

06;12

## **Обогащение свойств структуры металл–окисел–кремний при уменьшении ее размерных параметров до нанометрового диапазона**

© Г.Г. Карева

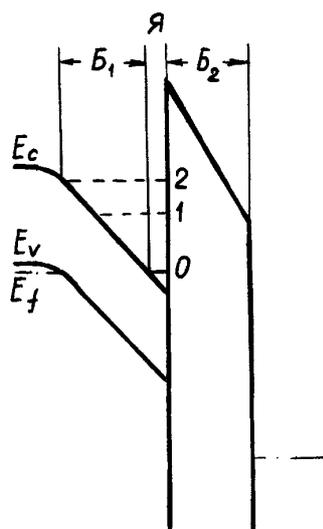
Санкт-Петербургский государственный университет

Поступило в Редакцию 8 августа 1996 г.

Предпринята попытка создания на базе традиционной заслуженной структуры металл–окисел–кремний двойного барьера и осуществления резонансного туннелирования электронов. В результате отмечено обогащение свойств структуры, в частности, исследованные вольт-фарадные характеристики приобретают резонансные особенности: ступени и пики в одном диапазоне напряжений наряду с классическим поведением в другом диапазоне приложенных напряжений. Количеством резонансных особенностей можно управлять с помощью напряжения. Наблюдаемый гистерезис вольт-фарадных характеристик свидетельствует о мультстабильности структуры, наличии памяти и о возможности записать и стереть электронные заряды.

Толщина окисла и протяженность области пространственного заряда полупроводника в традиционной структуре металл–окисел–кремний уменьшены до нанометровых размеров. Предлагаемая наноструктура представляет собой двойной барьер [1–4] и с помощью эффекта поля могут быть созданы условия для резонансного туннелирования электронов, что отмечается появлением резонансных особенностей на исследованных вольт-фарадных характеристиках в соответствующем диапазоне приложенных напряжений, наряду с традиционным поведением характеристик [5–6] в другом диапазоне напряжений. Таким образом, одна наноструктура металл–окисел–полупроводник (МОП) совмещает в себе свойства как МОП [5–6], так и искусственно-периодичной структуры [1–4] в зависимости от диапазона рабочих напряжений.

Для пояснения принципа организации двойного барьера и его работы на рис. 1 представлена энергетическая зонная диаграмма наноструктуры металл–окисел–полупроводник при напряжении, обеспечивающем резонансное туннелирование электронов.



**Рис. 1.** Энергетическая зонная диаграмма наноструктуры металл–окисел–полупроводник при напряжении, обеспечивающем резонансное туннелирование электронов из полупроводника в металл через квантованные уровни ямы области пространственного заряда полупроводника.

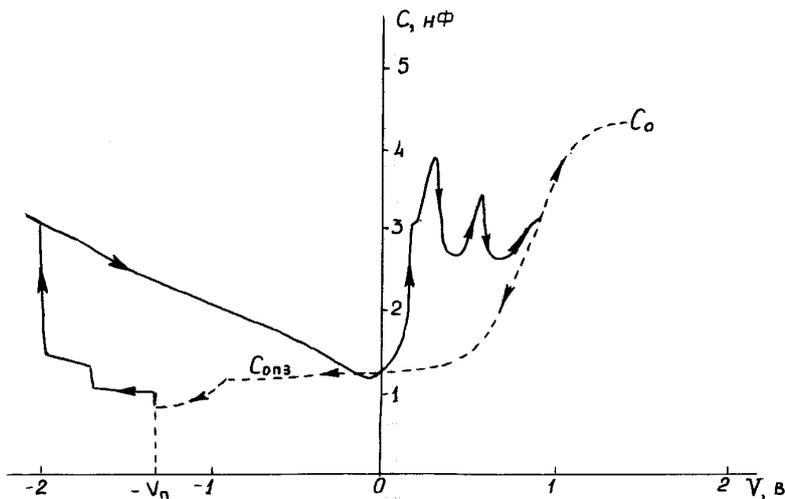
нанное туннелирование электронов из полупроводника в металл. Одной частью двойного барьера ( $B_2$ ) служит туннельно-тонкий окисел, приготовленный согласно [7]. Другой частью двойного барьера ( $B_1$ ) является барьерный слой туннельно-тонкого  $p-n$ -перехода, возникающего в кремнии, сильно легированном бором, за счет эффекта поля в структуре металл–окисел–полупроводник. Высокий уровень легирования в диапазоне  $10^{18}–10^{20} \text{ см}^{-3}$  обеспечивает как необходимую туннельную прозрачность барьерного слоя  $B_1$ , так и необходимый для квантования малый размер квантовой ямы ( $Я$ ), являющейся частью приповерхностной области пространственного заряда. Глубина ямы меняется при изменении напряжения. При наступлении резонансного туннелирования она превышает ширину запрещенной зоны полупроводника, т. е. 1.1 эВ. Такая глубокая квантовая яма благоприятствует наблюдению резонансных особенностей при комнатной температуре. Исследуемый двойной барьер асимметричен. Для обеспечения резонансного туннелирования

через квантованные уровни ямы необходимо приложить напряжение, достаточное для выравнивания энергетических положений квантованных уровней с положением эмитирующего уровня, которым в данном случае является уровень Ферми в объеме полупроводника (рис. 1). Минимальное напряжение, при котором с уровнем Ферми совпадает самый низкий уровень (0) квантовой ямы, обозначим пороговым  $V_p$ .

При отрицательных напряжениях, не достигающих порогового значения, и при положительных напряжениях условий для резонансного туннелирования нет и структура металл–окисел–полупроводник работает в своем традиционном режиме, что и подтверждают исследуемые вольт-фарадные характеристики (рис. 2, пунктир), демонстрирующие обычный вид [5–6] с переходом от емкости  $C$  верхней полки, задаваемой в основном окислом, к  $C$  нижней полки, задаваемой в основном областью пространственного заряда полупроводника. Величина  $C_0$ , так же как  $C/C_{опз}$ , отражает толщину исследуемого окисла в диапазоне (1–5) нм. Наблюдаемое дополнительное снижение емкости, приводящее к перегибу при  $V = -0.9$  В свидетельствует о наступлении неравновесного обеднения области пространственного заряда в условиях протекания туннельного тока. Диапазон рабочих напряжений, в котором структура металл–окисел–полупроводник имеет обычные вольт-фарадные характеристики, можно назвать классическим, в отличие от квантового, который начинается при  $|V| > |V_p|$ .

При  $-V = -V_p$  самая нижняя минизона в квантовой яме энергетически выравнивается с уровнем Ферми в объеме полупроводника, что открывает возможности для резонансного туннелирования электронов с уровня Ферми через минизону в металл. Это отражается в ступенчатом увеличении емкости (рис. 2). При дальнейшем росте отрицательного напряжения более высоко лежащие минизоны квантовой ямы достигают уровня Ферми, обеспечивая подключение их к процессу резонансного туннелирования и приводя ко все новым ступеням на вольт-фарадной характеристике. В соответствии с видом ямы энергетический зазор между уровнями сокращается по мере перехода от нижних уровней к верхним. Это находит подтверждение в уменьшении расстояния между ступенями по мере роста напряжения.

Одной из особенностей вольт-фарадных характеристик наноструктур металл–окисел–полупроводник, перспективных с точки зрения их практического применения, в частности организации памяти, является наличие управляемого напряжением гистерезиса при работе структуры в



**Рис. 2.** Типичное поведение высокочастотной ( $10^5$  Гц) вольт-фарадной характеристики нано-МОП-структуры на базе дырочного кремния ( $N_A = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ); скорость развертки напряжения  $\sim 10$  В/мин.

режиме резонансного туннелирования (рис. 2). Необходимым условием появления гистерезиса является превышение отрицательным напряжением  $-V_n$ . Причем чем дальше зайти в отрицательную область, тем ярче выражен гистерезис. В гистерезисном цикле величина  $C$  при обратном ходе больше, чем при прямом в преобладающем диапазоне  $V$ . При  $V > 0$  на вольт-фарадной характеристике обратного хода наблюдаются пики (рис. 2). Чем больше ступеней было пройдено при  $V < 0$  прямого хода, тем больше пиков наблюдается при  $V > 0$  обратного хода. Конечным результатом воздействия положительной полярности в гистерезисном цикле является возвращение структуры к своему исходному состоянию с начальной вольт-фарадной характеристикой, которая сохраняется до тех пор, пока в очередной раз не будет превышено пороговое напряжение при отрицательной полярности, после чего в очередной раз характеристика структуры, и стало быть она сама, может быть возвращена в исходное состояние с помощью  $V > 0$ . Такие циклы могут быть многократно повторены с различным количеством ступеней и пиков.

Наблюдаемый гистерезис обусловлен, по-видимому, следующими обстоятельствами. Можно заметить, что увеличение отрицательного напряжения при  $|V| > |V_{\text{п}}|$  обеспечивает не только процесс резонансного туннелирования, но и последовательный перевод все более высоко лежащих минизон из незаполненного состояния в заполненное; в результате в квантовой яме накапливается электронный заряд. Зарядовое состояние квантовой ямы изменяется по сравнению с исходным.

Полученные результаты свидетельствуют, что накопленный заряд сохраняется и после отключения внешнего напряжения. Это вполне возможно, если исследуемый электронный газ не 2-мерный, а 0-мерный. Причиной понижения размерности могут служить неоднородности вдоль поверхности, присущие исследуемой наноструктуре. Благодаря накопленному и сохраненному заряду в квантовых точках открываются возможности для резонансного туннелирования электронов из металла в полупроводник через квантовые уровни точек при  $V > 0$ , о чем свидетельствуют появляющиеся на характеристике пики, отсутствующие на исходной структуре. Пиковый вид резонансных особенностей (в отличие от ступеней при противоположной полярности  $V$ ) закономерно отражает энергетическую специфику коллектора в виде щели между уровнем Ферми и потолком валентной зоны полупроводника. Рост положительного напряжения сопровождается резонансным туннелированием из металла в полупроводник через все более глубокие квантовые минимуровни. Вместе с тем этот же рост напряжения переводит квантовые уровни из заполненного состояния в незаполненное и в конечном счете возвращает структуру к ее исходному зарядовому состоянию, о чем свидетельствуют ее характеристики и поведение.

Таким образом, на примере вольт-фарадных характеристик показано, что исследованная наноструктура металл–окисел–кремний наряду с классическим поведением позволяет:

1) осуществить резонансное туннелирование электронов из полупроводника в металл и из металла в полупроводник и получить характеристики с резонансными особенностями: ступенями при одной полярности напряжения и пиками при другой полярности;

2) записать электронный заряд при одной полярности напряжения и стереть его при другой, обеспечив мультстабильность структуры.

Признательна Ж. Корсен (H. Cohrssen) за финансовую поддержку.

## Список литературы

- [1] *Chang L.L., Esaki L., Tsu R.* // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 24. N 12. P. 593–595.
- [2] *Esaki L.* // IEEE. J. Quantum. Electron. 1986. V. QE-22. N 9. P. 1611–1624.
- [3] *Capasso F., Mohammed K., Cho A.Y.* // IEEE J. Quantum. Electron. 1986. V. QE-22. N 9. P. 1853–1868.
- [4] *Capasso F., Sen S., Beltram F.* High-Speed Semiconductor Devices. New York, Wiley, 1990. 455 p.
- [5] *Goetzberger A.* // Bell Syst. Tech.J. 1966. V. 45. N 9. P. 1097–1121.
- [6] *Sze S.M.* Physics of Semiconductor Devices. New York, Wiley, 1981. 455 p.
- [7] *Карева Г.Г.* Патент "Сверхрешетка" РФ N 2062529. Бюллетень № 17. 1996.