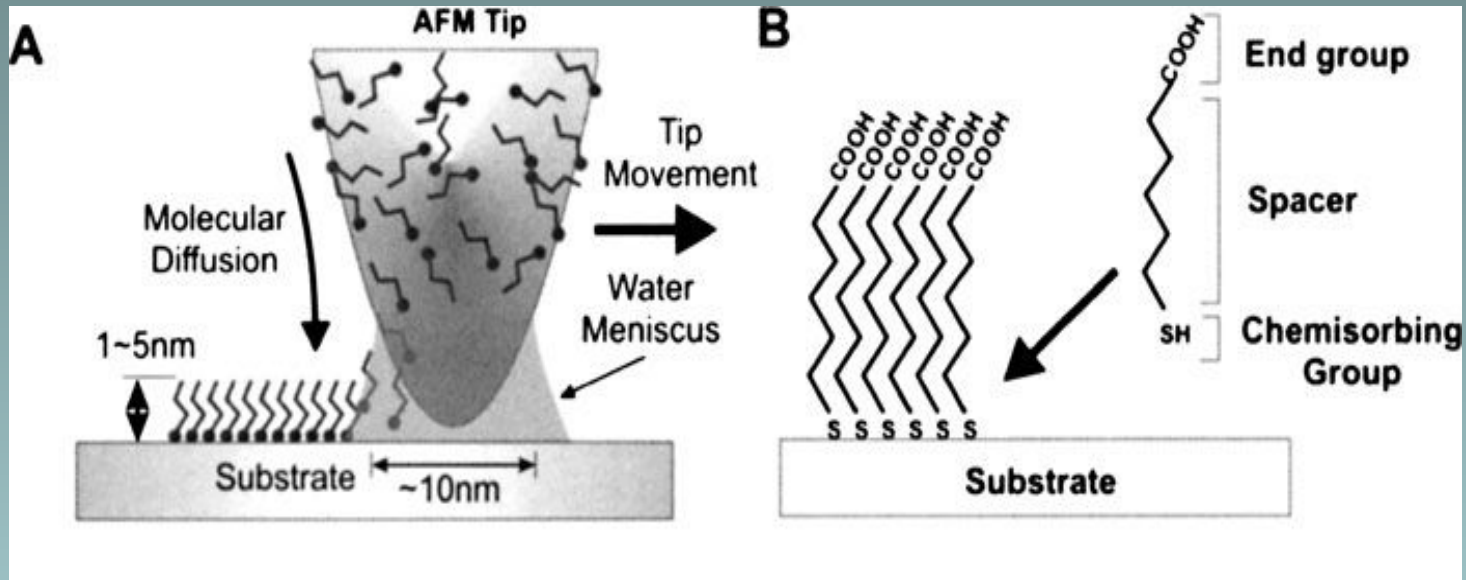


Применение зондовых методов для локальной модификации поверхности

Существующие на сегодняшний день группы технологических процессов с использованием зондовых методов:

- Процессы локального окисления
- Процессы локального испарения
- Процессы активации адсорбции или десорбции
- Локальное химическое осаждение из газовой фазы CVD
- Процессы экспонирования электрон-чувствительных резистов
- Процессы манипулирования отдельными атомами и молекулами
- Процессы создания локальных зарядов в сегнетоэлектриках
- Применение плазмонных сенсоров в медицине и биологии

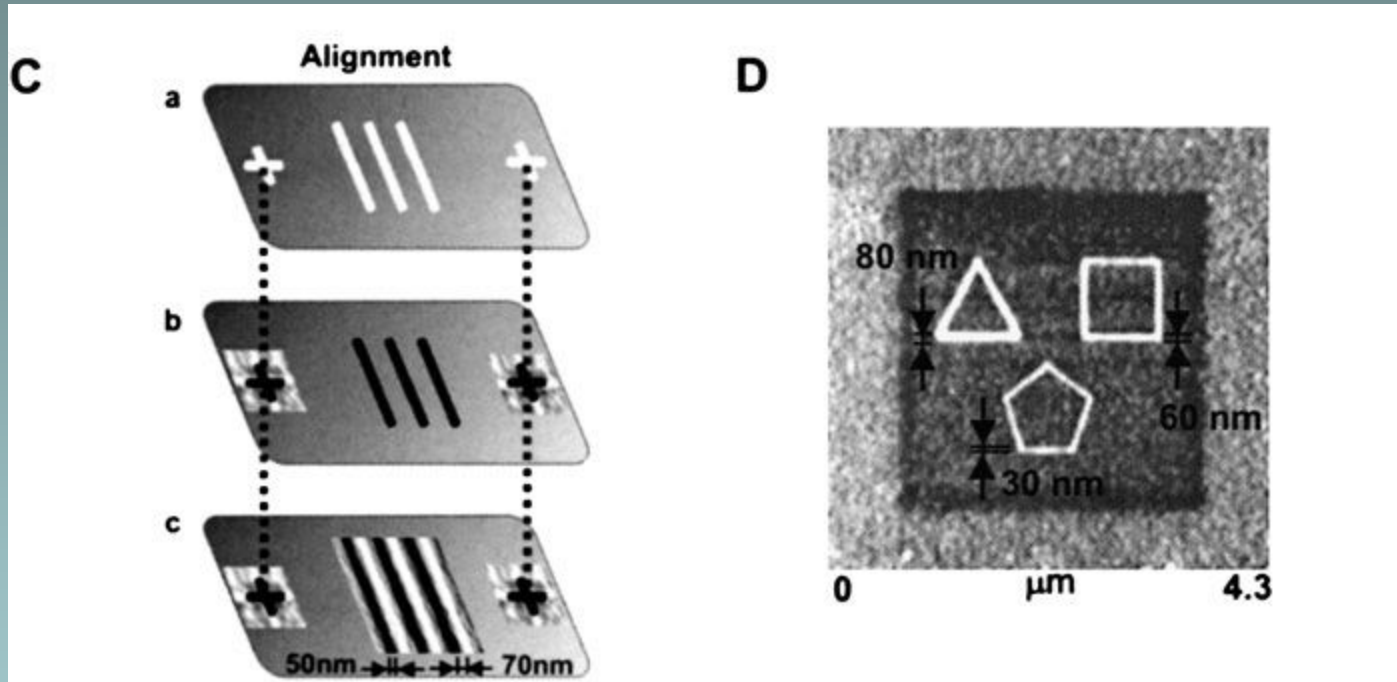
Наноразмерные перьевые ручки. Локальное нанесение самоорганизующихся молекул на поверхность



A – Схема процесса осаждения молекул с зонда на поверхность при контакте за счет диффузии.
B – Схема адсорбции самоорганизующихся молекул на поверхности.

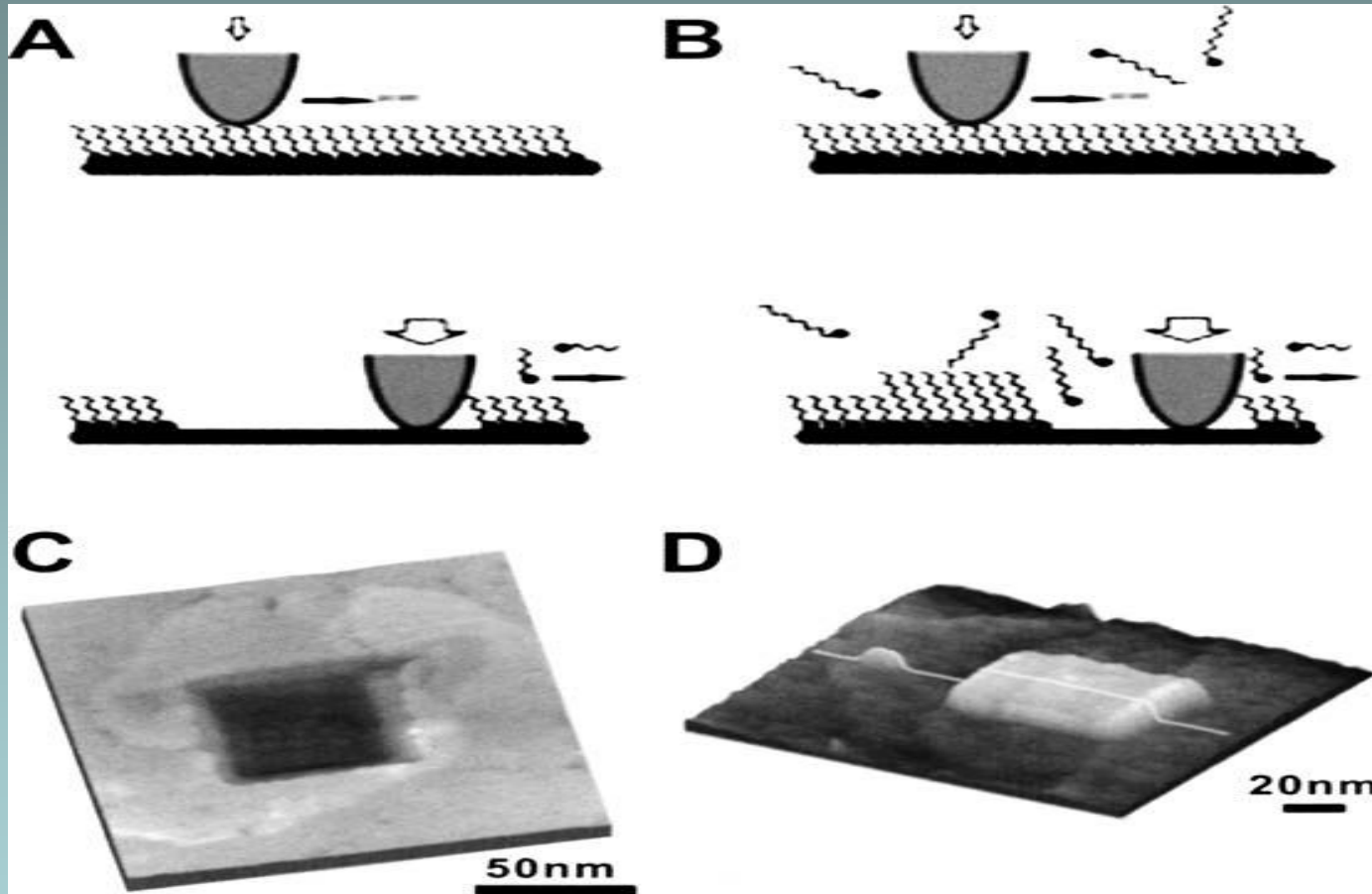
Наносимые на поверхность молекулы находятся на поверхности зонда, который играет роль резервуара. Контролируемыми параметрами являются: температура, относительная влажность среды, сила взаимодействия зонда с поверхностью, скорость перемещения зонда. Изменение параметров влияет на ширину наносимых линий. Достигнутое разрешение – около 10 нм.

В качестве чернил используют самоорганизующиеся молекулы типа $R(CH_2)_nSH$,
Время кристаллизации на поверхности – несколько секунд.



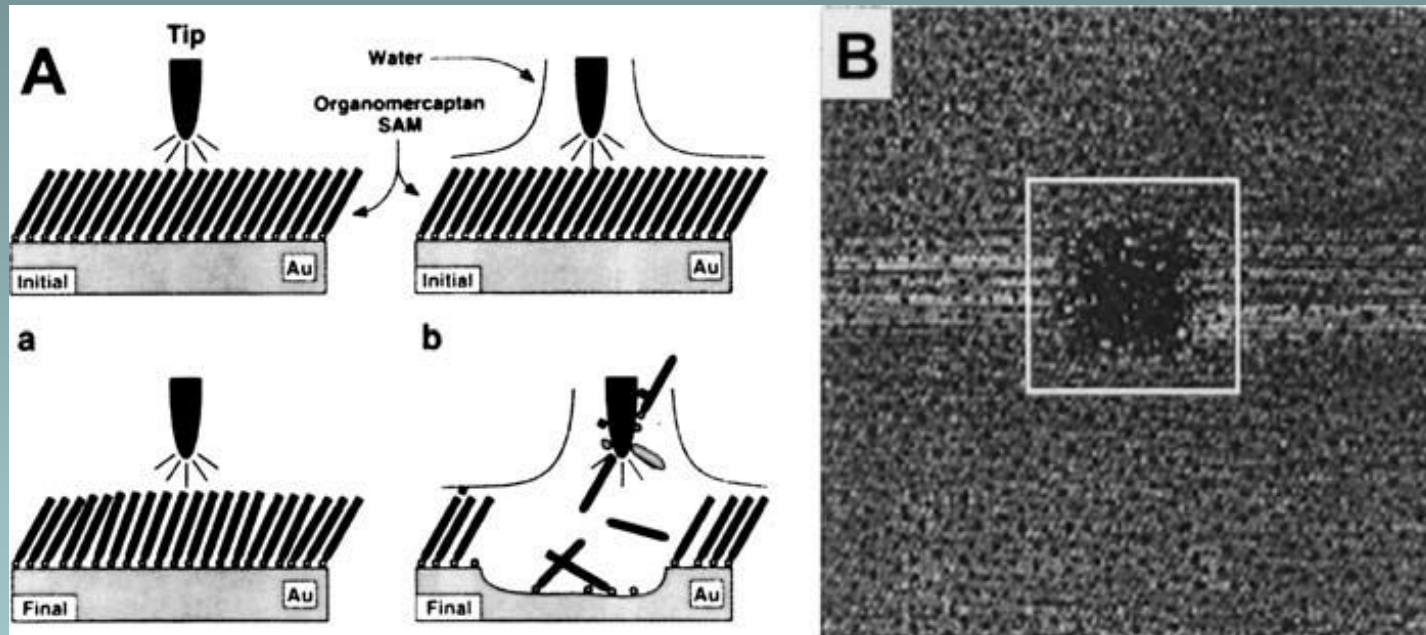
Поскольку в данном процессе используется стандартный АСМ зонд, то возможно одновременное прецизионное определение рельефа и позиционирование зонда для нанесения структуры в определенных местах. На рисунке С показано последовательное нанесение различных САМ молекул в чередующейся последовательности. Д – нанесение структуры в структуре.

Нано гравировка



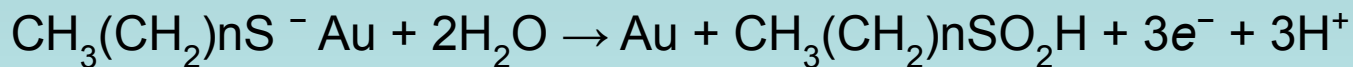
Использование мягких слоев самоорганизующихся молекул для последующей гравировки наноразмерных структур с силами порядка 5-10 нН. Процесс происходит в растворе тиола, так что освободившееся место занимают молекулы из раствора. В случае подбора более коротких или более длинных молекул можно формировать наноструктуры по высоте.

Наноразмерная десорбция самоорганизующихся молекул .

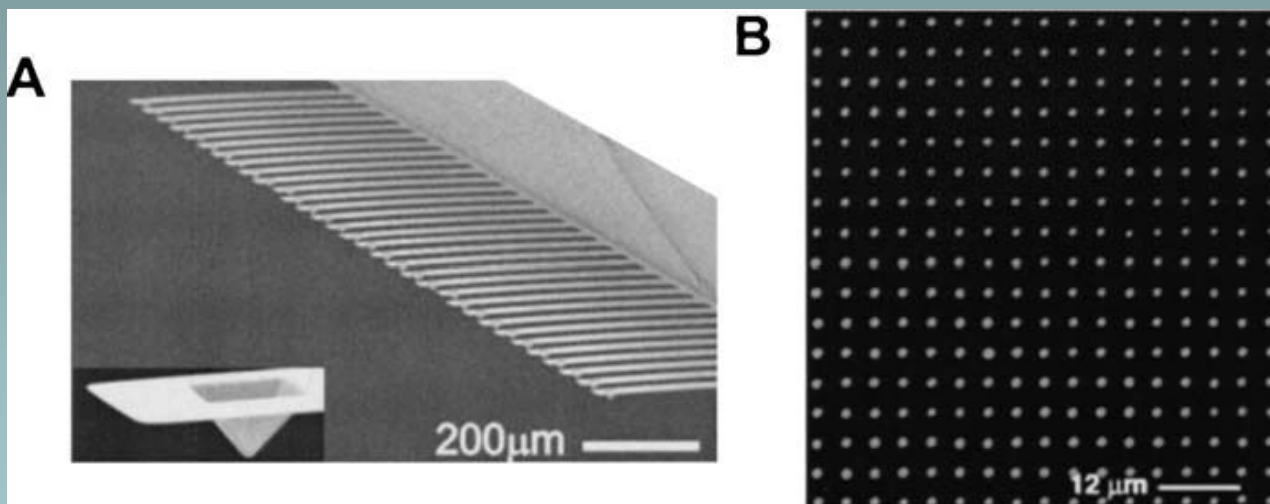


Локальная десорбция происходит в условиях мениска адсорбированной воды и усилена полем. Десорбция происходит в результате окисления SOM. Процесс существенным образом зависит от влажности.

Реакция окисления в случае алкентииола



Использование одного зонда для нанесения рисунка и визуализации поверхности позволяет наносить метки в строго определенных местах определяемых по СЗМ изображению с точностью до нескольких нанометров.

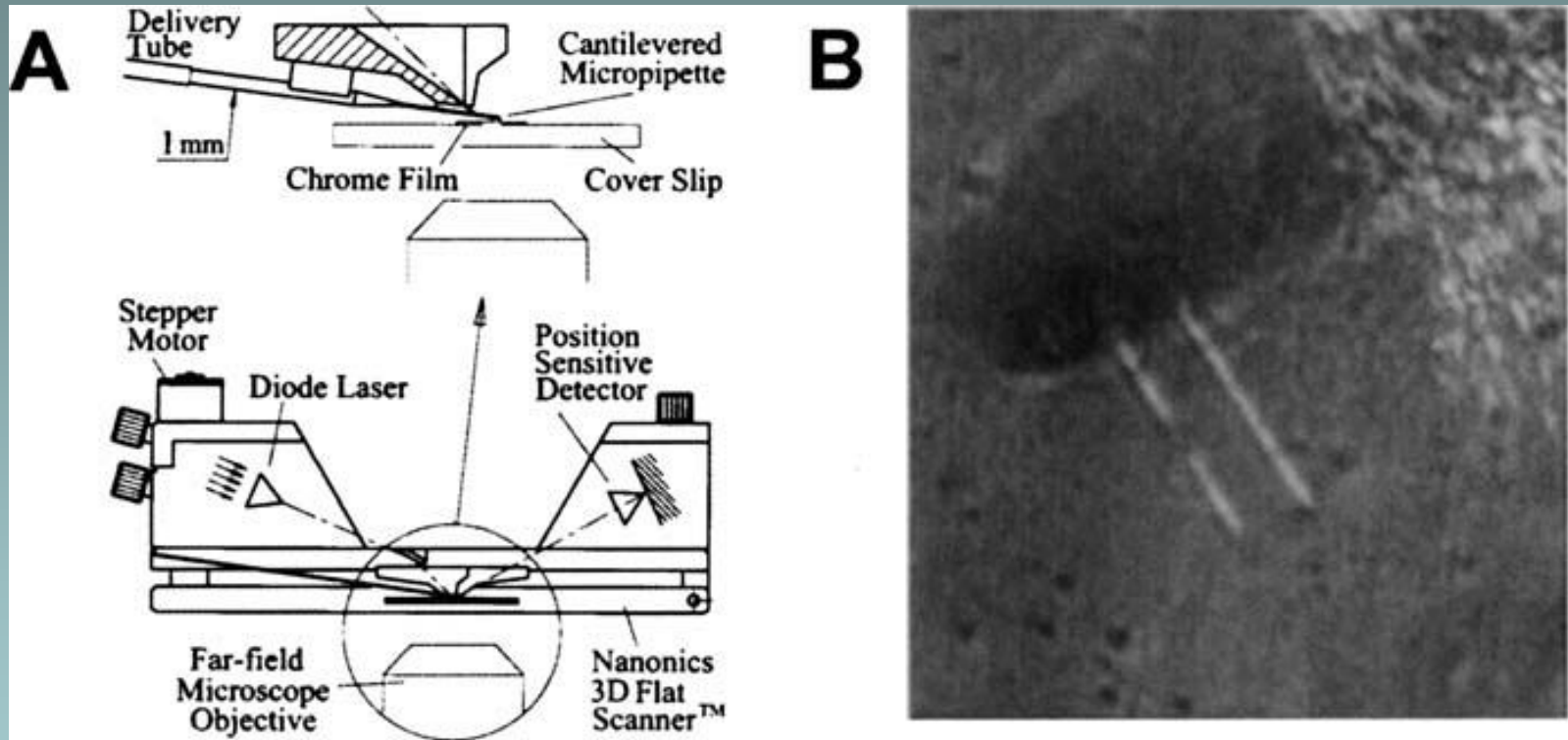


Возможность использования мульти зондовых устройств позволяет производить синхронную запись в многоканальном режиме. На рисунке показано изображение такого устройства полученное в электронном микроскопе. Справа показан результат нанесения точек содержащих ДНК молекулы на поверхности SiO_2 .

Применение метода нанесения самоорганизующихся молекул.

- Создания масок для последующего травления кремния, окиси кремния – нанолитография с разрешением определяемым размерами самоорганизующихся молекул.
- Создание наноразмерных функциональных элементов в специфических местах поверхности для выборочного взаимодействия со специфическими функциональными группами в процессе дальнейшей обработки. Могут быть использованы как специфическое ковалентное связывание, электростатическое взаимодействие, биохимическое взаимодействие. Последнее является чрезвычайно полезным для создания био-чипов, биосенсеров в наноразмерном масштабе

Прямая печать с помощью капилляров.



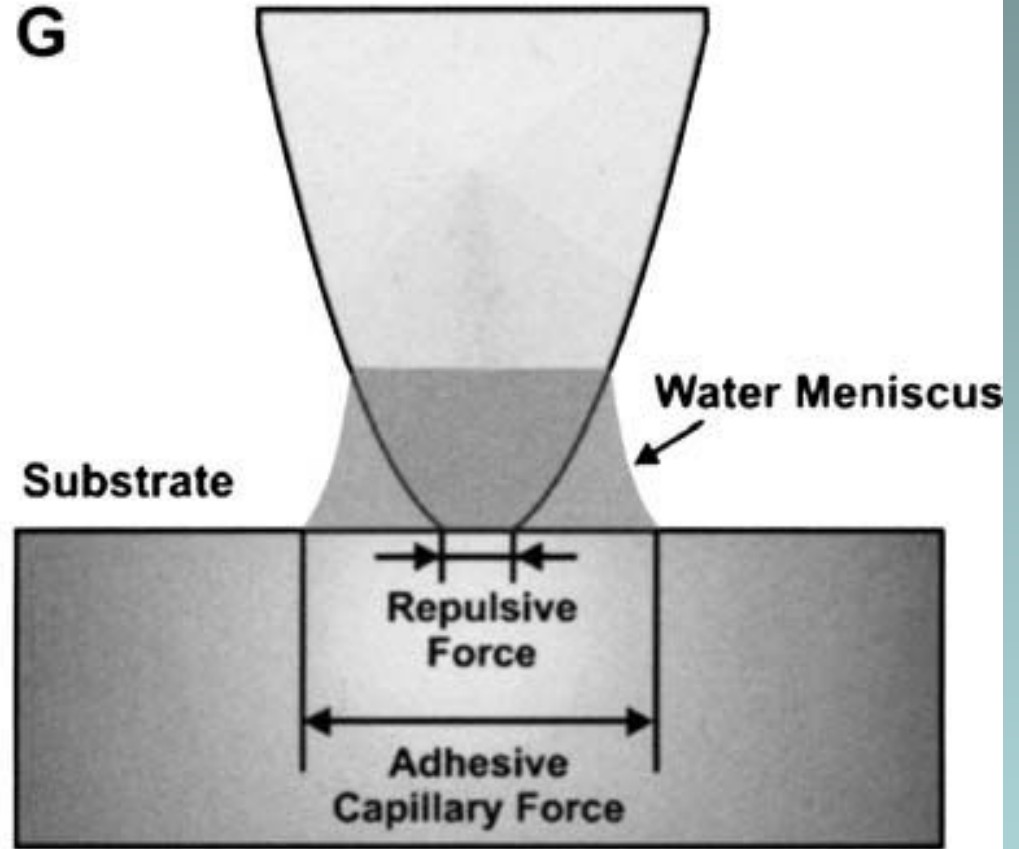
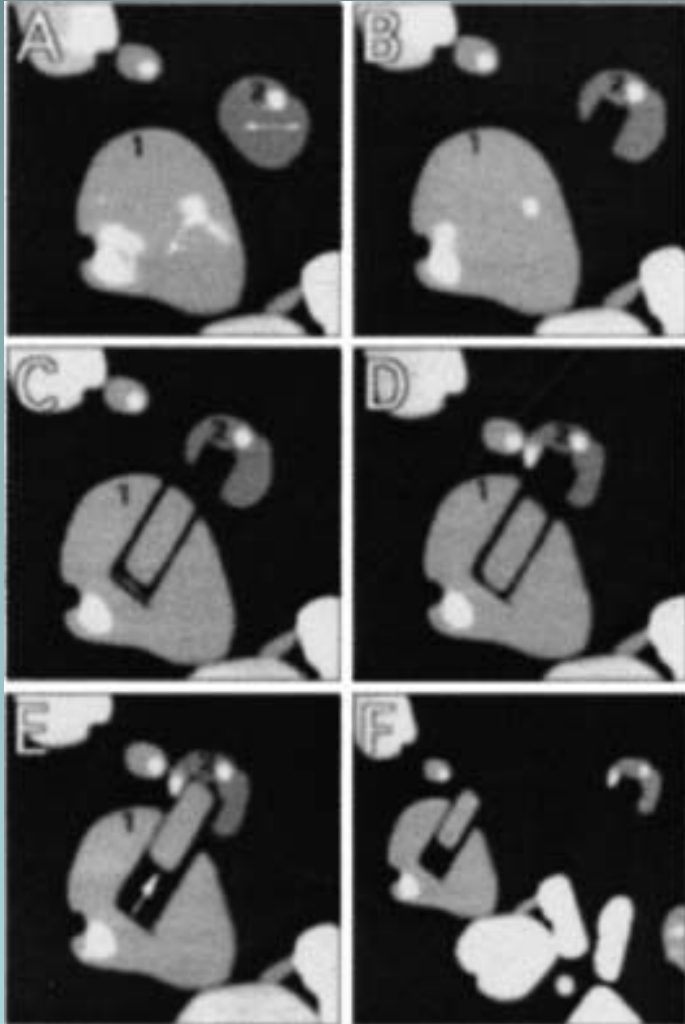
Достоинства:

- Возможность использования нанокапилляров для СБОМ с диаметрами отверстий менее 100 нм.
- Возможность использования широкого круга жидких «чернил» для печат и локального травления поверхности.
- Возможность контролировать расход «чернил»

Трудности:

- Возможность засорения капилляра наноразмерными частицами. Необходимость прецизионной очистки «чернил»
- Формирование жидкостного мениска между микропипеткой и поверхностью может значительно ухудшать разрешение вплоть до внешнего диаметра пипетки (~ 1 мкм)

Создание узора методом процарапывания



Создание наноразмерных структур на 2х кристаллах MoO_3 на подложке из MoS_2 (A-F). G – Схема процесса. Толщина линии скрабирования ~ 10 нм

Создание узора методом процарапывания

При создании царапин и разрезании слоев используются твердые зонды способные выдержать силу взаимодействия с поверхностью в пределах до 100 нН (в обычном режиме АСМ используется сила в 1 нН)

Используются зонды из Si_3N_4 (выдерживают давление до 0.3 Гпа) или зонды покрытые слоем алмазоподобного углерода (1 Гпа), использование углеродных нанотрубок (100 Гпа),

Возможно создание масок для полупроводниковых структур на резистивном верхнем слое с последующим травлением.

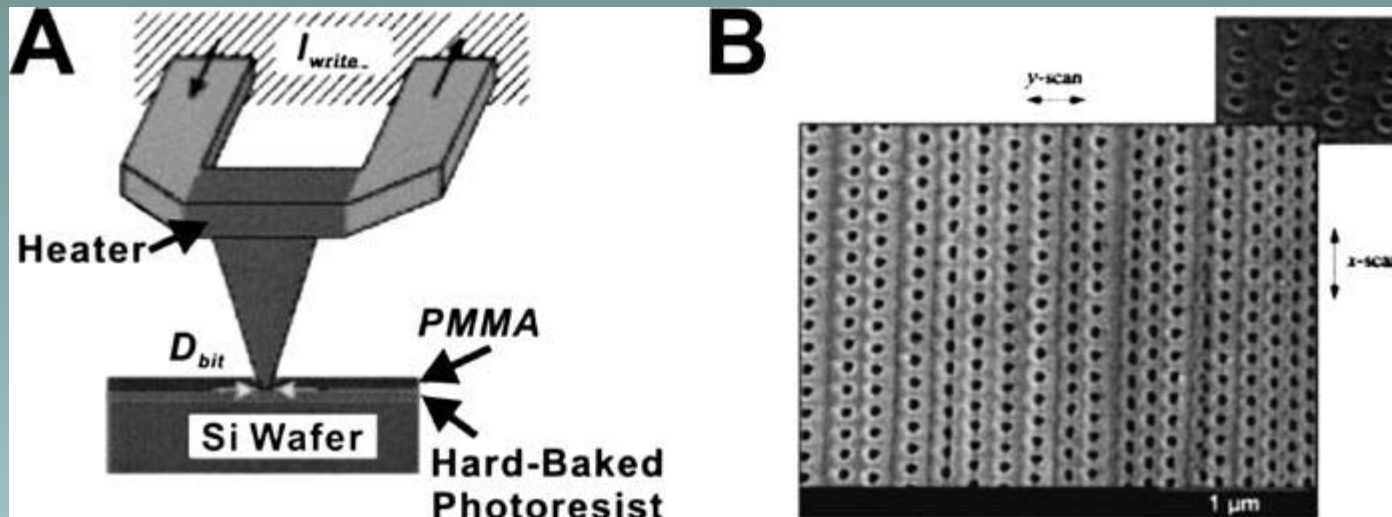
Основными недостатками являются:

А) постоянный износ зонда

Б) влияние водного мениска при работе на атмосфере увеличивает силу взаимодействия зонда с поверхностью до 2х раз.

Необходимость проведение работ в сухих боксах.

Наноразмерное плавление.



Нагретый до температуры 400°C зонд оставляет на поверхности полимерного слоя PMMA след при минимальной силе воздействия.

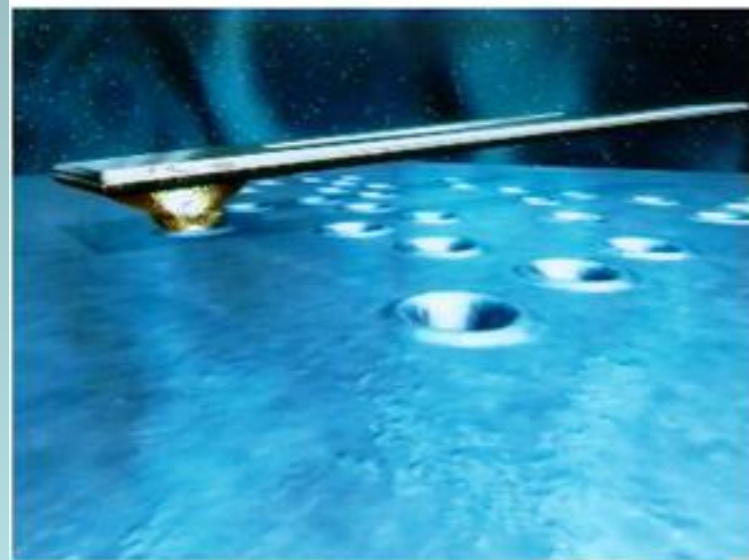
Таким образом записывается 1 бит информации. Достигнутая плотности записи на слое PMMA 400 Гбит/дюйм^2 . Скорость записи может составлять до 2 Мбит/сек . При использовании более плотных сред (стекло) можно ожидать плотности записи до 1 Тбита/дюйм^2 .

Проект Millipede, IBM

Среда для записи –
специальный термополимер

Запись – локальное
расплавление нагреванием
с одновременным
приложением усилия
для образования ямки

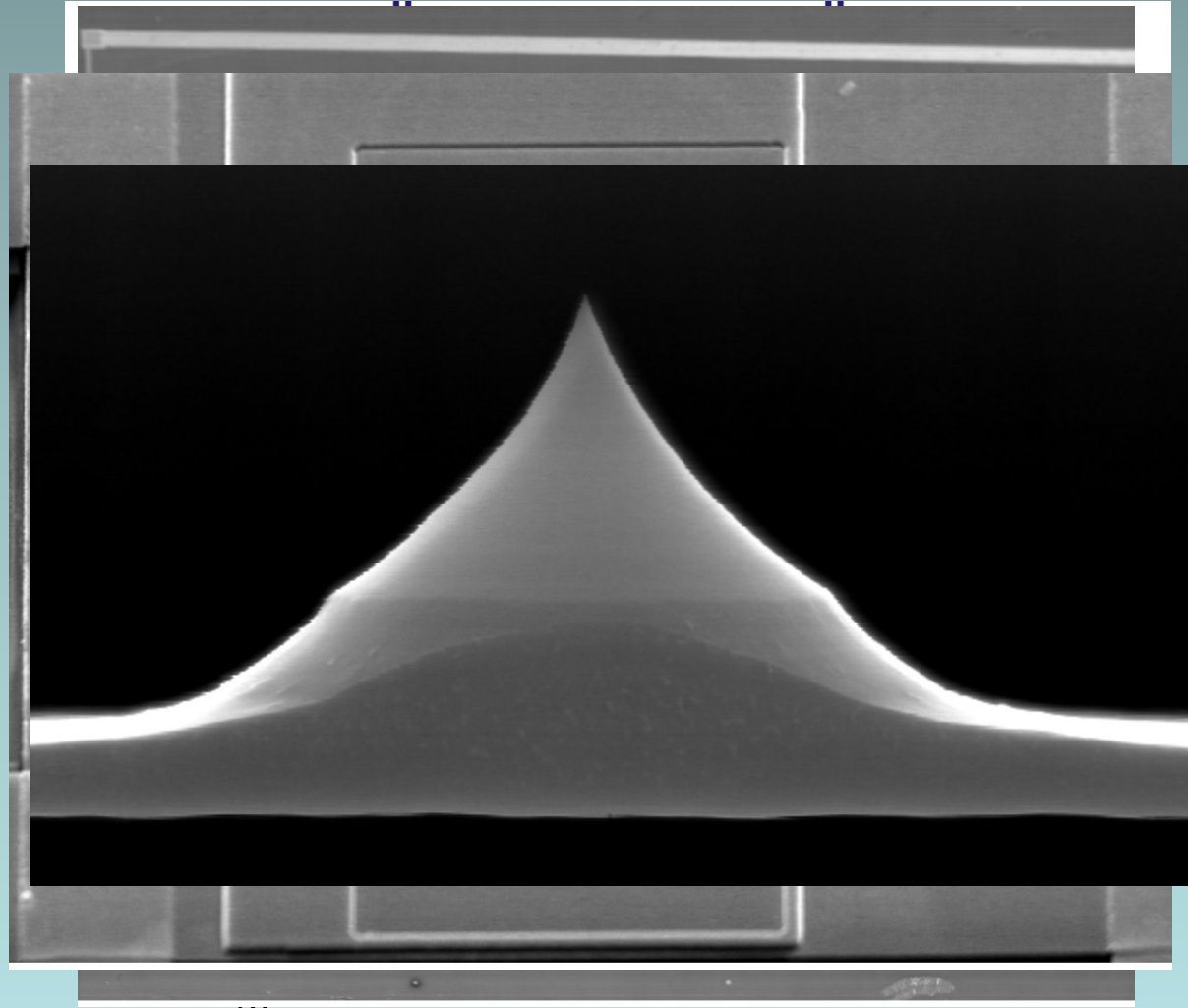
Чтение – отслеживание
рассеивания тепла
(измерение
термосопротивления)
при сканировании –
в ямках тепло рассеивается
быстрее из-за лучшего
контакта с зондом



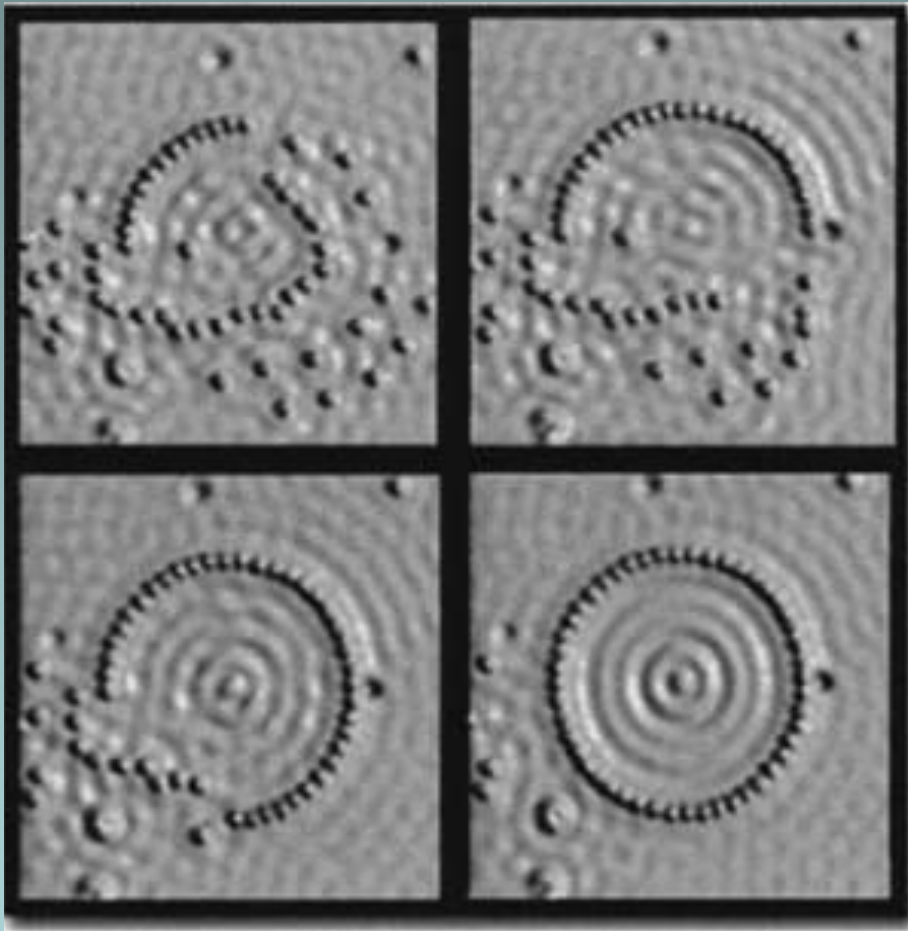
Проект Millipede, IBM

Запись информации
с плотностью
1 Tbit/inch²
с помощью
СЗМ технологии

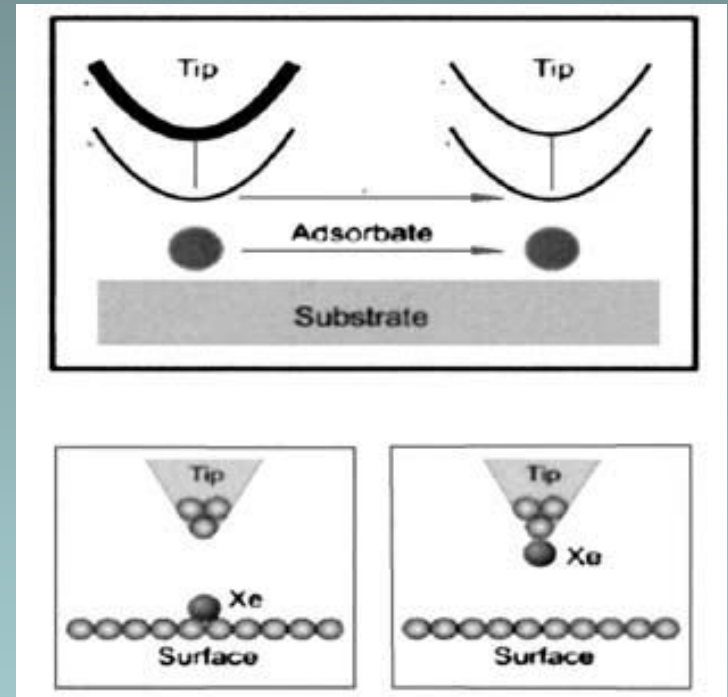
Высокая скорость
записи/чтения
достигается
использованием
матрицы
кантилеверов
(64*64 = 4096)



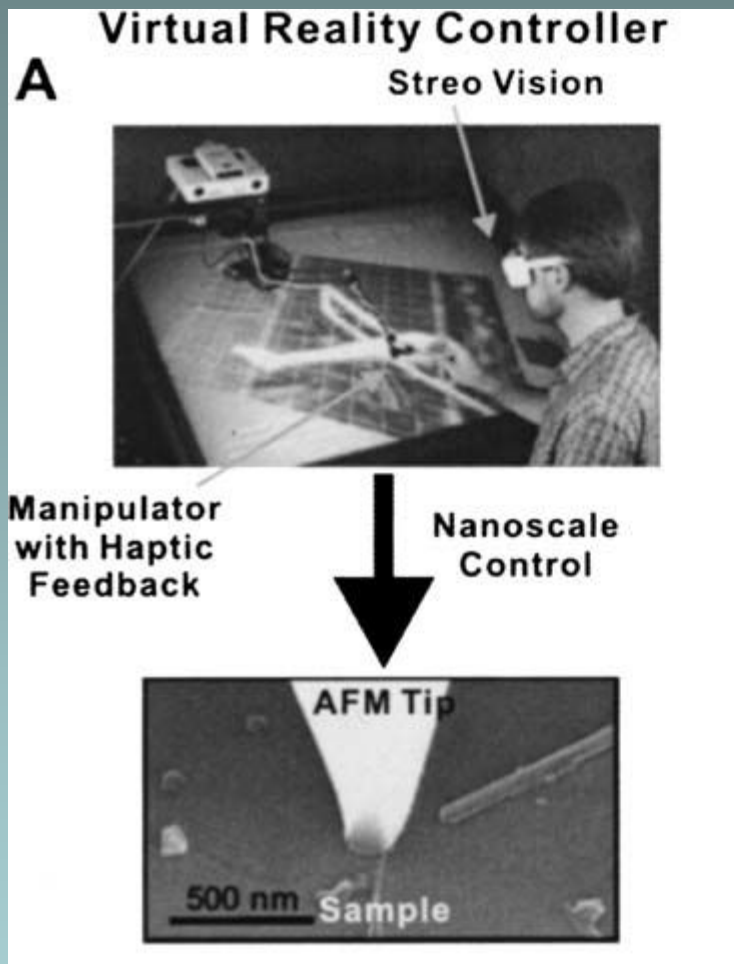
Манипуляция отдельными атомами и молекулам



Процесс формирования атомных кораллов из атомов Fe на поверхности Mo
Электронные поверхностные волны формируют стоячие волны внутри замкнутой структуры

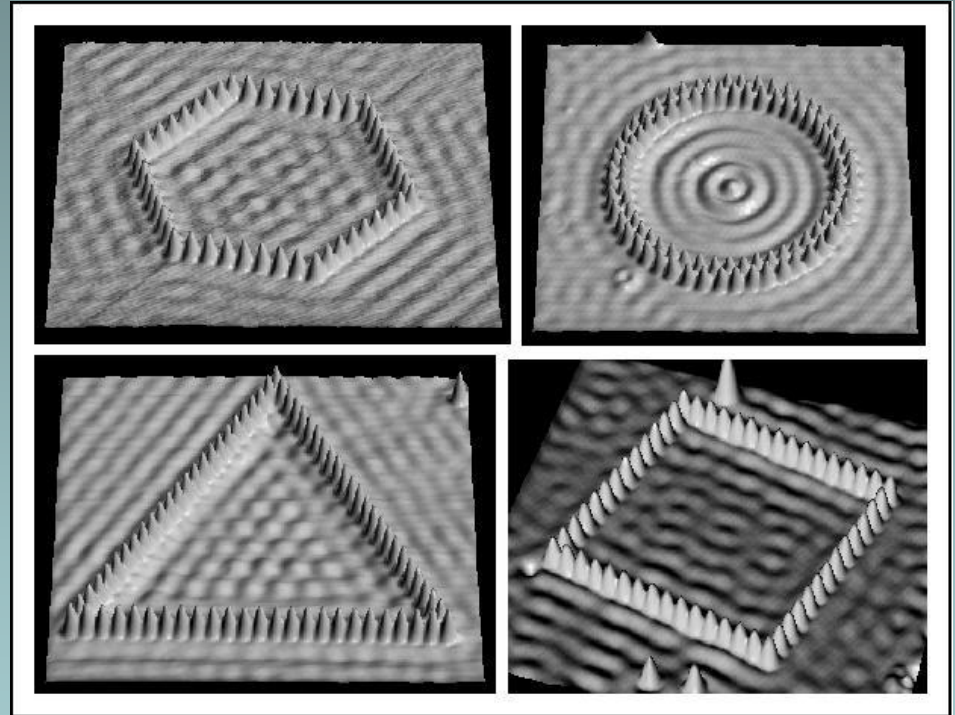


Использование методик СТМ манипуляции отдельными атомами для модификации электронной структуры поверхности. Вверху латеральное перемещение, снизу захват атома и перемещение



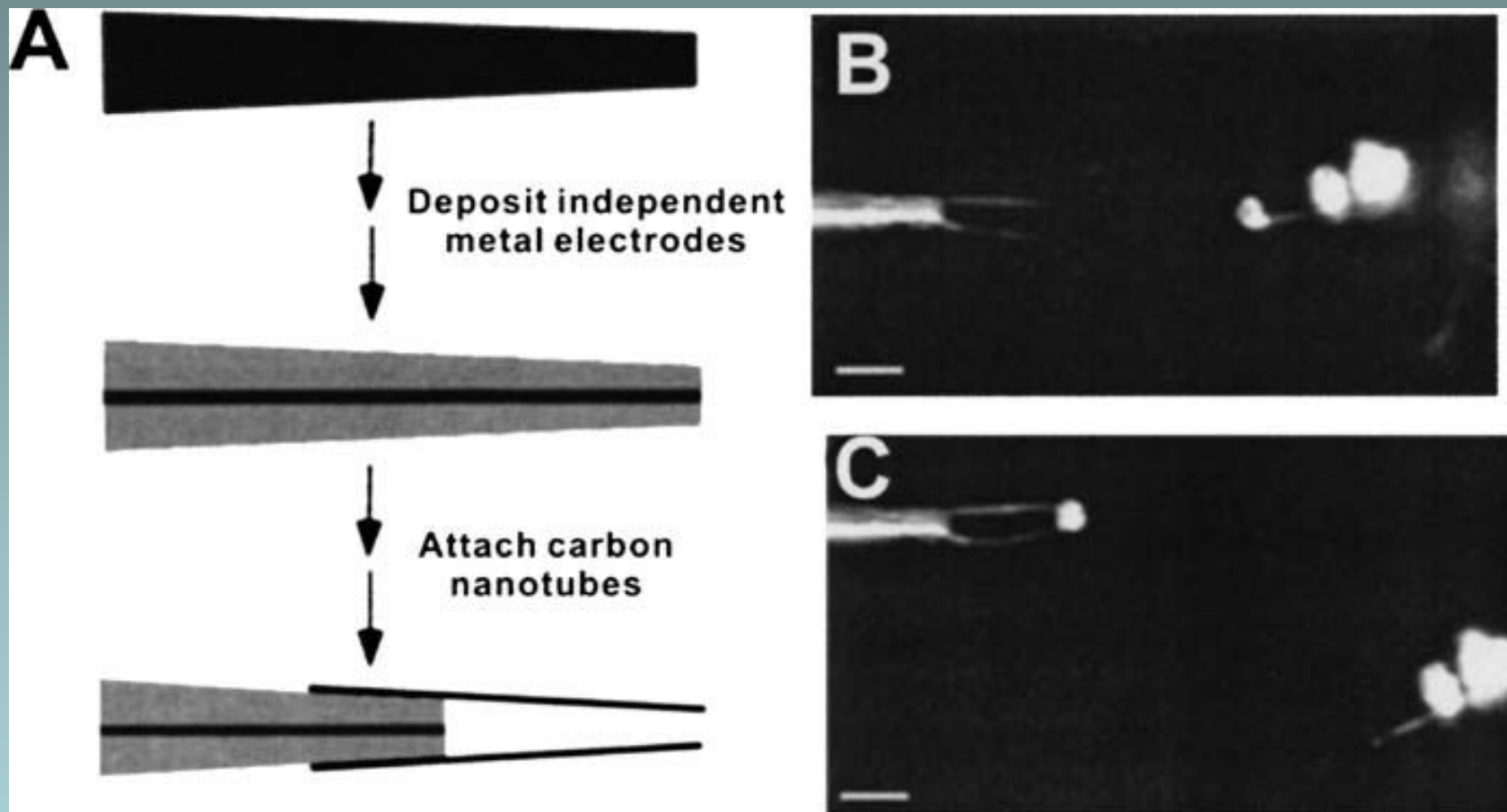
Использование специальных манипуляторов вместе с 3Д системой виртуальной реальности позволяет производить манипуляции в реальном времени вручную.

Различные нано кораллы полученные с помощью СТМ



Основная проблема манипуляции на диэлектриках – необходимость использования АСМ с отключенной системой обратной связи, т.е. в слепую. Направление работ – использование полуконтактных методик.

Наноразмерные зондовые захваты



Зонд сформирован из непроводящего основания на котором нанесено два независимых металлических электрода. На каждый электрод посажена углеродная нанотрубка. Подачей напряжения одной или противоположной полярности добиваются сближения или расхождения нанотрубок. А – схема создания nano захвата. В, С – манипулирование полистерольными кластерами 310 нМ с флуоресцентным красителем. Маркер 2 мкм.

Наноразмерная электрохимия – локальное окисление

Локальное окисление.

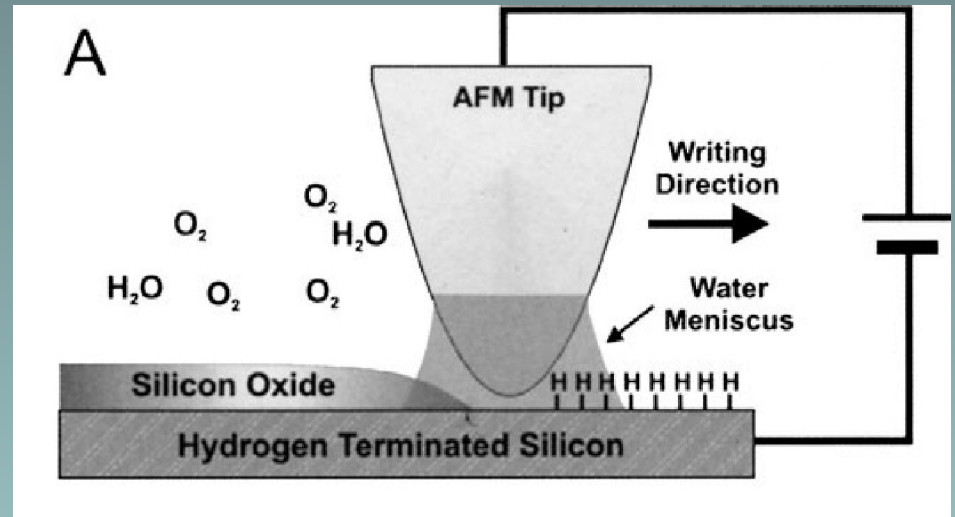
Начало применения - 1990е годы
Вначале использовались методы туннельной микроскопии при подаче + напряжения на образец относительно зонда.

Одновременно, с помощью системы обратной связи происходила запись изображения и окисление поверхности.

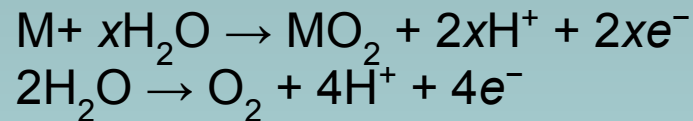
Недостатки – ограниченный контроль за окислением из за работы обратной связи.

Применение АСМ зондов позволяет лучше контролировать процессы окисления.

Основные контролируемые параметры: напряжение, влажность, расстояние.

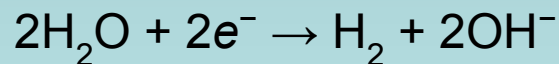


Реакция в водном мениске играющего роль камеры анодирования

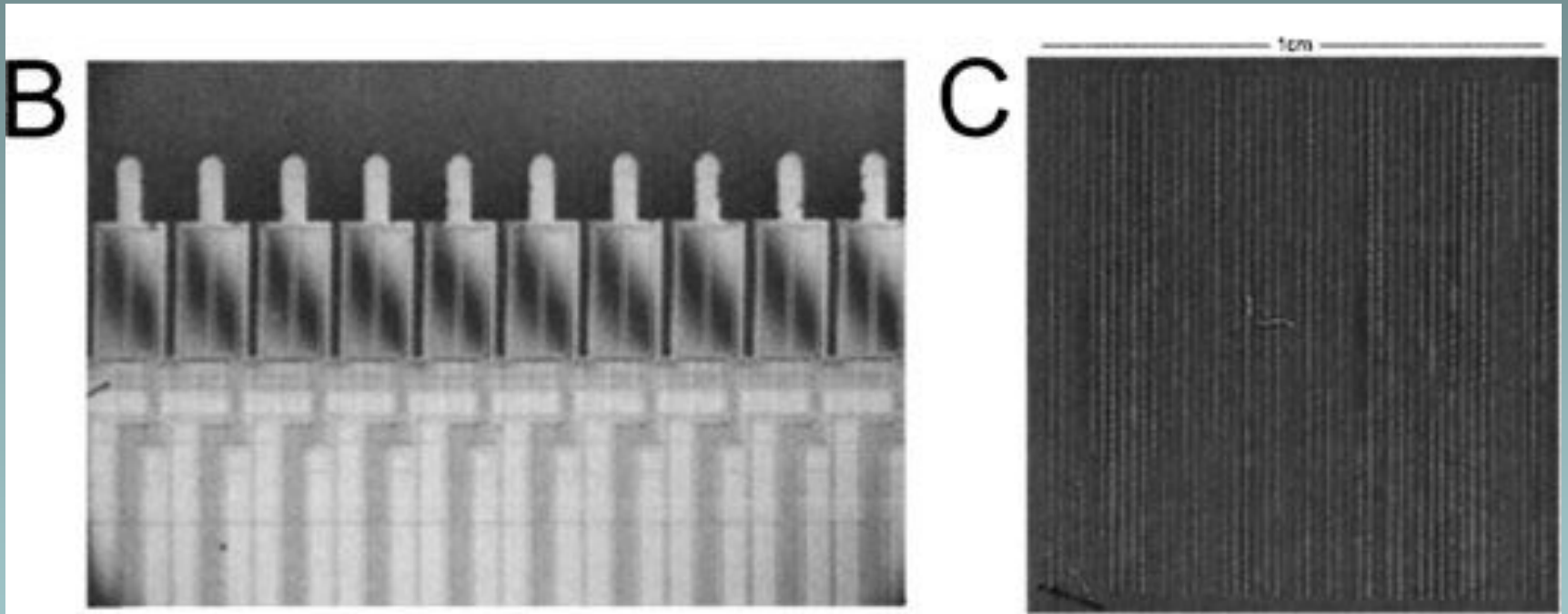


M – металл или полупроводник. X – число оксидирования.

Реакция разложения воды на кончике зонда

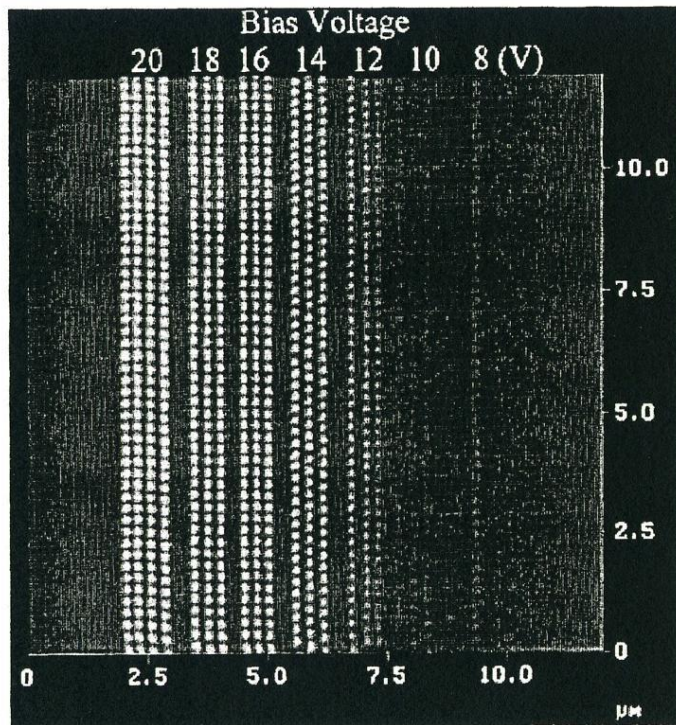


По протекающему току можно судить о кинетике процесса оксидирования



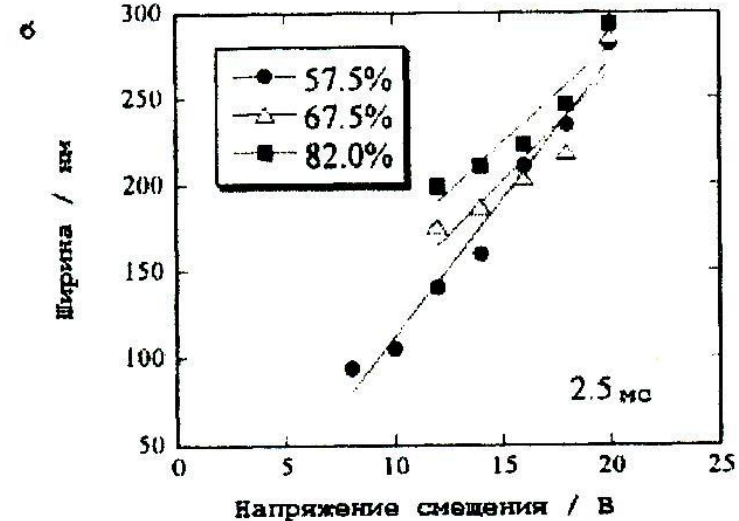
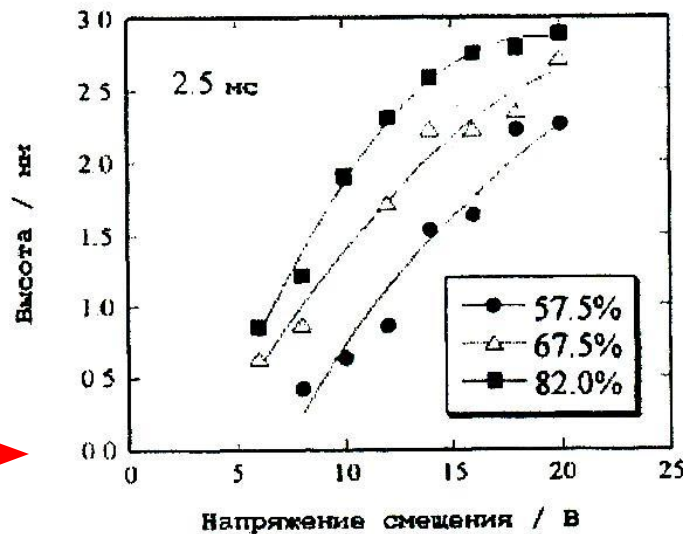
В – электронная микрофотография набора кантелеверов с датчиками 200 мкм
С – результат оксидирования – одиночные полосы 50x1 на 1 см². Скорость окисления – 1 мкм/сек.

Процесс оксидирования возможен и при подаче отрицательного напряжения на образец. Механизм аналогичен усилению окисления в электрическом поле



В случае окисления по методу анодирования процесс идет в присутствии жидкости на поверхности. Образующийся мениск влияет на получаемое разрешение. Кроме того на разрешение влияет напряжение и длительность импульса, а также скорость.

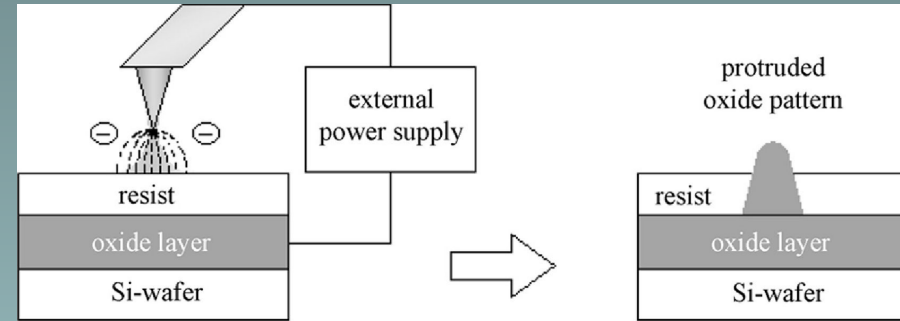
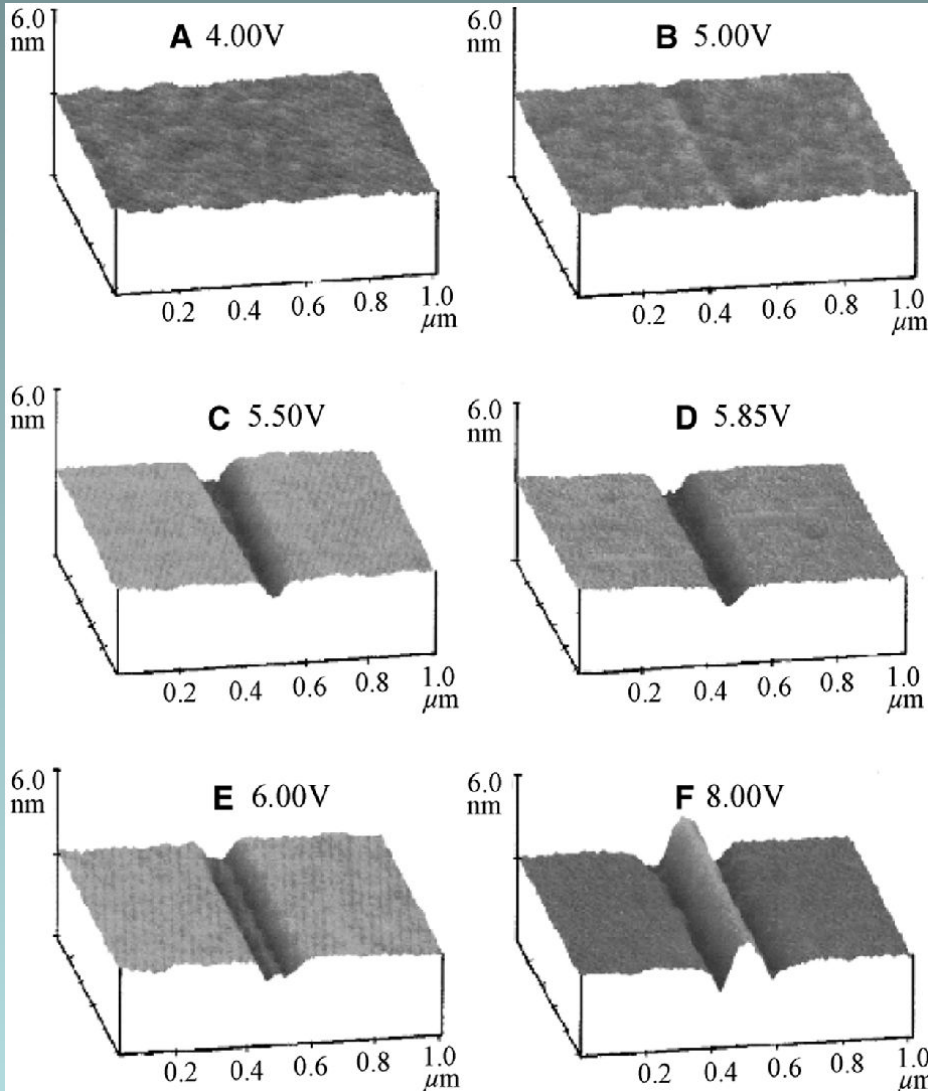
Оксидные точки на поверхности пассивированного кремния при разном напряжении.



Зависимость разрешения от напряжения при разной влажности

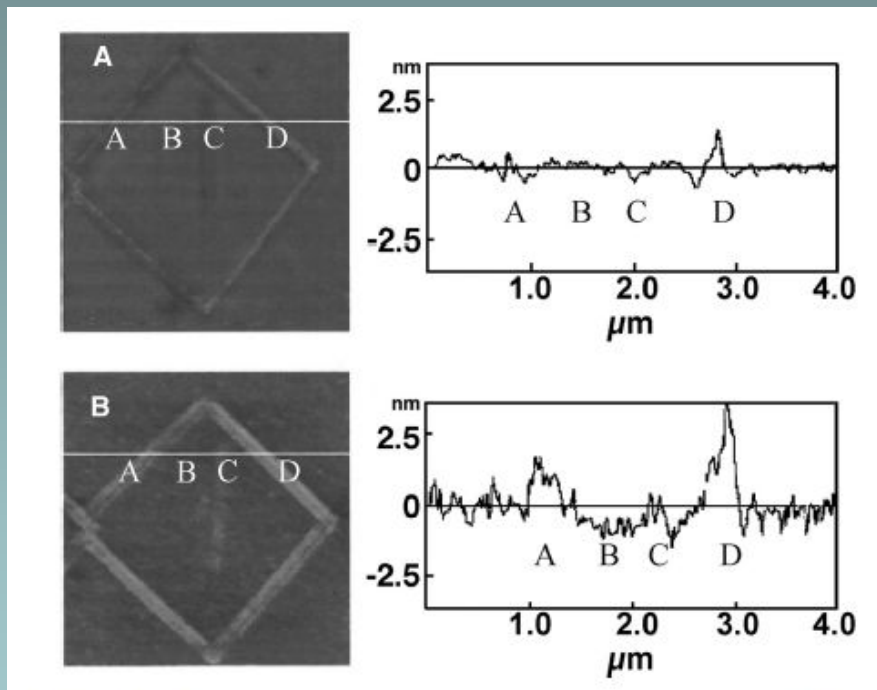


Исследование возможностей литографического оксидирования и структурирования с использованием резистивных пленок в качестве резистивного слоя

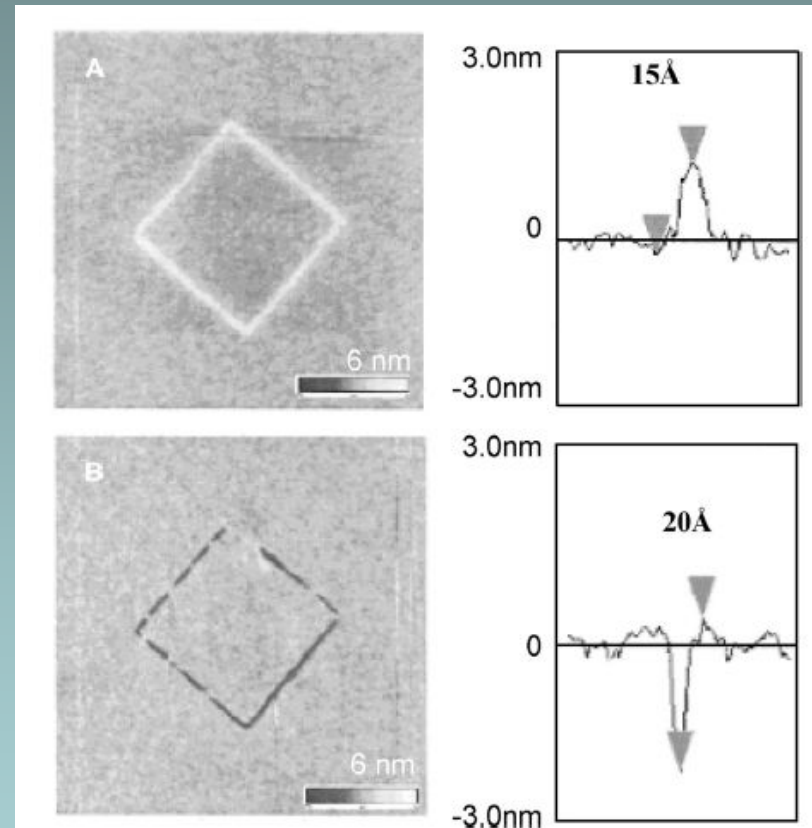


Схематическое представление процесса при подаче отрицательного напряжения на зонд. Получаемые структуры высотой до 2 нм и шириной около 100 нм. В большинстве случаев используют органический жидкий электролит для осаждения пленок, он же служит проводником электронов между зондом и поверхностью.

Электротекстурирование с использованием пленок пленок Ленгмюра Блоджета

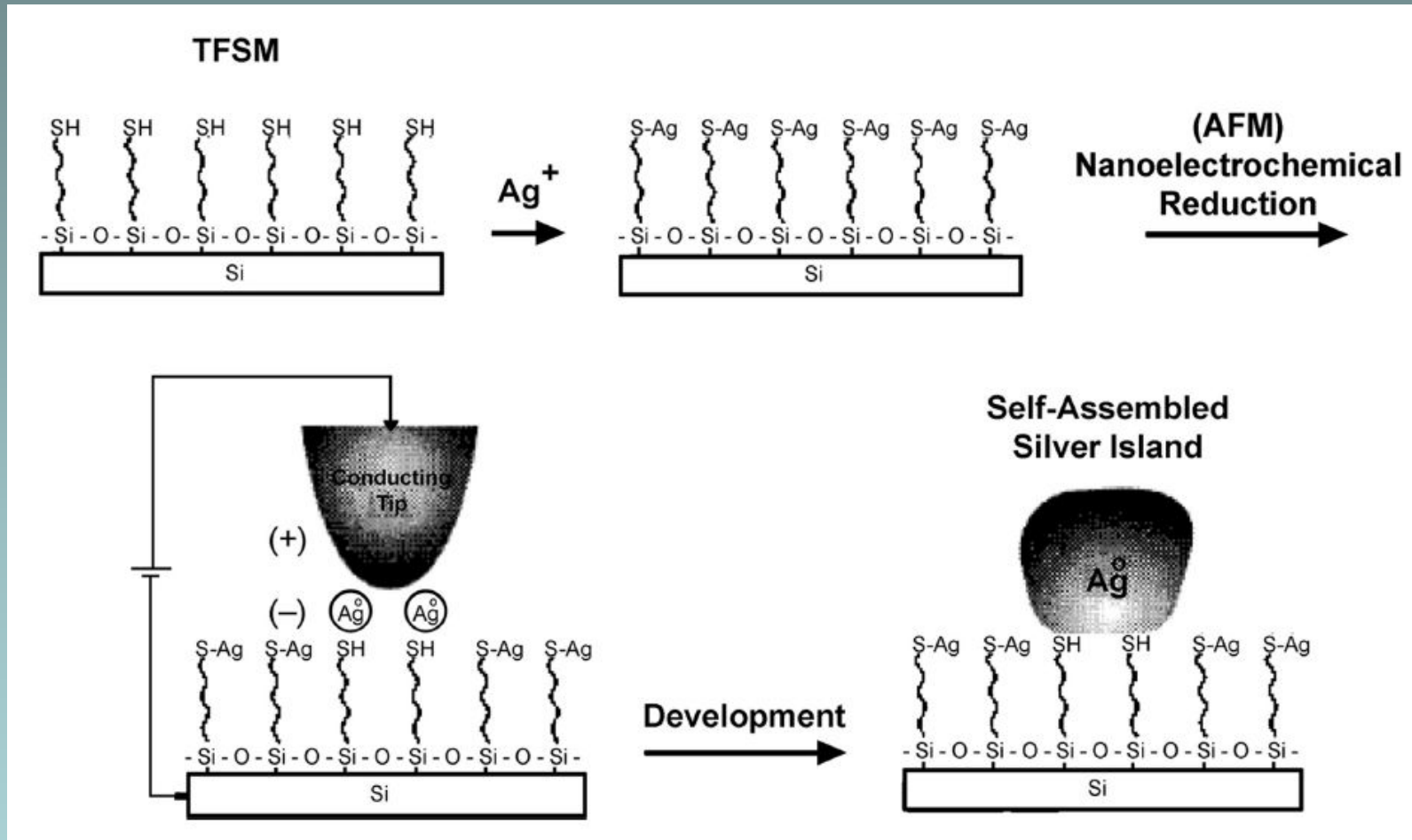


АСМ изображение результатов воздействия зонда при подаче +5.5 В на зонд до(А) и после (В) удаления резистивного слоя и профиль вдоль линии А-Д



АСМ изображение результатов воздействия зонда при подаче -10 В на зонд до(А) и при подаче +10 В (В) и профиль вдоль

Создание металлоорганических структур с использованием COM



Нанокластеры металла могут быть созданы последовательным замещением концевых групп COM с последующим процессом агрегации атомов металла при помощи токопроводящего зонда зондового микроскопа.

Ближнепольное окисление

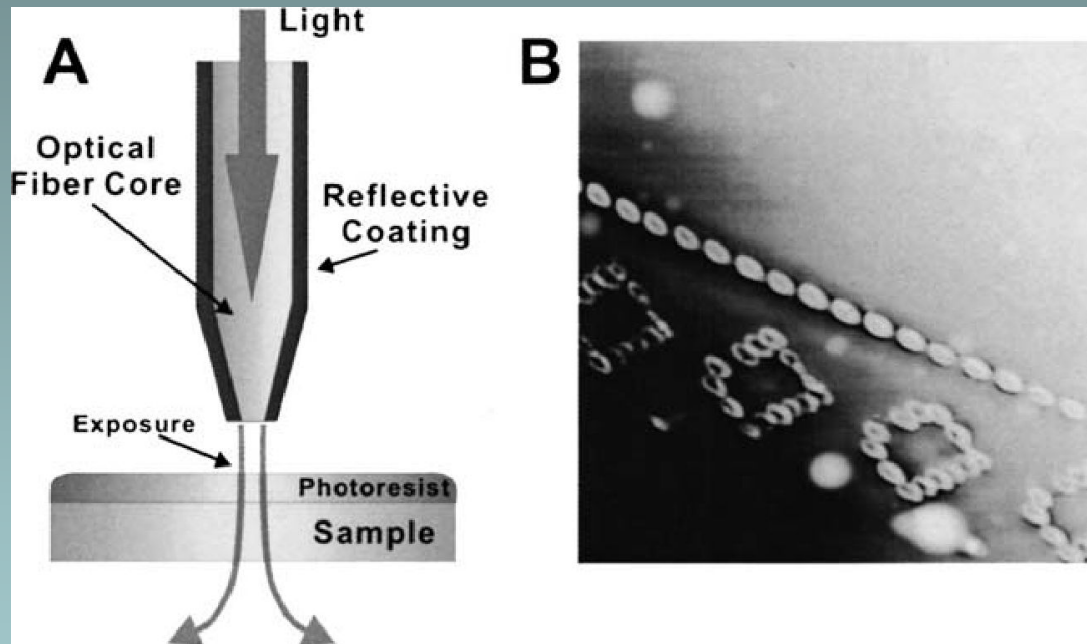


Фото окисление кремниевой подложки пассивированной водородом. Использование излучения аргонового лазера с длиной волны ~ 457 нм (что соответствует энергии необходимой для отрыва атома H от кремния) в местах удаления водорода происходит окисление в условиях атмосферы или специального газового окружения. Контроль процесса возможен по изменению оптических характеристик контролируемых с помощью ближнепольной методики.

Наноразмерные CVD процессы

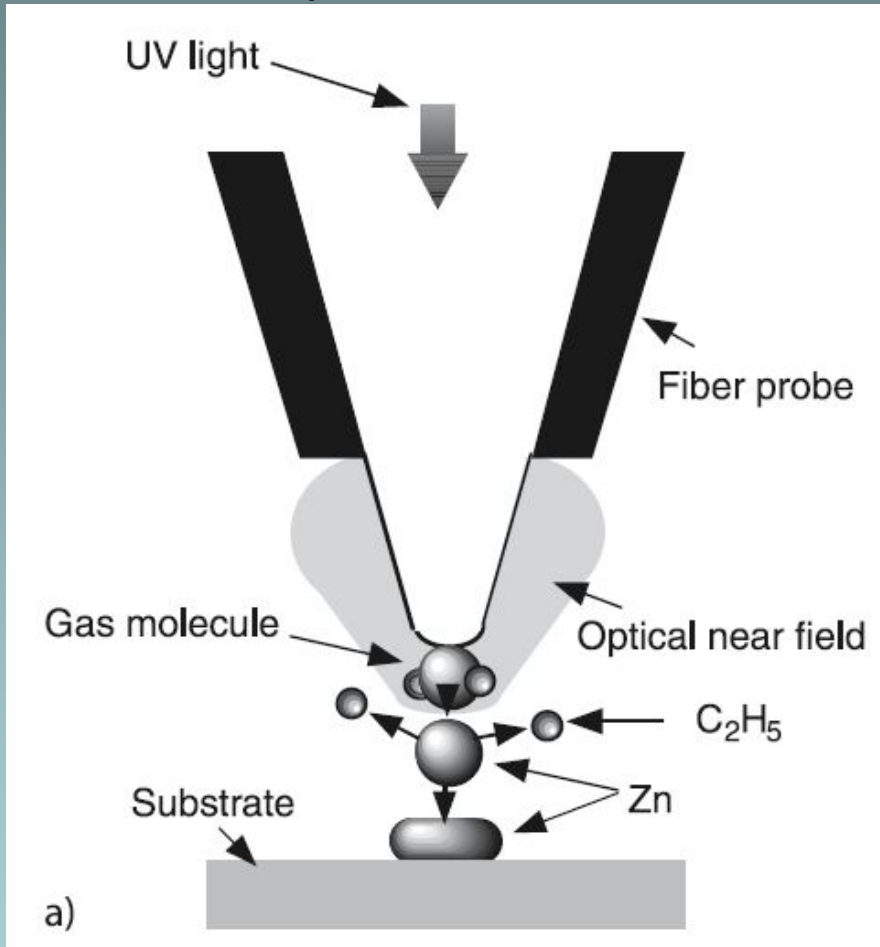
Наличие сильного градиента поля около СТМ зонда, а также некоторого количества электронов в промежутке между зондом и поверхностью делает возможным отрыв атома металла от молекулы газообразной металлоорганики и осаждение его на поверхности.

Процессы проводятся в вакуумных камерах с базовым вакуумом на уровне 10^{-8} Торр. Затем в камеру напускаются пары металлоорганики. В районе зонда происходит развал молекулы и осаждение металла.

Используемые материалы – диметил кадмий, гексокарбонил вольфрама, и другие металлоорганические молекулы типа: - $(M(CO)_n)$, $M=Cd, W, Fe$ и т.д.)
Для осаждения кремния используются силаны.

Прикладываемые напряжения несколько больше используемых в СТМ – 10-20 В, токи в пределах сотен пикоампер или единиц наноампер. Размер получаемых структур в районе сотни нанометров. Для кремниевых структур получены размеры порядка 10 нм ширины и единицы нм высоты, длиной до микрон и более.

CVD процессы под действием ближнеполюсного излучения



Латеральное разрешение создаваемых структур зависит от распределения ближнего поля вблизи поверхности, а высота, от интенсивности ближнего поля

Преимуществом является возможность селективного осаждения разных материалов в одном процессе. Недостатком является постепенное загрязнение зонда

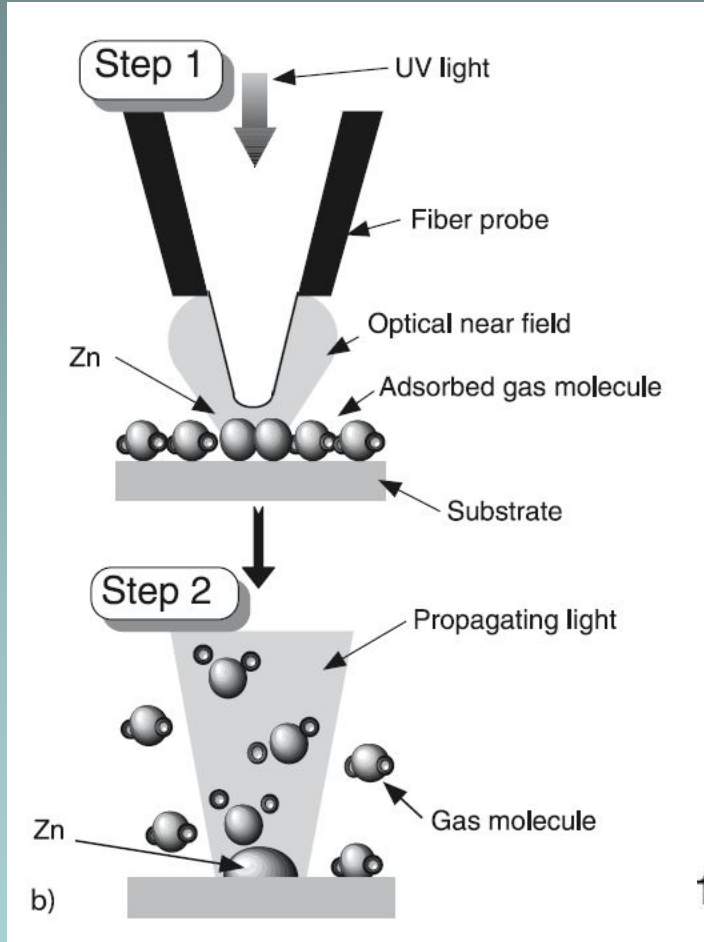
При воздействии светом с длиной волны $\lambda = 270 \text{ nm}$ (4.59 eV), происходит разрыв связей полимера и дальнейшая фото диссоциация типа:



и

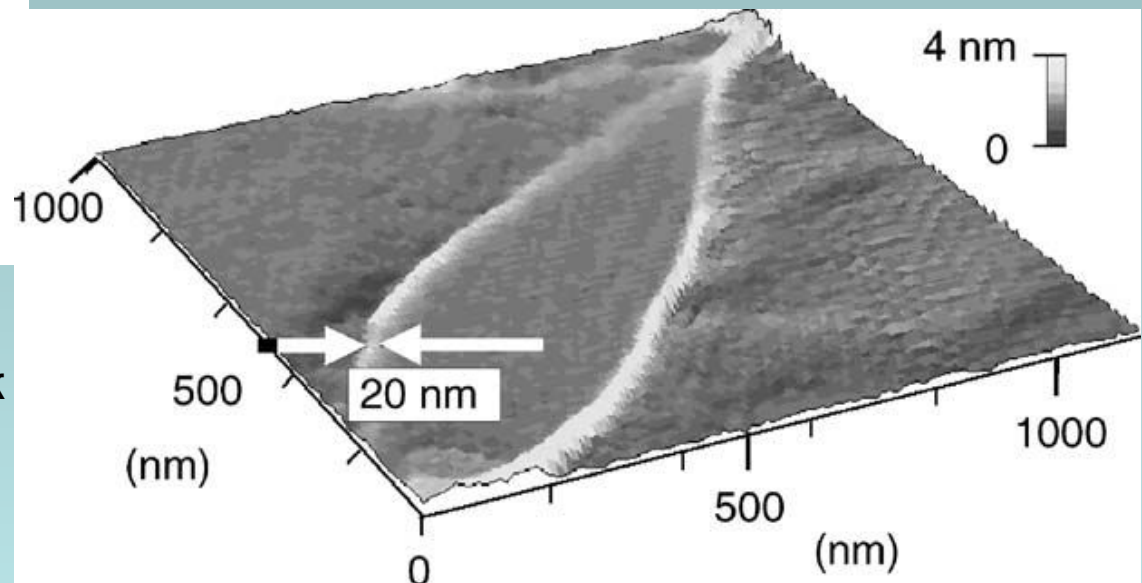
$\text{ZnC}_2\text{H}_5 + 0.9545 \text{ eV} \rightarrow \text{Zn} + \text{C}_2\text{H}_5$. Таким образом можно локально наносить металлические структуры на различные поверхности.

Второй способ использования фотодиссоциации при CVD процессе

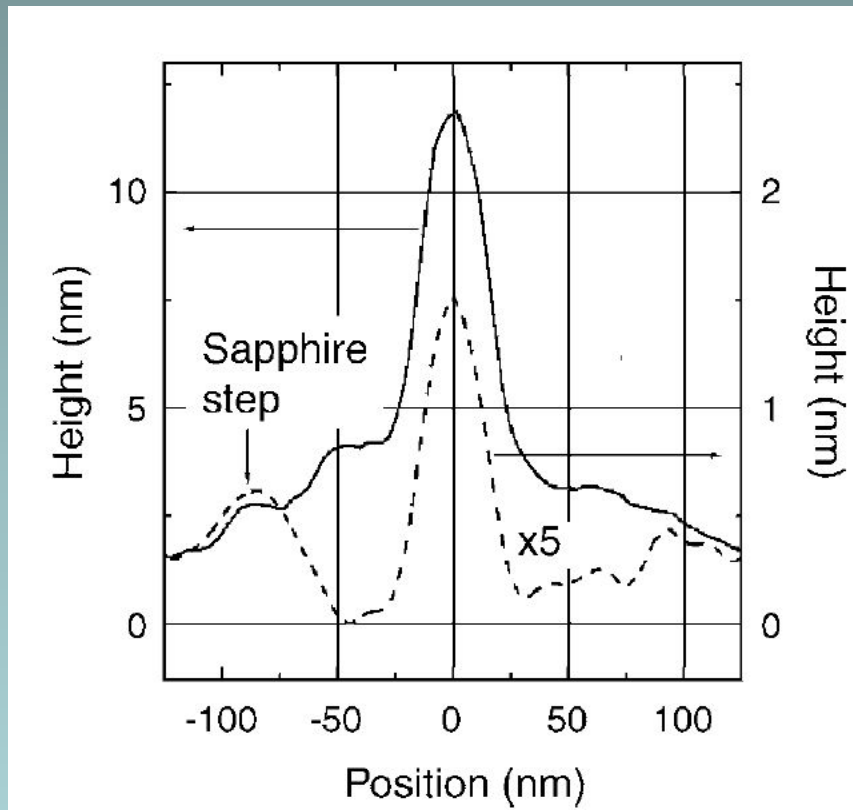


Второй способ состоит из двух стадий: На первой стадии CVD методом осаждается монослой металлорганики на поверхности и производится локальный развал молекул с освобождением цинка с помощью СБОМ. На второй стадии опять напускается в камеру пары металлоорганики, но освещение производится нерезонансной длиной волны проникающим – дальним полем. В результате рост осаждения Zn происходит только в районе прекурсора полученного на 1 этапе

Достоинство – нет загрязнения зонда, недостаток – сложности с осаждением разных металлов в одном процессе

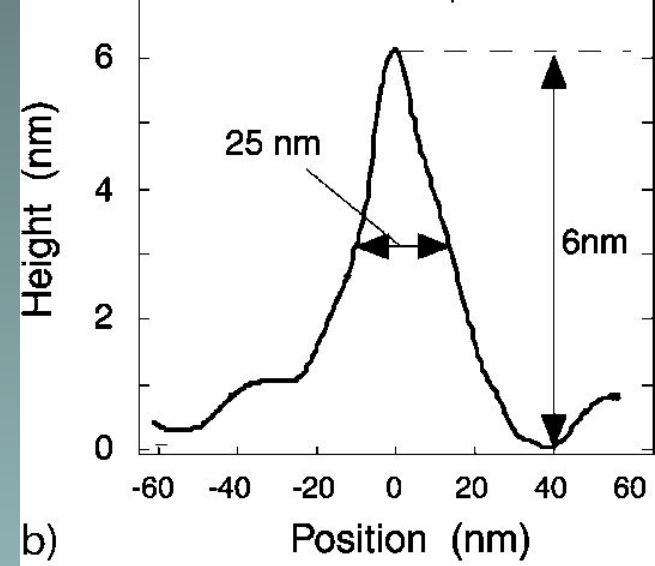
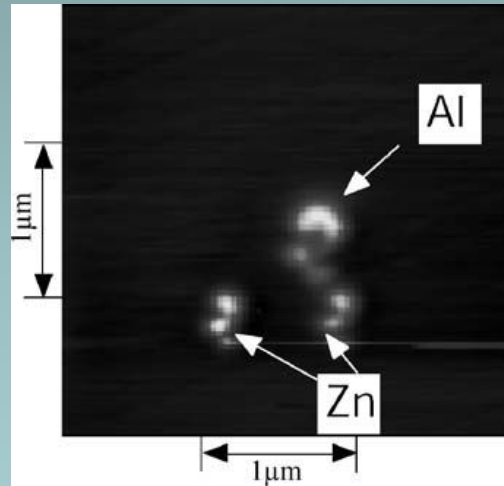
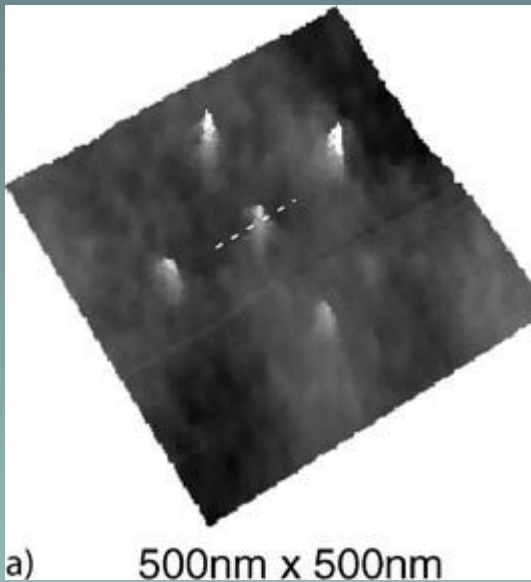


Сравнение осаждения Zn из диэтил цинка на сапфире с использованием резонансной и нерезонансной длины волны



На рисунке показан профиль осажденной структуры цинка на поверхности сапфира. В первом случае (сплошная линия) использовалось резонансное излучение 244 нм и оптический зонд не покрытый металлической пленкой. «хвосты» пика обусловлены осаждением Zn обычным полем просачивающимся за границы зонда.

Пунктир – профиль особенности полученной с использованием нерезонансного излучения 488 нм. «Хвосты» отсутствуют поскольку обычное поле не способно нерезонансно разложить диэтил цинк.

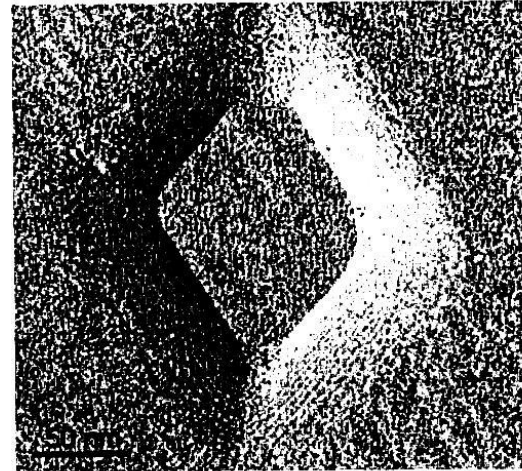


Создание структур (точек Al) на поверхности сапфира II стадийным методом CVD осаждения с последующим воздействием ближним полем для создания прекурсоров и последующим осаждением металла в этих местах дальним полем. Дальнее поле в этом случае использовано не резонансное, что дает возможность получать более мелкие структуры и осаждать последовательно разные металлы заменой газа в камере

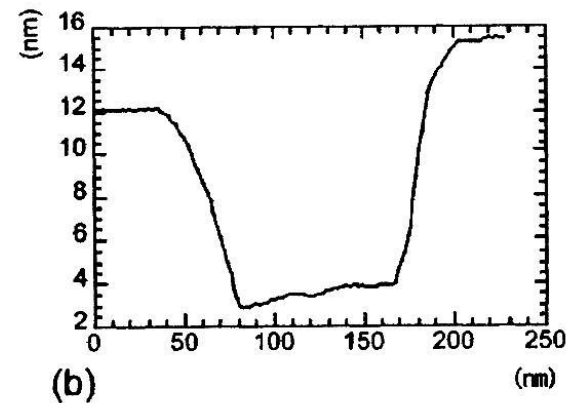
Локальное испарение

В случае нагревания образца и прикладывания повышенного потенциала 50-100 В между зондом и поверхностью может происходить локальное испарение материала в районе зонда

Ямка ромбовидной формы полученная при воздействии СТМ зонда на поверхность кремния нагретого до температуры 500 °С. Расстояние между зондом и поверхностью поддерживалось в пределах 50-100 нм, напряжение 100В, ток 800 нА. Система обратной связи поддерживала ток постоянным. Время воздействия 10 секунд.

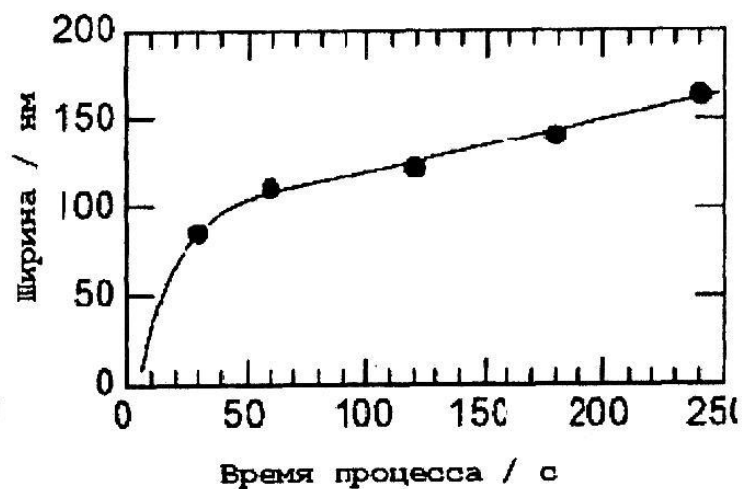
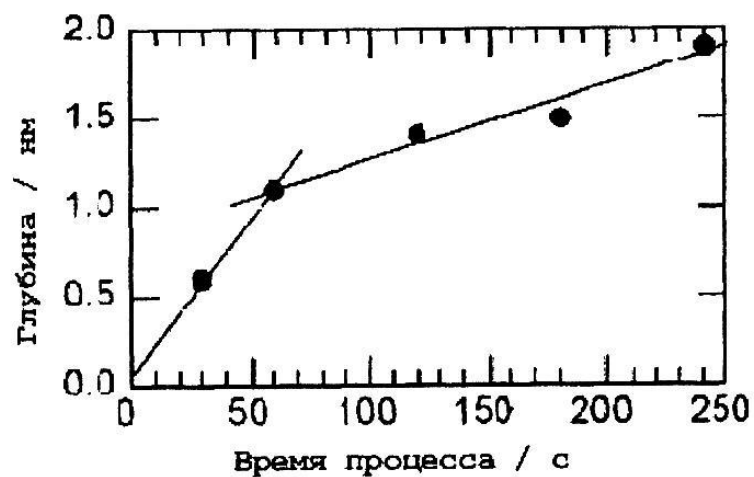


(a)

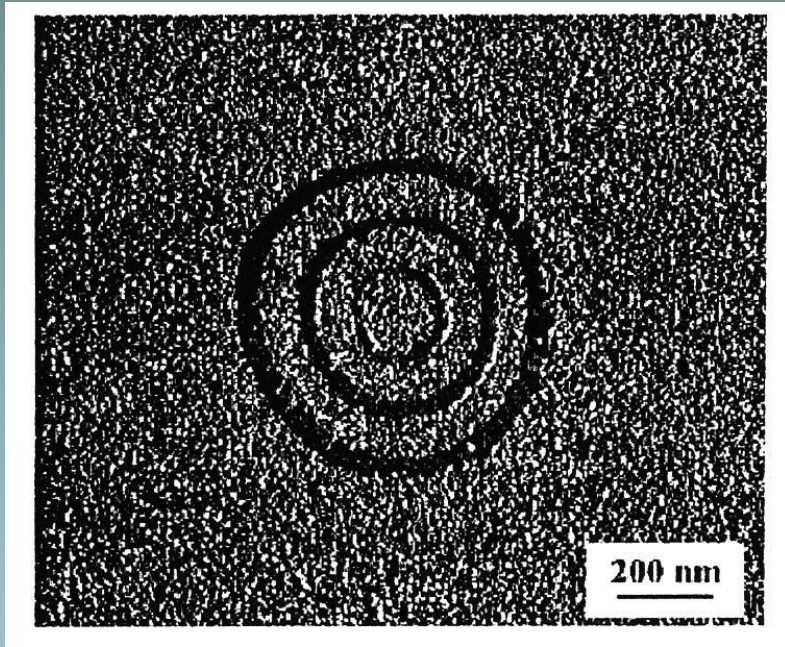


(b)

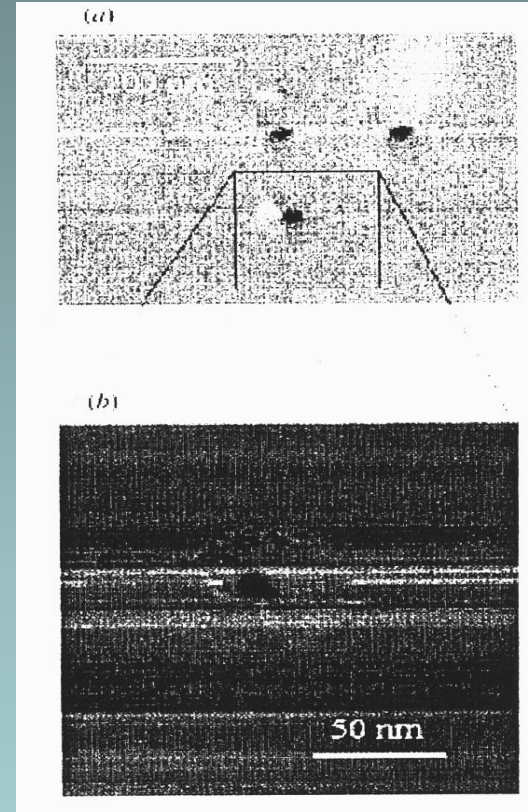
Зависимости ширины и глубины ямок испарения кремния в зависимости от времени воздействия имеют явно немонотонный характер



Локальное травление диоксида кремния и графита.

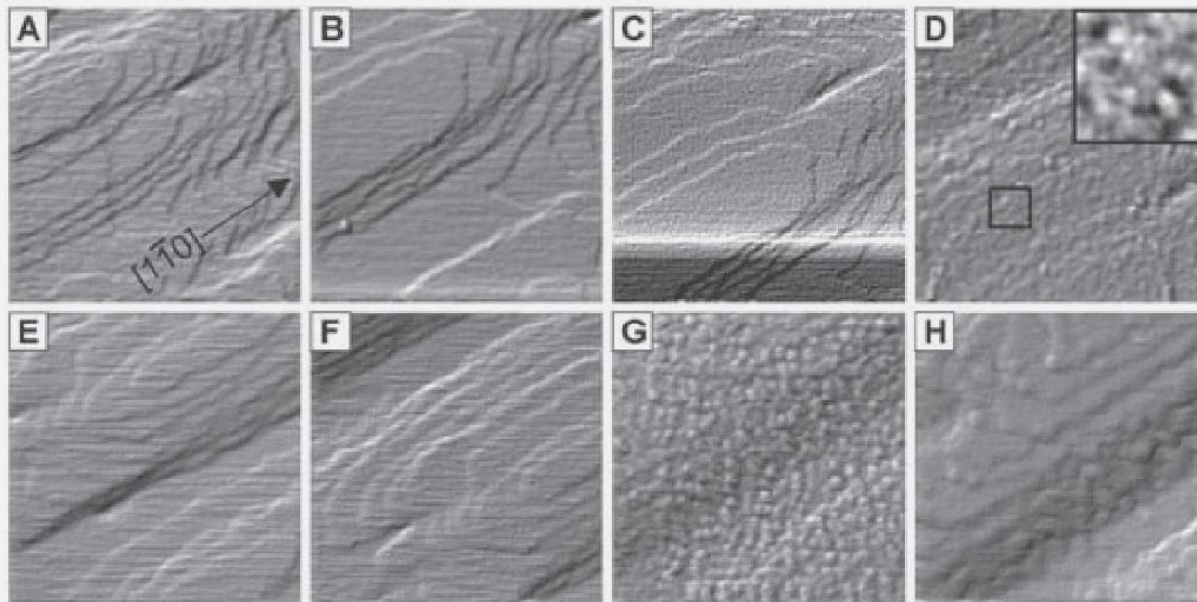
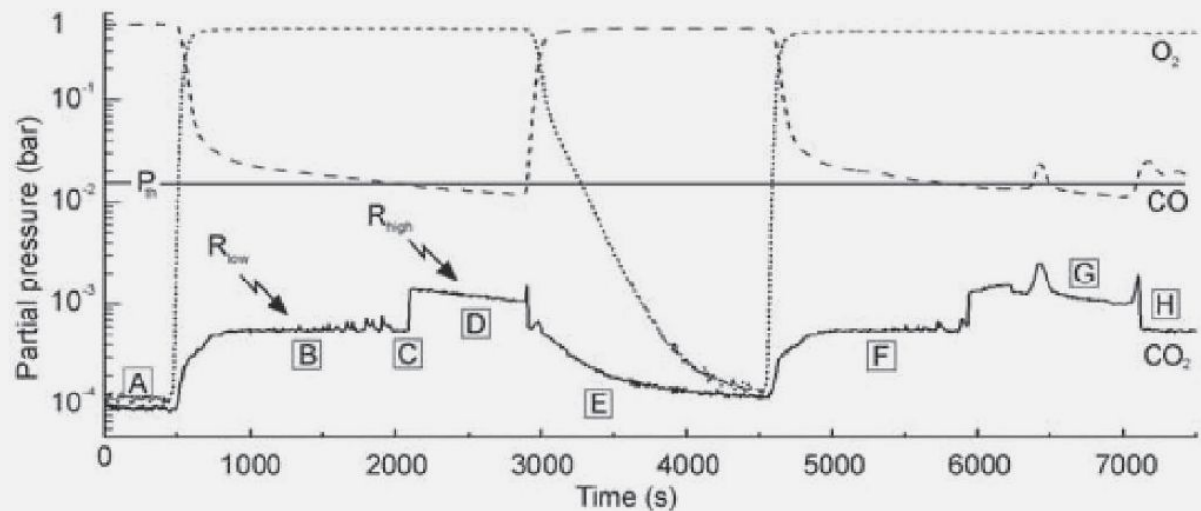


Предполагается, что механизм травления диоксида кремния при температуре 600-700 °С основан на восстановлении SiO_2 до монооксида кремния, летучего в условиях вакуума при данных температурах. Ток ~ 12 нА.



Углубления полученные в пиролитическом графите в условиях повышенного давления (25 атм) $\text{N}_2 + \text{O}_2$. Травление идет за счет ионного распыления. Ионы образуются в пространстве между зондом и поверхностью при взаимодействии с электронами

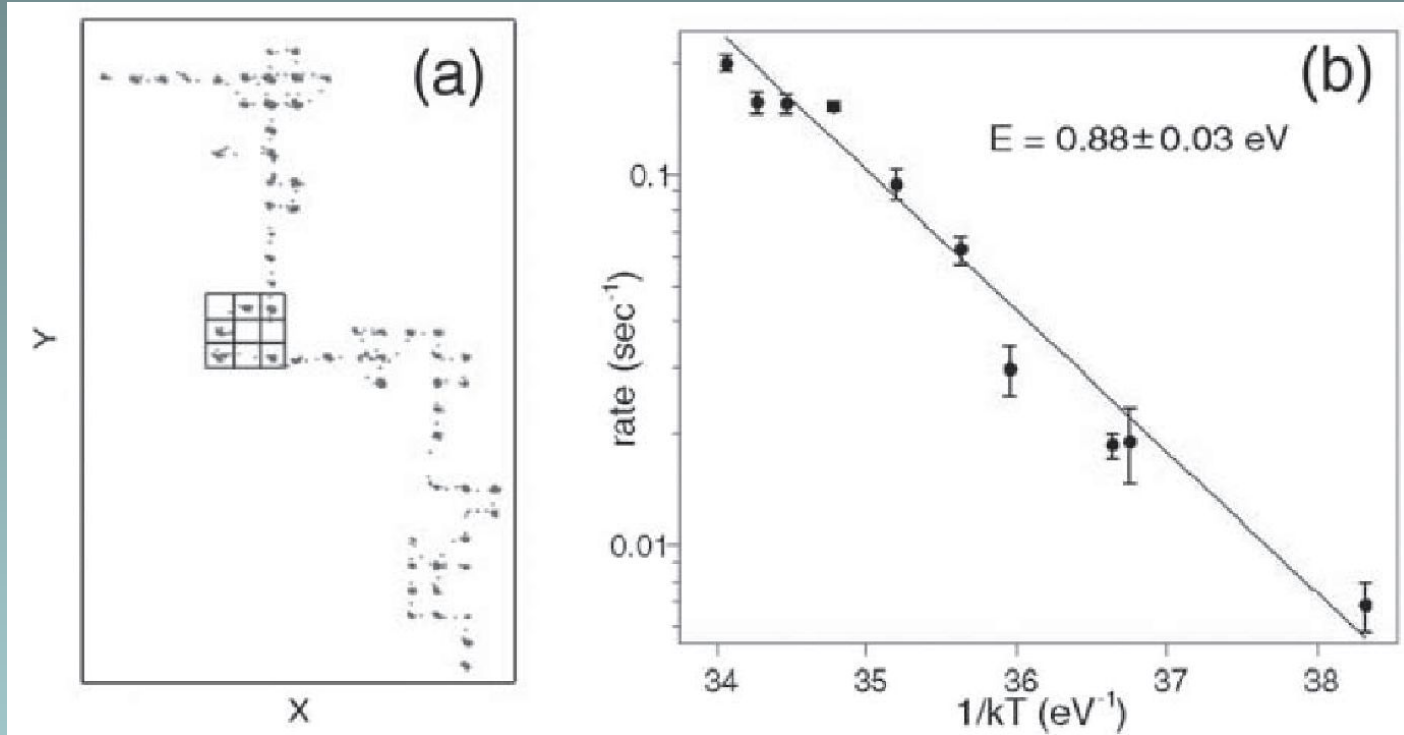
Исследование кинетики каталитических реакций



Пример комплексного исследования параметров каталитической реакции окисления CO на поверхности платины. Верхняя часть сигнала масс-спектрометра на выходе каталитической ячейки.

Внизу последовательные кадры СТМ «фильма». А – осаждение CO, напуск кислорода (В), окисление и десорбция CO₂ (С-Д) Е-Н повторение цикла.

СТМ Сопровождение атома в процессе диффузии



СТМ сопровождение конкретного атома Pd на поверхности Pd/Cu(001)

А) Карта миграции атома Pd. Сетка обозначает элементарную ячейку Cu(001). Атом Pd перемещался 853 раза за 5557 секунд при температуре 62°C. Зависимости коэффициента перемещения от температуры убывает с 145 до 5 в секунду. Данные согласуются с законом Аррениуса с энергией активации 0.88 эВ

$$k = A e^{-E_a/RT}$$

Вопрос о возможном влиянии зонда на процесс диффузии атомов остается открытым

Манипулирование атомами на поверхности для создания наноразмерных структур

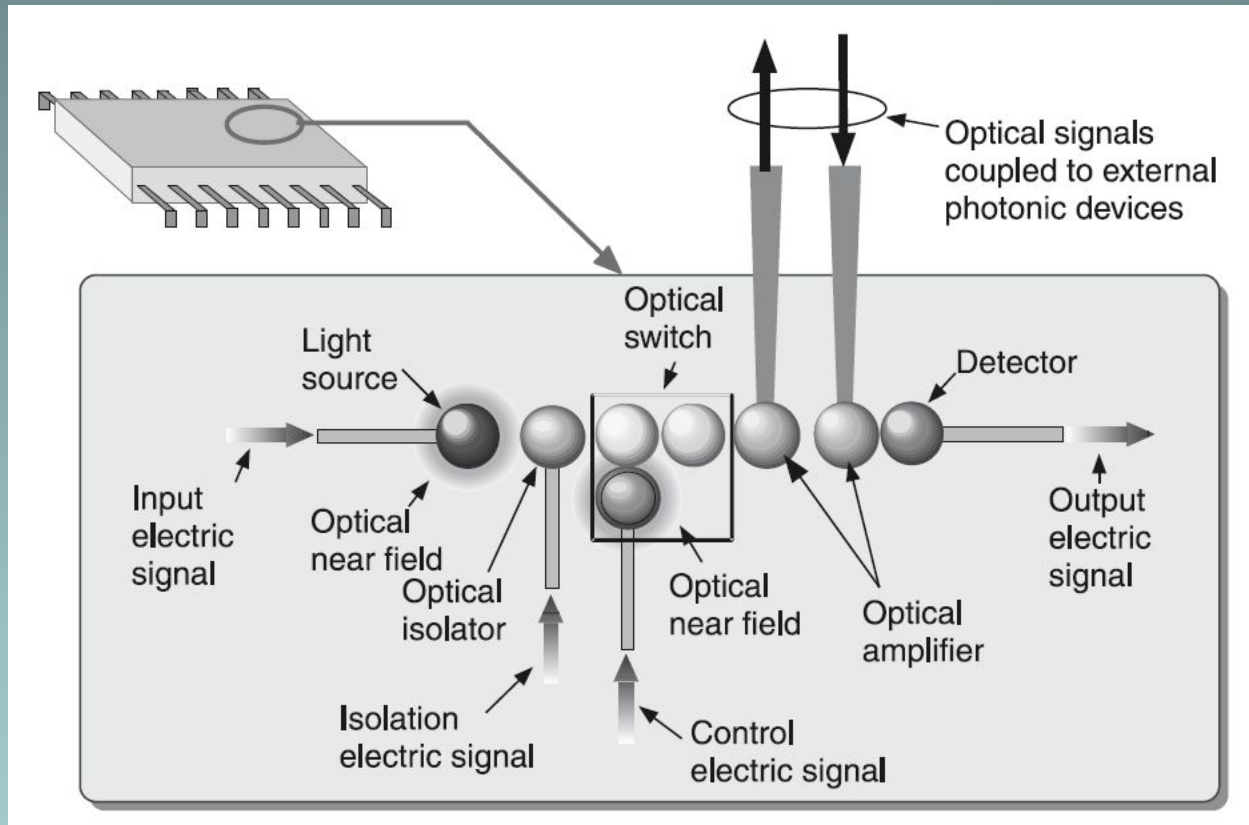
Используются следующие виды манипуляций:

- Контролирование химической реакции между конкретными молекулами на поверхности
- Присоединение молекулы к наночастицам на поверхности
- Конструирование механических элементов из молекул на поверхности
- Контролируемая передача избыточного заряда на атомам, молекулам или наноструктурным единицам поверхности.

Манипулирование достигается за счет следующих физических эффектов:

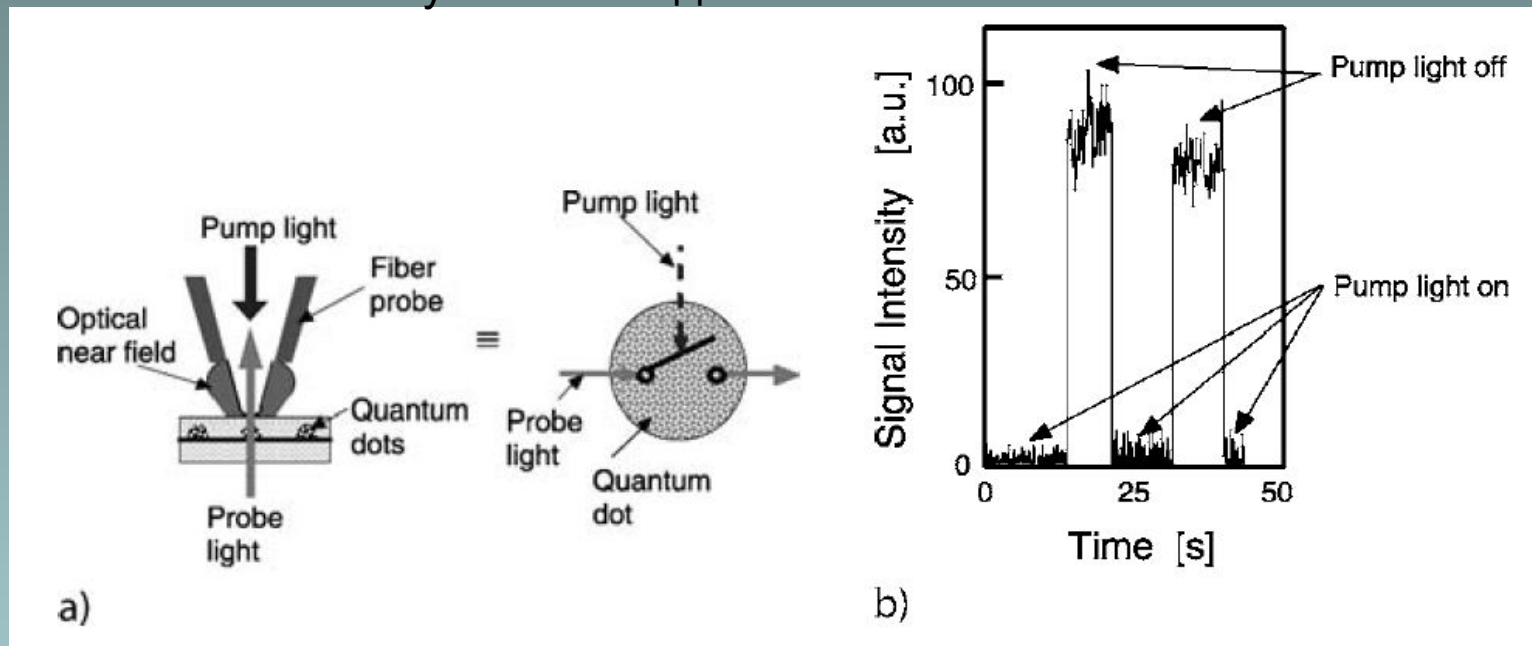
- Близость потенциала зонда искривляющего потенциальный рельеф поверхности (индуцирование перескока между адсорбционными центрами)
- Ближнепольное химическое взаимодействие зонда с атомом на поверхности (создание или обрыв химических связей)
- Колебательное возбуждение внутри молекулы или между атомом и поверхностью (возбуждение вращательно-колебательных степеней свободы молекулы)
- Прямой перенос заряда за счет туннельного тока

Интеграция нанооптических устройств



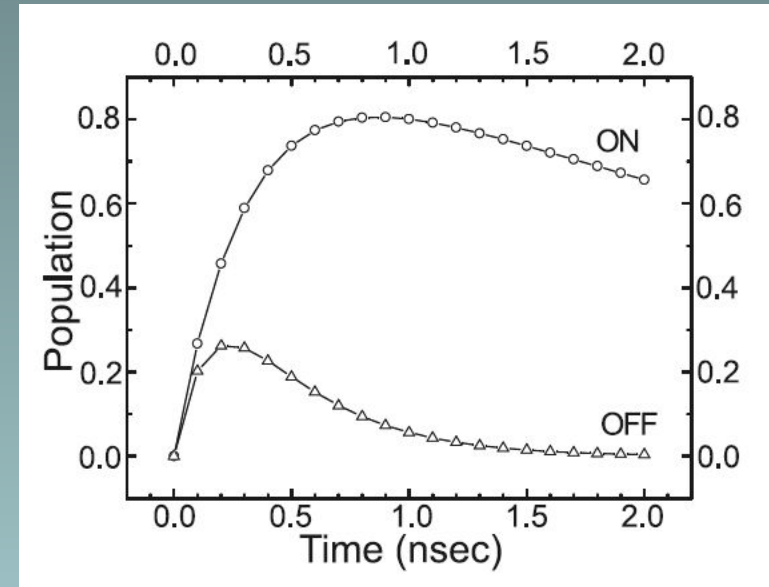
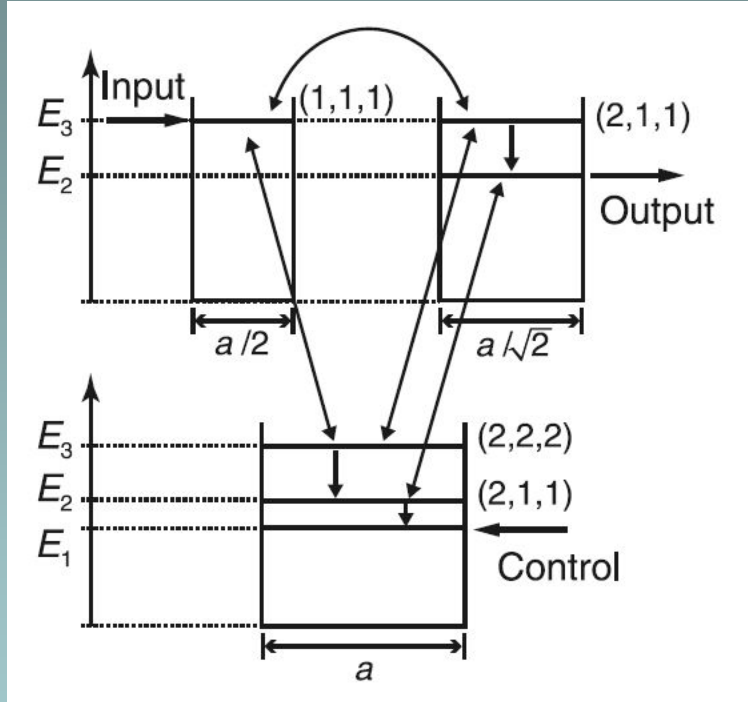
Концептуальная схема нано оптоэлектронного устройства в котором оптические переключатели, излучатели света, устройства ввода – вывода и электрические соединения контролируются наноразмерными отдельными точками и линиями, эти устройства используют ближнепольное излучение для передачи и трансформирования сигнала. Для создания таких наноразмерных структур перспективным считаются CVD процессы при ближнепольном локальном воздействии. Преимуществом является то, что за счет фотодиссоциации можно осаждавать как металлы, так и полупроводники и изоляторы используя в одном процессе резонансные методы ближнепольного оптического воздействия

Пример формирования переключателя на основе нелинейной адсорбции излучения в отдельной квантовой точке



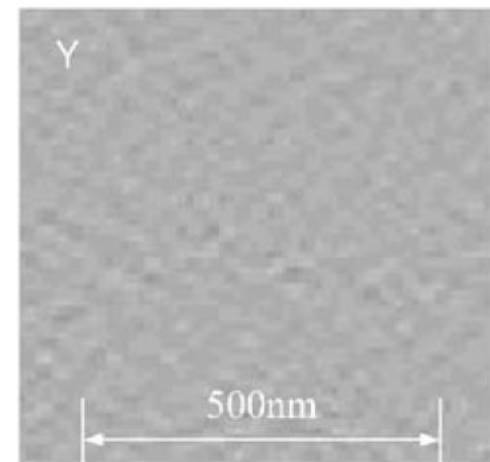
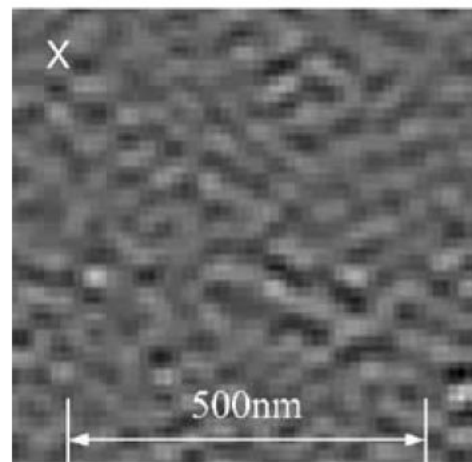
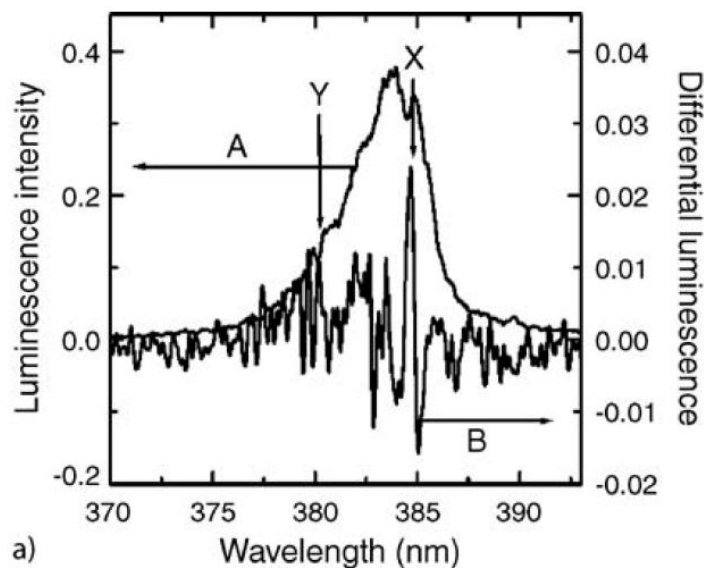
В этом примере ключ сформирован на основе отдельных квантовых точек InGaAs полученных на (100) GaAs подложке со средним диаметром 30 нм и высотой 15 нм. Слой квантовых точек закрыт прозрачным изолирующим слоем толщиной 180 нм. Излучение дальнего поля с $\lambda = 900\text{--}980\text{nm}$ облучало образец с обратной стороны. Приемником прошедшего излучения был наноприемник ближнепольного оптического микроскопа через который подавалось излучение накачки для квантовых точек $\lambda = 635\text{ nm}$ (a). При накачке в барьерном слое появлялись неравновесные носители, которые занимали квантовые точки приводя к возможности поглощения основного длинноволнового излучения. Изменения в прозрачности ключа регистрировались с помощью синхронного детектирования (b)

Переключение с помощью ближнепольного оптического взаимодействия квантовых точек



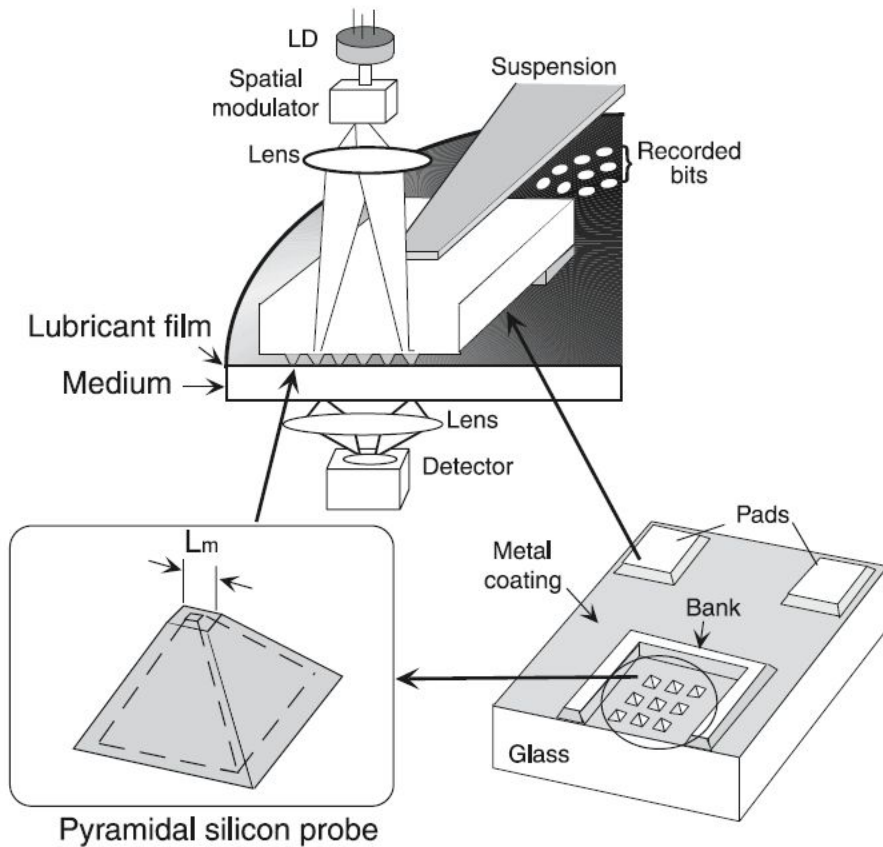
Электронная структура квантовых точек напрямую зависит от размера объекта. Это позволяет подбирая размеры квантовых точек сформировать структуру в которой размеры точек соотносятся как 1, 2, 3 с соотношениями $a/2$, $a/\sqrt{2}$, и a . В этом случае точка 1 соединенная с входным излучением которое за счет меж точечного взаимодействия передается точке 2 соединенной с выходным каналом. Точка 3 соединена с модулирующим каналом. Когда свет подан на точку 3 ее взаимодействие с точками 1 и 2 запрещено, поскольку уровень E_1 заселен неравновесными зарядами. При выключенном модулирующем свете взаимодействие точек 1, 2 и 3 приводит к уменьшению передачи излучения между точками 1 и 2 за счет того, что меж точечные релаксации имеют гораздо меньшее время жизни по сравнению с внутри точечными. На правом графике приведен расчет заселенности верхних уровней точки 2 при включенном и выключенном модулирующем свете на точке 3. Время переключения оценивается в сотню пикосекунд

Первая стадия реализации проекта – подбор частот возбуждения и фотолюминесценции квантовых точек



На рисунке а приведено сравнение фотолюминесценции квантовых точек CuCl в матрице NaCl при облучении излучением дальнего и ближнего поля. На рисунке b и c приведена картина сканирования фотолюминесценции квантовых точек при настройке на частоты соответствующие линиям отмеченным буквами X и Y на левом спектре. Использовалось излучение $\lambda = 325 \text{ nm}$ He-Cd лазера. При облучении дальнем полем происходит неравномерное уширение излучения фотолюминесценции за счет разброса в размере квантовых точек. При облучении с помощью ближнепольного микроскопа каждый размер дает вклад только в свою длину волны. Таким образом можно различать излучение от разного размера КТ, а также их распределение по поверхности.

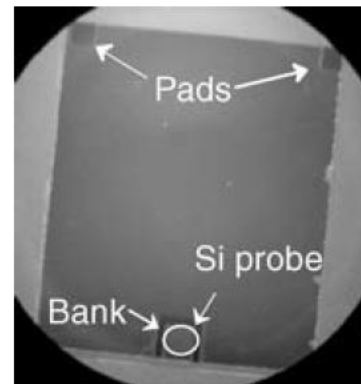
Оптическая запись и считывание оптическим ближним полем.



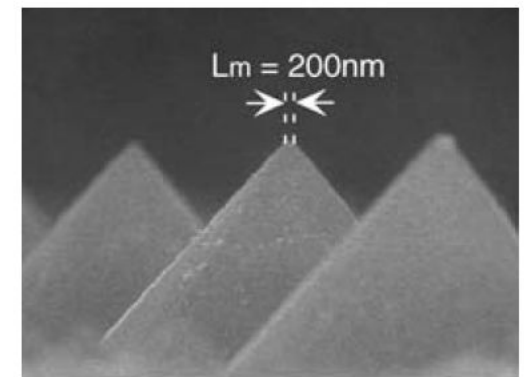
Устройство представляет собой слайдер из кремния преимуществва которого в высоком коэф. преломления $n = 3.67$ на длине волны $\lambda = 830 \text{ nm}$.

Основным критерием формирования пирамид является их гомогенность по высоте в пределах нескольких нанометров.

Увеличенное изображение блока с кремниевыми пирамидами и сами пирамиды.



a)



b)

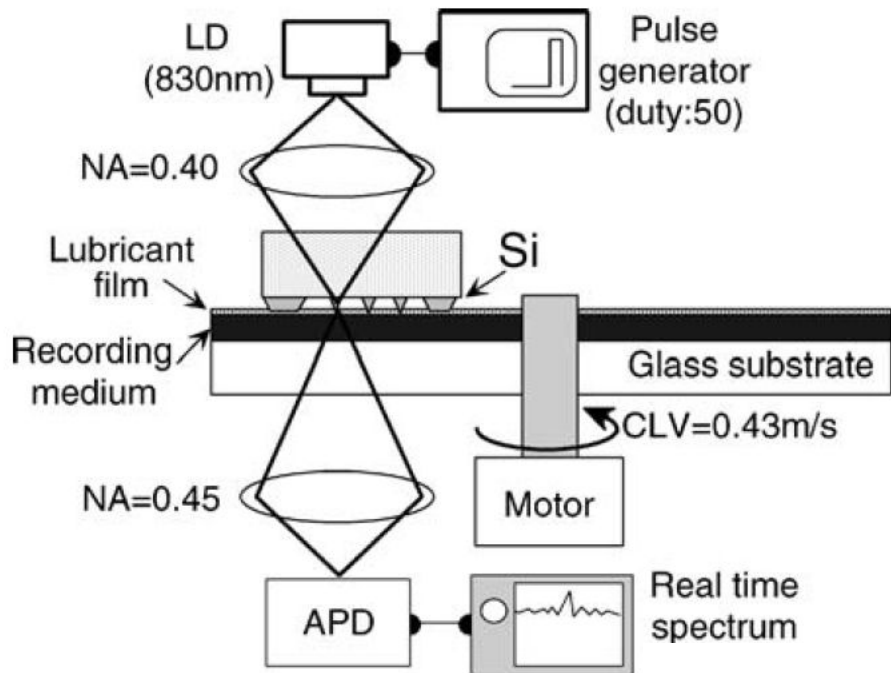
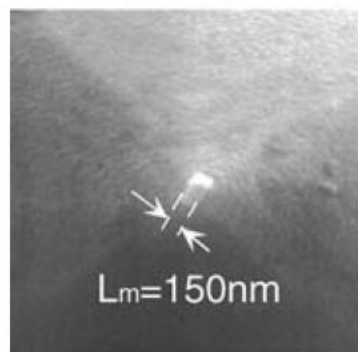


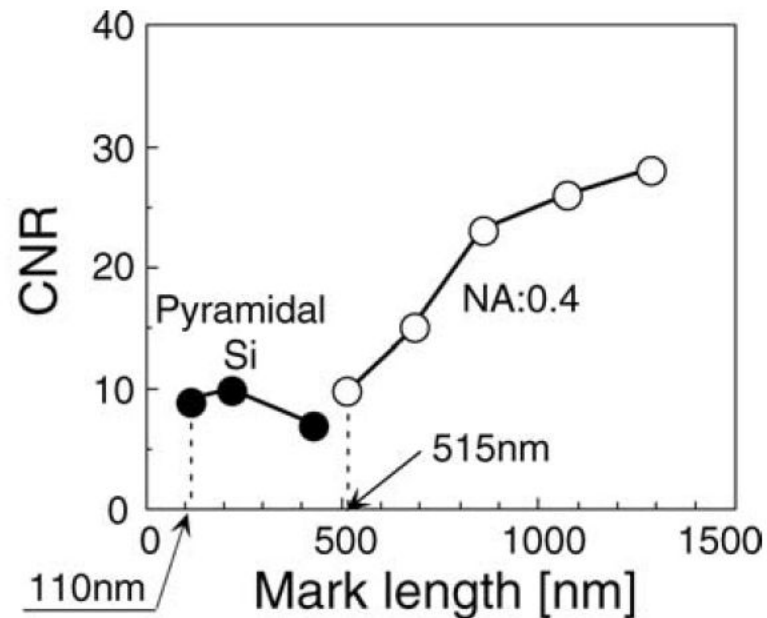
Схема устройства записи чтения на среду с изменяемым фазовым состоянием.

При использовании одной пирамиды отношение сигнал/шум (carrier to noise) для случаев облучения дальним полем и ближним полем.

При облучении ближним полем минимальный размер метки составил 110 нм, при линейной скорости 0.43 м/с, Плотность записи может составить 1 Tbit/in²

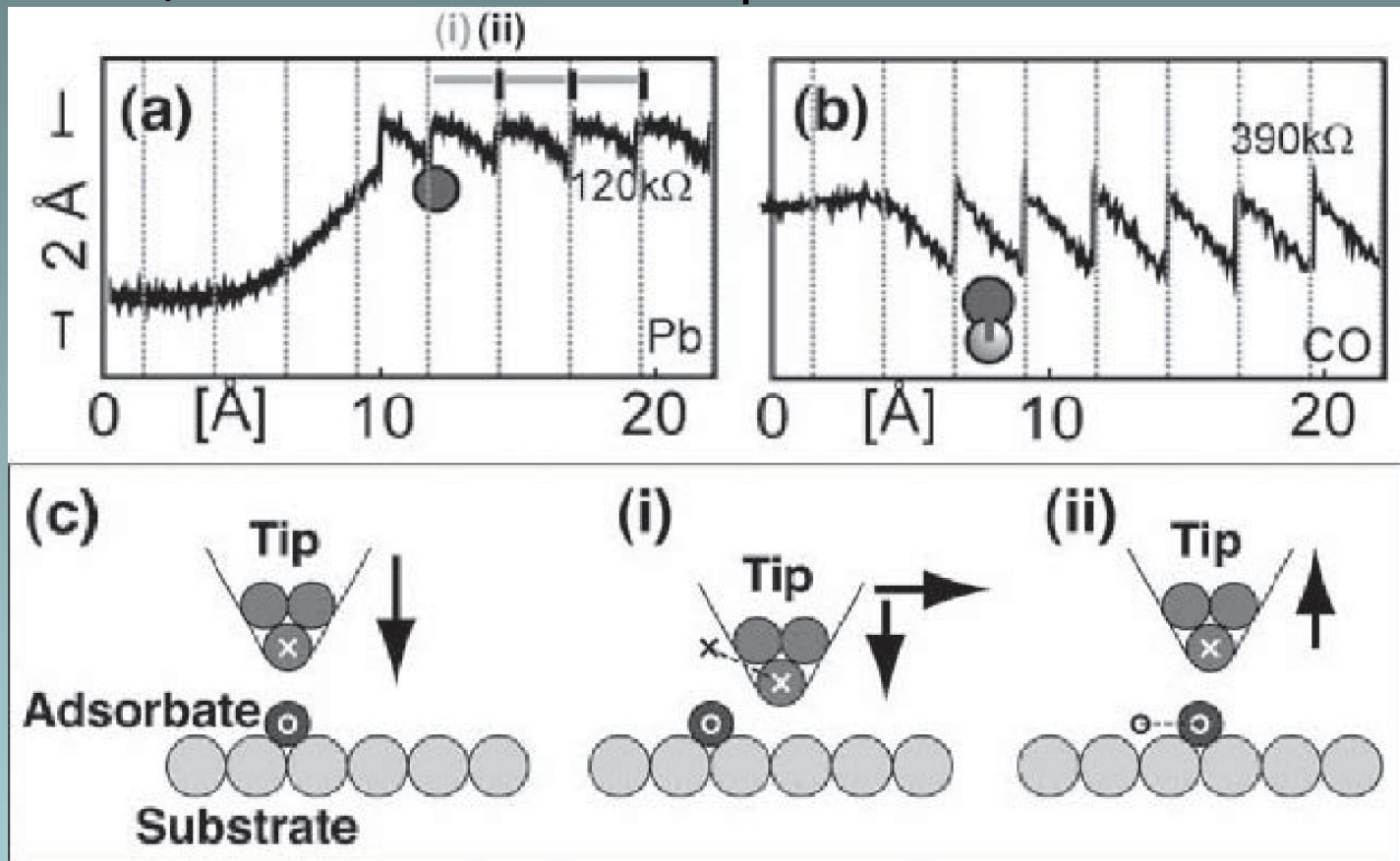


a)



b)

Перемещение атомов в латеральной плоскости



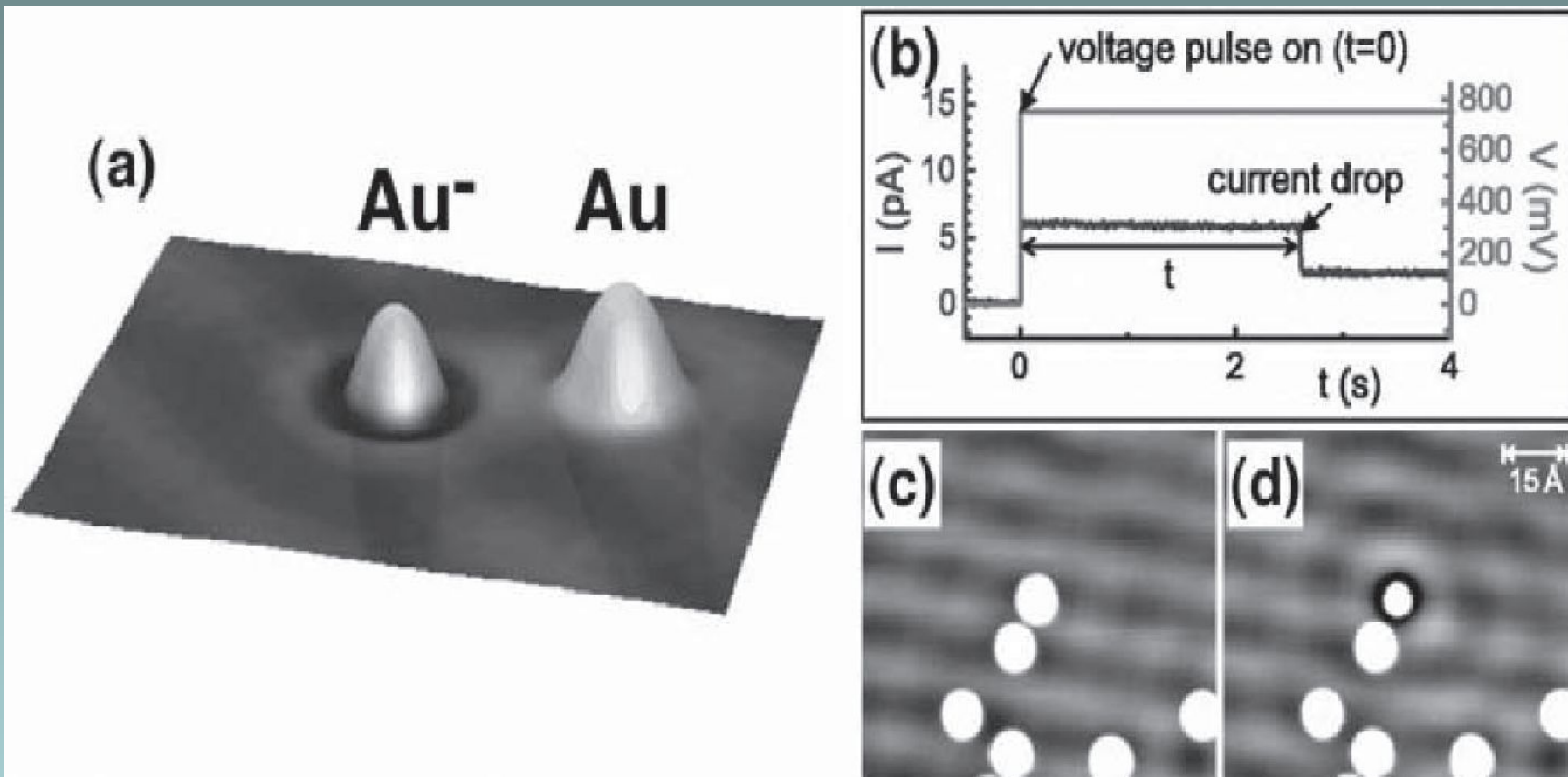
В зависимости от характера конкретных материалов необходимо применять либо силы притяжения, либо отталкивания для перемещения атомов.

Пример перемещения атомов Pb на поверхности Cu(211) с помощью сил притяжения к атомам W (зонд) (a) и с помощью сил отталкивания (b) w-CO

C – Вид перемещений

Контроль перемещения возможен по существенному изменению сопротивления туннельного тока (от Мом до кОм)

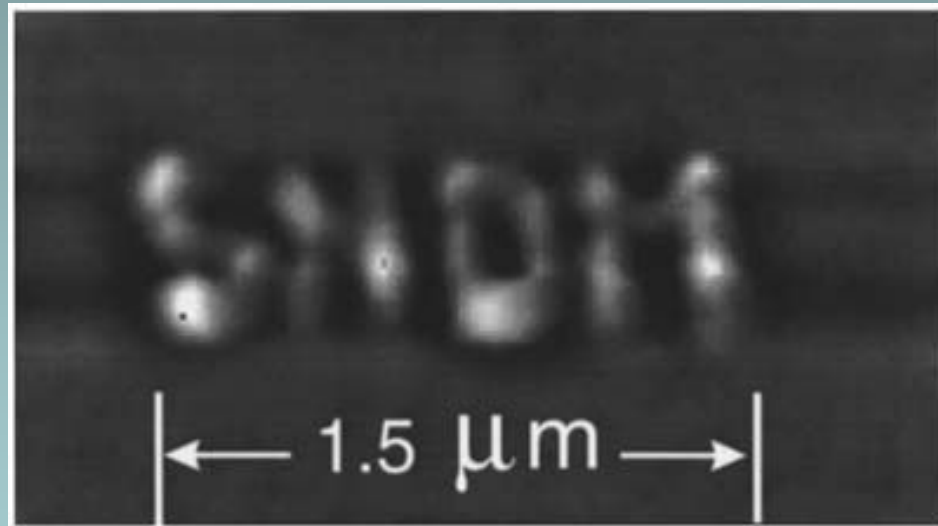
Создание зарядовых центров



Зарядка отдельных атомов Au на тонком слое NaCl на поверхности Cu. Тонкий слой NaCl стабилизирует заряд на атомах золота. а - СТМ изображение отдельных атомов Au один из которых заряжен. b – диаграмма туннельного тока, после зарядки туннельный ток существенно падает. c и d иллюстрирует рассеяние электронной плотности слоя NaCl заряженным атомом золота.

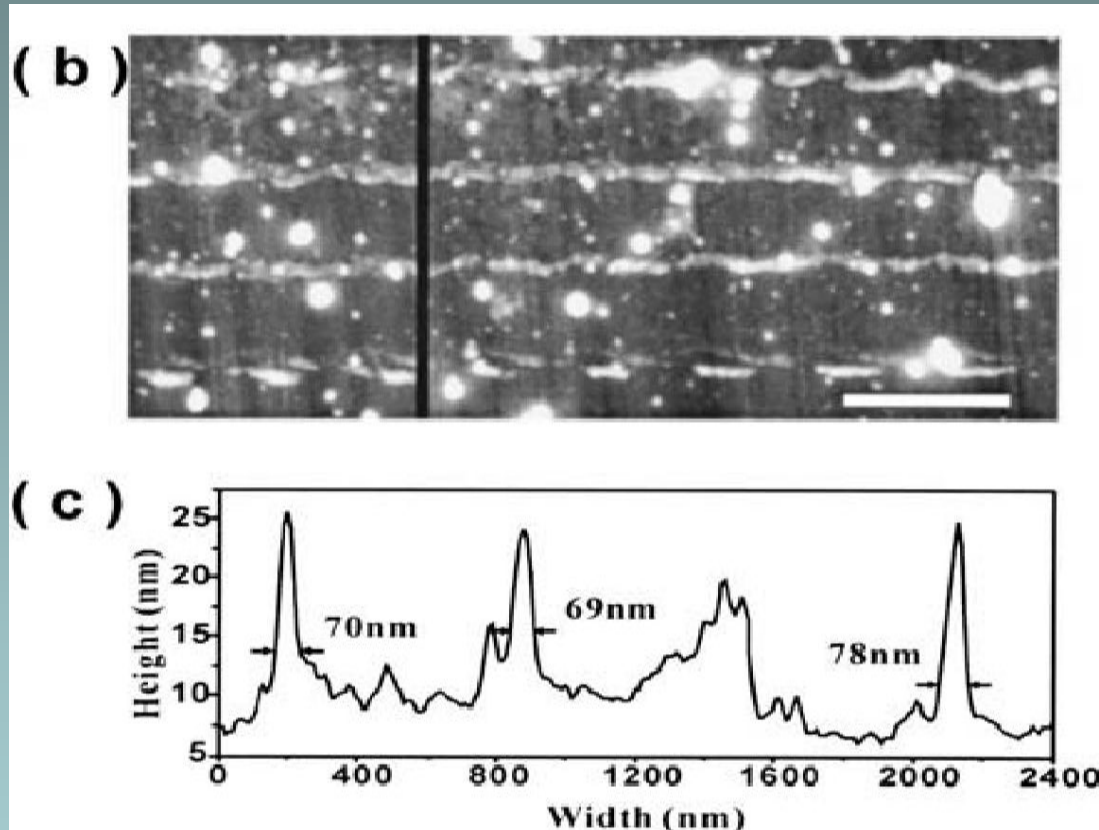
СБОМ, фото литография

Фото деформация фоточувствительного полимера воздействием ближнего поля.
Ширина линии в наиболее тонкой части – около 100 nm.



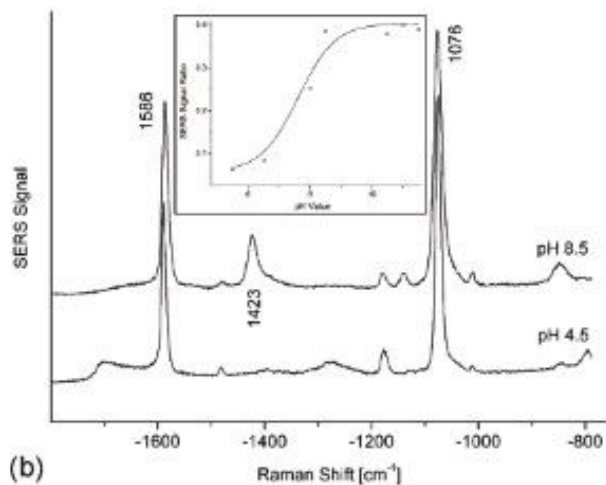
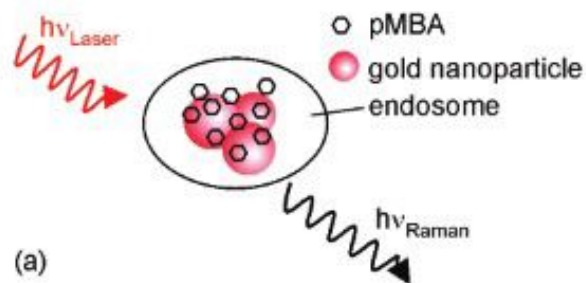
АФМ изображение линейной структуры образованной в ближнем поле. Фоторезист - SU-8 экспонировался при воздействии покрытого металлом кремниевого кантилевера. Использовалось излучение 790 nm.

Картинка подтверждает, что при помощи безапертурной ближнепольной фото литографии можно получать структуры 70 nm \pm 10 nm



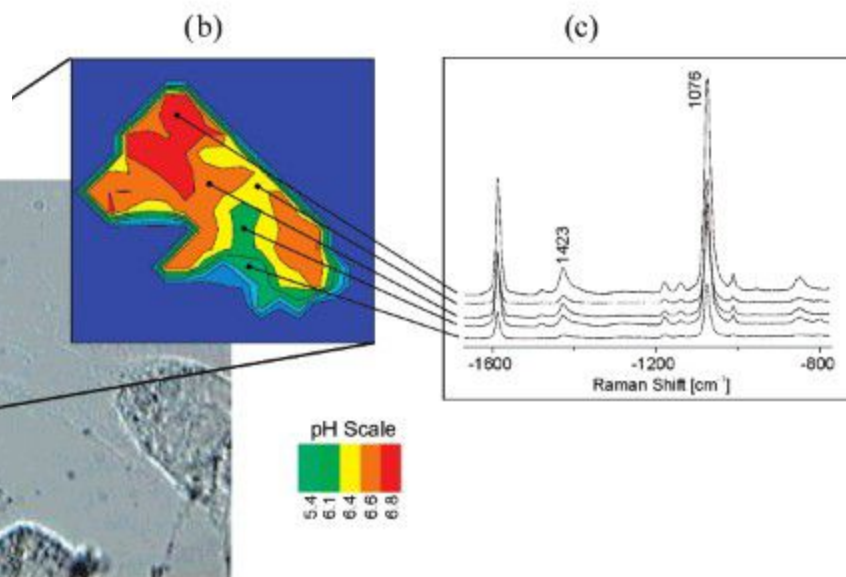
Линейные структуры полученные на фоторезисте SU-8 методом двухфотонного экспонирования. Общее облучение в дальнем поле и локальное облучение ближнепольным оптическим зондом. b – AFM изображение поверхности после облучения и c – профиль вдоль черной линии.

ГКР в медицине и биологии



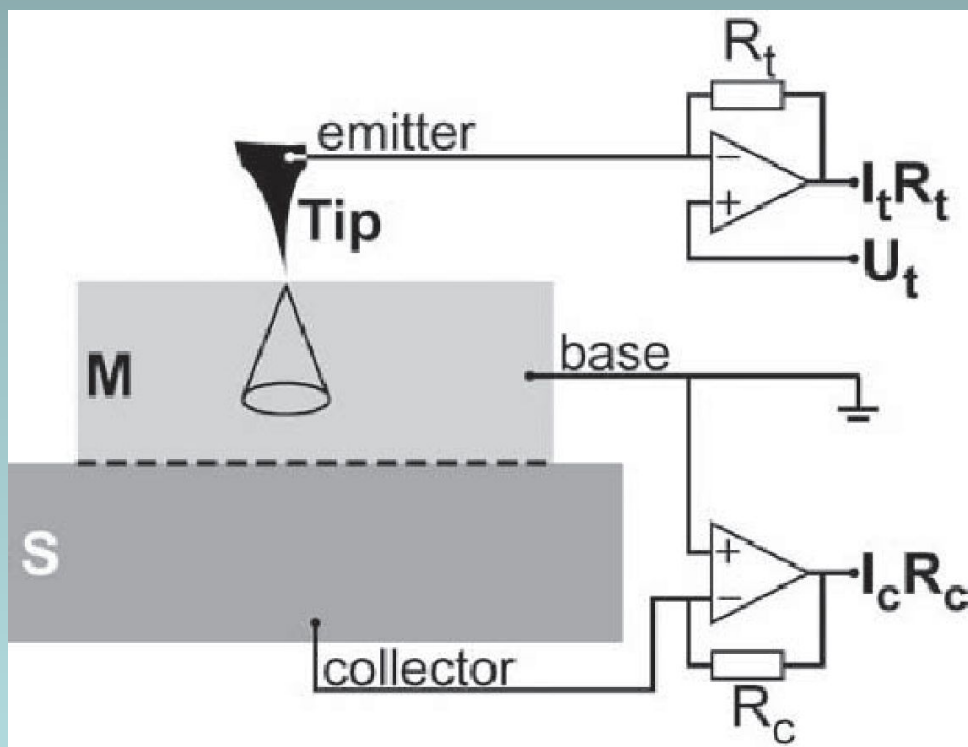
Наночастицы Au, меченные меркаптобензойной кислотой (МБК), являются меткой на pH внутри эндосом клеток

Золотые частицы захватываются клетками и накапливаются в эндосомах. pH оценивали по изменению отношения интенсивностей линий 1423 //1076



Зондирование внутренних слоев гетеро структур с помощью баллистической электронной микроскопии

Инжекция электронов с помощью СТМ зонда (работает в режиме постоянного тока) и регистрация тока в отдаленных структурах позволяет проводить анализ таких параметров ПП гетеро структур как подвижность носителей, диффузионная длина, дефектность и т. д.



Вариант схемы эксперимента:
М – металл толщина которого меньше длины свободного пробега электронов (10nm). Зонд – источник неравновесных зарядов, которые достигают интерфейса металл-полупроводник баллистически (то есть с сохранением своего импульса и энергии)

BEEM

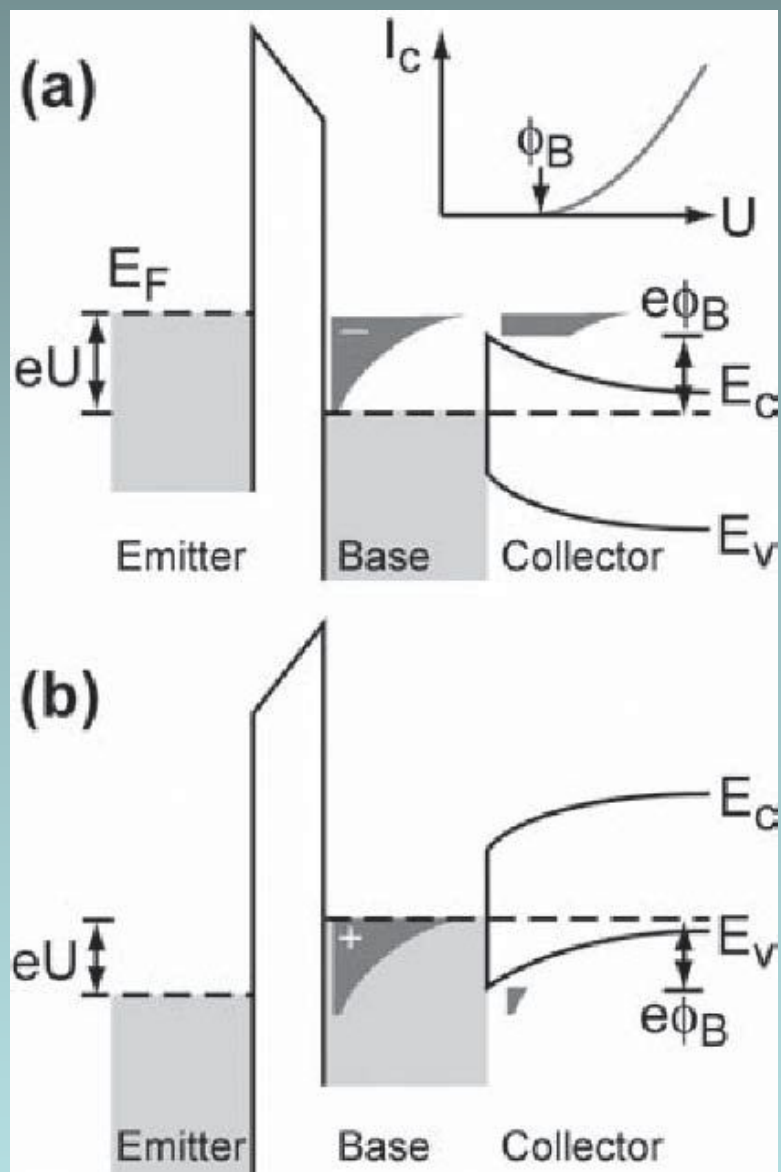
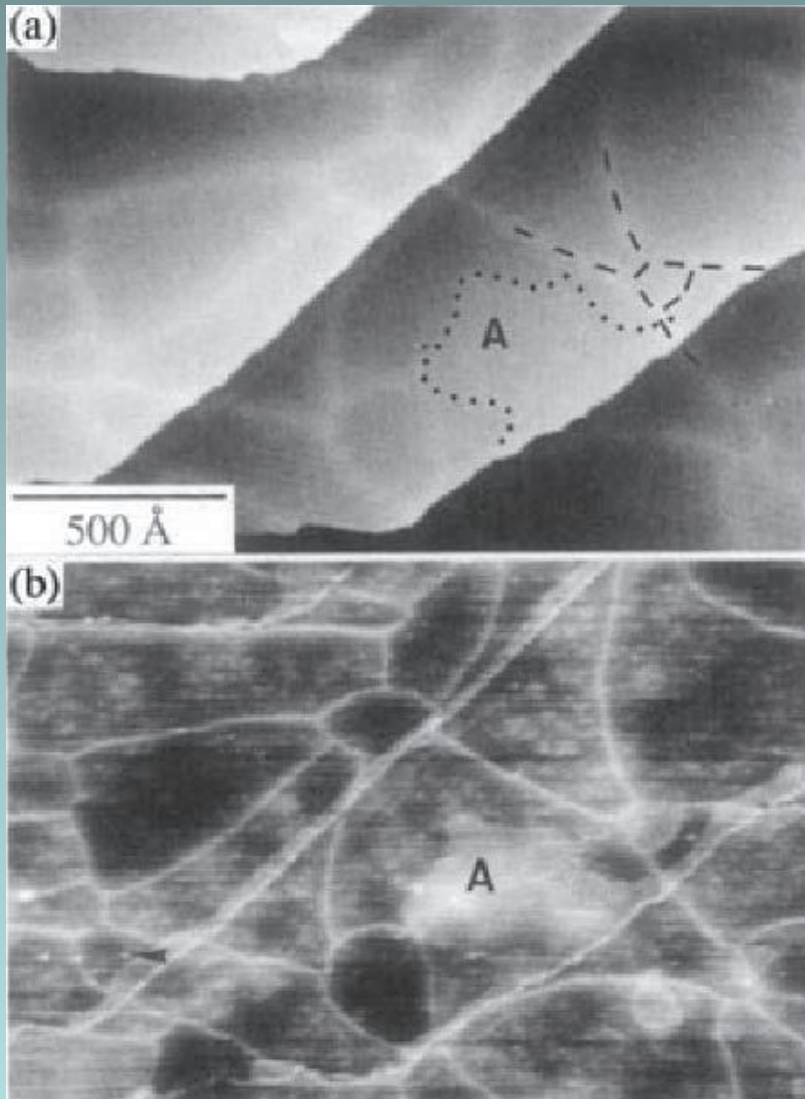


Диаграмма показывающая распределение инжектированных неравновесных носителей а)- электронов б) – дырок и их распределение после потенциального барьера Шотки на границе металл-полупроводник. На графике зависимость тока на детекторе от напряжения на зонде – максимальной энергии электронов.

Пример информации полученной с помощью ВЕЕМ



а) – СТМ изображение поверхности эпитаксиальной пленки $\text{CoSi}_2/\text{Si}(111)$. На фото видна сетка дислокации.

б) – ВЕЕМ карта выявляет области дислокаций за счет барьера на границе областей. Увеличение тока на границах обусловлено рассеянием горячих электронов граничным барьером.

За счет понижения температуры можно добиться лучшего энергетического и пространственного разрешения

Изменение тока в местах скопления квантовых точек или дефектов позволяет проводить их локализацию.