

Влияние толщины кремниевого разделительного слоя на электролюминесценцию многослойных структур с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001)

© Д.Н. Лобанов[¶], А.В. Новиков, К.Е. Кудрявцев, М.В. Шалеев, Д.В. Шенгуров,
З.Ф. Красильник, Н.Д. Захаров*, Р. Werner*

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

* Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik,
Weinberg 2, 06120 Halle/Saale, Germany

(Получена 25 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Представлены результаты исследований электролюминесценции многослойных $p-i-n$ -структур с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001). Обнаружена немонотонная зависимость интенсивности сигнала электролюминесценции от островков, наблюдаемого при комнатной температуре, от толщины разделительного слоя Si. Наибольшая интенсивность сигнала электролюминесценции наблюдается для структур с толщиной разделительного слоя Si 15–20 нм. Обнаруженное существенное уменьшение сигнала электролюминесценции от островков в структурах с толстыми разделительными слоями Si (> 20 нм) связывается с формированием в них дефектных областей. Наблюдаемое уменьшение интенсивности сигнала электролюминесценции в структурах с тонкими слоями Si связывается с уменьшением доли Ge в островках в этих структурах, которое вызвано увеличением диффузии Si в островки с ростом упругих напряжений в структуре.

1. Введение

Большой прогресс в производительности современных компьютерных систем, вызванный их миниатюризацией, обуславливает все возрастающую потребность в высокоскоростных каналах передачи данных, в том числе на одном чипе, между разными блоками интегральной схемы. Оптические межсоединения могут помочь преодолеть традиционные ограничения электрических проводных соединений, такие как нагрев, временные задержки, сложную архитектуру, наводки и т.д. Особый интерес вызывает разработка эффективных излучателей, приемников и модуляторов на кремниевых подложках, что позволяет интегрировать их в современную кремниевую микро- и наноэлектронику. Одними из перспективных объектов в этой области являются гетероструктуры с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001), так как в различных работах сообщалось о наблюдении в них сигнала электролюминесценции (ЭЛ) и фотопроводимости (ФП) в области длин волн 1.3–1.55 мкм [1–6]. Эта область длин волн является рабочей для современных оптоволоконных линий связи. Кроме того, объемный кремний в этой области длин волн прозрачен, что позволяет использовать кремниевые волноводы для внутричиповых соединений. Лучшие результаты в области формирования светоизлучающих диодных структур с островками Ge(Si), излучающими в области длин волн 1.3–1.8 мкм, были достигнуты в работе [6], в которой значение внешней квантовой эффективности ЭЛ при комнатной температуре составило $\sim 0.4\%$.

Проведенные ранее исследования фотолюминесценции (ФЛ) структур с островками Ge(Si) показали силь-

ную зависимость сигнала ФЛ островков от их параметров. На положение, интенсивность и температурное гашение сигнала ФЛ от островков оказывают влияние такие параметры, как размеры, форма, состав островков и их поверхностная плотность [7–10]. В предыдущей работе нами были проведены исследования зависимости сигнала ЭЛ островков Ge(Si) от температуры роста [11]. Было установлено, что наибольшая интенсивность сигнала люминесценции при комнатной температуре в области длин волн 1.3–1.55 мкм характерна для структур с островками, выращенными при 600°C [11]. Из литературы хорошо известно, что кроме температуры роста важным технологическим параметром, оказывающим существенное влияние как на параметры самих островков Ge(Si) в многослойных структурах, так и на их оптические свойства, является толщина слоя Si, разделяющего соседние слои островков Ge(Si) [12]. С одной стороны, известно [12], что увеличение толщины слоя Si должно приводить к уменьшению упругих напряжений в структуре. Уменьшение упругих напряжений ведет к снижению стимулированной ими диффузии Si в островки в верхних слоях многослойных структур и, как следствие, к росту доли Ge в островках [12]. В результате роста доли Ge в островках увеличивается глубина потенциальной ямы для дырок в них и, как следствие, увеличивается вероятность локализации дырок в островках при комнатной температуре. Кроме этого, снижение упругих напряжений в структурах с толстыми разделительными слоями Si, из общих соображений, должно уменьшать вероятность появления дефектов кристаллической решетки, ведущих к их релаксации. Оба этих фактора (рост доли Ge в островках и возможное уменьшение концентрации дефектов кри-

[¶] E-mail: dima@ipm.sci-nnov.ru

сталлической решетки) должны приводить к увеличению интенсивности сигнала ЭЛ от островков при комнатной температуре с ростом толщины слоя Si, разделяющего соседние слои с островками Ge(Si).

Однако, с другой стороны, в литературе имеются сообщения о росте эффективности излучательной рекомбинации носителей заряда в многослойных структурах с островками Ge(Si) при уменьшении толщины разделительных слоев Si до значений в единицы нанометров [1]. Причиной этого может быть увеличение деформации растяжения Si разделительных слоев Si полями упругих напряжений от зарощенных островков [13]. В результате деформации слоев Si растет глубина потенциальной ямы для электронов в них [13], что приводит к более эффективной пространственной локализации электронов вблизи островков. Высказывалась также идея о том, что в многослойных структурах с вертикально упорядоченными островками, разделенными тонкими слоями Si, возможно формирование мини-зон для носителей заряда [1]. Образование мини-зон будет способствовать увеличению перекрытия волновых функций электрона и дырок и, как следствие, росту вероятности их излучательной рекомбинации. Однако рост доли Si в островках Ge(Si) в многослойных структурах с тонкими разделительными слоями Si и высокие упругие напряжения в таких структурах могут приводить к уменьшению интенсивности сигнала ЭЛ от островков, особенно при высоких температурах измерения.

В настоящей работе исследовано влияние толщины слоя Si, разделяющего соседние слои с наноструктурами Ge(Si) в многослойных структурах, на электролюминесценцию многослойных диодных структур GeSi/Si(001) с самоформирующимися наноструктурами.

2. Методика эксперимента

Исследуемые структуры представляли собой $p-i-n$ -диоды и были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии из твердых источников на подложках Si(001) p -типа проводимости, легированного бором до концентрации $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Рост структур начинался с осаждения контактного p^+ -Si слоя толщиной 200 нм, легированного бором до концентрации $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Затем осаждался слой нелегированного Si толщиной 50 нм, на котором формировалась 20-периодная решетка, состоящая из слоев самоформирующихся островков Ge(Si), разделенных слоями нелегированного Si. Толщина разделительных слоев Si изменялась в диапазоне $d(\text{Si}) = 7-40 \text{ нм}$. Решетка с островками была выращена при 600°C , поскольку предыдущие исследования показали, что данная температура является оптимальной для достижения максимальной интенсивности сигнала ЭЛ от островков при комнатной температуре [11,14]. Подробнее формирование решетки с островками описано в [15]. Рост структур заканчивался осаждением слоя нелегированного Si толщиной 50 нм и контактного

слоя n^+ -Si толщиной 200 нм, легированного сурьмой до концентрации $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Исследования структур методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) были выполнены на микроскопах Philips CM20 и JEM 4010 при ускоряющих напряжениях 200 и 400 кВ соответственно. Для измерения ЭЛ на поверхности образцов со стороны структуры формировался омический контакт Au/Ti диаметром 0.5 мм. Второй омический контакт формировался путем нанесения сплошной пленки Al на обратную сторону подложки. Структуры с контактами раскалывались на отдельные кусочки (чипы) размером $2 \times 2 \text{ мм}$. Измерения спектров ЭЛ проводились на чипах в импульсном режиме, чтобы избежать перегрева образцов. Длительность импульсов составляла 4 мс, период повторения 25 мс. Спектры ЭЛ регистрировались с помощью решеточного монохроматора и охлаждаемого Ge: Au-фотоприемника.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследования спектров ЭЛ показали, что во всех $p-i-n$ -структурах с островками Ge(Si) при комнатной температуре наблюдался сигнал ЭЛ от островков в области энергий фотонов 0.75–1.0 эВ (длины волн $\lambda \approx 1.25-1.65 \text{ мкм}$) (рис. 1). Было обнаружено, что интенсивность сигнала ЭЛ от островков, наблюдаемого при комнатной температуре, немонотонно зависит от толщины разделительного слоя Si (рис. 2). Наибольшая интенсивность сигнала ЭЛ наблюдается от структур, в которых слои с островками разделены слоями Si толщиной $d(\text{Si}) = 15-20 \text{ нм}$ (рис. 2). При увеличении толщины $d(\text{Si}) > 20 \text{ нм}$ наблюдается существенное падение интенсивности сигнала ЭЛ от островков Ge(Si), а следовательно, и эффективности излучательной рекомбинации при

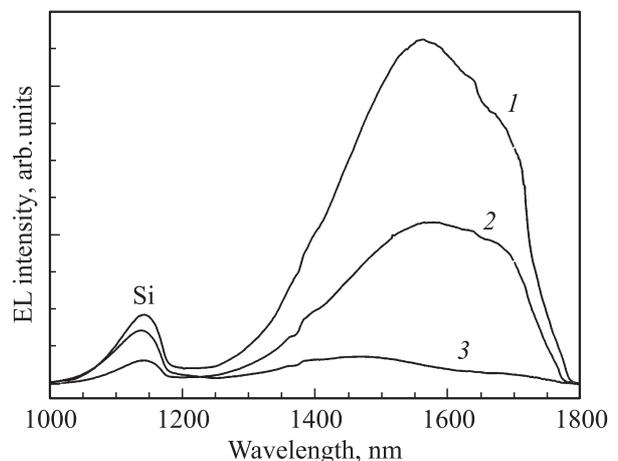


Рис. 1. Спектры электролюминесценции (EL) структур с островками Ge(Si) и с толщиной кремниевого разделительного слоя $d(\text{Si}) = 16$ (1), 13 (2), 28 нм (3). Температура измерений комнатная, плотность тока накачки 5 А/см^2 .

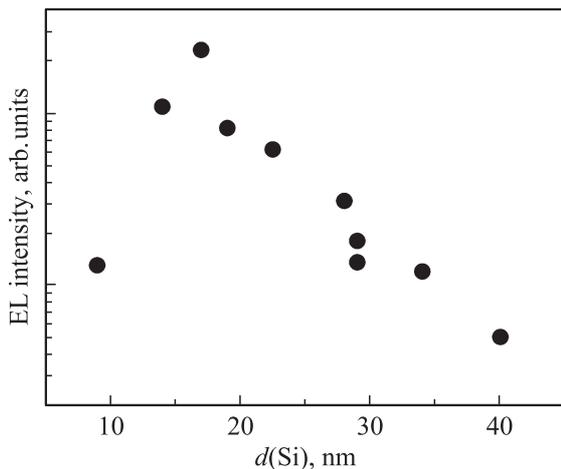


Рис. 2. Зависимость величины максимума интенсивности сигнала электролюминесценции (EL) островков Ge(Si) от толщины кремниевого разделительного слоя. Данные получены из спектров ЭЛ, измеренных при комнатной температуре и плотности тока накачки 5 A/cm^2 .

комнатной температуре. Падение интенсивности сигнала ЭЛ от островков в структурах с толстыми разделительными слоями Si связывается с формированием дефектных областей в таких структурах (рис. 3, *a*). Методами ПЭМ обнаружено, что формирование дефектной области начинается с образования дефекта кристаллической решетки в одном из островков Ge(Si) (рис. 3, *a*). При этом дефектный островок может сформироваться как на начальном этапе роста, в первых от подложки слоях структуры, так и в последних слоях многослойной структуры. Формирование дефекта кристаллической решетки в одном островке приводит к частичной, локальной релаксации упругих напряжений в области вблизи этого островка. В результате такой релаксации при формировании последующих слоев с островками происходит преимущественная диффузия атомов Ge в дефектную область структуры. При накоплении в дефектной области атомов Ge происходит рост упругой энергии в этой области, который приводит к формированию новых дефектов. Как следствие, размер дефектной области значительно увеличивается по мере роста структуры. В результате формирования дефектов в одном островке Ge(Si) в первых слоях многослойной структуры ведет к формированию в верхних слоях структуры дефектных областей, размер которых значительно превосходит размер отдельного островка (рис. 3, *a*). Преимущественная диффузия Ge в дефектные области и образование самих дефектов приводит к развитию рельефа поверхности структуры, который хорошо виден на ПЭМ-снимках (рис. 3, *a*). Было обнаружено, что характерный рельеф поверхности, связанный с образованием дефектных областей, наблюдается и при исследовании поверхности структур методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) (рис. 3, *b*). На АСМ-снимках поверхности многослойных структур с островками Ge(Si) присутствуют неровности

в виде "макропирамид". Их поверхностная концентрация коррелирует с концентрацией дефектных областей в структурах, определенных с помощью ПЭМ. Это позволяет связать обнаруженные особенности в морфологии поверхности многослойных структур с дефектами в них. Возможность визуализировать дефекты многослойных структур с островками Ge(Si) с помощью АСМ позволяет оперативно оценивать кристаллическое качество выращенных структур и концентрацию дефектных областей в них. Для установления природы и механизма образования дефектных областей в многослойных структурах с островками Ge(Si), разделенными толстыми слоями Si, необходимо проведение детальных исследований особенностей зарождения и роста островков Ge(Si) в верхних слоях многослойных структур.

Предполагается, что дефектные области являются центрами безызлучательной рекомбинации носителей

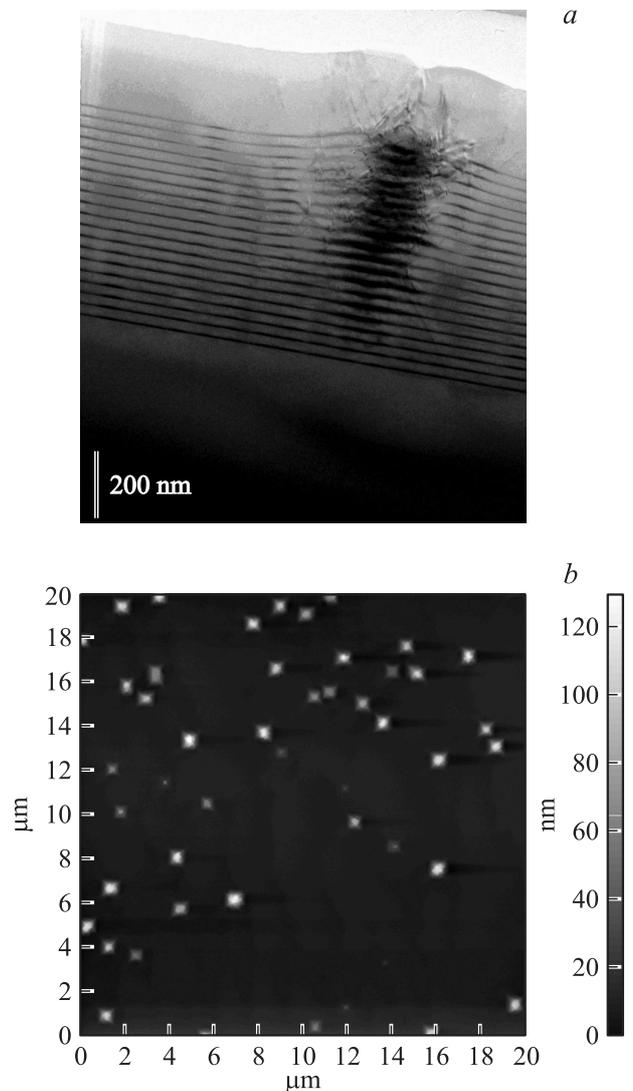


Рис. 3. ПЭМ-снимок (*a*) и АСМ-изображение поверхности (*b*) диодной многослойной структуры с островками Ge(Si) и с $d(\text{Si}) = 28 \text{ нм}$.

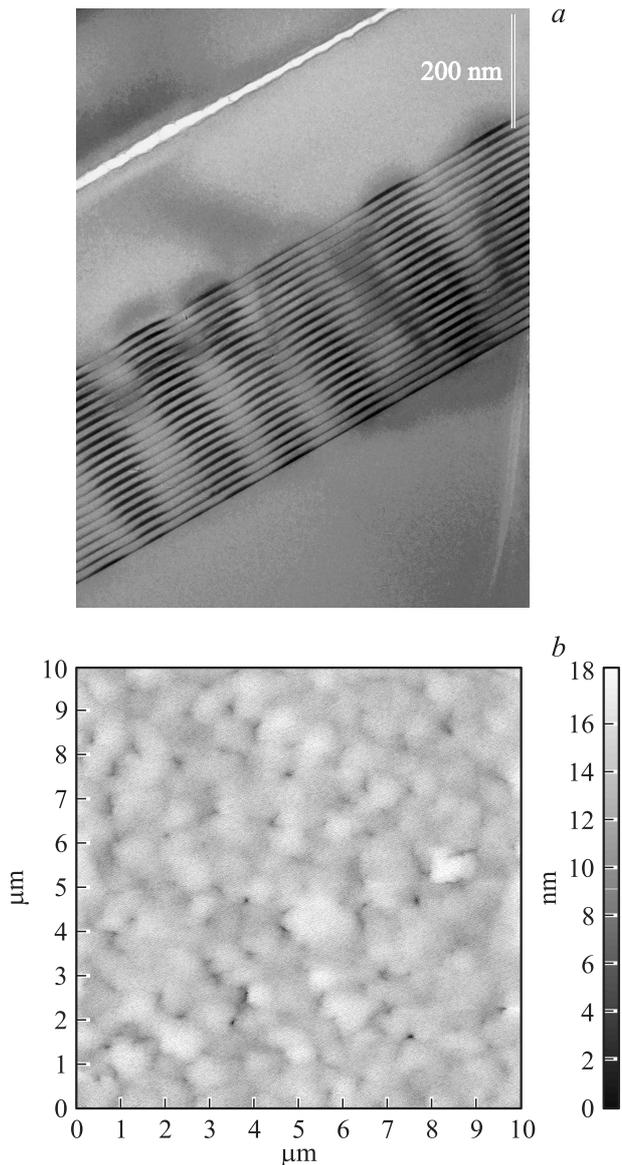


Рис. 4. ПЭМ-снимок (а) и АСМ-изображение поверхности (b) диодной многослойной структуры с островками Ge(Si) и с $d(\text{Si}) = 13 \text{ нм}$.

заряда. Безызлучательная рекомбинация носителей заряда в этих областях приводит к снижению интенсивности сигнала ЭЛ от островков при комнатной температуре для структур с $d(\text{Si}) > 20 \text{ нм}$ (рис. 1 и 2). Так как размеры дефектных областей существенно больше размеров отдельного островка Ge(Si), дефектные области могут занимать значительную часть активной области диодных структур и определять эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда в них.

Исследования многослойных структур с островками Ge(Si) с толщиной разделительного слоя $d(\text{Si}) < 20 \text{ нм}$ позволили установить, что концентрация дефектных областей в них значительно меньше, чем в структурах с $d(\text{Si}) > 20 \text{ нм}$ (рис. 4). Это подтверждается

методами ПЭМ (рис. 4, а), не выявившими дефектных областей в таких структурах. Кроме того, исследования методами АСМ не обнаружили формирования на поверхности структур с $d(\text{Si}) < 20 \text{ нм}$ макрообъектов, которые бы свидетельствовали о выходе на поверхность дефектных областей, как в случае структур с $d(\text{Si}) > 20 \text{ нм}$ (рис. 4, b). Предполагается, что значительное уменьшение числа дефектов в многослойных структурах с $d(\text{Si}) < 20 \text{ нм}$ может быть связано с несколькими причинами. Как показали исследования методами ПЭМ, в случае тонких разделительных слоев Si между соседними слоями островков поверхность роста становится существенно непланарной (рис. 4, а). Это может приводить к дополнительной релаксации упругих напряжений на неоднородностях поверхности роста. Кроме того, как показывают наши предыдущие исследования, содержание Ge в островках снижается с уменьшением $d(\text{Si})$, что также должно приводить к уменьшению упругих напряжений в структуре и снижению вероятности формирования дефектов [11,14].

Обнаружено, что при уменьшении толщины разделительного слоя до значений $d(\text{Si}) < 15 \text{ нм}$ интенсивность сигнала ЭЛ от островков при комнатной температуре начинает значительно уменьшаться (рис. 1 и 2). Измерения спектров ЭЛ диодных структур с тонкими разделительными слоями показали, что с уменьшением толщины разделительного слоя Si сигнал ЭЛ от островков смещается в область меньших длин волн. Смещение сигнала от островков в область меньших длин волн при уменьшении толщины разделительного слоя Si связывается с ростом упругих напряжений в структуре и, как следствие, с уменьшением содержания Ge в островках, которое вызвано ускоренной упругими напряжениями диффузией Si в островки. Ранее было показано, что сигнал фото- и электролюминесценции от островков Ge(Si) в одно- и многослойных структурах при комнатной температуре падает с уменьшением доли Ge в островках, вызванным повышением температуры роста или отжигом структур [7,11,15]. Этот результат связывается с уменьшением глубины потенциальной ямы для дырок в островках Ge(Si) при уменьшении содержания Ge в них, что ведет к падению вероятности локализации дырок в островках при комнатной температуре. Полагается, что именно уменьшением доли Ge в островках и связанным с ним уменьшением глубины потенциальной ямы для дырок в островках вызвано существенное падение интенсивности сигнала ЭЛ от островков при комнатной температуре в структурах с $d(\text{Si}) < 15 \text{ нм}$.

4. Заключение

В работе представлены результаты исследования влияния толщины разделительного слоя Si на ЭЛ многослойных диодных $p-i-n$ -структур Ge(Si)/Si(001) с самоформирующимися островками. Обнаружена немонотон-

ная зависимость интенсивности сигнала ЭЛ от структур с островками, наблюдаемого при комнатной температуре, от толщины разделительного слоя Si. Наибольшая интенсивность сигнала ЭЛ наблюдается для структур с толщиной разделительного слоя Si 15–20 нм, что связывается с низкой концентрацией дефектов кристаллической решетки в них и высокой долей Ge в островках для данного типа структур. Обнаруженное существенное уменьшение сигнала ЭЛ от островков в структурах с толстыми (> 20 нм) разделительными слоями Si вызвано формированием в них дефектных областей. Полагается, что дефектные области, размер которых существенно больше размеров отдельного островка Ge(Si), являясь центрами безызлучательной рекомбинации, определяют эффективность излучательной рекомбинации носителей заряда в структурах. Падение интенсивности сигнала ЭЛ в структурах с тонкими слоями Si связывается с уменьшением доли Ge в островках в этих структурах, которое вызвано увеличением диффузии Si в островки с ростом упругих напряжений в структуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-02-12100-офи-м и 10-02-91334-ННИО_а), Министерства образования и науки России (ГК № 16.552.11.7007) и программ РАН.

Список литературы

- [1] V.G. Talalaev, G.E. Cirlin, A.A. Tonkikh, N.D. Zakharov, P. Werner. *Phys. Status Solidi A*, **198**, R4 (2003).
- [2] А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, В.В. Кириенко, Н.П. Степина, А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, С.В. Чайковский, В.А. Володин, М.Д. Ефремов, М.С. Сексенбаев, Т.С. Шамирзаев, К.С. Журавлев, ФТП, **38** (10), 1265 (2004).
- [3] 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).
- [4] M. Stoffel, U. Denker, O.G. Schmidt. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3232 (2003).
- [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**, 1822 (2000).
- [6] M.H. Liao, C.-Y. Yu, T.-H. Guo, C.-H. Lin, C.W. Liu. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **27**, 252 (2006).
- [7] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский. *Письма ЖЭТФ*, **76**, 425 (2002).
- [8] U. Denker, M. Stoffel, O.G. Schmidt, H. Sigg, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 454 (2003).
- [9] W.-H. Chang, W.-Y. Chen, A.-T. Chou, T.-M. Hsu, P.-S. Chen, Z. Pei, L.-S. Lai. *J. Appl. Phys.*, **93**, 4999 (2003).
- [10] V. Yam, Vinh Le Thanh, Y. Zheng, P. Boucaud, D. Bouchier. *Phys. Rev. B*, **63**, 033 313 (2001).
- [11] Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, К.Е. Кудрявцев, Д.В. Шенгуров, Ю.Н. Дроздов, А.Н. Яблонский, В.Б. Шмагин, З.Ф. Красильник, N.D. Zakharov, P. Werner. *ФТП*, **43**, 332 (2009).
- [12] M. De Seta, G. Capellini, F. Evangelisti, C. Ferrari, L. Lazzarini, G. Salviati, R.W. Peng, S.S. Jiang. *J. Appl. Phys.*, **102**, 043 518 (2007).
- [13] O.G. Schmidt, K. Eberl, Y. Rau. *Phys. Rev. B*, **62**, 16 715 (2000).
- [14] D.N. Lobanov, A.V. Novikov, K.E. Kudryavtsev, A.N. Yablonskiy, A.V. Antonov, Yu.N. Drozdov, D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, Z.F. Krasilnik, N.D. Zakharov, P. Werner. *Physica E*, **41**, 935 (2009).
- [15] 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. *ФТП*, **42** (3), 291 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

The effect of silicon space layer on the electroluminescence of multilayer structures with Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands

D.N. Lobanov, A.V. Novikov, K.E. Kudryavtsev, M.V. Shaleev, D.V. Shengurov, Z.F. Krasilnik, N.D. Zakharov*, P. Werner*

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

*Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Weinberg 2, 06120 Halle/Saale, Germany

Abstract The study of electroluminescence from multilayer $p-i-n$ structures with self-assembled Ge(Si)/Si(001) islands has been performed. The dependence of the island related electroluminescence signal on the Si space layer thickness has been revealed to be nonmonotonic function at room temperature. The highest intensity of the room temperature electroluminescence has been observed for the structures with Si space layer thickness of 15–20 nm. The revealed sufficient decrease of electroluminescence signal from the islands in the structures with thick Si space layer (> 20 nm) is associated with formation of defect areas in them. The decrease of electroluminescence signal observed from the structures with thin Si space layer is associated with decrease of Ge content in the islands of these structures what is caused by enhanced Si diffusion into the islands due to growth of elastic strain in the structure.