

# Ширина линии фотолюминесценции от самоформирующихся островков Ge(Si), заключенных между напряженными Si-слоями

© М.В. Шалеев<sup>†</sup>, А.В. Новиков<sup>†\*</sup>, Н.А. Байдакова<sup>†\*</sup>, А.Н. Яблонский<sup>†</sup>,  
О.А. Кузнецов<sup>‡</sup>, Д.Н. Лобанов<sup>†</sup>, З.Ф. Красильник<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 ГСП-105 Нижний Новгород, Россия

\* 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 июня 2010 г. Принята к печати 22 июня 2010 г.)

Исследовано влияние толщин напряженных Si-слоев, температуры измерения и мощности оптического возбуждения на ширину пика фотолюминесценции от самоформирующихся наноструктур Ge(Si), выращенных на релаксированных буферных слоях SiGe/Si (001) и заключенных между напряженными Si-слоями. Показано, что путем изменения толщин напряженных Si-слоев над и под островками можно как уменьшать, так и увеличивать ширину линии фотолюминесценции островков Ge(Si). За счет учета диффузионного размытия напряженного слоя Si над островками достигнуто уменьшение ширины пика фотолюминесценции от островков Ge(Si) до значений, сравнимых с шириной пика фотолюминесценции от структур с квантовыми точками на основе прямозонных полупроводников InAs/GaAs.

## 1. Введение

Интерес к структурам с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si) связан как с изучением фундаментальных физических явлений, проявляющихся в низкоразмерных системах, так и с возможностью применения таких структур в полупроводниковых приборах [1–3]. Практический интерес к структурам с островками Ge(Si) во многом вызван наблюдаемым от них вплоть до комнатной температуры сигналом люминесценции в области длин волн 1.3–1.7 мкм, которая используется для передачи данных в оптоволоконных линиях связи [4,5]. Фундаментальные исследования люминесценции островков Ge(Si) направлены на выявление особенностей излучательной рекомбинации носителей заряда в наноструктурах на основе непрямозонных полупроводников, в частности влияния пространственной локализации носителей заряда на их рекомбинацию [6,7]. В структурах с островками Ge(Si), выращенными на подложках Si(001), из-за наличия гетероперехода II рода эффективная пространственная локализация возможна только для дырок в островках, а электроны оказываются лишь слабо локализованными в Si на масштабах порядка нескольких высот островка [6,8]. Более эффективная пространственная локализация носителей заряда обоих знаков может быть обеспечена в структурах с островками Ge(Si), выращенными на релаксированных буферных слоях SiGe/Si(001) и заключенными между напряженными (растянутыми) слоями Si [9–11] (рис. 1). Напряженные слои Si над и под островками в данном классе структур являются потенциальными ямами для электронов, а островки Ge(Si) — для дырок [9,10]

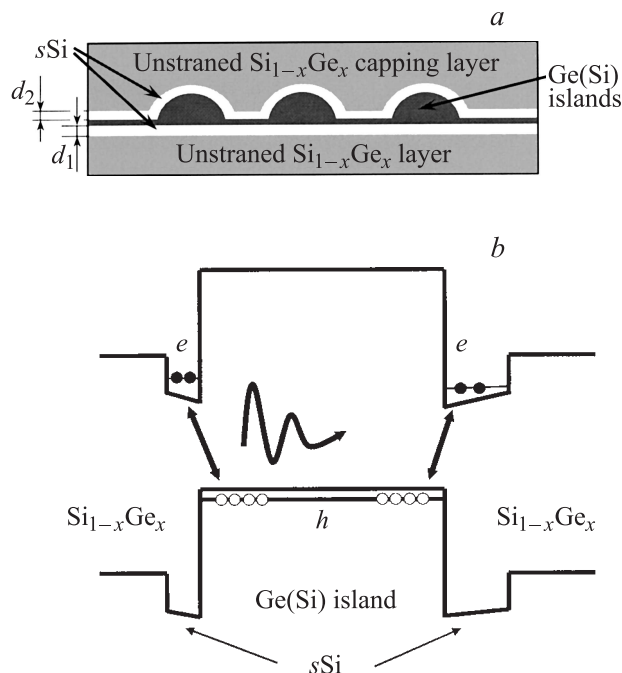
(рис. 1, b). Было обнаружено увеличение интенсивности сигнала фотолюминесценции (ФЛ) от островков Ge(Si), встроенных в напряженные слои Si (sSi) (далее — островки Ge(Si)/sSi), и уменьшение его ширины по сравнению с сигналом ФЛ от островков Ge(Si), выращенных непосредственно на подложках Si(001) (далее — островки Ge(Si)/Si(001)) [9,10]. Оба этих факта связывались с эффективной локализацией электронов в тонких слоях sSi на гетерогранице с островками Ge(Si)/sSi, что приводит к росту неопределенности координаты электронов в импульсном пространстве и, как следствие, к увеличению вероятности излучательной рекомбинации носителей заряда без участия фонона [10,11].

В настоящей работе подробно исследовано влияние параметров напряженных Si-слоев над и под островками Ge(Si) на ширину и положение линии ФЛ от гетероструктур с островками Ge(Si)/sSi.

## 2. Методика эксперимента

Исследованные структуры с островками Ge(Si)/sSi были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В качестве подложек использовались релаксированные буферные слои Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si(001) ( $x \approx 25\%$ ) с малой шероховатостью поверхности [12]. Структуры были выращены при 650°C и состояли из ненапряженного слоя SiGe, слоя sSi толщиной  $d_1 = 1-3$  нм, на который осаждался слой Ge с эквивалентной толщиной 11–12 монослоев (1 монослой  $\approx 0.14$  нм  $\approx 6.8 \cdot 10^{14}$  атомов/см<sup>2</sup>) (рис. 1, a). Согласно ранее проведенным с помощью атомно-силовой микроскопии исследованиям роста островков Ge(Si)/sSi, при данных условиях (доле Ge в буфере, температуре роста, толщине  $d_1$  и количестве

<sup>†</sup> E-mail: shaleev@ipm.sci-nnov.ru



**Рис. 1.** *a* — схематичное изображение поперечного сечения гетероструктур с островками Ge(Si)/sSi;  $d_1$  и  $d_2$  — толщины слоев sSi под и над островками соответственно. *b* — зонная диаграмма структур с островками Ge(Si)/sSi; стрелками показаны не прямые в реальном пространстве оптические переходы на верхней и нижней гетерограницах островка.

осажденного Ge) на поверхности структур формируется массив куполообразных островков, с разбросом островков по размерам менее 10% [13,14]. При этом для диапазона толщин  $d_1 = 1-3$  нм форма и размеры островков Ge(Si) не зависят от толщины слоя sSi под островками [13]. Для люминесцентных исследований островки заравнивались еще одним слоем sSi толщиной  $d_2$  и ненапряженным слоем SiGe толщиной 80 нм. Схематическое изображение исследованных структур представлено на рис. 1, *a*. Более подробно методика выращивания островков Ge(Si)/sSi описана в [13].

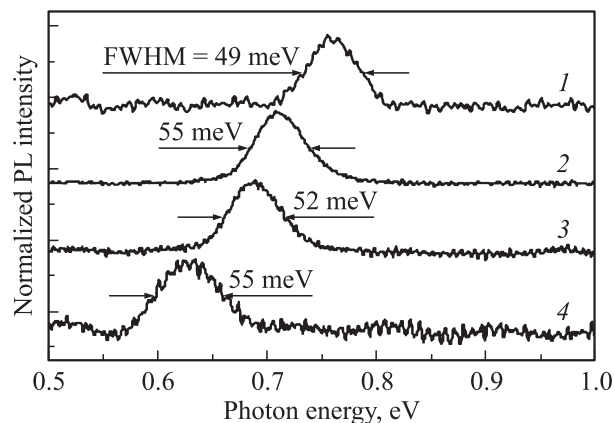
Измерения спектров ФЛ структур выполнены на монокроматоре АСТОН 2300i. Сигнал ФЛ регистрировался с помощью диодной InGaAs-линейки ОМА-V. Для возбуждения сигнала ФЛ использовался ультрафиолетовый HeCd-лазер (длина волны излучения  $\lambda = 325$  нм). Использование HeCd-лазера, излучение которого имеет малую глубину поглощения в SiGe, позволило избежать присутствия в спектрах ФЛ сигнала от дислокаций, расположенных в дефектных областях в глубине релаксированных буферных слоев SiGe/Si(001)[9].

### 3. Результаты и их обсуждение

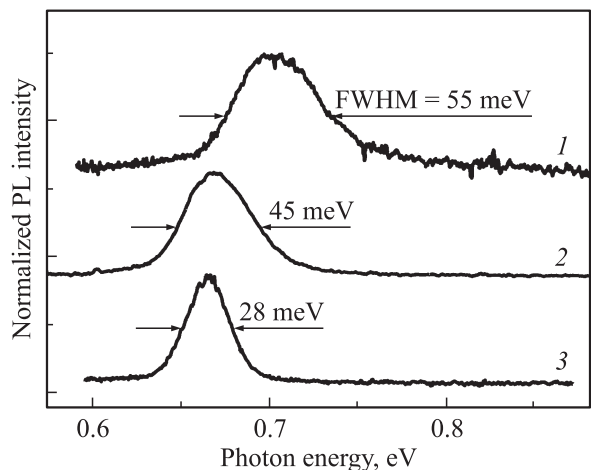
Типичная ширина сигнала ФЛ на его полувысоте от островков Ge(Si)/Si(001) составляет FWHM = 70–100 мэВ [2,3,6,15]. Такая большая ширина сигнала

ФЛ в различных работах связывается с разбросом островков по размерам [16], форме [17] и (или) присутствием в сигнале ФЛ от островков Ge(Si)/Si(001) как линии, связанной с излучательной рекомбинацией носителей заряда без участия фонона, так и линий, связанных с рекомбинацией носителей заряда с участием фононов [6,18]. Исследования спектров ФЛ структур с островками Ge(Si)/sSi, в которых номинальные толщины слоев sSi (количество осажденного Si) над и под островками были одинаковы ( $d_1 = d_2$ ), показали, что при 77 К ширина пика ФЛ от островков Ge(Si)/sSi лежит в диапазоне FWHM = 50–55 мэВ (рис. 2), что заметно меньше ширины пика ФЛ от островков Ge(Si)/Si(001) [9]. Уменьшение ширины пика ФЛ в структурах с островками Ge(Si)/sSi нельзя связать с их малым (< 10%) разбросом по размерам, так как в структурах с островками Ge(Si)/Si(001), имеющих такой же разброс по размерам, ширина пика ФЛ превосходит 70 мэВ [16,17].

Значительное уменьшение ширины пика ФЛ от островков Ge(Si)/sSi по сравнению с пиком ФЛ от островков Ge(Si)/Si(001) связывается с преобладанием в сигнале ФЛ в первом случае только одного пика — возникающего в результате рекомбинации носителей заряда без участия фонона [9]. Если бы наряду с рекомбинацией носителей заряда без участия фононов имела место их рекомбинация с участием оптических фононов и пики, связанные с этими переходами, не были бы спектрально разрешены, суммарная ширина пика ФЛ от островков Ge(Si)/sSi должна была бы быть заметно больше характерных энергий оптических фононов в Si (58 мэВ) и SiGe (49 мэВ) [19], чего не наблюдается в эксперименте. Увеличение вклада бесфононного пика в общий сигнал ФЛ от островков Ge(Si)/sSi происходит за счет эффективной пространственной локализации электронов в тонких слоях sSi ( $d_1, d_2 \leq 3$  нм) на гетерогранице с островком Ge(Si) (рис. 1, *b*). Из соотношения неопределенностей



**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции (PL) структур с островками Ge(Si)/sSi с номинально одинаковыми толщинами слоев sSi над и под островками.  $d_1 = d_2 = 1.0$  (1), 1.5 (2), 2 (3) и 3 нм (4). Указана ширина пика на его полувысоте (FWHM). Температура измерений 77 К, мощность оптической накачки 1 мВт.



**Рис. 3.** Спектры фотолуминесценции (PL) структур с островками Ge(Si)/sSi: 1 —  $d_1 = d_2 = 1.5$  нм, температура измерений 77 К; (2,3) —  $d_1 = 1.5$  нм и  $d_2 = 2.3$  нм, температура измерений 77 (2) и 20 К (3). Указана ширина пика на его полувысоте (FWHM). Мощность оптической накачки 1 мВт.

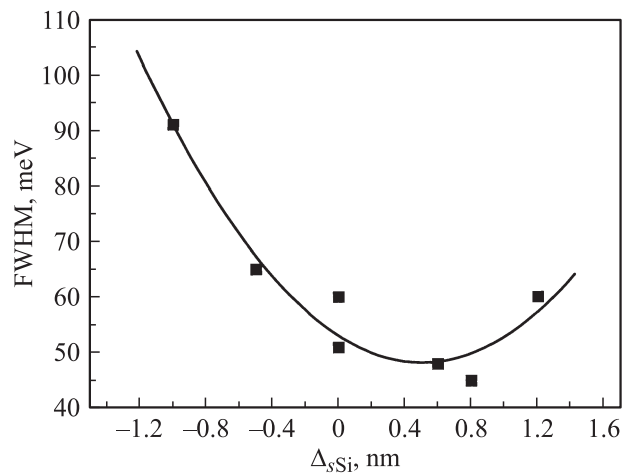
следует, что локализация электронов в реальном пространстве приводит к их делокализации в  $k$ -пространстве и соответственно возрастает вероятность их излучательной рекомбинации с дырками без участия фонона. К этому же приводит и рассеяние на гетерограницах электронов, локализованных в слоях sSi. Возрастание интенсивности пика ФЛ, соответствующего излучательной рекомбинации носителей заряда без участия фонона, ранее наблюдалось для SiGe-гетероструктур, выращенных на релаксированных буферных слоях SiGe/Si(001) и состоящих из чередующихся тонких напряженных слоев Ge и Si [20].

В структурах с номинально одинаковыми толщинами слоев sSi над и под островками ( $d_1 = d_2$ ) увеличение толщин sSi-слоев приводит к сдвигу пика ФЛ в область меньших энергий (рис. 2). Данный сдвиг вызван увеличением глубины потенциальной ямы для электронов в слоях sSi при увеличении их толщины и, как следствие, уменьшением энергии непрямого в реальном пространстве излучательного перехода между электронами в слоях sSi и дырками в островках Ge(Si) [10] (рис. 1, б). В структурах с  $d_1 = d_2$  ширина пика ФЛ от островков слабо зависит от толщины слоев sSi (рис. 2), что указывает на доминирование в сигнале ФЛ от островков Ge(Si)/sSi пика, связанного с рекомбинацией носителей заряда без участия фононов, в диапазоне толщин слоев sSi  $d_1 = d_2 = 1-3$  нм.

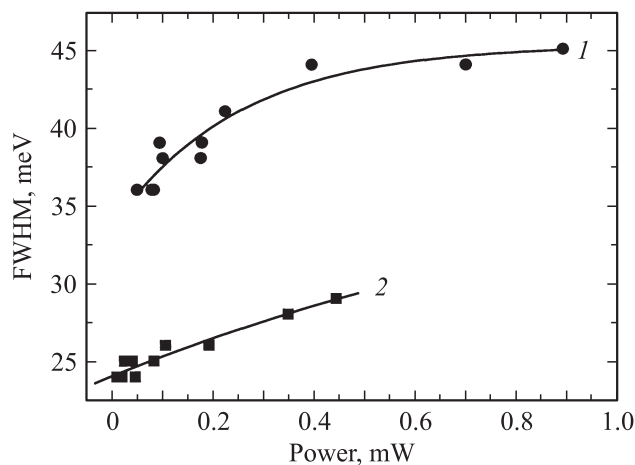
Суммарный сигнал ФЛ от островков Ge(Si), заключенных между тонкими слоями напряженного Si, складывается из пиков, связанных с рекомбинацией без участия фононов носителей заряда на верхней и нижней гетерограницах островка (рис. 1, б). Очевидно, что минимальная ширина суммарного пика ФЛ будет наблюдаться в том случае, когда положения пиков, вызванных излучательной рекомбинацией электронов ( $e$ ) из нижнего и

верхнего слоев sSi с дырками ( $h$ ) из островка, совпадают. Также очевидно, что для совпадения положений этих пиков необходимо совпадение положений электронных уровней в слоях sSi, что выполняется при равенстве реальных толщин напряженных Si-слоев под и над островками. Из-за различных диффузионных процессов реальные толщины слоев sSi над и под островками могут значительно отличаться от номинальных толщин этих слоев (количества осажденного материала). В частности, в структурах с номинально одинаковыми толщинами слоев sSi над и под островками ( $d_1 = d_2$ ) реальная их толщина может различаться за счет большего диффузионного размытия верхнего слоя sSi. Это предположение обосновано наблюдаемым в структурах с островками Ge(Si) существенным растворением островков при их заращивании Si при температурах больше 400°C [16], которое связывается с неоднородными упругими напряжениями от островков. Согласно результатам исследования структур с островками Ge(Si)/sSi с помощью просвечивающей электронной микроскопии, подобные процессы наблюдаются и при заращивании островков Ge(Si)/sSi слоем напряженного Si. В этом случае покровный слой sSi за счет больших упругих напряжений, присутствующих после формирования островков Ge(Si), размывается сильнее (становится тоньше), чем слой sSi под островками. Таким образом, для структур с номинально одинаковыми (по количеству осажденного материала) слоями sSi существует разница в реальных толщинах слоев sSi над и под островками. Данная разница в толщинах слоев sSi приводит к различию в положении энергетических уровней электронов в них (рис. 1, б) и, как следствие, к разнице в положении пиков ФЛ, связанных с рекомбинацией носителей заряда на верхней и нижней гетерограницах островка. Результатом такого различия является увеличение ширины суммарного сигнала ФЛ, связанного с островками Ge(Si)/sSi. Небольшое увеличение номинальной толщины верхнего слоя sSi по сравнению с нижним слоем sSi позволяет компенсировать различие в реальных толщинах этих слоев. В результате уменьшается разница в положении энергетических уровней электронов в слоях sSi над и под островками, что ведет к заметному уменьшению ширины пика ФЛ от островков Ge(Si)/sSi (рис. 3). Так, в структурах со слоем sSi под островками толщиной  $d_1 = 1.5$  нм увеличение толщины покровного слоя sSi с  $d_2 = 1.5$  до 2.3 нм приводит к уменьшению ширины сигнала ФЛ от островков Ge(Si)/sSi с FWHM = 55 до 45 мэВ (спектры 1 и 2 на рис. 3).

На рис. 4 представлена зависимость ширины линии ФЛ островков Ge(Si)/sSi при 77 К от разницы между номинальными толщинами напряженных Si-слоев над и под островками  $\Delta_{sSi} = d_2 - d_1$ . Из приведенных данных видно, что при используемых условиях роста наименьшая ширина линии ФЛ от структур с островками Ge(Si)/sSi наблюдается при  $\Delta_{sSi} = 0.6-0.8$  нм. Можно предположить, что эта величина соответствует уменьшению толщины покровного слоя sSi в результате его диффузион-



**Рис. 4.** Зависимость ширины линии фотолюминесценции островков Ge(Si)/sSi на ее полувысоте от разницы между номинальными толщинами слоев sSi над и под островками ( $\Delta_{sSi}$ ) для температуры 77 К и мощности оптической накачки 1 мВт.



**Рис. 5.** Зависимости ширины пика фотолюминесценции островков Ge(Si)/sSi на его полувысоте (FWHM) структуры с  $d_1 = 1.5$  нм и  $d_2 = 2.3$  нм от мощности оптической накачки при 77 (1) и 20 К (2). Линии проведены на глаз.

ного перемешивания с островками. Как отмечалось выше, при номинальном равенстве толщин слоев sSi над и под островками ( $\Delta_{sSi} = 0$ ) пик ФЛ уширен относительно минимальных значений, а при  $\Delta_{sSi} < 0$  происходит дальнейшее уширение суммарного сигнала ФЛ от островков Ge(Si)/sSi. Ранее было показано, что при осаждении слоя sSi под островками значительно большей толщины, чем над островками, ширина сигнала ФЛ от островков Ge(Si)/sSi увеличивается значительно [10]. Так, для структуры с  $d_1 = 3$  нм и  $d_2 = 2$  нм при 77 К ширина пика достигает FWHM = 90 мэВ (рис. 4). При этом в сигнале ФЛ уже легко можно выделить отдельные пики, связанные с рекомбинацией электронов из слоев sSi над и под островками [10]. Уширение пика ФЛ островков Ge(Si)/sSi наблюдается и при значениях  $\Delta_{sSi} > 0.8$  нм,

когда реальная толщина верхнего слоя sSi становится больше, чем нижнего.

Уменьшение ширины пика ФЛ от островков Ge(Si)/sSi может быть достигнуто за счет понижения температуры измерения. Так, в результате уменьшения температуры измерения с 77 до 20 К ширина пика ФЛ от островков Ge(Si)/sSi в структуре с  $d_1 = 1.5$  нм и  $d_2 = 2.3$  нм уменьшается с FWHM = 45 до 30 мэВ (спектры 2 и 3 на рис. 3). Данное уменьшение ширины пика ФЛ связано с уменьшением заселенности носителями заряда верхних энергетических состояний в островках Ge(Si) и слоях sSi.

Однако уменьшение ширины пика ФЛ островков Ge(Si)/sSi может быть достигнуто и при 77 К за счет уменьшения мощности оптического возбуждения. На рис. 5 приведена зависимость ширины пика ФЛ на его полувысоте от мощности возбуждающего излучения для структуры с  $d_1 = 1.5$  нм и  $d_2 = 2.3$  нм. Уменьшение мощности возбуждения на порядок (с 1.1 до 0.07 мВт) позволяет для данной структуры уменьшить ширину линии ФЛ при 77 К с FWHM = 43 до 35 мэВ. При этом при уменьшении мощности оптического возбуждения максимум пика ФЛ смещается в область меньших энергий. Подобная зависимость от мощности оптической накачки сигнала ФЛ от островков (уменьшение ширины пика ФЛ и сдвиг его в сторону меньших энергий) наблюдается и в структурах с островками Ge(Si)/Si(001) [21,22]. Такое поведение сигнала ФЛ является типичным для структур с непрямыми в реальном пространстве оптическими переходами (переходами II типа) [23] и связывается с изгибом энергетических зон, вызванным кулоновским потенциалом дырок, локализованных в островках. Уменьшение ширины сигнала ФЛ от островков Ge(Si)/sSi с уменьшением мощности оптической накачки наблюдается и при низких температурах измерения (рис. 5). При температуре 20 К при малых мощностях накачки ширина линии ФЛ островков Ge(Si)/sSi для структуры с  $d_1 = 1.5$  нм и  $d_2 = 2.3$  нм составляет FWHM = 25 мэВ (рис. 5). По мнению авторов, достигнутые значения ширины суммарного сигнала ФЛ от островков Ge(Si)/sSi FWHM = 25–30 мэВ являются наименьшими из наблюдаемых ранее для структур с самоформирующимися наноостровками Ge(Si). Полученные значения FWHM = 25–30 мэВ для сигнала ФЛ от островков Ge(Si)/sSi сравнимы с шириной пика ФЛ для структур с квантовыми точками на основе прямозонных полупроводников InAs/GaAs [24].

#### 4. Заключение

В работе исследовано влияние толщин напряженных Si-слоев, между которыми заключены островки Ge(Si), на ширину сигнала ФЛ от структур с островками Ge(Si), выращенными на релаксированных буферных слоях SiGe/Si(001). Меньшая ширина пика ФЛ в исследованных структурах по сравнению с сигналом ФЛ

от структур с островками Ge(Si), выращенными непосредственно на подложках Si(001), связывается со значительным увеличением вклада в сигнал ФЛ оптических переходов без участия фононов, которое вызвано локализацией электронов в тонких (толщиной  $\leq 3$  нм) напряженных Si-слоях над и под островками. Показано, что путем изменения толщин напряженных Si-слоев над и под островками можно менять положение и ширину линии ФЛ островков Ge(Si), заключенных между напряженными Si-слоями. За счет учета диффузионного размытия напряженного слоя Si над островками достигнуто уменьшение ширины пика ФЛ от островков Ge(Si) до значений, сравнимых с шириной пика ФЛ от структур с квантовыми точками на основе прямозонных полупроводников InAs/GaAs.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-02-00888-а), Рособразования (проект 2.1.1/617), программ РАН и CRDF (грант программы BRNE № Y5-P-01-07), гранта президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых (грант № МК-7694.2010.2).

## Список литературы

- [1] D.J. Paul. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**(10), R75 (2004).
- [2] K. Brunner. *Rep. Progr. Phys.*, **65** (1), 27 (2001).
- [3] J. Stangl, V. Holý, G. Bauer. *Rev. Mod. Phys.*, **76** (3), 725 (2004).
- [4] L. Vescan, T. Stoica. *J. Luminesc.*, **80**, 485 (1998).
- [5] T. Brunhes, P. Boucaud, S. Sauvage, F. Aniel, J.-M. Lourtioz, C. Hernandez, Y. Campidelli, O. Kermarrec, D. Bensahel, G. Faini, I. Sagnes. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (12) 1822 (2000).
- [6] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин, Н.Г. Калугин, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.В. Постников, Х. Сейрингер. *Письма ЖЭТФ*, **67** (1), 46 (1998).
- [7] B.V. Kamenev, L. Tsybeskov, J.-M. Baribeau, D.J. Lockwood. *Phys. Rev. B*, **72** (19), 193 306 (2005).
- [8] A.I. Yakimov, N.P. Stepina, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov, A.V. Nenashev. *Semicond. Sci. Technol.*, **15** (12), 1125 (2000).
- [9] M.V. Shaleev, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, Y.N. Drozdov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik, O.A. Kuznetsov. *Appl. Phys. Lett.*, **88** (1), 011 914 (2006).
- [10] A.V. Novikov, M.V. Shaleev, A.N. Yablonskiy, O.A. Kuznetsov, Yu.N. Drozdov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik. *Semicond. Sci. Technol.*, **22** (1), S29 (2007).
- [11] M.V. Shaleev, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, Y.N. Drozdov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik, O.A. Kuznetsov. *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2), 021 916 (2007).
- [12] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, О.А. Кузнецов, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.А. Перевозчиков, М.В. Шалеев. *ФТТ*, **47** (1), 44 (2005).
- [13] М.В. Шалеев, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский, О.А. Кузнецов, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник. *ФТП*, **41** (2), 172 (2007).
- [14] М.В. Шалеев, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский, О.А. Кузнецов, Ю.Н. Дроздов, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник. *ФТП*, **41** (11), 1375 (2007).

- [15] D.J. Lockwood, J.-M. Baribeau, B.V. Kamenev, E.-K. Lee, L. Tsybeskov. *Semicond. Sci. Technol.*, **23** (6), 064 003 (2008).
- [16] M. Stoffel, U. Denker, G.S. Kar, H. Sigg, O.G. Schmidt. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (14), 2910 (2003).
- [17] V. Yam, V. Le Thanh, Y. Zheng, P. Boucaud, D. Bouchier. *Phys. Rev. B*, **63** (3), 033 313 (2001).
- [18] J. Wan, Y.H. Luo, Z.M. Jiang, G. Jin, J.L. Liu, K.L. Wang, X.Z. Liao, J. Zou. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (13), 1980 (2001).
- [19] J. Weber, M.I. Alonso. *Phys. Rev. B*, **40**, 5683 (1989).
- [20] N. Usami, F. Issiki, D.K. Nayak, Y. Shiraki, S. Fukatsu. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (4), 524 (1995).
- [21] P. Boucaud, S. Sauvage, M. Elkurdi, E. Mercier, T. Brunhies, V. Le Thanh, D. Bouchier, O. Kermarrec, Y. Campidelli, D. Bensahel. *Phys. Rev. B*, **64** (15), 155 310 (2001).
- [22] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А. В. Новиков, А.Н. Яблонский. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **67** (2), 159 (2003).
- [23] C.-K. Sun, G. Wang, J.E. Bowers, B. Brar, H.-R. Blank, H. Kroemer, M.H. Pilkuhn. *Appl. Phys. Lett.*, **68** (11), 1543 (1996).
- [24] P. Howe, E.C. Le Ru, E. Clarke, B. Abbey, R. Murray, T.S. Jones. *J. Appl. Phys.*, **95** (6), 2998 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

## Line width of photoluminescence from Ge(Si) self-assembled islands embedded between tensile-strained Si layers

M.V. Shaleev<sup>†</sup>, A.V. Novikov<sup>†\*</sup>, N.A. Baydakova<sup>†\*</sup>,  
A.N. Yablonskiy<sup>†</sup>, O.A. Kuznetsov<sup>‡</sup>, D.N. Lobanov<sup>†</sup>,  
Z.F. Krasilnik<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950, GSP-105 Nizhny Novgorod, Russia

\* Nizhny Novgorod State University,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>‡</sup> Physical-Technical Research Institute,  
Nizhny Novgorod State University,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The effect of strained Si layers thicknesses, measurement temperature and optical pumping power on width of photoluminescence line from Ge(Si) self-assembled islands grown on relaxed SiGe/Si(001) buffer layers and embedded between tensile-strained Si layers was studied. As shown it is possible both to decrease and increase the Ge(Si) islands-related photoluminescence line width by changing the strained Si layers thicknesses under and above the islands. The decrease of Ge(Si) islands-related photoluminescence line width up to values comparable with that from direct band InAs/GaAs quantum dots was achieved with taking into account higher diffusion-induced smearing of strained Si layer above the islands.