

А. Г. Погосов^{1,2}, М. В. Буданцев¹, А. А. Шевырин^{1,2}, А. Е. Плотников¹,
А. К. Бакаров¹, А. И. Торопов¹

¹ Институт физики полупроводников СО РАН
ул. Институтская, 2, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: pogosov@isp.nsc.ru

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КУЛОНОВСКАЯ БЛОКАДА*

Исследован эффект кулоновской блокады в одноэлектронном транзисторе – квантовой точке, отделенной туннельными барьерами от областей истока и стока, особенность которого состоит в том, что он изготовлен на основе полупроводниковой мембраны, отделенной от подложки. Отрыв транзистора от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью, привел к резкому уменьшению емкости квантовой точки C и, следовательно, к увеличению кулоновской щели e^2/C . Величина последней имеет практическую значимость, так как определяет температурный предел работоспособности транзистора. Прямое сравнительное измерение кулоновской щели до и после отрыва от подложки показало, что она возрастает с 40 К (в температурных единицах) для обычного транзистора, расположенного в массиве полупроводника, до 150 К для «подвешенного». Большая величина кулоновской щели позволила при температуре 4,2 К получить четкую ромбовидную структуру зависимости кондактанса транзистора от напряжения на затворе и напряжения «сток – исток», характерную для кулоновской блокады, тогда как типичная температура таких измерений с использованием обычных одноэлектронных транзисторов составляет сотни милликельвин. В изготовленном транзисторе обнаружена блокада, дополнительная к кулоновской, природа которой предположительно связана с дополнительными механическими степенями свободы транзистора (упругие деформации).

Ключевые слова: кулоновская блокада, одноэлектронный транзистор, двумерный электронный газ, подвешенный транзистор, квантовая точка.

Одноэлектронное туннелирование и кулоновская блокада туннелирования – явления, интересные фундаментальной науке тем, что позволяют исследовать электронные состояния в квантовых точках [1], а также связанные с ними транспортные эффекты. В прикладном аспекте интерес представляет так называемый одноэлектронный транзистор, работающий на основе эффекта кулоновской блокады. Одноэлектронный транзистор состоит из пары туннельных барьеров, отделяющих квантовую точку от областей истока и стока. Электрохимический потенциал квантовой точки управляется напряжением на дополнительном электроде – затворе. Пусть квантовая точка заряжена N электронами. Чтобы поместить на нее еще один, $N + 1$ -й электрон, необходимо затратить энергию на преодоление сил кулоновского отталкивания от заряженной квантовой точки. При определенных значе-

ниях затворного напряжения V_g и напряжения «исток – сток» V_{sd} туннелирование через туннельные барьеры подавляется вследствие этого отталкивания. Это явление носит название кулоновской блокады и является определяющим для туннельного транспорта через квантовые точки. В электронном спектре квантовой точки появляется щель, отделяющая последний занятый уровень энергии от первого свободного. Величина этой щели называется зарядовой энергией E_C и определяется емкостью квантовой точки C : $E_C = \frac{e^2}{C}$. Кулоновскую блокаду можно наблюдать при температуре T , отвечающей условию $E_C \gg kT$. Таким образом, энергия зарядки определяет верхний температурный предел работоспособности одноэлектронного транзистора. Кулоновская блокада снимается приложением тяну-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-02-01277-а).

щего напряжения такой величины, что уровень электрохимического потенциала стока либо истока сравнивается с первым свободным уровнем энергии в квантовой точке.

При изучении кулоновской блокады типичный эксперимент – это измерение кондактанса G одноэлектронного транзистора как функции затворного напряжения V_g и напряжения «сток – исток» V_{sd} . Ток проходит через квантовую точку, если между уровнями электрохимических потенциалов истока и стока существуют уровни энергии электрона, локализованного на квантовой точке. В противном случае туннелирование заблокировано, и тока нет. Затворное напряжение сдвигает одновременно все электронные уровни квантовой точки вместе с кулоновской щелью, а тянущее напряжение меняет уровень электрохимического потенциала истока (при условии, что сток заземлен). Кулоновская блокада проявляется в том, что кондактанс квантовой точки равен нулю в областях на плоскости V_g – V_{sd} , имеющих форму ромбов, повторяющихся вдоль оси затворных напряжений. Зарядовая энергия $E_C = \Delta V_{sd} \cdot e / 2$, где ΔV_{sd} – размер ромбов вдоль оси тянущих напряжений.

Обычно квантовая точка находится в массиве полупроводника. Однако в настоящее время существует возможность создания квантовых точек из тонких полупроводниковых мембран, оторванных от подложки. Ранее нами было установлено, что отрыв квантовой точки от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью ϵ , уменьшает емкость квантовой точки, что приводит к резкому увеличению зарядовой энергии системы, а значит, и рабочей температуры транзистора [2].

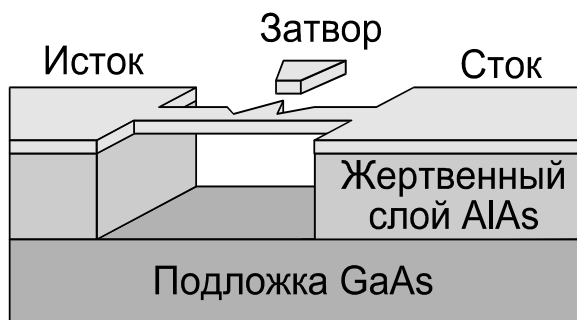


Рис. 1. Одноэлектронный транзистор с квантовой точкой, оторванной от подложки

Кроме того, квантовая точка в подвешенном транзисторе обладает дополнительными механическими степенями свободы. В связи с этим в подвешенных одноэлектронных транзисторах имеет место блокада, дополнительная к кулоновской, вызванная возбуждением колебаний нанопроволоки в процессе туннелирования электрона (изгибные фононные моды) [3]. В прикладном аспекте интересна такая перспективная область исследований, как наноэлектромеханические системы [4]. Однако до сих пор не было проведено измерений, позволяющих определенно сказать, к каким именно эффектам приводит отрыв квантовой точки от подложки.

Целью настоящей работы являлось проведение прямого сравнительного эксперимента, определяющего те свойства одноэлектронных транзисторов, которые обусловлены отрывом квантовой точки от подложки.

Подвешенная мембрана, используемая в данной работе, была изготовлена на основе гетероструктуры GaAs / AlGaAs толщиной 110 нм с двумерным электронным газом в слое GaAs толщиной 10 нм. Мембрана выращивалась методом молекулярно-лучевой эпитаксии поверх жертвенного слоя AlAs толщиной 400 нм. Латеральная геометрия транзистора задавалась при помощи электронной литографии с последующим анизотропным плазмохимическим травлением. Квантовая точка была образована на квантовой проволоке шириной 600 нм двумя сужениями, находящимися на расстоянии 600 нм друг от друга. Жертвенный слой AlAs селективно вытравливался, в результате чего квантовая точка «повисала» над подложкой. Полученный в результате одноэлектронный транзистор изображен на рис. 1.

Эксперимент был реализован следующим образом. Сначала были проведены измерения кондактанса одноэлектронного транзистора с квантовой точкой, находящейся в массиве полупроводника, как функции напряжения на одном из затворов и напряжения «исток – сток». После этого жертвенный слой арсенида алюминия был селективно вытравлен, в результате чего произошел отрыв квантовой точки от подложки, а измерения были повторены уже на подвешенном транзисторе. Образец во время проведения эксперимента находился при

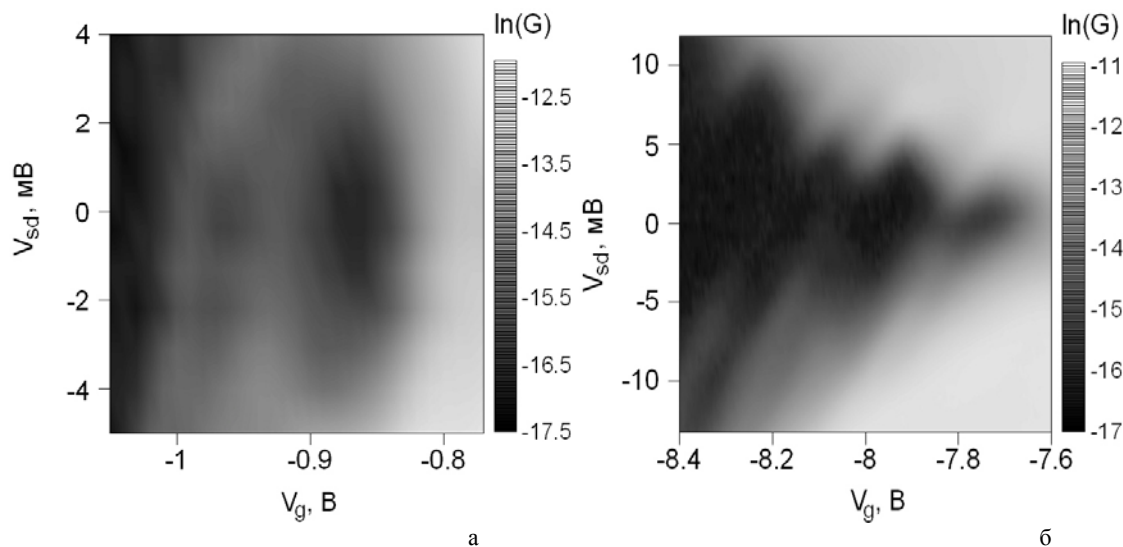


Рис. 2. Зависимость кондактанса G квантовой точки, находящейся в массиве полупроводника (а) и подвешенной квантовой точки (б) от затворного V_g и тянущего V_{sd} напряжений, отображенная на тоновом графике. Более светлые области соответствуют большим величинам кондактанса

температуре жидкого гелия ($T = 4,2$ К). Кондактанс измерялся методом синхронно-го детектирования на частоте 70 Гц.

Результаты эксперимента, проведенного до отрыва квантовой точки от подложки, приведены на рис. 2, а. На графике видны две области пониженного кондактанса вокруг точек $V_g = -0,85$ В, $V_{sd} = 0$ В и $V_g = -0,96$ В, $V_{sd} = 0$ В. Зарядовая энергия составляет 3,5 мэВ, или 40 К в температурных единицах.

Результаты измерений кондактанса подвешенного транзистора приведены на рис. 2, б, который демонстрирует ряд особенностей полученных результатов. Во-первых, величина зарядовой энергии резко увеличилась при подвешивании и составила 13 мэВ, или 150 К в температурных единицах, что является прямым следствием отрыва квантовой точки от подложки. Во-вторых, размеры ромбов кулоновской блокады неодинаковы. Поскольку каждый ромб отвечает определенному числу электронов, локализованных на квантовой точке, можно говорить о том, что зарядовая энергия зависит от числа электронов на квантовой точке. Третья особенность состоит в том, что на плоскости ($V_g - V_{sd}$) в областях между ромбами, где прохождение тока не должно ограничиваться кулоновской блокадой, наблюдается резкое подавление туннелирования. На рис. 2 это видно как «слипание» ромбов кулоновской блокады. Иными словами, наблюдается

блокада туннелирования, дополнительная к кулоновской.

Зная зарядовую энергию одноэлектронного транзистора e^2 / C , можно оценить размер квантовой точки как диаметр плоского диска, имеющего емкость C . Неодинаковость ромбов кулоновской блокады свидетельствует об изменении размеров квантовой точки вместе с числом электронов, локализованных на ней. Зависимость оценочного размера квантовой точки от напряжения на затворе изображена на рис. 3.

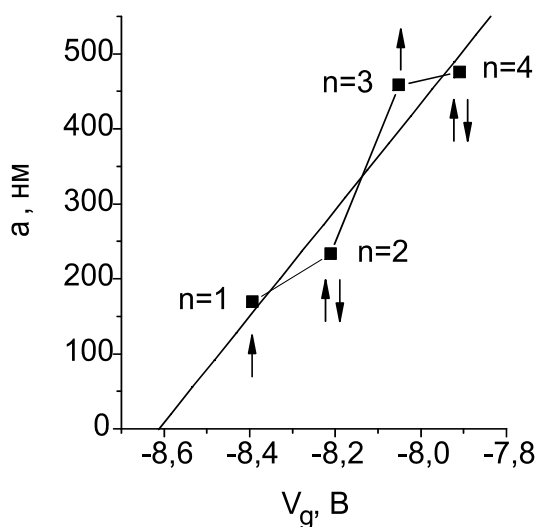


Рис. 3. Зависимость оценочного линейного размера квантовой точки от затворного напряжения V_g (n – число электронов в квантовой точке, стрелками показано спиновое состояние верхнего энергетического уровня)

Эффективный размер квантовой точки определяется характерными размерами волновых функций электронов, локализованных на ней. Видно, что точки на графике группируются в пары, что, вероятно, отражает двукратное спиновое вырождение электронных уровней. Кроме того, линейно экстраполируя экспериментальные точки, можно обнаружить, что если бы наблюдался еще один ромб кулоновской блокады в области затворных напряжений $V_g = -8,4$ В, то он соответствовал бы нулевому размеру квантовой точки. Это обстоятельство позволяет определить, какому числу электронов отвечает каждый из ромбов (см. рис. 3). В классическом же случае задача определения числа электронов, локализованных в квантовой точке, представляет существенную сложность.

Увеличение зарядовой энергии связано с извлечением квантовой точки из объема арсенида галлия, имеющего диэлектрическую проницаемость $\epsilon \approx 13$. Теория показывает, что емкость металлического шара в вакууме в ϵ раз меньше, чем емкость шара, находящегося в объеме полупроводника. В случае же перемещения шара в вакуум с поверхности полупроводника теория предсказывает уменьшение емкости в $(\epsilon + 1) / 2$ раз. Такой же механизм обеспечивает уменьшение емкости квантовой точки при отрыве от подложки, а следовательно, и увеличение кулоновской щели.

Ранее о блокаде туннелирования некулоновской природы сообщалось в работе [3].

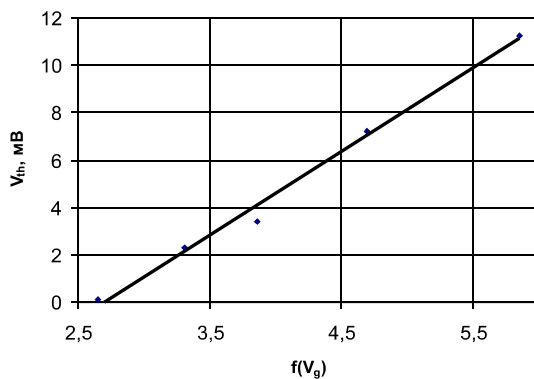


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения дополнительной блокады от затворного напряжения. Точки – экспериментально полученные значения, прямая – теоретическая функциональная зависимость, спрямляющаяся в масштабе, выбранном по оси абсцисс

В указанной статье этот эффект объясняется тем, что туннелирование электрона на квантовую точку сопровождается возбуждением изгибных (flexural) фононных мод в нанопроволоке, а следовательно, потерей энергии электроном, после чего он уже не может протуннелировать в область стока. Это явление специфично для подвешенных структур, так как при туннелировании в квантовую точку, находящуюся в массиве полупроводника, импульс электрона передается всей кристаллической решетке, а его энергия в таком процессе остается неизменной. Описываемые в [3] результаты получены при температуре 350 мК, что существенно меньше, чем в настоящей работе (4,2 К). По оценке, энергия рассматриваемых фононов примерно равна $\hbar\omega_{ph} = \hbar \frac{c_L}{b}$, где

$c_L = 4,77 \cdot 10^5$ см/с – продольная скорость звука в GaAs, $b = 110$ нм – толщина мембраны. В температурных единицах это составляет величину 330 мК. При 4,2 К все фононные моды данного вида уже температурно возбуждены. Этот факт свидетельствует о том, что обнаруженная нами блокада, дополнительная к кулоновской, не объясняется возбуждением фононных мод при туннелировании. Кроме того, слипание ромбов $V_{th}^+ - V_{th}^-$ в [3] составляет величины около 0,2 мэВ. В настоящей работе слипание ромбов существенно более явно ($V_{th}^+ - V_{th}^- = 10$ мэВ).

Проявление другого механизма дополнительной блокады предсказано в работе [5]. Заряженная квантовая точка находится в электрическом поле затвора, и под действием возникающих кулоновских сил нанопроволока, на которой она определена, упруго деформируется. Величина этих деформаций, определяющая емкость затворного контакта, дискретно изменяется вместе с числом электронов на квантовой точке. В результате туннелирования электрона часть его энергии переходит в энергию таких упругих деформаций, что приводит к невозможности дальнейшего туннелирования. Следует отличать данный эффект возникновения статических деформаций от динамического эффекта возбуждения фононов в нанопроволоке. Как указано в [5], пороговое напряжение дополнительной блокады про-

порционально определенной функции затворного напряжения: $V_{th}^+ \propto f(V_g)$. Здесь

$$f(V_g) = \left[\frac{C_g(w)^2}{\tilde{N}(w)C_{g0}} \right]^2 \frac{V_g^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_g}{V_{cr}}\right)^2}},$$

где w – смещение квантовой точки из начального положения; $C_g(w)$ – емкость затворного контакта; $C(w)$ – суммарная емкость всех контактов; C_{g0} – емкость затворного контакта при условии, что нанопроволока не изогнута; V_{cr} – напряжение, при котором нанопроволока прилипает к затвору. Путем измерения величин областей слипания ромбов были определены пороговые напряжения дополнительной блокады и отложены в координатах, в которых зависимость от затворного напряжения, согласно [5], должна спрямляться (рис. 4). Видно, что экспериментальные точки достаточно точно совпадают с предсказанной функциональной зависимостью, и это свидетельствует о том, что обнаруженный эф-

фект действительно может быть объяснен упругими деформациями.

Список литературы

1. Kouwenhoven L. P., Austing D. G., Tarucha S. Few-Electron Quantum Dots // Rep. Prog. Phys. 2001. Vol. 64. P. 701–736.
2. Погосов А. Г., Буданцев М. В., Лавров Р. А. и др. Кулоновская блокада и термоэдс подвешенной квантовой точки // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 83, вып. 3. С. 152–156.
3. Weig E. M., Blick R. H., Brandes T. et al. Single-Electron-Phonon Interaction in a Suspended Quantum Dot Phonon Cavity // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. No. 4. P. 046804-1.
4. Ekinici K. L., Roukes M. L. Nanoelectromechanical Systems // Review of Scientific Instruments. 2005. Vol. 76. P. 061101.
5. Nishiguchi N. Elastic Deformation Blockade in a Single-Electron Transistor // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 68. P. 121305.

Материал поступил в редколлегию 10.02.2009

A. G. Pogosov, M. V. Budantsev, A. A. Shevyrin, A. E. Plotnikov, A. K. Bakarov, A. I. Toropov

HIGH-TEMPERATURE COULOMB BLOCKADE

The Coulomb blockade effect is studied in a single-electron transistor – quantum dot, separated from source and drain areas by tunnel junctions. Peculiarity of the transistor is that it is made on the basis of semiconducting membrane, separated from the suffer. Separating the transistor from the suffer having high dielectric constant leads to the drastic decrease in the quantum dot capacity C and, therefore, to the increase in the Coulomb gap e^2/C . This value is important since it determines the upper limit of the transistor working temperature. A direct comparison of the Coulomb gaps before and after separating from the suffer shows that it increases from 40 K (in temperature units) for conventional transistor to 150 K for the «suspended» one. High value of the Coulomb gap has made it possible to observe clear diamond-like structure of conductance dependence on the gate and source-drain voltages, specific for the Coulomb blockade, while typical temperature of this kind of measurements on conventional single-electron transistors is about hundreds of millikelvins. An additional blockade effect, different from the conventional Coulomb blockade is observed. The nature of this effect can be connected with additional mechanical degrees of freedom of the transistor (elastic deformations).

Keywords: Coulomb blockade, single-electron transistor, 2-dimensional electron gas, suspended, quantum dot.