

# Отрицательная фотопроводимость в среднем ИК-диапазоне селективно легированных гетероструктур SiGe/Si:B с двумерным дырочным газом

© А.В. Антонов, В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, З.Ф. Красильник,  
А.В. Новиков, Е.А. Ускова\*, М.В. Шалеев

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\* Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: aav@ipm.sci-nnov.ru

Представлены результаты исследований спектров латеральной фотопроводимости селективно легированных гетероструктур SiGe/Si:B с двумерным дырочным газом. Обнаружено, что в спектрах фотопроводимости исследованных структур присутствуют два сигнала, имеющие различные знаки. Положительный сигнал связывается с примесной фотопроводимостью в кремниевых слоях структур. Обнаруженный сигнал отрицательной фотопроводимости связывается с переходом дырок из квантовой ямы SiGe в долгоживущие состояния в барьерах Si. Положение пика отрицательной фотопроводимости зависит от состава квантовой ямы, а его низкочастотный край хорошо согласуется с рассчитанной энергией залегания уровня размерного квантования дырок в квантовой яме.

Работа выполнена при финансовой поддержке ISTC (грант N 2206), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-02-16792, 03-02-16808), Федеральной программы Министерства промышленности и технологии РФ и Российской федеральной программы „Интеграция“.

## 1. Введение

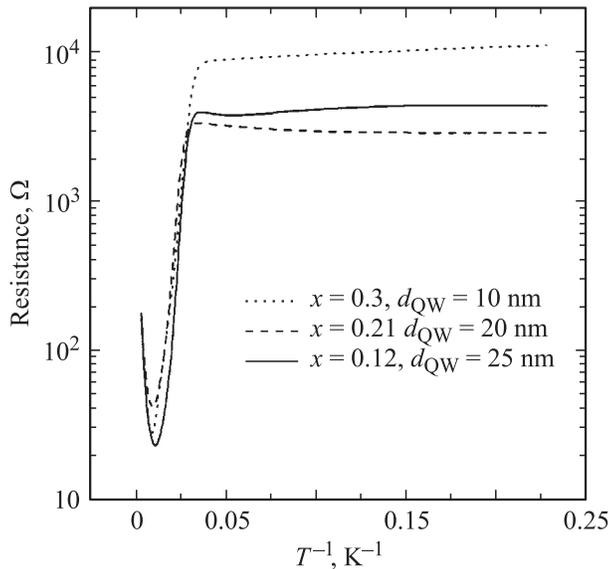
В настоящее время растет интерес к оптическим свойствам SiGe-наноструктур. Благодаря их совместимости с кремниевой технологией возможна интеграция на одном чипе оптоэлектронных устройств, основанных на SiGe-гетероструктурах с квантовыми ямами и квантовыми точками, и схем обработки сигналов. Поэтому изучение физических эффектов, лежащих в основе устройства SiGe-фотодетекторов для разных спектральных диапазонов, представляет особенный интерес. Работы, посвященные исследованию поглощения и фотопроводимости в среднем ИК-диапазоне обсуждаются в [1–3]. Одно- и многополосные детекторы среднего ИК-диапазона исследованы в [4,5]. Однако в большинстве своем эти исследования ограничены вертикальным транспортом заряда, когда фотоотклик возникает в результате фотовозбуждения носителей заряда из квантовой ямы в барьеры и происходит увеличение числа носителей заряда, вносящих вклад в электрический ток. В данной работе представлены результаты исследования латеральной фотопроводимости селективно легированных SiGe/Si:B-гетероструктур с двумерным дырочным газом. Обнаруженный отрицательный фотоотклик в среднем ИК-диапазоне может представлять интерес для характеристики SiGe-гетероструктур с квантовыми ямами.

## 2. Эксперимент и обсуждение

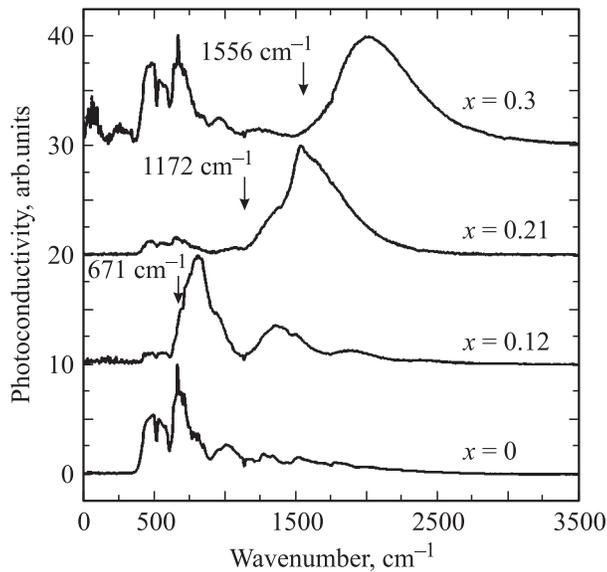
Исследованные SiGe/Si:B-гетероструктуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на слабо легированных бором подложках Si(100). Струк-

туры содержали одиночную квантовую яму  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , концентрация Ge в которой варьировалась от 12 до 30 at.%. Ширина квантовой ямы  $d_{\text{QW}}$  (25–10 nm) уменьшалась с ростом доли Ge и не превышала критической толщины эпитаксиального роста слоя GeSi на подложке Si(001). С обеих сторон от квантовой ямы на расстоянии 20 nm располагались слои, легированные бором. Поверхностная концентрация бора в легированных слоях составляла  $\sim 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . На поверхность выращенного образца в форме квадрата на расстоянии 3–4 mm друг от друга были нанесены полосковые омические контакты. Латеральная фотопроводимость изучалась при помощи Фурье-спектрометра BOMEM DA3.36 с делителем пучка KBr. В качестве источника излучения использовался глобар. Образцы помещались в световодной вставке в транспортный гелиевый дьюар.

На рис. 1 представлена измеренная зависимость сопротивления SiGe/Si:B-структур от обратной температуры. При температуре  $T > 35 \text{ K}$  примесь бора в подложке и легированных слоях ионизована, и сопротивление структуры определяется проводимостью на свободных носителях. При низкой ( $T < 35 \text{ K}$ ) температуре дырки в Si:B „выморожены“ на акцепторах. Поскольку глубина квантовой ямы в исследованных структурах больше, чем энергия ионизации примеси бора (46 meV), дырки из легированных слоев заполняют квантовую яму, образуя двумерный дырочный газ. Таким образом, при низких температурах проводимость по яме практически не зависит от температуры (рис. 1). Двумерная концентрация дырок при температуре 4.2 K, определенная при измерениях эффекта Холла, увеличивалась с ростом концентрации Ge в квантовой яме и находилась в



**Рис. 1.** Зависимость сопротивления  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}:\text{B}$ -структуры с двумерным дырочным газом от обратной температуры.



**Рис. 2.** Спектры фотопроводимости объемного  $\text{Si}:\text{B}$  ( $x = 0$ ) и структур  $\text{SiGe}/\text{Si}$  с различным содержанием Ge в квантовой яме, измеренные при 4.2 K. Стрелки и числа около кривых соответствуют рассчитанному положению и значению энергии перехода дырок из валентной зоны квантовой ямы  $\text{SiGe}$  в валентную зону  $\text{Si}$ .

диапазоне от  $3 \cdot 10^{11}$  до  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Подвижность дырок, также полученная на основании измерений эффекта Холла, зависела от содержания Ge в квантовой яме и при 4.2 K для  $x = 0.12, 0.21, 0.3$  составляла 5500, 1500 и  $300 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  соответственно.

Измеренные спектры фотопроводимости структур с квантовыми ямами представлены на рис. 2, где для сравнения также приведен спектр фотопроводимости объемного образца  $\text{Si}:\text{B}$  ( $x = 0$ ). Из измеренных спек-

тров видно, что сигнал фотопроводимости структур с квантовыми ямами состоит из двух частей разной природы. Первая часть — примесная полоса, связанная с фотоионизацией акцепторов бора в Si.

Особенности, характерные для спектра примесной фотопроводимости объемного образца  $\text{Si}:\text{B}$ , хорошо видны также в спектрах всех гетероструктур с квантовыми ямами и соответствуют фотоотклику из Si-барьеров и подложки. Кроме примесной полосы в спектрах фотопроводимости  $\text{SiGe}/\text{Si}:\text{B}$ -гетероструктур имеется широкая полоса, положение которой зависит от содержания Ge в квантовой яме. Соотношение интенсивностей этих двух полос зависит от напряжения смещения, прикладываемого к образцу. При относительно малом смещении (около 1 V) интенсивность полосы, связанной с фотопроводимостью квантовой ямы, преобладает над интенсивностью полосы, обусловленной ионизацией примеси бора в слоях кремния. Однако с увеличением смещения интенсивность примесной полосы начинает возрастать и при больших напряжениях превосходит интенсивность полосы, связанной с квантовой ямой.

На рис. 2 видны ярко выраженные осцилляции в спектре фотопроводимости объемного  $\text{Si}:\text{B}$ . Подобные осцилляции (фононные повторения) наблюдались ранее [6]. Период этих осцилляций определяется энергией оптического фонона в Si ( $\sim 60 \text{ meV}$ ). Похожие осцилляции хорошо видны также и в спектре фотопроводимости структуры с  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ -квантовой ямой для  $x = 0.12$ . Наблюдаемый минимум сигнала фотопроводимости в районе  $1200 \text{ cm}^{-1}$  предположительно связан с поглощением света кислородом в кремнии.

При увеличении содержания Ge полоса в спектре фотопроводимости, связанная с квантовой ямой, смещается в область больших энергий. Стрелками на рис. 2 показана рассчитанная глубина залегания уровня размерного квантования в яме для каждого образца. Расчет проводился с использованием гамильтониана  $6 \times 6$ , который описывает подзоны тяжелых, легких и спин-отщепленных дырок. Видно, что рассчитанная энергия хорошо совпадает с низкочастотным краем обнаруженной полосы фотопроводимости.

Было найдено, что сигнал фотопроводимости, связанный с квантовой ямой, более инерционный (характерное время релаксации  $\tau \sim 1 \text{ ms}$ ), чем сигнал примесной фотопроводимости бора в кремнии ( $\tau \sim 10 \mu\text{s}$ ). Необходимо также отметить, что фотопроводимость, связанная с квантовой ямой, отрицательна, т.е. сопротивление образца увеличивается при освещении. В случае примесной фотопроводимости имеет место обратный эффект: сопротивление образца уменьшается вследствие появления дополнительных носителей заряда, вносящих вклад в электрический ток. Интересно, что в спектрах фотопроводимости образцов с квантовой ямой (рис. 2) обе полосы имеют одинаковый знак, что может быть обусловлено фазовой ошибкой при обработке данных Фурье-спектрометром.

Мы связываем высокочастотную полосу фотопроводимости в селективно легированных  $\text{GeSi}/\text{Si}:\text{B}$ -гетероструктурах с двумерным дырочным газом с переходами

дырок из квантовой ямы в долгоживущие состояния в Si-барьерах. Подобная отрицательная фотопроводимость была обнаружена для межзонного возбуждения в SiGe/Si-гетероструктурах с квантовыми точками [7]. Захват дырок в барьерные состояния преобладает над возвратом дырок в квантовую яму, а большое время жизни дырок в барьере может определяться туннельными процессами. Таким образом, фотовозбуждение дырок приводит к уменьшению их концентрации в квантовой яме, т.е. к уменьшению тока и появлению сигнала отрицательной фотопроводимости.

### 3. Заключение

В настоящей работе исследована латеральная фотопроводимость селективно легированных гетероструктур SiGe/Si:B с двумерным дырочным газом. Подвижность двумерного дырочного газа уменьшается с ростом концентрации дырок и доли Ge в квантовой яме. Для структуры с малым содержанием Ge ( $x = 0.12$ ) в квантовой яме подвижность дырок, определенная на основании измерений эффекта Холла при 4.2 К, составляла  $> 5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Измерения спектров латеральной фотопроводимости в исследованных структурах показали наличие двух сигналов различной природы. Положительный сигнал связывается с примесной фотопроводимостью в кремниевых слоях исследованных структур. Положение пика примесной проводимости не зависело от параметров квантовой ямы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Второй сигнал фотопроводимости имеет отрицательный знак, его положение зависит от состава квантовой ямы. Низкочастотный край пика отрицательной фотопроводимости хорошо согласуется с рассчитанной энергией залегания уровня размерного квантования дырок в квантовой яме. Обнаруженный сигнал отрицательной фотопроводимости связывается с переходами дырок из квантовой ямы в долгоживущие состояния в барьерах Si, в результате чего происходит уменьшение концентрации носителей заряда в двумерном проводящем канале и, как следствие, увеличение сопротивления структуры.

### Список литературы

- [1] T. Fromherz, E. Koppensteiner, M. Helm, G. Bauer, J.F. Nützel, G. Abstreiter. *Phys. Rev. B* **50**, 20, 15 073 (1994).
- [2] T. Fromherz, P. Kruck, M. Helm, G. Bauer, J.F. Nützel, G. Abstreiter. *Appl. Phys. Lett.* **68**, 25, 3611 (1996).
- [3] E. Dekel, E. Ehrenfreund, D. Gershoni, P. Boucaud, I. Sagnes, Y. Campidelli. *Phys. Rev. B* **56**, 24, 15 734 (1997).
- [4] R.P.G. Karunasiri, J.S. Park, K.L. Wang. *Appl. Phys. Lett.* **59**, 20, 2588 (1991).
- [5] D. Krapf, B. Adoram, J. Shappir, A. Sa'ar, S.G. Thomas, J.L. Liu, K.L. Wang. *Appl. Phys. Lett.* **78**, 4, 495 (2001).
- [6] В.Ф. Банная, Е.М. Гершензон, Ю.П. Ладыжинский, Т.Г. Фукс. *ФТП* **7**, 6, 1092 (1973).
- [7] A.I. Yakimov, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov, O.P. Pchelyakov, A.V. Nenashev. *Phys. Rev. B* **62**, 24, R 16 283 (2000).