

# Исследование локальной плотности состояний в самоформирующихся островках GeSi/Si(001) методом комбинированной сканирующей туннельной/атомно-силовой микроскопии

© П.А. Бородин, А.А. Бухараев, Д.О. Филатов\*<sup>¶</sup>, М.А. Исаков\*,  
В.Г. Шенгуров\*, В.Ю. Чалков\*, С.А. Денисов\*

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук, 420029 Казань, Россия

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

(Получена 14 июля 2010 г. Принята к печати 26 июля 2010 г.)

Методом комбинированной сканирующей туннельной/атомно-силовой микроскопии впервые исследована локальная плотность состояний в самоформирующихся наноструктурах GeSi/Si(001). Получены токовые изображения и туннельные спектры индивидуальных островков GeSi/Si(001), отражающие соответственно пространственное и энергетическое распределение локальной плотности состояний в островках GeSi. Данные туннельной спектроскопии показывают, что поверхностные островки Ge<sub>0,3</sub>Si<sub>0,7</sub>/Si(001) проявляют свойства гетероструктур I типа.

## 1. Введение

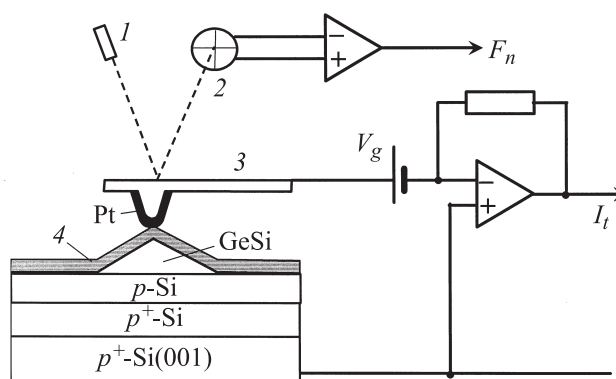
Сканирующая туннельная микроскопия/спектроскопия (СТМ/СТС) широко применяется для исследования морфологии и атомной структуры поверхности полупроводниковых наноструктур с начала 1990-х гг. В последние годы СТМ/СТС в сверхвысоком вакууме (СВВ) все шире используется для исследования пространственного распределения локальной плотности состояний (ЛПС) в квантово-размерных полупроводниковых гетероструктурах. Так, в [1] методом СТМ на поперечных сколах (X-СТМ) в СВВ исследовано пространственное распределение ЛПС в поперечном сечении квантовых точек (КТ) InAs/GaAs(001). В [2] методом X-СТМ в СВВ исследованы поперечные профили ЛПС в квантовых ямах (КЯ) GaSb/InAs(001). В [3] методом СТМ в СВВ исследовано планарное распределение ЛПС в поверхностных КТ InAs/GaAs(001) *in situ* при выращивании методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

В [4,5] для исследования ЛПС в самоформирующихся КТ InAs/GaAs(001) и квантовых кольцах InGaAs/GaAs(001), выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) при атмосферном давлении, был применен метод комбинированной сканирующей туннельной/атомно-силовой микроскопии (СТМ/АСМ) [6] в СВВ. Применение указанного метода позволило визуализировать пространственное распределение ЛПС размерно-квантованных электронных и дырочных состояний, а также измерить энергетический спектр размерного квантования в КТ и квантовых кольцах *ex situ* после выращивания, в силу чего поверхность исследуемых образцов была покрыта слоем естественного окисла, сформировавшегося в процессе переноса образцов из ростовой установки в сверхвысоковакуумную СТМ-камеру.

В настоящей работе методом комбинированной СТМ/АСМ впервые исследована ЛПС в самоформирующихся островках GeSi/Si(001). Были получены токовые изображения и туннельные спектры индивидуальных островков, отражающие соответственно пространственное и энергетическое распределение ЛПС в островках.

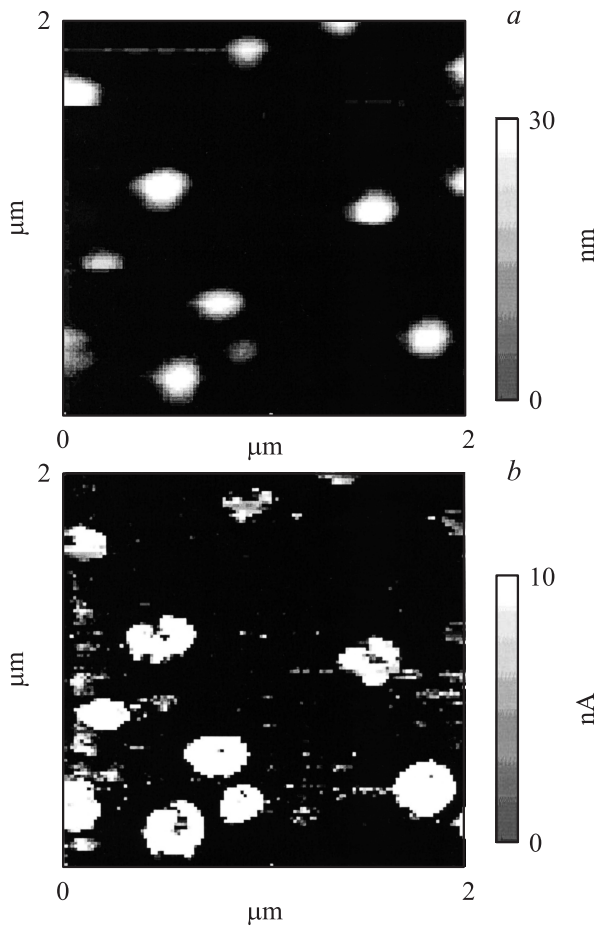
## 2. Методика эксперимента

Гетероструктуры GeSi/Si(001) с самоформирующимися островками для исследования электронной струк-



**Рис. 1.** Схема исследования электронных свойств самоформирующихся островков GeSi/Si(001) методом комбинированной СТМ/АСМ. 1 — юстировочный лазер; 2 — 4-секционный фотодетектор; 3 — кантилевер; 4 — естественный окисел.  $F_n$  — измеряемая сила,  $I_t$  — измеряемый ток.

<sup>¶</sup> E-mail: dmitry\_filatov@inbox.ru



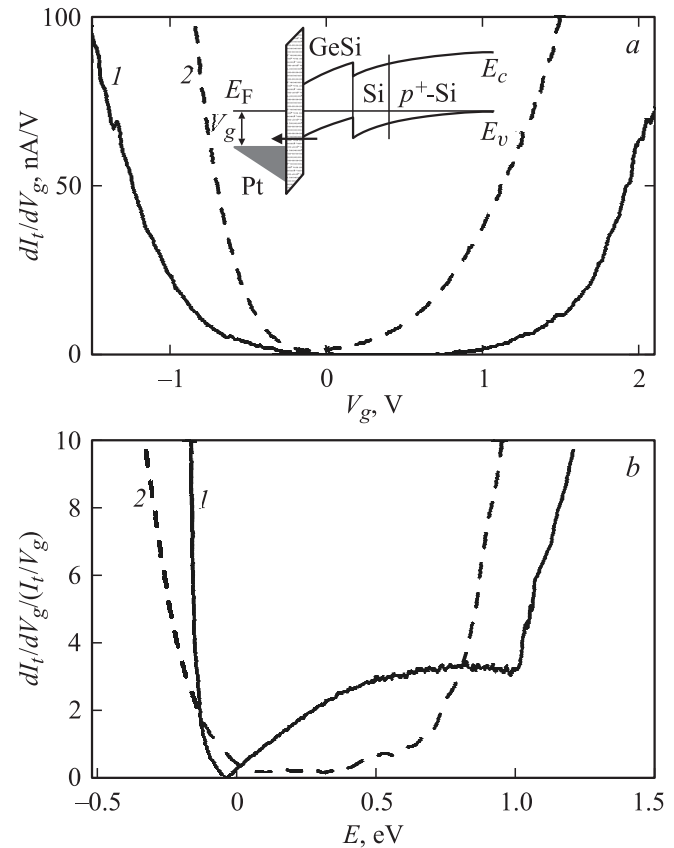
**Рис. 2.** Топографическое (а) и токовое (б) изображения поверхности гетероструктуры с самоформирующимися островками GeSi/Si(001).  $V_g \approx 2.0$  В.

туры островков методом комбинированной СТМ/АСМ *ex situ* были выращены методом сублимационной МЛЭ (СМЛЭ) в среде GeH<sub>4</sub> [7]. Схематическое изображение образца приведено на рис. 1. На подложке p<sup>+</sup>-Si(001) с удельным сопротивлением  $\sim 0.005$  Ом·см выращивался буферный слой p<sup>+</sup>-Si с концентрацией акцепторов  $N_A \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, толщиной  $\sim 200$  нм. На него осаждался спейсер p-Si ( $N_A \sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) толщиной  $\sim 3$  нм. Затем в ростовую камеру напускался GeH<sub>4</sub> с парциальным давлением  $p_g \approx 9 \cdot 10^{-4}$  Торр и на поверхность спейсерного слоя при температуре подложки  $T_g \approx 700^\circ\text{C}$  осаждался слой Ge номинальной толщиной  $d_{\text{Ge}} \approx 10.3$  монослоев (ML). Толщина слоя Ge определялась методом обратного резерфордского рассеяния (ОРР) на серии образцов-спутников.<sup>1</sup> Среднее значение атомной доли Ge  $x$  в материале островков Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>, по данным спектроскопии фотолюминесценции [8] и комбинационного рассеяния света [9] на образце-спутнике с островками GeSi, выращенными в тех же условиях на

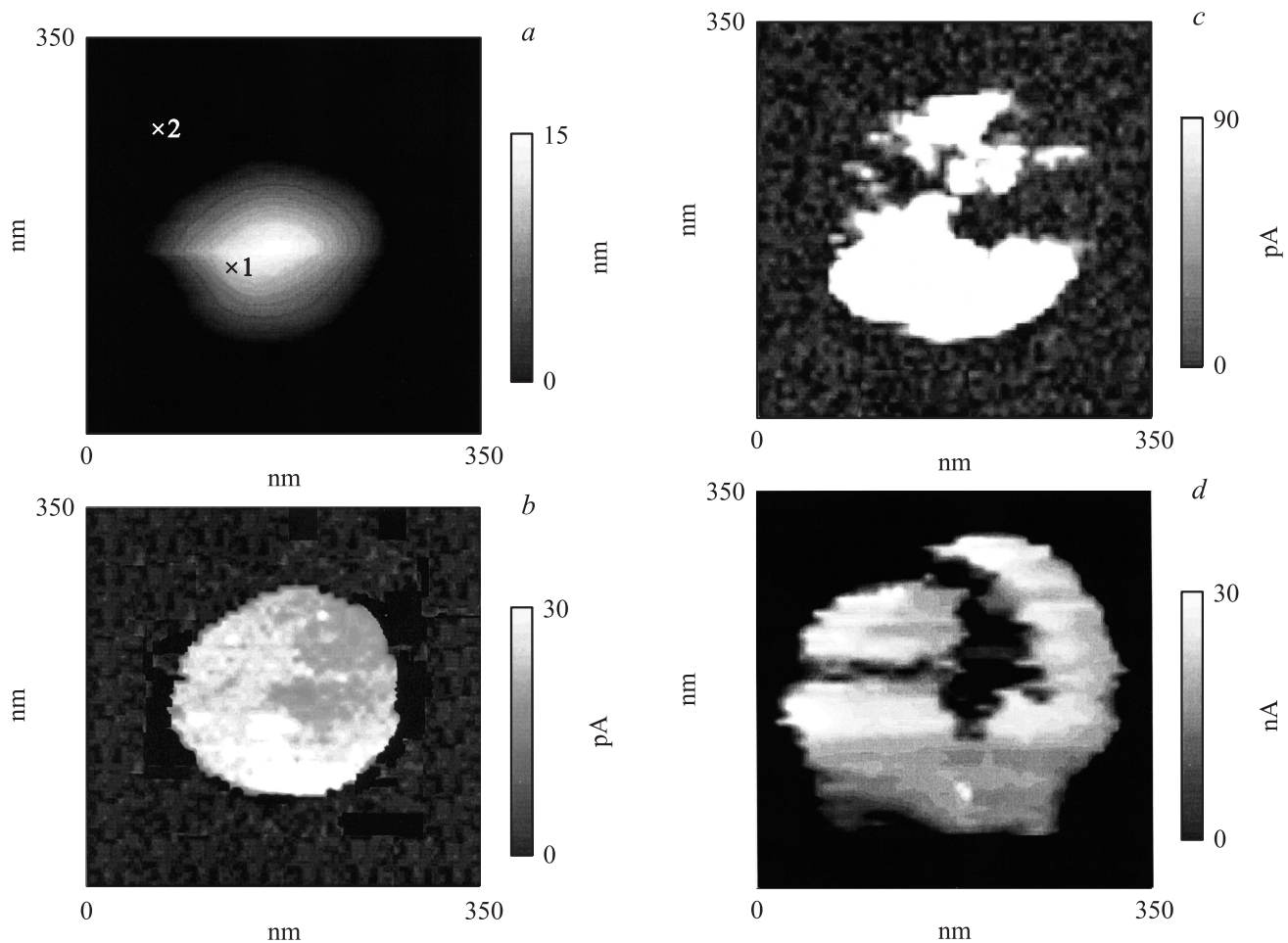
<sup>1</sup> Измерения спектров ОРР были выполнены П.С. Черных в Научно-исследовательском институте ядерной физики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

буферном слое p-Si и зарощёнными покровным слоем Si, составляло  $\sim 0.3$ .

Исследования электронной структуры островков GeSi/Si(001) методом комбинированной СТМ/АСМ проводились с использованием сверхвысоковакуумного комплекса Omicron Multiprobe P при 300 К. Схема эксперимента показана на рис. 1. Поверхность образца, покрытая естественным окислом, сканировалась проводящим АСМ-зондом из Si с Pt-покрытием в контактном режиме. Между АСМ-зондом и проводящей p<sup>+</sup>-Si-подложкой прикладывалась разность потенциалов  $V_g$ . Одновременно с регистрацией топографии поверхности образца  $z(x, y)$ , где  $x$  и  $y$  — координаты острия АСМ-зонда в плоскости поверхности образца,  $z$  — высота расположения зонда, регистрировалось пространственное распределение силы электрического тока через АСМ-зонд в плоскости поверхности образца  $I_t(x, y)$ . В другом режиме измерения в каждой точке кадра регистрировались вольт-амперные характеристики (ВАХ) контакта АСМ-зонда к поверхности образца  $I_t(V_g)$ .



**Рис. 3.** Дифференциальные туннельные спектры  $dI_t/dV_g$  (а) и нормированные дифференциальные туннельные спектры  $dI_t/dV_g/(I_t/V_g)$  (б) контакта АСМ-зонда с Pt-покрытием к поверхности смачивающего слоя (1) и поверхности островка GeSi (2). Точки 1, 2 измерения исходных ВАХ на поверхности образца показаны на рис. 4, а. а: на вставке — зонная диаграмма контакта АСМ-зонда к поверхности островка GeSi/p-Si/p<sup>+</sup>-Si при  $V_g > 0$  (качественно);  $E_F$  — уровень Ферми,  $E_c$  и  $E_v$  — края зоны проводимости и валентной зоны соответственно.



**Рис. 4.** Топографическое (*a*) и токовые (*b–d*) изображения индивидуального островка GeSi/Si(001).  $V_g, V$ : *b* — 0.1, *c* — 0.5, *d* — 1.0. *a*: 1,2 — точки измерения туннельных спектров, представленных на рис. 3.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* и *b* приведены соответственно топографическое и токовое изображения поверхности гетероструктуры GeSi/Si(001):  $z(x, y)$  и  $I_t(x, y)$ . На топографическом изображении (рис. 2, *a*) наблюдаются островки GeSi различных размеров и формы. Островки меньших размеров имеют куполообразную форму (так называемые *dome*-островки), тогда как островки ббльших размеров (так называемые *super-dome*-островки) имеют форму пирамид, огранных плоскостями (101), с усеченной вершиной [10].

На токовом изображении поверхности (рис. 2, *b*) наблюдаются области увеличения тока через АСМ-зонд  $I_t$ , положение которых соответствует положению островков GeSi. Увеличение  $I_t$  связано с туннелированием электронов из заполненных состояний в валентной зоне материала островков GeSi в незаполненные состояния над уровнем Ферми ( $E_F$ ) в материале покрытия АСМ-зонда (Pt) через слой естественного окисла на поверхности островков (зонная диаграмма контакта АСМ-зонда с Pt-покрытием к поверхности островка GeSi/*p*-Si/ $p^+$ -Si

при положительном смещении на зонде относительно образца  $V_g$  приведена на вставке к рис. 3, *a*).

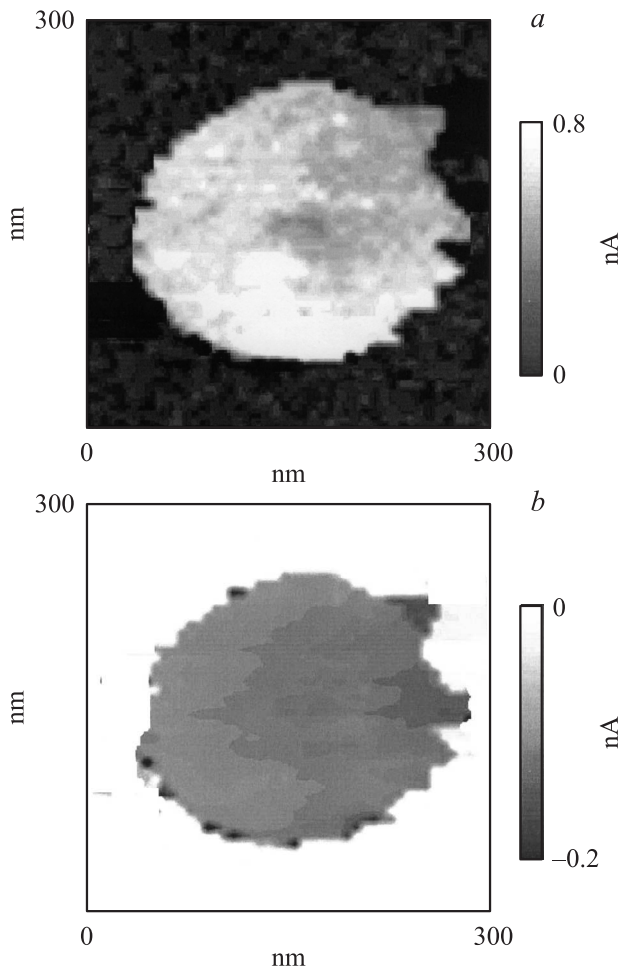
Следует отметить, что размер токовых изображений островков увеличен по сравнению с АСМ-изображениями, что связано с эффектом искажения вследствие конечного радиуса кривизны острия АСМ-зонда  $R_p$  [11]. Типичные значения  $R_p$  для АСМ-зондов марки CSG-01 с Pt-покрытием производства компании NT-MDT (Зеленоград, Россия) составляют  $\sim 50$  нм (согласно паспорту АСМ-зондов).

На рис. 3, *a* и *b* приведены соответственно дифференциальные туннельные спектры  $dI_t/dV_g$  и нормированные дифференциальные туннельные спектры  $dI_t/dV_g/(I_t/V_g)$  контакта АСМ-зонда с Pt-покрытием к поверхности островка GeSi и к поверхности структуры между островками. Дифференциальные туннельные спектры были получены из экспериментально измеренных ВАХ  $I_t(V_g)$  (точки 1,2 измерения ВАХ показаны на рис. 4, *a*) путем численного дифференцирования с последующим нелинейным сглаживанием. Значения энергетического положения уровня Ферми в материале покрытия зонда относительно края зоны проводимости на границе поверхности исследуемой структуры с естественным

окислом  $E = E_c - E_{\text{FPI}}$  (см. зонную диаграмму на вставке рис. 3, *a*) как функция  $V_g$  рассчитывались с учетом падения части  $V_g$  на области пространственного заряда (ОПЗ) контакта АСМ-зонда к поверхности гетероструктуры. Для учета указанного эффекта решалось одномерное уравнение Пуассона [12].

В отличие от туннельных спектров КТ InAs/GaAs(001) [4] и квантовых колец InGaAs/GaAs(001) [5] в туннельных спектрах островков GeSi/Si(001) с латеральными размерами  $D > 100$  нм и высотой  $h > 20$  нм не наблюдается участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Это свидетельствует о том, что эффект размерного квантования не оказывает существенного влияния на энергетический спектр ЛПС в островках GeSi/Si(001) указанных размеров. Данный вывод подтверждается также результатами расчетов энергетического спектра электронных состояний в валентной зоне самоформирующихся островков GeSi/Si(001) по модели [13].

На рис. 4 приведены АСМ-изображение и серия токовых изображений индивидуального островка GeSi/Si(001), измеренных при различных значениях  $V_g$ .



**Рис. 5.** Токовые изображения индивидуального островка GeSi/Si(001) при малых положительных и отрицательных значениях  $V_g$ . *a* — 0.1, *b* — -0.1.

АСМ-изображение островка на рис. 4, *a* вытянуто в горизонтальном направлении, что связано с эффектом усталости пьезоэлектрического сканера атомно-силового микроскопа.

Общий вид токовых изображений зависит от  $V_g$ . При малых положительных значениях  $V_g$ , соответствующих экстракции электронов из состояний вблизи потолка валентной зоны в GeSi (см. зонную диаграмму на рис. 3, *a*), токовое изображение имеет округлую форму (рис. 4, *b*). С увеличением  $V_g$  симметрия токового изображения меняется и становится подобной  $C_{2v}$  (рис. 4, *c*), а при дальнейшем увеличении  $V_g$  — подобной  $C_{4v}$  (рис. 4, *d*). Последнее может быть обусловлено смещением потолка валентной зоны в GeSi вследствие частичной релаксации упругих напряжений на ребрах пирамидального островка.

На рис. 5 приведены токовые изображения индивидуального островка GeSi/Si(001), полученные при малых положительных и отрицательных значениях  $V_g$ . Следует отметить, что контраст на токовых изображениях сменяется на инвертированный вместе со сменой полярности приложенного напряжения  $V_g$ . Таким образом, поверхностный островок  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  с  $x \approx 0.3$  проявляет свойства гетероструктуры I типа. Такой же вывод следует из вида спектров ЛПС, представленных на рис. 3, *b*.

Традиционно считается, что псевдоморфные гетероструктуры  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  относятся к II типу [14,15]. Однако в ряде теоретических [16,17] и экспериментальных [18,19] работ сообщалось, что при достаточно малых значениях  $x$  псевдоморфные слои  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  являются гетероструктурами I типа. В [20] с использованием  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ -метода в 30-зонной модели были проведены детальные расчеты зонной структуры псевдоморфных слоев и наноструктур куполообразной формы  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ . Для однородных слоев было найдено, что минимум зоны проводимости в GeSi образован долинами  $\Delta_4$ , которые при  $x < 0.7$  лежат ниже по энергии, чем долины  $\Delta_4$  в слоях Si, т.е. при  $x < 0.7$  напряженные слои  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  являются гетероструктурами I типа. Максимальное положительное значение разрыва зоны проводимости на границе GeSi/Si  $\Delta E_c$  было найдено при  $x \approx 0.4$  ( $\sim 30$  мэВ). Однако для куполообразных островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  в [20] было найдено, что вследствие неоднородной упругой деформации окружающей островок матрицы Si долина  $\Delta_2$  в окружающем островки материале вблизи вершины и дна островка лежит ниже, чем долина  $\Delta_4$  в материале островка при любых  $0 < x < 1$ . Однако и в этом случае абсолютная величина  $\Delta E_c$  не превышает нескольких мэВ. Возможно, что полученный в настоящей работе качественный характер спектра ЛПС в поверхностном островке  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}/\text{Si}(001)$  связан с частичной релаксацией упругих напряжений на ребрах и вершине островка.

## 4. Заключение

В настоящей работе методом комбинированной STM/АСМ впервые исследованы пространственное и



энергетическое распределения ЛПС в самоформирующихся островках GeSi/Si(001). Общий вид и симметрия токовых изображений островков в режиме экстракции электронов из заполненных состояний валентной зоны в GeSi в незаполненные состояния материала покрытия АСМ-зонда (Pt) зависят от напряжения между зондом и подложкой. Обнаруженный эффект может быть связан с частичной релаксацией упругих напряжений материала островков на их ребрах и вершинах. Результаты туннельной спектроскопии индивидуальных островков свидетельствуют, что поверхностные островки  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  с  $x \approx 0.3$ , полученные методом СМЛЭ в среде  $\text{GeH}_4$ , проявляют свойства гетероструктур I типа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-02-90738-моб\_ст) и Федерального агентства по образованию РФ (РНП 2.1.1.3615). Авторы благодарят П.С. Черных за измерения спектров ОНР.

## Список литературы

- [1] B. Grandier, Y.M. Niquet, B. Lagrand, J.P. Nys, C. Priester, D. Stiévenard, J.M. Gérard, V. Thierry-Mieg. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 1068 (2000).
- [2] K. Suzuki, K. Kanisawa, C. Janes, S. Perraud, K. Takashina, T. Fujisawa, Y. Hirayama. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 6802 (2007).
- [3] T. Maltezopoulos, A. Bolz, C. Meyer, C. Heyn, W. Hansen, M. Morgenstern, R. Wiesendanger. *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 6804 (2003).
- [4] П.А. Бородин, А.А. Бухараев, Д.О. Филатов, Д.А. Воронцов, М.А. Лапшина. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 9, 71 (2009).
- [5] Д.О. Филатов, П.А. Бородин, А.А. Бухараев. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, в печати (2010).
- [6] A. Olbrich, V. Ebersberger, C. Voit. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3114 (1998).
- [7] С.П. Светлов, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, З.Ф. Красильник, Б.А. Андреев, Ю.Н. Дроздов. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **65**, 204 (2001).
- [8] Д.О. Филатов, М.В. Круглова, М.А. Исаков, С.В. Сипрова, М.О. Марычев, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов. *ФТП*, **42**, 1116 (2008).
- [9] А.И. Машин, А.В. Нежданов, Д.О. Филатов, М.А. Исаков, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов. *ФТП*, **44**, 6272 (2010).
- [10] T.I. Kamins, G. Medeiros-Ribeiro, D.A.A. Ohlberg, R. Stanley Williams. *J. Appl. Phys.*, **85**, 1159 (1999).
- [11] А.А. Бухараев, Н.В. Бердунов, Д.В. Овчинников, К.М. Салихов. *Микроэлектроника*, **26**, 163 (1997).
- [12] R.M. Feenstra, J.A. Stroscio. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **5**, 923 (1987).
- [13] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин. *ФТП*, **31**, 171 (1997).
- [14] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. *ФТП*, **34**, 1281 (2000).
- [15] Y. Shiraki, A. Sakai. *Surf. Sci. R*, **59**, 153 (2005).
- [16] R. People, J.C. Bean. *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 538 (1986).
- [17] L. Colombo, R. Resta, S. Baroni. *Phys. Rev. B*, **44**, 5572 (1991).
- [18] S. Fukatsu, Y. Shiraki. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 2378 (1993).
- [19] D.C. Houghton, G.C. Aers, S.-R. Eric Yang, E. Wang, N.L. Rowell. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 866 (1995).
- [20] M. El Kurdi, S. Sauvage, G. Fishman, P. Boucaud. *Phys. Rev. B*, **73**, 195327 (2006).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## Investigation of the local density of states in the self-assembled GeSi/Si(001) nanoislands by tunnelling atomic force microscopy

*P.A. Borodin, A.A. Bukharaev, D.O. Filatov\*, M.A. Isakov\*, V.G. Shengurov\*, V.Yu. Chalkov\*, Yu.A. Denisov\**

E.K. Zavoisky Kazan' Physical-Technical Institute, Kazan' Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 420029 Kazan', Russia

\* Research Institute for Physics and Technology, N.I. Lobachevsky University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** We report on the first-time investigation of the local density of states in self-assembled GeSi/Si(001) nanoislands by tunnelling atomic force microscopy. The current images and the tunnel spectra of the individual GeSi/Si(001) islands have been obtained, which are correlated to the spatial and energy distributions, respectively, of the local density of states in the GeSi islands. The tunnel spectroscopy revealed the surface  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}/\text{Si}(001)$  islands to behave as heterostructures of the I type.