

## Преобразование структуры металл–окисел–кремний в резонансно-туннельную структуру с квазиультимерными квантованными состояниями

© Г.Г. Карева

Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета, 198904 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 марта 1998 г. Принята к печати 20 января 1999 г.)

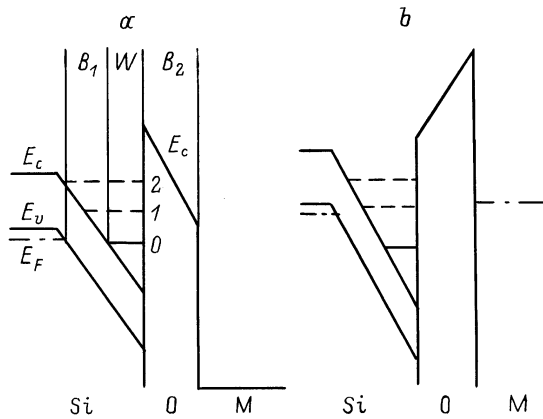
Структура металл–окисел–кремний превращена в наноструктуру с двойным барьером благодаря уменьшению таких ее размерных параметров как толщина диэлектрика и протяженность обедненной области пространственного заряда  $p$ -Si до нанометров. Реализовано резонансное туннелирование электронов при комнатной температуре через минизоны квантовой ямы приповерхностной обедненной области кремния, о чем свидетельствуют измеренные вольт-амперные характеристики. Количество особенностей доведено до 10 благодаря глубокой (более чем 1.1 эВ) квантовой яме. Максимальное отношение тока в пике к току в долине составляет 500.

Резонансно-туннельные полупроводниковые наноструктуры с искусственной периодичностью и пониженной размерностью электронного газа интенсивно исследуются в течение последних двух десятилетий [1–6]. При их создании используются возможности вариации состава и легирования входящих компонентов. Наиболее привлекательными качествами структур являются быстрдействие, возможность управления энергетической структурой с протекающим управлением их свойствами, отрицательное дифференциальное сопротивление, зарядовые явления. Недостатки структур обусловлены конструктивной сложностью: их изготовление и контроль требуют сложных технологий и методик. Структуры металл–окисел–кремний (МОК) в простейшем конструктивном варианте не упоминались как резонансно-туннельные. Вместе с тем МОК структура является одним из важнейших элементов современной электроники, в процессе развития которой происходит уменьшение ее размерных параметров. При таком уменьшении преодоление нанометрового рубежа приводит к тому, что МОК структура может быть качественно изменена и превращена в резонансно-туннельную. В результате может быть решена еще одна актуальная задача по созданию квантовых точек на поверхности кремния. Обсуждению этих вопросов посвящено настоящее сообщение.

Для превращения МОК структуры в искусственно периодическую наноструктуру, а именно структуру с двойным барьером, были уменьшены до нанометрового диапазона толщина выращиваемого окисла и протяженность области пространственного заряда (ОПЗ)  $p$ -Si [7] без усложнения конструкции структуры за счет дополнительных слоев или включений, как в работах [4–5]. Возможность оценки толщины окисла предоставляется методом его создания [7]. Кроме того, оценка толщины окисла осуществлялась с помощью емкостных и эллипсометрических измерений. Для обеспечения нанометровой протяженности ОПЗ был выбран Si, сильно легированный бором. Исследовались монокристаллические

пластины марок КДБ-0.07, КДБ-0.01, КДБ-0.005 с ориентацией поверхности (100) или (111). При таком легировании Si его обедненную ОПЗ можно рассматривать как туннельно-прозрачный барьер, соединенный последовательно с квантовой ямой, имеющей ряд квантовых минизон (рис. 1). Причем эта квантовая яма оказывается заключенной между двумя туннельно-прозрачными барьерами, один из которых (левый) является барьером обедненной ОПЗ  $p$ -Si, а другой (правый) — барьером окисла. Таким образом создается двойной барьер, как правило, асимметричный. Квантовая яма глубока (ее глубина больше  $E_g = 1.1$  эВ) и ее размеры достаточно малы (порядка нанометров). Эти обстоятельства обеспечивают достаточно большое (много больше  $kT$ ) энергетическое разделение между соседними квантовыми минизонами, что позволяет наблюдать резонансное туннелирование при комнатной температуре.

Рассмотрим работу структуры при полярности внешнего напряжения, обеспечивающей минус на Si по отношению к металлу (рис. 1, а). Как видно из рисунка, по мере увеличения приложенного напряжения последовательно одна за другой квантовые минизоны ОПЗ выравниваются энергетически с уровнем Ферми в объеме  $p$ -Si и резонансное туннелирование из кремния в металл через минизоны ОПЗ становится возможным при превышении напряжением значения  $-V_{th}$  — порогового напряжения, при котором самая нижняя минизона (0) совпадает с уровнем Ферми в объеме Si. Как показали предыдущие исследования вольт-фарадных характеристик таких структур [8], можно выделить два характерных диапазона напряжений, где поведение структур качественно отличается: классический и квантовый. В классическом диапазоне нет условий для резонансного туннелирования и вольт-фарадные характеристики, не имея особенностей, совпадают с рассчитанными [9] с учетом использованных параметров структуры. В квантовом диапазоне характеристики демонстрировали резонансно-туннельные особенности — ступени и пики.



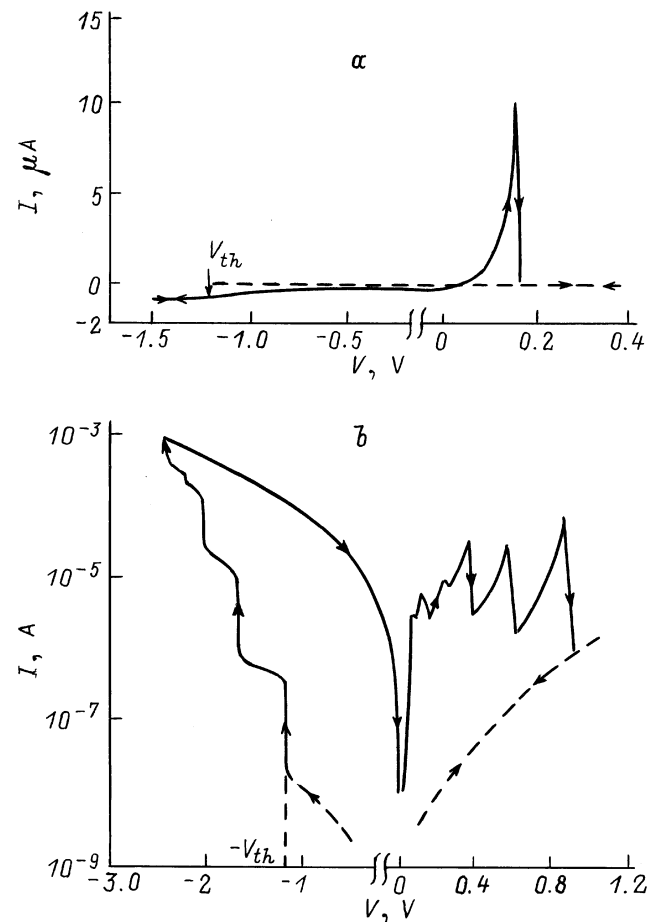
**Рис. 1.** Энергетические диаграммы наноструктуры металл-окисел-*p*-Si: *a* — для отрицательного смещения выше порогового значения  $-V_{th}$ , *b* — для положительного смещения, приложенного к структуре, которая предварительно находилась под отрицательным смещением, по величине превосходящем  $V_{th}$ , в результате чего произошло накопление электронного заряда в квазиультимерных квантовых ямах.

Аналогично изложенному поведению вольт-фарадных характеристик, вольт-амперные характеристики (ВАХ) не имеют особенностей в классическом диапазоне, когда условия для резонансного туннелирования отсутствуют (см. штриховые кривые на рис. 2). Классический диапазон соответствует исходному состоянию структуры и с учетом этого замечания включает полностью диапазон положительных напряжений и диапазон отрицательных напряжений от 0 до  $-V_{th}$ . В классическом диапазоне гладкий вид ВАХ не зависит от программы изменения напряжения. Такая зависимость появляется после перехода в квантовый диапазон в результате пересечения границы  $-V_{th}$ , где поведение характеристик качественно изменяется. При  $V = -V_{th} = -1.2$  В ток резко возрастает, формируя на ВАХ ступень, что свидетельствует о переключении структуры в более проводящее состояние, которое сохраняется и тогда, когда напряжение пересекает 0 и возрастает до  $V = +0.16$  В (рис. 2, *a*). При этом напряжении ВАХ, продемонстрировав пик с отношением тока в пике к току в долине, равном 200, возвращается к исходной (штриховой) кривой, которая вновь может быть покинута, когда отрицательное напряжение превысит  $-V_{th}$ , и снова может быть восстановлена с помощью соответствующего положительного напряжения.

ВАХ, аналогичные представленным на рис. 2, *a* наблюдались в работе [10] для структуры из батареи резонансно-туннельных столбчатых диодов на базе гетероструктуры AlAs/GaAs, весьма сложной конструктивно (искусственно многослойной и столбчатой одновременно). В [10] наблюдали на ВАХ только одну ступень и один пик, в то время как ВАХ обсуждаемой резонансно-туннельной МОК наноструктуры может демонстрировать больше особенностей. Когда приложенное напряжение возрастает до величин, достаточных для выравни-

вания энергетического положения следующей минизоны в квантовой яме с уровнем Ферми в объеме полупроводника (рис. 1, *a*), резонансное туннелирование через эту минизону вызывает вторую ступень на ВАХ при отрицательном напряжении (рис. 2, *b*) и соответствующий дополнительный пик при положительном напряжении. Процесс увеличения числа резонансно-туннельных особенностей может быть продолжен и может привести, например, к характеристике, представленной на рис. 2, *b*. Уменьшение диапазона напряжений между соседними ступенями по мере роста напряжения закономерно отражает тот факт, что, согласно форме квантовой ямы, энергетические расстояния между последовательными минизонами уменьшаются при переходе от более глубоких минизон к менее глубоким.

В квантовом диапазоне вид ВАХ зависит от программы развертки напряжения. Чем больше отрицательное напряжение превышает величину  $-V_{th}$  и, следовательно, чем больше наблюдается ступеней, тем больше пиков появляется при положительном напряжении (ср. рис. 2, *a*



**Рис. 2.** Типичные вольт-амперные характеристики наноструктуры металл-окисел-*p*-Si [КДБ-0.01(100)], измеренные при комнатной температуре при скорости развертки около 10 В/мин. Сплошная характеристика на рис. 2, *a* в диапазоне напряжений от 0 до  $-0.9$  В вертикально разнесена со штриховой, в действительности обе характеристики совпадают.

и *b*). В целом, в рамках наблюдаемого гистерезиса ВАХ, отрицательные и положительные напряжения имеют противоположные воздействия. Отрицательные напряжения ведут к отклонению характеристик от их исходного состояния, описываемого штриховой кривой, в то время как положительные смещения способствуют возвращению структуры к ее исходному состоянию, и при достижении необходимой величины этих напряжений структура полностью возвращается к своему исходному состоянию, приведенному штриховой линией на рис. 2. Однако вновь и вновь это исходное состояние может быть покинуто, когда отрицательное смещение превышает  $-V_{th}$ , и в свою очередь оно может быть вновь восстановлено соответствующим положительным смещением. Такие гистерезисные циклы с разным числом резонансно-туннельных особенностей могут быть многократно повторены.

Подчеркнем, что именно отрицательное напряжение в квантовом диапазоне, т.е. напряжение, превышающее  $-V_{th}$ , вызывает описанный гистерезис ВАХ, который можно объяснить зарядовыми эффектами, сопровождающими процесс резонансного туннелирования в рассматриваемом асимметричном двойном барьере. Поскольку в преобладающем числе случаев вторая часть барьера, а именно диэлектрическая, менее проницаема, чем первая (полупроводниковая), создаются благоприятные условия для заполнения квантовой ямы электронами при резонансном туннелировании из кремния в металл. В процесс увеличения отрицательного смещения выше значения  $-V_{th}$  одна за другой квантовые минизоны пересекают уровень Ферми и изменяют свое состояние из незаполненного в заполненное электронами. Заметим, что на всех рисунках штриховые кривые соответствуют незаполненным состояниям, в то время как сплошные кривые — заполненным. Как следует из полученных результатов, электроны, заполняющие квантовую яму при отрицательных напряжениях, сохраняются в ней и при отсутствии напряжений, приведших к заполнению квантовой ямы. Консервации электронов в квантовой яме способствуют уже упомянутая асимметрия двойного барьера, а также неоднородности его вдоль поверхности. В данной работе речь идет о естественно возникающих неоднородностях, к числу которых относятся и поверхностные состояния. Неоднородности вызывают флуктуации потенциала в направлениях, параллельных поверхности, и способствуют квазиульмеризации квантованных состояний, функционирующих в процессе резонансного туннелирования. Таким образом на поверхности кремния в МОК структуре могут быть созданы квантовые точки. Их размеры в направлениях вдоль поверхности определяются размерами и распределением неоднородностей. Размерные параметры в направлении нормальном поверхности структуры, определяются размерными параметрами созданного двойного барьера и, следовательно, контролируются уровнем легирования кремния  $N_A$ , толщиной диэлектрика  $d$ , приложенным напряжением  $V$  и могут быть легко управляемы.

Благодаря электронным зарядам, запасенным в квантовых точках, зонная диаграмма структуры при отсутствии приложенного напряжения изменяется таким образом, что появляются минизоны, расположенные ниже уровня Ферми. Учет этих изменений, вызванных запасенным зарядом, необходим для понимания зонной диаграммы<sup>1</sup> на рис. 1, *b*. Как видно из рис. 1, при положительных напряжениях теперь имеется возможность реализации резонансного туннелирования из металла в полупроводник через минизоны квантовой ямы, когда в процессе роста напряжения одна из них выравнивается с энергетическим зазором между уровнем Ферми и потолком валентной зоны. Эта возможность выразительно раскрывается в пиках измеренных ВАХ на рис. 2. Различный вид резонансно-туннельных особенностей при противоположных полярностях напряжения закономерно обусловлен различием энергетических зонных диаграмм в этих случаях, в особенности различием энергетической диаграммы коллектора. Другое различие между двумя полярностями приложенного напряжения проистекает из разнонаправленности зарядовых процессов в квантовых точках. При положительных напряжениях имеет место разрядка квантовых точек по мере роста величины напряжения в результате последовательного опустошения квантовых минизон при пересечении ими уровня Ферми, вместо зарядки квантовых точек при обратном движении их квантовых минизон по отношению к уровню Ферми в процессе увеличения отрицательного напряжения. При достижении необходимого положительного напряжения все минизоны опустошаются и структура возвращается к своему исходному состоянию, в котором она пребывает до тех пор, пока в очередной раз отрицательное напряжение не превысит величину  $-V_{th}$  и структура не начнет проходить через различные квазистабильные состояния с различной величиной заряда, запасенного в квантовых ямах. Таким образом, резонансное туннелирование из полупроводника в металл сопровождается записью электронных зарядов в МОК наноструктуре, в то время как резонансное туннелирование из металла в полупроводник сопровождается стиранием электронных зарядов, предварительно запасенных, а структура характеризуется мультистабильностью и может быть использована как устройство с длинновременной памятью.

Итак, структура металл–окисел–*p*-Si была превращена в резонансно-туннельную наноструктуру с квазиульмерными квантованными состояниями. Прежде всего только путем уменьшения до нанометровых размеров толщины

<sup>1</sup> Структура, подвергшаяся воздействию отрицательного напряжения, превышающего значение  $-V_{th}$ , переходит по сравнению с исходной структурой в иное состояние и характеризуется, в частности, иным распределением заряда. Появляется избыточный отрицательный заряд в квантовой яме, компенсация воздействия которого при приложенных отрицательных напряжениях приводит к избыточному отрицательному заряду в полупроводнике. Эта встроенная заряженная область сохраняется и после отключения внешнего напряжения, что приводит к появлению при  $V = 0$  отрицательного заряда на металле, избыточного по сравнению с исходным состоянием структуры. Таким образом возникает зонная диаграмма, изображенная на рис. 1, *b*.

диэлектрика и протяженности обедненной области пространственного заряда создан двойной барьер, позволяющий осуществлять резонансное туннелирование электронов. Флуктуации потенциала, вызванные неоднородностью структуры в направлениях вдоль поверхности, приводят к дополнительному снижению размерности электронного газа до квазиульмерного. В результате на кремнии в МОК наноструктуре организуются квантовые точки, размерные параметры которых в направлении, нормальном поверхности, контролируются и управляемы. Вольт-амперные характеристики, измеренные при комнатной температуре, демонстрируют резонансно-туннельные особенности: пики и ступени, количество которых может достигать 10. Максимальное отношение тока в пике к току в долине составляет 500. Наблюдаемый гистерезис вольт-амперных характеристик, объясняемый зарядением квантовых точек при резонансном туннелировании из полупроводника в металл и разрядкой квантовых точек при резонансном туннелировании из металла в полупроводник, свидетельствует о мультистабильности структуры при наличии долговременной памяти и возможности записывать и стирать заряды.

## Список литературы

- [1] L.L. Chang, L. Esaki, R. Tsu. *Appl. Phys. Lett.*, **24**, 593 (1974).
- [2] F. Capasso, K. Mohammed, A.Y. Cho. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-22**, 1853 (1986).
- [3] L. Esaki. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-22**, 1611 (1986).
- [4] S.L. Wu, C.L. Lee, T.E. Lei. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 24 (1993).
- [5] E.H. Nicollan, R. Tsu. *J. Appl. Phys.*, **74**, 4020 (1993).
- [6] F. Capasso, S. Sen, F. Beltram. *High-Speed Semiconductor Devices* (N.Y., Intersci. Publ., 1990).
- [7] Г.Г. Карева. Патент РФ № 2062529 (1995).
- [8] Г.Г. Карева. Письма ЖТФ, **23** (6), 71 (1997).
- [9] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [10] B.W. Alphenaar, Z.A.K. Durrani, A.P. Heberie, M. Wagner. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1234 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

## Transformation of a Metal–Oxide–Silicon Structure into a Resonant Tunneling Structure with Quasi–Zero–Dimensional Quantized States

G.G. Kareva

Institute of Physics,  
St.Petesburg State University,  
198904 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A metal–oxide–silicon structure has been transformed into a double-barrier structure only by decreasing such dimensional parameters as the thicknesses of both the oxide and *p*-silicon depletion layer down to the nanometer range (1–5 nm). Electron resonant tunneling at room temperature through the minibands of the quantum well of the silicon depletion layer has been realized that is confirmed by resonant tunneling features such as steps and peaks in the measured direct current–voltage characteristics. The number of the peculiarities can achieve 10 due to a deep (more than 1.1 eV) quantum well. The maximal current peak-to-valley ratio is 500. The double barrier thus created is, for majority of cases, asymmetrical. Besides, the nonuniformity-produced potential fluctuations, which are parallel to the surface of the structure, cause a quasi-zero dimensionality of the quantized states. These circumstances promote retention of the electrons in the quantum dots. The observed hysteresis of the characteristics testifies to recording and erasing electron charges. The structure is multistable.

Fax: (812)4287240

E-mail: apver@ont.niif.spb.su (Kareva)