

# Индucedированная межзонным светом ступенчатая фотопроводимость структур Si/Ge с квантовыми точками

© О.А. Шегай, В.А. Марков, А.И. Никифоров

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: shegai@thermo.isp.nsc.ru

При увеличении интенсивности межзонного света обнаружен ступенчатый рост сигнала низкотемпературной латеральной фотопроводимости структур Si/Ge, содержащих шесть слоев квантовых точек германия в матрице кремния. Как и ранее в структурах с одним слоем квантовых точек, рост тянущего поля приводит к смещению положения ступенек в область меньших интенсивностей света. Обнаружено, что смещение положения ступенек в область малых интенсивностей света происходит также и под действием темнового тянущего поля. Результаты обсуждаются в рамках теории протекания неравновесных электронов, локализованных в состояниях между квантовыми точками.

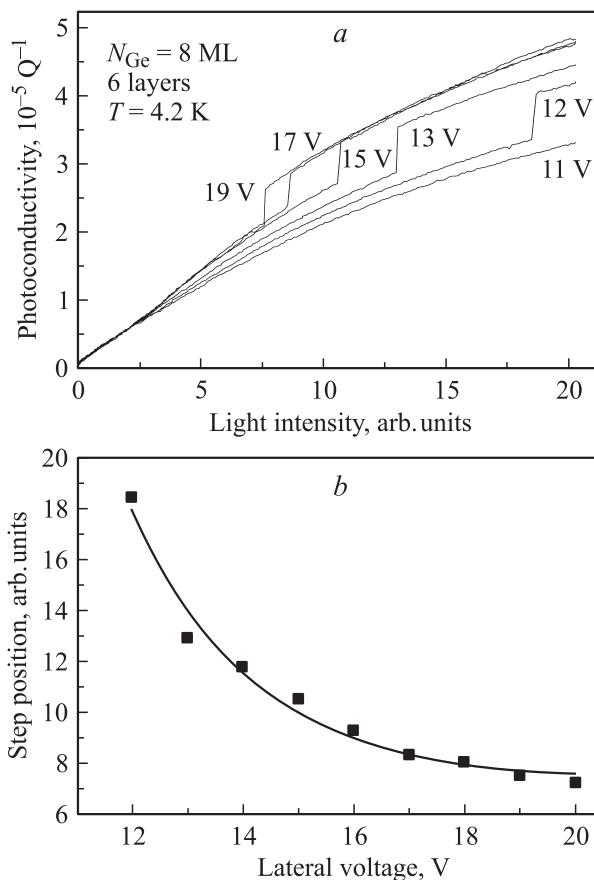
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-02-16466, 03-02-16468).

**1.** Изучение механизмов латеральной фотопроводимости (ФП) в Si/Ge/Si структурах, содержащих самоорганизующиеся квантовые точки (QD's) германия, актуально в связи с возможностью использования этих структур в оптоэлектронных приборах [1]. Ранее нами сообщалось об обнаружении ступенчатого роста латеральной ФП структур с одним слоем QD's при увеличении интенсивности межзонной подсветки [2,3]. Объяснение наблюдаемой зависимости основывается на теории протекания [4] неравновесных носителей заряда по локализованным состояниям, образующимся между QD's в матрице кремния из-за пространственной релаксации механического напряжения вокруг QD's [5]. В настоящей работе сообщается об обнаружении ступенчатого роста сигнала ФП при межзонной подсветке в структурах с шестью слоями QD's германия и влиянии на положение ступеньки темнового тянущего поля.

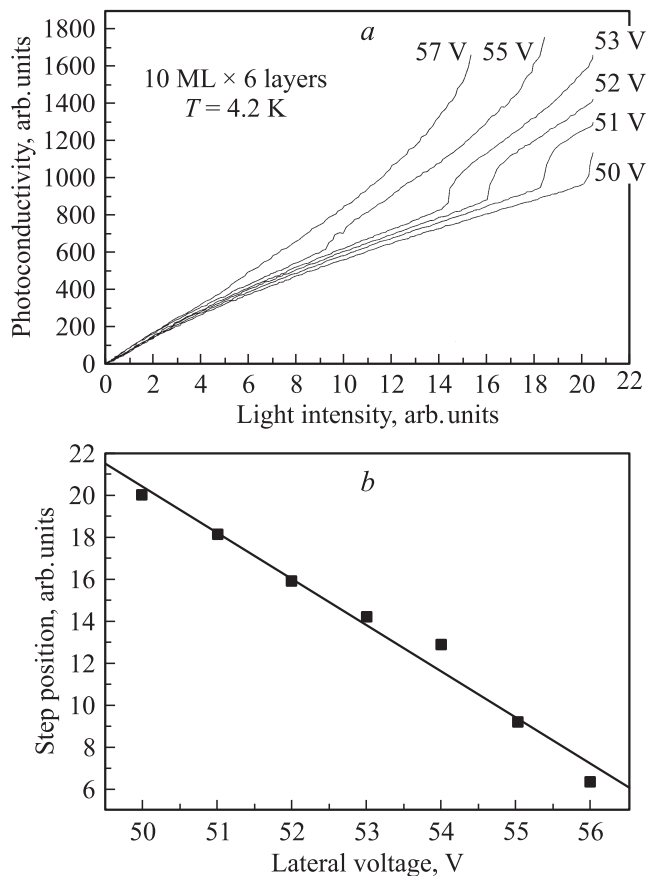
**2.** Напряженные Si/Ge/Si структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии по механизму Странского–Крастанова на подложках Si(001) и содержали шесть слоев QD's с номинальной толщиной германия  $N_{\text{Ge}} = 8$  и 10 монослоев (ML). Слои QD's разделены кремнием толщиной 25 nm. Слои, содержащие QD's, выращивались на буферном слое кремния толщиной около 100 nm; сверху они закрывались поверхностным слоем Si толщиной порядка 20 nm. Понижение температуры роста слоя германия до  $t_g = 250^\circ\text{C}$  приводило к большой плотности QD's ( $N_{\text{QD}} \approx 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ) и малым размерам QD's (латеральный размер около 10 nm).

Измерения ФП проводились при  $T = 4.2 \text{ K}$ . Сканирование интенсивности света осуществлялось путем увеличения тока через светодиод, излучающий в красной области спектра и установленный вблизи образца с площадью засветки  $1.5 \times 0.2 \text{ mm}$ . Регистрация сигналов, пропорциональных величине проводимости образца и плотности интенсивности света на образце, осуществлялся с помощью персонального компьютера.

**3.** На рис. 1 показаны кривые зависимости латеральной ФП при различных значениях тянущего поля для структуры с шестью слоями QD's и  $N_{\text{Ge}} = 8 \text{ ML}$  и зависимость положения ступеньки от тянущего поля



**Рис. 1.** Зависимость латеральной фотопроводимости структуры с шестью слоями QD's и номинальной толщиной каждого слоя 8 ML от интенсивности межзонного света при различных значениях тянущего поля (a); зависимость положения ступенчатого роста ФП от латерального поля (b).



**Рис. 2.** Зависимость латеральной фотопроводимости структуры с шестью слоями QD's и номинальной толщиной каждого слоя 10 ML от интенсивности межзонного света при различных значениях тянущего поля (a); зависимость положения ступенчатого роста ФП от латерального поля (b).

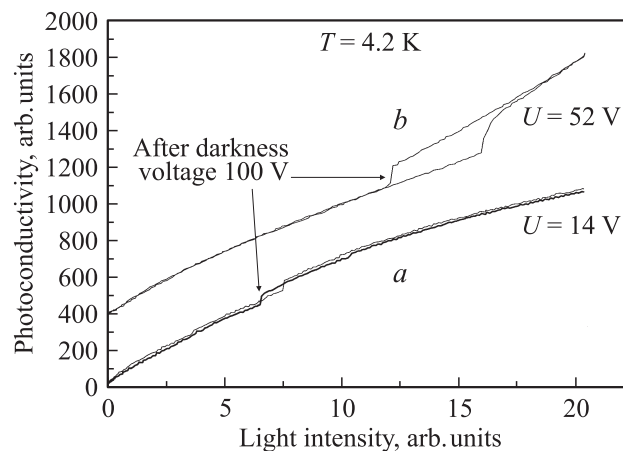
(точки — эксперимент, кривая — результат экспоненциальной подгонки). На рис. 2 показаны аналогичные зависимости для структуры с  $N_{\text{Ge}} = 10$  ML. В поведении кривых, как и ранее, для структур с одним слоем QD's [2,3], наблюдается ступенчатый рост сигнала ФП. С ростом тянущего поля положение ступенек сдвигается в область малых интенсивностей света. Однако, если для структуры с  $N_{\text{Ge}} = 8$  ML это смещение, как и для структур с одним слоем QD's, имеет экспоненциальную зависимость с близким характерным значением  $U_0 \approx 2$  V [2,3], то для структуры с  $N_{\text{Ge}} = 10$  ML это смещение происходит по линейному закону (рис. 2).

На рис. 3 представлены результаты влияния темнового тянущего поля на положение ступеньки в ФП обеих структур с QD's. Сначала проводилась регистрация зависимости латеральной ФП от интенсивности межзонного света при некотором фиксированном значении тянущего поля, затем в темноте к структуре в течение нескольких секунд прикладывалось напряжение величиной 100 V, и далее вновь происходила запись зависимости ФП при первоначальном тянущем поле. Из рисунка видно, что для обеих структур после подачи темнового напряжения

происходит сдвиг ступеньки в область меньших интенсивностей света, причем для структуры с  $N_{\text{Ge}} = 10$  ML величина сдвига примерно в 4 раза превышает сдвиг для структуры с  $N_{\text{Ge}} = 8$  ML. Было замечено, что величина смещения линейно зависит от темнового поля.

Анализ полученных результатов основывается на предложенной нами ранее модели протекания неравновесных носителей заряда по локализованным состояниям между QD's, образующимся между QD's из-за пространственной релаксации механического напряжения вокруг QD's [5]. Эти состояния находятся в плоскости QD's, каждое из которых расположено на равноудаленном расстоянии, по крайней мере от трех ближайших QD's. В силу флуктуации расстояния между QD's и их латерального размера потенциал локализации также испытывает флуктуацию.

При межзонной подсветке происходит локализация неравновесных электронов в состояниях, описанных выше. При малых интенсивностях межзонного света, когда концентрация неравновесных носителей заряда меньше, чем концентрация QD's, дырки в основном локализируются на состояниях QD's, а при больших интенсивностях — между QD's. Если кулоновский потенциал QD, захвативший дырку, больше отталкивающего потенциала, связанного с неоднородным механическим напряжением вокруг нее, то электрон образует связанное состояние на QD [5]. Локализованные в состояниях между QD's носители заряда образуют экситонные состояния, концентрация которых определяется интенсивностью межзонного света и которые не влияют на проводимость структуры. Увеличение тянущего поля приводит к развалу экситонных состояний на носители заряда, локализованные там же. Когда квазиуровень Ферми электронов, находящихся в локализованных состояниях между QD's, достигает порога протекания, наблюдается ступенчатый рост сигнала ФП. Чем больше величина



**Рис. 3.** Влияние темнового напряжения (100 V) на зависимость латеральной фотопроводимости от интенсивности межзонного света для структур, содержащих шесть слоев QD's толщиной Ge 8 ML (a) и 10 ML (b) (для удобства кривые сдвинуты вверх).

латерального поля, тем больше количество экситонов распадается и меньше интенсивность света, при которой появляется ступенька. Значения латеральных полей, при которых в ФП наблюдается ступенька, для структуры с  $N_{Ge} = 10$  ML существенно больше, чем для структуры  $N_{Ge} = 8$  ML, что связано с большей амплитудой рельефа энергетических зон, вызванной ростом механического напряжения в QD's в структурах с большими размерами QD's.

Кроме латеральной релаксации механического напряжения вокруг QD's происходит и поперечная релаксация напряжения в направлении роста структур. Поскольку характер кривых зависимости ФП от интенсивности межзонного света для структуры с  $N_{Ge} = 8$  ML почти не отличается от зависимостей для структур с одним слоем QD's, в этой структуре поперечная релаксация механического напряжения между соседними слоями QD's происходит полностью. Для структуры же с большими латеральными размерами QD's ( $N_{Ge} = 10$  ML) при тех же расстояниях между соседними слоями QD's происходит взаимное усиление полей деформации, приводящее к увеличению рельефа зон.

Мы считаем, что смещение положения ступенек в ФП структур с QD's под действием темнового напряжения происходит из-за инжекции носителей заряда из контактов в структуру. После снятия темнового напряжения часть электронов благодаря рельефу зон достаточно длительное время может находиться в локализованных состояниях между QD's. В структуре с большим потенциалом рельефа зон ( $N_{Ge} = 10$  ML) количество электронов, локализованных между QD's, больше по сравнению со структурой с  $N_{Ge} = 8$  ML, что приводит к достижению порога протекания при существенно меньших интенсивностях межзонного света.

Таким образом, в зависимости латеральной фотопроводимости Si/Ge структур с несколькими слоями квантовых точек от интенсивности межзонного света обнаружен ступенчатый рост. Рост тянущего поля приводит к смещению положения ступеньки в область меньших интенсивностей света. Обнаружено влияние темнового тянущего поля на положение ступеньки, величина смещения которой существенно зависит от латеральных размеров QD's. Результаты обсуждаются в рамках теории протекания по локализованным состояниям, образующимся из-за пространственной релаксации механического напряжения вокруг квантовых точек.

## Список литературы

- [1] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. ФТП **34**, *11*, 1281 (2000).
- [2] O.A. Shegai, V.A. Markov, A.I. Nikiforov, A.S. Shaimuratova, K.S. Zhuravlev. PLDS **1/2**, 261 (2002).

- [3] О.А. Шегай, К.С. Журавлев, В.А. Марков, А.И. Никифоров, А.Ш. Шаймуратова. Изв. АН. Сер. физ. **67**, *2*, 192 (2003).
- [4] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. Наука, М. (1979).
- [5] О.А. Шегай, К.С. Журавлев, В.А. Марков, А.И. Никифоров, О.П. Пчеляков. ФТП **34**, *11*, 1363 (2000).