

# Сравнительный анализ фото- и электролюминесценции многослойных структур с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001)

© Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Шенгуров, В.Б. Шмагин, А.Н. Яблонский<sup>¶</sup>

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

(Получена 5 июня 2007 г. Принята к печати 20 июня 2007 г.)

Выполнены сравнительные исследования фото- и электролюминесценции многослойных структур с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001). Сигнал люминесценции островков наблюдается вплоть до комнатной температуры. Отжиг структур приводит к коротковолновому сдвигу пика люминесценции, величина которого зависит от температуры отжига, что позволяет контролируемо изменять спектральное положение пика люминесценции островков Ge(Si) в диапазоне 1.3–1.55 мкм. Увеличение температурного гашения фотолюминесценции островков с ростом температуры отжига связывается со снижением содержания Ge в островках в процессе отжига, что приводит к уменьшению глубины потенциальной ямы для дырок в островках. Продемонстрировано существенное подавление температурного гашения электролюминесценции островков Ge(Si) в неотожженной структуре при увеличении тока накачки.

PACS: 78.55.Ap, 78.60.Fi, 78.67.Hc, 81.07.Ta

## 1. Введение

В настоящее время ведутся активные работы по созданию на кремниевых подложках эффективных оптических компонентов, включая источники света, модуляторы и фотоприемники. Основным преимуществом подобных приборов является их совместимость с технологией современной кремниевой микроэлектроники. Большой интерес вызывает также возможность их работы в области длин волн 1.55 мкм, которая является „окном прозрачности“ современных волоконно-оптических линий связи. В последние годы рассматриваются несколько путей создания источников света на кремнии в области длин волн 1.55 мкм, таких как легирование кремния редкоземельными элементами [1,2] и рост короткопериодных сверхрешеток  $\text{Si}_m\text{Ge}_n$  [3]. Еще один перспективный путь создания светоизлучающих кремниевых устройств, работающих в диапазоне длин волн 1.3–1.55 мкм, основан на использовании структур с самоформирующимися наноостровками Ge(Si)/Si(001) (квантовыми точками). К настоящему времени для структур этого типа сообщалось о достижении при комнатной температуре внешней квантовой эффективности  $\sim 4 \cdot 10^{-4}$  [4].

В данной работе мы представляем результаты сравнительного анализа фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) многослойных структур с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001). Использование оптической и токовой накачки позволяет лучше понять механизмы рекомбинации носителей заряда в этом классе гетероструктур. Также в работе рассматривается влияние термического отжига на спектральное положение, интенсивность и температурное гашение ФЛ и ЭЛ наноостровков Ge(Si)/Si.

## 2. Методика эксперимента

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии из твердых источников на подложках Si(001) *p*-типа, легированных бором до концентрации  $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Рост структур начинался с осаждения контактного слоя  $p^+$ -Si толщиной 200 нм, легированного бором до концентрации  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Затем осаждался слой нелегированного Si толщиной 50 нм, на котором при температуре 600°C формировалась решетка, состоящая из 20 слоев самоформирующихся островков Ge(Si), разделенных слоями нелегированного Si толщиной 20 нм. Образование островков происходило в результате осаждения слоя Ge с эквивалентной толщиной 8.5–6.5 монослоев (МС) ( $1 \text{ МС} = 6.27 \cdot 10^{14} \text{ атомов/см}^2$ ). Из-за влияния полей упругих напряжений островков нижележащих слоев размеры островков при одном и том же количестве осажденного Ge увеличиваются с увеличением номера слоя [5]. Поэтому для повышения однородности островков по размерам количество осаждаемого Ge уменьшалось при росте каждого последующего слоя на  $\sim 0.1 \text{ МС}$ . Рост структур заканчивался осаждением слоя нелегированного Si толщиной 50 нм и контактного слоя  $n^+$ -Si толщиной 200 нм, легированного сурьмой до концентрации  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

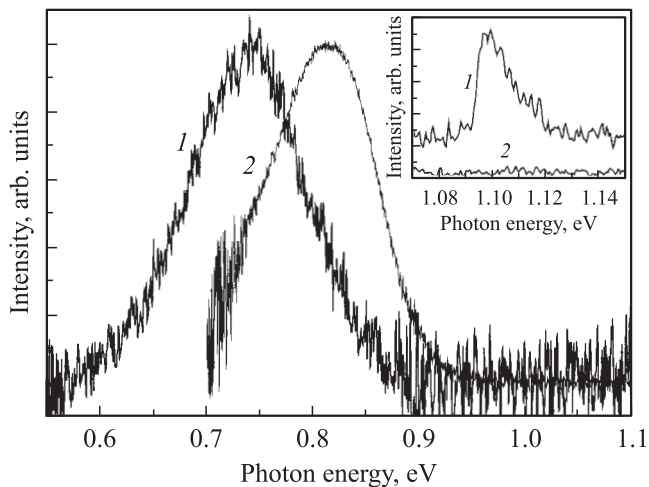
Выращенные структуры раскалывались на отдельные кусочки (чипы). Часть чипов подвергалась термическому отжигу в атмосфере азота в течение 1 мин при температурах 650 и 700°C. Для измерения ЭЛ использовались чипы размером  $2 \times 2 \text{ мм}$ , на поверхности которых был сформирован омический контакт Au/Ti диаметром 0.5 мм. Вторым омический контакт формировался нанесением сплошной пленки алюминия на обрат-

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

ную сторону подложки. Измерения ЭЛ проводились в импульсном режиме, чтобы избежать перегрева образцов. Длительность импульсов составляла 4 мс, период повторения — 25 мс. Измерения ФЛ были выполнены на образцах без металлических контактов с помощью фурье-спектрометра BOMEM DA3-36. Для возбуждения сигнала ФЛ использовалось излучение лазера Nd:YAG с длиной волны  $\lambda = 532$  нм. Спектры ФЛ и ЭЛ регистрировались с помощью охлаждаемых жидким азотом Ge- и InSb-фотоприемников.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

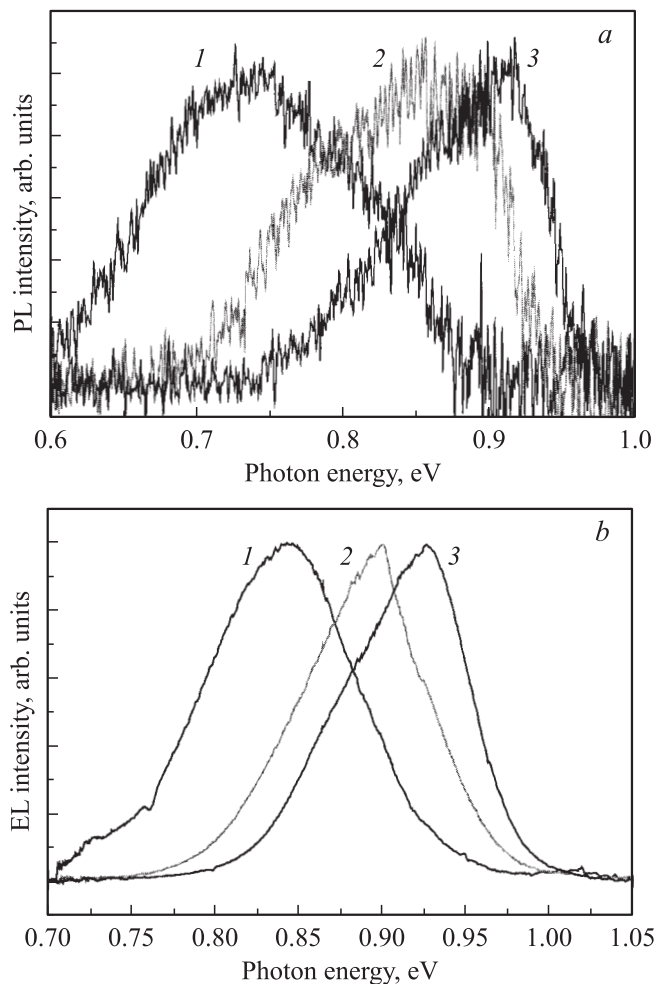
На рис. 1 представлены спектры ФЛ и ЭЛ диодных структур с Ge(Si)-островками, измеренные при 77 К с использованием InSb- и Ge-фотоприемников соответственно. В спектрах всех исследованных структур с Ge(Si)-островками наблюдался пик люминесценции в области энергий 0.6–0.9 эВ, который связывался с рекомбинацией носителей заряда в Ge(Si)-островках. Поскольку пик ФЛ островков был смещен относительно пика ЭЛ в сторону меньших энергий (рис. 1) и не попадал целиком в рабочую область высокочувствительного Ge-детектора, для измерения спектров ФЛ использовался менее чувствительный (на  $\sim 2.5$  порядка), но более широкополосный InSb-приемник. Предполагается, что обнаруженное расхождение в положении пика от островков в спектрах ФЛ и ЭЛ связано с более эффективной накачкой носителей заряда в структуру с помо-



**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции (1) и электролюминесценции (2) структуры с Ge(Si)-островками, выращенной при 600 °С. Спектры измерены при  $T = 77$  К. Спектры нормированы на спектральную характеристику приемников и на максимум сигнала Ge(Si)-островков. Мощность оптической накачки при записи спектров фотолюминесценции составляла  $2 \text{ Вт/см}^2$ , плотность тока при измерении электролюминесценции —  $0.75 \text{ А/см}^2$ . На вставке — спектры в области межзонных переходов в кремнии, измеренные с помощью Ge-приемника.

щью электрического тока по сравнению с оптической накачкой. Это предположение основано на том факте, что сигнал как ФЛ [6], так и ЭЛ [7] Ge(Si)-островков смещается в область больших энергий с увеличением мощности накачки. Это обусловлено связью наблюдаемого сигнала люминесценции островков с оптической рекомбинацией дырок, локализованных в островках, и электронов, находящихся в окружающей кремниевой матрице на гетерогранице II типа с островком [8,9]. При используемом в измерениях ФЛ лазере Nd:YAG мощностью 0.2 Вт с диаметром лазерного пучка  $\sim 3$  мм количество фотогенерируемых электронно-дырочных пар в образце составляет  $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ . В случае измерения ЭЛ такое же количество носителей заряда в единицу времени инжектируется в структуру при токе накачки  $0.75 \text{ А/см}^2$ . Следовательно, спектры ФЛ и ЭЛ, приведенные на рис. 1, получены при примерно одинаковом темпе генерации носителей заряда в структуре. Однако следует отметить, что толщина нелегированной области исследованной структуры, содержащей 20 периодов Ge(Si)-островков, составляет 640 нм. В то же время глубина проникновения излучения лазера Nd:YAG с длиной волны  $\lambda = 532$  нм в кремний составляет  $\sim 1.7$  мкм [10], и значительная часть возбуждающего лазерного излучения поглощается в контактных областях структуры и в Si-подложке. Хорошо известно, что вследствие безызлучательной оже-рекомбинации носителей заряда в контактных  $n^+$ - и  $p^+$ -областях структуры эти области служат естественным стоком для фотогенерируемых носителей заряда. В результате лишь часть электронно-дырочных пар, генерируемых излучением лазера Nd:YAG, излучательно рекомбинирует в Ge(Si)-островках. В то же время при токовой накачке носители заряда инжектируются из контактных  $n^+$ - и  $p^+$ -областей структуры непосредственно в нелегированную часть структуры, содержащую островки, что делает такую накачку более эффективной по сравнению с оптической. Это предположение подтверждается тем фактом, что в спектрах ЭЛ наблюдается только сигнал от островков, тогда как в спектрах ФЛ наблюдается также линия, связанная с межзонной рекомбинацией носителей заряда в объемном кремнии (см. вставку на рис. 1).

В результате вышеизложенных различий между токовой и оптической накачкой при одном и том же темпе генерации носителей заряда их концентрация в области, содержащей островки, будет значительно выше в случае токовой накачки. Большая концентрация дырок в островках при измерениях ЭЛ приводит к заполнению дырками возбужденных энергетических уровней в островках и излучательной рекомбинации дырок с этих уровней. Кроме того, рост концентрации дырок в островках приводит к кулоновскому изгибу зон в окружающей матрице кремния, что также ведет к увеличению энергии оптической рекомбинации в полупроводниковых структурах с гетерограницей II типа [11].



**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции (а) и электролюминесценции (б) диодной структуры с Ge(Si)-островками до отжига (1) и после отжига при 650°C (2) и 700°C (3). Спектры измерены при  $T = 77$  К с использованием приемников InSb (а) и Ge (б), нормированы на спектральную характеристику приемников и на максимум сигнала островков Ge(Si). Мощность оптической накачки 2 Вт/см<sup>2</sup>. Плотность тока накачки 0.75 А/см<sup>2</sup>.

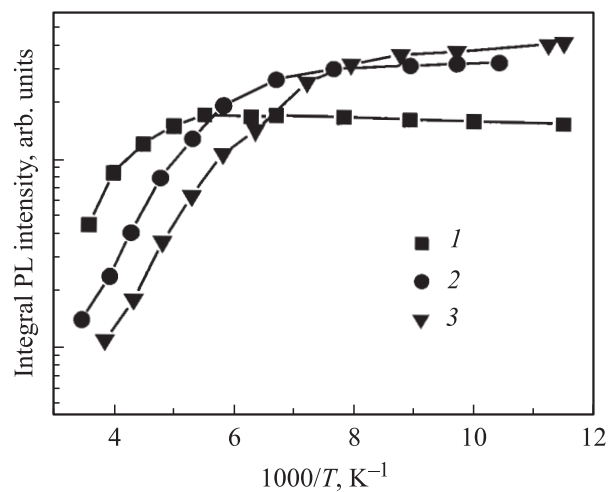
Было обнаружено, что отжиг выращенных структур приводит к смещению пиков ФЛ и ЭЛ Ge(Si)-островков в сторону больших энергий, причем величина сдвига растет с увеличением температуры отжига (см. рис. 2). Так, максимум пика ФЛ островков смещается с 0.74 эВ для неотожженной структуры до 0.85 и 0.91 эВ для структур, отожженных при 650 и 700°C соответственно. Данное смещение пиков ФЛ и ЭЛ связывается с дополнительной диффузией Si в островки во время отжига, что приводит к увеличению ширины запрещенной зоны островков и, как следствие, к увеличению энергии оптических переходов, связанных с ними [12,13].

Необходимо отметить, что после отжига существенно уменьшается различие в положении пиков ФЛ и ЭЛ Ge(Si)-островков при одинаковом уровне накачки — с 65 мэВ для неотожженной структуры до 10–15 мэВ

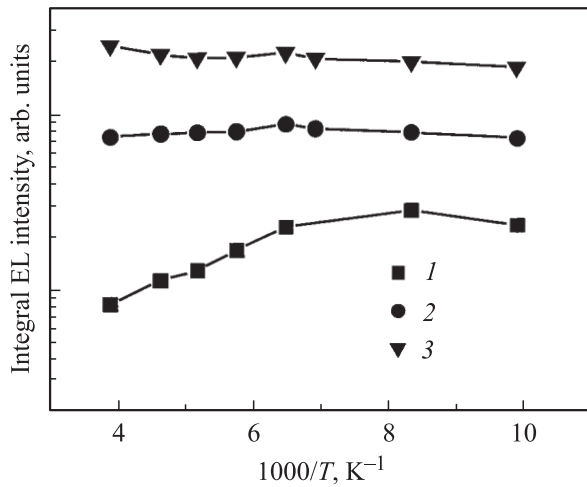
для структуры, отожженной при 700°C (рис. 2, а и 2, б). Этот эффект объясняется увеличением в отожженных структурах плотности энергетических состояний дырок в островках, что связано с ростом размеров островков вследствие взаимодиффузии атомов Si и Ge в процессе отжига. Увеличение плотности состояний приводит к меньшему заполнению дырками возбужденных энергетических уровней с ростом интенсивности накачки и, следовательно, к более слабой зависимости положения максимума сигнала люминесценции островков от мощности накачки.

Помимо смещения пика ФЛ в область больших энергий отжиг структур приводит к существенному возрастанию интенсивности ФЛ островков при низких температурах измерения (рис. 3). Данный эффект связан, по-видимому, с отжигом точечных дефектов в выращенных структурах, что приводит к снижению концентрации центров безызлучательной рекомбинации, связанных с дефектами.

Температурное гашение сигнала ФЛ наблюдается как для неотожженного, так и для отожженных образцов, что можно видеть из представленных на рис. 3 температурных зависимостей интегральной интенсивности сигнала ФЛ Ge(Si)-островков. Анализ этих зависимостей показал, что энергия активации температурного гашения ФЛ островков падает с 185 мэВ для неотожженной структуры до 130 и 100 мэВ для структур, отожженных при 650 и 700°C соответственно. Для интерпретации полученных значений энергии активации по модели упругонапряженного слоя был выполнен расчет зонной диаграммы в окрестности Ge(Si)-островка. При расчетах использовались экспериментальные данные о составе и остаточных упругих напряжениях в островках, полученные методом рентгеноструктурного анализа в приближении упругонапряженного двумерного слоя [14]. В рамках этого приближения среднее содержание Ge в островках



**Рис. 3.** Температурные зависимости интегральной интенсивности фотолуминесценции Ge(Si)-островков для диодной структуры до отжига (1) и после отжига при 650°C (2) и 700°C (3). Мощность оптической накачки 2 Вт/см<sup>2</sup>.



**Рис. 4.** Температурные зависимости интегральной интенсивности электролюминесценции Ge(Si)-островков в неотожженной структуре при плотности тока накачки, А/см<sup>2</sup>: 1 — 0.75, 2 — 2.5, 3 — 7.5.

и остаточные упругие напряжения островков составили  $(45 \pm 3)\%$  и  $(80 \pm 20)\%$  соответственно. Энергия основного уровня дырок в смачивающем слое была определена по положению бесфонного пика от этого слоя в спектрах ФЛ структуры со смачивающим слоем Ge (не приведенных здесь), выращенной и отожженной при тех же температурах, что и исследуемые диодные структуры с Ge(Si)-островками. Вычисленная разница в положении основных уровней дырок в островках и смачивающем слое хорошо совпадает с полученным значением энергии активации температурного гашения ФЛ островков как для неотожженного образца, так и для образцов, подвергнутых термическому отжигу. Исходя из этого можно предположить, что температурное гашение сигнала ФЛ Ge(Si)-островков связано с термическим выбросом дырок из островка в смачивающий слой. Уменьшение энергии активации температурного гашения в результате отжига структур можно связать с более существенным по сравнению со смачивающим слоем снижением содержания Ge в островках в процессе отжига. Это приводит к сокращению разрыва валентной зоны на гетерогранице кремния с островком и, как следствие, к уменьшению разницы в положениях основных уровней дырок в островке и смачивающем слое.

Было обнаружено, что сигнал ЭЛ Ge(Si)-островков в неотожженных структурах характеризуется гораздо меньшим температурным гашением, чем сигнал ФЛ. Кроме того, температурное гашение ЭЛ, в отличие от ФЛ, существенно зависит от мощности накачки (рис. 4). Так, если интегральная интенсивность ФЛ островков падает более чем в 4 раза при повышении температуры с 77 до 300 К (рис. 3) во всем исследованном диапазоне значений мощности возбуждающего излучения ( $0.2\text{--}1500\text{ Вт/см}^2$ ), то интенсивность ЭЛ в

том же интервале температур падает в 2.8 раз при плотности тока накачки  $0.75\text{ А/см}^2$ , практически не зависит от температуры измерения при плотности тока  $2.5\text{ А/см}^2$  и возрастает с увеличением температуры при плотности тока  $7.5\text{ А/см}^2$  (рис. 4).

Возрастание интенсивности сигнала ЭЛ с увеличением температуры в кремниевых диодах наблюдалось ранее как для сигнала от самоформирующихся Ge(Si)-островков [15], так и для межзонной (краевой) ЭЛ в объемном кремнии [16,17]. Также в работе [15] сообщалось об аналогичной нашим результатам зависимости температурного гашения ЭЛ Ge(Si)-островков от плотности тока накачки. Для объяснения полученных результатов авторами этих работ были предложены различные физические механизмы: уменьшение вклада безызлучательной рекомбинации по механизму Шокли–Рида с ростом концентрации носителей заряда; уменьшение влияния безызлучательной оже-рекомбинации при высоких температурах [15]; подавление каналов безызлучательной рекомбинации и возрастание в связи с этим времени жизни носителей заряда при комнатной температуре [17]. Однако для окончательного выявления физической природы зависимости температурного гашения сигнала ЭЛ Ge(Si)-островков в исследуемых структурах от тока накачки требуется проведение дополнительных исследований.

Внешняя квантовая эффективность ЭЛ неотожженной диодной структуры с островками при комнатной температуре и токе накачки  $7.5\text{ А/см}^2$  составила  $2 \cdot 10^{-5}$ . Следует отметить, что никакой дополнительной оптимизации структуры для достижения высокой внешней квантовой эффективности излучательной рекомбинации не производилось. Кроме того, в связи с сохраняющейся (вплоть до максимальных использованных значений плотности тока) сверхлинейной зависимостью интегральной интенсивности сигнала ЭЛ от плотности тока накачки можно ожидать повышения внешней квантовой эффективности в исследуемых структурах при увеличении тока накачки.

#### 4. Заключение

В данной работе выполнены исследования фото- и электролюминесценции многослойных структур Ge(Si)/Si(001) с самоформирующимися островками. Сигналы фото- и электролюминесценции Ge(Si)-островков в многослойных структурах наблюдаются вплоть до комнатной температуры. Обнаружено, что при равных уровнях оптической и электрической накачки (температура генерации носителей заряда) положение максимума сигнала от островков в спектрах ЭЛ смещено в сторону больших энергий по сравнению со спектрами ФЛ, что связывается с более высокой эффективностью токовой накачки по сравнению с оптической.

Показано, что отжиг выращенных структур приводит к смещению сигнала фото- и электролюминесценции

островков в сторону больших энергий, причем величина сдвига зависит от температуры отжига, что позволяет контролируемо изменять спектральное положение пика люминесценции островков в диапазоне длин волн 1.3–1.55 мкм. Смещение сигнала люминесценции вызвано дополнительной диффузией Si в островки во время отжига, что приводит к увеличению энергии оптических переходов в островках. Обнаруженное уменьшение энергии активации температурного гашения ФЛ островков с увеличением температуры отжига также связывается со снижением содержания Ge в островках в процессе отжига, которое приводит к уменьшению глубины потенциальной ямы для дырок в островках.

Обнаружено, что степень температурного гашения Эл Ge(Si)-островков значительно слабее температурного гашения ФЛ и существенно зависит от тока накачки. Внешняя квантовая эффективность Эл Ge(Si)-островков при комнатной температуре для неотожженной структуры Ge(Si)/Si(001) составила  $2 \cdot 10^{-5}$  при максимальном использованном токе накачки  $7.5 \text{ A/cm}^2$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-02-17336-а и 06-02-08118-офи), Федерального агентства по образованию (проект РНП.2.1.1.1370) и программ Российской академии наук.

## Список литературы

- [1] G. Franzo, S. Coffa, F. Priolo, C. Spinella. *J. Appl. Phys.*, **81**, 2784 (1997).
- [2] Z.F. Krasilnik, B.A. Andreev, D.I. Kryzhkov, L.V. Krasilnikova, V.P. Kuznetsov, D.Yu. Remizov, V.B. Shmagin, M.V. Stepihova, A.N. Yablonskiy, T. Gregorkievicz, N.Q. Vinh, W. Jantsch, V.Yu. Timoshenko, D.M. Zhigunov. *J. Mater. Res.*, **21** (3), 574 (2006).
- [3] H. Presing, H. Kibbel, M. Jaros, R.M. Turton, U. Mencezgar, G. Abstreiter, H.G. Grimmeiss. *Semicond. Sci. Technol.*, **7**, 127 (1992).
- [4] V.G. Talalaev, G.E. Cirlin, A.A. Tonkikh, N.D. Zakharov, P. Werner. *Phys. Status Solidi A*, **198**, R4 (2003).
- [5] O.G. Schmidt, U. Denker, S. Christiansen, F. Ernst. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2614 (2002).
- [6] P. Boucaud, S. Sauvage, M. Elkurdi, E. Mercier, T. Brunhies, V. Le Thanh, D. Bouchier, O. Kermarrec, Y. Campidelli, D. Bensahell. *Phys. Rev. B*, **64**, 155 310 (2001).
- [7] L. Vescan, T. Stoica, O. Chretien, M. Goryll, E. Mateeva, A. Mück. *J. Appl. Phys.*, **87**, 7275 (2000).
- [8] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин, Н.Г. Калугин, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.В. Постников, X. Сейрингер. *Письма ЖЭТФ*, **67**, 46 (1998).
- [9] S. Fukatsu, H. Sunamura, Y. Shiraki, S. Komiyama. *Thin Sol. Films*, **321**, 65 (1998).
- [10] A. Dargys, J. Kundrotas. *Handbook on Physical properties of Ge, Si, GaAs and InP* (Science and Encyclopedia Publishers, Vilnius, 1994).
- [11] C.-K. Sun, G. Wang, J.E. Bowers, B. Brar, H.-R. Blank, H. Kroemer, M.H. Pilkuhn. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1543 (1996).

- [12] M.W. Dashiell, U. Denker, O.G. Schmidt. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2261 (2001).
- [13] H. Sunamura, N. Usami, Y. Shiraki, S. Fukatsu. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 3024 (1995).
- [14] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский. *Письма ЖЭТФ*, **6**, 425 (2002).
- [15] W.-H. Chang, A.T. Chou, W.Y. Chen, H.S. Chang, T.M. Hsu, Z. Pei, P.S. Chen, S.W. Lee, L.S. Lai, S.C. Lu, M.-J. Tsai. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2958 (2003).
- [16] Wai Lek Ng, M.A. Lourenco, R.M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao, K.P. Homewood. *Nature*, **410**, 192 (2001).
- [17] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Б.А. Захарченя, И.Н. Ясневич. *ФТТ*, **46** (1), 10 (2004).

Редактор Т.А. Полянская

## Comparative study of photo- and electroluminescence from multilayer structures with self-assembled Ge(Si)/Si(001) islands

*Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasilnik, K.E. Kudryavtsev, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, M.V. Shaleev, D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, A.N. Yablonskiy*

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

**Abstract** Comparative study of photo- and electroluminescence from multilayer structures with self-assembled Ge(Si)/Si(001) islands has been performed. The luminescence signal from the islands has been observed up to the room temperature. Annealing of the structures leads to a blue shift of the luminescence peak with the shift value depending on the annealing temperature, which allows for controllable change in the spectral position of the island-related luminescence peak in the range 1.3–1.55  $\mu\text{m}$ . The rise in the temperature of photoluminescence quenching observed with an increase of the annealing temperature is associated with a drop of the Ge content in the islands during the annealing, which brings to a decrease in the depth of the potential well for the holes in the islands. Substantial suppression of the temperature quenching of the island-related electroluminescence with an increase of the pump current density has been observed for the as-grown Ge(Si)/Si(001) structure.