

# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Структуры с вертикальным переносом

---

---

Ранее физику размерного квантования мы рассмотрели на примере одиночных пленок, нитей и точек. Реальные структуры в большинстве случаев содержат большое количество одинаковых или почти одинаковых квантовых объектов. Как правило, это не меняет физической картины, поскольку вклады от всех объектов просто суммируются.

Совсем другая физическая картина возникает, когда отдельные слои, нити или точки находятся столь близко друг к другу, что носители заряда могут туннелировать между ними.

# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

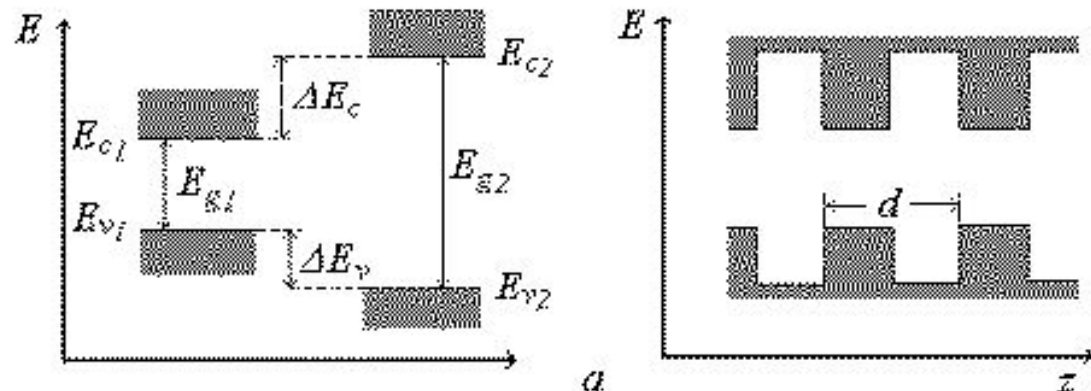
## Структуры с вертикальным переносом

На рисунке показана система параллельных квантовых ям, в полупроводниковой композиционной сверхрешетке.

Если слои широкозонного полупроводника очень тонкие (порядка единиц нанометров), то квантовые ямы не являются независимыми и могут обмениваться электронами за счет туннелирования.

Подобные структуры принято называть *структурами с вертикальным переносом*.

Подвергнув такую систему литографической обработки, мы получим систему квантовых нитей или точек, между которыми возможен вертикальный перенос. Подобные структуры служат основой для ряда приборов нанoeлектроники. Таких, например, как резонансно-туннельный диод или одноэлектронный транзистор.

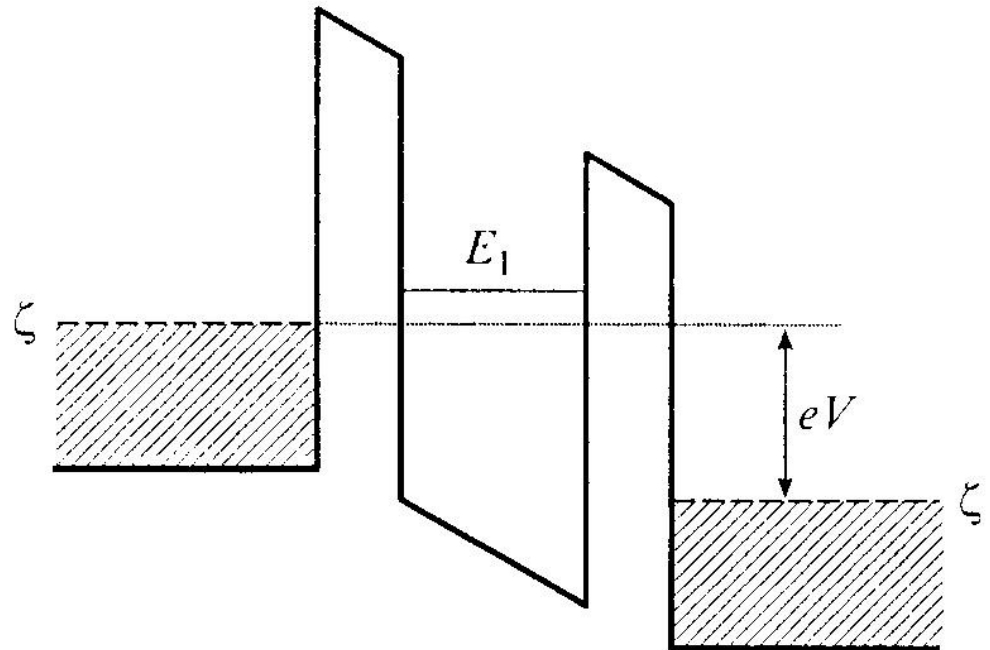


# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Резонансно-туннельные структуры

Резонансно-туннельными структурами называют совокупность полупроводниковых слоев, разделенных туннельными барьерами, где хотя бы один из слоев представляет собой квантовую яму с системой энергетических уровней.

Зонная диаграмма простейшей резонансно-туннельной структуры с одной квантовой ямой, двумя туннельными барьерами и двумя внешними сильно легированными массивными областями



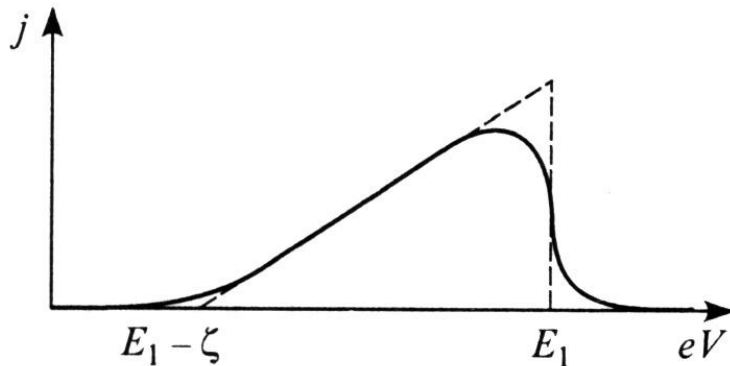
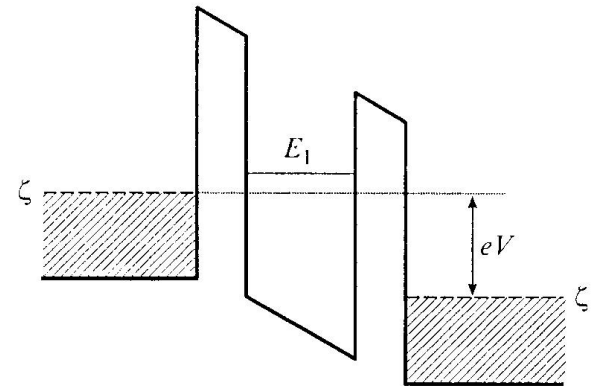
# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Резонансно-туннельные структуры

Если бы на месте квантовой ямы находился массивный полупроводник, то с ростом напряжения туннельные токи через оба барьера возрастали бы и ВАХ носила бы монотонный характер. Дискретность энергетического спектра в яме приводит к тому, что туннелирование через левый барьер возможно лишь тогда, когда уровень  $E_1$  совпадает по энергии с каким-либо из заполненных состояний слева от барьера, т.е. когда падение напряжения на этом барьере  $V$  удовлетворяет условию

$$E_1 - \zeta < eV < E_1$$

Вне этого интервала ток должен равняться нулю. Обращение тока в нуль означает, что при напряжениях, близких к правой границе интервала, ток убывает с ростом напряжения, т.е. ВАХ имеет падающий участок – участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Наличие такого участка является причиной большого интереса к резонансно-туннельным структурам.



# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Лазеры с квантовыми ямами и точками

---

---

Самым распространенным типом полупроводникового лазера является лазер на двойной гетероструктуре, где активная область представляет собой тонкий слой узкозонного полупроводника между двумя широкозонными. Двойные гетероструктуры предложены в 1963 г. Ж.И. Алферовым. В 2000 году «за развитие полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокоскоростной электронике и оптоэлектронике». Ж.И. Алферов и Г. Крёмер (США) награждены Нобелевской премией по физике.

При достаточно малой толщине активной области она начинает вести себя как квантовая яма и квантование энергетического спектра в ней существенно меняет свойства лазеров. Основное влияние на это оказывает изменение плотности состояний, происходящее под влиянием размерного квантования. Если в массивном полупроводнике в непосредственной близости от края зоны плотность состояний мала, то в квантово-размерной системе она не убывает вблизи края, оставаясь для двумерных систем равной

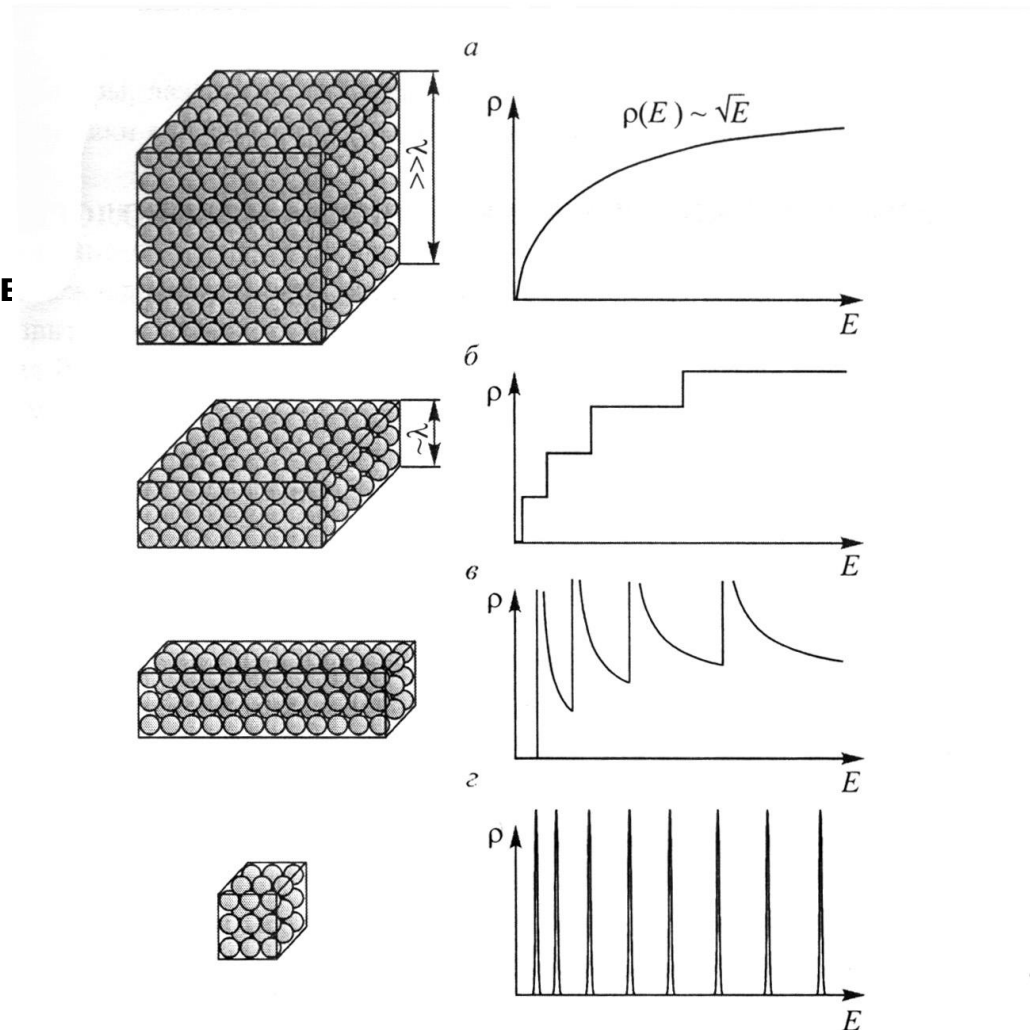
$$m/\pi\hbar^2$$

Благодаря этому факту условия создания инверсной населенности в двумерных системах оказываются более благоприятными, чем в трехмерных. Создание лазеров с квантово-размерной активной областью позволило получить непрерывную генерацию при комнатной температуре и в дальнейшем снизить пороговый ток инжекционного лазера до рекордно низких значений, составляющих величину порядка 50 А/см<sup>2</sup>.

# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Лазеры с квантовыми ямами и точками

Зависимость плотности электронных состояний от энергии в массивных полупроводниках (а), квантовых ямах (б), квантовых нитях (в) и квантовых точках (г).



# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Лазеры с квантовыми ямами и точками

---

---

Благодаря иной энергетической зависимости плотности состояний меняется не только величина порогового тока, но и его температурная зависимость. Она становится более слабой, в силу чего непрерывную генерацию удается получить не только при комнатной температуре, но и при температурах на много десятков градусов выше.

Другой важной особенностью лазеров на квантовых ямах является возможность их частотной перестройки. Минимальная энергия излучаемых световых квантов определяется шириной запрещенной зоны и квантовыми уровнями для электронов и дырок:

$$\hbar\omega = E_g + E_1^e + E_1^h$$

Она меняется при изменении ширины потенциальной ямы, т.е. путем изменения этой величины можно осуществлять перестройку частоты генерации, сдвигая ее в коротковолновую сторону по сравнению с лазерами с широкой (классической) активной областью.

В квантовых точках энергетический спектр меняется еще более радикально, чем в квантовых ямах. Плотность состояний имеет  $\delta$ -образный вид, и в результате отсутствуют состояния, которые не принимают участия в усилении оптического излучения, но содержат электроны. Это уменьшает потери энергии и как следствие уменьшает пороговый ток.

Лазеры могут содержать одну или (для увеличения оптического усиления) несколько плоскостей, заполненных квантовыми точками.

Согласно теоретическим оценкам диодные лазеры с активной средой из квантовых точек должны обладать значительно лучшими свойствами по сравнению с лазерами на квантовых ямах, а именно: существенно большим коэффициентом усиления, меньшей пороговой плотностью тока, полной невосприимчивостью к температуре решетки, лучшими динамическими характеристиками.

Показано, что в лазерах на основе вертикально связанных квантовых точек пороговый ток при комнатной температуре может быть снижен до  $15 \text{ A/cm}^2$ .

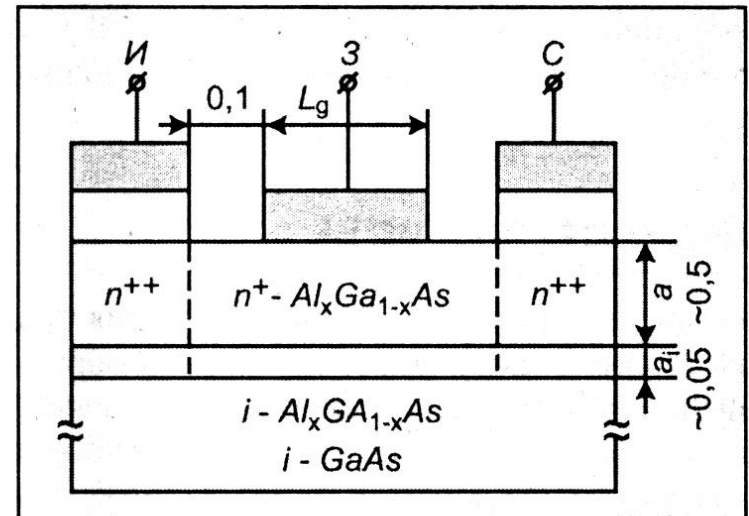
# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Полевой транзистор на гетероструктурах

Традиционные полевые транзисторы, выполненные по субмикронной технологии, приобретают новые свойства. Уменьшение толщины окисла, длины канала приводят к квантованию поперечного движения в канале. В результате образуется квазидвумерный газ носителей заряда, увеличивается их подвижность и туннельный ток. При длинах затворов транзисторов до 20 нм они становятся сравнимыми с волны Де-Бройля при комнатной температуре.

Полевой транзистор на гетероструктурах с использованием арсенида галлия представляет собой эпитаксиальную пленку, нанесенную на полупроводниковую подложку. Образуется гетеропереход с потенциальной ямой со стороны подложки, в которой формируется проводящий канал, подобный каналу в сильно инвертированном выраженном поверхностном слое.

Когда квазиуровень Ферми подвижных носителей, представляемый потенциалами истока и стока, пересечет дно ямы, то яма деформируется. Она станет узкой и состояние носителей в ней приобретет квантовый характер. Образуется квазидвумерный газ, подвижность носителей в котором увеличится благодаря уменьшению рассеивания носителей на примесях. Причиной тому является малая концентрация остаточных заряженных центров в буферном слое полуизолирующей подложки вблизи поверхности ( $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) и высокое качество границы гетероперехода. Формирование со стороны эпитаксиальной пленки тонкого, порядка нанометра. Нелегированного пограничного слоя, который отделяет канал от сильно легированной области в эпитаксиальной пленке также способствует увеличению подвижности носителей.



Структура арсенид-галлиевого транзистора



# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

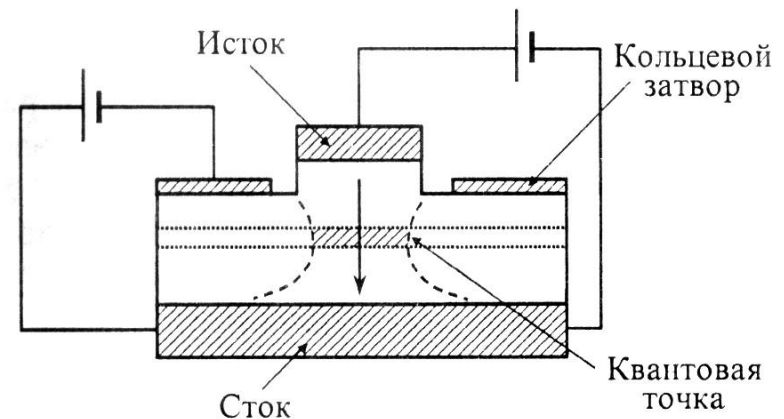
## Резонансно-туннельный транзистор на квантовой точке

Квантовая точка имеет дискретный энергетический спектр. На ее основе можно изготовить резонансно-туннельный диод, если связать ее через туннельно-прозрачные барьеры с двумя электродами. Вольт-амперная характеристика такой структуры будет иметь участок отрицательного дифференциального сопротивления. Однако в отличие от планарной структуры в этом случае оказывается возможным осуществить управление проводимостью структуры. Для этого необходимо иметь способ изменения размеров квантовой точки. В таком случае будет меняться положение энергетических уровней в квантовой точке – появляется принципиальная возможность «включать» и «выключать» механизм резонансного туннелирования.

Центральный верхний электрод транзистора круглой формы соединяется с нижним электродом через планарную двухбарьерную резонансно-туннельную структуру с двумерным электронным газом в центре. Квантовая точка в этой структуре образуется с помощью третьего электрода – затвора, кольцом окружающего центральный верхний электрод. При подаче на него отрицательного потенциала электроны из области двумерного газа под затвором вытесняются к центру структуры. Таким способом под центральным электродом формируется квантовая точка, поперечные размеры которой, а следовательно и положение энергетических уровней в ней определяются величиной отрицательного напряжения на затворе.

Сдвиг уровней приводит к изменению условий резонансного туннелирования. Положение участков отрицательного дифференциального сопротивления в вольт-амперной характеристике между центральным и нижним электродами зависит от напряжения на затворе – такой прибор имеет более широкие функциональные возможности, чем просто резонансно-туннельный диод.

**Схематическое изображение структуры резонансно-туннельного транзистора на основе квантовой точки.**

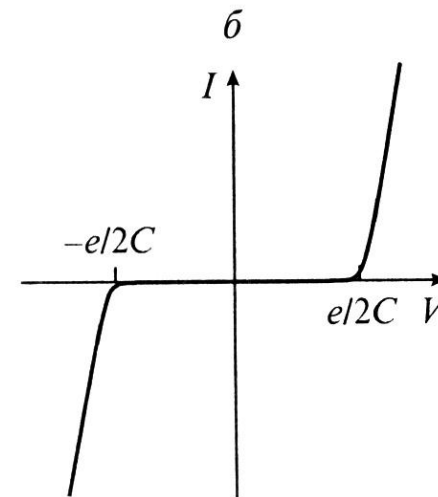
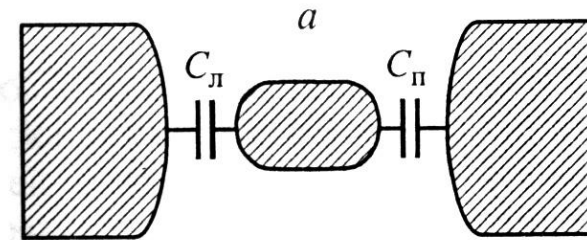


# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Одноэлектронный транзистор

Работа одноэлектронного транзистора основана на принципиально новом физическом явлении, возникающее при туннелировании носителей через квантовую точку. Это явление, называемое *кулоновской блокадой*, опирается на тот факт, что заряд не может дробиться бесконечно и переносится через барьер дискретными порциями, кратными заряду электрона. Если размер, а следовательно, и емкость квантовой точки  $C = C_{\text{л}} + C_{\text{п}}$  ( $C_{\text{л}}$  и  $C_{\text{п}}$  – емкости левого и правого туннельных переходов) достаточно малы, то перенос одного электрона в точку или из нее меняет электростатическую энергию на величину  $e^2/2C$ .

Указанный энергетический барьер должен быть преодолен в ходе токопереноса. Это означает, что при малых напряжениях, приложенных к туннельной структуре, ток будет отсутствовать и возникнет лишь тогда, когда приложенное напряжение  $V$  превзойдет по абсолютной величине  $e/2C$ . Иными словами, вольт-амперная характеристика туннельного контакта при малых  $V$  будет существенно нелинейна.



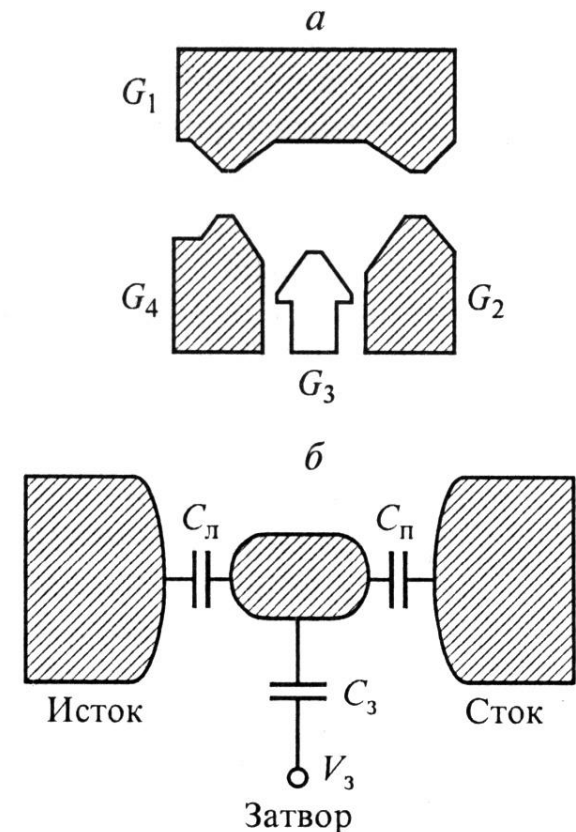
Схематическое изображение структуры для наблюдения кулоновской блокады (а) и ее вольт-амперная характеристика (б).

# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Одноэлектронный транзистор

Один из вариантов одноэлектронного транзистора в структуре с двумерным электронным газом (а) и его схематическое изображение (б).

При отрицательном напряжении на затворах  $G_1$ ,  $G_2$  и  $G_4$  вблизи них образуется область, обедненная носителями заряда, в результате в центре структуры создается проводящий островок очень малых размеров (квантовая точка), с помощью туннельного эффекта связанный с резервуарами истока и стока. Связь квантовой точки с основным затвором транзисторной структуры  $G_3$  является чисто емкостной – расстояние между ними достаточно велико, чтобы исключить вероятность туннельных переходов. Затвор  $G_3$  используют для изменения электрохимического потенциала электронов в центральном электроде с помощью наведенного квазизаряда  $\Delta Q = C_3 V_3$ . В отличие от заряда, связанного с туннелированием электронов от истока к стоку (рис. б) через квантовую точку, этот заряд может изменяться непрерывно, так как это поляризационный заряд



# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

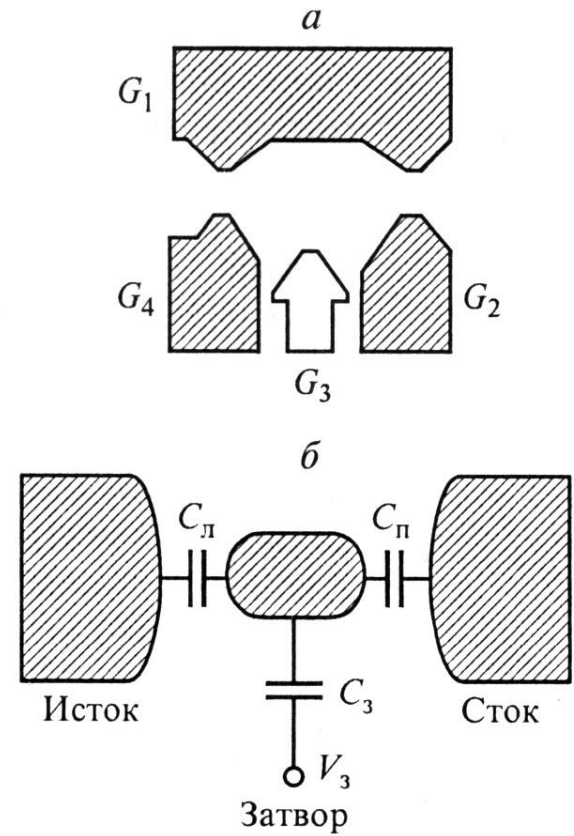
## Одноэлектронный транзистор

С помощью концепции квазизаряда мы можем определить условия переключения одноэлектронного транзистора. Энергия центрального электрода по-прежнему определяется выражением  $E = q^2/2C$ , где  $q$  – его полный заряд, а  $C$  – электрическая емкость островка  $C = C_{\text{л}} + C_{\text{п}} + C_3$ . Если на центральном электроде находится  $N$  дополнительных электронов, то его заряд равен

$$q = -Ne + \Delta Q = -Ne + C_3 V_3$$

так, что полная энергия задается выражением

$$E = \frac{(-Ne + C_3 V_3)^2}{2C}$$



# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Одноэлектронный транзистор

Если между истоком и стоком приложено небольшое напряжение смещения, так что будет иметь место режим кулоновской блокады, то ток через структуру течь не может, так энергия центрального электрода увеличивается с каждым дополнительным электроном:

$$E(N + 1) > E(N)$$

Однако, подстраивая напряжение на затворе, мы можем добиться выполнения условия

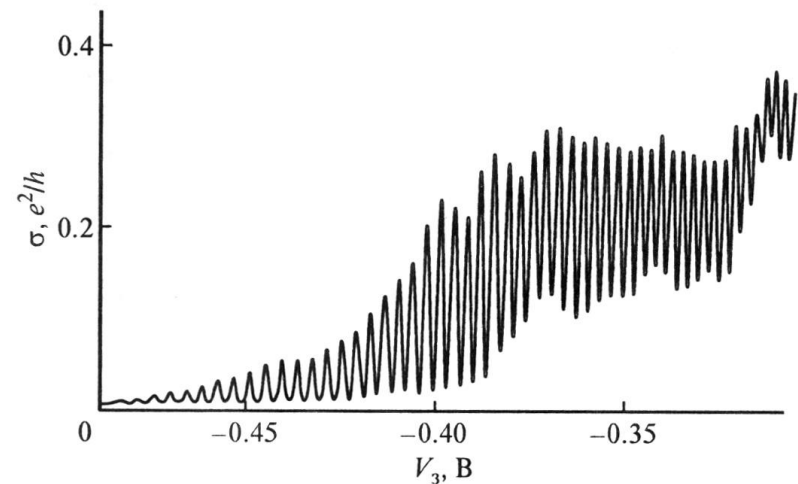
$$E(N + 1, V_3 + \Delta V_3) = E(N, V_3)$$

В этом случае электрон может туннелировать через структуру и ток через транзистор будет течь. Другими словами, электроны могут туннелировать в центральный электрод всякий раз, когда напряжение на затворе изменяется на величину

$$\Delta V_3 = \frac{e}{C_3}$$

Т.е. проводимость одноэлектронного транзистора будет осциллировать с увеличением напряжения на затворе с периодом  $\Delta V_3$

пении с единичным актом туннелирования, приводит к колам проводимости транзистора даже в условиях кулоновской бло-



**Проводимость одноэлектронного транзистора. Каждый пик проводимости соответствует удалению (с ростом отрицательного смещения) очередного электрона из квантовой точки, причем при смещении – 0.4 В число электронов в точке порядка 100.**

# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Одноэлектронный транзистор

### *Устройства на основе одноэлектронных транзисторов*

#### **Стандарт силы тока**

Структура из квантовой точки, связанная туннельными переходами с истоком и стоком, может служить стандартом силы тока. Планарную квантовую точку выделяют из области двумерного электронного газа с помощью системы затворов, два из которых определяют высоту, а следовательно и прозрачность туннельных барьеров, через которые происходит перенос электронов. На эти затворы подают в противофазе переменное напряжение частотой  $f$ . Таким образом, когда повышается один барьер, другой в этот момент понижается. Через пониженный барьер у истока электрон проникает в квантовую точку, а покинуть ее может лишь при следующем полупериоде. Следовательно, за один период изменения напряжения через квантовую точку проходит только один электрон.

Ток, протекающий через квантовую точку будет равен  $I = ef$

Величина заряда известна с высокой точностью, измерение частоты тоже можно сделать достаточно точно. В результате оказывается возможным измерить силу тока с точностью, значительно превосходящей точность других стандартов тока.

# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Одноэлектронный транзистор

---

---

### *Устройства на основе одноэлектронных транзисторов*

#### *Ячейка памяти на основе одноэлектронных транзисторов*

Одноэлектронный транзистор может находиться в двух состояниях – либо в состоянии кулоновской блокады, либо в проводящем состоянии. Этот факт позволяет создавать на его основе устройства, которые могут служить ячейкой компьютерной памяти.

Очень малые размеры одноэлектронных транзисторов при высоком быстродействии и низкой потребляемой мощности делают такое их применение очень перспективным.

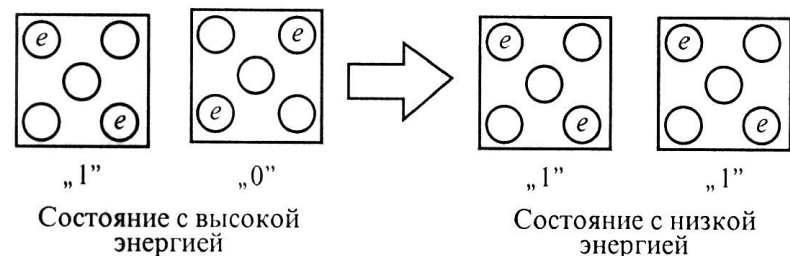
# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Квантово-точечные клеточные автоматы

Массивы связанных квантовых точек предлагается использовать для вычислений логических булевых функций. Новые приборы называют *квантово-точечными клеточными автоматами*.

Основу прибора составляет ячейка, состоящая из пяти квантовых точек: четыре расположены в углах квадрата, а одна – в его центре. В ячейку вводятся два избыточных электрона и ячейка приобретает электрический заряд. Из-за электростатического отталкивания между избыточными электронами вся система будет иметь минимальную энергию только в том случае, если электроны расположатся как можно дальше друг от друга, т.е. в углах квадрата, соединенных диагональю. Поскольку таких возможных положений всего два, то система имеет всего два устойчивых состояния, и, следовательно, одно из них можно считать логической единицей, а второе – логическим нулем.

Если рядом с первой ячейкой расположить вторую, то электростатическое поле первой ячейки заставит электроны располагаться так, чтобы обеспечить минимум электростатической энергии всей системы. Составляя комбинации из расположенных разным образом ячеек, можно реализовывать разнообразные логические функции и выполнить необходимые логические преобразования и вычисления.





# ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Квантово-точечные клеточные автоматы

Комбинация ячеек квантово-точечного автомата, при которых состояние на выходе определяется большинством состояний на входе (логическая функция «Majority»)

На основе таких элементов возможно создание нанокomпьютера. Важно отметить, что взаимное расположение ячеек обеспечивает передачу логического сигнала без перемещения зарядов вдоль цепочки – в бестоковом режиме. Только за счет передачи вдоль цепочки состояния поляризации.

Преимущества логических устройств на основе квантово-точечных клеточных автоматов состоят в том, что по сравнению с аналогичными устройствами на основе полевых транзисторов требуется значительно меньший объем активной области.

