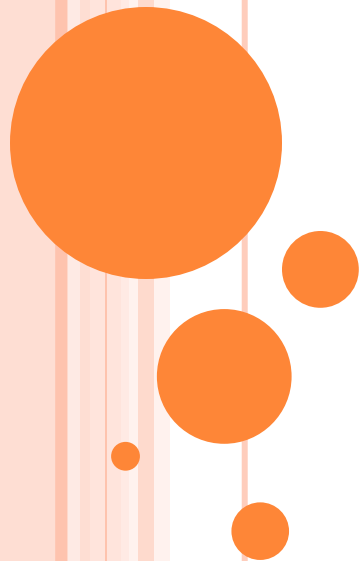
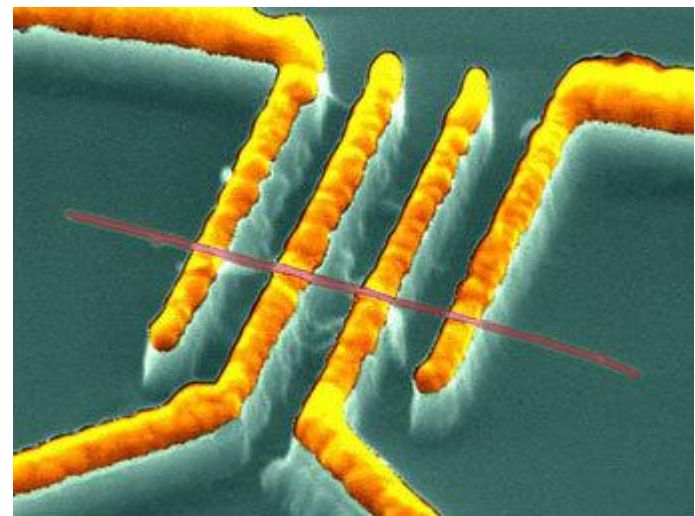


# НАНОЭЛЕКТРОНИКА



## **Лекция 3.**

### **Нанотранзисторные структуры. Углеродные наноструктуры. Одноэлектроника.**



# Новые технологии

silicides – like  $\text{Cu}_5\text{Si}$ ,  $(\text{V,Cr,Mn})_3\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{Mn}_3\text{Si}$ , Hf and Th silicides, KSi, RbSi, CsSi etc.

USJ – ultra-shallow junction

FUSI – Fully Silicided technology

## Преимущества миниатюризации:

- увеличивается быстродействие элементов
- уменьшается потребляемая энергия
- уменьшается выделяемое тепло
- увеличивается степень интеграции, т.е. увеличивается функциональность при одинаковых внешних размерах микросхемы

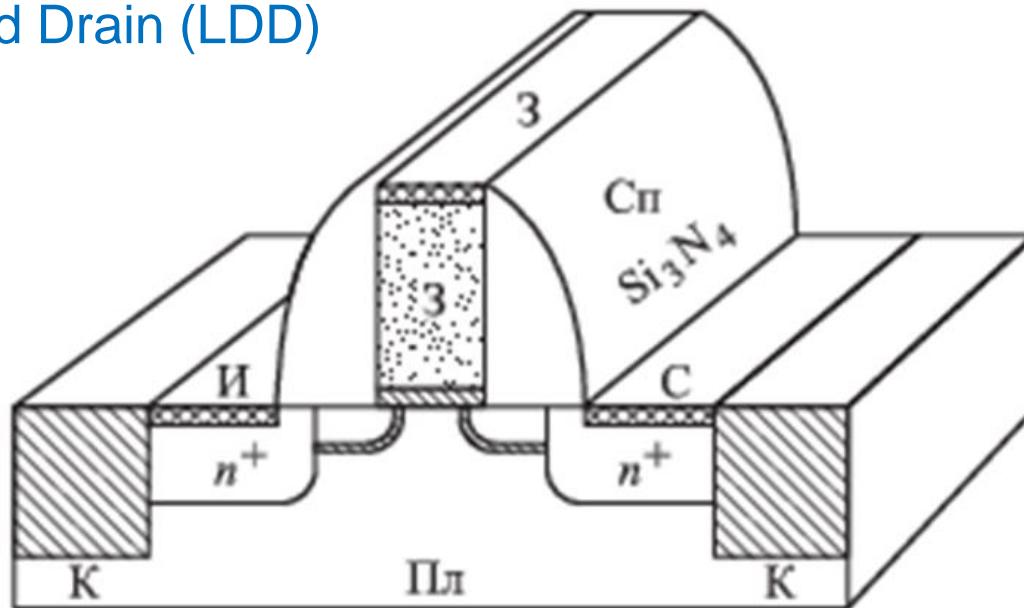


## Проблемы миниатюризации:

- полностью изменяются физические принципы работы элементов интегральных схем
- уменьшаются значения токов и напряжений
- увеличивается количество межсоединений на единицу площади
- усложняется способ отбора рассеиваемого тепла

# Полевой транзистор: от микро- к нано

## Lightly Doped Drain (LDD)



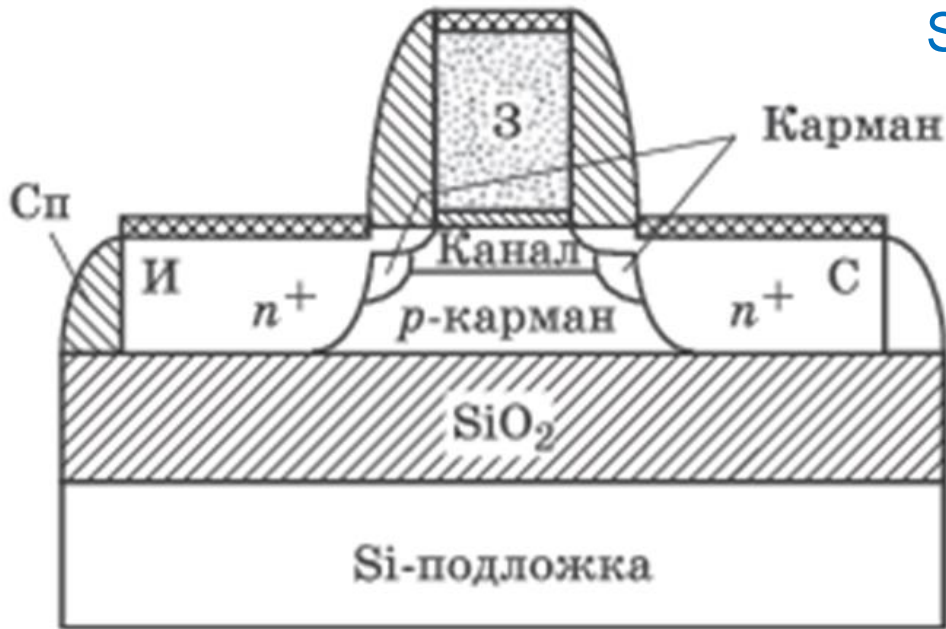
Структура МОП-транзистора со слаболегированными LDD-областями: И — исток, С — сток, Пл — подложка из  $p\text{-Si}$ , З — затвор, К — канавка, Сп — спейсер  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Уменьшение длины канала позволяет:

- снизить напряжённость электрического поля в канале
- уменьшить энергию электронов
- уменьшить эффект модуляции длины канала
- повысить напряжение инжекционного и лавинного пробоя

# Полевой транзистор: от микро- к нано

## Silicon On Insulator (SOI)



Структура  
КНИ-транзистора: Сп —  
спейсер, Z — затвор,  
И — исток, С — сток

### Особенности:

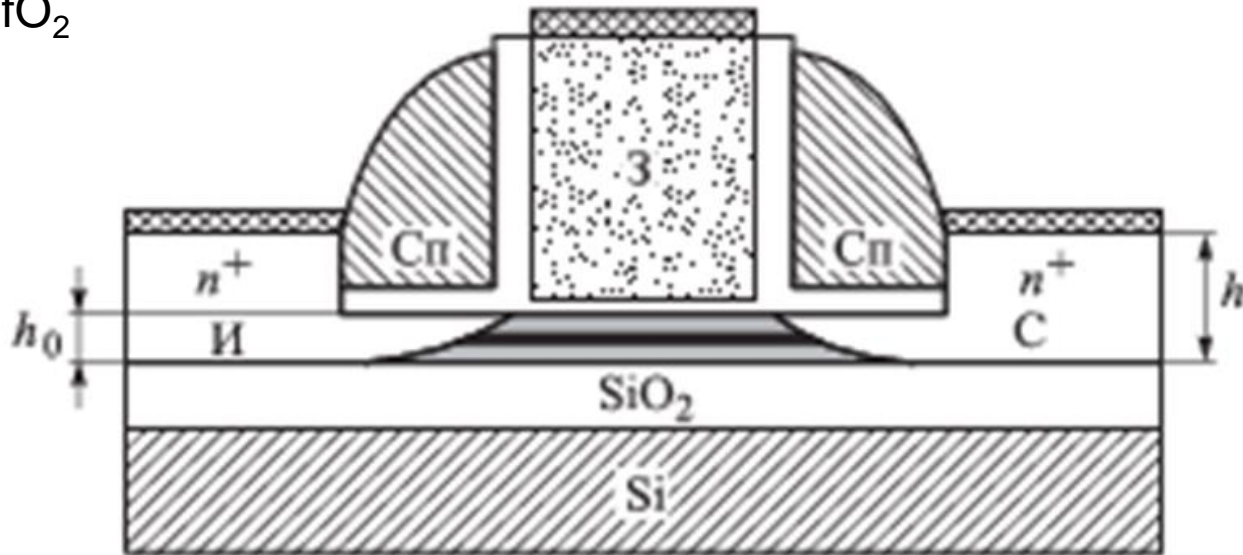
- малая величина электрического поля в инверсионном слое
- высокая проводимость канала
- уменьшено влияние короткоканальных эффектов

# Полевой транзистор: от микро- к нано

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

High-k SOI

ZrO<sub>2</sub> ; HfO<sub>2</sub>

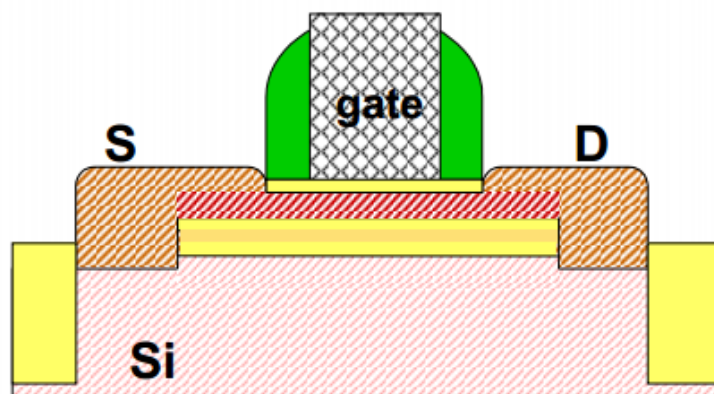
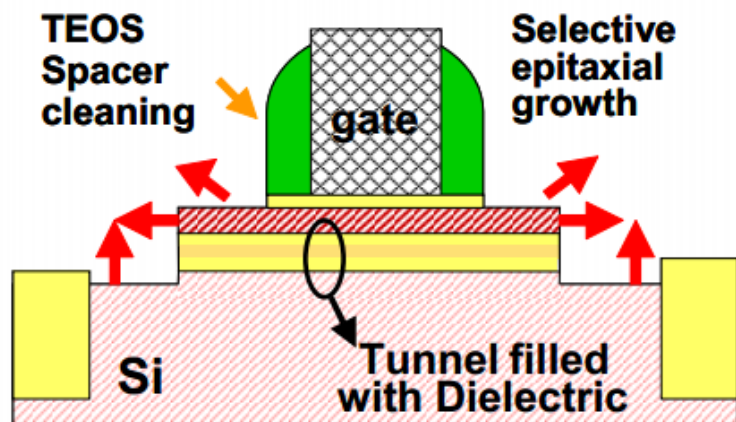
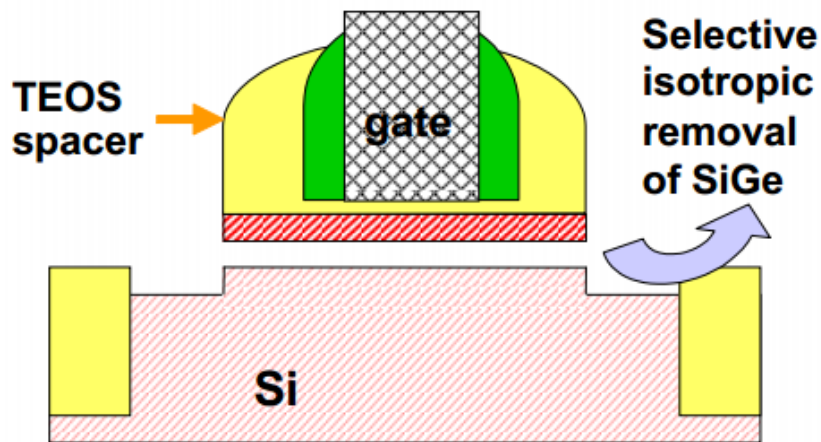
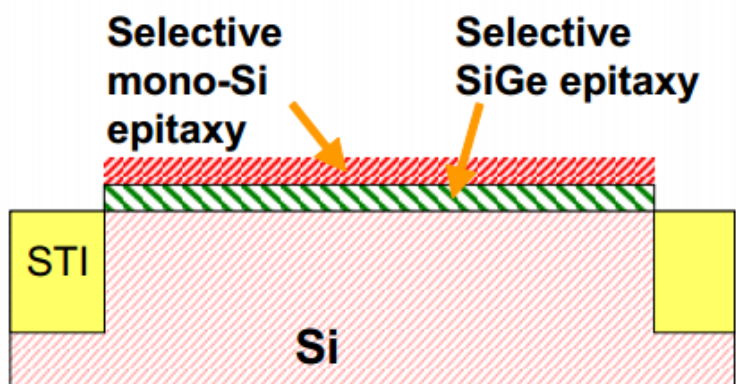
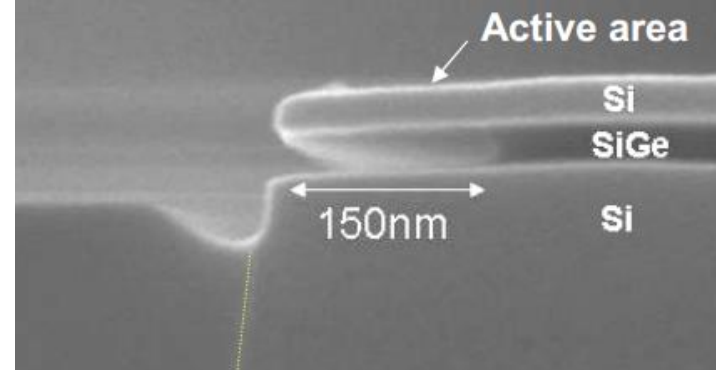


*Особенности:*

- малые рабочие токи
- высокая радиационная стойкость

# Полевой транзистор: от микро- к нано

SON – Silicon on nothing

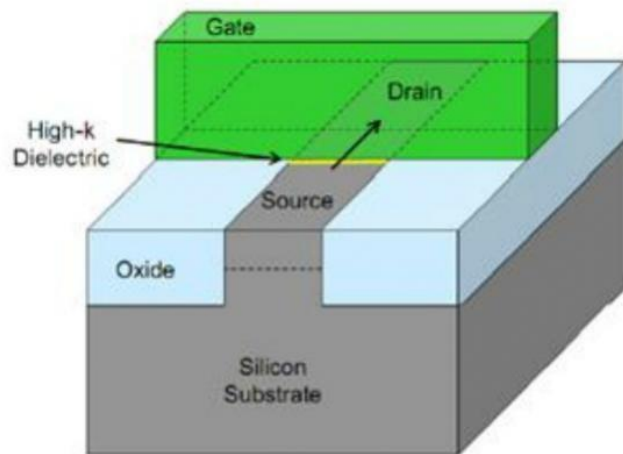




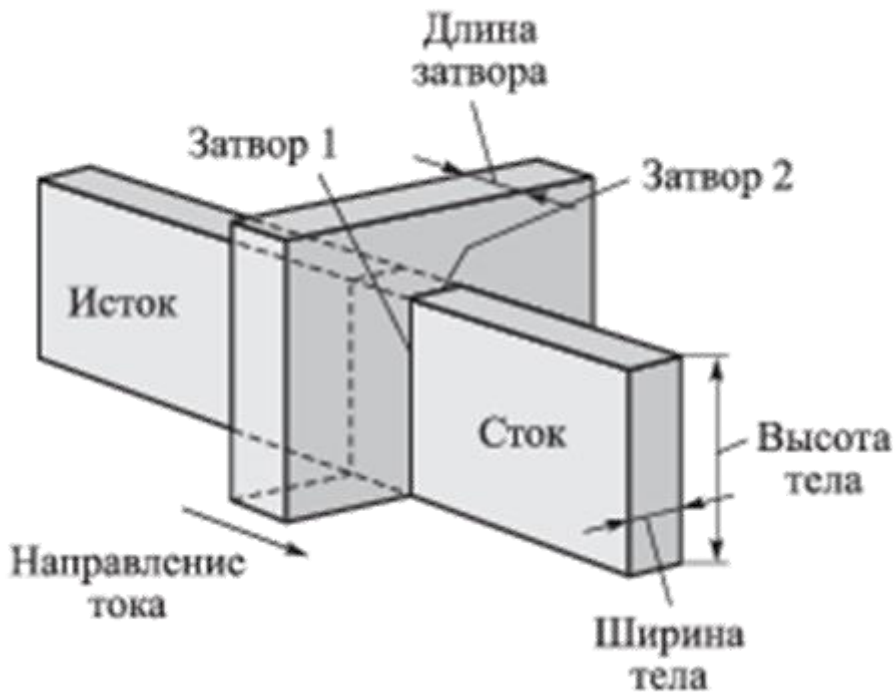
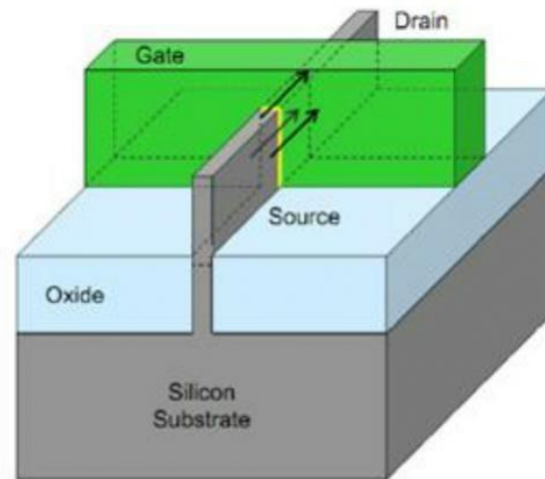
# Полевой транзистор: от микро- к нано

## FinFET

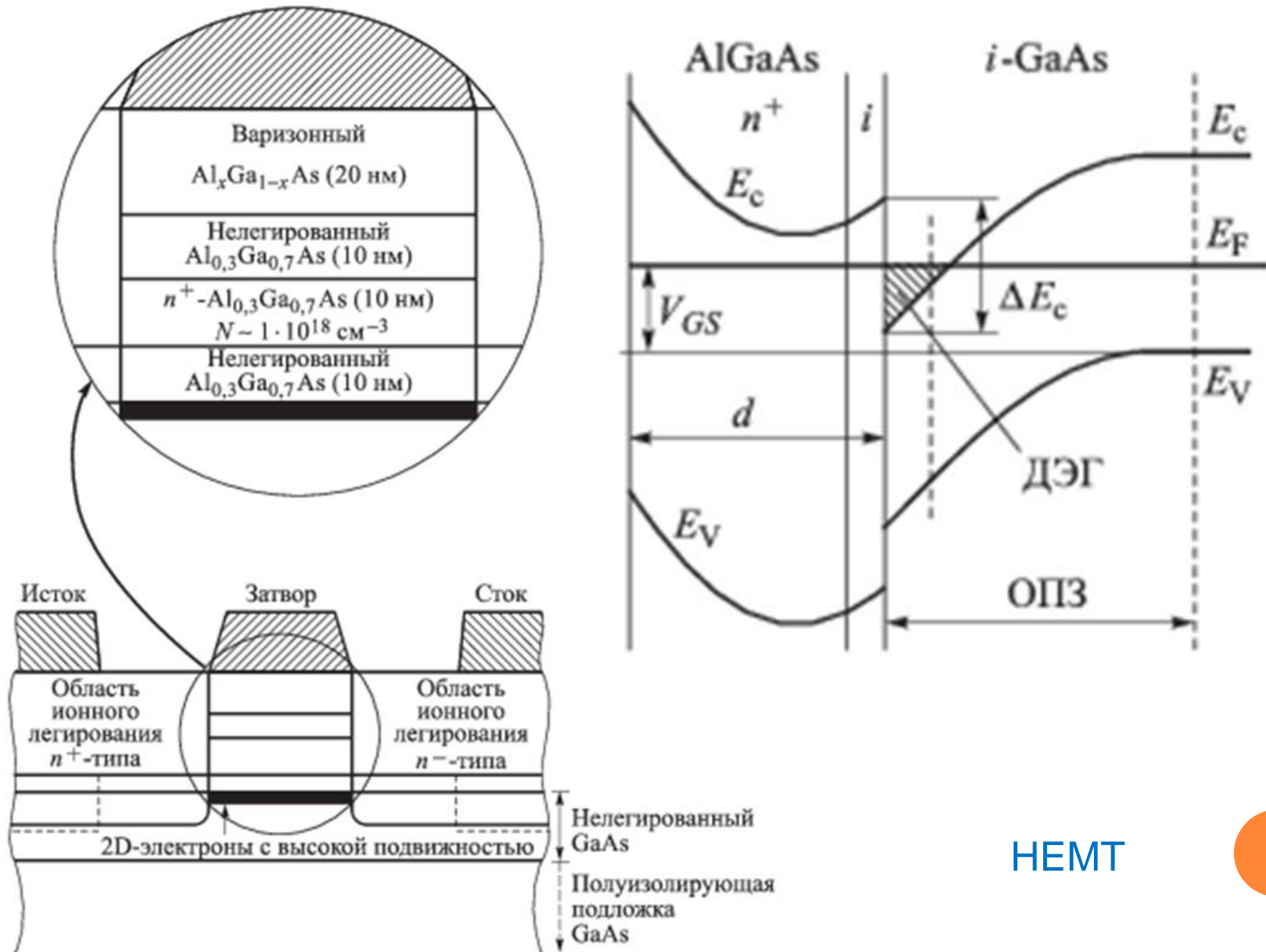
### Traditional Planar



### 3D FinFET



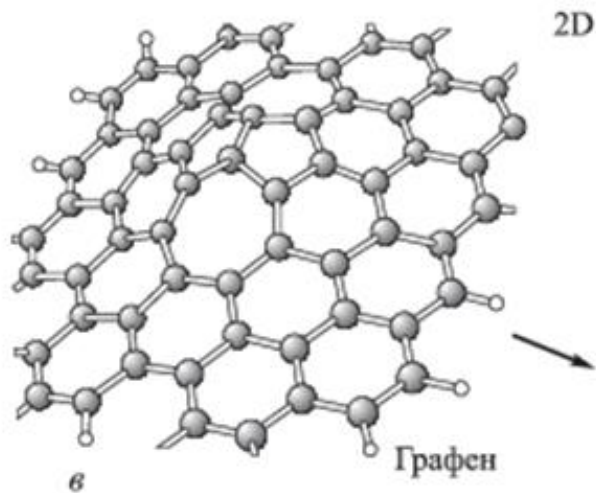
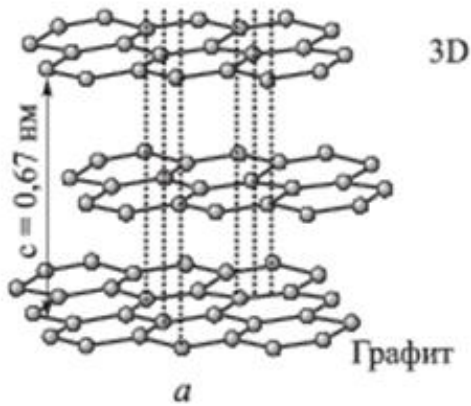
# Полевой транзистор с гетеропереходом



HEMT



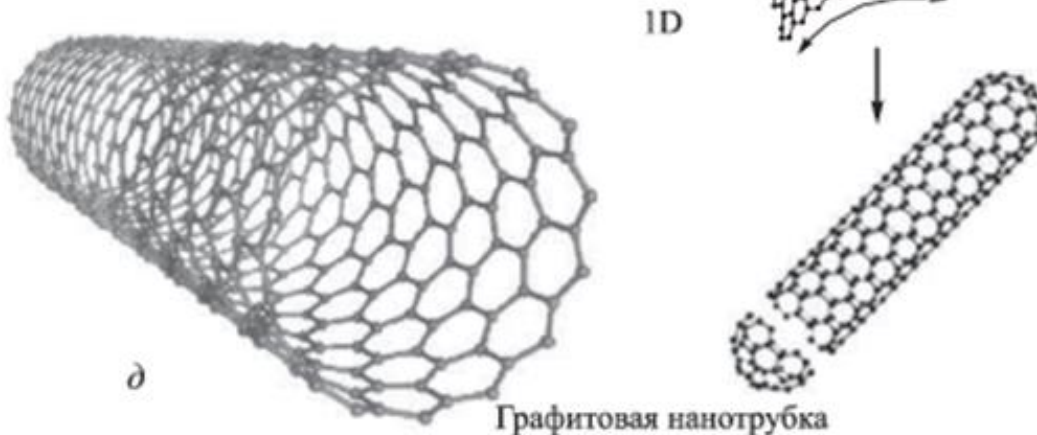
# Углеродные структуры



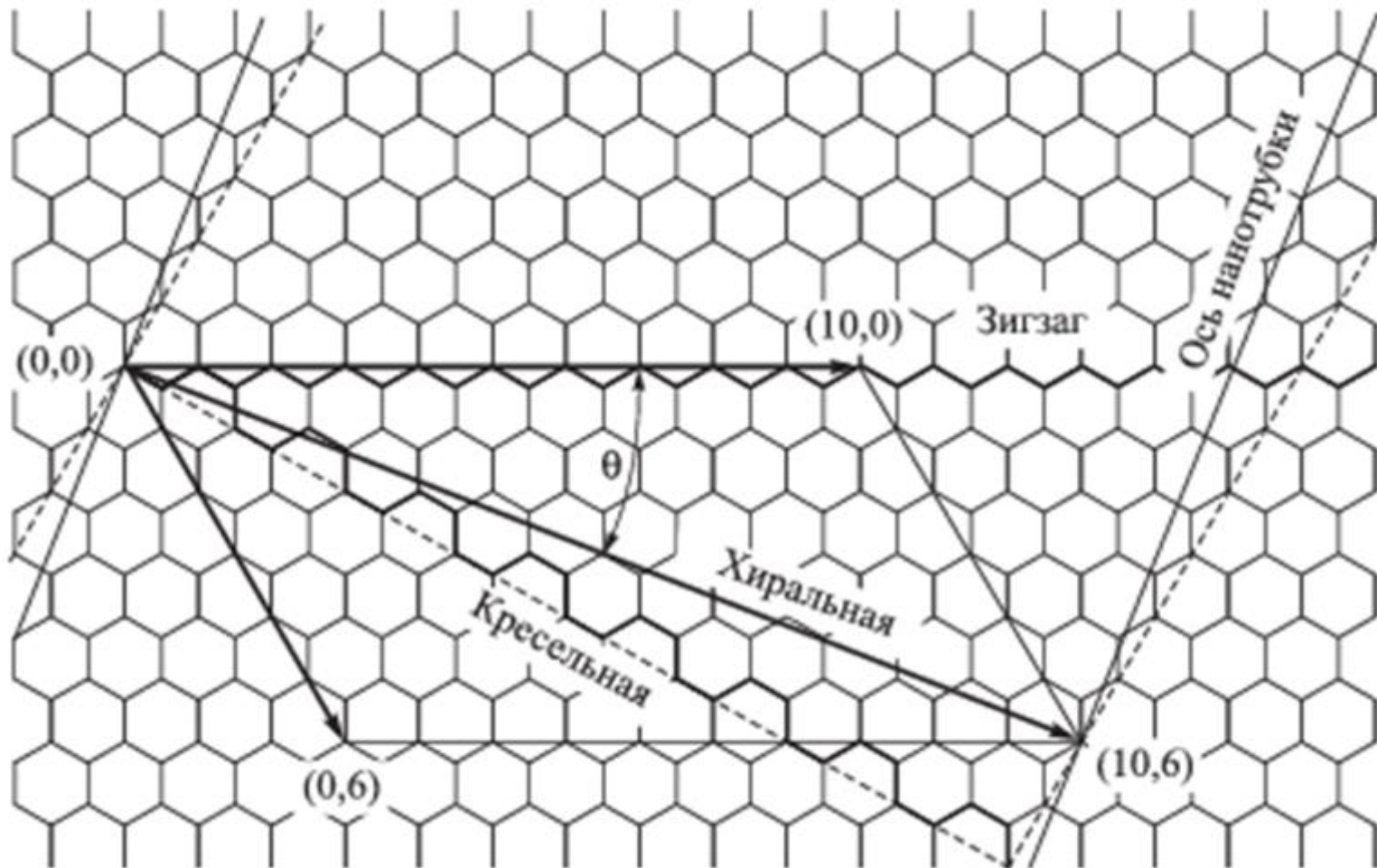
Удельное сопротивление графита:

Латеральное  $4.4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$   
тангенциальное  $0.17 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

Удельное сопротивление слоя графена:  
 $\sim 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

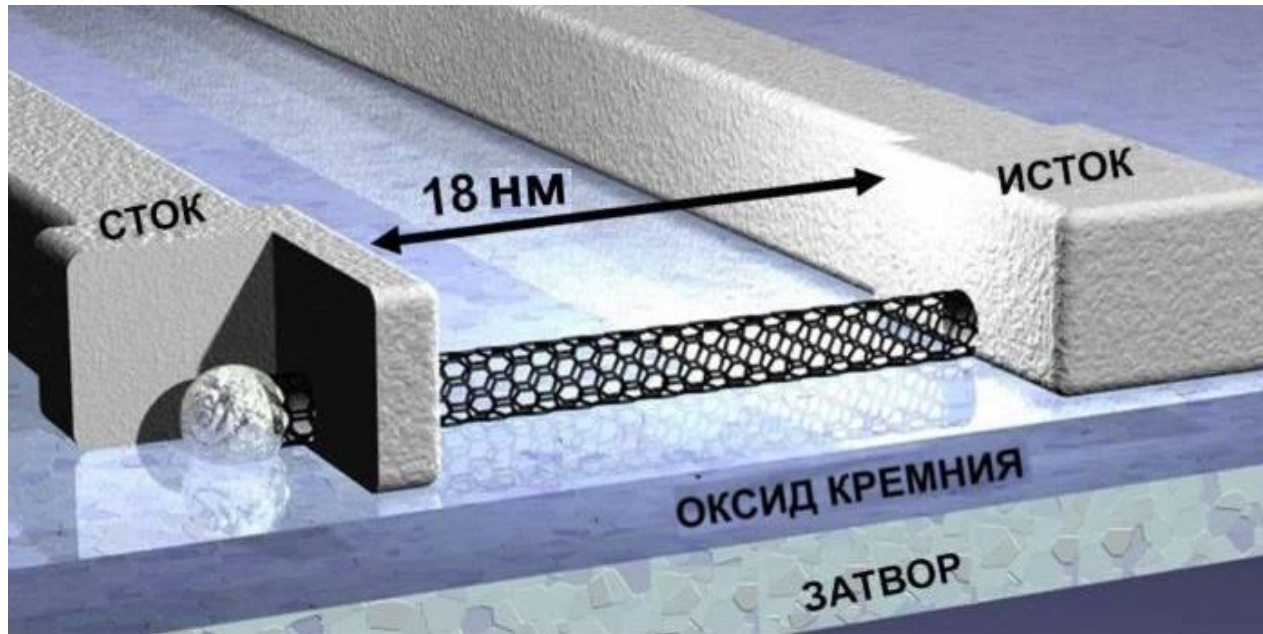


## Нанотранзисторы: на основе углеродных нанотрубок



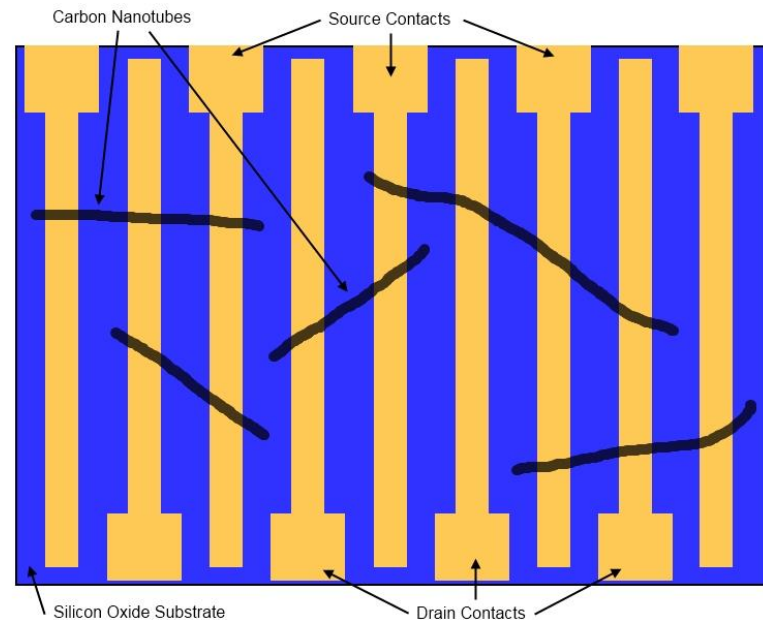
Если  $n - m$  кратна 3, то нанотрубка обладает металлическим типом проводимости, иначе – полупроводниковым (чем меньше диаметр нанотрубки, тем больше ширина запрещённой зоны)  
Электрон проходит через нанотрубку без рассеяния на фононах и без выделения джоулева тепла.

# Нанотранзисторы: на основе углеродных нанотрубок

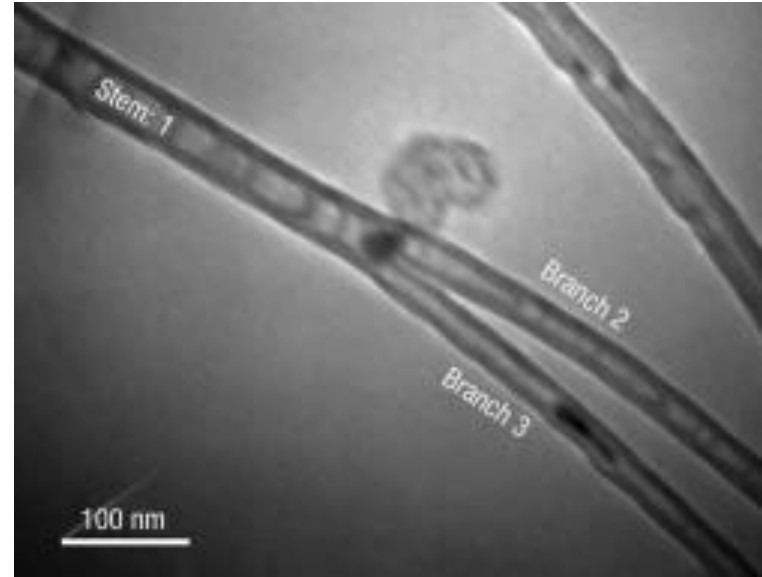
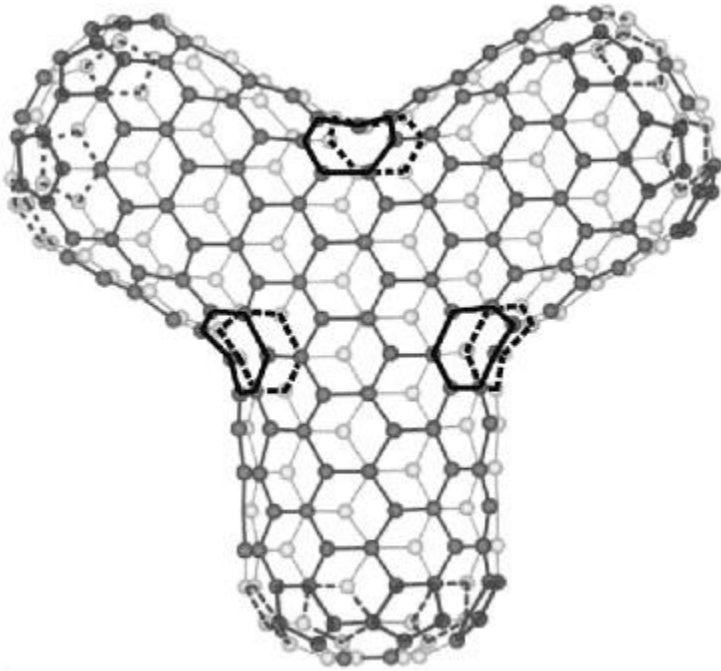


2004 г.

Ожидаемый частотный диапазон  
– до 1 ТГц.  
Подвижность электронов в  
нанотрубке  $\sim 10^4$  см<sup>2</sup>/(В·с)



# Нанотранзисторы: на основе углеродных нанотрубок



Искусственная нейронная сеть?

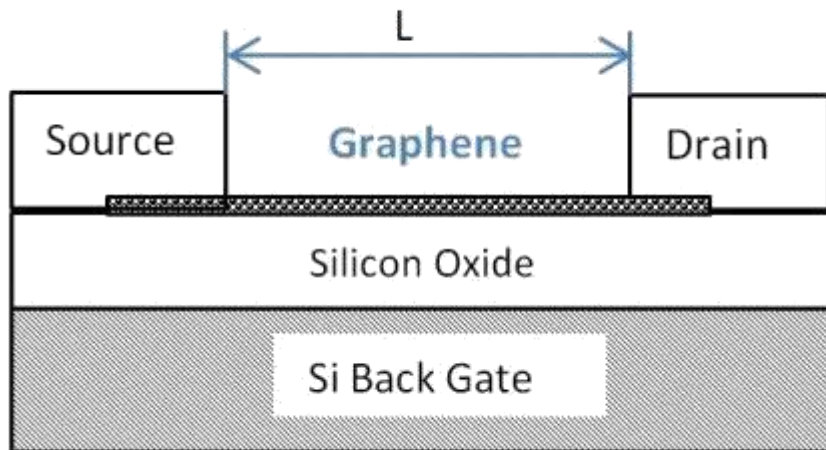
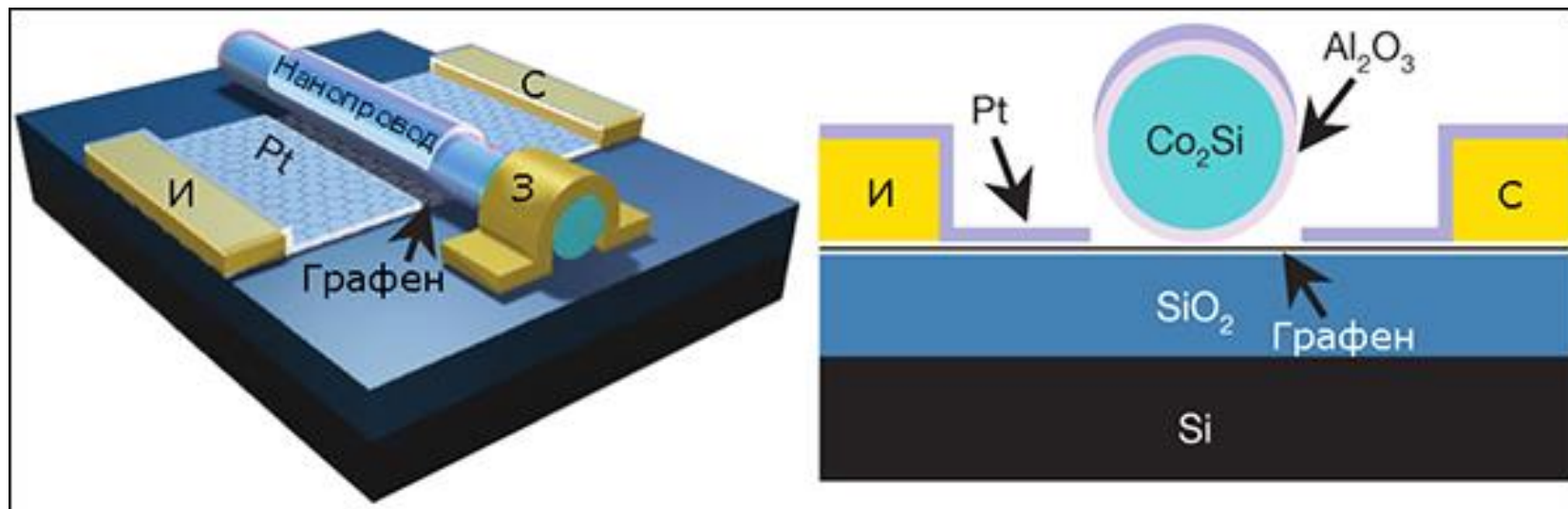


Эффект ключа:  
при прикладывании отрицательного напряжения к "стволу" нанотрубки, протекание электронов от одной ветви к другой прекращается

2005 г.

12

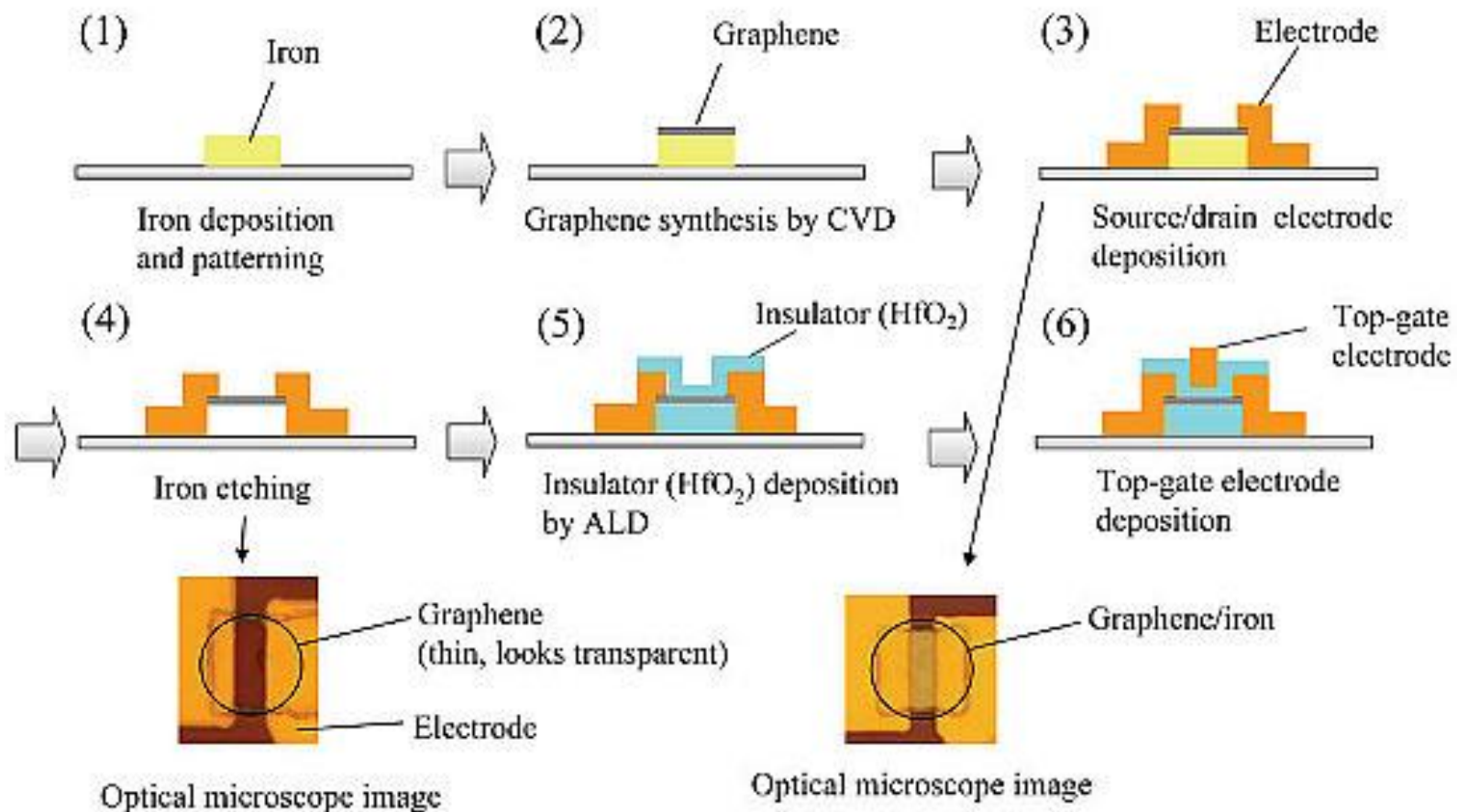




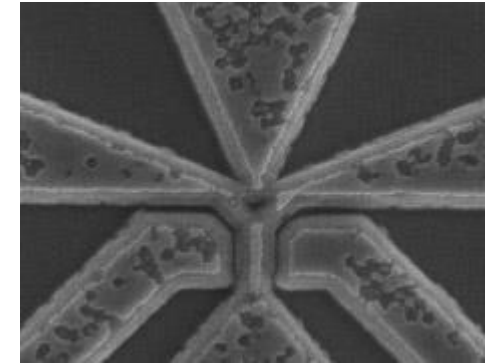
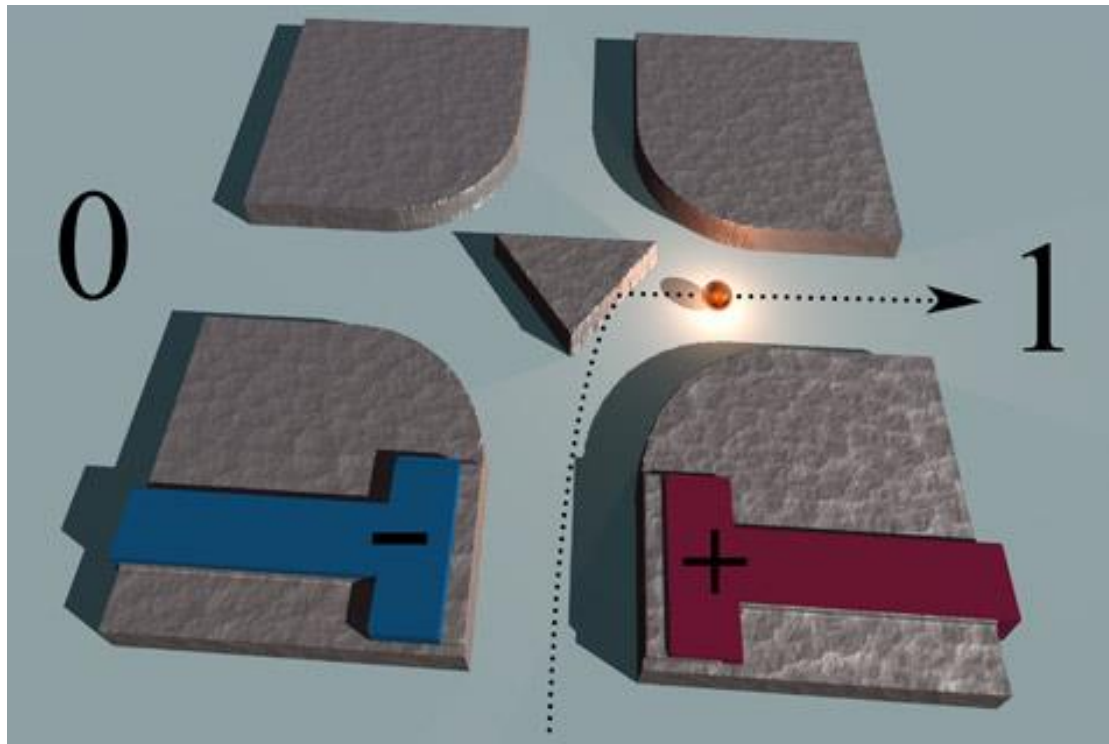
Длина канала 140 нм,  
предельная частота 300 ГГц



# Нанотранзисторы: на основе графена

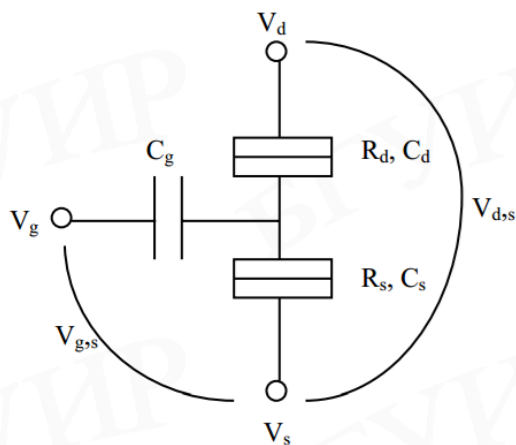
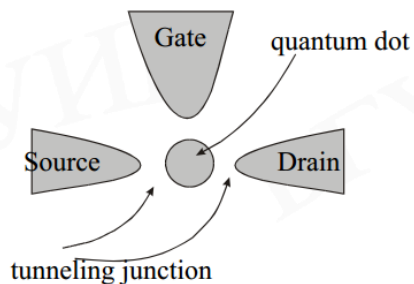


# Нанотранзисторы: баллистический транзистор



В основе прибора – полупроводниковый материал, в котором электроны находятся в состоянии двумерного электронного газа. Внутри этого полупроводника электроны движутся без столкновений с атомами примесей

# Одноэлектронный транзистор: принцип



Эффект **дискретного одноэлектронного тунnelирования** состоит в том, что в переходах с малой собственной ёмкостью  $C$  в результате тунnelирования одиночного электрона изменяется напряжение на туннельном переходе на величину  $\Delta V = e / C$ .

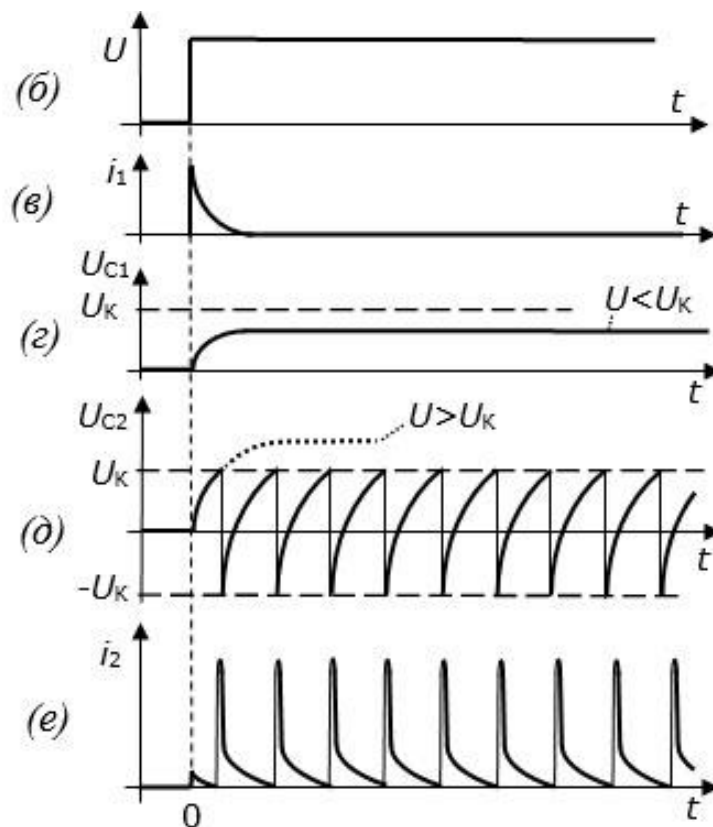
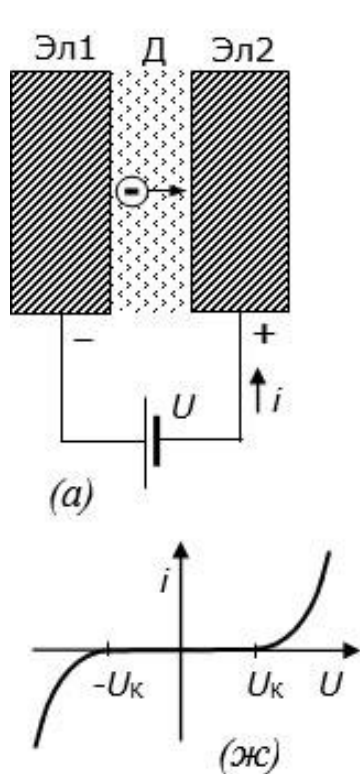
Эффект **кулоновской блокады** – электрон на квантовой точке блокирует переход других электронов.

$$E_e = \frac{e^2}{2C} \gg kT$$

Для наблюдения эффекта ёмкость  $C$  должна быть  $\ll \frac{e^2}{2kT}$ .

Это  $2 \cdot 10^{-16}$  Ф при 4.2 К и  $3 \cdot 10^{-18}$  Ф при 300 К

# Одиночный переход: одноэлектронные колебания

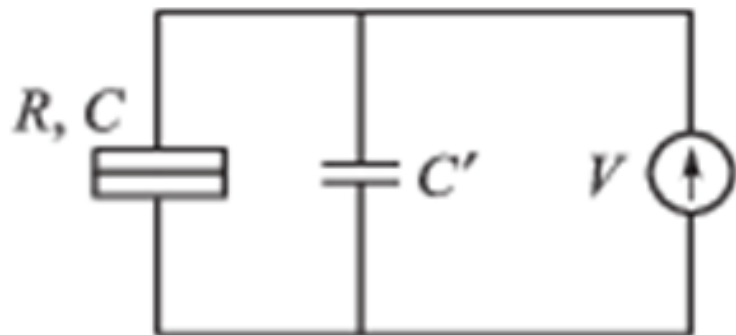


Зависимость тока, протекающего через квантовую точку (или напряжения на ней при постоянном токе) носит осциллирующий характер. Зарядом на квантовой точке можно управлять с помощью затворного электрода, который располагают вблизи квантовой точки.

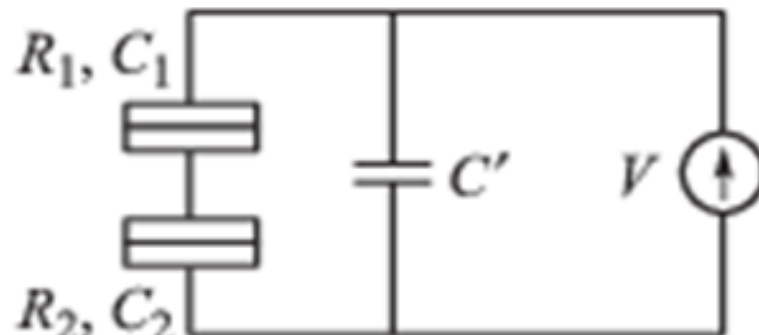
Длительность импульсов можно оценить из соотношения неопределённостей:

$$\Delta E \cdot \tau \gg \hbar, \text{ где } \tau = RC$$

## Одноэлектронный транзистор: кулоновская лестница



а



б

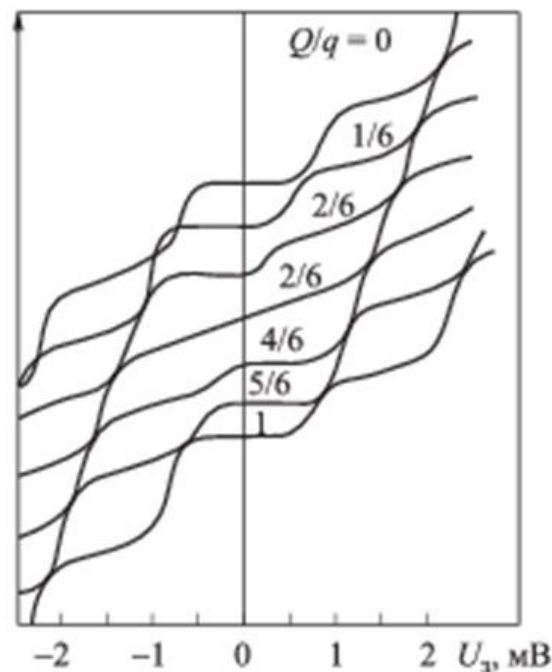
Эквивалентная схема (а) туннельного перехода;  
(б) частица между двумя туннельными переходами (наноостровок).  
 $C'$  – паразитная ёмкость.

Темп туннелирования через первый переход:

$$T_1 = \frac{E_1}{e^2 R_1}, \text{ где } E_1 = eV_1 - \frac{e^2}{2C_1}$$

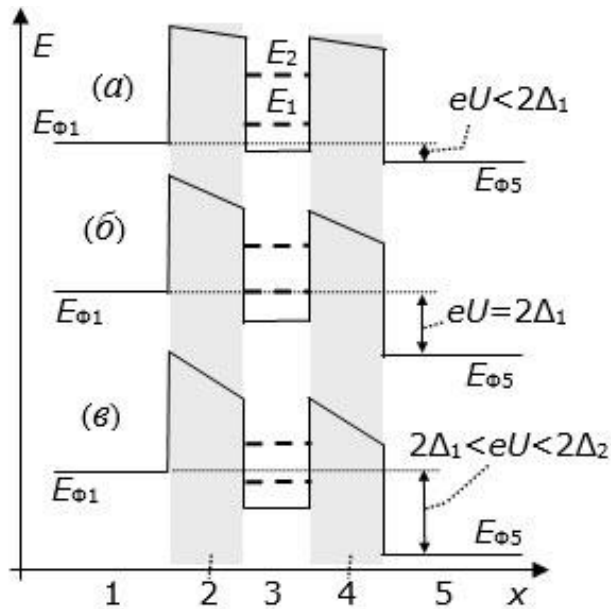
Аналогичное выражение можно записать для второго перехода.

«Кулоновская лестница» (расчёт) – ступеньки будут тем ярче выражены, чем несимметричнее переходы.

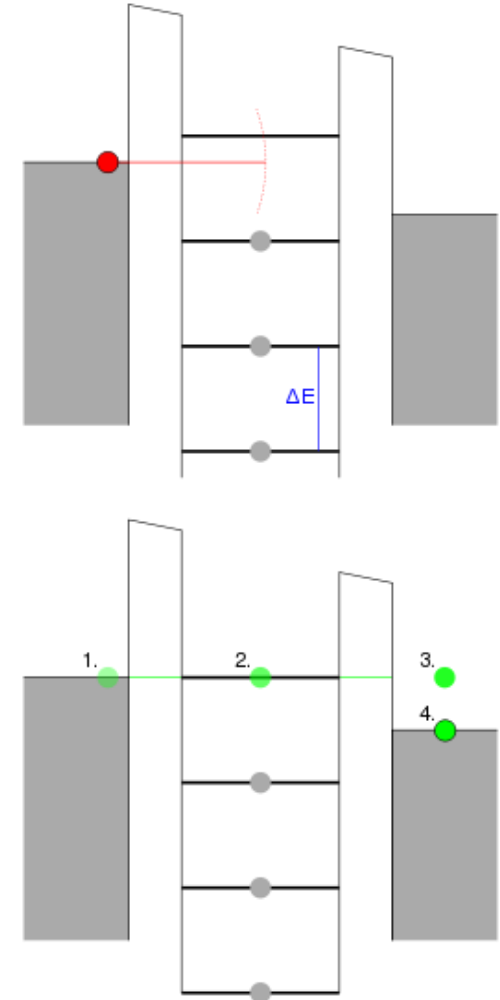
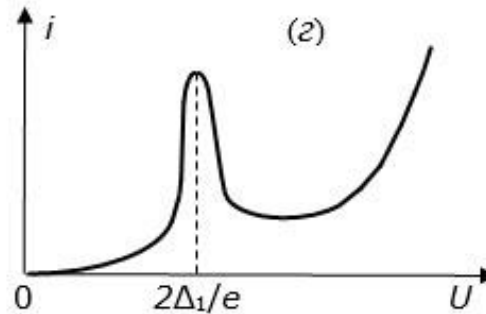




# Низкоразмерная структура и резонансное туннелирование



$$\Delta_1 = E_1 - E_{\Phi 1}$$



Слева – энергетическая диаграмма двойного туннельного барьера с квантово-размерной центральной областью: а) при  $eU < 2\Delta_1$ ; б) при  $eU = 2\Delta_1$ ; в) при  $2\Delta_1 < eU < 2\Delta_2$ . Справа (г) – ВАХ такой структуры

При туннельном переходе энергия электрона не изменяется!

# Кремниевый одноэлектронный МОП-транзистор

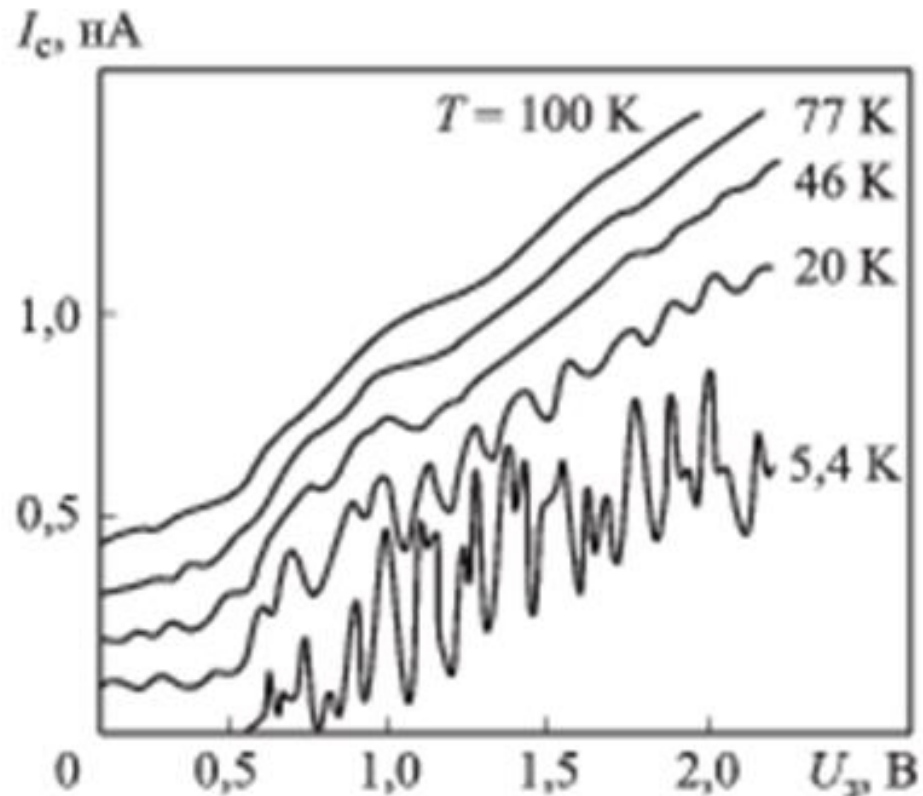


Кремниевый одноэлектронный транзистор с двумя затворами и одиночной квантовой точкой.

# Одноэлектронный КНИ-транзистор



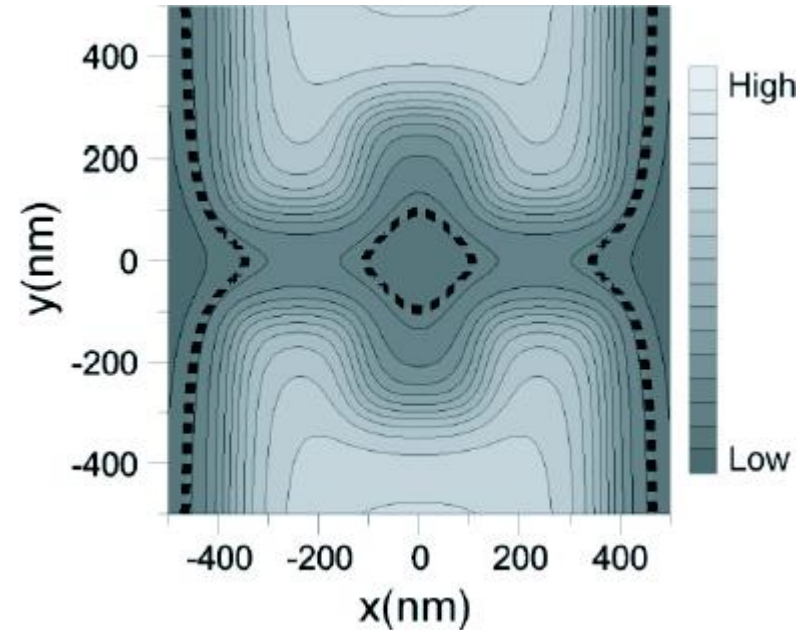
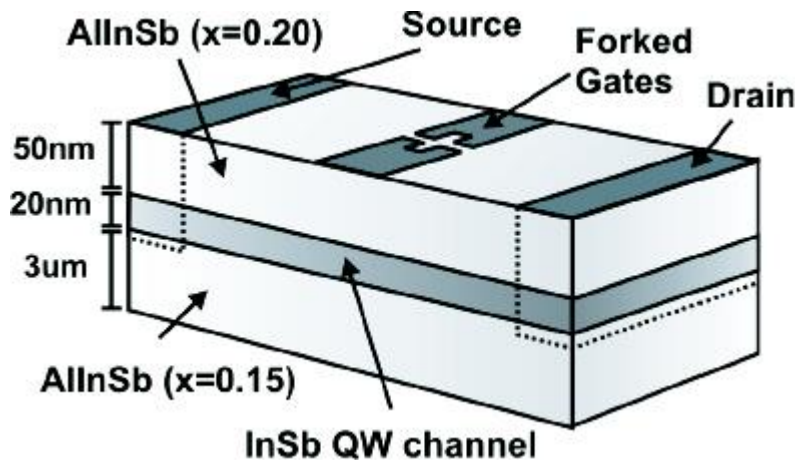
*a*



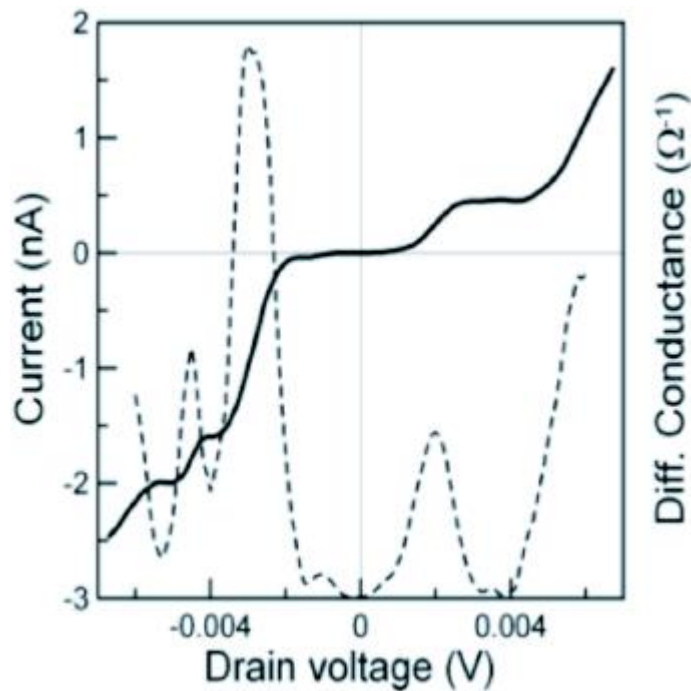
*б*

В зависимости от нужного типа проводимости исток, сток и канал изготовлены из кремния n- либо p-типа. Затвор выполнен из поликремния. Энергопотребление  $\sim 10^{-10} \dots 10^{-12}$  Вт.

# Одноэлектронные транзисторы на гетероструктурах

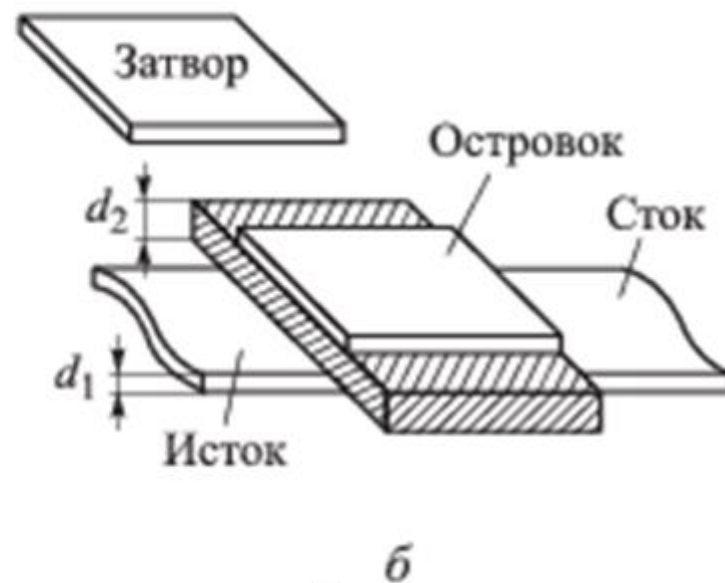
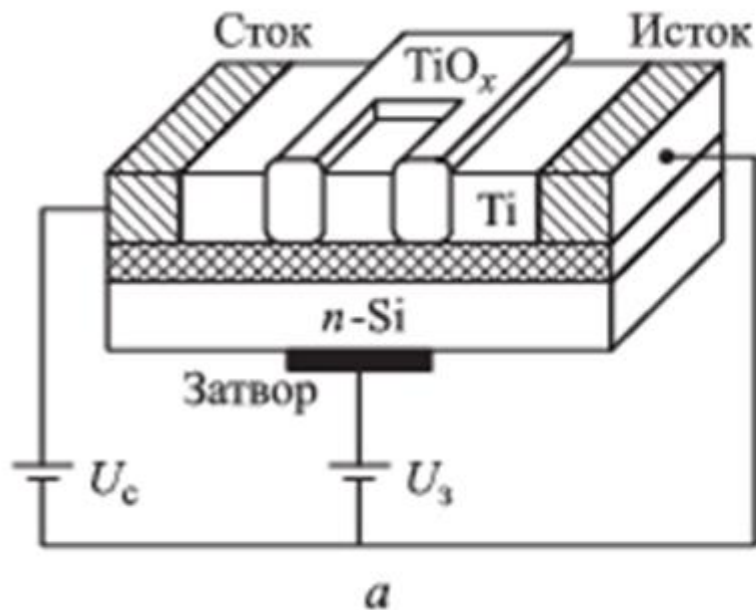


Approximate confinement potential generated by a typical fork-gated InSb/AlInSb SET with some finite negative bias.

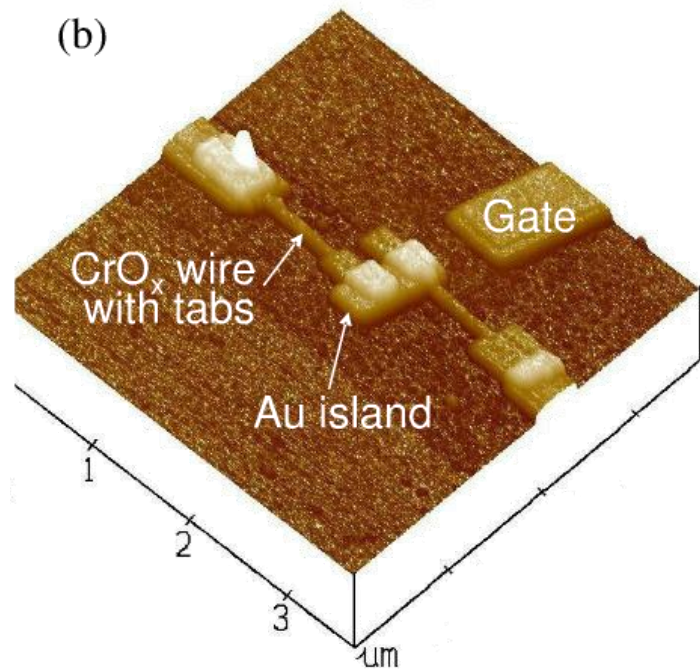


При подаче на затвор отрицательного напряжения происходит обеднение двумерного электронного газа, в результате формируется проводящий «островок» с барьерами

# Одноэлектронные металлические транзисторы

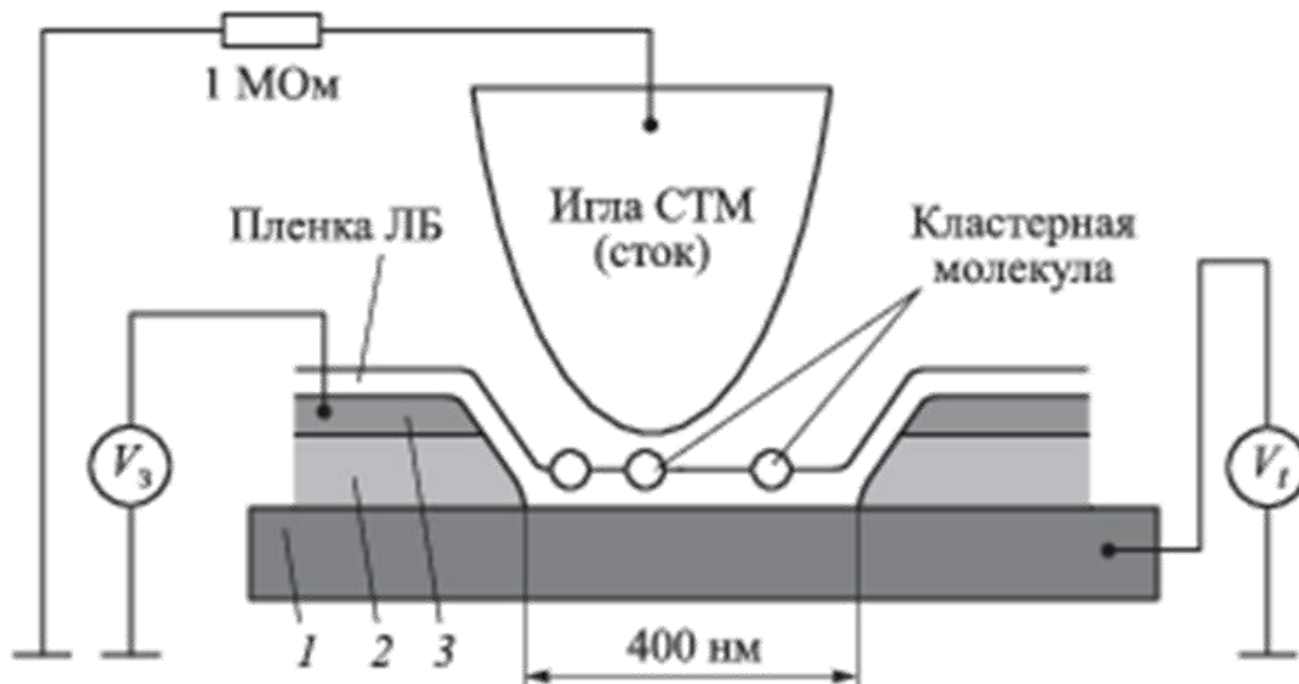


«Металлические» транзисторы: (а) – на основе туннельных переходов, сформированных локальным окислением; (б) – на основе туннельных переходов Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr, сформированных на основе ступенчатого торцевого среза.

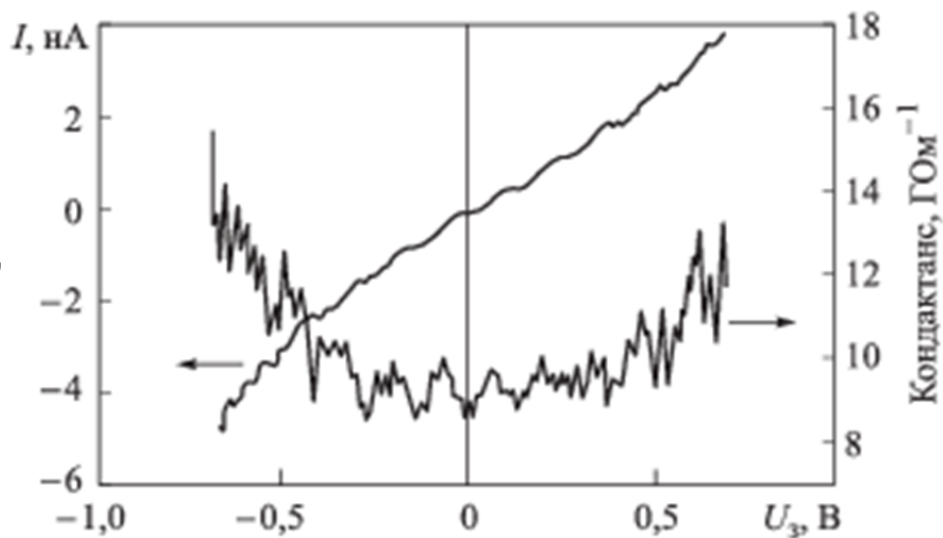




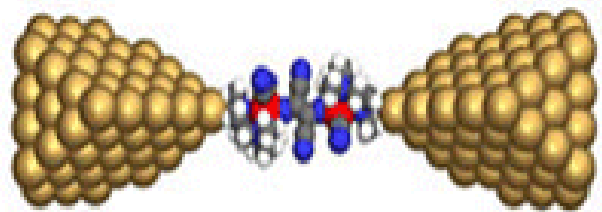
# Одноэлектронный молекулярный транзистор



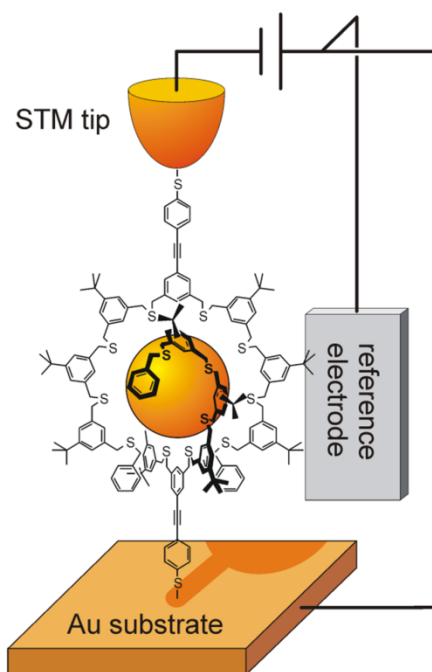
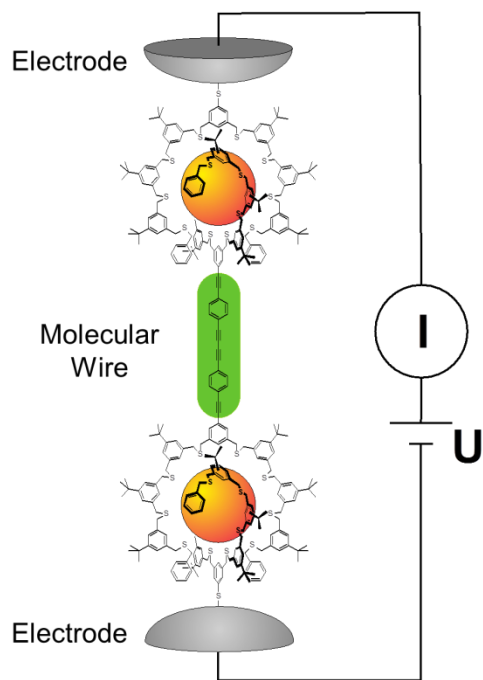
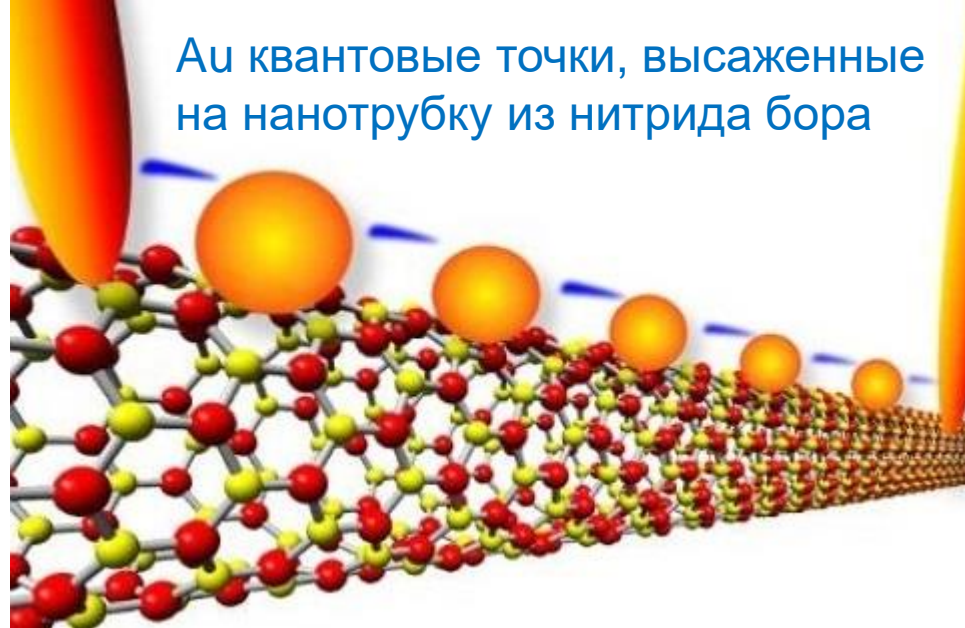
- 1 – графитовая подложка,
- 2 – изолирующая прослойка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- 3 – золотой электрод затвора.



# Золотые цепочки



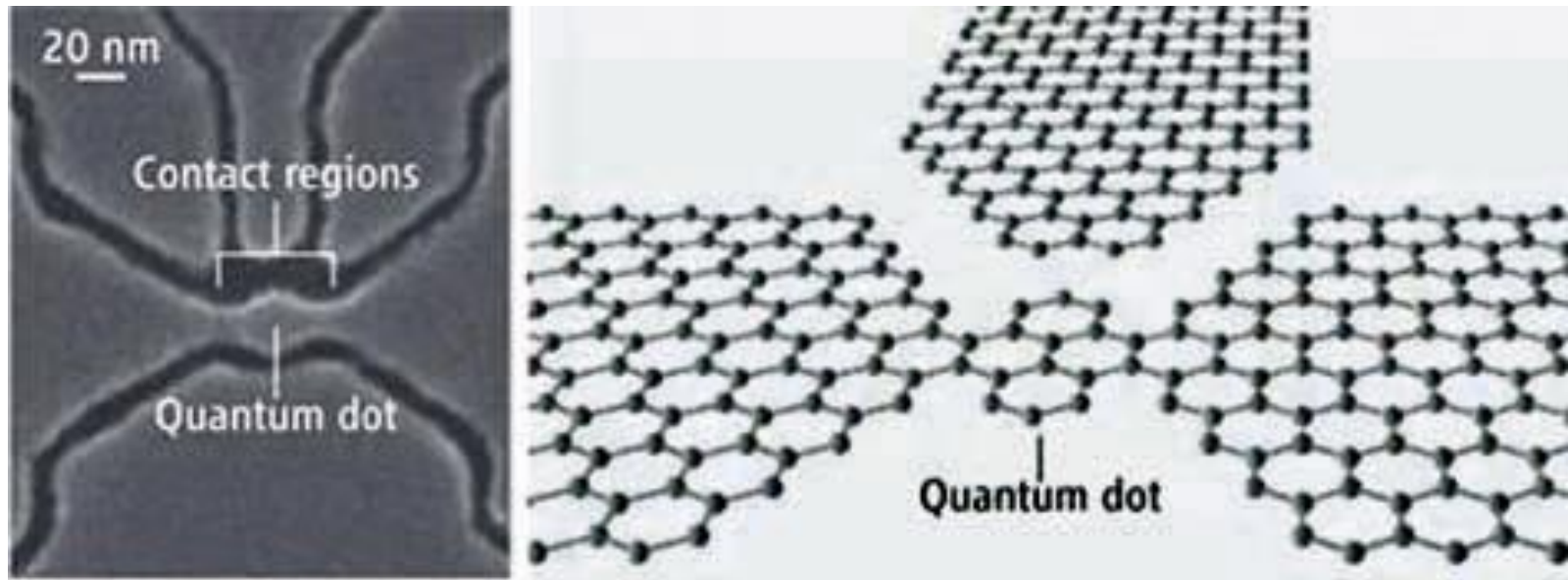
Au квантовые точки, высаженные на нанотрубку из нитрида бора



Частицы золота формируют островки, а связывающие их органические молекулы служат туннельными барьерами. Рабочая температура 4.2 К.

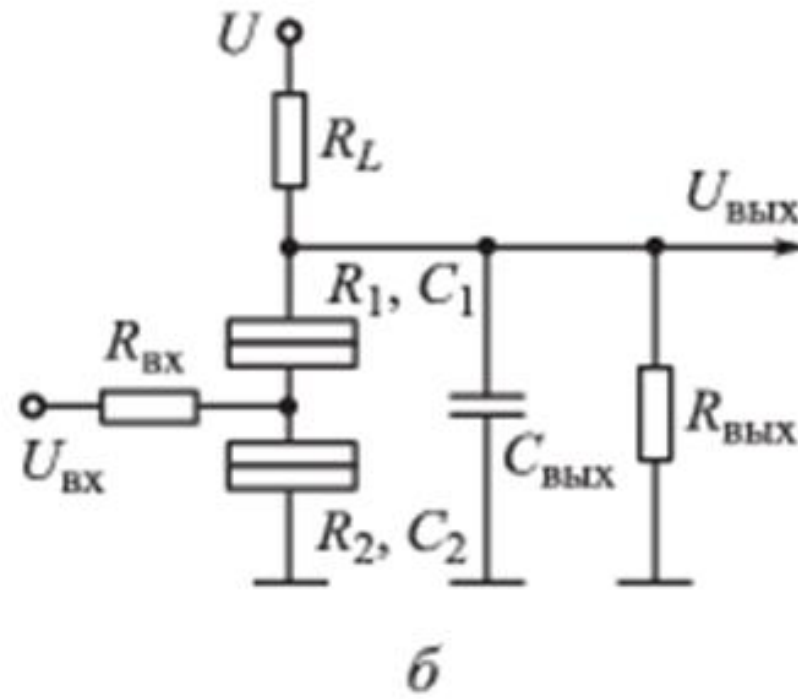
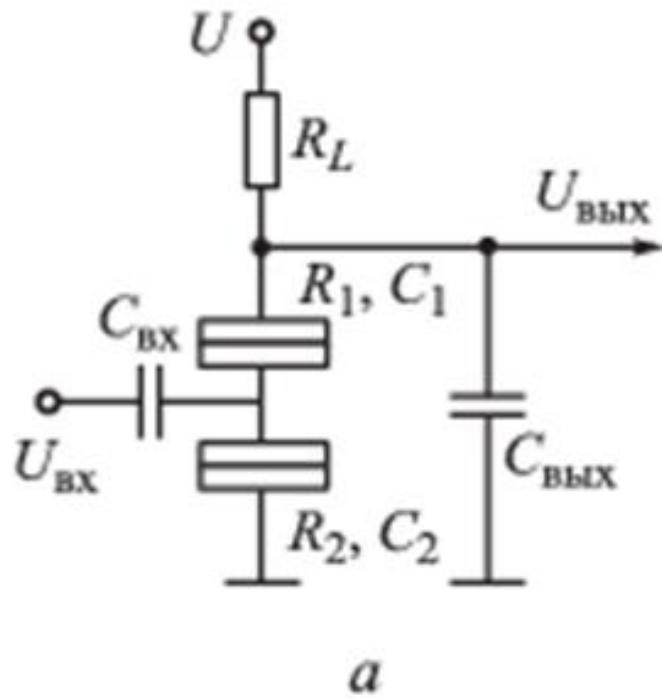
# Одноэлектронный графеновый транзистор

2008



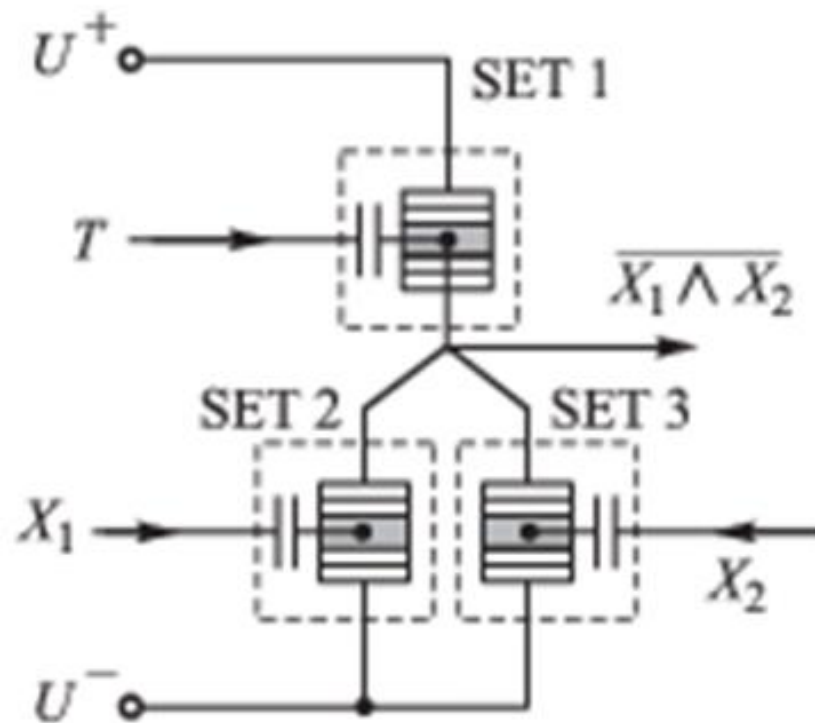
В листе графена с помощью электронно-лучевой литографии и реактивного плазменного травления вырезается «квантовая точка». Достоинством графенового транзистора является возможность работать при комнатной температуре

# Цифровые устройства на одноэлектронных транзисторах



Одноэлектронные инверторы: (а) ёмкостной; (б) резистивный

## Цифровые устройства на одноэлектронных транзисторах

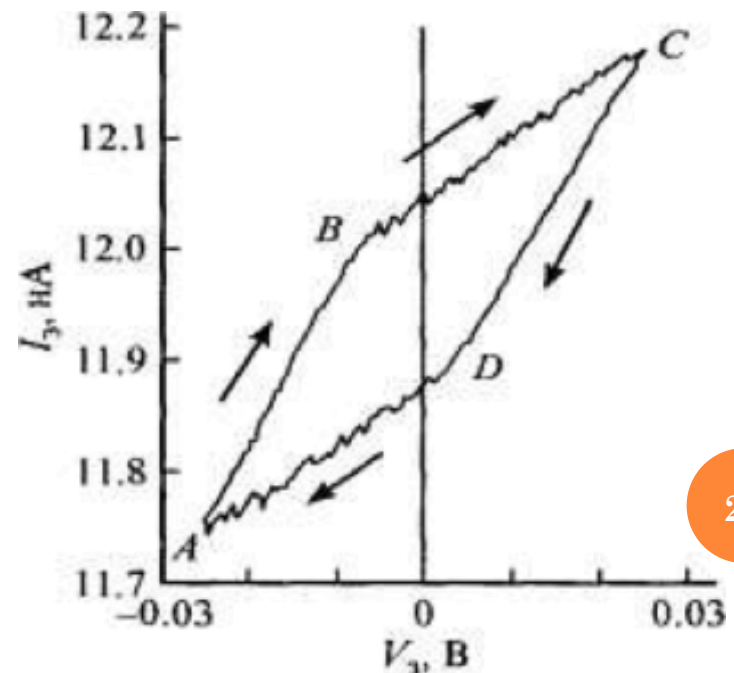
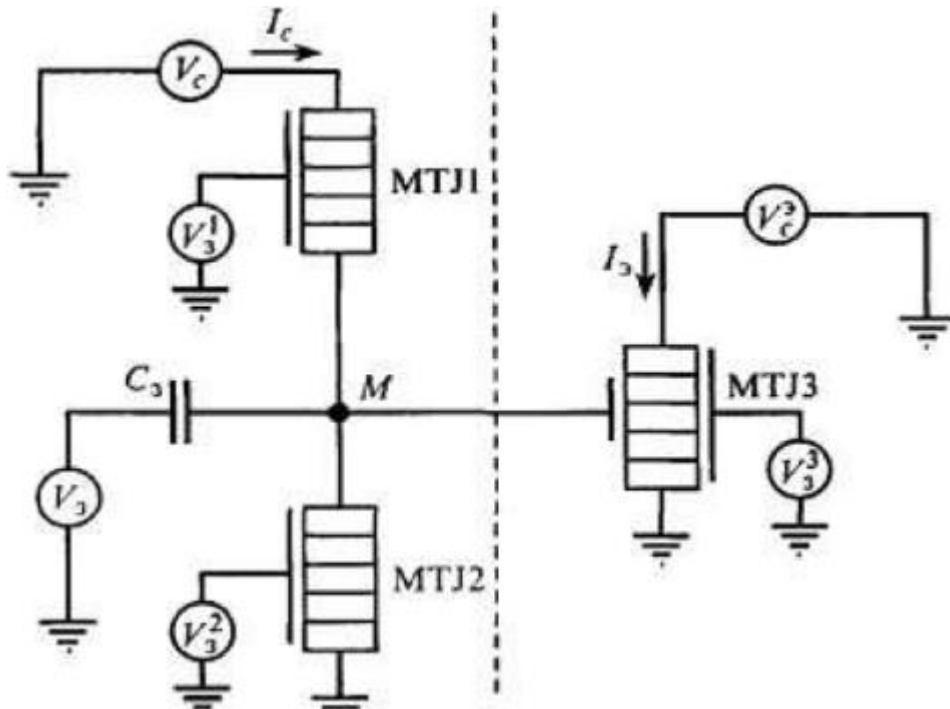
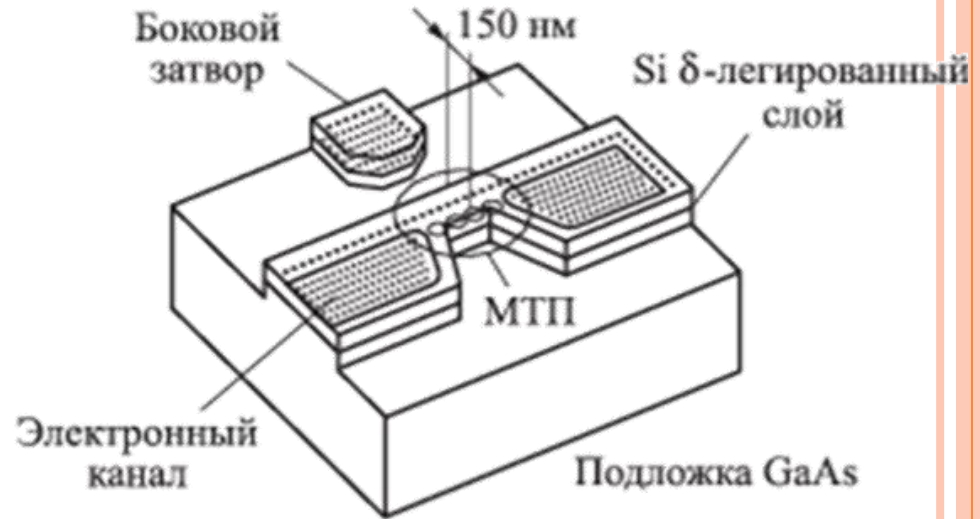


Гипотетическая схема логического элемента И-НЕ, собранного на основе одноэлектронных кластерных транзисторов



# Элементы памяти на одноэлектронных транзисторах

Транзистор 3 (двухзатворный) выполняет функцию электрометра. М – узел запоминания. При  $V_3 = 0$  ячейка имеет два устойчивых состояния, которые могут быть использованы для записи бита информации.



# Одноэлектронные транзисторы: проблемы и ограничения

Главные преимущества одноэлектронных транзисторов:

- сверхмалые размеры
- очень малые токи
- очень малое выделение тепла

Проблемы:

- Работоспособность ограничена областью низких температур
- Высокий выходной импеданс, т.к. высокое сопротивление туннельных переходов должно быть много больше  $h/e^2$  (25.8 кОм)
- Напряжение исток-сток должно быть меньше, чем амплитуда напряжения на затворе, чтобы иметь возможность стабильно управлять таким транзистором
- При появлении неконтролируемого заряда вблизи квантового островка (атом примеси или др.) транзистор перестаёт работать

aspire invent achieve

