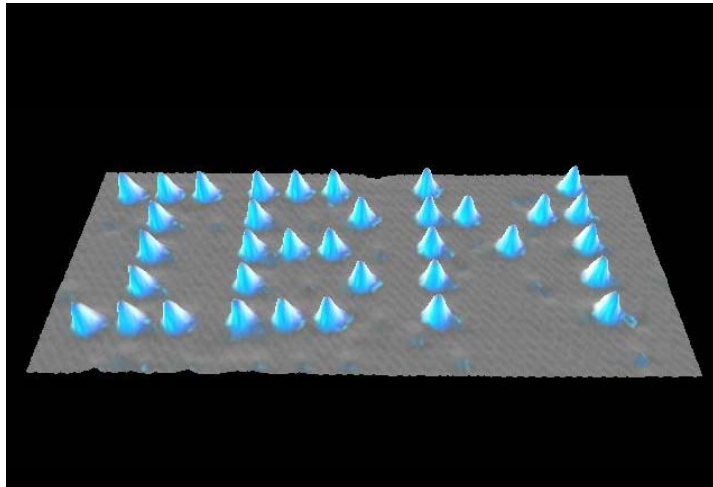
(NT-MDT, Россия 2005)

Сканирующая Туннельная Микроскопия

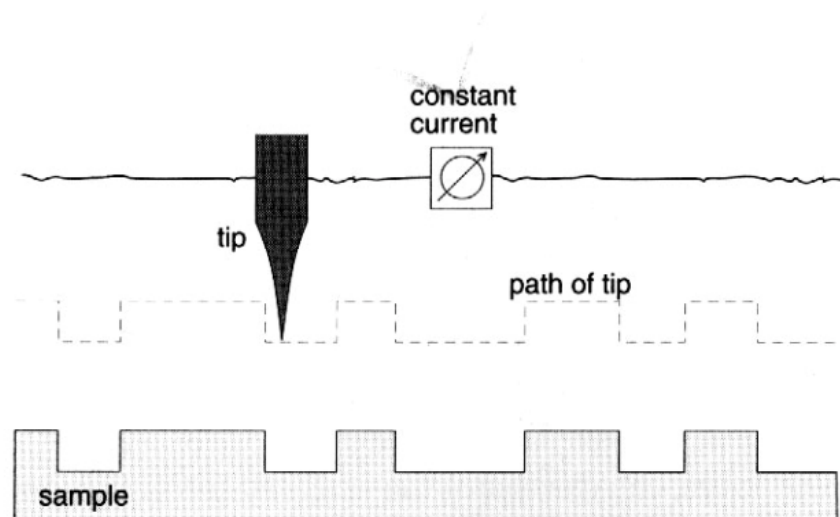
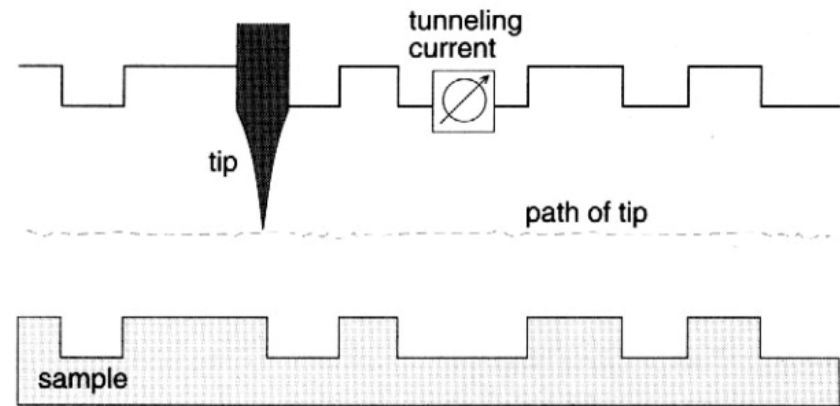
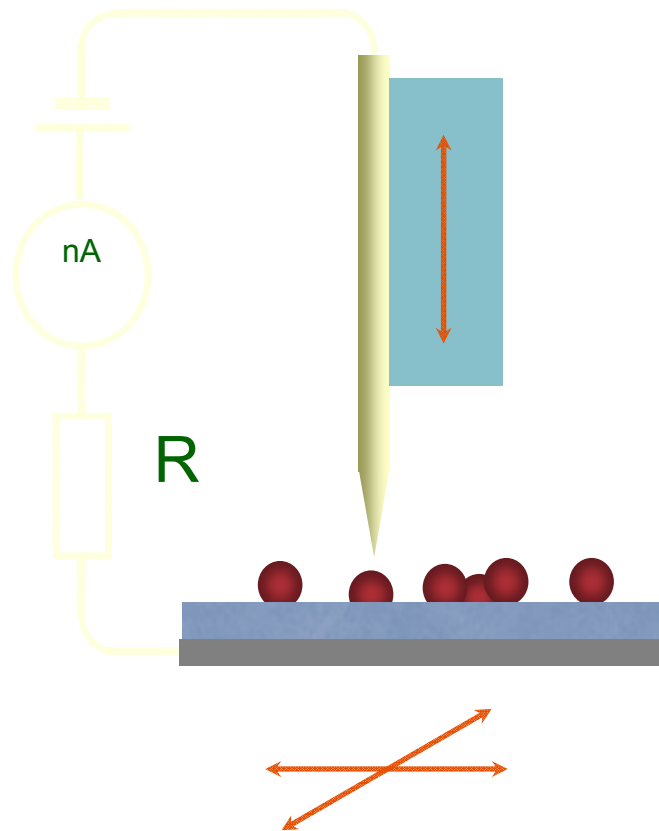


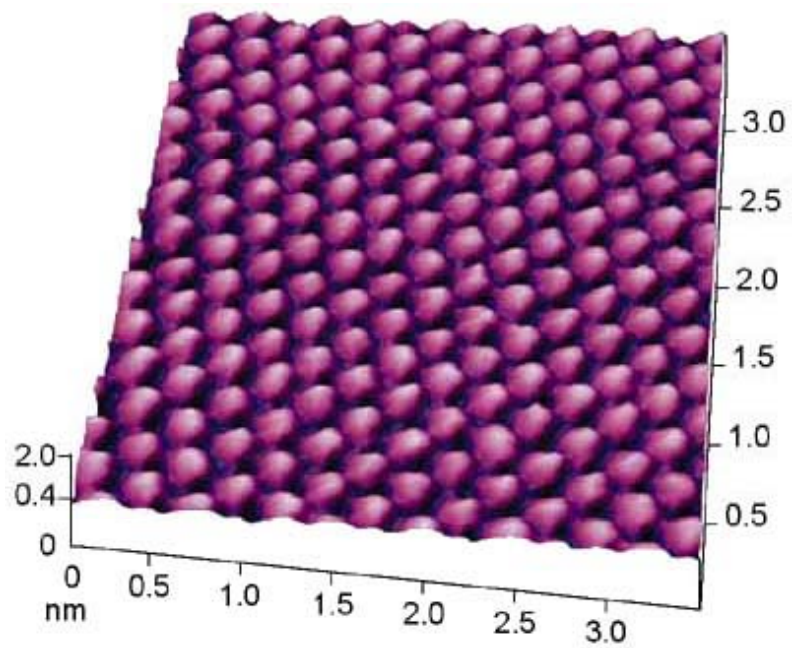
Gerd Binnig Heinrich Rohrer

- **1981** создание первого СТМ
получение атомарного разрешения
(IBM, Цюрих)
- **1986** Нобелевская премия

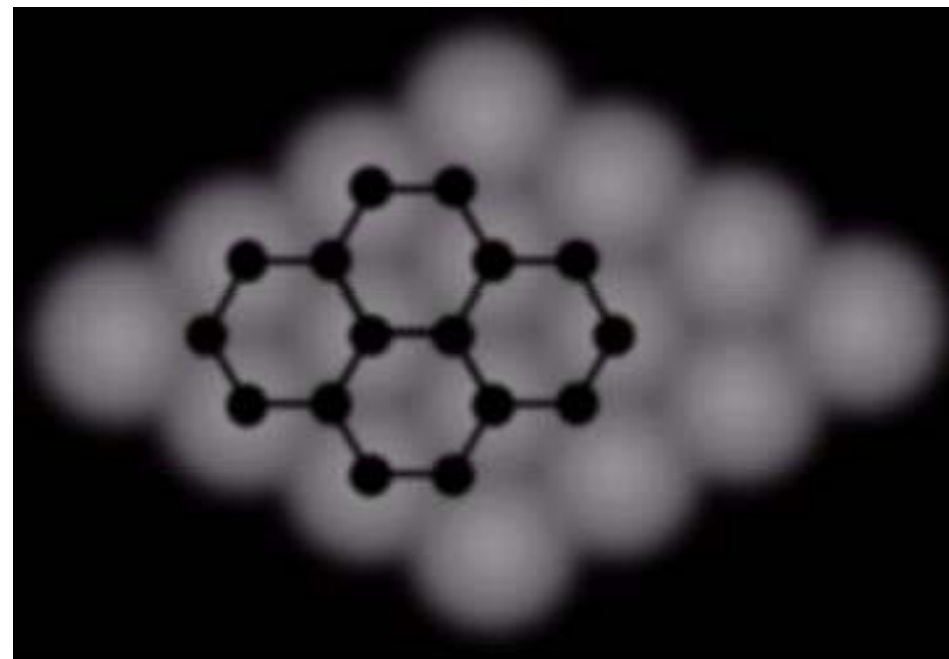


Сканирующая Туннельная Микроскопия

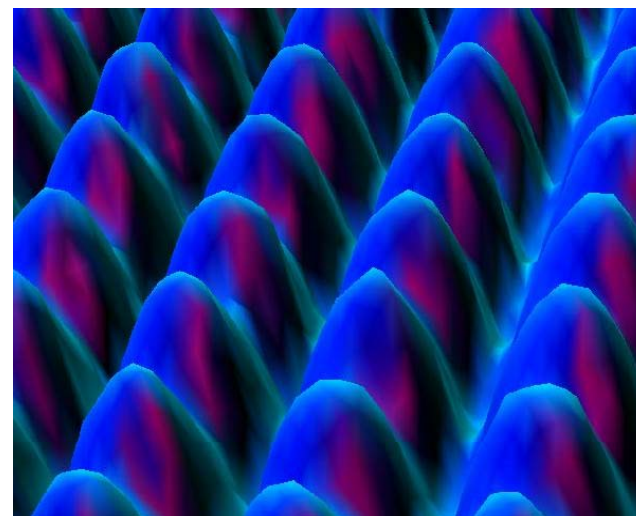
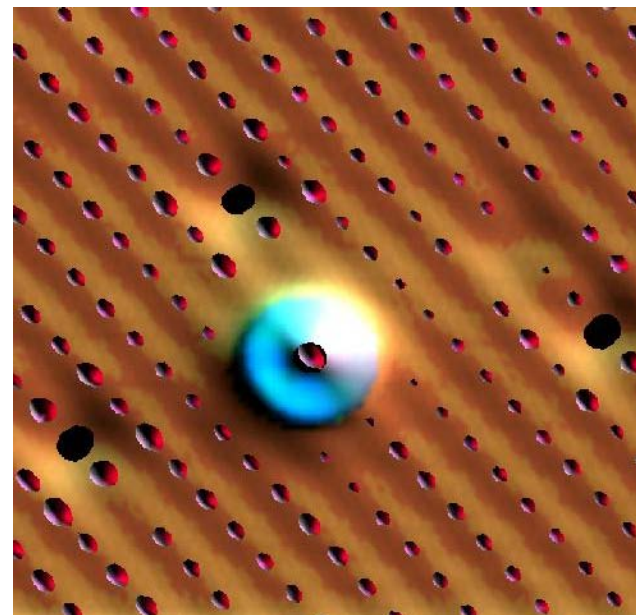
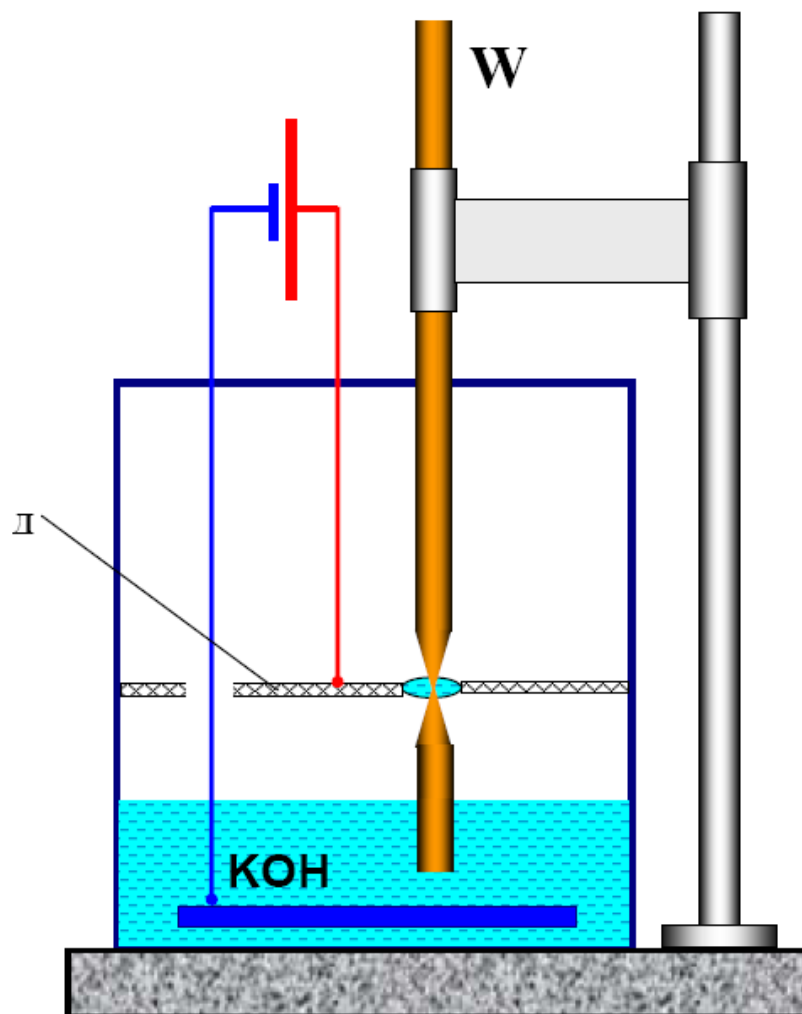




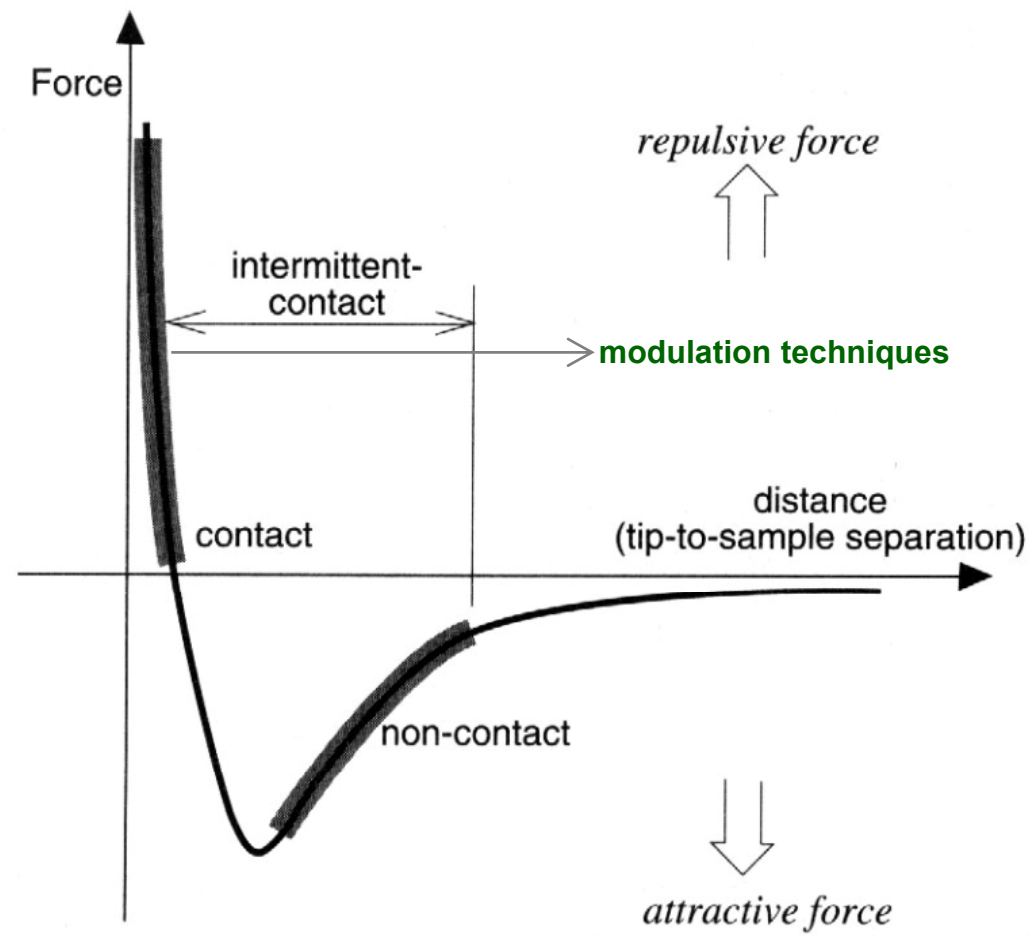
Пиролитический
графит в вакууме



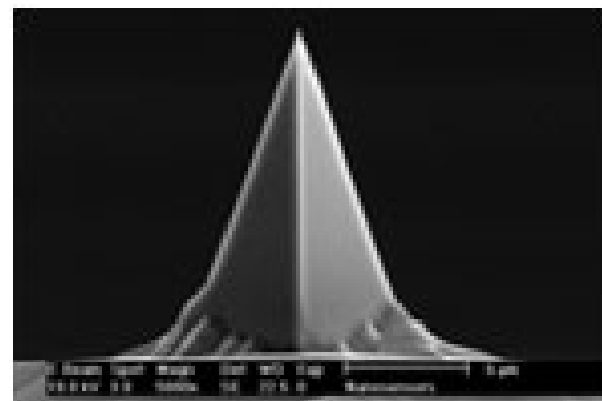
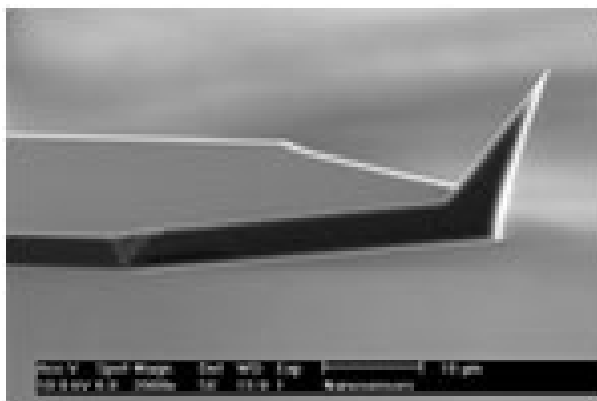
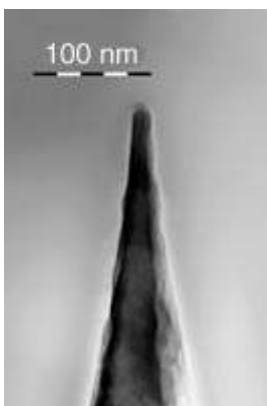
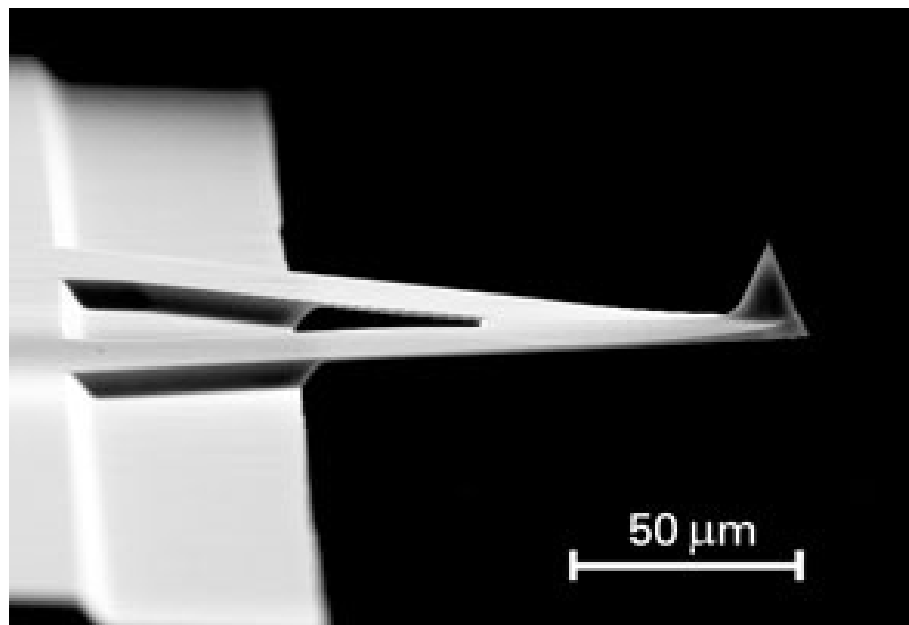
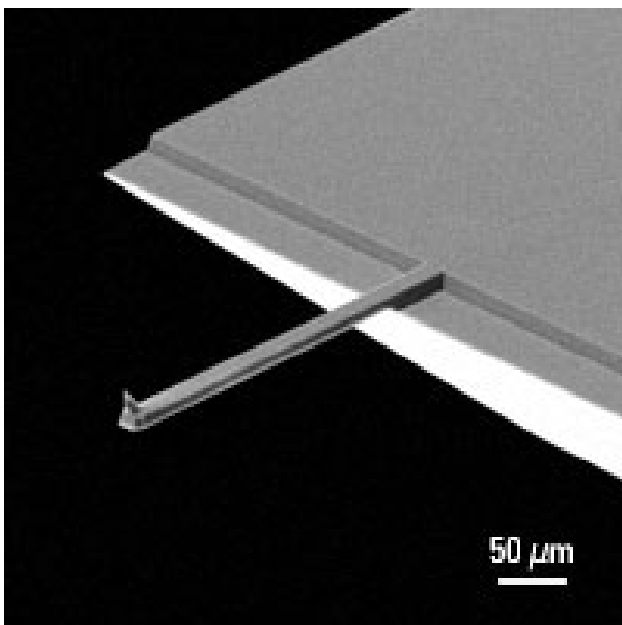
СТМ Зонды



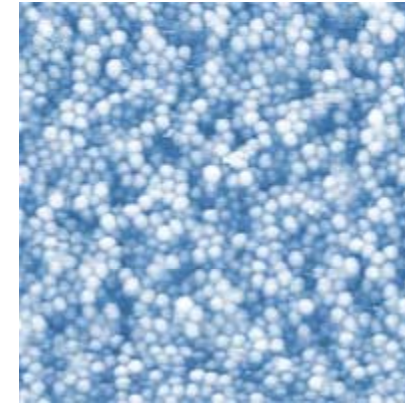
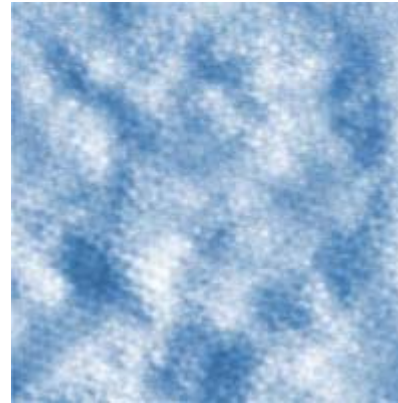
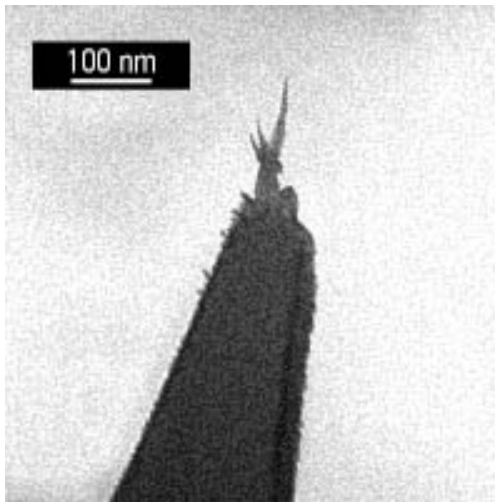
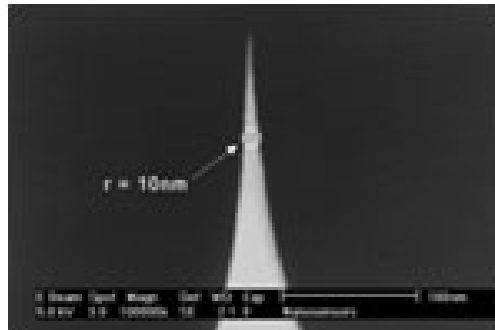
Атомно-Силовая Микроскопия



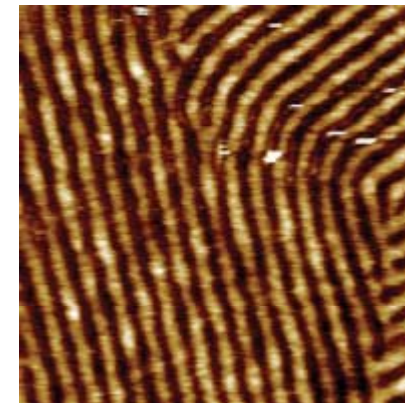
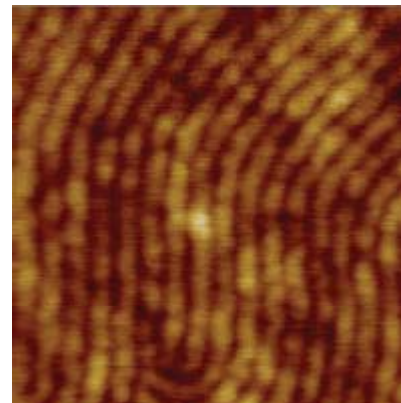
АСМ Зонды



АСМ Зонды высокого разрешения

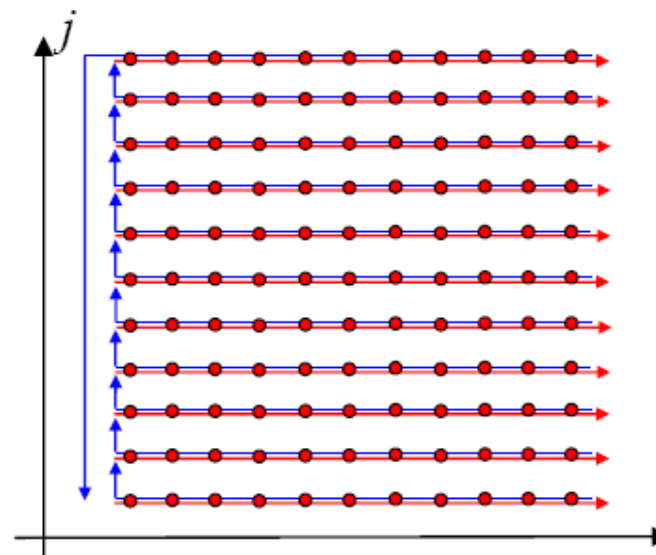
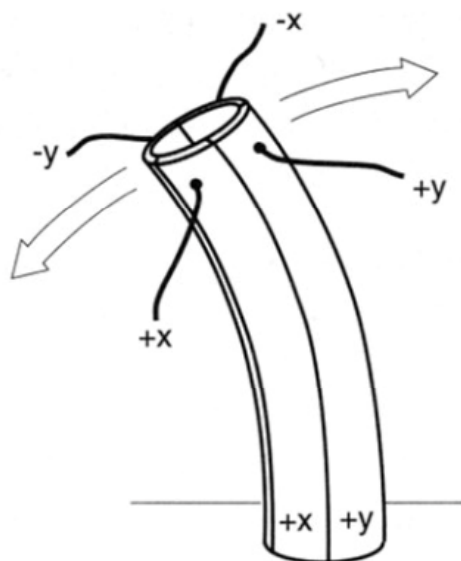


дендримеры

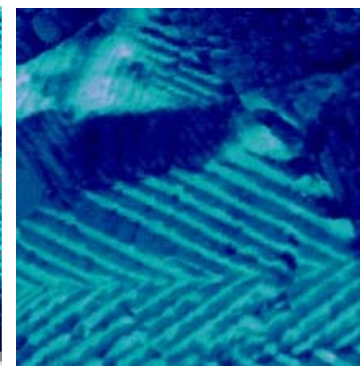
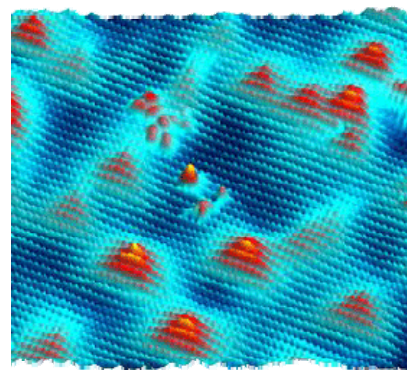


жидкие кристаллы

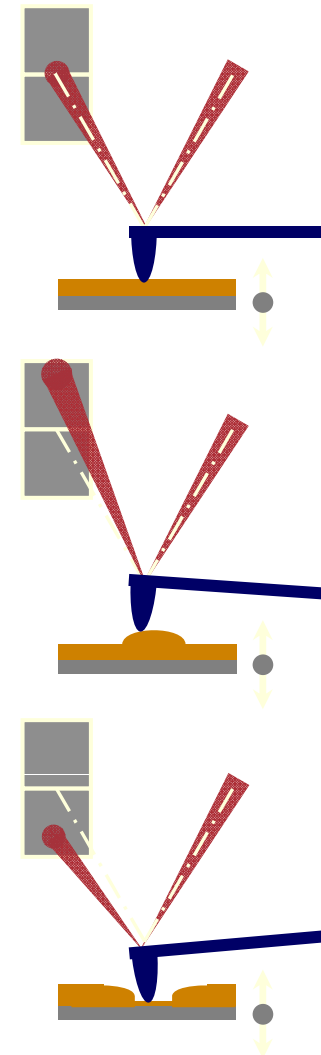
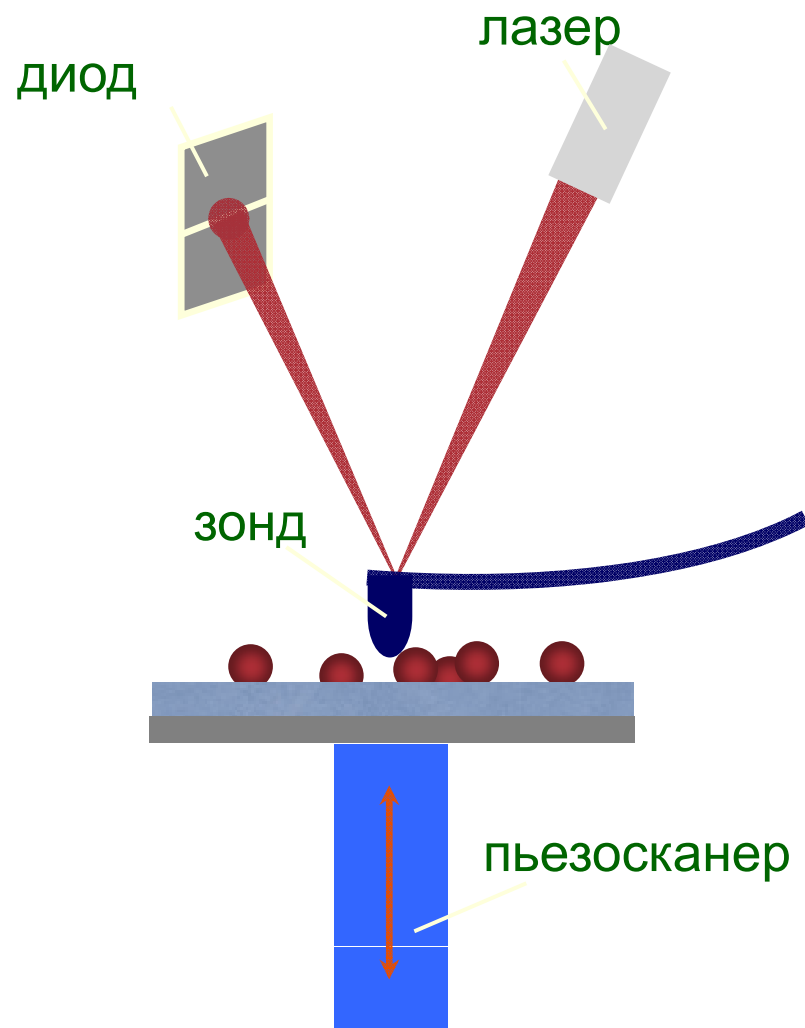
Сканирующая Зондовая Микроскопия



3D и 2D визуализация

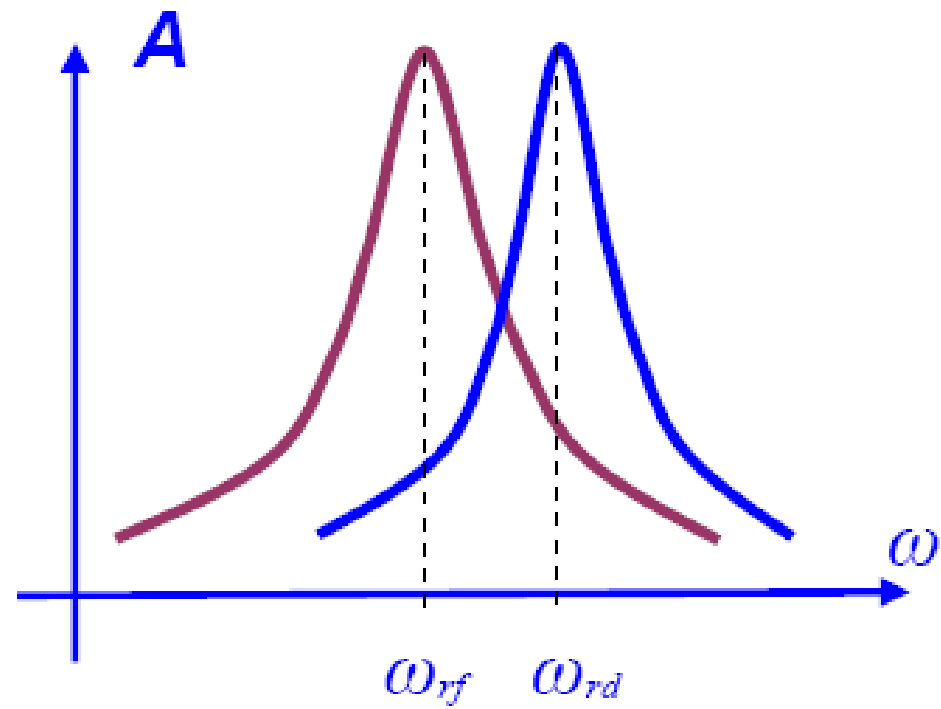
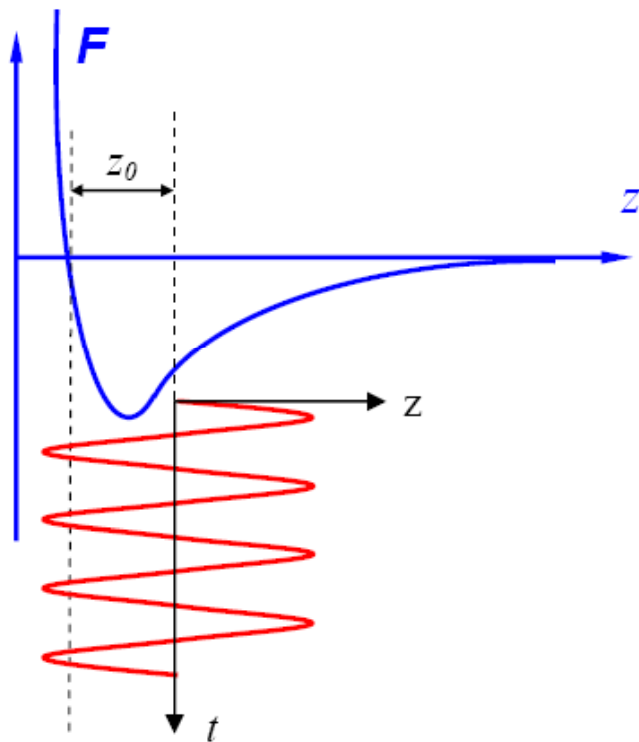


Атомно-Силовая Микроскопия

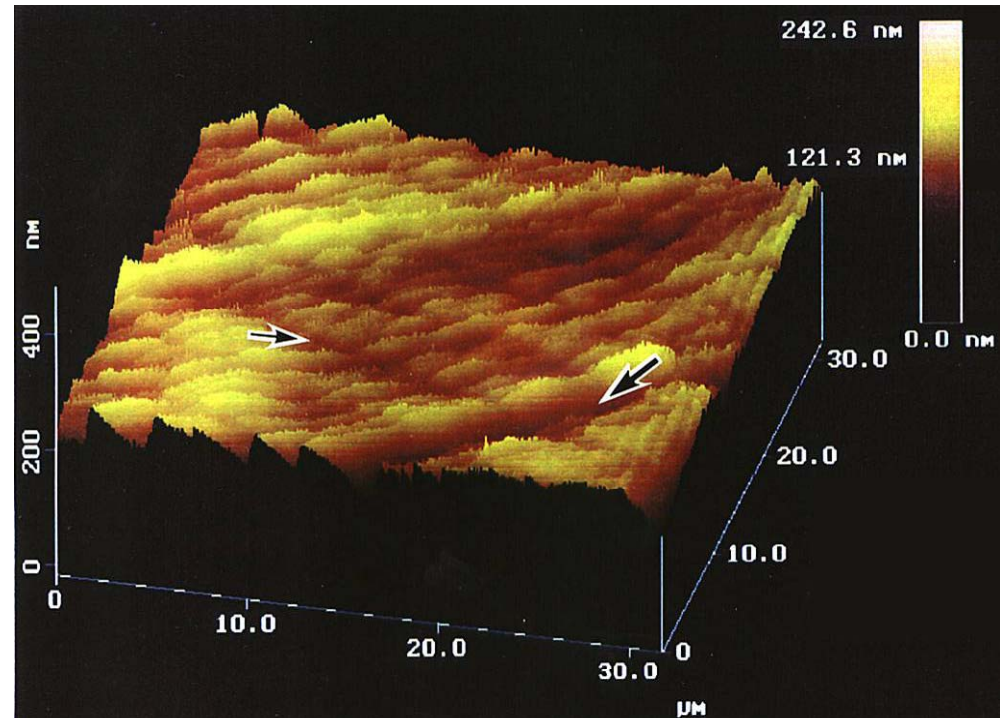
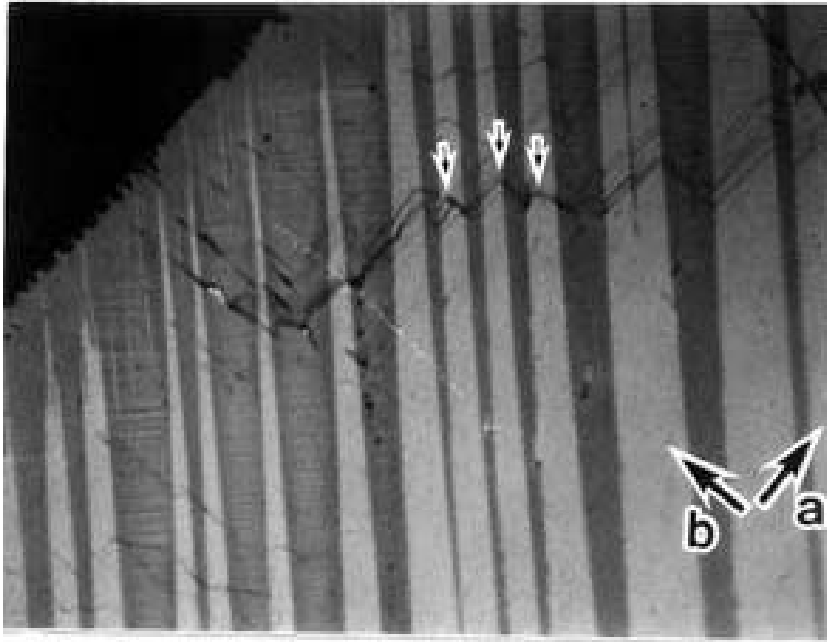


Атомно-Силовая Микроскопия

tapping mode™ и безконтактные режимы

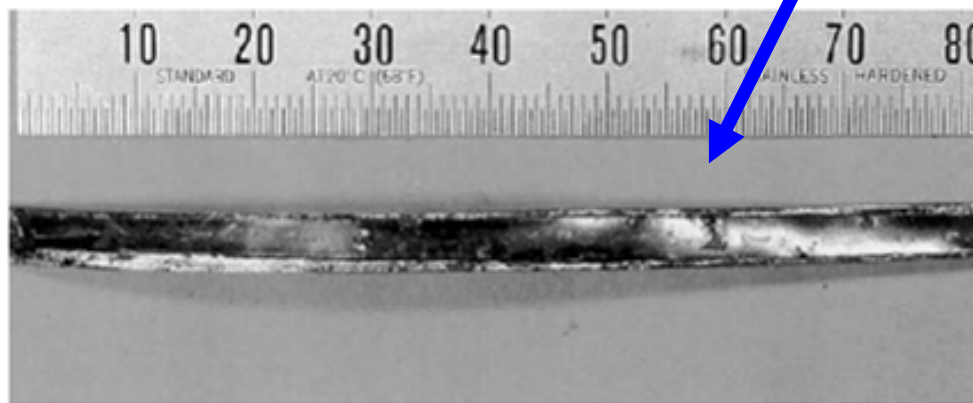
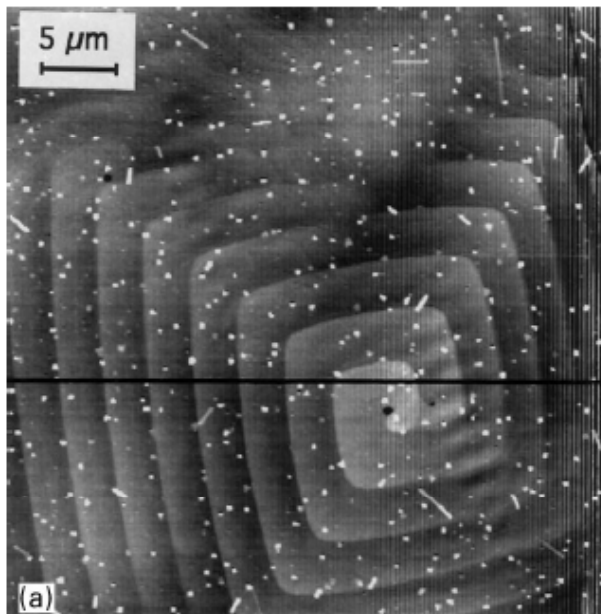
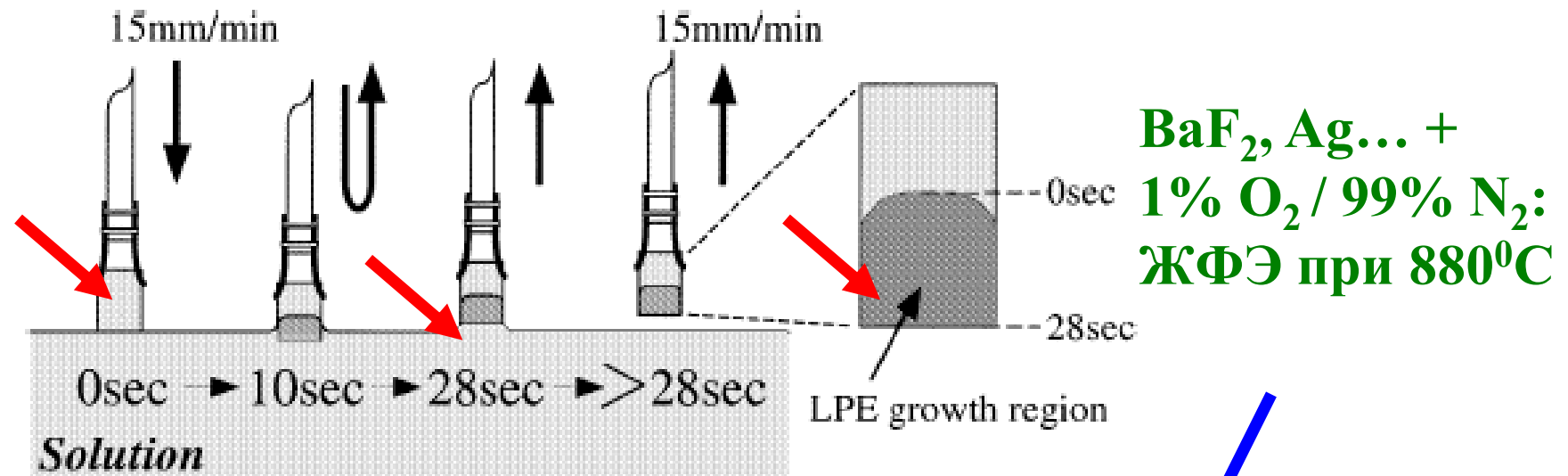


TPRE



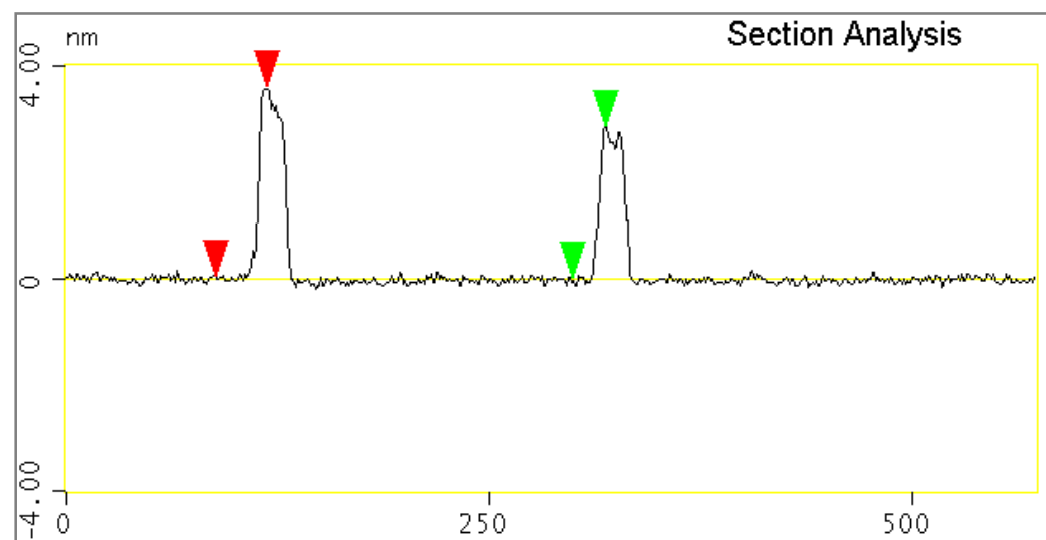
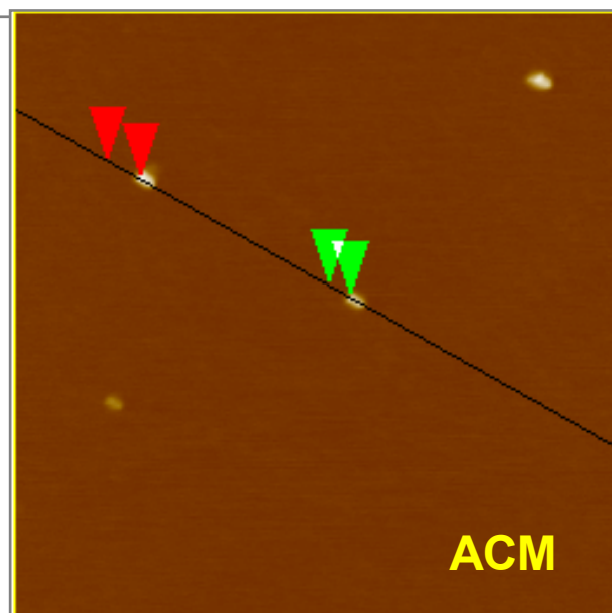
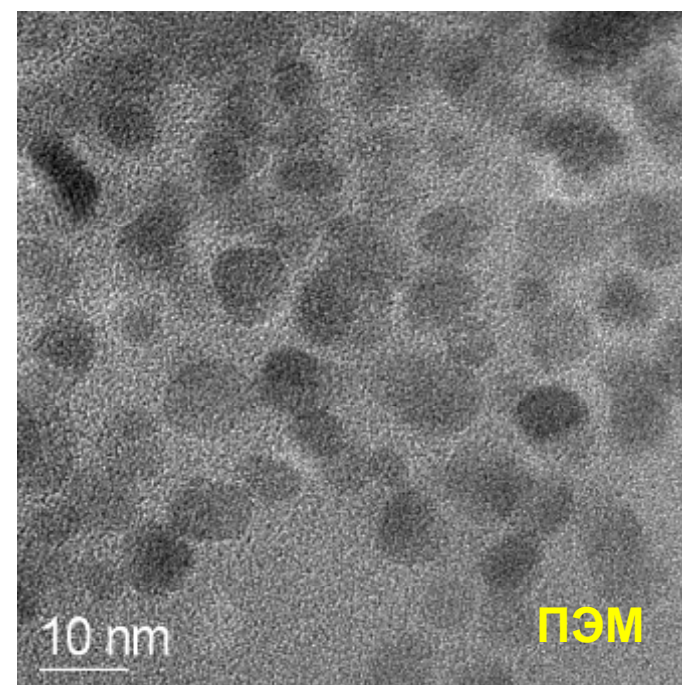
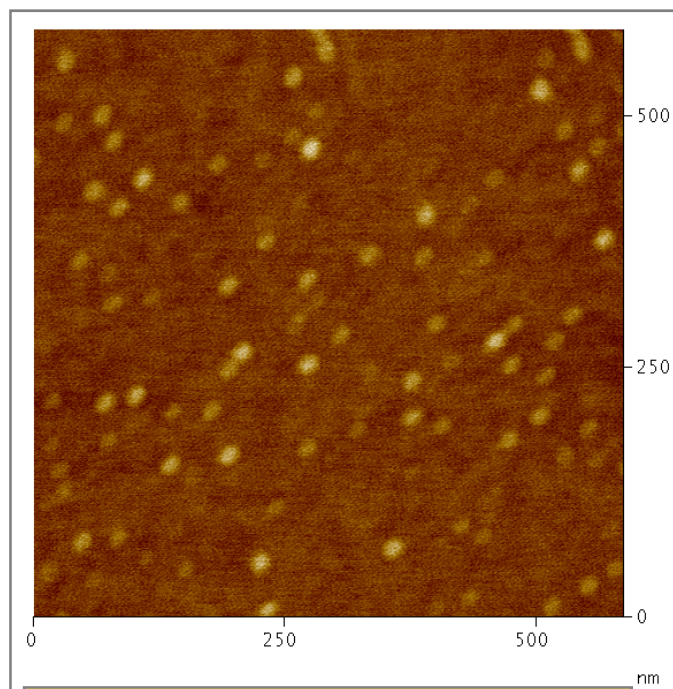
Twin-plane-reentrant-edge growth
-Nd213
-BaTiO₃

Жидкофазная эпитаксия



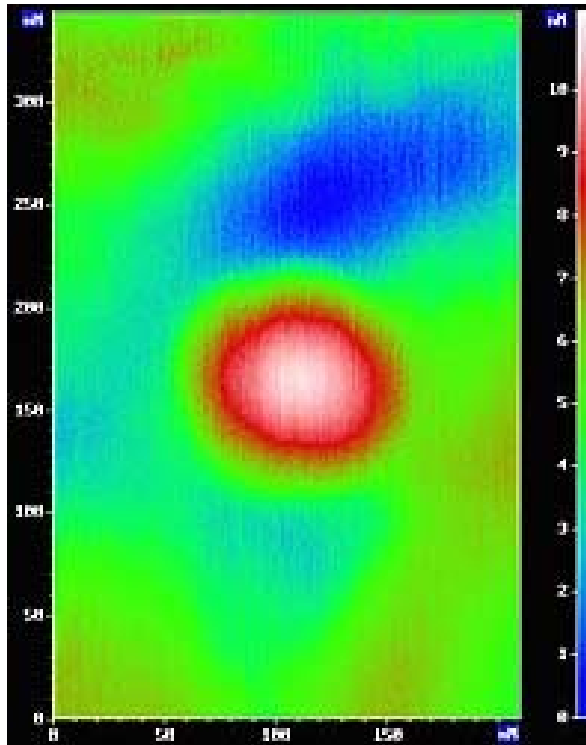
Полигональная (макро)спираль

Магнитные наночастицы Fe_2O_3

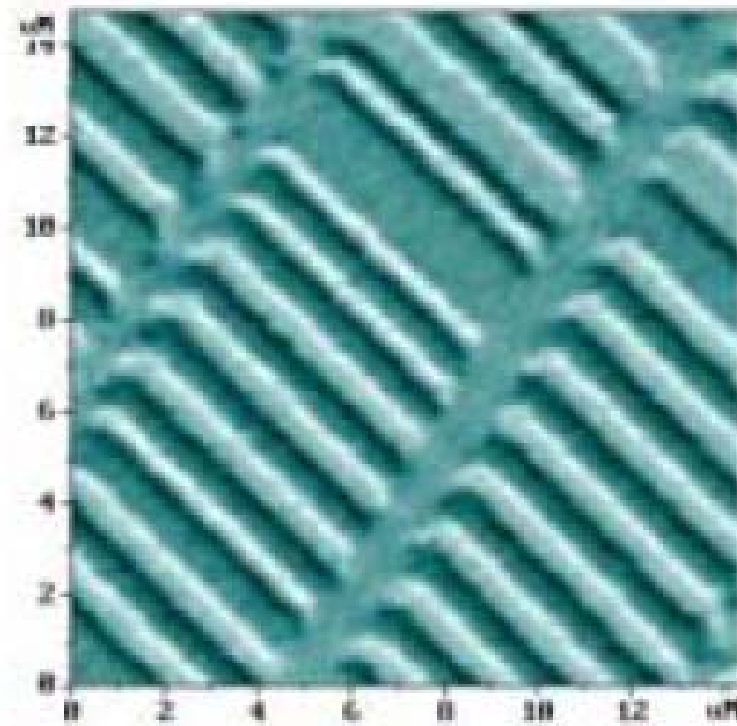


Магнитные АСМ Зонды

Co-Cr покрытие
300 – 400 Oe



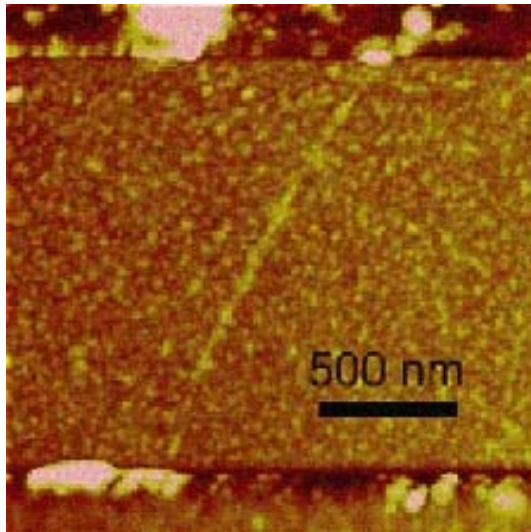
Co наночастица



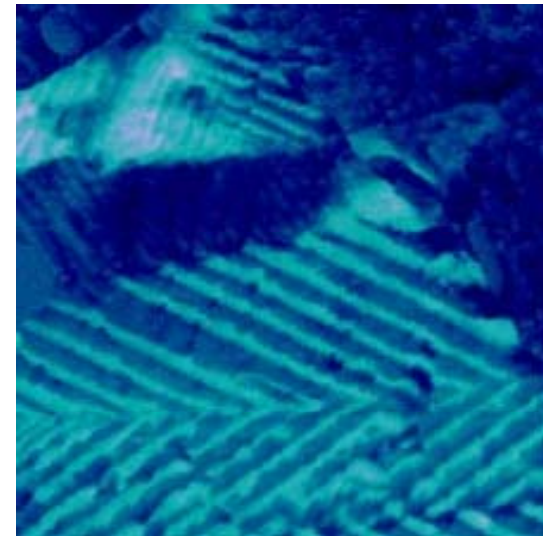
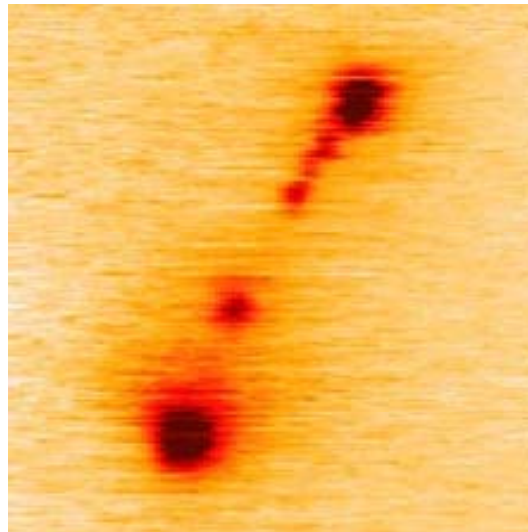
поверхность жесткого диска

Проводящие АСМ Зонды

Ti-Pt, Pt, Cr-Au, PtIr покрытия
зонды из высоколегированного кремния

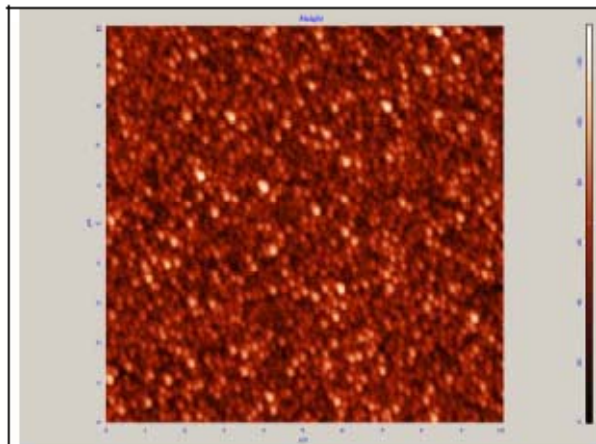


SWNT

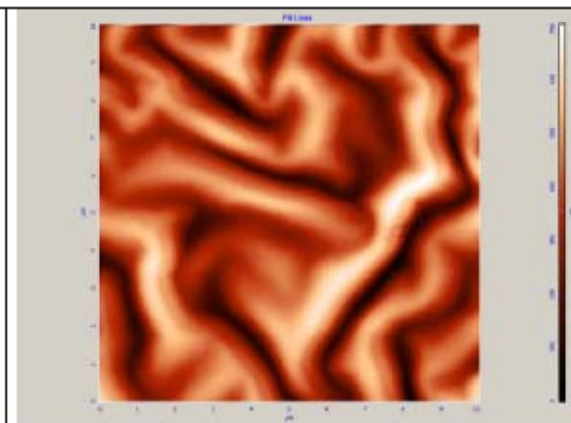


BaTiO₃

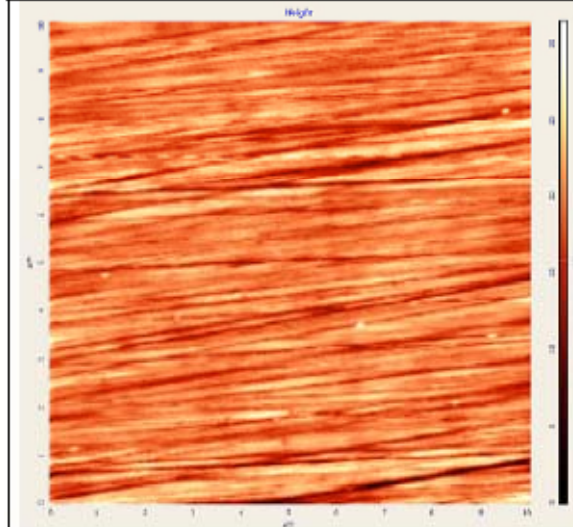
Примеры изображений



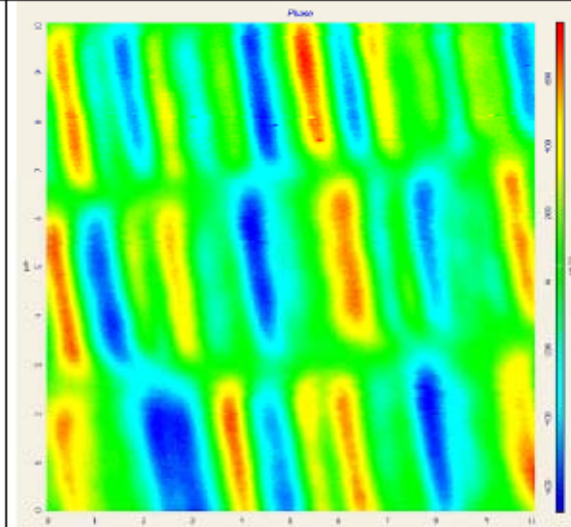
Тонкая пленка люминесцентного комплекса на проводящей подложке ITO (получение OLED)



Толстая пленка люминесцентного комплекса на проводящей подложке ITO (получение OLED)



Поверхность магнитного носителя (жесткого диска) компьютера в контактной моде



Поверхность магнитного носителя (жесткого диска) компьютера магнито-силовой моде