



**Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Конотопський інститут  
Кафедра електронних приладів та автоматики**



**дисципліна: Фізика та технологія мікроелектронних приладів**

# **Одноелектронні прилади та пристрої**

к.ф.-м.н., провідн. наук. співроб., ст. викладач

М.М. Іващенко

Конотоп – 2018 р.

© М.М. Ivashchenko

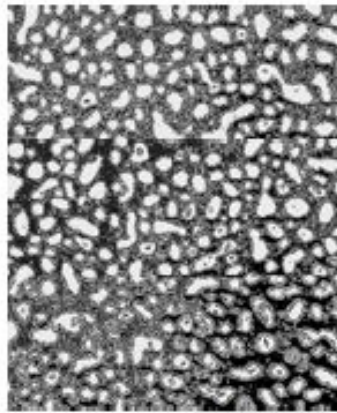
# Що таке одноелектроніка та одноелектроні прилади і пристрої?

Одноелектроніка — це розділ електроніки, який вивчає умови та приладові структури, в яких процес струмопереносу реалізується одним (або невеликою кількістю) електроном (ами), або, точніше, визначається рухом одного електрона.

Одноелектронними називаються прилади, в яких контролюється переміщення одного електрона або малої їх кількості.

# Краткая история одноэлектроники

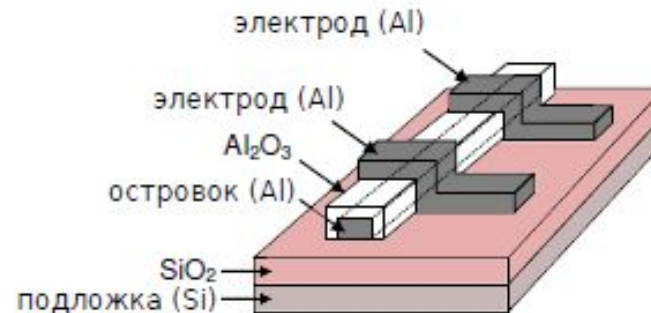
Гранулированная пленка



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.

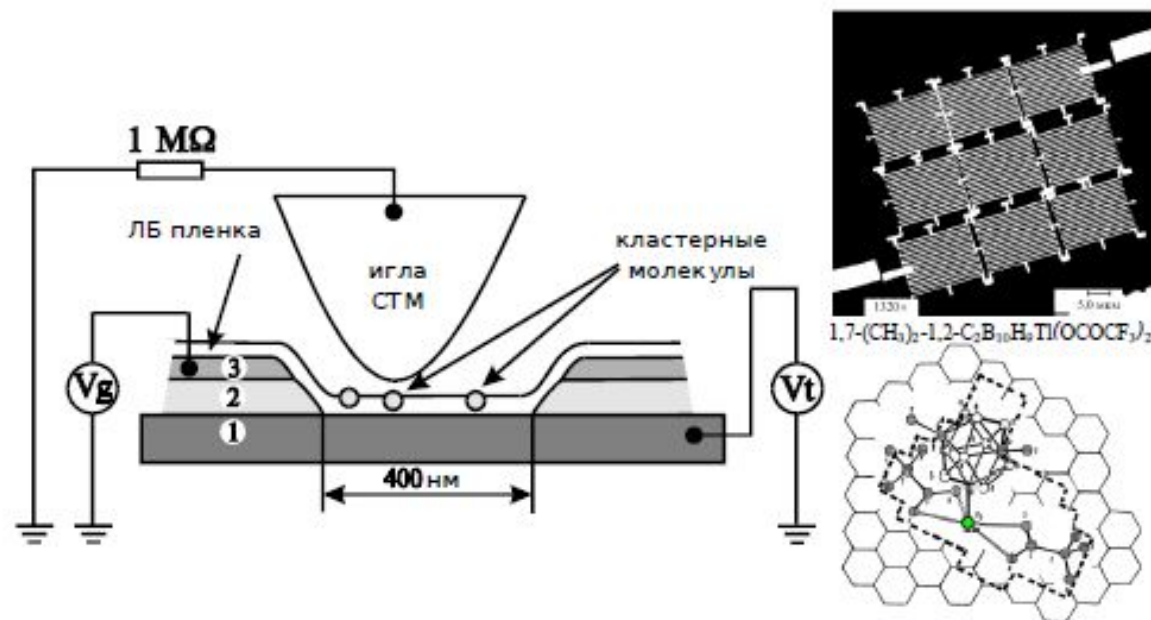
**1957, 1960 Esaki, Giaever**, экспериментальное подтверждение туннельного эффекта в полупроводниковых структурах, туннельный диод.

**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).

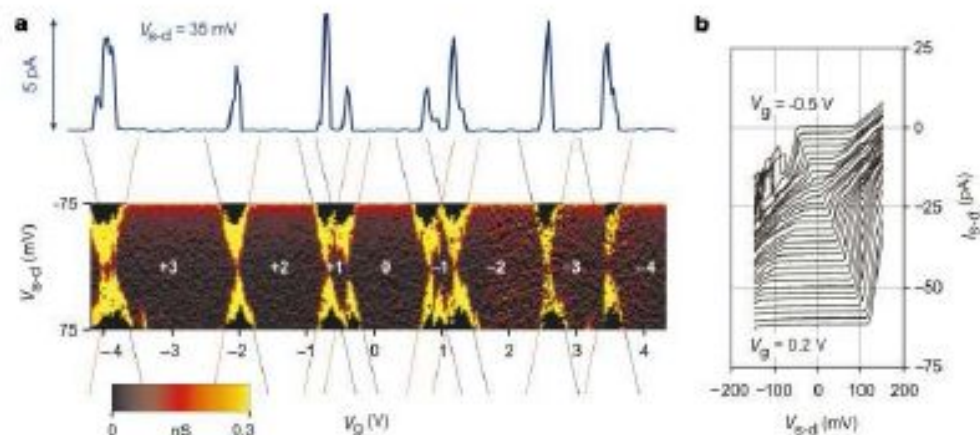
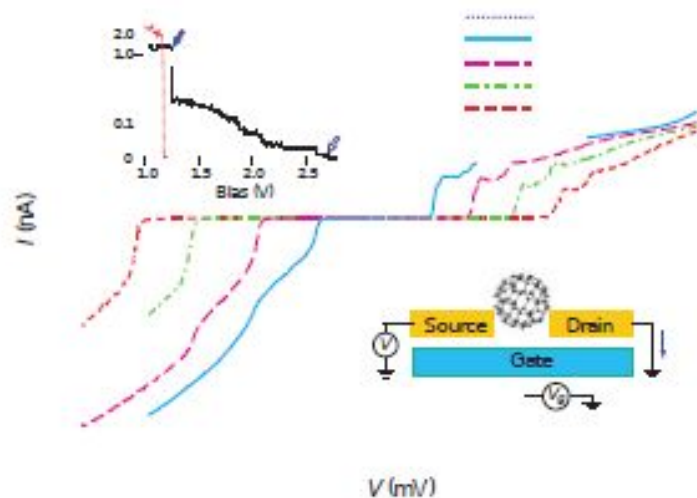
**1987 Fulton и Dolan, Лихарев и Кузьмин**, первый экспериментальный «металлический» одноэлектронный транзистор.

**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.

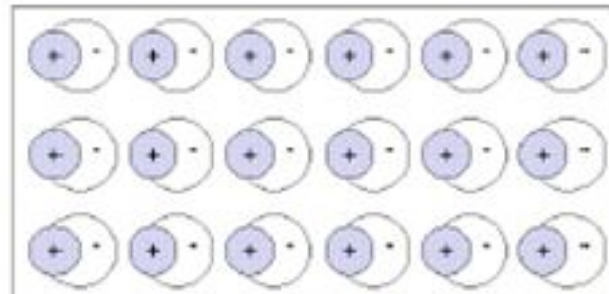
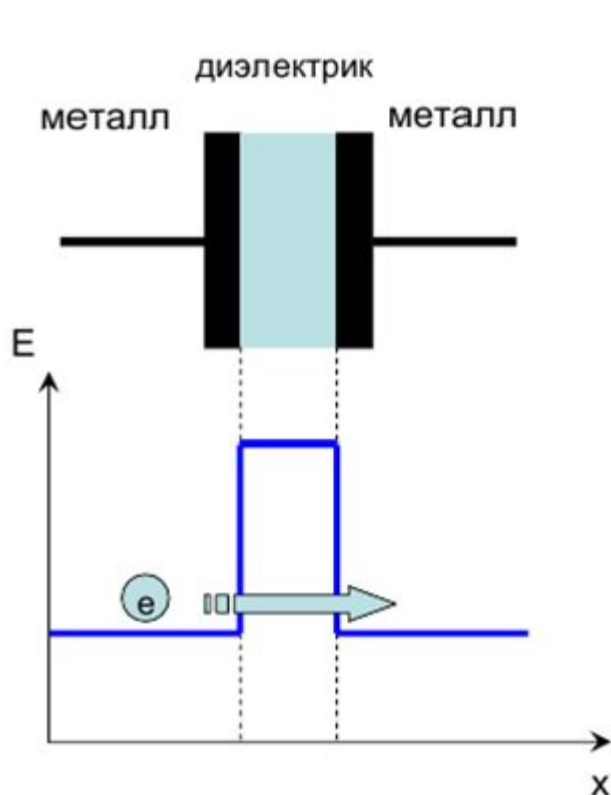
Останнім часом у зв'язку з наближенням до границь мініатюризації класичних мікроелектронних приладів підвищилась зацікавленість відносно приладів, які можуть забезпечити подальший прогрес електроніки. Одним з можливих шляхів такого прогресу є створення приладів, в яких контролюється переміщення визначеної кількості електронів, в ідеальному випадку, - одного електрона.

Створення так званих одноелектронних приладів відкриває нові перспективи цифрової одноелектроніки, в якій біт інформації буде представлений одним електроном. В таких приладах переміщення електрона реалізується з використанням ефекту тунелювання. Час тунелювання електрона є достатньо малим, теоретична межа швидкодії одноелектронних приладів є оберненопропорційною, тому - дуже високою. Робота, необхідна для переміщення одного електрона, також є малою а відповідно, енергоспоживання одноелектронних схем повинно бути надзвичайно малим.

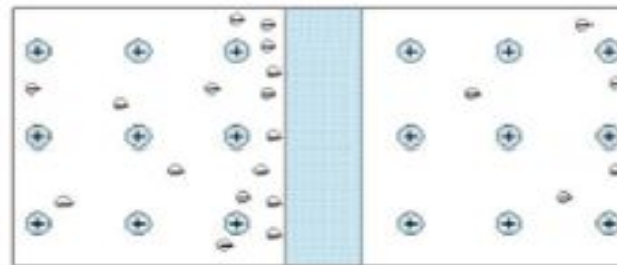
# Кулонівська блокада тунелювання

Відомо, що електричний струм у провіднику зумовлений рухом електронів відносно нерухомих іонів ґратки.

У структурі, що складається з двох областей провідника, розділених тонким діелектриком, електричний заряд переноситься комбіновано – безперервно у провіднику та дискретно через діелектрик.



В провіднике  
смещение заряда под  
действием внешнего  
поля непрерывно.

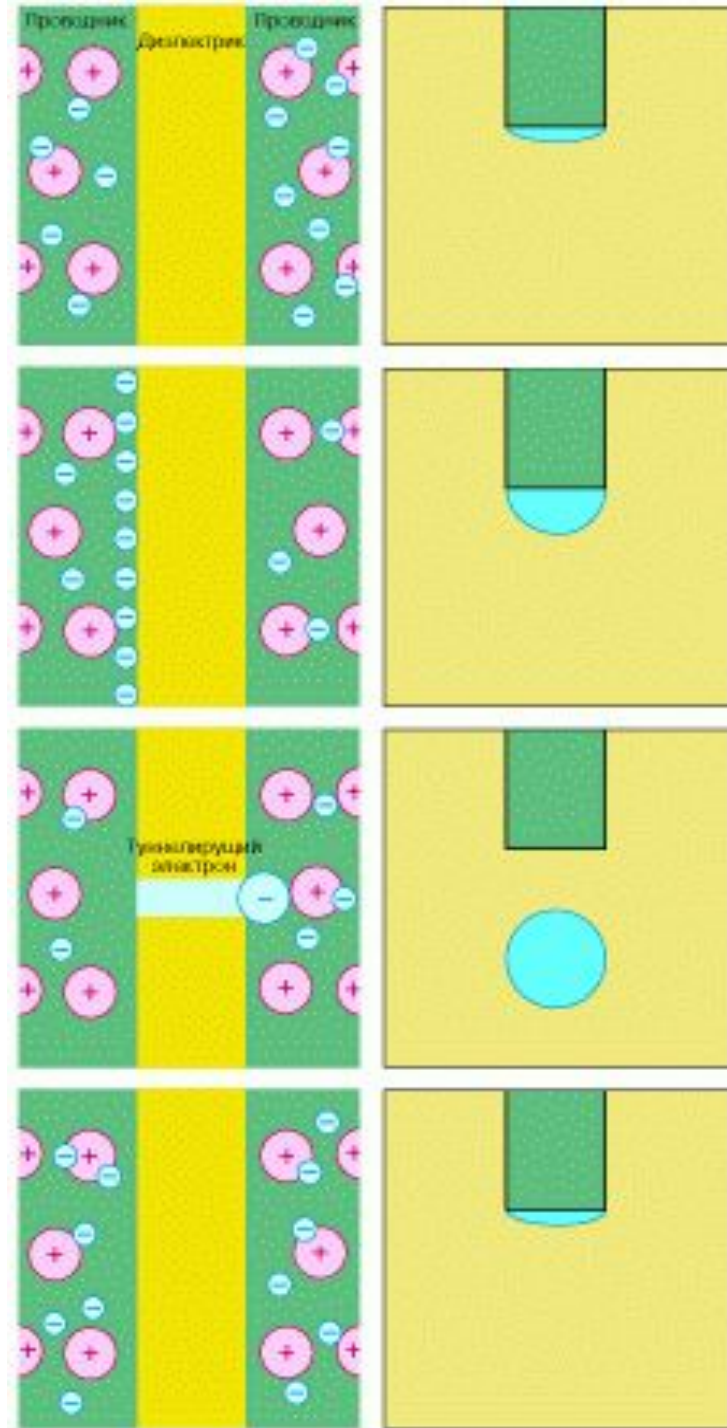


Туннелирование  
электронов происходит  
дискретно при  
постоянном  
приложенном  
напряжении.





Спочатку межа розділу між провідником та діелектриком є електрично нейтральною. За умови прикладання до зовнішньої структури електричного потенціалу починається безперервна зміна кількості заряду в провіднику. Вона супроводжується накопиченням заряду на межі з діелектриком. Накопичення заряду відбувається до тих пір, доки його величина не виявиться достатньою для відриву та тунелювання через діелектрик одного електрона. Після процесу тунелювання система повертається у початкове положення.



При збереженні зовнішньої прикладеної напруги все повторюється знову. Електрон набуває можливість «тунелювати» крізь діелектрик, коли накопичений заряд становиться більшим за  $+e/2$  (тунелювання в «прямому» напрямі) або меншим за  $-e/2$  (тунелювання в «зворотному» напрямі), оскільки тільки за такої умови зменшується електростатична енергія системи. Всередині заданого інтервалу тунелювання є неможливим внаслідок кулонівської взаємодії електрона з іншими рухомими та нерухомими носіями заряду в провіднику. Дане явище називають **кулонівською блокадою**.

Одноелектронне тунелювання в умовах кулонівської блокади було вперше виявлено Д. Аверінім та К. Ліхарєвим. На основі їх робіт (1985-1986 рр.) сформувався новий напрям електроніки - **одноелектроніка**.

Кулонівською блокадою називають відсутність струму через тунельний перехід за наявності зовнішньої напруги, якщо тунелюванню електронів перешкоджає їх кулонівська взаємодія

Конструкції одноелектронних приладів є різноманітними, однак їх можна класифікувати за декількома ознаками:

**За напрямом протікання струму** конструкції ділять на **горизонтальні (латеральні)** та **вертикальні**. В

горизонтальних приладах напрям протікання струму є паралельним до площини поверхні структури, у вертикальних - перпендикулярним.

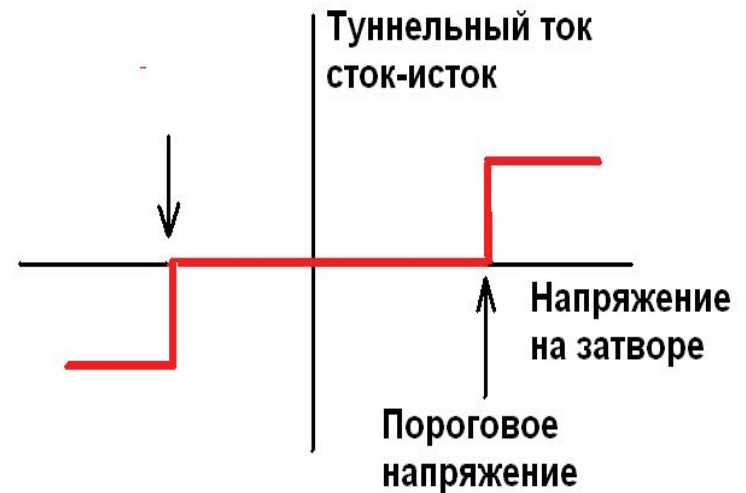
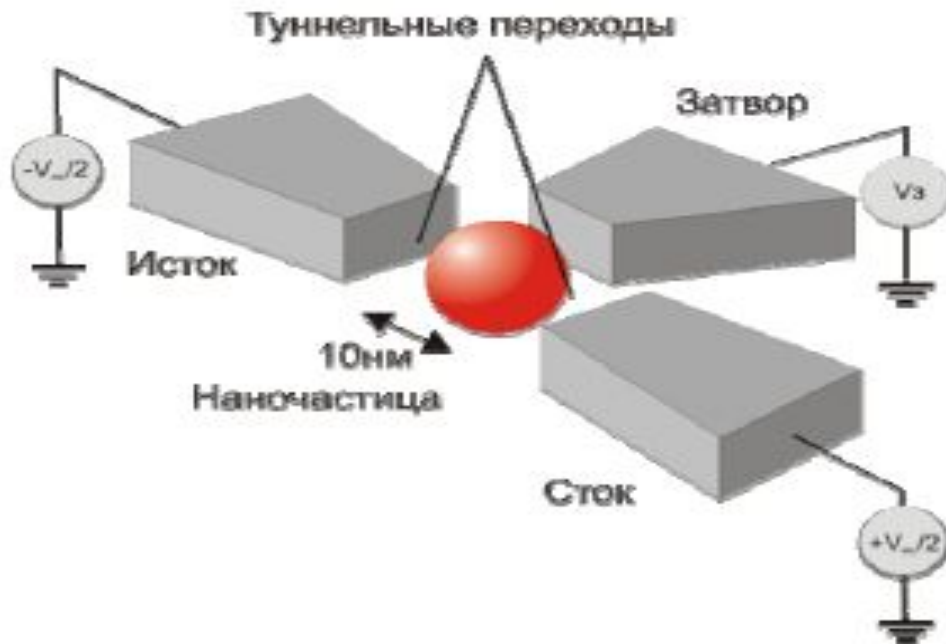
**За способом формування квантових точок (КТ)** є прилади на **сталіх та тимчасових КТ**. Відмітимо, що термін «КТ» по відношенню до малого об'єкта не завжди є коректним, оскільки квантування енергетичного спектру може і не спостерігатися. Однак даний термін широко застосовується в силу того, що для квантування спектру достатньо знизити температуру.

**Стала КТ** існує весь час та являє собою частіше за все кластер (металевий або напівпровідниковий). **Тимчасова КТ** створюється у двомірному електронному газі шляхом прикладення збіднюючих напруг, тобто існує лише на протязі часу роботи. Крім того, прилади на тимчасових КТ можна розділити за способом формування двомірного електронного газу на **інверсні та гетероструктурні**. У **інверсних приладах** двомірний електронний газ утворюється в інверсних приповерхневих каналах шляхом прикладення відповідної напруги. В **гетероструктурних приладах** двомірний електронний газ сконцентрований на гетеромежі. За кількістю КТ прилади можуть бути **нуль- (одноточкові), одно- (ланцюг точок) та двомірні (масив точок)**. За керованістю параметрами КТ прилади ділять на **некеровані (двохелектродні) та керовані (багатоелектродні, з одним або декількома затворами)**.

# Одноелектронний транзистор

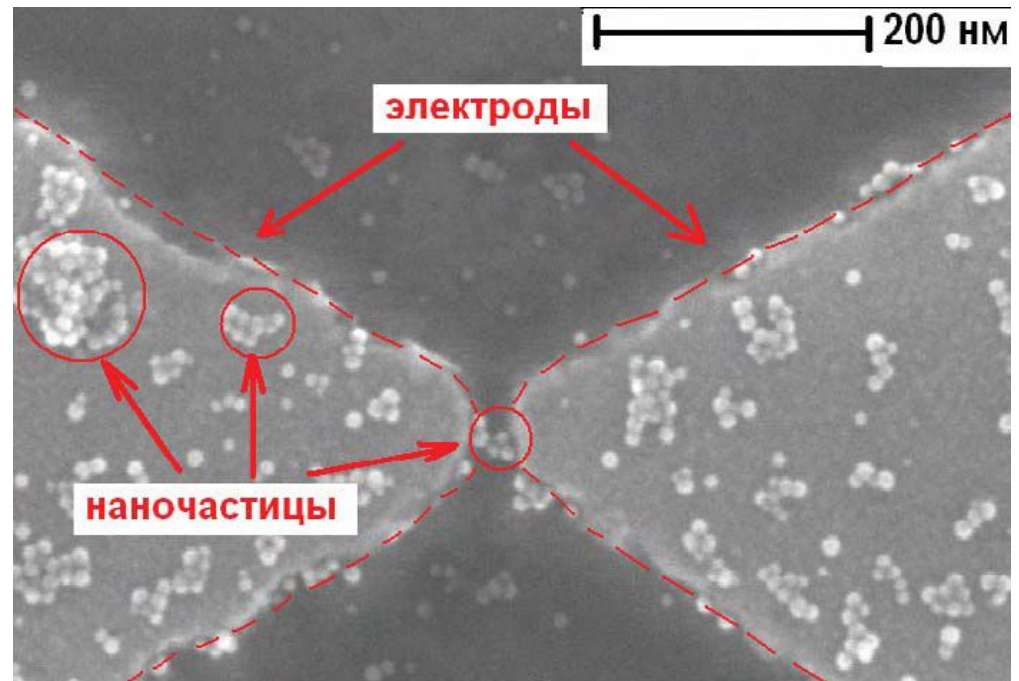
Принциповою відмінністю одноелектронного транзистора від класичного є той факт, що лінійні розміри каналу між зтоком та витоком лежать у нанодіапазоні, обумовлюючи прояв *квантово-розмірних ефектів*. Крім того, одноелектронний транзистор не підсилює струм, а лише управляє переходом електронів, тому більш коректним було б називати його перемикачем. Принцип роботи одноелектронного транзистора оснований на ефекті так званої «кулонівської блокади» - ефекті стрибкоподібної зміни потенціальної енергії достатньо малої системи при тунелюванні одного електрона та блокуванні руху всіх інших. При цьому електричний струм у колі протікає макроскопічно реєстрованими порціями, інакше кажучи, у системі проявляється рух одиничних зарядів.

Одноэлектронный транзистор, как и классический, має у своєму складі три електроди - витік, втік та затвор. Однак між електродами розташований металевий або напівпровідниковий «наноострівець» - наночастинка або кластер нанометрових розмірів (рис.).



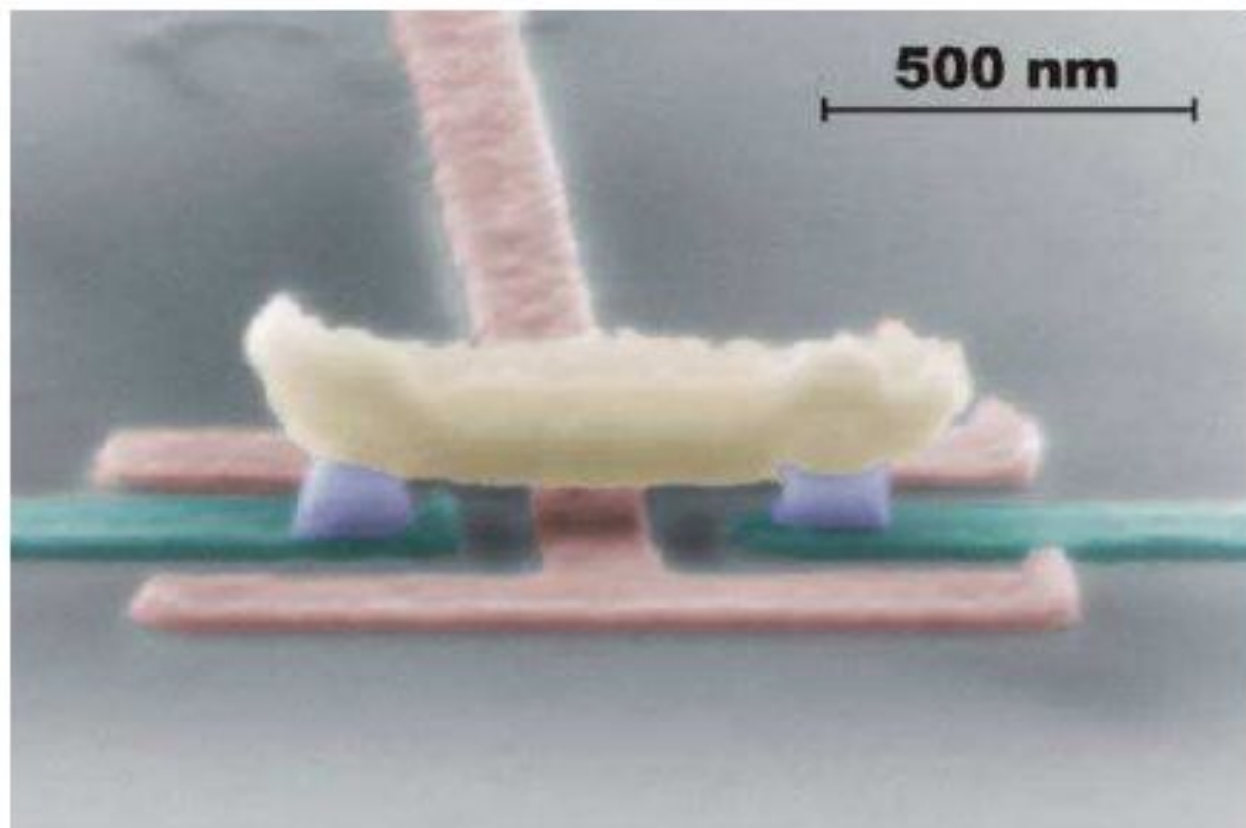
При цьому товщини «наноострівців» є настільки малими, що електрон має змогу тунелювати. Якщо прикласти різницю потенціалів між втоком та витоком, то, відповідно, повинен протікати тунельний струм. Однак доки потенціал на управляючому електроді буде меншим за деяке порогове значення, тунелювання не спостерігатиметься. Електрон на наночастинці залишається ізольованим, тобто «заблокованим».

При подальшому збільшенні напруги та досягнення вище порогового значення блокада електрона проривається, і у колі між втоком та витоком відбувається «стрибок» електрона - протікатиме тунельний струм.



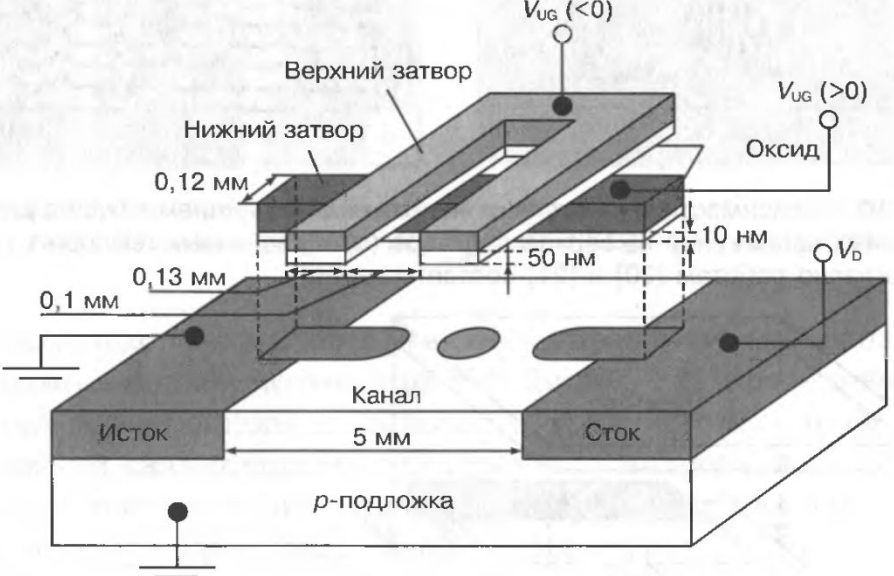


Таким чином, управляючи потенціалом затвору, можна пропускати по колу одиничні електрони. Якщо піти далі і замість наночастинки помістити між електродами молекулу або молекулярний комплекс, то рух одиничних електронів буде відбуватися в результаті «стрибків» по хімічним зв'язкам - в роботу «вступлять» дискретні рівні енергії молекули. **Таким чином, одноелектронний транзистор розглядається як крайня супінь мініатюризації класичного *транзистора***

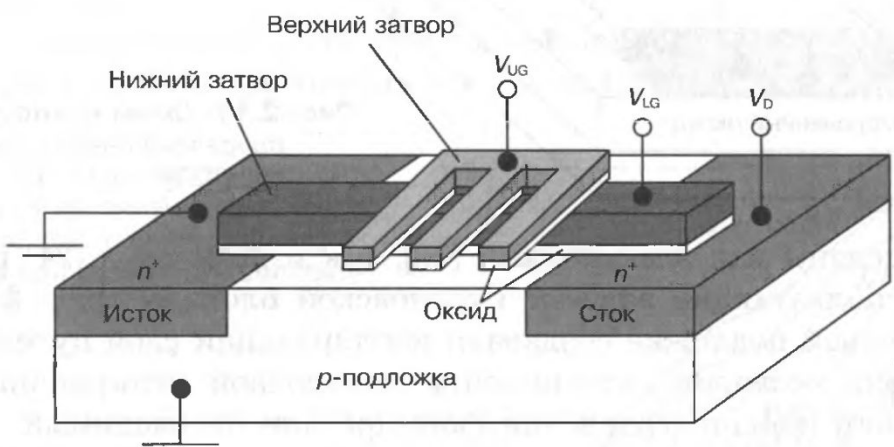


Одноэлектронный транзистор, изготовленный с использованием литографической техники.

Для наглядности различные функциональные элементы окрашены разными цветами.



а



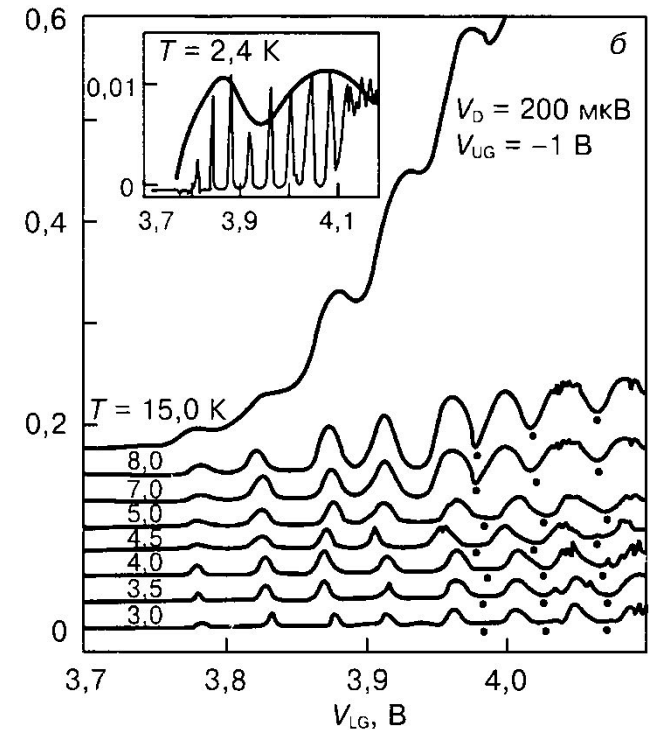
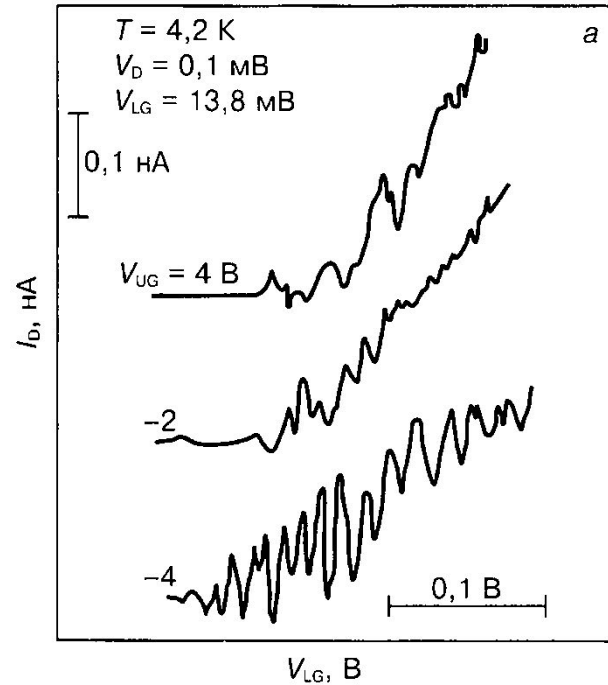
б

Схема кремнієвого одноелектронного транзистора з двома затворами на одинарній (а) та подвійній (б) КТ.  $V_{UG}$ ,  $V_{LG}$  - напруги на верхньому та нижньому затворах відповідно;  $V_D$  - напруга на втоці

Конструкції, основані на принципі роботи МДН-транзистора (метал-оксид-напівпровідник) з індукованим каналом. Затвор таких транзисторів складається з двох електрично не зв'язаних частин. Подача на нижній затвор додатньої напруги формує інверсний n-канал у р-підкладці, а подача на верхній затвор від'ємної напруги - розриває канал областями збіднення, формуючи КТ.

Дані прилади є планарними керуючими приладами на одній або двох тимчасових КТ. На рис. а показані залежності струму витoku для однокерованого транзистора від напруги на нижньому затворі при різних напругах на верхньому затворі. На рис. б представлені аналогічні характеристики, однак при різних температурах.

Осциляції на цих залежностях відповідають присутності оуремих електронів.



Залежності струму витoku від напруги на нижньому затворі для різних напруг на верхньому затворі (а) при  $4,2$  К та різних температурах (б) при  $V_{UG} = -1$  В та  $V_D = 0,2$  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.

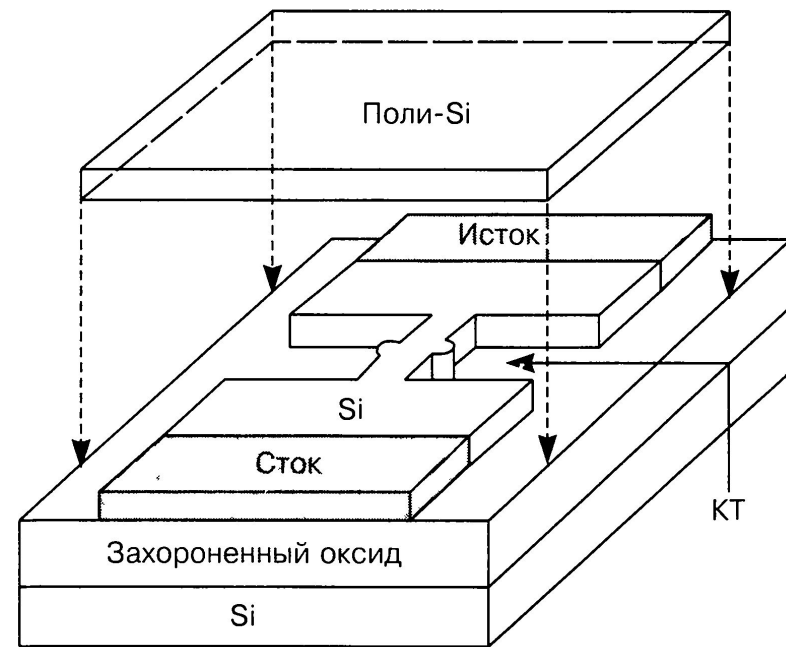
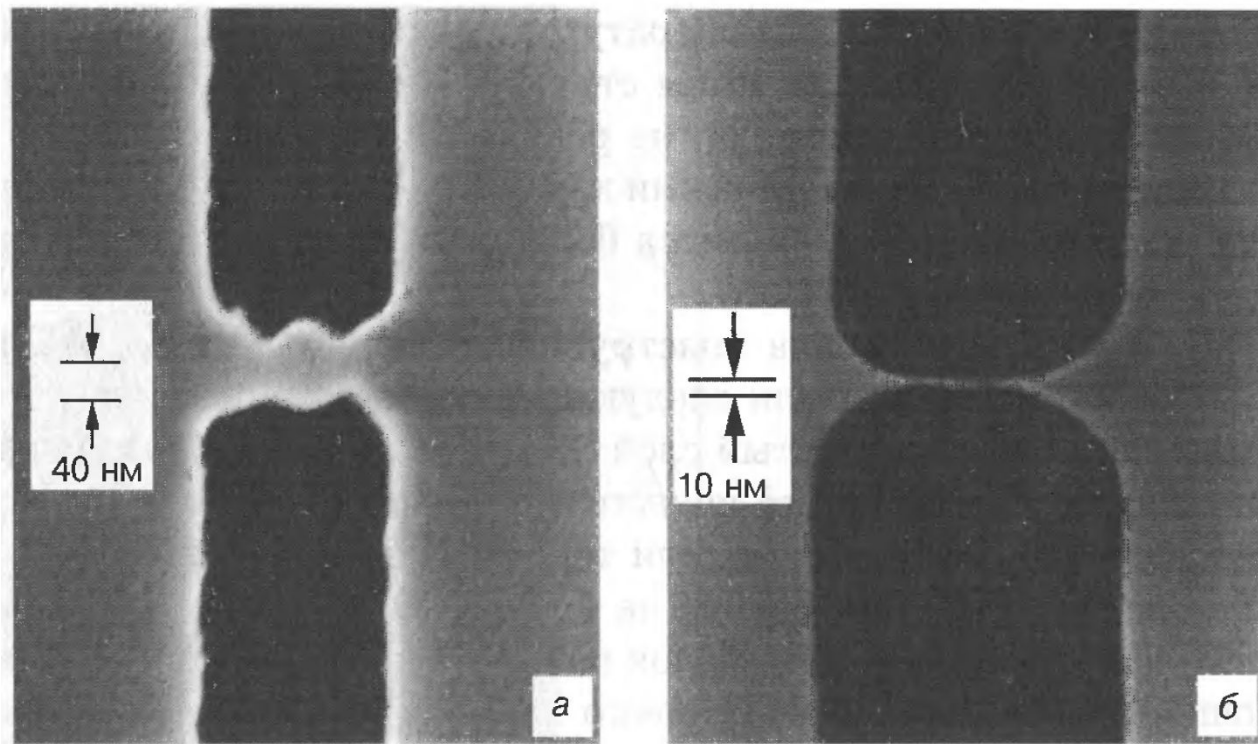


Схема квантового одноэлектронного транзистора

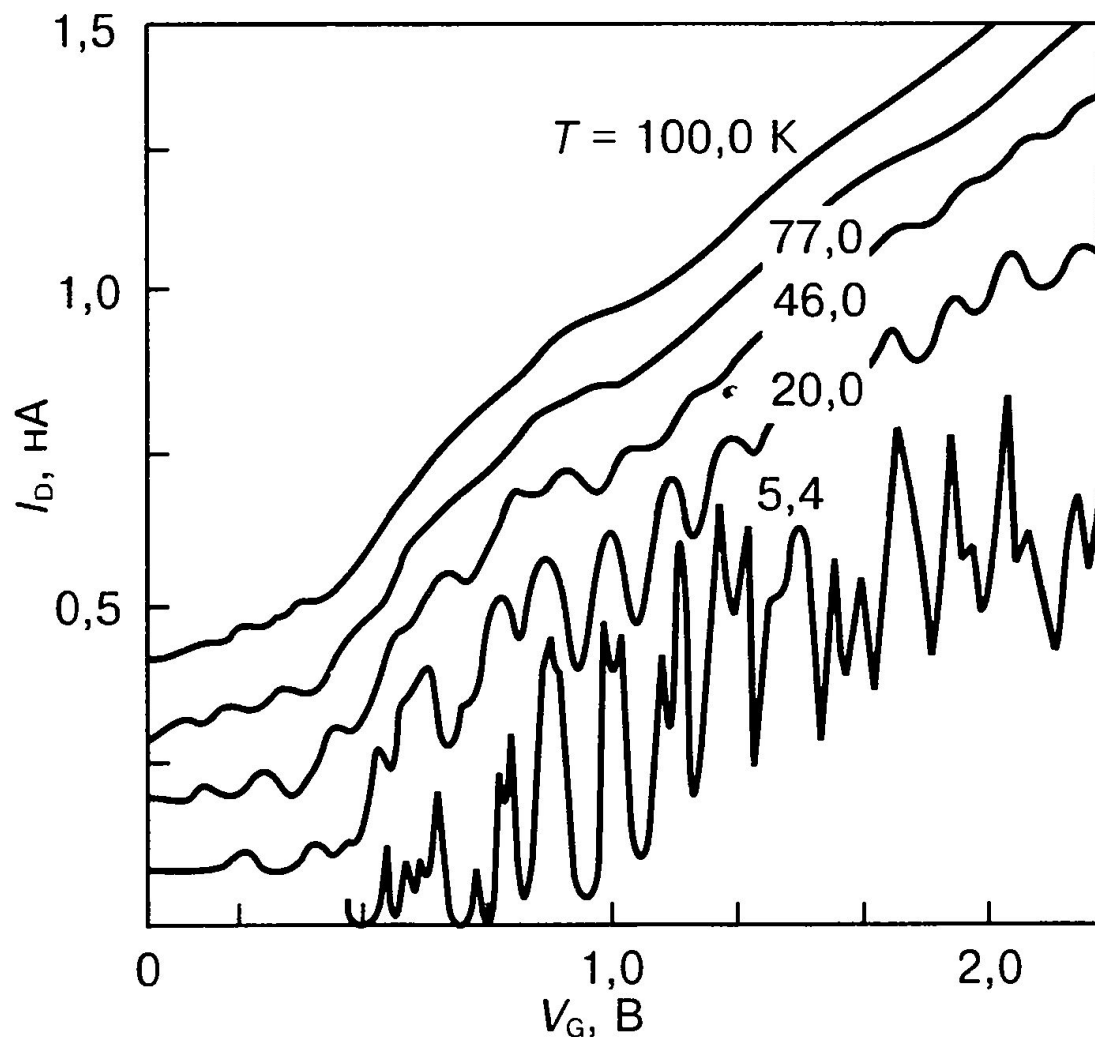
Описанные транзисторы являются управляемыми планарными приборами на одной постоянной КТ. На рис. приведены изображения электронного и дырочного транзисторов, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).



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

Залежність струму витоку від затворної напруги для електронного транзистора при різних температурах представлена на рис. Аналогічні залежності отримані і для діркового транзистора.

Необхідно відмітити, що ці два транзистори - єдині одноелектронні прилади (крім реалізованих з використанням СТМ), що працюють за температур вище 77 К.



Реалізована конструкція приведена на рис. Прилад виготовляється наступним чином: на полікремнійовий шар наносили товстий слой  $\text{SiO}_2$ . З використанням електронної літографії та реактивного іонного травлення формується острівець  $\text{Si-SiO}_2$ . Потім проводиться термічне окислення для отримання тонкого (2 нм) оксиду на бічній поверхні острівця.

Після нанесення ще одного шару полікремнію методом електронної літографії та реактивного іонного травлення формуються підвідні контакти

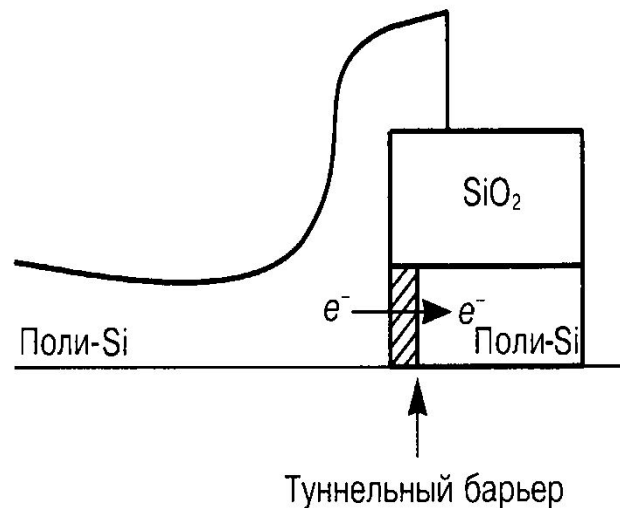
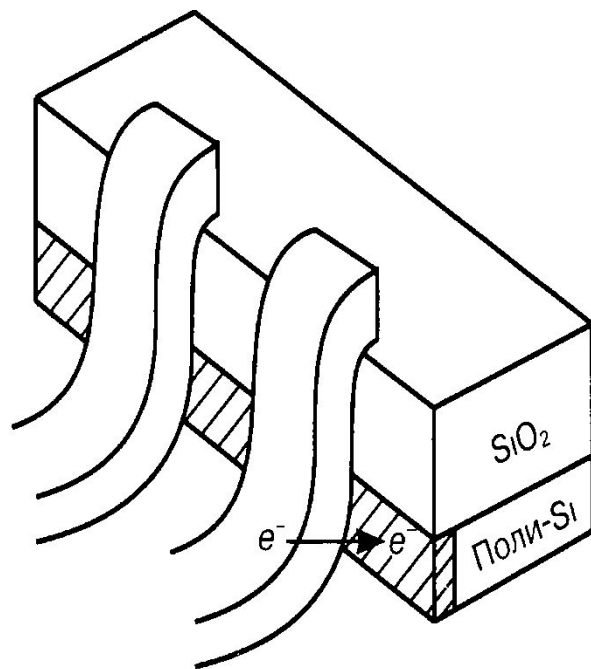


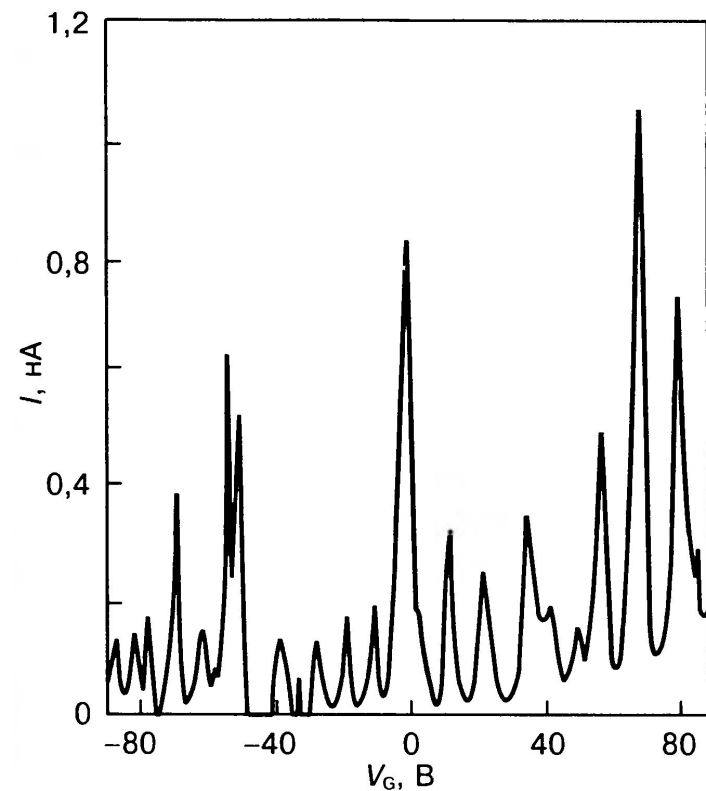
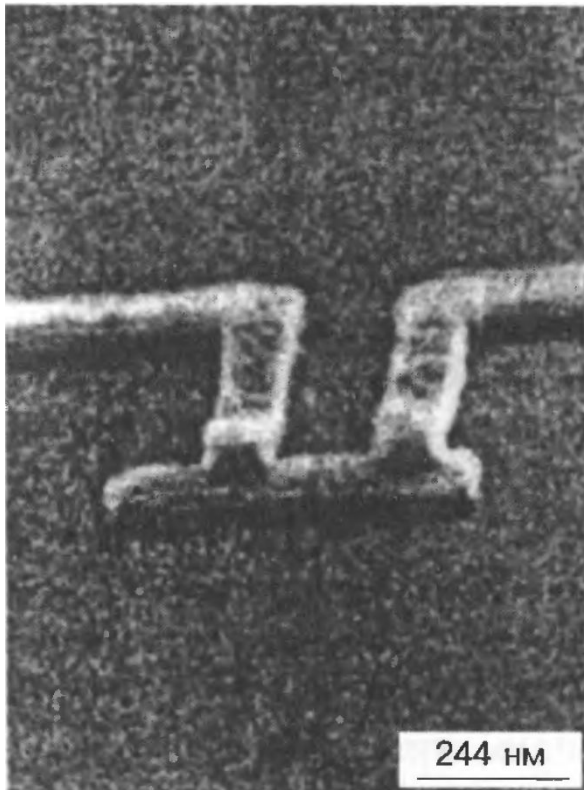
Схема одноэлектронного транзистора



Роль КТ відіграє острівець, тунельні контакти реалізуються через тонкий бічний оксид. Ємність перекриття контактів та острівця зменшується за рахунок більшої товщини  $\text{SiO}_2$  (50 нм) над острівцем. В якості затворного електрода використовується підкладка. Класифікація прилада є аналогічною до попереднього.

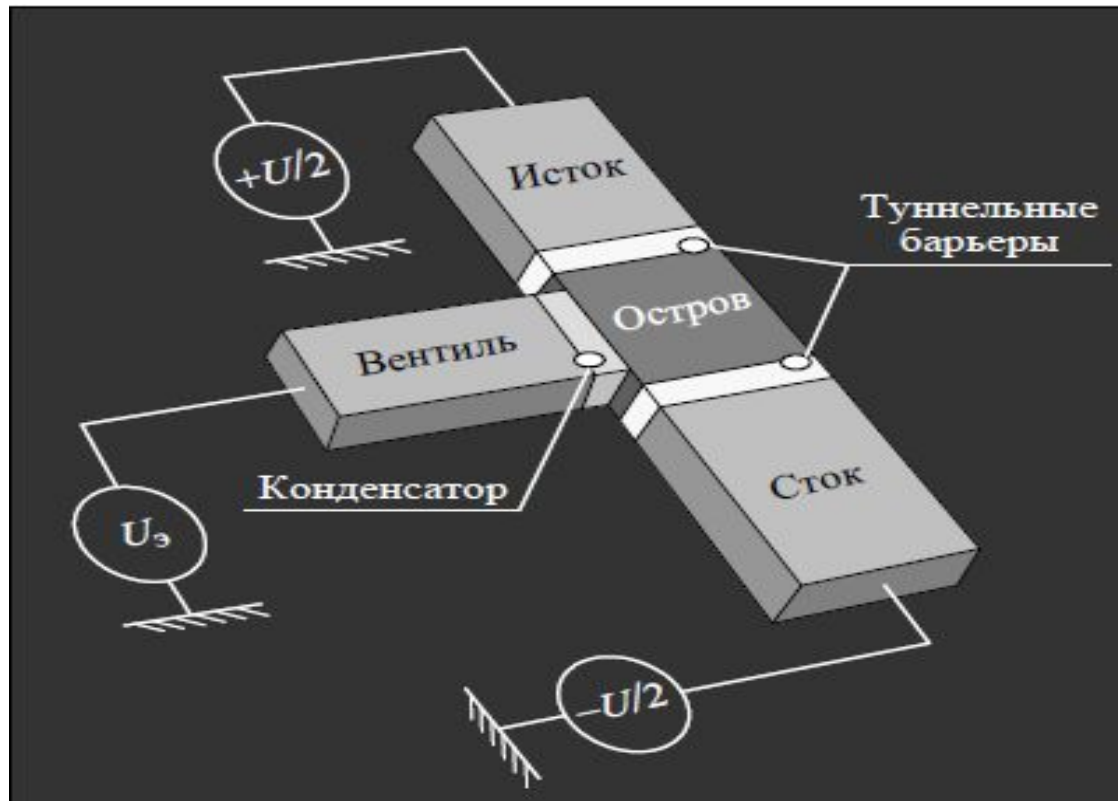
Як видно з рис., площа тунельного контакту визначається висотою острівця та шириною підвідного контакту, які складають 30 та 100 нм відповідно. Таким чином, ємність контактів при товщині бічного оксиду 2 нм складає 50 фмФ.

Зображення структури, отримане методом РЕМ, показане на рис. а. На рис. б представлені характерні одноелектронні осциляції струму витоку від напруги на затворі (тобто на підкладці). Вимірювання проводились за температури 4,2 К.



Напруга  
на витоку 3 мВ

Однією з перспективних конструкцій одноелектронних пристроїв є Т-подібна транзисторна структура, що складається з двох одноелектронних транзисторів, зв'язаних між собою через тунельний конденсатор. На основі Т-подібних транзисторних структур можуть бути реалізовані одноелектронний комутатор, одноелектронний насос, одноелектронний інвертор, тощо.



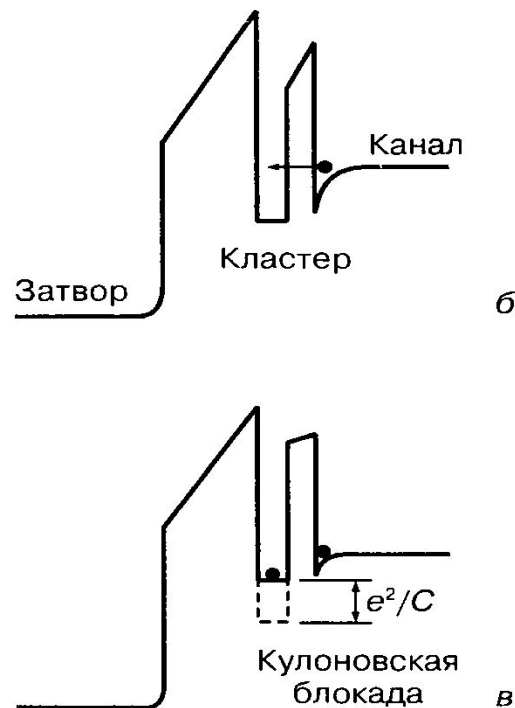
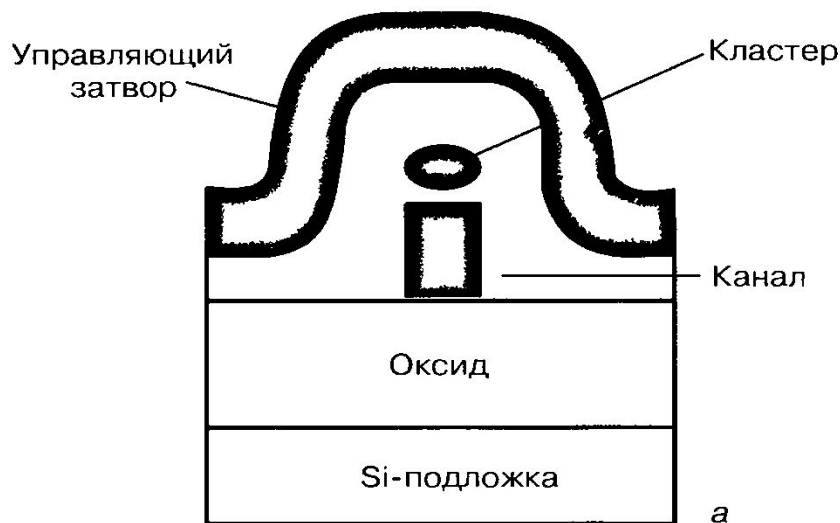
Інший типовий приклад реалізації одноелектронного приладу, що являє собою елемент пам'яті МДН-типу (метал-діелектрик-нпівпровідник) з ультракоротким каналом. Розглянемо металевий кластер (сферичний, з радіусом  $R$ ), поміщений у діелектричне середовище з діелектричною проникністю  $\epsilon$ . Потенціал такого кластера дорівнює

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

де  $q$  - електричний заряд;  $C = \epsilon R$  - ємність.

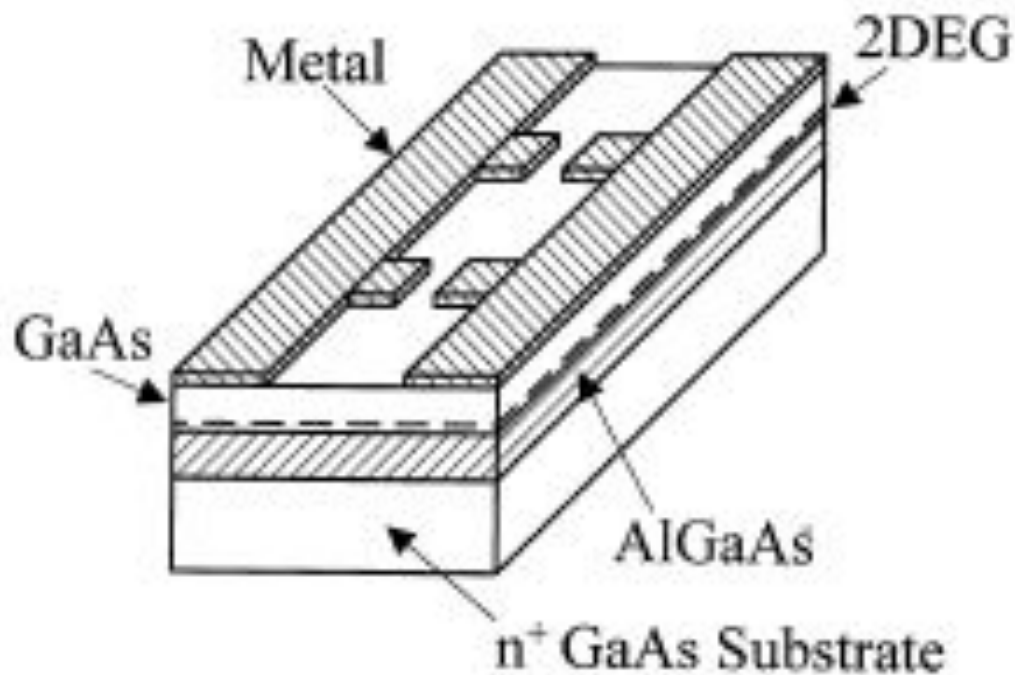
Для кластера розміром в декілька нанометрів ємність складає  $\sim 10^{-18}$  Ф. Тому один електрон, поміщений у даний кластер, створює потенціал порядку 0,1 В. Такий потенціал може виявитися достатнім для кулонівської блокади транспорту інших електронів. Це відкриває можливість для створення нового класу одноелектронних приладів..

Разроблено декілька типів приладових структур даного типу: одноелектронні елементи пам'яті (рис.); польові транзистори, керовані одним електроном на затворі; одноелектронний аналог біполярного транзистора; «одноелектронний насос», тощо.



Одноелектронний пристрій пам'яті з нанорозмірним кластером в якості плаваючого затвора. Схематичне зображення структури (а) та енергетичні діаграми до (б) та після (в) захоплення електрона на кластер. Захоплення одного електрона приводить до запирання вузького каналу за рахунок ефекта кулонівської блокади

Інтенсивно розроблюються також і одноелектронні напівпровідникові структури на основі GaAs. На рис. показаний прилад, що являє собою подвійний тунельний перехід на основі гетероструктури GaAs/AlGaAs.



Структура на основі GaAs/AlGaAs з розщепленим затвором Шотткі.

## Лічильник електронів

Система з багатьох послідовно з'єднаних тунельних конденсаторів може слугувати в якості лічильника електронів - вона дозволяє контролювано переміщувати одиничні електрони. Лічильник електронів можна використати в цілях метрології - квантовий стандарт струму.

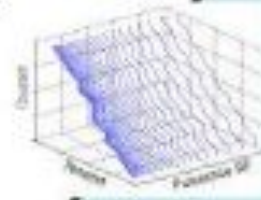
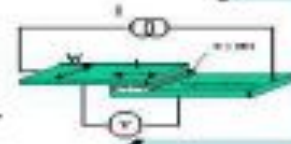
## Логічні елементи

Є дві принципові можливості побудови логічних елементів на одноелектронних транзисторах. Це керовані напругою логічні елементи та керовані зарядом логічні елементи.

На даний час квантовим еталоном напруги слугує джозефсонівський контакт, а квантовим еталоном опору є елемент на квантовому ефекті Холла.

Эффект Джозефсона  
(1962)

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



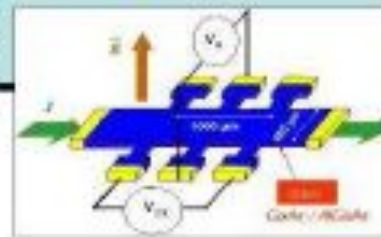
Одноэлектронный насос

точность:  $10^{-8}$  А

$$I = nef$$

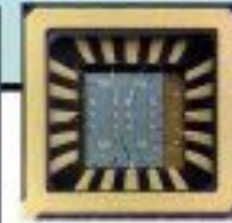


$U$

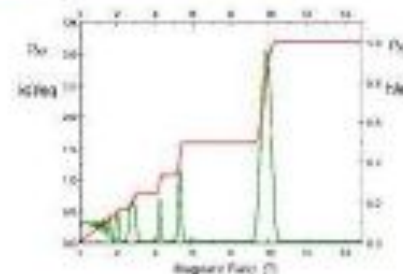


Квантовый эффект  
Холла (1980)

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



$I$



Поява квантового еталона струму дозволить замкнути метрологічний трикутник напруга-опір-струм