

**Факультет наук о материалах, МГУ имени М.В.Ломоносова**

# **Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения**

**Лекция 13**

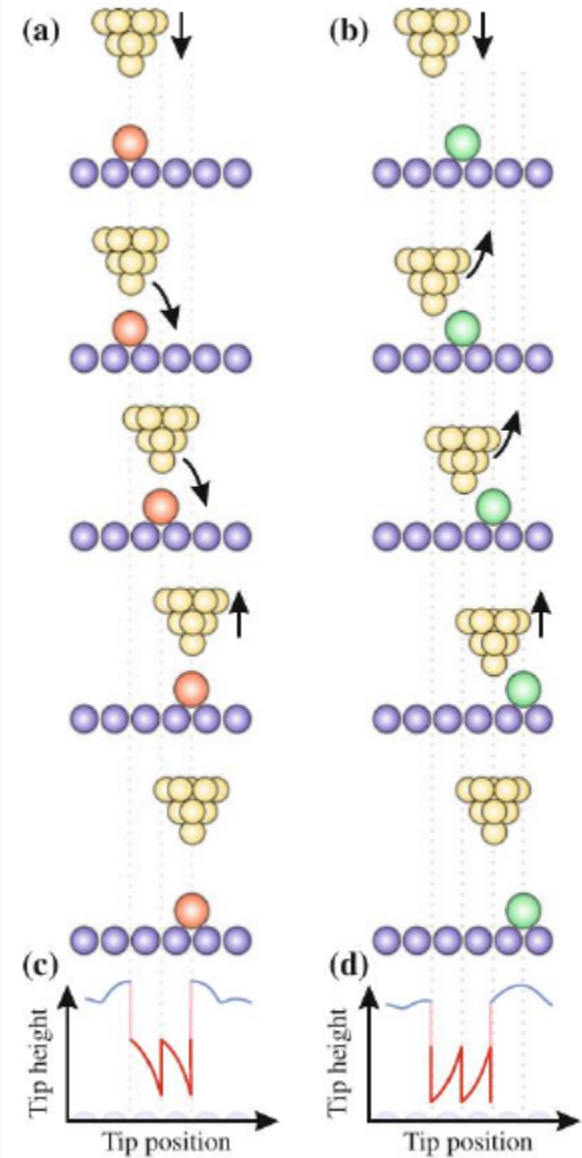
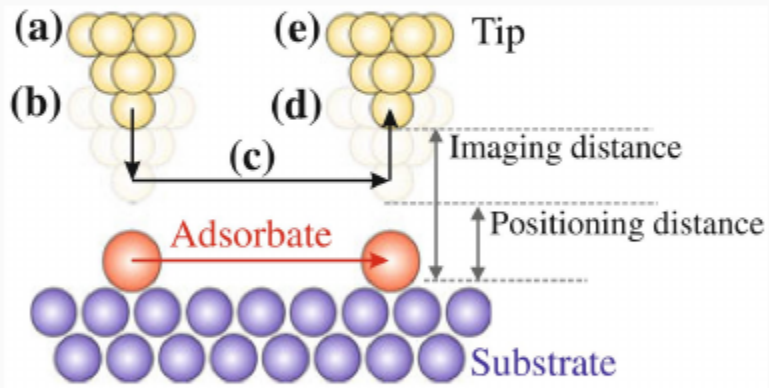
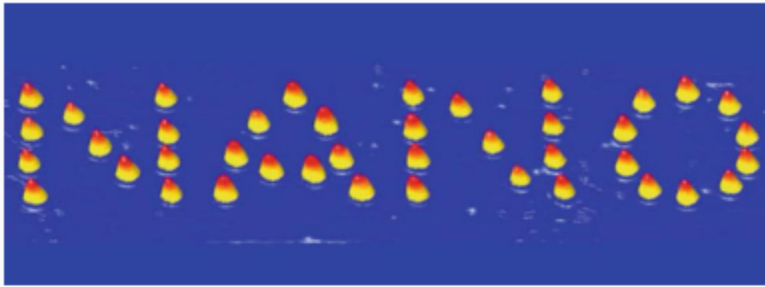
**Манипуляция нанообъектами, зондовая литография,  
изучение soft matter**

**О.В. Сеницына, Г.Б. Мешков, Я.В. Гиндикин**

**14 мая 2018**

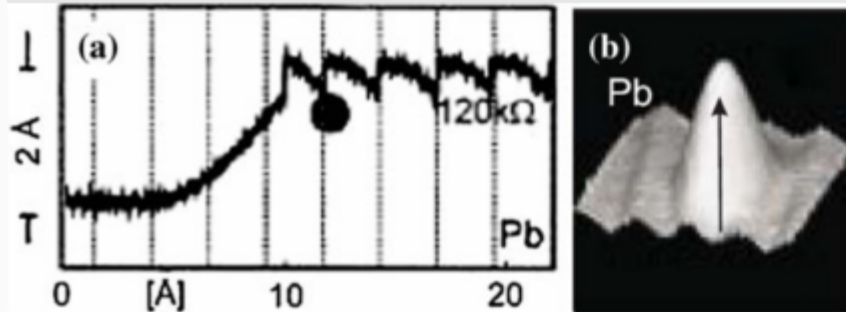
- Манипуляции атомами и молекулами
- Визуализация электронных волновых функций
- Нанолитография погружным пером
- Зондовая литография на полимерных пленках
- Зондовый микроскоп — химическая лаборатория
- Локальное анодное окисление
- Создание заряженных областей на поверхности
- АСМ для исследования soft matter

# Манипуляция атомами: латеральный перенос

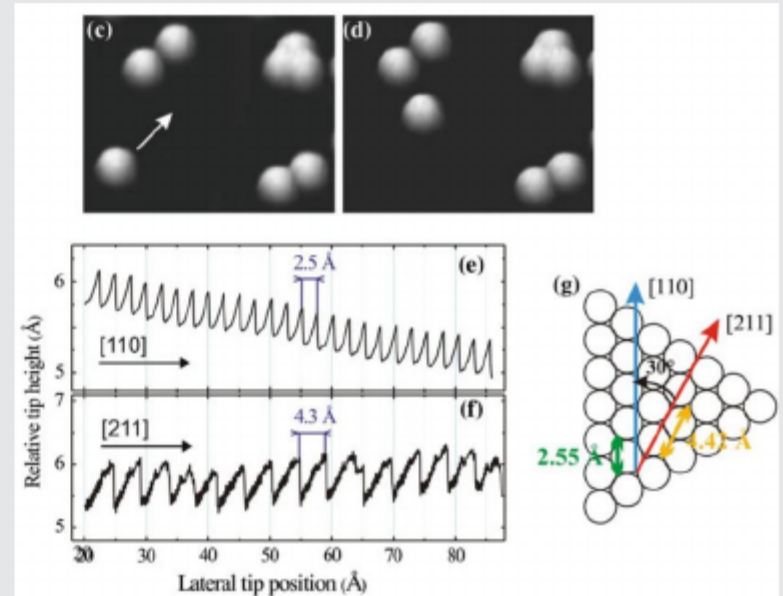


# Манипуляция атомами: латеральный перенос

*Pb* на *Cu*(211)

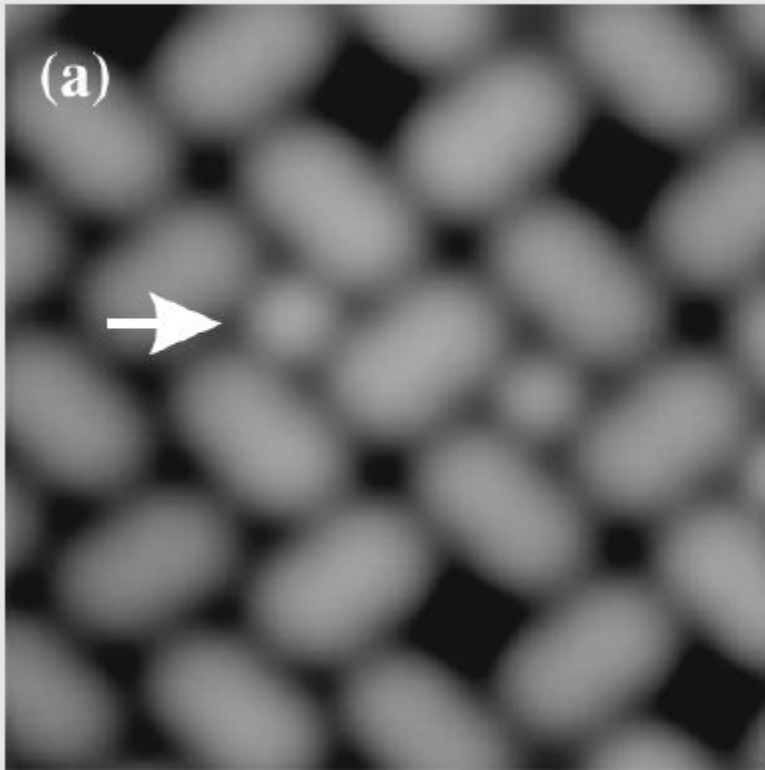


*C*<sub>60</sub> на *Cu*(111)

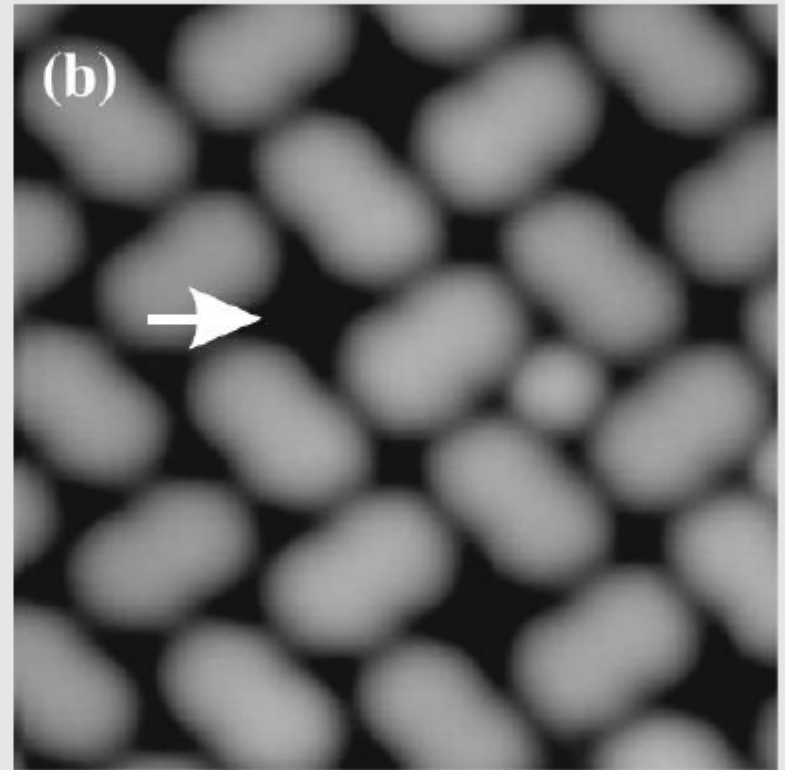


# Манипуляция атомами: вертикальный перенос

*Xe на Au(111)*

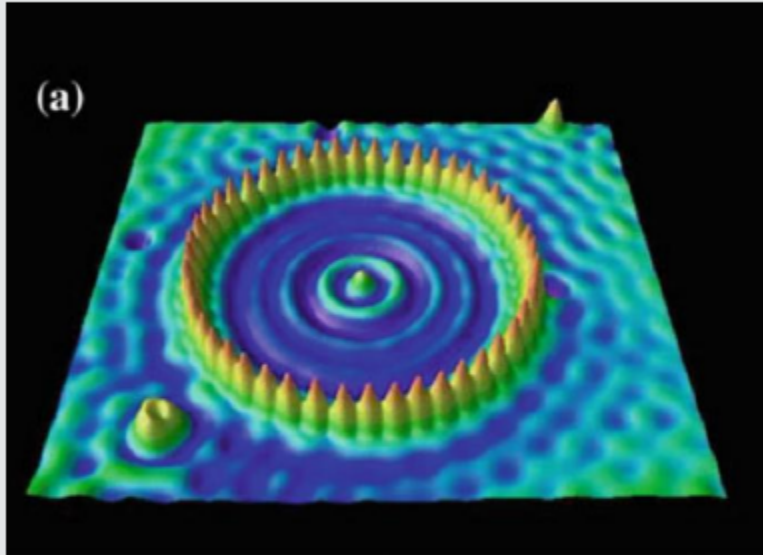


*Xe на Au(111)*

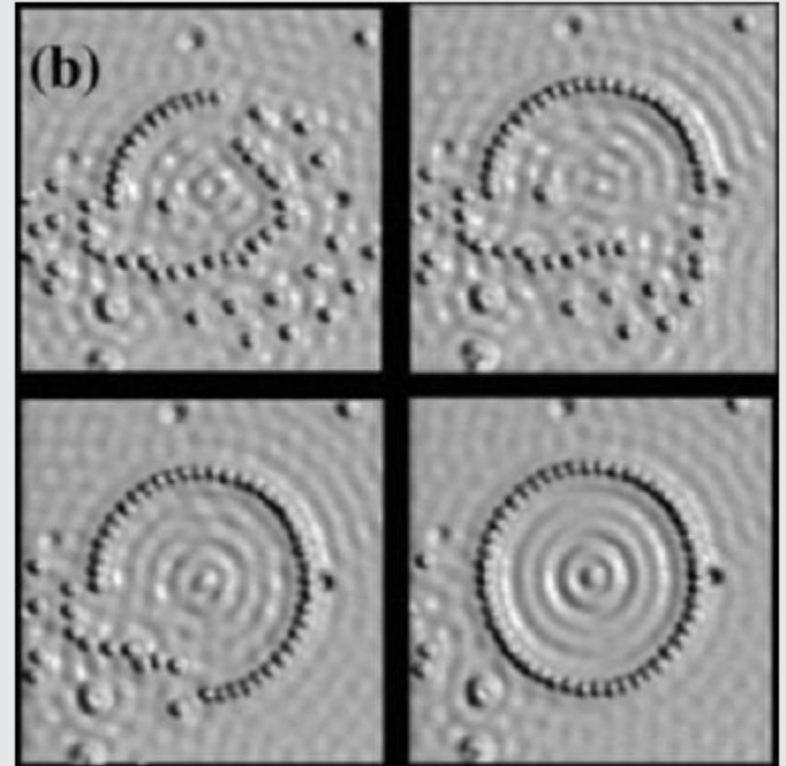


# Квантовые корали

Адатомы  $Fe$  на  $Cu(111)$

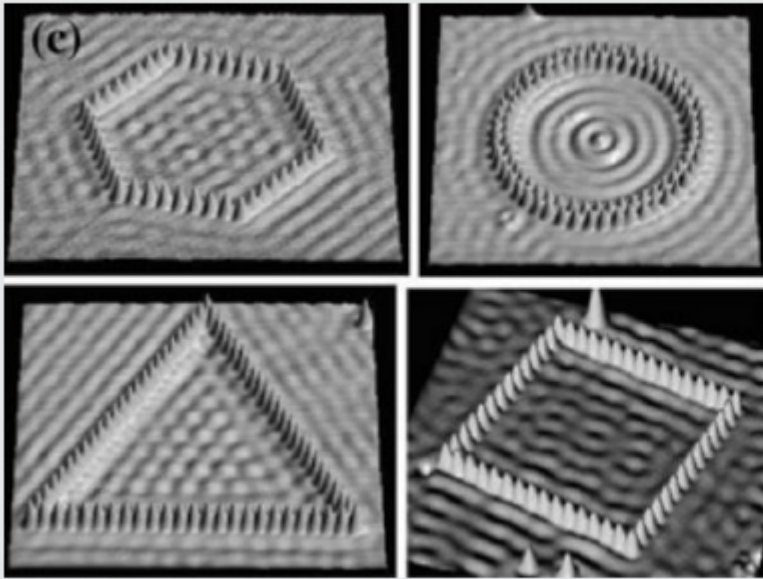


Адатомы  $Fe$  на  $Cu(111)$

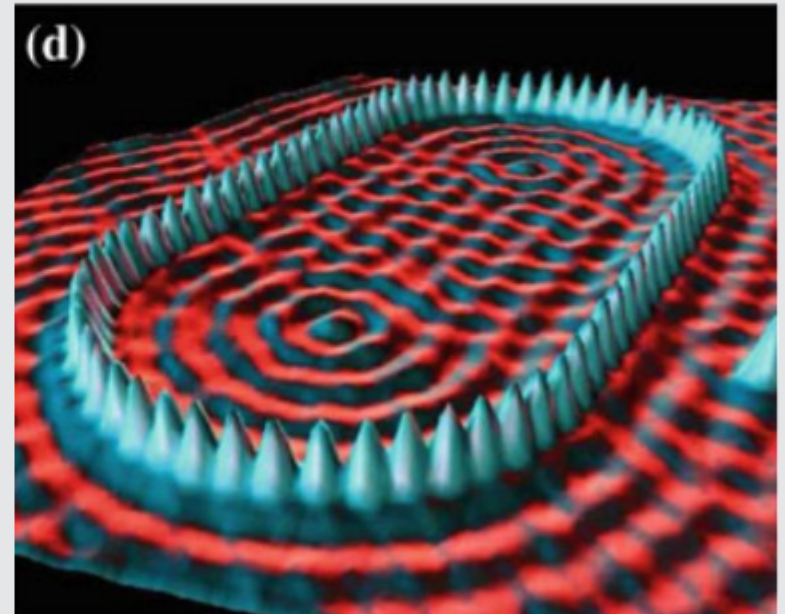


# Квантовые корали

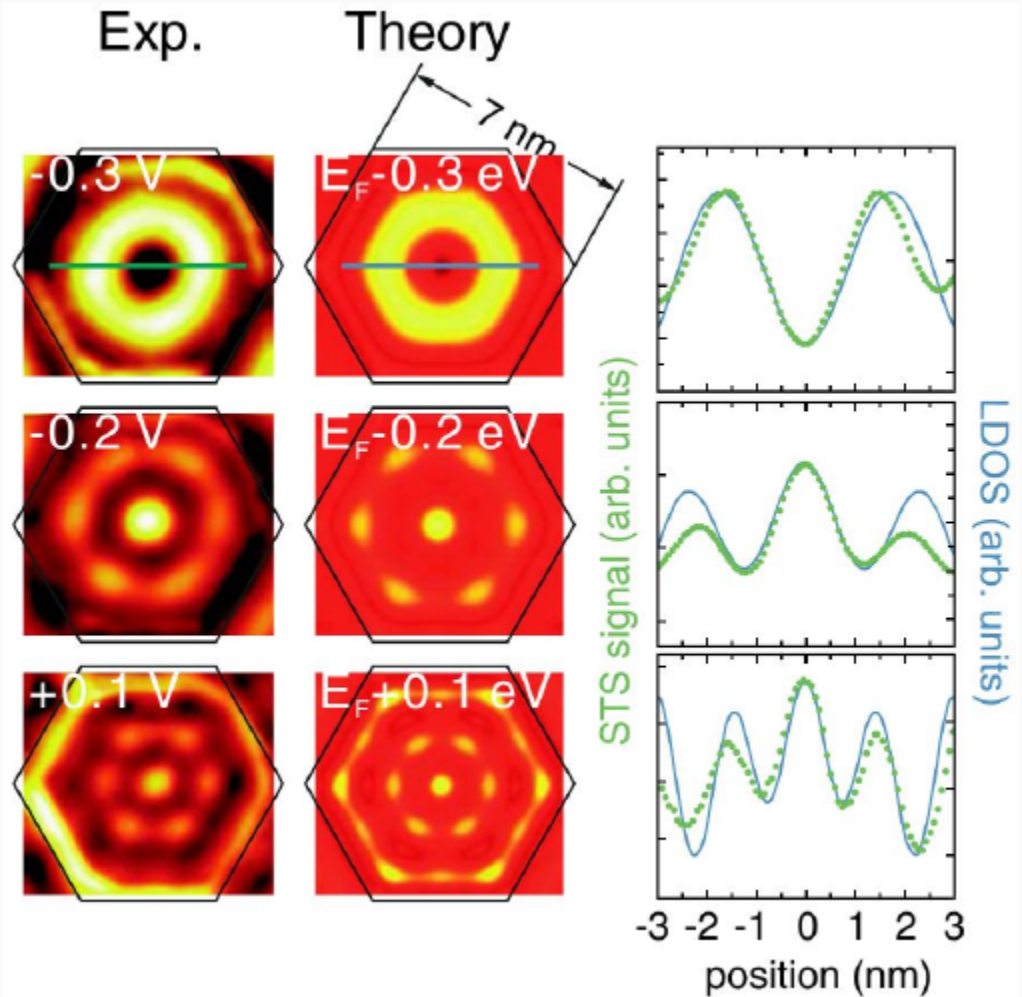
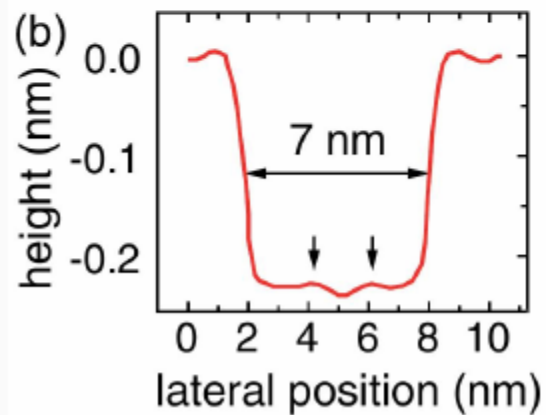
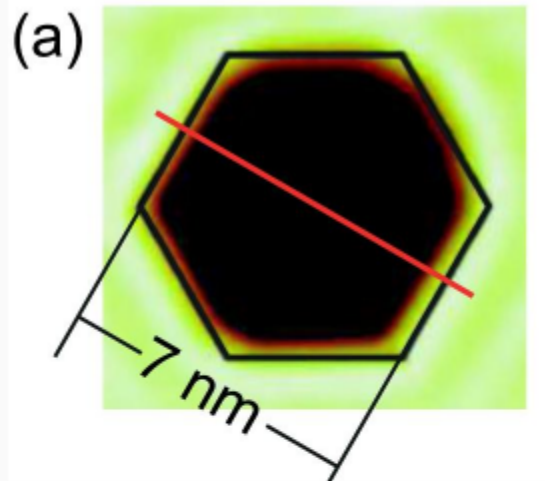
Адатома  $Fe$  на  $Cu(111)$



Адатома  $Fe$  на  $Cu(111)$

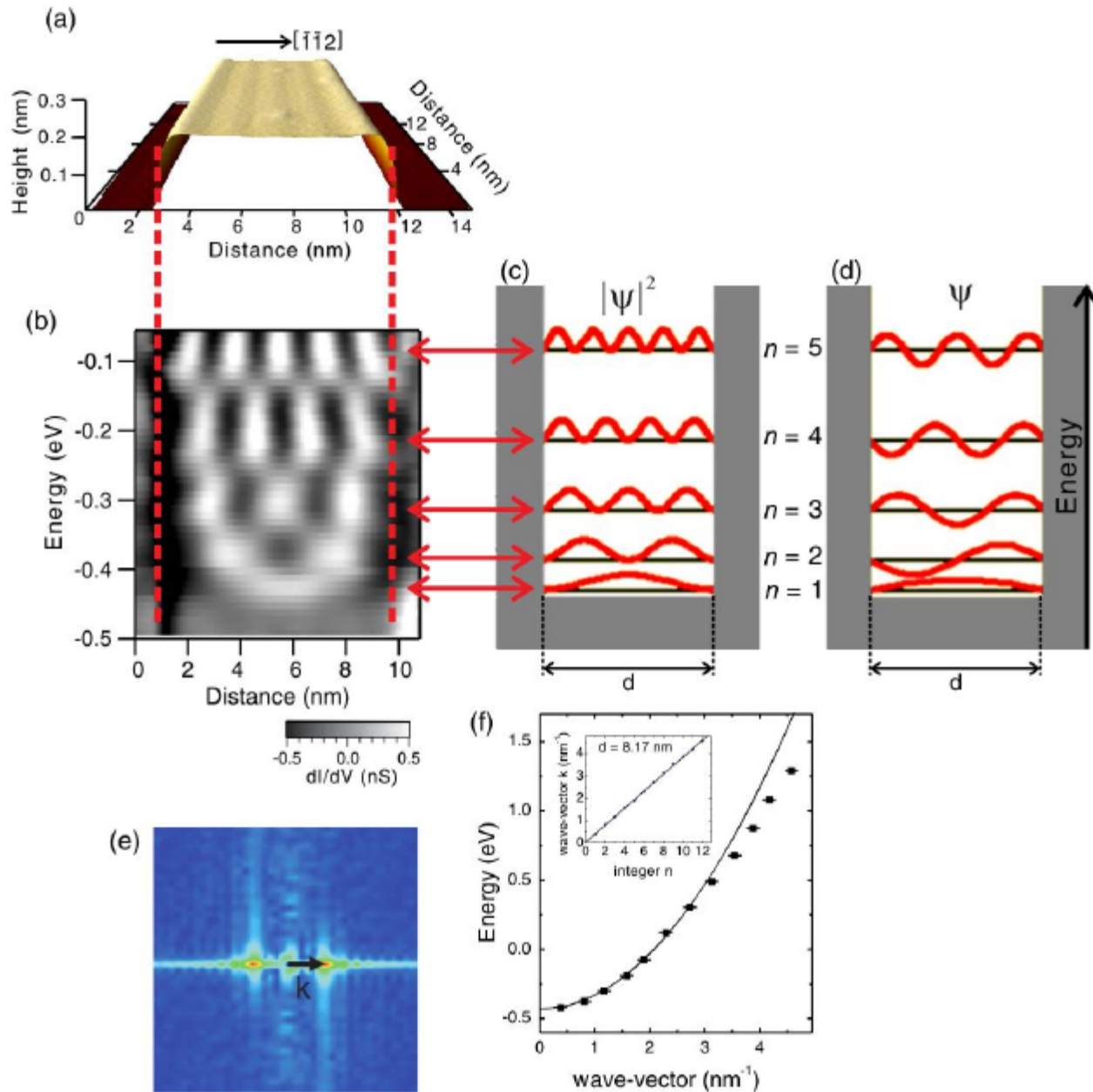


# Кратеры на Cu(111)

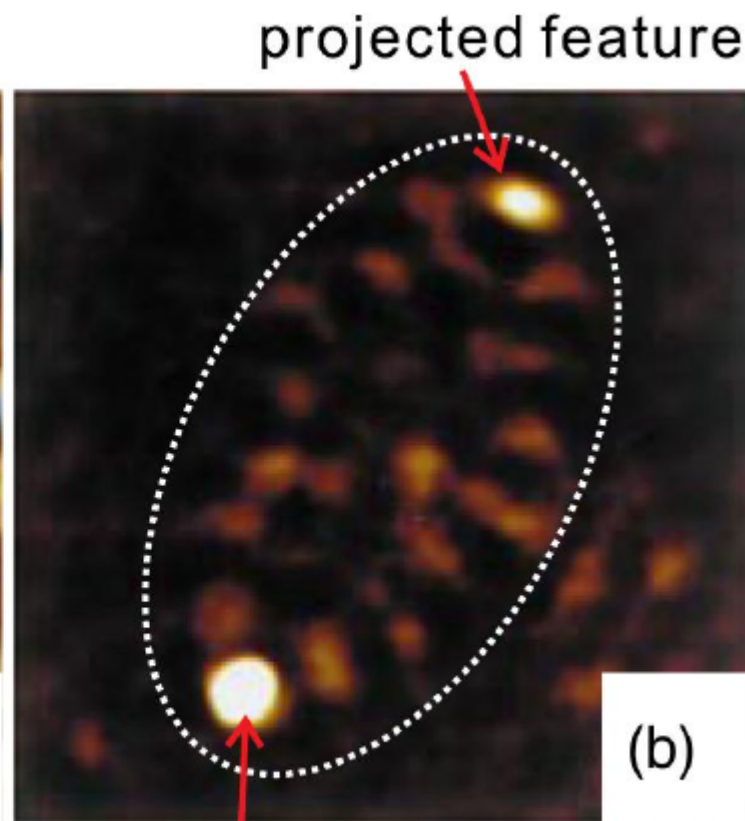
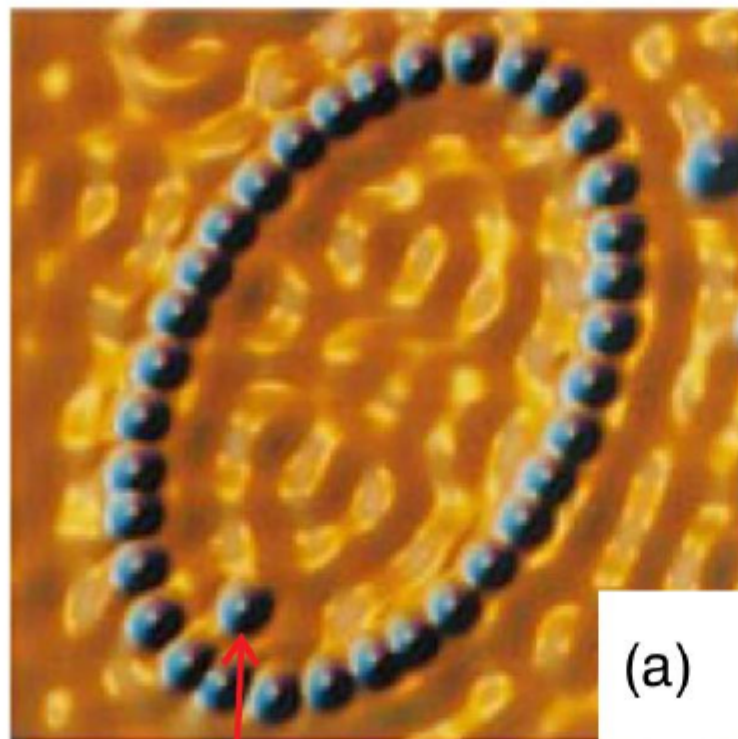




# Моноатомная полоса на Cu(111)



# Квантовый мираж: Co в корале



# Нанолитография погружным пером

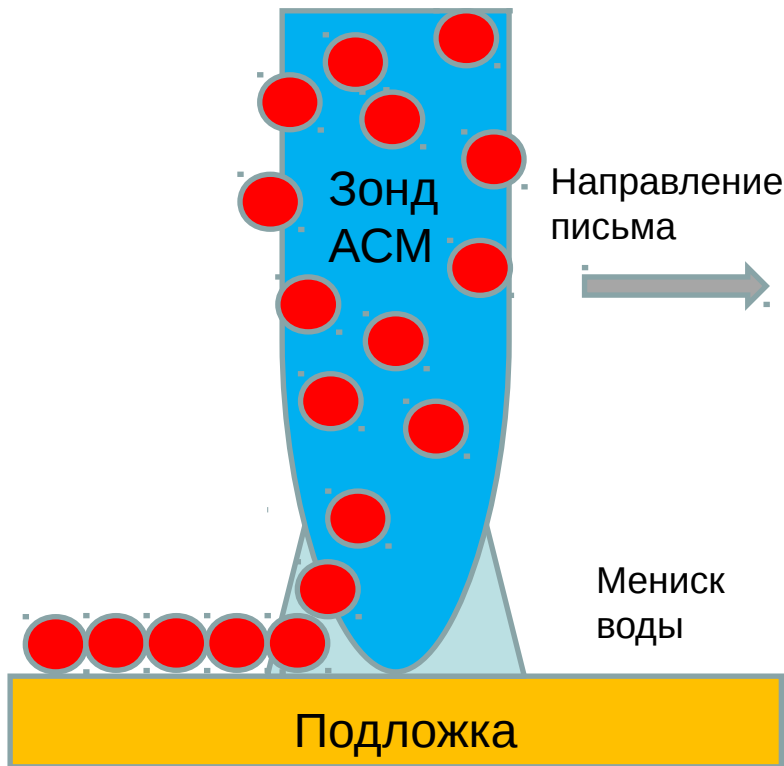
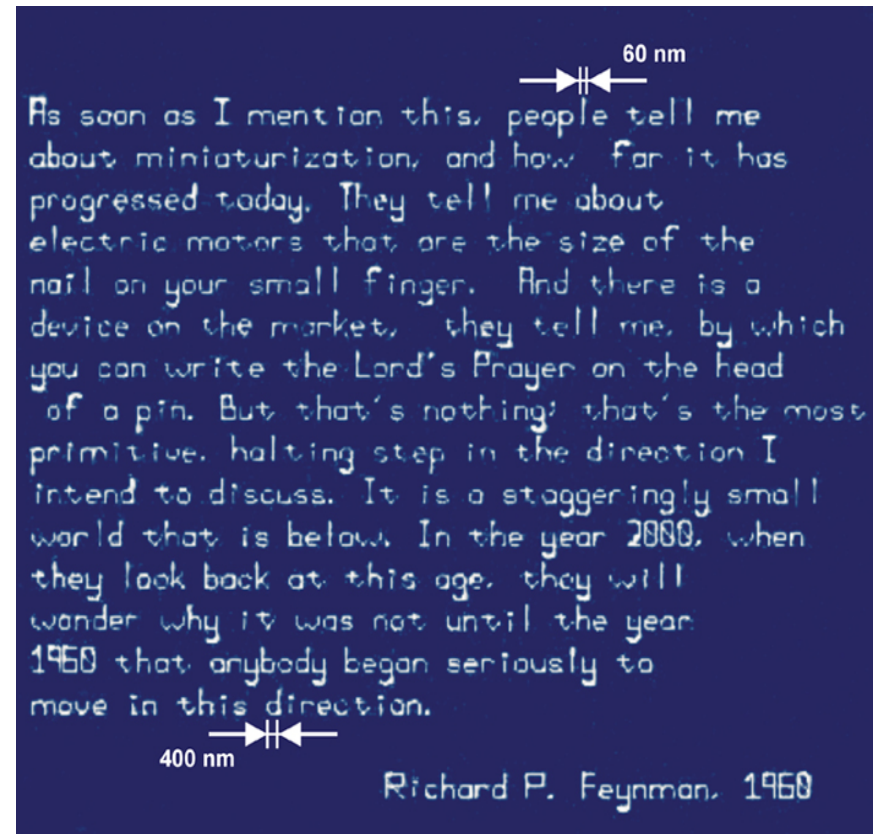


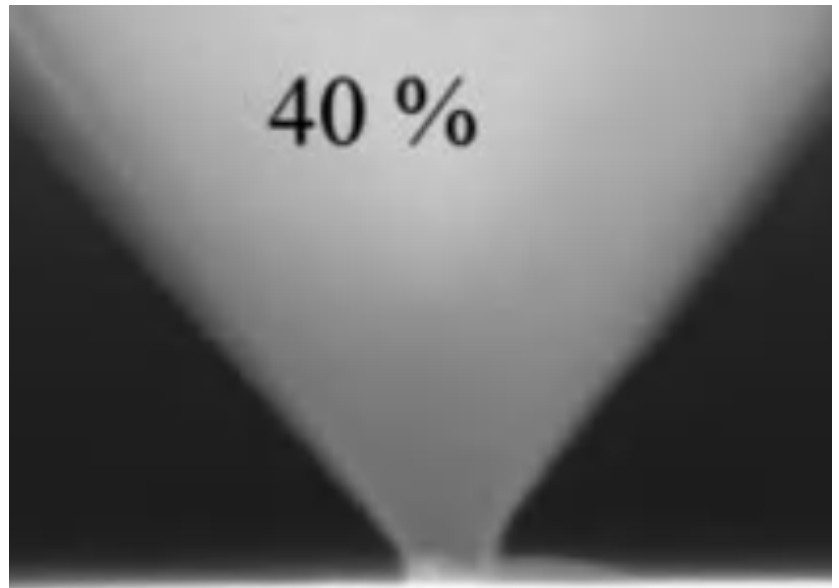
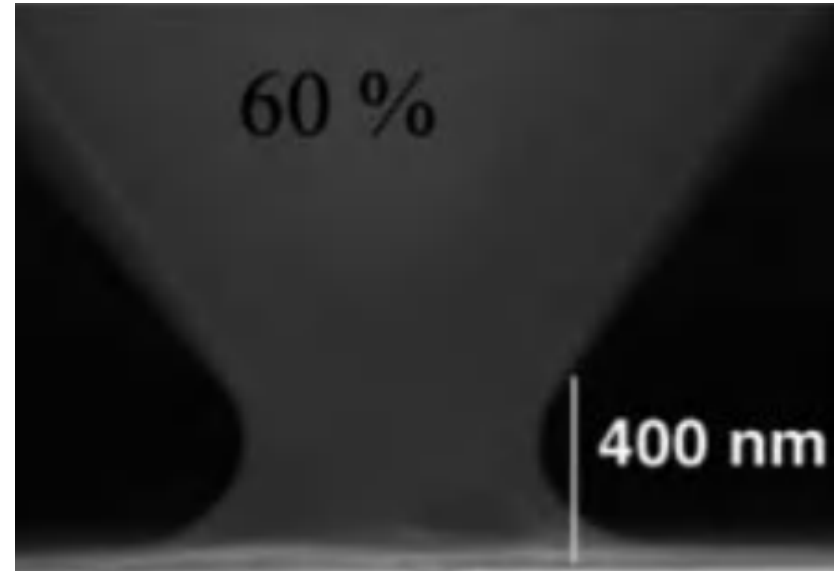
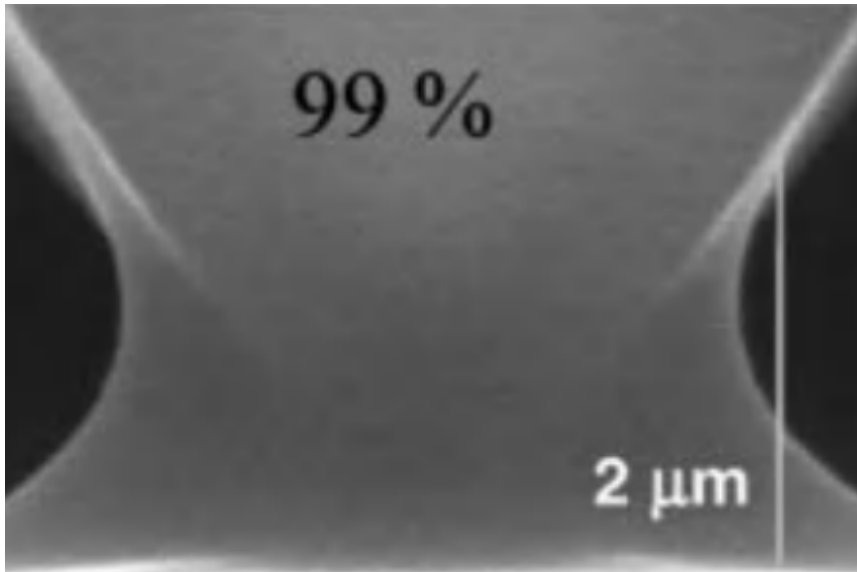
Схема литографии методом погружного пера



Текст из лекции Р. Феймана, созданный с помощью метода нанолитографии погружным пером

# Нанолитография погружным пером

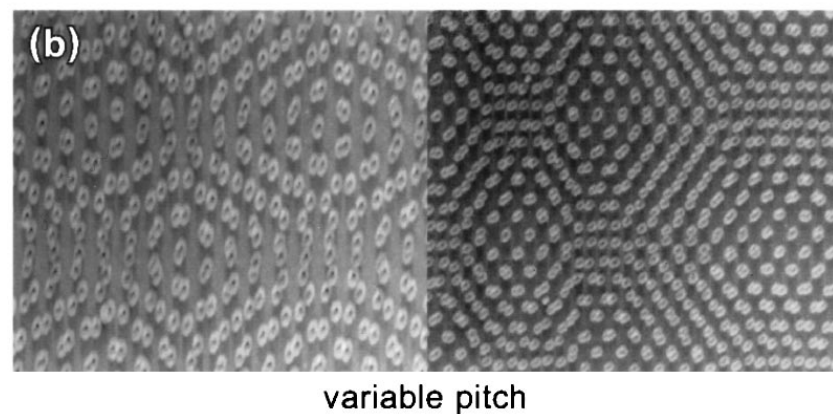
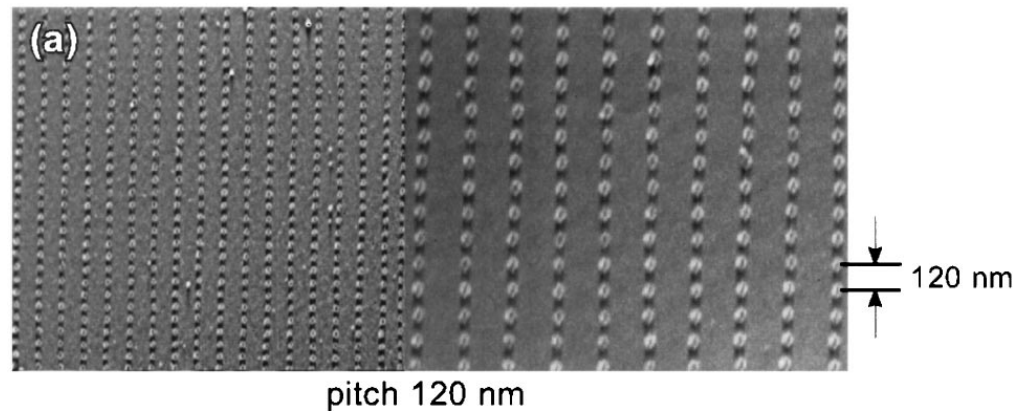
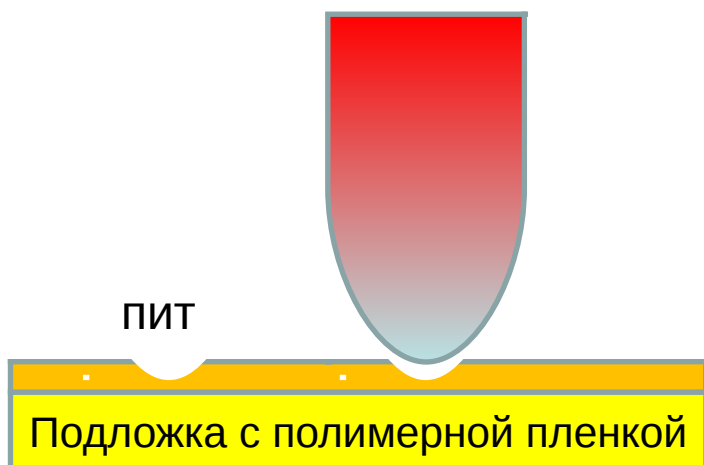
Зависимость размеров мениска от относительной влажности



Изображения заимствованы из  
V.V. Tsukruk, S. Singamaneni.  
Scanning Probe Microscopy of Soft Matter:  
Fundamentals and Practices.  
2012, Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA

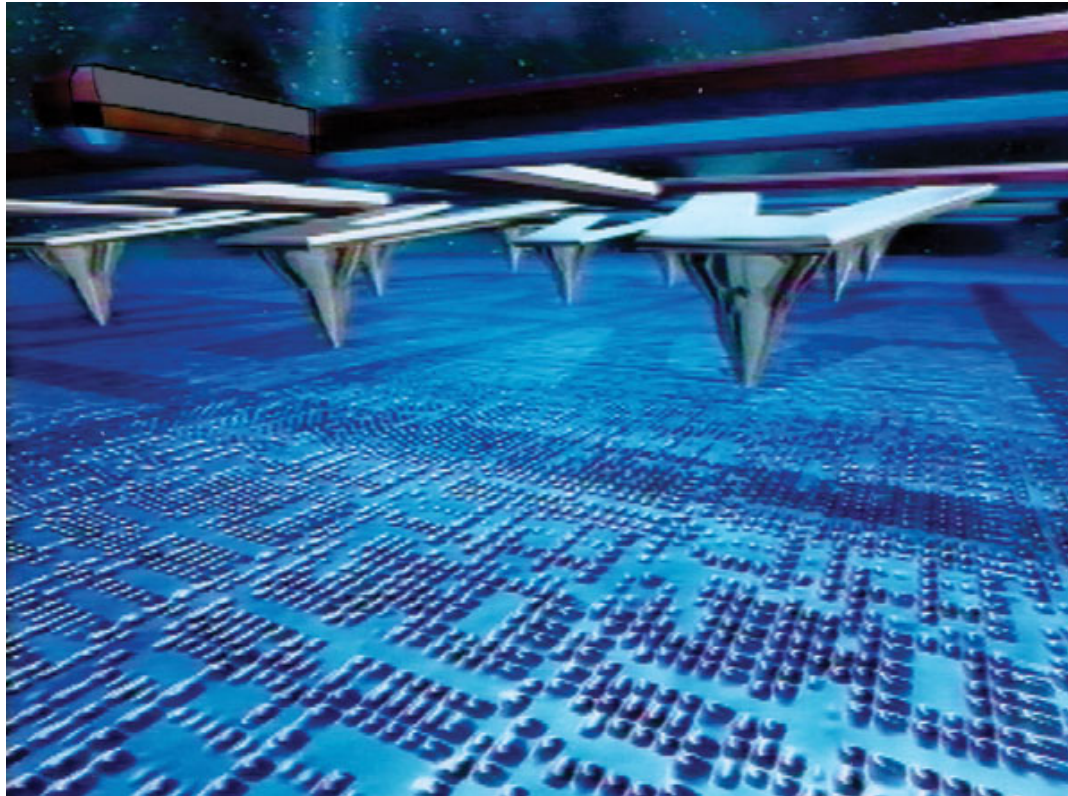
# Зондовая литографи на полимерных пленках

Для создания пита зонд нагревается



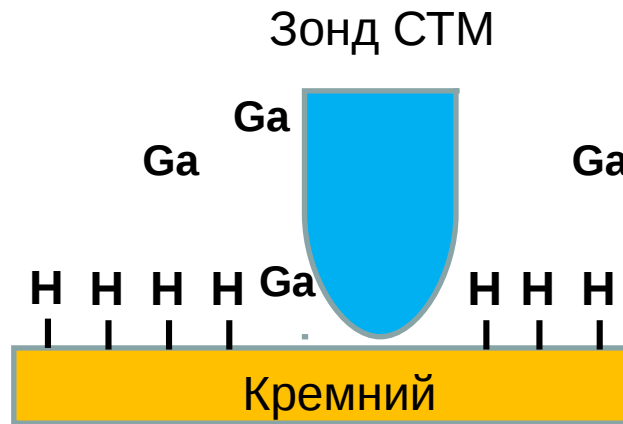
# Зондовая литографи на полимерных пленках

Проект Millipede предполагал создание запоминающих устройств с плотностью записи информации более чем 1 гигабит на квадратный миллиметр

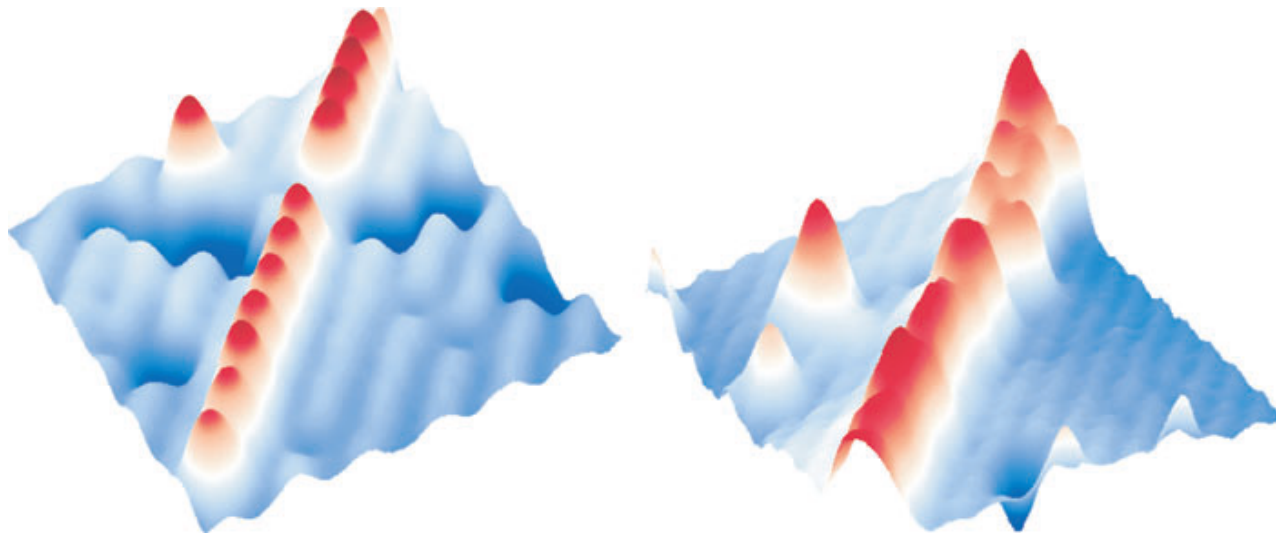


Массив кантилеверов с помощью которых можно осуществлять запись, удаление и считывание информации

# Зондовый микроскоп — химическая лаборатория



Разрушения резиста из атомов водорода на поверхности кремния в атмосфере атомов галлия

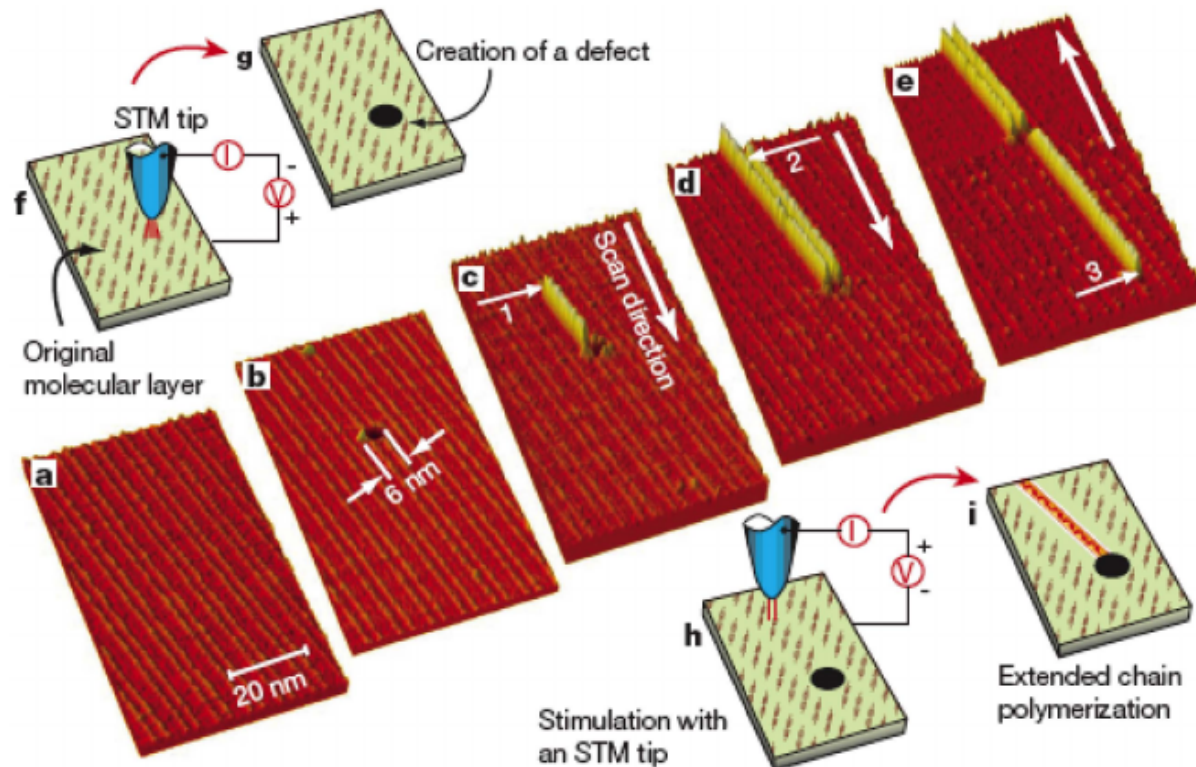
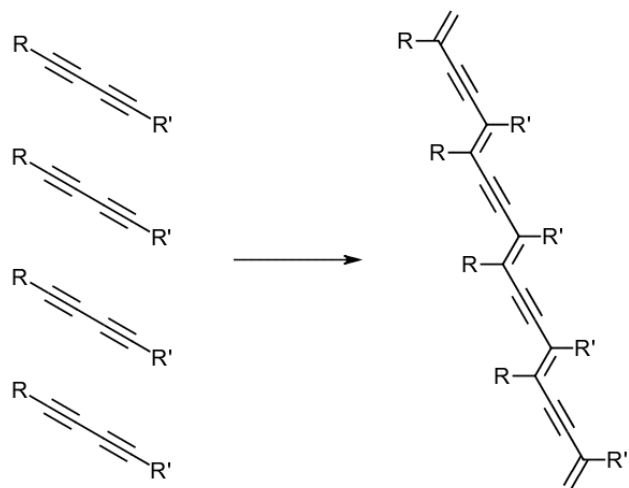


Слева – изображение полосы из адатомов кремния на гидрированной поверхности Si(100)-2×1. Справа – полоска из атомов галлия.

Заимствовано из *Michael A. Walsh and Mark C. Hersam. Annu. Rev. Phys. Chem. 2009. 60:193–216*

# Зондовый микроскоп — химическая лаборатория

Схема реакции полимеризации нонакоза-10,12-дииновой кислоты,  $R=(CH_2)_{15}CH_3$ ,  $R'=(CH_2)_8COOH$

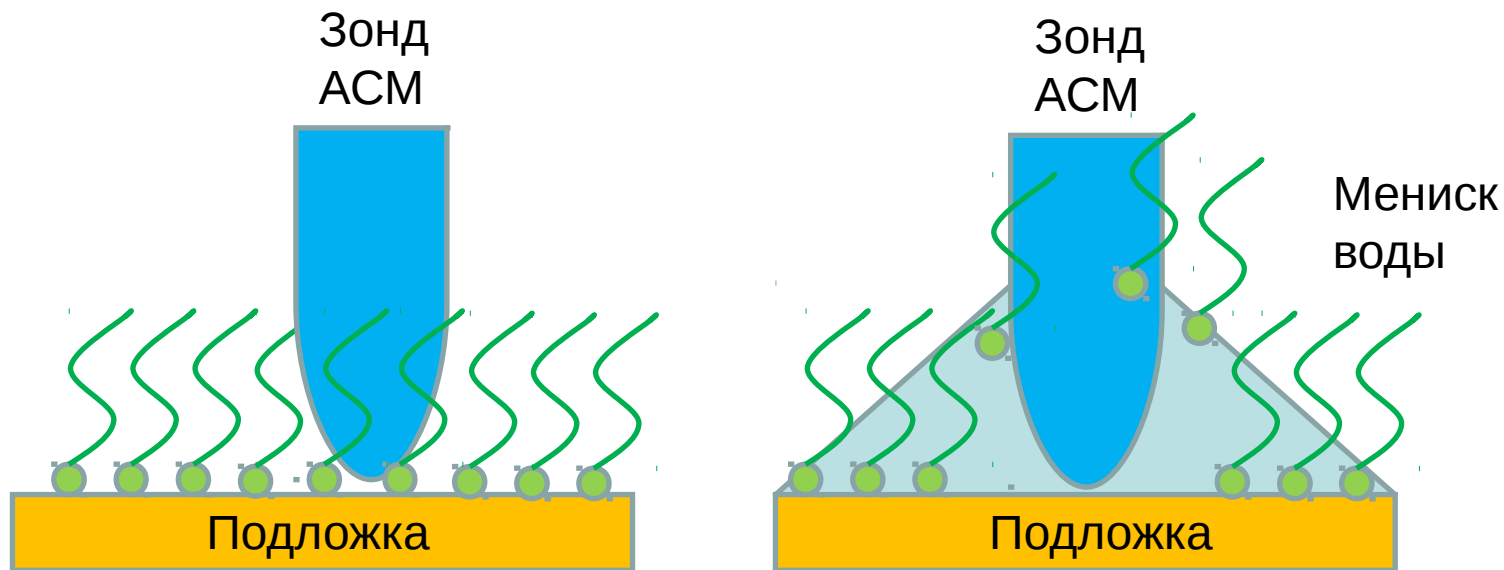
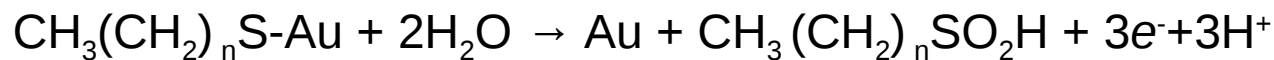


Изображения заимствованы из  
R. Xie et al. ANALYTICAL SCIENCES, 2011, VOL. 27, 129



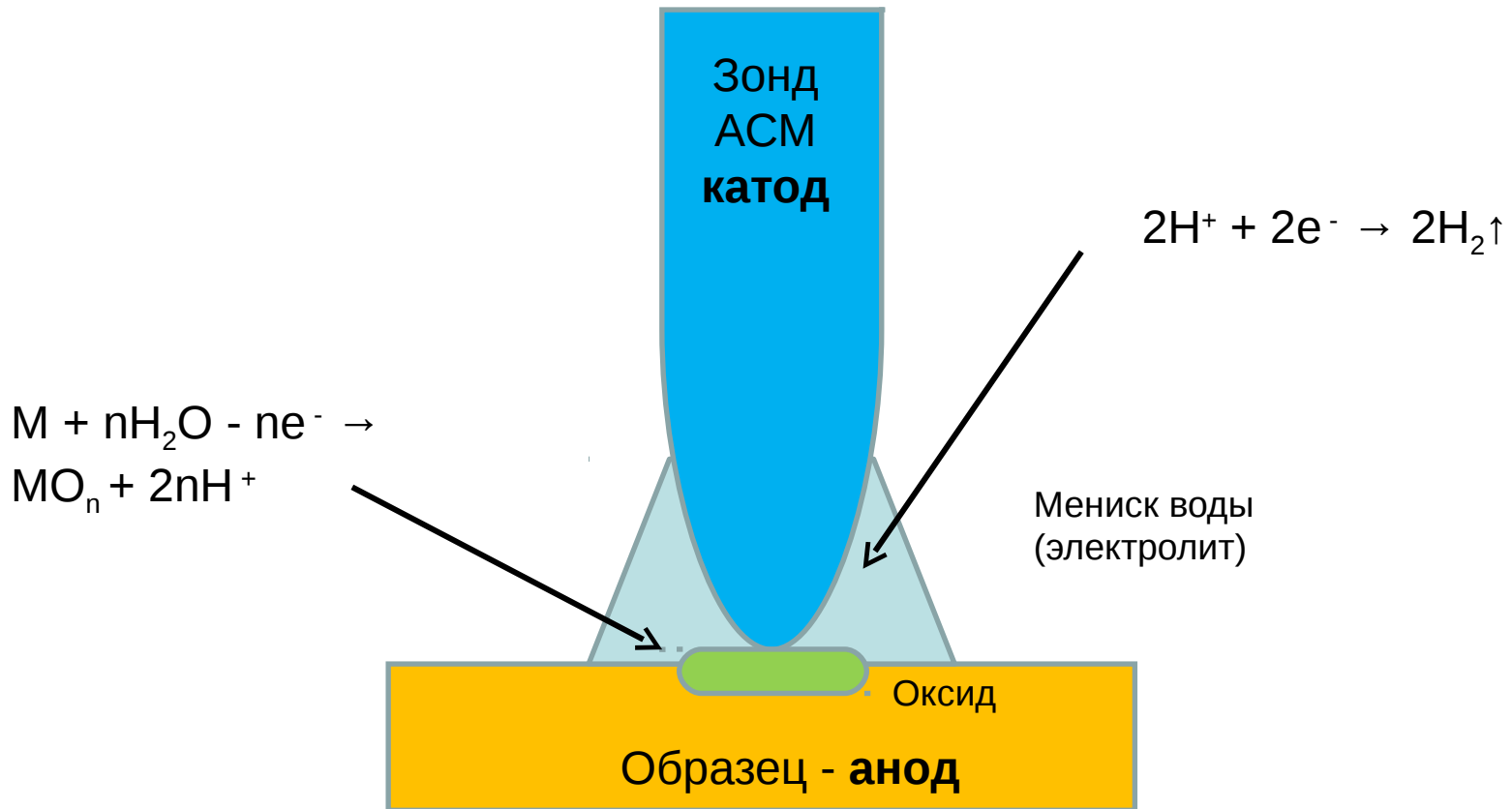
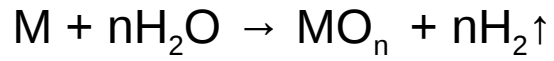
# Зондовый микроскоп — химическая лаборатория

Пример реакции десорбции алкантиольных самособирающихся слоев на поверхности золота:



Процесс десорбции не протекает при нулевой влажности и отсутствии мениска воды

# Локальное анодное окисление



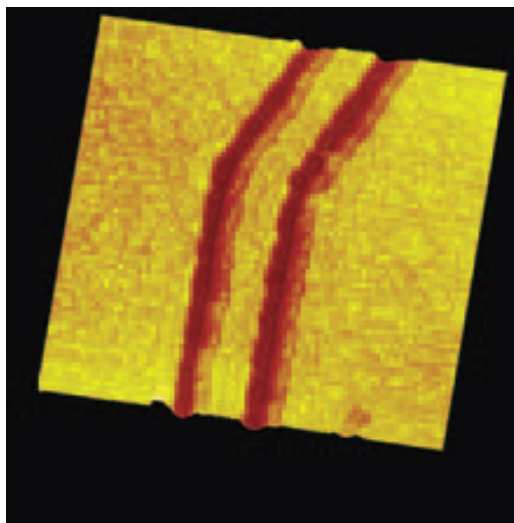
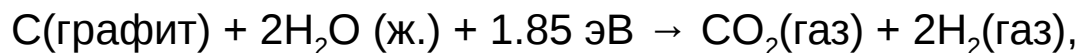
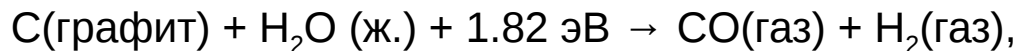
## Роль окружающей среды в процессе локального анодного окисления

Для многих материалов напряжения, необходимые для начала процесса окисления, в вакууме и на воздухе различаются в несколько раз. Ниже приведен пример для окисления графита.

Условия	Схема процесса	E, эВ	U <sub>tr</sub> , В
В вакууме	$C_{sol} \rightarrow C_{gas}$	7.43	8.5
	$C_{sol} \rightarrow C^+_{gas}$		
На воздухе	$C + H_2O \rightarrow CO \uparrow + H_2 \uparrow$	1.82	2.5

# Локальное анодное окисление углеродных материалов

Возможные химические реакции, протекающие при локальном анодном окислении поверхности углеродных материалов

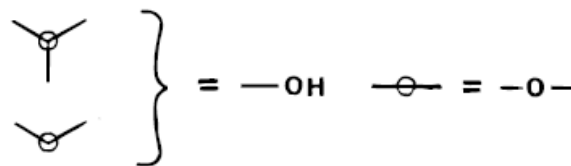
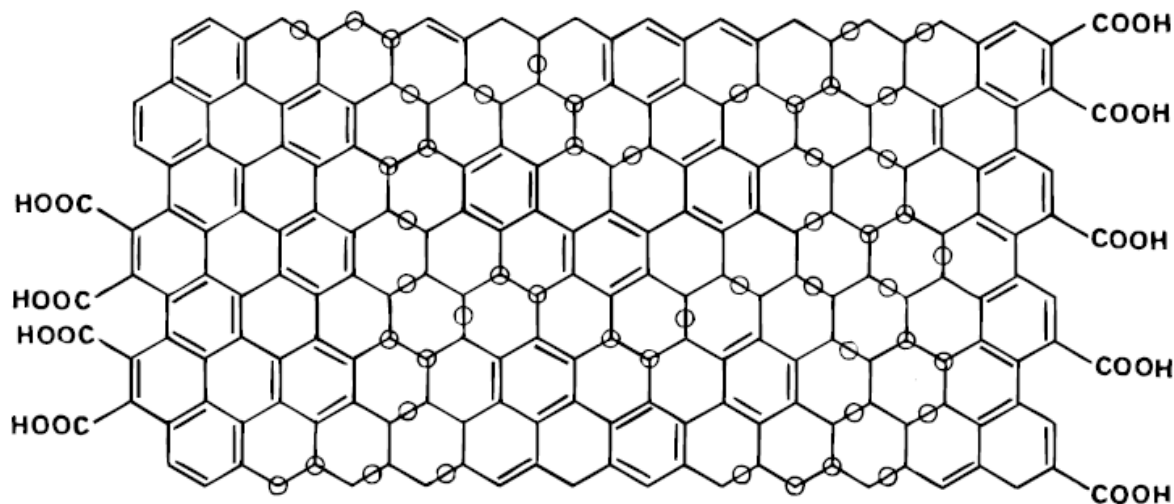
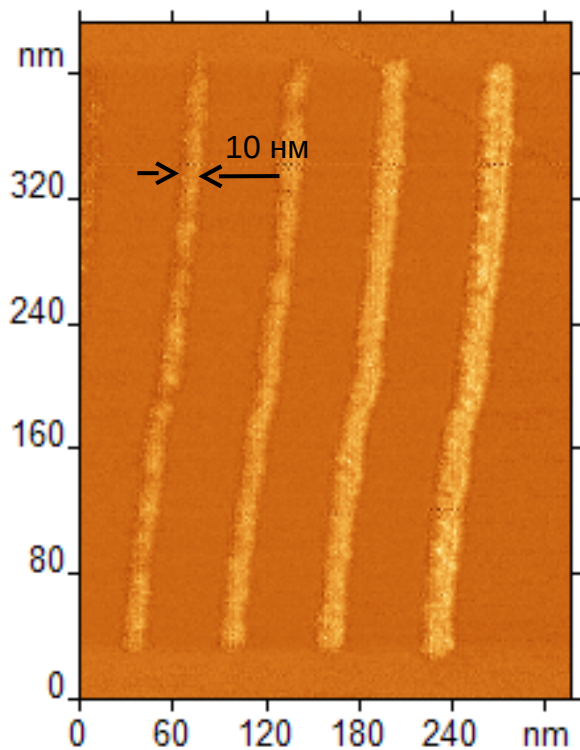


Наилучшее разрешение (2.5 нм) методом ЛАО на поверхности углеродных материалов было получено с помощью СТМ. Размер кадра 120x120 нм<sup>2</sup>.

*Заимствовано из LEVENTE TAPASZTO, GERGELY DOBRIK, PHILIPPE LAMBIN AND LA´SZLO´ P. BIRO. Nature nanotechnology | VOL 3 | JULY 2008, 397-401*

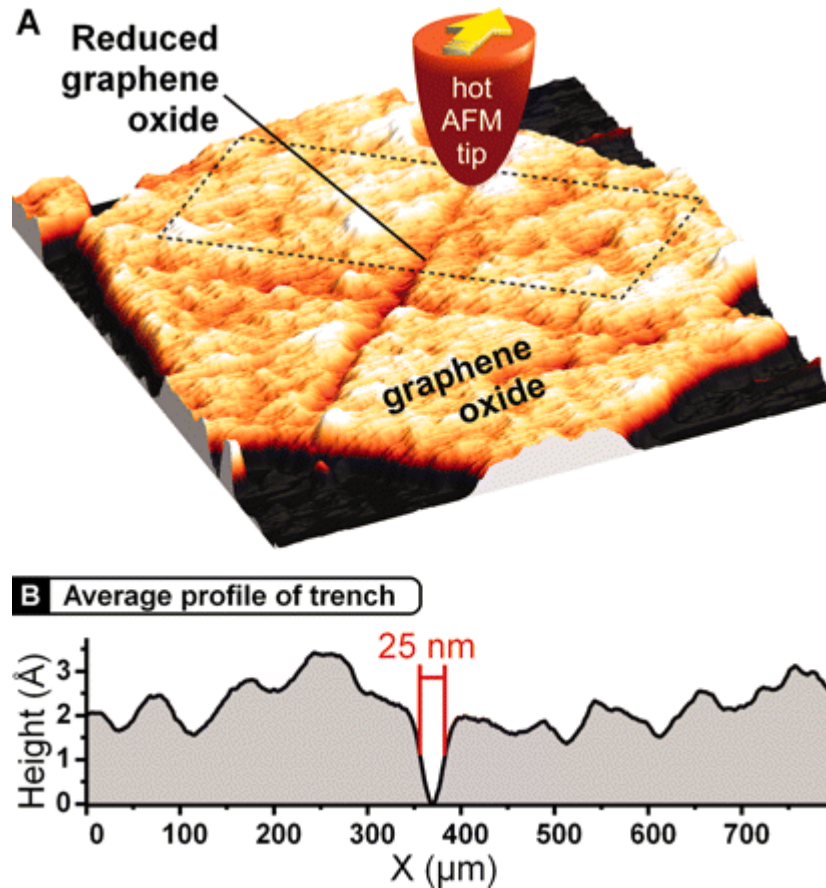
# Локальное анодное окисление углеродных материалов

Окисление графита с образованием оксида графита



A.Lerf, H.He, M. Forster, J. Klinowski.  
J. Phys. Chem. B, 1998, 102, 4477

# Восстановление оксида графена



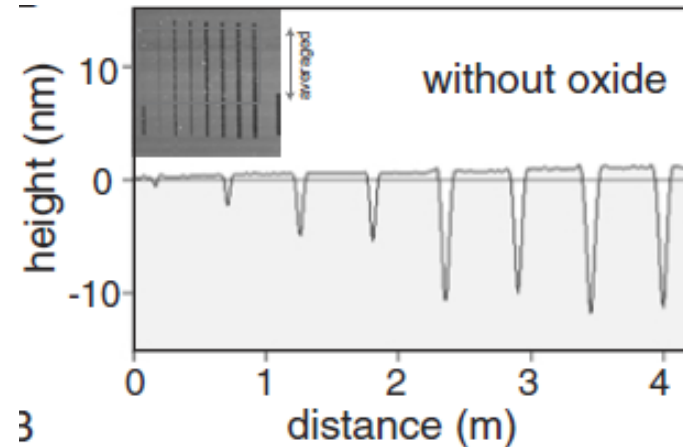
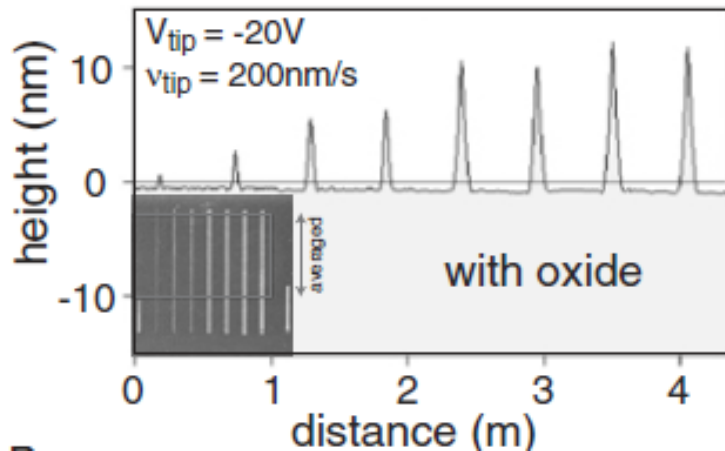
Температура зонда 330°C, скорость сканирования 2 μм/с.

Восстановленные области имели проводимость на 4 порядка больше, чем исходный материал.

Заимствовано из Zh. Wei et al., Science, 328, 2012, 1373

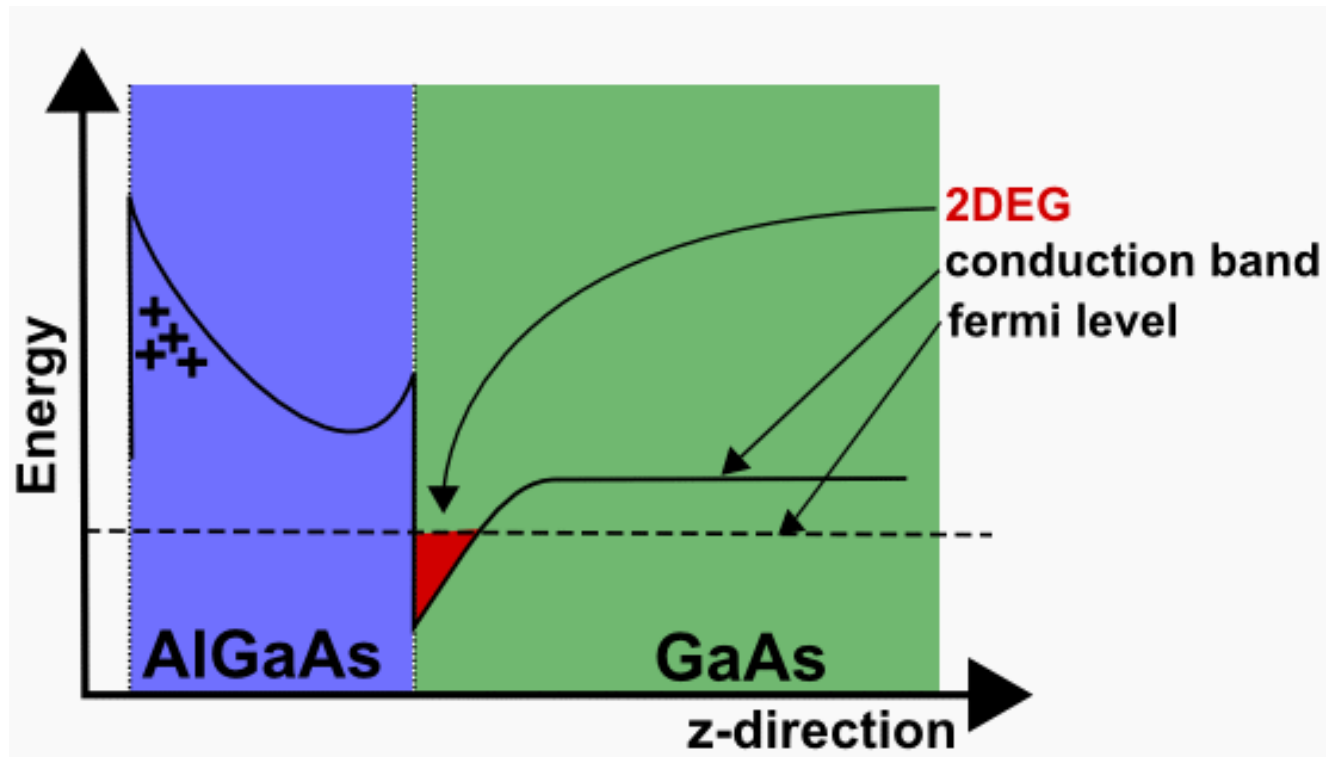
# Локальное анодное окисление полупроводников

Локальное анодное окисление было выполнено на различных полупроводниках: пассивированный водородом кремний, GaAs, GaN и др.



Доказательство формирования оксида как на поверхности, так и в глубине полупроводника. *Заимствовано из А. FUHRER, А. DORN, S. LÜSCHER, T. HEINZEL, K. ENSSLIN Superlattices and Microstructures, Vol. 31, No. 1, 2002*

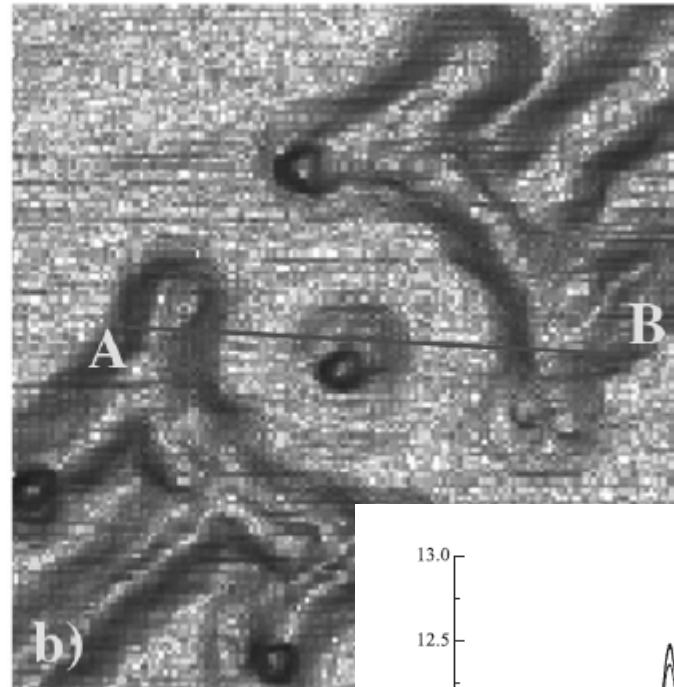
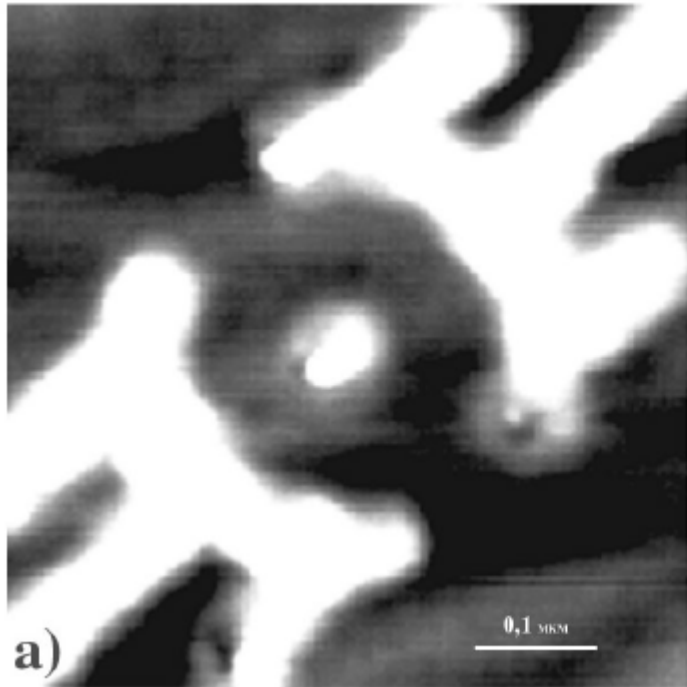
# Структуры с двумерным электронным газом



Зонная диаграмма для структуры AlGaAs/GaAs с двумерным газом.  
Заимствовано из  
[http://www.phys.unsw.edu.au/QED/research/2D\\_scattering.htm](http://www.phys.unsw.edu.au/QED/research/2D_scattering.htm)

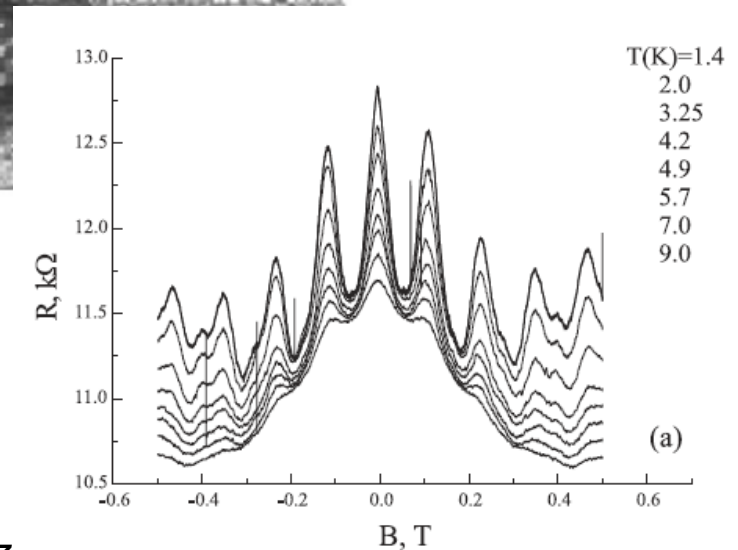


# Создание наноструктур с помощью ЛАО



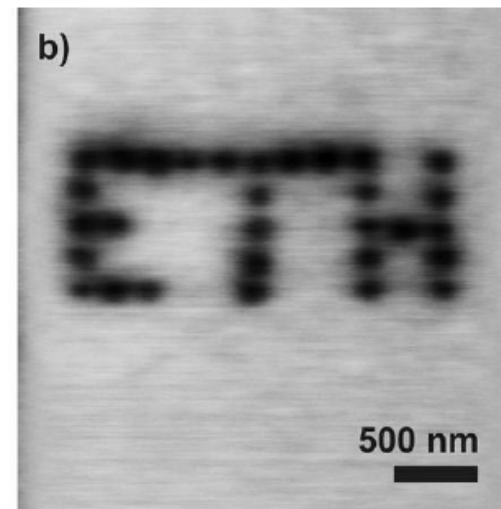
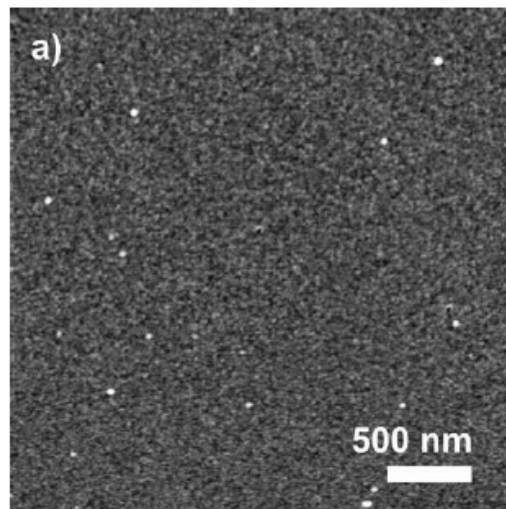
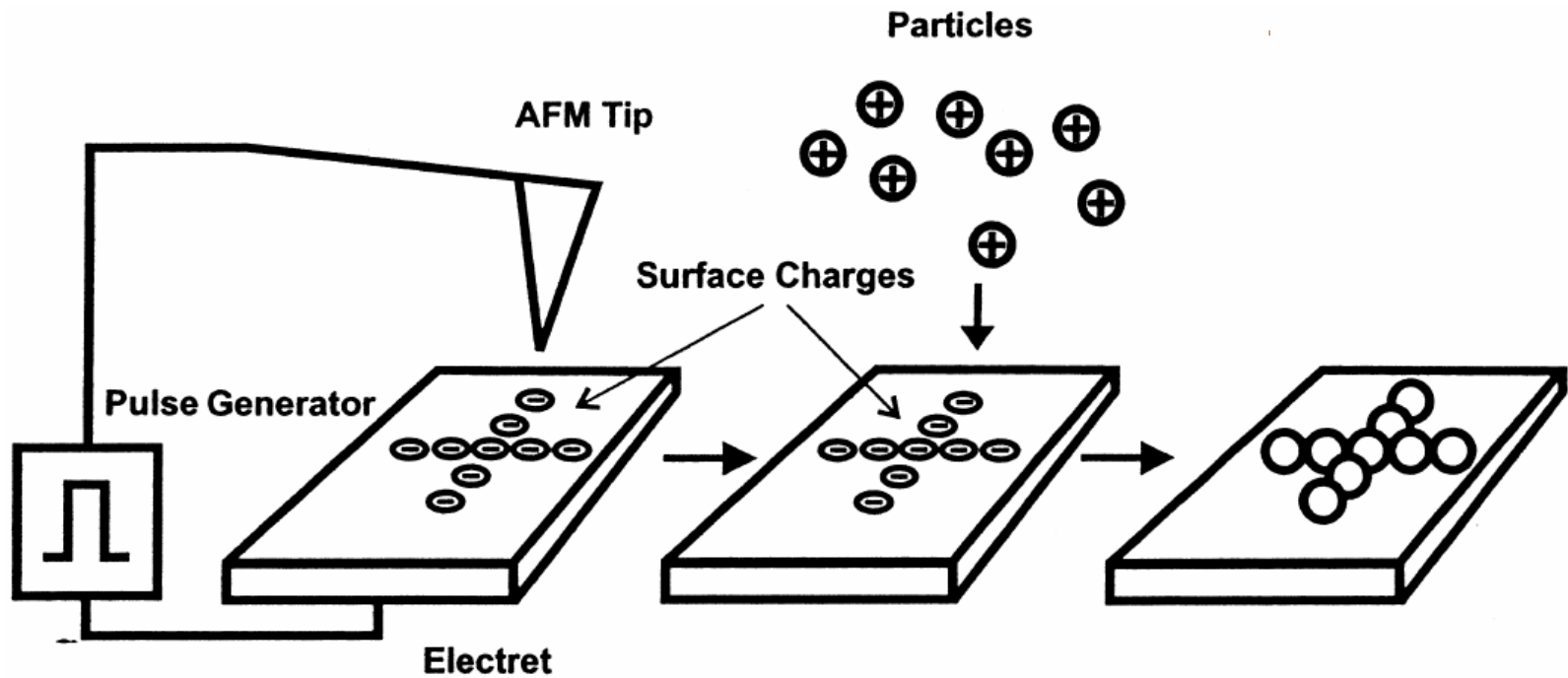
Кольцевой интерферометр, созданный на поверхности гетероструктуры AlGaAs/GaAs.

Изображения заимствованы из *E. B. Olshanetsky, Z. D. Kvon, D. V. Sheglov, A. V. Latyshev, A. I. Toropov. International Journal of Modern Physics B 2004*

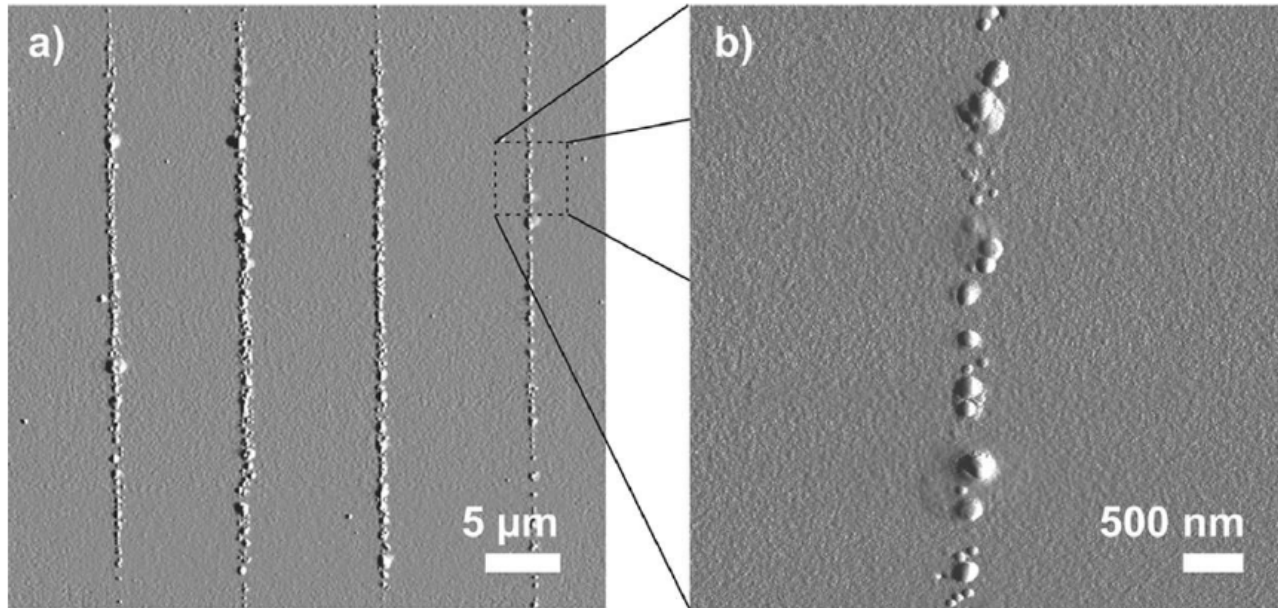


Наблюдение осцилляций Ааронова-Бома.

# Создание заряженных областей на поверхности



# Создание заряженных областей на поверхности

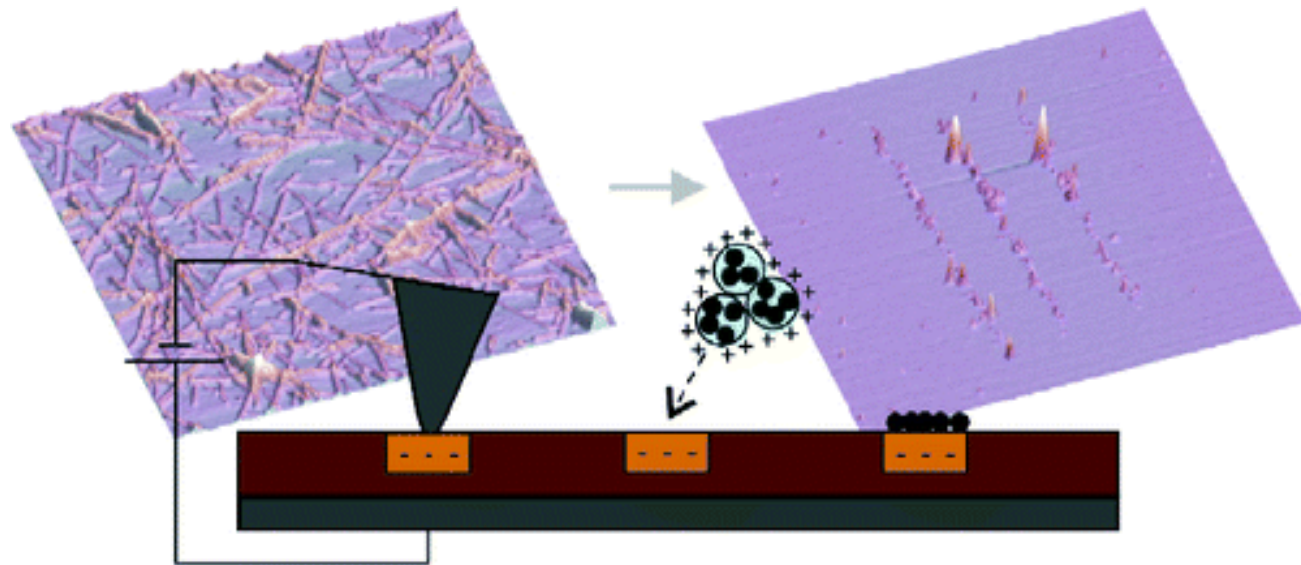


Наночастицы  
золота

Microelectronic  
Engineering 61 –  
62 (2002) 671 –  
674

Фибриллы,  
образованные  
пептидом

Langmuir 2006,  
22, 9089-9091



# Преимущества и недостатки зондовой литографии



- Нет ограничения по разрешению, как в фотолитографии
- Универсальность



- Низкая производительность
- Малое время жизни зондов

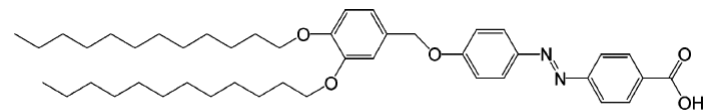
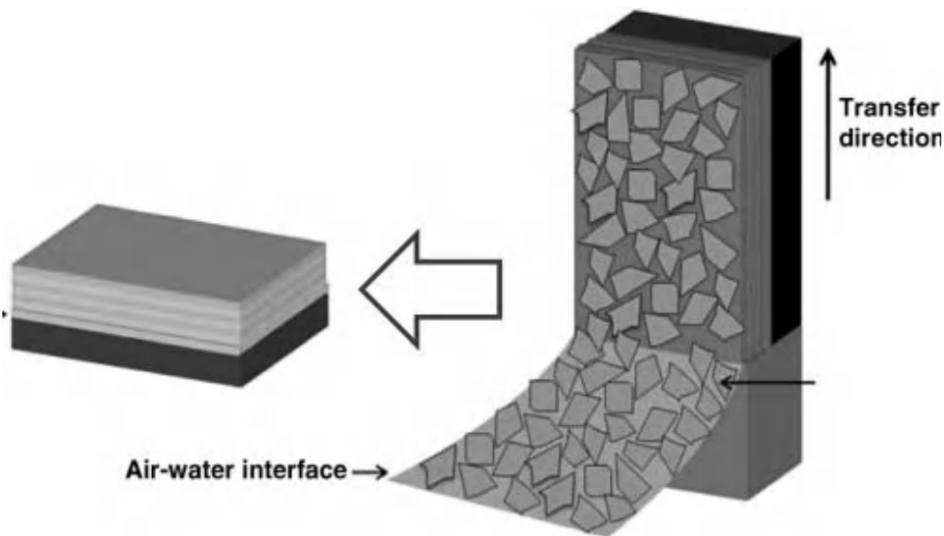
**Зондовая литография — мощный и универсальный метод для лаборатории.**



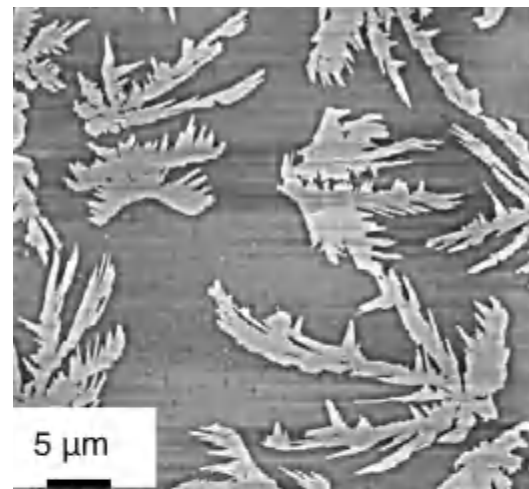
Применение зондовой литографии в промышленности



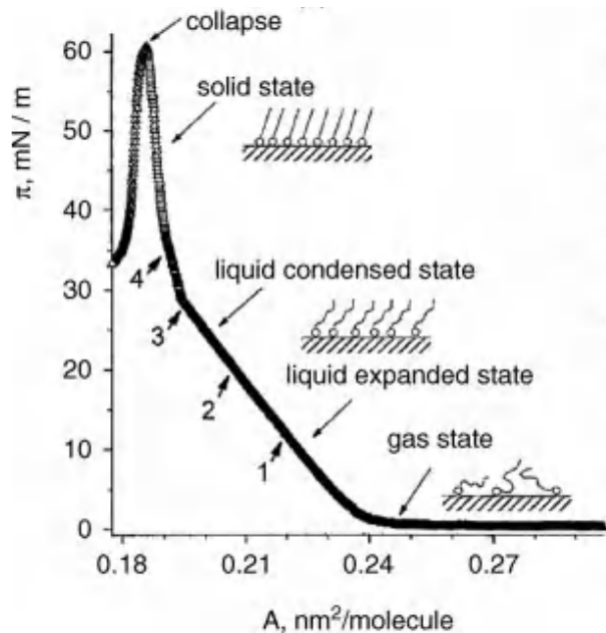
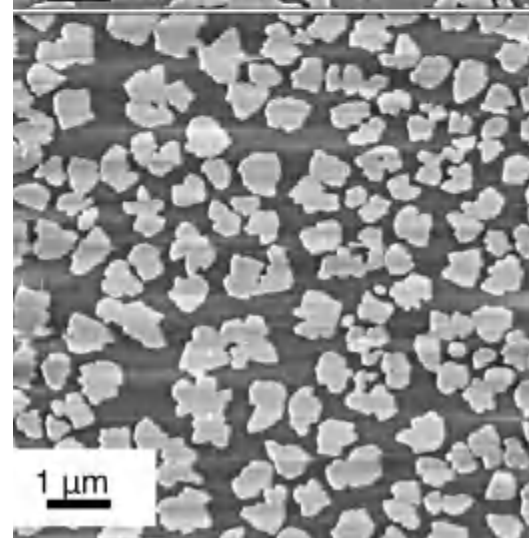
# Плёнки Ленгмюра-Блоджетт



3 мН/м



20 мН/м

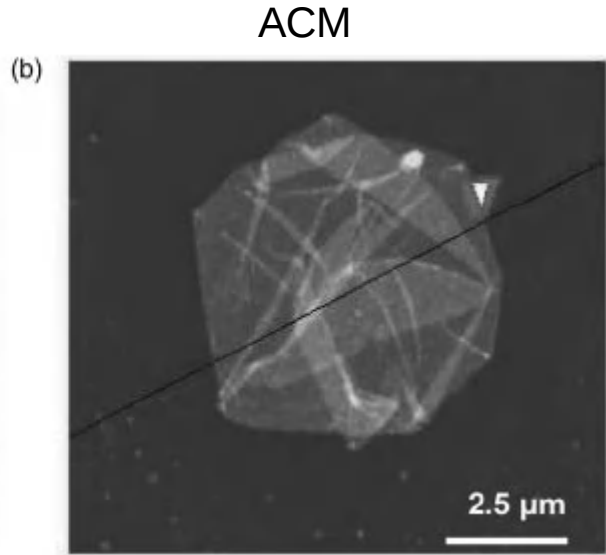
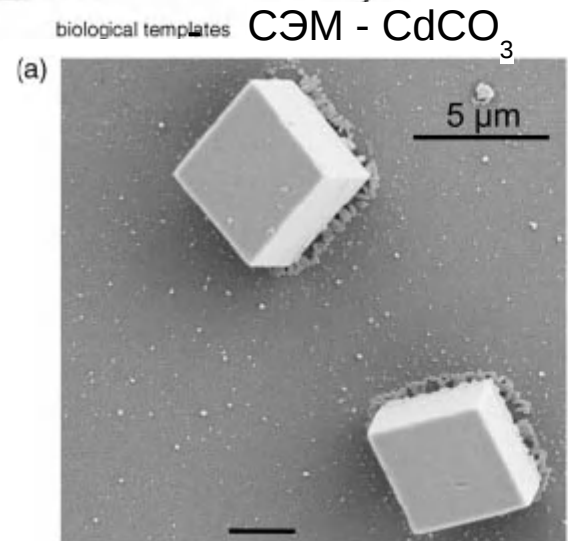
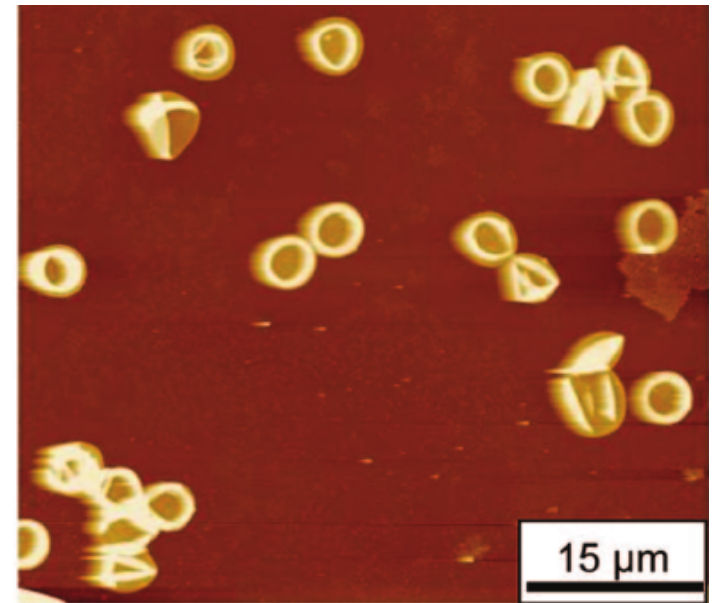
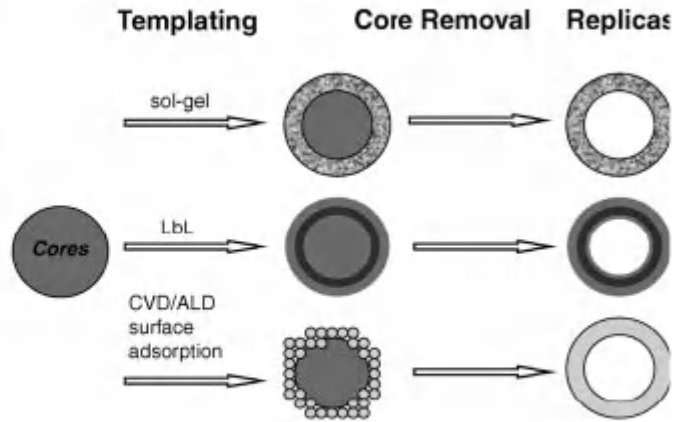
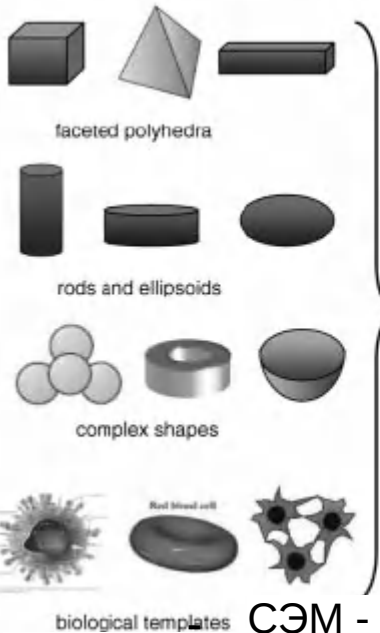


Состояние плёнки Ленгмюра-Блоджетт в зависимости от поверхностного давления.

Займствовано из Tsukruk and Singamaneni, Scanning Probe Microscopy of Soft Matter: Fundamentals and Practices, 2012, Wiley-VCH; Genson et al. J. Phys. Chem. B 2005, 109, 20393

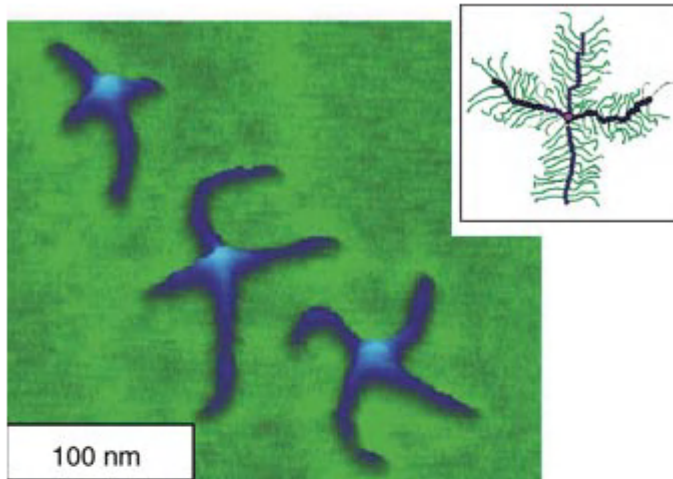
# Микрокапсулы

## Anisotropic Cores/Templates

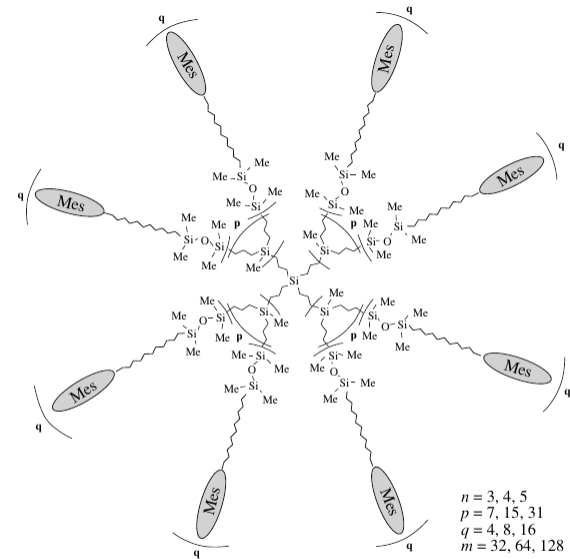


Займствовано из Tsukruk and Singamaneni, Scanning Probe Microscopy of Soft Matter: Fundamentals and Practices, 2012, Wiley-VCH; Kozlovskaya, et al. Chem. Mater. 2009, 21, 2158

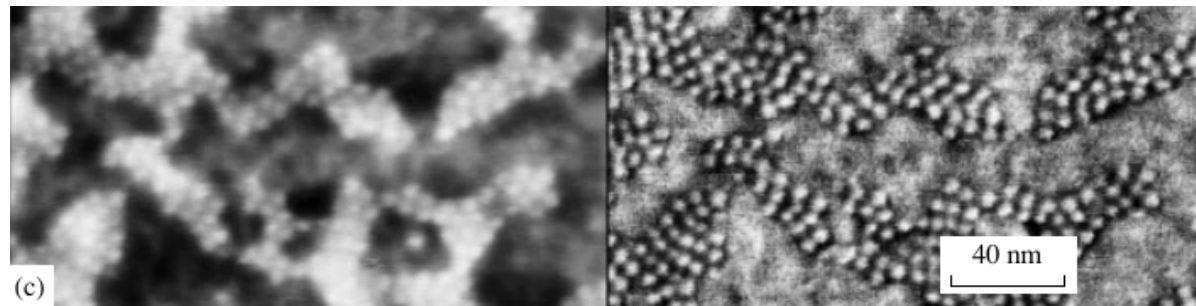
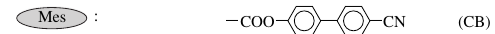
# Полимерные щетки и дендримеры



250



$G-n(\text{Und-Mes})_m$

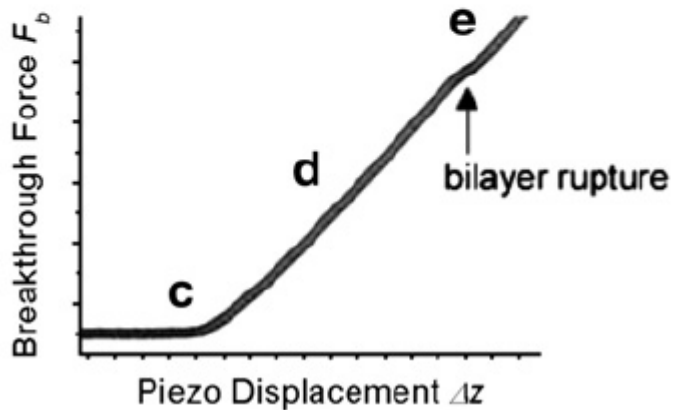
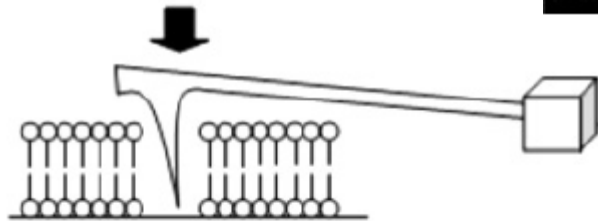
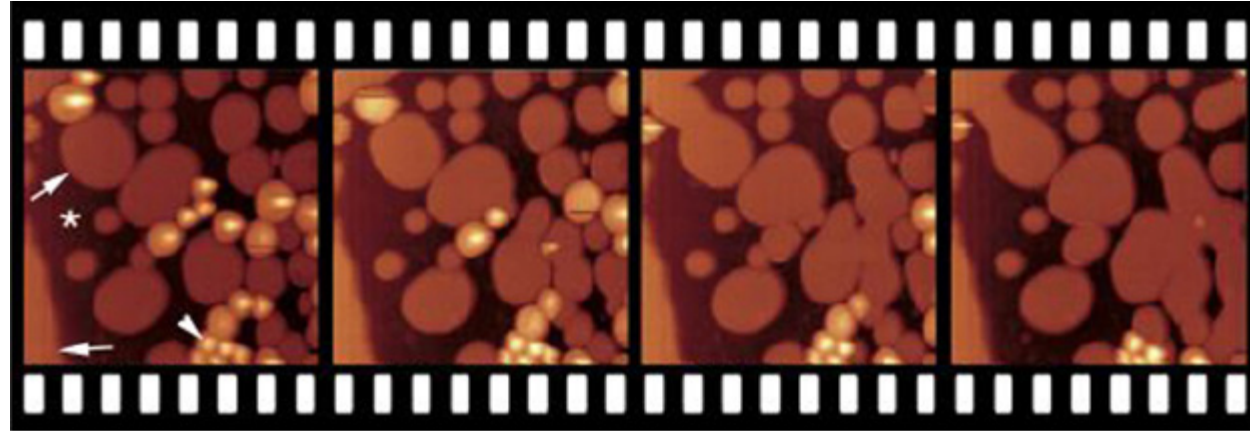
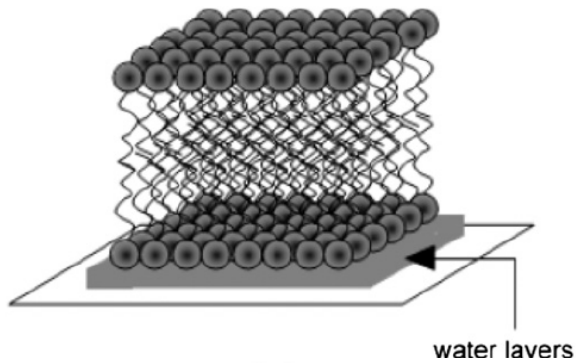


(c)

40 nm

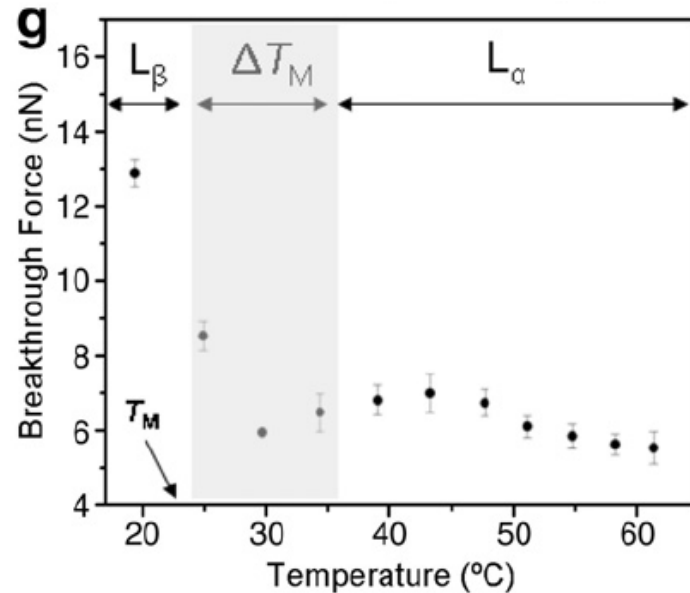
Заимствовано из Tsukruk and Singamaneni, Scanning Probe Microscopy of Soft Matter: Fundamentals and Practices, 2012, Wiley-VCH; Ponomarenko et al. POLYMER SCIENCE Series A, 2001, 43, 245

# Фосфолипидные двойные слои



Формирование слоев из везикул на слюде,  
- 800 нм x 800 нм, 2 секунды/кадр

Заимствовано из Picas et al. / Chemistry and Physics of Lipids 165 (2012) 845



Механические свойства слоев при разных температурах  
Заимствовано из Garcia-Manyes et al. Biochimica et Biophysica Acta 1798 (2010) 741



**Спасибо за внимание!**