

Особенности формирования островков Ge(Si) на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001)

© Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, О.А. Кузнецов*,
Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев[†]

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

* Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 31 мая 2005 г. Принята к печати 14 июня 2005 г.)

Представлены результаты исследования роста самоформирующихся островков Ge(Si), выращенных на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001) ($x \approx 25\%$) с малой шероховатостью поверхности. Показано, что рост самоформирующихся островков на буферных слоях SiGe качественно аналогичен росту островков на Si(001). Обнаружено, что изменение морфологии поверхности (переход от *dome*- к *hut*-островкам) в случае роста островков на релаксированных буферных слоях SiGe происходит при большей температуре, чем для островков Ge(Si)/Si(001). Причинами этого могут быть как меньшее рассогласование кристаллических решеток островка и буферного слоя, так и несколько большая поверхностная плотность островков при их росте на буфере SiGe.

PACS: 68.65.Hb, 68.55.Ac, 68.55.Jk

1. Введение

В настоящее время одним из направлений дальнейшего развития кремниевой микроэлектроники является использование гетероструктур Ge/Si для улучшения параметров уже существующих электронных приборов и создания новых оптоэлектронных приборов [1]. За счет применения напряженных слоев GeSi в качестве базы биполярного транзистора удалось значительно повысить его быстродействие и в результате наладить коммерческое производство интегральных схем на основе кремния с рабочей частотой выше 100 ГГц [2]. В последнее время значительные успехи в увеличении быстродействия полевых транзисторов достигнуты за счет использования в качестве „искусственных“ подложек релаксированных буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, сформированных на подложках Si(001). Рост напряженных слоев Si и Ge на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001) позволяет увеличить быстродействие полевых транзисторов как с *n*-, так и с *p*-каналом [3]. С использованием релаксированных буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001) в качестве подложек для роста сверхрешеток GeSi/Si связываются надежды на создание каскадных лазеров терагерцового диапазона [4].

Еще одним классом GeSi-структур, перспективным с точки зрения создания оптоэлектронных приборов, являются структуры с самоформирующимися островками Ge(Si). Исследуется возможность создания на основе этих структур эффективных светоизлучающих и фотоприемных устройств ближнего инфракрасного диапазона, в том числе для рабочего диапазона длин волн оптоволоконных линий связи (1.3 и 1.55 мкм) [5]. К настоящему времени достаточно хорошо изучены

структурные и оптические свойства самоформирующихся островков Ge(Si), выращенных на подложках Si(001) [6,7]. В то же время рост самоформирующихся островков Ge(Si) на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001) может дать ряд преимуществ. Так, в ряде работ рассматривалась возможность формирования пространственно упорядоченного массива островков Ge(Si) за счет их роста на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001), поверхность которых изначально (до формирования островков) имела хорошо выраженный рельеф, обусловленный наличием дислокаций несоответствия (так называемая *cross-hatch* картина) [8,9]. Кроме этого, за счет роста островков Ge(Si) на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001) может быть решена проблема слабой пространственной локализации электронов в структурах с островками, которая является одной из причин довольно низкой эффективности излучательной рекомбинации в гетероструктурах в GeSi/Si(001) с самоформирующимися наноструктурами и квантовыми точками [10]. Эффективная локализация электронов вблизи островков может быть достигнута за счет их встраивания в напряженный (растянутый) слой Si, который может быть сформирован на релаксированном буферном слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001).

Известно, что в случае роста самоформирующихся островков Ge(Si) на подложках Si(001) (далее островков Ge(Si)/Si(001)) положение, интенсивность и ширина пика фотолюминесценции, связанного с островками, зависят от их размеров, формы и поверхностной плотности. Очевидно, что изменение постоянной кристаллической решетки подложки при переходе от роста на подложке Si(001) к росту островков на релаксированном буферном слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (001) приведет к существенному изменению параметров островков, что в свою очередь должно отразиться на оптических свойствах этих структур.

[†] E-mail: shaleev@ipm.sci-nnov.ru

В данной работе представлены результаты исследования особенностей роста самоформирующихся островков Ge(Si) на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ ($x \approx 25\%$) (далее островков Ge(Si)/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$). Исследована зависимость размеров, формы и поверхностной плотности островков от температуры осаждения Ge (T_g) в интервале $T_g = 550\text{--}750^\circ\text{C}$. Особое внимание уделено изменению типа островков Ge(Si)/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, происходящему в диапазоне $T_g = 600\text{--}630^\circ\text{C}$.

2. Методика эксперимента

В настоящей работе в качестве подложек использовались структуры с градиентными релаксированными буферными слоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, выращенными на подложках Si(001) методом гидридной газовой эпитаксии (ГФЭ) при атмосферном давлении с использованием германия (GeH_4) и силана (SiH_4) [11]. С целью уменьшения шероховатости поверхности выращенные буферные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ подвергались химико-механическому полированию (ХМП) [12] с использованием специального раствора, состоящего из перекиси водорода, глицерина и аэросила [13].

Рост структур с самоформирующимися островками Ge(Si) на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ был выполнен методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) из твердых источников. Для роста использовались буферные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ с максимальным содержанием Ge $x \approx 25\%$, подвергнутые ХМП. Испарение Ge и Si в установке МПЭ осуществлялось при помощи электронно-лучевых испарителей. Скорости роста структур лежали в диапазоне $0.01\text{--}0.1$ нм/с. Рост структур на релаксированных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ начинался с осаждения буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с содержанием Ge, соответствующим содержанию Ge в верхнем ненапряженном слое релаксированного буфера. Далее осаждался слой Si с эквивалентной толщиной ~ 2 нм, на котором формировались островки Ge(Si). Островки были получены за счет осаждения Ge с эквивалентной толщиной $d_{\text{Ge}} = 7\text{--}8$ монослоев (МС) ($1 \text{ МС} \approx 0.14$ нм). Температура осаждения Ge варьировалась в диапазоне $T_g = 550\text{--}750^\circ\text{C}$.

Плотность прорастающих дислокаций в выращенных структурах определялась с помощью селективного травления. Рентгенодифракционные исследования выращенных структур выполнены на двухкристальном дифрактометре ДРОН-4. Исследования морфологии поверхности структур были выполнены методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Solver PRO с использованием бесконтактной моды.

3. Результаты и их обсуждение

По данным селективного травления плотность прорастающих дислокаций в полученных релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ с максимальным со-

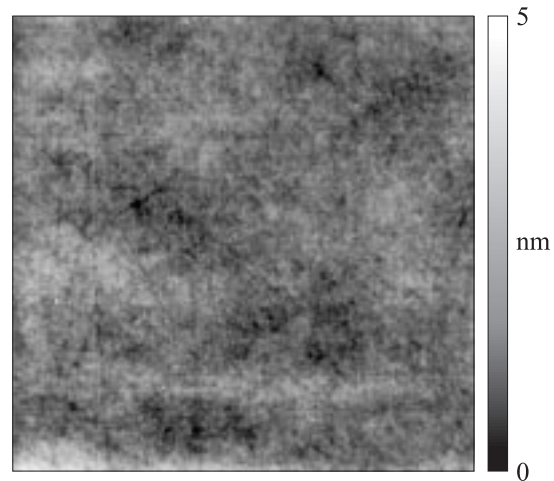


Рис. 1. АСМ-снимок поверхности релаксированного буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ ($x = 25\%$), выращенного методом ГФЭ и подвергнутого ХМП. Размер поля изображения 10×10 мкм².

держанием Ge $x \approx 25\%$ была на уровне $\sim 2 \cdot 10^4$ см⁻². Проведенные АСМ-исследования показали (рис. 1), что ХМП позволяет полностью удалить с поверхности буферных слоев неровности, связанные с сеткой дислокаций несоответствия. В результате проведения ХМП шероховатость поверхности буферных слоев с максимальной долей Ge $x \approx 25\%$ уменьшается примерно на порядок (среднеквадратичная шероховатость поверхности < 0.5 нм), но остается несколько выше шероховатости исходных подложек Si(001) (среднеквадратичная шероховатость поверхности < 2 нм) [11]. Исследования поверхности тестовых структур с ненапряженным буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, выращенным МПЭ на релаксированных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$, показали, что используемые в методе МПЭ температуры ($\leq 800^\circ\text{C}$) не приводят к повторному возникновению на поверхности структур неровностей, связанных с сеткой дислокаций несоответствия.

Было обнаружено, что во всем используемом интервале температур роста осаждение слоя Ge толщиной $7\text{--}8$ МС на релаксированный буферный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ с максимальным содержанием Ge $x \approx 25\%$ приводит к формированию островков (рис. 2). Необходимо отметить, что в исследуемых структурах не наблюдалось пространственного упорядочения самоформирующихся островков Ge(Si), что связывается с отсутствием на поверхности буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$, подвергнутых ХМП, сетки неровностей, обусловленных с дислокациями несоответствия.

Согласно АСМ-данным в интервале температур осаждения Ge $T_g = 630\text{--}750^\circ\text{C}$ на поверхности наблюдаются два типа островков Ge(Si)/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: пирамидальные (*pyramid*) и куполообразные (*dome*) островки (рис. 2, *a, b*). Как и в случае формирования островков Ge(Si)/Si(001), при уменьшении температуры осаждения Ge происходит уменьшение размеров остров-

ков Ge(Si)/Si_{1-x}Ge_x и растет их поверхностная плотность (рис. 3).

При уменьшении температуры осаждения Ge с 630 до 600°C происходит резкое изменение морфологии поверхности структур с островками — на поверхности

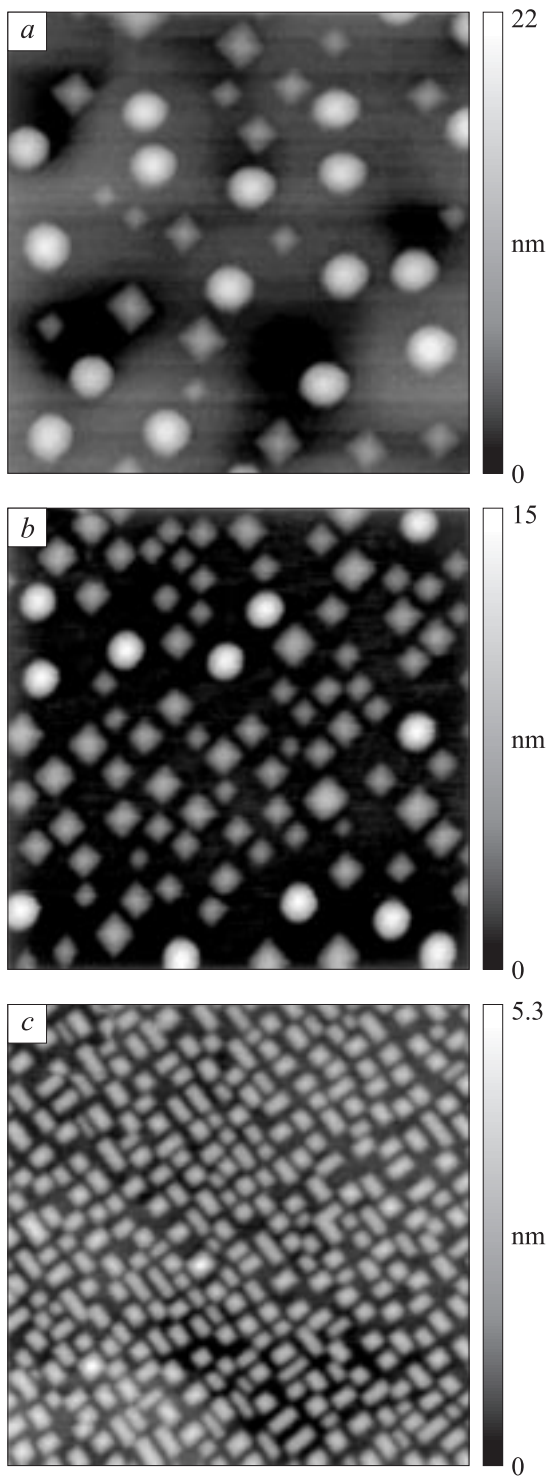


Рис. 2. АСМ-снимки поверхности структур с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si_{1-x}Ge_x, выращенными при температурах осаждения Ge 650 (a), 630 (b) и 600°C (c). Размер поля изображения 1 × 1 мкм².

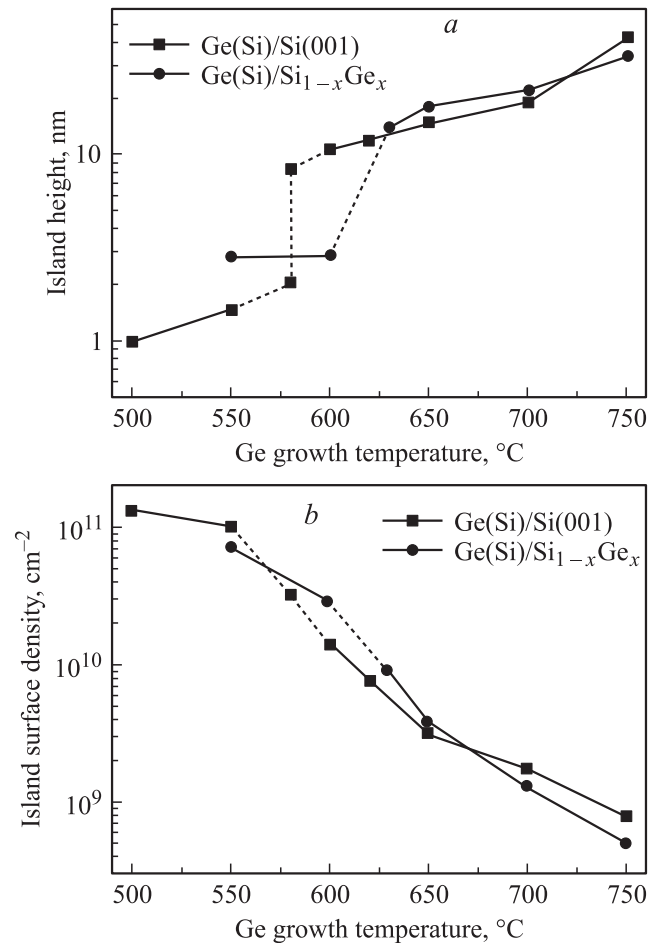


Рис. 3. Зависимости высоты (a) и поверхностной плотности (b) островков Ge(Si)/Si(001) и Ge(Si)/Si_{1-x}Ge_x от температуры осаждения Ge. Пунктирной линией показано изменение параметров при смене типа островков.

структур, выращенных при температурах $T_g \leq 600^\circ\text{C}$, наблюдаются лишь пирамидальные и так называемые *hut*-островки (рис. 2, c), имеющие прямоугольное основание и вытянутую пирамидальную форму. Большие куполообразные *dome*-островки при $T_g \leq 600^\circ\text{C}$ отсутствуют. Изменение морфологии поверхности заключается не только в изменении формы островков, но и в существенном уменьшении средней высоты островков (рис. 3, a). Аналогичное изменение морфологии поверхности (переход *dome-hut*) ранее наблюдалось в случае роста островков Ge(Si)/Si(001) [14,15]. Однако для самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001) данный переход имел место в диапазоне температур осаждения Ge $T_g = 550\text{--}600^\circ\text{C}$.

Как было показано в [16], образование *hut*-островков при низких температурах осаждения Ge может быть обусловлено изменением диффузии и энергетических потенциалов для образования новых граней островков. В этом случае разница в температурах изменения морфологии островков в случае роста островков Ge(Si)/Si_{1-x}Ge_x и Ge(Si)/Si(001) может быть связана

с различием коэффициентов диффузии атомов на поверхности буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и $\text{Si}(001)$, а также с различием энергетических потенциалов образования новых граней островков.

Еще одной возможной причиной изменения морфологии поверхности может являться увеличение поверхностной плотности самоформирующихся островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (рис. 3, b) при понижении температуры осаждения Ge. Известно [17], что для образования *dome*-островков необходимо, чтобы *pyramid*-островки достигли некоторого критического объема, который зависит от рассогласования кристаллических решеток островка и подложки. При высокой поверхностной плотности из-за взаимодействия с соседними островками *pyramid*-островки, первоначально образующиеся на поверхности структур, могут не достигать равновесного критического объема, необходимого для их трансформации в островки типа *dome*. Ранее было показано [18], что при высокой температуре роста это может привести к уменьшению критического объема *pyramid*-островков. Однако кинетические ограничения, связанные с низкими температурами роста, могут препятствовать переходу *pyramid*-островков в *dome*-островки при объемах, меньших равновесного критического объема. В этом случае рост *pyramid*-островков, не достигших из-за упругого взаимодействия с соседними островками равновесного критического объема, может происходить за счет увеличения их латерального размера в направлении наименьшего взаимодействия с соседними островками. В этом случае произойдет трансформация *pyramid*-островков в островки типа *hut*.

Анализ АСМ-снимков структур с островками $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$, сформированными при $T_g = 600\text{--}650^\circ\text{C}$, показал, что в этой области температур поверхностная плотность островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ несколько выше поверхностной плотности островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$ (рис. 3, b). Увеличение поверхностной плотности островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ приводит к тому, что упругие взаимодействия между *pyramid*-островками становятся существенными при более высоких температурах роста, в результате чего и происходит смещение точки изменения морфологии островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в область более высоких температур. Рост поверхностной плотности островков при росте на буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ может быть связан с отмеченной выше большей шероховатостью поверхности буферных слоев по сравнению с исходными подложками $\text{Si}(001)$.

Еще одной возможной причиной увеличения температуры перехода *dome*–*hut* для островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ может являться меньшее рассогласование кристаллических решеток островка $\text{Ge}(\text{Si})$ и релаксированного буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, чем в случае роста островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$ при той же температуре осаждения Ge. Рентгенодифракционные исследования структур с самоформирующимися островками $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, выращенными при $T_g = 630^\circ\text{C}$, показали, что среднее содержание Ge в островках оказывается на 10–12%

выше содержания Ge в островках $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$, сформированных при той же температуре. Однако, с учетом 25%-го содержания Ge в буферном слое SiGe , рассогласование кристаллических решеток буферного слоя SiGe и островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, сформированных на нем, оказывается меньшим, чем для островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$. От рассогласования кристаллических решеток островка и подложки существенно зависит критический объем *pyramid*-островков [17,19]. Меньшее рассогласование кристаллических решеток островка и подложки в случае осаждения Ge на релаксированный буферный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ приводит к увеличению критического размера *pyramid*-островков. Следовательно, уже при меньшей поверхностной плотности (при более высоких температурах роста) взаимодействие между близлежащими *pyramid*-островками становится существенным, препятствуя переходу *pyramid*-островков в *dome*-островки и приводя к появлению на поверхности *hut*-островков.

4. Заключение

В работе исследован рост самоформирующихся островков $\text{Ge}(\text{Si})$ на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ ($x \approx 25\%$) с малой шероховатостью поверхности. Показано, что качественно рост островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ аналогичен росту островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$. Обнаружено, что резкое изменение морфологии поверхности (переход от *dome*- к *hut*-островкам) в случае роста островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ происходит при более высоких температурах роста по сравнению с ростом островков $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}(001)$. Данное изменение связывается как с меньшим рассогласованием кристаллических решеток островка $\text{Ge}(\text{Si})/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и релаксированного буферного слоя, так и с несколько большей поверхностной плотностью островков в случае роста их на релаксированных буферных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

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

Список литературы

- [1] D.J. Paul. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, R75 (2004).
- [2] H.G. Grimmeiss. *ФТП*, **33** (9), 1032 (1999).
- [3] F. Schaffler. *Semicond. Sci. Technol.*, **12**, 1515 (1997).
- [4] L. Diehl, S. Mentese, E. Muller, D. Grutzmacher, H. Sigg, U. Gennser, I. Sagnes, Y. Campidelli, O. Kermarrec, D. Bensahel, J. Faist. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4700 (2000).
- [5] А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, В.В. Кириенко, А.И. Никифоров. *ФТТ*, **47** (1), 37 (2005).
- [6] K. Brunner. *Rep. Progr. Phys.*, **65**, 27 (2002).
- [7] J. Stangl, V. Holý, G. Bauer. *Rev. Mod. Phys.*, **76**, 725 (2004).
- [8] J.L. Liu, S. Tong, Y.H. Luo, J. Wan, K.L. Wang. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3431 (2001).
- [9] M.A. Lutz, R.M. Feenstra, F.K. LeGoues, P.M. Money, J.O. Chu. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 724 (1995).

- [10] A.I. Yakimov, N.P. Stepina, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov, A.V. Nenashev. *Semicond. Sci. Technol.*, **15**, 1125 (2000).
- [11] 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).
- [12] K. Sawano, K. Kawaguchi, T. Ueno, S. Koh, K. Nakagawa, Y. Shiraki. *Mater. Sci. Eng. B*, **89**, 406 (2002).
- [13] В.А. Перевозчиков, В.Д. Скупов. *Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников* (Н.Новгород, Изд-во ННГУ, 1992) с. 198.
- [14] O.G. Schmidt, C. Lange, K. Eberl. *Phys. Status Solidi B*, **215**, 319 (1999).
- [15] Н.В. Востоков, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, А.Н. Яблонский. *ФТТ*, **46** (1), 63 (2004).
- [16] M. Kästner, B. Voigtländer. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 2745 (1999).
- [17] F.M. Ross, J. Tersoff, R.M. Tromp. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 984 (1998).
- [18] J.A. Floro, G.A. Lucadamo, E. Chason, L.B. Freund, M. Sinclair, R.D. Twisten, R.Q. Hwang. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 4717 (1998).
- [19] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский. *Письма ЖЭТФ*, **76**, 365 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

Peculiarities of Ge(Si) islands formation upon Si_{1-x}Ge_x/Si(001) relaxed buffer layers

N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, O.A. Kuznetsov, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, M.V. Shaleev*

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950, GSP-105, Nizhny Novgorod, Russia

* Physico-Technical Research Institute
of N.I. Lobachevsky Nizhniy Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia