

# Наноэлектроника

## Лекция 6

к.т.н., доц. Марончук И.И.

# Одноэлектроника

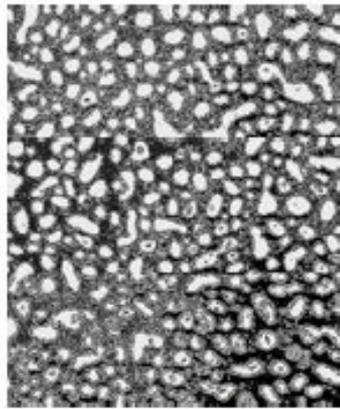
# Что такое одноэлектроника и одноэлектронные приборы?

Одноэлектроника — это раздел нанoeлектроники, изучающий условия и приборные структуры, в которых перенос тока осуществляется одним электроном, или, точнее, определяется движением одного электрона.

Одноэлектронными называются приборы, в которых контролируется перемещение одного электрона или малого их количества.

# Краткая история одноэлектроники

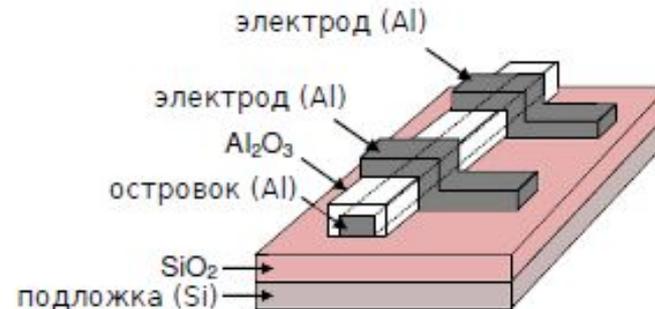
Гранулированная пленка



300 нм  
зерна Au ~5 нм



Первый эксп. SET-транзистор  
(Fulton и Dolan в 1987 г.)



**1951 Gorter**, качественное объяснение пика сопротивления тонких проводящих пленок при малых напряжениях и малых температурах кулоновским отталкиванием в малых гранулах.

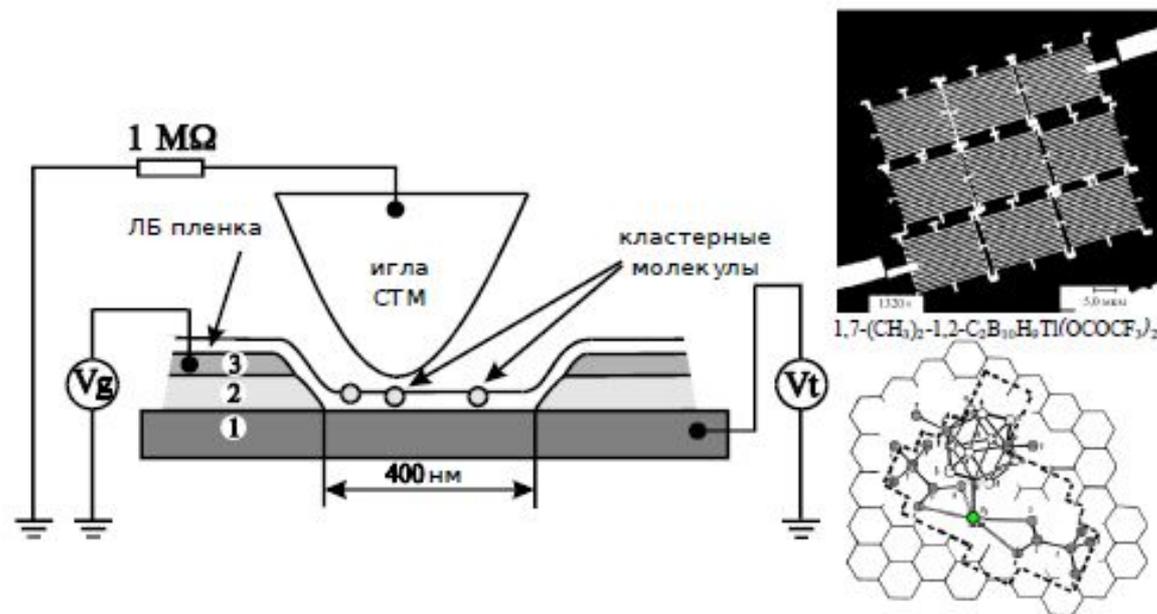
**1957, 1960 Esaki, Giaever**, экспериментальное подтверждение туннельного эффекта в полупроводниковых структурах, туннельный диод.

**1962, 1968, 1969 Neugebauer и Webb**, подавление проводимости в гранулированных пленках,

**1967 Lambe и Jaklevic**, экспериментальное изучение туннелирования между тонкими пленками и изучение спектров возбуждения молекул, составляющих туннельный переход.

**1968 Zeller и Giaever**, подавление проводимости в гранулированных пленках при низких температурах и низких напряжениях, предложена емкостная модель блокады туннельного тока.

# Краткая история одноэлектроники



**1975 Кулик и Шехтер**, теоретическая модель туннельного переноса заряда через малую сверхпроводящую гранулу с учетом электростатического взаимодействия.

**1985 Аверин, Лихарев, Зорин**, формулировка ортодоксальной теории одноэлектроники (или одноэлектронного туннелирования, или коррелированного туннелирования электронов).

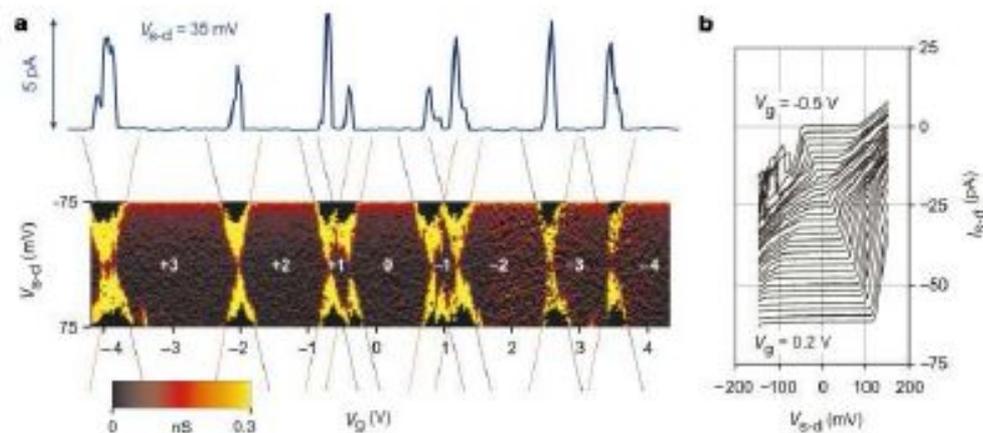
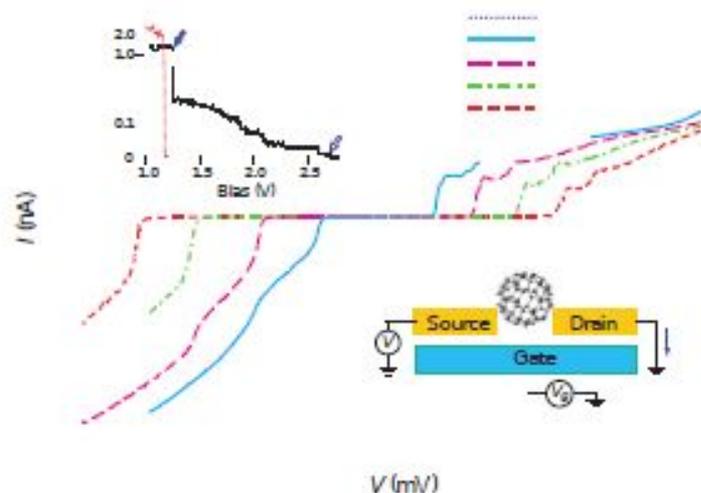
**1987 Fulton и Dolan, Лихарев и Кузьмин**, первый экспериментальный «металлический» одноэлектронный транзистор.

**1991 Аверин, Коротков, Лихарев, Веенаккер**, теория одноэлектронных эффектов в квантовых ямах и точках, теория построена с учетом дискретности энергетического спектра.

**1996 Трифонов, Солдатов и др.**, молекулярный одноэлектронный транзистор, работающий при комнатной температуре.

# Краткая история одноэлектроники

## Первый планарный MSET-транзистор



**1996 Лихарев и Коротков**, теория логических устройств и ячеек памяти на основе одноэлектронных элементов. Беспроводная одноэлектроника.

**2000 Park и др.**, первый планарный молекулярный одноэлектронный транзистор.

**2003 Кубаткин, Данилов и др.**, планарный молекулярный одноэлектронный транзистор с сильной дискретностью, определение влияния отдельных молекулярных состояний.

**2009-2012 6 работ**, планарный атомный одноэлектронный транзистор.

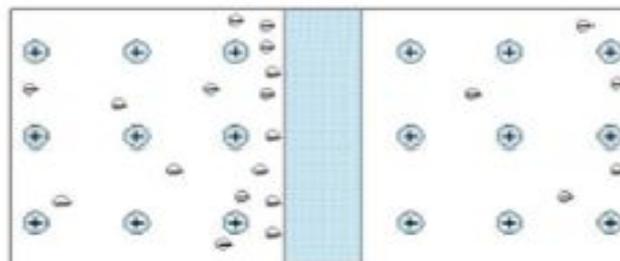
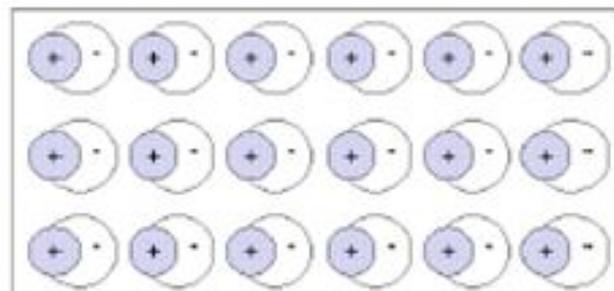
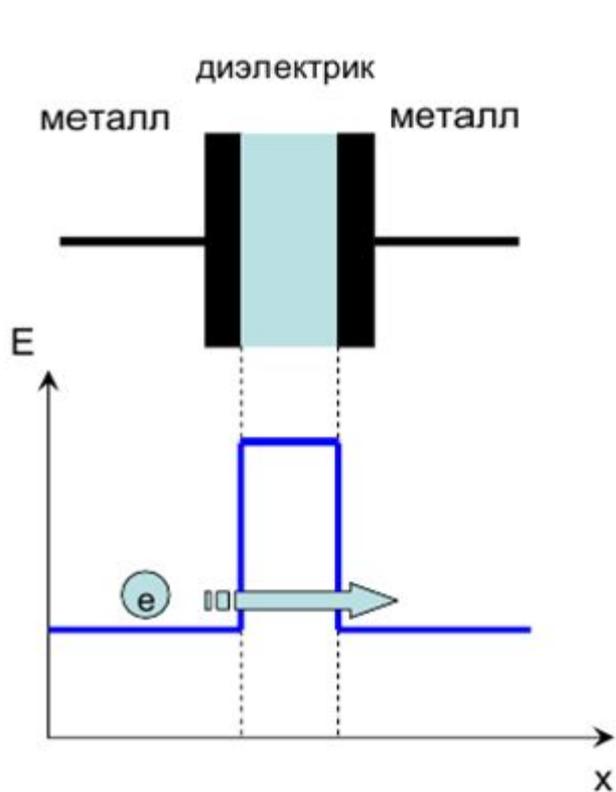
В последнее время в связи с приближением к пределам миниатюризации классических микроэлектронных приборов усилился интерес к приборам, могущим обеспечить дальнейший прогресс электроники. Одним из возможных путей такого прогресса является создание приборов, в которых контролируется перемещение определенного количества электронов, в частности, одного электрона.

Создание так называемых одноэлектронных приборов открывает заманчивые перспективы цифровой одноэлектроники, в которой бит информации будет представлен одним электроном. В таких приборах перемещение электрона происходит посредством туннелирования. Время туннелирования электрона достаточно мало, теоретический предел быстродействия одноэлектронных приборов очень высок. Работа, необходимая для перемещения одного электрона, также мала, следовательно, энергопотребление одноэлектронных схем должно быть чрезвычайно небольшим.

# Кулоновская блокада тунелирования

Известно, что электрический ток в проводнике обусловлен движением электронов относительно неподвижных ионов решетки.

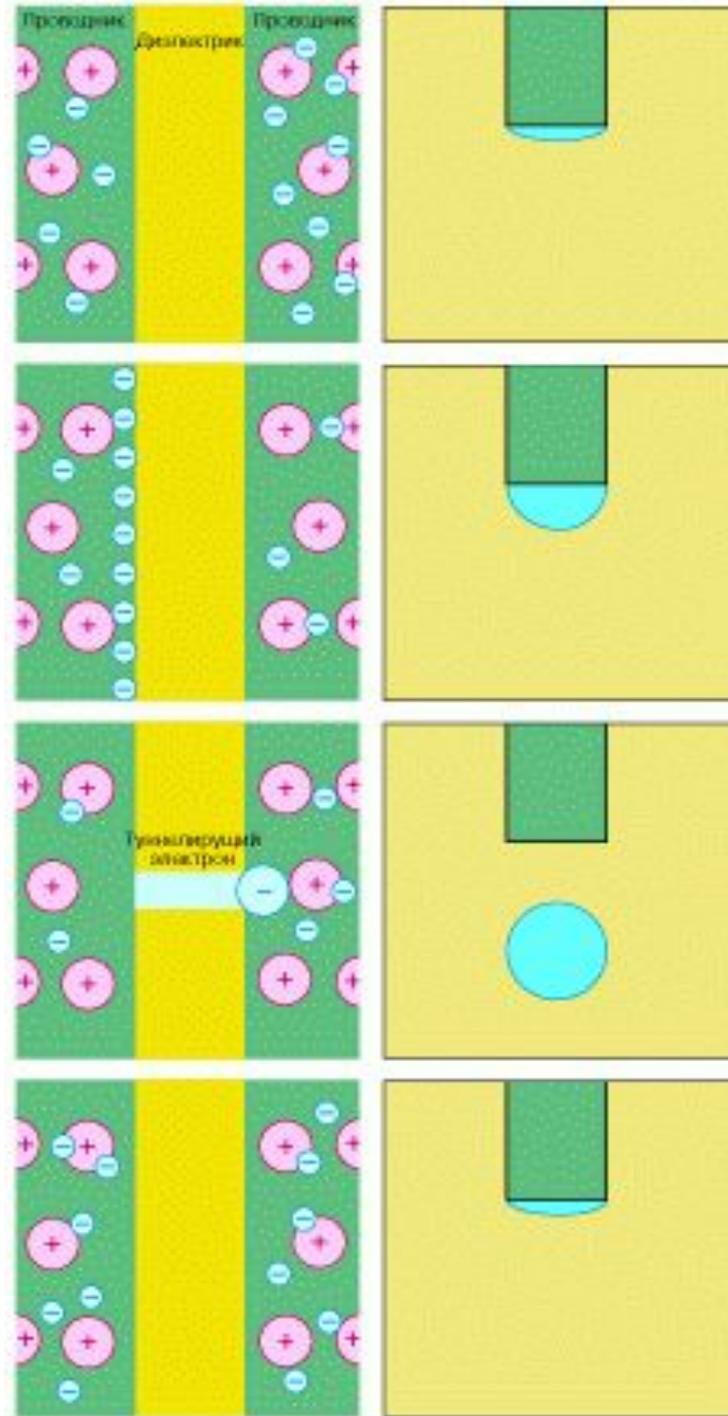
В структуре, состоящей из двух областей проводника, разделенных тонким диэлектриком, электрический заряд переносится комбинированно - непрерывно в проводнике и дискретно через диэлектрик.



В проводнике смещение заряда под действием внешнего поля непрерывно.

Тунелирование электронов происходит дискретно при постоянном приложенном напряжении.

Первоначально граница раздела между проводником и диэлектриком электрически нейтральна. При приложении к внешним контактам структуры электрического потенциала начинается непрерывное изменение заряда в проводнике. Оно сопровождается накоплением заряда на границе с диэлектриком. Накопление заряда продолжается до тех пор, пока его величина не окажется достаточной для отрыва и туннелирования через диэлектрик одного электрона. После акта туннелирования система возвращается в первоначальное состояние.



При сохранении внешнего приложенного напряжения все повторяется вновь. Электрон приобретает возможность туннелировать через диэлектрик, когда накопленный заряд становится больше  $+e/2$  (туннелирование в «прямом» направлении) или меньше  $-e/2$  (туннелирование в «обратном» направлении), поскольку только при этом уменьшается электростатическая энергия системы. Внутри этого интервала туннелирование невозможно из-за кулоновского взаимодействия электрона с другими подвижными и неподвижными зарядами в проводнике. Данное явление называют кулоновской блокадой.

Одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады было впервые рассмотрено советскими учеными Д. Авериным и К. Лихаревым. На основе их работ (1985-1986 гг.) сформировалось новое направление в нанoeлектронике - одноэлектроника.

Кулоновской блокадой называется отсутствие тока через туннельный переход при наличии внешнего напряжения, если туннелированию электронов препятствует их кулоновское взаимодействие.

Конструкции одноэлектронных приборов весьма различны, но их можно классифицировать по нескольким признакам.

**По направлению протекания тока** конструкции делятся на **горизонтальные** (латеральные) и **вертикальные**. В горизонтальных приборах направление протекания тока параллельно плоскости поверхности структуры, в вертикальных - перпендикулярно.

**По способу формирования квантовых точек** (КТ) бывают приборы на **постоянных и временных КТ**. Заметим, что термин «КТ» по отношению к малому объекту не всегда корректен, так как квантования энергетического спектра может и не наблюдаться. Однако этот термин широко используется в силу того, что для квантования спектра достаточно понизить температуру. В дальнейшем будем придерживаться такой терминологии.

**Постоянная КТ** существует все время и представляет собой чаще всего какой либо кластер (металлический или полупроводниковый). **Временная КТ** создается в двумерном электронном газе путем приложения обедняющих напряжений, т. е. существует лишь во время работы прибора. Кроме того, приборы на временных КТ можно разделить по способу формирования двумерного электронного газа на **инверсные и гетероструктурные**. В **инверсных приборах** двумерный электронный газ образуется в инверсных приповерхностных каналах путем приложения соответствующего напряжения. В **гетероструктурных приборах** двумерный электронный газ сосредоточен на гетерогранице.

По количеству КТ приборы могут быть **нуль-** (одноточечные), **одно-** (цепочка точек) и **двумерные** (массив точек).

По управляемости параметрами КТ приборы делятся на **неуправляемые** (двухэлектродные) и **управляемые** (многоэлектродные, с одним или несколькими затворами).

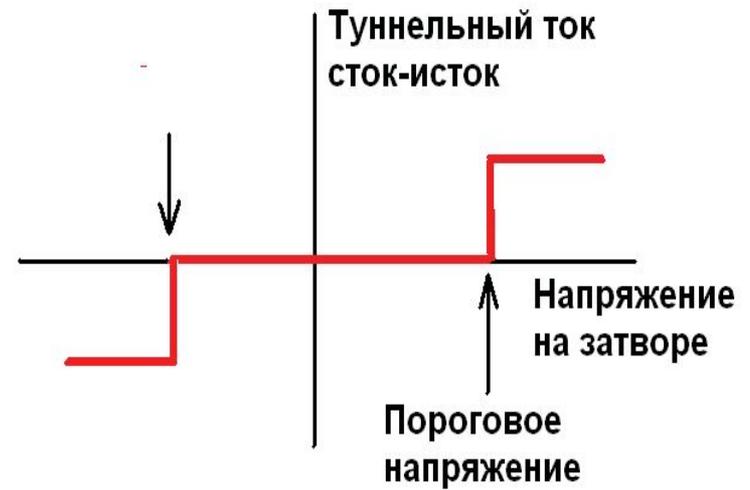
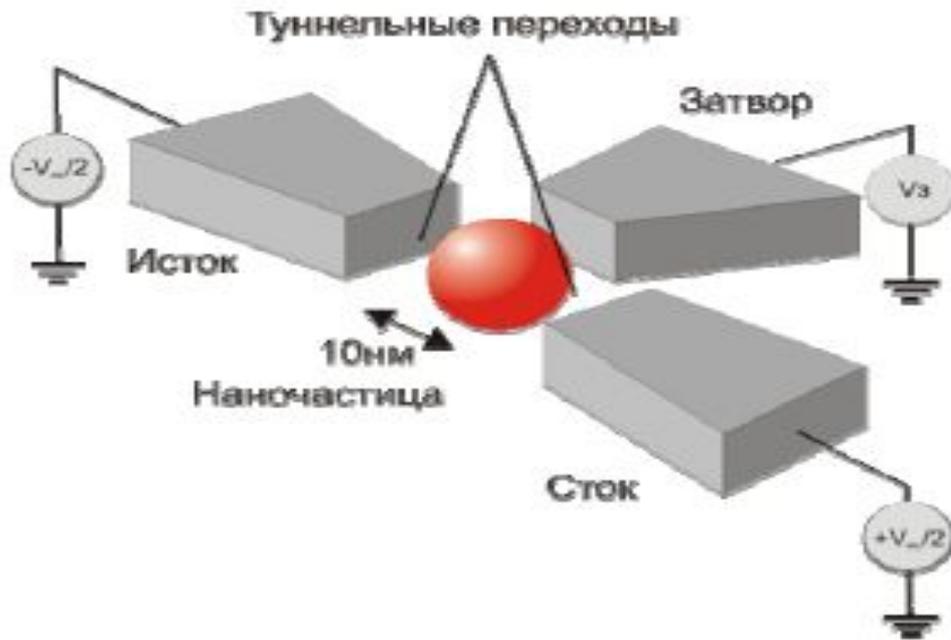
Известные в настоящее время  
одноэлектронные приборные структуры  
можно отнести к  
определенному классу, виду и  
разновидности.

Ниже рассмотрим наиболее часто  
встречающиеся конструкции  
одноэлектронных приборов.

# Одноэлектронный транзистор

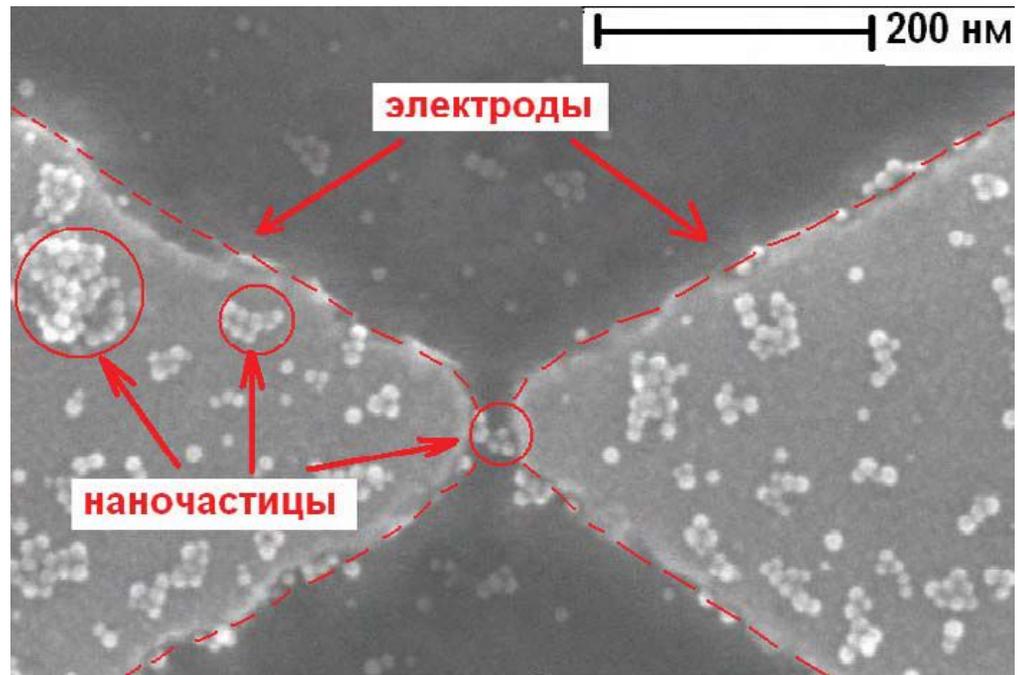
Принципиальным отличием одноэлектронного транзистора от классического является то, что линейные размеры канала между стоком и истоком лежат в нанодиапазоне, обуславливая проявление **квантово-размерных эффектов**. Кроме того, одноэлектронный транзистор не усиливает текущий ток, а только управляет переходом электронов, поэтому правильнее было бы называть его переключателем. Принцип работы одноэлектронного транзистора основан на эффекте так называемой «кулоновской блокады» - скачкообразном изменении потенциальной энергии достаточно малой системы при туннелировании одного электрона и блокировании движения всех остальных. При этом электрический ток в цепи протекает макроскопически регистрируемыми порциями, иначе говоря, в системе проявляется движение единичных зарядов.

Одноэлектронный транзистор имеет три электрода, называемые истоком, стоком и затвором. Только вот между электродами расположен металлический или полупроводниковый «наноостровок» - наночастица или кластер нанометровых размеров (рис.).



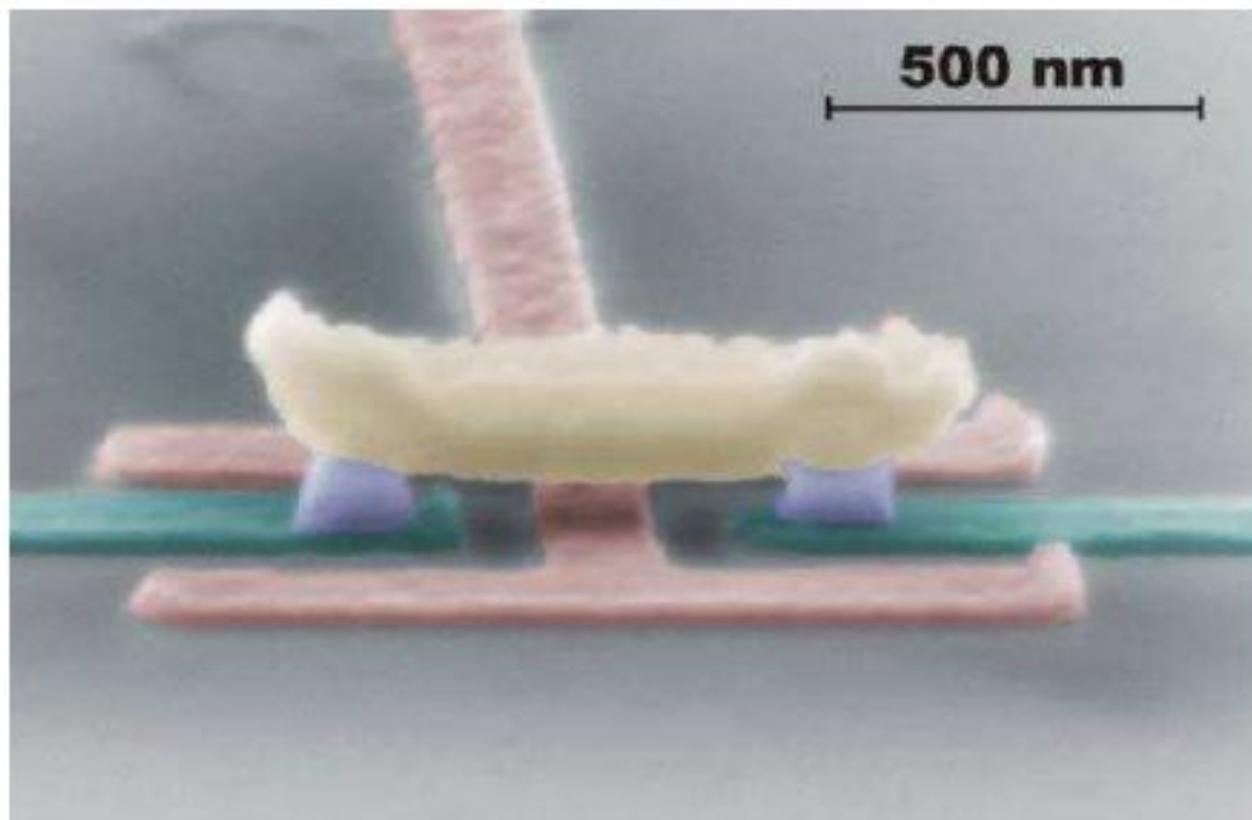
При этом толщины «наноостровков» настолько малы, что электрон может туннелировать. Если приложить разность потенциалов между стоком и истоком, то, казалось бы, должен потечь туннельный ток. Однако пока потенциал на управляющем электроде будет меньше некоторого порогового значения, туннелирование не наблюдается. Электрон на наночастице остается изолированным, т.е. «заблокированным».

При дальнейшем же увеличении напряжения выше порогового значения блокада электрона прорывается, и в цепи между стоком и истоком происходит перескок электрона - течет туннельный ток.



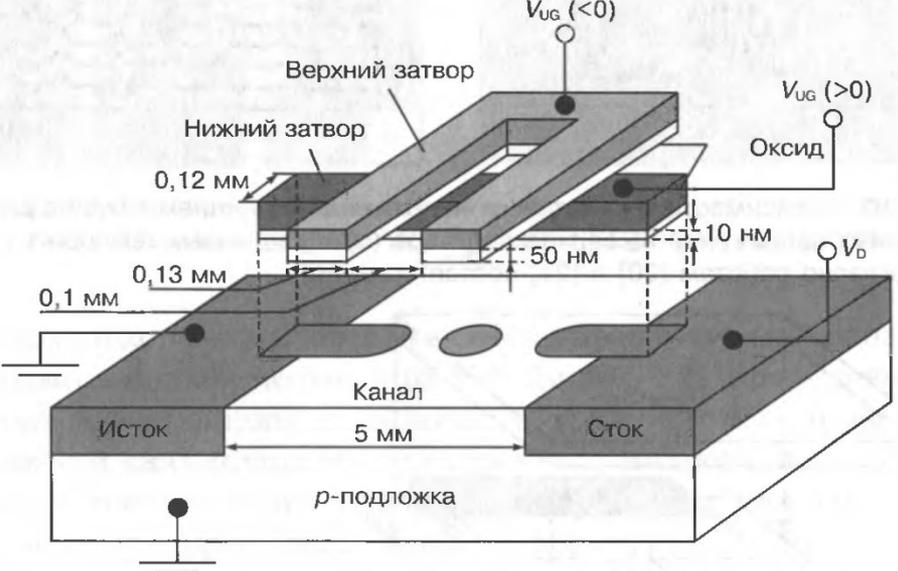
Таким образом, управляя потенциалом затвора, можно пропускать по цепи единичные электроны. Если пойти дальше и вместо наночастицы поместить между электродами молекулу или молекулярный комплекс, то движение единичных электронов будет осуществляться в результате прыжков по химическим связям – в работу вступят дискретные уровни энергии молекулы. **Таким образом**, одноэлектронный транзистор рассматривается как предельная степень миниатюризации классического **транзистора** – **то, к чему стремятся** все крупнейшие производители вычислительной техники.

В настоящий момент работу одноэлектронных транзисторов можно наблюдать только в исследовательских лабораториях, но в будущем их использование в массовом производстве может привести к резкому снижению энергопотребления и тепловыделения электронными схемами, значительному увеличению быстродействия и плотности элементов микросхем. Развитие технологии одноэлектронных транзисторов позволит создать ячейки памяти с большим временем хранения, высокой плотностью записи информации и малой рассеиваемой мощностью, а также высокочувствительные химические/биохимические сенсоры.

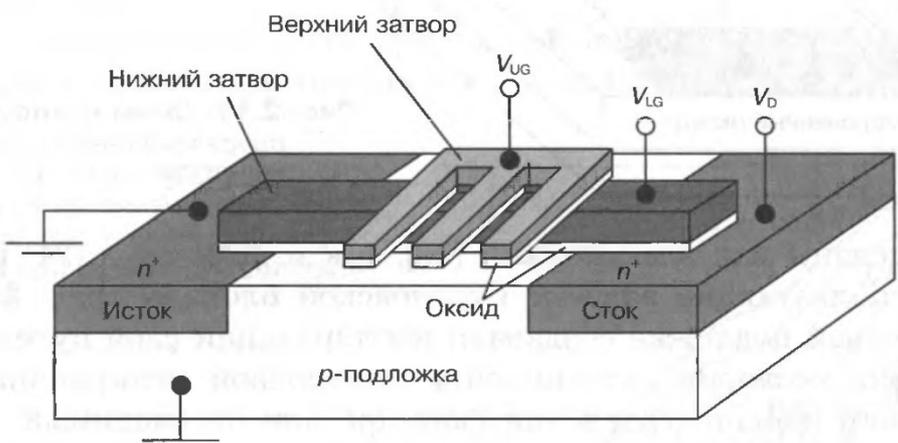


Одноэлектронный транзистор, изготовленный с использованием литографической техники.

Для наглядности различные функциональные элементы окрашены разными цветами.



а



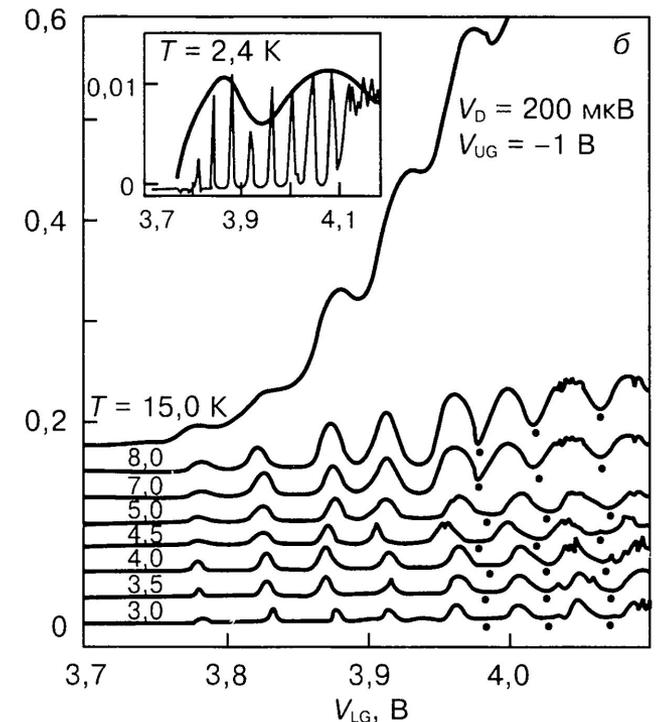
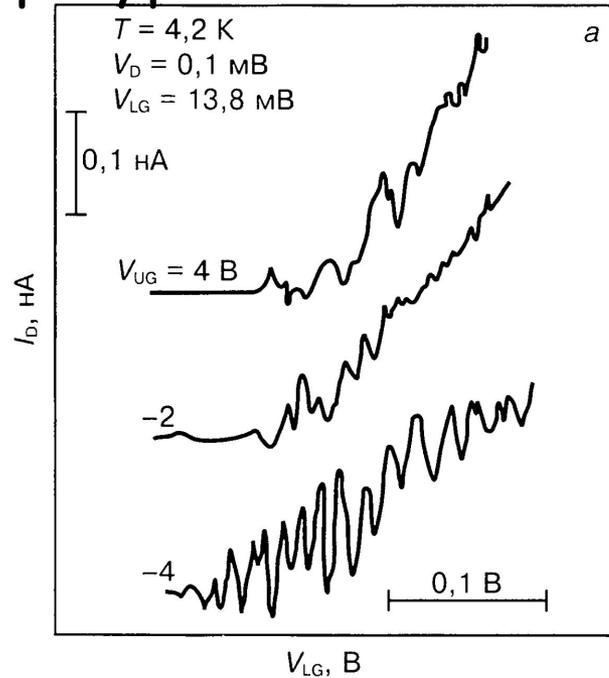
б

Схема кремниевого одноэлектронного транзистора с двумя затворами на одиночной (а) и двойной (б) КТ.  $V_{UG}$ ,  $V_{LG}$  - напряжения на верхнем и нижнем затворах соответственно;  $V_D$  - напряжение на стоке

Конструкции, основанные на принципе работы МОП-транзистора (металл-оксид-полупроводник) с индуцированным каналом. Затвор таких транзисторов состоит из двух электрически не связанных частей. Подача на нижний затвор положительного напряжения формирует инверсный n-канал в p-подложке, а подача на верхний затвор отрицательного напряжения разрывает канал областями обеднения, формируя КТ.

Эти приборы являются планарными управляемыми приборами на одной или двух временных КТ. На рис. а показаны зависимости тока стока для одноточечного транзистора от напряжения на нижнем затворе при различных напряжениях на верхнем затворе. На рис. б представлены аналогичные характеристики, но при различных температурах.

Осцилляции на этих зависимостях соответствуют присутствию отдельных электронов.



Зависимости тока стока от напряжения на нижнем затворе для различных напряжений на верхнем затворе (а) при  $4,2$  К и различных температур (б) при  $V_{UG} = -1$  В и  $V_D = 0,2$  мВ

Сделаны электронный, и дырочный приборы, использующие эффект кулоновской блокады (рис.). В кремниевой подложке создавали изолирующий слой путем имплантации кислорода, при помощи электронной литографии и реактивного ионного травления формировали необходимый рисунок.

Затем проводили термическое подзатворное окисление, которое уменьшало размеры КТ и увеличивало высоту потенциальных барьеров между точкой и контактами. Сверху наносили поликристаллический кремниевый затвор. Разница заключалась в использовании n-Si для электронного и p-Si для дырочного транзистора.

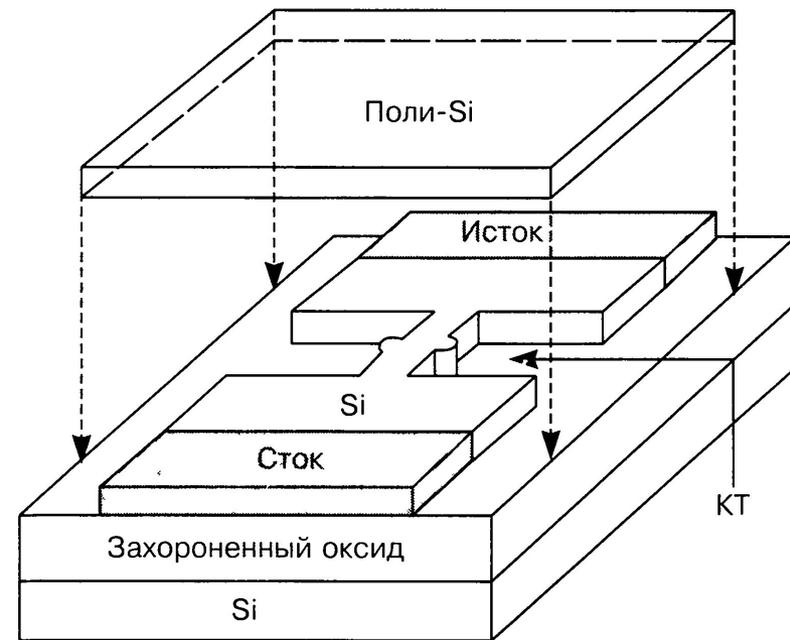
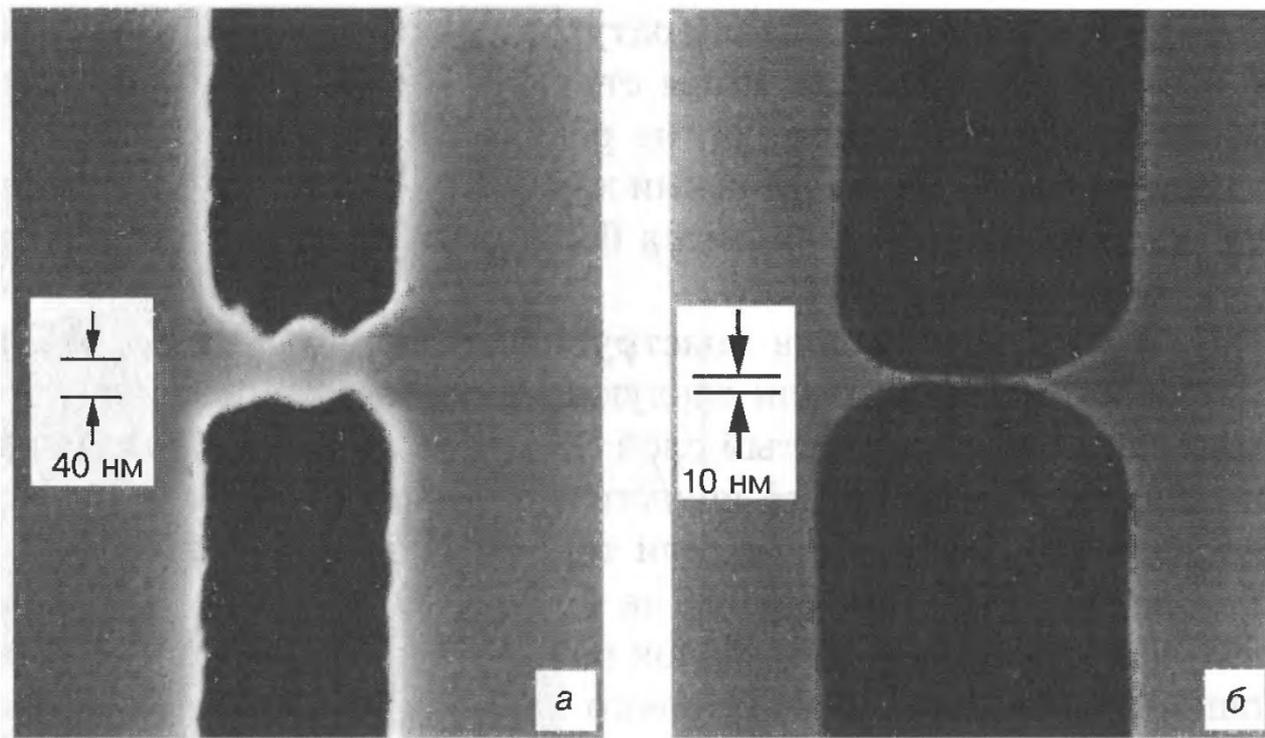


Схема квантового одноэлектронного транзистора

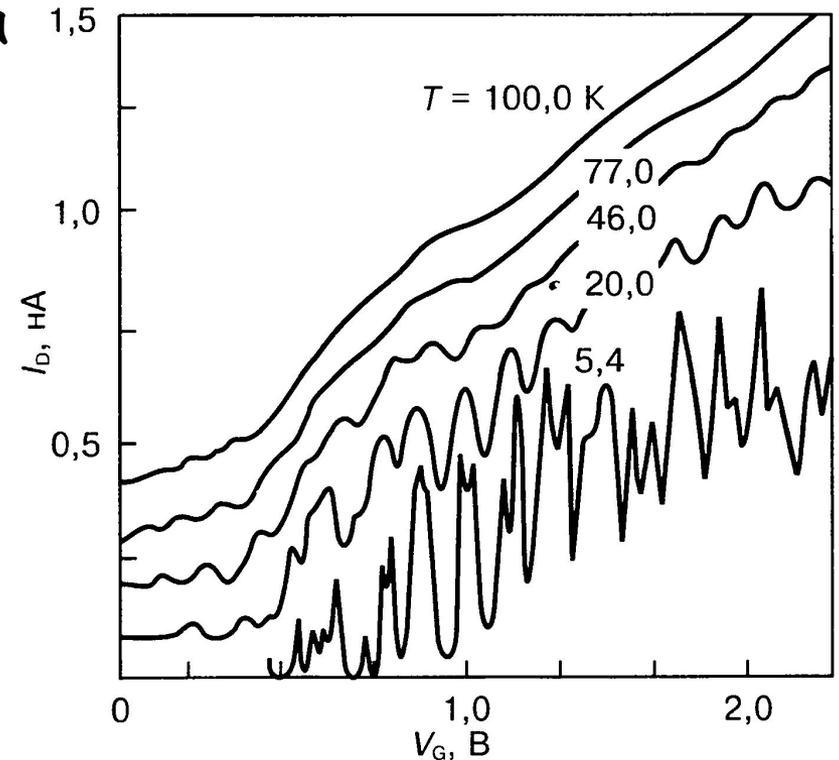
Описанные транзисторы являются управляемыми планарными приборами на одной постоянной КТ. На рис. приведены изображения электронного и дырочного транзисторов, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).



Изображения электронного (а) и дырочного (б) транзисторов, полученные при помощи СЭМ

Зависимость тока стока от затворного напряжения для электронного транзистора при различных температурах представлена на рис. Аналогичные зависимости получены и для дырочного транзистора.

Следует отметить, что эти два транзистора - единственные одноэлектронные приборы (кроме реализованных при помощи СТМ), работающие при температурах выше 77 К. Однако вопрос о воспроизводимости 10-нм структур при помощи электронной литографии в работе авторы этого изделия не рассматривали.



Зависимости тока стока от напряжения на затворе для электронного транзистора при различных температурах  $T$

Существует конструкция, показанная на рис. Прибор изготавливали следующим образом: на поликремниевый слой наносили толстый слой  $\text{SiO}_2$ . При помощи электронной литографии и реактивного ионного травления формировали островок  $\text{Si-SiO}_2$ . Затем проводили термическое окисление для получения тонкого (2 нм) оксида на боковой поверхности островка. После нанесения

еще одного слоя поликремния при помощи электронной литографии и реактивного ионного травления формировали подводящие контакты (см. рис.)

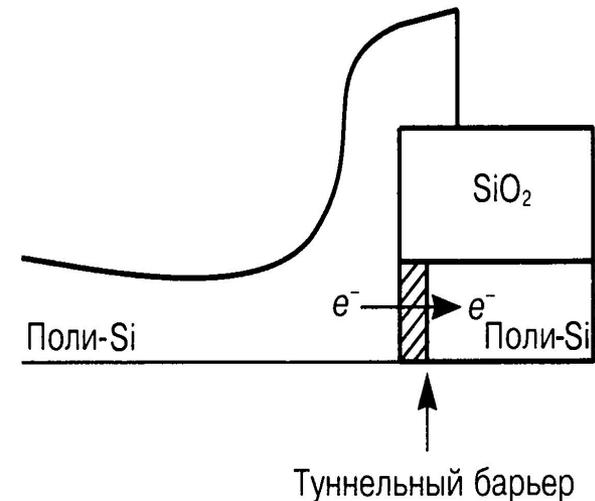
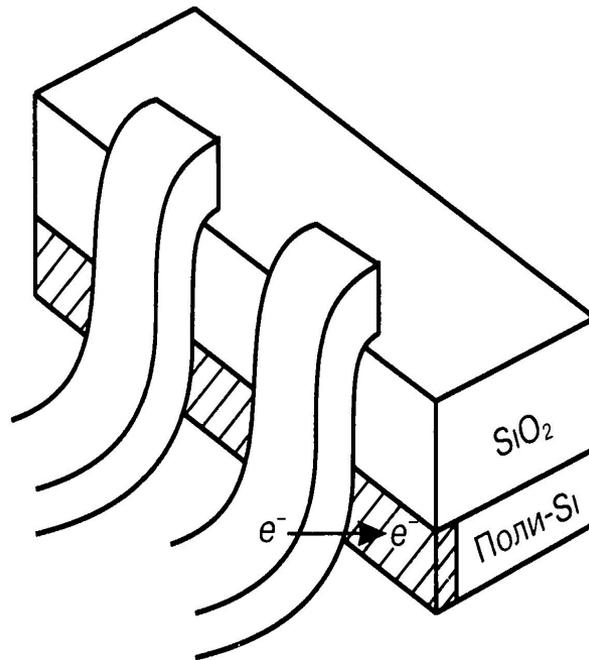


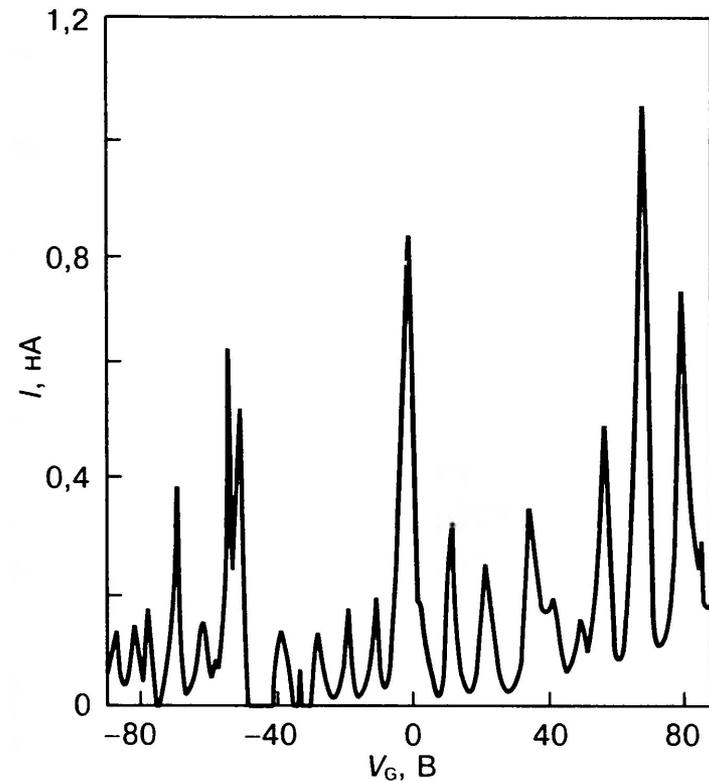
Схема одноэлектронного транзистора

Роль КТ играл островок, туннельные контакты осуществлялись через тонкий боковой оксид. Емкость перекрытия контактов и островка уменьшалась за счет большой толщины  $\text{SiO}_2$  (50 нм) сверху островка. В качестве затворного электрода использовали подложку. Классификация прибора аналогична предыдущему. Как видно из рис. выше, площадь туннельного контакта определяется высотой островка и шириной подводящего контакта, которые составляли 30 и 100 нм соответственно. Таким образом, емкость контактов при толщине бокового оксида 2 нм составляла 50 фФ.

Изображение структуры, полученное с помощью СЭМ, показано на рис. а. На рис.б представлены характерные одноэлектронные осцилляции тока стока от напряжения на затворе (т.е. на подложке). Измерения проводили при температуре 4,2 К.

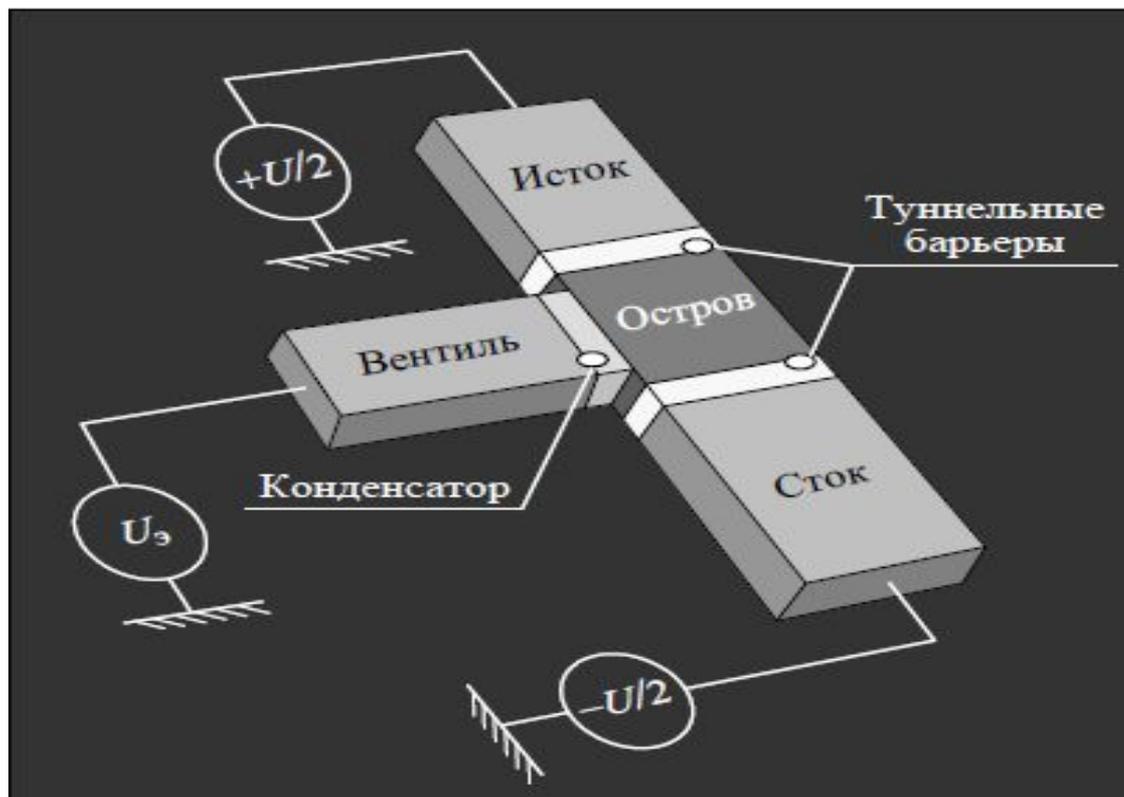


Изображение одноэлектронного транзистора, полученное при помощи СЭМ



Зависимость тока стока от напряжения на затворе. Напряжение на стоке 3 мВ

Одной из перспективных конструкций дноэлектронных устройств является T-образная транзисторная структура, состоящая из двух одноэлектронных транзисторов, связанных между собой через туннельный конденсатор. На основе T-образных транзисторных структур могут быть реализованы одноэлектронный коммутатор, одноэлектронный насос, одноэлектронный инвертор и др.



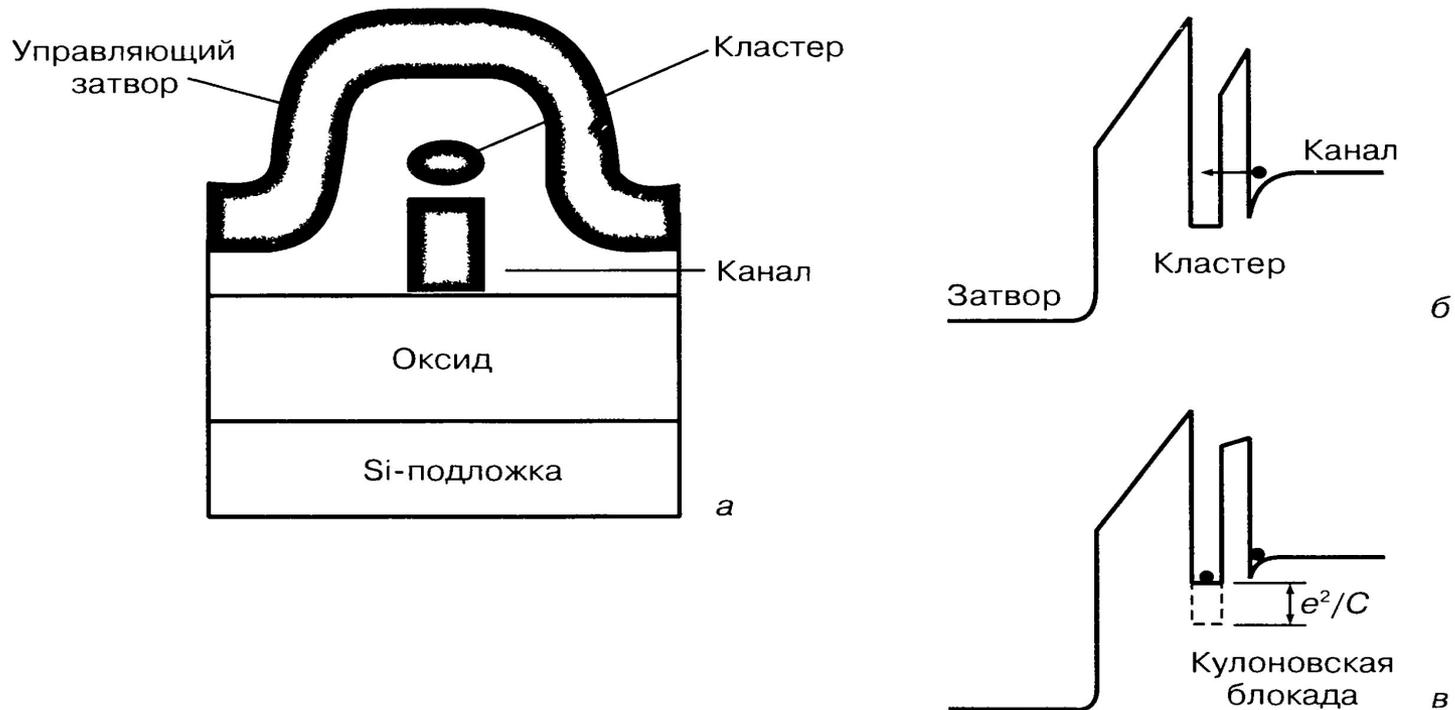
Другой типичный пример реализации одноэлектронного прибора, представляющего собой элемент памяти МДП-типа (металл-диэлектрик-полупроводник) с ультракоротким каналом. Рассмотрим металлический кластер (для определенности сферический, радиуса  $R$ ), помещенный в диэлектрическую среду с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Потенциал такого кластера равен

$$U = \frac{q}{C},$$

где  $q$  - электрический заряд;  $C = \epsilon R$  - емкость.

Для кластера размером в несколько нанометров емкость составляет  $\sim 10^{-18}$  Ф. Поэтому один электрон, помещенный в подобный кластер, создает потенциал порядка 0,1 В. Такой потенциал может оказаться вполне достаточным для кулоновской блокады транспорта других электронов. Это открывает возможности для создания нового класса так называемых одноэлектронных приборов.

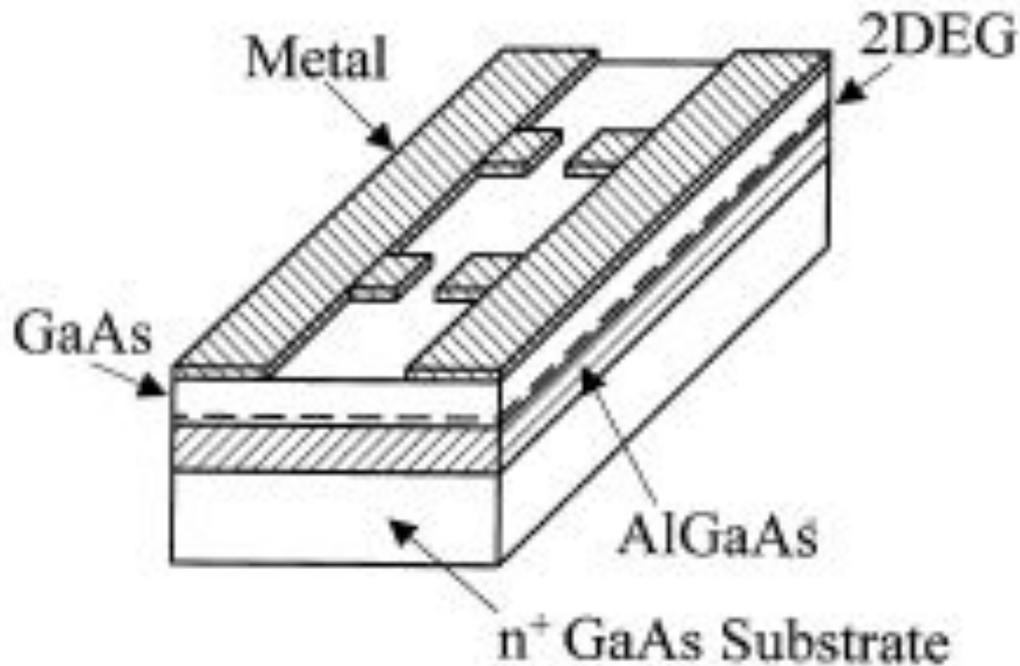
Разработано несколько типов приборных структур этого типа: одноэлектронные элементы памяти (рис.); полевые транзисторы, управляемые одиночным электроном на затворе; одноэлектронный аналог биполярного транзистора; «одноэлектронный насос» и др.



Одноэлектронное устройство памяти с наноразмерным кластером в качестве плавающего затвора. Схематическое изображение структуры (а) и энергетические диаграммы до (б) и после (в) захвата электрона на кластер. Захват одного электрона приводит к запираению узкого канала за счет эффекта кулоновской блокады

В настоящее время практическая реализация таких структур, как правило, основана на использовании прецизионной литографии тонких металлических пленок или полупроводниковых слоев с двумерным газом. Пространственное разрешение, характерное для этого подхода, в большинстве случаев не позволяет создать объекты достаточно малого размера, что ограничивает рабочую температуру подобных устройств на уровне температуры жидкого гелия и ниже. Следует, однако, отметить значительный прогресс этой технологии, достигнутый в последнее время. Например, имеется информация о создании одноэлектронной памяти, работающей при комнатной температуре, на основе полевого транзистора с очень узким каналом и плавающим затвором нанометрового размера.

Интенсивно разрабатываются и одноэлектронные полупроводниковые структуры на основе GaAs. На рис. показан прибор, который представляет собой двойной туннельный переход на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs.



Структура на основе GaAs/AlGaAs с расщепленным затвором Шоттки.

В этом приборе ограничение двумерного электронного газа (ДЭГ) в островки осуществляется посредством прикладывания напряжения к металлическим расщепленным затворам Шоттки, расположенным на поверхности структуры.

ДЭГ формируется на границе раздела слоев  $GaAs$  и  $AlGaAs$ , его плотность контролируется напряжением, приложенным к проводящей подложке. При подаче отрицательных напряжений на расщепленные затворы происходит обеднение ДЭГ под ними. В результате в ДЭГ формируется канал с малыми сегментами (островками) между обедненными участками (барьерами). Рабочая температура прибора около  $0.5\text{ K}$

При увеличении количества туннельно-связанных островков можно получить различные одноэлектронные приборы.

### Одноэлектронная ловушка

Главное свойство данного прибора - это би- или мультитабильная внутренняя зарядовая память, то есть в пределах определенного диапазона напряжения  $U$ , прикладываемого к затвору, ближайший к затвору островок может быть в одном, двух или более устойчивых зарядовых состояниях.

### Генераторы на одноэлектронных транзисторах

Одноэлектронные транзисторы можно использовать для генерации узкополосных сигналов с частотой, по существу, пропорциональной постоянному току  $f = I/e$ .

## Счетчик электронов

Система из многих последовательно соединенных туннельных конденсаторов может служить в качестве счетчика электронов - она позволяет контролируемо перемещать единичные электроны. Счетчик электронов можно использовать в целях метрологии - квантовый стандарт тока.

## Логические элементы

Имеются две принципиальные возможности построения логических элементов на одноэлектронных транзисторах. Это управляемые напряжением логические элементы и управляемые зарядом логические элементы.

## Стандарты постоянного тока

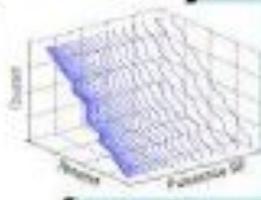
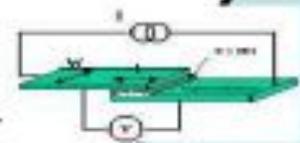
Одноэлектронный прибор может быть использован в качестве стандарта постоянного тока. Принцип его работы основан на стабилизации фазы одноэлектронных колебаний с помощью внешнего высокочастотного источника с характерной частотой  $f$ . Стабилизация фазы обеспечивает передачу определенного количества электронов  $n$  за период внешнего высокочастотного сигнала и, таким образом, генерацию постоянного тока, который фундаментально связан с частотой через уравнение  $I = nef$ .

Напомним, что в настоящее время квантовым эталоном напряжения служит джозефсоновский контакт, а квантовым эталоном сопротивления элемент на квантовом эффекте Холла.

Появление квантового эталона тока позволяет замкнуть метрологический треугольник напряжение-сопротивление-ток, что очень важно для целей метрологии.

Эффект Джозефсона (1962)

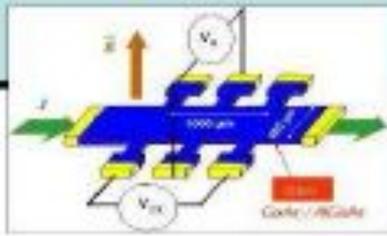
$$f = \frac{2e}{h} V$$



Одноэлектронный насос  
точность:  $10^{-8}$  А  
 $I = nef$

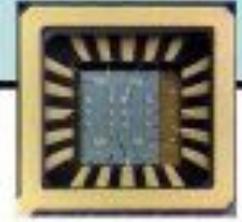


U

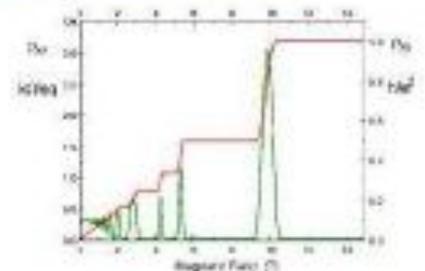


Квантовый эффект Холла (1980)

$$U = \frac{h}{e^2} I$$



I



## Оценка быстродействия одноэлектронных приборов

Характеристики	$S=a \times b$ , нм <sup>2</sup>	$C$ , аФ	$T$ , К	$R$ , кОм	$\tau=RC$ , пс
Современная технология	100×100	300	0.15	30	10
Ближайшая перспектива	30×30	30	1.5	30	1
Пределы нанолитографии	10×10	3	15	30	0.1
Молекулярный уровень	3×3	0.3	150	30	0.01

В таблице  $S=a \times b$  – площадь туннельного перехода,  $C$  – емкость данного перехода,  $R$  – сопротивление,  $T$  – рабочая температура,  $\tau$  – время переключения.

## Недостатки

- Во-первых, работоспособность одноэлектронных транзисторов обычно ограничена областью низких температур.
- Во-вторых, одноэлектронные транзисторы имеют высокий выходной импеданс из-за высокого сопротивления туннельных переходов.
- В-третьих, напряжение исток — сток для одноэлектронных транзисторов должно быть меньше, чем амплитуда (размах) напряжения затвора.
- В-четвертых, определенные трудности в воспроизводимости характеристик одноэлектронных приборов возникают в связи с появлением неконтролируемого заряда вблизи островка. Такой заряд возникает вследствие захвата хотя бы одного примесного атома диэлектрическим окружением островка. Заряд примеси поляризует островок и изменяет, таким образом, условия для кулоновской

## Основные преимущества

Главные преимущества одноэлектронных приборов по сравнению с известными биполярными и полевыми полупроводниковыми транзисторами связаны с намного меньшими размерами и с расширенными функциональными возможностями а также чрезвычайно низкой потребляемой мощностью.