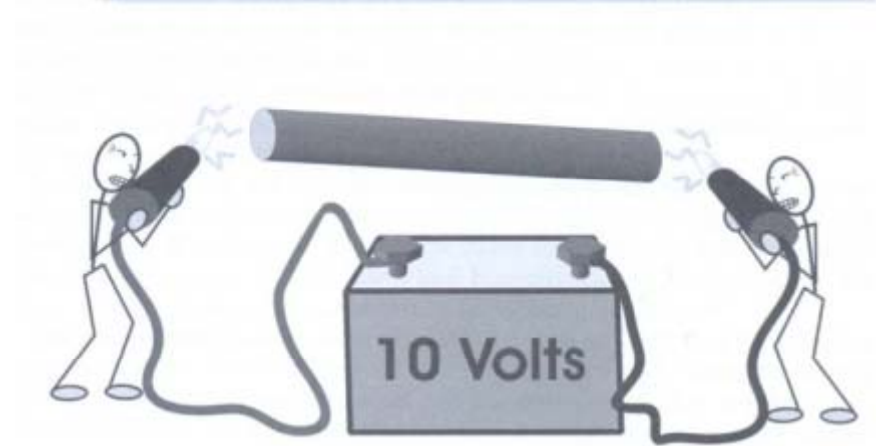


Нано- структурированные 1D - системы

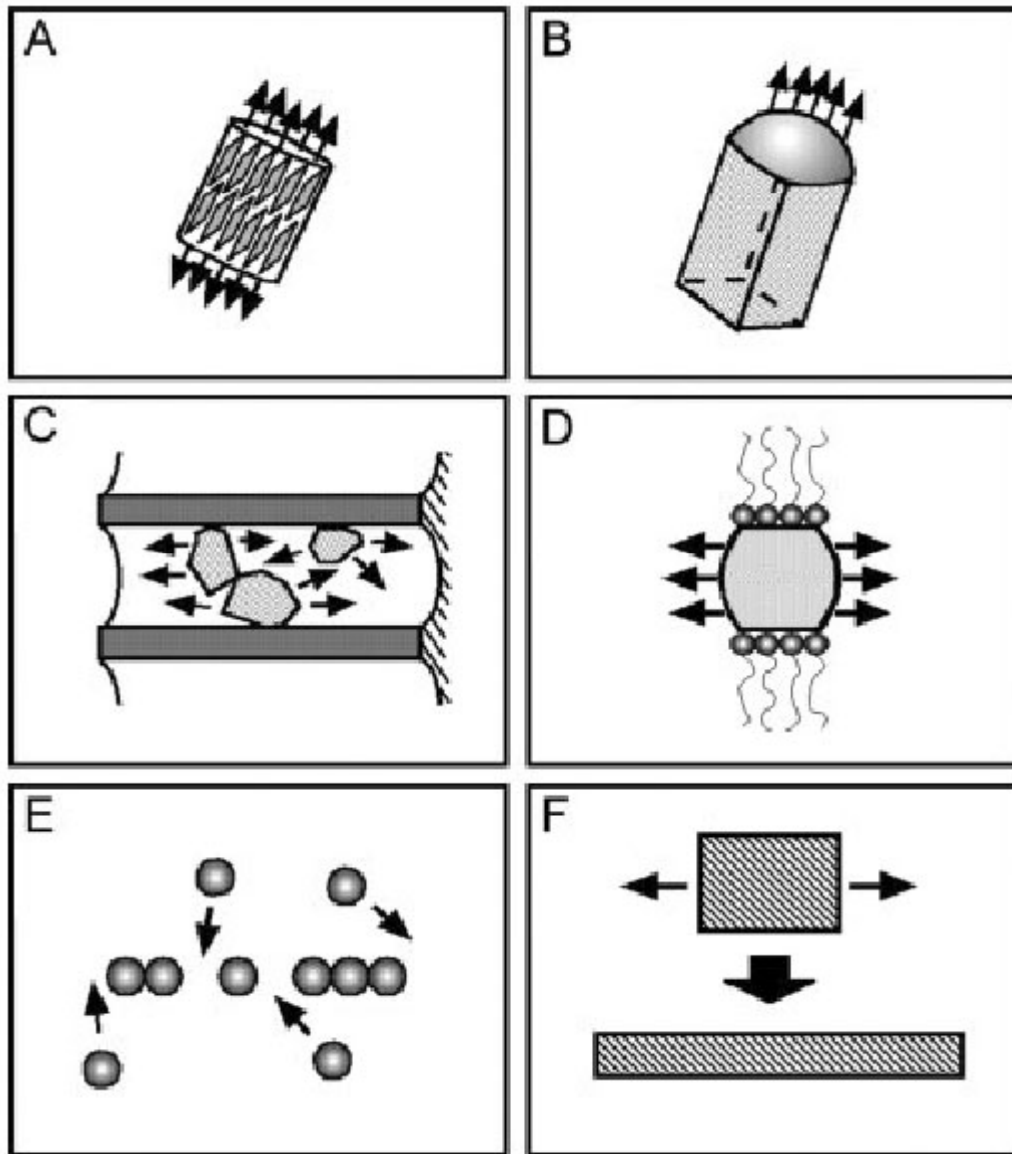
Нитевидные кристаллы
Нанотрубки



Мотивация

- Новые типы квазиодномерных систем
- Сочетание (поли)функциональных и рекордных механических характеристик
- Исследование механизма роста
- Возможности химической модификации
- Возможности наноструктурирования для изменения площади и свойств поверхности
- Фундаментальные корреляции «состав-структура-свойства» (1D системы)

Одномерные структуры



А – влияние анизотропии кристаллической структуры твердого тела

В – капля жидкости («Пар-Жидкость-Кристалл»)

С – геометрические ограничения роста («шаблон»)

Д – кинетический контроль (блокирование роста граней)

Е – самоупорядочение 0D (и 2D!) структур

Ф – уменьшение размера 1D структур

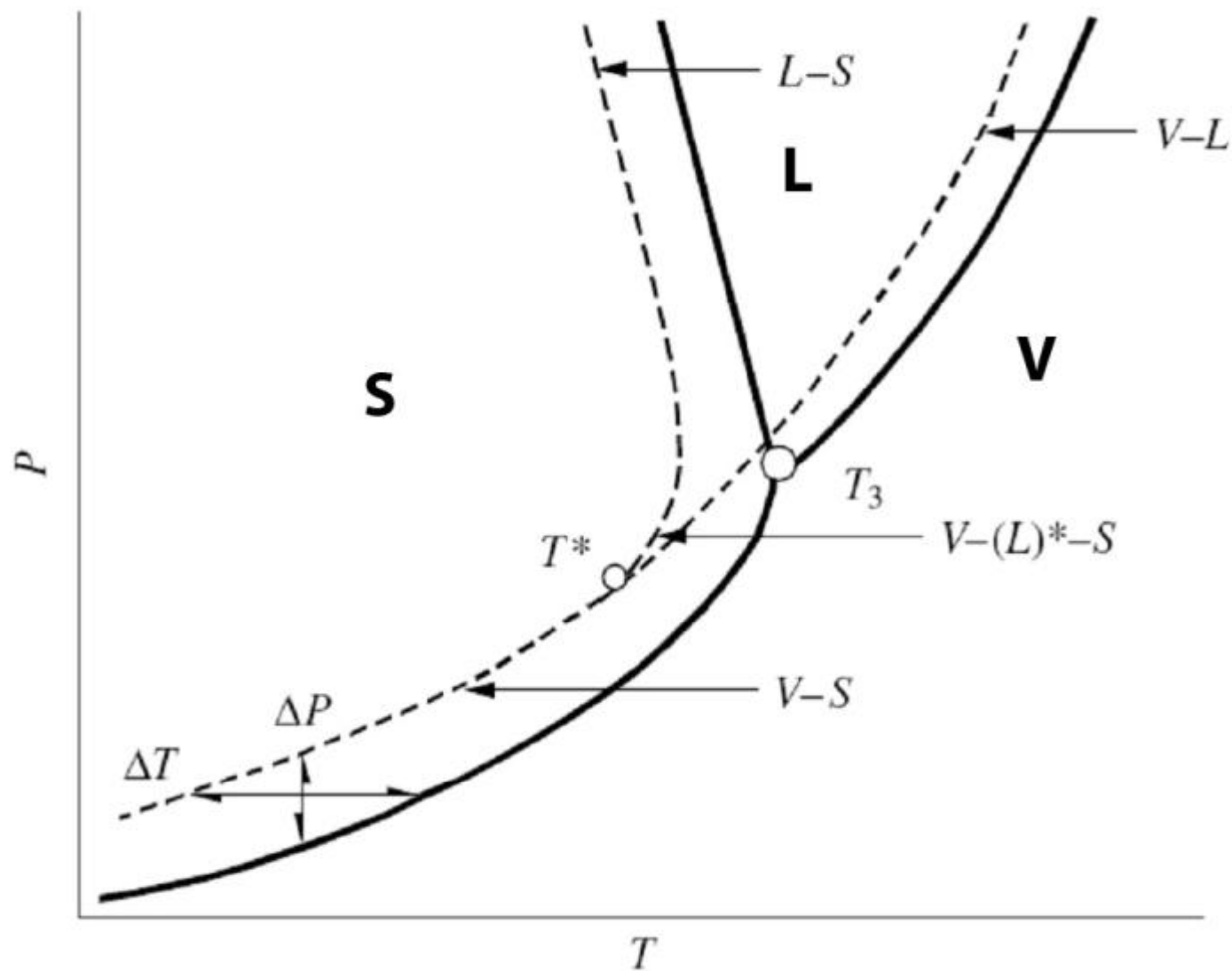
Кристаллы

Рост кристаллов – самопроизвольный гетерогенный процесс, происходящий тогда, когда в системе на стадии образования зародышей **уже сформирована** граница раздела между исходной и новой фазами.

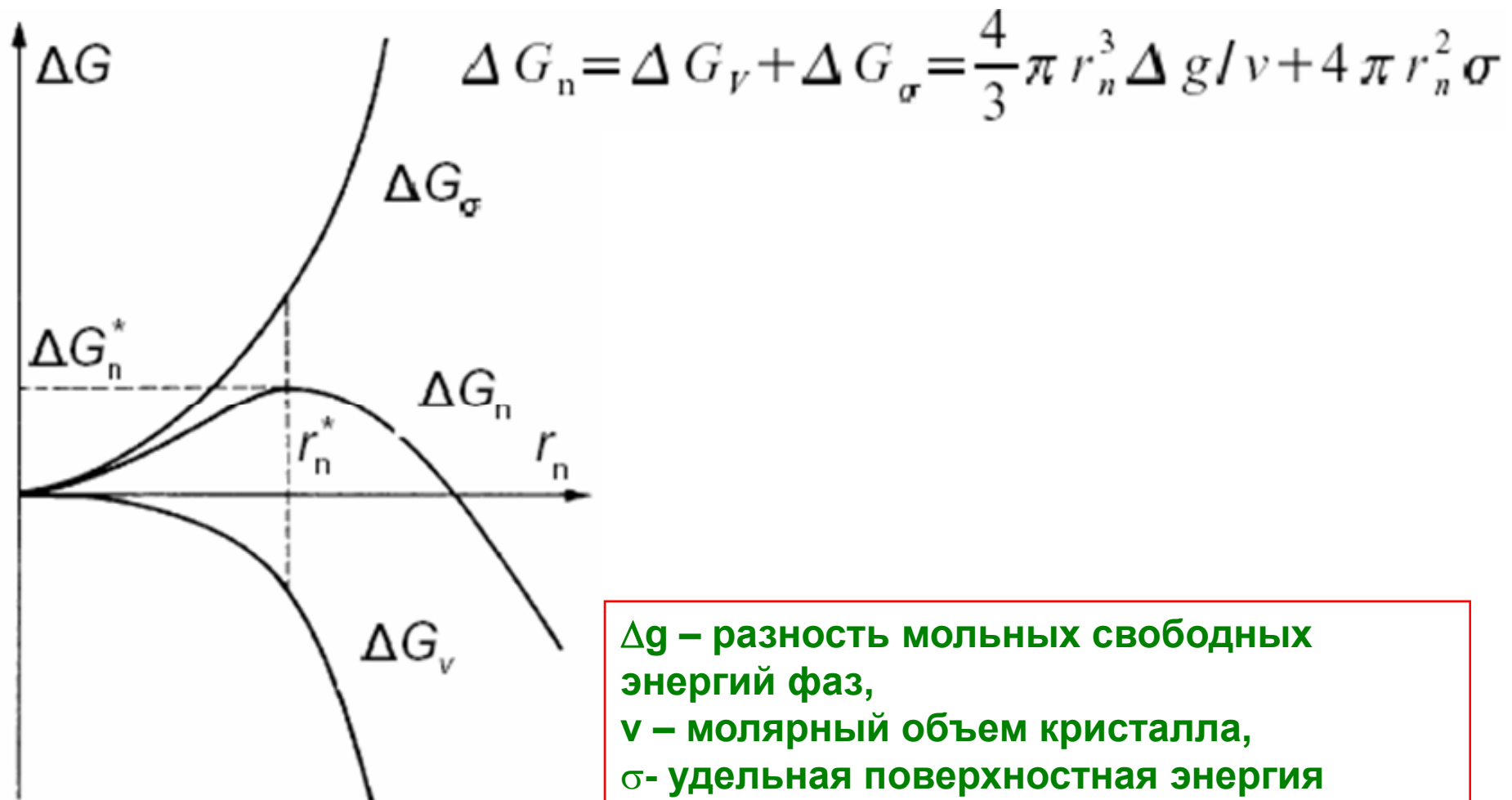
Непременным условием является наличие движущей силы, то есть отклонение системы от состояния термодинамического равновесия, что приводит к такому перераспределению компонентов между питающей средой и растущим кристаллом, которое ведет в конечном итоге к увеличению его размера или изменению его формы.

Кристаллизация - фазовый переход 1 рода и сопровождается выделением тепла, которое должно отводиться от движущейся границы раздела кристалл - среда.

Варианты пересыщения

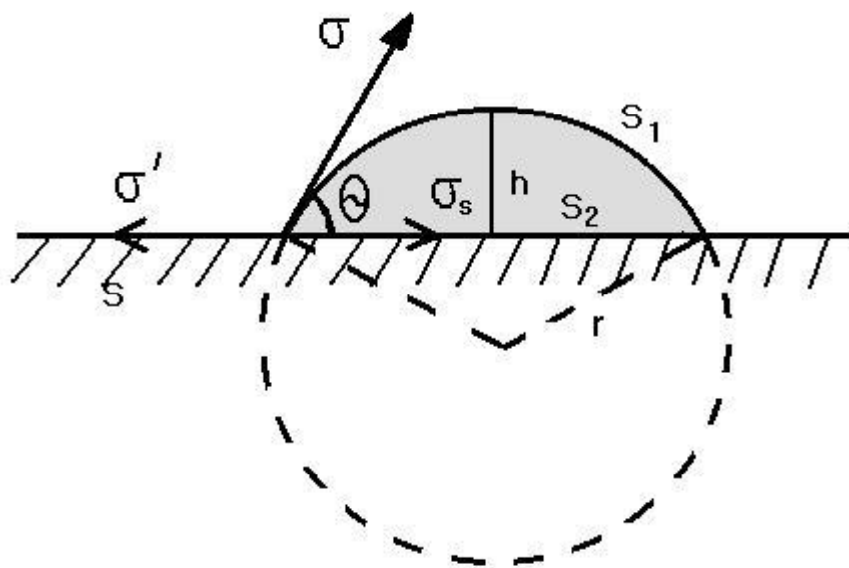


Гомогенное зародышеобразование



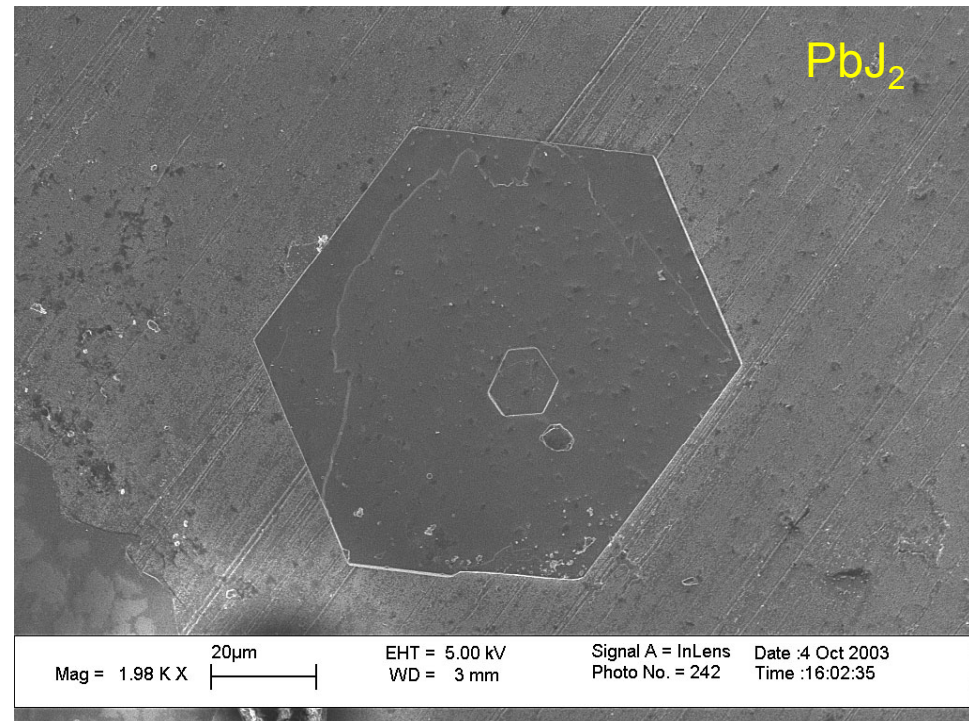
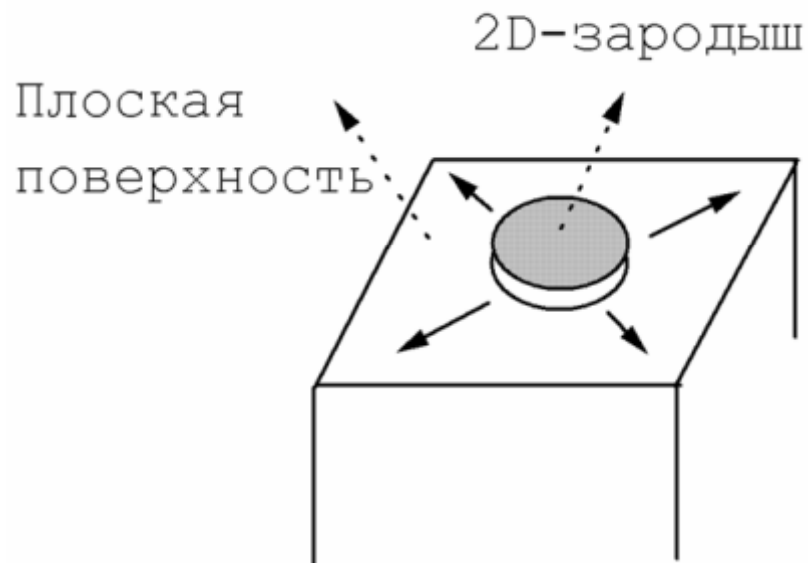
Δg – разность мольных свободных энергий фаз,
 v – молярный объем кристалла,
 σ – удельная поверхностная энергия
 ΔG_n – энергия образования зародыша,
 r_n^* – радиус критического зародыша

Гетерогенное зародышеобразование



- кристаллизация на чужеродных частицах, пыли, стенках контейнера или подложке
- использование затравки
- две стадии: образование адсорбционного слоя, формирование критического зародыша и его рост
- ♦ более низкое значение критического переохлаждения

Островковый рост



Рост двумерных зародышей (островковый рост)
Образование на поверхности кристалла двумерного зародыша и его рост (распространение) по поверхности независимо или одновременно с другими растущими двумерными зародышами

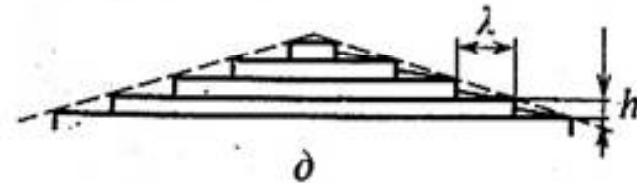
Энергия активации процесса достаточно высока и обычно этот процесс не является доминирующим в росте монокристаллов

Спиральный рост



Р и с. 43

Последовательные стадии образования ступени вокруг точки выхода на поверхность кристалла винтовой дислокации



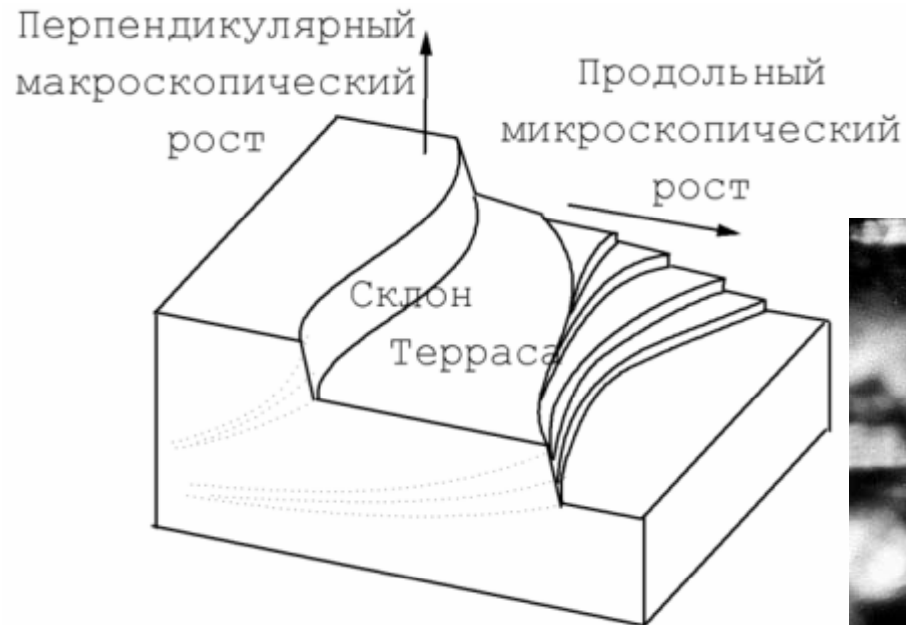
Спиральный рост (винтовые дислокации, как генераторы кристаллизующихся слоев, Бартон, Франк, Кабрера, 1949)

Является одним из наиболее распространенных и наблюдаемых механизмов роста.

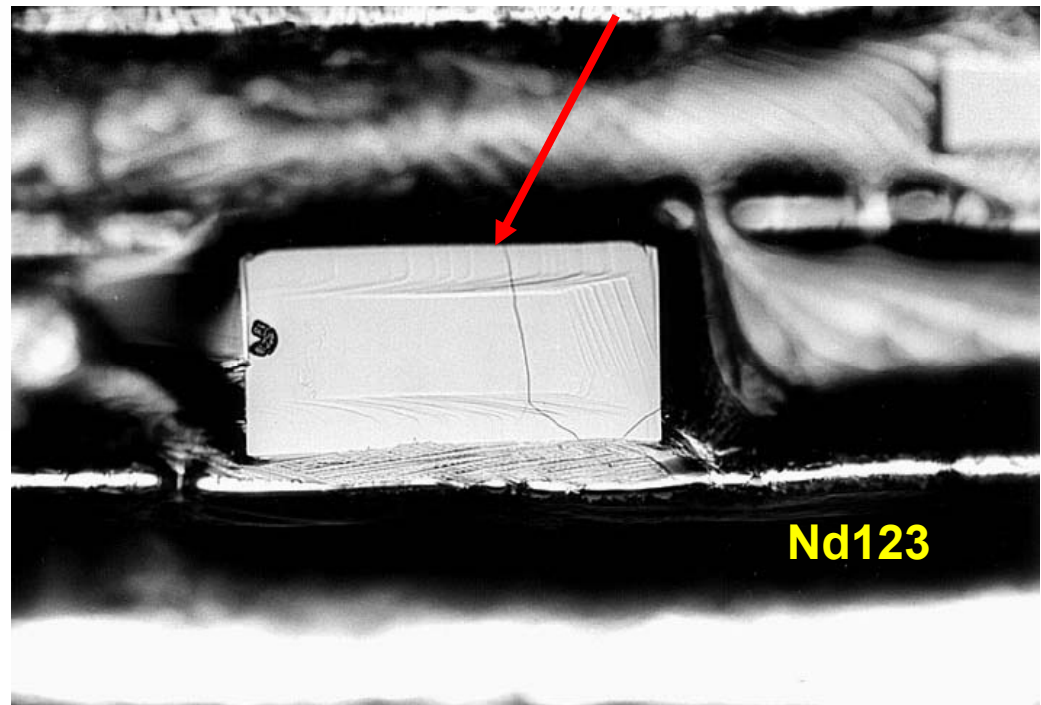
Математическое описание системы взаимодействующих спиралей достаточно сложно и зависит от взаимного расположения, энергии, вектора Бюргерса винтовых дислокаций.

Полигонизация спиралей зависит от пересыщения и индекса грани.

Послойный рост



Рост от краев к центру
за счет террас/слоев

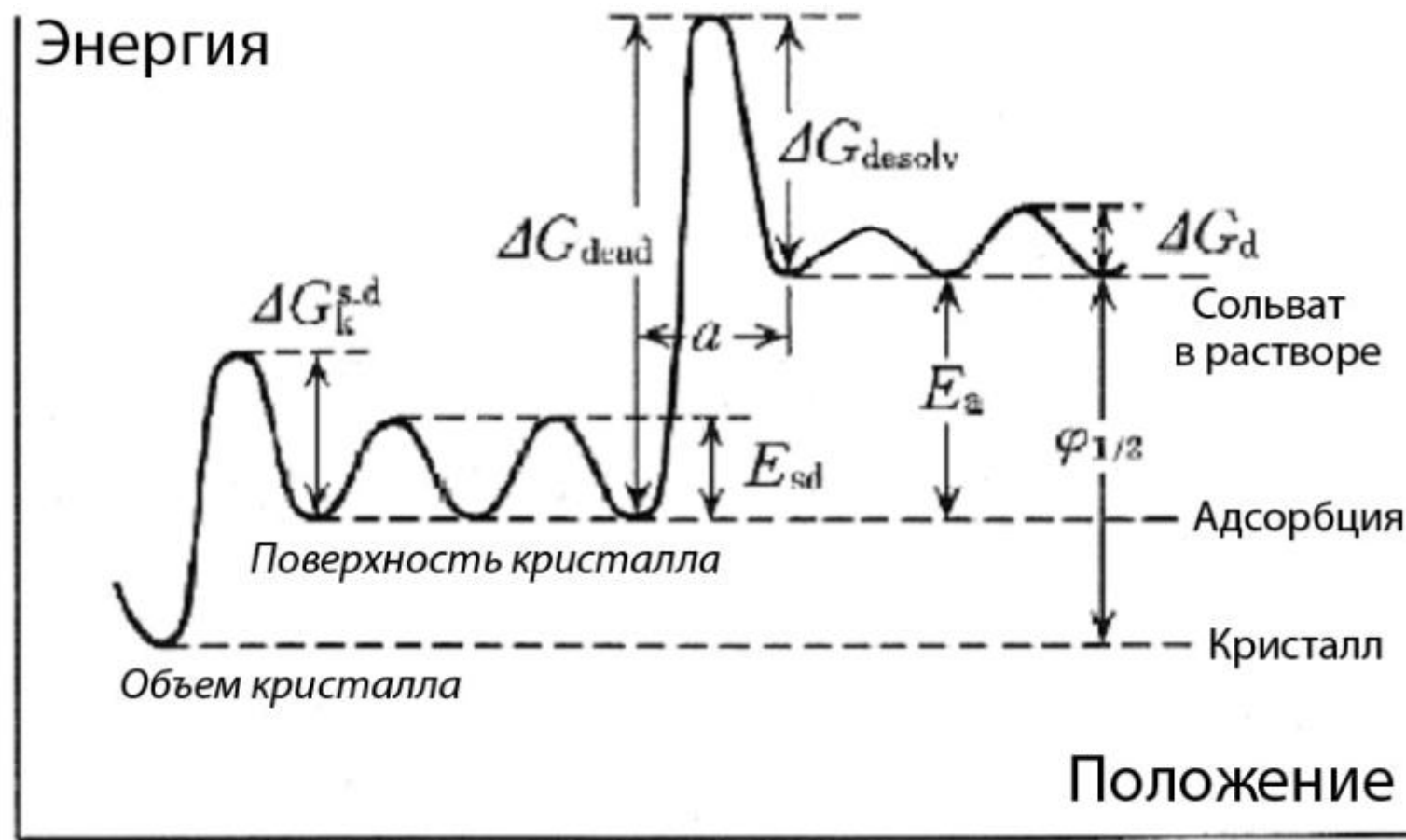


Послойный рост (движение фронта кристаллизации в виде «террас», параллельных поверхности кристалла)

Часто происходит образование визуально наблюдаемых макротеррас из-за взаимодействия элементарных кристаллизующихся слоев

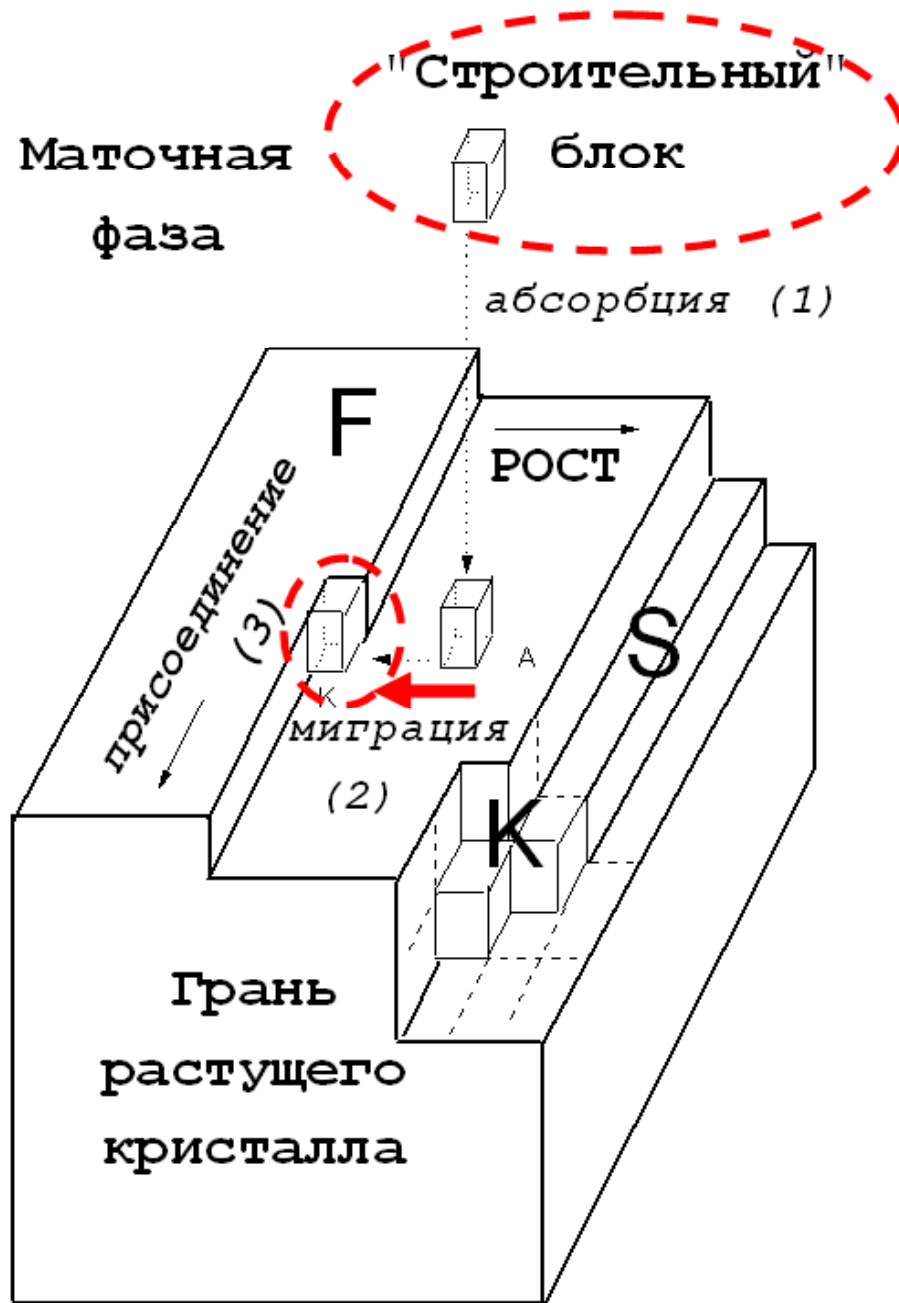
Не реализуется в ряде случаев, особенно при наличии выходов на поверхность винтовых дислокаций.

Граница раздела и мезослой



ΔG_d – энергия флуктуаций сольватированного комплекса в растворе, ΔG_{desolv} – потенциальный барьер процесса разрушения сольвата, E_{sd} – потенциальная энергия перескоков адатома в результате поверхностной диффузии, ΔG_{dead} – потенциальный барьер десорбции адатома с поверхности кристалла, сопровождающейся изменением структуры поверхностного слоя жидкости в результате сольватации адатома, $\Delta G_{k.s.d.}$ – потенциальный барьер встраивания адатома, мигрирующего по поверхности кристалла, в объем кристалла. $\varphi_{1/2}$ – результирующая энергия выигрыша при встраивании адатома из сольвата в кристалл. «а» - толщина фазовой границы.

Энергетика



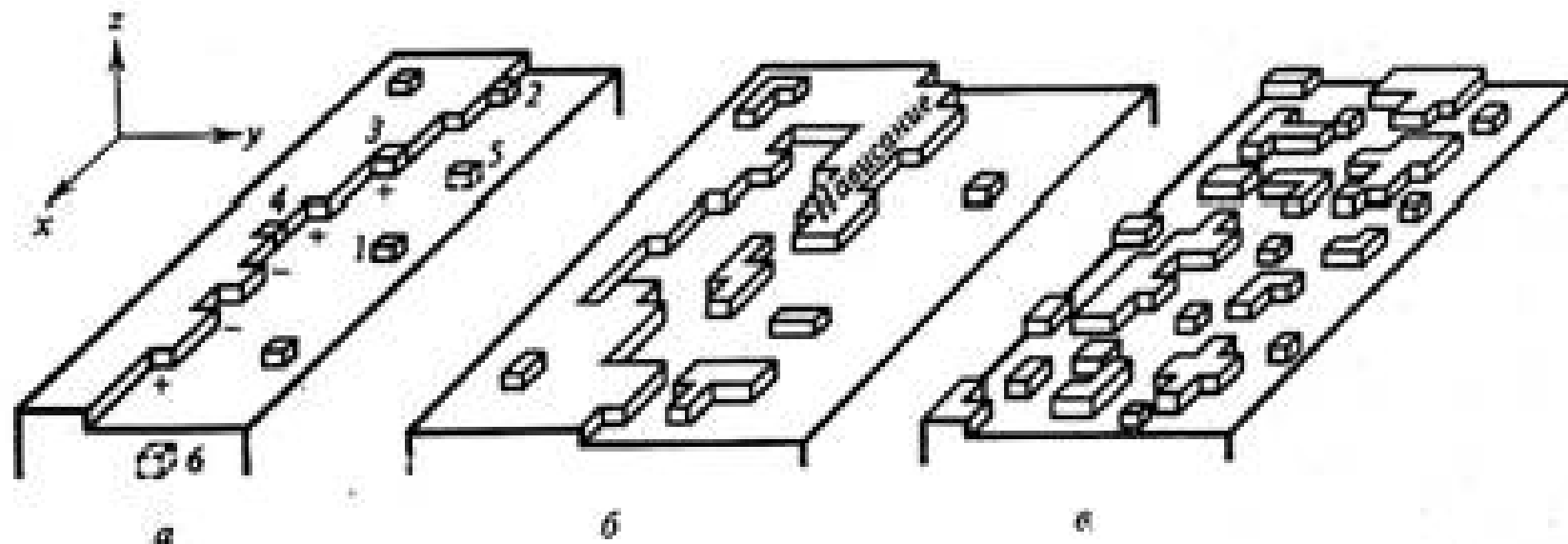
Модель Коссея-Странского-
(Крастанова) (1927), (0 K!)

Силы молекулярной природы,
компенсация ненасыщенных связей,
дифференциация мест
присоединения по критерию
энергетической выгоды

Способы встраивания

Наиболее массовое приложение (присоединение) в места изломов К, при котором быстро заполняется ряд адатомов, называется повторимым ходом, которым практически строится весь кристалл, слой за слоем. Отложение слоев за счет перемещения ступеней перпендикулярно направлению повторимого хода называется тангенциальным или послойным ростом. Движение поверхности по нормали к самой себе называется нормальным ростом.

Строение границы раздела



Р и с. 7

Схема поверхности кристалла с простой кубической решеткой

- а** — различные типы атомных положений при $T > 0$ (см. табл. 1). Знаками «+» и «—» показаны положительные и отрицательные заряды на ступени соответственно;
- б** — сильно развитая шероховатость ступени, включая конфигурацию нависания;
- в** — атомно шероховатая поверхность с двумя возможными уровнями поверхностных атомов

α - фактор (энтропия)

In the Jackson model, the interface is described as a collection of N sites on which N_s atoms are adsorbed. Each site has a coordination number z_s . On average, for each atom, $(1 - N_s/N)z_s$ neighbouring sites are empty, which corresponds to an energy cost (with respect to a totally filled, smooth lattice) of

$$\Delta U = U_{\text{bond}}(1 - N_s/N)z_s N_s$$

$$\Delta S = k_B \ln \Omega = k_B \ln \frac{N!}{N_s!(N - N_s)!}$$

$$\approx k_B [N \ln N - N_s \ln N_s - (N - N_s) \ln (N - N_s)]$$

$2U_{\text{bond}}$ is the energy associated with one 'crystal bond' between neighbouring atoms

The bonding energy U_{bond} is related to the latent heat per atom l by $l = zU_{\text{bond}}$

z is the coordination number in the bulk crystal

$$\phi = N_s/N:$$

$$\frac{\Delta F}{Nk_B T_R} = 2\phi(1 - \phi) + \frac{T}{T_R} \ln(1 - \phi) - \frac{T}{T_R} \phi \ln \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right)$$

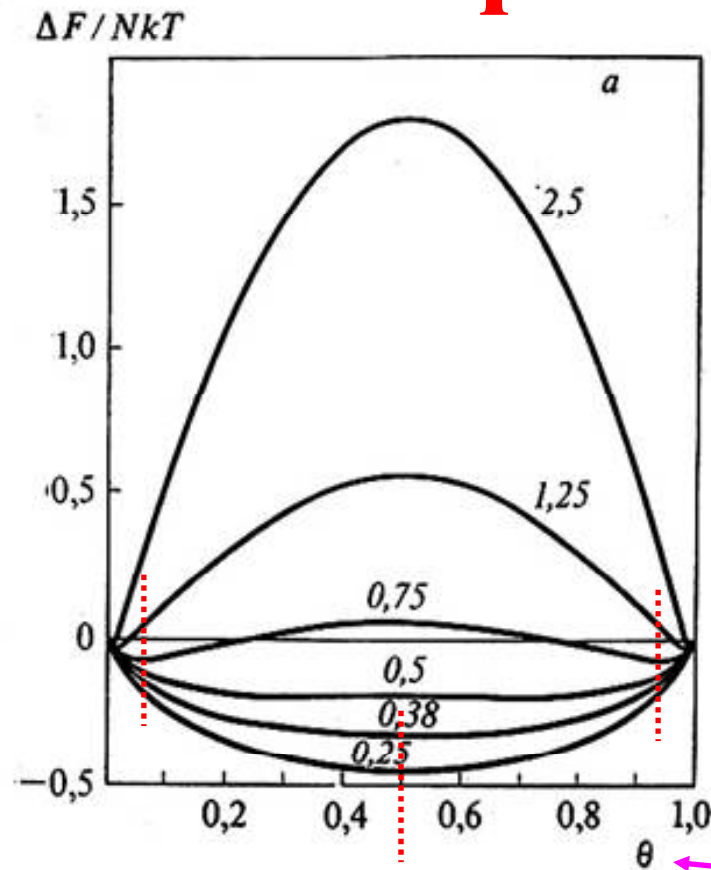
$$T_R = \frac{z_s l}{2zk_B}$$

$$\alpha \equiv \frac{z_s l}{zk_B T_{\text{eq}}} = \frac{2T_R}{T_{\text{eq}}}$$

Свойство материала + грань кристалла (z)

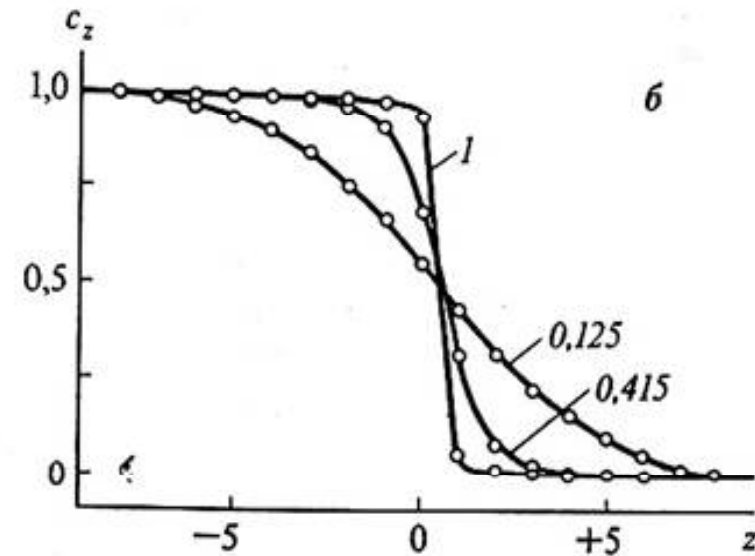


Межфазные границы



$\alpha > 2$ - гладкая
 $\alpha < 2$ - шероховатая поверхность

$$\alpha \equiv \frac{z_s l}{z k_B T_{eq}} = \frac{2 T_R}{T_{eq}}$$

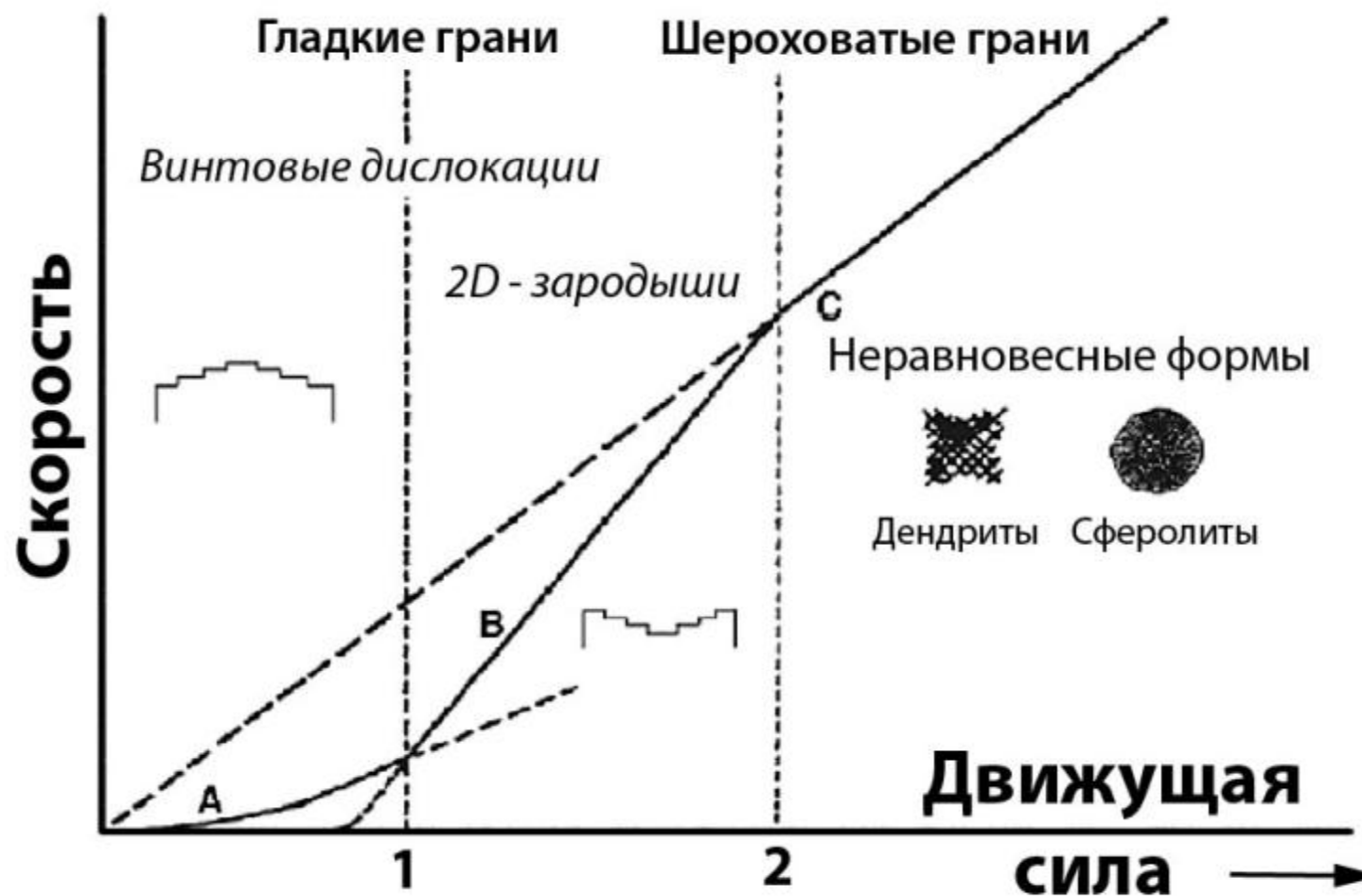


Р и с. 9

- а — зависимость удельной свободной энергии грани (100) простой кубической решетки от степени заполнения адсорбционного слоя. Энергия отсчитывается от энергии идеально гладкой грани (Jackson, 1958);
- б — вероятность принадлежности к кристаллу атома, имеющего координату z , перпендикулярную границе раздела фаз; z убывает в направлении от среды к кристаллу (Джексон, 1975). Числа на кривых обоих рисунков дают значения параметра w/kT

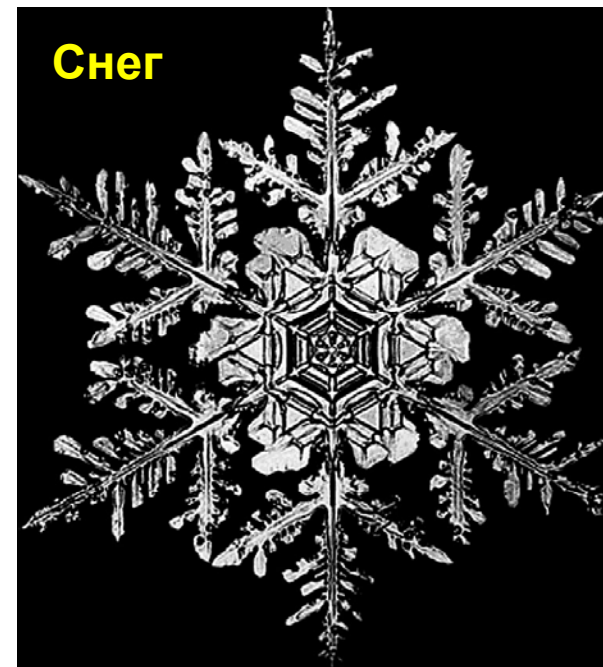
← степень заполнения адс. слоя

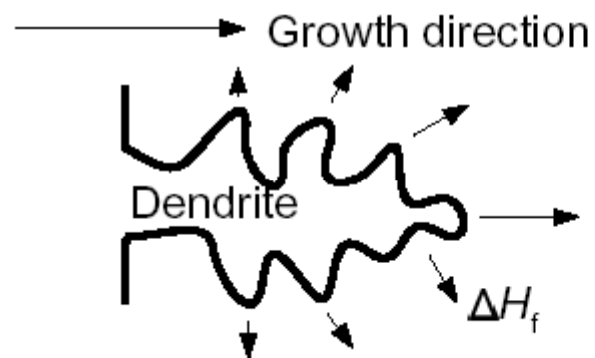
Влияние пересыщения



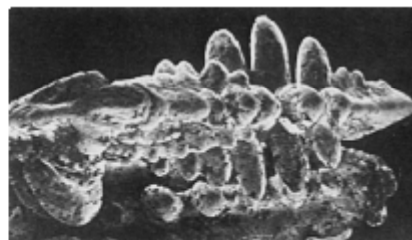
Механизм роста грани в существенной степени зависит от степени отклонения системы от равновесия (пересыщения).

Дендриты





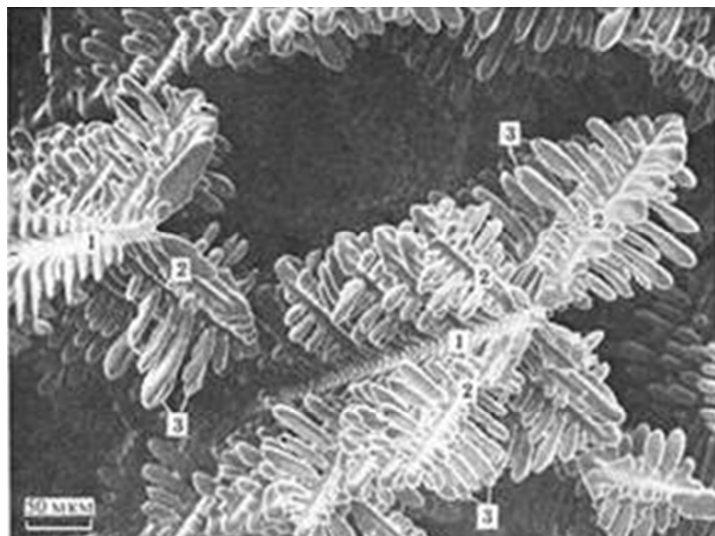
Сталь



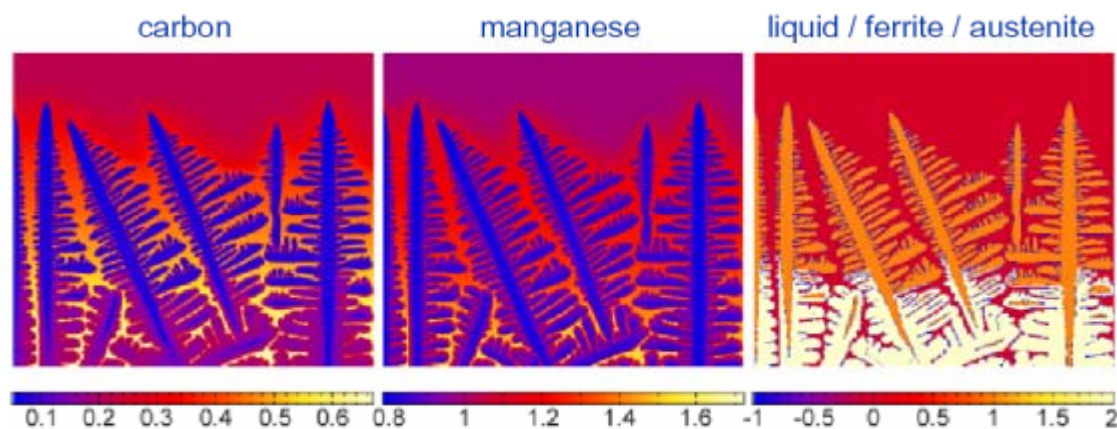
Dendrites in steel



Снежинки

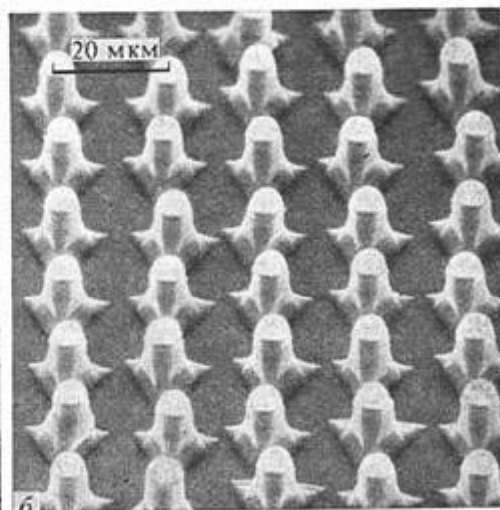
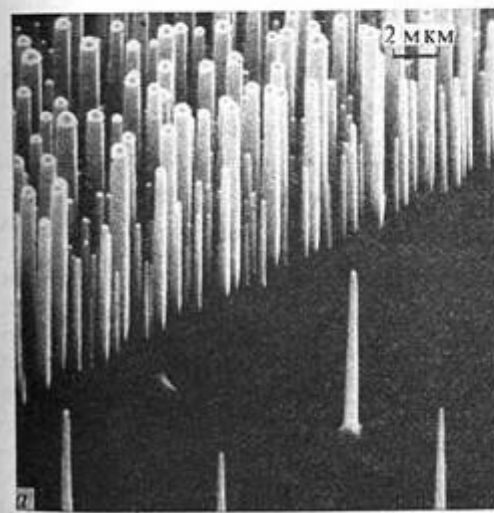
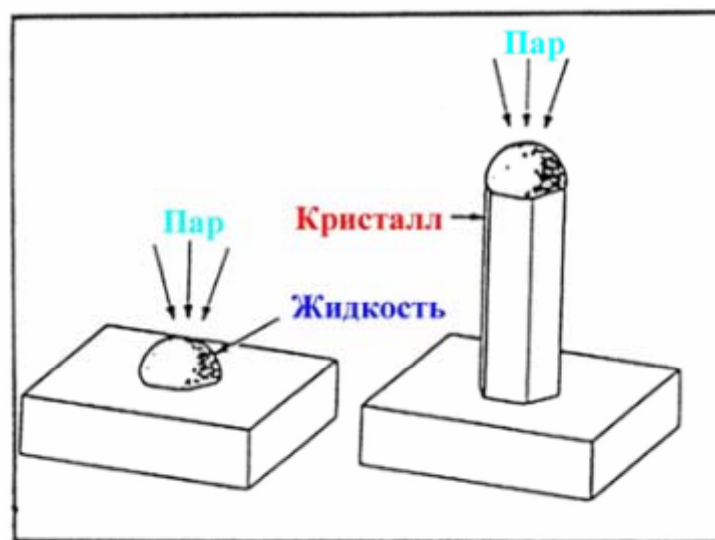
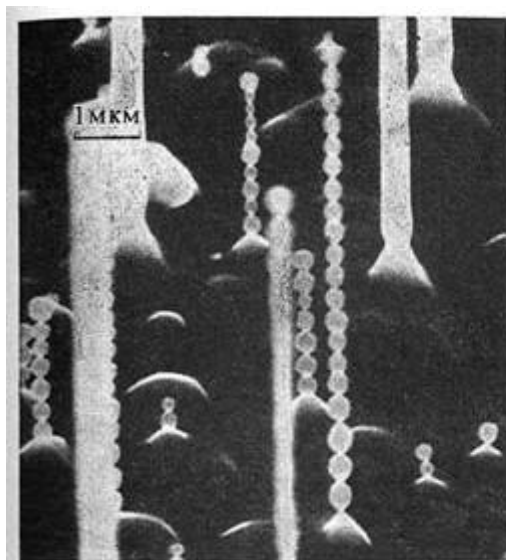


Со, сплав Со-РЗЭ-Са

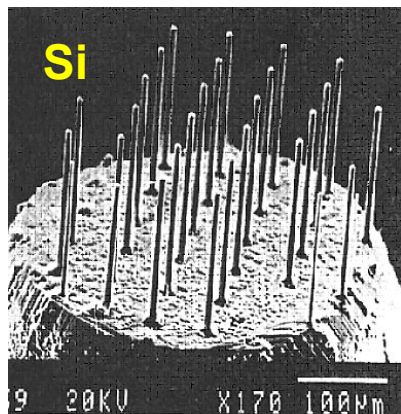


Моделирование («фазовое поле»)

Рост вискеров (Si/Au, ...)

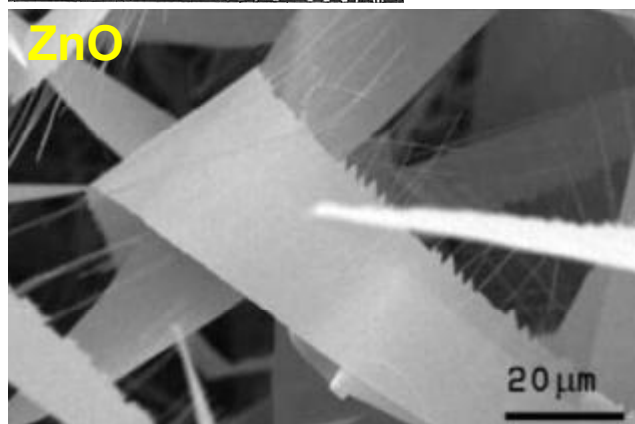
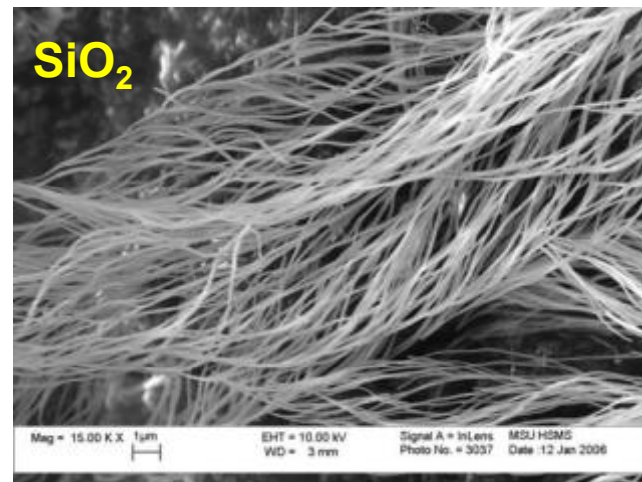
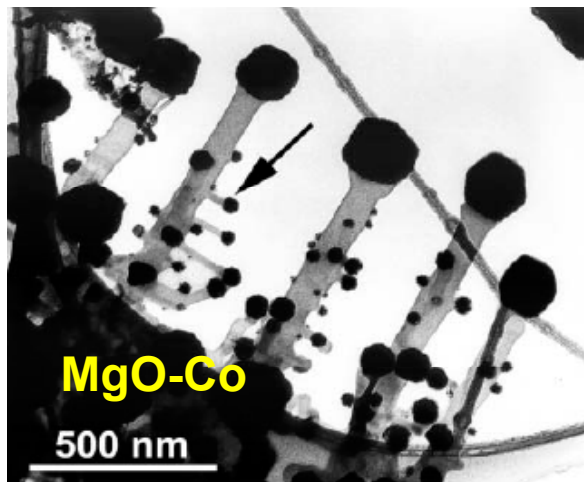


Механизм "Пар-Жидкость-Кристалл":
1. капля должна быть жидкой при данных T и $C_{р.в.}$
2. капля должна смачивать подложку
3. вещество капли не должно в больших концентрациях захватываться кристаллом
4. вещество не должно реагировать с газовой фазой, но должно растворять компоненты для роста кристалла



АСМ

«КВАНТОВЫЕ
НИТИ»



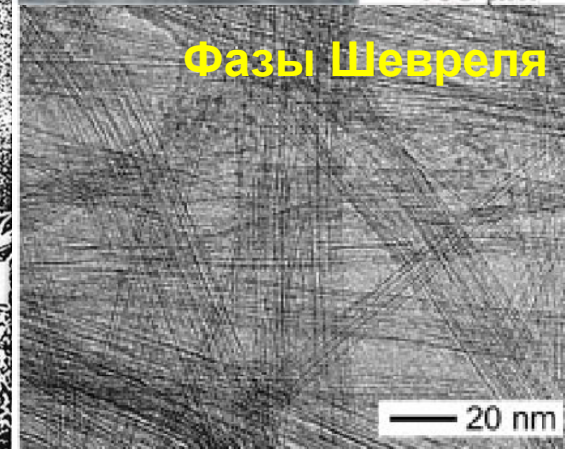
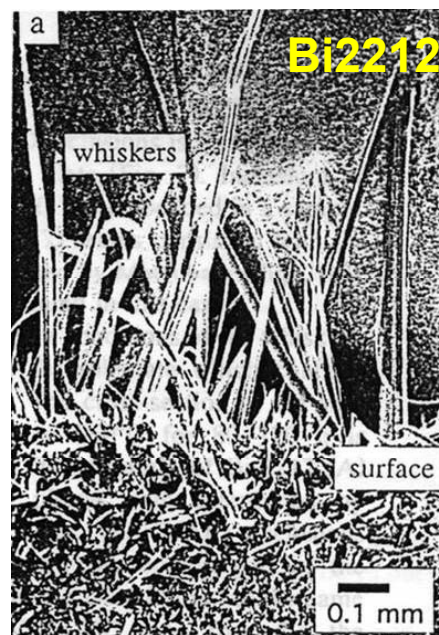
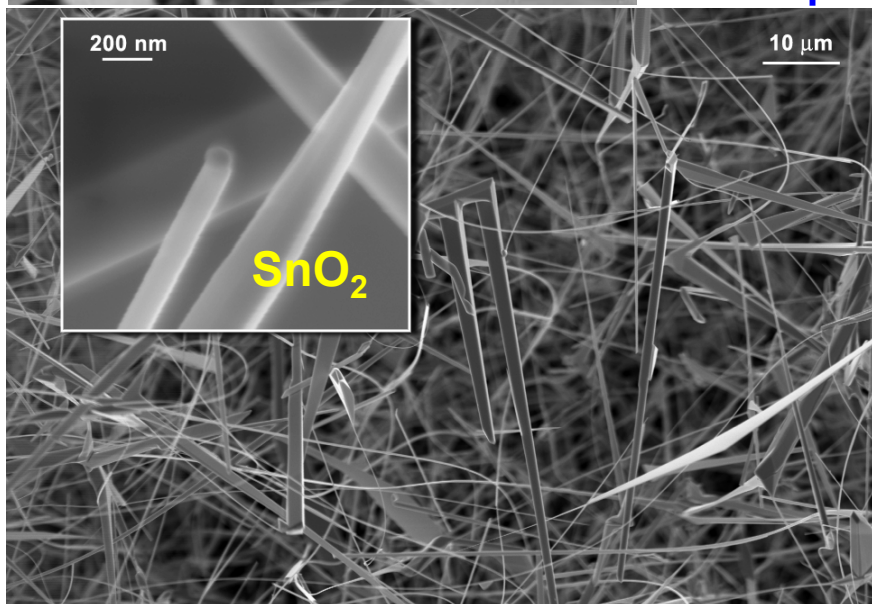
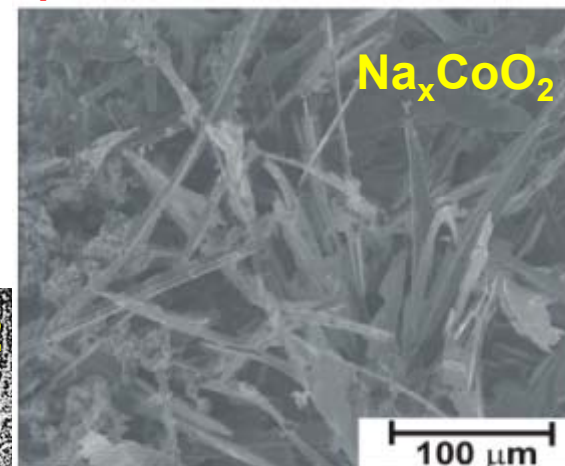
полупроводники

сенсоры

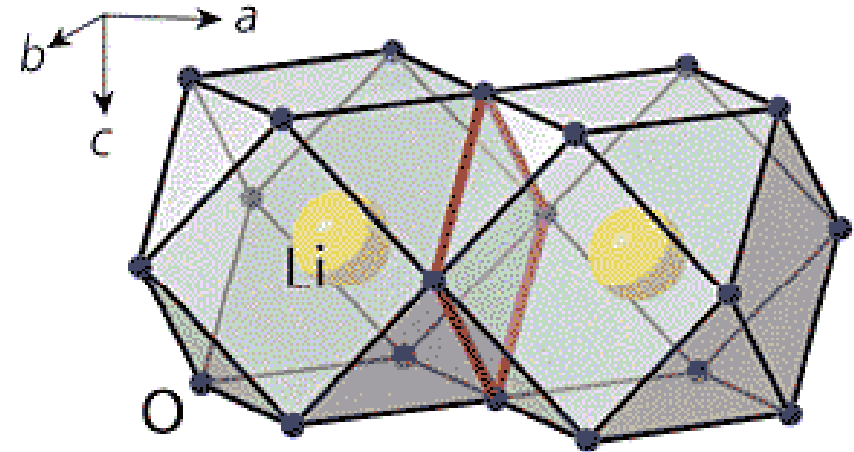
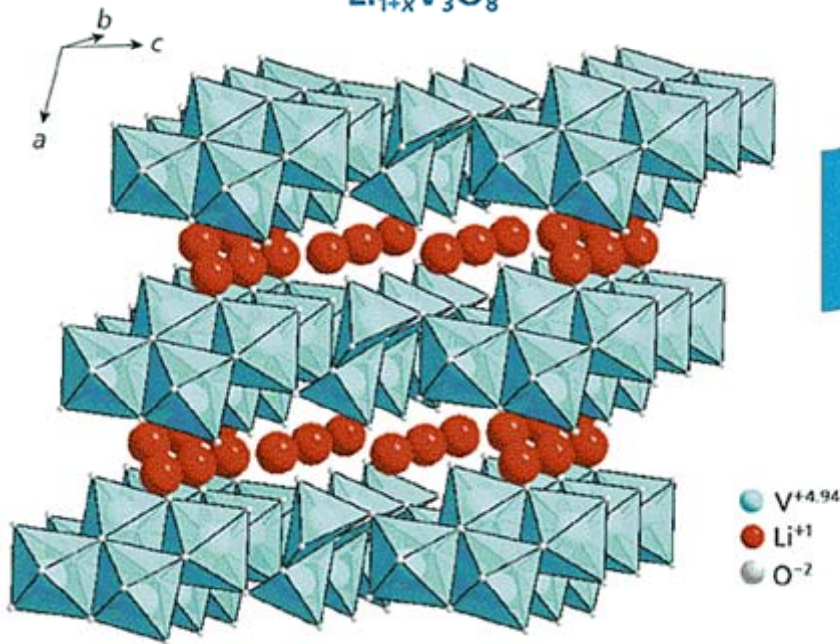
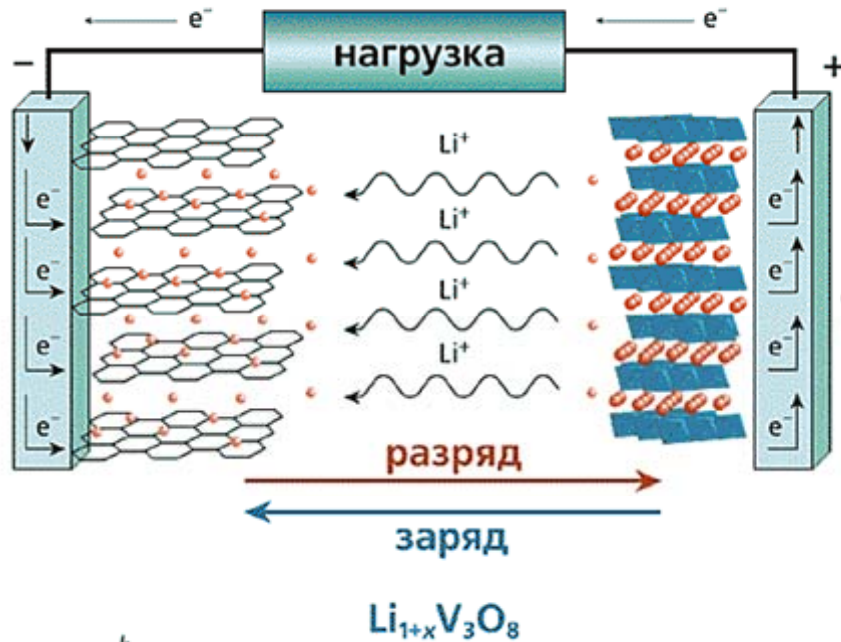
конструкционные материалы

Вискеры

сверхпроводники

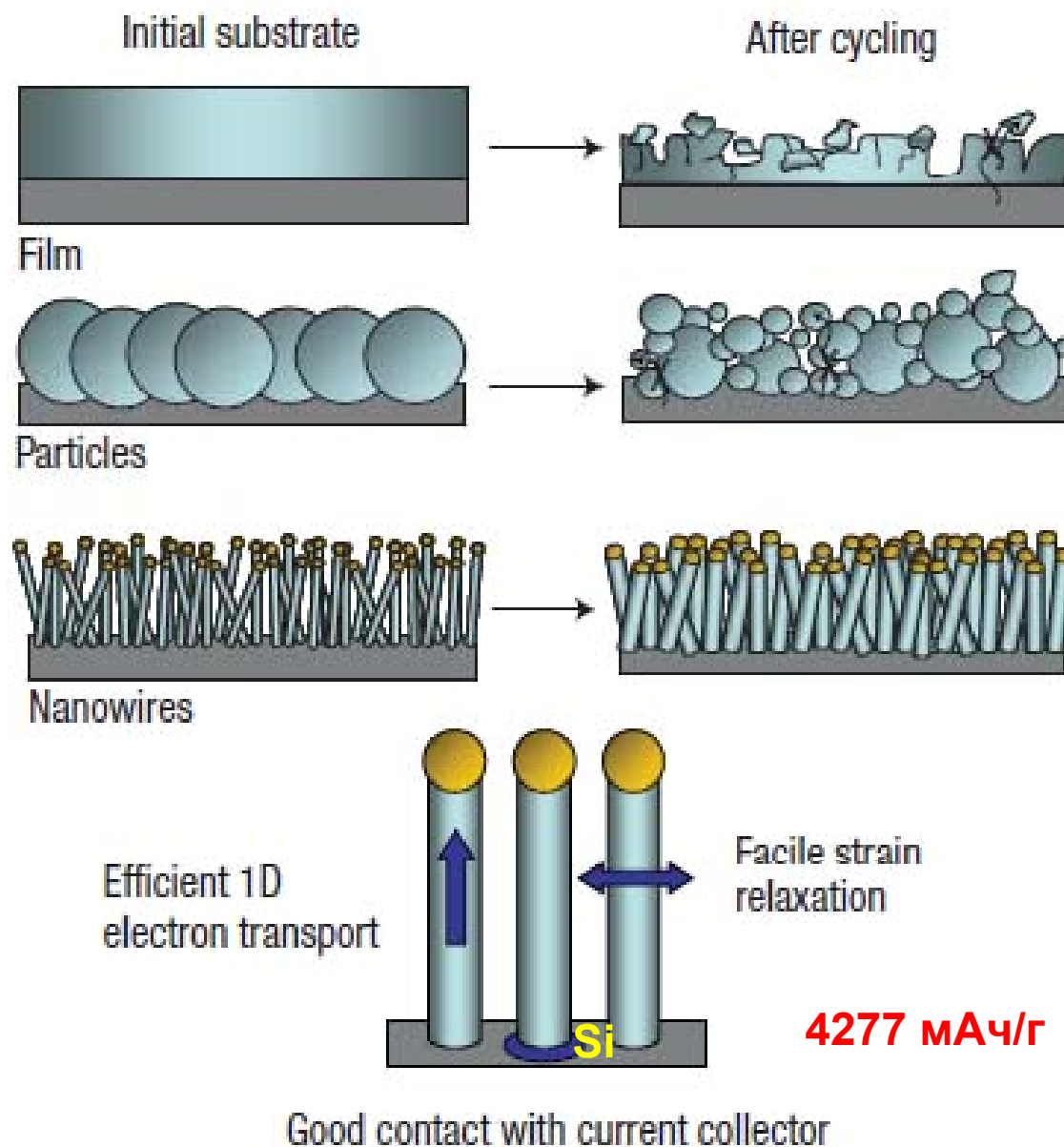
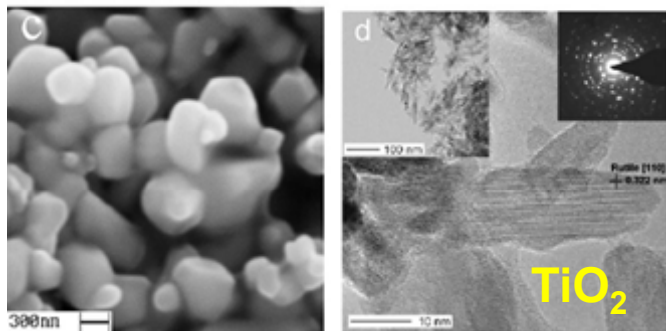
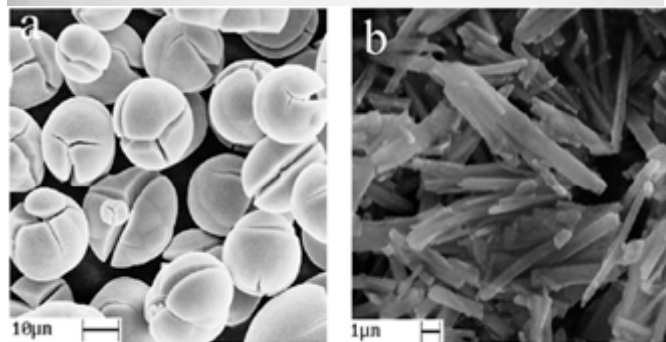
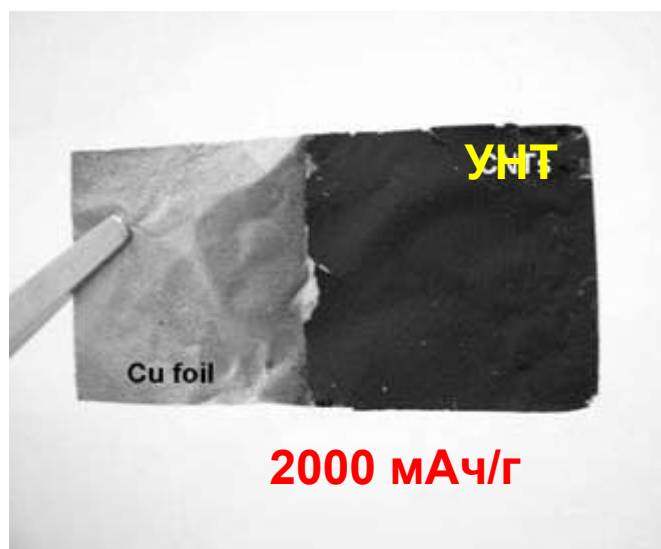


Аккумулятор



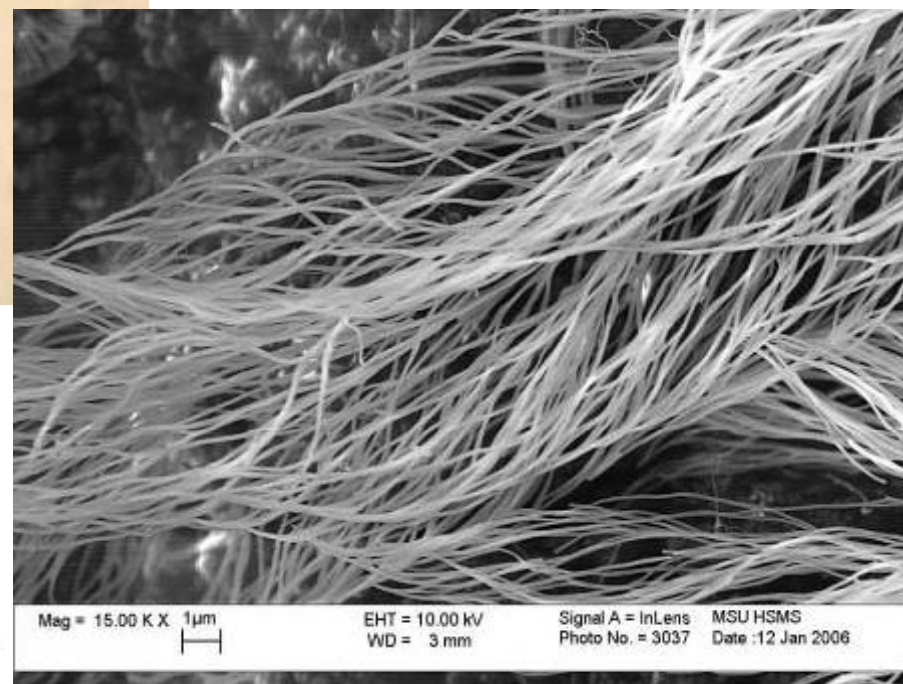
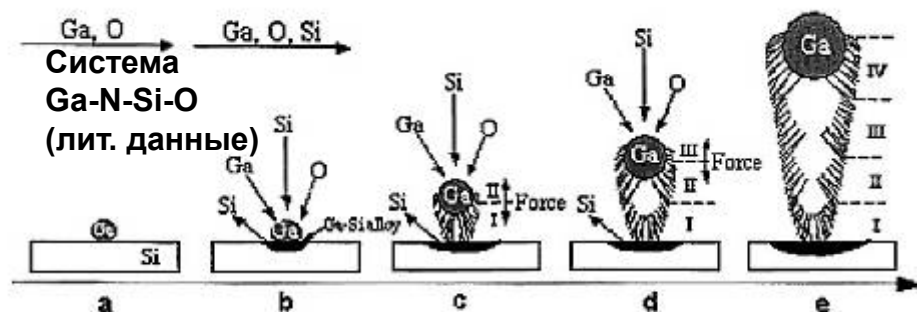
- Системы с высоким потенциалом полуреакции
- Высокая емкость
- Высокая площадь поверхности для быстрой перезарядки
- Сохранение свойств при циклировании
- Малая токсичность и невысокая стоимость
- Удобная морфология, позволяющая изготавливать электроды различной формы

Анодные материалы Li ХИТ

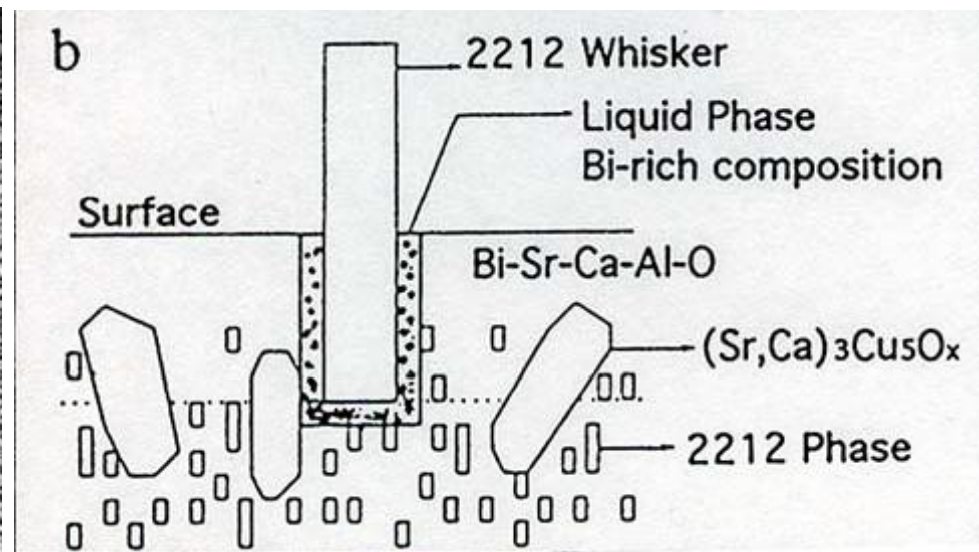
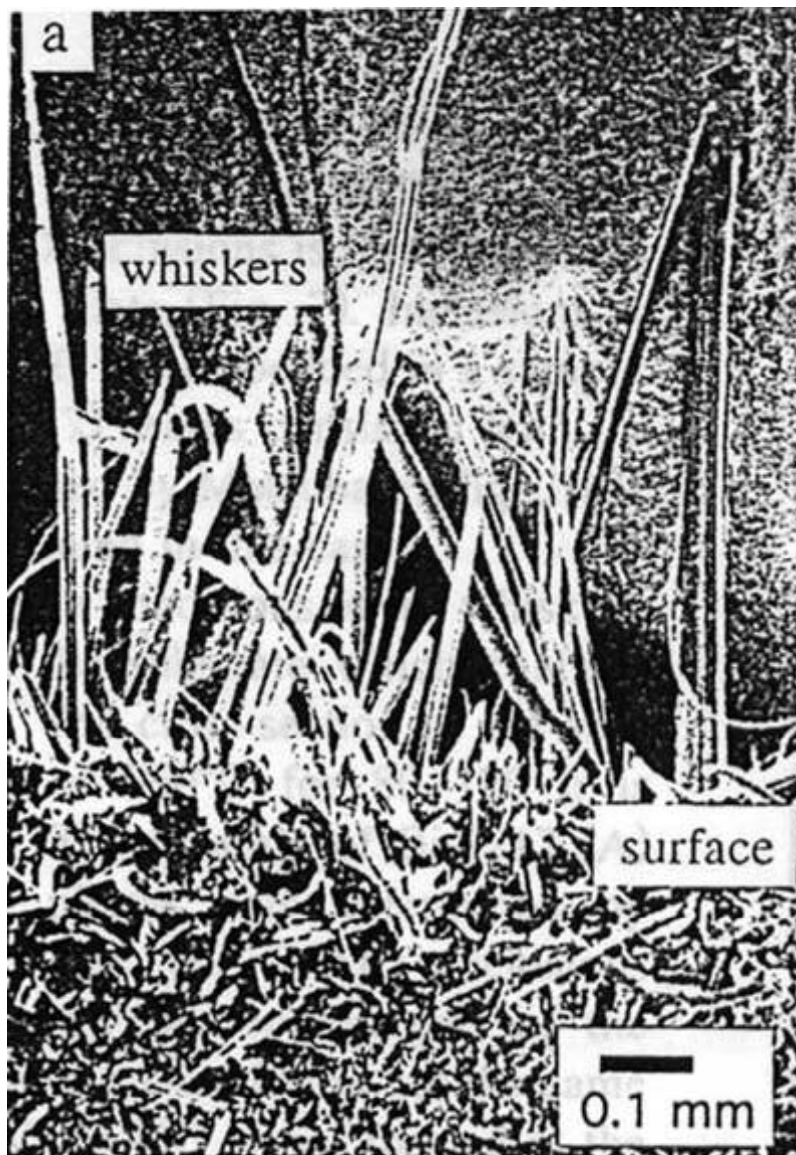




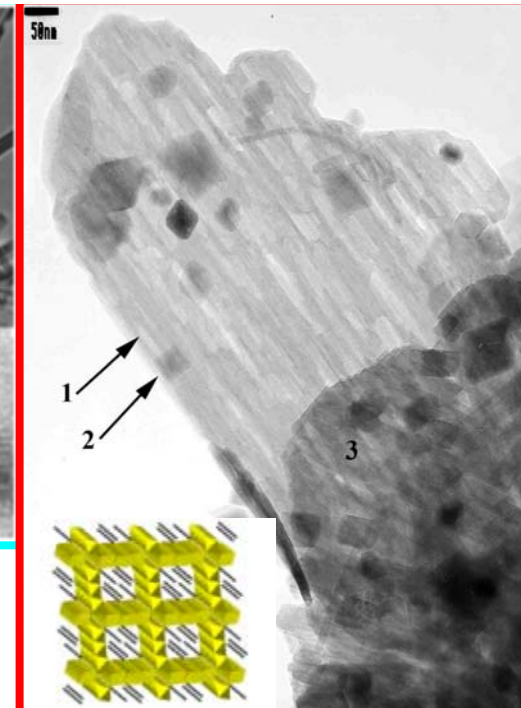
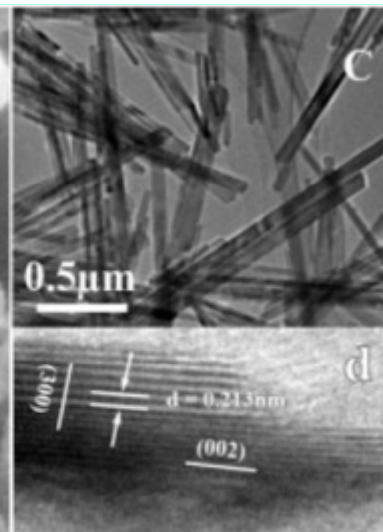
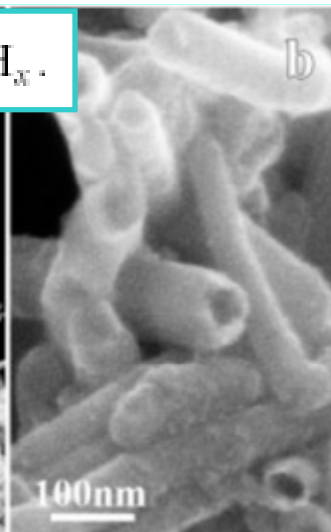
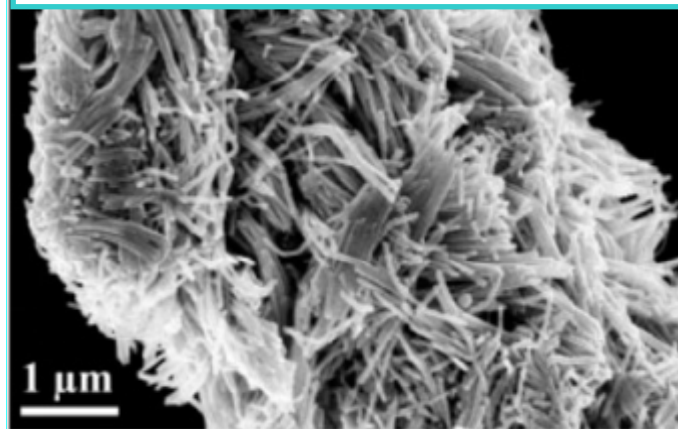
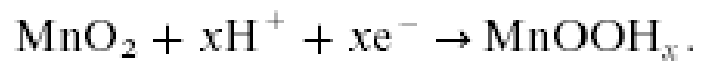
«Перьевидные»
кристаллы SiO_2
(механизм
Пар-Жидкость-Кристалл)



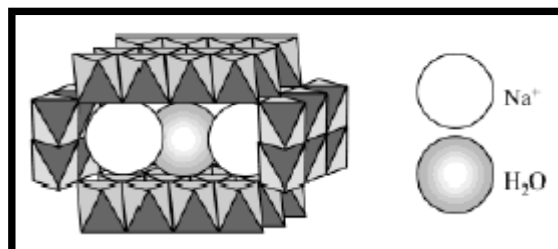
Рост вискеро́в (ВТСП Bi2212)



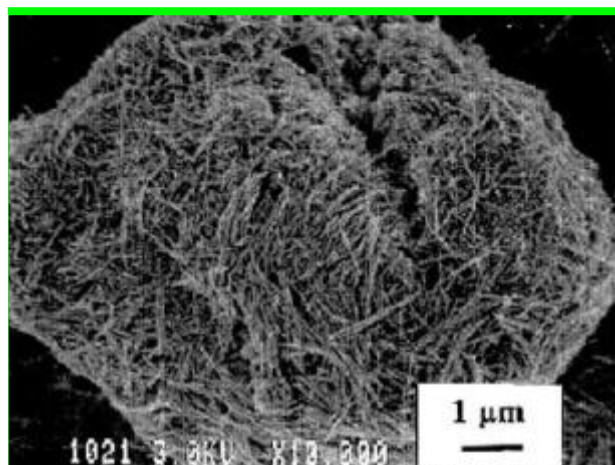
Рост за счет капиллярного потока
расплава к основанию растущей иглы



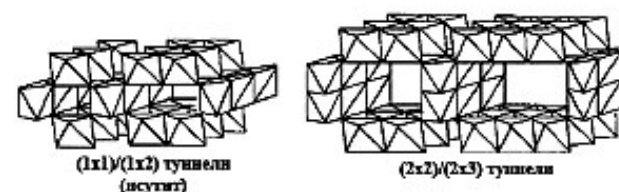
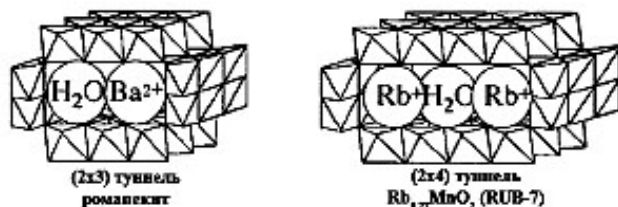
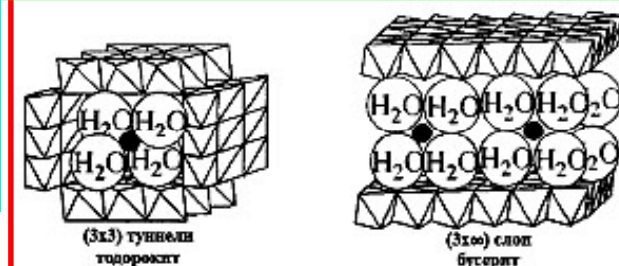
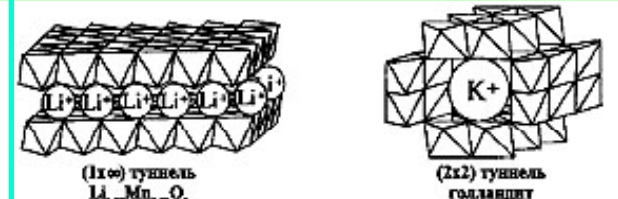
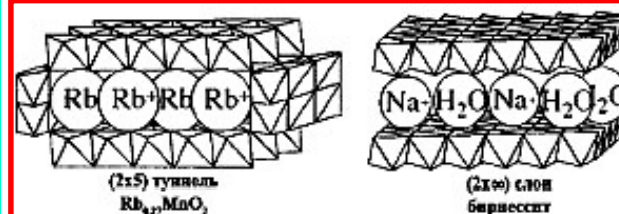
Катодные материалы



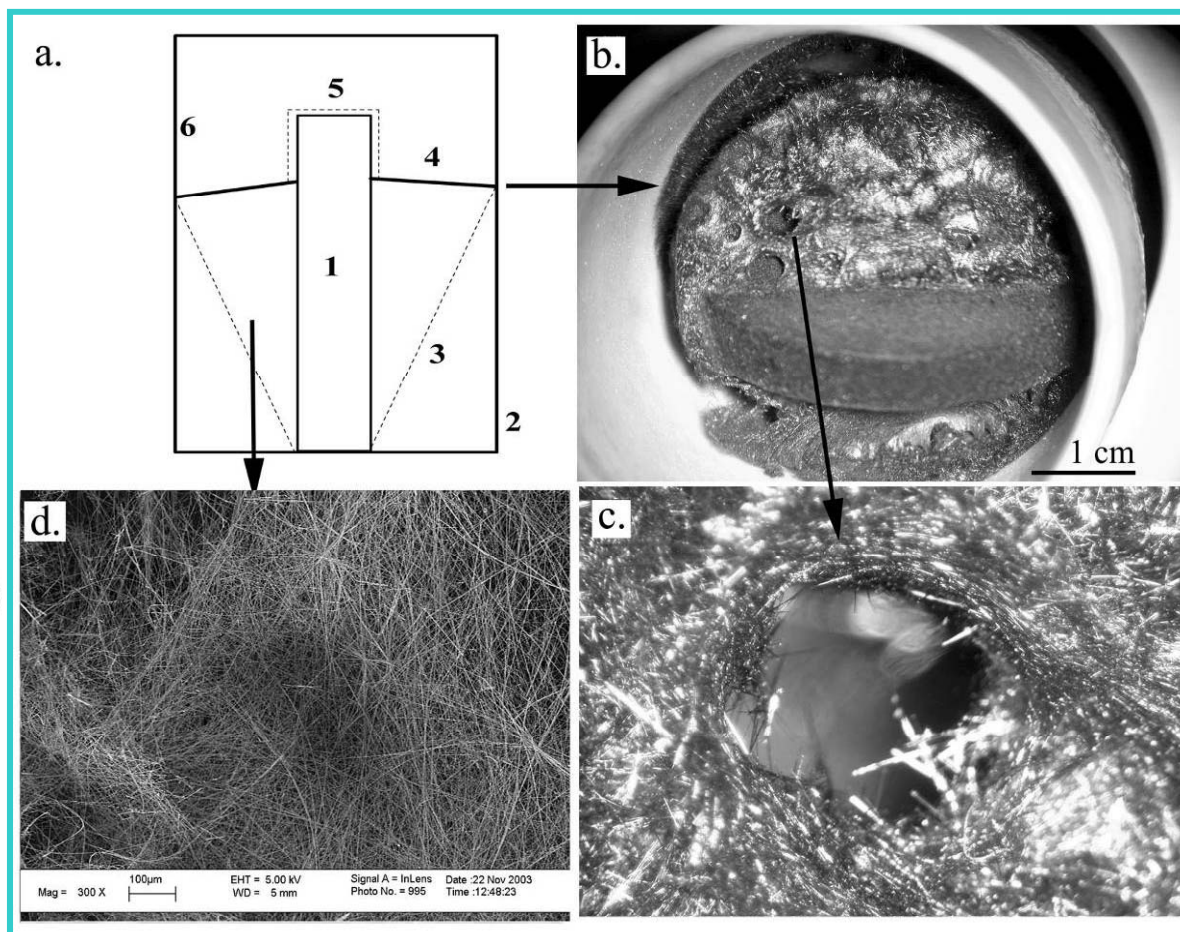
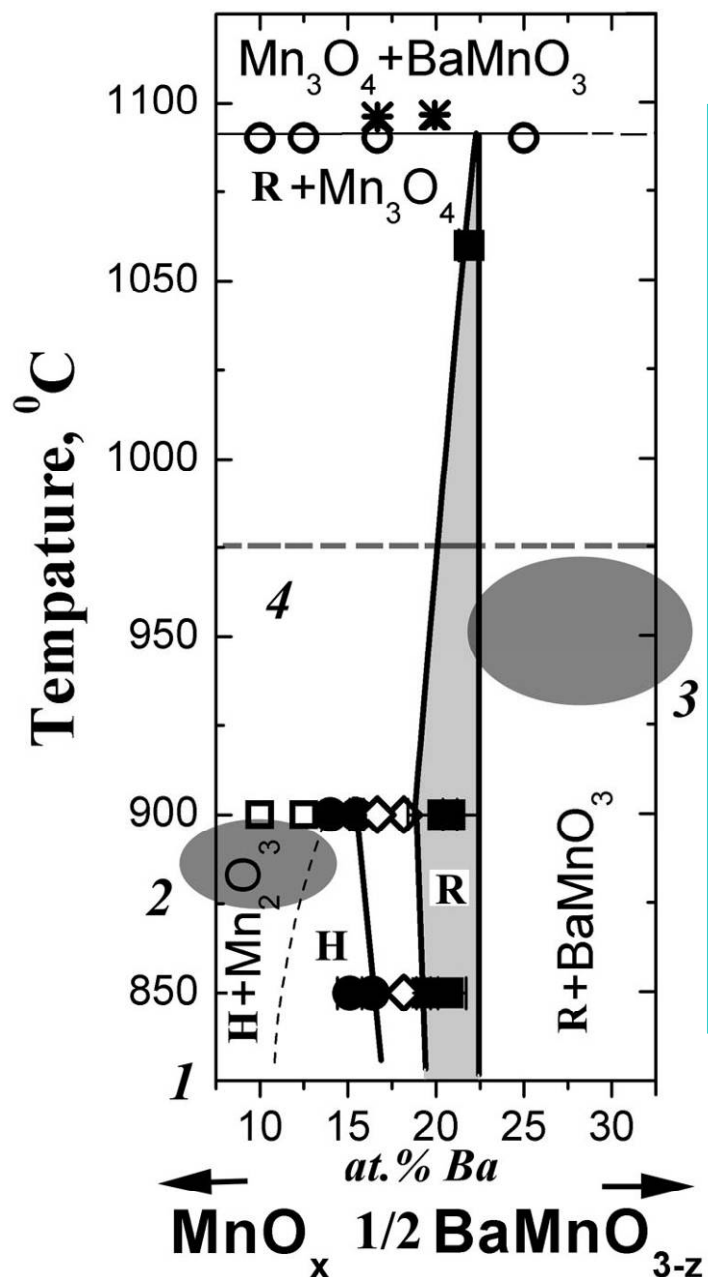
Катализ



Молекулярные сита, сорбенты

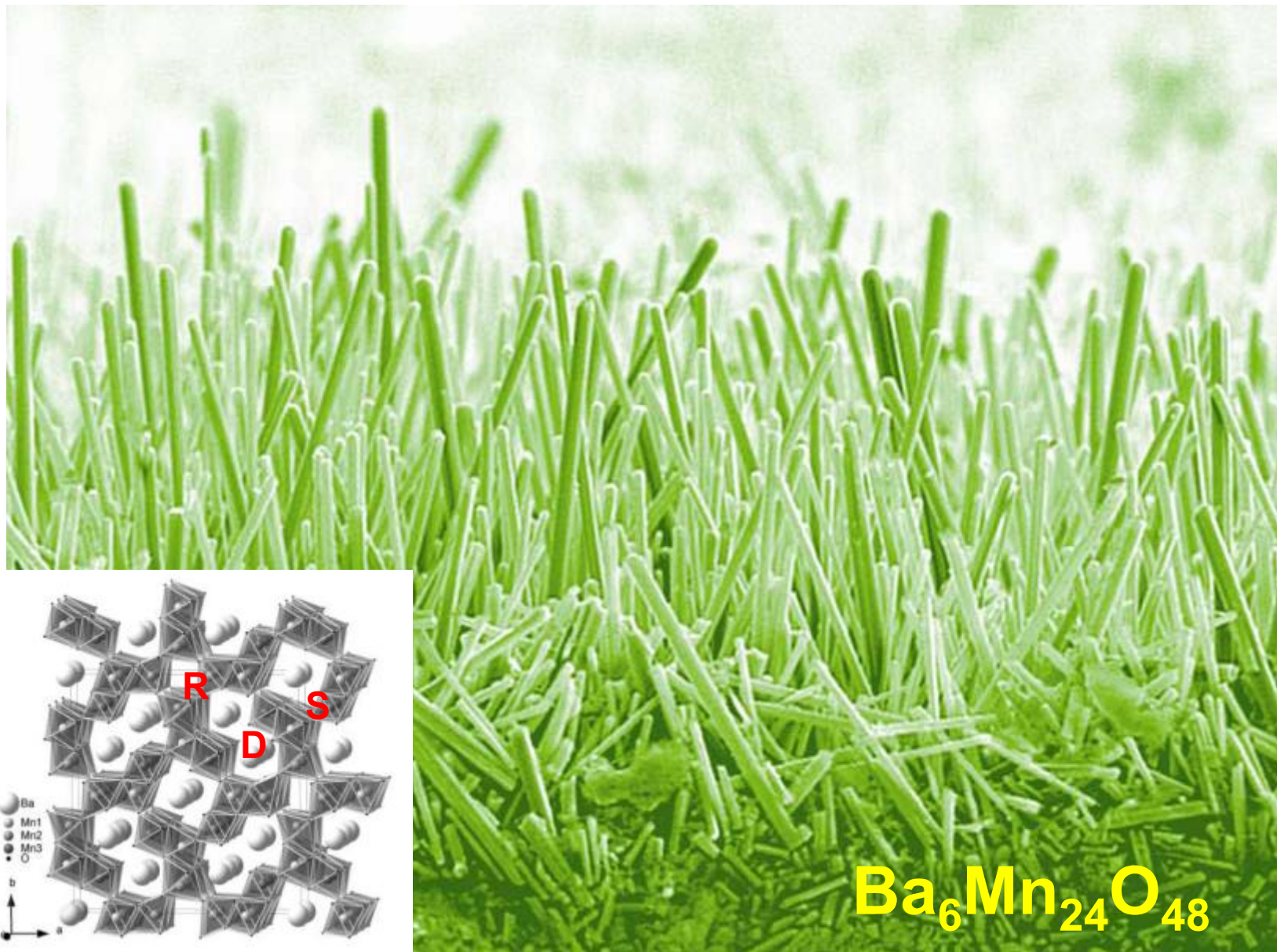


Рост вискеров

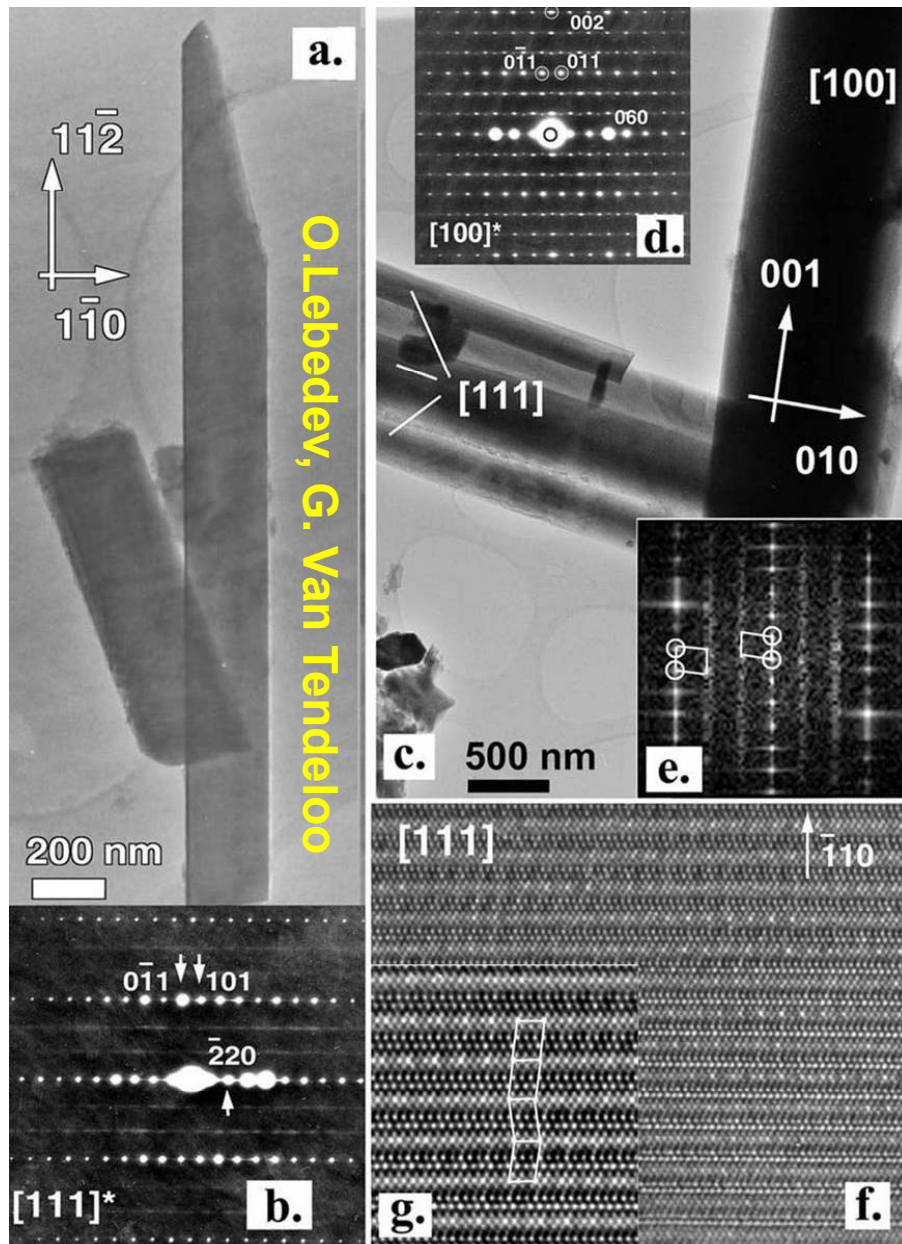


KCl (флюс)
 BaMn_4O_8 - BaMnO_3 (таблетированный)
 $p\text{O}_2 = 0.21$ атм. + нас. пар KCl
 $T = \text{const} = 850\text{-}950^{\circ}\text{C}$

Манганитные вискеры



Направление роста

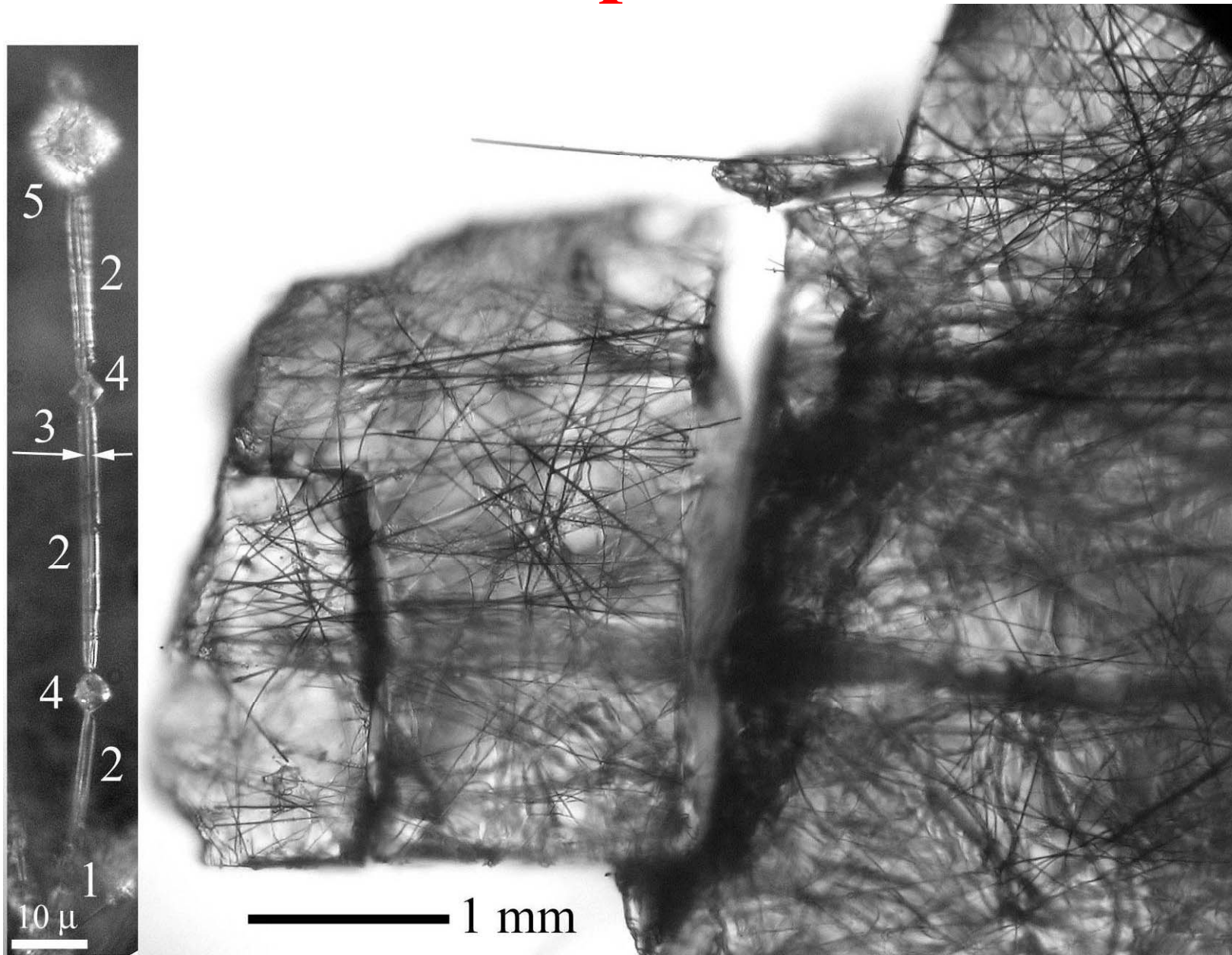


O. Lebedev, G. Van Tendeloo

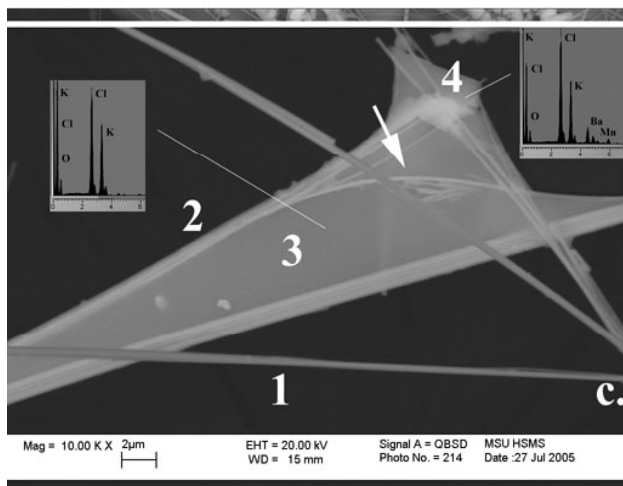
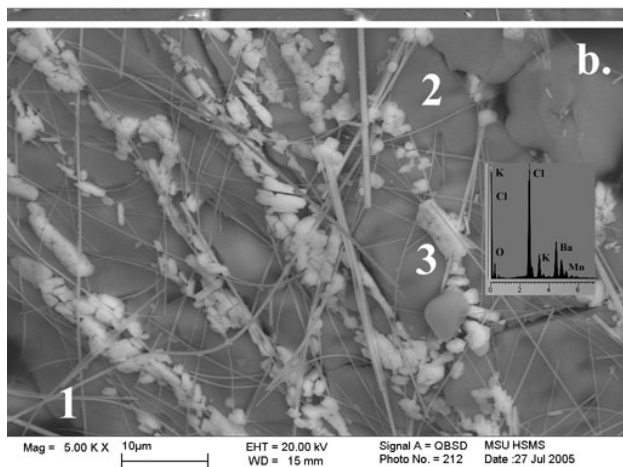
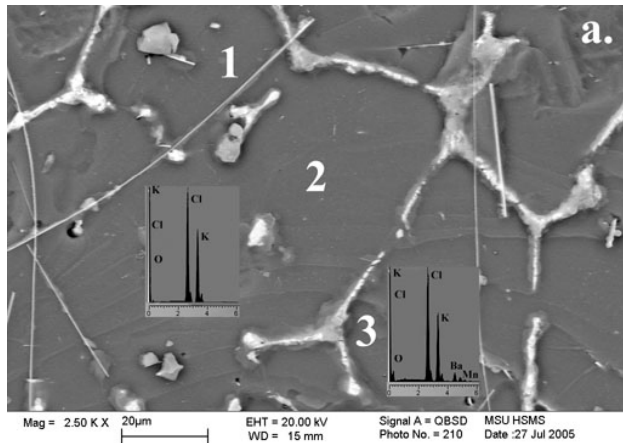


Стадия быстрого роста (нормальный рост)
Стадия утолщения (послойный рост)

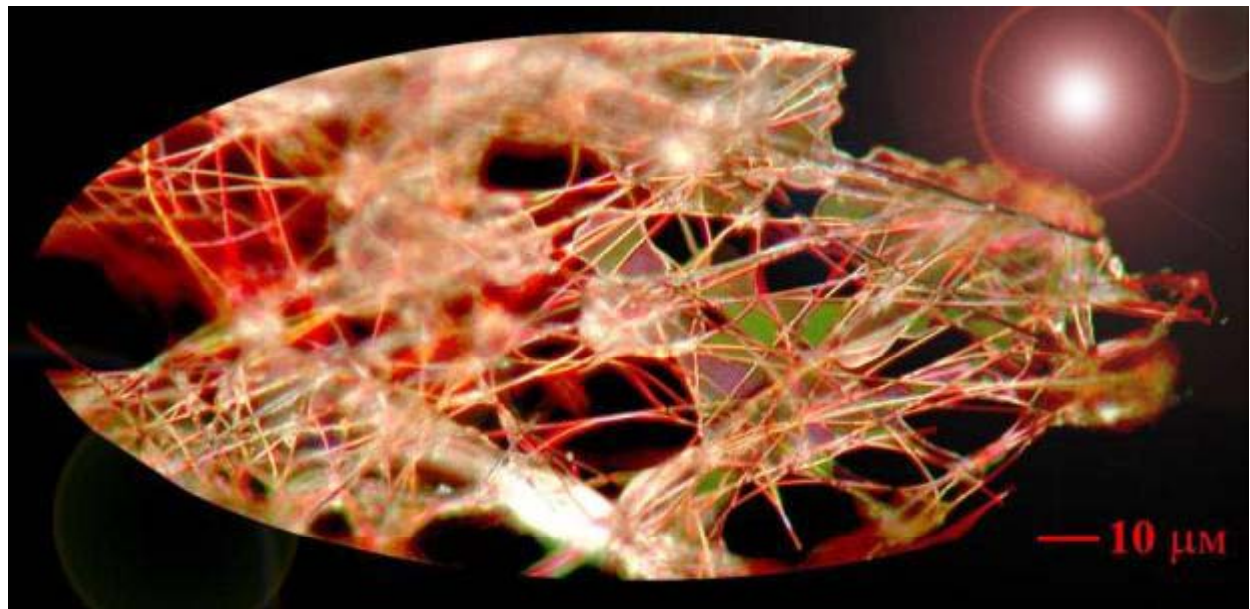
Рост в поверхностном слое



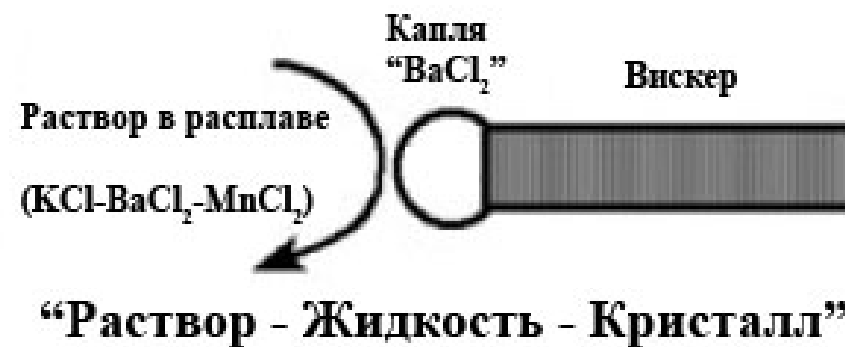
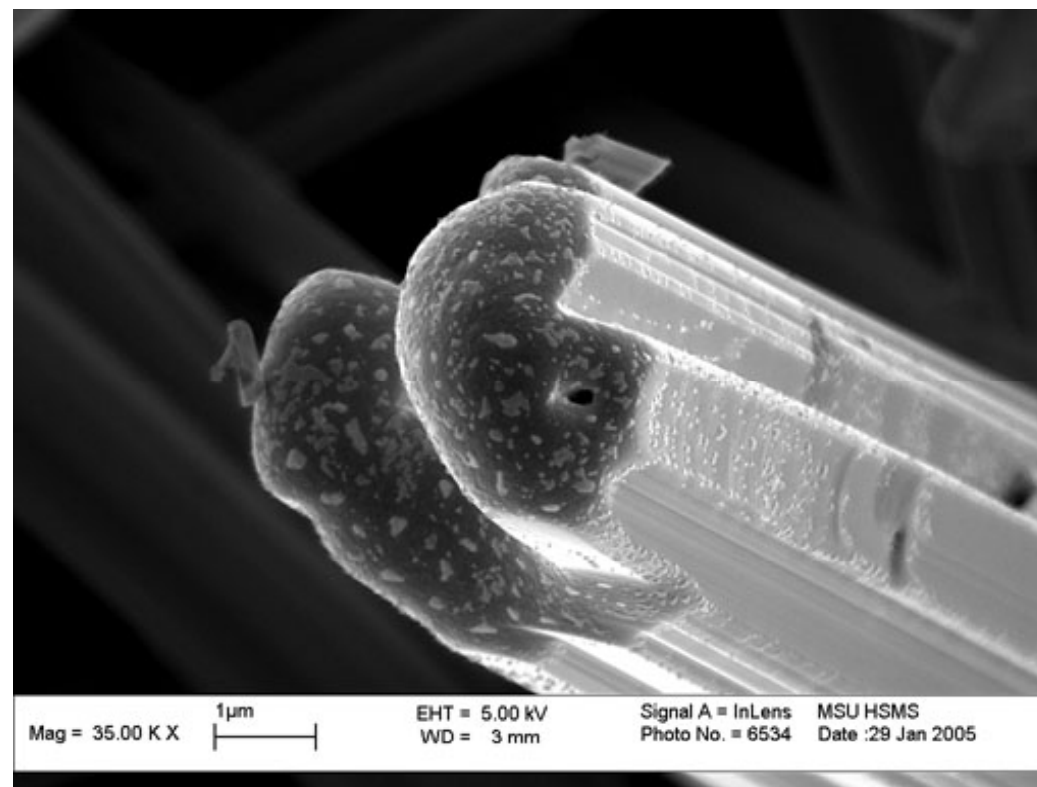
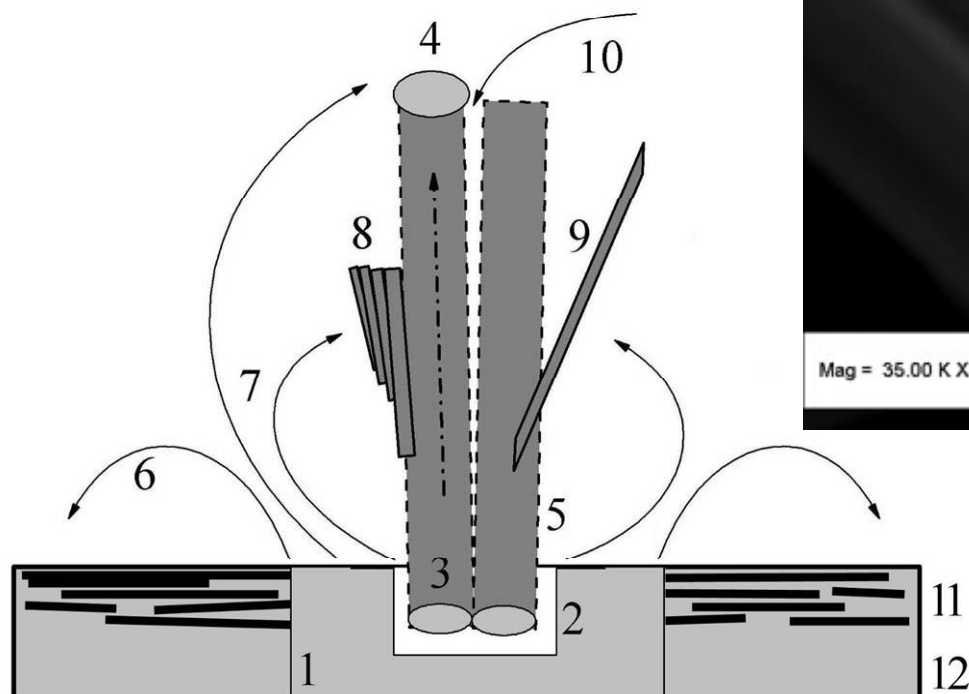
Анализ состава флюса



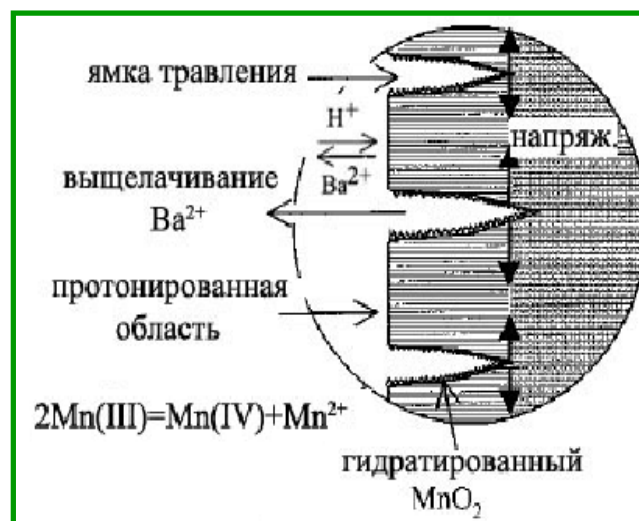
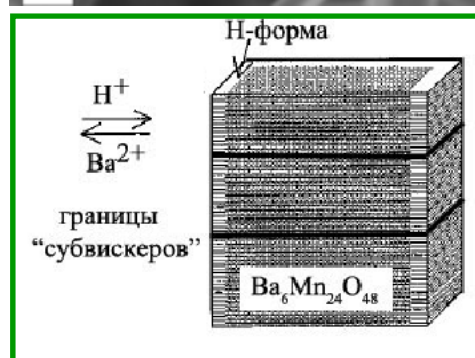
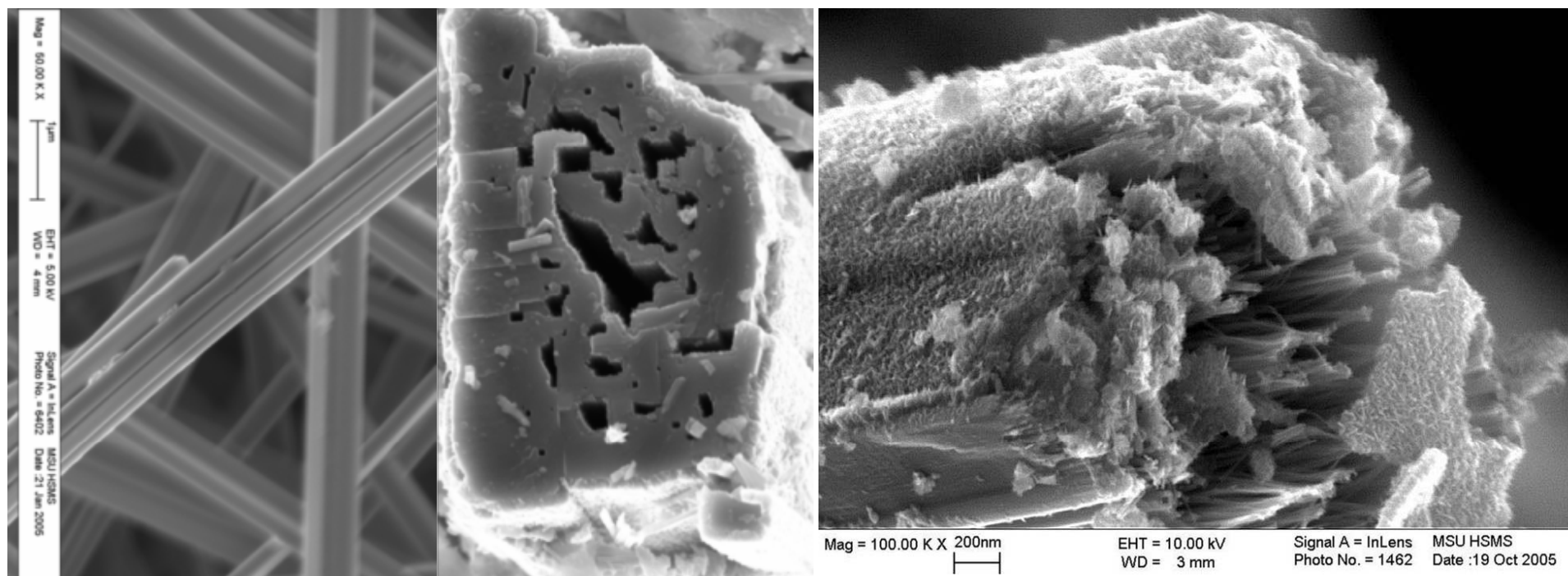
(а). объем расплава. 1 – вискер $\text{Ba}_6\text{Mn}_{24}\text{O}_{48}$, 2 - кристаллиты KCl (1.4(5) ат% O, 51.3(4) ат% Cl, 46.4(3) ат% K, 0 ат% Mn, 0.1(3) ат% Ba), 3 – границы зерен флюса, обогащенные Ba (2.3(4) ат% O, 50(3) ат% Cl, 36.8(2) ат% K, 0 ат% Mn, 6.1(5) ат% Ba), (б). поверхность расплава около растущих вискеров, 1- вискеры, 2 – свободный от вискеров расплав (K:Mn:Ba = 95: 3 : 2), 3 – Ba-содержащие кристаллиты, концентрирующиеся около вискеров (K:Mn:Ba = 35 : 3 : 62), (с). тонкий слой затвердевшего расплава внутри «петли» из вискеров, 1 – вискер без расплава, 2 – вискеры, составляющие петлю, 3 – пленка затвердевшего расплава (K:Mn:Ba = 95 : 3 : 2), 4 – небольшой кристалл около пересечения вискеров (K:Mn:Ba = 68 : 11 : 21).



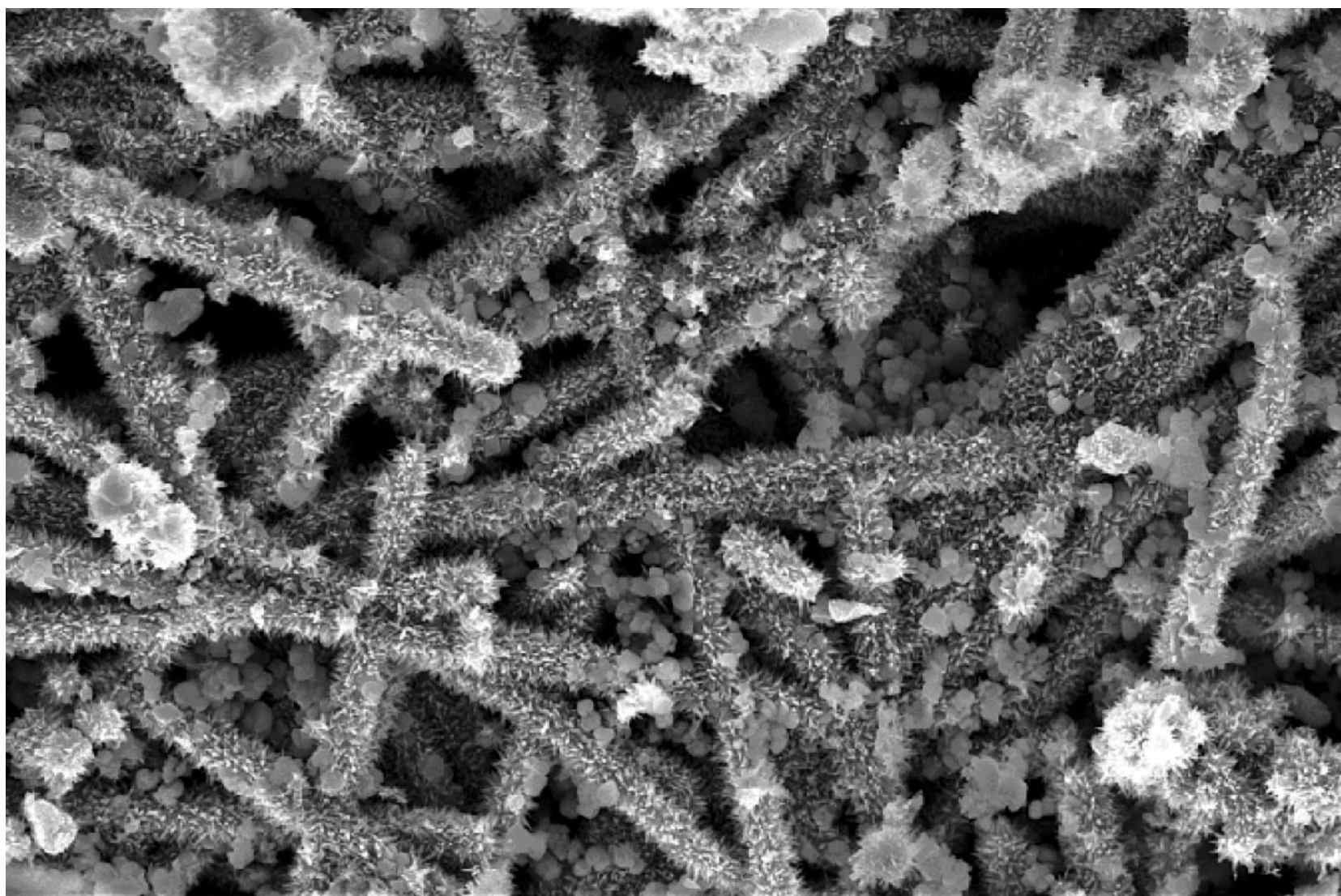
Возможный механизм роста



Протонирование вискеров



Наноструктурированные вискеры



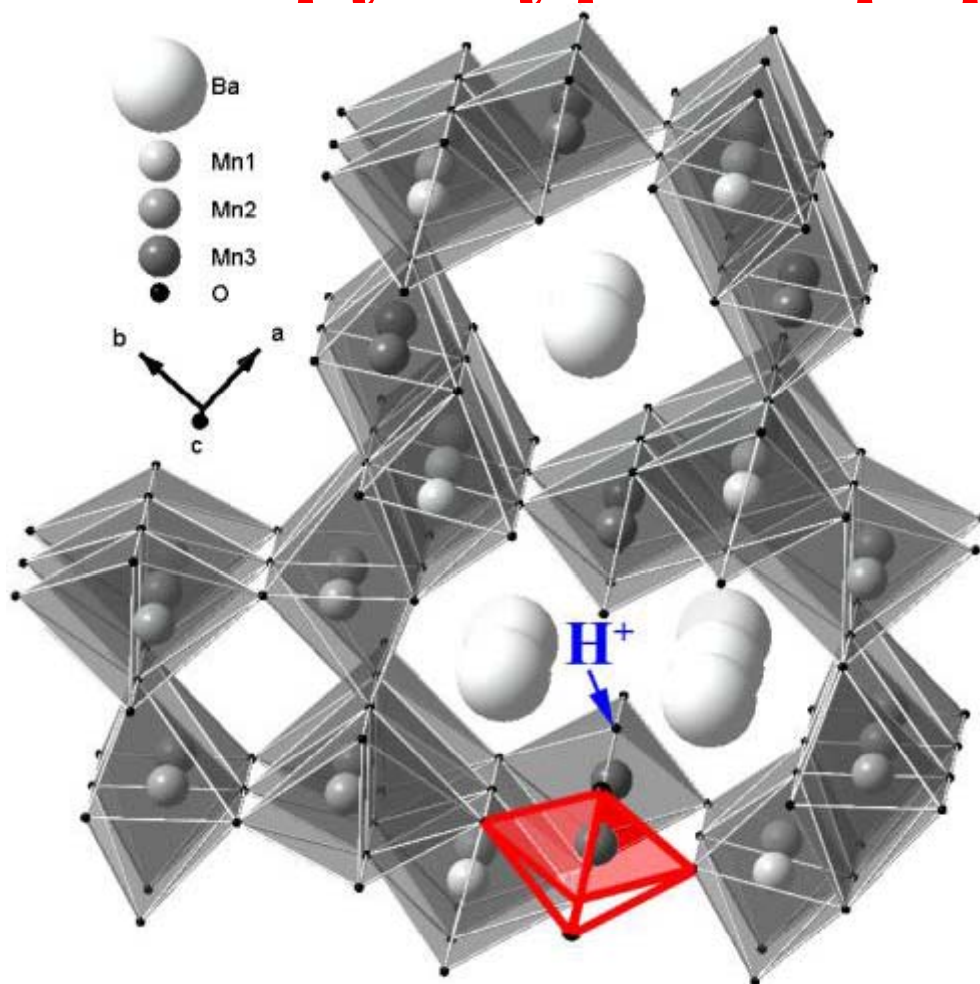
Mag = 15.00 K X 2µm
|-----|

EHT = 10.00 kV
WD = 3 mm

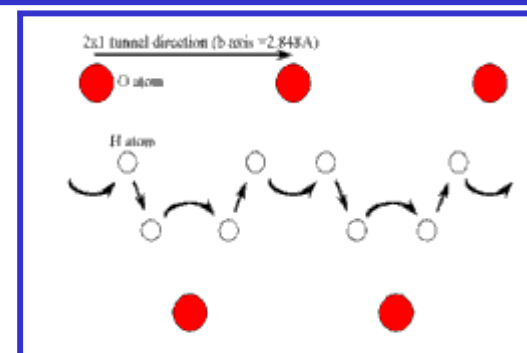
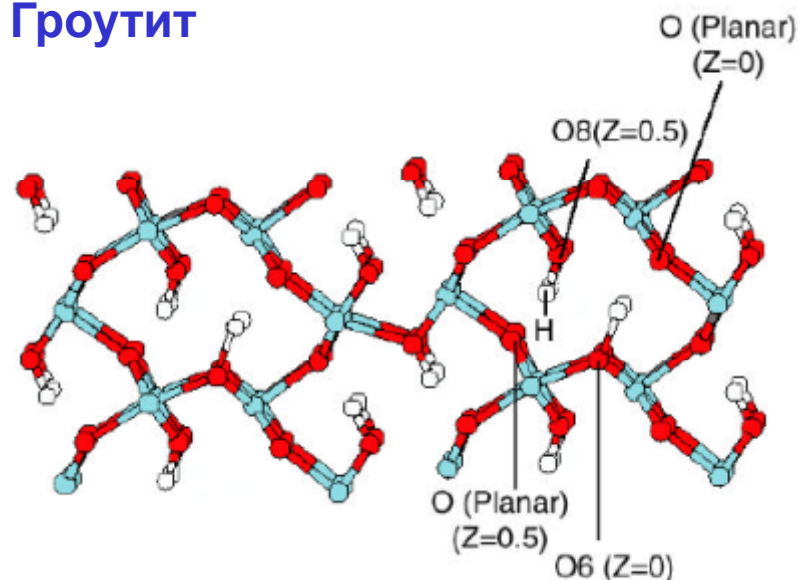
Signal A = InLens
Photo No. = 1561

MSU HSMS
Date :22 Oct 2005

Структура Н-формы (предполагаемая)

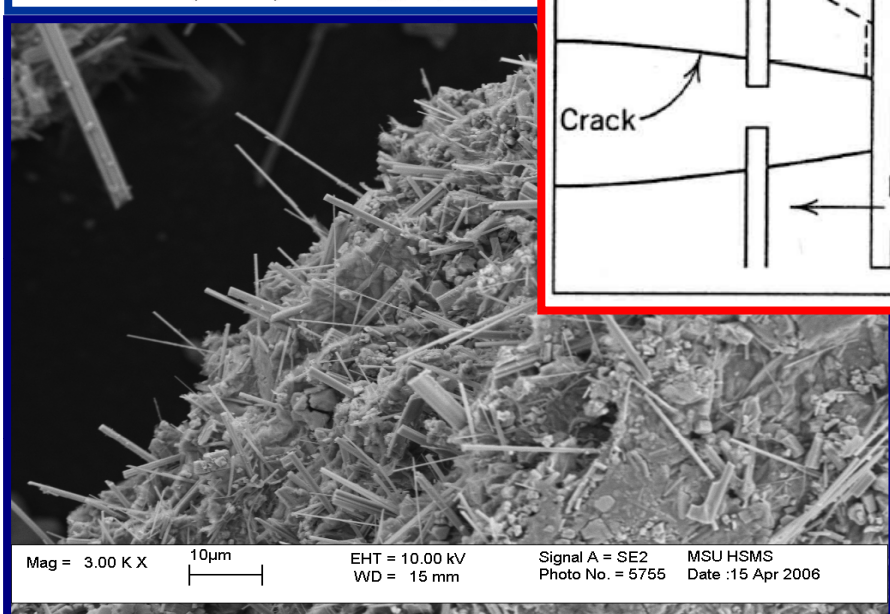
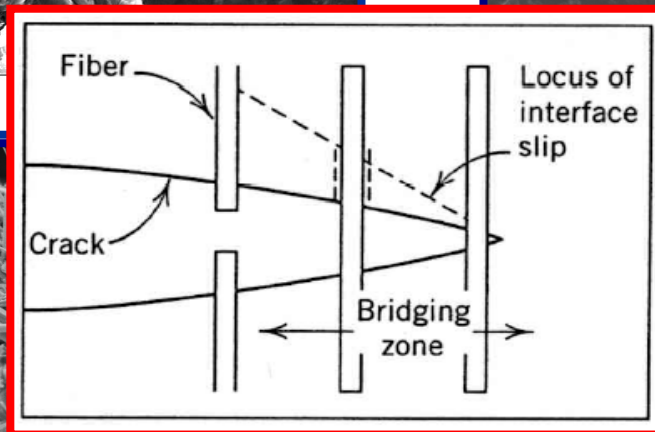
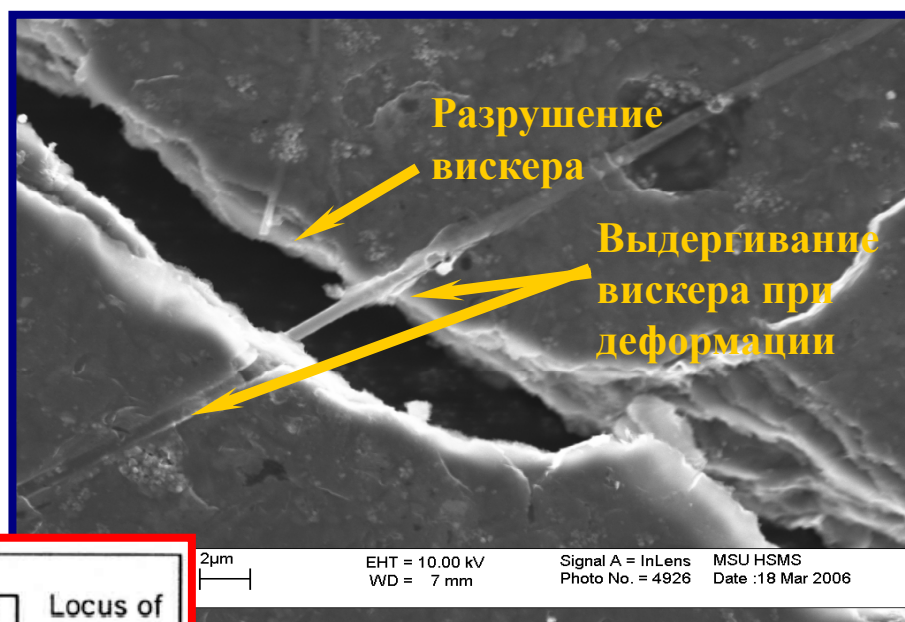
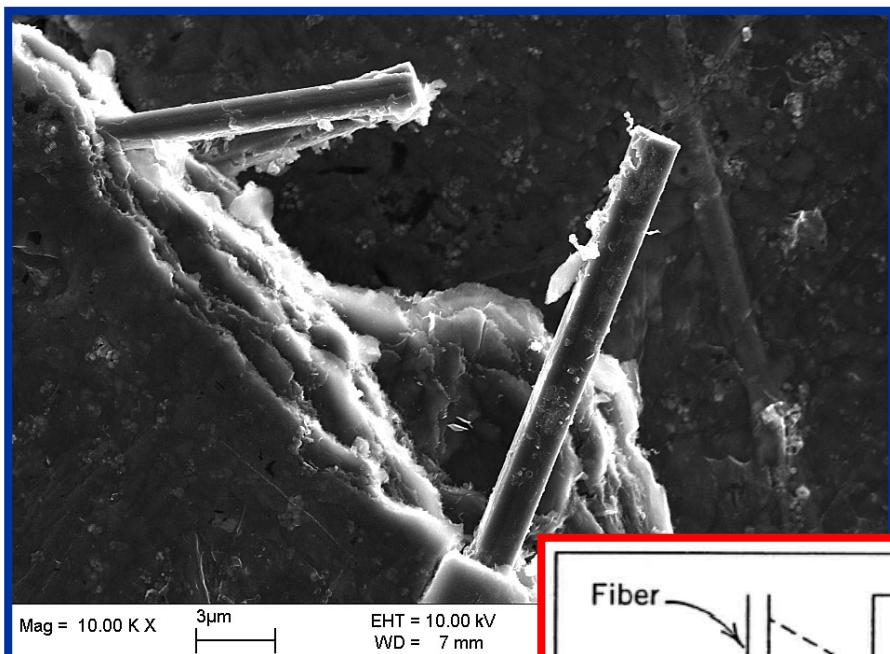


Гроутит

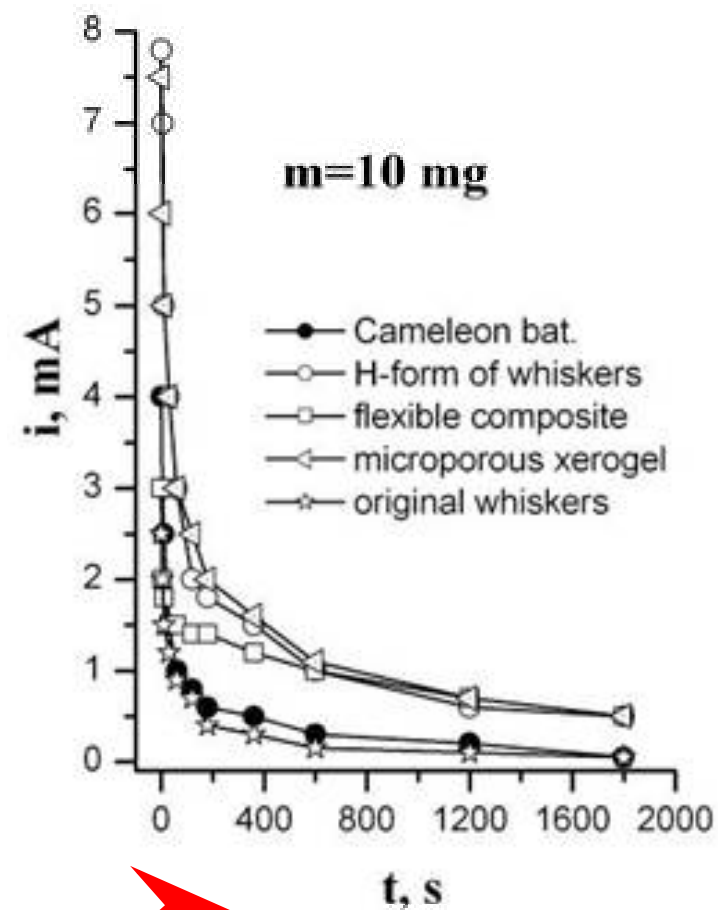
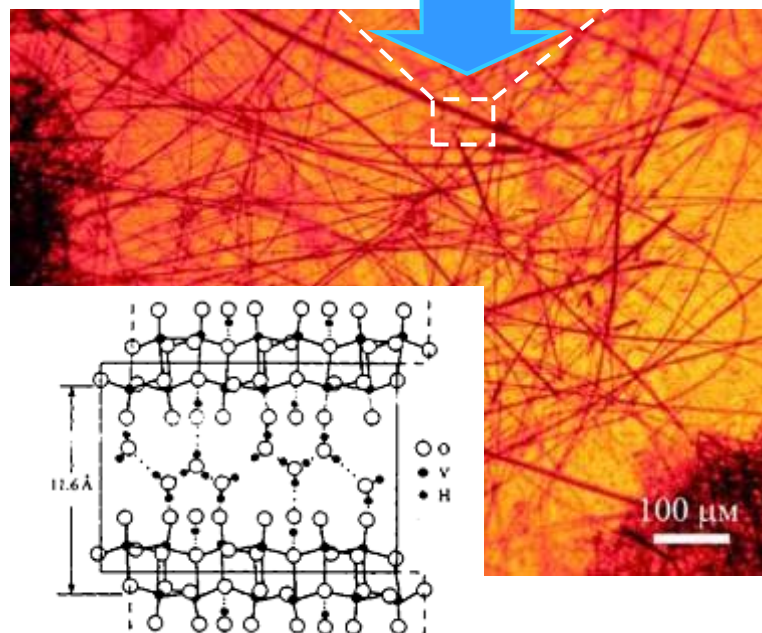
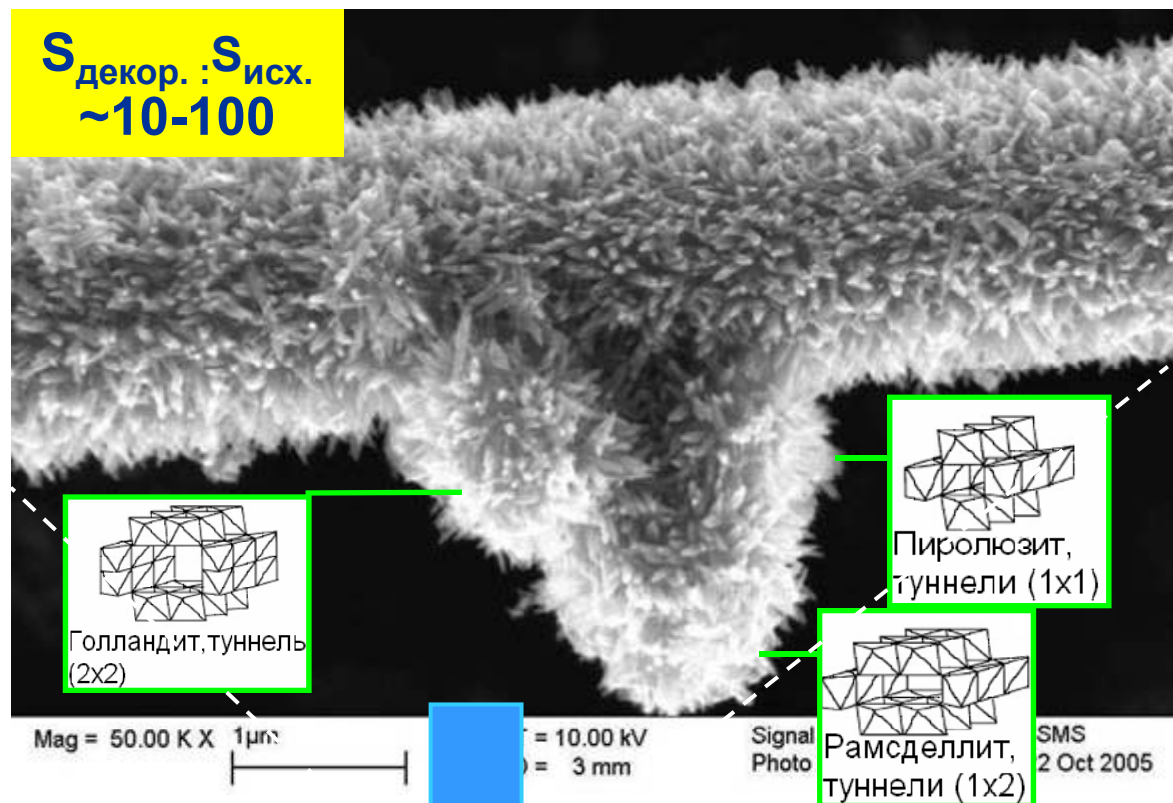


$$\text{Ba}_6\text{Mn}_{24}\text{O}_{48} + 18\text{H}^+ = (\text{Ba}_3\Diamond_3)\{\text{Mn}_{18}\nabla_6\}[\text{O}_{36}\square_6(\text{OH})_6] + 3\text{Ba}^{2+} + 6\text{Mn}^{2+} + 6\text{H}_2\text{O}$$
 где \Diamond - незанятые позиции в подрешетке Ba, образовавшиеся в результате ионного обмена (протонирования), ∇ - дефекты (вакансии) в подрешетке марганца, $\square(\text{OH})$ – вакансия в кислородной подрешетке, взаимодействующая с гидроксил – ионами, образовавшимися при протонировании октаэдров MnO_6 и диспропорционировании Mn(III) .

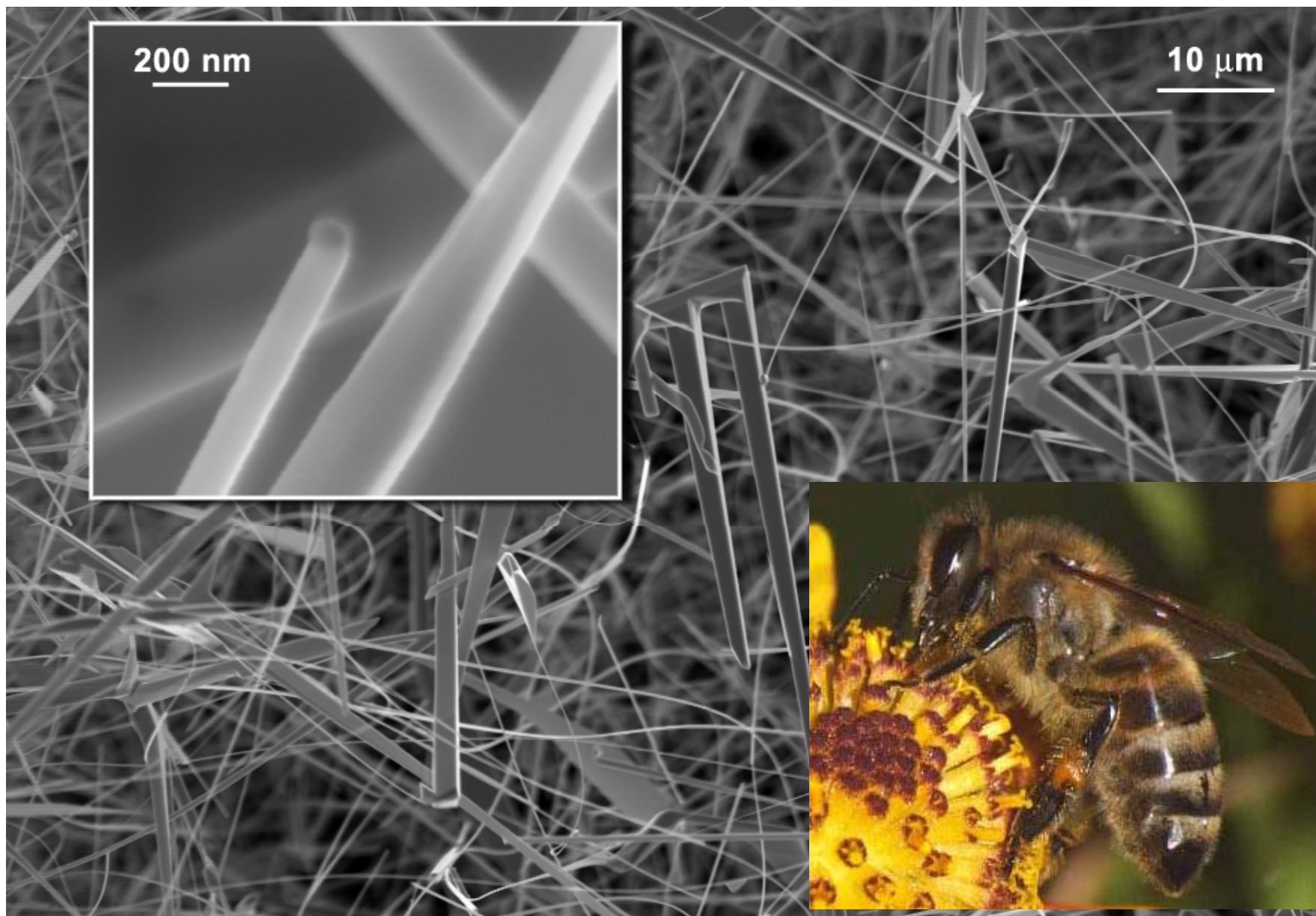
Микроструктура

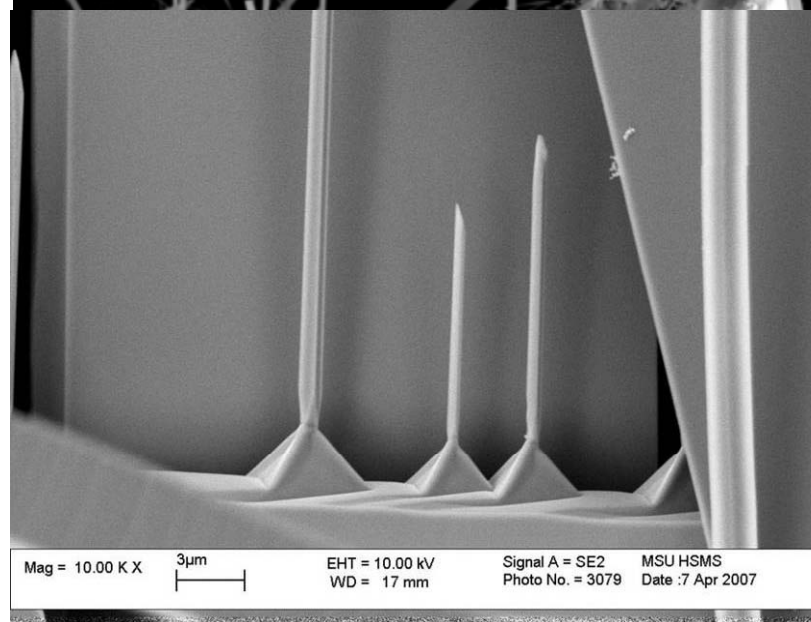
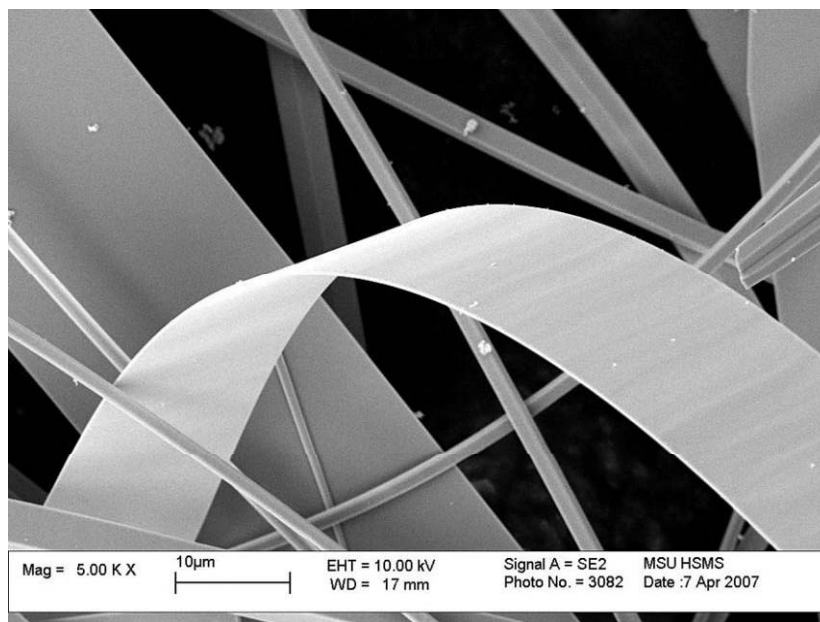
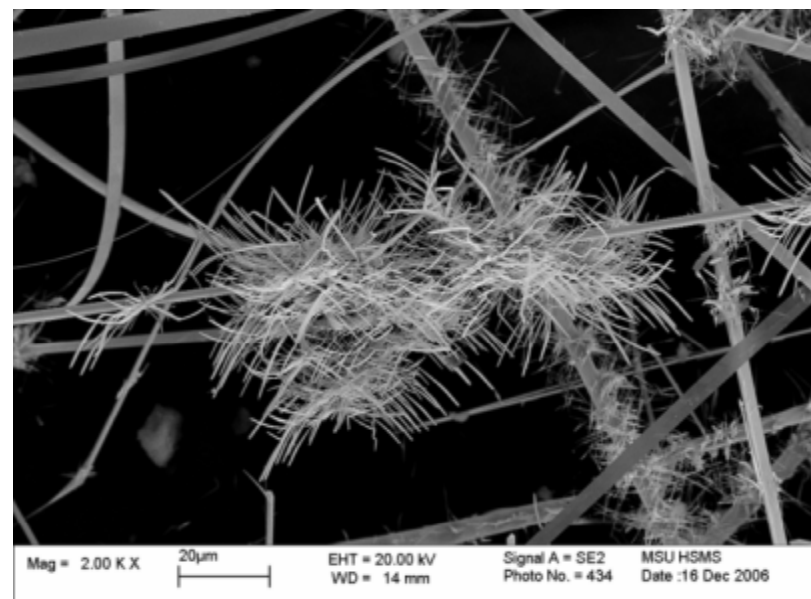
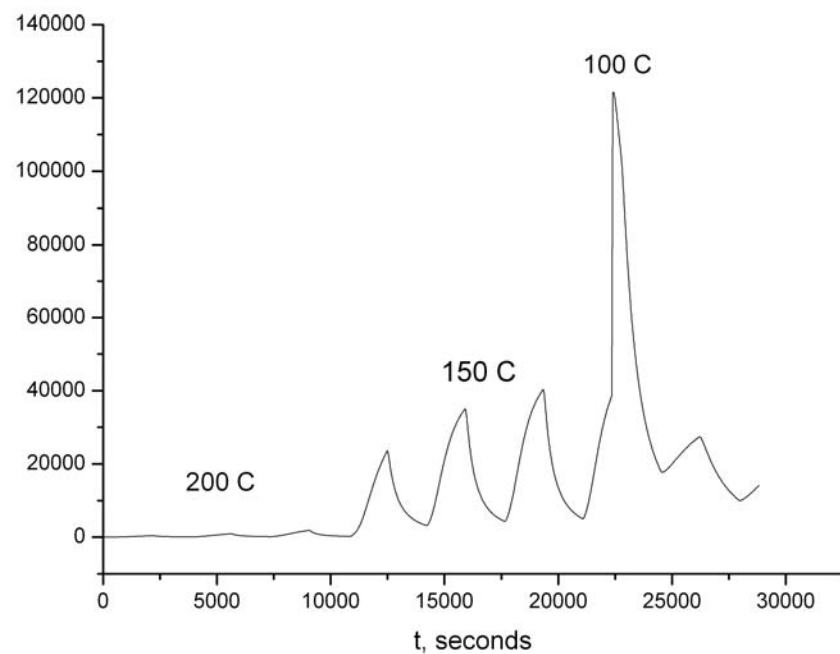


$S_{\text{декор.}} : S_{\text{исх.}}$
~10-100



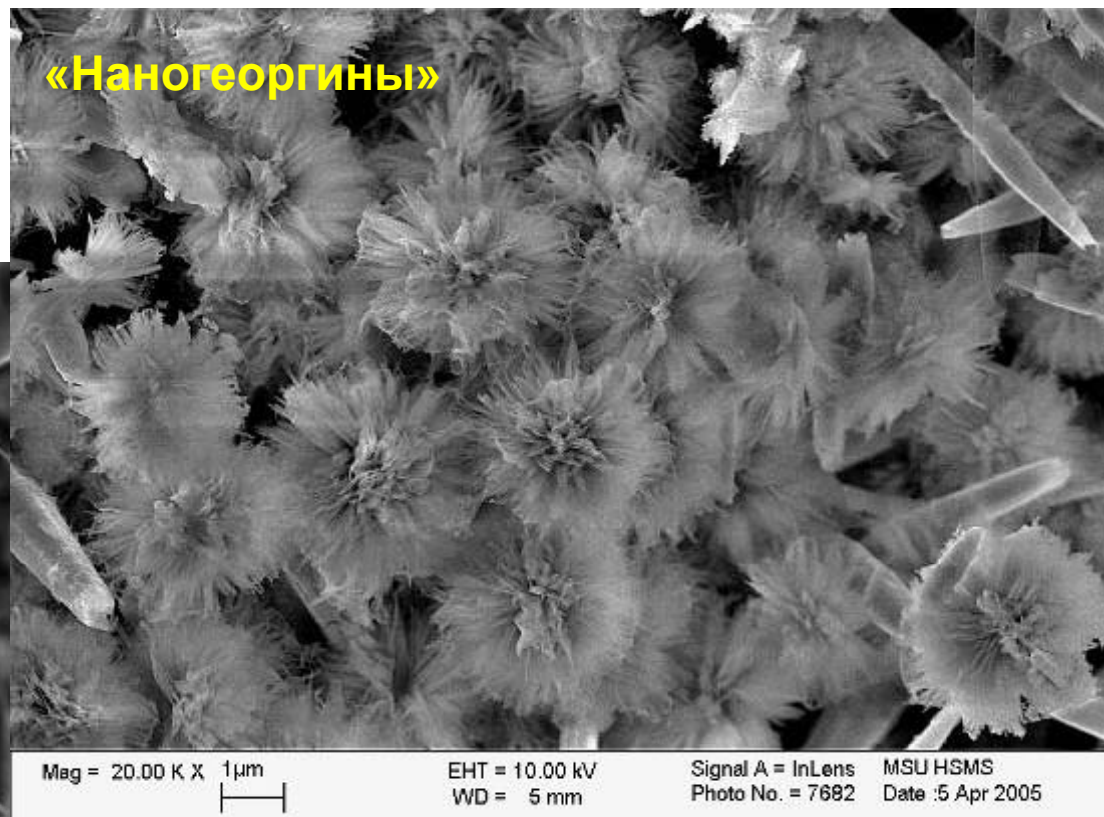
Химический сенсор SnO_2



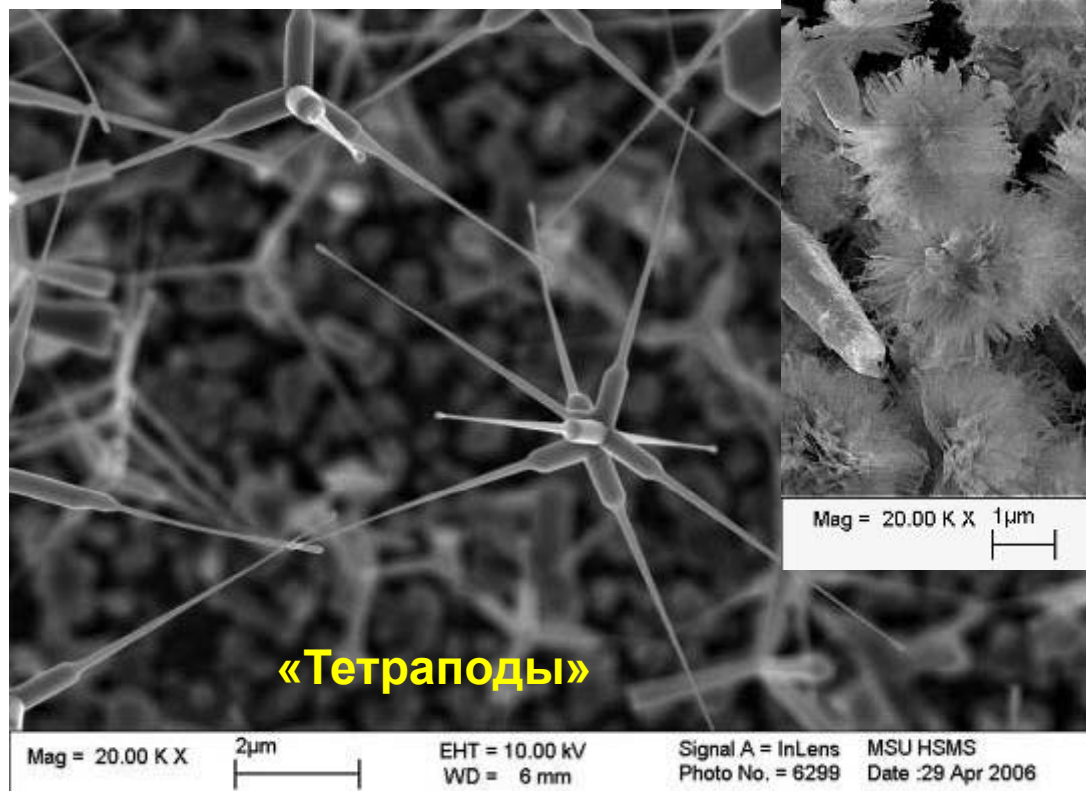


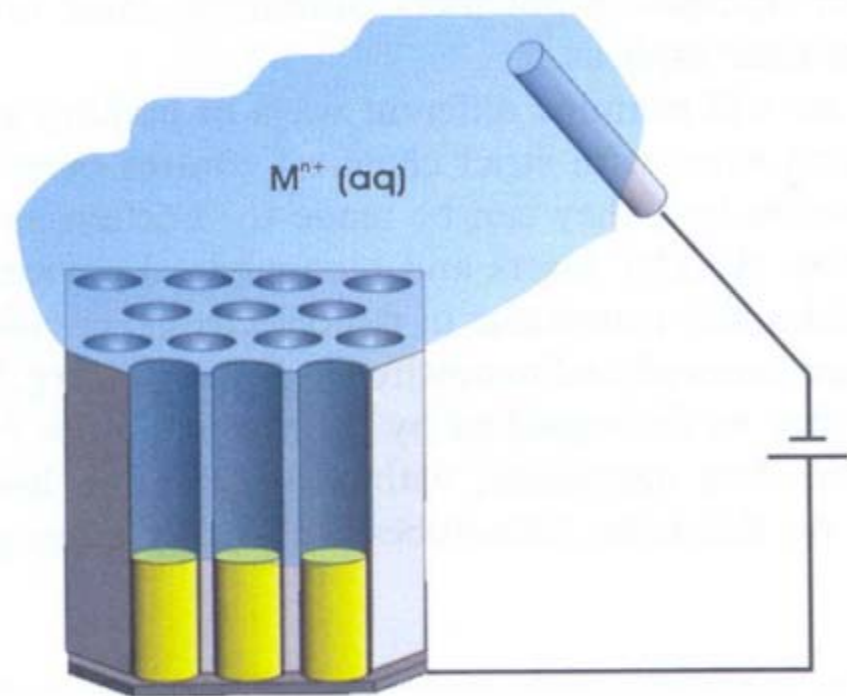
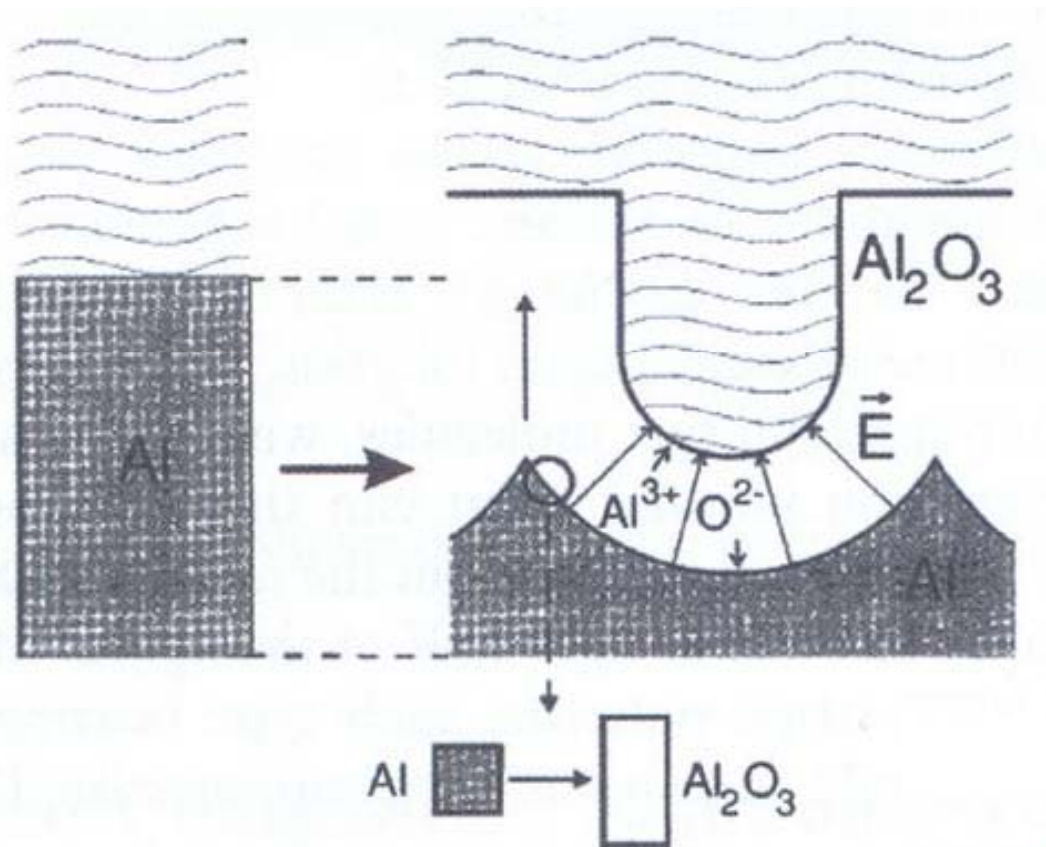
ZnO

«Наногеоргины»

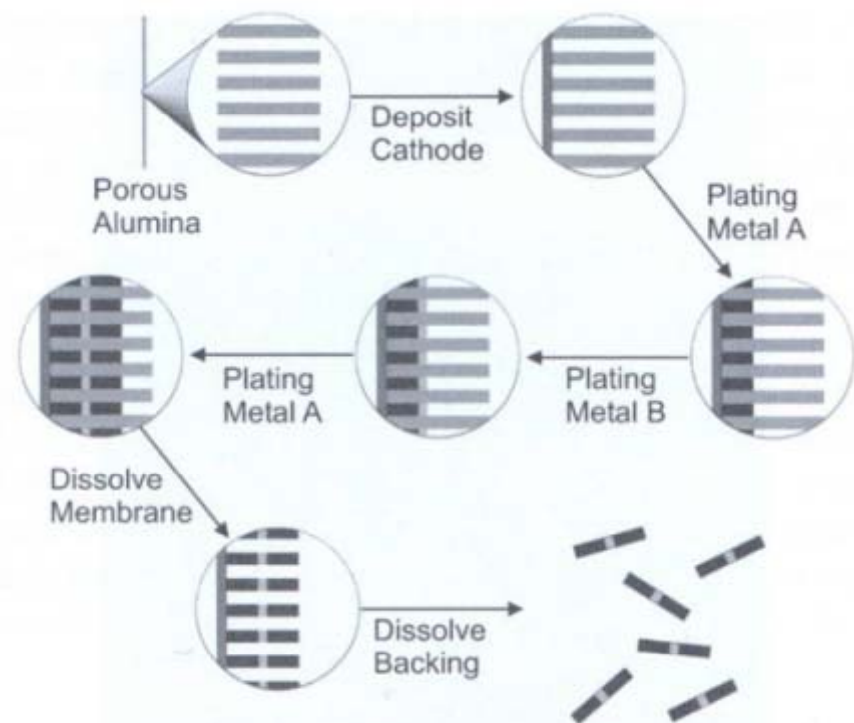
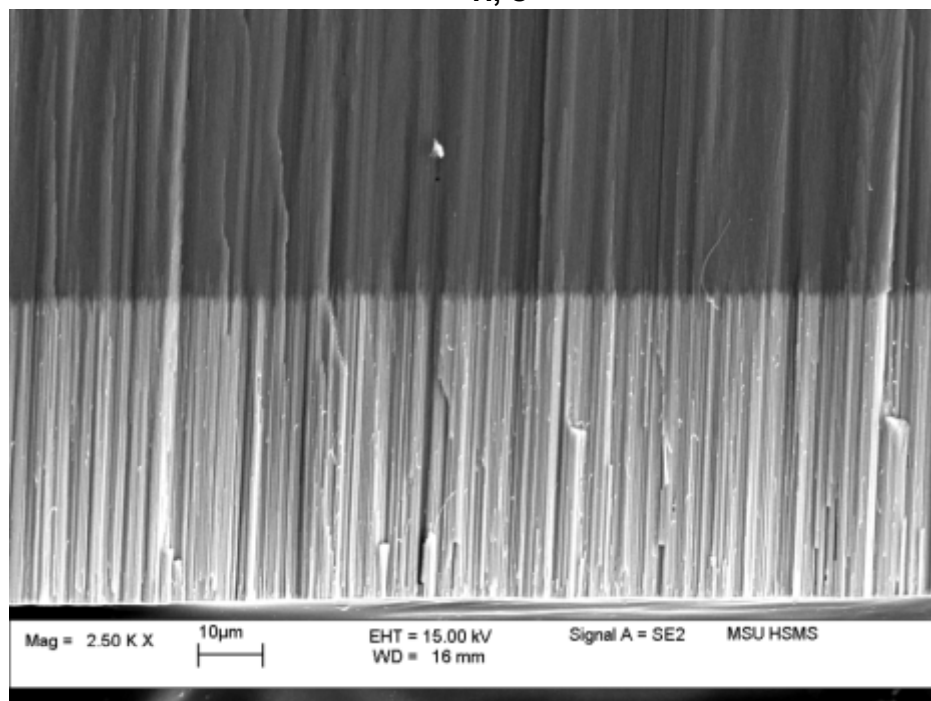
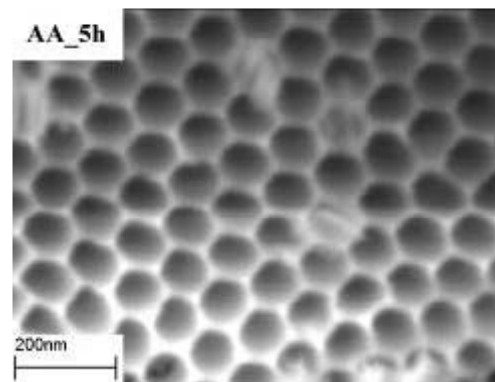
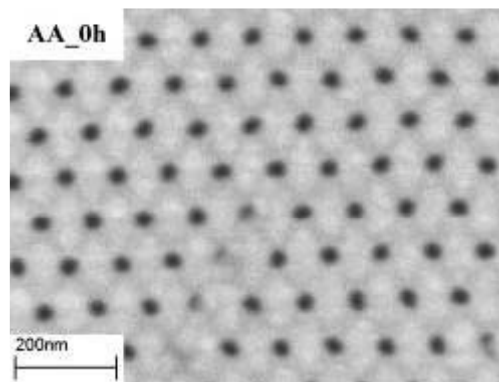
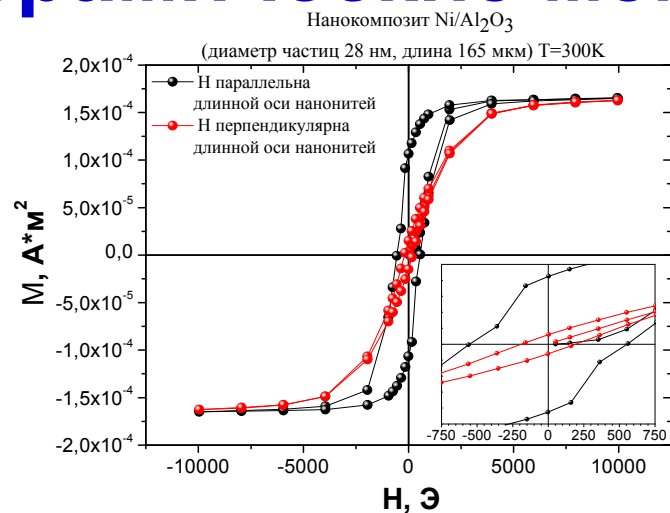


«Тетраподы»



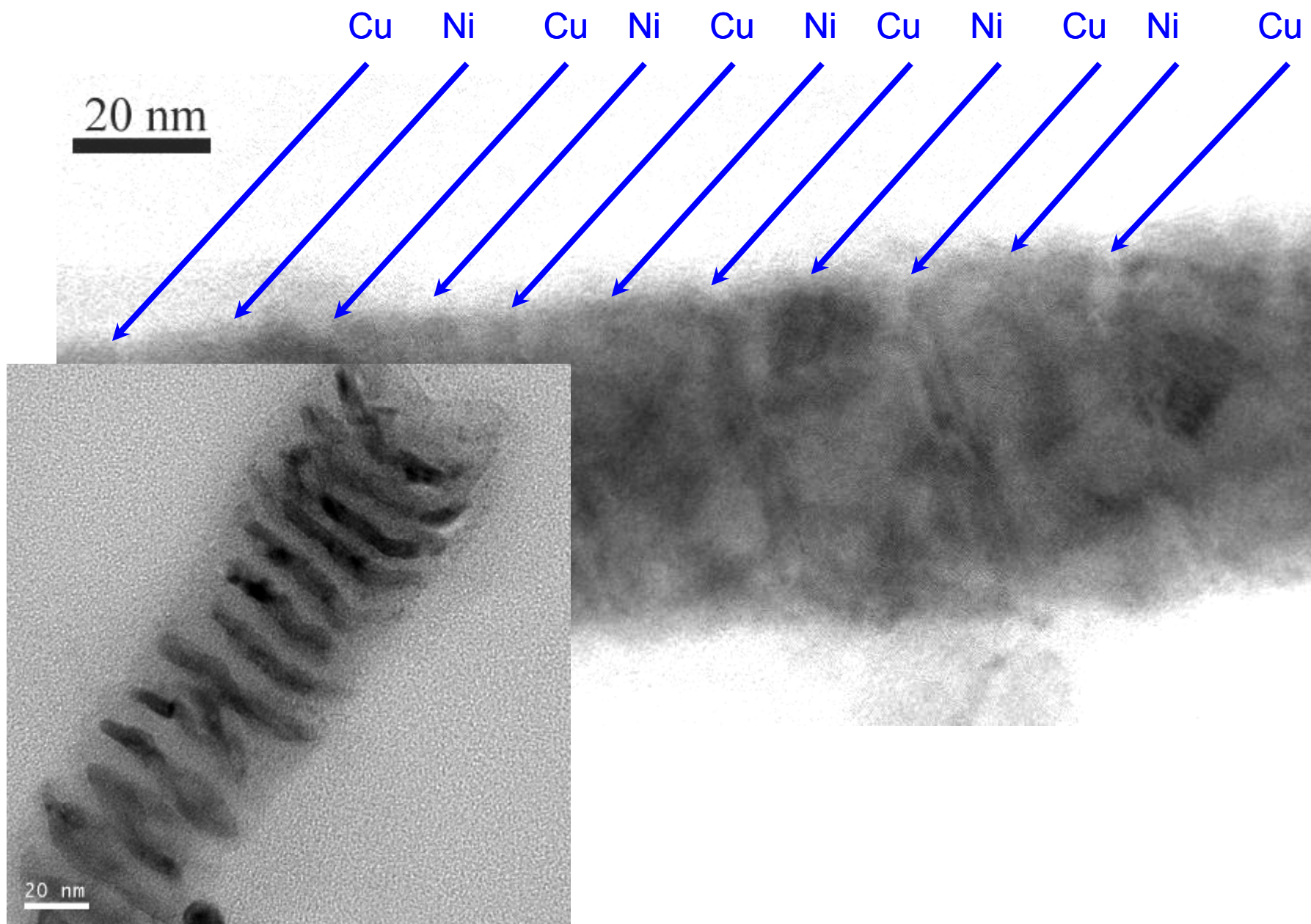


Керамические мембраны и нанокompозиты

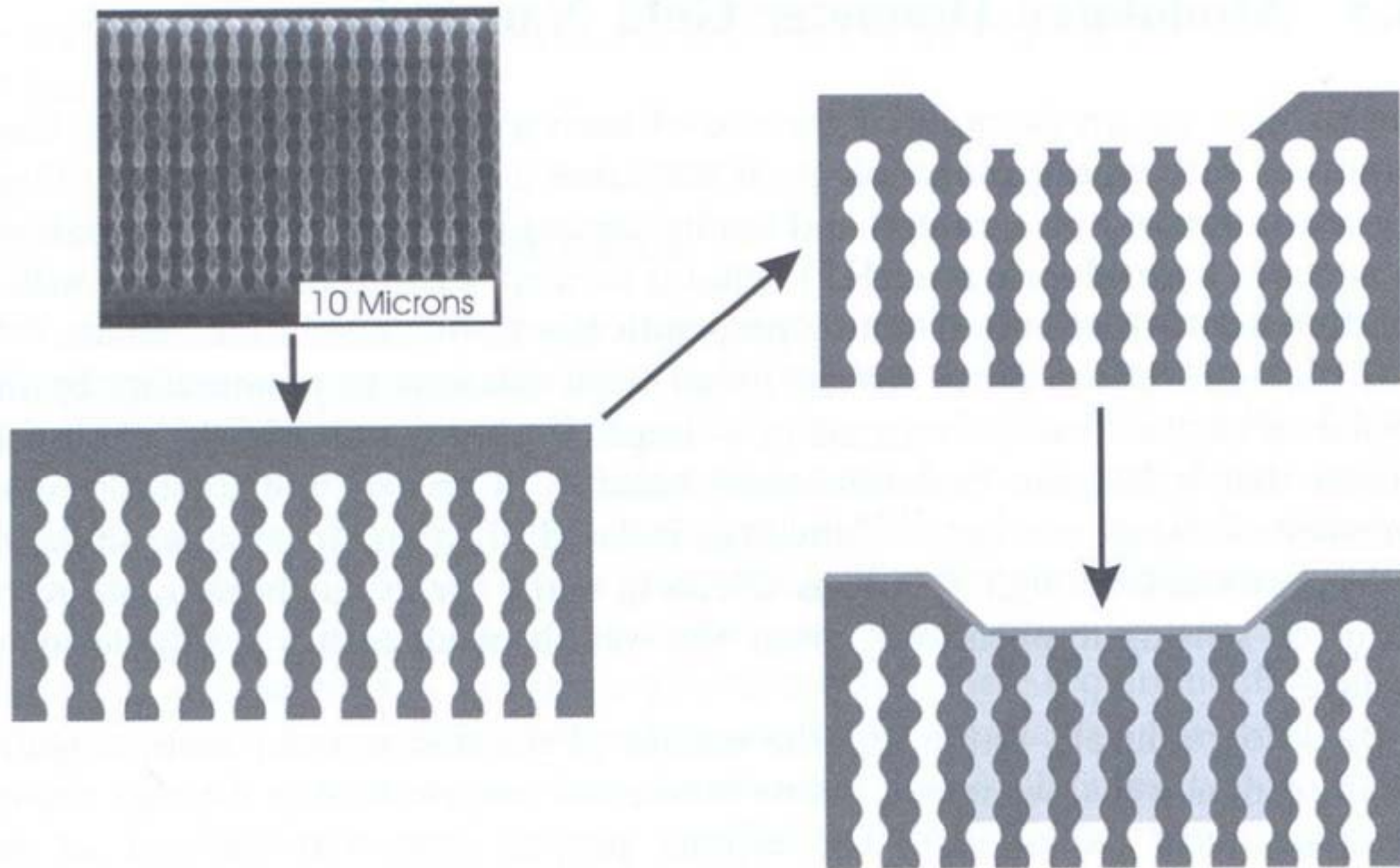


Synthesis of multi-metal rods by electrodeposition.

Композитная нанопроволока (Ni/Cu)

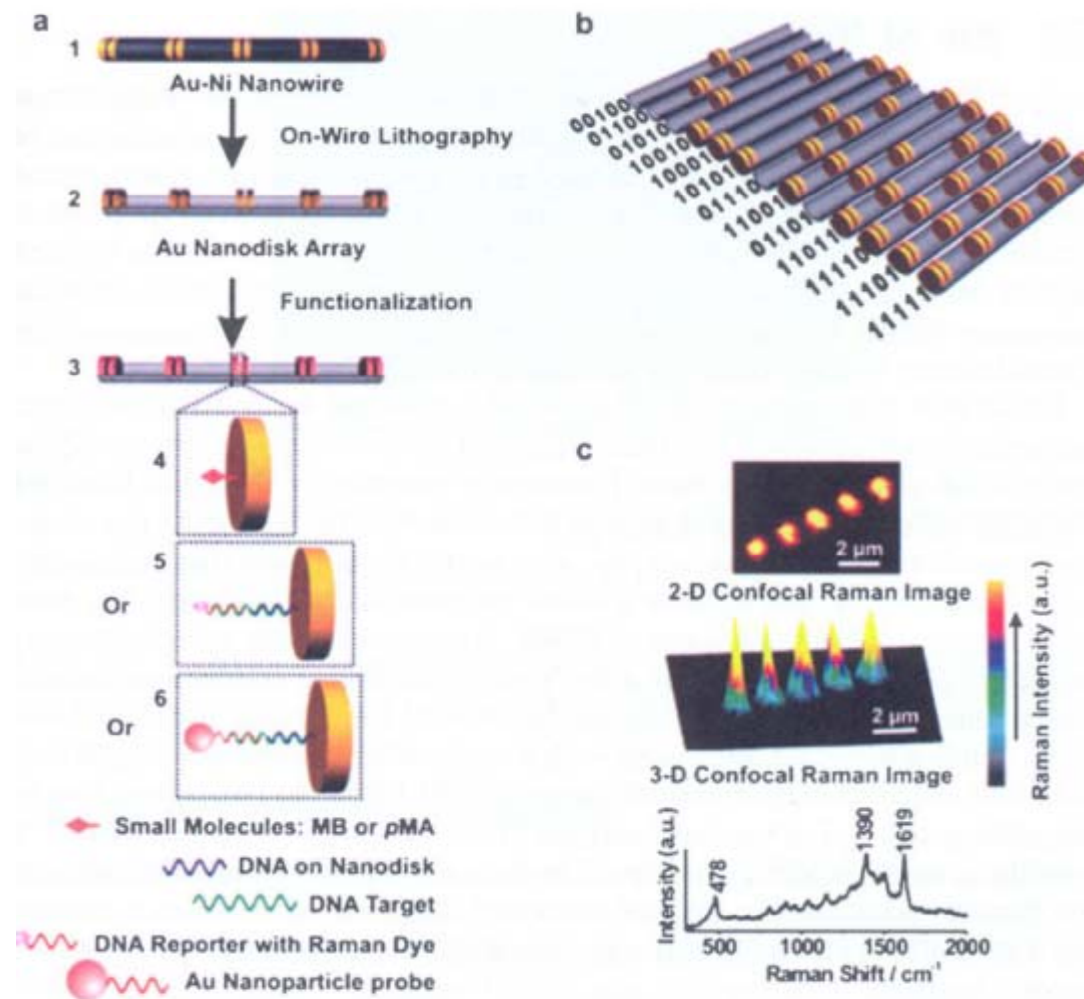


«Сосиски»



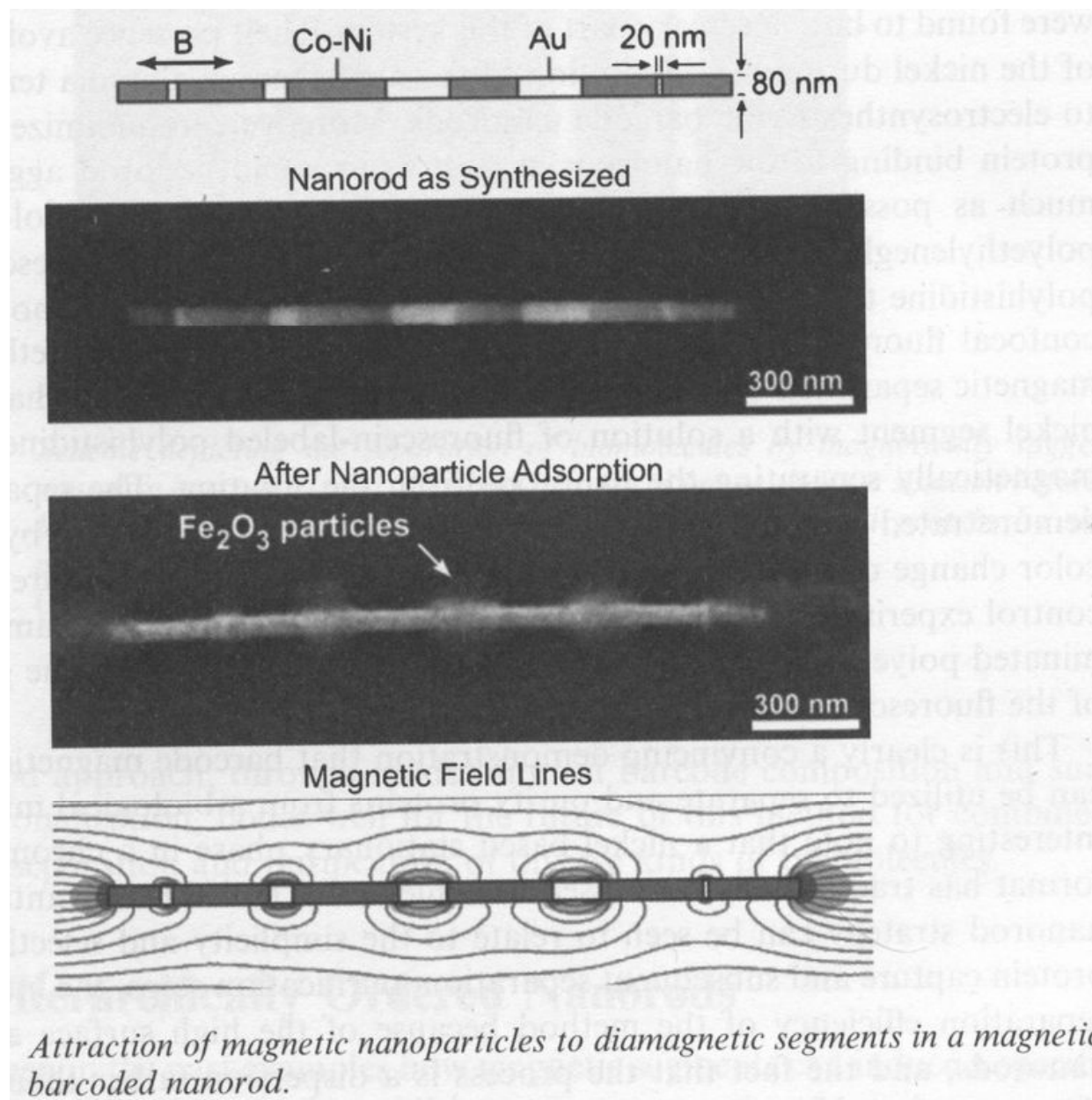
SEM of a modulated diameter pore in silicon formed by anodic oxidation with a sinusoidal current profile, top left, and the method used to replicate this membrane as modulated diameter metal rods.
(Reproduced with permission from Ref. 27)

Штрих-коды

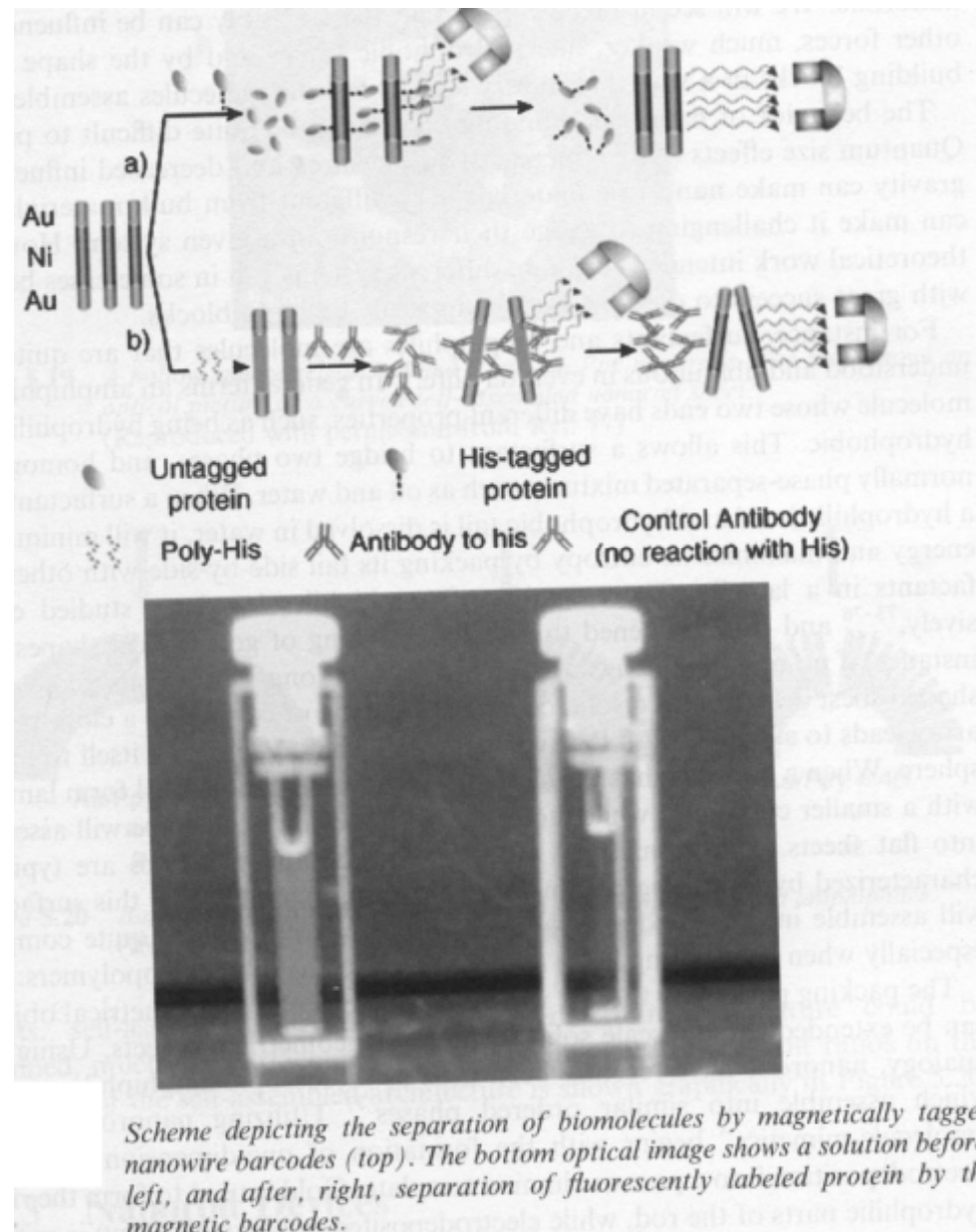


(a) On wire nanolithography (OWL) method for making nanodisk codes (1–3), and surface functionalization protocol for anchoring dye, (4) DNA (5) and gold nanoparticle probes (6) to the nanodisk pairs. (b) Binary codes for the thirteen distinct arrangements of nanodisk pairs in five nanorod site locations. (c) 2-D (top) and 3D (middle) confocal SERS micro-spectrum and normal SERS Raman spectrum of a 11111 nanodisk code recorded at hot spots between the nanodisk pairs.

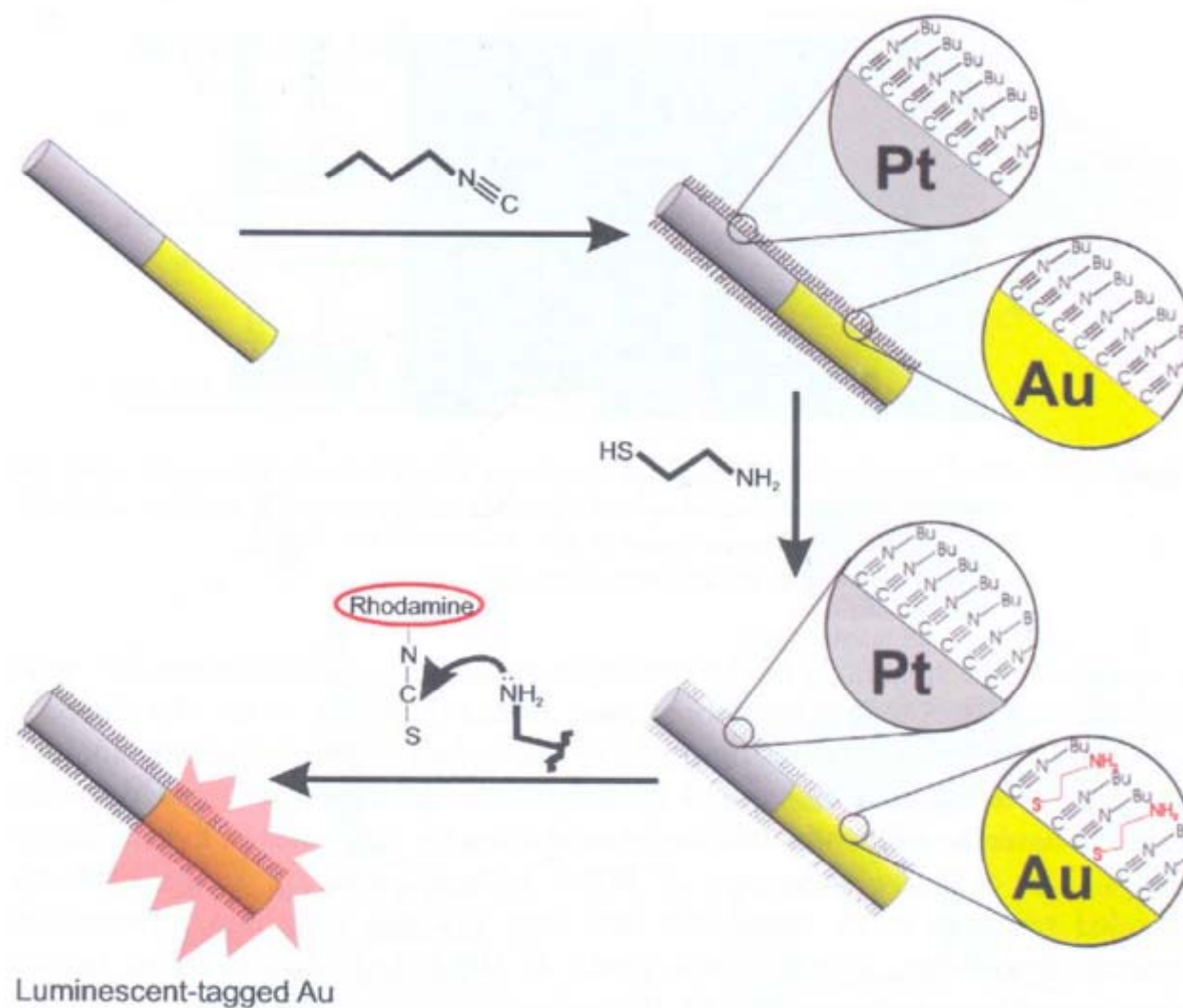
Магнитный «штрих-код»



Магнитная сепарация

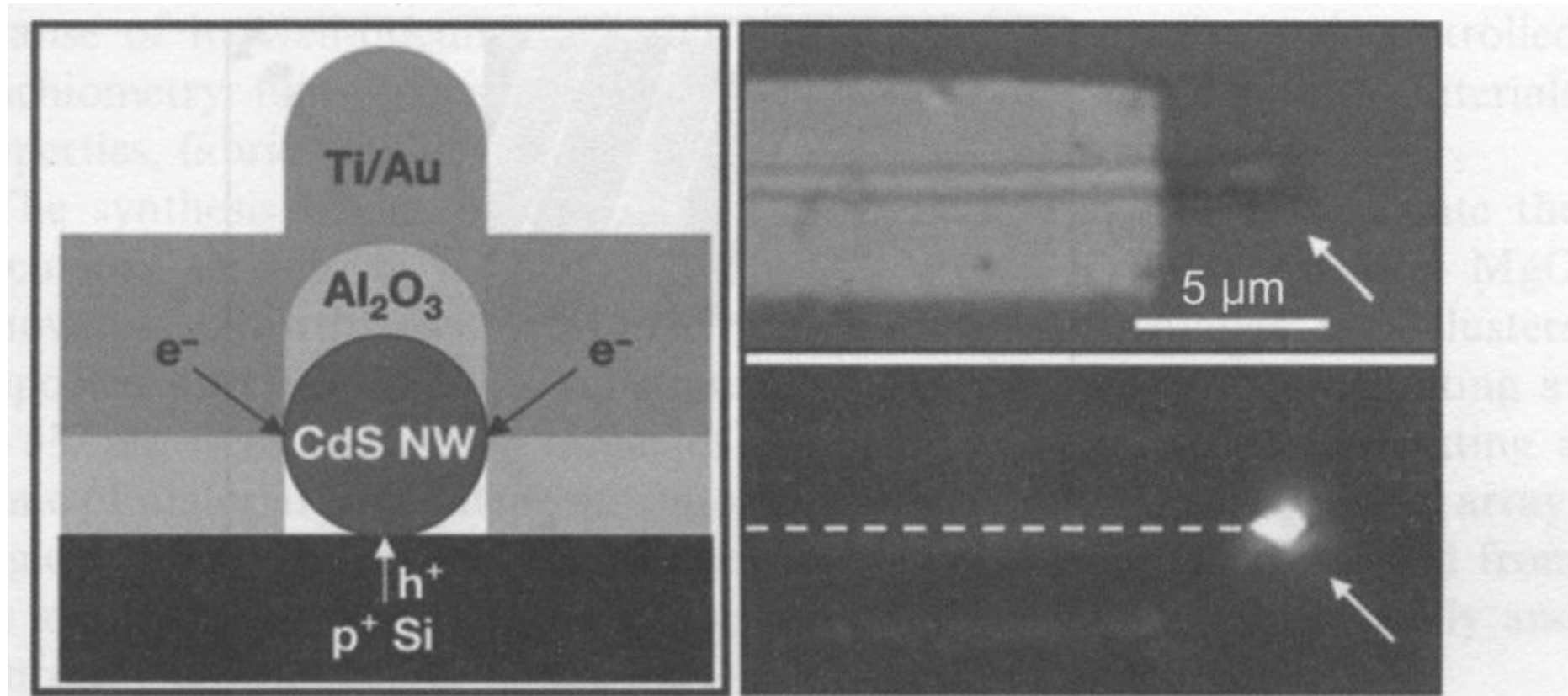


Модификация нанопроволок



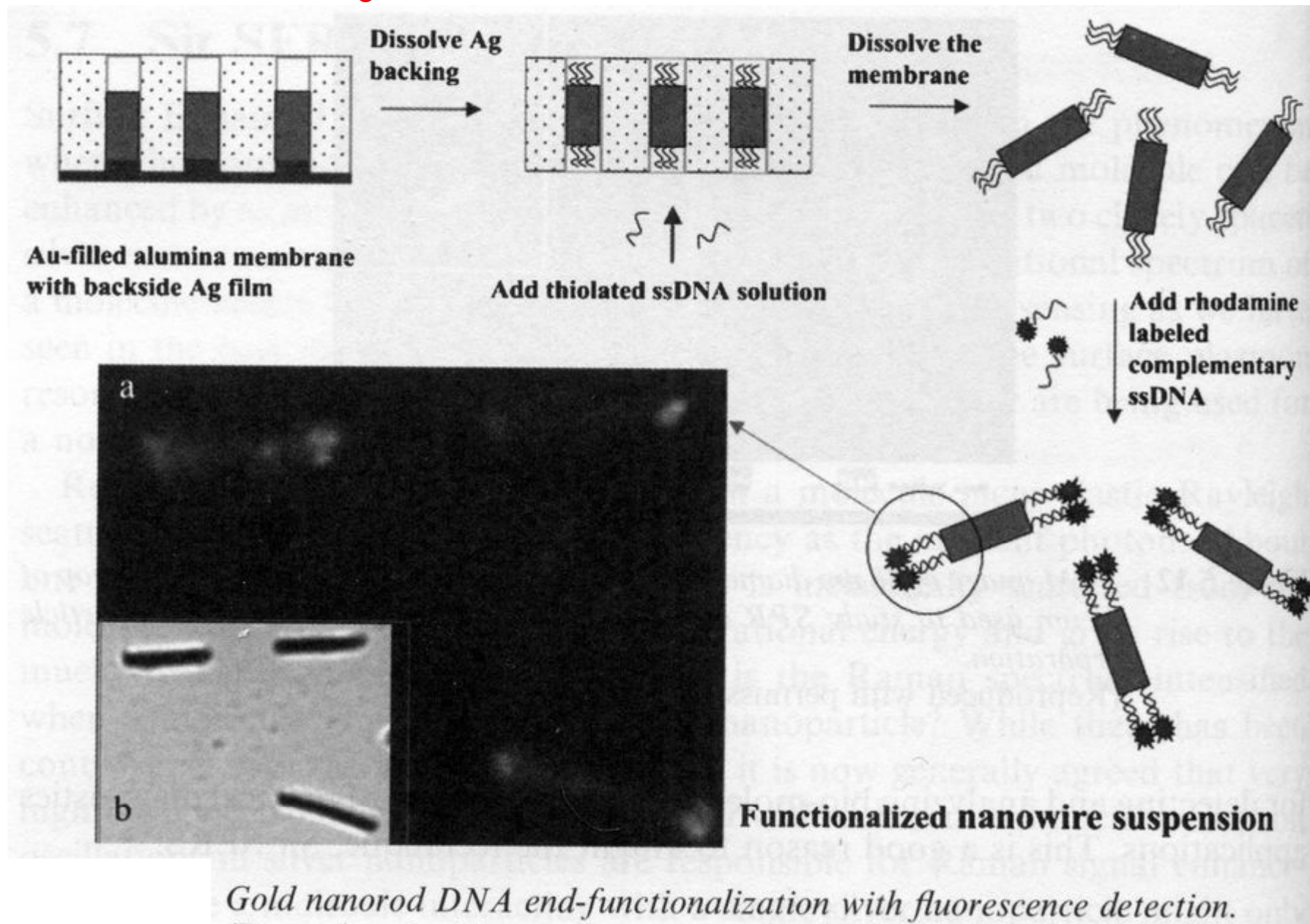
Orthogonal assembly on nanorods. Butylisonitrile is bound to Pt and Au surfaces. Aminoethanethiol displaces isocyanides on gold but not on platinum. Rhodamine isocyanate is reacted with terminal amino groups to fluorescently label gold segments.

Нанотрубочный лазер

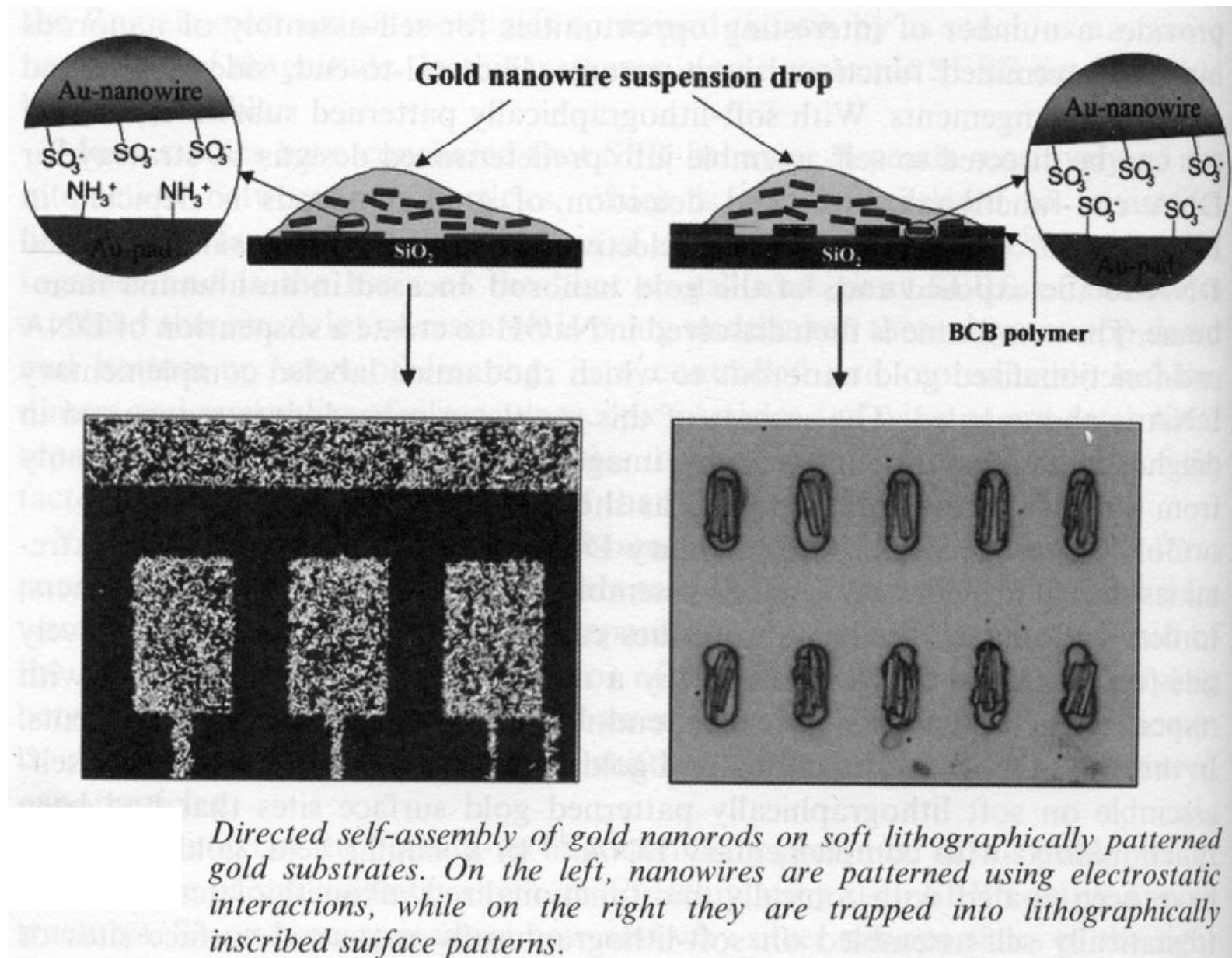


Structure of an electrically pumped nanowire laser, left. Top-view SEM image of the device, as well as spatially resolved luminescence.

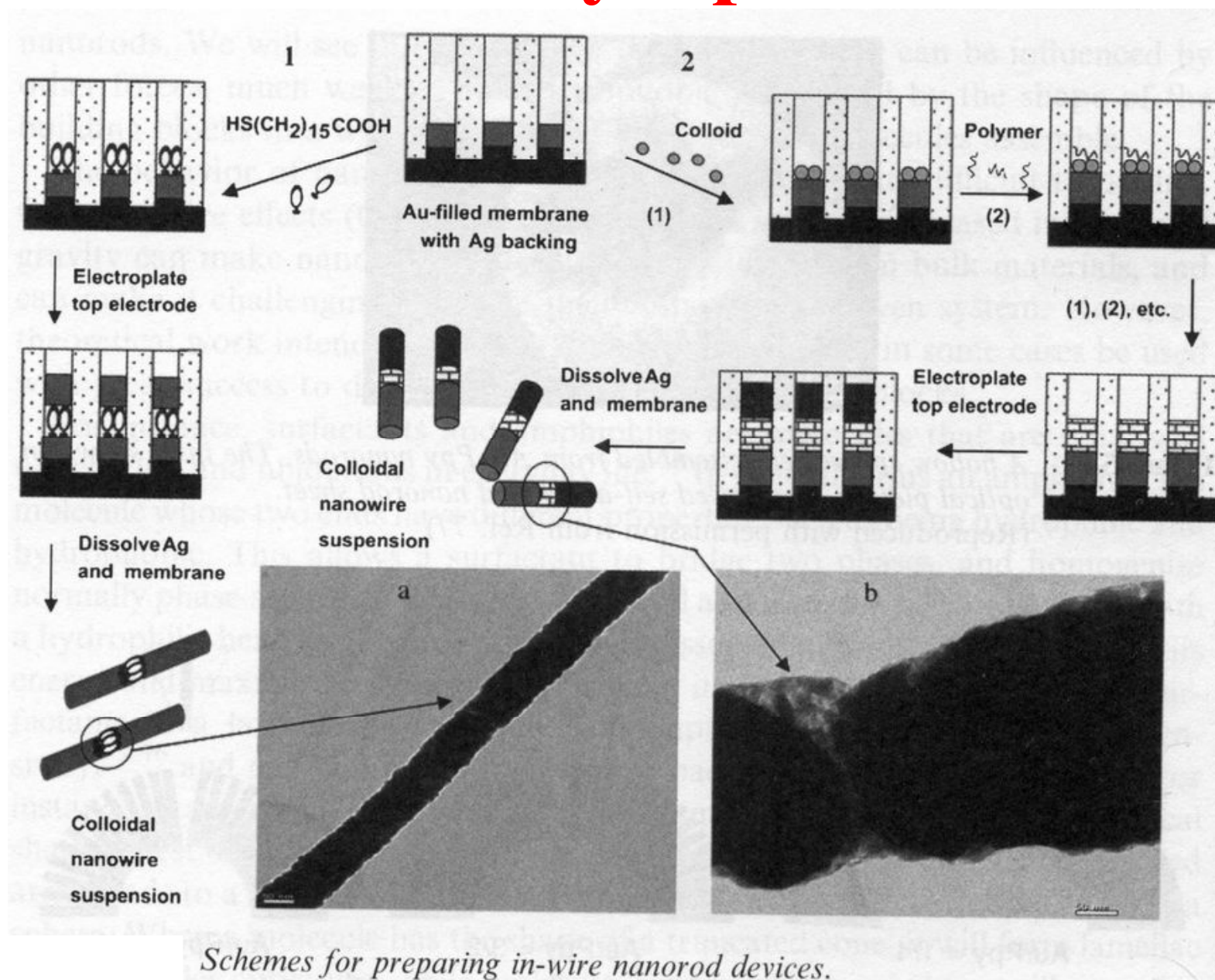
Функционализация



Самосборка и «мягкая литография»

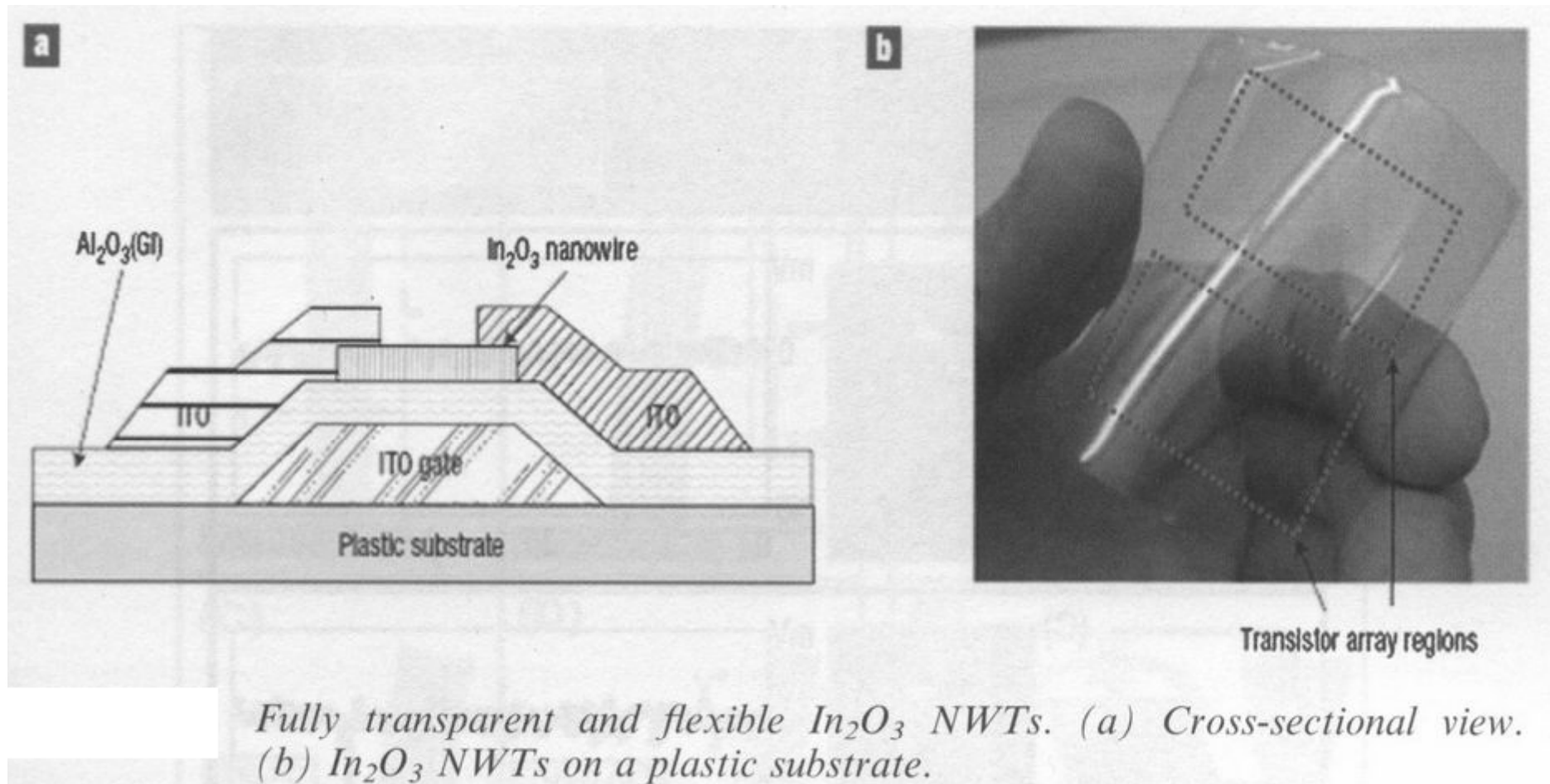


Сложные устройства

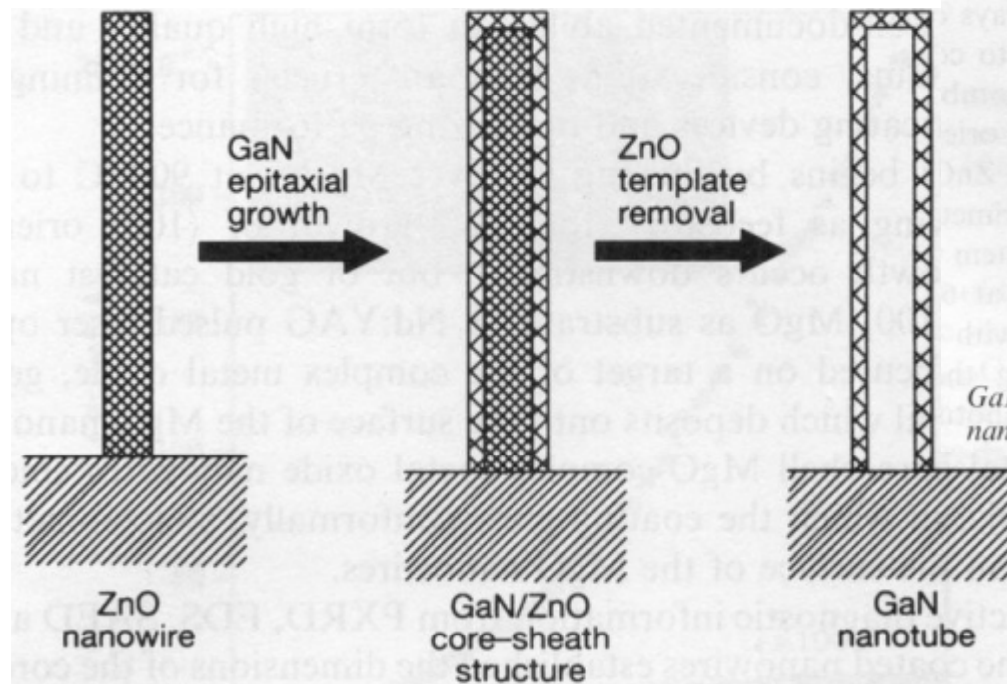


Schemes for preparing in-wire nanorod devices.

Прозрачная электроника

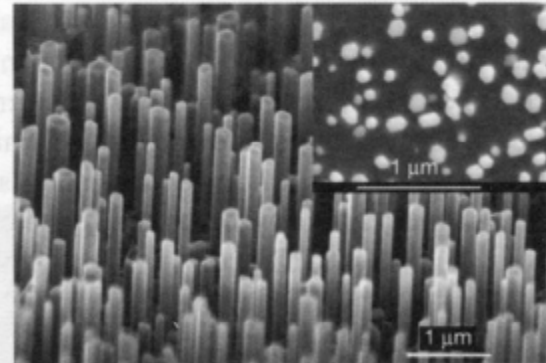


Чехол

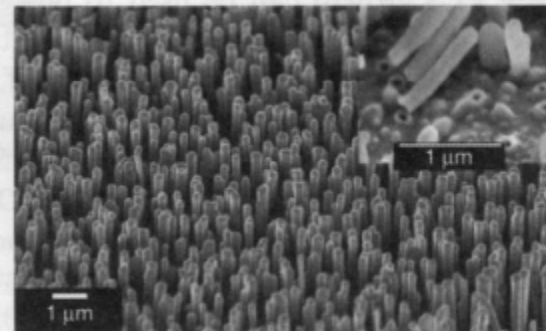


Epitaxial casting of wurtzite GaN nanotubes using wurtzite ZnO nanowire templates.

Core-Shell Nanowire Array

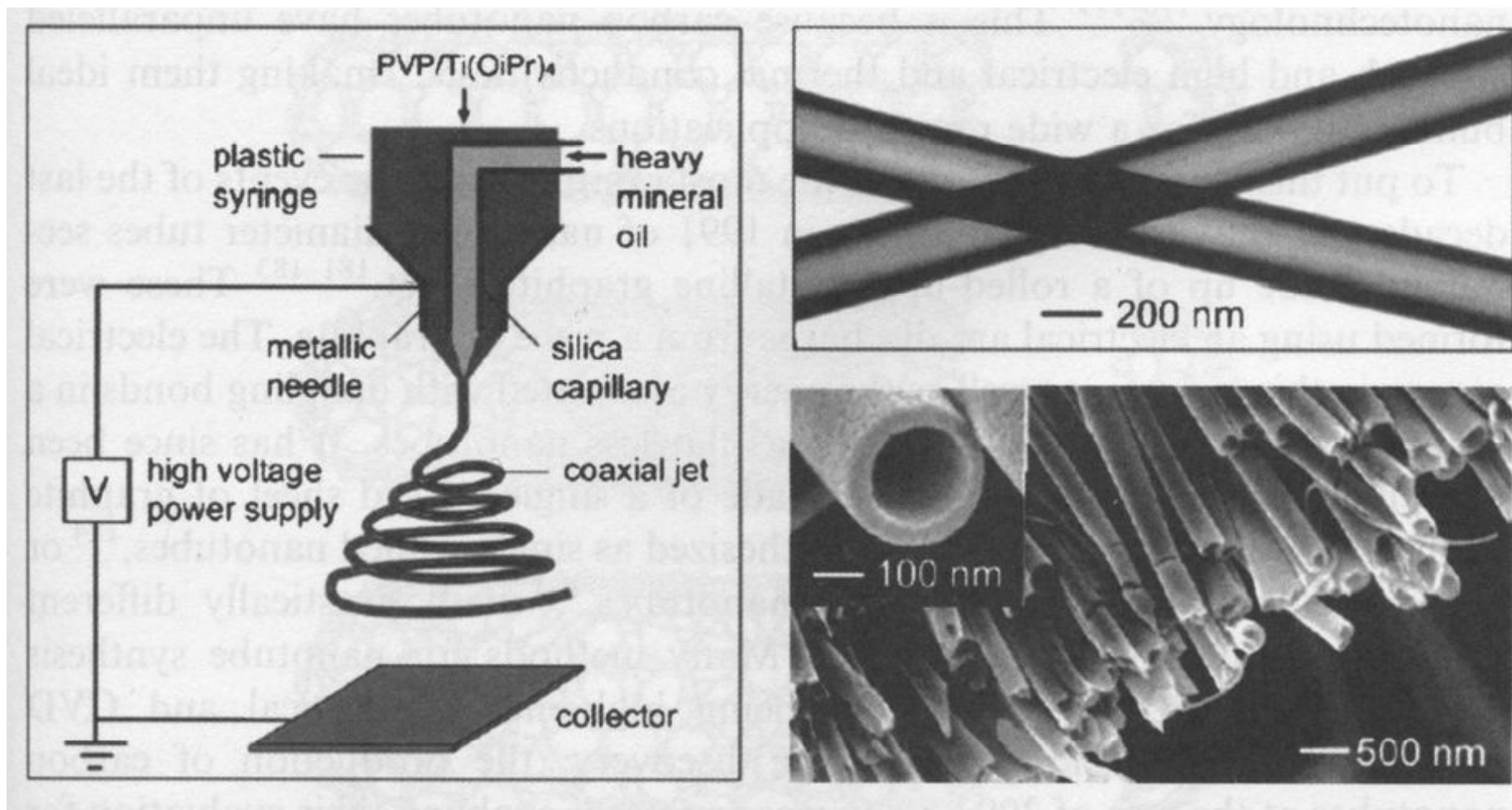


Nanotube Array



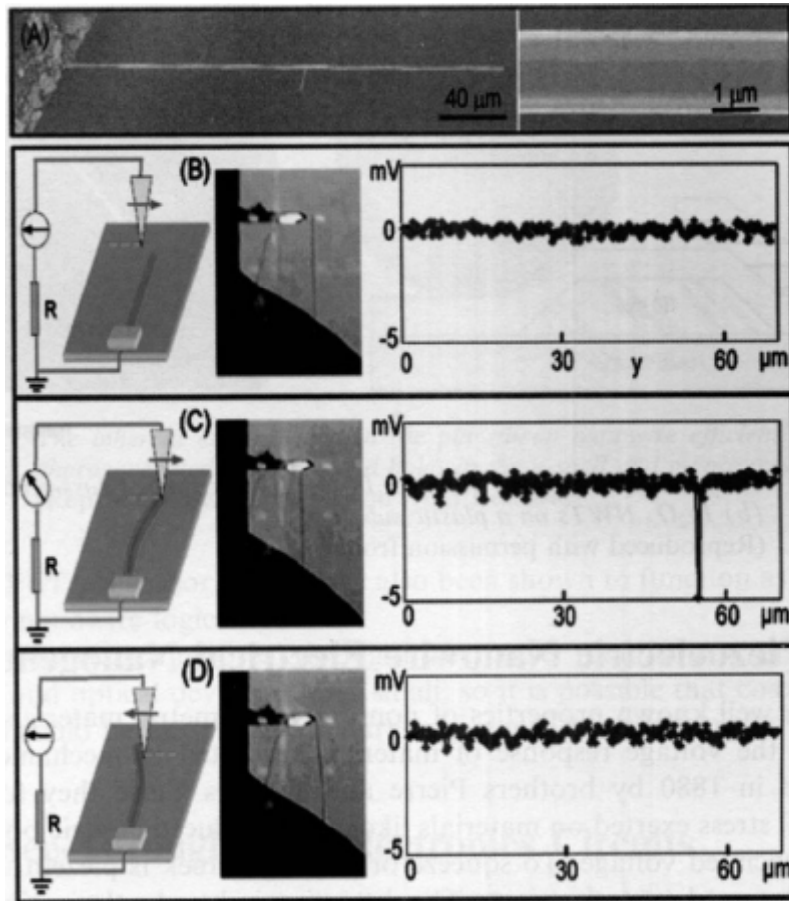
GaN/ZnO core-shell nanowire array on sapphire substrate gives a GaN nanotube array upon removing the ZnO core.

Нанопряжа

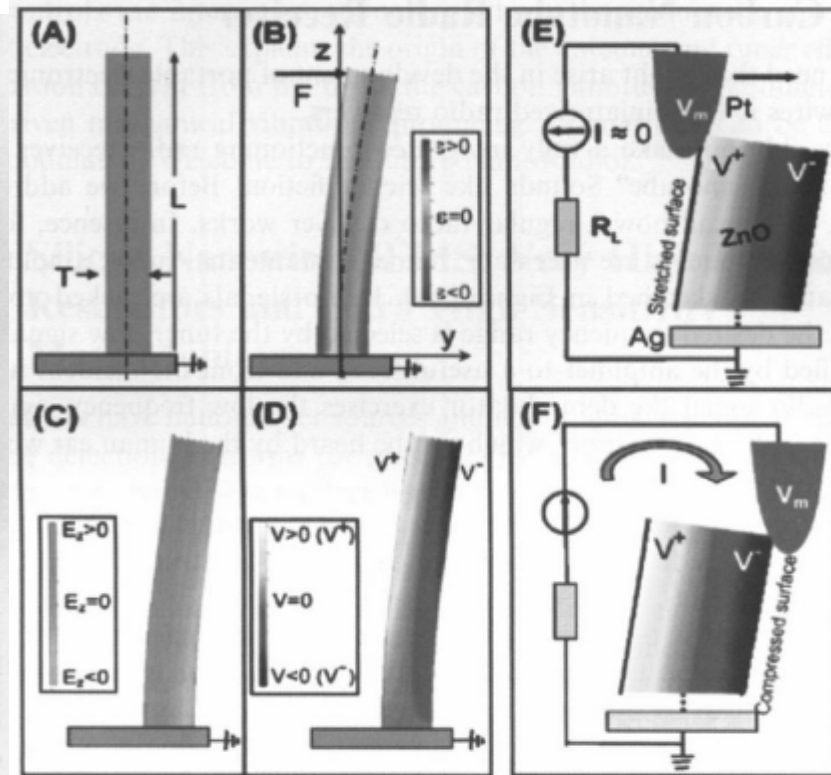


Electrospinning hollow nanotubes. A coaxial stream with an oil core and solid precursor sheath is extruded from a capillary towards a counter-electrode substrate, and the oil subsequently dissolved away. TEM and SEM images confirm the morphology of the hollow tubes.

Наноэлектростанции

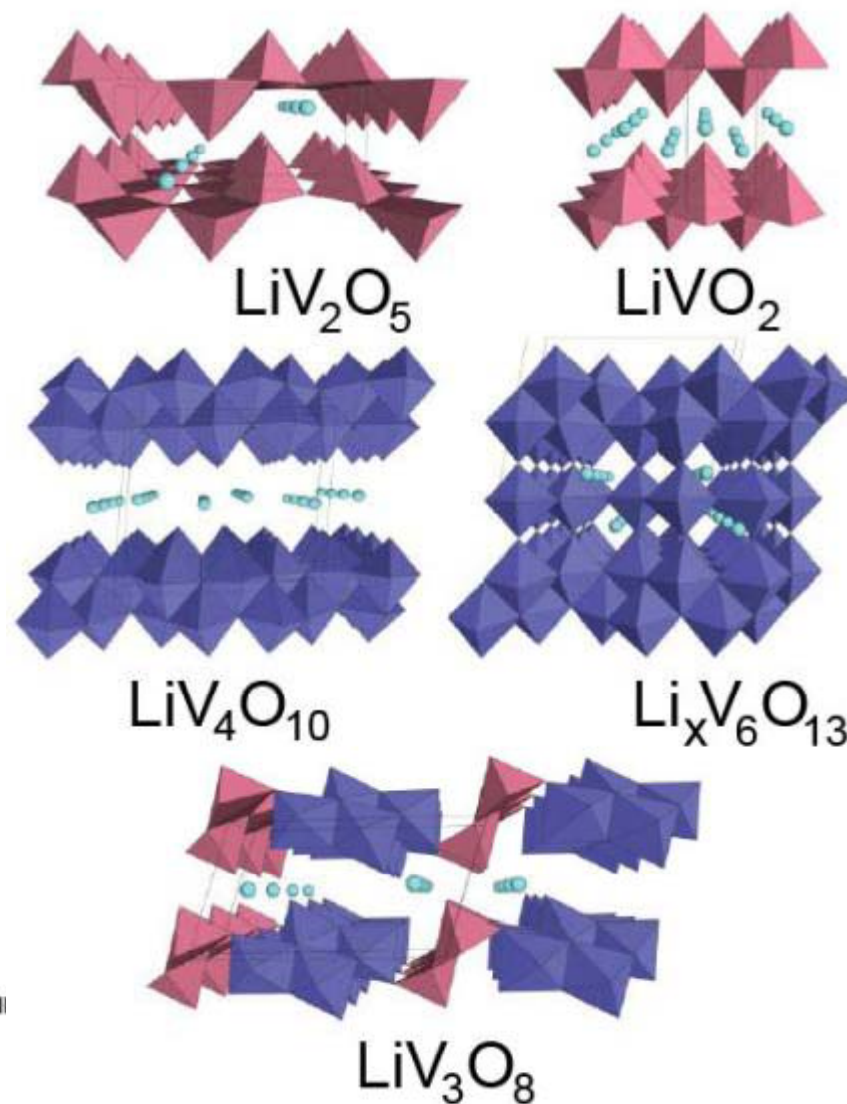
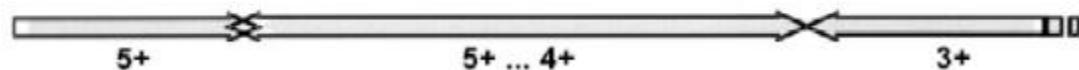


Process for converting mechanical energy into electric energy by a piezoelectric ZnO wire. (A) SEM images of a ZnO wire with one end affixed by silver paste onto a silicon substrate and the other end free. The wire has a hexagonal cross section. (B, C, and D) Three characteristic snapshots and the corresponding output voltage images, when the tip scanned across the wire.

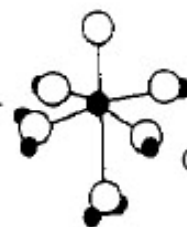
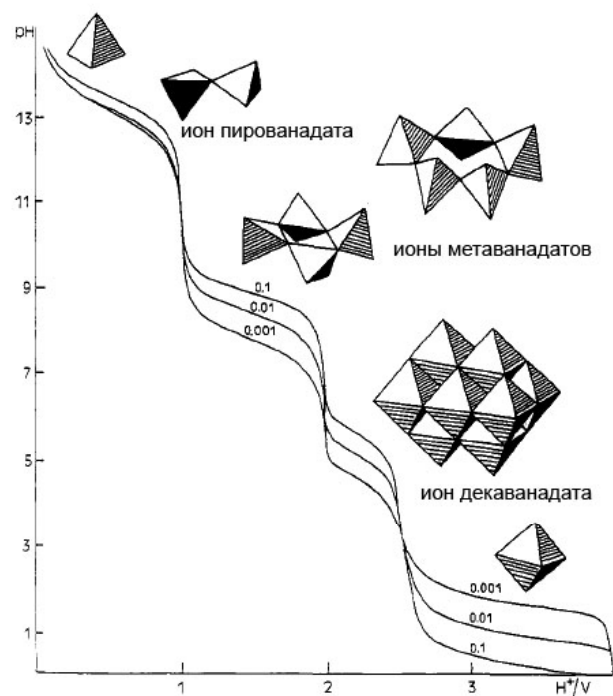


Working mechanism for the power generation process of a piezoelectric ZnO nanowire as a result of coupled piezoelectric and semiconducting properties in conjunction with the Schottky barrier at the AFM tip-semiconductor interface. (A) Schematic definition of a wire. (B) Longitudinal strain z distribution in the wire after being deflected by an AFM tip from the side. (C) The corresponding longitudinal piezoelectric induced electric field E_z distribution in the wire. (D) Potential distribution in the wire as a result of piezoelectric effect, with the stretched and compressed side surfaces being positive and negative potentials, respectively. (E, F) Metal and semiconductor contacts between the AFM tip and the semiconductor ZnO nanowire at two reversed local contact potentials (positive and negative), showing reverse and forward biased Schottky rectifying behavior, respectively.

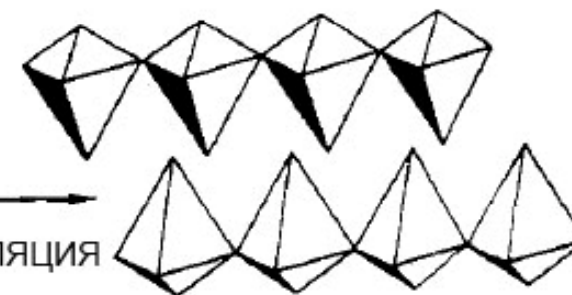
Кристаллохимия оксидных соединений ванадия



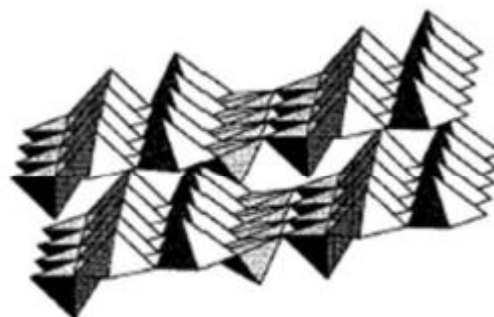
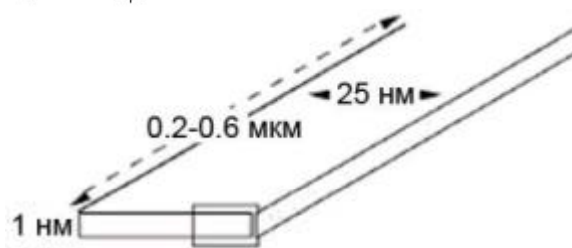
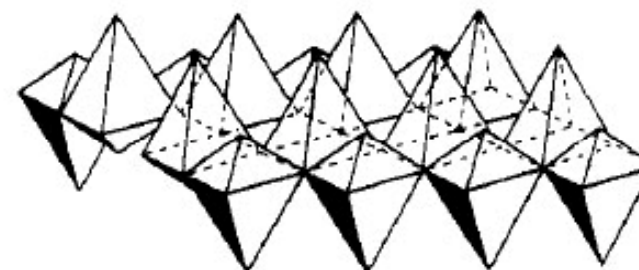
Гели



оляция



оксоляция



«Полимеризация» в водном растворе. Ксерогели оксидов ванадия

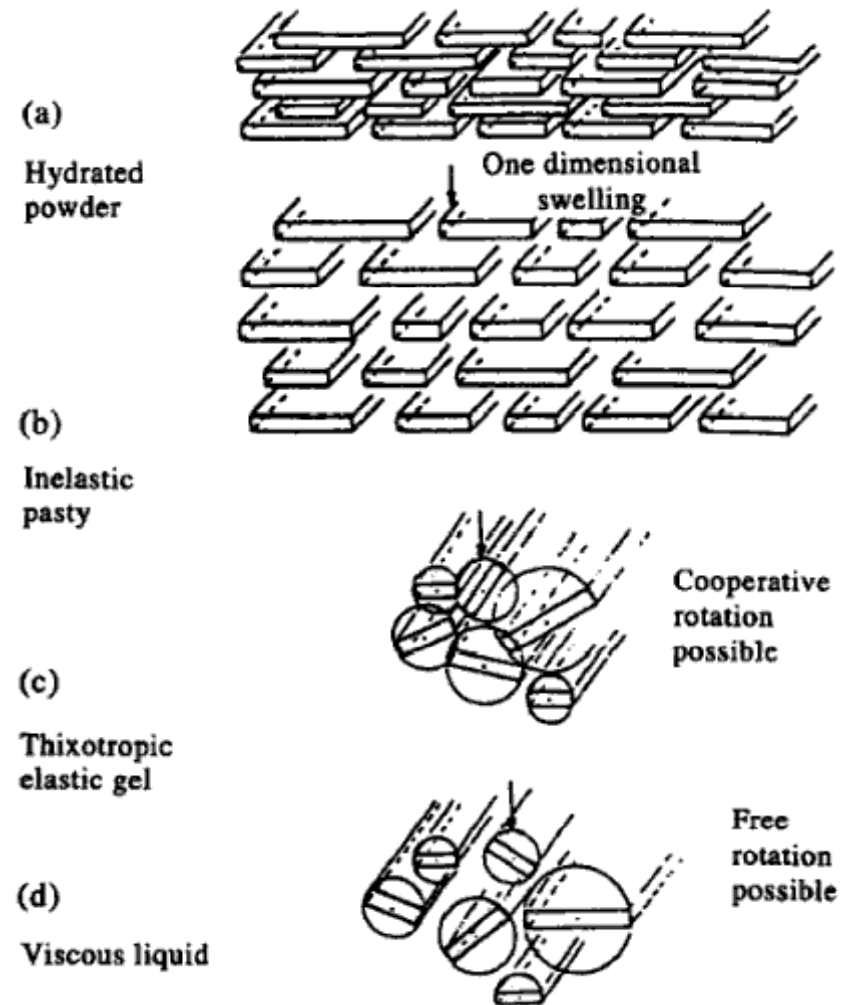
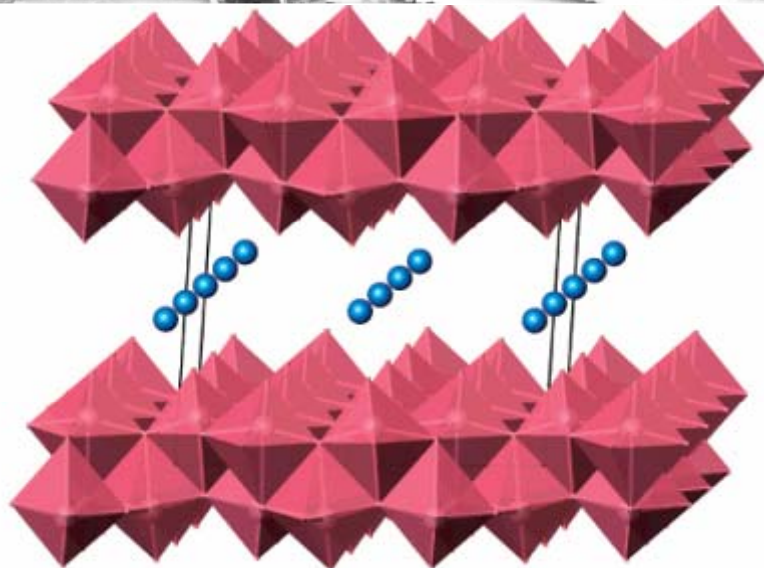
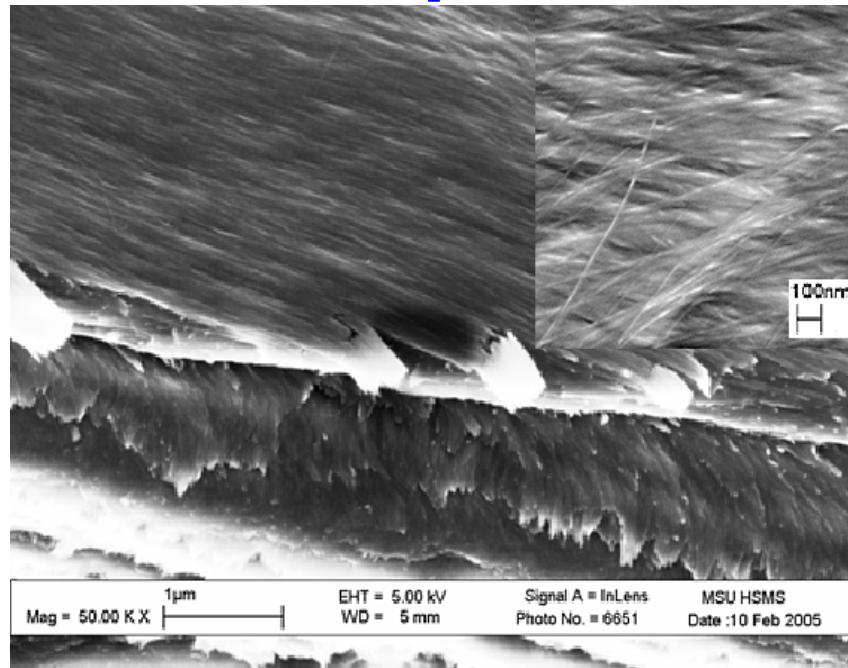
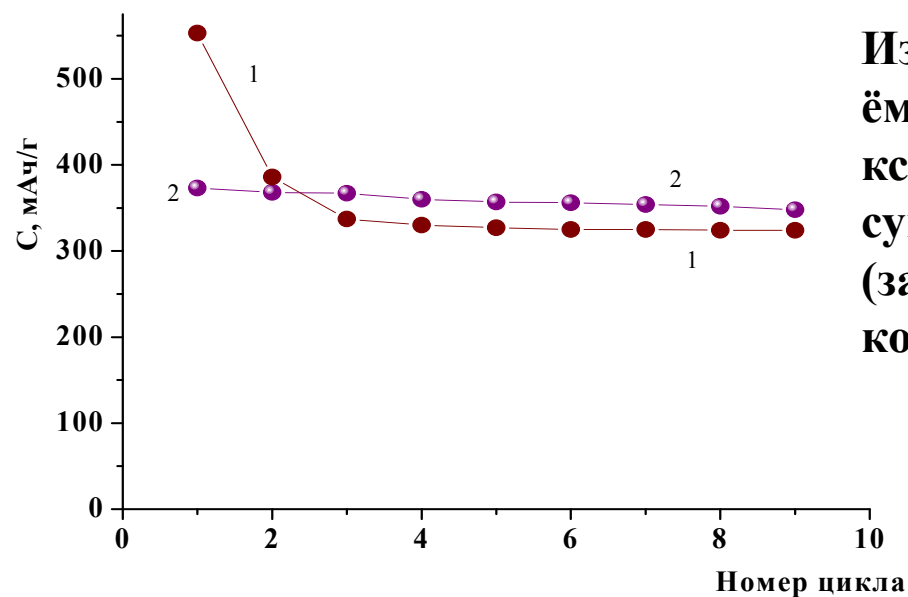
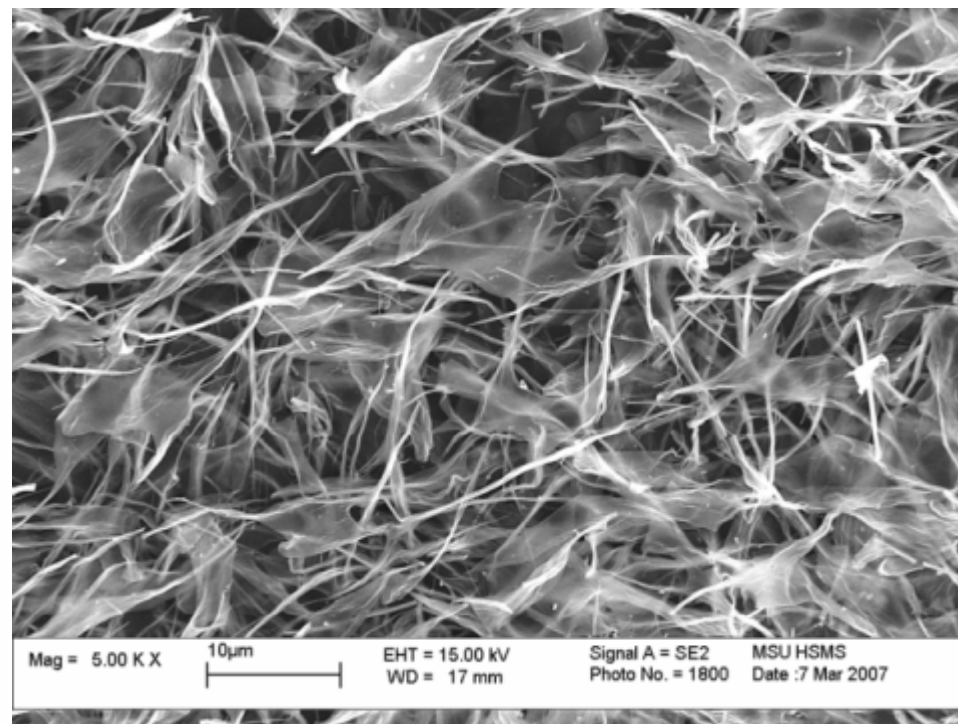
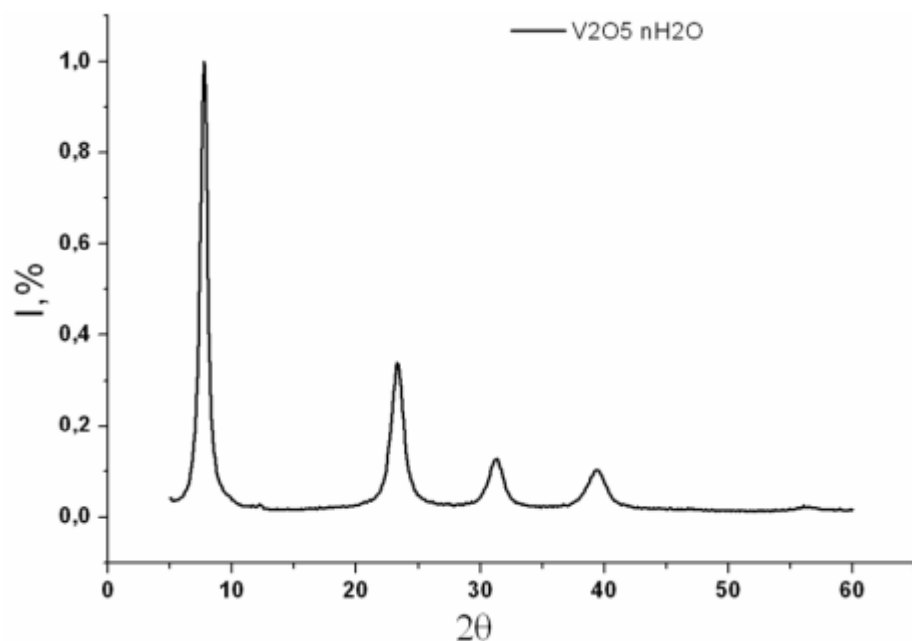


Fig. 8. Ribbon behaviour on dilution.

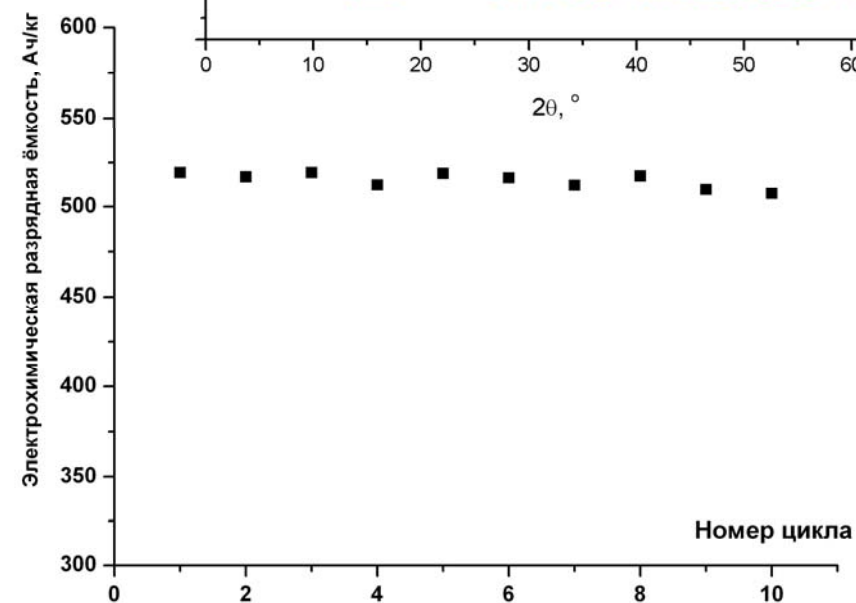
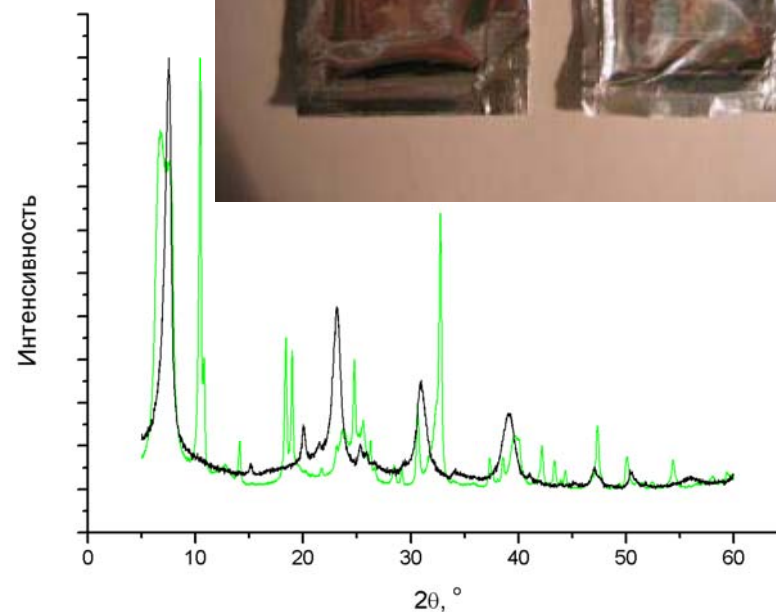
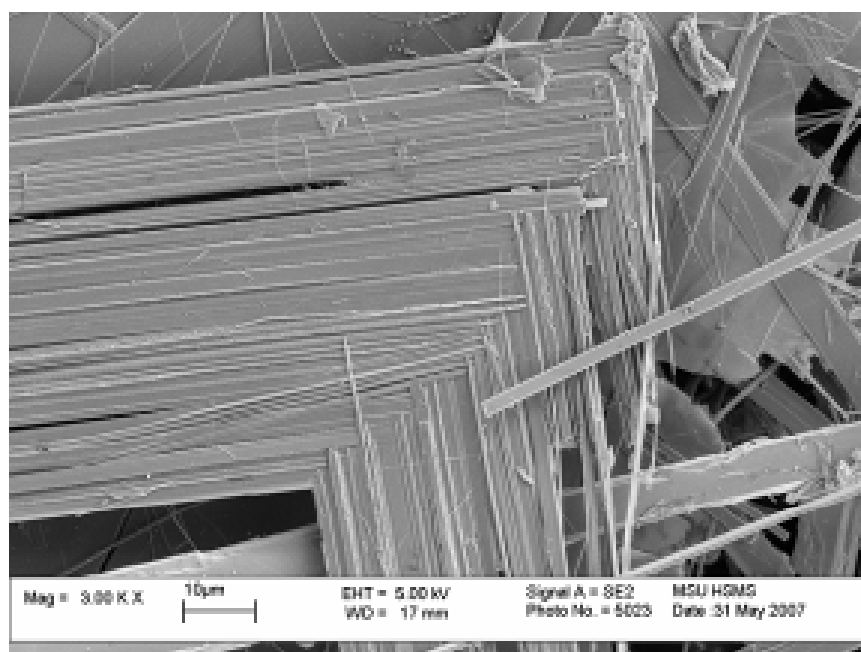
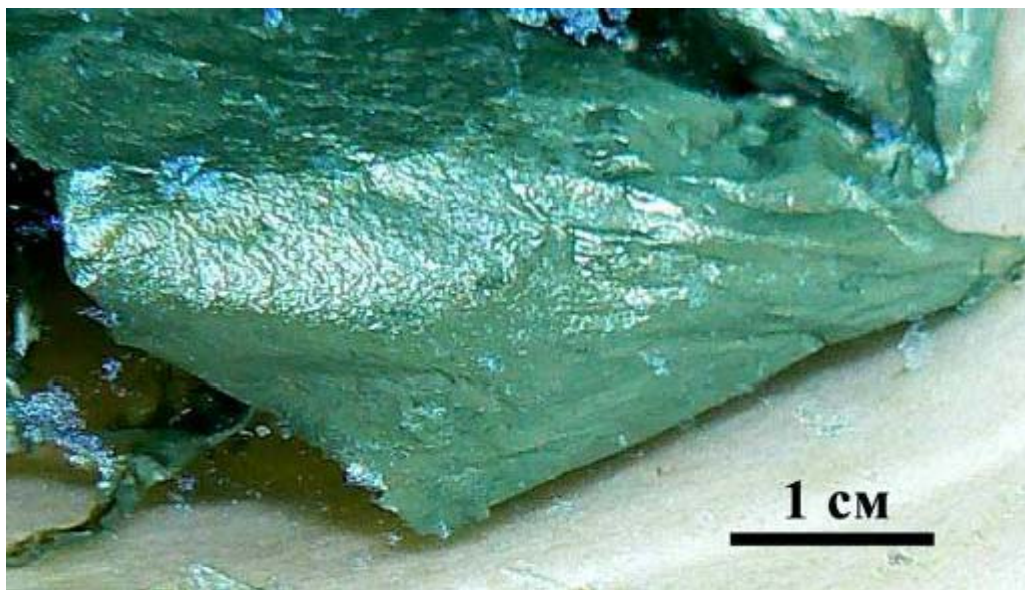


Изменение разрядной электрохимической ёмкости при циклировании электродов из ксерогелей, полученных сублимационной сушкой гидрогеля до его оксоляции (заморозка спустя 5 минут после выхода из колонки) с добавками сажи (1) и УНТ (2)

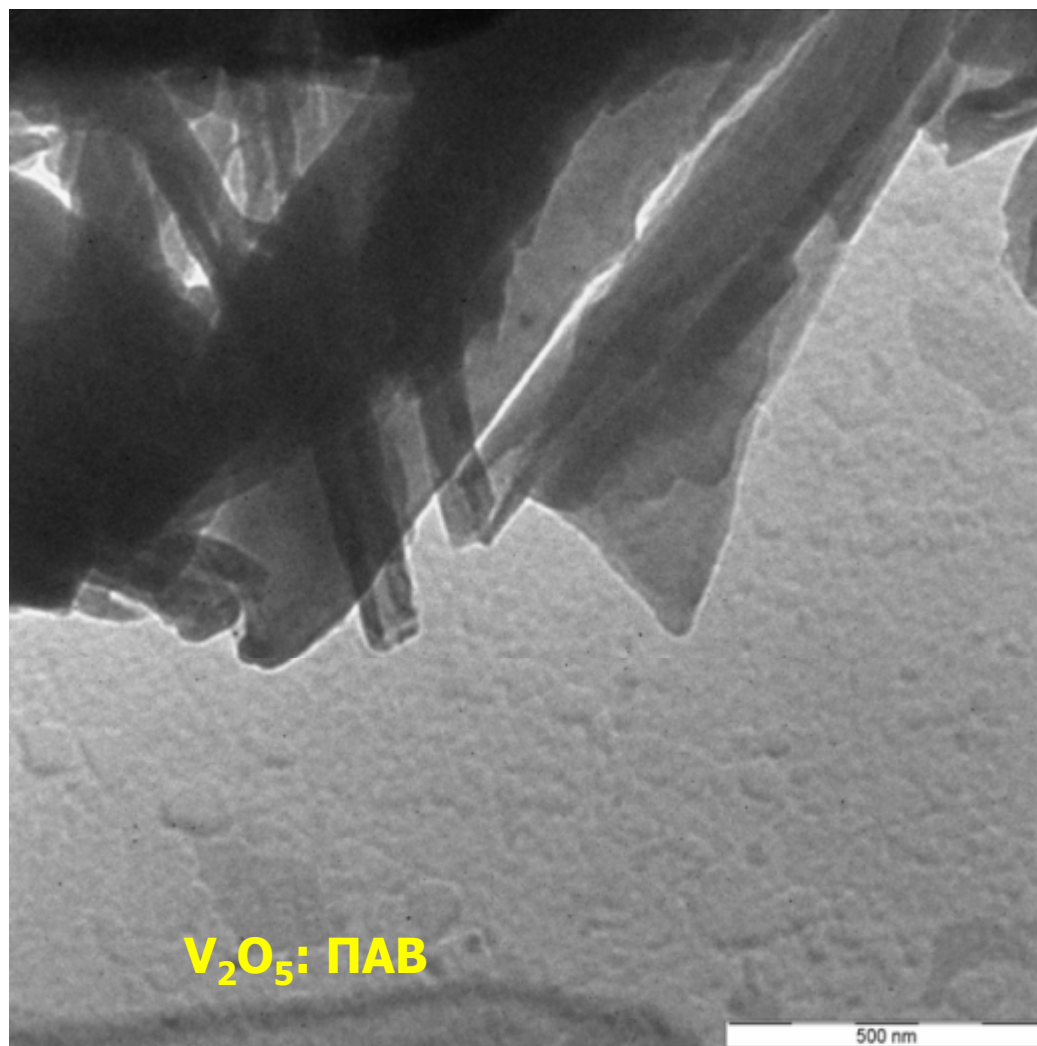
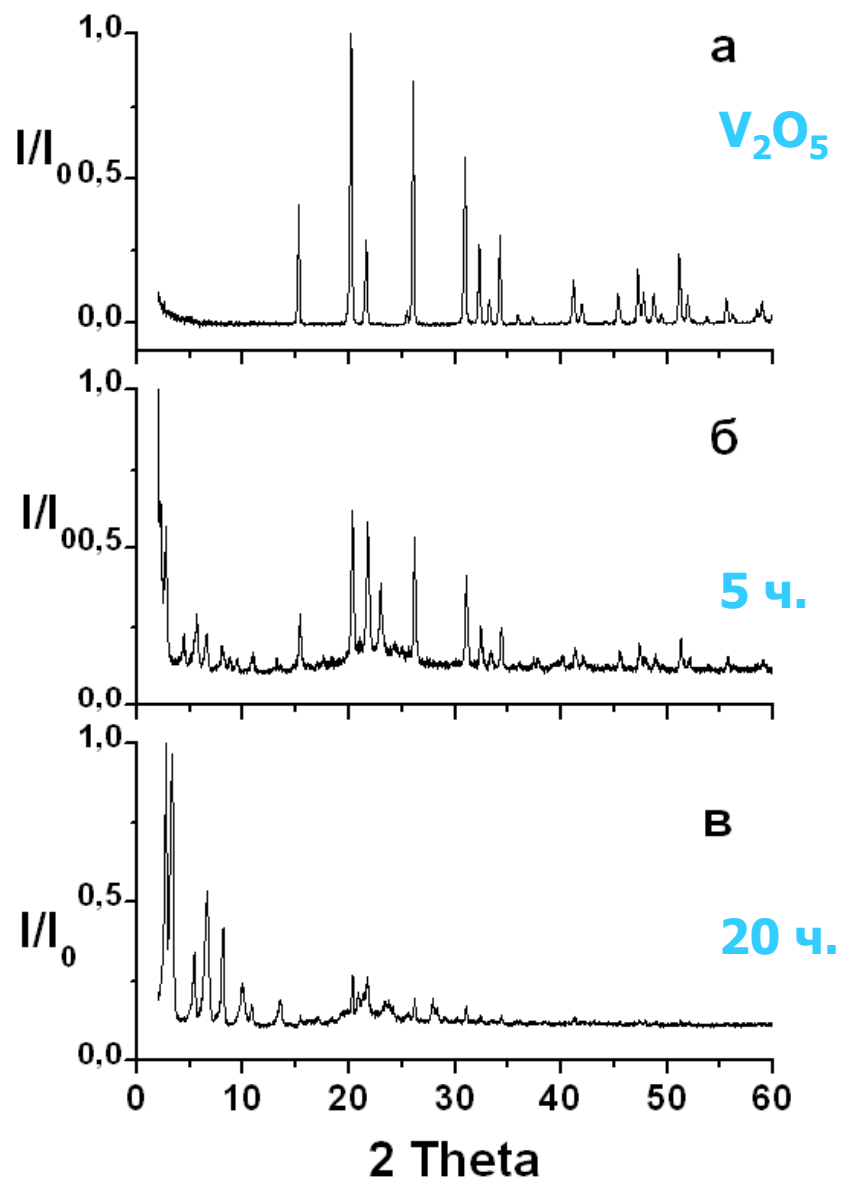


Изменение разрядной электрохимической ёмкости ксерогелей различной предыстории при циклировании

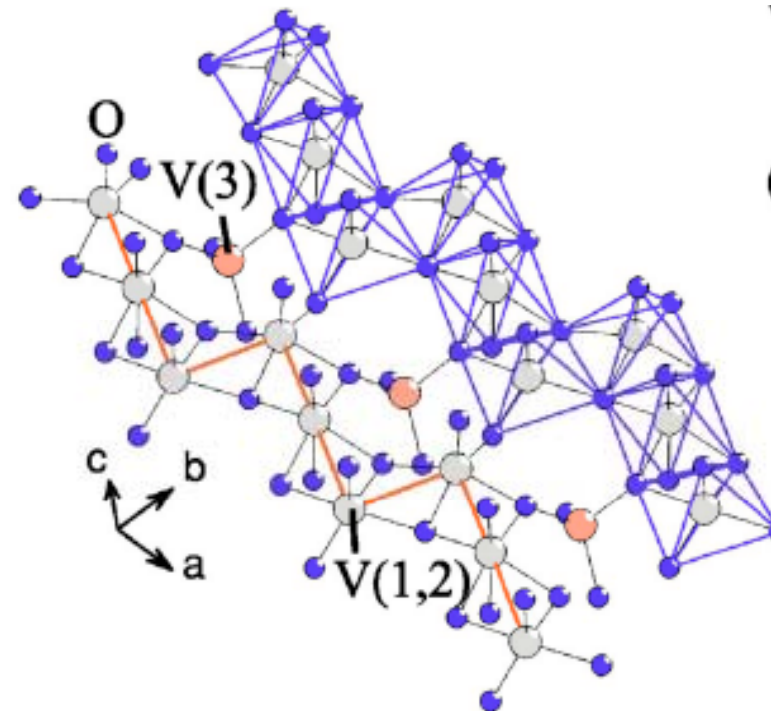
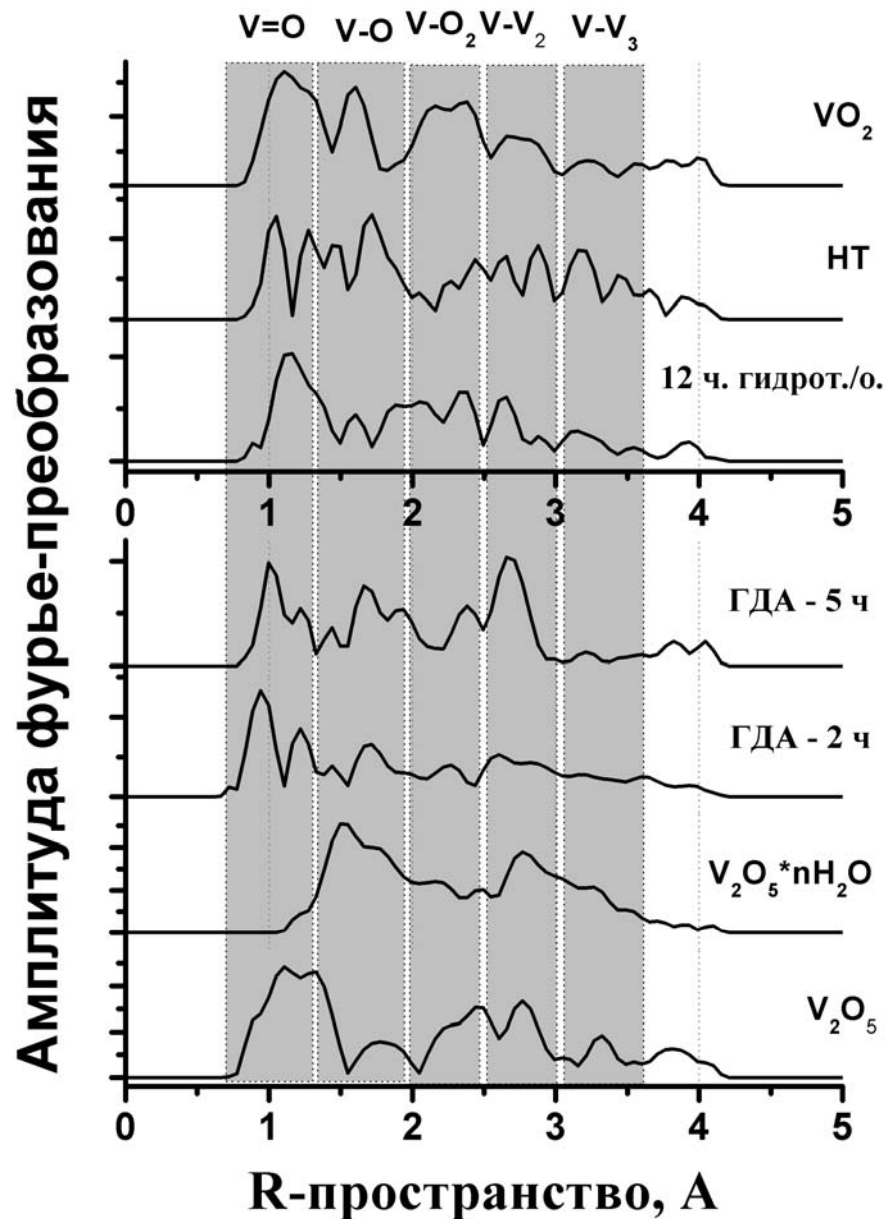
Нитевидные кристаллы



Прекурсоры нанотрубуленов

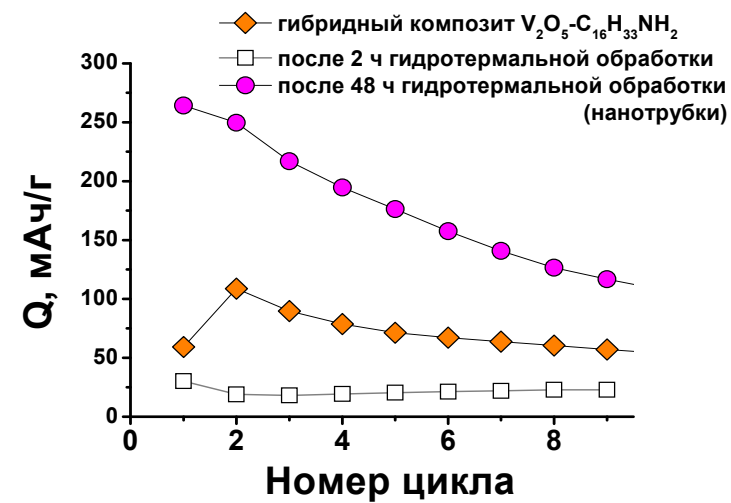
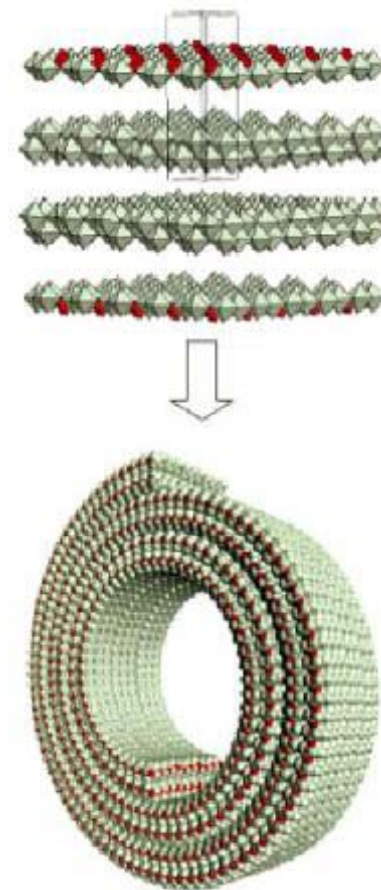
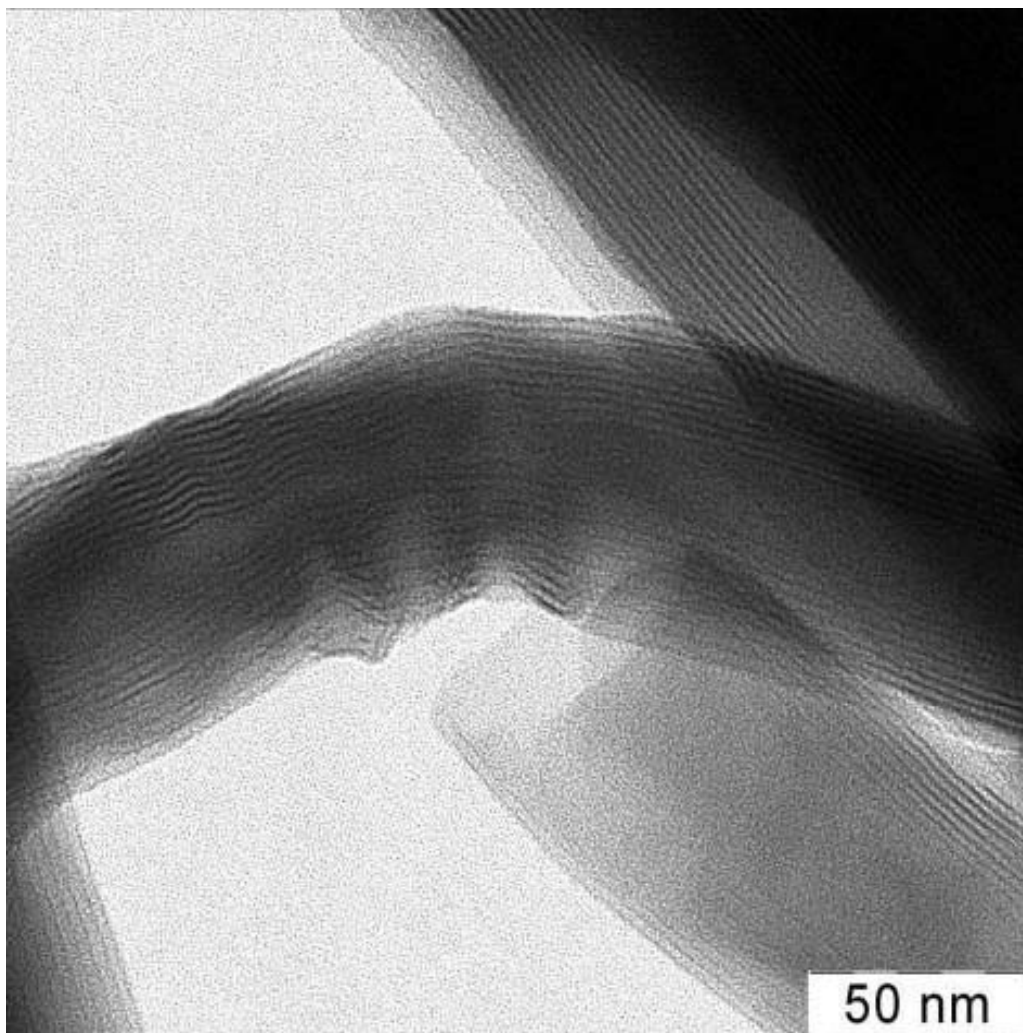


Локальная структура

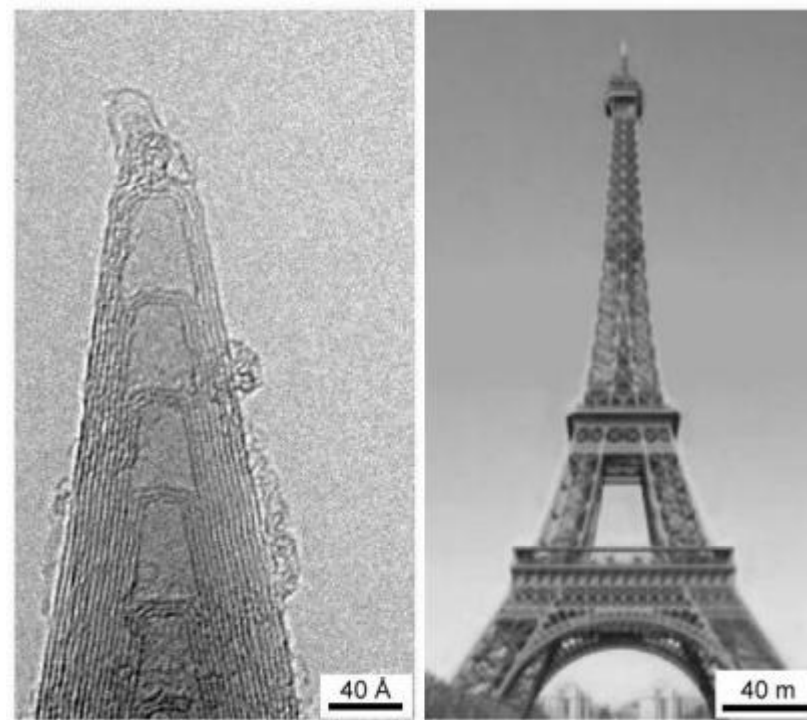
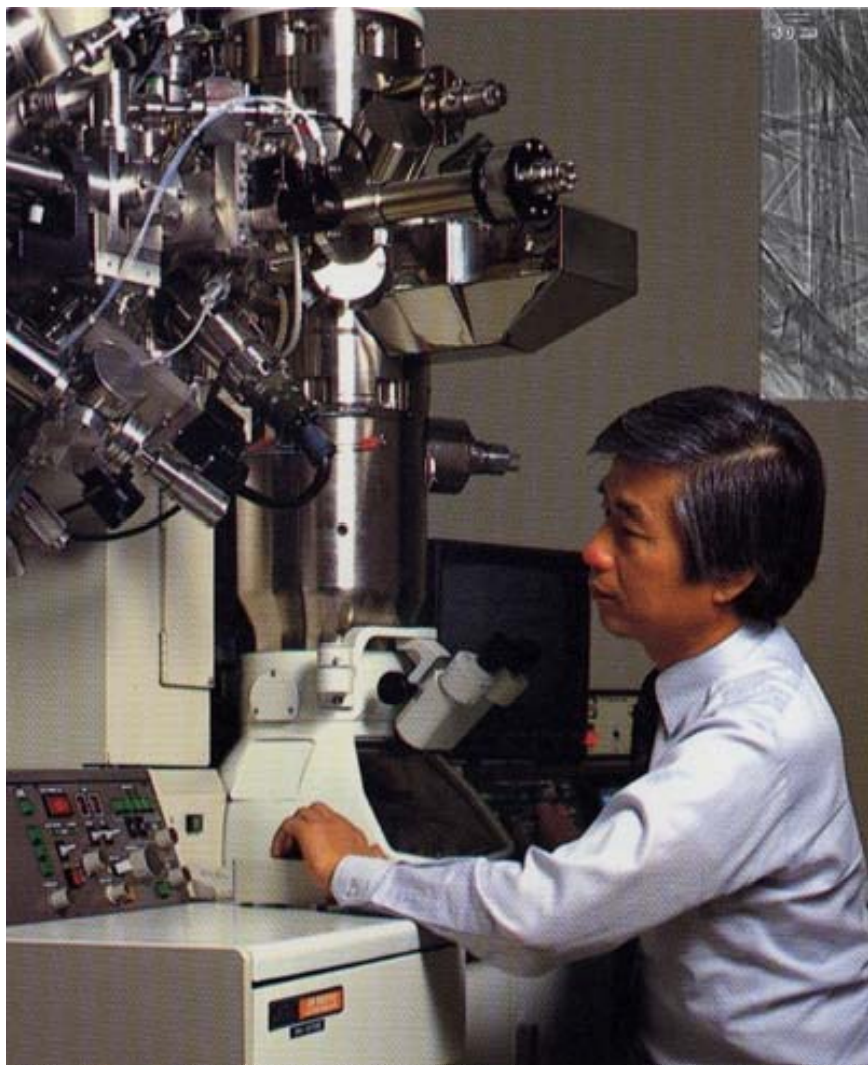


№	R, Å	Интерпретация
1	1.40	V - O
2	1.77	V - O(1), V - O
3	2.05	V - O(2), V(3) - O
4	2.27	V - O(3), V(3) - O
5	2.50	V - O(4)
6	2.82	V - V(3)
7	3.12	V - V(2)

Нанотрубки

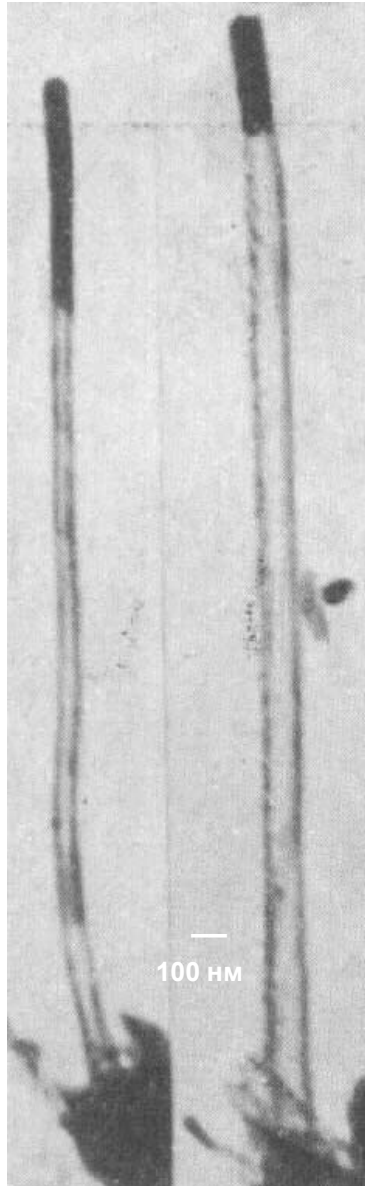


Углеродные нанотрубки (УНТ)



S. Iijima *Nature* 1991, 354, 56

Первые РЭМ наблюдения углеродных нанотрубок

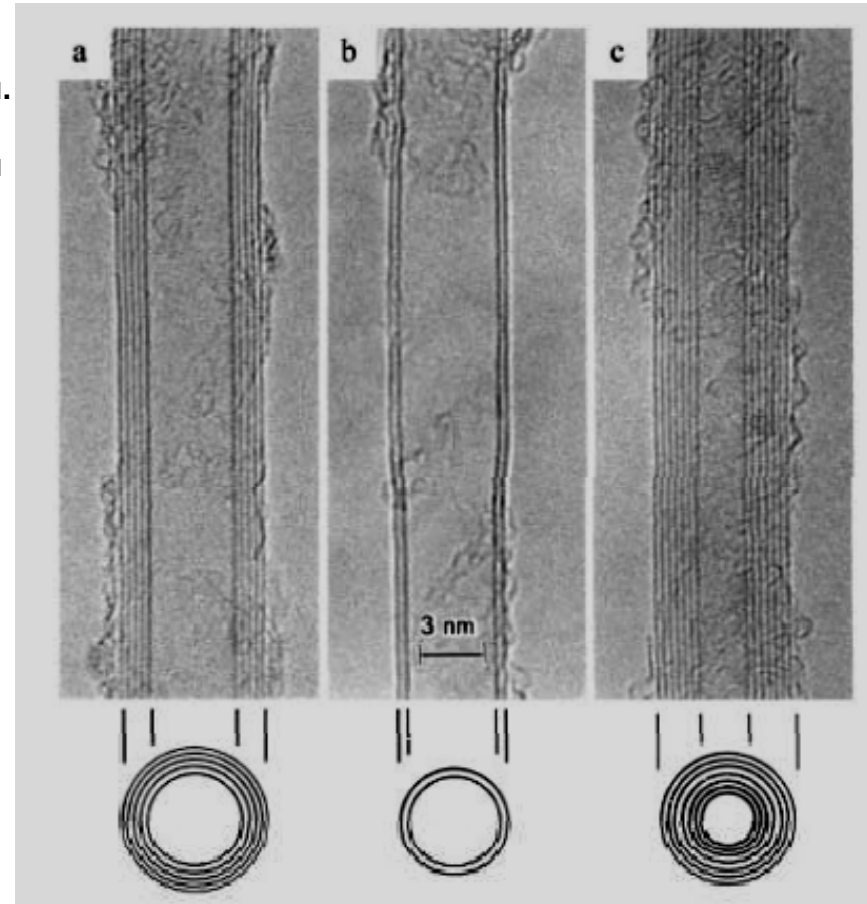


Л.В.Радужкевич, В.М.Лушкинович.
О структуре углерода,
образующегося при термическом
разложении окиси углерода на
железе ЖФХ (1952)

получены СНТ < 10 нм
метод CVD

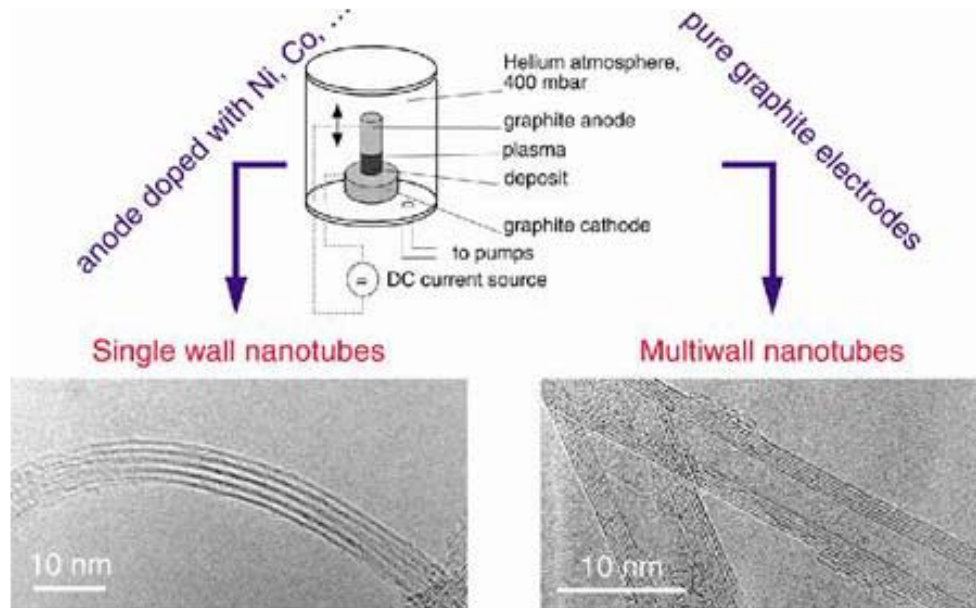
M. Endo PhD thesis
Orlean, France. 1975

Oberlin, M. Endo, T.
Koyama. J. Cryst. Growth
32, 335 (1976).

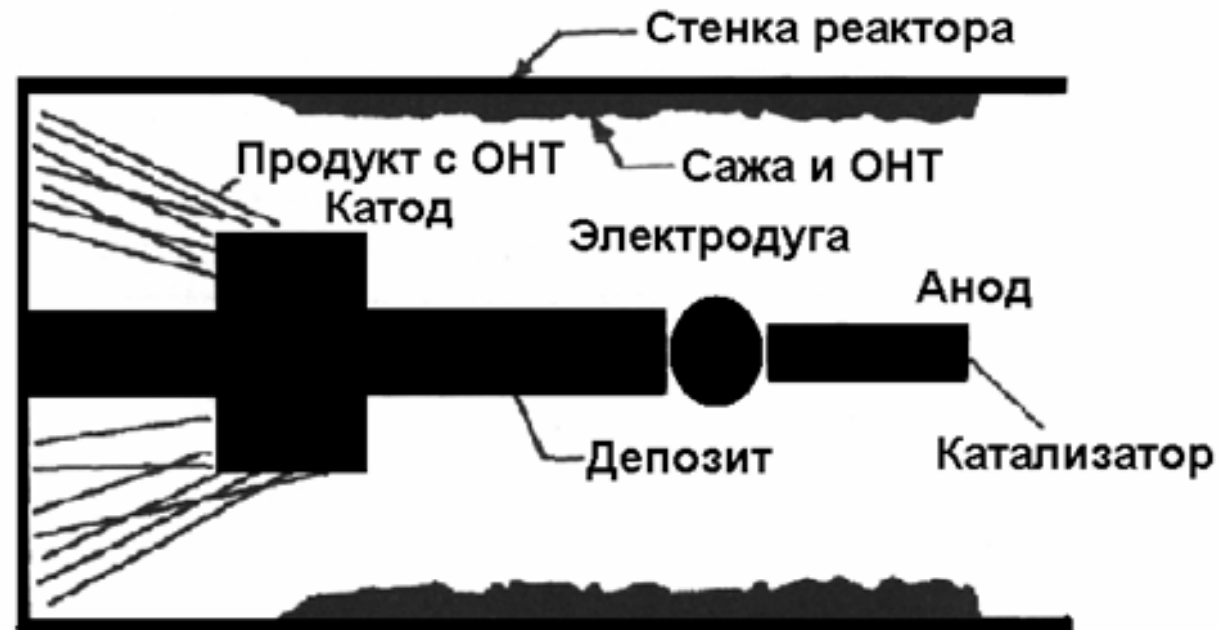


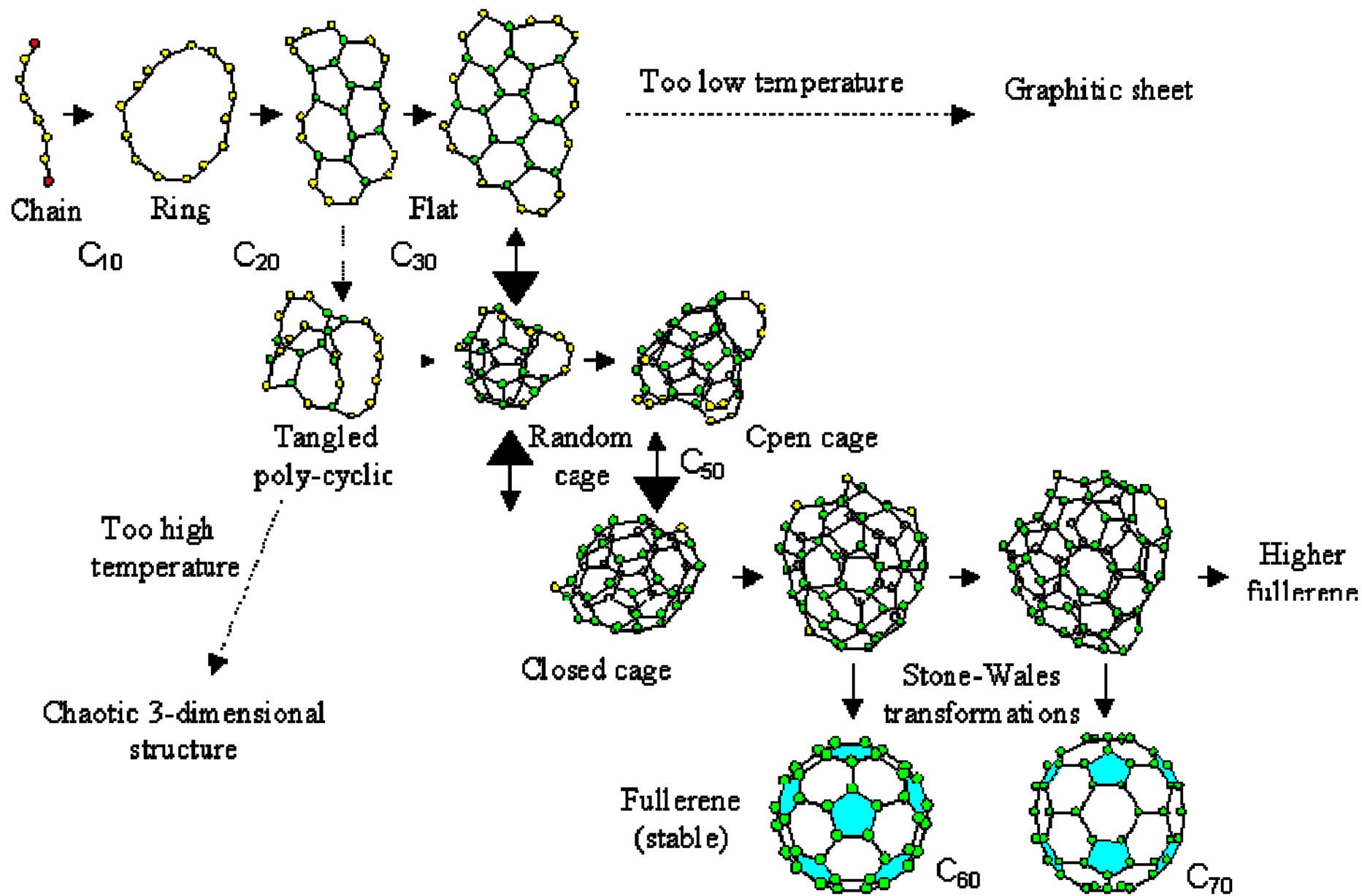
ТЕМ наблюдение J. Iijima (Nature, 1991) коаксиальных
многостенных нанотруб (катод осадок в угл
дуге) различными внутренними и внутренними
диаметрами и числом оболочек с различной
хиральностью

Синтез нанотрубок и фуллеренов

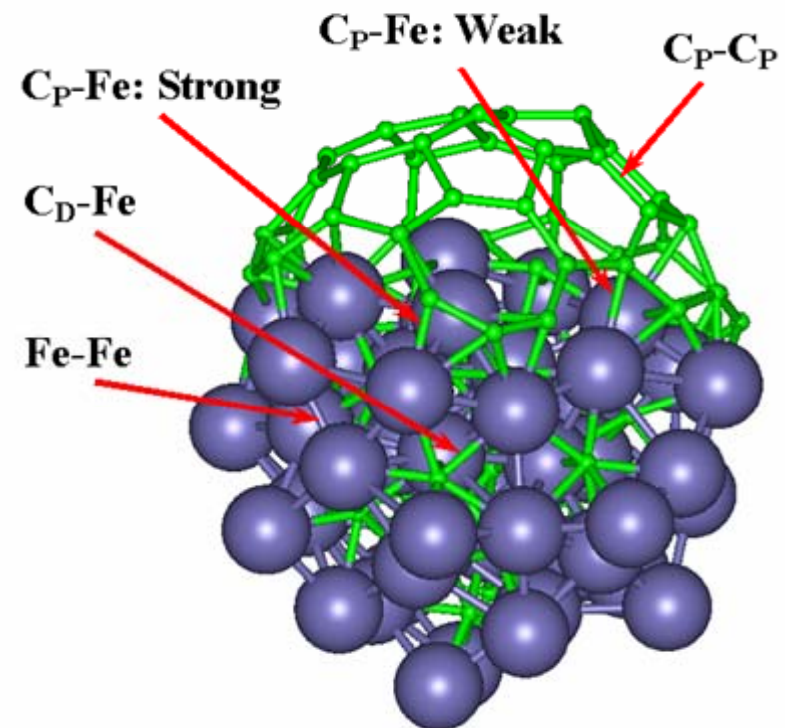
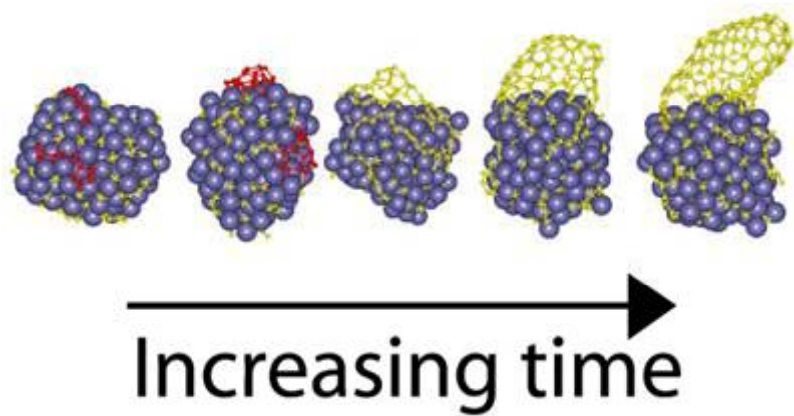


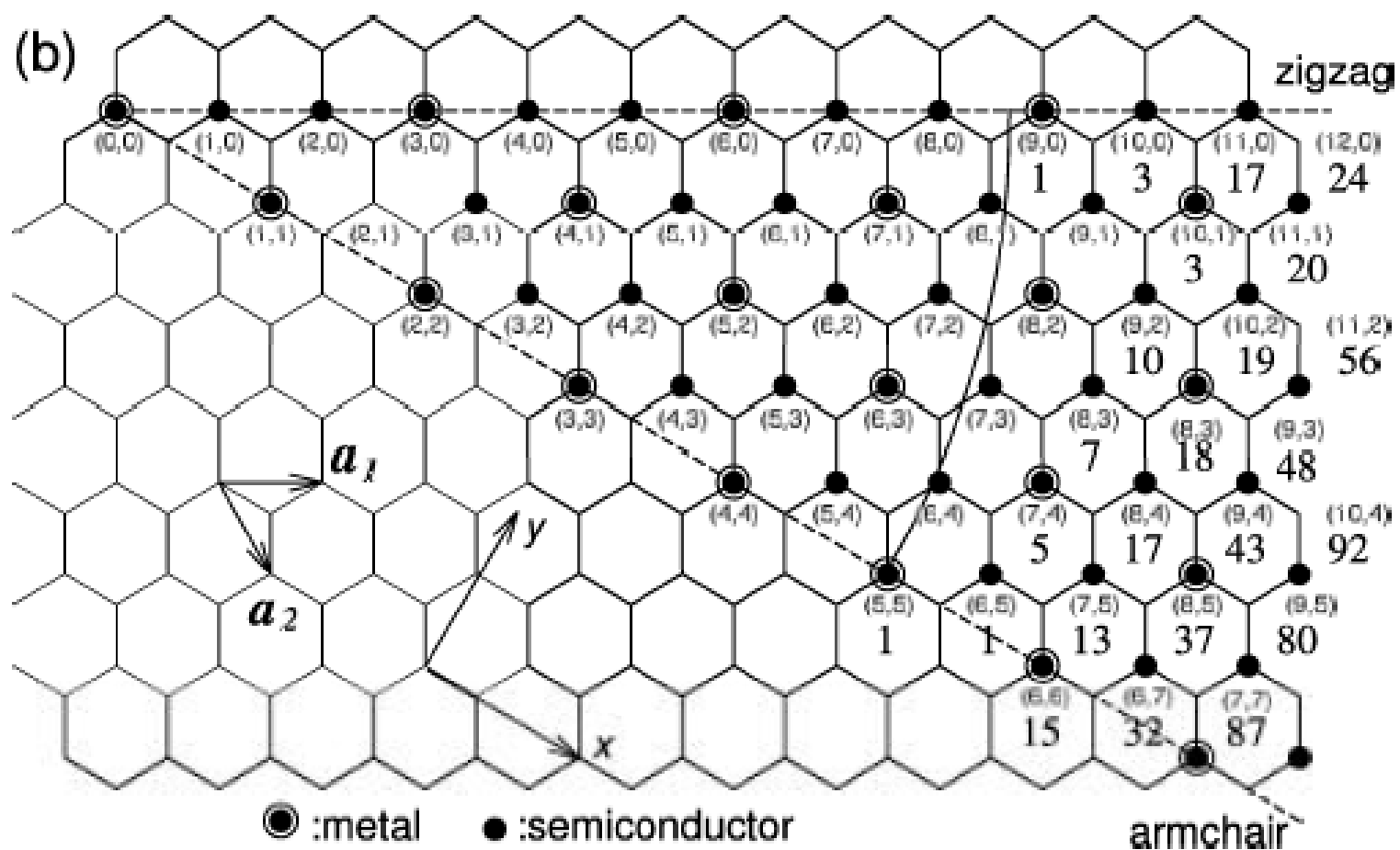
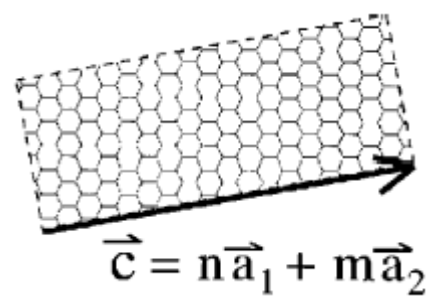
Высокая плотность тока $I = 150-300$ А, DC, высокое давление газа > 300 тор, Ar, фиксированный зазор 1-3 мм



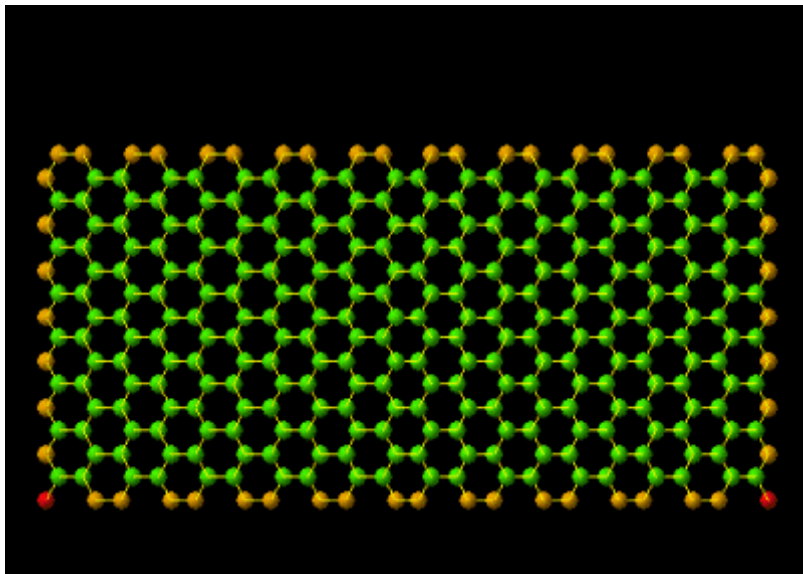


Модель роста нанотрубок



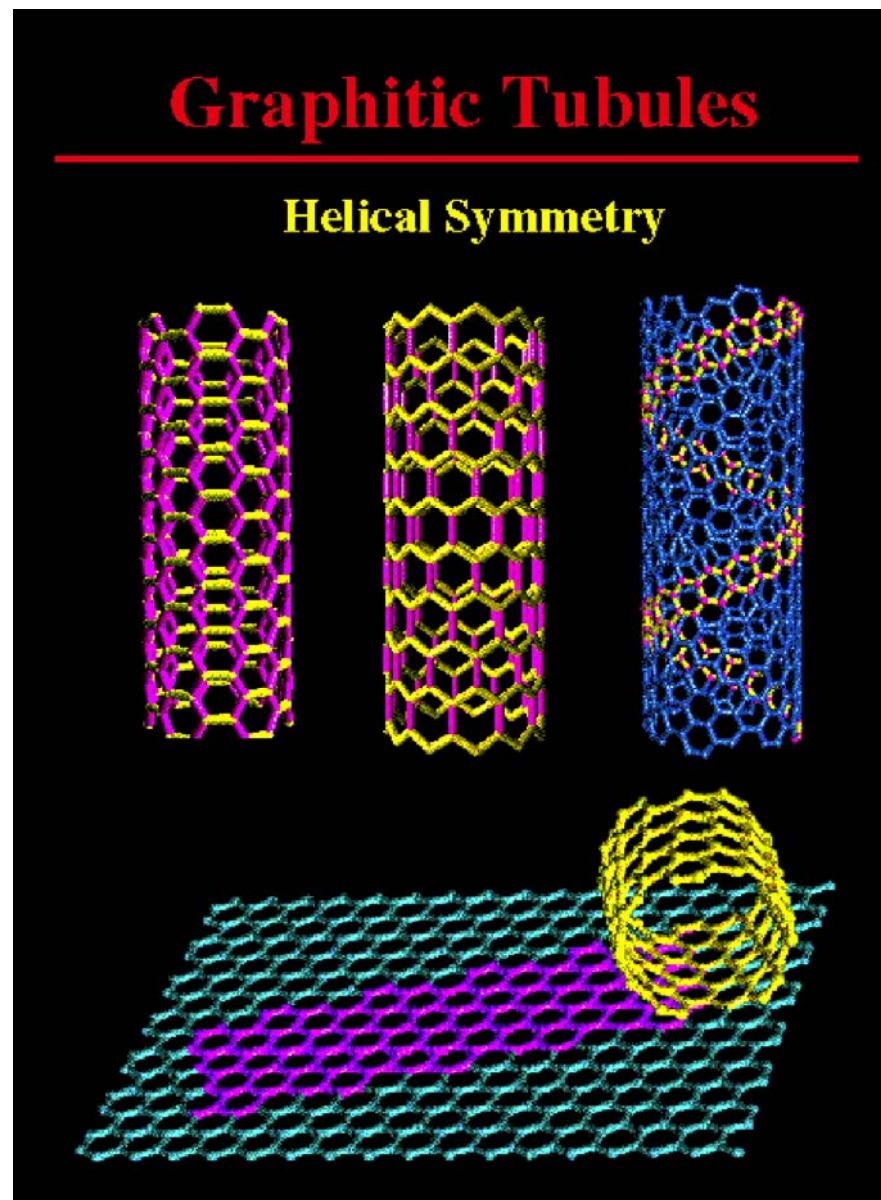


Строение УНТ

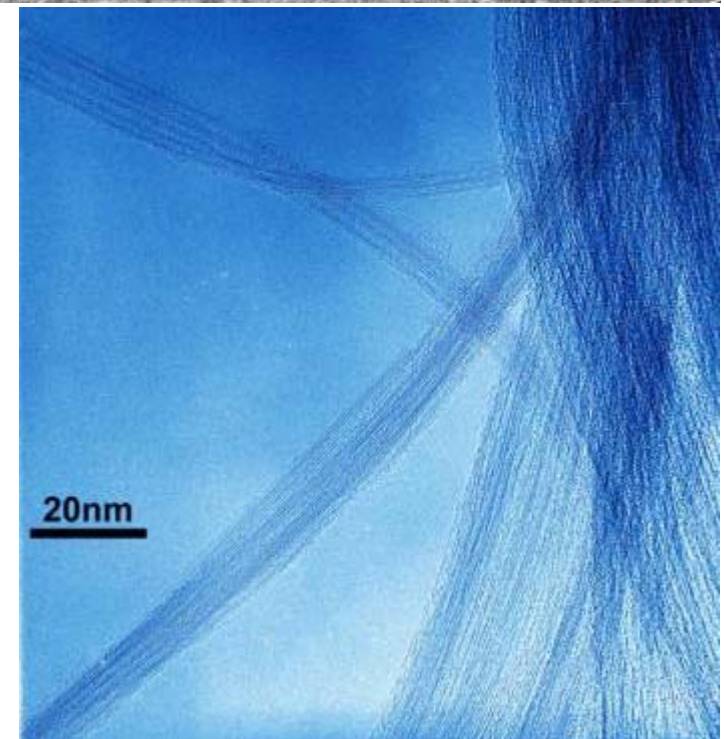
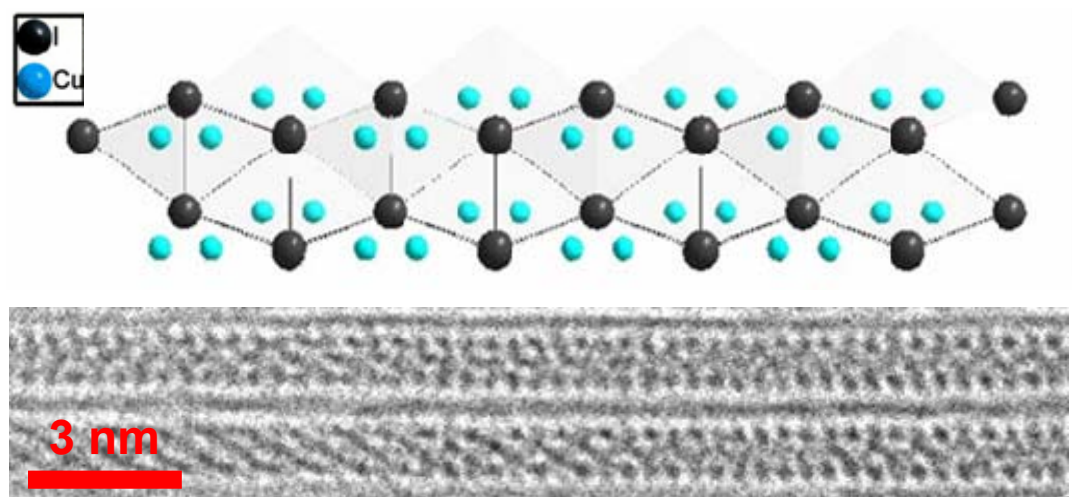
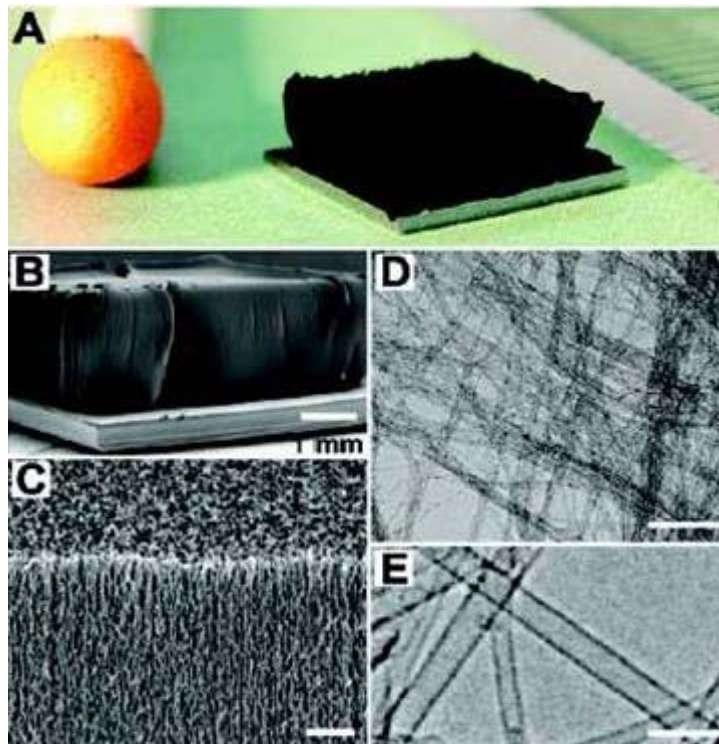


Схематическое получение
zig-zag УНТ (10,10) из
графитового листа

Кресло (n,n) – металлические
Зигзаг (n,0) – преимущественно полупроводники
Хиральные (n,m) $n \neq m$ – преимущественно
полупроводники и диэлектрики



Углеродные нанотрубки (МГУ – ИК РАН)



«космический лифт»

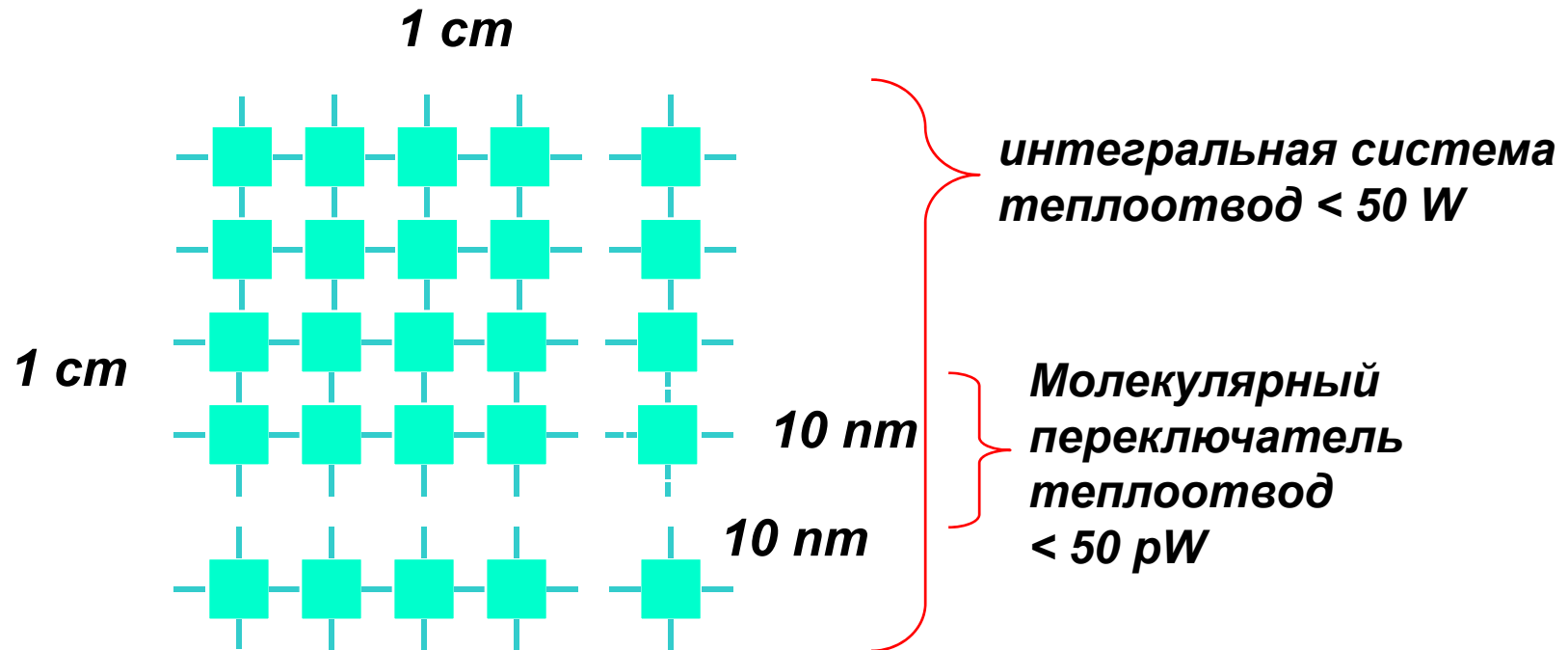
Сенсоры

Нанoeлектроника

Электролюминесцентные
дисплеи

Основание

Главная цель молекулярной электроники (*Science, Nature, Physics Today, etc.* 2001 - 2005) – создание интегральной системы с плотностью устройств $10^{12}/\text{cm}^2$

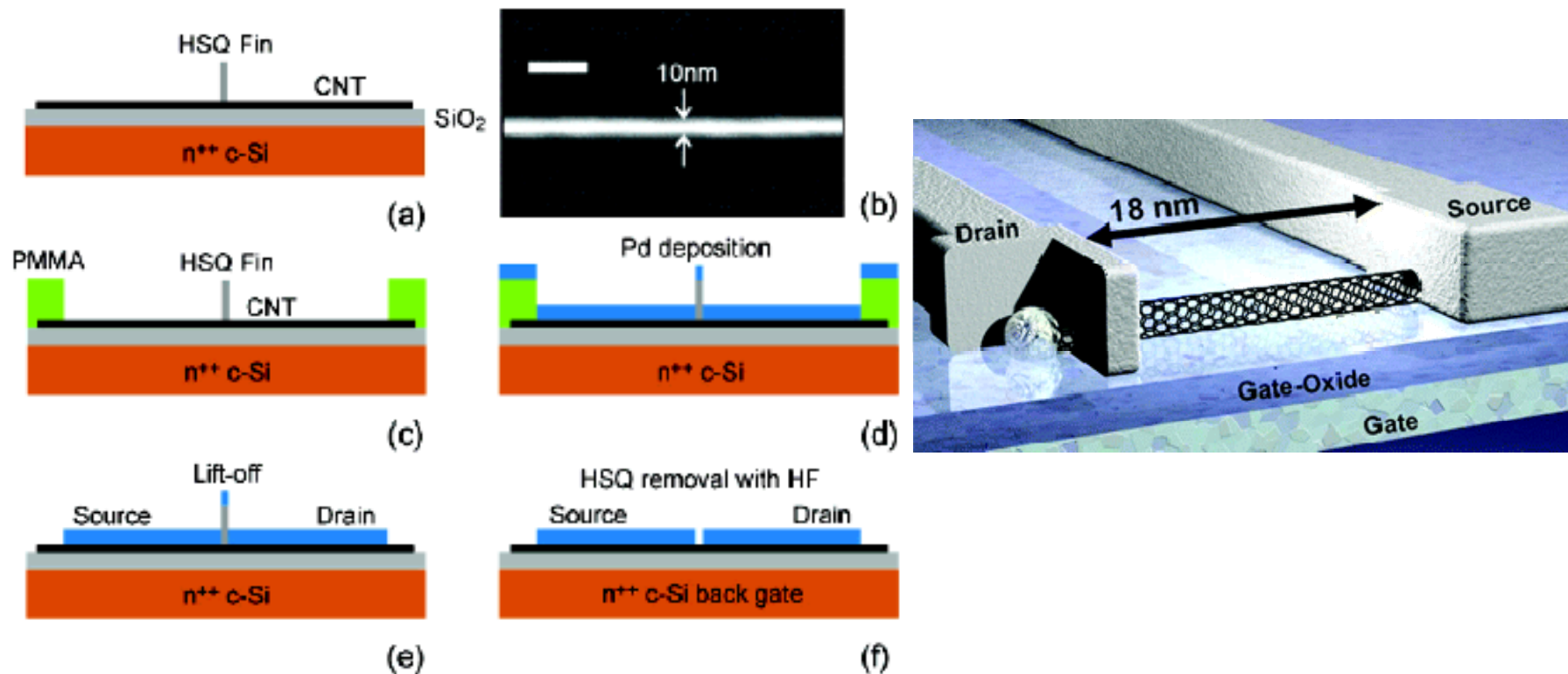


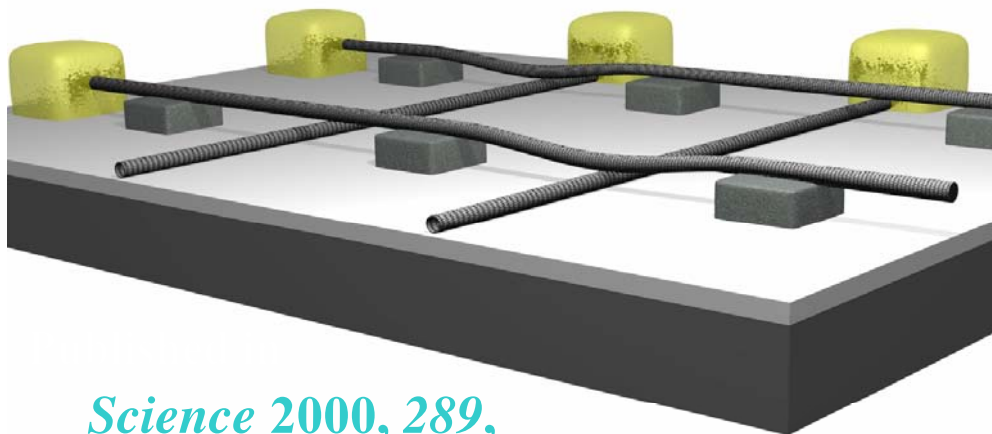
Суб-20 nm короткие СНТ транзисторы

NANO
LETTERS

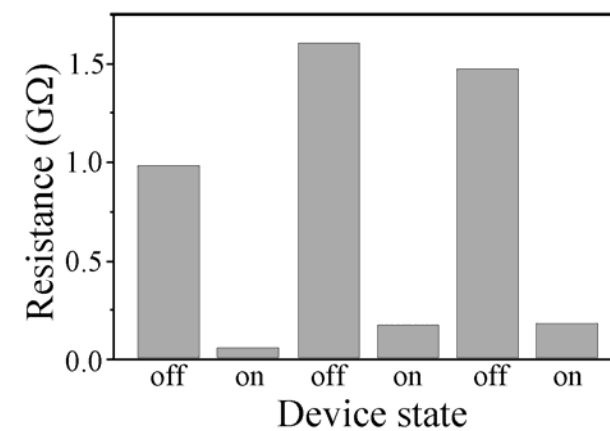
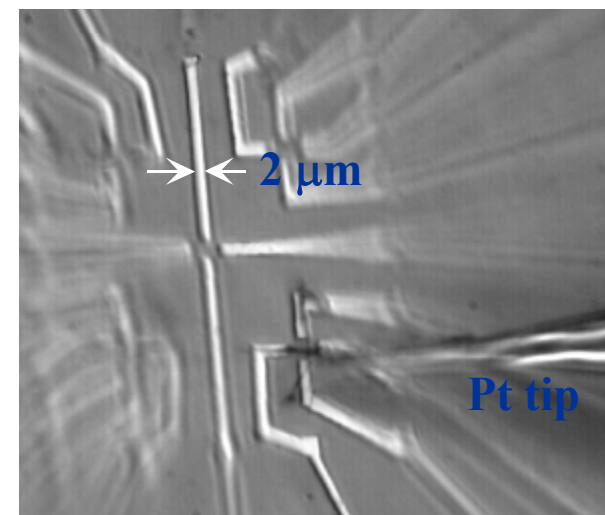
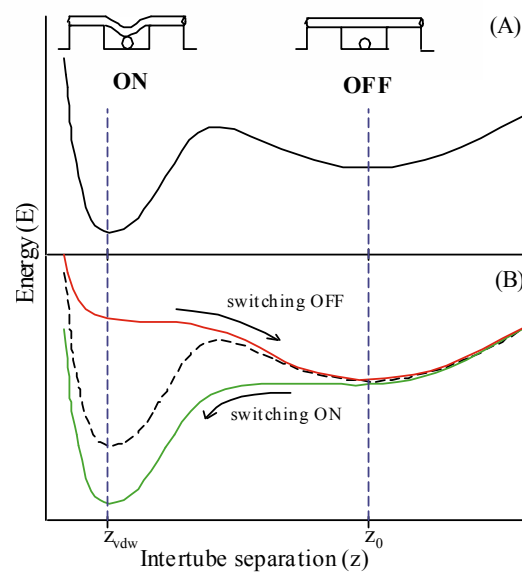
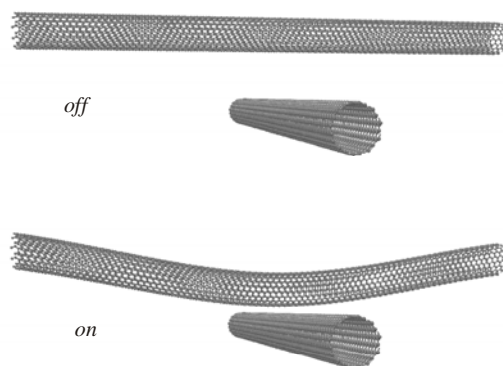
2005
Vol. 5, No. 1
147–150

Углеродные ОСНТ полевые транзисторы с каналами суб-20 nm длины и отношениями тока включения к току насыщения $>10^6$. ОСНТ диаметрами от 0.7 до 1.1 nm, выращенные на островках катализатора методом CVD при 700 °C образуют эти каналы. Использованы электронно-лучевая литография в комбинации HSQ и нанесения PMMA резиста для приготовления структуры коротких каналов и областей истока и стока. НТ транзисторы показывают рабочие токи, не превышающие 15 mкA при напряжении исток-сток 0.4 V.



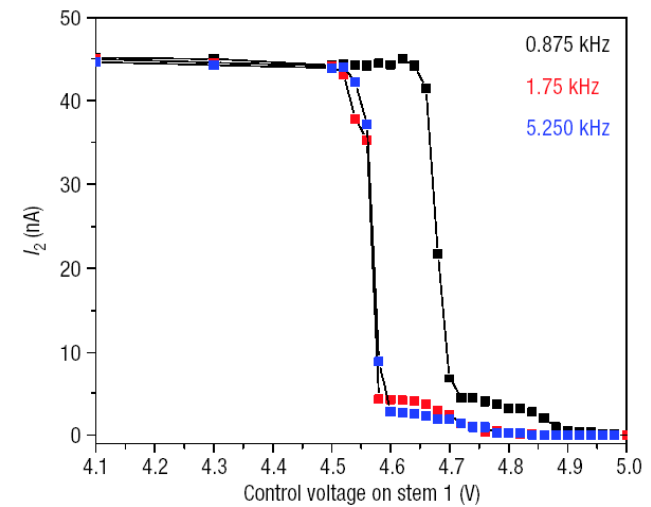
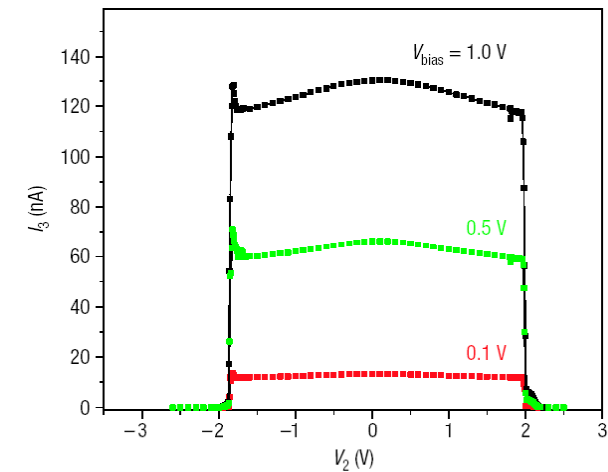
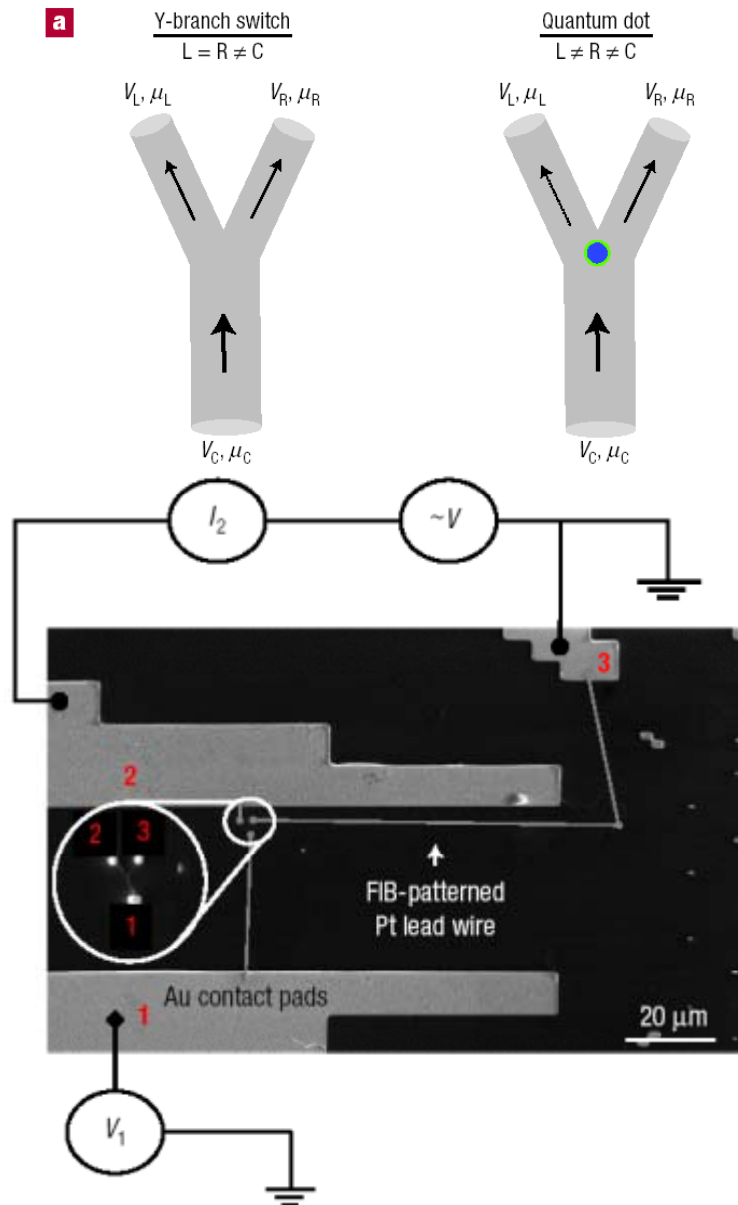


Science 2000, 289,
94



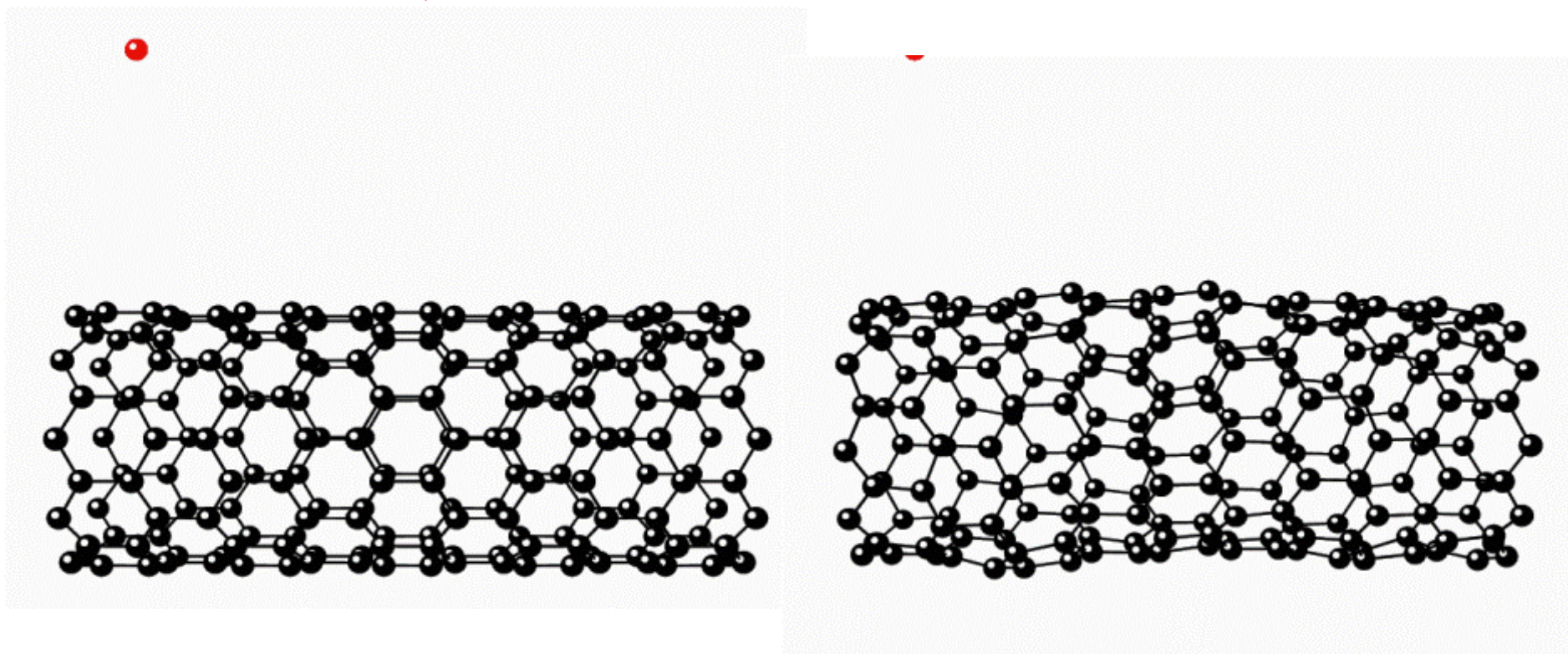
Эффекты переключения и логики в Y-соединениях СНТ

NatMat aug2005



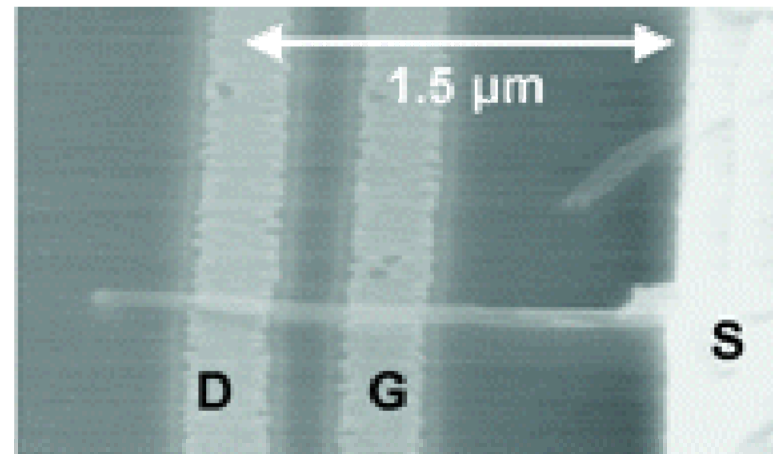
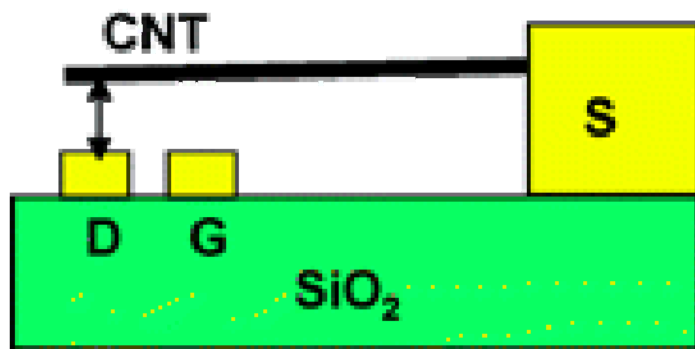
Столкновения между молекулами окружающего газа и НТ весьма важны во время роста НТ и при их использовании в сенсорах.

Поэтому важно понять динамику взаимодействия между молекулами газа и НТ. Кино показывает столкновения между Хе атомом (красным) и УНТ. На первом кино показана НТ при 0 К – при столкновении Хе на НТ образуется вмятина. На втором – одноразовая встреча Хе атома с трубой при 1300 К. Кадры сделаны за более короткое время (кадр в 10 fs) – ясно видно движение атомов с большой амплитудой из-за высокой температуры. Экспериментальные результаты показали, что такие столкновения изменяют термоэлектрические свойства и проводимость (рассеяние электронов в НТ из-за возбуждения фононов), что позволяет делать очень чувствительные к инертному газу сенсоры. (Н Е Romero *et al.* 2005 *Science* 307 89).



УНТ нанореле

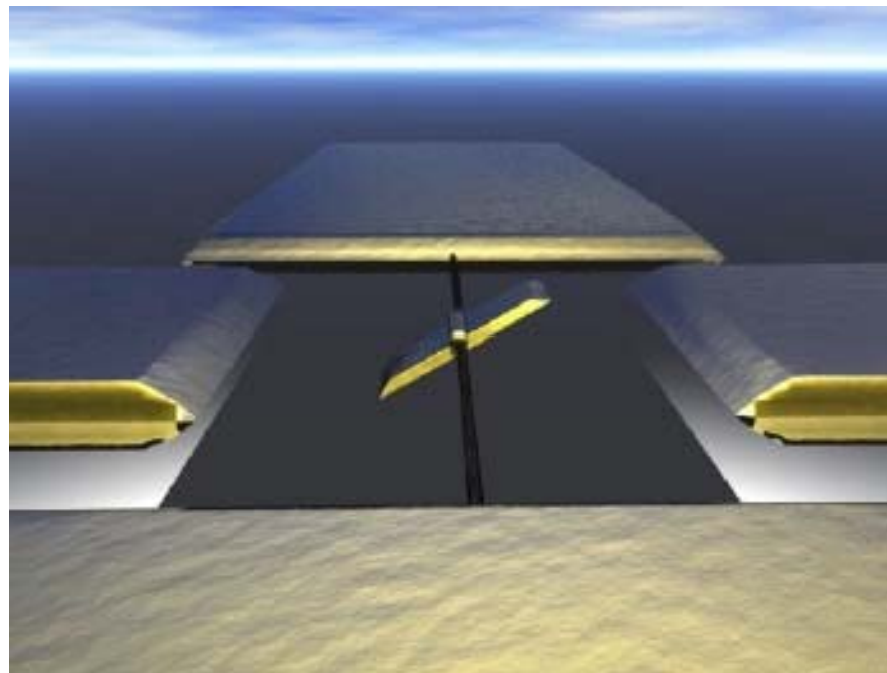
Nano Lett 2005



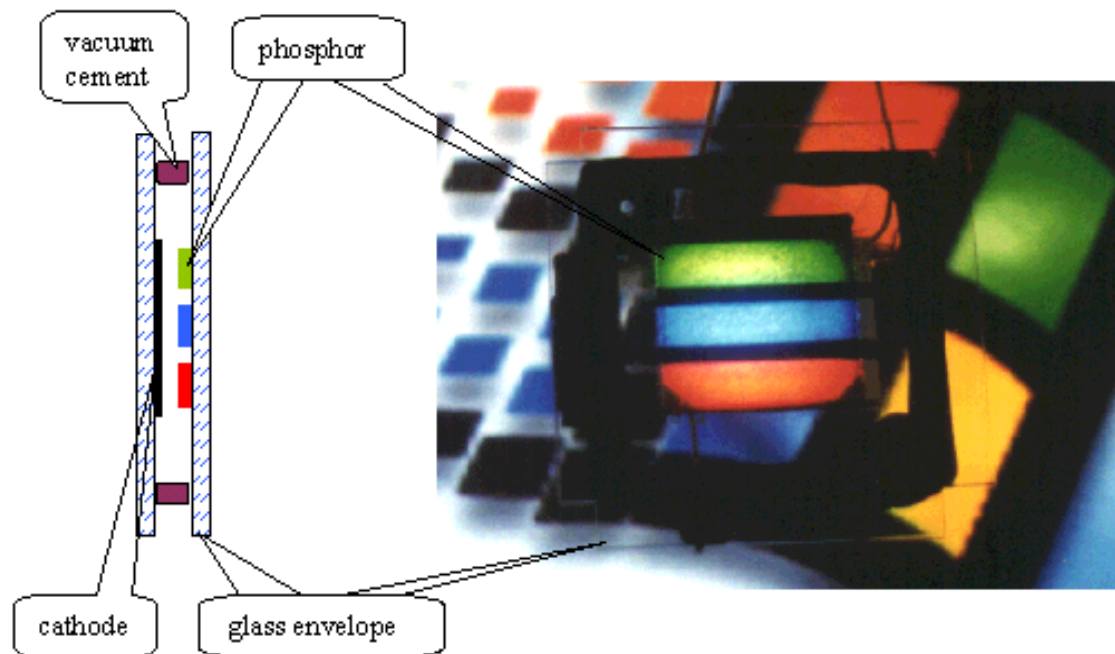
Основа – многослойная углеродная нанотрубка. Реле отклоняется при приложении напряжения на затворе (G) до контакта (механического и/или электрического) с электродом стока (D), так что цепь замыкается. Возможность выполнять многократные циклы переключения показывает, что УНТ – удобные и практические системы для разработки наноэлектромеханических устройств подобного вида.

Scientists from the University of California at Berkeley, US, and Lawrence Berkeley National Laboratory, US, claim they have made the first true NEMS (nanometre-scale electromechanical system) device based on a multiwalled carbon nanotube.
При нагреве прямоугольная металлическая пластинка приваривается к МСНТ «ручке» (A Fennimore *et al.* 2003 *Nature* 424 408).

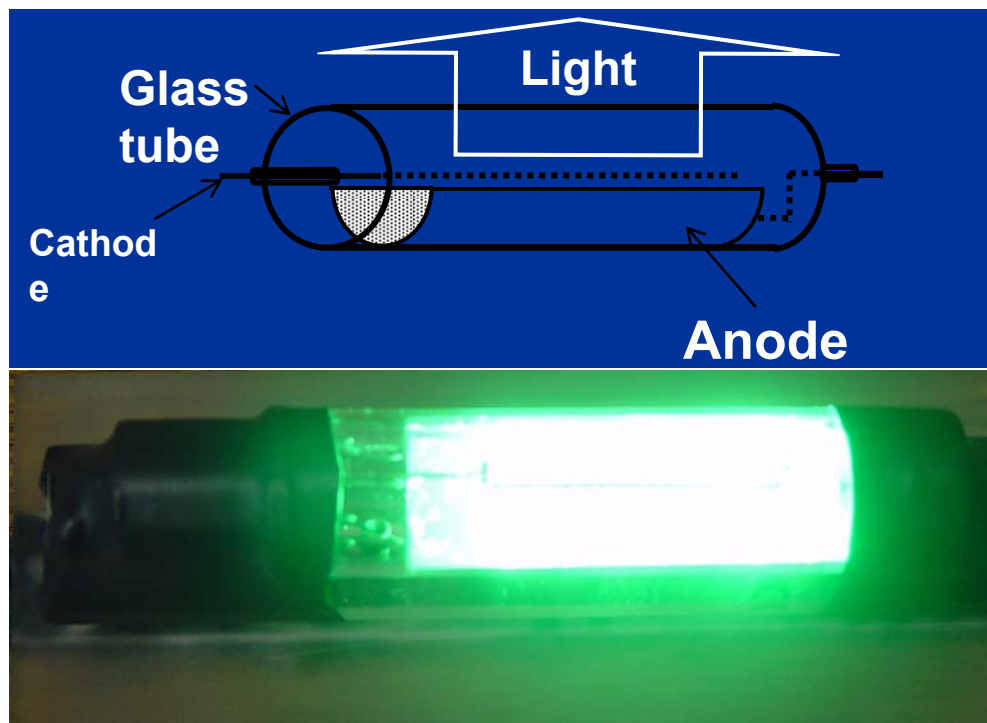
При напряжениях до 5 В между роторной пластиной и статорами можно контролировать позицию, скорость и направление вращения роторной пластины



A. Zettl *et al.*, UC Berkeley, *Science* (2004)

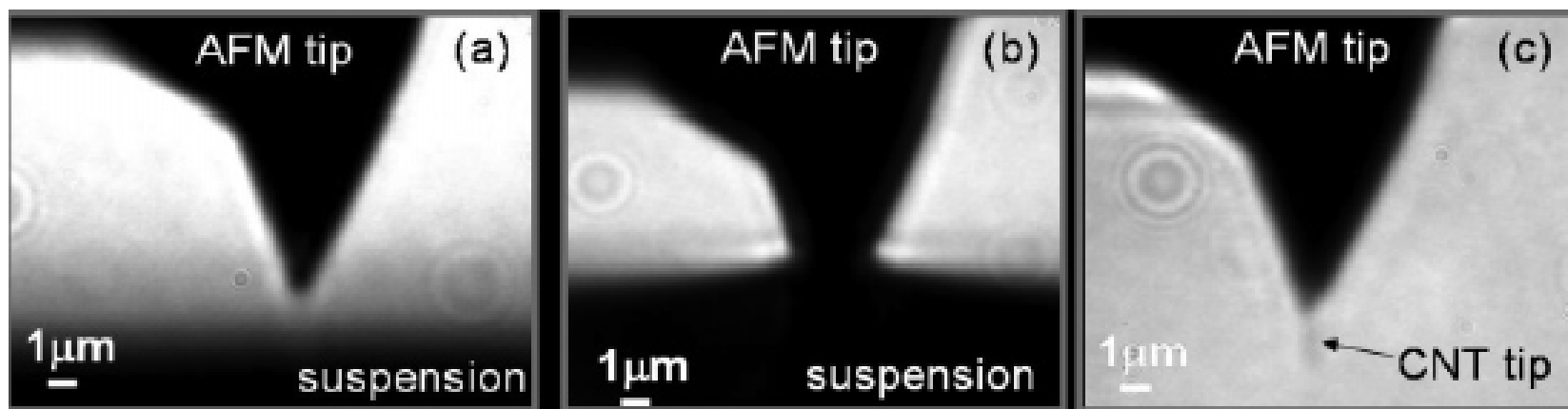


Пиксель
панельного дисплея с
холодным катодом из
УНТ



Лампа –
УНТ цилиндрический
вакуумный диод с
фосфорным слоем на
аноде-отражателе

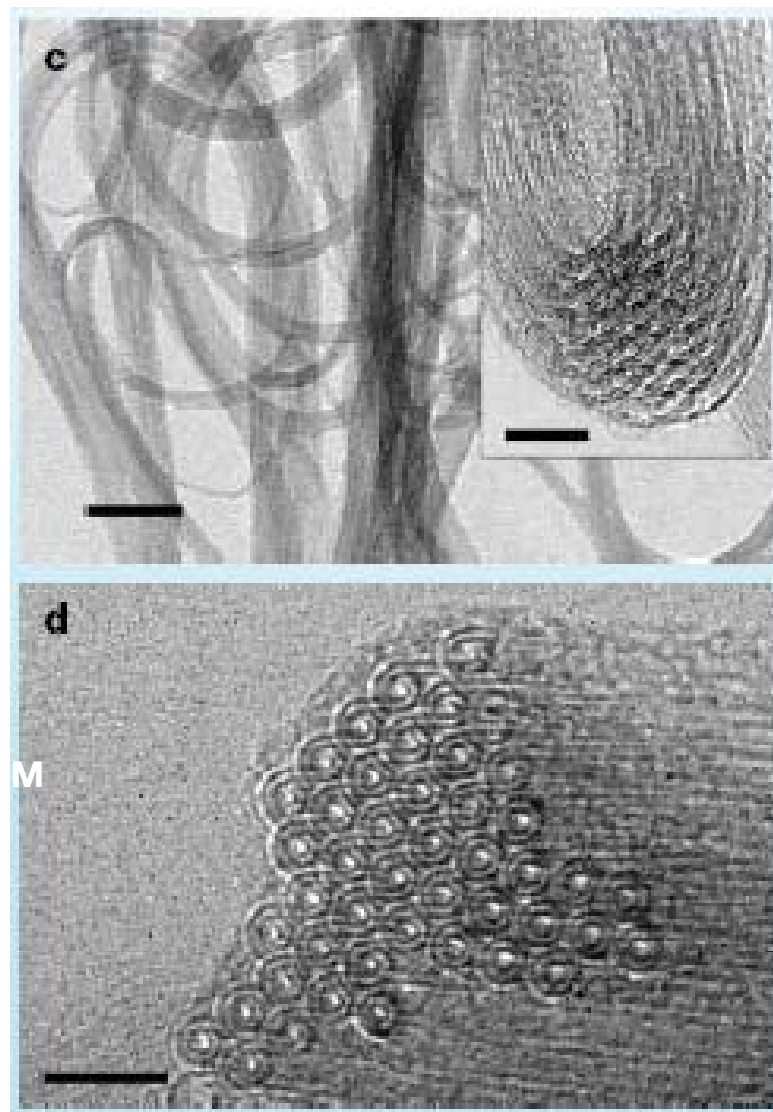
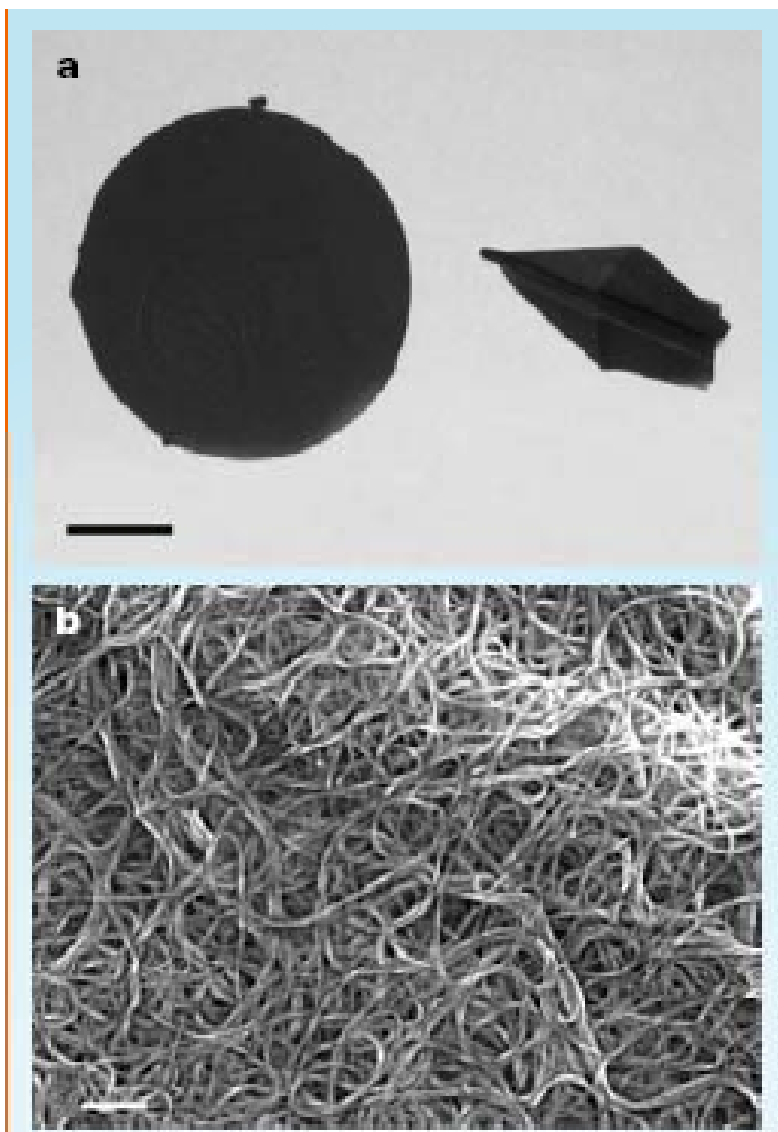
Быстрое и репродуцированное приготовление AFM зондов



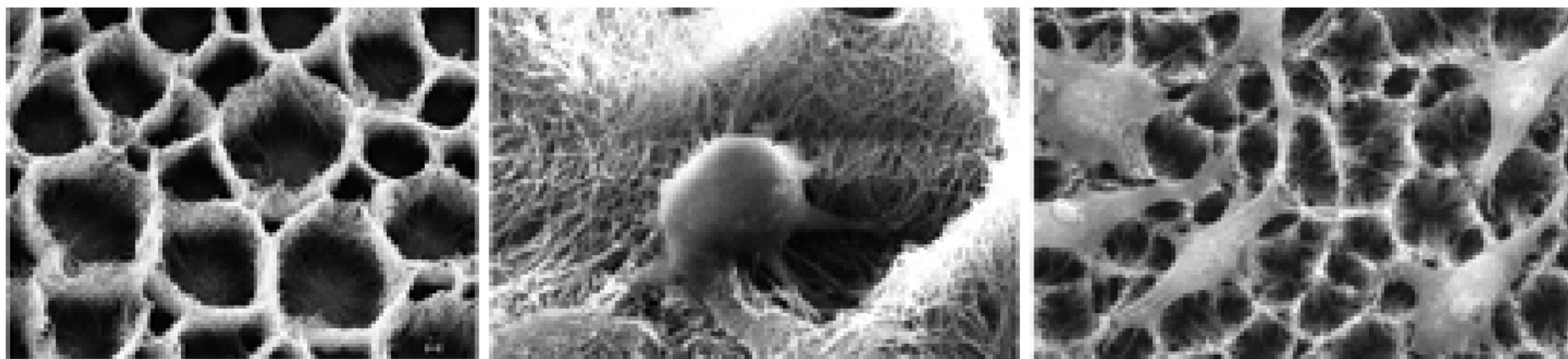
ОМ изображение Si AFM зонда (a) до, (b) во время и (c) после процесса диэлектрофореза монтажа УНТ наконечника. Переменное поле прикладывается между AFM зондом и противоположным электродом во время нанесения. УНТ наконечник смонтированный на Si AFM зонде виден на изображении с.

«Бумага» из двуслойных НТ 'Buskupaer' *Science 2005*

Использовался обычный катализатор молибдена в конце печи и железа – в ее центральной части. Смесь метана и аргона (1:1) впрыскивалась в этот реактор 10 min при 875 °C.



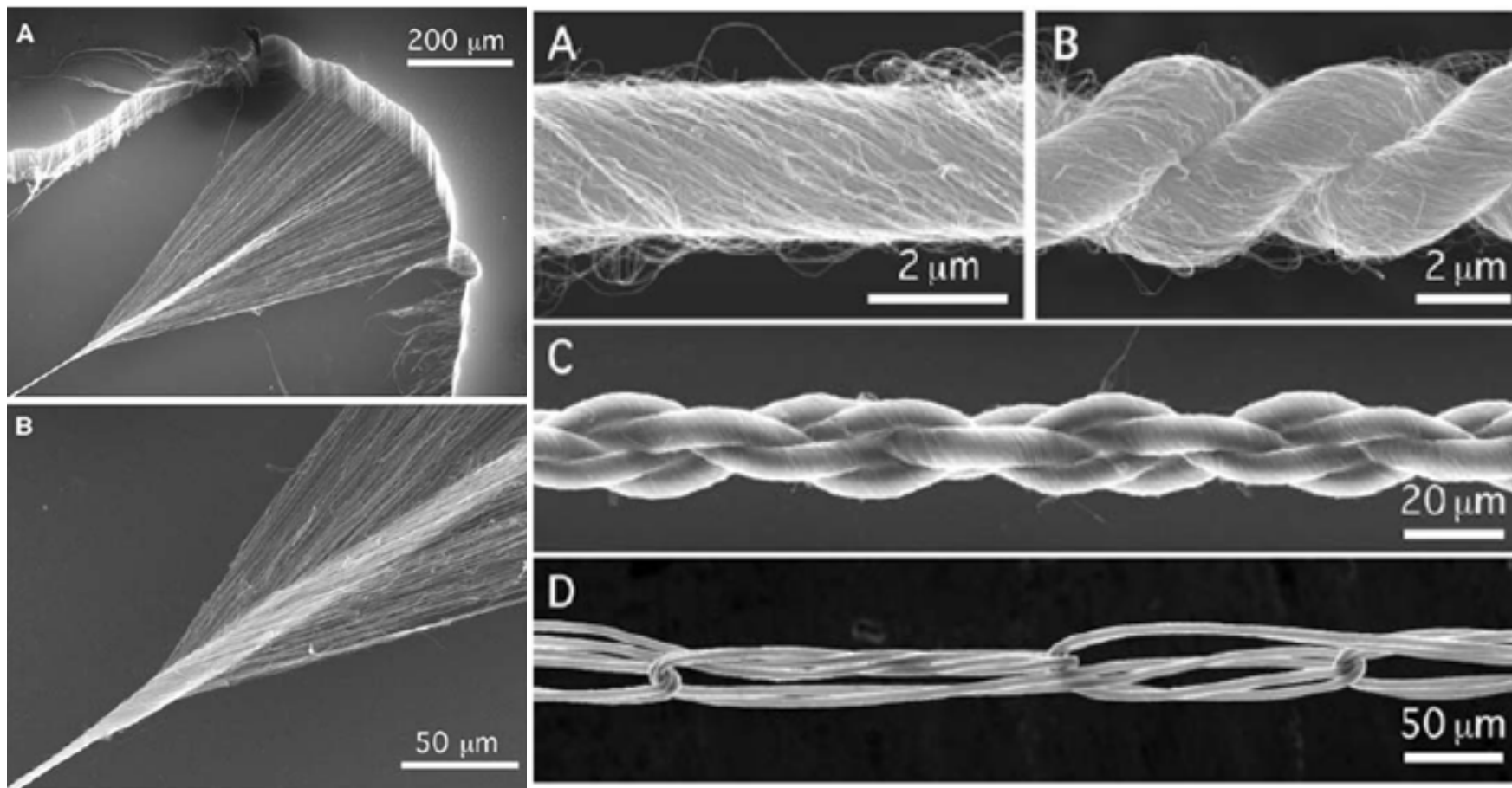
Изготовление и биосовместимость основанных на УНТ 3D сеток как подложек для клеточного роста



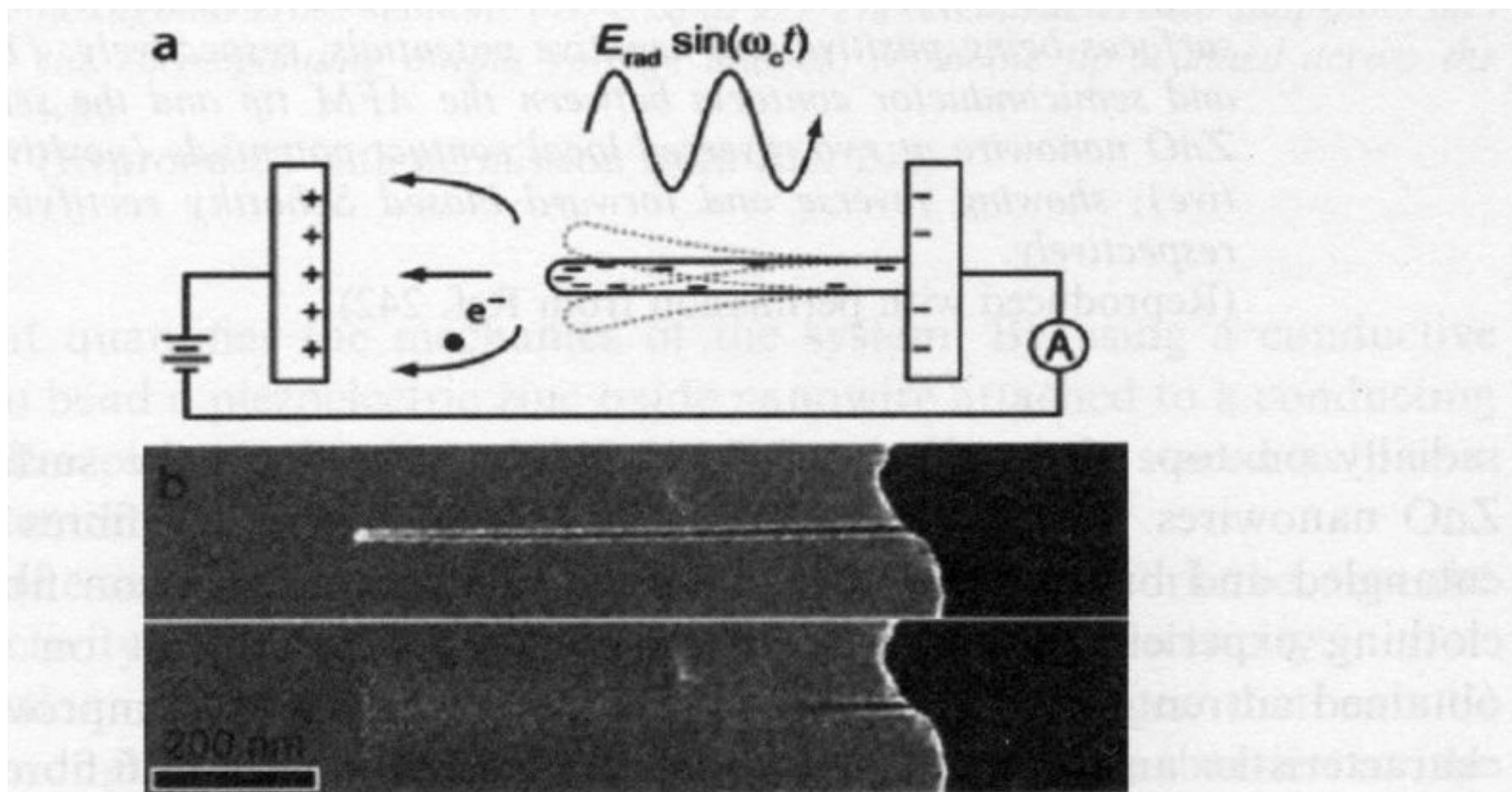
Тонкие пленочные сетки из МСНТ приготовленные под давлением, химически вызванным капиллярными силами на нанотрубки. Во время процесса МСНТ испытывают трансформацию из структуры вытянутых вертикально нанотрубок во взаимозаменяющуюся сетку переплетенных нанотрубок, чья основная особенность – регулярная трехмерная (3D) решетчатая структура. 3D-МСНТ- решетчатые системы - идеальные кандидаты для поддержек/матриц в тканевой инженерии из-за своих структурных характеристик на наномасштабном уровне. Это подтверждено быстрым ростом, размазкой и адгезией фибропластовых клеточных шнуров обычной мыши L929.

Многофункциональные УНТ пряжи выполненной в микромасштабе по древней технологии

Mei Zhang, Ken R. Atkinson, Ray H. Baughman (*Science* 2004)

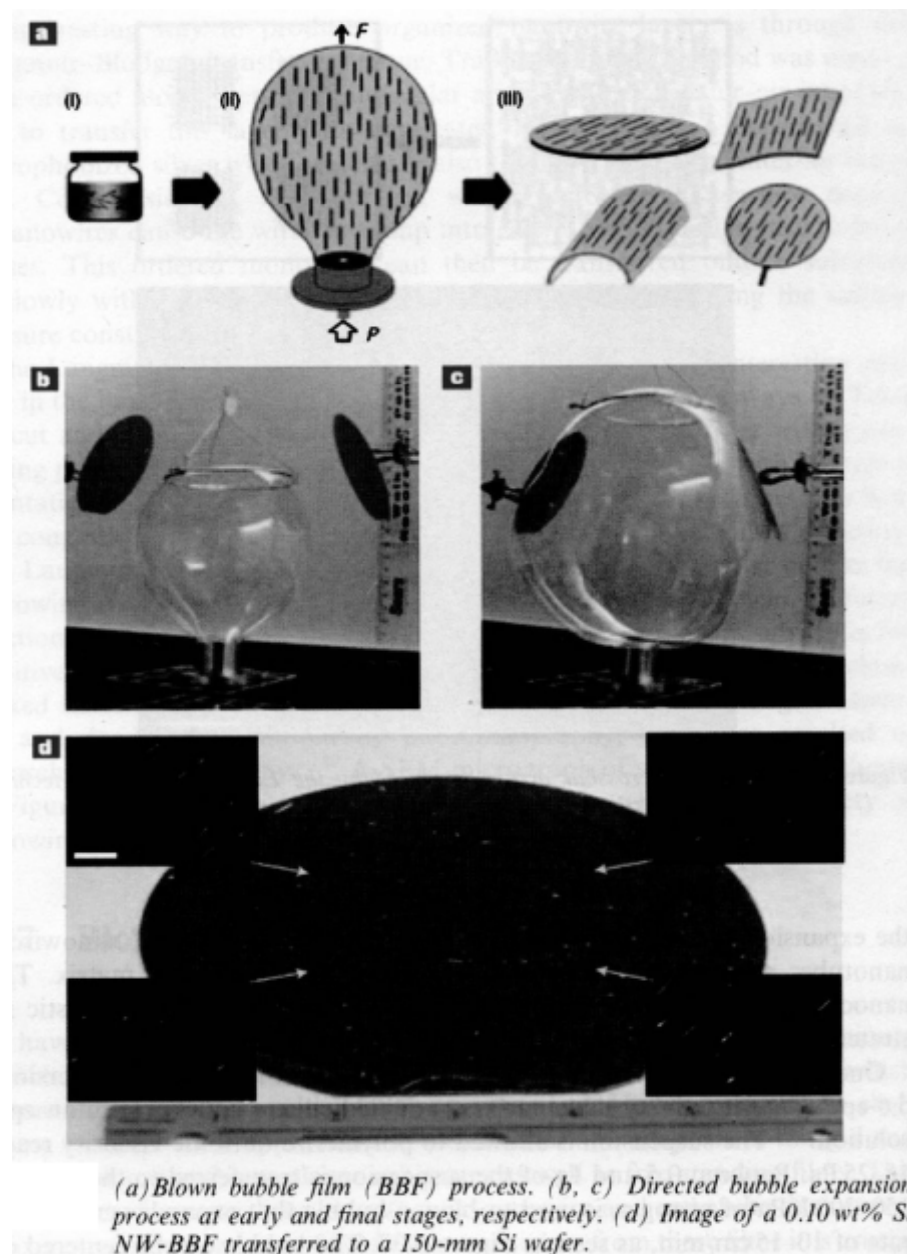


Нанотрубчатое радио

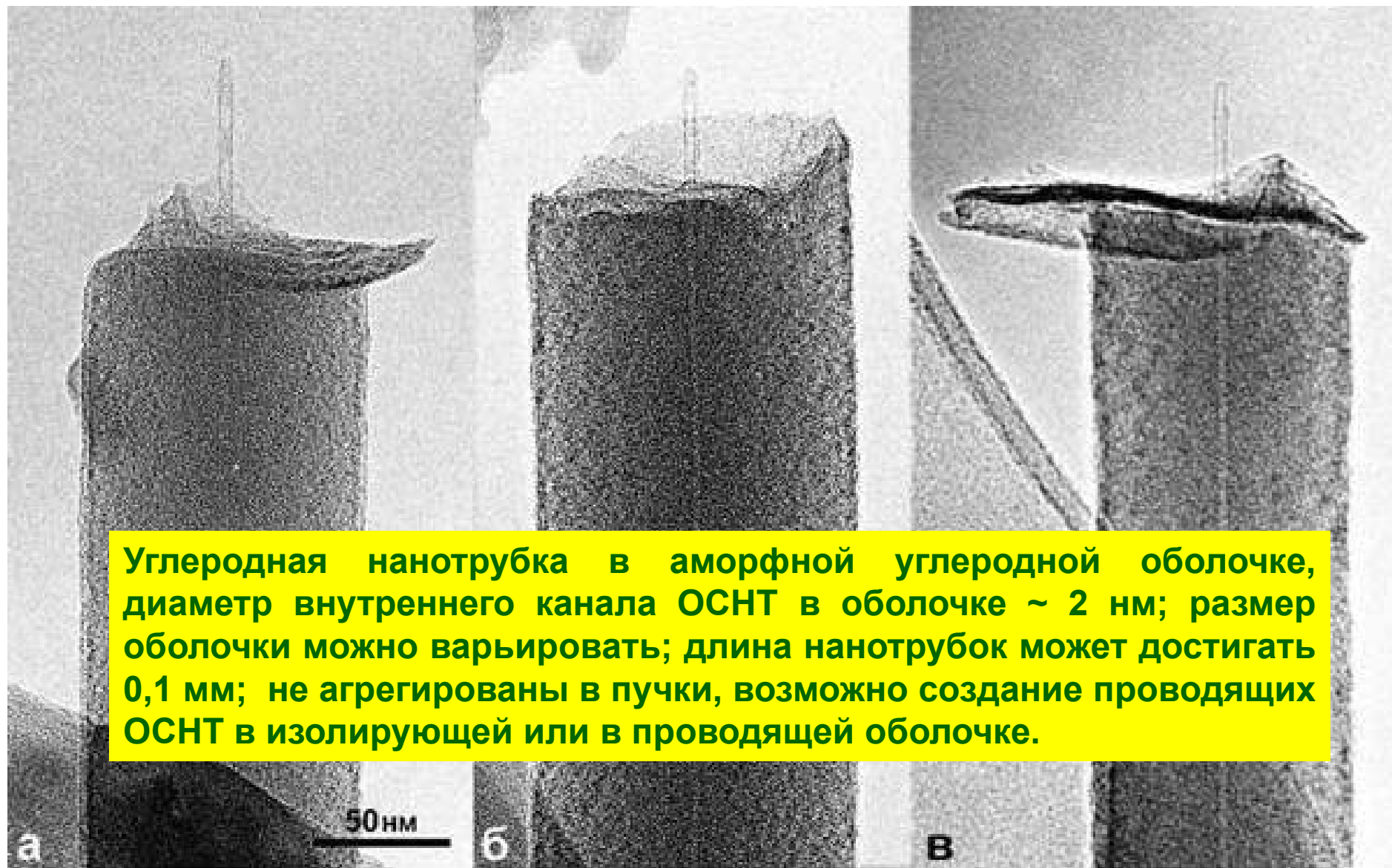


(Top) Four key electronic components integrated into a traditional radio receiver. (middle a) Schematic of the mode of operation of a carbon nanotube receiver and (bottom b) TEM image of the working device off and on resonance during transmission of the radio signal to a speaker.

В пленке мыльного пузыря

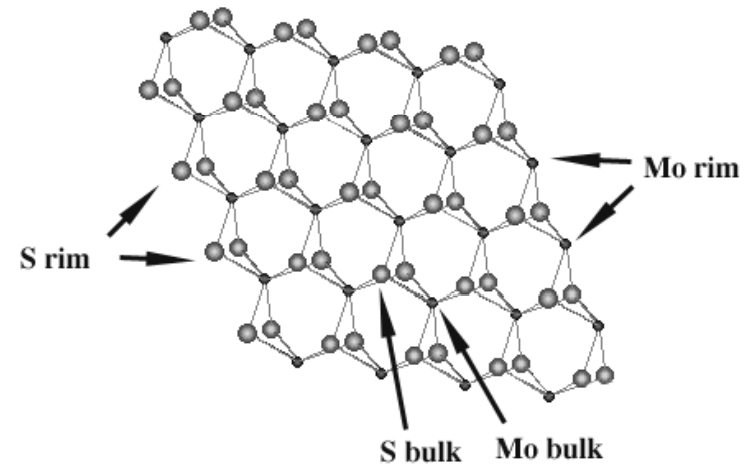
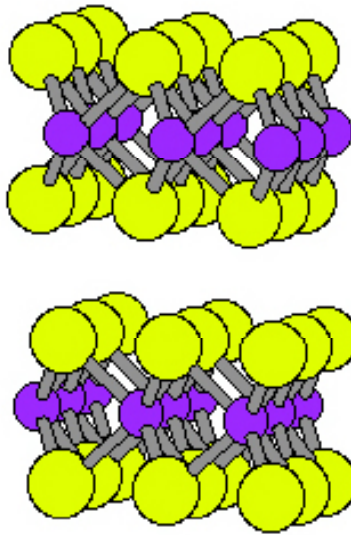
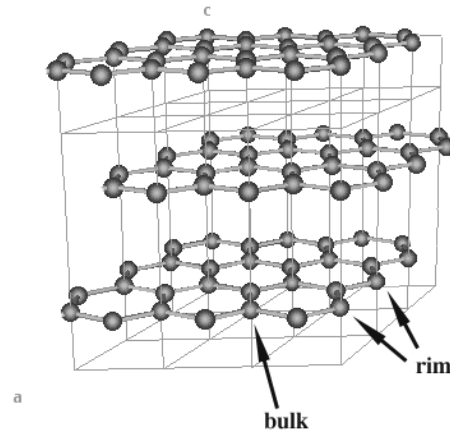


УНТ в аморфной оболочке



Углеродная нанотрубка в аморфной углеродной оболочке, диаметр внутреннего канала ОСНТ в оболочке ~ 2 нм; размер оболочки можно варьировать; длина нанотрубок может достигать 0,1 мм; не агрегированы в пучки, возможно создание проводящих ОСНТ в изолирующей или в проводящей оболочке.

The different bonding of bulk and rim atoms in graphite and MoS₂

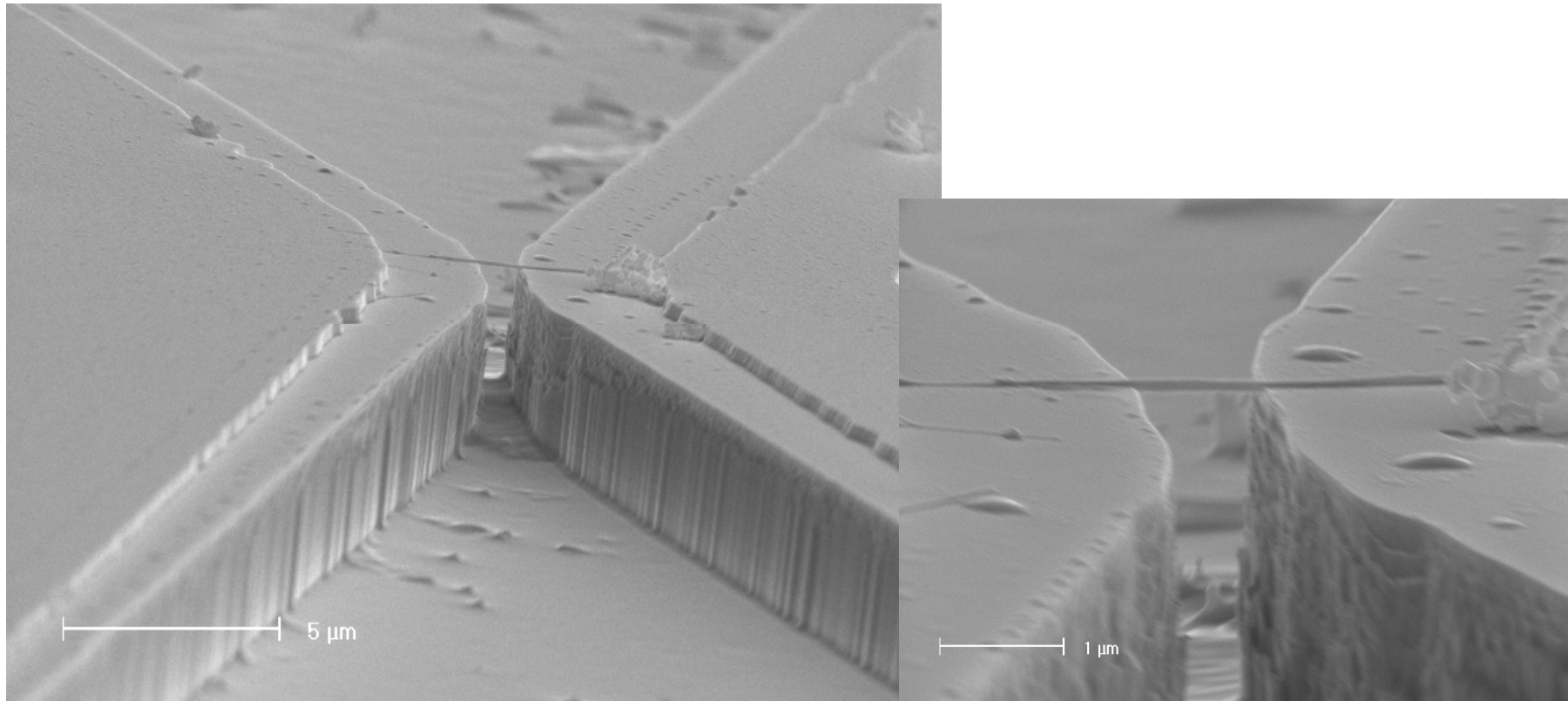


Graphite

MoS₂

R. Tenne and co-workers, *Nature*, 360, 444 (1992); 365, 113 (1993); *J. Am. Chem. Soc.*, 116, 1914 (1994); *Science*, 267, 222 (1995)

Modified WS₂ nanotube placed on gold electrodes



A. Johansson, K. Gartsman, R. Tenne, Y. Oreg and D. Shahar

Fluidized bed reactor for the synthesis of $IF-MS_2$

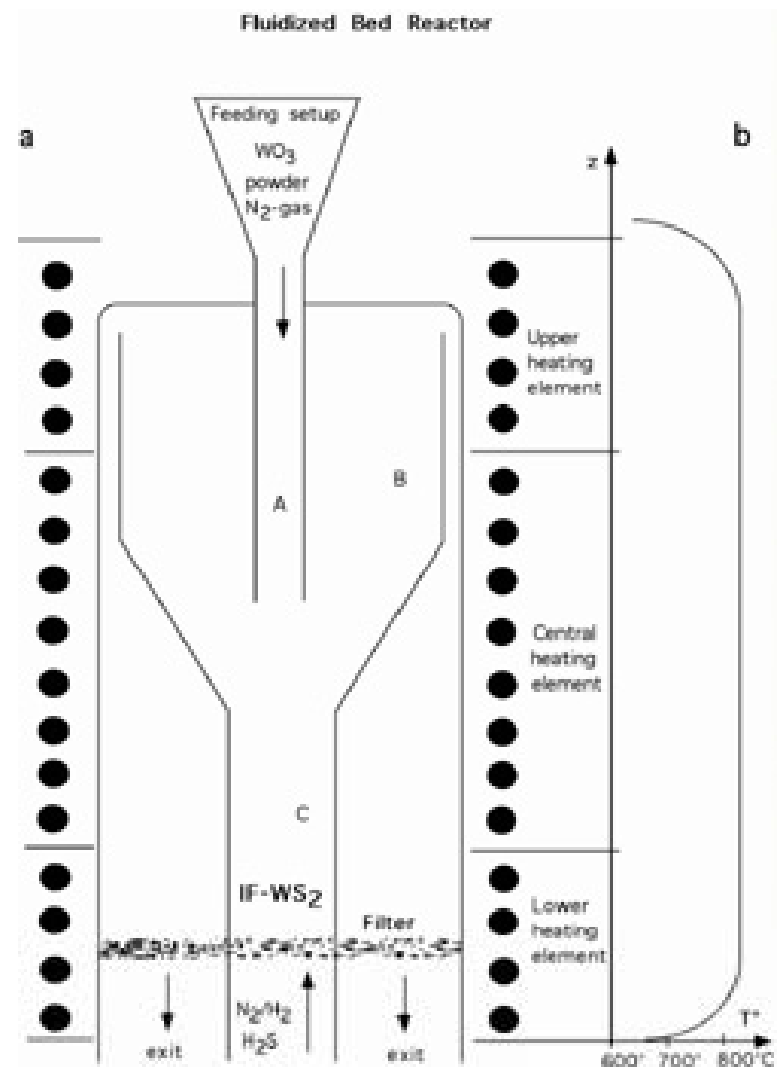
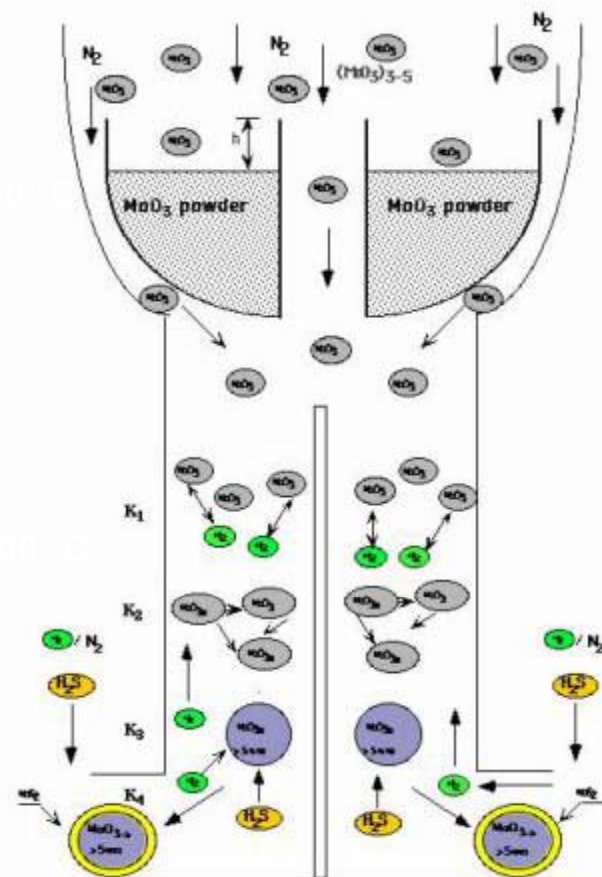
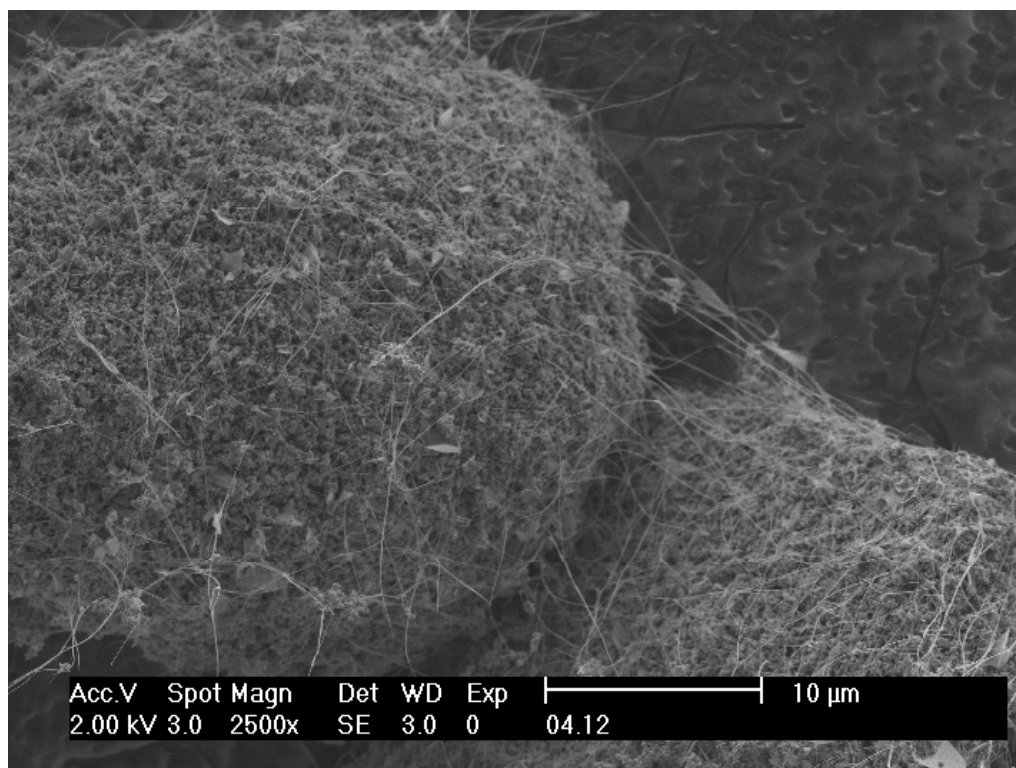


Fig.3. a. Schematic representation of the fluidized bed reactor, b. Temperature profile along furnace (z) axis.

Y. Feldman and R. Rosentsveig, A. Margolin, and R. Tenne

Synthesis of *1F*-MoS₂ by the gas phase reaction between MoO₃ vapor and H₂S

Scheme of the suboxide nanoclusters formation.

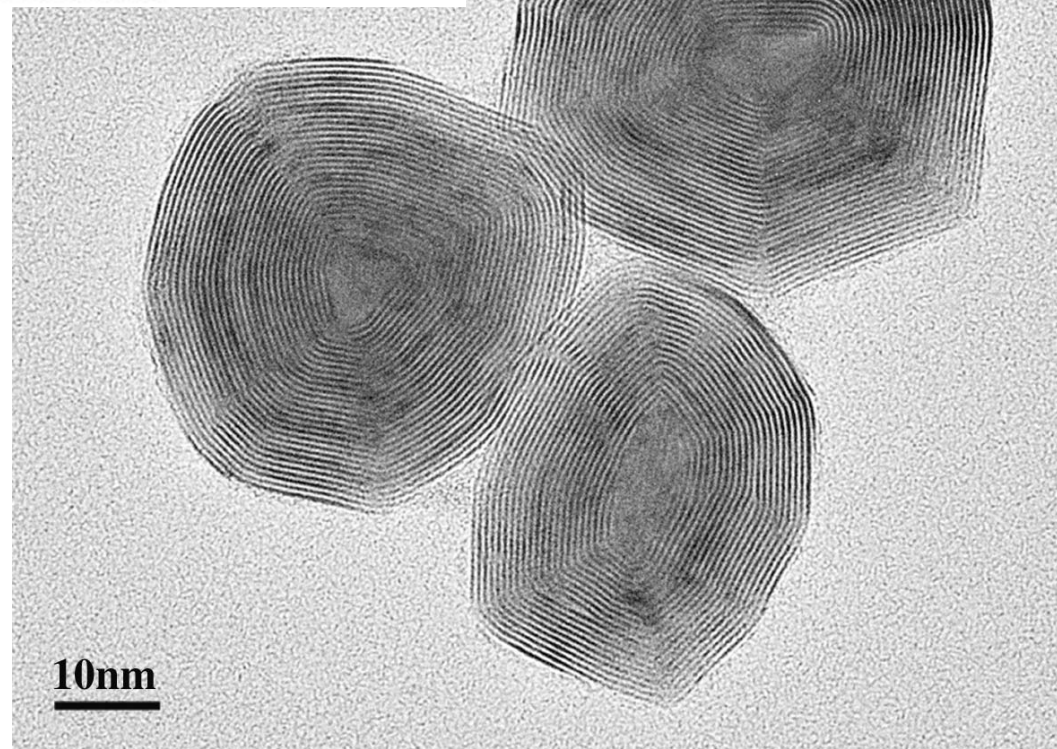
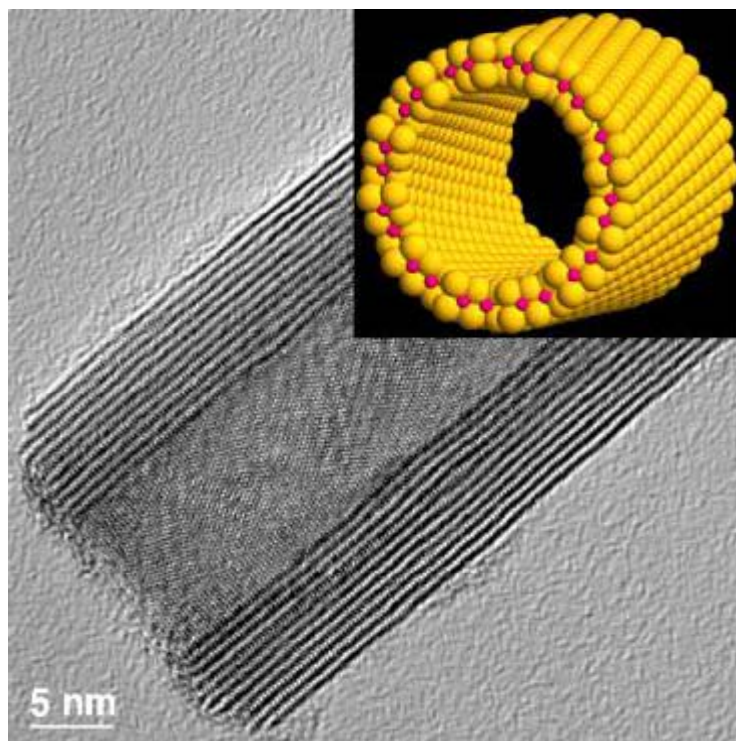
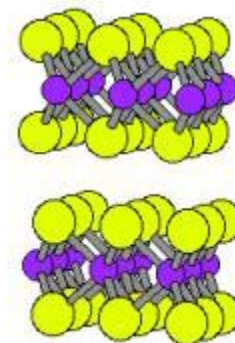


A

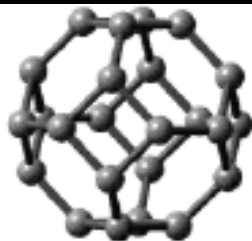
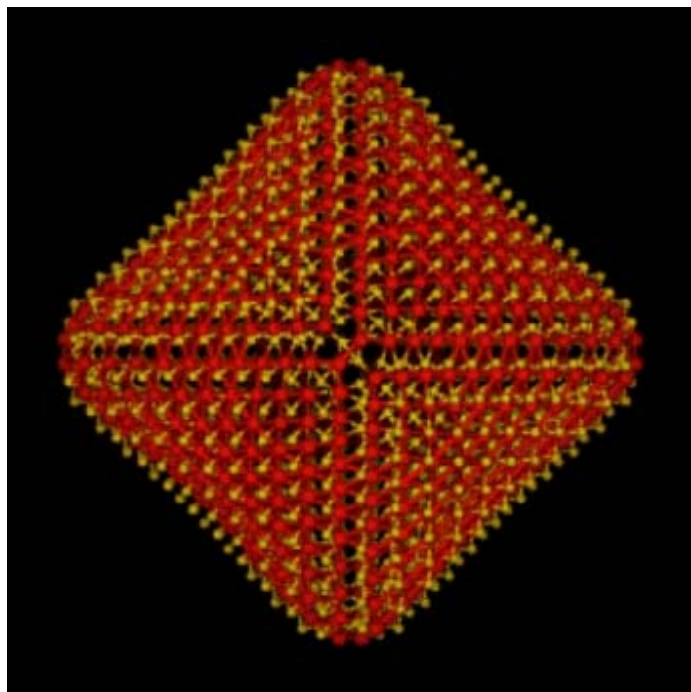
A. Zak, R. Rosentsveig, Y. Feldman and R. Tenne, *J. Am. Chem. Soc.* 122, 11108 (2000)

B

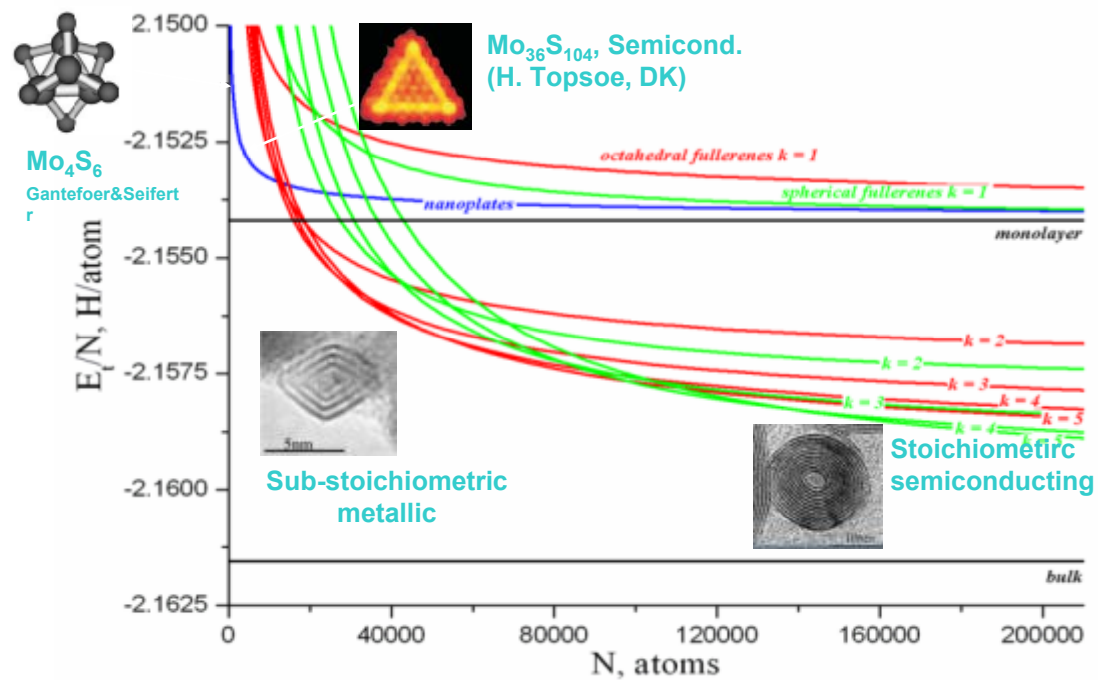
Дисульфиды молибдена/ вольфрама



DFT-TB calculated MoS_2 octahedra



Truncated octahedron



A.N. Enyashin, S. Gemming, M. Bar-Sadan, R. Popovitz-Biro, Y. Prior, R. Tenne, G. Seifert,
Angew. Chem. Intl. Ed., 46, 623 (2007) & *J. Phys. Chem. B*, 110, 25399 (2006)

Катализ

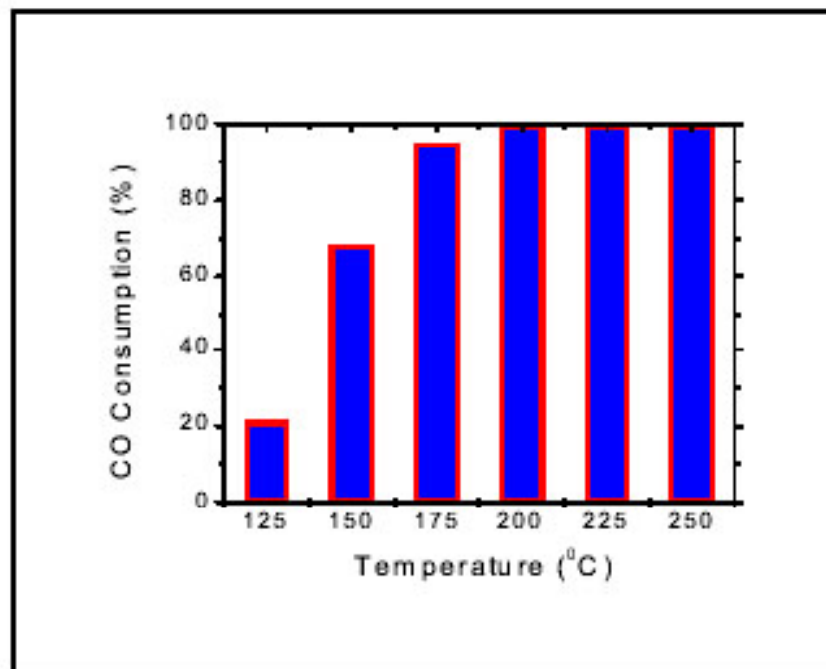


Fig. 2 Catalytic activity of open-ended MoS₂ nanotubes for methanation of carbon monoxide and hydrogen.

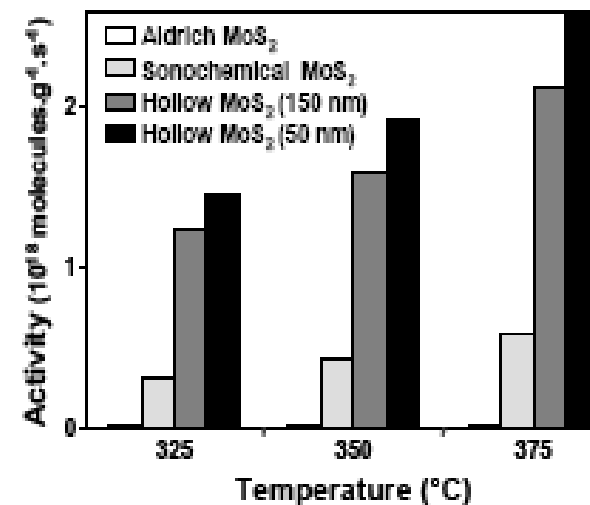
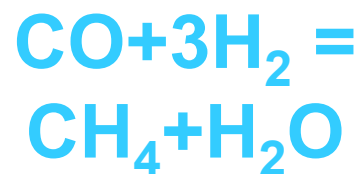
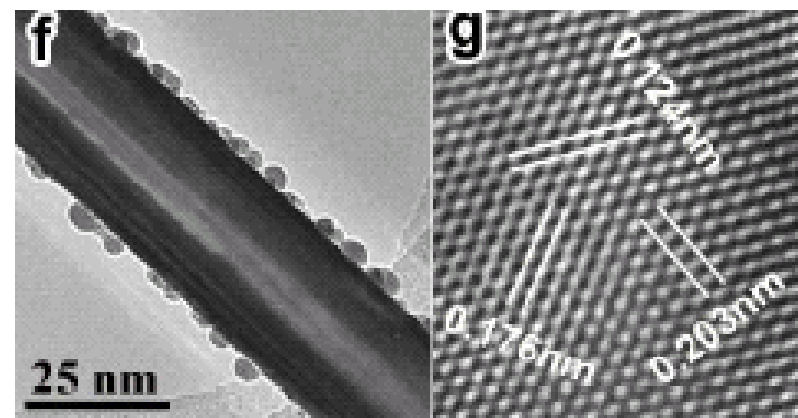
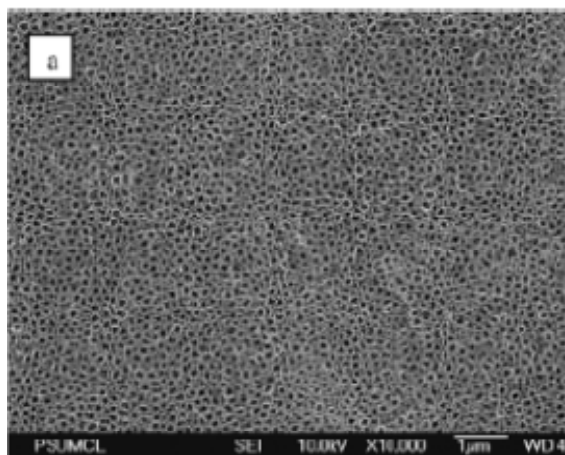


Figure 4. Catalytic activity for hydrosulfurization of thiophene at 325–375°C after 24 hours over sonochemically prepared hollow MoS₂ nanospheres compared to sonochemically prepared MoS₂ nanoparticles,⁴¹ and commercially available micronized powder.

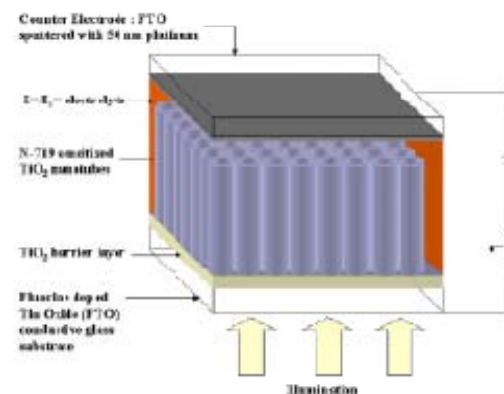


Гидродесульфирование
тиофена наноккомпозитом Ni/MoS₂ HT **94**

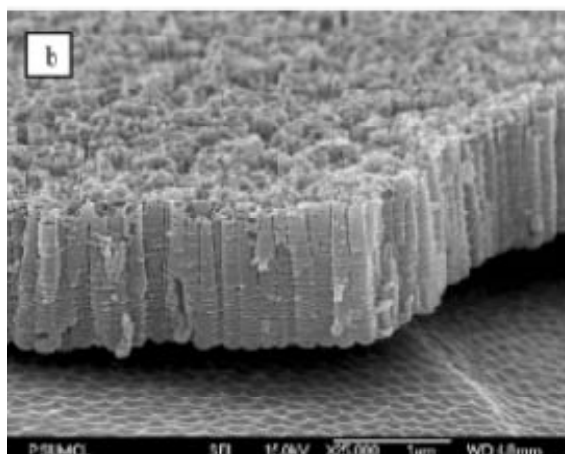
Нанотрубки $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$



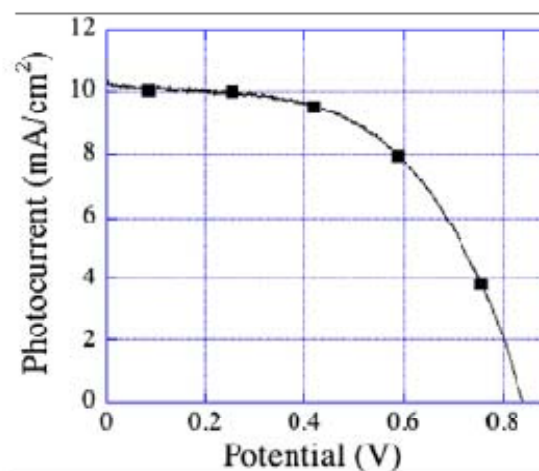
(a)



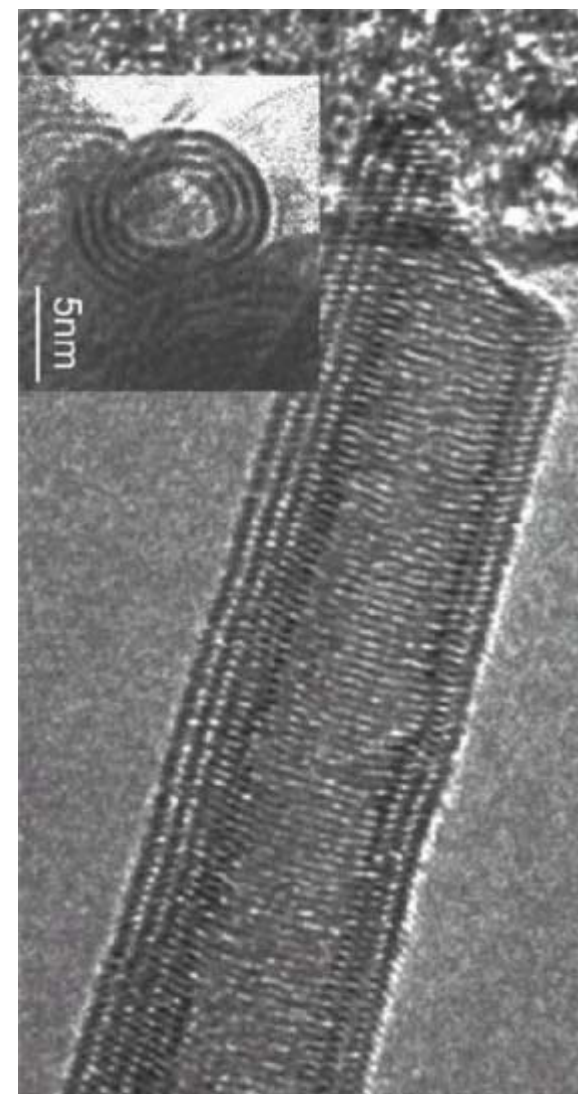
(c)



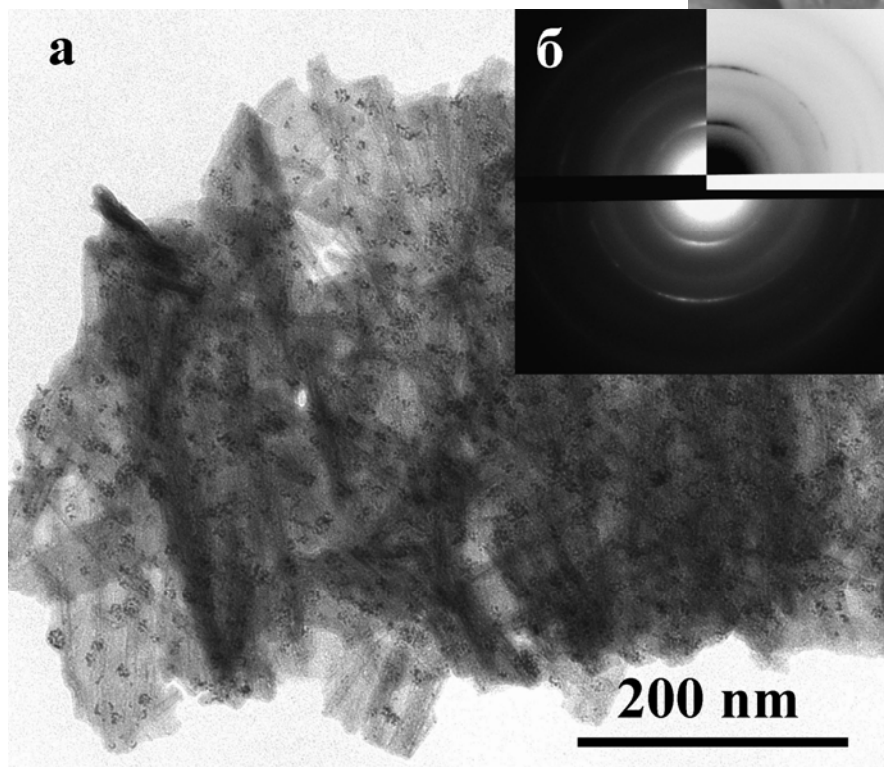
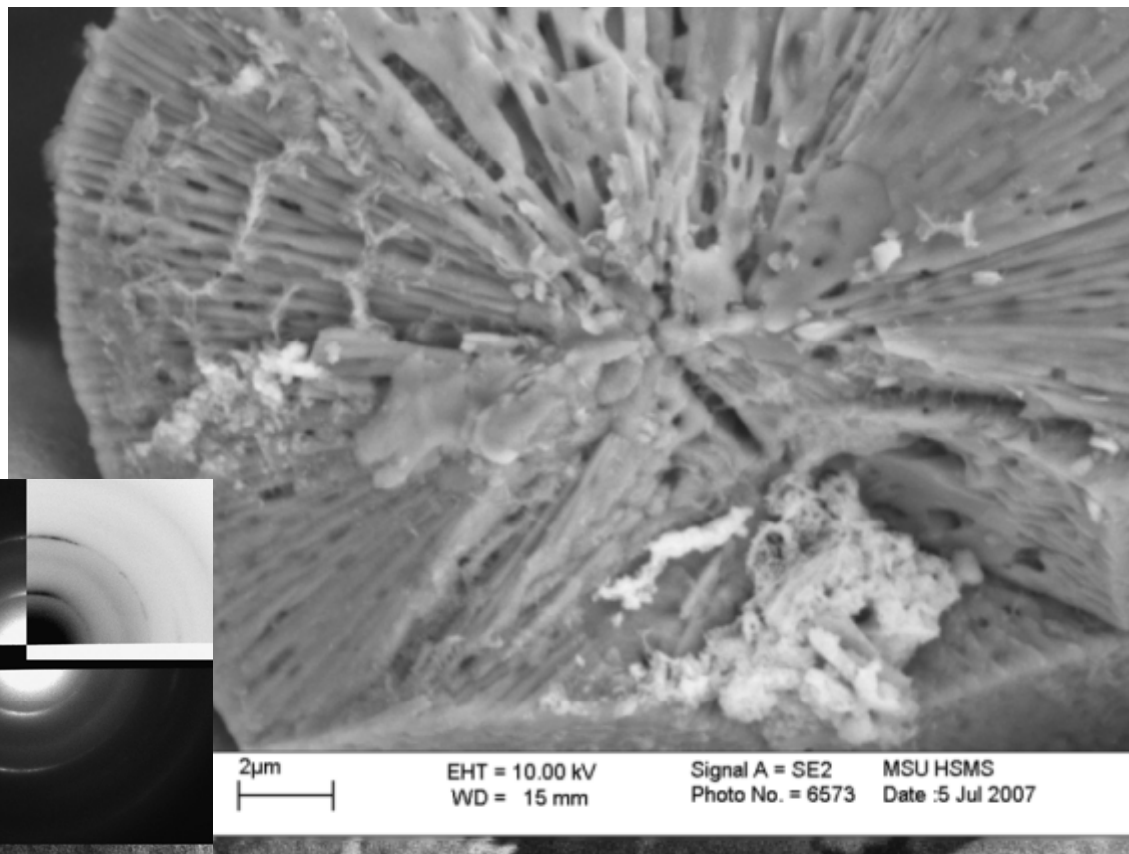
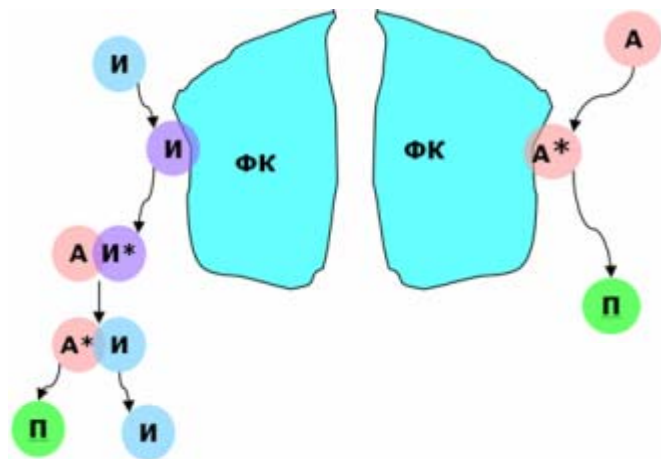
(b)



(d)



Гидротермальная обработка TiO_2



TiO_2 NT – 1-3масс% Pt нанокompозит

Конверсия CO при комнатной температуре

Фотокатализ (экология)

Основное

- 1. Получение нанопроволок основано на специфических механизмах роста кристаллов (ПЖК), проявлении кристаллографической анизотропии или использовании темплатного синтеза**
- 2. Формирование нанотрубок основано на нестабильности планарной системы (краевые эффекты) и формировании более сложных объектов- нанотрубок и наносвитков**
- 3. Формирование наноструктурированных нанопроволок и / или самосборка нанопроволок являются эффективным способом формирования сложных структур с уникальными свойствами**
- 4. Функциональные свойства нанотрубок определяются их составом, морфологией и структурными дефектами**
- 5. К рекордным характеристикам нанотрубок и нанопроволок относятся рекордные механические характеристики в сочетании с нелинейными электрофизическими и электрохимическими характеристиками**