

06

## **О влиянии ширины спейсерных слоев на размеры области бистабильности в вольт-амперных характеристиках двухбарьерных туннельных резонансных диодов**

© М.М. Врубель, В.М. Борздов, Ф.Ф. Комаров

Белорусский государственный университет, Минск

Поступило в Редакцию 3 апреля 1997 г.

Обуждается вопрос о влиянии размеров спейсерных слоев на положение и ширину области бистабильности в вольт-амперных характеристиках туннельных резонансных диодов. Вольт-амперные характеристики рассчитывались в рамках самосогласованного приближения эффективной массы. Омечается, что увеличение размеров спейсерных слоев приводит к смещению вверх нижней границы области бистабильности, к сужению этой области и затем к полному ее исчезновению.

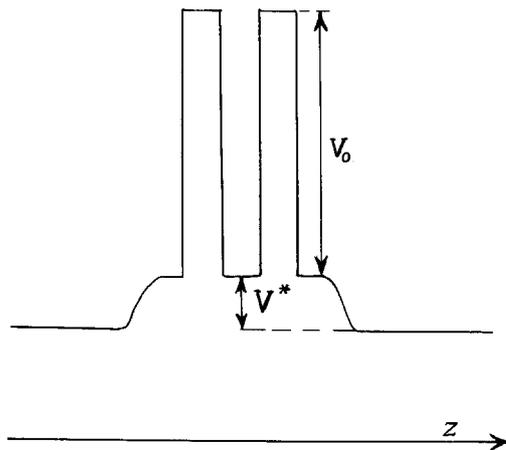
Как известно, при определенных условиях вольт-амперные характеристики двухбарьерных туннельных резонансных структур обнаруживают в областях с отрицательным дифференциальным сопротивлением эффект бистабильности [1–4]. В настоящей работе обсуждается вопрос о влиянии размеров спейсерных слоев на положение границ гистерезисной петли в вольт-амперных характеристиках двухбарьерных туннельных резонансных структур. Вольт-амперные характеристики с участками бистабильности в областях с отрицательным дифференциальным сопротивлением были рассчитаны в рамках предложенной в [6] схемы, включающей самосогласованное решение уравнений Пуассона и Шредингера. Рассматривались двухбарьерные AlAs/AlGaAs диоды с параметрами, аналогичными [6]: ширина барьеров и квантовой ямы составляла 50 Å, концентрация донорной примеси в контактах  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , эффективная масса электрона  $m = 0.067m_0$ , величина квантового барьера  $V_0 = 370 \text{ meV}$  и относительная диэлектрическая постоянная

$\varepsilon_R = 11.9$ . Все вольт-амперные характеристики рассчитаны для температуры  $T = 5$  К.

Механизм возникновения двух устойчивых токовых состояний в области отрицательного дифференциального сопротивления можно объяснить следующим образом [5–8]. При возрастании внешнего напряжения (движение от пиковых токов к долинным) резонансный уровень приближается ко дну зоны проводимости эмиттера сверху. Резонансный уровень, находясь в области энергий  $U(0) < E < U(0) + E_F$ , накапливает электроны, туннелирующие из эмиттера. Заряд электронов, скопившихся на резонансном уровне квантовой ямы, меняет потенциальный профиль структуры, в частности приподнимая дно ямы. Вследствие этого повышается положение резонансного уровня и, следовательно, увеличивается значение напряжения, при котором резонансный уровень пересекает дно зоны проводимости эмиттера. Качественно именно это напряжение является границей между областями пиковых и долинных токов. При падении напряжения (движение из долины к пику) резонансный уровень подходит ко дну зоны проводимости эмиттера снизу. При этом электроны на резонансном уровне полностью отсутствуют (при низких температурах мы пренебрегаем рассеянием и, следовательно, возможностью накопления рассеявшихся электронов на резонансном уровне  $E_R$ , расположенном под дном зоны проводимости в области энергий  $U(L) + E_F < E_R < U(0)$ ). Рассматриваемые далее примеры позволяют уточнить приведенную схему.

Как известно, присутствие спейсерных слоев между сильно вырожденными электродными областями и квантовыми барьерами вносит значительные изменения в потенциальный профиль структуры (рис. 1). Возникает потенциальный барьер  $V^*$ , препятствующий проникновению заряда из электродов в спейсерные слои. Дно квантовой ямы и, следовательно, положение резонансного уровня квантовой ямы повышаются в сравнении с дном зоны проводимости в электродах. Чем уже спейсерный слой, тем меньше значение  $V^*$ .

На рис. 2, а приведены вольт-амперные характеристики двухбарьерных туннельных резонансных диодов, различающихся только размерами спейсерных слоев. Легко заметить, что размеры спейсерных слоев сильно влияют на положение нижней границы области бистабильности. Нижняя граница петли гистерезиса (области с двумя устойчивыми токовыми состояниями) соответствует пересечению резонансным уровнем дна зоны проводимости эмиттерного при условии, что в квантовой

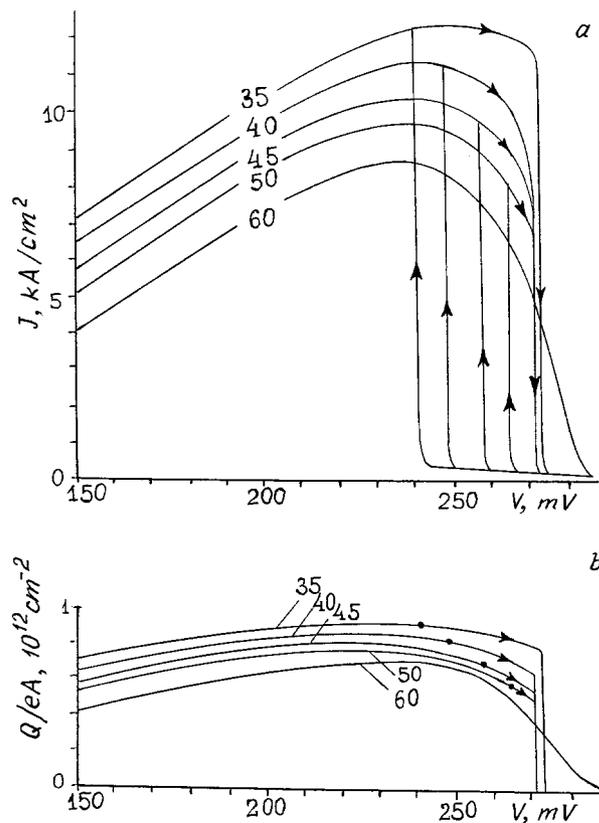


**Рис. 1.** Схематическое представление потенциального профиля двухбарьерного туннельного резонансного диода со спейсерными слоями.

яме нет накопленного заряда. Положение границы может быть оценено величиной  $V_L = 2(E_R + V^*)/e$ . Таким образом, чем уже спейсерные слои, тем меньше потенциал  $V^*$  и, следовательно, тем меньше значение  $V_L$ .

Нужно отметить, что положение верхней границы петли гистерезиса  $V_H$  одинаково для всех рассмотренных нами структур с шириной спейсерных слоев от 35 до 50 Å (рис. 2, *a*). Рис. 2, *b* позволяет сравнить величину накопленного квантовой ямой заряда  $Q$  для структур с различными размерами спейсеров. Величина  $Q_m$  — максимальный заряд, удерживаемый квантовой ямой, соответствует максимумам в зависимостях рис. 2, *b*. Очевидно, что связь между  $Q_m$  и шириной области бистабильности  $\Delta V = V_H - V_L$  в рассмотренных структурах не может считаться линейной, в отличие от туннельных резонансных диодов без спейсерных слоев [5].

Мы хотели бы обратить внимание на то, что если спейсерные слои настолько широки, что значение  $V_L \approx 2(E_R + V^*)$  превышает значение  $V_H$ , область с двумя устойчивыми токовыми состояниями отсутствует, несмотря на то что заряд в квантовой яме накапливается (рис. 2,  $w = 60$  Å). Такой же эффект обнаружен экспериментально [2].



**Рис. 2.** Зависимости плотности тока  $J$  (a) и двумерной плотности накопленного квантовой ямой заряда  $Q/eA$  (b) от приложенного внешнего напряжения  $V$  для двухбарьерных туннельных резонансных диодов, различающихся размерами спейсерных слоев. Цифры на рисунке соответствуют ширине спейсерных слоев  $w$ , стрелками показан ход изменения напряжения, точками отмечены нижние границы областей бистабильности  $V_L$ .

Ситуация, когда спейсерные слои очень узкие или отсутствуют совсем, требует дальнейшего исследования. Отметим, что положение верхней границы петли гистерезиса незначительно смещается вверх (рис. 2,  $w = 35 \text{ \AA}$ ). В структурах с тонкими спейсерными слоями при

достижении напряжения  $V_H$  наблюдается значительное падение потенциала в областях эмиттера и коллектора, прилегающих к структуре. Образуются обогащенный (в коллекторе) и обедненный (в эмиттере) слои. Возникает необходимость включать в пространственную область для самосогласования широкие электродные слои, что создает дополнительные сложности при достижении сходимости в самосогласованном решении уравнений Шредингера и Пуассона. Кроме того, решение становится очень чувствительным к выбору начальных условий.

Таким образом, основные результаты нашей работы сводятся к следующему. Присутствие спейсерных слоев в двухбарьерных туннельных резонансных структурах приводит к сужению области с двумя устойчивыми токовыми состояниями (петли гистерезиса) за счет движения вверх нижней границы петли при увеличении ширины спейсерных слоев. Положение верхней границы петли гистерезиса одинаково для структур со спейсерными слоями различной ширины до тех пор, пока спейсерные слои достаточно широки, чтобы препятствовать образованию обедненного и обогащенного слоев в электродах. Если спейсерные слои оказываются настолько широкими, что величина потенциала  $V^*$  превышает размеры области бистабильности аналогичной структуры без спейсерных слоев, область с двумя устойчивыми токовыми состояниями не возникает.

## Список литературы

- [1] Goldman V.J., Tsui D.C., Cunningham J.E. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. N 12. P. 1256–1259.
- [2] Wei T., Stapleton S., O. Berolo // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. N 8. P. 4071–4075.
- [3] Zaslavsky A., Goldman V.J., Tsui D.S. et al. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 15. P. 1408–1410.
- [4] Игнатъев А.С., Каминский В.Э., Копылов В.Б. и др. // ФТП. 1992. Т. 26. № 10. С. 1795–1800.
- [5] Shead F.W., Toombs G.A. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. N 15. P. 1228–1230.
- [6] Sofo J.O., Balseiro C.A. // Phys. Rev. B. 1990. V. 42. N 11. P. 7292–7295.
- [7] Jensen K.L., Buot F.A. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. N 8. P. 1078–1081.
- [8] Salvino R.J., Buot F.A. // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. N 12. P. 5975–5981.