

# Продольная фотопроводимость гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge

© С.В. Кондратенко<sup>¶</sup>, А.С. Николенко, О.В. Вакуленко, С.Л. Головинский,  
Ю.Н. Козырев\*, М.Ю. Рубежанская\*, А.И. Водяницкий\*

Киевский национальный университет им. Т.Г. Шевченко (физический факультет),  
03022 Киев, Украина

\* Институт химии поверхности,  
03164 Киев, Украина

(Получена 17 ноября 2006 г. Принята к печати 4 декабря 2006 г.)

Исследовались спектральные зависимости продольной фотопроводимости гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge. Был обнаружен фотоотклик структур Ge/Si с нанокластерами Ge в диапазоне 1.0–1.1 эВ при  $T = 290$  К, тогда как фототок от подложки монокристаллического Si без слоев Ge оказался значительно ослабленным. Такой результат может объясняться возникновением упругой деформации в структуре, влияющей на спектр оптического поглощения Si. Исследованные гетероструктуры обнаружили fotocувствительность при температуре ниже 120 К в спектральном диапазоне от 0.4 до 1.1 эВ, где монокристаллический Si является прозрачным. Фототок в этом диапазоне, возможно, обусловливается дырочными переходами из основных состояний, локализованных в квантовых точках, в делокализованные состояния валентной зоны.

PACS: 73.63.Kv, 73.50.Pz, 78.67.Hc

## 1. Введение

В последнее время интенсивно разрабатываются новые типы фотодетекторов на основе кремний-германиевых низкоразмерных гетероструктур с использованием внутривозонных и межвозонных переходов в этих материалах. Такие приборы имеют перспективу использования в оптоэлектронных системах связи и дистанционного контроля. Особое внимание уделяется разработке новых фотоприемников, чувствительных в диапазонах длин волн 3–5 и 8–12 мкм, где атмосфера является прозрачной. Созданы эффективные фотодетекторы на основе Si/Ge с квантовыми ямами с fotocувствительностью в диапазоне от 6 до 20 мкм [1–3], которые являются альтернативой фотоприемникам на основе соединений A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup>. Область их fotocувствительности обусловлена оптическими переходами между подзонами квантовых ям.

Практическое использование фотодетекторов с квантовыми ямами ограничивается поляризационным правилом отбора, согласно которому межвозонные переходы в квантовых ямах возможны только для излучения, поляризованного вдоль направления размерного квантования [4]. Таким образом, такие переходы не наблюдаются при нормальном падении возбуждающего излучения. Иная ситуация имеет место в фотоприемниках с квантовыми точками — объектами, в которых движение носителей заряда ограничено во всех трех направлениях, и правила отбора существенно модифицируются. Фотодетекторы с квантовыми точками, fotocувствительными при нормальном падении возбуждающего излучения в диапазоне 3–5 мкм, уже изготовлены на основе структур InAs/GaAs и Ge/Si [5–7].

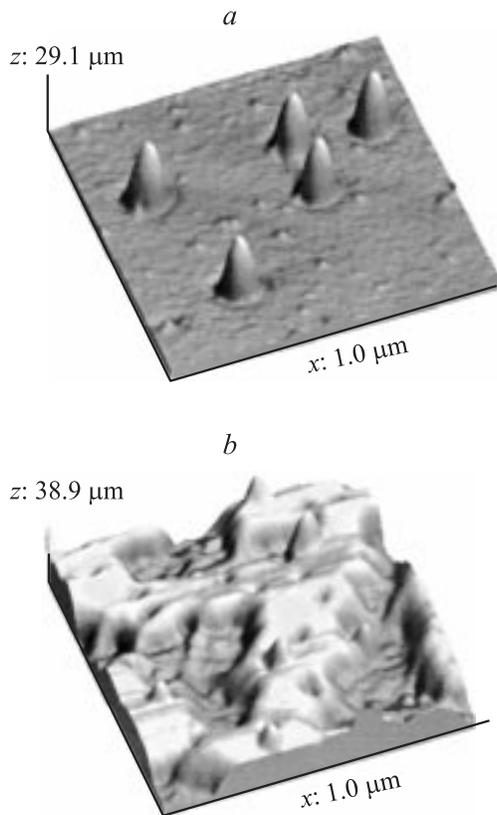
Особого внимания при этом заслуживает разработка продольных фотодетекторов, которые имеют большой потенциал практического применения благодаря возможности легкой реализации инфракрасных приборов с большой площадью чувствительной поверхности, способных работать при нормальном падении возбуждающего излучения. Для улучшения технических параметров таких систем необходимо более детально изучить оптические и фотоэлектрические свойства квантовых точек Ge и прилегающих к ним кремниевых слоев.

В данной работе проведено изучение спектральных зависимостей продольной фотопроводимости кремниевых структур с квантовыми точками Ge при разных температурах.

## 2. Методика эксперимента

Исследуемые структуры были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке „Катунь-В“ на подложках Si(100) *n*-типа (7.5–20 Ом·см,  $\varnothing 76$  мм). Ранее [8,9] нами была предложена схема эпитаксиального роста нанокластеров Ge с помощью так называемой системы промежуточных слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, содержащей *N* двумерных слоев докритической толщины с постепенным увеличением мольной доли Ge *x* от слоя к слою, которые выращивались при постепенном снижении температуры подложки до  $T_s = 350–450^\circ\text{C}$ . Для получения многослойных структур с квантовыми точками от 3 до 10 слоев германий толщиной  $\sim 1.5–2.0$  нм чередовался с пленками кремния (2.0–2.5 нм) при  $T_s = 350–450^\circ\text{C}$ . Состояние поверхности в процессе выращивания на момент перехода от послойного роста к формированию трехмерных островков контролировалось по картинам

<sup>¶</sup> E-mail: kondr@univ.kiev.ua



**Рис. 1.** Изображения поверхности структуры Ge/Si с квантовыми точками Ge (*a*) и структуры с неоднородным двумерным слоем Ge (*b*), полученные с помощью атомной силовой микроскопии.

дифракции быстрых электронов. Методика системы промежуточных слоев позволила получить структуры с квантовыми точками Ge, отличающиеся как размерами нанокластеров Ge, так и плотностью их распределения по поверхности подложки. На рис. 1, *a* приведено изображение одного из таких образцов, полученное с помощью атомной силовой микроскопии. Как видно из рисунка, плотность распределения квантовых точек составляет примерно  $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ . Средний размер основания нанокластеров, имеющих форму четырехгранной пирамиды, приблизительно равен 100 нм, а средняя высота 15 нм. Для сравнения изготавливались также структуры с неоднородными двумерными слоями Ge (рис. 1, *b*).

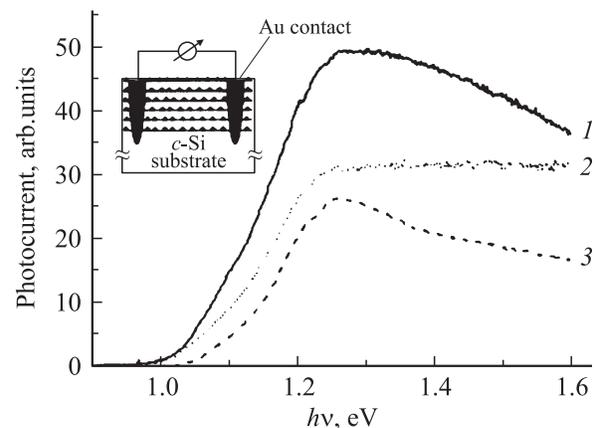
Для исследования продольной фотопроводимости на поверхность с эпитаксиальными слоями вплавлялись два омических Au-контакта диаметром 1 мм на расстоянии 10 мм один от другого (см. вставку на рис. 2). Измерение спектральных зависимостей фотопроводимости проводилось на базе стандартного инфракрасного спектрометра в спектральном интервале 0.4–1.2 эВ. Модулированное излучение от источника света — глобара — после прохождения монохроматора фокусировалось на поверхности слоя Ge в области между контактами. Частота модуляции составляла 10 Гц. Измерения фототока про-

водились с использованием усилителя тока и стандартной техники синхронного детектирования. Измеренные спектральные зависимости сводились к постоянному количеству квантов возбуждающего излучения с помощью неселективного пироэлектрического приемника.

### 3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 (кривая 1) приведена спектральная зависимость продольной фотопроводимости структуры Ge/Si с квантовыми точками Ge, измеренная при комнатной температуре. Для сравнения также проведены измерения спектральной зависимости продольной фотопроводимости структур с неоднородными двумерными (2D) слоями Ge (рис. 2, кривая 2) и образца монокристаллического Si (*c*-Si), который не содержал Ge (рис. 2, кривая 3). Положение длинноволнового края измеренных спектров указывает на то, что фототок обусловлен генерацией неравновесных носителей заряда за счет непрямых зонных переходов в Si.

Структура с квантовыми точками Ge обнаружила значительно большую фоточувствительность в области энергий квантов  $1.0 \lesssim h\nu \lesssim 1.11 \text{ эВ}$ , меньших ширины запрещенной зоны *c*-Si при комнатной температуре ( $E_g = 1.11 \text{ эВ}$  [10]). Как известно, форма спектра фотопроводимости вблизи длинноволнового края фотопроводимости определяется спектральной зависимостью спектра оптического поглощения. Таким образом, отличие спектров фотопроводимости обусловлено изменениями в оптическом поглощении гетероструктур с квантовыми точками. Такой эффект может быть вызван возникновением механических напряжений в гетероструктуре Ge/Si. Авторами работы [11] было установлено, что неоднородные упругие деформации, возникающие в гетероструктурах с наличием рассогласования постоянных решетки  $\Delta a$  (в случае Ge и Si  $\Delta a \approx 4.2\%$ ), способны вызывать значительные изменения парамет-



**Рис. 2.** Спектральные зависимости продольной фотопроводимости гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge (кривая 1), структуры с двумерными слоями Ge (кривая 2) и образца *c*-Si (кривая 3) при 290 К.

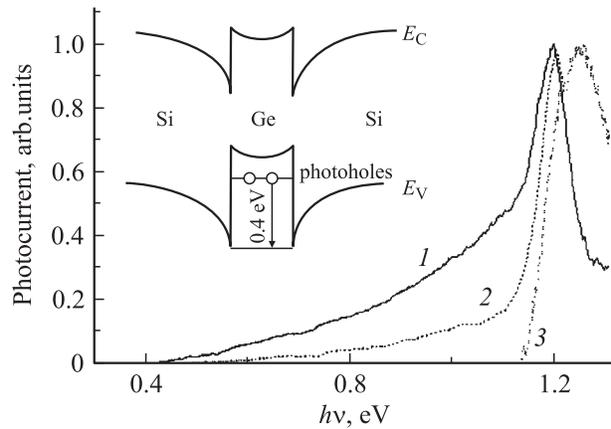
ров зонной структуры, а также оптических свойств, что обуславливает сдвиг энергетического спектра на величину порядка 100 мэВ. Расчеты полей механических напряжений структуры Ge/Si с квантовыми точками Ge показали, что кремниевая матрица вблизи нанокластеров Ge подвергается деформации сжатия. Наиболее напряженный участок находится возле основания квантовой точки, и величина деформации решетки кремния вдоль плоскости структуры уменьшается при отдалении от квантовой точки [12]. В результате энергетическая структура кремниевой матрицы подвергается модуляции в плоскости структуры. Кроме того, как было показано в работе [13], упругое деформирование островковой пленки также существенно влияет на латеральные размеры формирующихся островков Ge. В свою очередь, эффекты размерного квантования в структурах с квантовыми точками определяются размерами нанокластеров и, возможно, упругими напряжениями, возникающими в системе. На основании численного моделирования механических напряжений в рамках классической теории упругости и механики сплошных сред выяснилось, что величина относительной упругой деформации  $\epsilon$  отдельного островка практически не зависит от его высоты и изменяется пропорционально величине  $\sqrt{1/L}$ , где  $L$  — латеральный размер наноостровка.

Поэтому можно считать, что область с минимальной шириной запрещенной зоны соответствует области максимальных механических напряжений и будет находиться вблизи основания квантовой точки. Заметно больший фотоотклик структуры с квантовыми точками в инфракрасной области 1.0–1.11 эВ можно объяснить тем, что сжатые области Si вблизи наноостровка имеют меньшую ширину запрещенной зоны по сравнению с недеформированной Si-матрицей. Неравновесные носители заряда, которые генерируются в сжатых областях Si, и дают вклад в фототок в области 1.0–1.11 эВ.

Зона-зонные переходы в кремниевых структурах с квантовыми точками Ge (размер основания 6 нм, высота 3–4 нм) изучались в работе [14] методом спектроскопии фототока при поперечном направлении приложенного напряжения смещения. Обнаруженная фоточувствительность  $\sim 10$  мА/Вт в области 900–1200 мэВ объяснялась непрямыми экситонными переходами между дырочными состояниями в Ge и электронными состояниями, локализованными в Si.

Можно предположить, что в структурах с квантовыми точками Ge поглощение в области 900–1200 мэВ обусловлено как непрямыми переходами, так и переходами в деформированных эпитаксиальных слоях Si вблизи нанокластеров. Относительный вклад каждого из механизмов поглощения, вероятно, зависит от плотности квантовых точек, их размера и однородности распределения, что требует дополнительного исследования.

При уменьшении температуры до  $T < 120$  К в гетероструктурах с квантовыми точками обнаружена фоточувствительность в инфракрасной области 0.4–1.15 эВ, где



**Рис. 3.** Спектральные зависимости продольной фотопроводимости гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge (кривая 1), структуры с неоднородными 2D слоями Ge (кривая 2) и *c*-Si образца (кривая 3) при  $T = 77$  К. На вставке — зонная диаграмма гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками.

*c*-Si является прозрачным. На рис. 3 приведены спектральные зависимости продольной фотопроводимости структуры с квантовыми точками (кривая 1), структуры с неоднородными 2D слоями Ge (кривая 2) и образца *c*-Si без Ge (кривая 3), измеренные при  $T = 77$  К. Величина приложенного напряжения составляла  $U = 2$  В. Следует отметить, что для образца *c*-Si фотоотклик в области 0.4–1.15 эВ отсутствовал, а для структуры с неоднородными 2D слоями Ge был значительно меньше. Возникновение фототока при освещении квантами с энергиями  $h\nu > 1.15$  эВ обусловлено неравновесными носителями заряда, которые генерируются в Si. Для объяснения природы непрерывного возрастания фотоотклика при увеличении  $h\nu$  в спектральной области 0.4–1.15 эВ гетероструктуры с квантовыми точками следует рассмотреть зонную диаграмму Ge/Si. Обычно считается относить эти структуры ко II типу, в которых потенциальная яма существует только для носителей заряда одного знака. Энергия ионизации основного состояния дырок в квантовой точке по отношению к валентной зоне Si составляет величину порядка 400 мэВ. На вставке к рис. 3 приведена зонная диаграмма структуры вдоль планарного направления, проходящего через нанокластер Ge. Изображенные изгибы зон вблизи гетерограницы обусловлены неоднородной деформацией. В результате вблизи гетерограниц Ge/Si в кремнии возникают потенциальные ямы для электронов.

Фоточувствительность в области 0.4–1.11 эВ можно объяснить переходом дырок из основного состояния, локализованного в квантовой точке, в делокализованные состояния валентной зоны. Для наших структур энергетическое расстояние между основным состоянием и ближайшим делокализованным уровнем составляет 400 мэВ. Для того чтобы неравновесные дырки, появляющиеся в делокализованных состояниях квантовой точки Ge, дали вклад в фототок, они должны достичь

каналов, по которым осуществляется перенос носителей заряда. При измерении продольной фоточувствительности транспорт носителей заряда в основном осуществляется в двумерных Si-каналах, прилежащих к квантовой точке. Не исключена возможность транспорта и в смачивающем слое Ge [5,14–16].

Таким образом, на величину фототока в области 0.4–1.1 эВ должен опосредованно влиять градиент потенциала в кремнии, обусловленный неоднородными деформациями. Как известно, в неоднородно деформированных полупроводниках возникает дрейф неравновесных носителей заряда во внутреннем поле, изменяющий их пространственное распределение [14]. В случае, приведенном на вставке к рис. 3, дрейф неравновесных дырок во внутреннем электрическом поле способствует их переносу в направлении от гетерограницы, что приводит к увеличению фотоотклика. Следовательно, при оптимизации фотоприемников на основе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками следует учитывать влияния неоднородных деформаций, что требует дальнейших исследований.

#### 4. Заключение

В работе изучались спектральные зависимости продольной фотопроводимости гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge при разных температурах. Фотоотклик структур Ge/Si с квантовыми точками в области от 1.0 до 1.09 эВ существенно превышал фототок аналогичного образца *c*-Si без эпитаксиальных слоев. Наблюдаемые особенности спектров продольной фотопроводимости при комнатной температуре объясняются наличием деформаций в структуре, смещающих край спектра оптического поглощения кремниевой матрицы в длинноволновую область. Установлено, что при температурах  $T < 120$  К исследуемые гетероструктуры являются фоточувствительными в спектральном диапазоне от 0.4 до 1.11 эВ, где *c*-Si прозрачен. Наблюдения фототока в этой области объясняются переходами дырок из основного состояния, локализованного в квантовых точках, в делокализованные состояния валентной зоны. Из полученных результатов следует, что энергия ионизации основного состояния дырок в квантовых точках по отношению к валентной зоне Si составляет величину порядка 400 мэВ при 77 К.

#### Список литературы

- [1] A. Carbone, R. Introzzi, H.C. Liu. Appl. Phys. Lett., **82**, 9242 (2003).
- [2] M. Ershov, H.C. Liu, M. Buchanan, Z.R. Wasilewski, V. Ryzhü. Appl. Phys. Lett., **70**, 414 (1997).
- [3] T. Fromherz, P. Kruck, M. Helm, G. Bauer, J.F. Nützel, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **68**, 3611 (1996).
- [4] T. Brunhes, P. Boucaud, S. Sauvage, N. Yam, V. Le Thanh, D. Bouchier. Appl. Phys. Lett., **77**, 3224 (2000).

- [5] C. Meisner, O. Röthig, K. Brunner, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **76**, 1027 (2000).
- [6] S.-W. Lee, K. Hirakawa, Y. Shimada. Appl. Phys. Lett., **75**, 1428 (1999).
- [7] L. Chu, A. Zrenner, G. Börm, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **76**, 1944 (2000).
- [8] Ю.М. Козырев, В.М. Огенько, М.Ю. Рубежанская, О.О. Чуйко. Докл. НАН Украины, **1**, 76 (2002).
- [9] A.A. Dadykin, A.G. Naumovets, Yu.N. Kozyrev, M. Yu. Rubezhanska, P.M. Lytvyn, Yu.M. Litvin. Prog. Surf. Sci., **74**, 305 (2003).
- [10] W.C. Dash, F. Newman. Phys. Rev., **99**, 1151 (1955).
- [11] A.V. Dvurechenskiy, A.I. Jakimov. Semicond. Sci. Technol., **9**, 1143 (2001).
- [12] О.А. Шергай, К.С. Журавлев, В.А. Марков, А.И. Никифоров, О.П. Пчеляков. ФТП, **34** (11), 1363 (2000).
- [13] Л.Г. Гречко, Ю.М. Козырев, Л.Б. Лерман, М.Ю. Рубежанская, О.О. Чуйко. Докл. НАН Украины, **10**, 35 (2005).
- [14] A.I. Yakimov, N.P. Stepina, A.V. Dvurechenskiy, A.I. Nikiforov, A.V. Nenashv. Phys. Rev. B, **63**, 045 312 (2003).
- [15] C. Meisner, K. Brunner, G. Abstreiter. Phys. Status Solidi B **224** (2), 605 (2001).
- [16] O.V. Vakulenko, S.V. Kondratenko. Semicond. Phys., Quant. Optoelectron., **3**, 540 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

#### Lateral photoconductivity of Ge/Si heterostructures with Ge quantum dots

S.V. Kondratenko, A.S. Nikolenko, O.V. Vakulenko, S.L. Golovinskiy, Yu.N. Kozyrev\*, M.Yu. Rubezhanska\*, A.I. Vodyanitsky\*

Kiev National Taras Shevchenko University,  
Physics Department,  
03022 Kiev, Ukraine

\* Institute of Surface Chemistry,  
03164 Kiev, Ukraine

**Abstract** We studied spectral dependencies of the lateral photoconductivity of Ge/Si heterostructures with Ge quantum dots. The photoresponse of Ge/Si structures with Ge quantum dots was found in the range of 1.0–1.1 eV at  $T = 290$  K, while photocurrent of *c*-Si substrates without Ge layers appeared to be greatly attenuated. Such a result can be explained by elastic strain origination in the structure that affects the optical absorption of the silicon material. The studied heterostructures were found to be photosensitive below 120 K in the spectral region from 0.4 to 1.1 eV, where *c*-Si is transparent. The photocurrent in this region is likely to be due to hole transitions from the ground state localized in the quantum dots to the delocalized states of the valence band.