

Функциональные материалы



Пленки и покрытия

Ю.Д.Третьяков, Е.А.Гудилин

Использованы материалы: проф. А.Р.Кауль (МГУ), G.A.Ozin e.a. Nanochemistry, «Современная кристаллография»

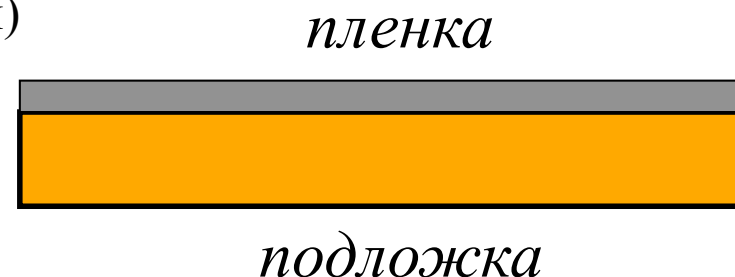
Мотивация

- миниатюризация, микроэлектроника
- гетероструктуры, туннелирование, новые свойства
- упорядоченные нано/микроструктуры
- эпитаксиальная стабилизация, изменение свойств фаз за счет эффектов взаимодействия с подложкой
- искусственные дефекты

Пленка как композит

Взаимодействия:

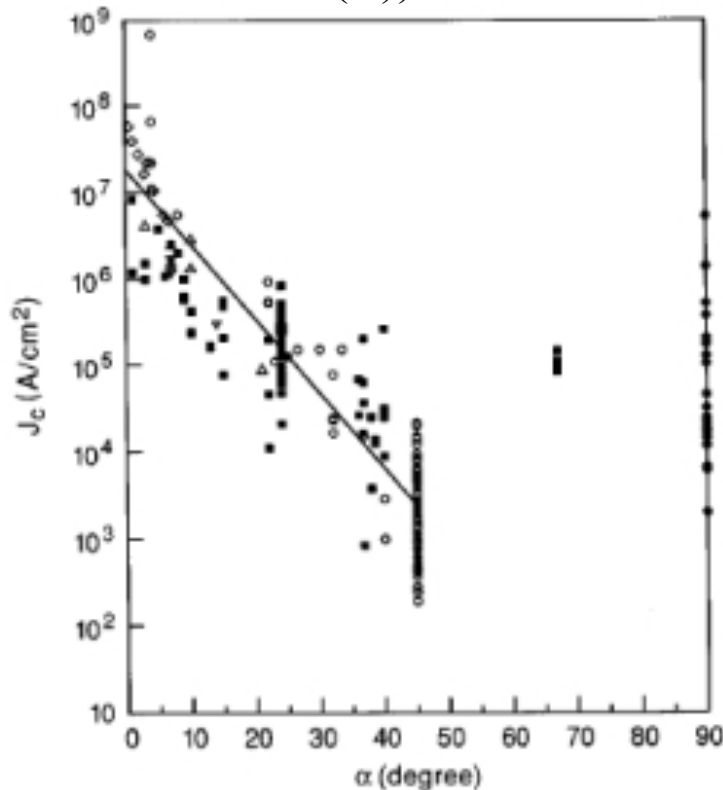
- химическое и диффузионное (обмен веществом)
- механическое (адгезия, изменение поверхностной энергии, межфазная граница)
- физическое («эффекты близости», фазовые переходы, КТР, анизотропное изменение объема элементарной ячейки)



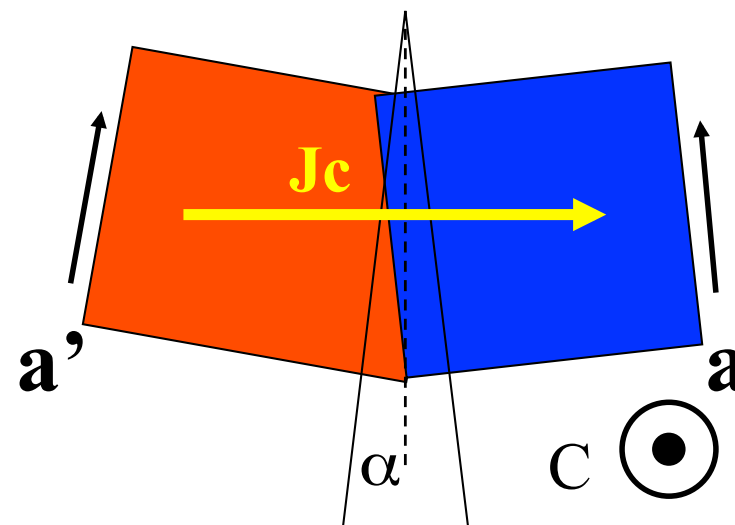
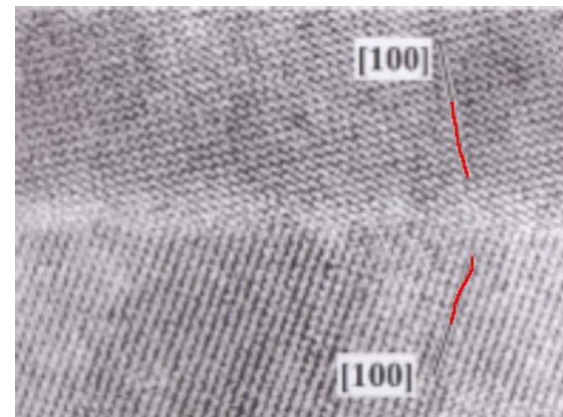
«Бикристаллы»

«Двойная» философия:

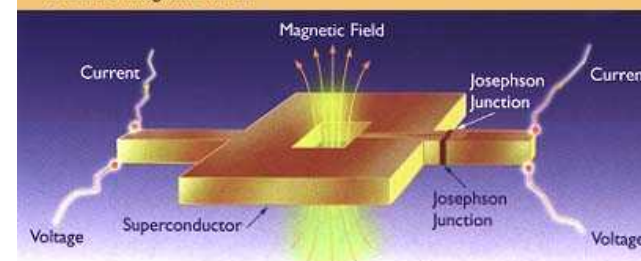
- Двуосное текстурирование («сильные связи» для повышения $J_c(B)$)



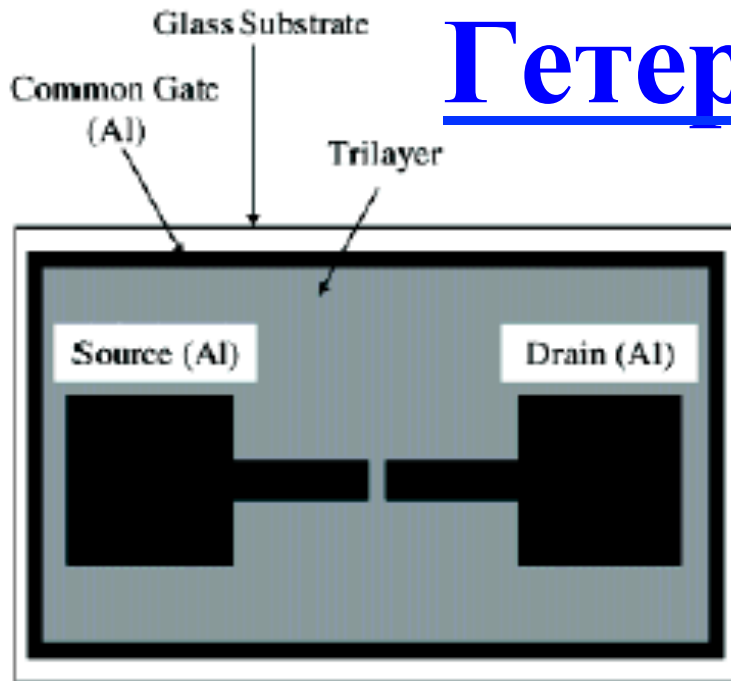
- Туннелирование (зависимость $J_c(B)$ для слабых связей) – SQUID



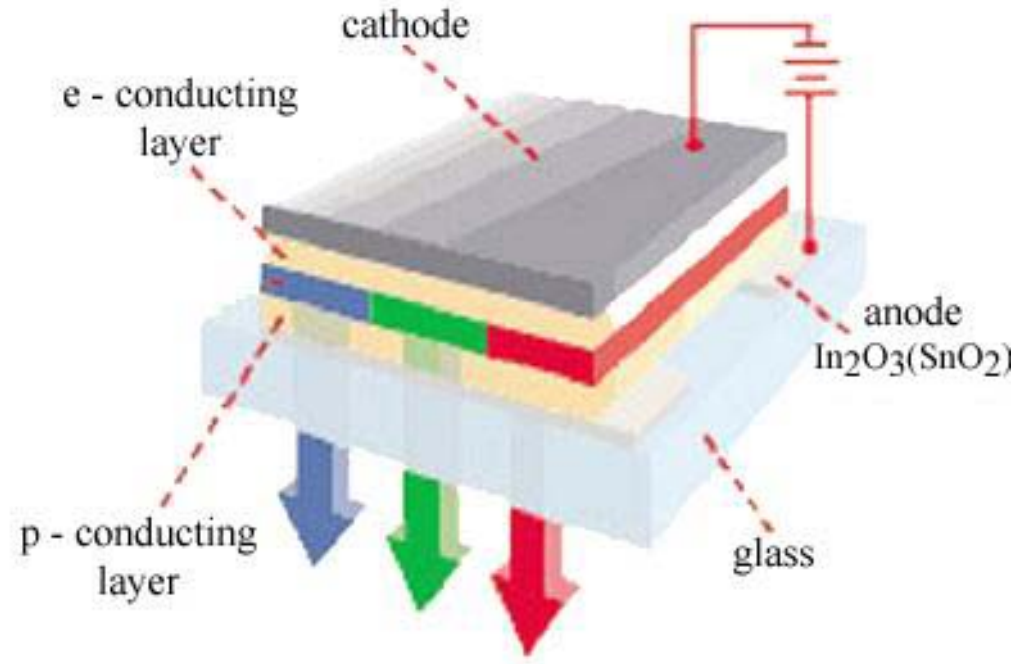
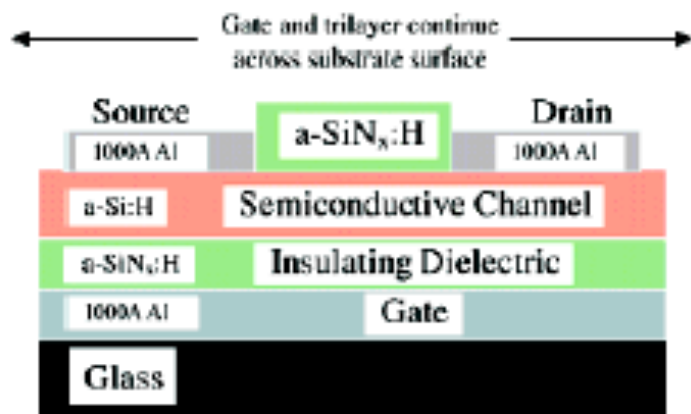
A SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) is the most sensitive type of detector known to science. Consisting of a superconducting loop with two Josephson junctions, SQUIDs are used to measure magnetic fields.



Гетероструктуры

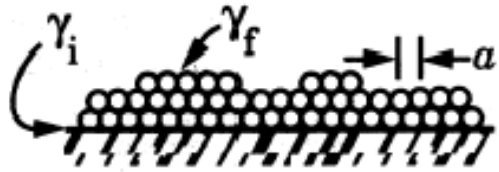


Thin Film Transistor

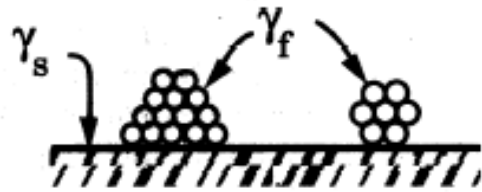


Organic light-emitting diodes (OLED)

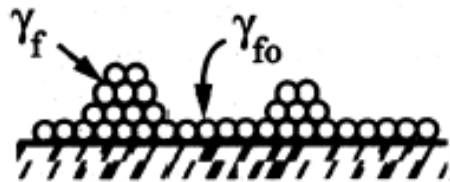
Тонкие пленки



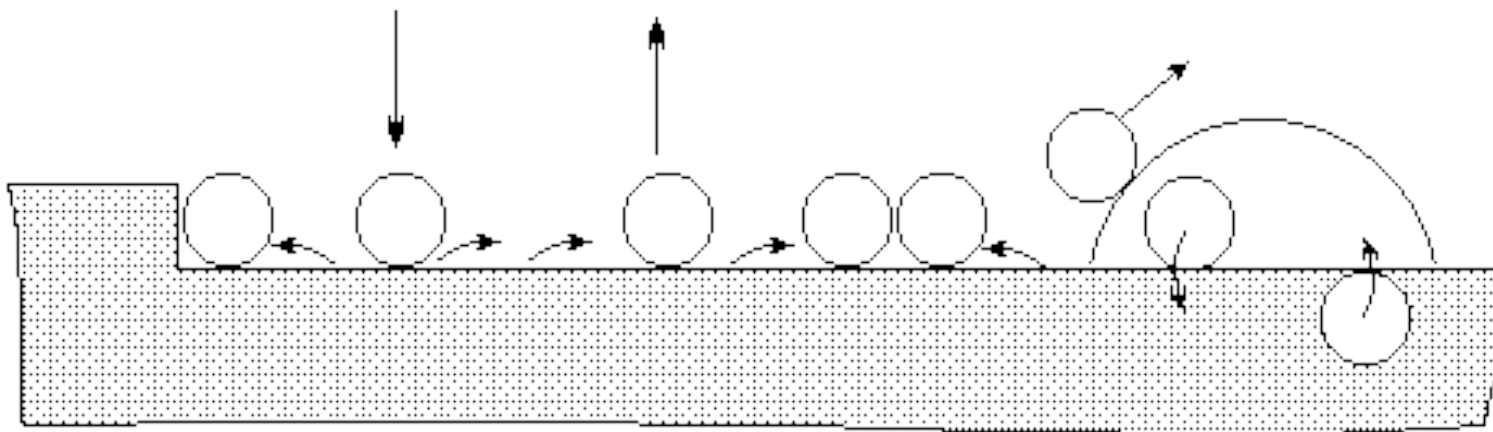
$\gamma_i + \gamma_f < \gamma_s$ layer-by-layer growth (Frank-van der Merwe)



$\gamma_i \approx \gamma_s + \gamma_f$ island growth (Volmer-Weber)
 minimization of total surface energy:
 $\gamma_i > \gamma_s + \gamma_f$ low- γ facets of islands



few ML layer-by-layer, then crossover to island growth (Stranski-Krastanov)



Взаимодействие с дефектами подложки

Поверхностная диффузия

Химическое связывание, зародышеобразование

Объемная диффузия

Моды осаждения



Самосборка (поле упругих напряжений)

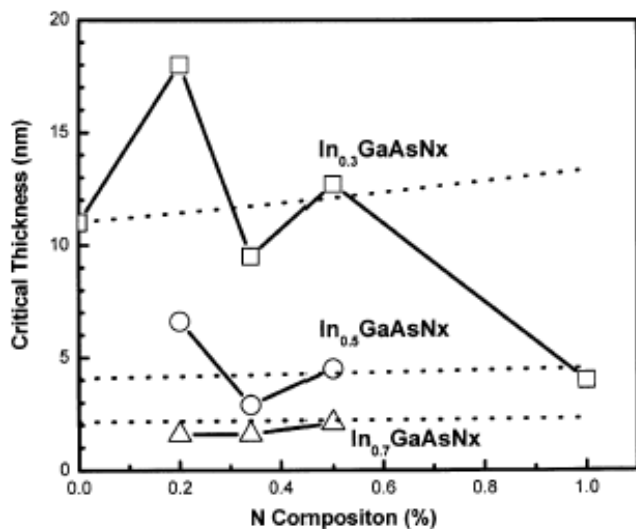


Fig. 1. Plot of critical thickness observed by RHEED for GaInNAs samples of different In and N composition. The dotted lines represent the theoretical value of critical thickness with respect to epilayer strain.

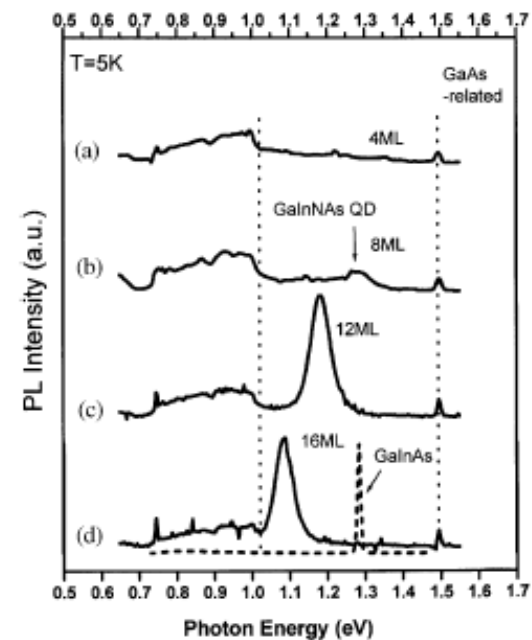
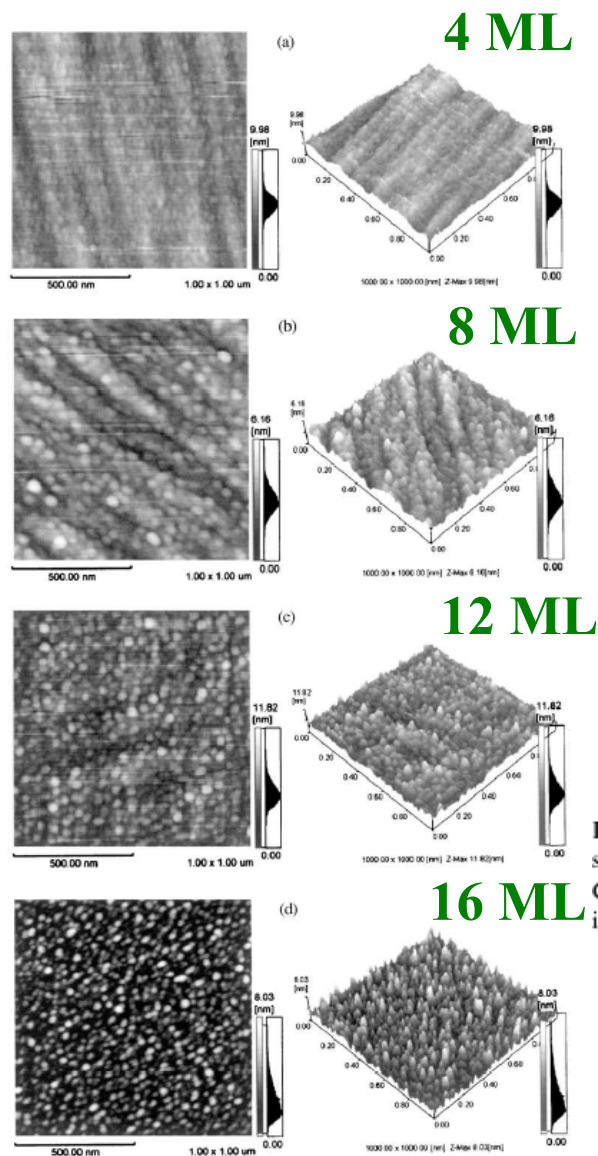
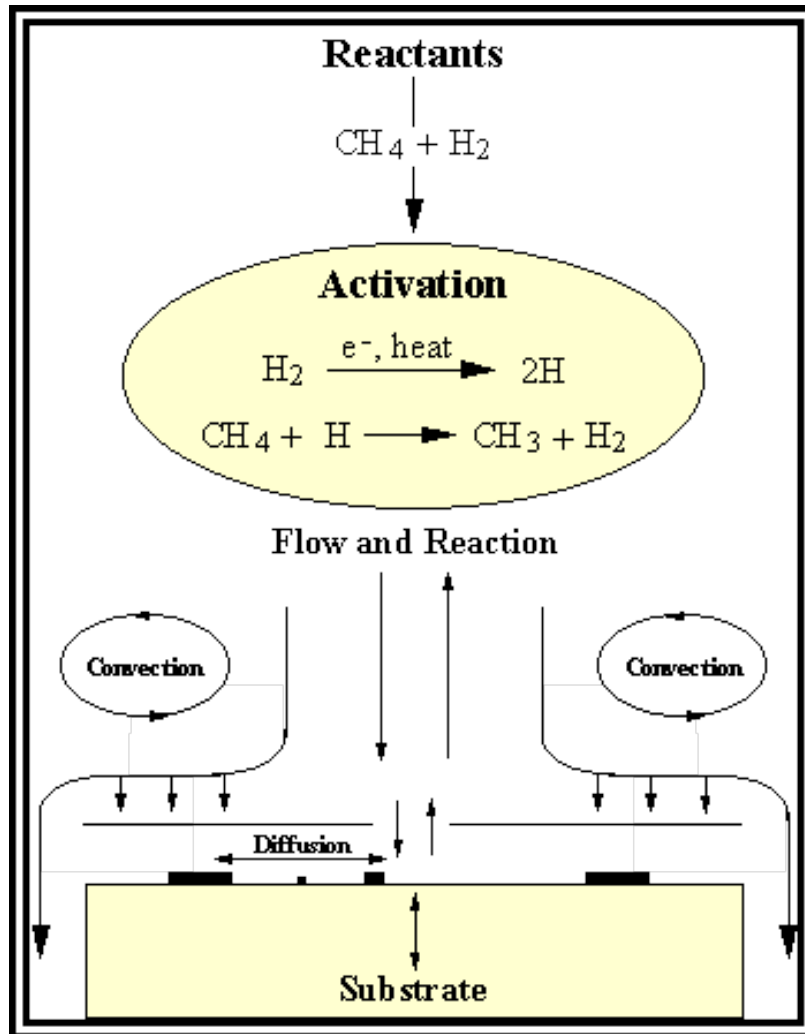
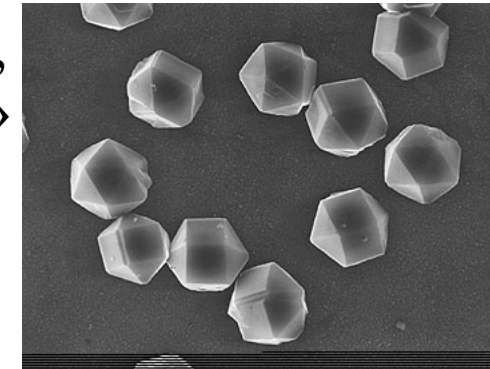


Fig. 4. Low temperature (5 K) PL spectra of GaInNAs QD samples with: (a) 4 ML, (b) 8 ML, (c) 12 ML, (d) 16 ML of $Ga_{0.7}In_{0.3}N_{0.01}As_{0.99}$ coverage. The reference GaInAs spectrum is indicated by dashed line.

Механизм осаждения



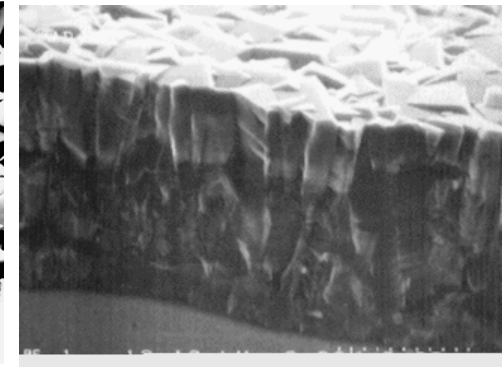
1. Активные радикалы, «строительные блоки»
2. Транспорт, мезослой
3. 3/0
4. Миграция по поверхности, рост
5. Обмен энергией



Начальные стадии, Si-подложка



Колончатая структура



<100> – алмазная пленка

Эпитаксия - процесс ориентированного нарастания, в результате которого образующаяся новая фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку имеющейся подложки с образованием переходного эпитаксиального слоя (ПЭС), способствующего когерентному срастанию двух решеток по плоскостям и направлениям со сходной плотностью упаковки атомов.

- Автоэпитаксия (от греческого autos – само) – процесс ориентированного нарастания кристаллического вещества гомотипного по структуре, незначительно отличающегося по химическому составу от вещества подложки.
- Гетероэпитаксия (от греческого hetero – другой) – процесс ориентированного нарастания вещества, отличающегося по составу от вещества подложки, происходящий при кристаллохимическом взаимодействии срастающихся веществ с образованием ПЭС в соответствии с характером физико-химического взаимодействия.
- Псевдоэпитаксия (совпадение не всех атомных рядов) – $\text{MgO} / \text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$

- Хемозпитаксия – процесс ориентированного нарастания, в результате которого образование хемозпитаксиального слоя происходит при химическом взаимодействии вещества подложки с веществом, поступающим из внешней среды. При этом полученное соединение отличается по химическому составу, как от вещества подложки, так и от вещества, поступающего из внешней среды на ее поверхность.
- Эндотаксия – процесс ориентированного выделения новой фазы в кристаллической решетке имеющейся фазы, происходящий в результате пересыщения последней диффундирующими от поверхности вглубь атомами соответствующего вещества или вследствие распада пересыщенного твердого раствора на основе кристаллической решетки подложки.

Эпитаксия



Факторы эпитаксиального роста:

- близость параметров решетки,
- близость КТР,
- химическая совместимость,

Параметры подложки:

- {факторы эпитаксиального роста} + переходов...

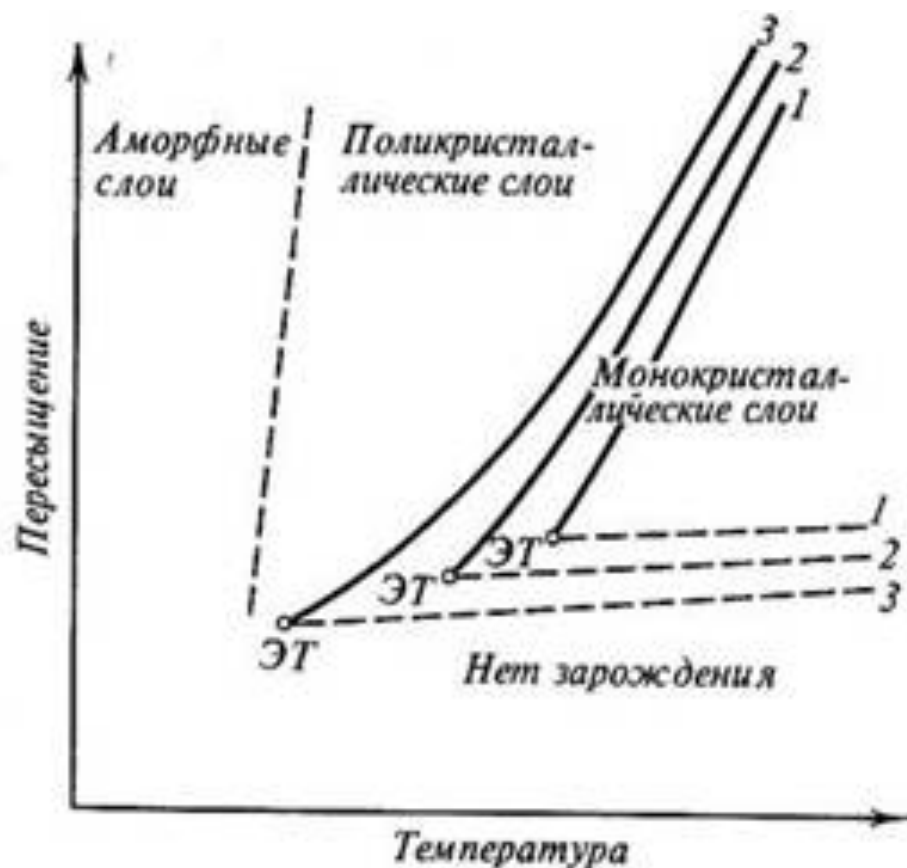
- прочность, возможность обработки,

- приемлемая стоимость

(Идеальных подложек не существует..)

Пасыщение «ненасыщенных» валентной / ионной природы на поверхности – «молекулярный», короткодействующий характер эпитаксии

Скорость осаждения (морфология)

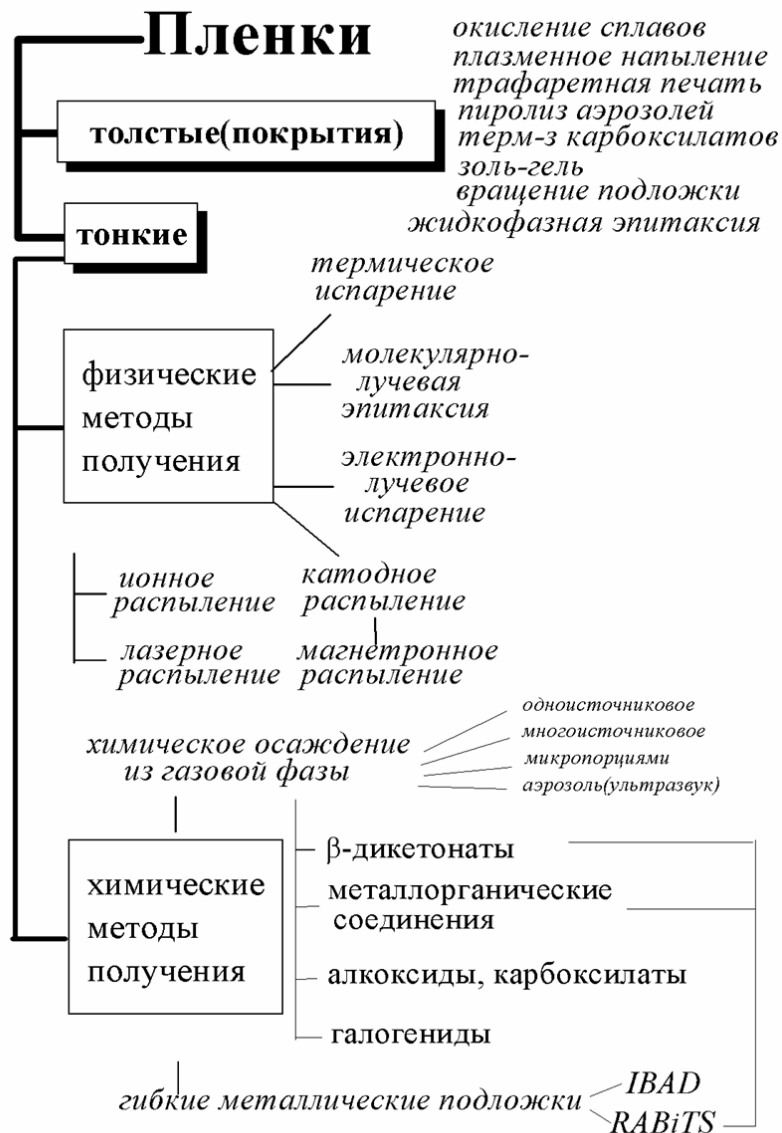


Р и с. 118

Области пересыщений и температур, при которых получают слои с различными структурными характеристиками

ЭТ — температура эпитаксии. Сплошные кривые 1—3, разграничивающие области роста поликристаллических и монокристаллических слоев, и штриховые линии 1—3, разграничивающие область роста монокристаллических слоев и область, где зарождение отсутствует, отвечают различной чистоте среды и (или) подложки. Чистота повышается от 1 к 3

Методы получения пленок



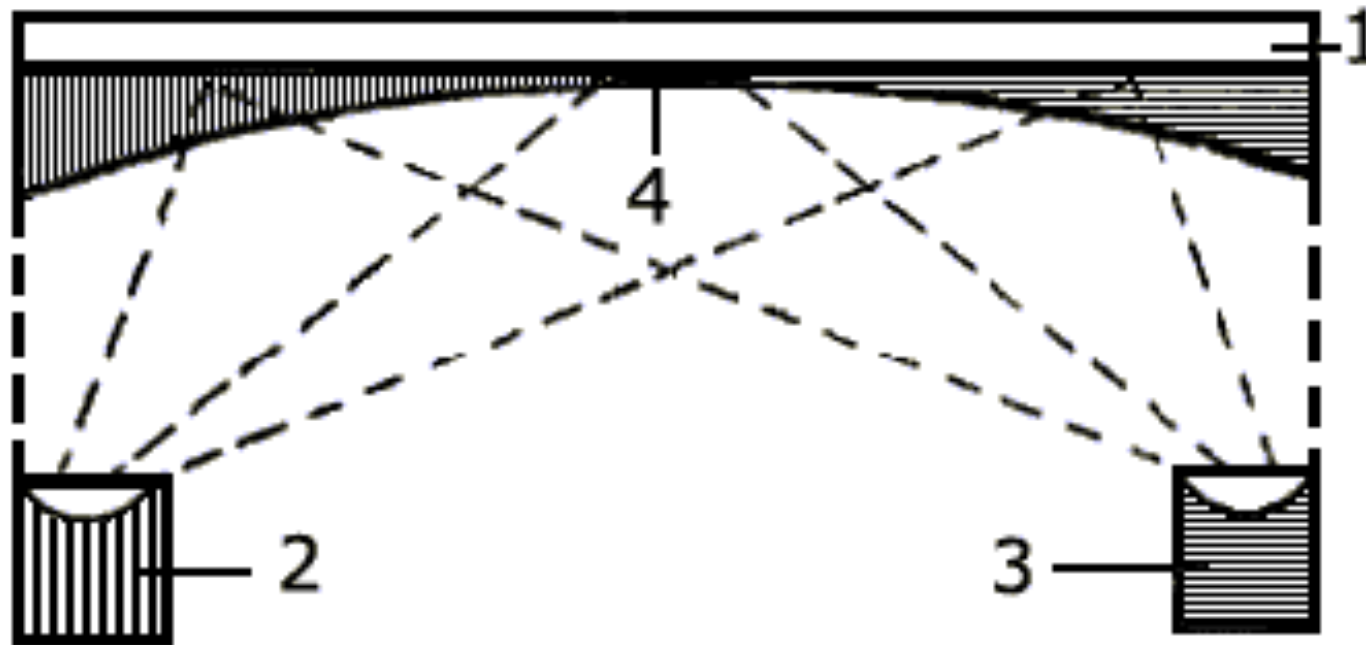
Классические методы:

- трафаретная печать
- пиролиз аэрозолей
- жидкофазная эпитаксия
- термическое испарение
- химическое осаждение из газовой фазы

Новые методы:

- графотекстурирование
- самособирающиеся слои
- жидкостная самосборка
- Лэнгмюр-Блоджетт

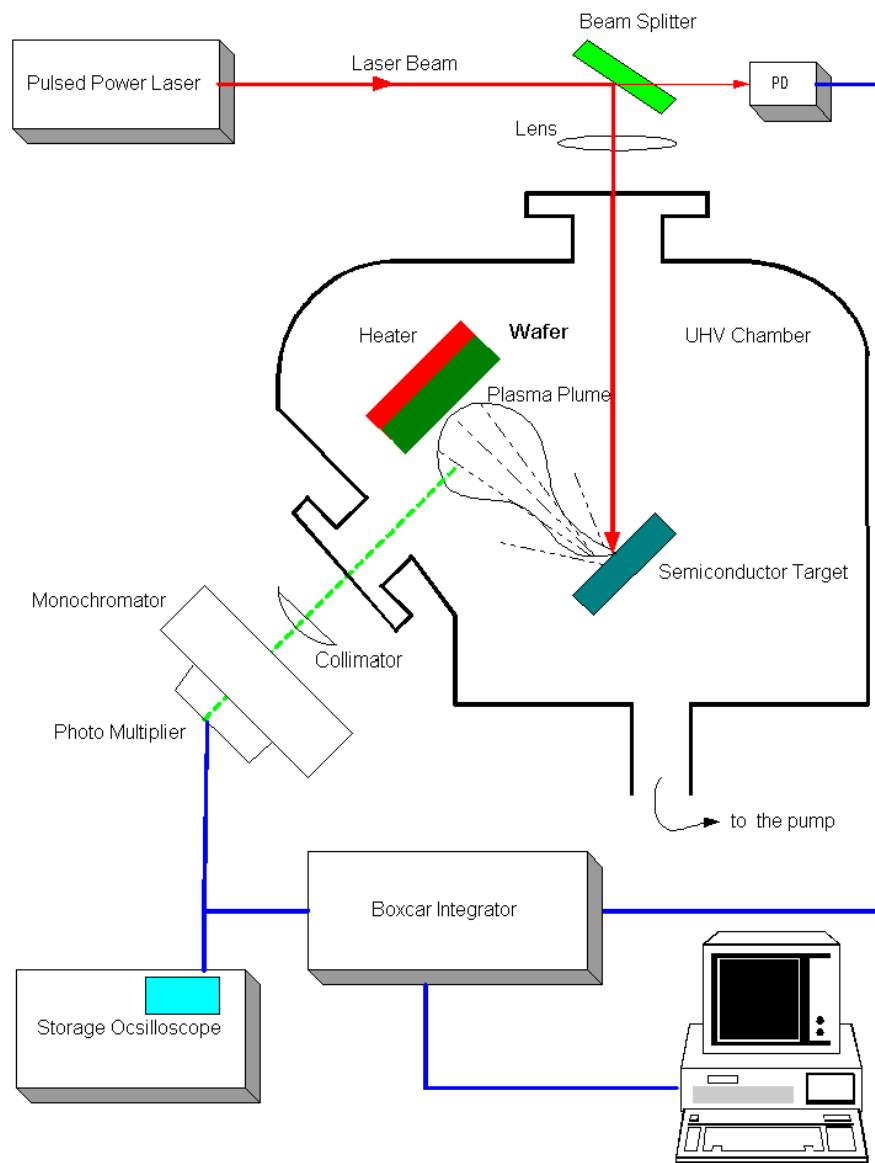
Многоисточниковое осаждение



Получение пленок соединений типа АВ по методу С.А. Векшинского:

1 - подложка; 2 - компонент А; 3 - компонент В; 4 - область образования соединения

Физические методы осаждения



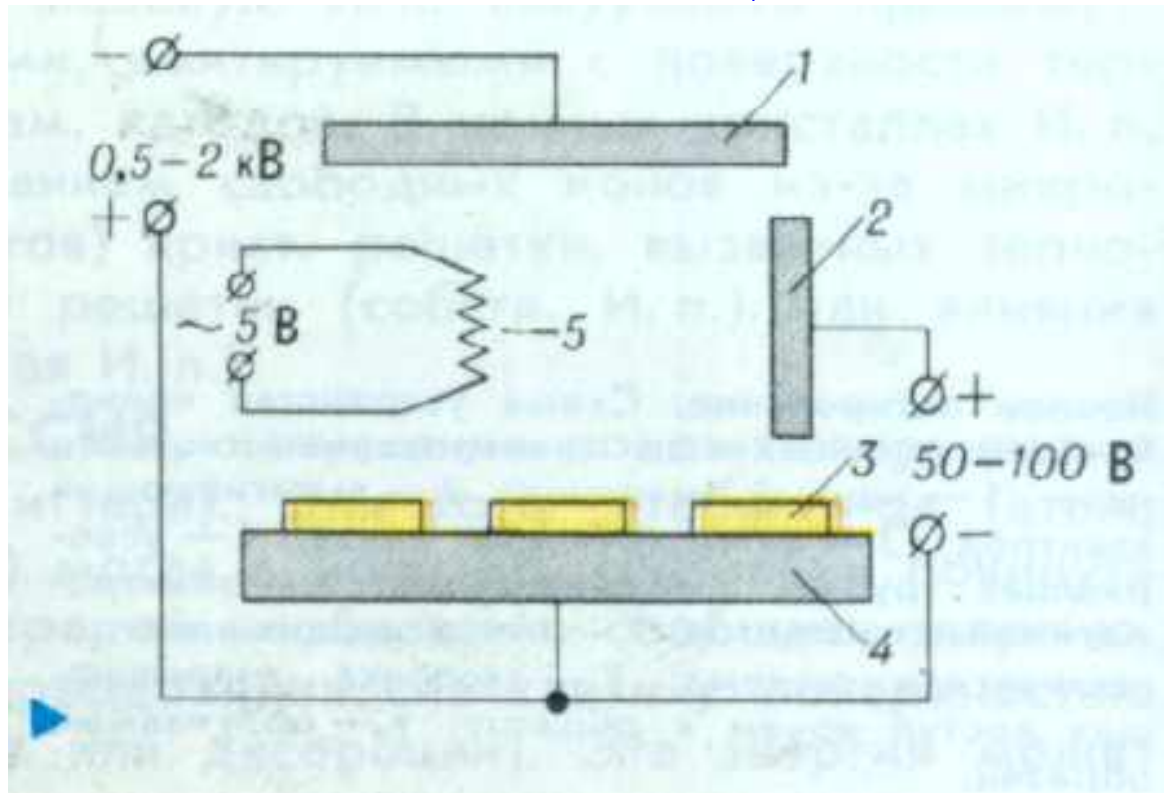
- лазерное напыление
- молекулярные пучки
- магнетронное напыление..

Требования:

- высокий вакуум
- высокий расход энергии
- сложность и дороговизна оборудования
- высокие пересыщения и (в ряде случаев) плохая ростовая морфология
- ограниченные возможности масштабирования технологии и непрерывного осуществления процесса

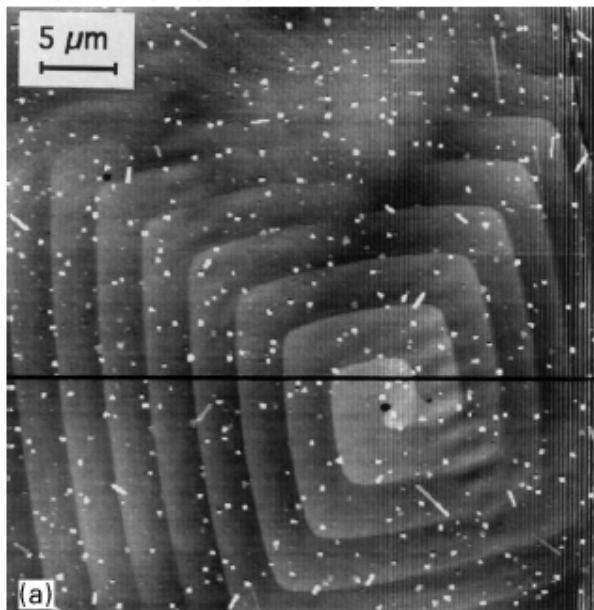
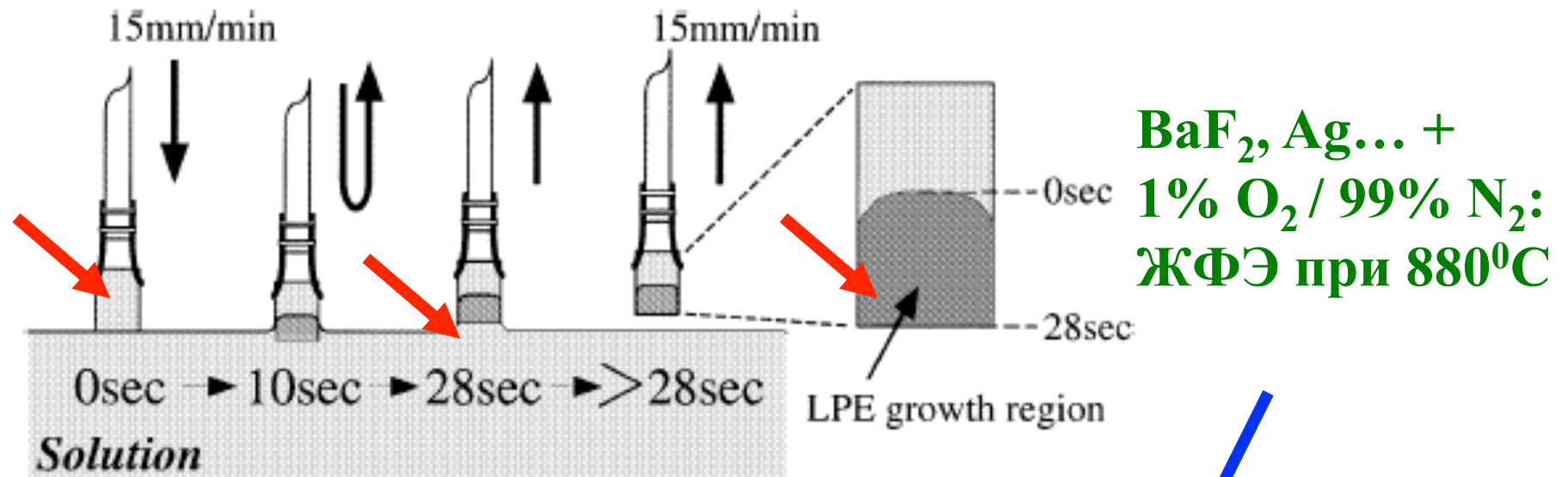
*послойная сборка (гетеро)структур,
структурный дизайн*

Распыление нейтральными частицами

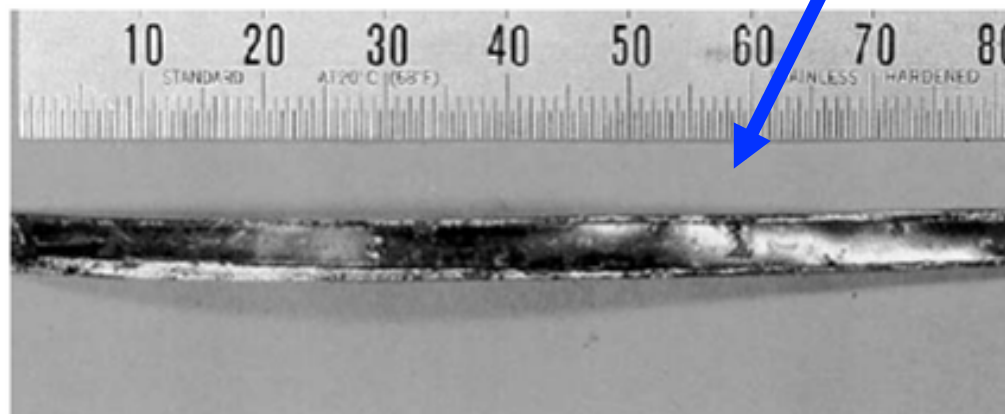


- 1 - катод-мишень, 2 - вспомогательный анод, 3 - подложка,
4 - анод-подложкодержатель,
5 - вспомогательный катод (термоэмиттер электронов)

Жидкофазная эпитаксия

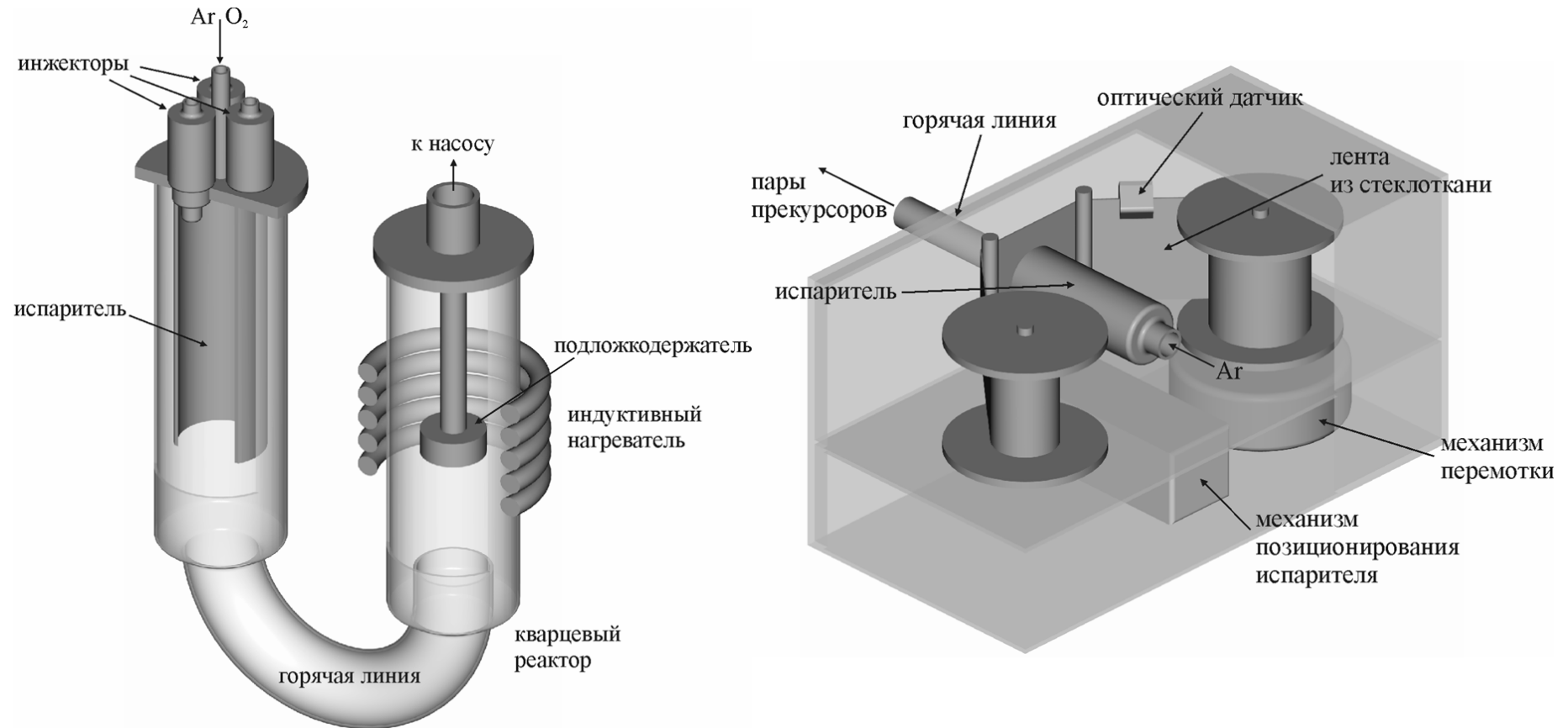


ФНМ МГУ



Полигональная (макро)спираль

Химическое осаждение (CVD)



Синтез летучих прекурсоров - Испарение (контроль состава пара)
– **Транспорт** (выбор газа-носителя и контроль его распределения в реакторе) – **Осаждение** (контроль T , p_{O_2} , p_{CO_2} , скорости осаждения)

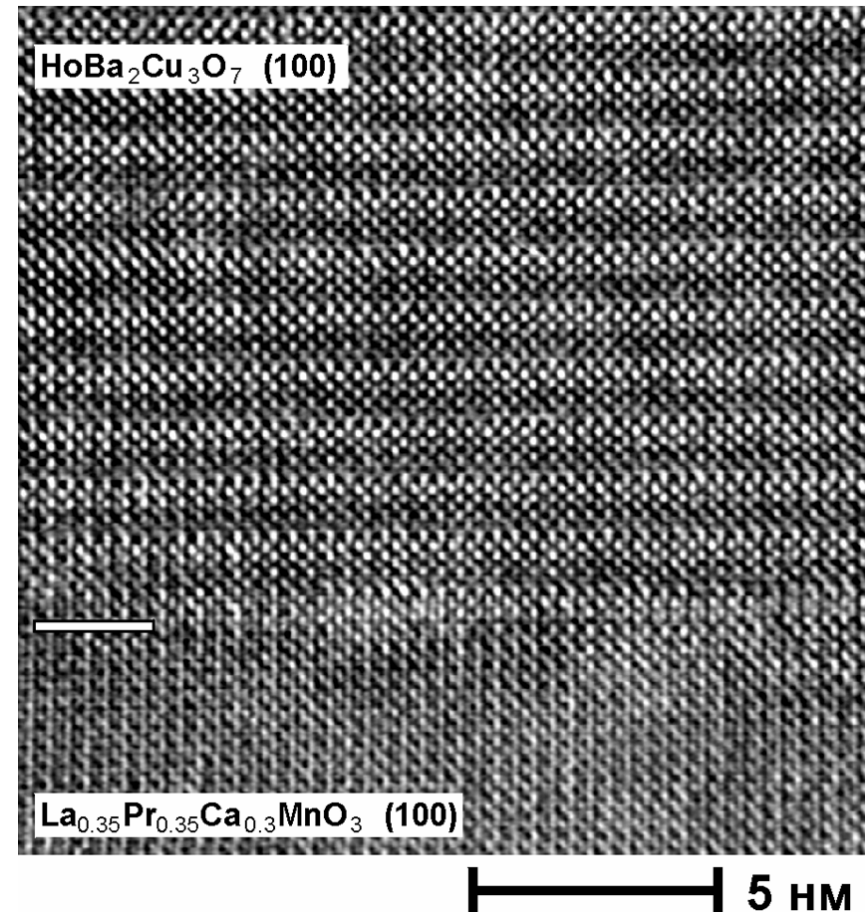
Преимущества и недостатки CVD

Преимущества:

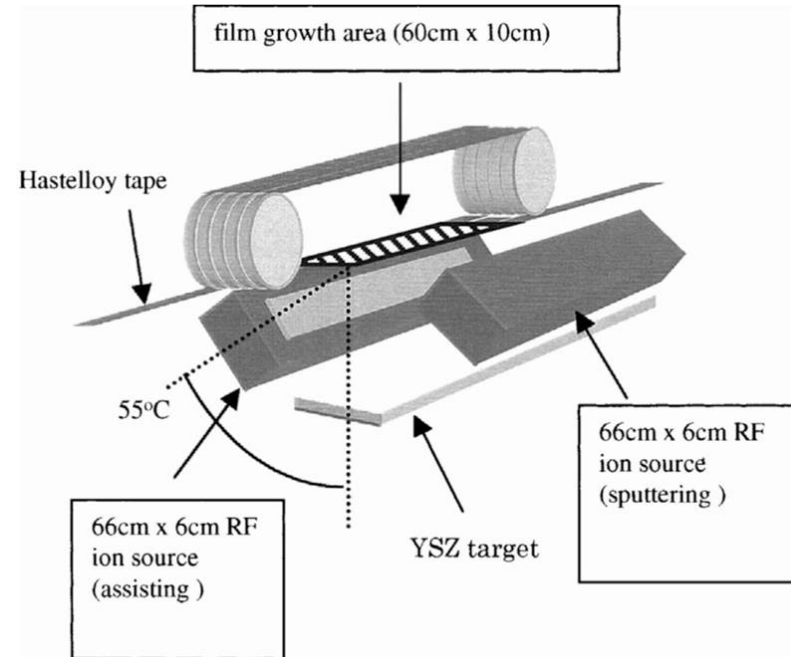
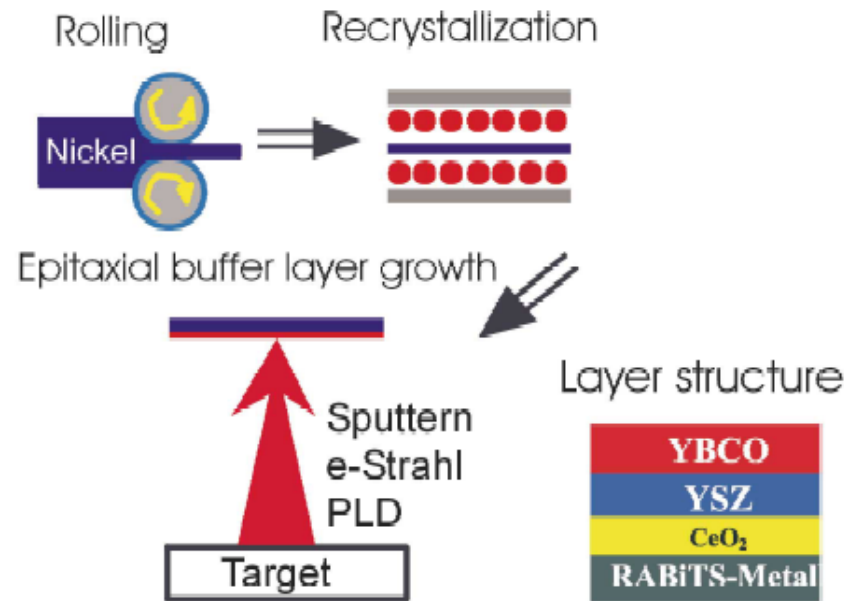
- универсальность (почти любой состав пленок),
- гибкость процесса,
- возможность нанесения одно- и двухсторонних пленок на детали сложной формы и большой площади,
- возможность достижения высоких скоростей осаждения (до нескольких миллиметров в час) при сохранении высокого качества пленки,
- переход от высоковакуумной аппаратуры к проточным установкам, простота и дешевизна оборудования.

Недостатки:

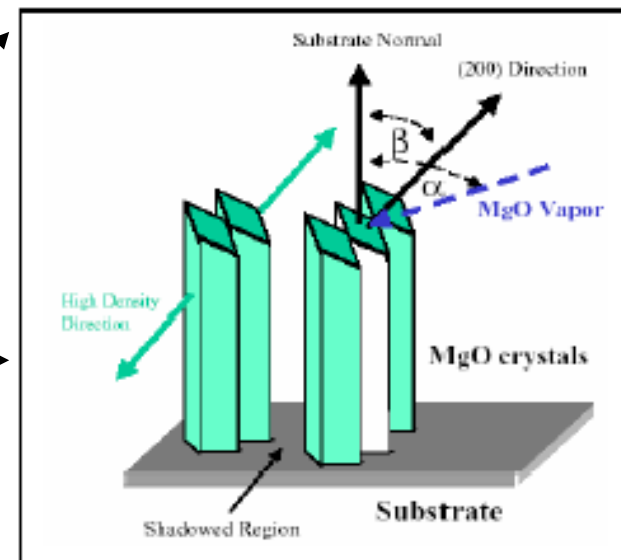
- «симбиотическая» проблема выбора подложек,
- управление катионной и анионной стехиометрией пленки (Т, рO₂, рСО₂, ..., несколько источников, аэрозольная доставка, ленточный испаритель...),
- целенаправленный поиск веществ с высокой и воспроизводимой летучестью,
- создание оптимальной морфологии пленки.



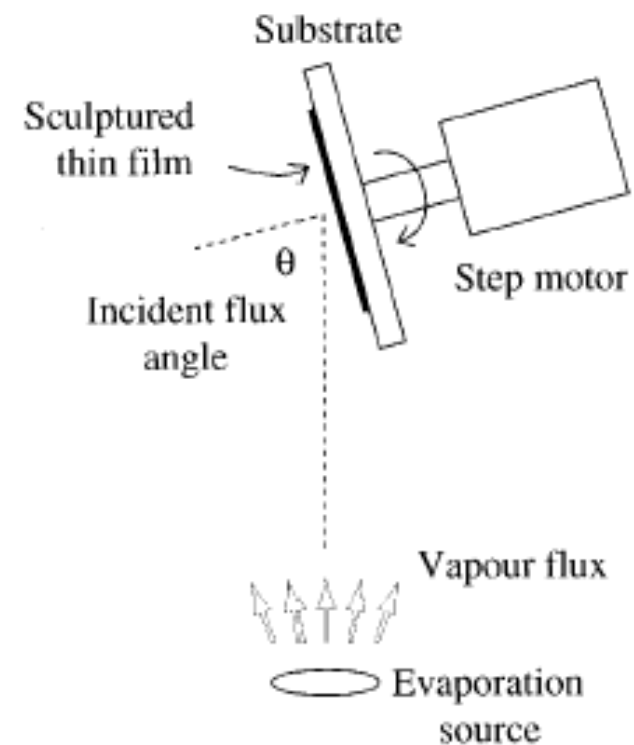
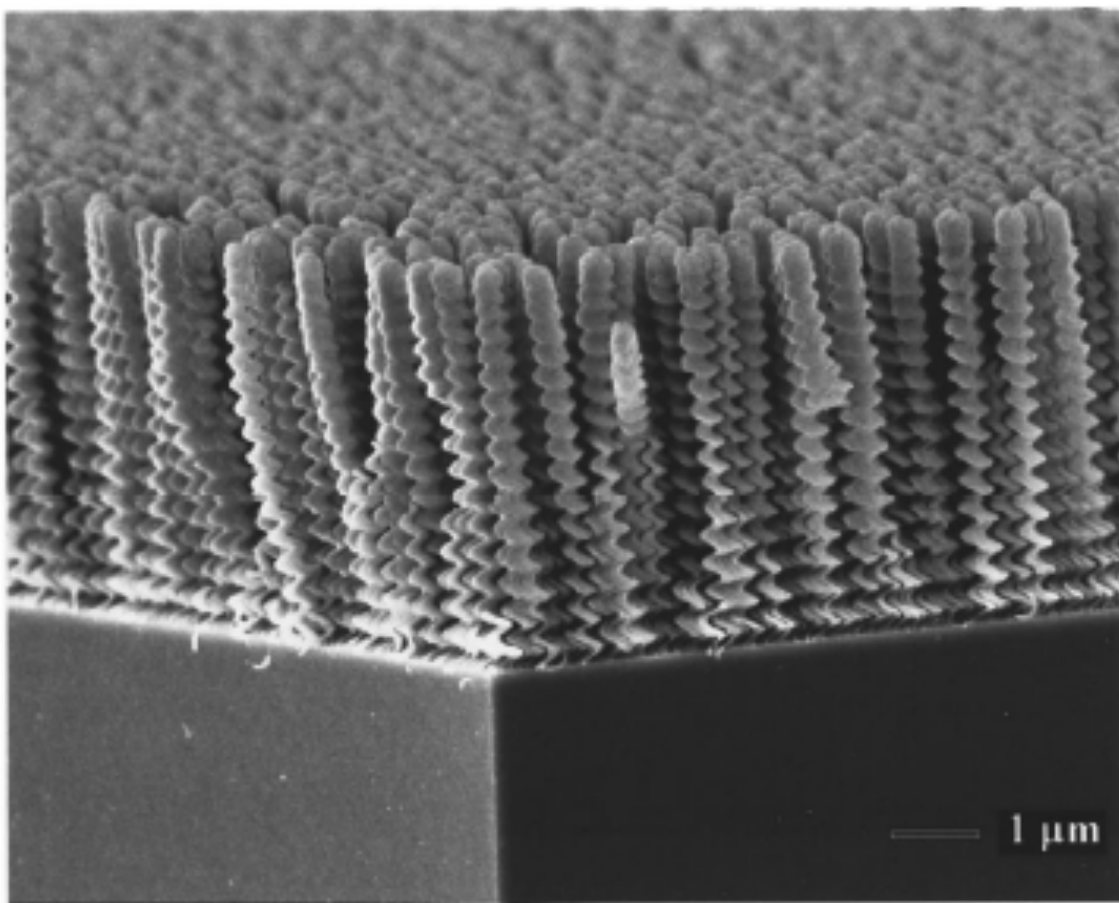
Осаждение пленок на ленты



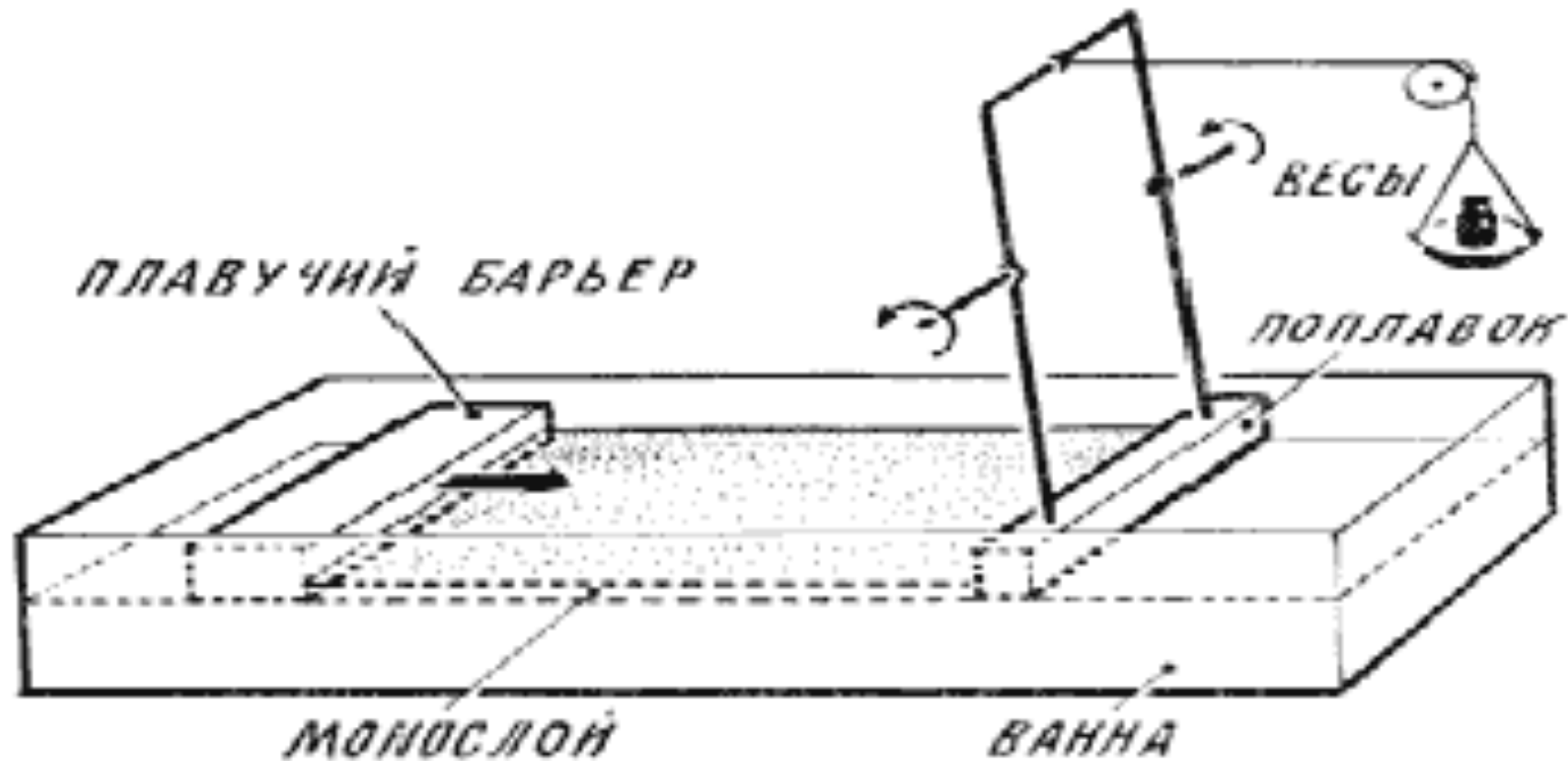
- *Rolling Assisted Biaxially Textured Substrates (RABiTS)*
- *Ion-Beam-Assisted-Deposition*
- *Inclined-Substrate-Deposition*



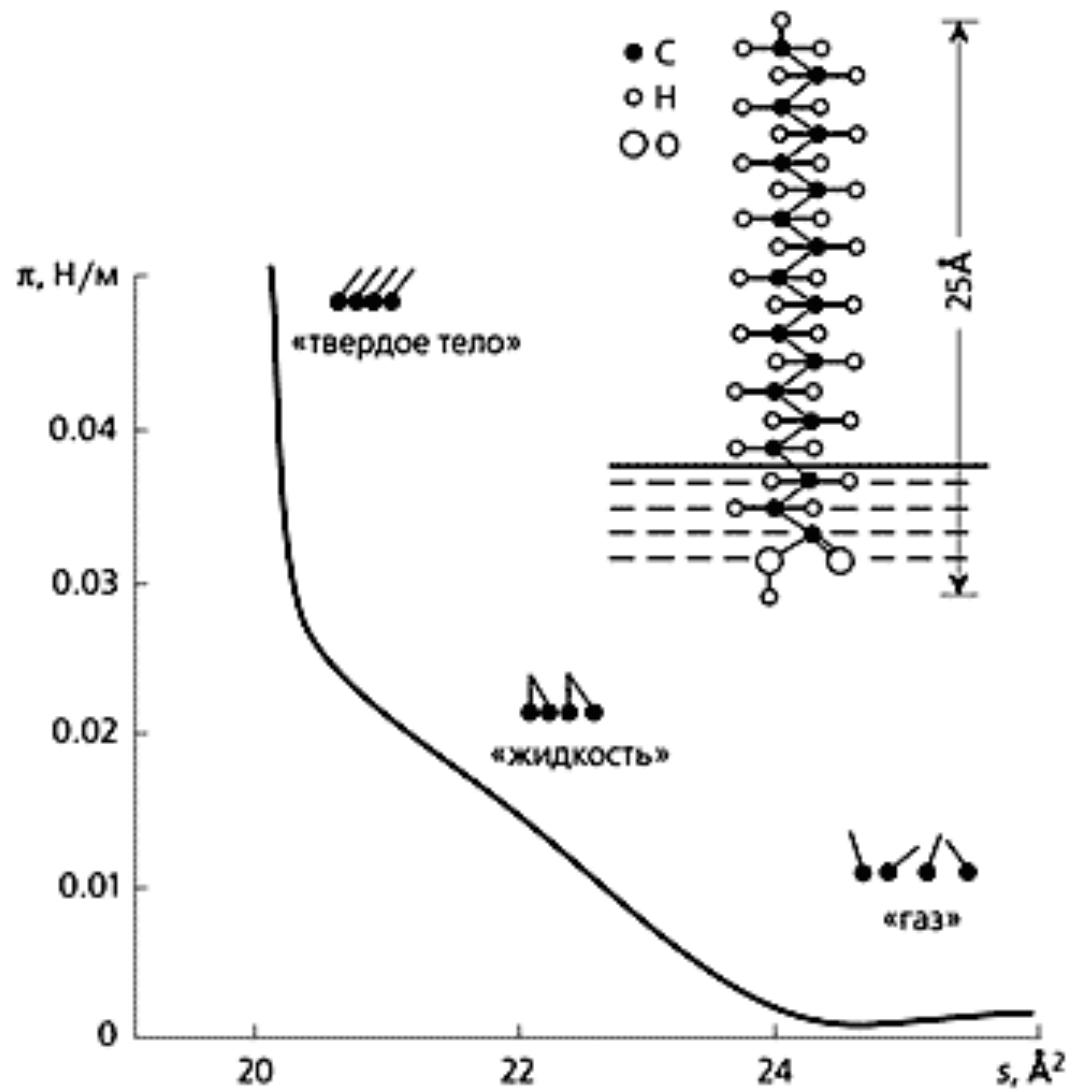
Glancing Angle Deposition



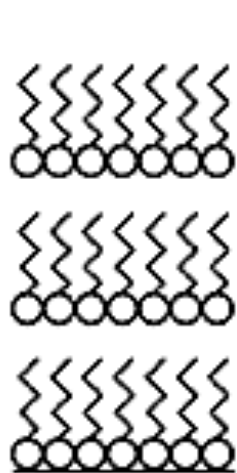
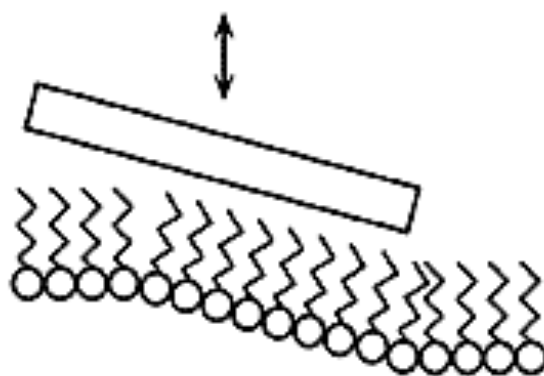
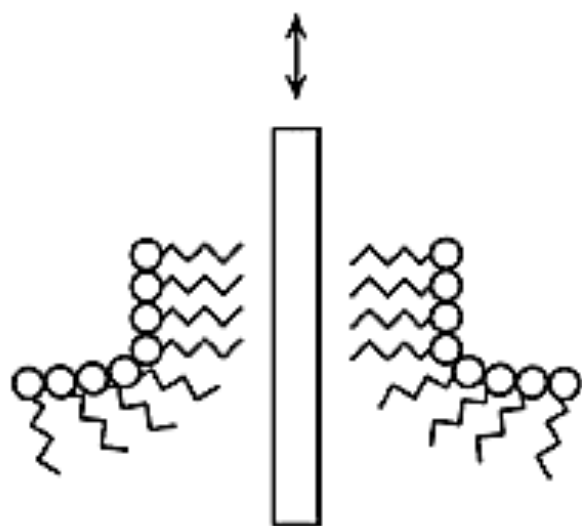
Лэнгмюр-Блоджетт



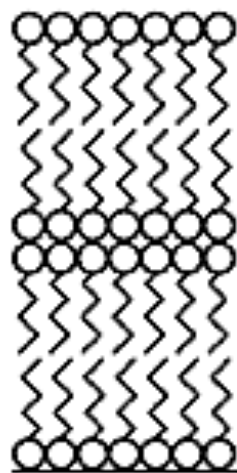
Строение слоя



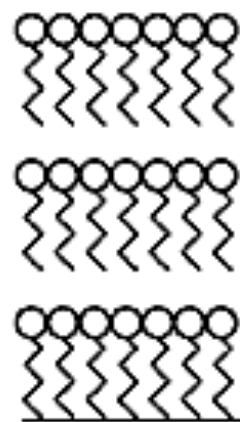
Типы ЛБ - пленок



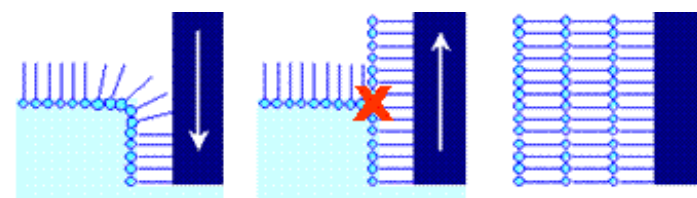
X-тип



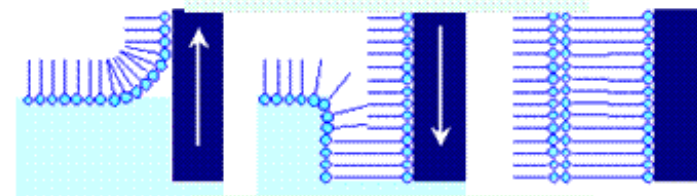
Y-тип



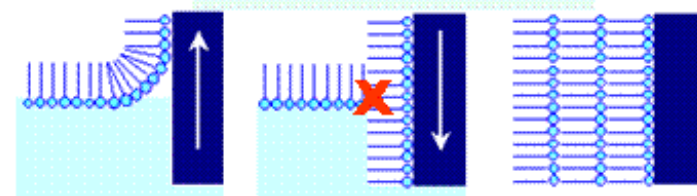
Z-тип



X-тип пленки ЛБ



Y-тип пленки ЛБ



Z-тип пленки ЛБ

Родопсин

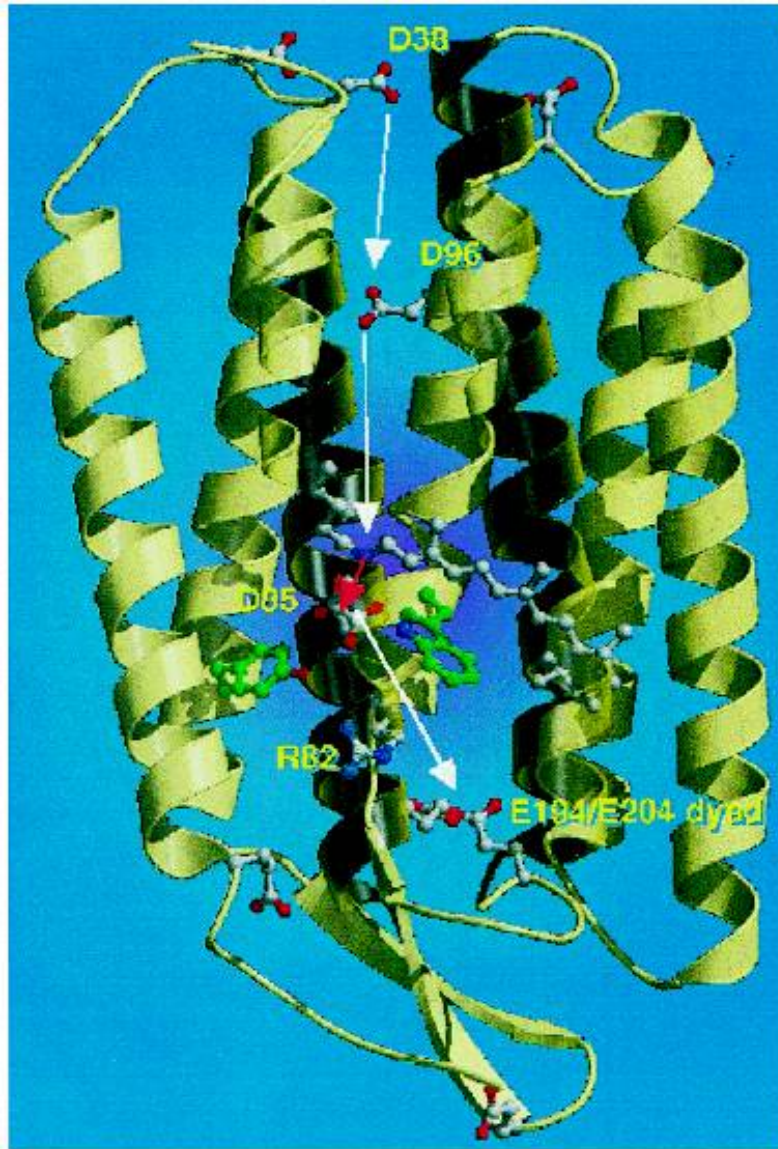


Figure 13. Bacteriorhodopsin film with large aperture. These films have free apertures of 90 mm × 90 mm, their outer dimensions are 120 mm × 120 mm. They are tuned to maximal light sensitivity because their primary use is in holographic interferometry.

Table 8. Optical and Holographic Properties of BR Films

spectral range	400–700 nm possible
	transient recording
B → M	520 nm–640 nm
M → B	400 nm–430 nm
	long-term recording
O → P	630 nm–700 nm
P → B	430 nm–530 nm
resolution (optical)	≥ 5000 lines/mm
optical density (570 nm)	1–5 OD ₅₇₀
maximal bleaching ratio	95%
index of refraction	1.47
refraction index change	0.001–0.01 (depends on OD)
diffraction efficiency	1–3%, max 7%
light sensitivity	0.1–20 mJ/cm ²
polarization recording	possible
reversibility	≥ 10 ⁶ cycles
shelf life	years
film thickness	10–500 μm, typ 20–40 μm
rise and decay times	ms–s
aperture	unlimited

Магнитные полиоксометаллаты

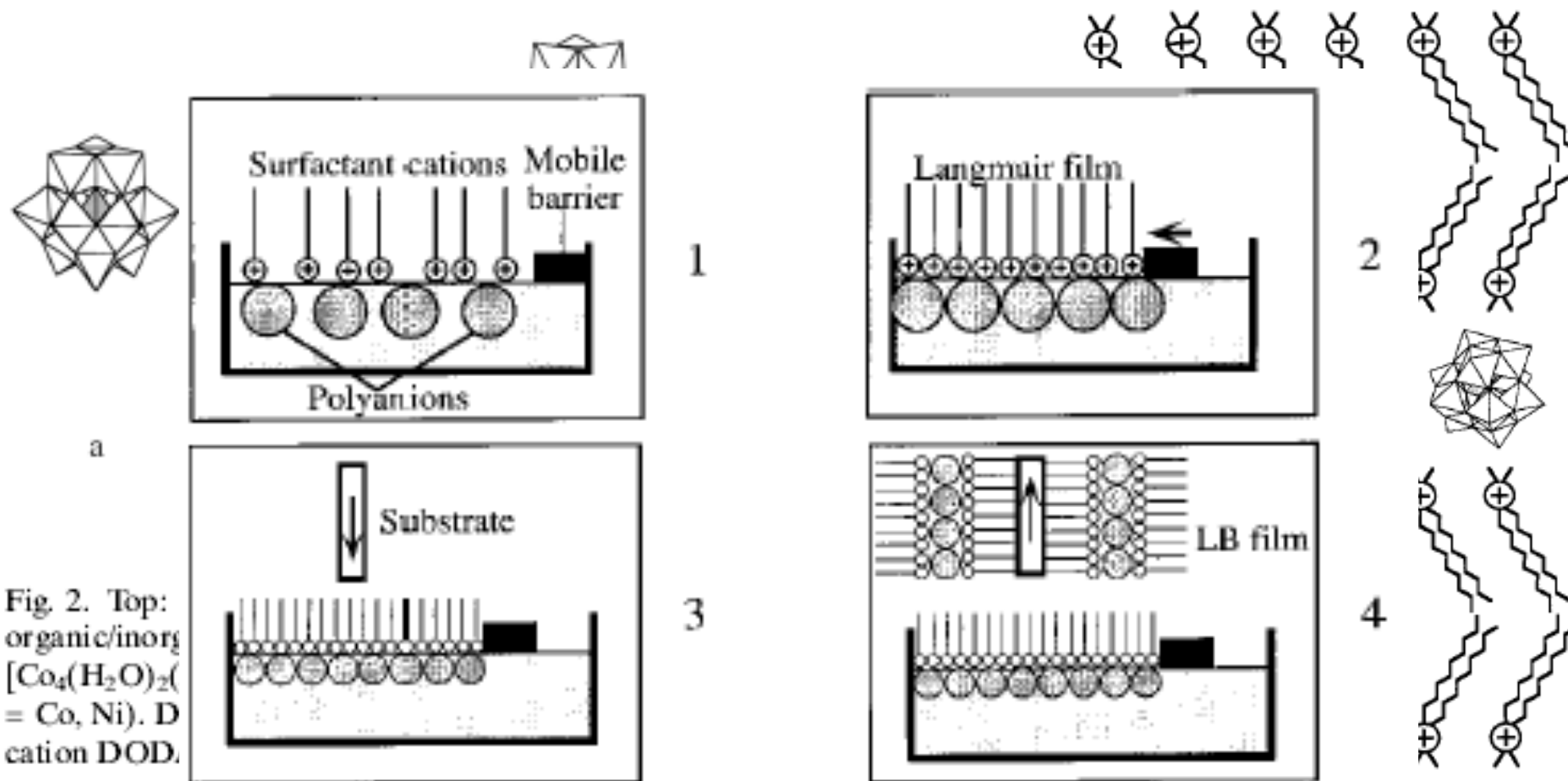
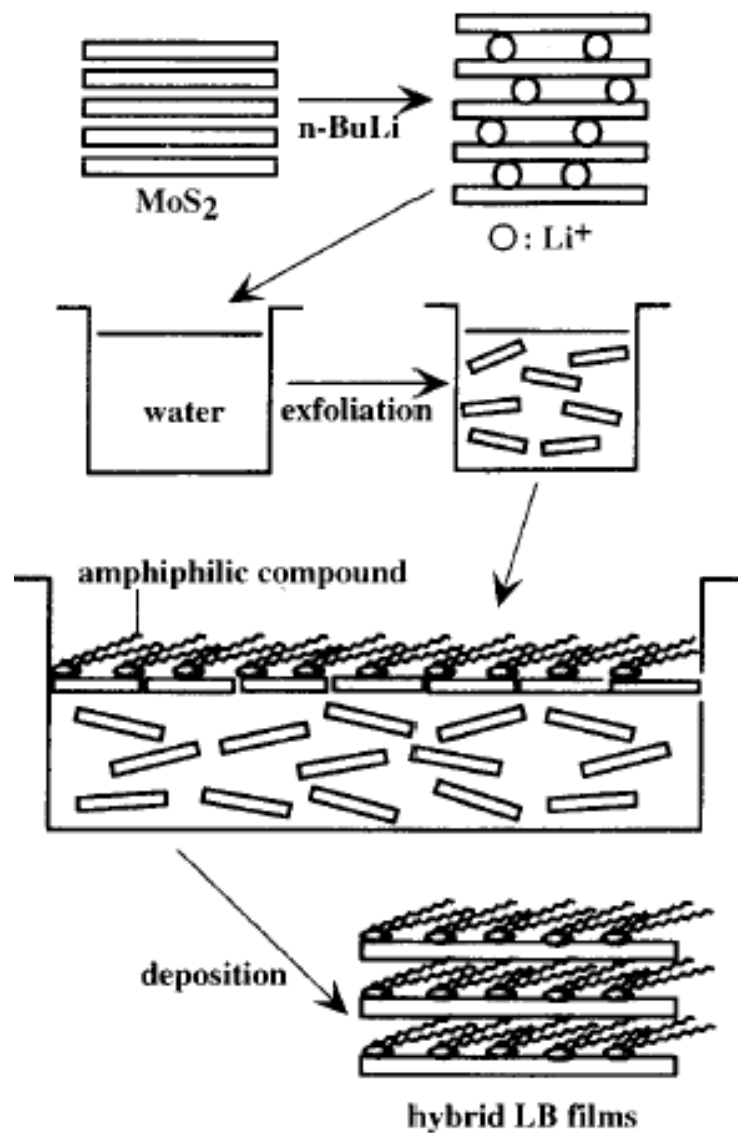


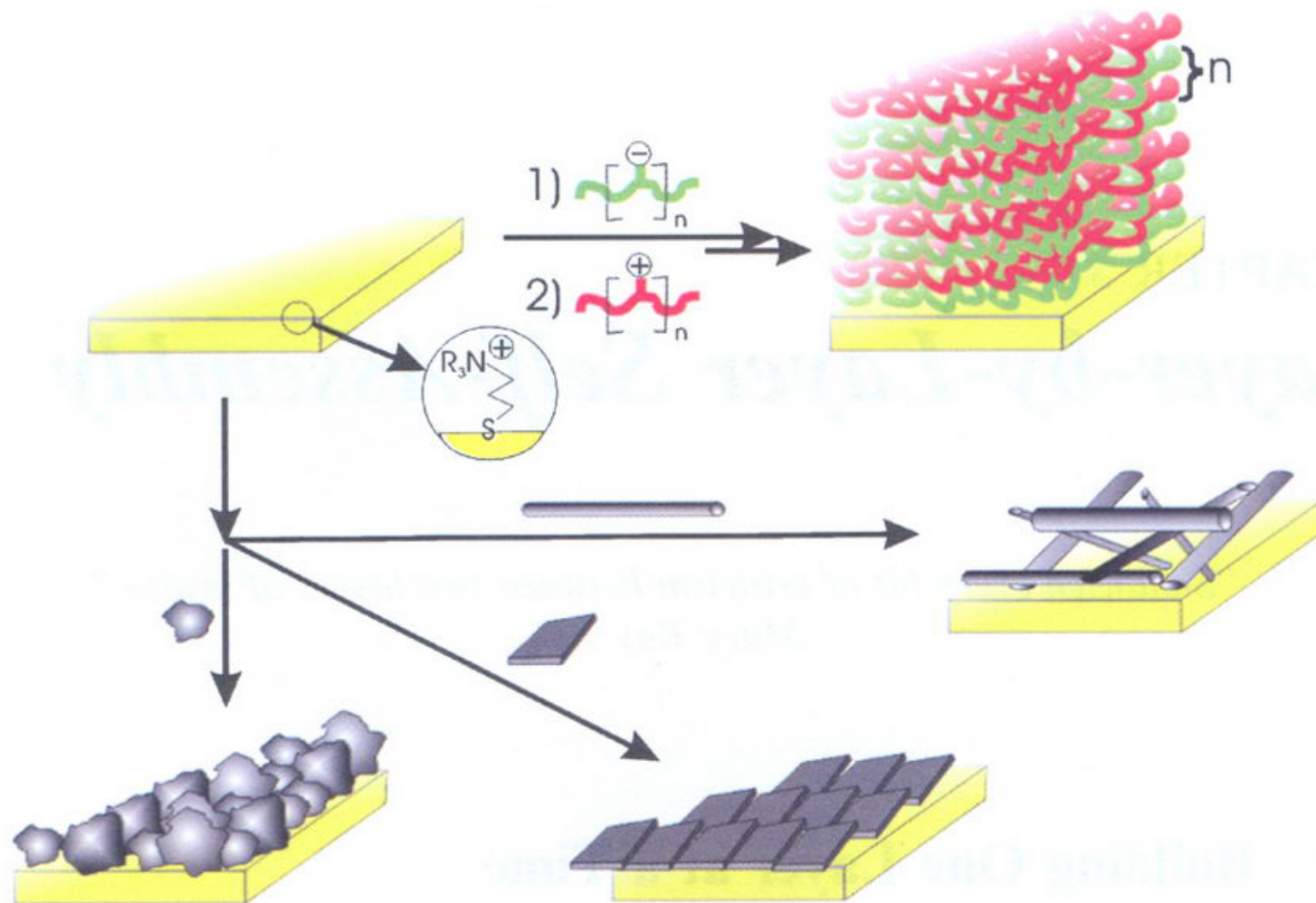
Fig. 2. Top: organic/inorg $[\text{Co}_4(\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$ ($= \text{Co}, \text{Ni}$). D cation DOD.

Суперионный проводник



1. слоистая структура (MoS₂)
2. интеркалирование лития
3. использование ПАВ
4. осаждение пленки методом Лэнгмюра-Блоджетт

Электростатические «мультислои»

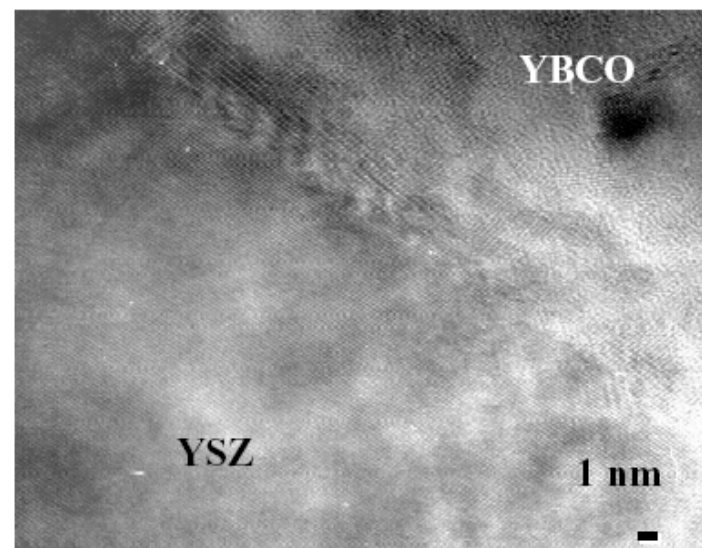
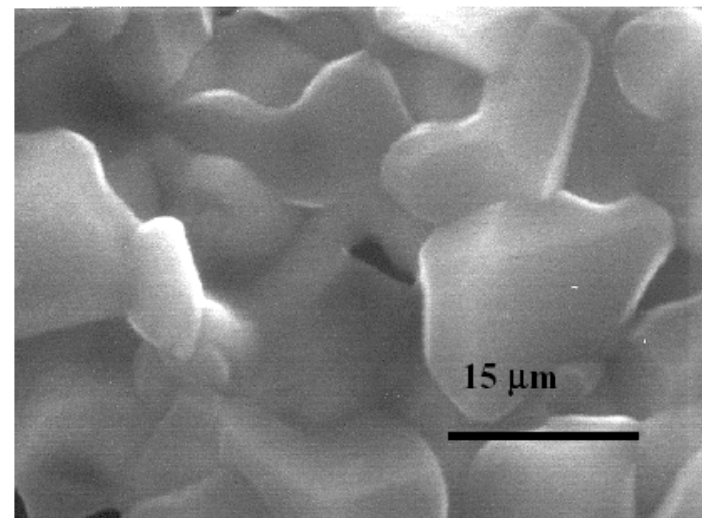


Schematic diagram showing the buildup of electrostatic multilayers of soluble polyelectrolytes (above) as well as the generalization of the procedure to charged objects such as clusters, sheets and rods (below).

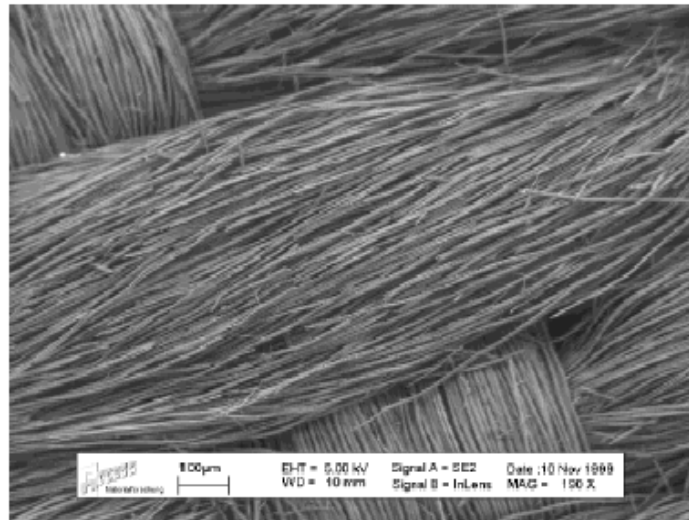
Вращающаяся подложка

- Растворы: золь – гель (BaF_2)
- Распыление/выливание на вращающуюся подложку (3000-4000 об./мин.)
- Сушка при 200-250⁰С (толщина ~0.5 мкм)
- Отжиг при 800-950⁰С
- Окисление (O_2 , 400⁰С)

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$ на YSZ (001)



Ориентированные затравки



ограничители
предельно
допустимого
тока:

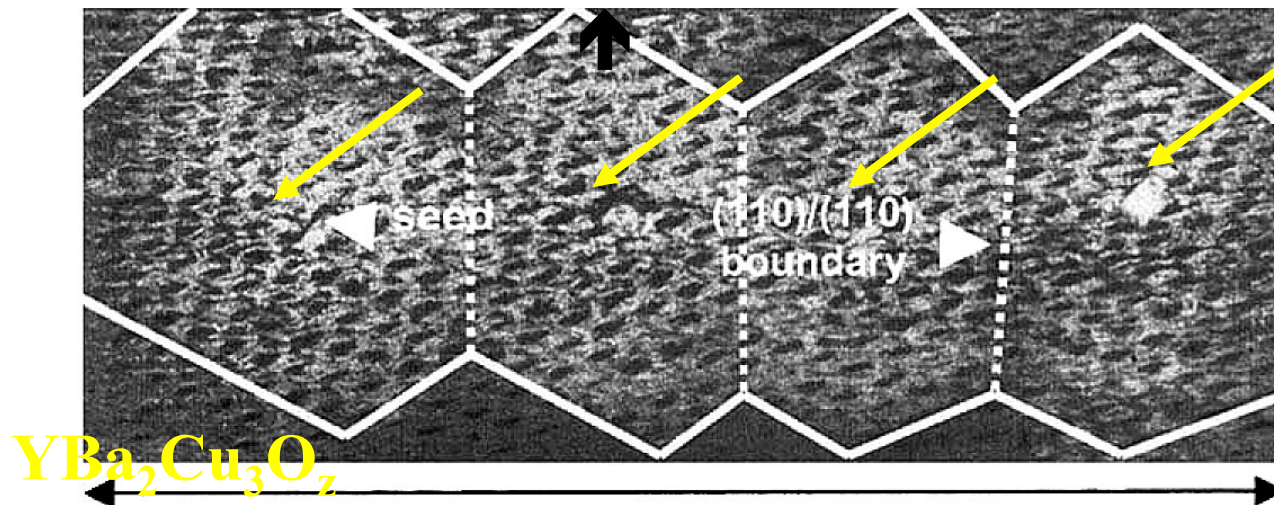
$$-\Omega_{j < \text{lim}} = 0$$

$-\Omega_{j > \text{lim}}$ ВЕЛИКО

$$-\tau \rightarrow 0$$

$-E / N_2$ (ж)

Y_2O_3 -ТКАНЬ

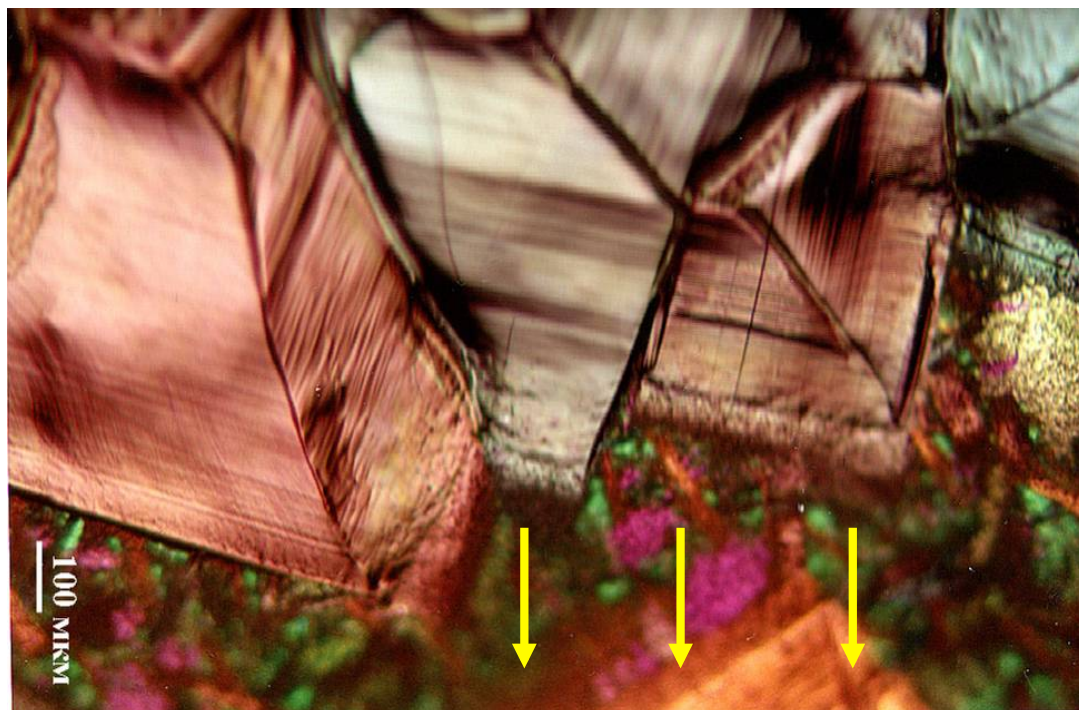


$55\,000\text{ A/cm}^2$
(77K, U-I - кривая)

20 mm

40 mm

Концентрационный градиент

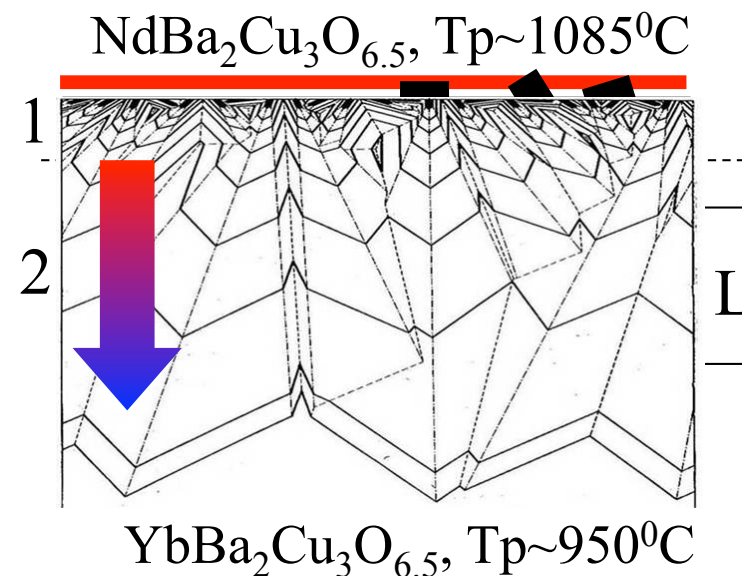
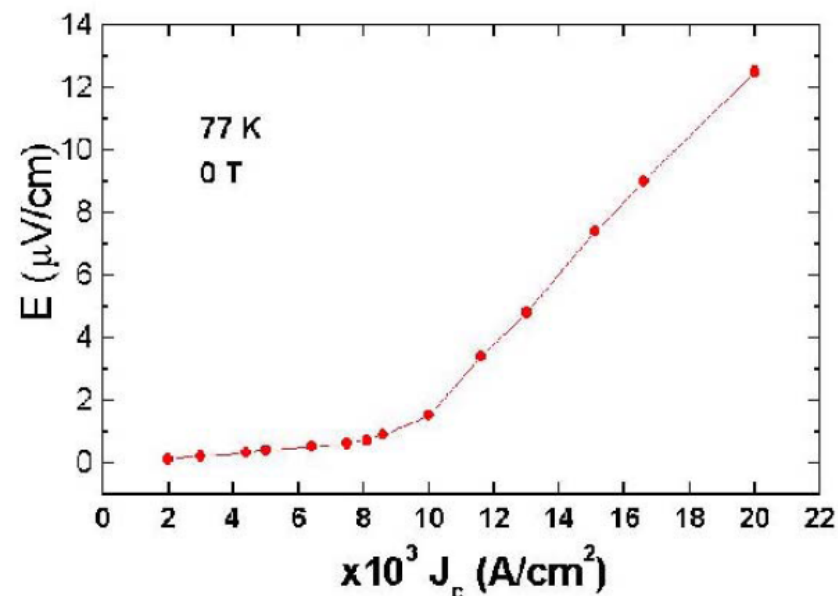


«Селекция» («выживание») наиболее быстрых направлений в ансамбле растущих кристаллитов предопределяет направление развития всего ансамбля (текстура)

Идея: G.J.Schmitz, ACCESS e.V.

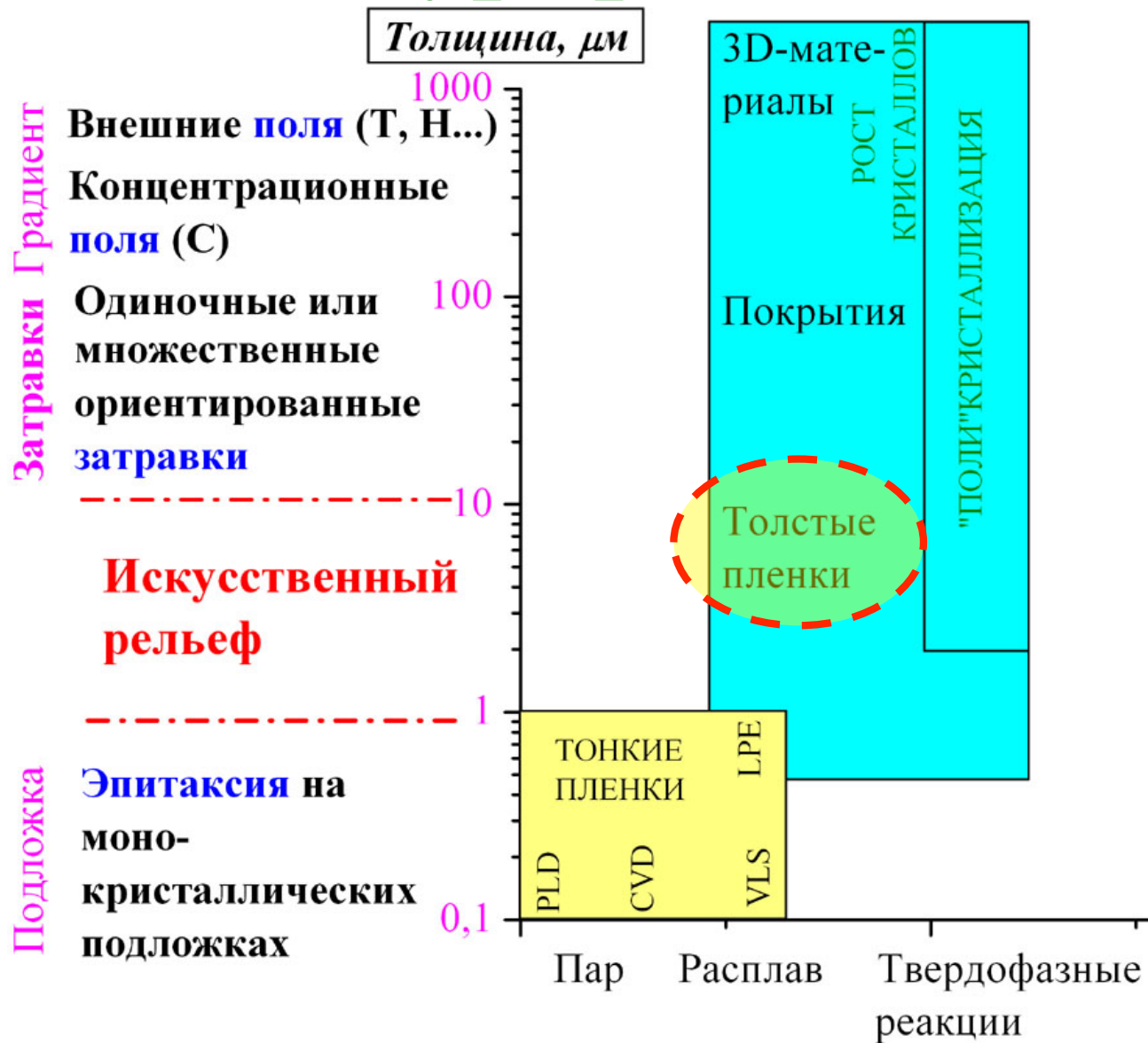
ФНМ МГУ

Лекция 4. Пленки



Москва, 2011 г.

Текстурирование



«Фильтры» ориентации роста зерен

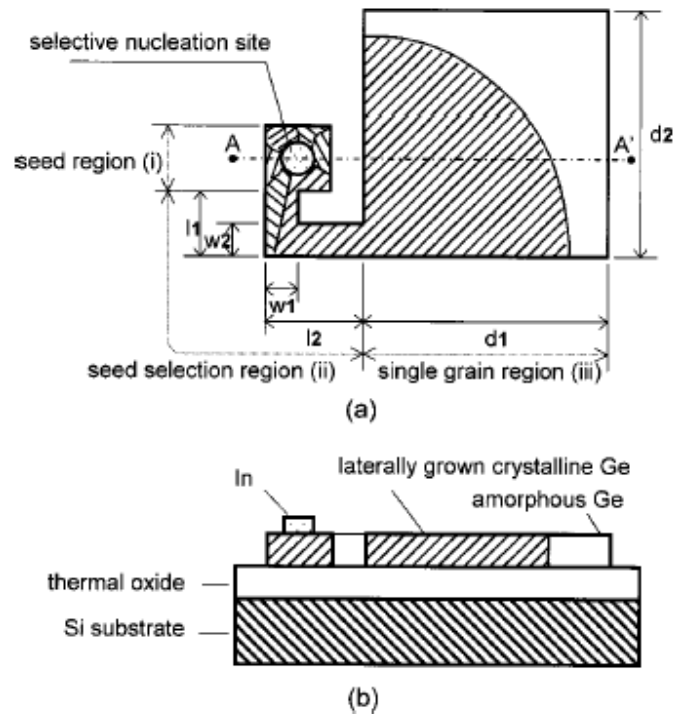


FIG. 1. In (a), plan view schematic of the pattern employed for grain boundary filtration. In (b), cross-sectional view of $A-A'$.

Appl. Phys. Lett., Vol. 77, No. 26, 25 December 2000

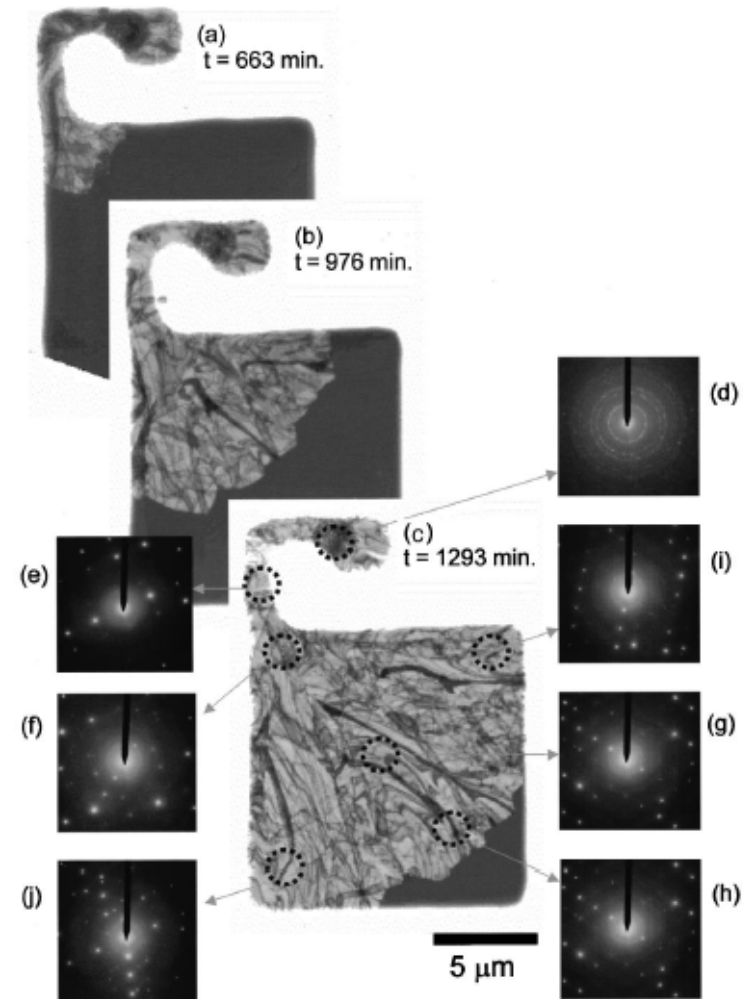


FIG. 3. Plan view transmission electron micrographs and selected area diffracted patterns for partially crystallized films after each 400 °C anneal.

Графоэпитаксия (идея)

- ✓ Ориентированный рост на кристаллографически соответствующем растущим кристаллам по симметрии расположения и профилю рельефе
- ✓ Рост с использованием геометрической селекции кристаллов (связанные перешейками островки)
- ✓ Перекристаллизация с использованием “термического рельефа” (особая форма лазерного луча, островки с различной теплопроводностью)
- ✓ Искусственная эпитаксия под действием периодических механических напряжений (“шахматная доска”)
- ✓ Sntaxy (selective nucleation based epitaxy)

- + *оптимально работает для тонких пленок*
- + *универсальный метод, не требует эпитаксии*
- + *имеет много гибких модификаций*
- + *может ориентировать до 100% растущих кристаллитов*
- + *применим для получения сплошных слоев*

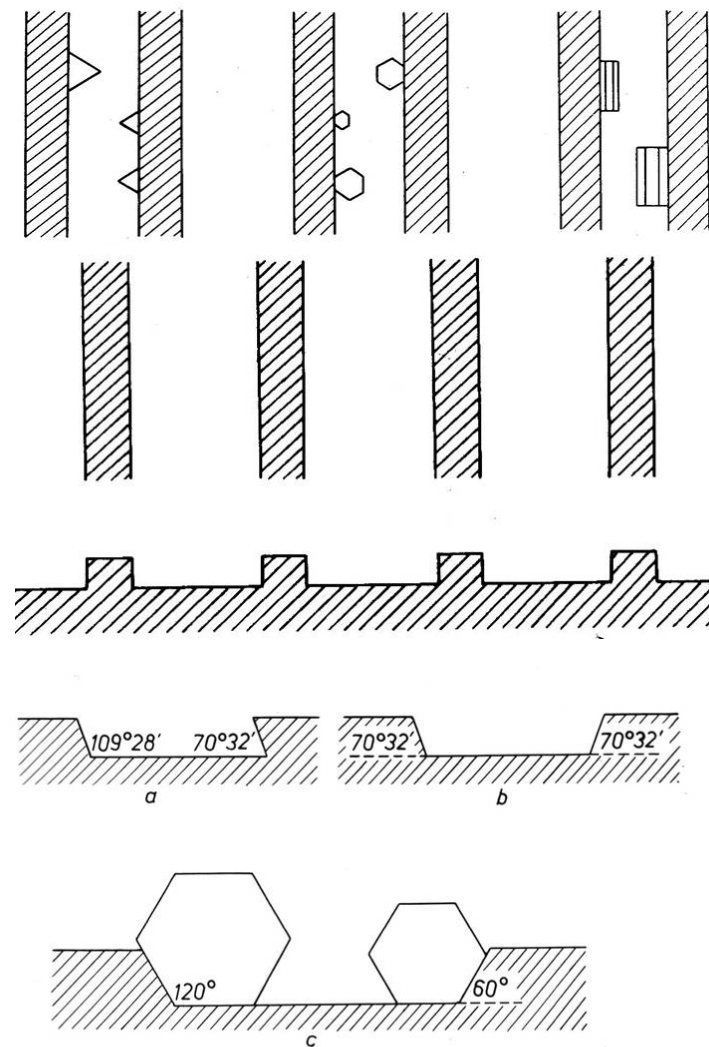
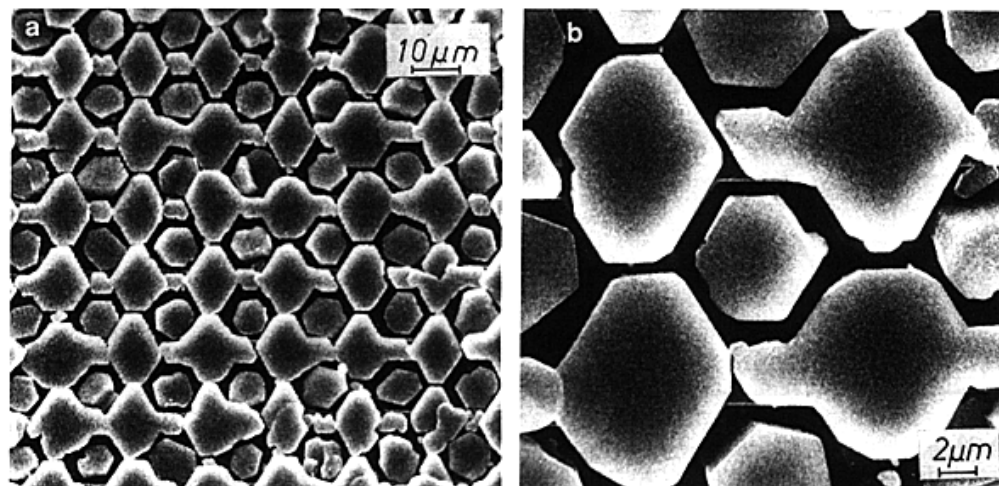
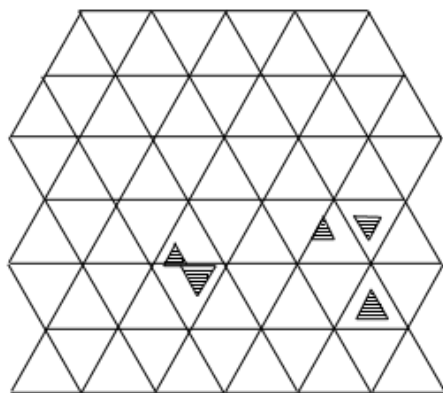


Fig. 9. Profiles of a substrate with microrelief having various slopes of sidewalls, and positions of some crystallites.

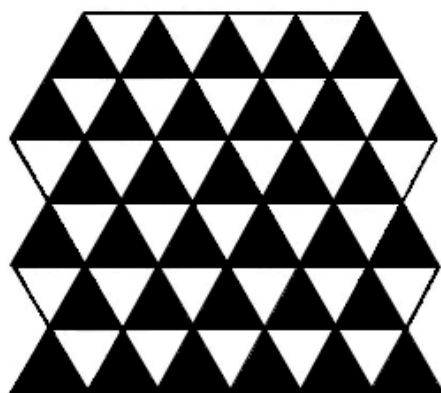
Графоэпитаксия (примеры)



Полупроводники
(ZnS на аморфной подложке)



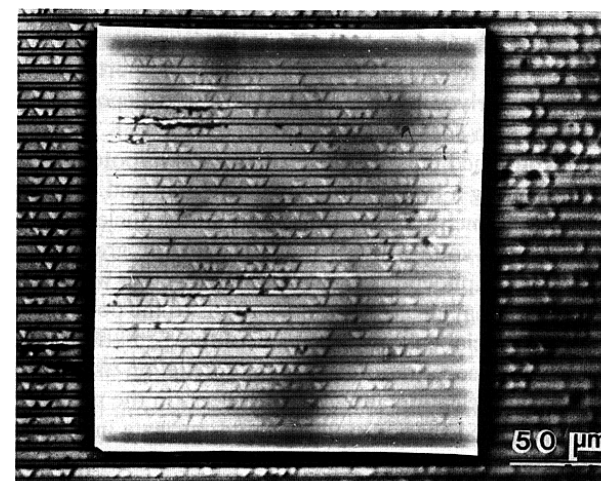
а



б

ФНМ МГУ

Лекция 4. Пленки



Белки (каталаза)
Москва, 2011 г.

Полимеры

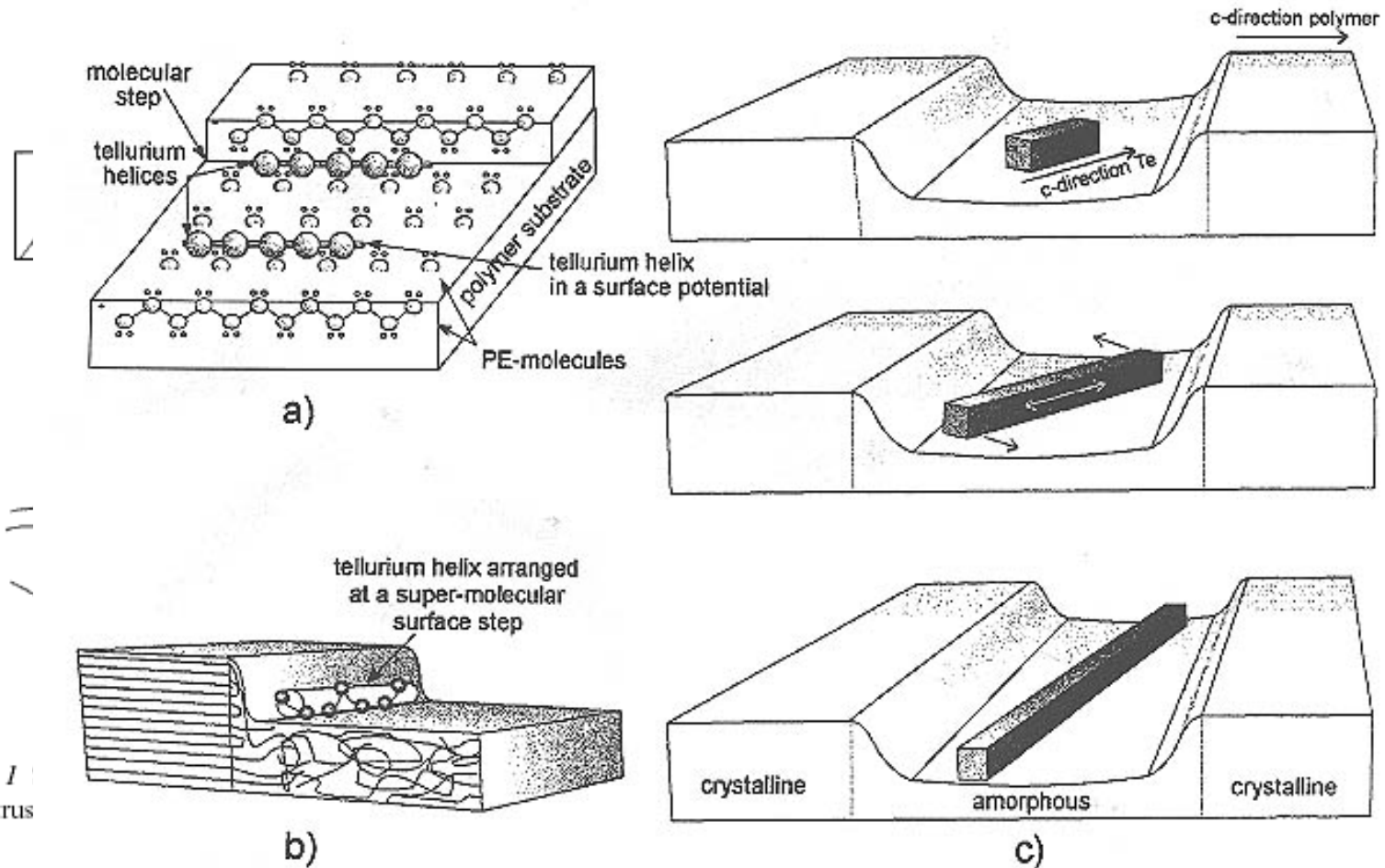
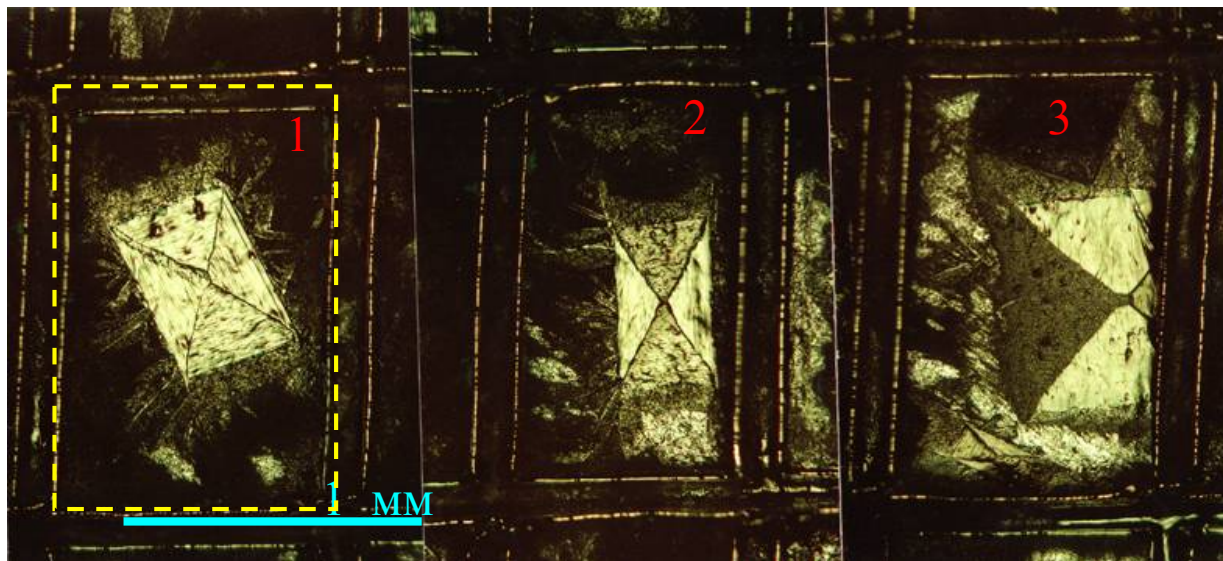


Figure 1
by protus

are caused

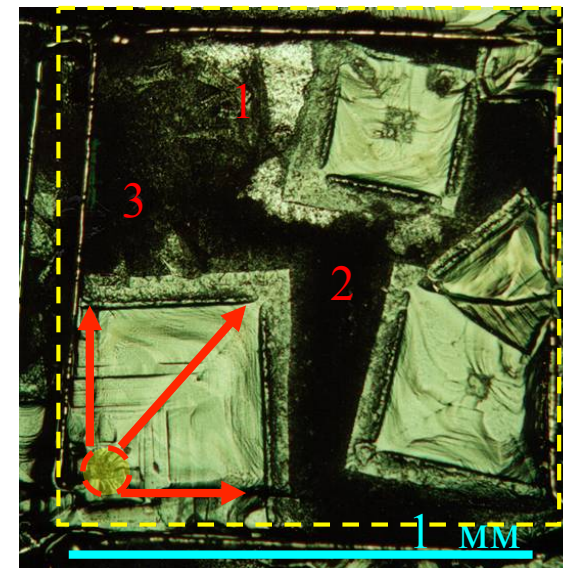
Роль искусственного рельефа



В ячейке,
разориентация

Близко
к стенке

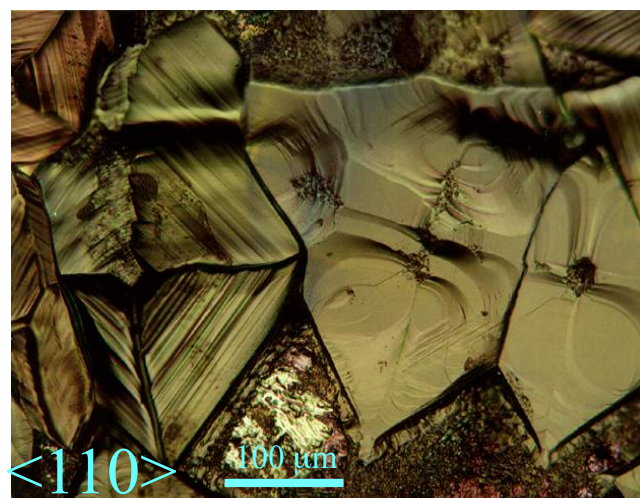
На стенке,
ориентация



Две
перпендикулярные
стенки



ФНМ МГУ

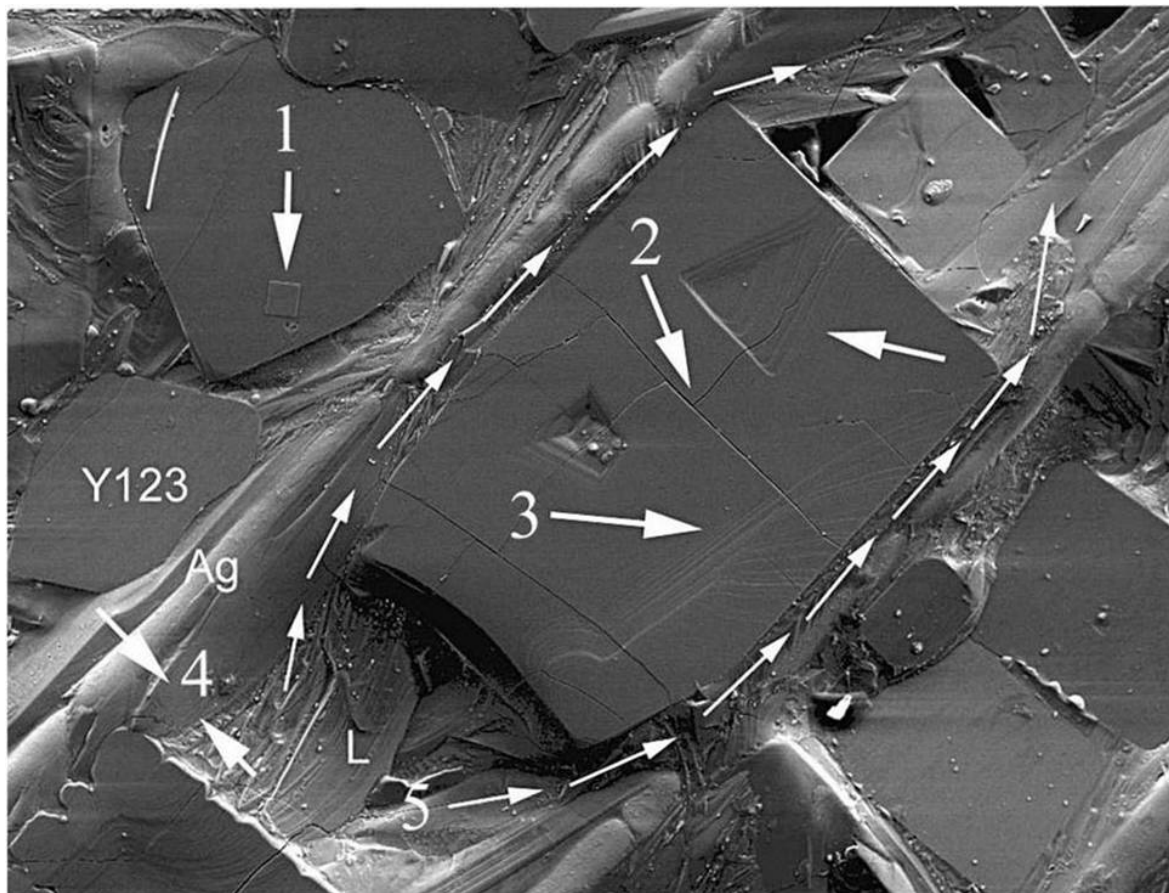


Лекция 4. Пленки

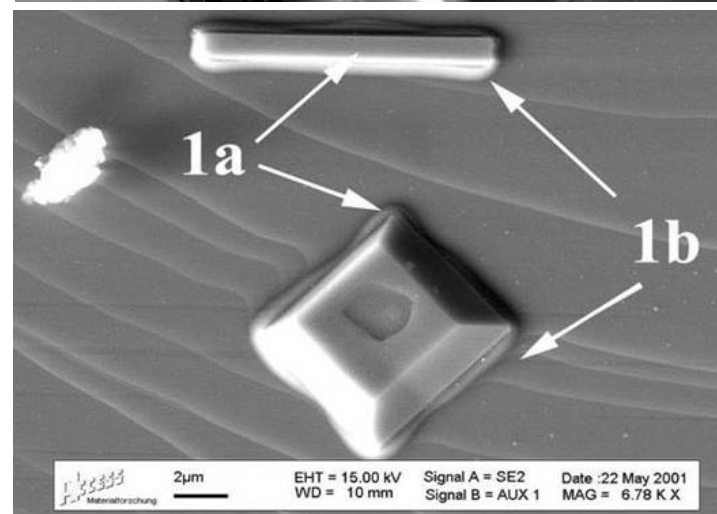
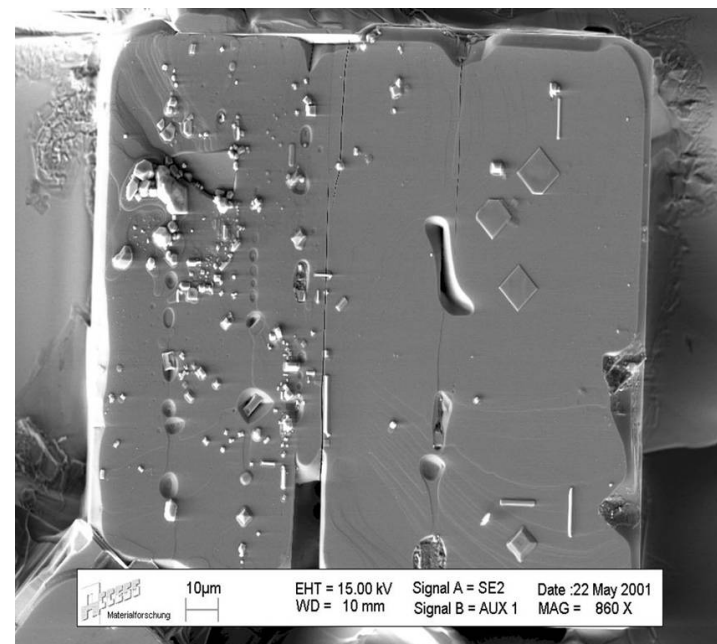
- Рост кристаллов около
элементов рельефа**
- Контакт со стенкой
 - Симметрия рельефа
 - Один кристалл на ячейку

Москва, 2011 г.

Микроморфология



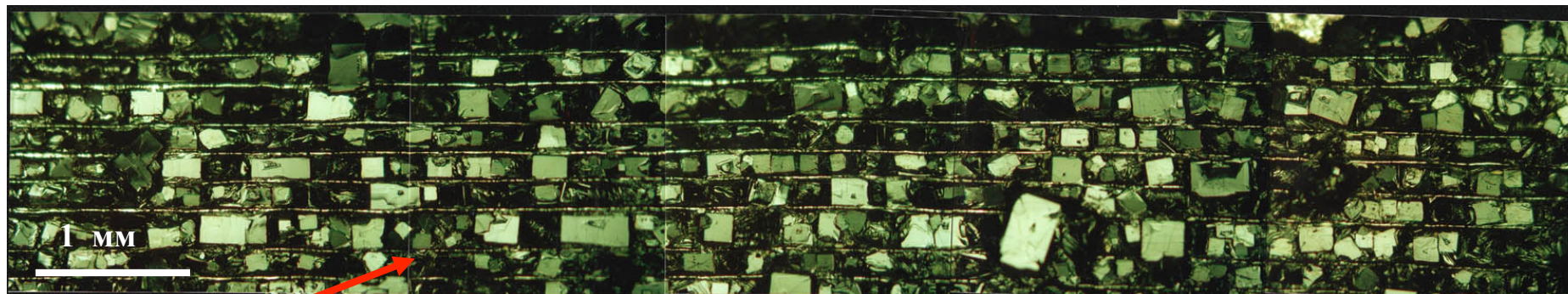
1 - BaCuO_2 , 2 - трещины, 3 –
послойный рост, 4 - мениск,
“Y123” – кристаллиты в
широкой канавке



Пленка расплава

Ориентация кристаллитов

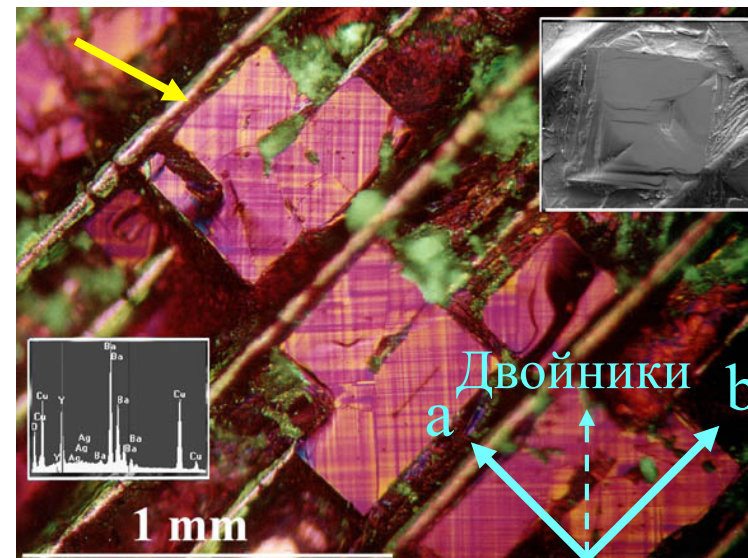
ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$



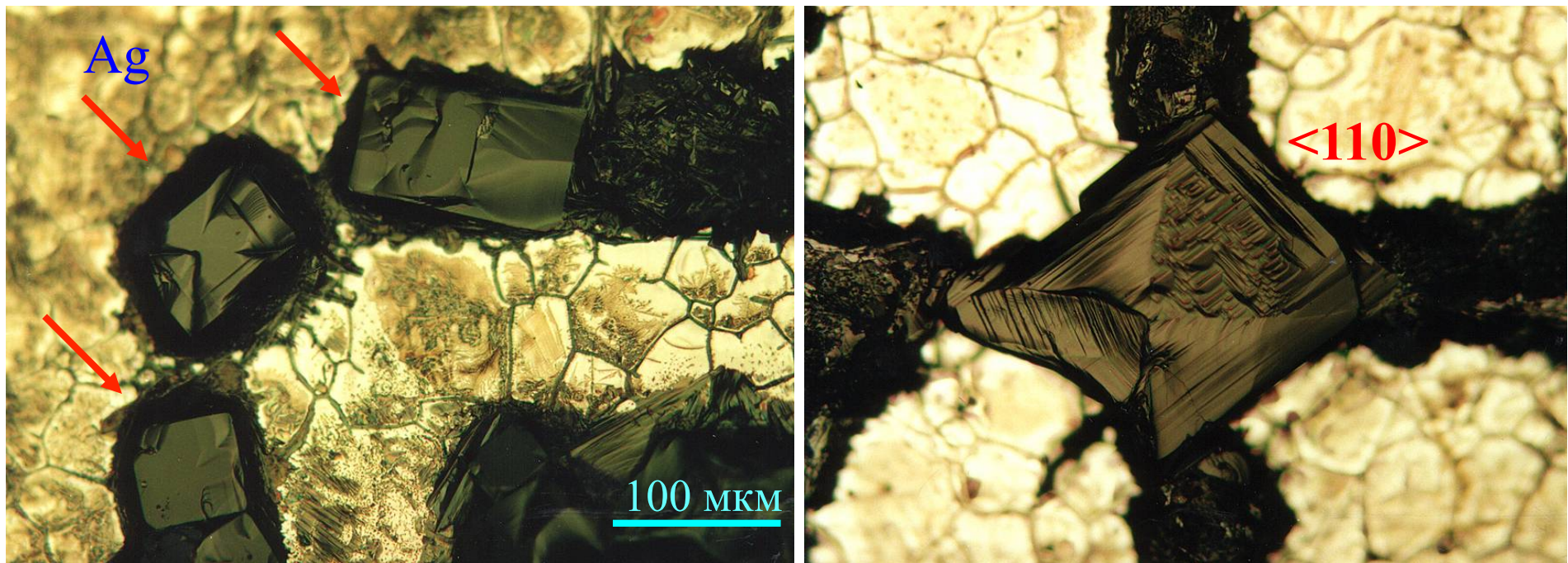
Параллельные
внутренние стенки
канавок

75% из 220 кристаллов
полностью ориентированы
на площади 8-9 мм²

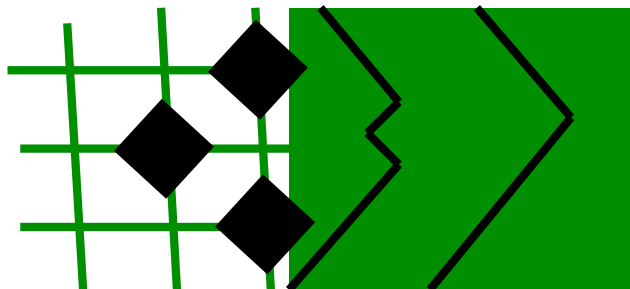
- ✓ Соответствующий по симметрии рельеф (*ось второго порядка, пластинки*),
- ✓ Соответствие размеров кристаллов и элементов рельефа (*около 100 мкм*),
- ✓ Геометрические ограничения роста (*две параллельные стенки*),
- ✓ Контроль зародышеобразования (*вблизи элементов рельефа*)



«Умные» затравки



Пропитка расплавом структуры, полученной на поверхности серебра методом трафаретной печати



ФНМ МГУ

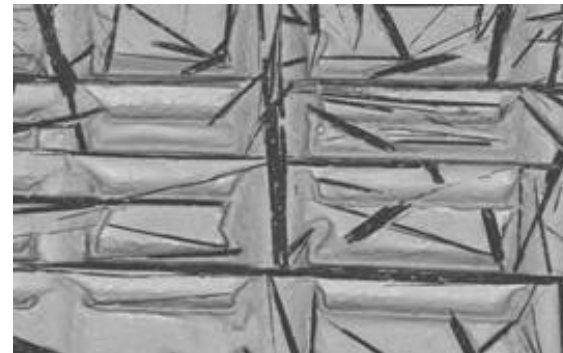
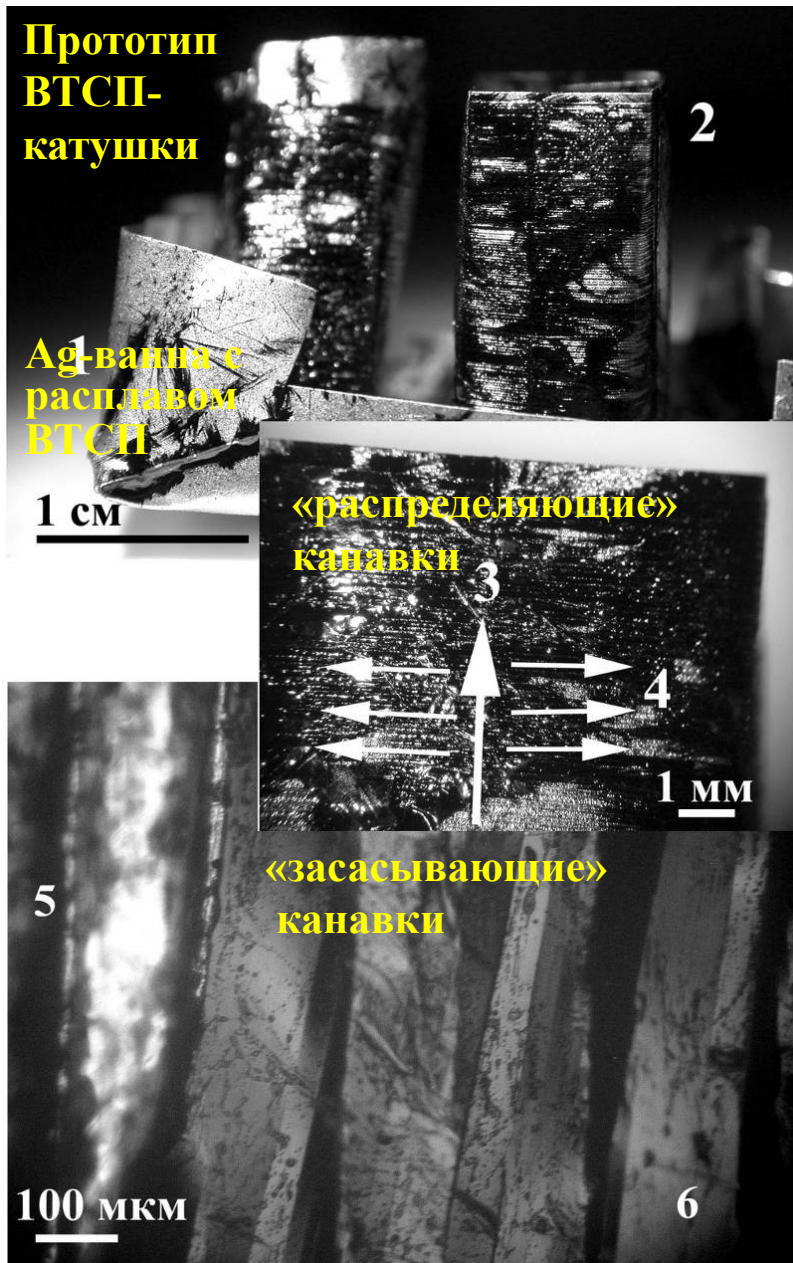
$T \downarrow$ - образование центров кристаллизации и рост «затравок» в **требуемой** ориентации

$T \downarrow \downarrow$ - развитие фронта кристаллизации в основном поле в той же ориентации

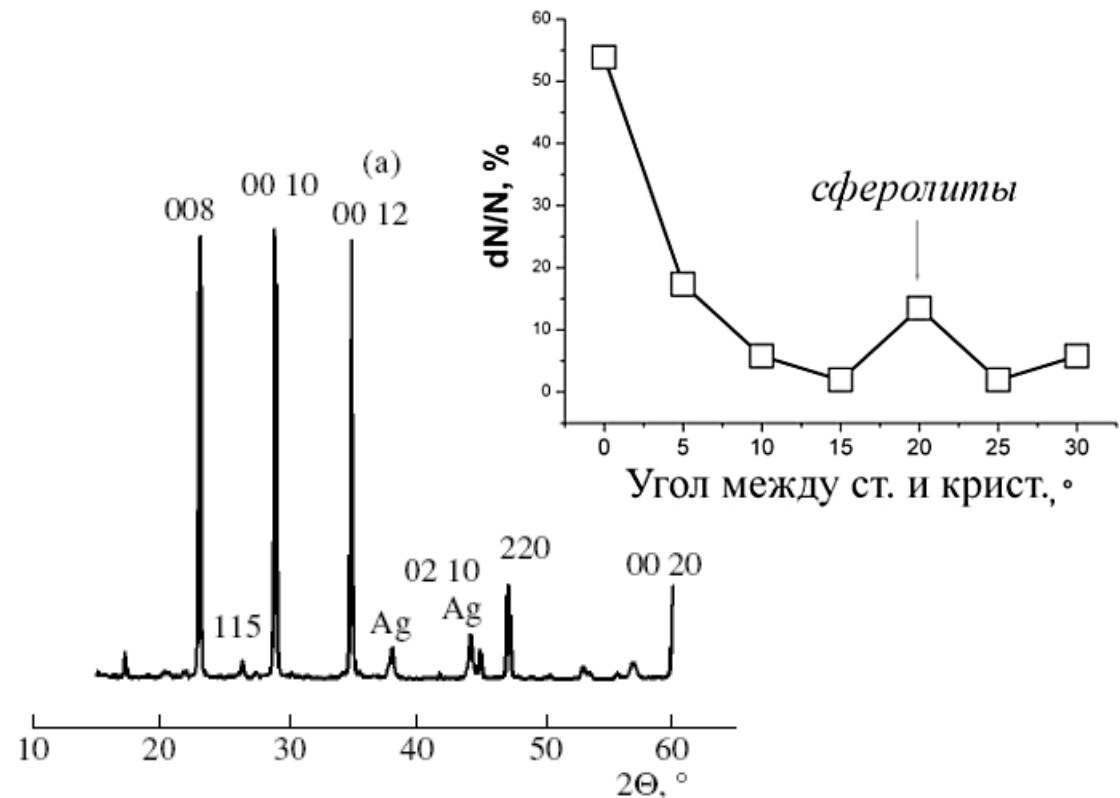
Лекция 4. Пленки

Москва, 2011 г.

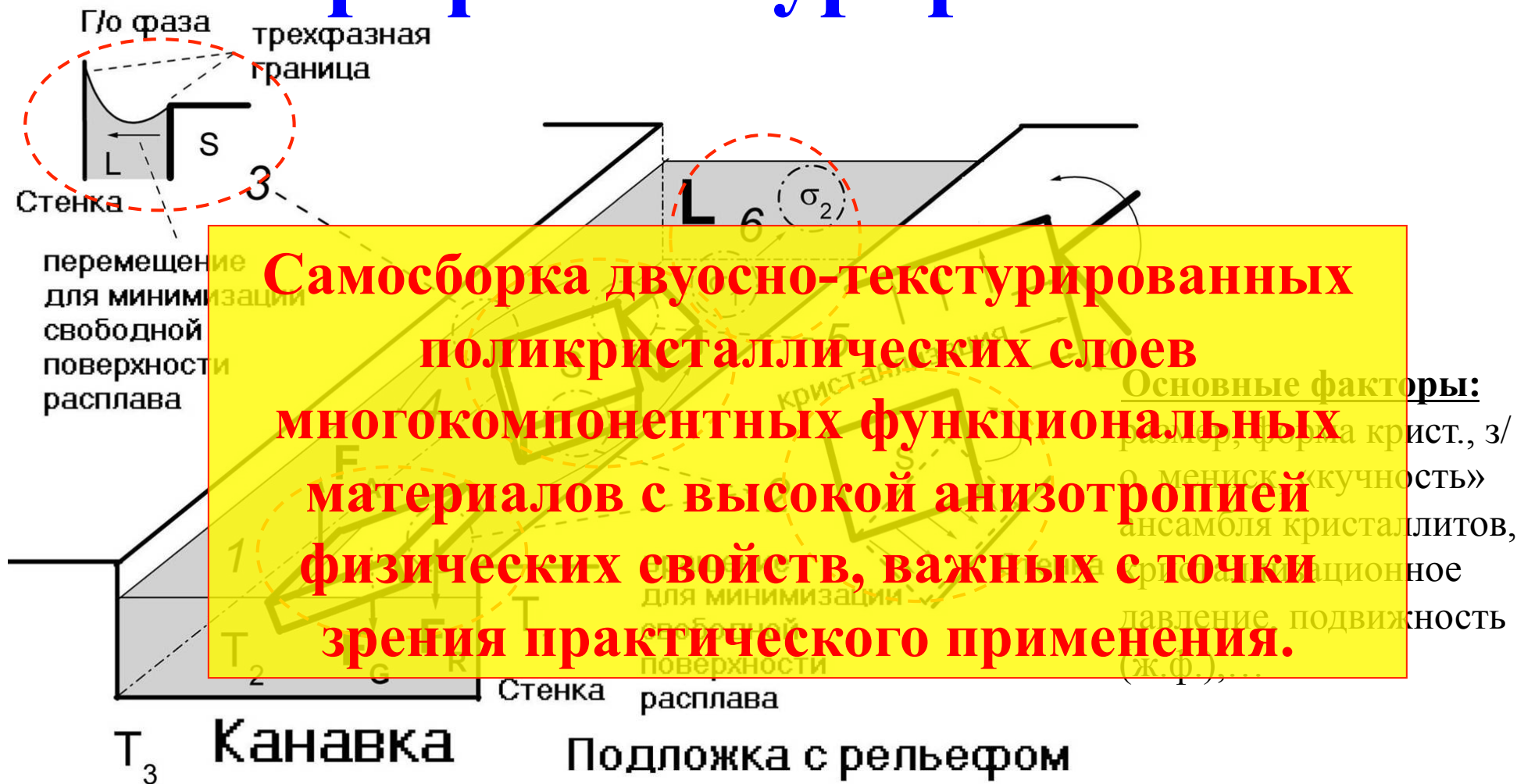
“Самотекстурирование”



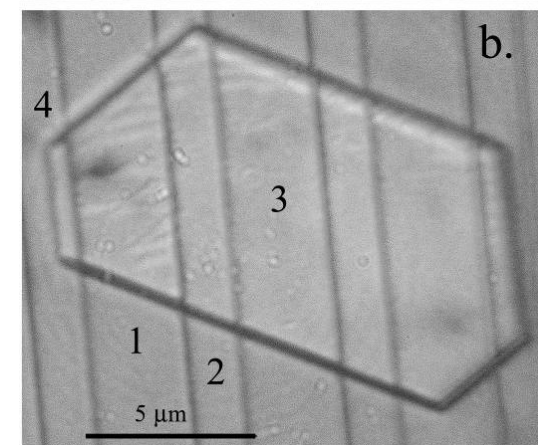
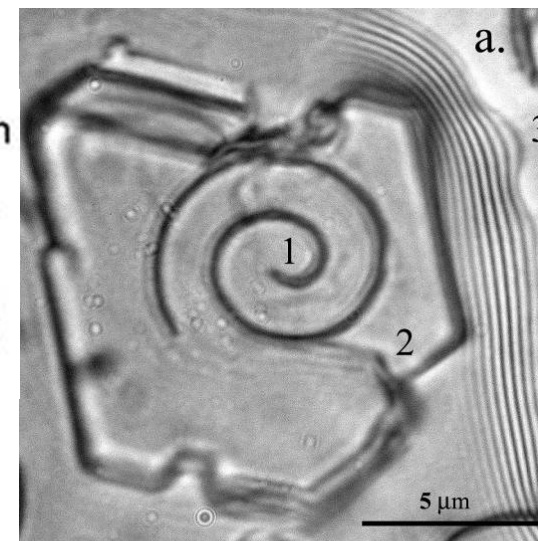
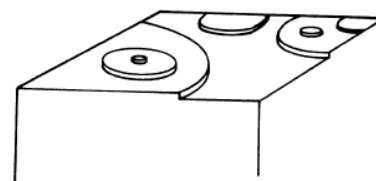
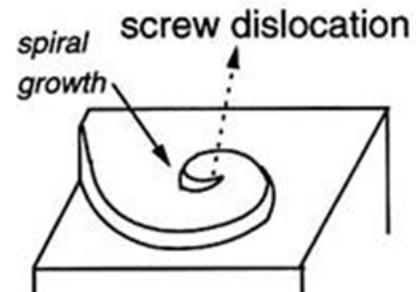
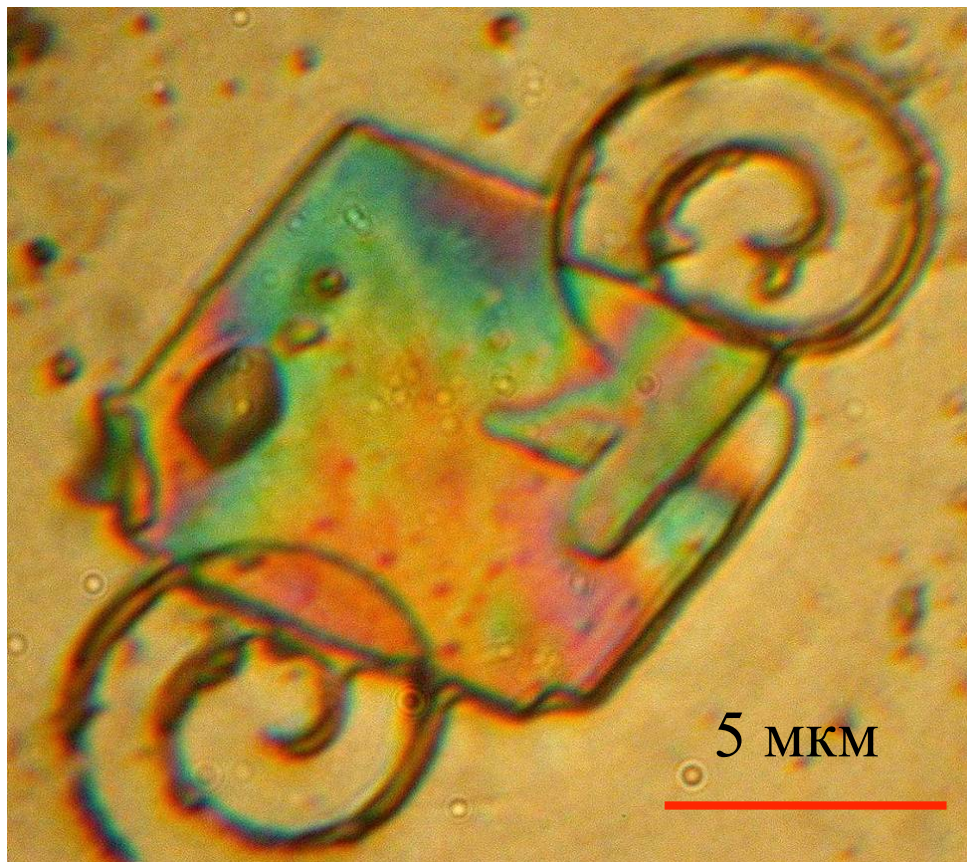
АЕС+CF+melt =
 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$,
 Ag, 920-880 °С,
 охлаждение
 ~1-3 °С/ч, воздух



Графотекстурирование

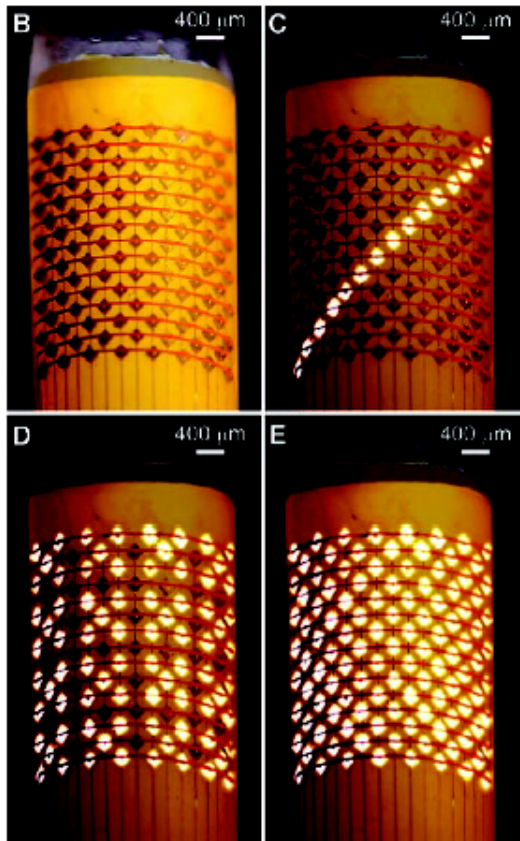


Биокристаллизация



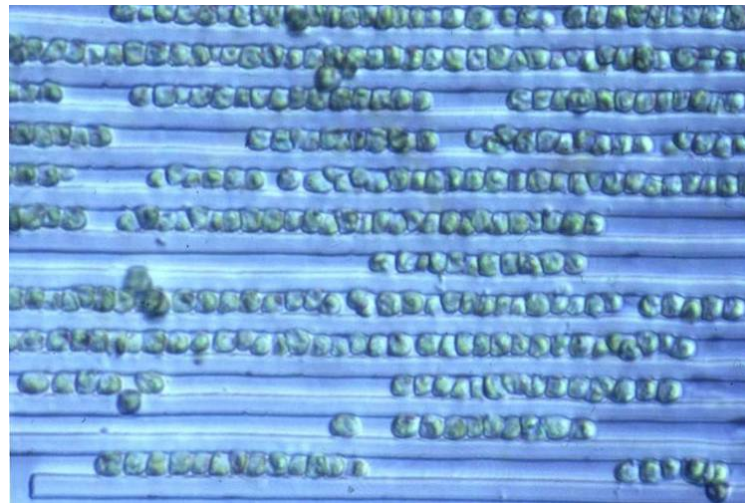
Хиральный рельеф изменяет механизм (и скорость) роста энантимеров

Гибридные материалы

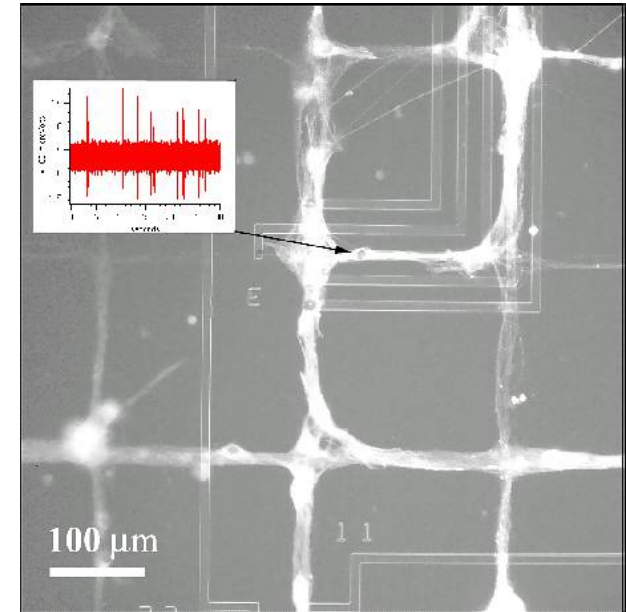


Гибкий п/п
дисплей

Микрокапиллярная
сенсорная «микросхема»

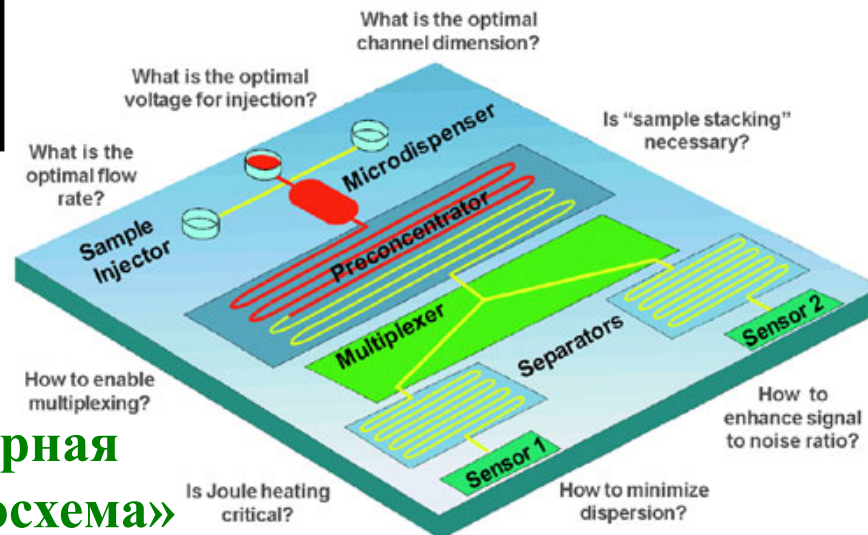


Колония бактерий

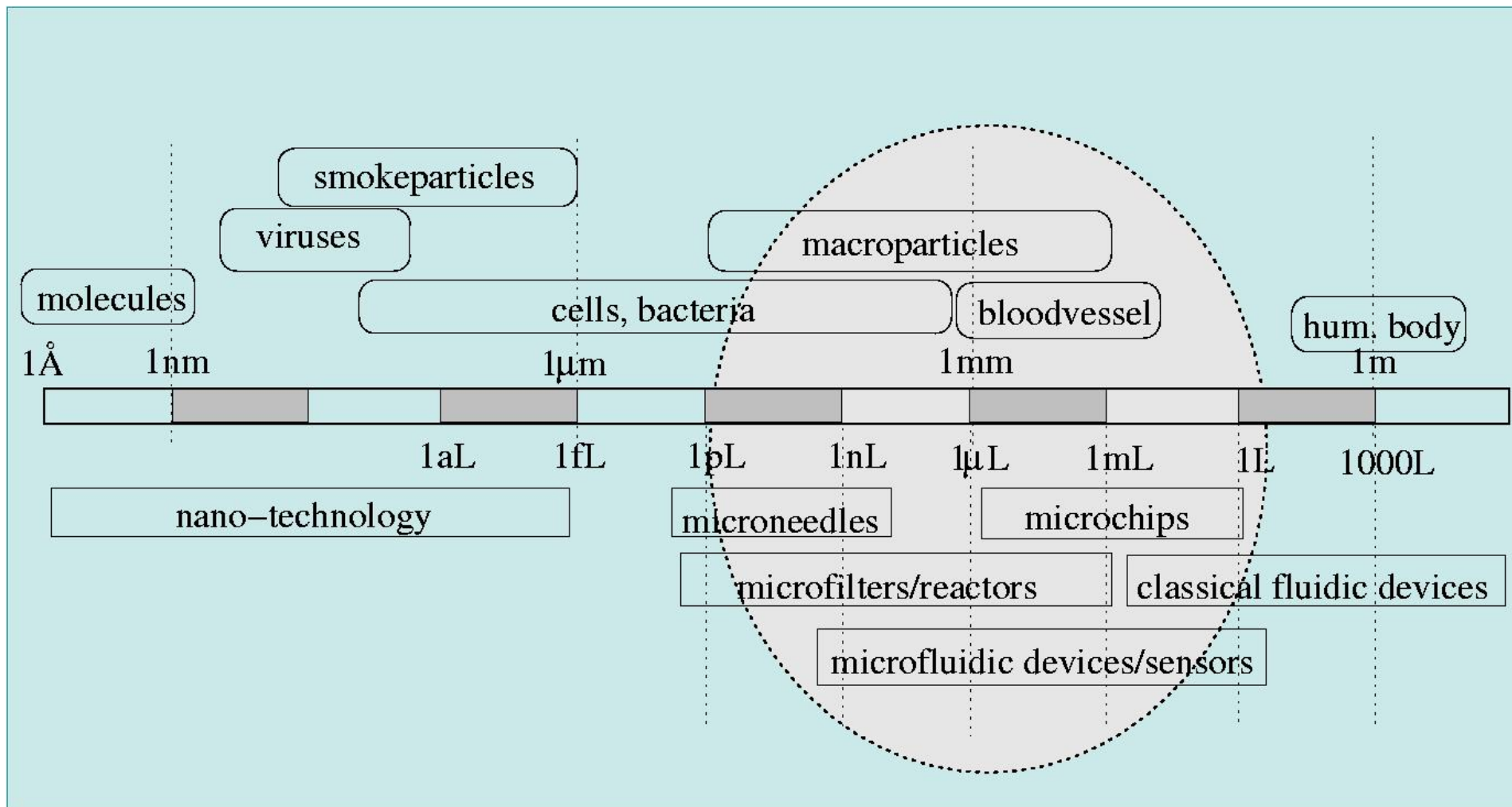


Нервные
клетки,
размноженные
на
микрорельефе
поверхности

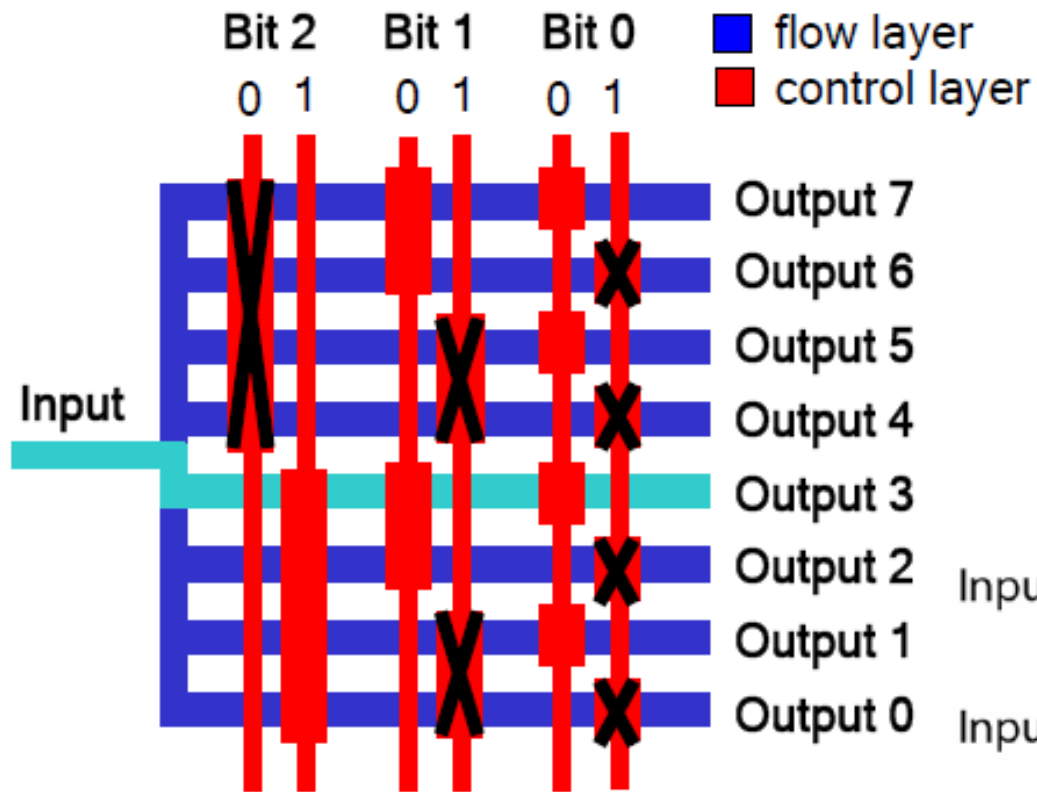
How Does One Successfully Build a Lab-on-a-Chip?



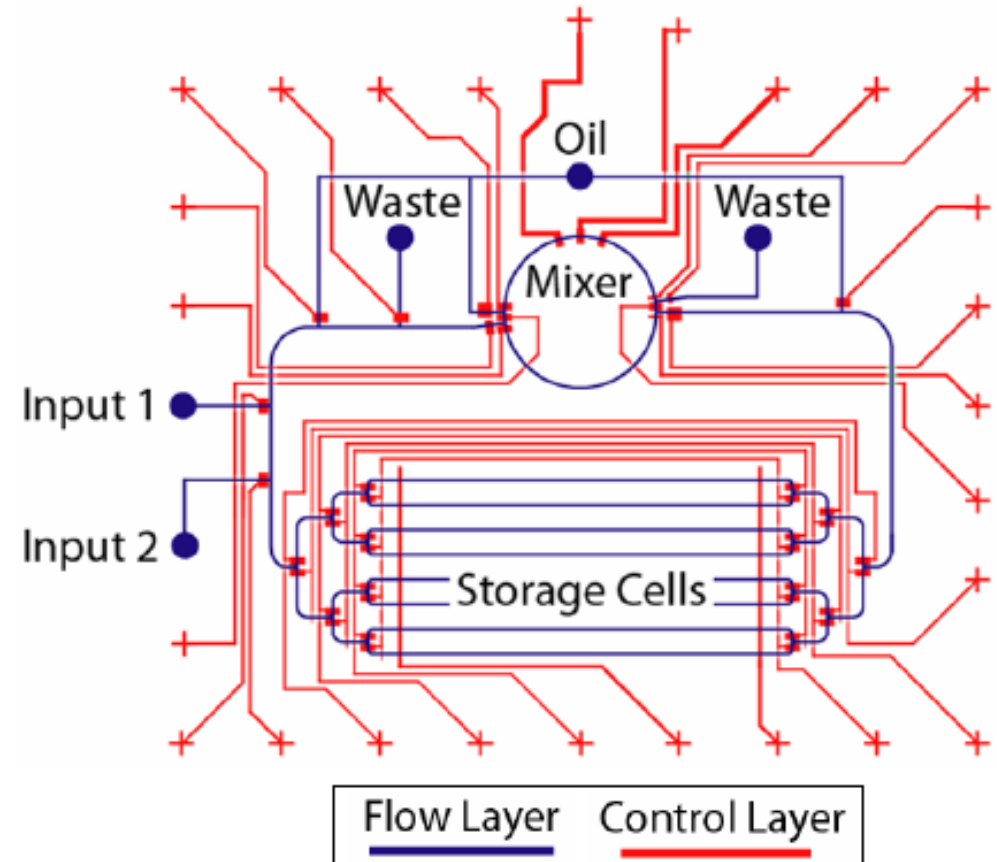
Микрофлюидика

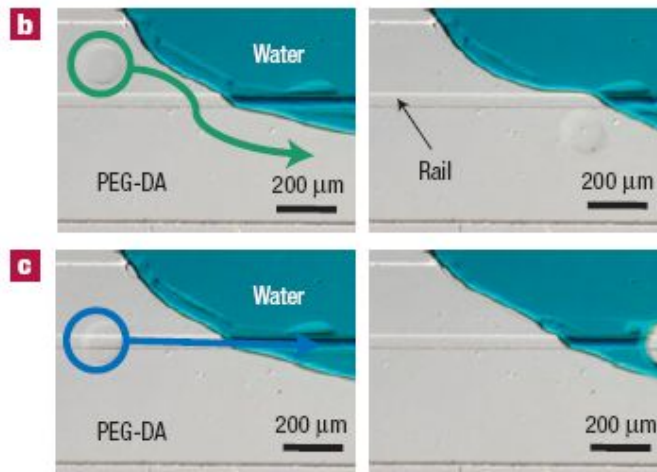
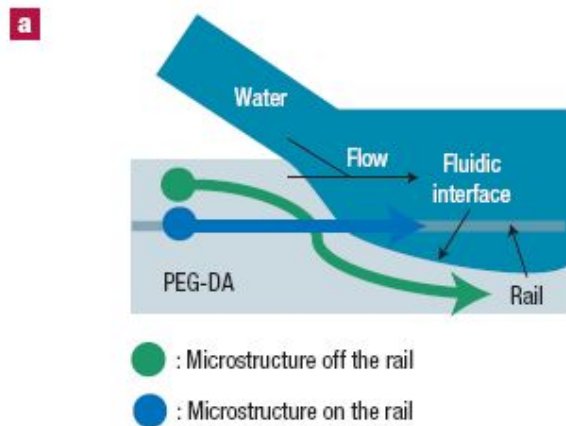


Логика



Example: select 3 = 011





Самосборка объектов, состоящих из разнородных частей, с использованием скрещивающихся потоков. а) Принципиальная схема движения объекта в данной системе. b-c)

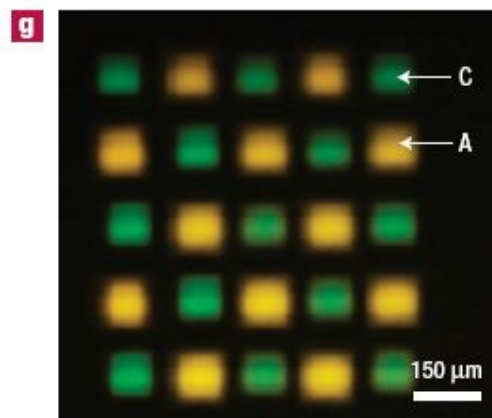
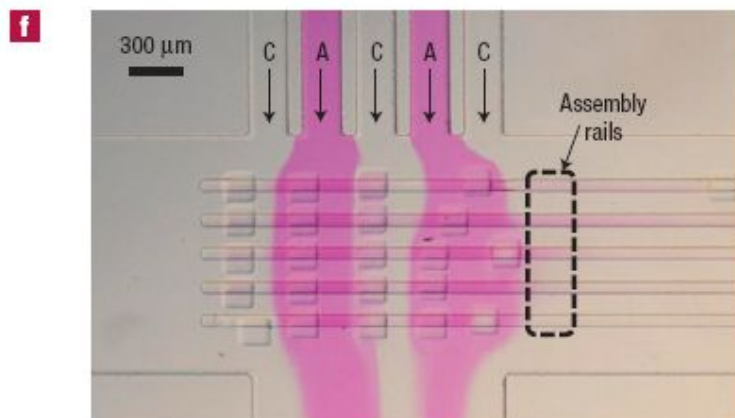
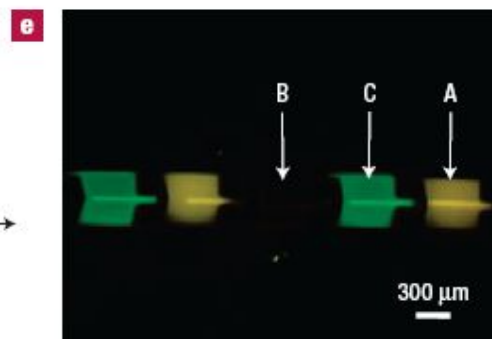
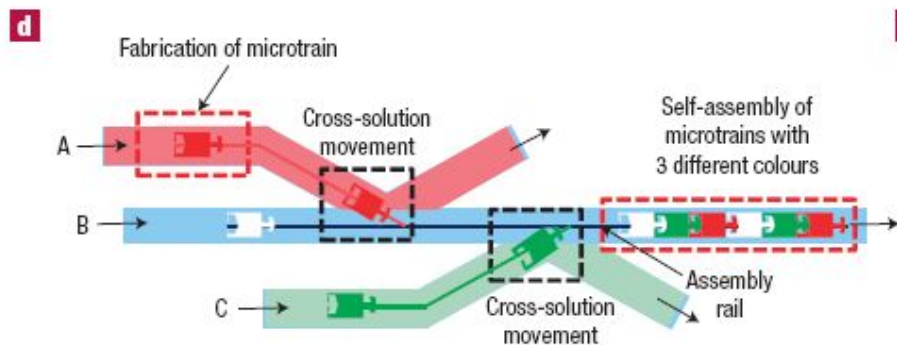
Микрофотографии, подтверждающие

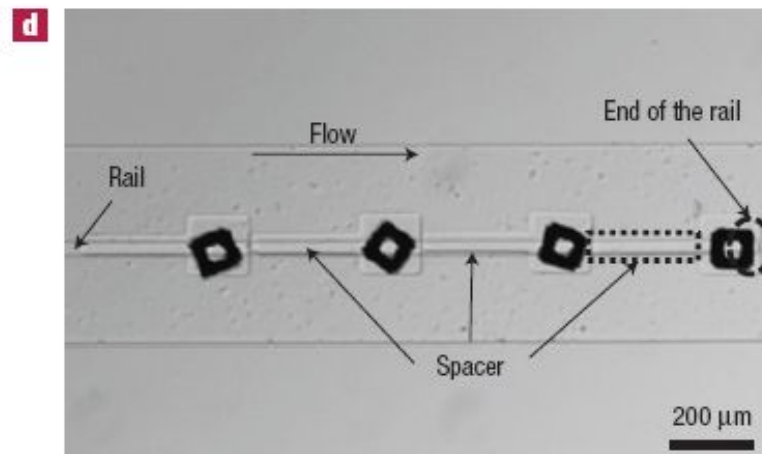
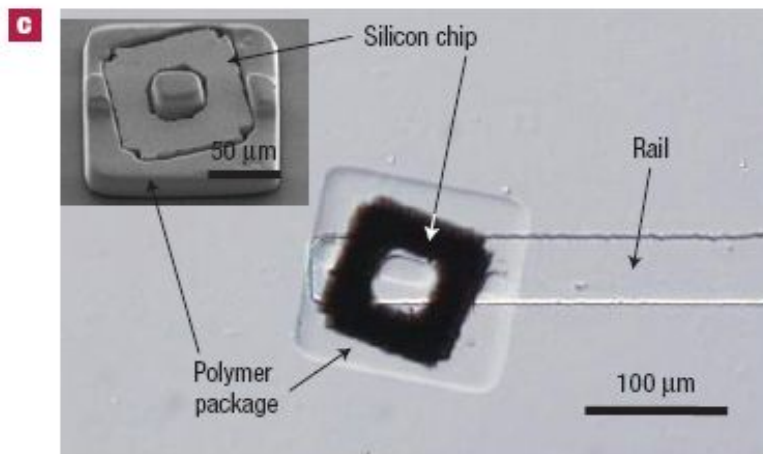
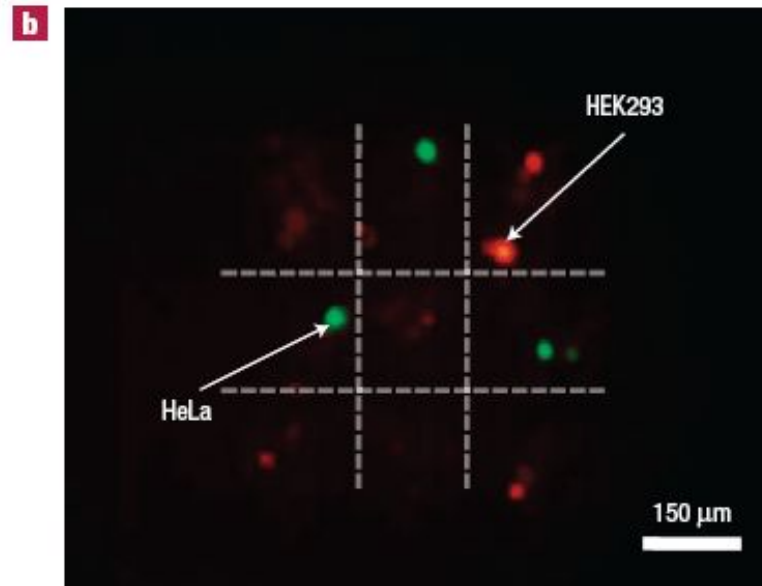
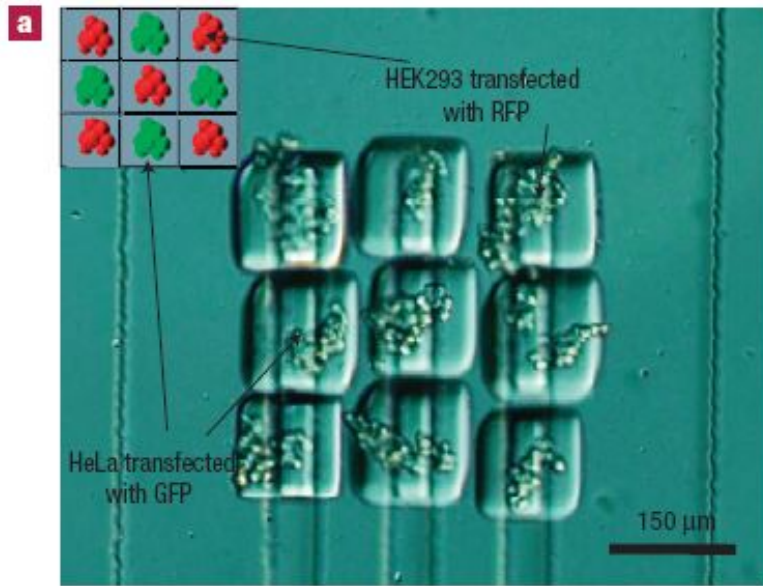
правильность выдвинутого предположения о движении частиц. d) Схема процесса сборки сложных систем с помощью

описанного подхода. е) Флуоресцентная

микрофотография 1D массива. f) Процесс создания 2D массива из частиц различного сорта.

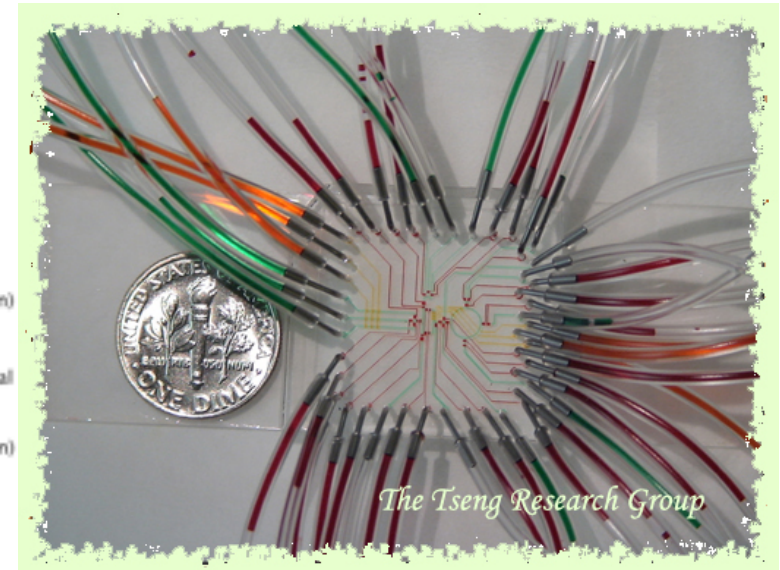
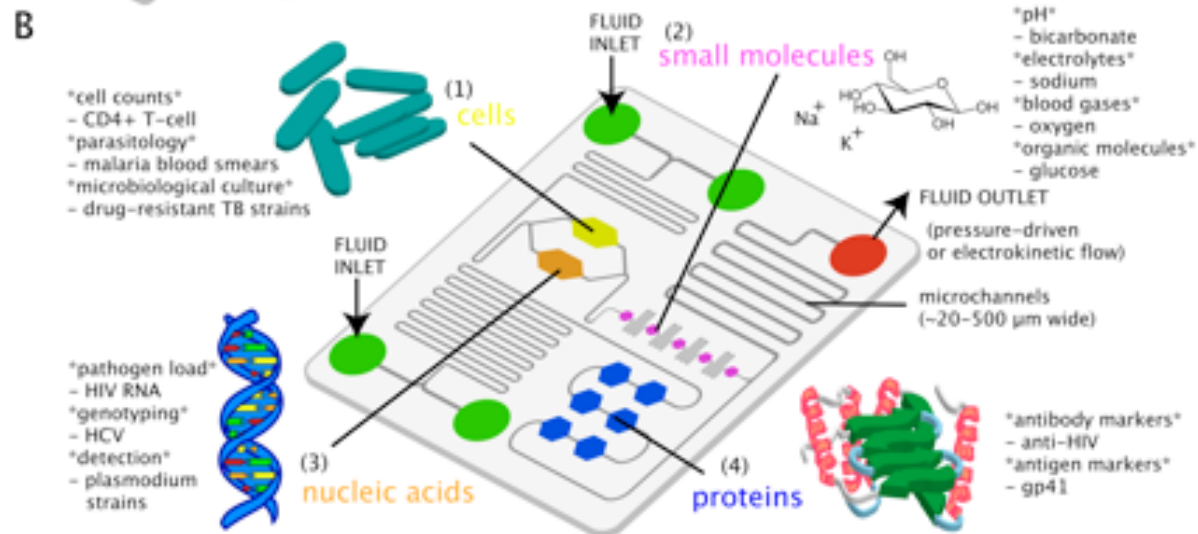
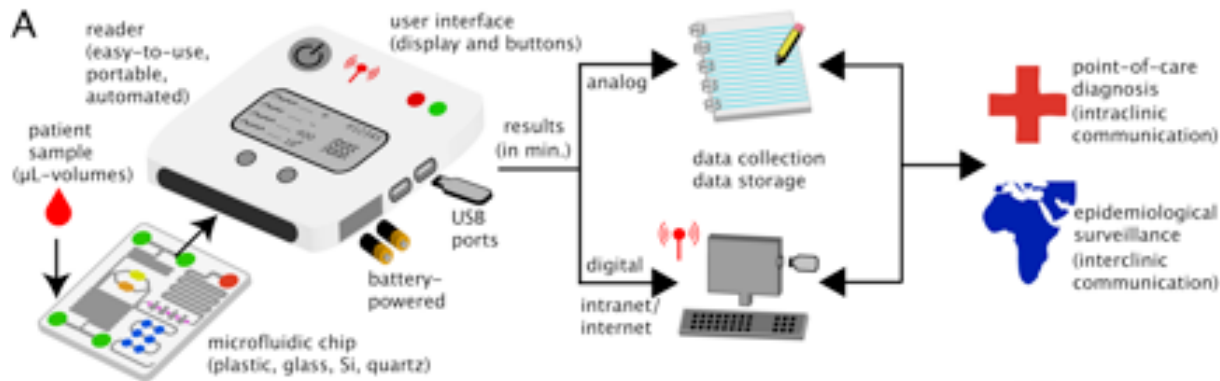
g) Флуоресцентная микрофотография 2D массива.



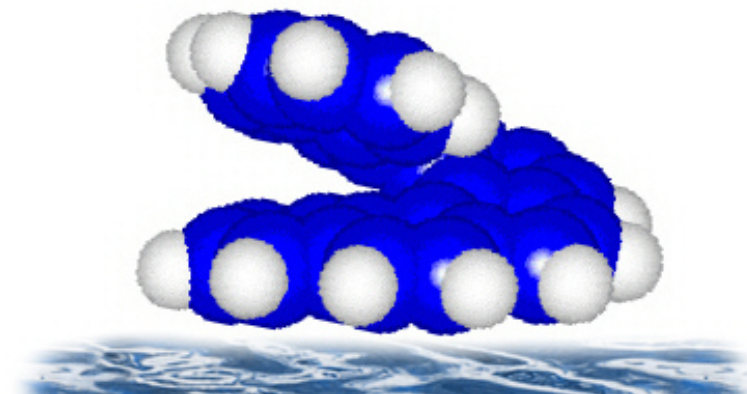
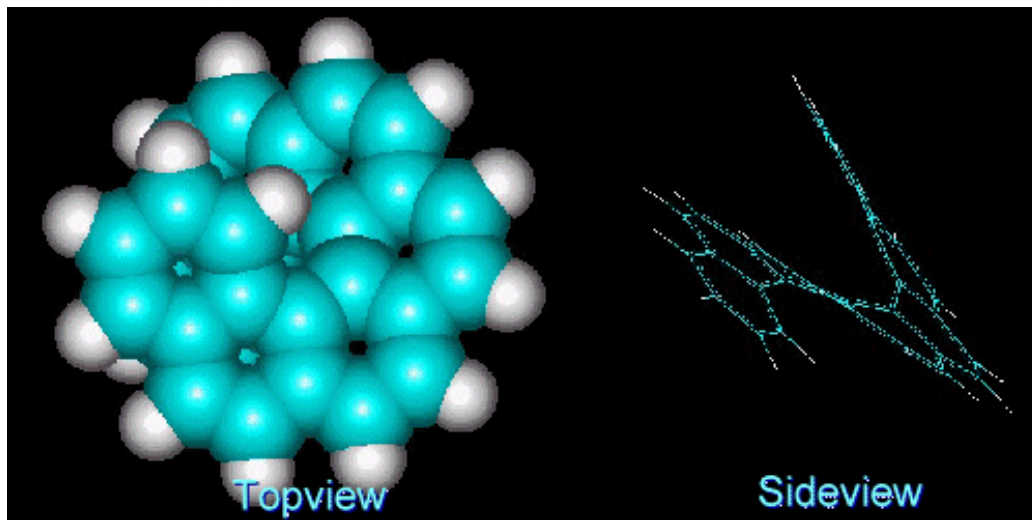
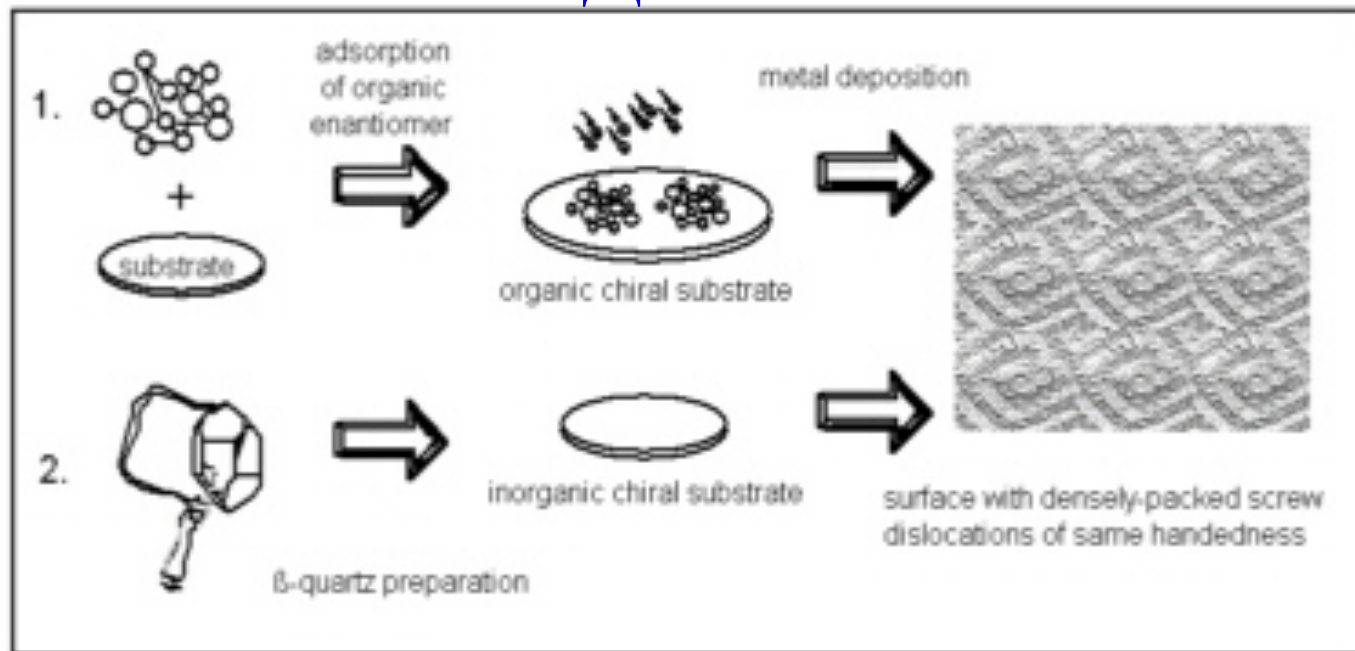


Непосредственное применение данной технологии для клеточной инженерии и упаковки микрочипов. а-б) Прямое и флуоресцентное изображение собранного массива 3x3 из двух видов живых клеток. с-д) Упаковка микрочипов, размеры которых 100x100 микрон. Данный вид упаковки может быть применён при создании LED-панелей для равномерного и яркого освещения (например, в операционных, школах, квартирах).

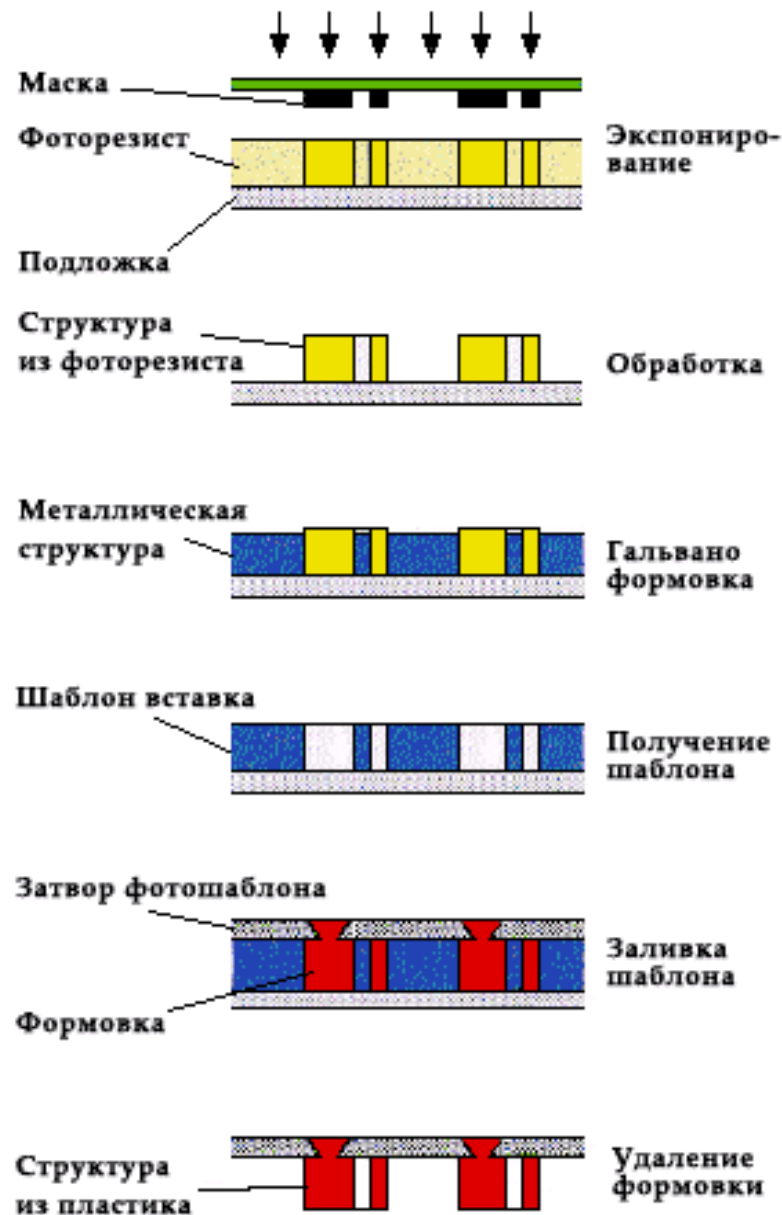
Биологические микрочипы

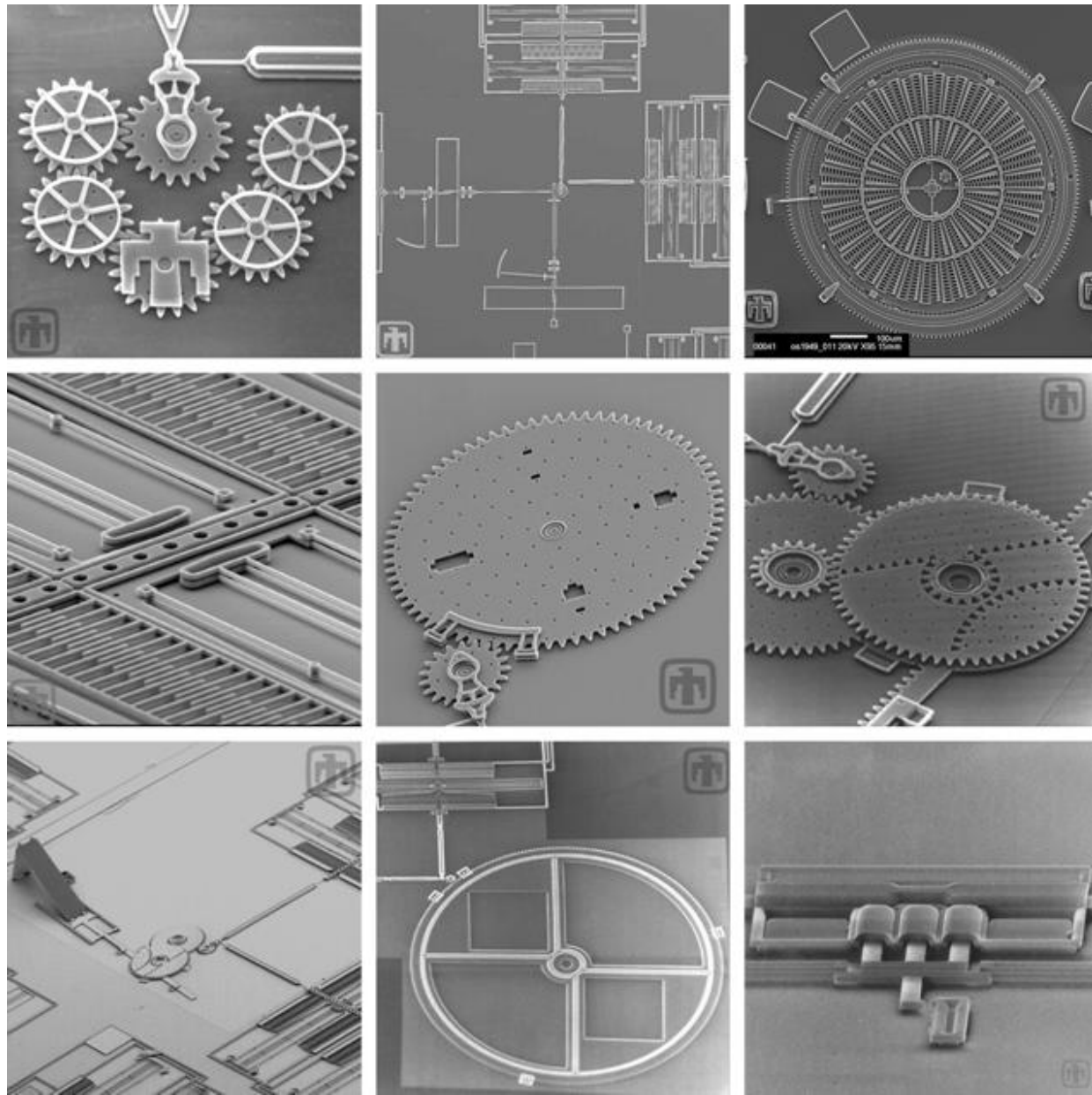


«Геликоидные» пленки

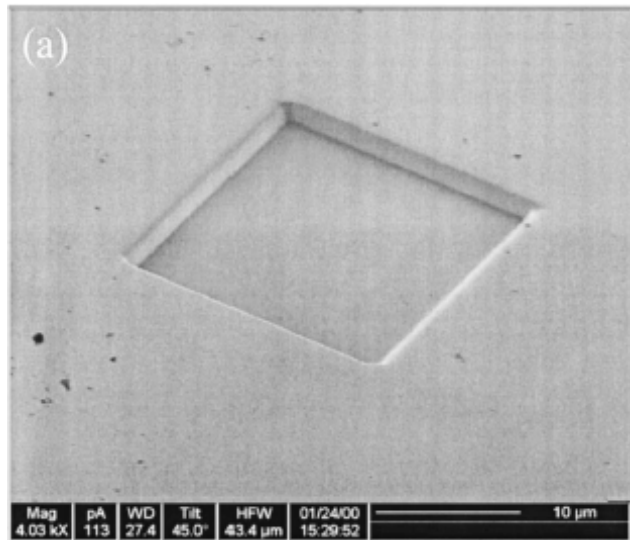


MicroElectroMechanicSystems

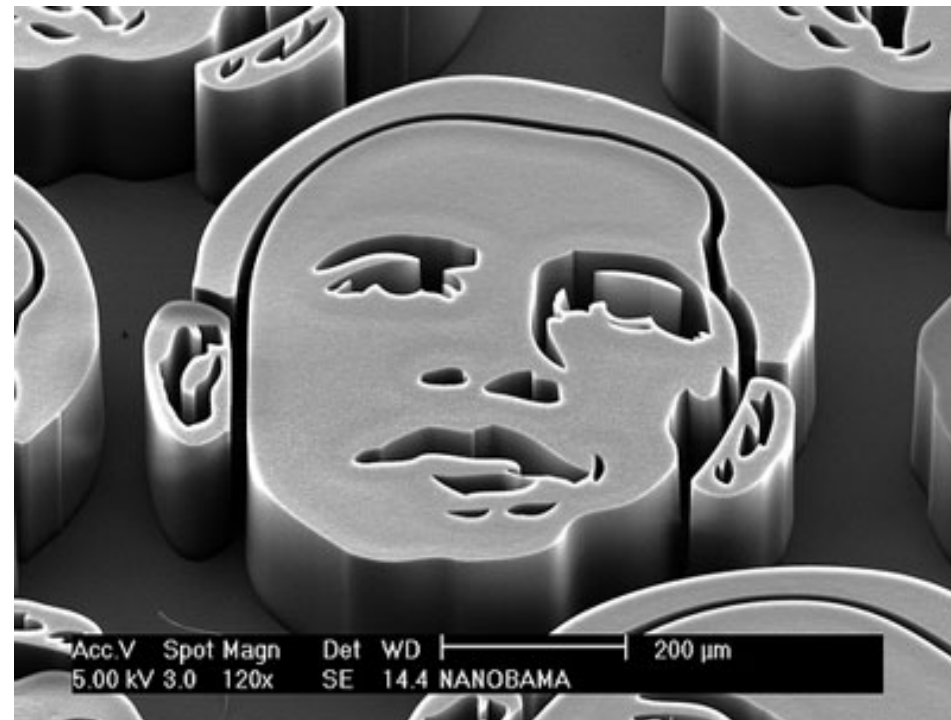
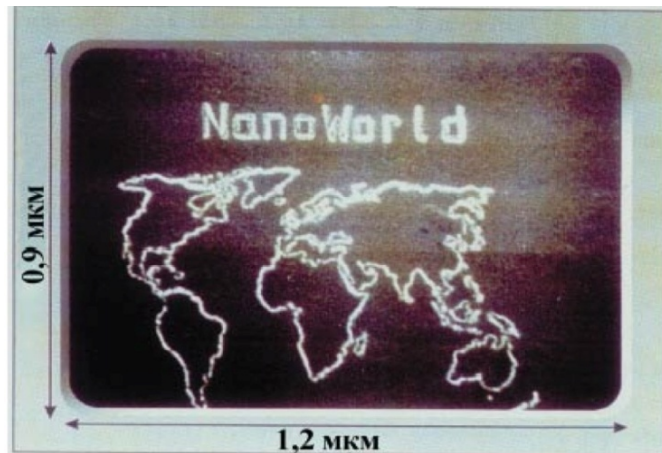




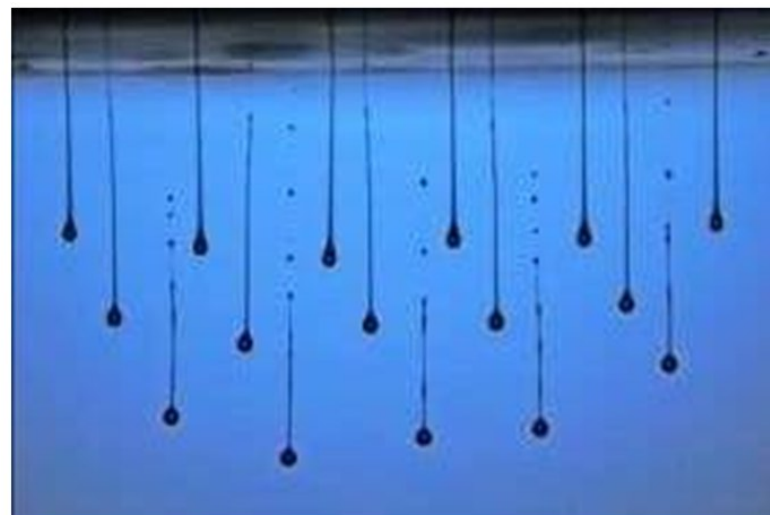
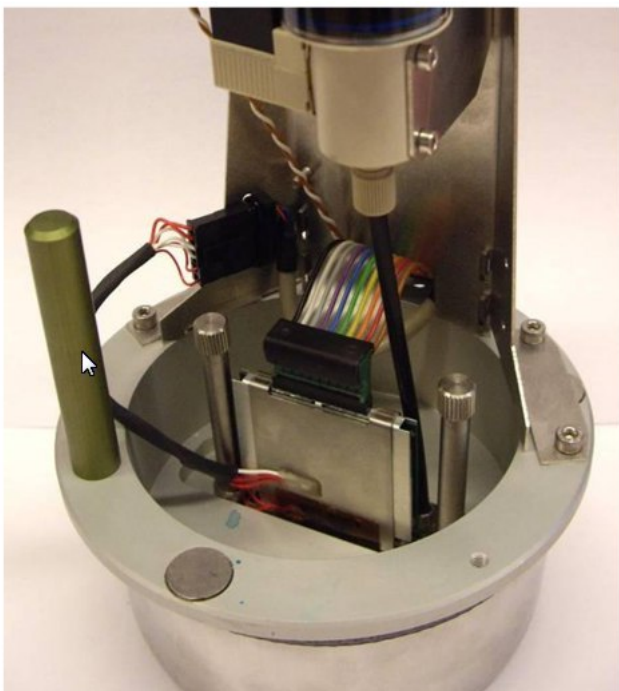
Литография фокусированным пучком заряженных частиц



Примеры структур, получаемых с помощью фокусированного ионного (а – вытравливание подложки ионами) и электронного (б - разложение хлорида алюминия) пучка.

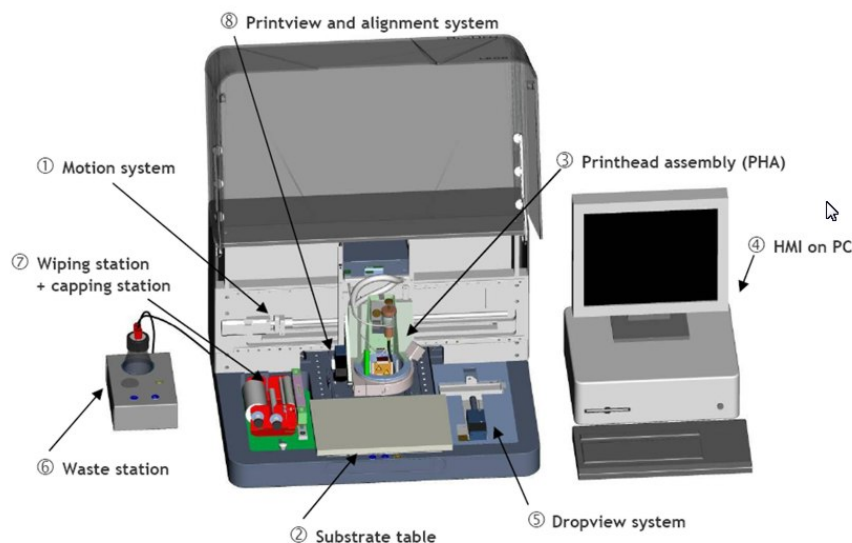


Микропечать

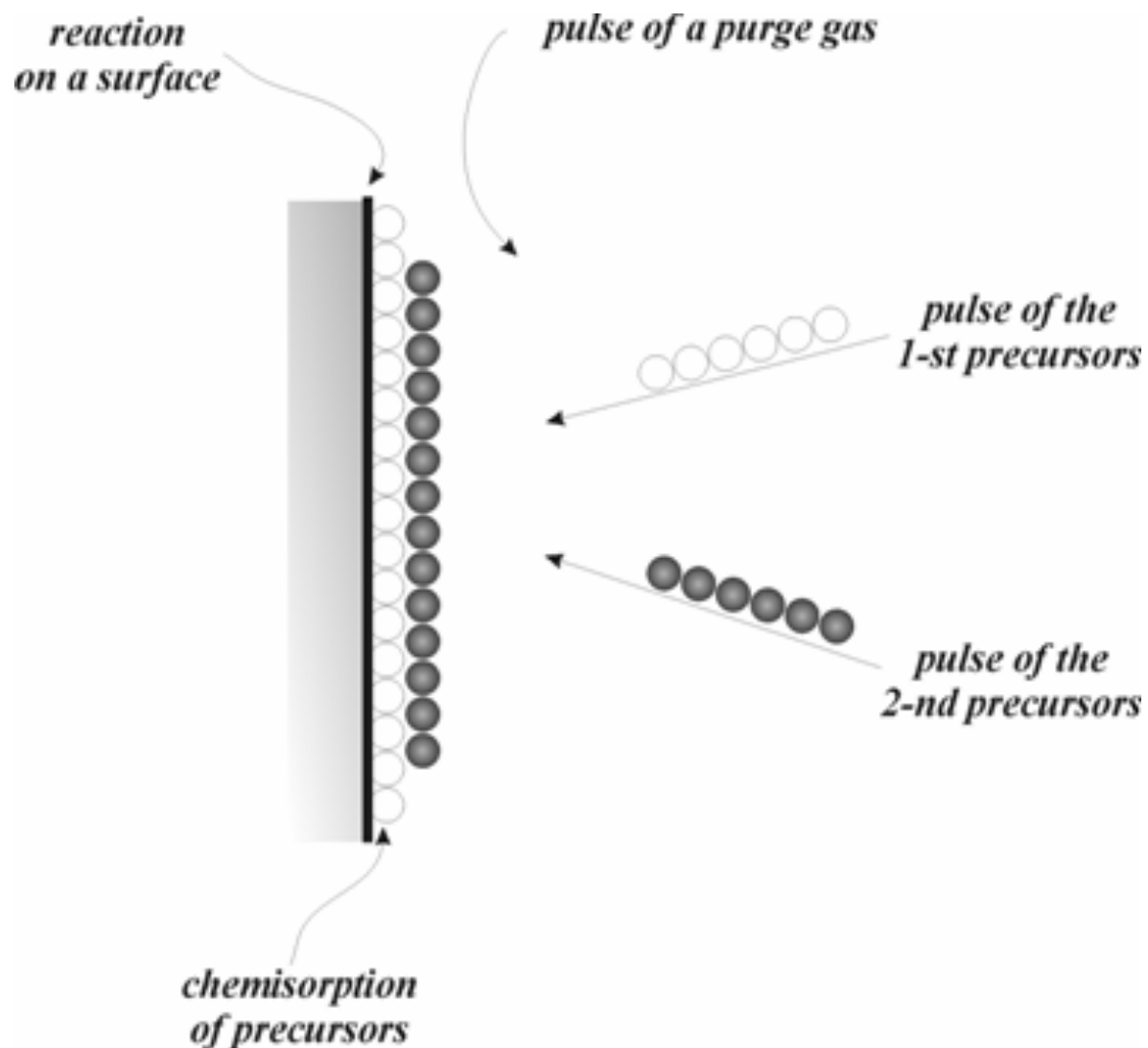
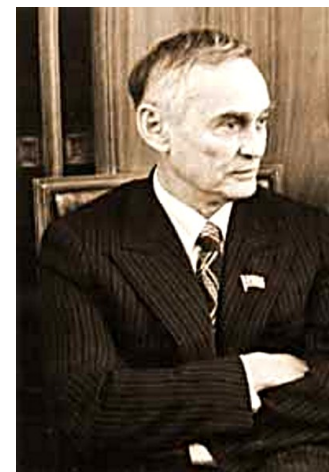


Specifications

- Technology Piezo MEMS DOD Glass & Silicon
- Droplets rate 0 – 25,000 [droplets/sec]
- Drop volume
 - PL128-L: 15-30 [pL]
 - PL128-S: 12-25 [pL]
- Number of nozzles 128 (2 row of 64 nozzles)
- Nozzle resolution 49.32 [dpi] (Spacing: 0.515 mm)
- Drop velocity (nominal) 5-10 m/s
- Ink Viscosity 1 - 10 cPs
- Chemical resistant Ph 1 to 13
- Mounting direction Vertical, Horizontal
- Independent control for each nozzle row
- Dimensions 50 x 5 x 72 mm³



Послойная сборка (Atomic Layer Deposition)



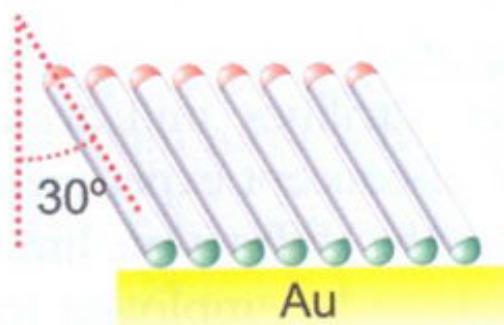
**Член-
корреспондент РАН
В.Б.Алесковский**

Требования к

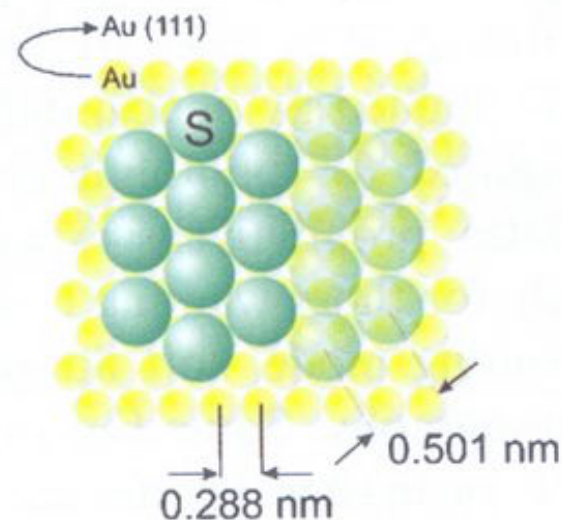
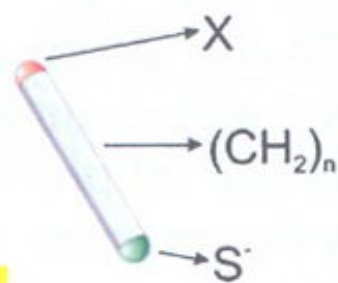
ALD - прекурсорам:

- летучесть;
- термостабильность;
- быстрая хемосорбция;
- способность к гидролизу;

SAM



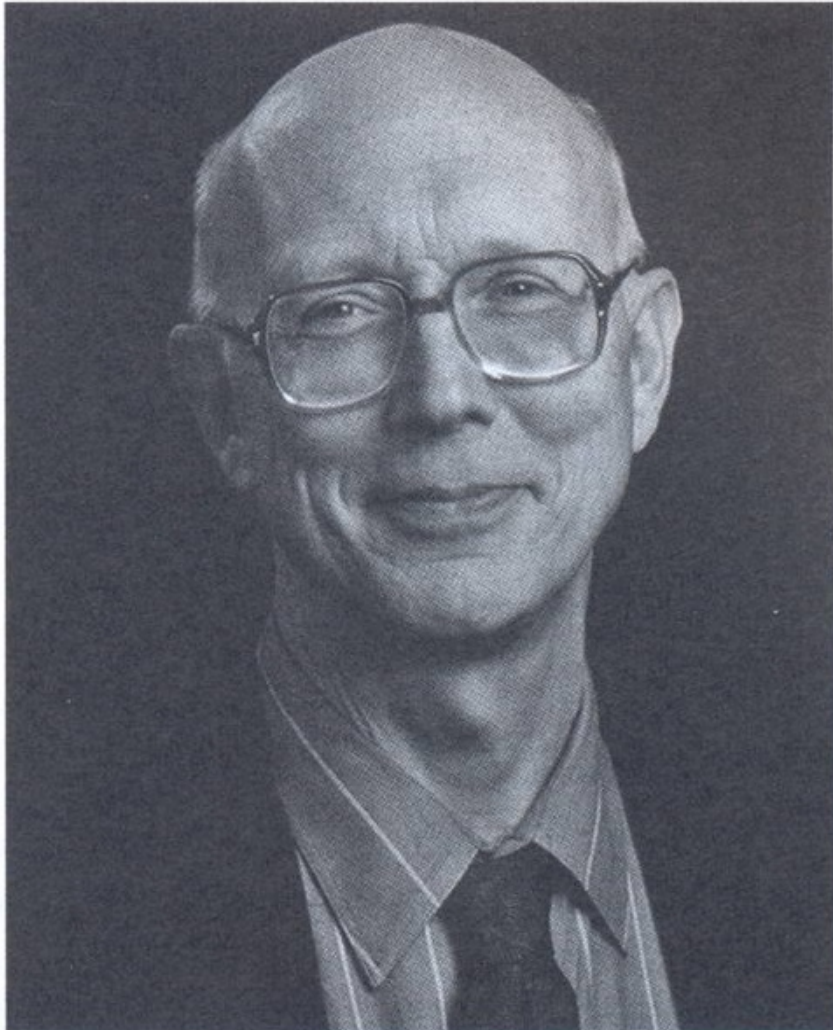
Side View



Top View

Chemical reaction occurring during the formation of thiol self-assembled monolayers on gold (top). A side view shows SAM molecules are not standing straight up but are tilted about 30°. Sulfur atoms occupy threefold sites on the Au (111) surface, resulting in a highly ordered close-packed monolayer.

Изобретение «мягкой литографии»



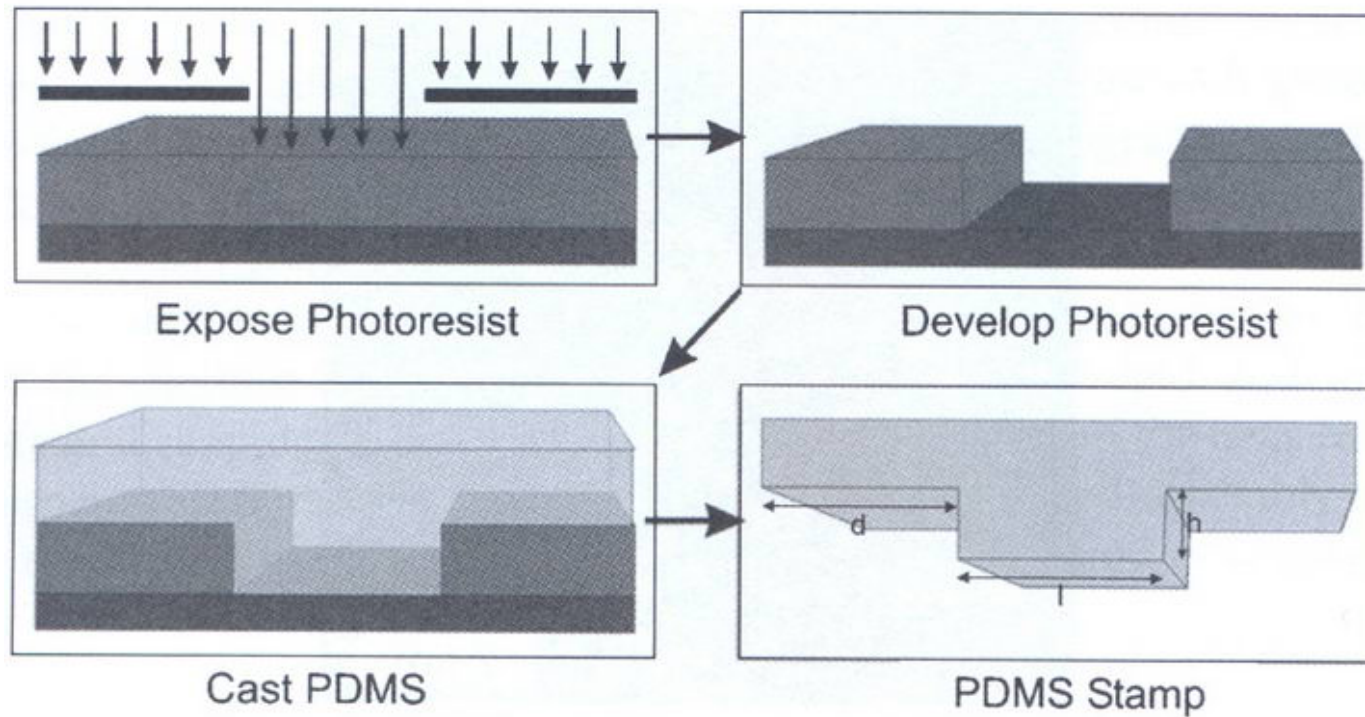
*George Whitesides, father of soft lithography.
(Image provided by G.M. Whitesides)*

Иерархические структуры:
Самосборка+
Темплатирование+
Зародышеобразование+
Микроконтактная печать...

-альтернативная, дешевая
литография без
«оптических» ограничений,
удобная для получения
даже комплексных 3D
структур

PDMS – поли(диметил)силоксан

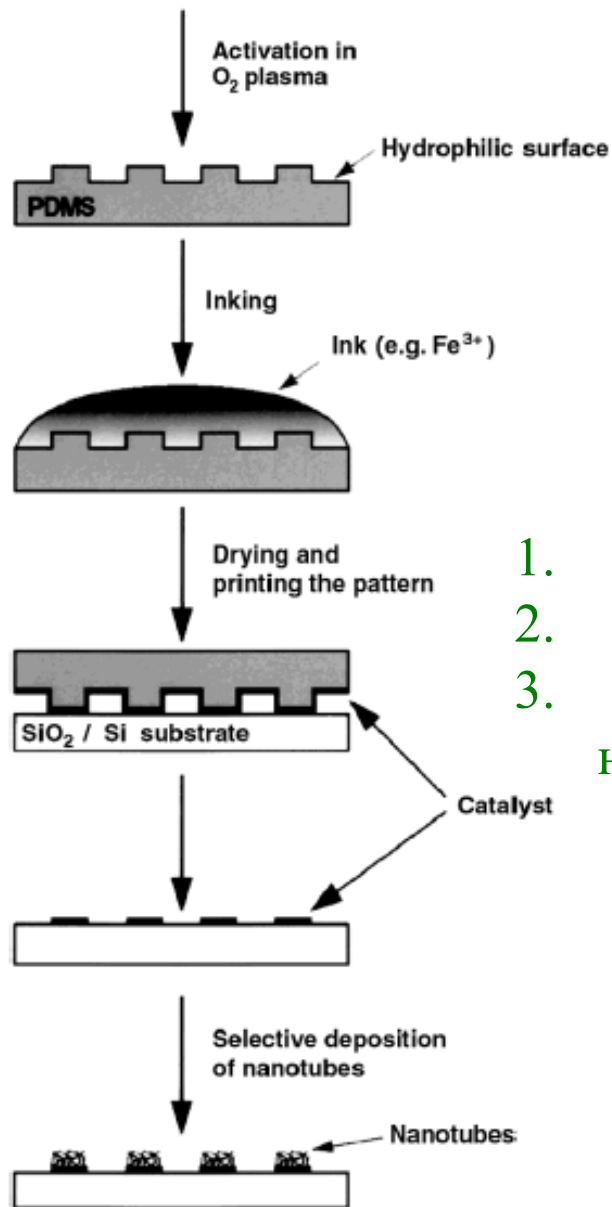
«Микроштампование»



Использование
до 100 раз

Procedure for making a PDMS stamp. The first step is coating a thin layer of photoresist onto a silicon wafer, followed by exposure to UV light through a shadow mask. The exposed photoresist is washed away with developer (or alternatively the unexposed photoresist is washed away), and the patterned "master" treated with perfluoroalkyltrichlorosilane to reduce its stickiness. A PDMS prepolymer is then poured onto the master, cured and removed to form the PDMS stamp. Many variations on this procedure are possible, and essentially any topological feature can be replicated in this fashion.

«Мягкая» литография



1. микрочасть
2. островки катализатора
3. селективное осаждение нанотрубок

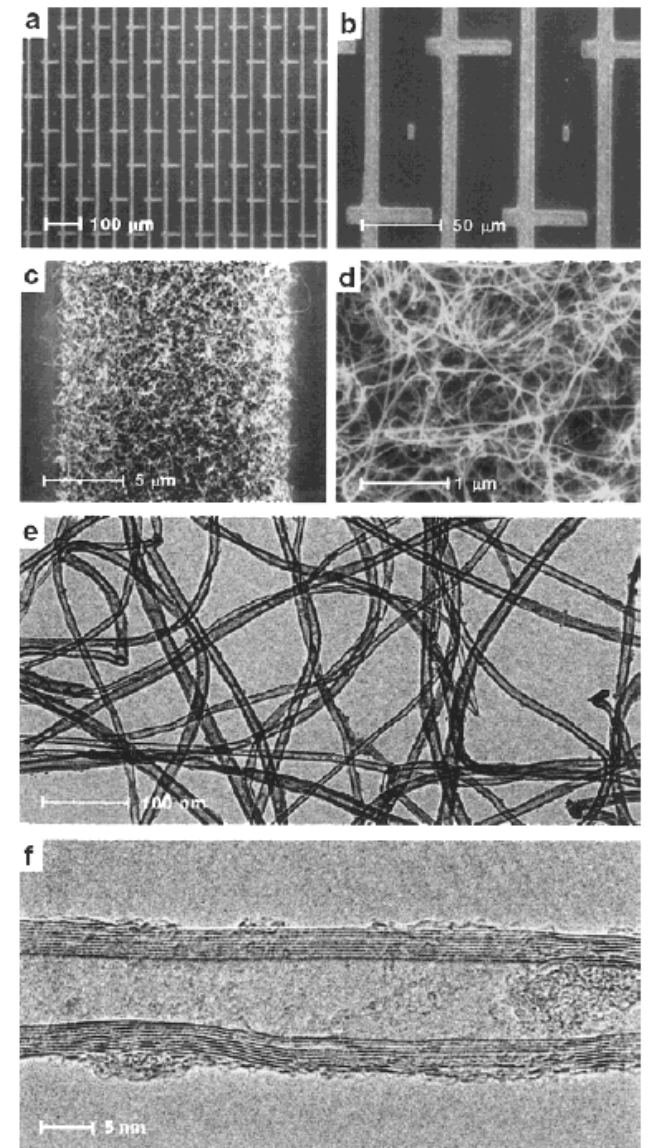
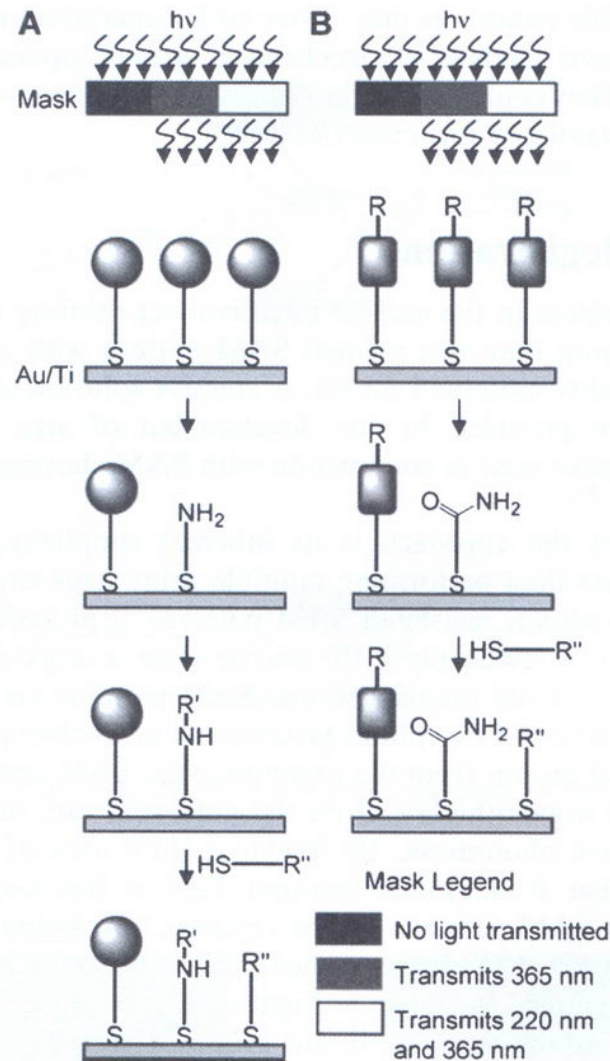


Fig. 2. Scanning electron microscopy images (a-d) of a surface with patterned carbon nanotubes at different scales and high-resolution transmission electron microscopy images (e,f) of the nanotubes. The substrate was prepared according to the procedures described in the experimental section with an ink concentration of 100 mM Fe³⁺.

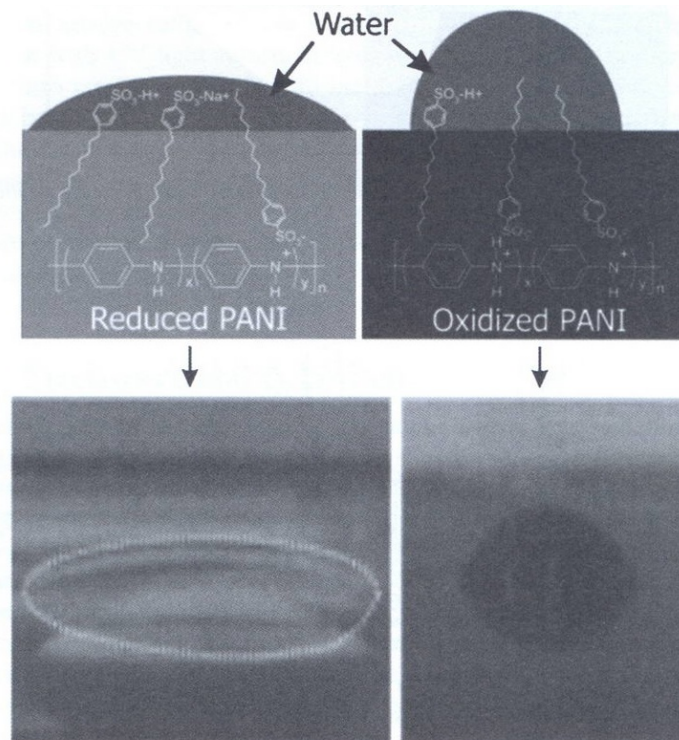
«Многоцветная» засветка



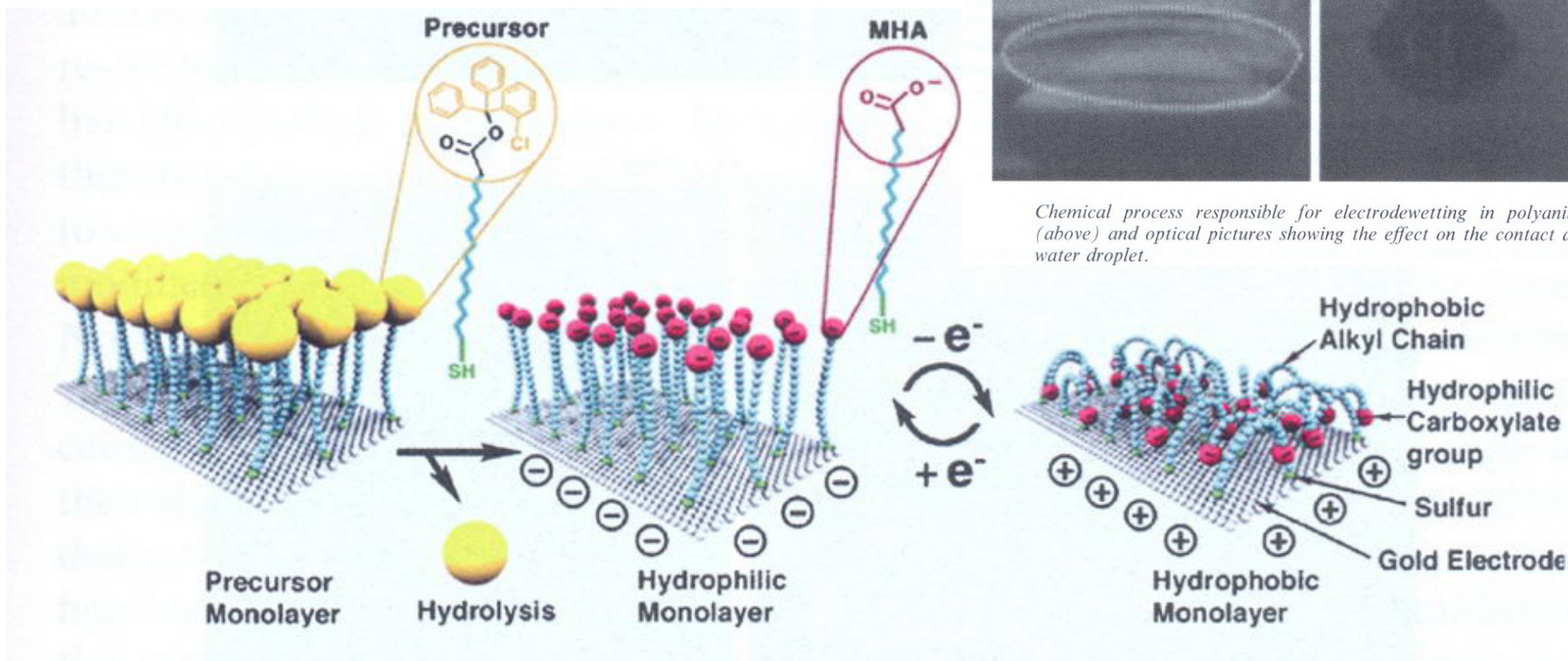
- использование нескольких длин волн (цветов) за й цикл вместо использование различных SAM и нескольких циклов
- влияние функциональных групп

Solving the registry problem in micro contact printing of multiply aligned multi functional SAMs.

Электроуправляемые SAM

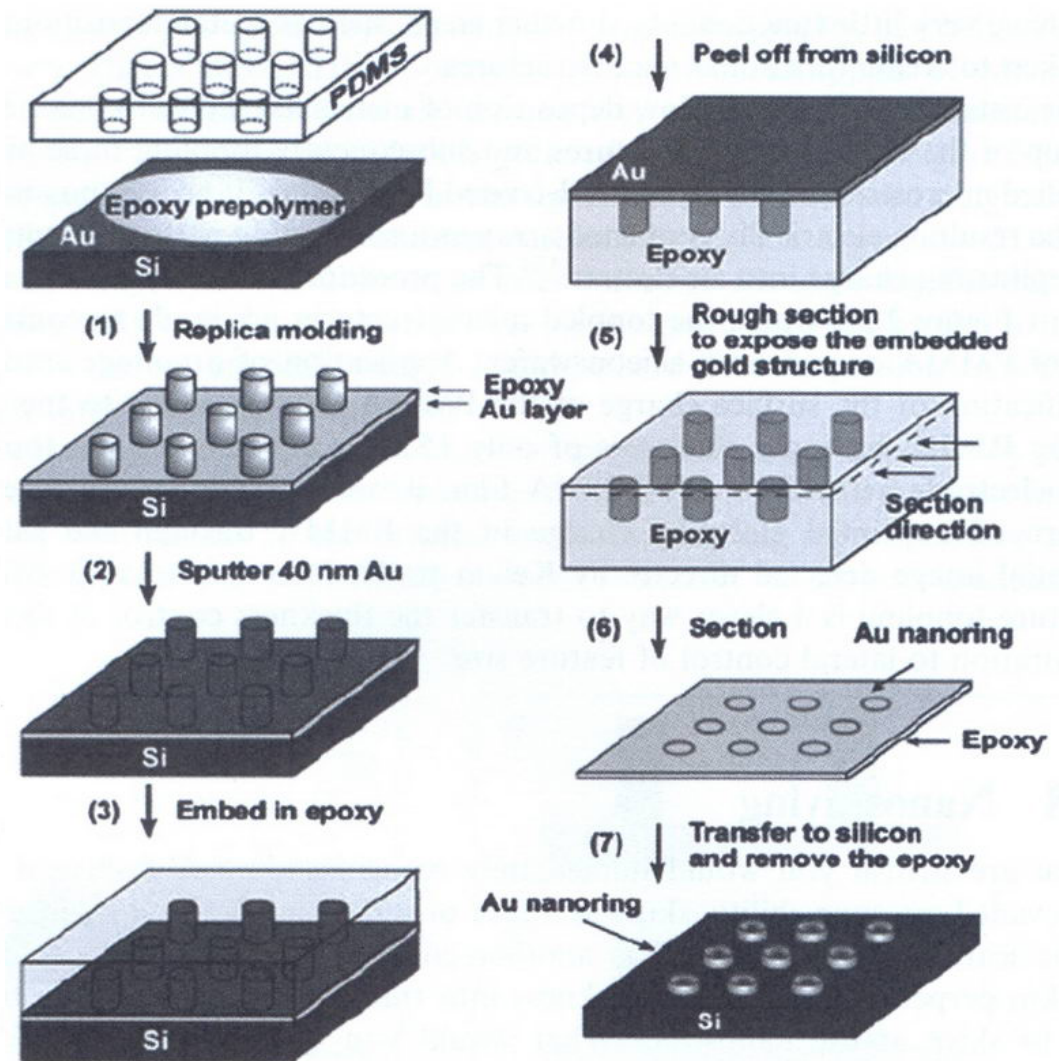
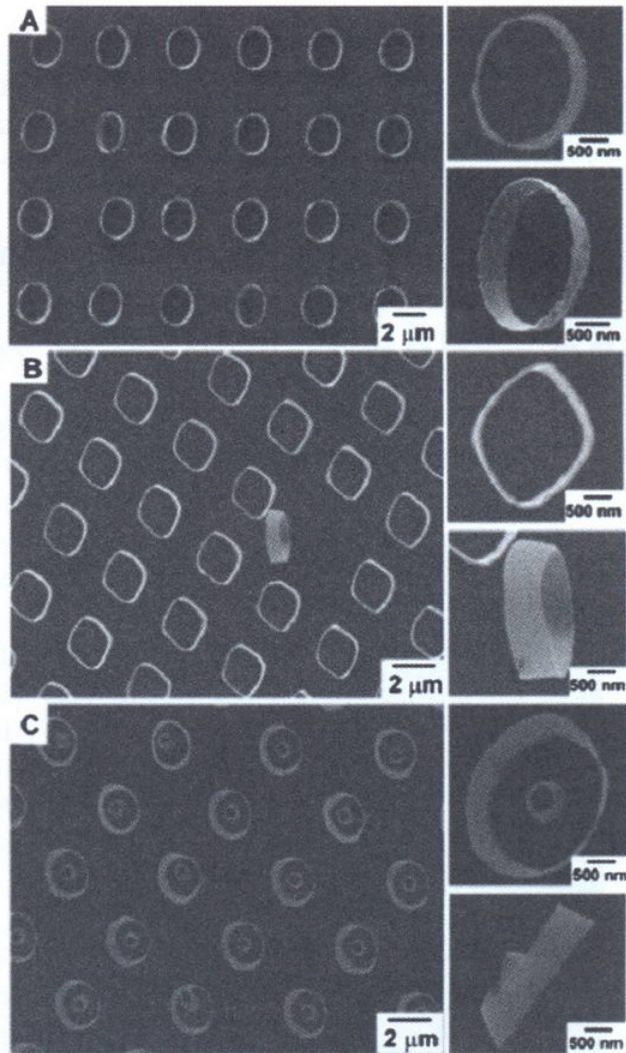


Chemical process responsible for electrodewetting in polyaniline films (above) and optical pictures showing the effect on the contact angle of a water droplet.



Design of a dynamic SAM with switchable surface properties.

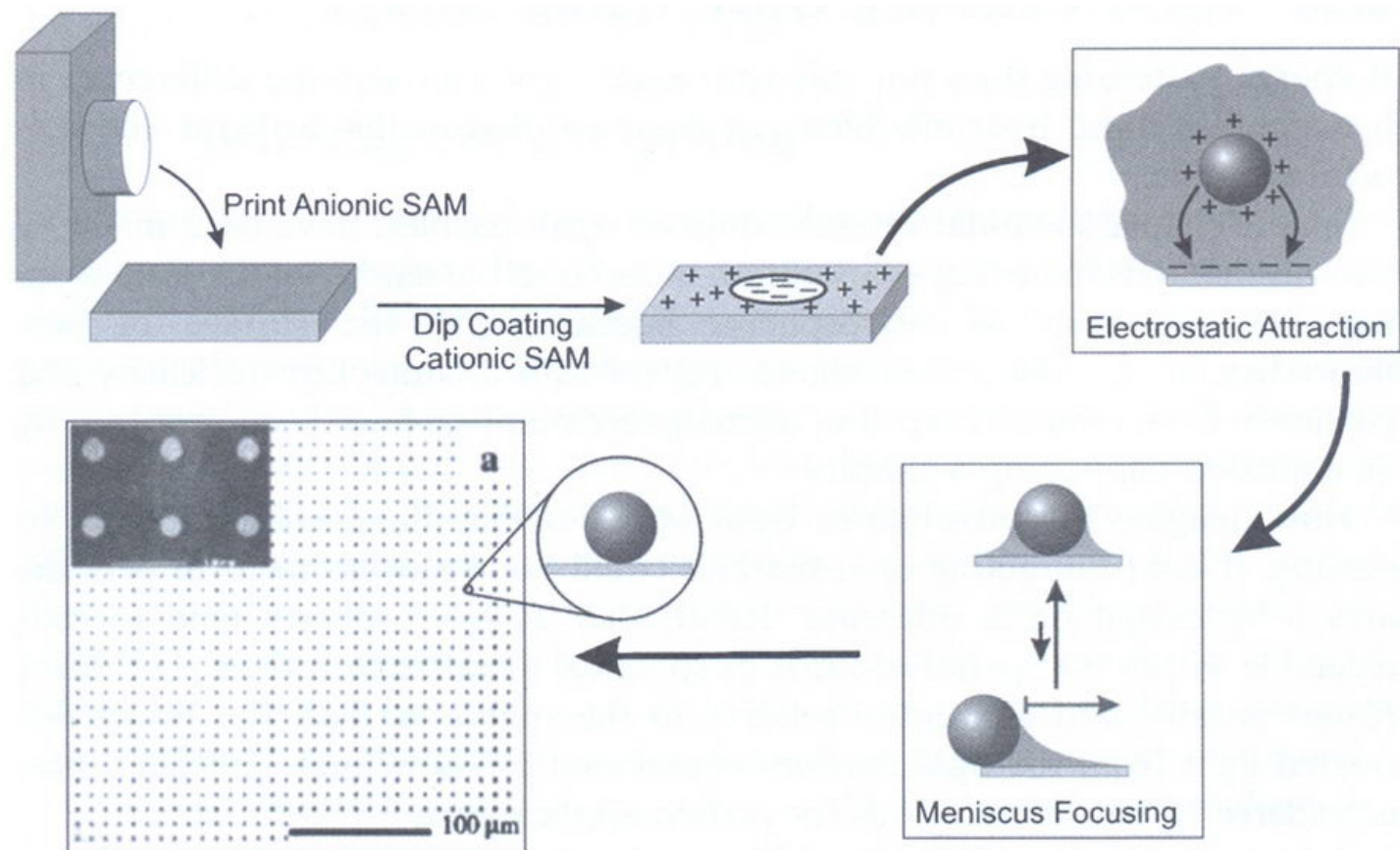
«Нарезка» наноструктур



Parallel-processing of a large population of high aspect ratio gold nanorings by the process of nanoskiving.

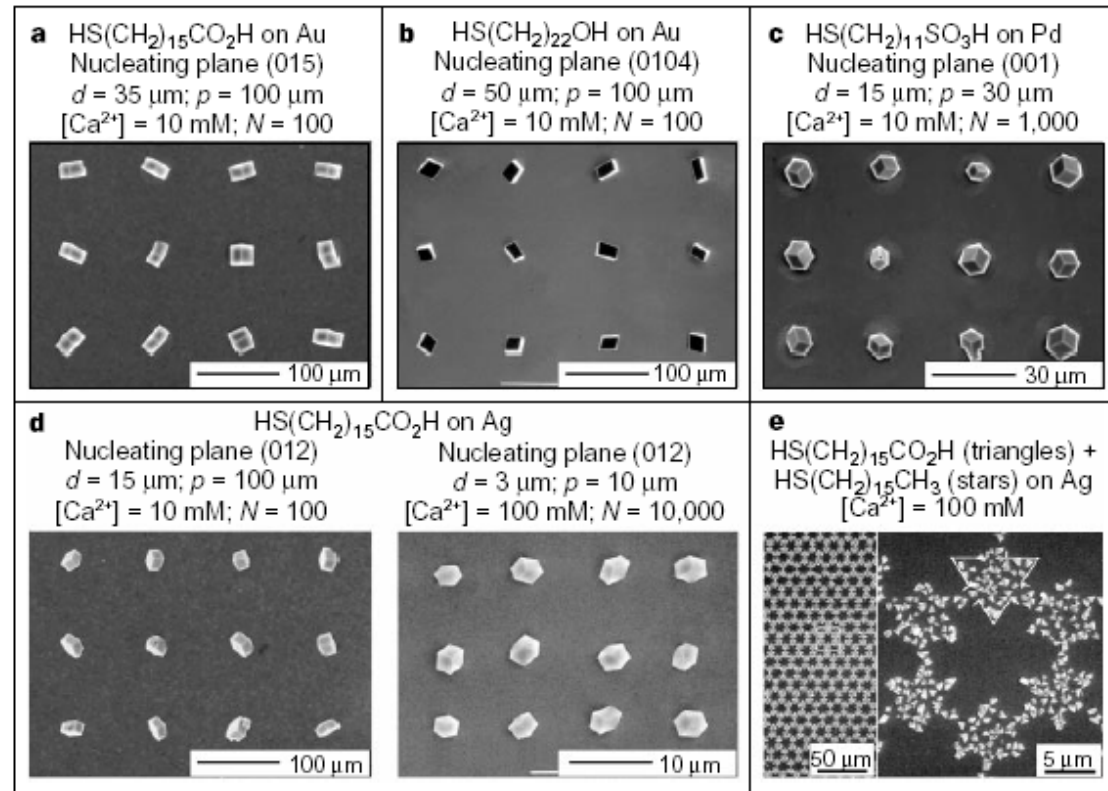
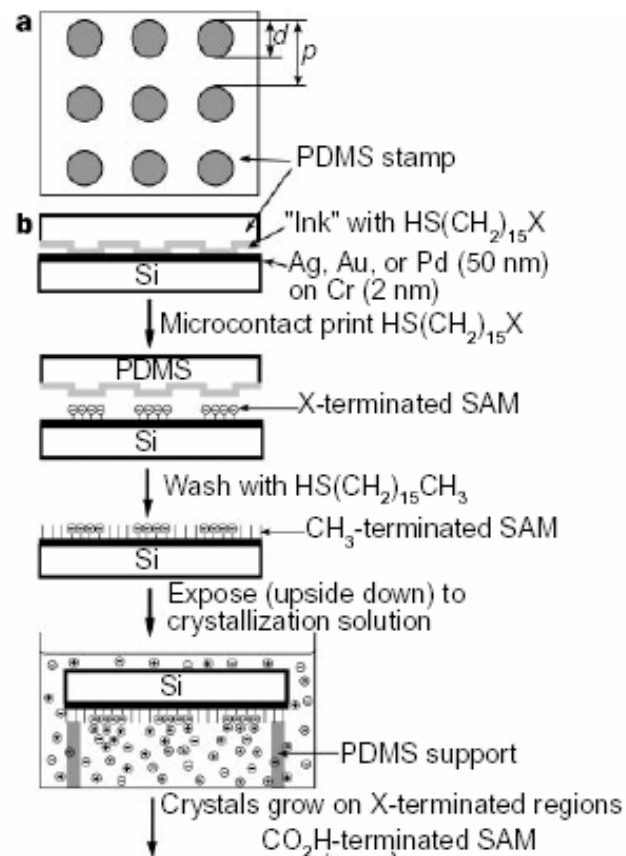
Scanning electron microscopy images of an array of nanoskived gold nanostructures on a silicon wafer after sacrificing the epoxy in oxygen plasma.

Фиксация крупных объектов



Steps in the electrostatic patterning of an array of single microspheres. Anionic patches are printed, followed by modification of the unprinted areas with a cationic SAM. Cationic spheres are attracted to the patches through electrostatic interactions. When the solvent evaporates, the spheres are driven to the center of the patches through minimization of the meniscus area, which minimizes surface energy. The final result is an array of patches bearing single spheres, shown in a light microscopy image and SEM (inset).

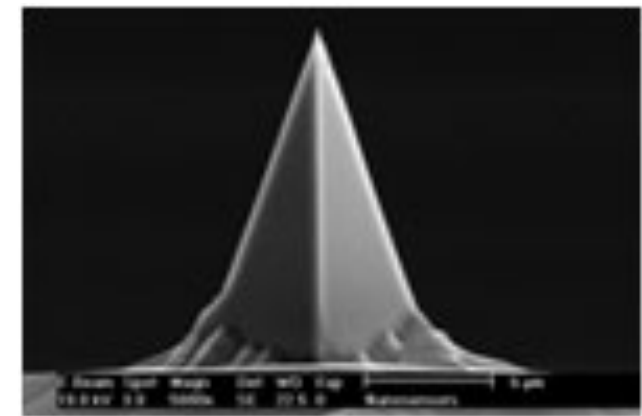
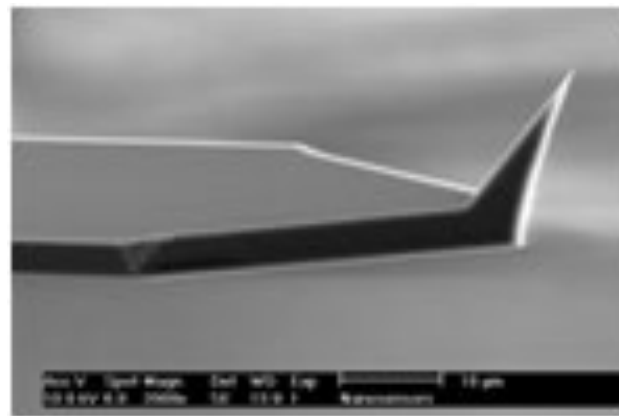
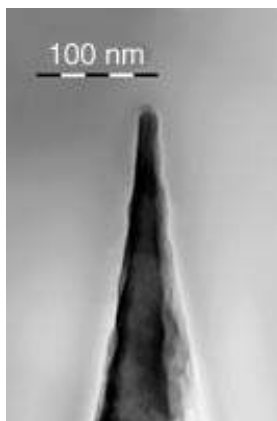
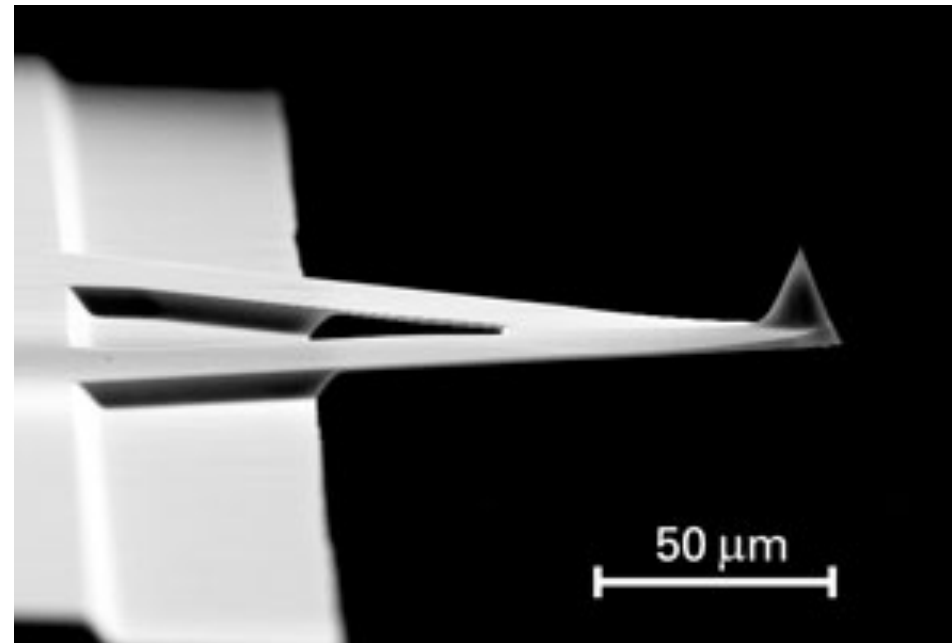
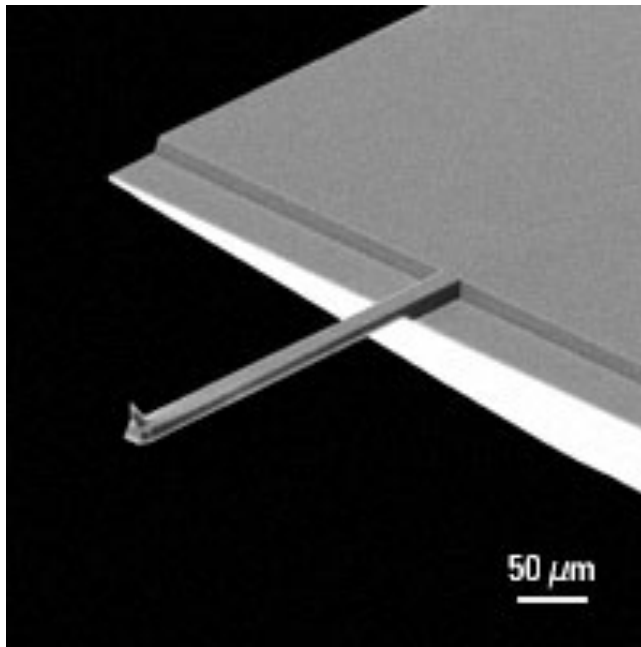
«Ориентированное» зародышеобразование



NATURE | VOL 398 | 8 APRIL 1999 | www.nature.com

«Двумерный квазикристалл» из упорядоченных органических молекул, иммобилизированных одной из функциональных групп (тиолы, сульфаты, гидроксиды, амины и пр.) на подложке – Изменение свойств поверхности - Контроль ориентации осаждающихся кристаллитов неорганических солей

АСМ Зонды





(NT-MDT, Россия 2005)

Сканирующий Зондовый Микроскоп NT- MDT NTEGRA Aura

Универсальный СЗМ комплекс, сочетающий в себе возможности сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопа. Позволяет производить исследования как топологии поверхности, так и электрофизических свойств наночастиц и материалов.

Режимы работы: СТМ/ АСМ (контактная + полуконтактная + бесконтактная) / Латерально-Силовая Микроскопия / Отображение Фазы / Модуляция Силов / Отображение Адгезионных Сил / МСМ/ ЭСМ/ Сканирующая Емкостная Микроскопия/ Метод Зонда Кельвина / Отображение Сопротивления Растекания / Литография: АСМ (Силовая и Токовая), СТМ

Атмосфера: съемка на воздухе или в вакууме до 10^{-2} Торр

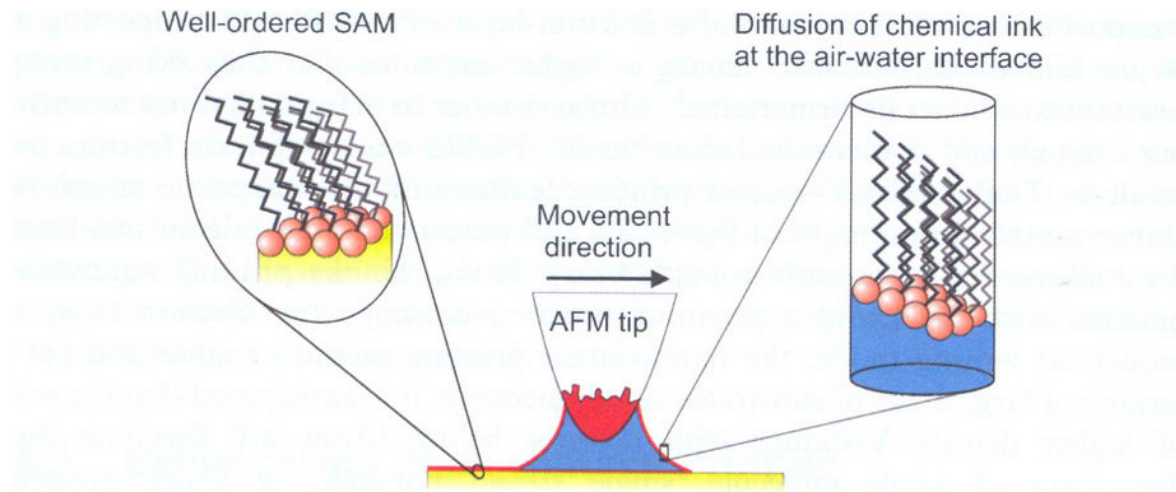
Температура съемки: от комнатной до 150°C

Внешнее магнитное поле: до 0.2 Тл

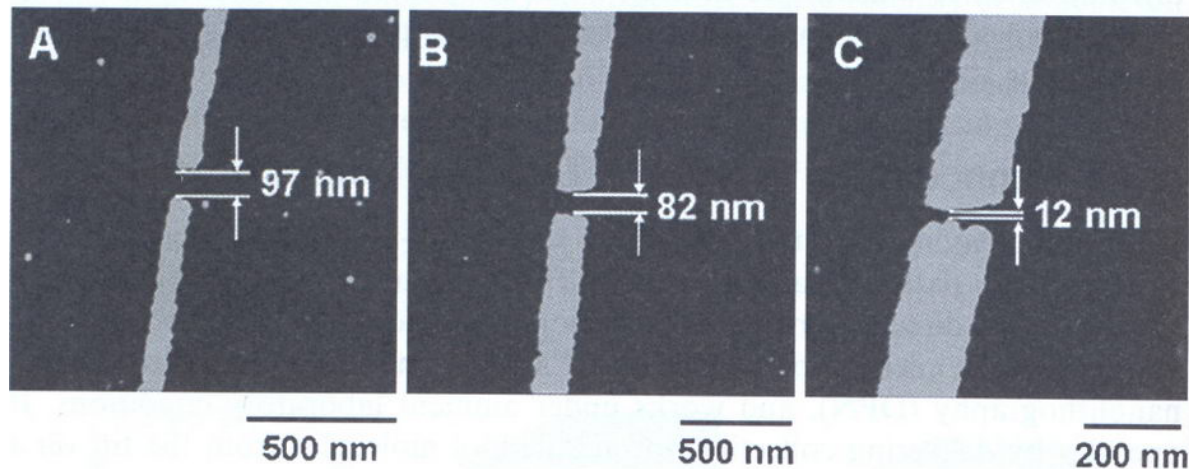
Максимальное поле сканирования: $110 \times 110 \text{ мкм}$

Минимальные достижимые шумы: менее 1 А

Принцип Dip-реп-нанолитографии

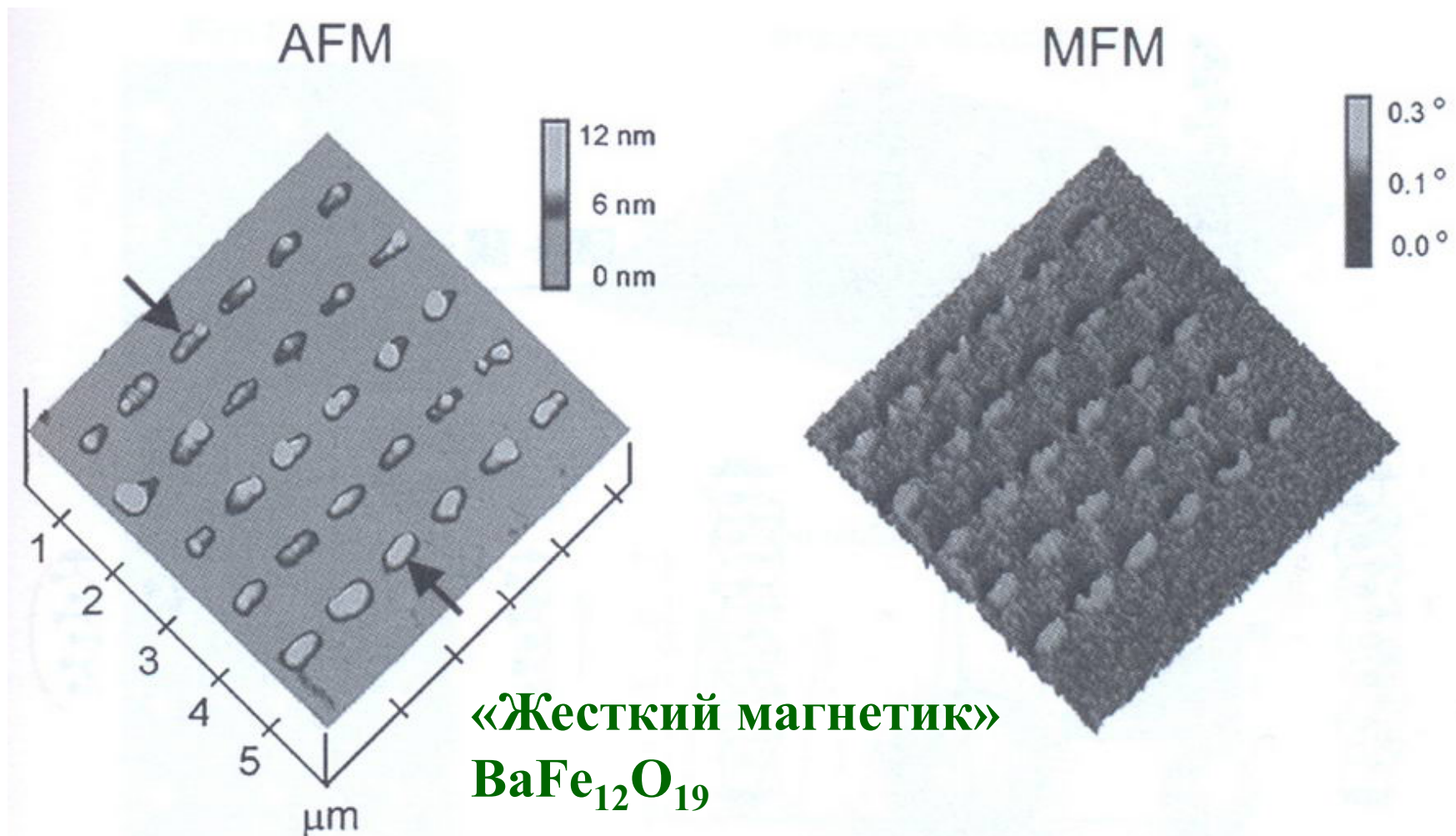


Перенос монослоя с нанокapлей



Nanolines with nanogaps made by DPN.

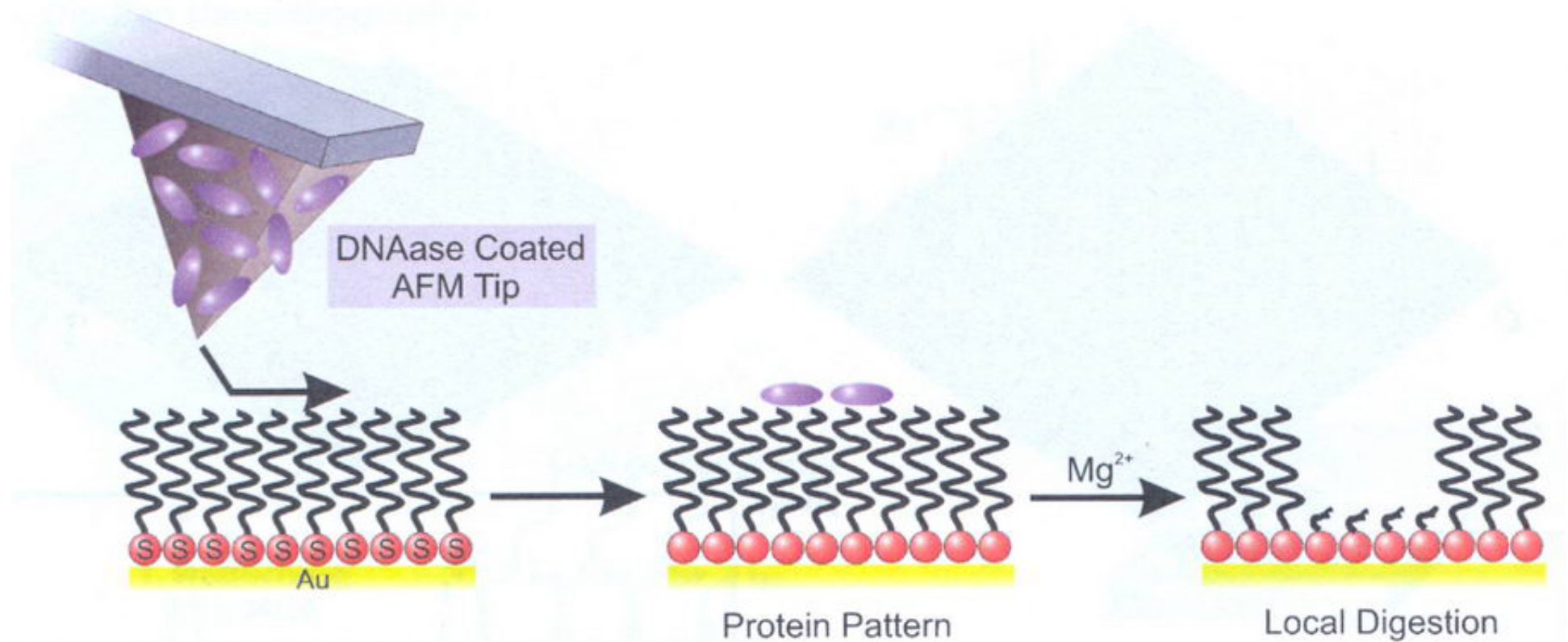
Магнитные структуры



**«Жесткий магнетик»
BaFe₁₂O₁₉**

Печать золь – гелем 12:1 нитрата железа и BaCO₃ (с этиленгликолем)
Array of magnetic bars produced by DPN, and imaged by topographical AFM and MFM confirming the presence of the nanobars and their magnetic properties.

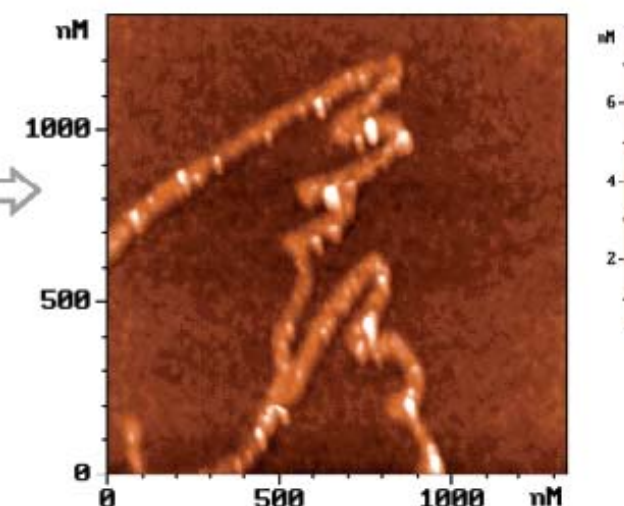
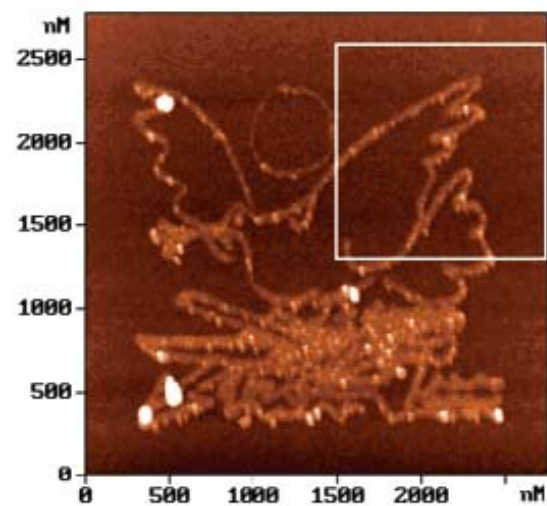
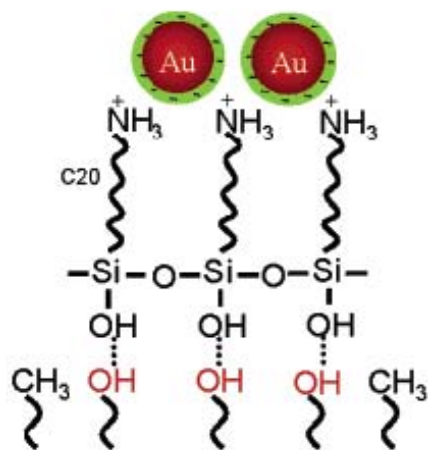
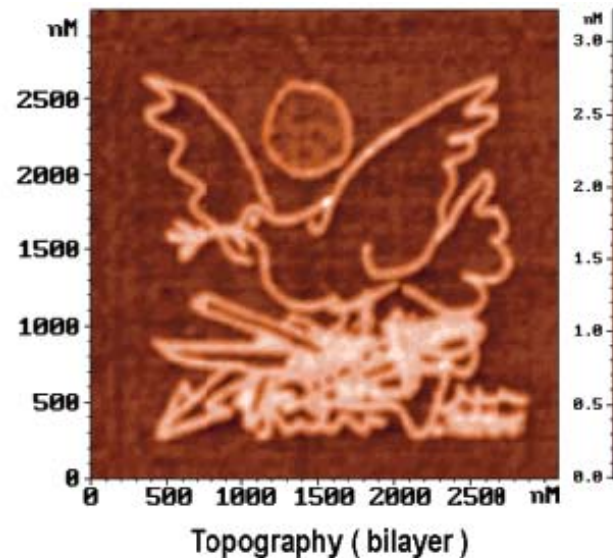
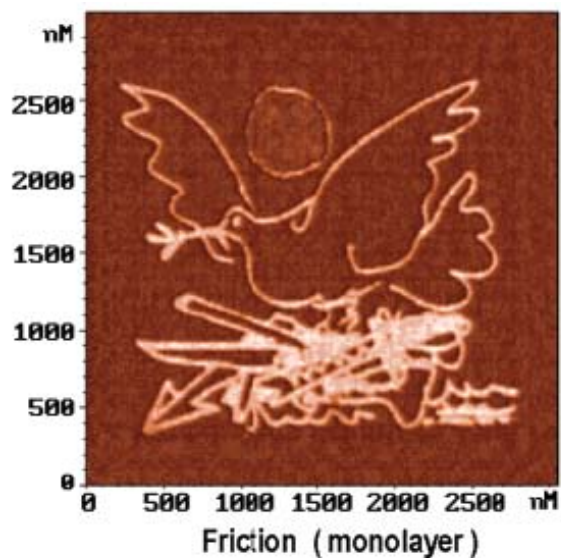
«Подрезка» с помощью ферментов



Nanoscale writing of DNAase for local digestion of oligonucleotide monolayers.

Наноискусство

World Without Weapons
P. Picasso, 1962

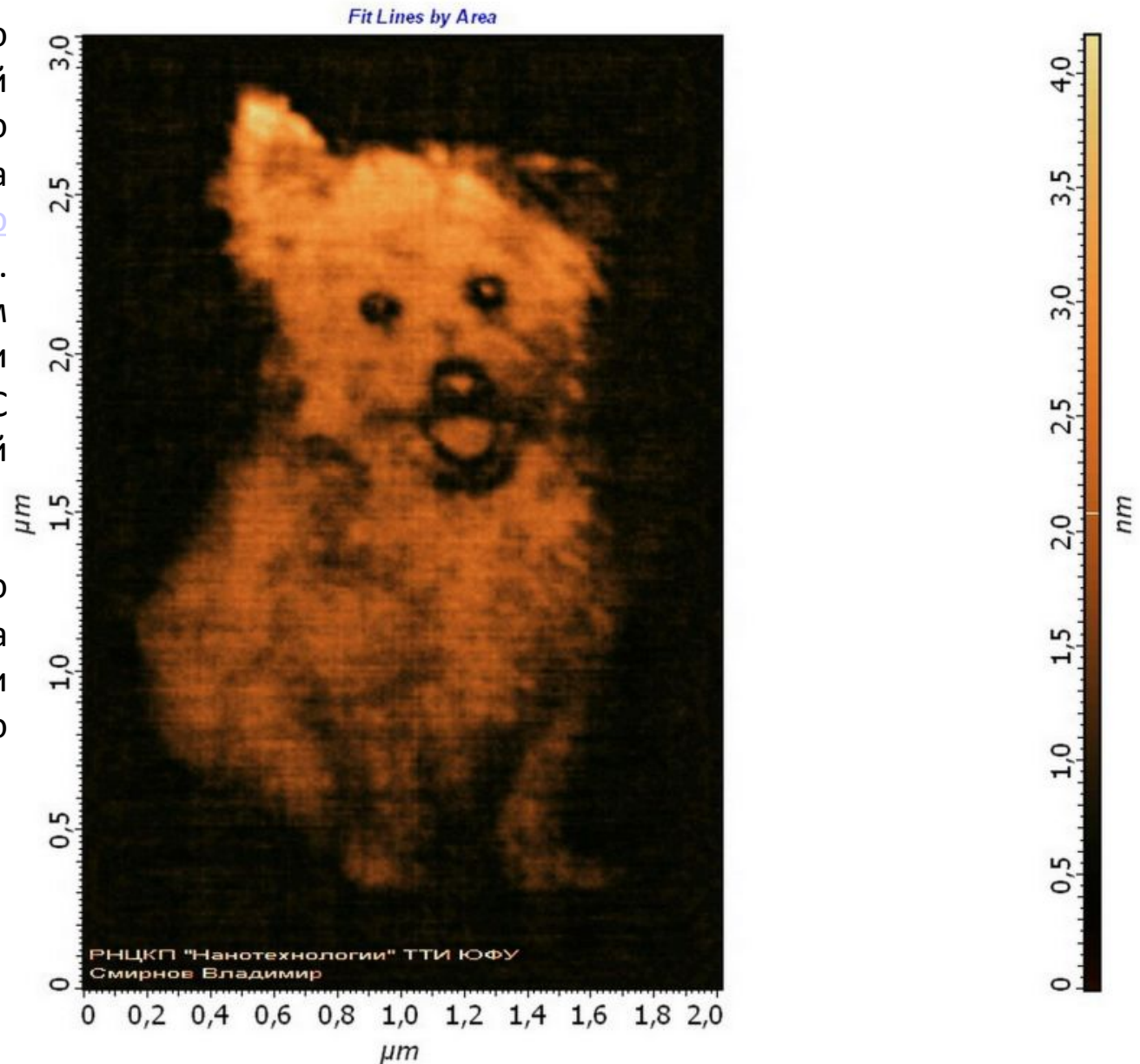


Topography (colloidal gold pattern)

Нанолитография

АСМ-зображення отримано зондовою нанолитографією методом локального анодного окислення тонкої плівки титана на СЗМ [Solver P47 Pro](#) (виробник ЗАО "НТ-МДТ", г. Зеленоград) в полуконтактному режимі АСМ, кантилеверами NSG11 з провідним W_2C покриттям, при відносній вологості 70%.

Показана можливість точного переносу зображення шаблону на поверхню підложки медом растрового локального анодного окислення



Дефекты пленок

- химическое загрязнение материалом подложки
- загрязнение веществом газовой атмосферы (CO₂, CVD)
- включения посторонних фаз
- дислокации, напряжения
- границы зерен, разориентация
- двойниковые дефекты
- структуры срастания

Устройства

- Магнитные и электрические сенсоры, SQUID, магнитные томографы (*ВТСП*), антенны, болометры
- Магнитная запись и считывание (*ферриты, КМС*)
- Элементы памяти (*ферроэлектрики, сегнетоэлектрики*)
- Интегрированные микросхемы (*полупроводники*)
- Диэлектрические покрытия
- Буферные слои
- Оптические покрытия (волноводы, голография, фильтры, просветление оптики, преобразователи солнечной энергии)
- «Микромашины»

Контрольные вопросы

1. Какие существуют новые методы получения пленок и покрытий?
2. В чем преимущества и недостатки «физических» и «химических» методов осаждения?
3. Какие явления происходят на границе «пленка-подложка» при и после ее осаждения?
4. Могут ли дефекты пленки играть положительную роль (для улучшения функциональных свойств) и в каких случаях?
5. Какие требования предъявляются к подложкам при эпитаксиальном осаждении пленок и почему?
6. Чем «мягкая литография» лучше оптической?
7. Придумайте наилучший перевод «dip-pen lithography», объясните, почему именно это название отражает суть метода.
8. Для каких устройств пригоден метод микрожидкостной сборки?
9. Найдите выдающихся отечественных исследователей, которые занимались или занимаются разработкой новых методов получения планарных структур.
10. Существуют ли методы масштабирования (массового производства) наноструктур методом dip-pen литографии?