

# Электрoluminesценция структур с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si), заключенными между напряженными слоями кремния

© Н.А. Байдакова<sup>+</sup>, А.В. Новиков<sup>+,\*</sup>, М.В. Шалеев<sup>+</sup>, Д.В. Юрасов<sup>+</sup>,  
Е.Е. Морозова<sup>+</sup>, Д.В. Шенгуров<sup>+</sup>, З.Ф. Красильник<sup>+,\*</sup>

<sup>+</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>\*</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: banatale@ipmras.ru

(Получена 27 апреля 2016 г. Принята к печати 10 мая 2016 г.)

Впервые исследована электрoluminesценция структур с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si), выращенными на релаксированных буферах SiGe/Si(001) и заключенными между слоями напряженного кремния. Сигнал электрoluminesценции от исследованных структур наблюдается в области длин волн 1.6–2.0 мкм, более длинноволновой области спектра по сравнению со структурами с островками Ge(Si), сформированными на подложках Si(001). Это позволяет рассматривать структуры с островками Ge(Si), заключенными между напряженными слоями Si, в качестве кандидатов для создания на кремнии источников излучения на диапазон длин волн > 1.55 мкм.

## 1. Введение

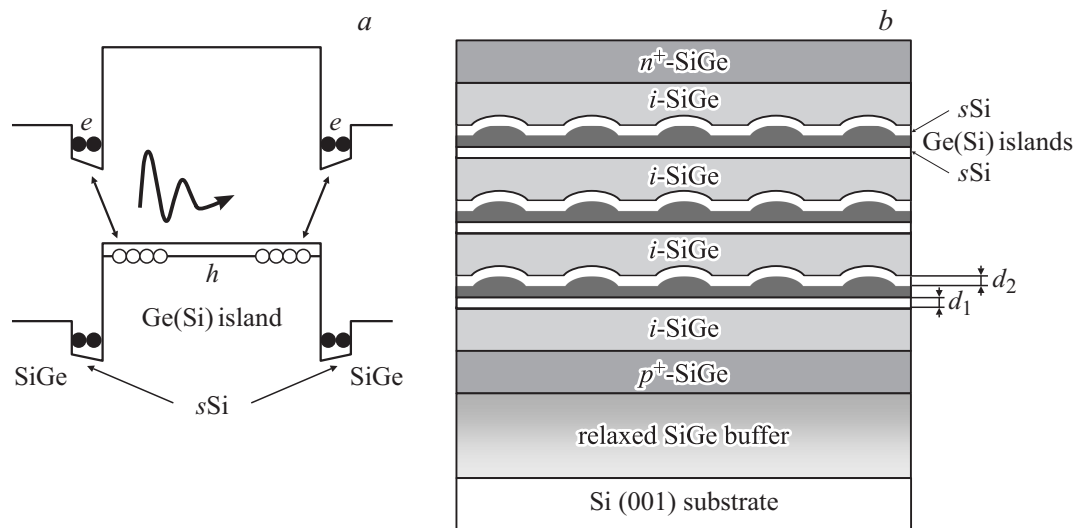
В настоящее время ведутся активные работы по расширению рабочего диапазона кремниевых оптоэлектронных устройств в диапазон длин волн > 1.55 мкм [1–3]. Полагается, что это позволит значительно расширить пропускную способность оптических каналов связи [3] и использовать кремниевую оптоэлектронику в устройствах детектирования широкого спектра химических и биологических веществ, в медицинских целях и устройствах безопасности [1,2]. В этой связи актуальной становится задача создания светоизлучающих структур для спектральной области > 1.55 мкм, совместимых с современной кремниевой технологией. В качестве источников излучения на данный диапазон рассматриваются слои твердого раствора Ge<sub>1-y</sub>Sn<sub>y</sub>, сформированные на Si-подложках, для которых при комнатной температуре наблюдается сигнал фото- и электрoluminesценции в диапазоне длин волн 1.55–1.9 мкм [4–6]. К несомненным плюсам данного типа структур следует отнести возможность управления спектральным положением линии люминесценции за счет изменения количества олова в растворе. Однако создание подобных структур сопряжено с рядом трудностей, связанных с композиционной нестабильностью раствора Ge<sub>1-y</sub>Sn<sub>y</sub> при  $y > 0.005$  и сегрегацией Sn во время роста [7]. В то же время излучение в диапазоне длин волн > 1.55 мкм наблюдалось ранее в спектрах фотoluminesценции (ФЛ) структур с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si), выращенными на релаксированных буферных слоях SiGe/Si(001) и заключенными между слоями напряженного (растянутого) Si (далее — островки Ge(Si)/sSi) [8,9]. В данном типе структур сигнал люминесценции связан с пространственно непрямой излучательной рекомбинацией дырок, заключенных в островках, и электронов, локализован-

ных в потенциальных ямах, образованных слоями напряженного кремния на гетерогранице островков (рис. 1, а). По сравнению со структурами с островками Ge(Si), сформированными на подложках Si(001) (далее — островки Ge(Si)/Si(001)), островки Ge(Si)/sSi характеризуются значительным увеличением интенсивности сигнала ФЛ и уменьшением его ширины при температуре  $T = 77$  К за счет большой пространственной локализации электронов вблизи островков [8,10] (рис. 1, а). Кроме этого, в структурах с островками Ge(Si)/sSi появляется возможность управления спектральным положением линии ФЛ от островков за счет изменения толщины слоев sSi, причем положение сигнала ФЛ островков Ge(Si)/sSi может изменяться в достаточно широком спектральном диапазоне 1.55–2.2 мкм [9,11]. Одним из практических преимуществ светоизлучающих структур с островками Ge(Si)/sSi является возможность их формирования на подложках „напряженный кремний-на-изоляторе“ [12], которые активно используются для создания КМОП (на основе комплементарных структур металл–окисел–полупроводник) транзисторов с высокой подвижностью носителей заряда и малыми токами утечки [13,14]. Однако ранее все исследования излучательных свойств структур с островками Ge(Si)/sSi были выполнены при их оптической накачке.

В настоящей работе приводятся результаты первых исследований электрoluminesцентных свойств структур с островками Ge(Si)/sSi, сформированными на релаксированных буферных слоях SiGe/Si(001).

## 2. Эксперимент

В работе исследовались диодные  $p-i-n$ -структуры на основе SiGe, в  $i$ -области которых находилась решетка с наноструктурами Ge(Si), заключенными между



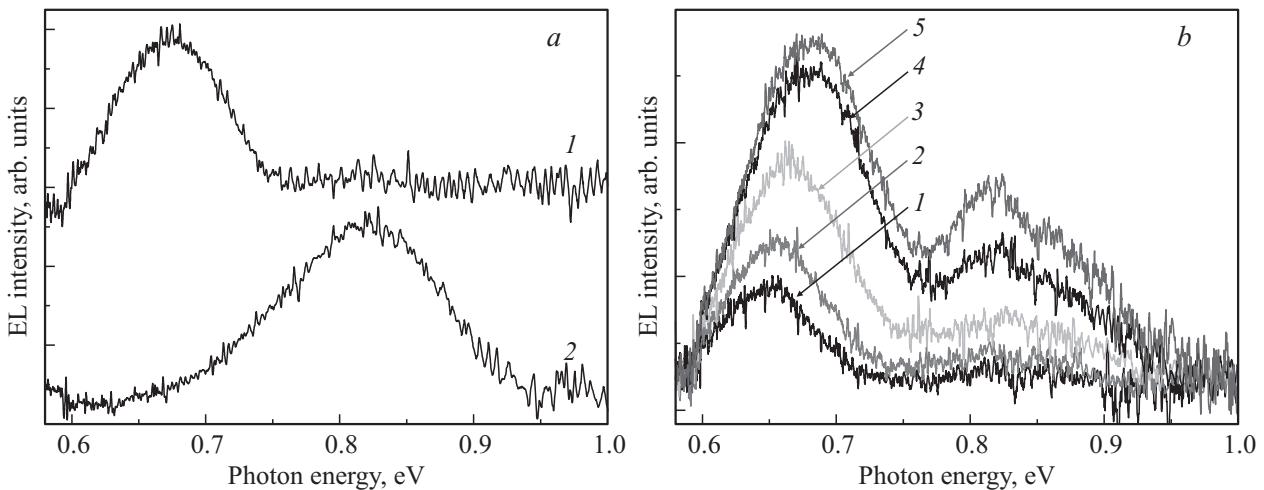
**Рис. 1.** Зонная диаграмма в окрестности островков Ge(Si)/sSi (a) и поперечное сечение диодных структур с островками Ge(Si)/sSi, сформированными на релаксированном буфере SiGe (b).

напряженными слоями Si (рис. 1, b). Структуры формировались методом молекулярно-пучковой эпитаксии из твердых источников на градиентном релаксированном буфере SiGe/Si(001), доля Ge в верхнем слое которого составляла 27%. Релаксированные буферы SiGe/Si(001) были выращены методом газовой эпитаксии и после роста подвергнуты химико-механической полировке для уменьшения шероховатости их поверхности [15]. Рост диодных структур на буферах SiGe/Si(001) начинался с осаждения при  $650^\circ\text{C}$  контактного слоя  $p^+$ -SiGe толщиной 300 нм, легированного бором до концентрации  $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Контактный слой SiGe формировался ненапряженным, так как содержание германия в нем соответствовало содержанию германия в верхнем слое градиентного релаксированного буфера SiGe. Затем выращивался слой нелегированного SiGe толщиной 50 нм, на котором при температуре  $T_g = 630^\circ\text{C}$  формировалась решетка, состоящая из 3 слоев самоформирующихся островков Ge(Si), заключенных между слоями напряженного кремния с номинальными толщинами  $d_1 = d_2 = 2 \text{ нм}$  над и под островками (рис. 1, b). Образование островков происходило в результате осаждения слоя Ge с эквивалентной толщиной 12 монослоев (МС) ( $1 \text{ МС} = 6.8 \cdot 10^{14} \text{ атомов/см}^2$ ). Момент образования островков контролировался с помощью дифракции быстрых электронов. Слои островков были разделены слоями нелегированного SiGe толщиной  $d_{\text{spacer}} = 100 \text{ нм}$ . Известно, что при формировании многослойных структур с островками Ge(Si) на подложках Si(001) начиная с определенной толщины разделительного слоя Si, которая зависит от параметров островков и температуры роста, можно пренебречь влиянием нижних слоев островков на параметры островков в верхних слоях [16]. Для исследованных структур с островками Ge(Si)/sSi подтверждением отсутствия при  $d_{\text{spacer}} = 100 \text{ нм}$  влияния нижних слоев с островками на последующий рост

структуры является одинаковая критическая толщина двумерного роста (6.5 МС) для всех формируемых слоев островков. Это позволяет утверждать, что слои островков Ge(Si)/sSi формировались независимо, т.е. каждый из слоев островков должен обладать характеристиками, соответствующими однослойной структуре с островками Ge(Si), выращенной при аналогичных условиях. Выполненные ранее исследования показали, что при используемых условиях роста (температуре роста и количестве осажденного Ge) на поверхности структур формируется массив куполообразных островков с малым разбросом по размерам [17,18]. Более подробно особенности формирования островков Ge(Si)/sSi описаны в [17,19]. Рост диодных структур заканчивался осаждением слоя нелегированного SiGe толщиной 50 нм и контактного слоя  $n^+$ -SiGe толщиной 200 нм, легированного сурьмой до концентрации  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

На полученных диодных структурах с островками Ge(Si)/sSi методами оптической литографии и плазмохимического травления были сформированы планарные мезы размером  $1 \times 1 \text{ мм}$ . Нижний омический контакт формировался напылением металлов на слой  $p^+$ -SiGe и окружал мезаструктуру по периметру, верхний контакт формировался напылением металлов на верхний контактный слой  $n^+$ -SiGe мезаструктуры и представлял собой сетку с контактной площадкой. Такая форма верхнего контакта позволяет добиться однородного протекания тока через структуру, при этом сохранив значительную часть поверхности мезы свободной от металла для лучшего вывода излучения из структуры. Создание омических контактов к диодным структурам осуществлялось за счет магнетронного осаждения контактных слоев Au/Ti и взрывной литографии.

Измерения спектров электролюминесценции (ЭЛ) диодных структур проводились в импульсном режиме со стабилизацией по напряжению. Длительность импульса



**Рис. 2.** *a* — спектры электролюминесценции (EL) диодных структур с островками Ge(Si)/sSi (1) и Ge(Si)/Si(001) (2) при плотности тока накачки  $5 \text{ A/cm}^2$ ; для удобства спектры нормированы на максимум интенсивности сигнала от островков и разнесены по вертикали. *b* — спектры электролюминесценции (EL) структуры с островками Ge(Si)/sSi при токах накачки  $2.5$  (1),  $5$  (2),  $10$  (3),  $20$  (4),  $30 \text{ A/cm}^2$  (5). Все спектры получены при  $T = 77 \text{ K}$ .

накачки составляла 4 мс, период 25 мс. Проведение измерений в импульсном режиме позволило избежать перегрева образца при больших токах накачки. Спектры ЭЛ регистрировались с использованием охлаждаемого детектора OMA-V на основе линейки InGaAs-фотодиодов (диапазон 0.8–2.1 мкм) и решеточного монохроматора ACTON 2300i, на входе которого стоял оптический фильтр ИКС-1. Спектры ЭЛ, приведенные в статье, были нормированы на спектральную характеристику системы регистрации. Поверхность исследованного образца располагалась перпендикулярно оптической оси системы, и детектирование сигнала ЭЛ выполнялось с поверхности структуры.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* приведен спектр ЭЛ структуры с островками Ge(Si)/sSi, сформированными на релаксированном буфере SiGe, измеренный при 77 К. На этом же рисунке для сравнения представлен спектр ЭЛ диодной структуры с Ge(Si)/Si(001), исследованной ранее в работе [20]. При небольших токах накачки в спектрах ЭЛ исследованных структур с островками Ge(Si)/sSi доминирует сигнал в области 0.6–0.75 эВ (1.6–2.1 мкм), связанный с непрямой в реальном пространстве излучательной рекомбинацией дырок  $h$ , заключенных в островках, и электронов  $e$ , локализованных в напряженных Si-слоях (рис. 1, *a*) [8]. Сравнение спектров ЭЛ структур с островками Ge(Si)/sSi и Ge(Si)/Si(001) показывает, что сигнал ЭЛ островков Ge(Si)/sSi значительно сдвинут в область меньших энергий (больших длин волн) по сравнению с сигналом островков Ge(Si)/Si(001) (рис. 2, *a*). Таким образом, использование островков Ge(Si)/sSi в светоизлучающих SiGe-гетероструктурах позволяет значительно расширить их спектральный диапазон в сторону средней

инфракрасной области вплоть до 2 мкм. При этом наблюдаемый сигнал ЭЛ от островков Ge(Si)/sSi является наиболее длинноволновым из известных авторам результатов по электролюминесценции SiGe-гетероструктур, выращенных на Si-подложках. Отметим, что дальнейшее смещение сигнала в область длин волн  $> 2 \text{ мкм}$  может быть достигнуто за счет увеличения толщины слоев напряженного Si над и под островками [9]. Кроме спектрального сдвига в длинноволновую область сигнал ЭЛ от островков Ge(Si)/sSi в сравнении с сигналом ЭЛ от островков Ge(Si)/Si(001) имеет заметно меньшую ширину линии люминесценции (при плотности тока возбуждения  $5 \text{ A/cm}^2$  ширина линий ЭЛ на полувысоте составляет 85 и 150 мэВ соответственно) (рис. 2, *a*). Данное уменьшение ширины линии ЭЛ связывается с доминированием в спектре ЭЛ островков Ge(Si)/sSi сигнала, связанного с излучательной рекомбинацией носителей заряда без участия фононов [8]. Увеличение вероятности таких переходов вызвано локализацией электронов в потенциальных ямах, созданных тонкими слоями sSi на гетерогранице с островками [8] (рис. 1, *a*). Дополнительного уменьшения ширины линии ЭЛ от островков Ge(Si)/sSi можно достигнуть за счет подбора соотношения номинальных толщин осаждаемого Si над и под островками с учетом их различного диффузионного размытия при росте островков Ge(Si)/sSi [21]. Сравнение спектров ЭЛ структур с островками Ge(Si)/sSi и Ge(Si)/Si, полученных при 77 К, показывает, что, несмотря на различие в количестве периодов в данных структурах почти в 7 раз (3 и 20 слоев островков соответственно), интенсивности сигналов ЭЛ островков Ge(Si)/sSi и Ge(Si)/Si при малых токах накачки различаются менее чем в 2 раза. Это указывает на более высокую эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда в структурах с островками Ge(Si)/sSi при низкой температуре, которая связывается с эф-

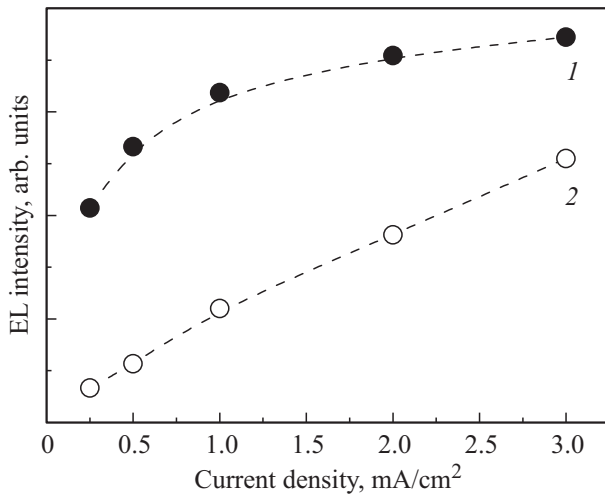


Рис. 3. Зависимости от плотности тока накачки интенсивности электролюминесценции (EL) в максимуме сигнала островков Ge(Si)/sSi (1) и линии дислокационной люминесценции D1 (2).

фактивной пространственной локализацией носителей заряда обоих знаков в этих структурах (рис. 1, *a*).

При увеличении тока накачки наблюдается увеличение ширины линии ЭЛ островков Ge(Si)/sSi и смещение максимума в сторону больших энергий (рис. 2, *b*). Данное поведение типично для излучающих структур с островками Ge(Si) и связано преимущественно с заполнением тяжелыми дырками высокоэнергетических состояний в островках [22], а также с неоднородностью островков по размерам и составу [23]. Кроме этого, при увеличении тока накачки в спектрах ЭЛ исследованных Ge(Si)/sSi-структур появляется сигнал в области энергий 0.8–0.9 эВ, связываемый с дислокациями релаксированного буфера SiGe (так называемая „линия D1“ [24]) (рис. 2, *b*). Рост тока накачки сопровождается насыщением сигнала ЭЛ островков Ge(Si)/sSi и линейным ростом интенсивности сигнала ЭЛ дислокаций буфера SiGe (рис. 3). При этом сигнал ЭЛ от островков остается доминирующим при всех используемых в работе токах накачки (рис. 3).

С увеличением температуры от 77 К до комнатной наблюдается значительное гашение сигнала ЭЛ островков Ge(Si)/sSi (сигнал от островков при комнатной температуре в 6–7 раз слабее, чем при 77 К). При этом тестовые структуры с островками Ge(Si)/Si(001) характеризуются гораздо меньшим температурным гашением электролюминесценции (уменьшение интенсивности сигнала ЭЛ всего в 2–3 раза при увеличении температуры от 77 К до комнатной). Одной из причин различий в температурной стабильности сигнала ЭЛ островков Ge(Si) в исследованных структурах может быть лучшее кристаллическое качество структур, сформированных на подложках Si(001), по сравнению со структурами, выращенными на релаксированных буферах SiGe. Используемые в работе буферы SiGe имели плотность прорастающих дислокаций на уровне

$10^4$ – $10^5$  см<sup>-2</sup> [25], что является низким значением для релаксированных буферов SiGe/Si(001), но на несколько порядков превышает плотность дислокаций в стандартных подложках Si(001). За счет высокого кристаллического качества структур с островками Ge(Si)/Si(001) время жизни инжектированных в активную область структуры носителей заряда может составлять единицы микросекунд [26]. Благодаря большому времени жизни носители заряда, покинувшие окрестность островков Ge(Si) в результате термической активации, за время жизни могут быть повторно захвачены островками и в дальнейшем рекомбинировать в них излучательно. Полагается, что более высокая дефектность структур с островками Ge(Si)/sSi, сформированными на релаксированном буфере SiGe, приводит к росту вероятности безызлучательной рекомбинации носителей заряда, покинувших островки в результате термической активации, и, как следствие, к сильному температурному гашению сигнала люминесценции островков Ge(Si)/sSi. Частично проблема повышения кристаллического качества структур с островками Ge(Si)/sSi может быть решена за счет замены релаксированных буферов SiGe/Si(001) на структуры „напряженный кремний-на-изоляторе“ [12].

Еще одной возможной причиной сильного температурного гашения сигнала люминесценции от островков Ge(Si)/sSi является уменьшение глубины потенциальной ямы для дырок в них по сравнению со структурами Ge(Si)/Si(001). Это связано с уменьшением энергетического разрыва в валентной зоне при переходе от роста на подложках Si(001) к росту на буферах SiGe [27]. Также к уменьшению глубин потенциальных ям для носителей заряда в островках Ge(Si)/sSi и слоях sSi ведет их более сильное по сравнению с островками Ge(Si)/Si(001) диффузионное расплывание при заращивании островков. Данный факт подтверждается исследованиями структур, выращенных на различных подложках, методами просвечивающей электронной микроскопии. В результате диффузионного расплывания при заращивании островков Ge(Si)/sSi происходит уменьшение их высоты и толщины слоя sSi над островками. Это ведет к выталкиванию уровней размерного квантования носителей заряда в них (дырок в островках и электронов в слоях sSi (рис. 1, *b*)) к границам соответствующих зон матрицы SiGe и, как следствие, уменьшению глубины потенциальных ям для носителей заряда. Полагается, что для подавления температурного гашения сигнала люминесценции от островков Ge(Si)/sSi необходима оптимизация условий их заращивания.

#### 4. Заключение

В работе впервые выполнены исследования спектров электролюминесценции структур с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si) на релаксированных буферах SiGe/Si(001), заключенными между тонкими слоями напряженного (растянутого) Si. Показано, что данный тип светоизлучающих SiGe-гетероструктур характеризуется более длинноволновым и более узким сигналом

ЭЛ по сравнению со структурами с нанозостровками Ge(Si), выращенными на подложках Si(001). Сигнал ЭЛ острозков Ge(Si)/sSi наблюдается в диапазоне длин волн 1.6–2.0 мкм, что позволяет рассматривать данный тип структур в качестве кандидатов для создания на кремнии источников излучения в диапазоне длин волн > 1.55 мкм. Несмотря на сильное температурное гашение, сигнал ЭЛ от острозков Ge(Si)/sSi регистрируется вплоть до комнатной температуры. Для подавления температурного гашения сигнала люминесценции острозков Ge(Si)/sSi предлагается использовать для их роста структуры „напряженный кремний-на-изоляторе“ и оптимизировать условия зарашивания острозков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-02-01157 и 16-32-00459).

## Список литературы

- [1] R. Soref. *Nature Photonics*, **4**, 495 (2010).
- [2] M. Nedeljkovic, A.Z. Khokhar, Y. Hu, X. Chen, J. Soler Penades, S. Stankovic, H.M.H. Chong, D.J. Thomson, F.Y. Gardes, G.T. Reed, G.Z. Mashanovich. *Opt. Mater. Express*, **3** (9), 1205 (2013).
- [3] D.J. Thomson, L. Shen, J.J. Ackert, E. Huante-Ceron, A.P. Knights, M. Nedeljkovic, A.C. Peacock, G.Z. Mashanovich. *Opt. Express*, **22** (9), 10 825 (2014).
- [4] J. Mathews, R.T. Beeler, J. Tolle, C. Xu, R. Roucka, J. Kouvetakis, J. Menéndez. *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 221 912 (2010).
- [5] R. Roucka, J. Mathews, R.T. Beeler, J. Tolle, J. Kouvetakis, J. Menéndez. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 061 109 (2011).
- [6] M. Oehme, J. Werner, M. Gollhofer, M. Schmid, M. Kaschel, E. Kasper, J. Schulze. *IEEE. Phot. Technol. Lett.*, **23**(23), 1751 (2011).
- [7] R.R. Lieten, J.W. Seo, S. Decoster, A. Vantomme, S. Peters, K.C. Bustillo, E.E. Haller, M. Menghini, J.-P. Locquet. *Appl. Phys. Lett.*, **102** 052 106 (2013).
- [8] 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**, 011 914 (2006).
- [9] 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**, S29 (2007).
- [10] M.B. Шалев, A.B. Новиков, H.A. Байдакова, A.H. Яблонский, O.A. Кузнецов, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник. *ФТП*, **45** (2), 202 (2011).
- [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**, 021 916 (2007).
- [12] H.A. Байдакова, A.I. Бобров, M.H. Дроздов, A.B. Новиков, Д.А. Павлов, M.B. Шалев, П.А. Юнин, Д.В. Юрасов. *ФТП*, **49** (8), 1129 (2015).
- [13] T.A. Langdo, M.T. Currie, A. Lochtefeld, R. Hammond, J.A. Carlin, M. Erdtmann, G. Braithwaite, V.K. Yang, C.J. Vineis, H. Badawi, M.T. Bulsara. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4256 (2003).
- [14] T.A. Langdo, M.T. Currie, Z.-Y. Cheng, J.G. Fiorenza, M. Erdtmann, G. Braithwaite, C.W. Leitz, C.J. Vineis, J.A. Carlin, A. Lochtefeld, M.T. Bulsara, I. Lauer, D.A. Antoniadis, M. Somerville. *Sol. St. Electron.*, **48**, 1357 (2004).
- [15] H.B. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, O.A. Кузнецов, A.B. Новиков, B.A. Перовошиков, M.B. Шалев. *Микроэлектроника*, **34** (4), 243 (2005).
- [16] O.G. Schmidt, K. Eberl. *Phys.Rev. B*, **61** (20), 13721 (2000).
- [17] M.B. Шалев, A.B. Новиков, A.H. Яблонский, O.A. Кузнецов, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник. *ФТП*, **41** (2), 172 (2007).
- [18] M.B. Шалев, A.B. Новиков, A.H. Яблонский, O.A. Кузнецов, Ю.Н. Дроздов, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник. *ФТП*, **41** (11), 1375 (2007).
- [19] M.V. Shaleev, A.V. Novikov, D.V. Yurasov, J.M. Hartmann, O.A. Kuznetsov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik. *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 151 601 (2003).
- [20] Д.Н. Лобанов, A.B. Новиков, K.E. Кудрявцев, M.B. Шалев, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник, H.Д. Захаров, P. Werner. *ФТП*, **46** (11), 1448 (2012).
- [21] M.B. Шалев, A.B. Новиков, H.A. Байдакова, A.H. Яблонский, O.A. Кузнецов, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник. *ФТП*, **45** (2), 202 (2011).
- [22] P. Boucaud, S. Sauvage, M. Elkurdi, E. Mercier, T. Brunhes, V. Le Thanh, D. Bouchier. *Phys. Rev. B*, **64**, 155 310 (2001).
- [23] M. Brehm, M. Grydlik, F. Hackl, E. Lausecker, T. Fromherz, G. Bauer. *Nanoscale Res. Lett.*, **5**, 1868 (2010).
- [24] H. Lee, S.-H. Choi. *J. Appl. Phys.*, **85** 1771 (1999).
- [25] H.B. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, O.A. Кузнецов, A.B. Новиков, B.A. Перовошиков, M.B. Шалев. *ФТП*, **47** (1), 44 (2005).
- [26] A.H. Яблонский, H.A. Байдакова, A.B. Новиков, Д.Н. Лобанов, M.B. Шалев. *ФТП*, **49** (11) 1458 (2015).
- [27] Ya. Shiraki, A. Sakai. *Surf. Sci. Reports*, **59**, 153 (2005).

Редактор Л.В. Шаронова

## Electroluminescence of self-assembled Ge(Si) islands embedded in a tensile-strained Si layer

N.A. Baidakova<sup>+</sup>, A.V. Novikov<sup>+,\*</sup>, M.V. Shaleev<sup>+</sup>, D.V. Yurasov<sup>+</sup>, E.E. Morozova<sup>+</sup>, D.V. Shengurov<sup>+</sup>, Z.F. Krasilnik<sup>+,\*</sup>

<sup>+</sup> Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>\*</sup> Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The electroluminescence of structures with self-assembled Ge(Si) islands grown on relaxed SiGe/Si(001) buffer and embedded into a tensile-strained Si layer was studied for the first time. Electroluminescence signal from investigated structures is observed in the wavelength range 1.6–2.0 μm, in the more long-wave region as compared to the signal from Ge(Si) islands grown on Si(001) substrates. This makes the structures with Ge(Si) islands embedded in the tensile-strained Si layers promising candidates for mid-infrared silicon based optoelectronic emitters.