

# Синтез полевого транзистора на основе нанотрубок

Ст. гр. ИУ4-83  
Сарымсаков Р. Г.

# Цель работы

- Создание конструкции полевого транзистора на основе нанотрубок (CNT-FET - carbon nanotube field effect transistor) для использования в ИС высокого быстродействия и сверхбольшой степени интеграции.
- Разработка математической модели CNT-FET.
- Исследование методов получения наноструктур и выбор наиболее пригодных для наноэлектроники.
- Синтез технологии производства CNT-FET.
- Исследования применимости CNT-FET в электронных цифровых устройствах (вентиль И-НЕ, память).

# Решаемые задачи

- Разработка математической модели CNT-FET.
- Разработка принципов технологии получения CNT-FET с применением методов ионно-лучевой обработки (ИЛО) и нанолитографии.
- Исследование методов получения нанотрубок.
- Экспериментальное исследование нанолитографических процессов.
- Исследование применимости методов ИЛО при производстве элементов нанoeлектроники.
- Проектирование электронных цифровых устройств (инвертор, память) на CNT-FET.
- Разработка программы моделирования ячеек памяти на основе нанотрубок.

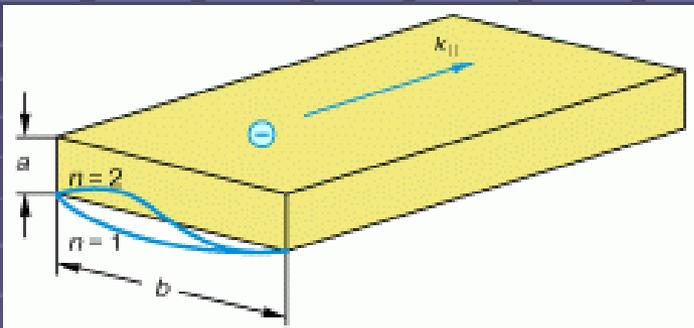
# Актуальность

- По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области все больше проявляются квантовые свойства электрона. Это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов.
- К недостаткам фотолитографических процессов стоит отнести наличие определенных искажений (сферическая и хроматическая аберрации, астигматизм), что ограничивает разрешающую способность.

# Квантовые основы наноэлектроники

## Квантовое ограничение

- Имеет место дополнительное квантование энергетических уровней.



$$\lambda = \frac{2L}{n}$$
$$k = \frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{n\pi}{L}$$

- Запирание электрона в одном из направлений в соответствии с принципом неопределенности приводит к увеличению его импульса и минимальной энергии.

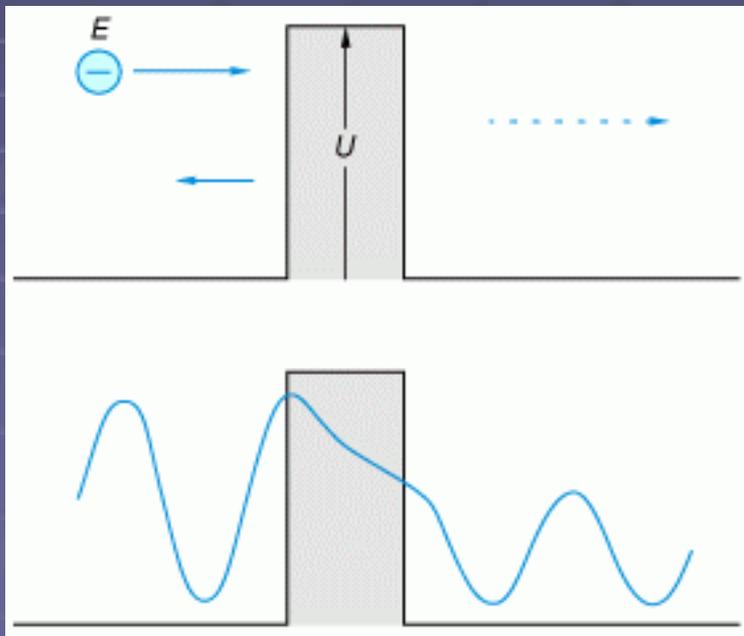
$$\Delta E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \cdot \frac{\pi^2}{L^2}$$

- Это приводит к тому, что электронные свойства наноразмерных структур отличаются от известных объемных свойств материала, из которого они сделаны.

# Квантовые основы наноэлектроники

## Туннелирование

- Уникальным свойством квантовых частиц, в том числе и электронов, является их способность проникать через преграду даже в случаях, когда их энергия ниже потенциального барьера, соответствующего данной преграде.

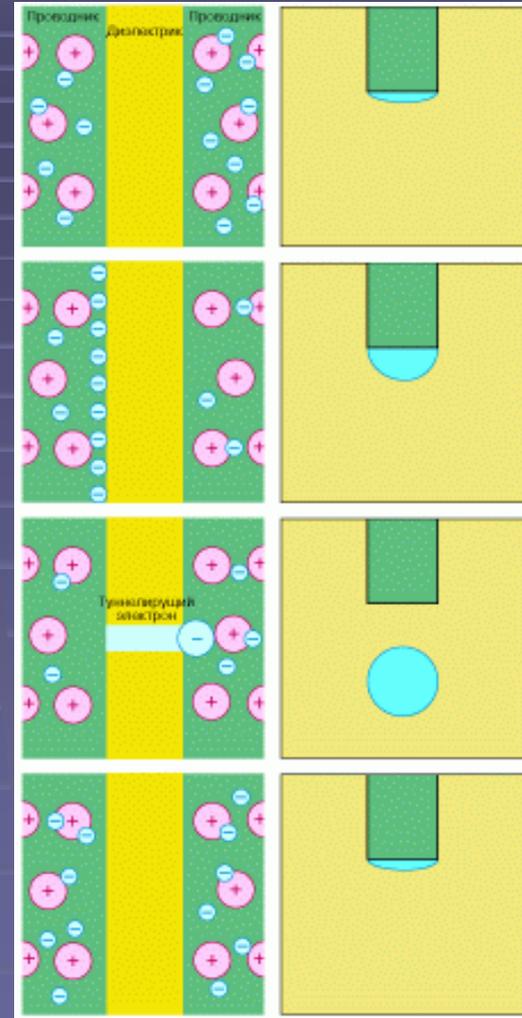


$$P = \left( \frac{4n}{1+n^2} \cdot e^{-\alpha a} \right)^2$$
$$n = \sqrt{\frac{E}{U-E}}$$
$$\alpha = \frac{\sqrt{2m(U-E)}}{\hbar}$$

# Квантовые основы наноэлектроники

## Кулоновская блокада

- При приложении к металлическим областям потенциала на границе металл-диэлектрик начинает накапливаться заряд.
- Это продолжается до тех пор, пока его величина не окажется достаточной для отрыва и туннелирования через диэлектрик одного электрона.
- При сохранении внешнего приложенного напряжения все повторяется вновь.
- Таким образом, перенос заряда в такой структуре осуществляется порциями, равными заряду одного электрона.

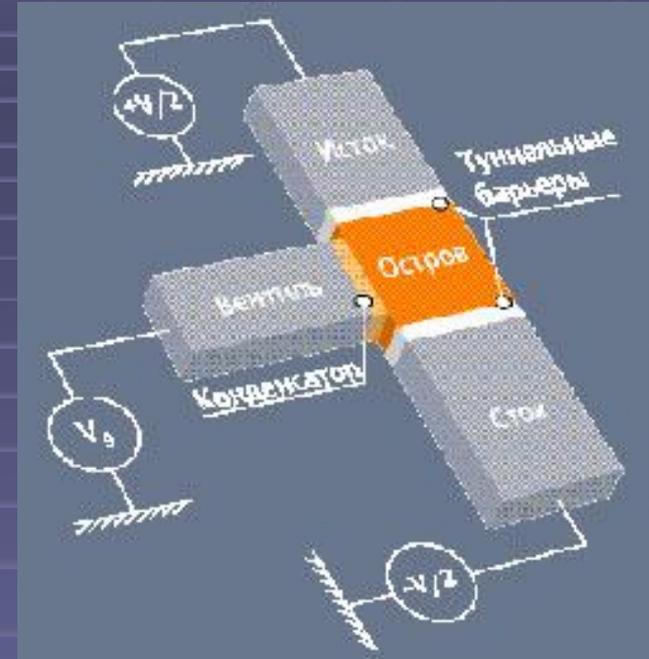


# Одноэлектронный транзистор

- У одноэлектронного транзистора (single electron transistor – SET) имеется специальный наноразмерный проводящий канал, представляющий собой так называемую квантовую точку.
- До тех пор, пока в наноразмерном проводящем канале находится один электрон, никакой другой электрон войти в канал не может.
- Недостаток – сильное влияние температуры. Необходимо выполнение условия

$$E_C > kT$$

- Низкая рабочая температурой (порядка 100 К)



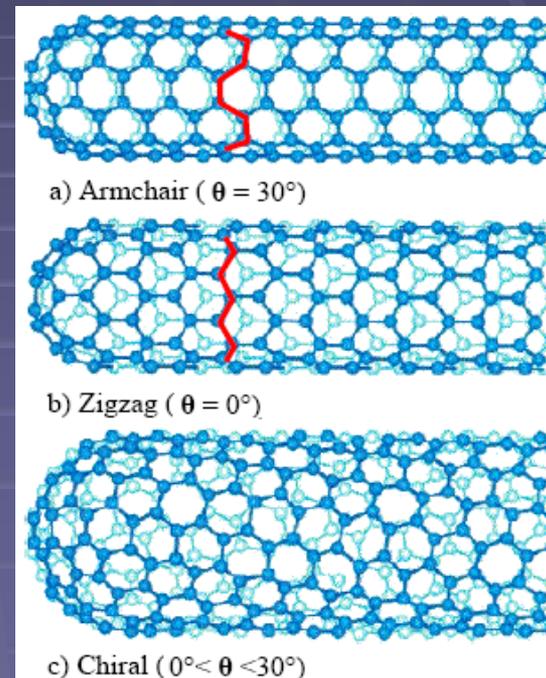
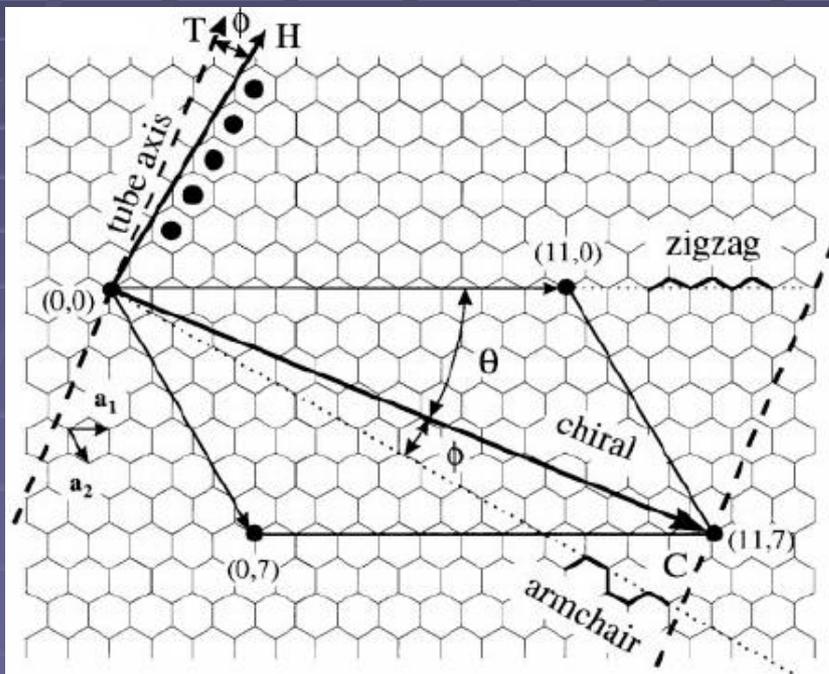
$$E_C = \frac{e^2}{2C}, V > \frac{e}{C}$$

# Нанотрубки

- Нанотрубки характеризуются вектором и углом хиральности.

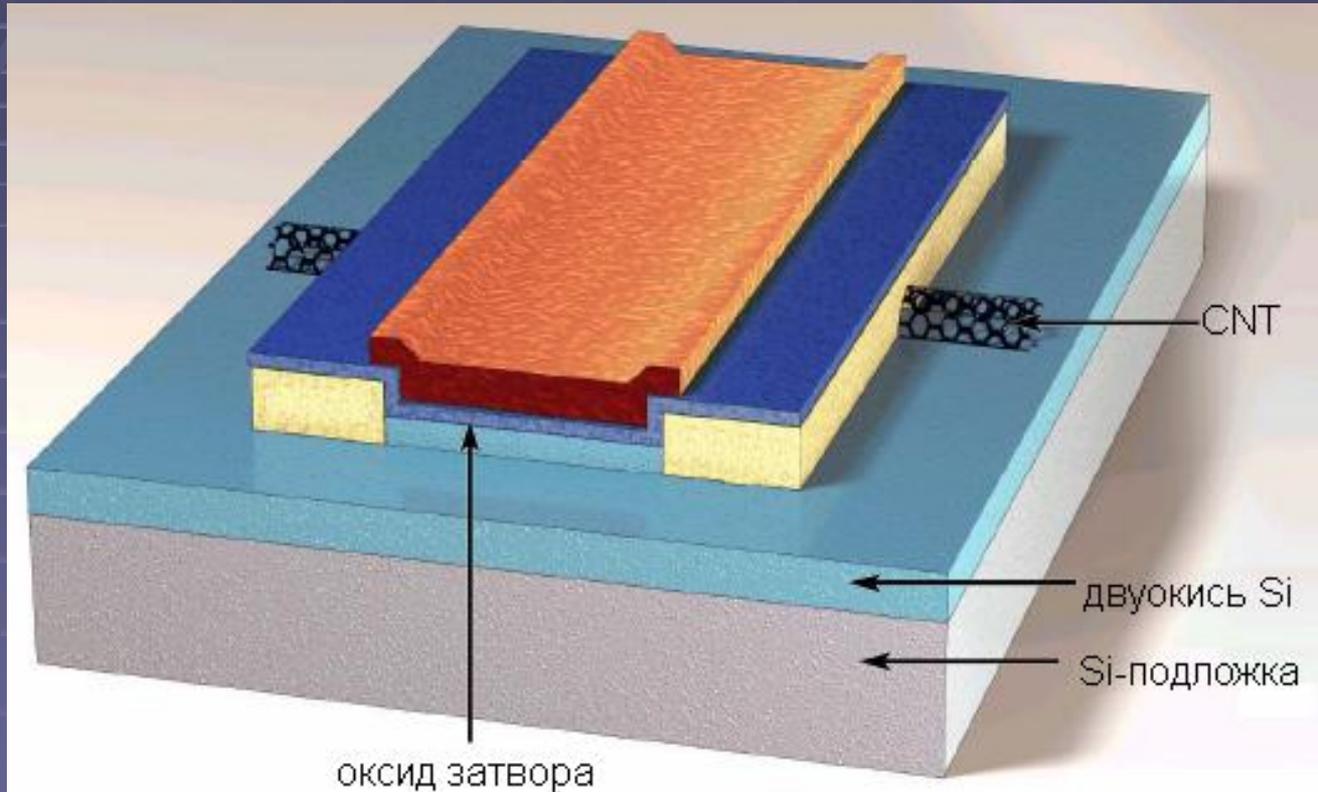
$$C = na_1 + ma_2, \theta = \arctg\left(\frac{\sqrt{3}n}{2m+n}\right)$$

$$n + m = 3i, \theta = 30^\circ (*)$$



- Было установлено, что при выполнении условия (\*) углеродные нанотрубки (CNT – carbon nanotube) напоминают металлы в осевом направлении. В противном случае нанотрубки проявляют свойства полупроводника, легированного p-примесями.

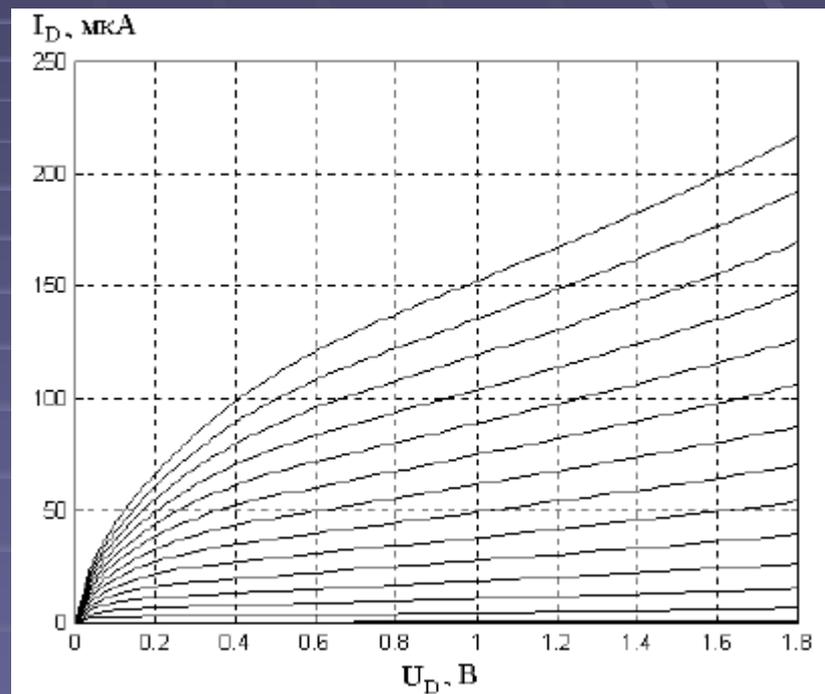
# Модель CNT-FET



# Модель CNT-FET

- Электроны в металлических CNT проявляют баллистическую природу.
- При контакте CNT-металл (Au) нет барьера Шоттки (малая разность работ выхода)
- Экспериментальные данные для полупроводниковых CNT хорошо согласуются с классической теорией проводимости.
- Это означает, что движение электрона может быть описано подвижностью, как и в случае классической физики твердого тела.

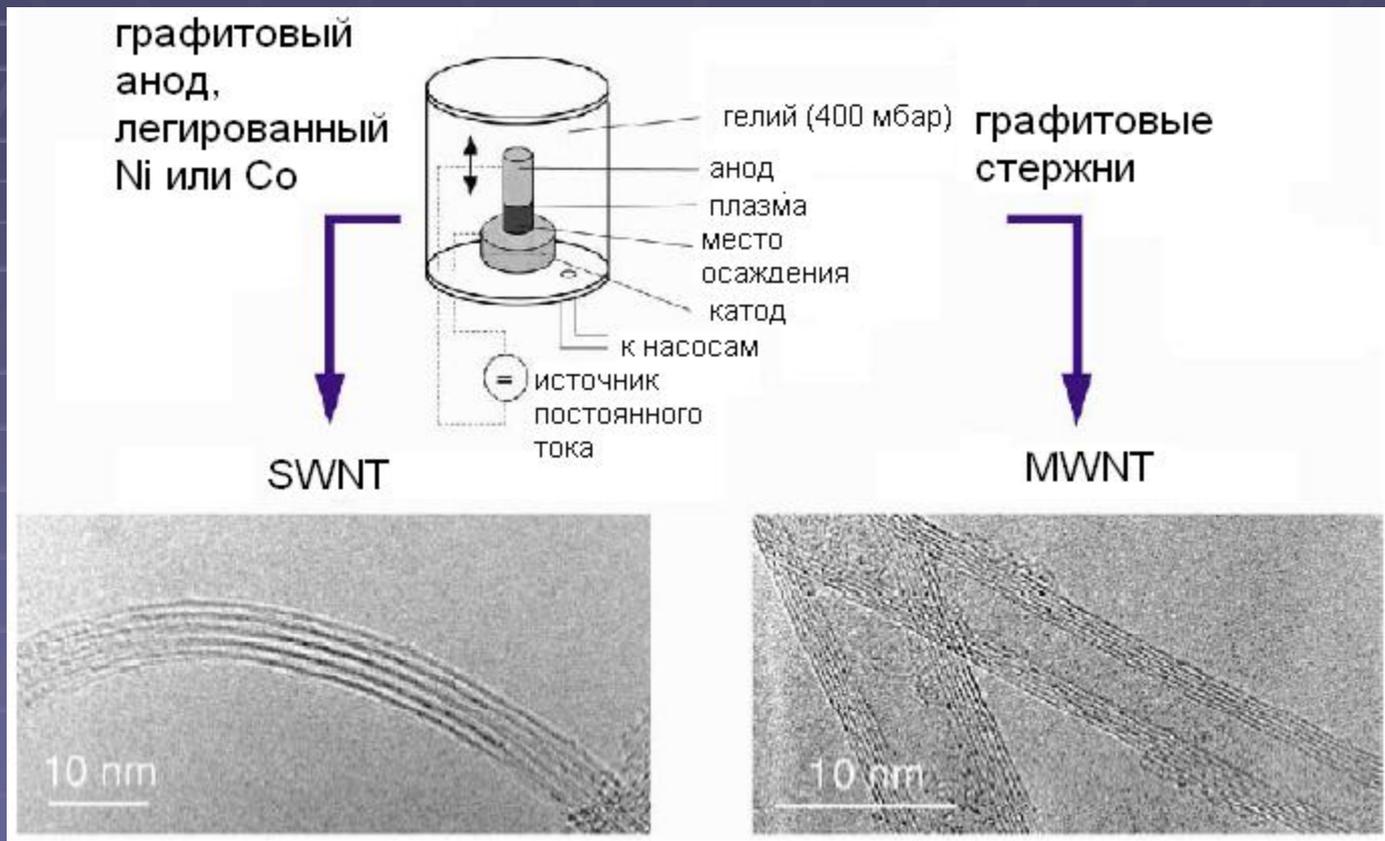
$$I_D = 0,5WQ_n\mu_0(N,T)\sqrt{E_K E} \left[ 2 + \left( \sqrt{1 + \frac{2eL}{m\mu_0^2 E_K}} - 1 \right) \exp\left(-\frac{L}{L_{SR}}\right) \right]$$



Выходная ВАХ  
(подвижность электрона в нанотрубке - 15 000 В / (см<sup>2</sup> \* с),  
длина канала - 180 нм,  
напряжение затвора изменялось от 1,8 В с шагом 0,1 В)

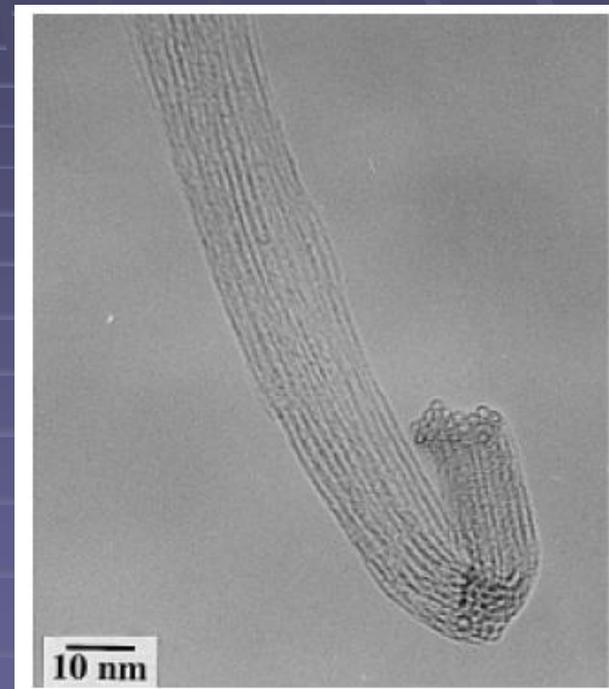
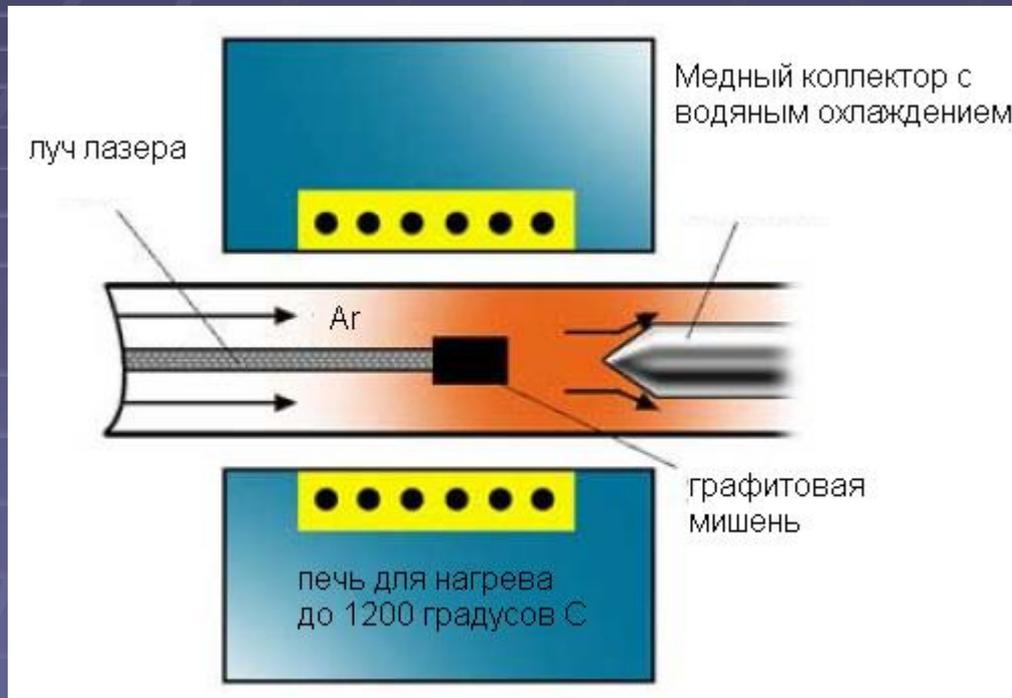
# Методы получения CNT

## Дуговой разряд (arc discharge – AD)



# Методы получения CNT

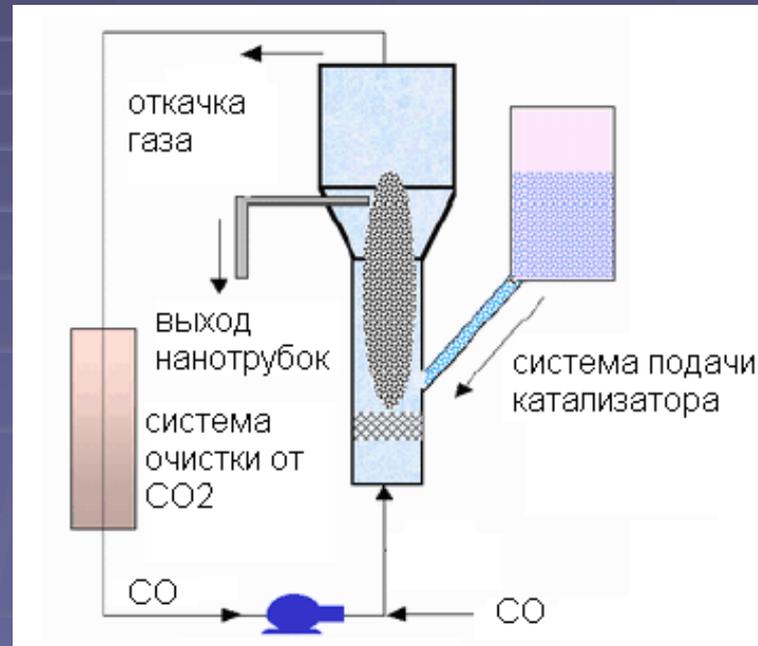
## Лазерное испарение (laser ablation – LA)



# Методы получения CNT

## Химическое осаждение (chemical vapor deposition – CVD)

- Разновидность – CoMoCat (cobalt-molybdenum catalyst).
- Высокий процент получения одностенных нанотрубок (single walled nanotube – SWNT)

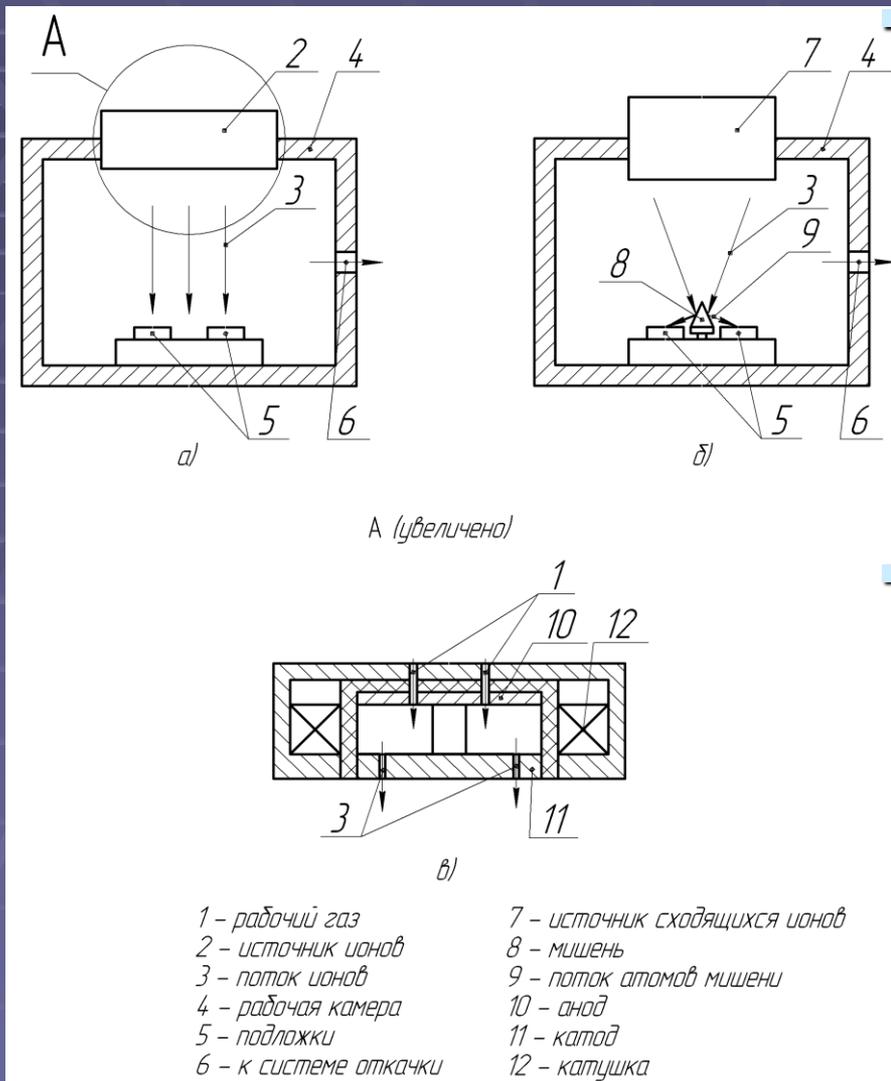


# Методы получения CNT

## Сравнительный анализ

Метод	AD	CVD	LA
Первое применение	Ebbesen и Ajayan, NEC, Япония, 1992	Endo, университет Shinshu, Nagano, Япония	Smalley, Rice, США, 1995
Краткое описание	Дуговой разряд между двумя графитовыми стержнями, расположенными на расстоянии 1 мм.	Подложка помещена в печь, в которой находится углеродосодержащий газ.	Облучение мощным лазером графитовой мишени создает углеродный газ, который охлаждается у коллектора
Процент выхода	30-90 %	20-100 %	70 %
Формируемые SWNT	Короткие нанотрубки диаметром 0,6-1,4 нм	Длинные нанотрубки диаметром 0,6-4 нм	Длинные нанотрубки диаметром 1-2 нм.
Достоинства	Простота установки. У SWNT мало дефектов. Возможен синтез CNT на открытом воздухе	Высокопроизводительный метод. Очень чистые длинные SWNT.	Получаются в основном только SWNT очень высокого качества.
Недостатки	Малая длина CNT. Метод не осаждает на подложку.	Сложность конструкции установки.	Высокая стоимость. Метод не осаждает на подложку.

# Методы ионно-лучевой обработки



## Травление материалов

- достижение высокого разрешения (получены субмикронные размеры элементов менее 100 нм);
- получение соотношения высоты к ширине ступеньки  $> 30:1$ ;
- управление профилем ступеньки и получение канавки требуемой конфигурации, за счет возможности изменения угла наклона пучка к обрабатываемой поверхности.

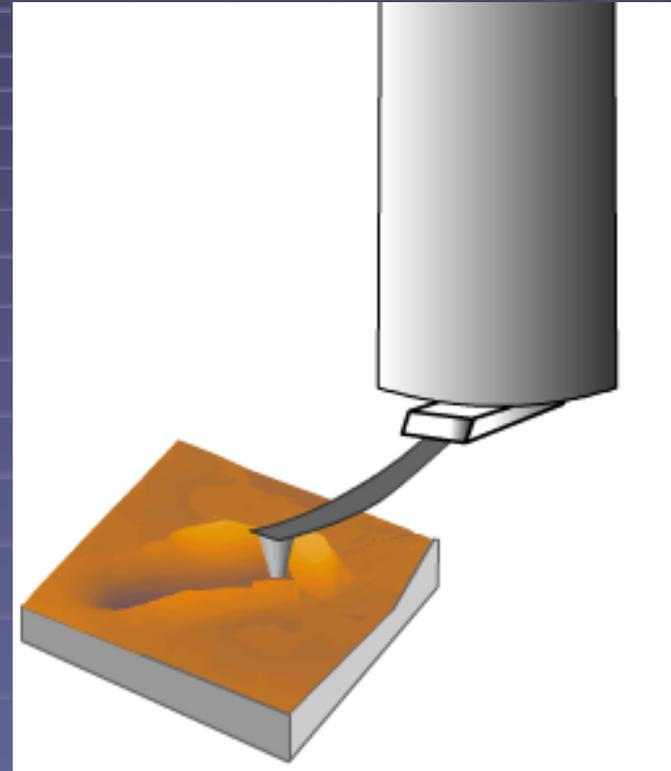
## Нанесение материалов

- обеспечивают однородную обработку неподвижных поверхностей большой площади;
- отсутствие электрических полей в области подложки, что особенно важно при нанесении диэлектрических пленок на подложки из проводящих материалов;

# Сканирующая зондовая литография

## Наногравировка

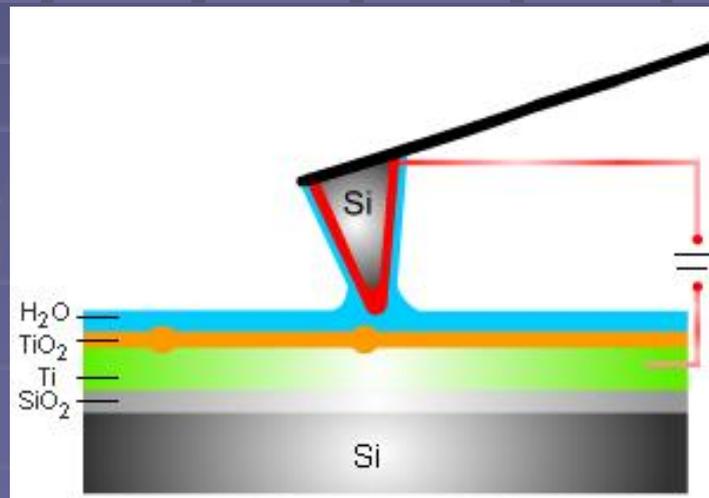
- При наногравировке зонд микроскопа перемещается по поверхности подложки с достаточно большой силой прижима, так что на подложке (или на лежащем на ней слое резиста) формируется рисунок в виде углублений
- Наногравировка была применена, например, для формирования мостиков из сверхпроводящих материалов, поверхностных квантовых ям .



# Сканирующая зондовая литография

## Импульсное воздействие

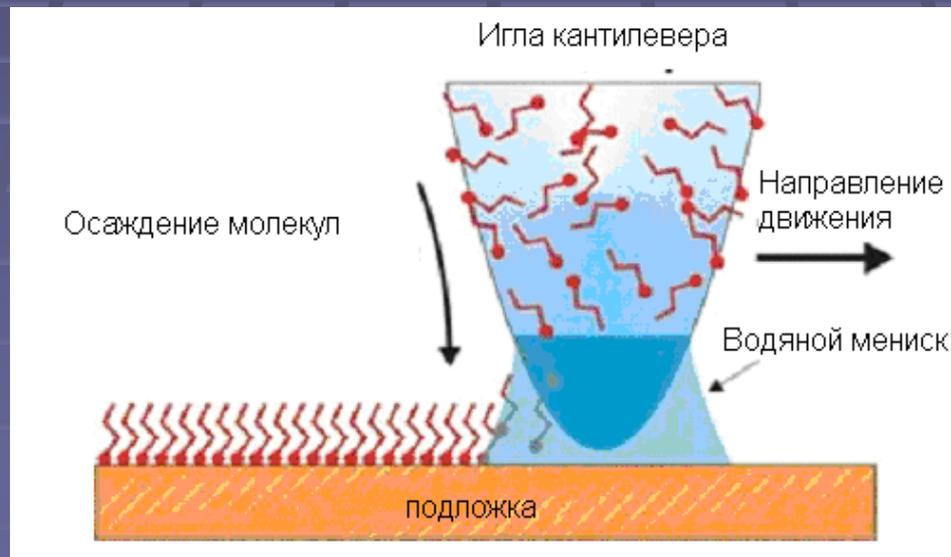
- С помощью импульсного воздействия можно изменять не только геометрические характеристики поверхности, но и ее локальные электрофизические свойства. Например, приложение электрического смещения к проводящему кантилеверу стимулирует протекание электрохимических процессов на поверхности непосредственно под образцом, при этом может происходить окисление металлических слоев.



# Сканирующая зондовая литография

## Осаждение молекул

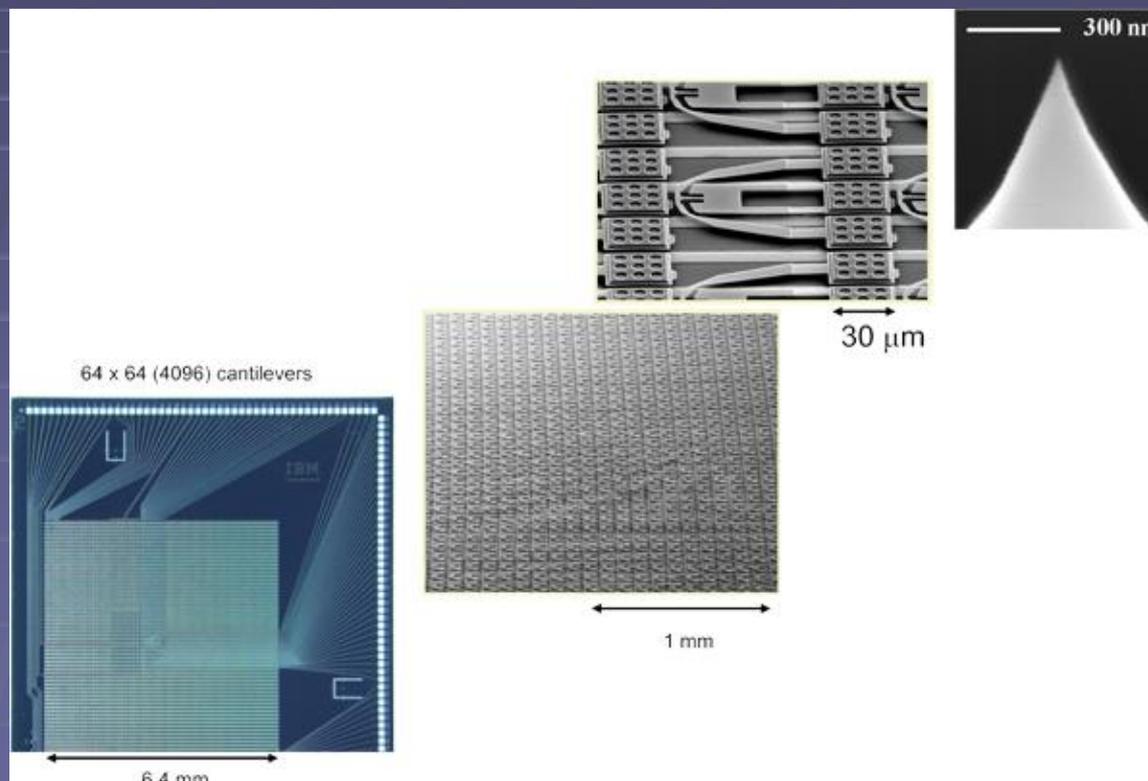
- Суть метода осаждения молекул (Dip Pen Lithography - DPL) заключается в том, что на кантилевер АСМ специальным образом наносится вещество (например, золото). Это вещество в рамках метода называют чернилами. Далее зонд подводится к поверхности образца и через водяной мениск молекулы вещества переносятся в необходимые точки поверхности.



# Сканирующая зондовая литография

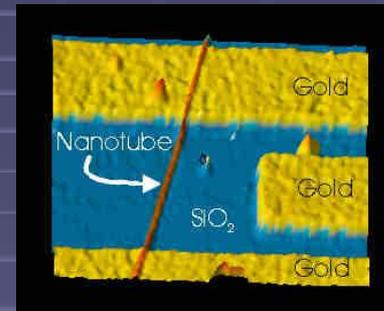
## Технологический анализ

- Очевидно, что проведение СЗЛ одним кантилевером на пластине займет огромное количество времени.
- Стандартное решение проблемы – распараллеливание операций.

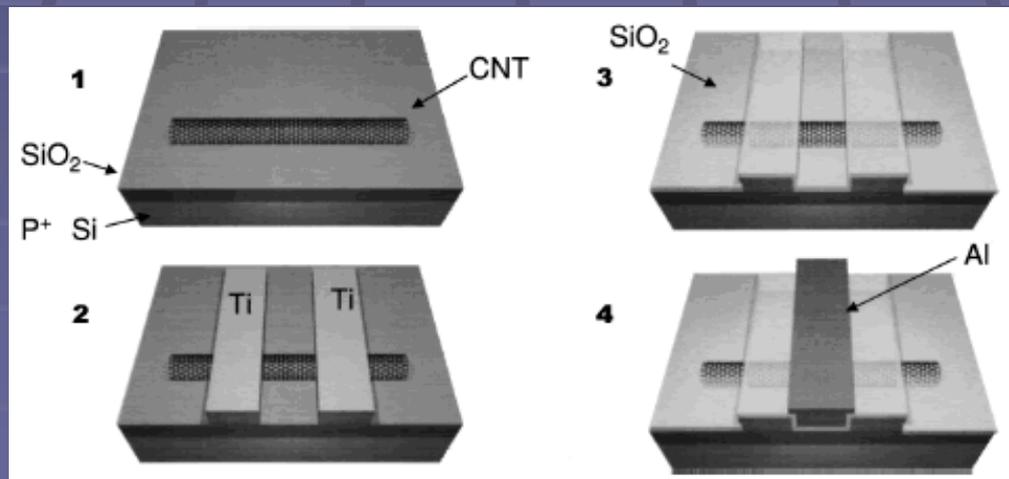


# Получение CNT-FET

- С затвором внизу

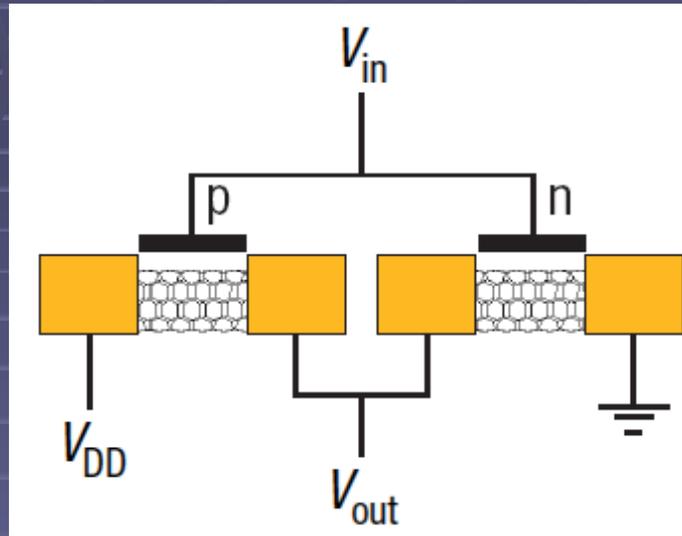


- С затвором сверху



# Нанoeлектронные устройства

## Инвертор

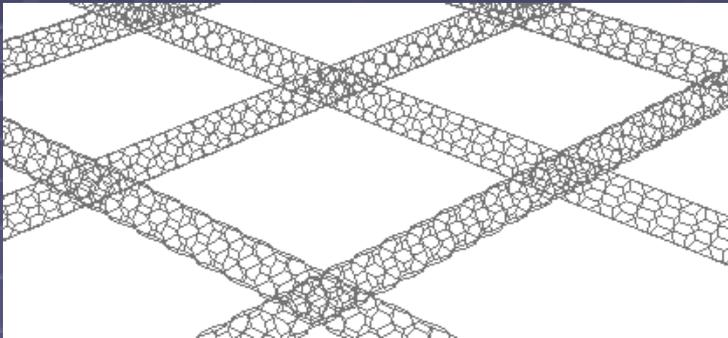


- Для создания инвертора необходимо два типа транзистора: с р-каналом и с n-каналом. Выращенные SWNT проявляют р-проводимость.
- Для превращения нанотрубок в полупроводники с n-проводимостью их необходимо легировать материалами – донорами электронов (щелочные металлы) – или термически обработать.

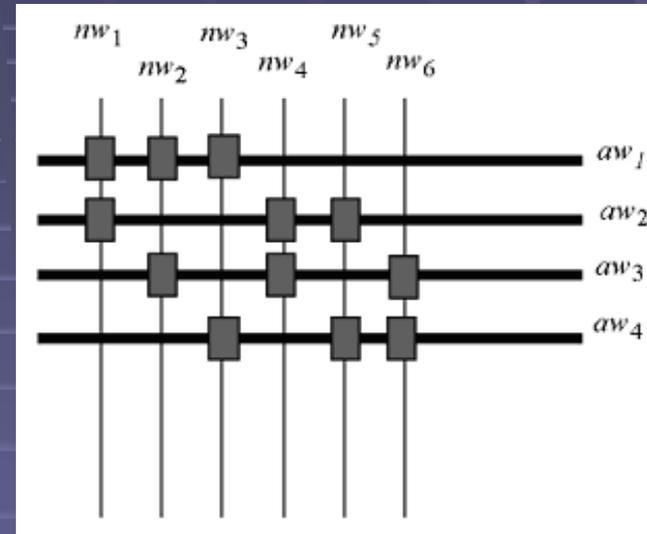
# Нанoeлектронные устройства

## Память

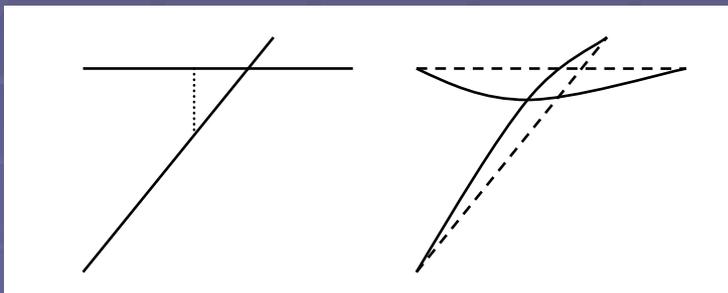
- Массив нанотрубок



- Адресация



- Физическое представление данных

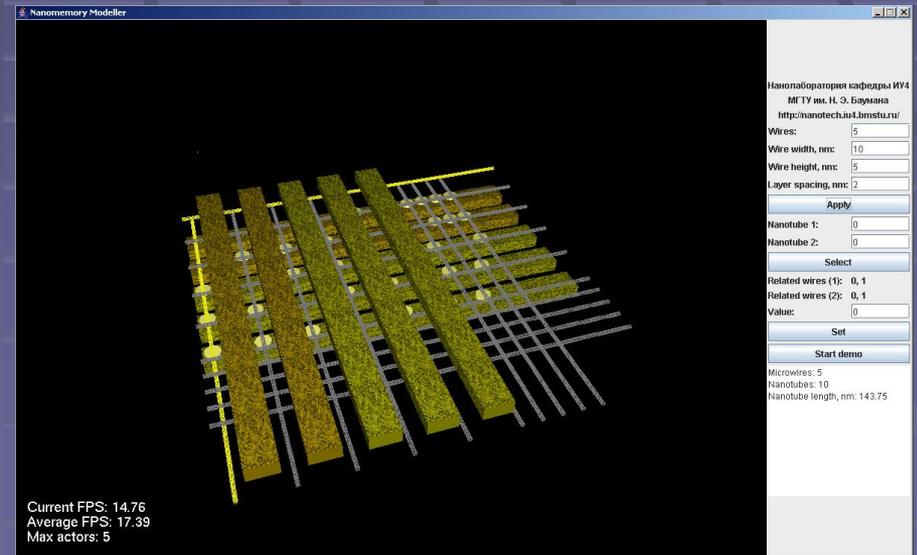
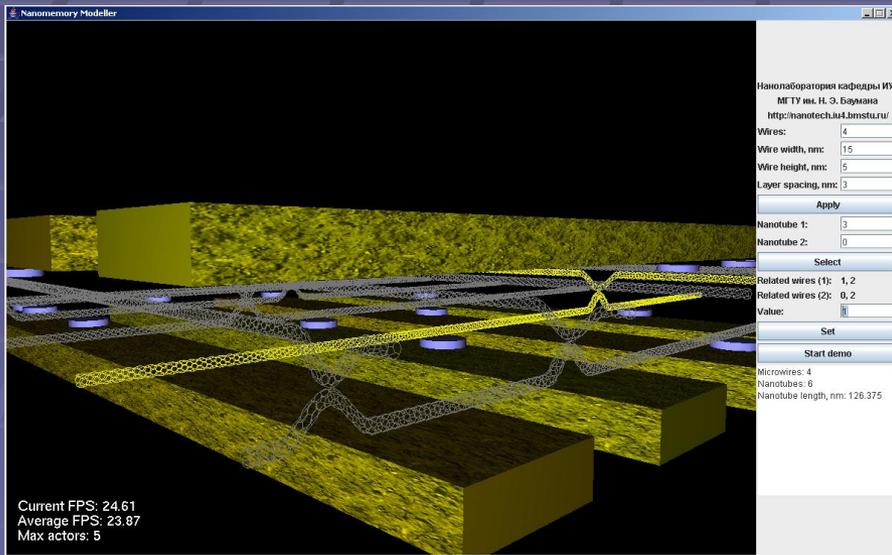


$$n = C_t^2 = \frac{t!}{2!(t-2)!} = \frac{t \cdot (t-1)}{2}$$

# Наноэлектронные устройства

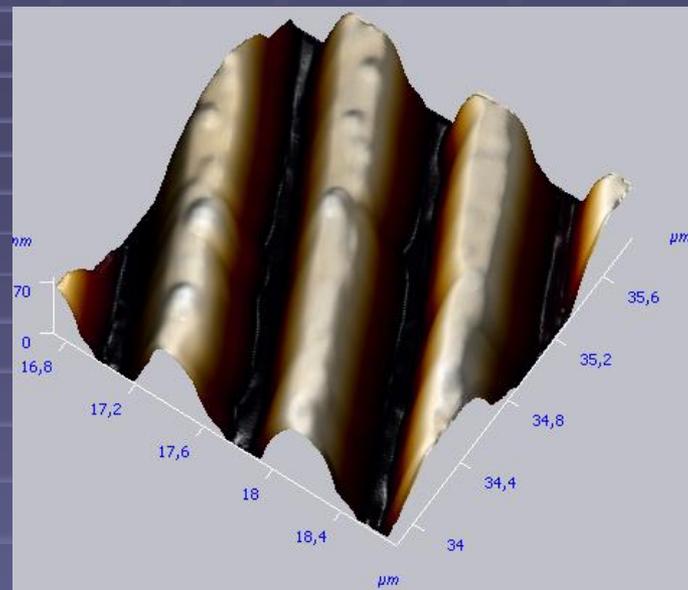
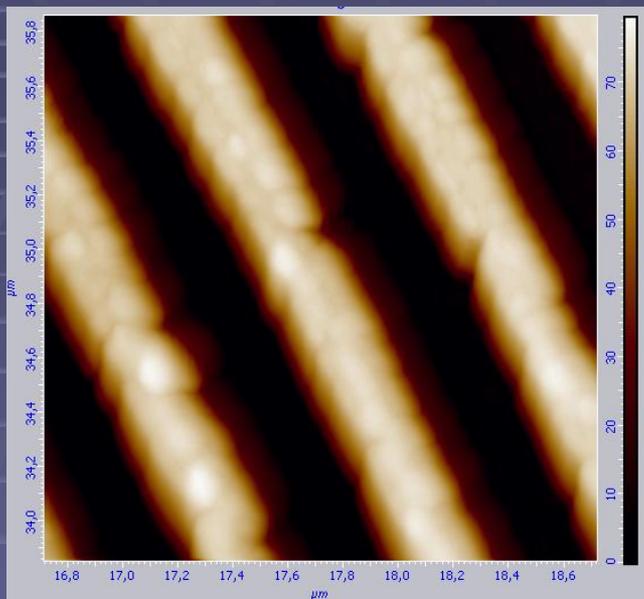
## Память

- Для моделирования ячеек нанопамати с произвольными параметрами была разработана программа Nanomemory Modeller.
- Смоделирована ячейка памяти объемом в 100 бит (10 на 10 нанотрубок).
- Предполагаемые размеры ячейки – 320 x 320 x 40 нм. Малые размеры ячейки позволяют хранить 1 Гб памяти на площади 8,8 кв. мм.



# Исследование применимости ИЛО

## Получение решетки на Si-подложке

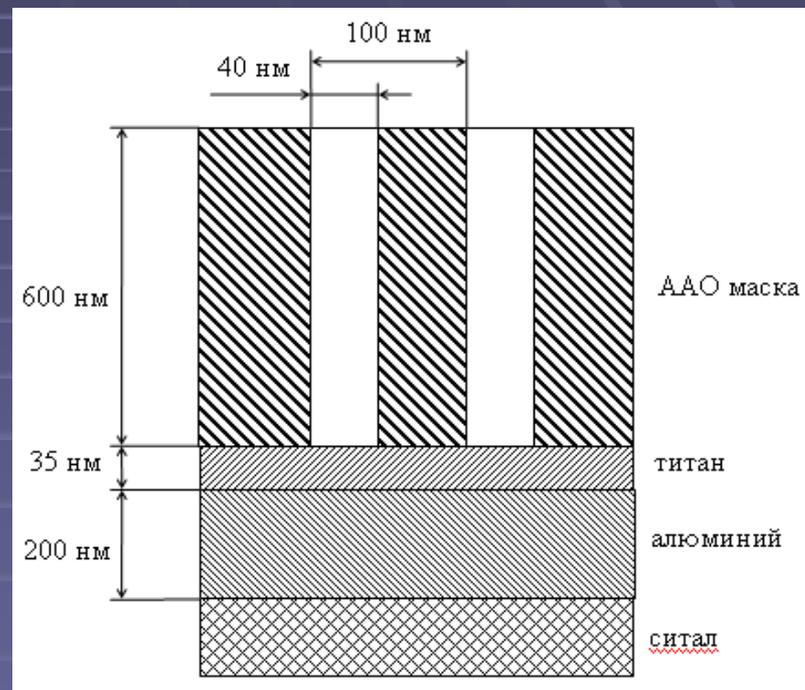
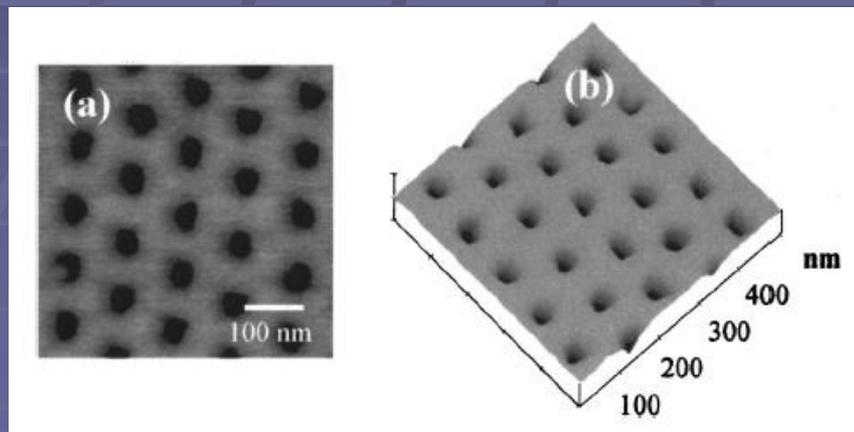


- Внешний слой  $\text{SiO}_2$  кремниевой подложки подвергали воздействию пучка ионов  $\text{CF}_4$  через маску из резиста, которую затем удаляли РИЛТ с кислородом в качестве рабочего газа.
- В результате была сформирована решетка с периодом 700 нм и высотой выступов 60 нм

# Исследование применимости ИЛО

## Формирование массива нанопор

- Осуществляется процесс реактивного травления. Рабочее вещество -  $\text{CF}_4$ .
- Производится травление слоя Ti структуры Ti-Al на сапфировой подложке
- В результате получается массив из нанопор диаметром 50 нм



# Технология создания CNT-FET

- Ионно-лучевая обработка
  - Травление или осаждение для получения металлических контактов (Al, Au)
  - Осаждение полимеров для формирования слоя подзатворного диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ )
- Химическое осаждение из газовой фазы
  - CoMoCat для получения SWNT из паров CO
- Термическая обработка
  - Выдержка при высоких температурах для создания CNT с n-типом проводимости
- Сканирующая зондовая литография
  - Dip Pen Lithography для позиционирования CNT

# Нерешенные вопросы

- Модель CNT-FET, учитывающая влияние барьеров Шоттки
- Исследование частотных свойств CNT-FET
- Особенности high-k подзатворных диэлектриков
- Разработка ТП нанoeлектроники для создания спроектированных инвертора и ячейки памяти.
- Экспериментальное исследование работы цифровых нанoeлектронных устройств
- Применимость явления самоорганизации для повышения производительности ТП нанoeлектроники
- Исследование нанотрубок в форме буквы Y и T