

# Особенности фотолюминесценции самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001), выращенных на напряженном слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>

© Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов<sup>¶</sup>, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, А.Н. Яблонский

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 20 июня 2005 г. Принята к печати 13 июля 2005 г.)

Исследовано влияние предосаждения напряженных слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> ( $x \leq 20\%$ ) на фотолюминесценцию самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001). Обнаружено смещение пика фотолюминесценции от куполообразных островков в сторону меньших энергий по сравнению с пиком фотолюминесценции от пирамидальных островков, которое связывается со значительно большей высотой куполов по сравнению с пирамидами. Выявлено, что с увеличением содержания Ge в слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> более 10% в широкой полосе фотолюминесценции от островков появляются два отдельных пика, которые связываются с бесфононным и фононным оптическими переходами в островках. Их появление вызвано изменением типа ТО-фотона, участвующего в оптической рекомбинации, с ТО<sub>Ge-Ge</sub>-фонона на более коротковолновый ТО<sub>Si-Ge</sub>-фонон.

PACS: 78.67.Hc, 78.55.Nx, 81.07.Ta

## 1. Введение

Низкоразмерные гетероструктуры Ge(Si)/Si(001) с самоформирующимися наноструктурами и квантовыми точками вызывают растущий интерес в связи с возможностью создания на их основе светоизлучающих приборов и фотоприемников. В таких структурах при комнатной температуре наблюдается как интенсивный сигнал фото- и электролюминесценции [1–4], так и сигнал фотопроводимости [5] в области длин волн 1.3–1.55 мкм, соответствующей минимуму оптических потерь для современных оптоволоконных линий передач. Для увеличения интенсивности сигнала люминесценции и фотопроводимости необходимо формирование массива островков с высокой поверхностной плотностью и малым разбросом по размерам. Проведенные ранее исследования методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) [6] показали, что предосаждение напряженного слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> приводит к увеличению поверхностной плотности и размеров самоформирующихся островков Ge(Si). При этом на поверхности структур со слоем Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> наблюдается локальное пространственное упорядочение во взаимном расположении островков. Кроме того, было обнаружено [6] увеличение сигнала фотолюминесценции (ФЛ) в области длин волн 1.3–1.55 мкм от островков, выращенных на слое Si<sub>0.9</sub>Ge<sub>0.1</sub>, по сравнению с островками, сформированными непосредственно на Si.

В настоящей работе представлены результаты детальных исследований влияния предосаждения напряженных слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> ( $x \leq 20\%$ ) на ФЛ самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001). Выявлены особенности в ФЛ островков различной формы.

## 2. Эксперимент

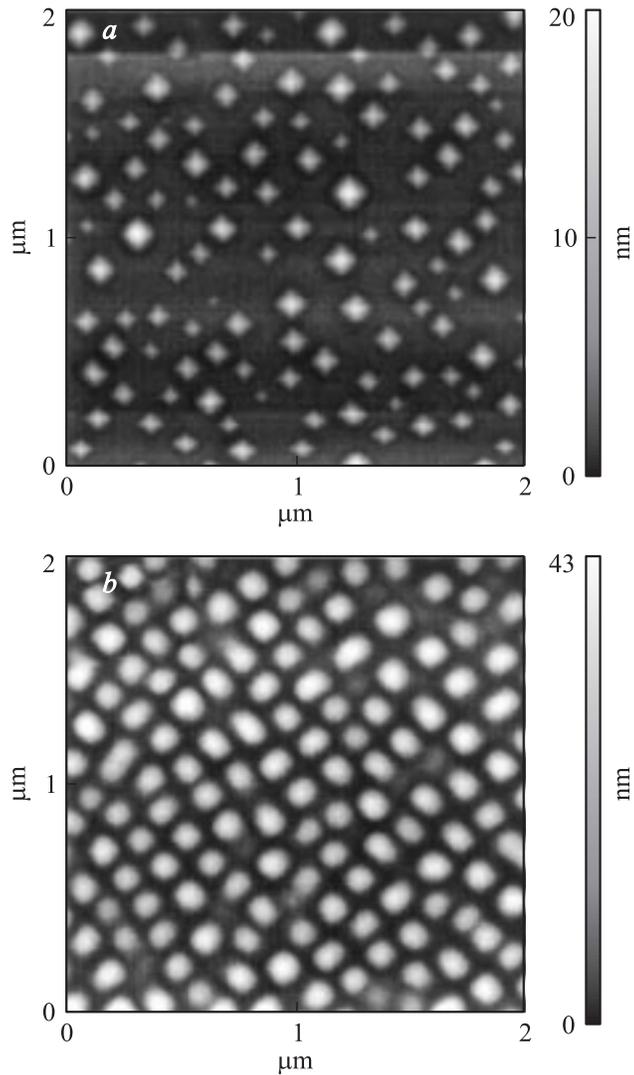
Исследуемые структуры были выращены на подложках Si(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии

<sup>¶</sup> E-mail: dima@ipm.sci-nnov.ru

из твердых источников при температуре роста 700°C. Структуры с самоформирующимися наноструктурами состояли из буферного слоя Si толщиной 100 нм и слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> ( $0 \leq x \leq 20\%$ ) толщиной 10 нм, на который осаждался Ge с эквивалентной толщиной от 3.8 до 13 монослоев (МС) (1МС  $\approx 0.14$  нм). Необходимо отметить, что толщина слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> была меньше критической толщины псевдоэпитаксиального роста ( $\sim 13$  нм для сплава Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> [7]) и слои Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> были напряженными. По данным АМС-измерений поверхность структур после осаждения слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> оставалась планарной. Структуры для фотолюминесцентных измерений имели покровный слой Si, рост которого проходил при 700°C. Исследования морфологии поверхности выращенных структур выполнены *ex situ* с помощью атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме на микроскопе „Solver PRO“. Рентгенодифракционные (РД) исследования выполнены на дифрактометре ДРОН-4. Спектры фотолюминесценции GeSi-гетероструктур записывались с помощью фурье-спектрометра WOMEM DA3.36. Для регистрации спектров использовался охлаждаемый Ge-детектор. Для возбуждения ФЛ использовался Ar<sup>+</sup>-лазер (длина волны излучения  $\lambda = 514.5$  нм).

## 3. Результаты

АСМ-исследования показали, что на начальных стадиях роста, в отличие от бимодального распределения самоформирующихся островков Ge(Si) по размерам и форме при росте на Si-буфере [8], формирование островков Ge(Si) на напряженном слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> при  $x \geq 10\%$  позволяет получить массив только пирамидальных островков („пирамид“) (рис. 1, а) [6]. При дальнейшем увеличении количества осажденного Ge, как и в случае роста островков на буфере Si, пирамиды постепенно трансформируются в куполообразные островки. Необходимо отметить, что переход пирамидальных островков



**Рис. 1.** АСМ-снимки образцов с пирамидами (*a*) и куполами (*b*), полученными соответственно осаждением 4.2 и 13 МС Ge на слой  $\text{Si}_{0.9}\text{Ge}_{0.1}$  толщиной 10 нм.

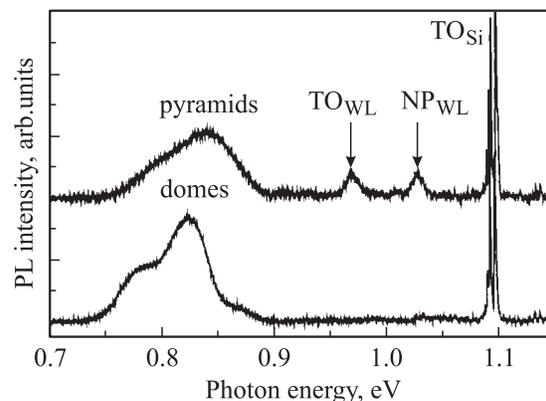
в куполообразные сопровождается увеличением высоты островков в  $\sim 2$  раза (рис. 1). При толщине осажденного Ge больше 10 МС возможно формирование массива островков только куполообразной формы („куполов“) (рис. 1, *b*).

Как было отмечено выше, при росте островков непосредственно на Si-буфере трудно получить массив островков Ge(Si) пирамидальной формы, так как уже на начальных стадиях роста на поверхности наблюдается бимодальное распределение островков по форме (на поверхности имеются как пирамидальные, так и куполообразные островки) [8]. Поэтому в спектрах ФЛ структур с островками Ge(Si), выращенными на Si-буфере, присутствует сигнал от островков различной формы [9], что значительно усложняет задачу выделения сигнала от островков пирамидальной формы. Возможность получения однородных по форме островков в случае их

роста на напряженном слое  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  позволяет изучать оптические свойства островков с разной формой.

На рис. 2 представлены спектры ФЛ образцов с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001) разной формы. Пирамиды были получены осаждением Ge с эквивалентной толщиной 4.2 МС, а купола — с эквивалентной толщиной 13 МС на слой  $\text{Si}_{0.9}\text{Ge}_{0.1}$  толщиной 10 нм. В представленных на рис. 2 спектрах можно видеть ТО-фононный сигнал ФЛ от объемного кремния ( $\text{TO}_{\text{Si}}$ ), а в спектре ФЛ образца с пирамидами — бесфононный ( $\text{NR}_{\text{WL}}$ ) и ТО-фононный ( $\text{TO}_{\text{WL}}$ ) пики от смачивающего слоя. В области 0.7–0.9 эВ в спектрах обеих структур наблюдается широкий пик ФЛ, который связывается с непрямыми в реальном пространстве оптическими переходами между дырками, локализованными в островках, и электронами, находящимися в кремнии на границе с островками [10]. Из рис. 2 видно, что пик ФЛ от куполов смещен в область меньших энергий по сравнению с пиком ФЛ от пирамид. Из литературы известно [11], что при трансформации пирамид в купола происходит уменьшение содержания Ge в островках, что должно приводить к уменьшению разрыва в валентной зоне и, следовательно, увеличению энергии непрямого оптического перехода в куполах, что не согласуется с нашими экспериментальными данными.

Кроме состава, на положение уровня дырок в островке могут оказывать влияние эффекты размерного квантования, приводящие к смещению основного состояния дырок от потолка валентной зоны в островке к потолку валентной зоны кремния. С ростом высоты островков влияние эффектов размерного квантования на положение уровня дырок в островках уменьшается, и он смещается ближе к потолку валентной зоны в островке. В результате этого происходит уменьшение энергии оптического перехода при увеличении высоты островков. Очевидно, что отмеченное выше значительное увеличение высоты островков при их переходе из пирамид в купола оказывает более существенное влияние на положение пика ФЛ от островков, чем различие в составе



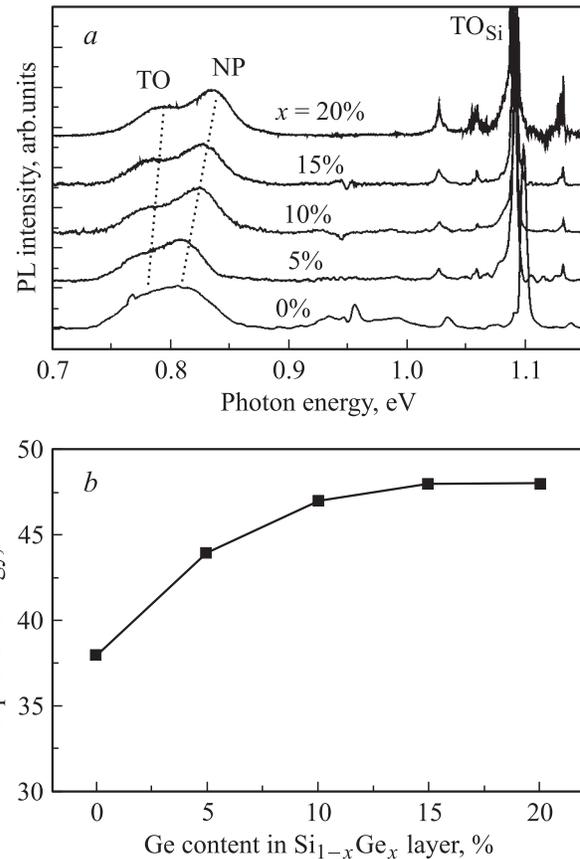
**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции (PL) образцов с пирамидами и куполами.  $\text{NR}_{\text{WL}}$  и  $\text{TO}_{\text{WL}}$  — бесфононный и ТО-фононный сигналы от смачивающего слоя;  $\text{TO}_{\text{Si}}$  — ТО-фононный сигнал от объемного кремния.

пирамид и куполов. Таким образом, обнаруженное смещение пика ФЛ от куполов в сторону меньших энергий связывается нами с уменьшением влияния эффектов размерного квантования на положение энергетических уровней дырок в островках в результате значительно большей высоты куполов по сравнению с пирамидами.

Существенным отличием спектров ФЛ структур с пирамидами от структур с куполами является отсутствие в спектрах ФЛ последних сигнала, связанного со смачивающим слоем (рис. 2). Уменьшение интенсивности сигнала ФЛ от смачивающего слоя происходит монотонно с увеличением количества осажденного Ge, и пики от смачивающего слоя исчезают при толщинах осажденного Ge > 10 нм. Этот эффект может быть вызван существенным увеличением степени заполнения поверхности образца островками с ростом количества осажденного Ge, в связи с чем смачивающий слой между островками практически исчезает (рис. 1, *b*). Необходимо отметить, что во всех исследованных структурах с островками не наблюдается сигнала ФЛ от слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, так как из-за большого содержания Ge в островках и смачивающем слое локализация дырок происходит или в островках, или в смачивающем слое.

При анализе спектров ФЛ структур с куполообразными островками, выращенными на слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> с различным содержанием Ge, было обнаружено, что при увеличении доли Ge в слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> сигнал ФЛ от островков смещается в сторону больших энергий (рис. 3, *a*). Это смещение связывается нами с обнаруженным ранее уменьшением содержания Ge в незарощенных куполообразных островках с ростом содержания Ge в слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> [6]. Было обнаружено, что среднее содержание Ge в островках уменьшается с (52 ± 3)% до (41 ± 3)% при увеличении содержания Ge в слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> от *x* = 0 до 15% [6]. При уменьшении доли Ge в островках уменьшается разрыв валентных зон островка и кремния, что приводит к росту энергии непрямого оптического перехода.

В спектрах ФЛ структур с куполообразными островками, выращенными на слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> с содержанием Ge *x* ≥ 10%, в широкой полосе ФЛ от островков проявляются два отдельных пика, которые связываются нами с бесфоновым оптическим переходом (NP) и переходом с участием поперечного оптического фонона (ТО) (рис. 3, *a*). Появление двух максимумов в спектре сигнала ФЛ от островков может быть связано с уменьшением ширины NP- и ТО-пигов от островков. Однако, как показал количественный анализ спектров ФЛ от островков, сформированных на слоях Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> с различным содержанием Ge, заметного сужения пиков ФЛ с ростом *x* не происходит. Достаточно большая ширина пиков ФЛ от островков (ширина на полувысоте ~ 35 мэВ) может быть связана с сохраняющимся большим разбросом островков по размерам (~ 10%). Появление двух отдельных пиков в сигнале ФЛ от островков, выращенных на слоях Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> с *x* ≥ 10%, может быть связано с обнаруженным увеличением разности энергий



**Рис. 3.** *a* — спектры фотолюминесценции (PL) образцов с куполообразными островками, полученными осаждением 10 нм Ge на слой Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> толщиной 10 нм с разным содержанием Ge (*x*). NP и ТО — бесфоновая и ТО-фононная реплики сигнала ФЛ от островков. *b* — энергия ТО-фонона, определенная из разности энергий NP- и ТО-пигов ФЛ от островков, в зависимости от содержания Ge в слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>.

между NP- и ТО-пиками с ростом содержания Ge в слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (рис. 3, *b*). Возможным объяснением изменения разности энергий между NP- и ТО-пиками является изменение типа ТО-фонона, участвующего в оптической рекомбинации, с TO<sub>Ge-Ge</sub>-фонона с энергией 34 мэВ на более коротковолновый TO<sub>Si-Ge</sub>-фонон с энергией 49 мэВ [12].

Сигнал ФЛ от островков в области 1.3–1.55 мкм наблюдается вплоть до комнатной температуры. Проведенные исследования показали, что интенсивность сигнала ФЛ от островков при комнатной температуре не монотонно зависит от доли Ge в слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> и достигает максимума при *x* = 10%. Увеличение интенсивности сигнала ФЛ от островков при росте *x* до 10%, возможно, связано со значительным (~ 3 раза) ростом доли поверхности, занятой островками, при увеличении *x* от 0 до 10% [6]. Рост доли поверхности, занятой островками, может приводить к более эффективному захвату островками носителей заряда и, как следствие, увеличению интенсивности сигнала ФЛ от островков при комнатной температуре. В случае, когда содержание Ge в слое

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  превышает 10%, уменьшение интенсивности сигнала ФЛ от островков связывается нами с уменьшением содержания Ge в островках с ростом  $x$  [6], которое приводит к ослаблению локализации носителей заряда в островках. Снижение содержания Ge в островках вызывает уменьшение разрыва в валентной зоне на границе кремний–островок и ослабляет локализацию дырок в островках. Снижение содержания Ge в островках с ростом  $x$  приводит также к уменьшению потенциальной ямы для электронов, находящейся в Si на гетерогранице с островком, которая вызвана проникновением упругих напряжений от островков в слои Si и глубина которой увеличивается с ростом рассогласования кристаллических решеток Si и островка [10].

#### 4. Заключение

Таким образом, в результате исследований влияния предосаждения напряженных слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x \leq 20\%$ ) на ФЛ самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001) выявлены различия в спектрах ФЛ островков различной формы. Обнаруженное смещение пика ФЛ от куполов в сторону меньших энергий по сравнению с пиком ФЛ от пирамид связывается со значительно большей высотой куполов, по сравнению с пирамидами. Обнаружено, что с увеличением содержания Ge в слое  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  выше 10% в широкой полосе ФЛ от островков появляются два отдельных пика, которые связываются с бесфононным и фононным оптическими переходами в островках. Их появление объясняется изменением типа ТО-фонона, участвующего в оптической рекомбинации, с  $\text{TO}_{\text{Ge-Ge}}$ -фонона на более коротковолновый  $\text{TO}_{\text{Si-Ge}}$ -фонон. Обнаружено, что зависимость интенсивности сигнала ФЛ от островков при комнатной температуре от доли Ge в слое  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  имеет немонотонный характер и достигает максимума при  $x = 10\%$ . Предполагается, что увеличение сигнала ФЛ от островков при повышении  $x$  до 10% связано с ростом относительной площади поверхности, занятой островками. Уменьшение сигнала ФЛ от островков при дальнейшем увеличении  $x$  выше 10% связывается с уменьшением содержания Ge в островках, которое приводит к ослаблению локализации носителей заряда в островке и на его гетерогранице.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-17336), программы BRNE (проект Y1 P-01-05) и программ Российской академии наук.

#### Список литературы

- [1] O.G. Schmidt, U. Denker, K. Eberl, O. Kienzle, F. Ernst. Appl. Phys. Lett., **77**, 2509 (2000).
- [2] S. Tong, J.L. Liu, J. Wan, Kang L. Wang. Appl. Phys. Lett., **80**, 1189 (2002).
- [3] R. Apetz, L. Vescan, H. Hartmann, C. Dieker, H. Lüth. Appl. Phys. Lett., **66**, 445 (1995).
- [4] M. Stoffel, U. Denker, O.G. Schmidt. Appl. Phys. Lett., **82**, 3236 (2000).

- [5] А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, А.И. Никифоров, С.В. Чайковский, С.А. Тийс. ФТП, **37**, 1383 (2003).
- [6] D.N. Lobanov, A.V. Novikov, N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, A.N. Yablonskiy, Z.F. Krasilnik, M. Stoffel, U. Denker, O.G. Schmidt. Optical Materials, **27**, 818 (2005).
- [7] J.W. Matthews, A.E. Blakeslee. J. Cryst. Growth, **27**, 118 (1974).
- [8] T.I. Kamins, E.C. Carr, R.S. Williams, S.J. Rosner. J. Appl. Phys., **81**, 211 (1997).
- [9] M. Goryll, L. Vescan, H. Lüth. Mater. Sci. Eng. B, **69-70**, 251 (2000).
- [10] В.Я. Алешин, Н.А. Бекин, Н.Г. Калугин, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.В. Постников, Х. Сейрингер. Письма ЖЭТФ, **67**, 46 (1998).
- [11] R. Magalhães-Paniago, G. Medeiros-Ribeiro, A. Malachias, S. Kycia, T.I. Kamins, R. Stan Williams. Phys. Rev. B, **66**, 245 312 (2002).
- [12] J. Weber, M.I. Alonso. Phys. Rev. B, **40**, 5683 (1989).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Effect of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ layer predeposition on growth of SiGe/Si(001) self-assembled islands

Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, M.V. Shaleev, A.N. Yablonskiy

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The photoluminescence of Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands on strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  layers ( $x \leq 20\%$ ) has been investigated. The photoluminescence signal from dome-islands has been observed to shift towards the lower energies relative to the photoluminescence signal from pyramid-islands, which is caused by a considerable increase of the island height after transformation of the island from the pyramidal to dome shape. We attribute the two maximums observed in the photoluminescence spectra from the islands grown on the  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  layer with  $x \geq 10\%$  to the nonphonon and TO-phonon assisted optical transitions in the islands. The appearance of two maxima in the photoluminescence spectra from the islands is co caused by the change in the TO-phonon type in radiative recombination, from  $\text{TO}_{\text{Ge-Ge}}$  phonon to  $\text{TO}_{\text{Si-Ge}}$  phonon with higher energy.