

# Конфокальная рамановская микроскопия самоформирующихся островков GeSi/Si(001)

© А.И. Машин, А.В. Нежданов, Д.О. Филатов<sup>†¶</sup>, М.А. Исаков<sup>†</sup>, В.Г. Шенгуров<sup>†</sup>,  
В.Ю. Чалков<sup>†</sup>, С.А. Денисов<sup>†</sup>

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>†</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт

Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 12 апреля 2010 г.)

Метод конфокальной рамановской микроскопии впервые применен для исследования пространственного распределения элементного состава и упругих напряжений в самоформирующихся островках  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде  $\text{GeH}_4$ . В спектрах комбинационного рассеяния света, измеренных в области размером  $< 100$  нм на поверхности образца, идентифицированы линии, связанные с колебательными модами Si–Si, Ge–Ge и Si–Ge. Полученные карты распределения сдвигов указанных линий по поверхности образца были пересчитаны в карты распределения атомной доли Ge  $x$  и упругой деформации  $\epsilon$ , усредненных по толщине слоя островков. Изучена зависимость  $x$  и  $\epsilon$  от температуры роста и номинальной толщины осажденного слоя Ge.

## 1. Введение

Гетероструктуры (ГС) с самоформирующимися наноструктурами  $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$  являлись в последние 15 лет объектами интенсивных исследований в связи с потенциальными возможностями создания на их основе различных приборов кремниевой оптоэлектроники [1]. Известно, что наноструктуры, полученные осаждением Ge на  $\text{Si}(001)$  в определенных условиях, состоят не из чистого Ge, а из твердого раствора  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  вследствие диффузии Si из подложки в материал островков в процессе роста [2,3]. Для определения состава самоформирующихся наноструктур  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  и исследования его зависимости от условий роста применялись различные методы, в том числе двухкристалльная рентгеновская дифрактометрия и спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) [4–6]. Общим недостатком этих методов является их нелокальность, т.е. определенные этими методами характеристики островков являются усредненными по площади, равной площади пучка тестирующего излучения. В [7,8] для исследования состава индивидуальных островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  был применен метод растровой оже-микроскопии (РОМ).

В настоящей работе для исследования пространственного распределения концентрации Ge и упругих напряжений в ГС с самоформирующимися островками  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  впервые применен метод конфокальной рамановской микроскопии (КРМ). Объектами исследования являлись ГС с самоформирующимися островками  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенные методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) в среде  $\text{GeH}_4$  [9]. В этом методе слои Si осаждаются из сублимационного источника, а для осаждения Ge в ростовую камеру напускается  $\text{GeH}_4$ , который разлагается на по-

верхности нагретой подложки. Цель настоящей работы заключалась в изучении зависимости состава и упругонапряженного состояния индивидуальных островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенных методом СМЛЭ в среде  $\text{GeH}_4$ , от условий роста.

## 2. Методика эксперимента

Исследуемые ГС с самоформирующимися островками  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  были выращены методом СМЛЭ в среде  $\text{GeH}_4$  при температурах подложки  $T_g = 700$  и  $800^\circ\text{C}$  и парциальном давлении  $\text{GeH}_4$  в ростовой камере  $p_g = 9 \cdot 10^{-4}$  Торр. Ранее в работах [10,11] методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовалась зависимость морфологических параметров массивов самоформирующихся островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенных методом СМЛЭ в среде  $\text{GeH}_4$  (поверхностная плотность островков  $N_s$ , высота  $h$ , латеральные размеры  $D$ ), от условий роста ( $T_g$ ,  $p_g$ , время напуска  $\text{GeH}_4$  в ростовую камеру  $t_g$ ). Было установлено, что массивы островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенных методом СМЛЭ в среде  $\text{GeH}_4$  при  $T_g = 700–800^\circ\text{C}$ , отличаются достаточно малыми значениями  $N_s$  ( $N_s \sim 10^8 \text{ см}^{-2}$ ), что благоприятствует получению конфокальных микроскопических (КМ) изображений отдельных островков. Базовое давление остаточных газов в ростовой камере составляло  $\sim 10^{-8}$  Торр. Источником Si служил стержень из монокристаллического  $p$ -Si с удельным сопротивлением  $\sim 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Подложка и источник нагревались пропусканием через них постоянного электрического тока. Перед осаждением буферного слоя Si подложка отжигалась в течение 10 мин при  $\sim 1200^\circ\text{C}$ . Осаждение буферного слоя Si толщиной  $d_b \approx 400$  нм производилось при температуре подложки  $\sim 1000^\circ\text{C}$ , затем сублимационный источник Si отключался и в ростовую камеру

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

напускался GeH<sub>4</sub>. Перед этим температура подложки уменьшалась до значений, равных  $T_g$  ( $\sim 700$  и  $800^\circ\text{C}$ ). Значение номинальной толщины осажденного слоя Ge  $d_{\text{Ge}}$  определялось (при фиксированных значениях  $p_g$  и  $T_g$ ) временем  $t_g$ , которое варьировалось в пределах 0.25–5.0 мин. После окончания процесса осаждения Ge напуск GeH<sub>4</sub> в ростовую камеру прекращался, GeH<sub>4</sub> откачивался из ростовой камеры, сублимационный источник Si включался вновь и сформировавшиеся (по механизму Странски–Крастанова) островки Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si(001) зарастивались покровным слоем специально не легированного  $p$ -Si толщиной  $d_c \approx 40$  нм при температуре  $\sim 600^\circ\text{C}$ . Связь между значениями  $t_g$  и  $d_{\text{Ge}}$  (при заданных  $T_g$  и  $p_g$ ) определялась на серии калибровочных образцов, в которых островки Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub> выращивались в тех же условиях (т.е. при тех же значениях  $p_g$ ,  $T_g$  и  $t_g$ ), но без осаждения покровного слоя Si, методом обратного резерфордовского рассеяния (ОРР).<sup>1</sup> Эти же образцы использовались для исследований морфологии поверхности незарастенных островков, результаты которых приведены в [10,11]. Исследования в цитированных работах проводились с помощью атомно-силового микроскопа Solver Pro<sup>TM</sup> производства компании NT-MDT® (Зеленоград, Россия) в контактной моде. Использовались кремниевые АСМ-зоны NT-MDT® NSG-01<sup>TM</sup> с радиусом закругления острия  $R_p < 10$  нм (согласно паспортным данным). Там же приведены результаты спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) ГС с зарастенными островками. Исследования методом КРМ, описанные в настоящей работе, проводились на тех же образцах, что и исследования спектров ФЛ в [10,11], при помощи микро/спектроскопического комплекса Integra Spectra<sup>TM</sup> производства компании NT-MDT® в конфигурации на отражение при 300 К и возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны излучения  $\lambda \approx 473$  нм. В каждой точке скана размером  $10 \times 10$  мкм с разрешением  $128 \times 128$  точек, помимо интенсивности упругого (рэлеевского) рассеяния возбуждающего света, измерялся спектр КРС в диапазоне  $200\text{--}600\text{ см}^{-1}$ , содержащем линии колебательных мод связей Ge–Ge, Si–Ge и Si–Si.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1, В приведены КМ-изображения ГС с островками Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si(001), зарастенными покровным слоем Si. На них наблюдаются особенности с размерами от 100 до 800 нм, идентифицированные как островки Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si(001). На рис. 1, А приведены АСМ-изображения ГС с поверхностными островками Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si(001), выращенными в тех же условиях осаждения Ge ( $T_g$ ,  $p_g$  и  $t_g$ ) [10,11]. На поверхности ГС

наблюдаются островки двух различных форм. Наряду с когерентными куполообразными островками, имеющими латеральные размеры  $D = 100\text{--}150$  нм и высоту  $h = 20\text{--}30$  нм, ограниченными плоскостями (105) и (113), на поверхности наблюдаются также релаксированные островки с  $D = 150\text{--}400$  нм и  $h = 60\text{--}150$  нм, ограниченные плоскостями (101) (так называемые „super-dome“-островки [12]). С увеличением  $t_g$  (и соответственно  $d_{\text{Ge}}$ ) размеры и плотность последних растут, они начинают сливаться между собой (рис. 1, V-A), в связи с чем плохо разрешаются на КМ-изображениях (рис. 1, V-B).

На рис. 1, а, II-A приведено АСМ-изображение поверхности образца с островками Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si(001), выращенными при  $T_g \approx 700^\circ\text{C}$  и  $t_g \approx 2$  мин (соответствующее значение  $d_{\text{Ge}} \approx 10.5$  монослоев (ML), согласно данным ОРР). На поверхности образца наряду с когерентными куполообразными островками наблюдается некоторое количество „super-dome“-островков. Последние выделяются на изображении на рис. 1, а, II-B, тогда как более мелкие куполообразные островки практически не заметны на их фоне.

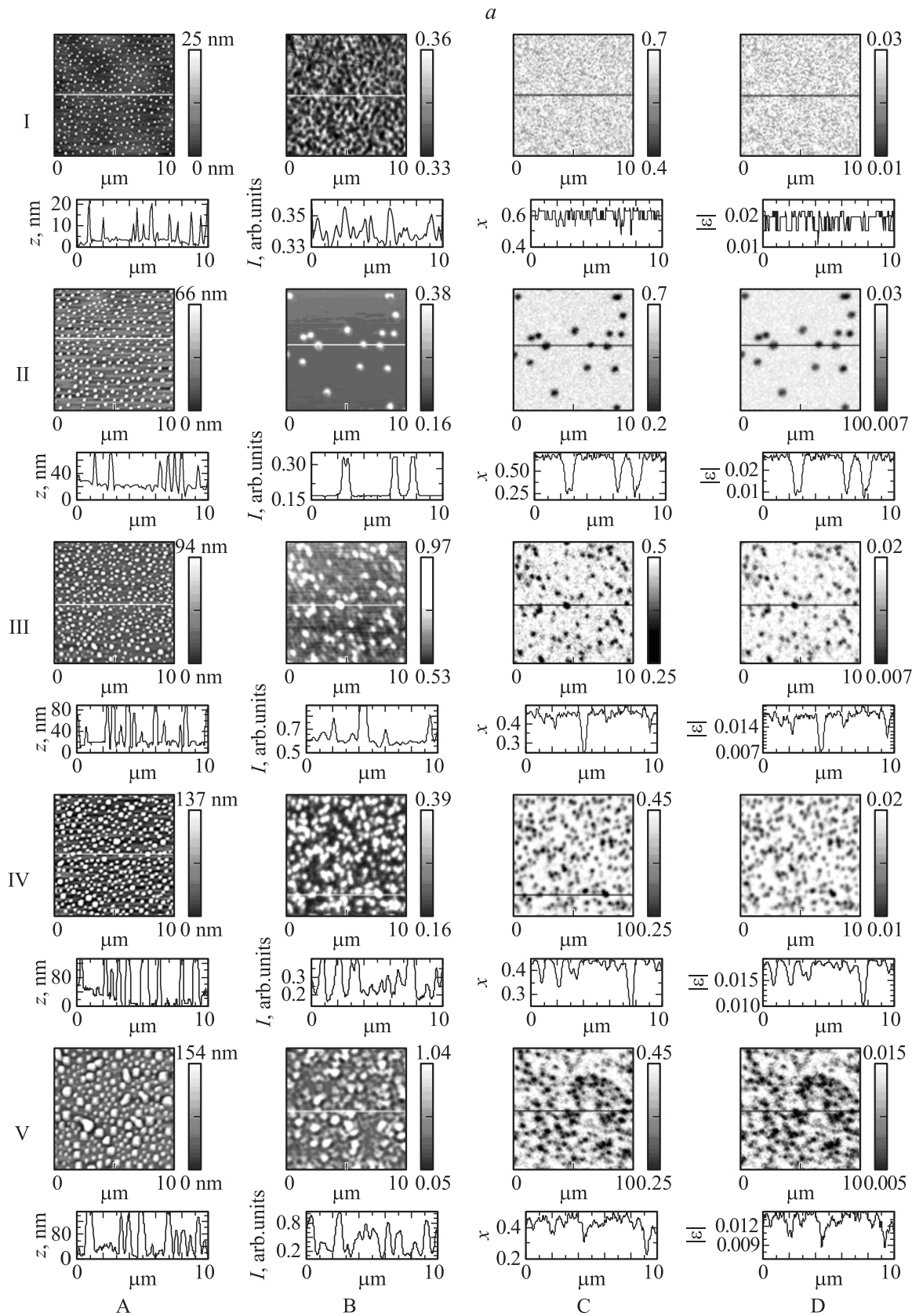
Сравнение КМ-изображений ГС Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si(001) на рис. 1, В с соответствующими АСМ-изображениями на рис. 1, А показывает, что значения  $N_s$  на соответствующих изображениях в большинстве случаев приблизительно одинаковы, тогда как КМ-изображения островков с  $D \sim 100$  нм выглядят более размытыми, при этом изображения соседних островков сливаются между собой, что связано с меньшим пространственным разрешением КМ по сравнению с АСМ. Теория КМ [13] гласит, что минимальное расстояние между точками на поверхности объекта, разрешаемыми согласно критерию Рэлея, есть

$$r \approx 0.44 \frac{\lambda}{n N_A}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $N_A$  — числовая апертура используемого объектива,  $n$  — показатель преломления среды. Для  $N_A = 0.95$ ,  $n = 3.5$  (Si)  $r \approx 56$  нм. Данная оценка справедлива, если толщина покровного слоя  $d_c \geq \lambda/n \approx 135$  нм. В исследованных структурах с  $d_c \approx 40$  нм данное условие не выполняется. Оценка максимального латерального пространственного разрешения, достигнутого в настоящей работе, сделанная исходя из минимальных размеров наблюдаемых КМ-изображений островков Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si(001), дает величину  $< 100$  нм.

На рис. 2 приведены локальные спектры КРС образцов с самоформирующимися островками Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si(001), выращенными при различных значениях  $T_g$  и  $t_g$ . Спектры I–6 были измерены на вершинах островков Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>, тогда как спектры I'–6' измерены в промежутках между островками. В локальных спектрах КРС наблюдаются более или менее хорошо выраженные пики с максимумами вблизи  $300$ ,  $400$ ,  $500$  и  $520\text{ см}^{-1}$ , соответствующие рассеянию на колебательных модах связей Ge–Ge, Si–Ge и Si–Si в упругонапряженном материале островков Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub> или в смачивающем слое (в зависимости от точки измерения спектра) и связей

<sup>1</sup> Измерения ОРР проведены в Научно-исследовательском институте ядерной физики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.



**Рис. 1.** АСМ-(А) и конфокальные микроскопические (В) изображения и профили ( $z$ -вертикальная координата,  $I$  — интенсивность) поверхности гетероструктур с самоформирующимися островками  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенных в различных условиях; карты пространственного распределения и профили атомной доли Ge  $x$  (С) и модуля относительной деформации  $|\varepsilon|$  (D) в материале островков по поверхности структур.  $T_g$ , °C:  $a$  — 700,  $b$  — 800;  $t_g$ , мин: I — 0.5, II — 1.0, III — 2.0, IV — 4.0, V — 5.0.

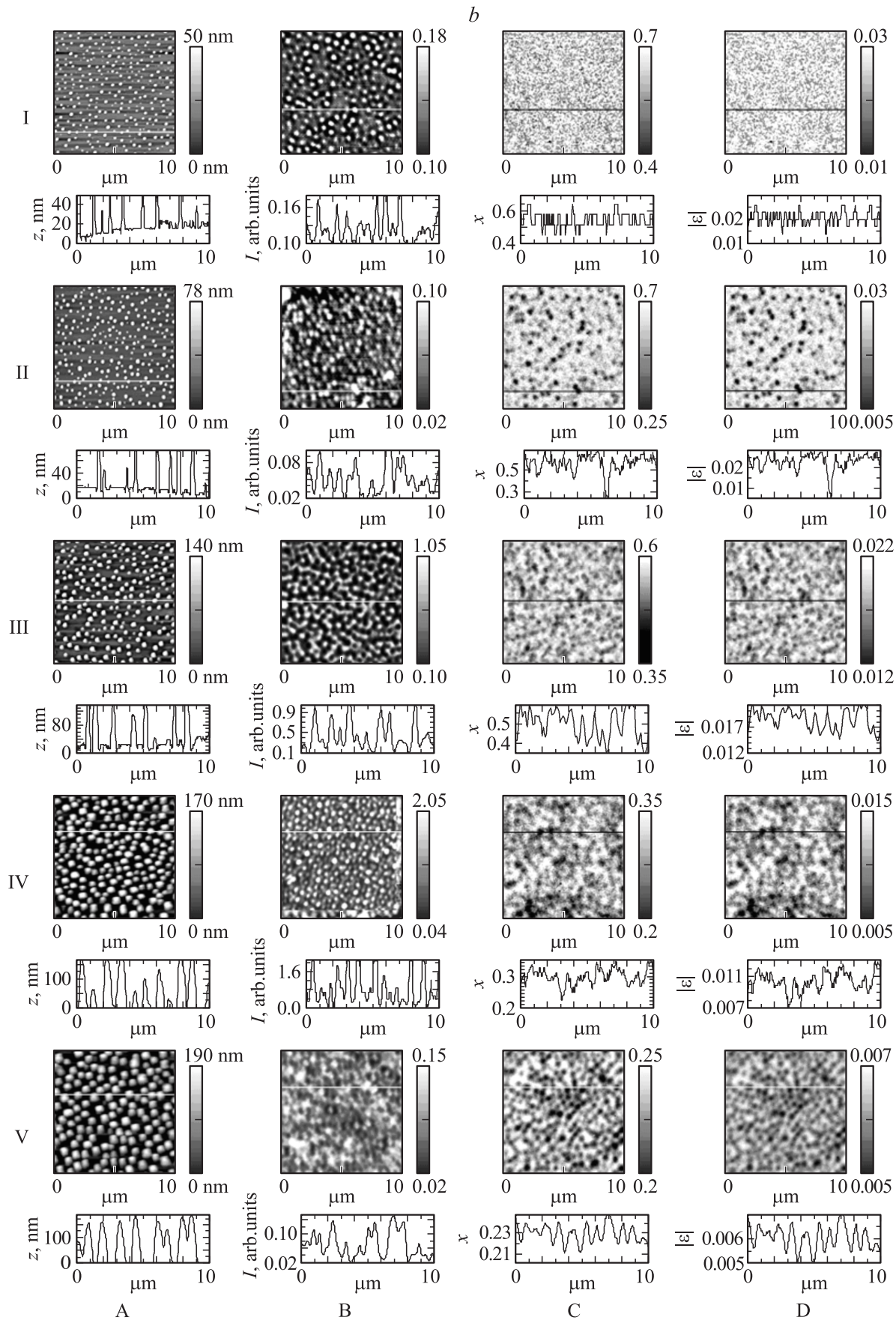
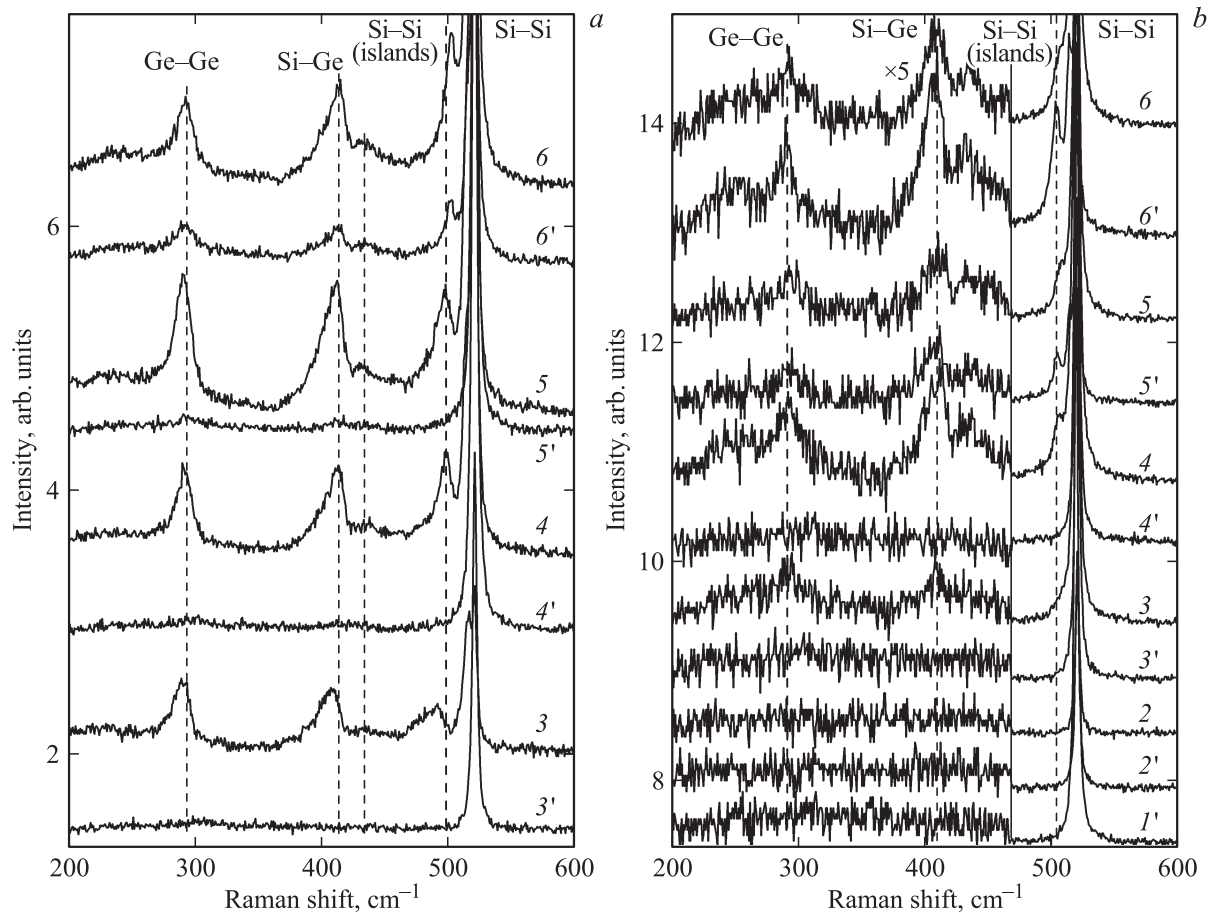


Рис. 1 (продолжение).



**Рис. 2.** Локальные спектры КРС гетероструктур с самоформирующимися островками  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , измеренные в центре островков (2–6) и между островками (1'–6').  $T_g$ , °C: *a* — 700, *b* — 800;  $t_g$ , мин: 1' — 0.25, 2, 2' — 0.5, 3, 3' — 1.0, 4, 4' — 2.0, 5, 5' — 4.0, 6, 6' — 5.0.

Si–Si в недеформированном буферном слое Si соответственно [4–6,14–16].

По значениям сдвигов максимумов указанных линий в тех спектрах, где их идентификация была возможна, были сделаны оценки атомной доли Ge  $x$  и относительной упругой деформации  $\varepsilon$  в материале островков и смачивающего слоя между островками. Связь спектрального положения указанных выше пиков КРС с  $x$  и  $\varepsilon$  в однородных слоях  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  подробно изучена как теоретически [14], так и экспериментально [15]. В настоящей работе оценка  $x$  и  $\varepsilon$  проводилась на основе модели [16], использовавшейся также в [4,5], согласно которой связь между положениями максимумов линий Ge–Ge и Si–Ge (соответственно  $k_{\text{Ge-Ge}}$  и  $k_{\text{Si-Ge}}$ ) и значениями  $x$  и  $\varepsilon$  в слое  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  дается следующими линейными соотношениями:

$$x \approx 0.154k_{\text{Ge-Ge}} - 0.103k_{\text{Si-Ge}} - 2.209,$$

$$\varepsilon \approx (3.804k_{\text{Ge-Ge}} - 4.286k_{\text{Si-Ge}}) \cdot 10^{-3} + 0.642. \quad (2)$$

Полученные методом КРМ карты распределения рамановских сдвигов линий Ge–Ge и Si–Ge ( $k_{\text{Ge-Ge}}$  и  $k_{\text{Si-Ge}}$  соответственно) в плоскости поверхности образца

были пересчитаны по формулам (2) в карты латерального распределения  $x$  и  $\varepsilon$ , приведенные соответственно на рис. 1, С и D. На указанных картах наблюдаются участки с пониженными значениями  $x$  и  $\varepsilon$ , соответствующие островкам  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  на фоне почти псевдоморфного смачивающего слоя с большим по сравнению с островками содержанием Ge. На рис. 1, I, где приведены карты  $x$  и  $\varepsilon$  для образцов с наименьшими значениями  $d_{\text{Ge}}$ , подобного контраста не наблюдается, что может быть связано с недостаточным количеством на поверхности данных образцов материала ( $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ) для проявления соответствующих линий в спектрах КРС.

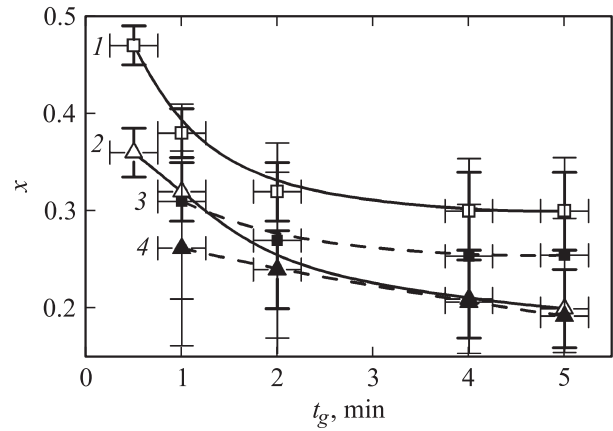
Следует отметить, что сделанные вышеописанным методом оценки  $x$  между островками дают величины существенно меньше единицы ( $x = 0.7-0.45$  для  $T_g = 700^\circ\text{C}$  и  $x = 0.7-0.25$  для  $T_g = 800^\circ\text{C}$ ), при этом уменьшающиеся с ростом  $T_g$ . Это можно объяснить следующим образом. При росте самоформирующихся островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  по механизму Странски–Крастанова вначале образуется смачивающий слой Ge/Si, по достижении последним критической толщины  $d_{\text{WL}} = 3-5$  ML (в зависимости от  $T_g$ ) происходит переход от слоевого к трехмерному росту. Для системы InAs/GaAs(001)

$d_{WL} \approx 1 \text{ ML}$  [17]. Однако в работе [18] методом сканирующей туннельной микроскопии на поперечных сколах (X-СТМ) в сверхвысоком вакууме с атомарным разрешением установлено, что в ГС с самоформирующимися квантовыми точками (КТ) InAs/GaAs(001) атомы In между КТ не сосредоточены в одной плоскости, а диспергированы в матрице GaAs в пределах 2–3 атомных слоев подрешетки Ga как вверх, так и вниз от плоскости смачивающего слоя. Полученные в настоящей работе значения  $x$  между островками можно объяснить, предположив, что в процессе роста островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  и последующего их зарастания покровным слоем Si происходит трансформация смачивающего слоя Ge в слой твердого раствора  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  за счет диффузионного размытия первого, подобно тому, как это происходит при росте КТ InAs/GaAs(001).

Существенное отличие ГС с самоформирующимися островками  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  от ГС с однородными слоями  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  заключается в том, что в первом случае как  $x$ , так и  $\epsilon$  распределены по объему островков неравномерно. Это приводит к уширению и асимметрии формы линий КРС Ge–Ge и Si–Ge, а также к их расщеплению, сильнее выраженному при  $T_g = 800^\circ\text{C}$  (рис. 2, *b*). Данное расщепление может быть связано со следующим обстоятельством. Как было установлено прямыми измерениями методами РОМ с профилированием  $x$  по глубине структуры с использованием ионного травления  $\text{Ag}^+$  [7,8], верхняя часть островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенных методом СМЛЭ в среде  $\text{GeH}_4$  при  $T_g = 700\text{--}800^\circ\text{C}$ , обогащена Ge ( $x \rightarrow 1$ ), тогда как в объеме островка  $x = 0.2\text{--}0.3$  в зависимости от  $T_g$ . Оценка  $x$  в поверхностном слое островков по спектрам КРС, приведенным на рис. 2, дает 0.8–0.95.

При анализе спектров КРС индивидуальных островков, представленных на рис. 2, учитывалось, что они являются суперпозицией спектров от различных слоев ГС (покровного слоя Si, приповерхностной и внутренней областей островка, буферного слоя Si). При этом отсутствует возможность идентификации слоя, с которым связана та или иная линия в дублетах Ge–Ge или Si–Ge (в отличие от метода РОМ с ионным травлением). Из четырех возможных пар значений  $x$  и  $\epsilon$ , которые дают различные комбинации  $k_{\text{Ge-Ge}}$  и  $k_{\text{Si-Ge}}$ , отбирались те, для которых  $0 < x < 1$  и  $-4.2 \cdot 10^{-2} < \epsilon < 0$ .

На рис. 3 приведены зависимости среднего значения  $x$  в материале островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенных при различных значениях  $T_g$ , от  $t_g$ . С увеличением  $t_g$   $x$  уменьшается, что связано с увеличением времени диффузии Si из подложки в объем островка. При  $T_g = 800^\circ\text{C}$  значения  $x$  меньше, чем при  $T_g = 700^\circ\text{C}$ , что естественно связать с увеличением скорости диффузии Si в объем островков при повышении  $T_g$ . Указанные закономерности согласуются с данными о зависимости  $x$  в островках  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  от  $T_g$  и скорости роста, приведенными в литературе [1–6]. Следует подчеркнуть, что сделанные по описанной выше методике оценки  $x$  в исследованных ГС являются достаточно



**Рис. 3.** Зависимость средней атомной доли Ge  $x$  в материале островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , определенной из соотношений интенсивности линий Ge–Ge и Si–Ge в спектрах КРС (1, 2) и из спектрального положения максимумов указанных линий (3, 4), от времени напуска  $\text{GeH}_4$  в ростовую камеру  $t_g$ .  $T_g$ ,  $^\circ\text{C}$ : (1, 3) — 700, (2, 4) — 800.

грубыми, что связано с относительно большими числовыми значениями деформационных потенциалов в (2). На рис. 3 приведены также значения  $x$  в материале островков, полученные из соотношения интенсивностей пиков Ge–Ge и Si–Ge с использованием градуировочного графика, приведенного в [16]. Неопределенность значений  $x$ , полученных последним методом, значительно выше, чем полученных из смещений рамановских пиков [16]. Однако по соотношению интенсивностей пиков в спектре КРС можно определить только  $x$ , но не  $\epsilon$ . Следует отметить, что значения  $x$ , полученные из соотношения интенсивностей линий Ge–Ge и Si–Ge, больше, чем полученные из сдвигов соответствующих линий по формуле (2), и расхождение увеличивается с ростом  $x$ . Можно предложить следующее объяснение. Согласно данным недавних работ [19,20], где приведены уточненные значения фононных деформационных потенциалов в напряженных структурах  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , зависимости  $k_{\text{Ge-Ge}}$  и  $k_{\text{Si-Ge}}$  от  $x$  являются существенно нелинейными и выходят на насыщение при  $x > 0.5$ , так что линейные формулы (2) [16] представляют удовлетворительное приближение лишь в области  $x < 0.35$ . Как следствие, оценки  $x$  из деформационных смещений рамановских пиков могут являться заниженными. В целом же значения  $x$ , полученные обоими методами, удовлетворительно согласуются между собой, а также с оценками  $x$  по спектральным положениям максимумов ФЛ в островках  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  [10,11] в пределах неопределенности.

## 4. Заключение

Результаты настоящей работы показывают возможность применения метода конфокальной рамановской

микроскопии для локального определения состава твердого раствора и упругих напряжений в гетероструктурах с самоформирующимися островками  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  с латеральным пространственным разрешением  $< 100$  нм. Изучена зависимость состава материала самоформирующихся островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде  $\text{GeH}_4$ , от условий роста (температуры подложки, времени напуска  $\text{GeH}_4$  в ростовую камеру). Установленные зависимости согласуются с полученными ранее методом спектроскопии фотолюминесценции. Обнаружено расщепление линий Ge–Ge и Si–Ge в спектрах КРС островков  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , связанное с неоднородностью распределения Ge по объему островков (вершина островка обогащена Ge).

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию РФ (№ проекта РНП 2.1.1.3615). Авторы благодарят П.С. Черных (НИИ ЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова) за измерения спектров ОНР.

## Список литературы

- [1] I. Berbezier, A. Ronda. Surf. Sci. Rep., **64**, 47 (2009).
- [2] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. ФТП, **34**, 1281 (2000).
- [3] Y. Shiraki, A. Sakai. Surf. Sci. Rep., **59**, 153 (2005).
- [4] Z.F. Krasil'nik, I.V. Dolgov, D.O. Filatov, S.A. Gusev, D.N. Lobanov, L.D. Moldavskaya, A.V. Novikov, V.V. Postnikov, N.V. Vostokov. Thin Sol. Films, **367**, 171 (2000).
- [5] Н.В. Востоков, С.А. Гусев, И.В. Долгов, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, Л.Д. Молдавская, А.В. Новиков, В.В. Постников, Д.О. Филатов. ФТП, **34**, 8 (2000).
- [6] М.Я. Валах, Р.Ю. Голиней, В.Н. Джаган, З.Ф. Красильник, О.С. Литвин, Д.Н. Лобанов, А.Г. Милехин, А.И. Никифоров, А.В. Новиков, О.П. Пчеляков, В.А. Юхимчук. ФТТ, **47**, 54 (2005).
- [7] Г.А. Максимов, З.Ф. Красильник, Д.О. Филатов, М.В. Круглова, С.В. Морозов, Д.Ю. Ремизов, Д.Е. Николичев, В.Г. Шенгуров. ФТТ, **47**, 26 (2006).
- [8] G.A. Maximov, Z.F. Krasil'nik, A.V. Novikov, V.G. Shengurov, D.O. Filatov, V.F. Dryakhlushin, K.P. Gaikovich. In: *Nanophysics, Nanoclusters and Nanodevices*, ed. by K.S. Gehar (N.Y., Nova Science, 2006) p. 87.
- [9] 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).
- [10] Д.О. Филатов, М.В. Круглова, М.А. Исаков, С.В. Сипрова, М.О. Марычев, В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов. Изв. РАН. Сер. физ., **72**, 267 (2008).
- [11] 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).
- [12] T.I. Kamins, G. Medeiros-Ribeiro, D.A.A. Ohlberg, R.S. Williams. J. Appl. Phys., **85**, 1159 (1999).
- [13] R.H. Webb. Rep. Progr. Phys., **59**, 427 (1986).
- [14] P.Y. Yu, M. Cardona. *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties* (Berlin–Heidelberg, Springer, 2005).
- [15] D.J. Lockwood, J.M. Baribeau. Phys. Rev. B, **45**, 8565 (1992).
- [16] J. Groenen, R. Carles, S. Christiansen, M. Albrecht, W. Dorsch, H.P. Strunk, H. Wawra, G. Wagner. Appl. Phys. Lett., **71**, 3856 (1997).
- [17] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. ФТП, **32**, 385 (1998).
- [18] P. Offermans, P.M. Könraad, R. Nötzel, J.H. Wolter. Appl. Phys. Lett., **87**, 111 903 (2005).
- [19] J.S. Reparaz, A. Bernardi, A.R. Goñi, M.I. Alonso, M. Garriga. Appl. Phys. Lett., **92**, 081 909 (2008).
- [20] J.S. Reparaz, A.R. Goñi, A. Bernardi, M.I. Alonso, M. Garriga. Phys. Status Solidi B, **246**, 548 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

## Confocal Raman microscopy of self-assembled GeSi/Si(001) islands

A.I. Mashin, A.V. Nezhdanov, D.O. Filatov<sup>+</sup>,  
M.A. Isakov<sup>+</sup>, V.G. Shengurov<sup>+</sup>,  
V.Yu. Chalkov<sup>+</sup>, S.A. Denisov<sup>+</sup>

University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>+</sup> Research Institute for Physics and Technology,  
N.I. Lobachevsky University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** Confocal Raman microscopy has been applied for the first time to study the composition and elastic strain of self-assembled  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$  islands grown by sublimation molecular-beam epitaxy in  $\text{GeH}_4$  ambient. The Raman scattering lines related to the Si–Si, Ge–Ge, and Si–Ge vibration modes have been identified in the Raman spectra measured in the spots on the sample surface less than 100 nm in diameter. The spatial distributions of the Ge atomic fraction  $x$  in the  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  alloy and of the elastic strain  $\varepsilon$  (averaged in depth over the island layer) have been calculated from the maps of the Raman shifts of the lines over the sample surface. The dependencies of  $x$  and  $\varepsilon$  on the islands' growth temperature and on the nominal thickness of the deposited Ge layer have been studied.