

**Бесполудин Владислав Валерьевич** – e-mail: eyugusev@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

**Gusev Evgeny Yurievich** – Southern Federal University; e-mail: eyugusev@sfned.ru; 2, Shevchenko street, building E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78643371611; the department of nanotechnology and microsystem technics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Jityaeva Juliya Yurievna** – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystems technology; postgraduate student.

**Bykov Alexander Victorovich** – F.V. Lukin State Research Institute of Physical Problems; e-mail: admin@niifp.ru; Building 6, Passage 4806, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia; phone: +74997311306; unit manager.

**Bespoludin Vladislav Valerievich** – e-mail: eyugusev@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystems technology; student.

УДК 621.793.14

**С.В. Балакирев, М.М. Еременко, М.С. Солодовник**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ВЛИЯНИЯ ПОТОКА  
ТЕТРАМЕРОВ МЫШЬЯКА НА ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ  
GAAS/GAAS(001)\***

*Представлена модель роста GaAs на поверхности GaAs(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии с учетом влияния потока тетрамеров мышьяка на геометрические параметры массивов зарождающихся островков. Моделирование проводится с помощью кинетического метода Монте-Карло с учетом особенностей поверхности, многокомпонентности растущей пленки и локального окружения адатомов. В связи с большой подвижностью мышьяка на поверхности диффузионный шаг молекулы мышьяка был принят равным средней диффузионной длине, что позволило значительно увеличить скорость вычислений без существенного искажения результатов моделирования. Показано, что островки формируются преимущественно в траншеях (2×4)-реконструированной поверхности GaAs(001) и имеют вытянутую форму вдоль направления [110]. Плотность островков увеличивается с повышением степени заполнения поверхности и достигает значения насыщения. При увеличении потока мышьяка с  $3 \cdot 10^{14}$  до  $4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> плотность островков увеличивается с  $3,1 \cdot 10^{12}$  до  $4,6 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> при степени заполнения, равной 0,2 монослоя GaAs. При этом средний размер островков уменьшается с 3,6 до 2,5 нм. С увеличением степени заполнения поверхности степень влияния потока мышьяка на средний размер островков возрастает. Функция распределения островков по размерам показывает, что наиболее существенное влияние на характеристики островков оказывает изменение потока тетрамеров мышьяка в области больших значений. Это объясняется дефицитом атомов галлия относительно осажденных молекул мышьяка, что препятствует формированию островков большого размера и приводит к резкому увеличению концентрации малых кластеров. Результаты моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.*

*Нанотехнологии; наноструктуры; наноматериалы; полупроводники; молекулярно-лучевая эпитаксия; арсенид галлия; поток мышьяка; кинетическое моделирование; метод Монте-Карло.*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10006).

S.V. Balakirev, M.M. Eremenko, M.S. Solodovnik

**MONTE CARLO SIMULATION OF ARSENIC TETRAMER FLUX EFFECT ON GAAS/GAAS(001) EPITAXIAL GROWTH**

*The model of GaAs/GaAs(001) molecular beam epitaxial growth considering arsenic tetramer flux influence on geometrical characteristics of nucleating island arrays is presented in the paper. The simulation is carried out with a kinetic Monte Carlo method and takes into account the surface specifics, multicomponent composition of the growing film and adatom local environment. Due to the large mobility of arsenic on the surface, arsenic molecule diffusion step was taken equal to its average diffusion length. It made it possible to accelerate computations essentially without significant corruption of the simulation results. It is shown that islands are preferentially formed in the trenches of (2×4)-reconstructed surface of GaAs(001) and favor elongation along the [110] direction. The island density increases with the surface coverage increase and reaches a saturation value. The increase of arsenic flux from  $3 \cdot 10^{14}$  до  $4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  leads to the increase of the island density from  $3,1 \cdot 10^{12}$  to  $4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  at the coverage equal to 0,2 monolayer of GaAs. At the same time the average size decreases from 3,6 to 2,5 nm. The influence of arsenic flux on the average island size is growing with the surface coverage increase. The island size distribution function shows that the island characteristics are affected by arsenic flux more significantly in the range of large values. This is attributed to the shortage of gallium atoms in comparison with deposited arsenic molecules that prevents large island formation and leads to the dramatic growth of little island concentration. The simulation results are in good agreement with experimental data.*

*Nanotechnology; nanostructures; nanomaterials; semiconductors; molecular beam epitaxy; gallium arsenide; arsenic flux; kinetic modeling; Monte Carlo method.*

**Введение.** В последние годы повышенное внимание уделяется исследованиям процессов формирования полупроводниковых структур  $A^{III}B^V$ , таких как GaAs, в том числе исследованиям процессов роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии [1–5]. Последнее важно не только для более глубокого понимания закономерностей роста кристаллов, но и для применения полученных знаний в области производства перспективных устройств нанoeлектроники и нанофотоники.

К настоящему времени проведено множество исследований процессов диффузии и зарождения островков GaAs на технологически значимой поверхности GaAs(001). Среди широко используемых методов можно выделить дифракцию отраженных быстрых электронов [6], сканирующую туннельную микроскопию [7–9], вычисления из первых принципов [10], кинетические методы Монте-Карло [11]. Теоретические модели активно применяются для исследования структуры поверхности, активационных барьеров, поверхностной диффузии адатомов и влияния на эти параметры температуры роста. Однако почти ничего не известно о влиянии потока мышьяка на процессы эпитаксиального роста GaAs. Кроме того, моделирование проводится чаще всего с учетом роста из потока  $As_2$  [12] или даже для однокомпонентного случая [13], тогда как наиболее распространенный на практике случай роста из потока  $As_4$  гораздо более сложен и требует включения в модель множества типов частиц и микроскопических процессов [8].

В данной работе предложена кинетическая модель Монте-Карло эпитаксиального роста GaAs с учетом влияния потока  $As_4$  на характеристики островков, зарождающихся на поверхности GaAs(001). Метод Монте-Карло позволяет проводить моделирование в широком диапазоне температур и потоков ростовых компонент, а также на большом пространственном и временном масштабе, чего нельзя достигнуть на основе вычислений из первых принципов.

**Описание модели.** Кристалл GaAs в рассматриваемой модели представлен в виде двумерной решетки со структурой цинковой обманки. Поверхность имеет реконструкцию  $\beta 2(2 \times 4)$  GaAs(001), при которой вдоль решетки расположены ряды димеров мышьяка, чередующиеся с незаполненными траншеями [14–16].

Базовым параметром модели является простое событие, осуществляемое с вероятностью, определяемой активационным барьером. Энергия активации  $E_i$  события  $i$  зависит от типа микроскопического процесса, типа частицы, ее расположения на поверхности и окружения адатомов. Частота  $f_i$  осуществления события  $i$  определяется уравнением Аррениуса [11, 12, 17]:

$$f_i = \nu_0 \exp(E_i/kT), \quad (1)$$

где  $\nu_0$  – частота колебаний решетки, равная  $10^{13} \text{ с}^{-1}$  [14],  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура подложки.

В связи с тем, что в моделировании учитывается рост на поверхности со сложной структурой и большим числом частиц принципиально различных типов, необходимо рассмотрение большого количества микроскопических процессов. В данной работе рассматриваются следующие процессы, которые определяют группы событий, осуществляемых частицами.

1. *Адсорбция галлия.* Атомы Ga осаждаются на поверхность и занимают случайные узлы в галлиевой подрешетке. Считается, что атомы Ga адсорбируются с единичным коэффициентом прилипания и не десорбируются, что характерно для типичных температур роста GaAs [18, 19].
2. *Поверхностная диффузия галлия.* Миграция адатомов Ga выражается как серия последовательных скачков в соседние узлы подрешетки. Диффузия анизотропна так, что активационный барьер скачка адатома Ga составляет 1,3 эВ вдоль направления  $[1\bar{1}0]$  и 1,5 эВ вдоль направления  $[110]$  [7].
3. *Физисорбция и поверхностная диффузия мышьяка.* Мышьяк осаждается из потока молекул  $\text{As}_4$  и занимает случайные узлы в мышьяковой подрешетке. В то время как почти все атомы Ga задерживаются на поверхности, мышьяк образует достаточно сильную связь с поверхностью только при наличии на ней адатомов галлия [19]. В отсутствие адатомов галлия мышьяк находится на поверхности в слабо связанном (физисорбированном) состоянии [20], благодаря которому обладает повышенным коэффициентом диффузии. В связи с тем, что за время одного скачка адатома галлия молекула мышьяка совершает  $\sim 10^9$  скачков, в настоящей модели принято, что диффузионный шаг молекулы мышьяка имеет случайное распределение:

$$l = -\lambda_{\text{As}} \ln \delta, \quad (2)$$

где  $\lambda_{\text{As}}$  – диффузионная длина тетрамера мышьяка, варьирующаяся в пределах от 1 до 30 мкм в зависимости от технологических параметров [21-24],  $\delta$  – случайное число, имеющее равномерное распределение в диапазоне (0,1).

Энергия активации диффузии мышьяка составляет 0,2 эВ [25]. Молекула  $\text{As}_4$  может распадаться при столкновении с адатомами Ga на две молекулы  $\text{As}_2$  [18]. Вкладом атомарного As пренебрегается, так как димеры  $\text{As}_2$  не диссоциируют при типичных ростовых условиях [12].

1. *Десорбция мышьяка.* С поверхности могут десорбироваться только физисорбированные молекулы мышьяка. Энергия активации десорбции молекул  $\text{As}_2$  и  $\text{As}_4$ , не имеющих соседей, составляет 0,48 и 0,37 эВ соответственно [26].
2. *Хемосорбция мышьяка.* В связи с малой химической активностью молекул  $\text{As}_4$ , хемосорбция тетрамеров происходит только при одновременной парной диссоциации на парах атомов Ga [9, 27]. При этом один из освободившихся димеров может также десорбироваться либо начать диффузию по поверхности. Энергия активации хемосорбции молекулы  $\text{As}_2$  составляет 0,16 эВ [8].

**Результаты и обсуждение.** В результате моделирования было выявлено, что островки зарождаются преимущественно в траншеях реконструированной поверхности и вытягиваются вдоль направления  $[1\bar{1}0]$  (рис. 1), что связано с анизотропией диффузии [7]. Реконструкция  $(2 \times 4)$  сохраняется на поверхности в течение всего субмонослойного роста. Морфология островков, сформированных при аналогичных технологических параметрах, хорошо согласуется с изображениями, полученными с помощью сканирующей туннельной микроскопии [8], и с другими теоретическими моделями [7, 12].

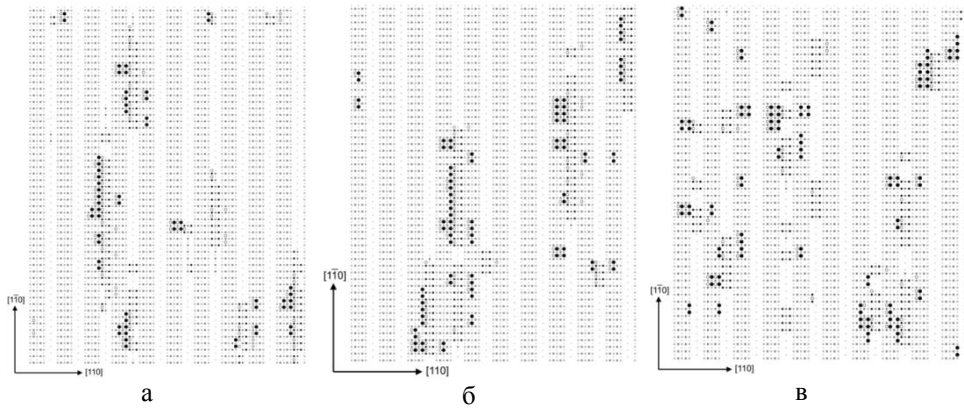


Рис. 1. Морфология островков в области моделирования  $160 \times 200 \text{ \AA}$  после осаждения 0,1 монослоя (МС) GaAs при  $T = 580^\circ\text{C}$ ,  $v = 0.1 \text{ nm/s}$ :  
 а –  $J_{\text{As4}} = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ; б –  $J_{\text{As4}} = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ; в –  $J_{\text{As4}} = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

На рис. 1 видно, что с увеличением потока мышьяка увеличивается разброс островков по поверхности, а также снижается анизотропия их формы. Также при повышенном потоке мышьяка на поверхности наблюдается большое количество конгломератов, состоящих из нескольких атомов и являющихся центрами зарождения крупных островков.

Для количественной оценки характеристик растущей пленки GaAs была рассчитана поверхностная плотность (рис. 2), средний размер (рис. 3) и функция распределения островков по размерам (рис. 4).

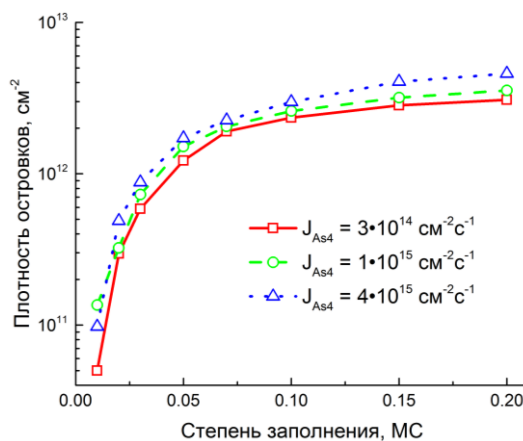


Рис. 2. Зависимость поверхностной плотности островков от степени заполнения при  $T = 580^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,1 \text{ nm/s}$  и различных потоках мышьяка

Плотность островков возрастает с увеличением степени заполнения поверхности и выходит на насыщение после осаждения  $\sim 0.1$  МС GaAs (см. рис. 2), что соответствует экспериментальным данным [9]. Увеличение потока мышьяка с  $3 \cdot 10^{14}$  до  $4 \cdot 10^{15}$   $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  приводит к повышению плотности островков с  $3,1 \cdot 10^{12}$  до  $4,6 \cdot 10^{12}$   $\text{см}^{-2}$  при степени заполнения  $\theta = 0,2$  МС. Это связано с тем, что большая концентрация молекул мышьяка на поверхности подавляет диффузию адатомов галлия, что не позволяет им встраиваться в устойчивые островки и приводит к формированию большего количества новых кластеров.

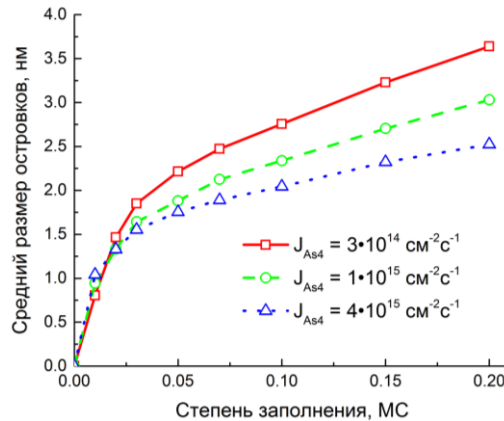


Рис. 2. Зависимость среднего размера островков от степени заполнения поверхности при  $T = 580$  °С,  $v = 0,1$  нм/с и различных потоках мышьяка

С увеличением степени заполнения поверхности средний размер островков монотонно возрастает (см. рис. 3). Однако, по вышеуказанным причинам, повышение потока мышьяка приводит к уменьшению среднего размера островков. При этом с увеличением степени заполнения поверхности разница между размерами островков, сформированных при различных потоках мышьяка, становится более существенной. Средний размер островков при  $T = 580$  °С,  $v = 0,1$  нм/с,  $\theta = 0,2$  МС и потоке мышьяка  $J_{As4} = 1 \cdot 10^{15}$   $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  составляет 2,3 нм, что соответствует результатам экспериментов, полученных при аналогичных технологических параметрах [28].

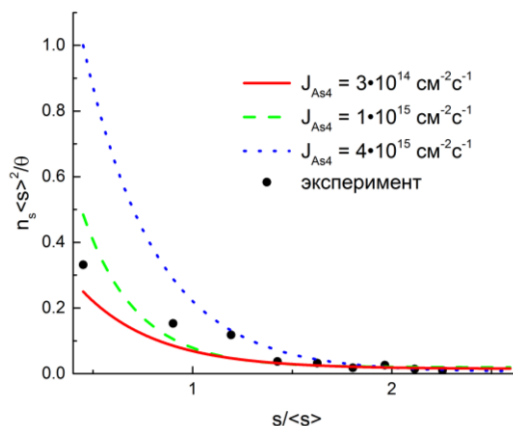


Рис. 4. Функция распределения островков по размерам при  $T = 580$  °С,  $v = 0,1$  нм/с и различных потоках мышьяка

Функция распределения островков по размерам имеет убывающий вид (рис. 4), что характерно для поверхностей GaAs(001) [8], в отличие от поверхностей (110) и (111)А [29]. Полученная в результате моделирования функция распределения находится также в хорошем количественном согласии с экспериментальной зависимостью для  $J_{Asd} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  [30]. Увеличение потока мышьяка приводит к значительному увеличению функции распределения, что наиболее сильно проявляется в области малых размеров. В первую очередь, это связано с повышением поверхностной концентрации молекул мышьяка, избыток которых при больших потоках приводит к формированию нестабильных кластеров малого размера (менее 10 атомов). При этом наибольшее влияние на плотность островков оказывает повышение потока с  $1 \cdot 10^{15}$  до  $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , так как в этом случае наиболее велика нехватка атомов галлия относительно осажденного мышьяка. Наибольший вклад в функцию распределения вносят димеры и тетрамеры, сохранившиеся на поверхности, а также конгломераты, образованные в результате объединения молекул мышьяка с одиночными атомами и димерами галлия. В то же время увеличение потока мышьяка с  $3 \cdot 10^{14}$  до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  приводит к перераспределению материала по поверхности, а избыточные молекулы мышьяка десорбируются.

**Заключение.** Таким образом, изложенная в работе модель позволяет детально исследовать закономерности эпитаксиального роста GaAs на поверхности GaAs(001) с учетом влияния потока мышьяка, осаждаемого в виде тетрамеров, на характеристики зарождающихся островков. Поверхностная плотность островков возрастает с увеличением степени заполнения и выходит на значение насыщения после осаждения  $\sim 0.1$  МС GaAs, в то время как средний размер островков непрерывно возрастает. Функция распределения островков по размерам имеет вид убывающей зависимости и демонстрирует хорошее сходство с результатами экспериментов. Повышение потока мышьяка приводит к увеличению плотности островков и соответствующему уменьшению их размеров, что связано с подавлением диффузии галлия и повышением вероятности зарождения новых островков.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Manfra M.J.* Molecular Beam Epitaxy of Ultra-High-Quality AlGaAs/GaAs Heterostructures: Enabling Physics in Low-Dimensional Electronic Systems // Annual Review of Condensed Matter Physics. – 2014. – Vol. 5. – P. 347-373.
2. *Агеев О.А., Коломийцев А.С., Михайличенко А.В., Смирнов В.А., Пташник В.В., Солодовник М.С., Федотов А.А., Замбург Е.Г., Климин В.С., Ильин О.И., Громов А.Л., Рукомойкин А.В.* Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 1 (114). – С. 109-116.
3. *Алексеев А.Н., Соколов И.А., Агеев О.А., Коноплев Б.Г.* Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.
4. *Ageev O.A., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Rukomoikin A.V., Smirnov V.A., Solodovnik M.S.* Studying the effect of geometric parameters of oriented GaAs nanowhiskers on Youngs modulus using atomic force microscopy // Nanotechnologies in Russia. – 2013. – Vol. 8, No. 1-2. – P. 23-28.

5. Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Rukomoikin A.V., Avilov V.I. A study of the formation modes of nanosized oxide structures of gallium arsenide by local anodic oxidation // *Semiconductors*. – 2012. – Vol. 46, No. 13. – P. 1616-1621.
6. Hata M., Isu T., Watanabe A., Katayama Y. Distributions of growth rates on patterned surfaces measured by scanning microprobe reflection high-energy electron diffraction // *J. Vac. Sci. Technol. B*. – 1990. – Vol. 8 (4). – P. 692.
7. LaBella V.P., Bullock D.W., Ding Z., Emery C., Harter W.G., Thibado P.M. Monte Carlo derived diffusion parameters for Ga on the GaAs(001)-(2×4) surface: A molecular beam epitaxy–scanning tunneling microscopy study // *J. Vac. Sci. Technol. A*. – 2000. – Vol. 18 (4). – P. 1526-1531.
8. Avery A.R., Dobbs H.T., Holmes D.M., Joyce B.A., Vvedensky D.D. Nucleation and Growth of Islands on GaAs Surfaces // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 79 (20). – P. 3938-3941.
9. Itoh M., Bell G.R., Joyce B.A., Vvedensky D.D. Transformation kinetics of homoepitaxial islands on GaAs(001) // *Surf. Sci.* – 2000. – Vol. 464 (2-3). – P. 200.
10. Kratzer P., Morgan C.G., Scheffler M. Model for nucleation in GaAs homoepitaxy derived from first principles // *Phys. Rev. B*. – 1999. – Vol. 59(23). – P. 15246.
11. Amrani A., Djafari Rouhani M., Mraoufel A. A Monte Carlo investigation of Gallium and Arsenic migration on GaAs(100) surface // *Appl. Nanosci.* – 2011. – Vol. 1. – P. 59-65.
12. Kratzer P., Scheffler M. Reaction-Limited Island Nucleation in Molecular Beam Epitaxy of Compound Semiconductors // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – Vol. 88 (3). – P. 036102.
13. Smilauer P., Wilby M.R., Vvedensky D.D. Reentrant layer-by-layer growth: A numerical study // *Phys. Rev. B*. – 1993. – Vol. 47 (7). – P. 4119.
14. Kley A., Ruggerone P., Scheffler M. Novel Diffusion Mechanism on the GaAs(001) Surface: The Role of Adatom-Dimer Interaction // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 79 (26). – P. 5278.
15. Pashley M.D. Electron counting model and its application to island structures on molecular-beam epitaxy grown GaAs(001) and ZnSe(001) // *Phys. Rev. B*. – 1989. – Vol. 40(15). – P. 10481.
16. Daweritz L., Ploog K. Contribution of reflection high-energy electron diffraction to nanometre tailoring of surfaces and interfaces by molecular beam epitaxy // *Semicond. Sci. Tech.* – 1994. – Vol. 9(2). – P. 123-136.
17. Kangawa Y., Ito T., Taguchi A., Shiraishi K., Irisawa T., Ohachi T. Monte Carlo simulation for temperature dependence of Ga diffusion length on GaAs(001) // *Appl. Surf. Sci.* – 2002. – Vol. 190. – P. 517-520.
18. Foxon C.T., Joyce B.A. Interaction kinetics of As<sub>4</sub> and Ga on {100} GaAs surfaces using a modulated molecular beam technique // *Surf. Sci.* – 1975. – Vol. 50. – P. 434.
19. Tok E.S., Neave J.H., Zhang J., Joyce B.A., Jones T.S. Arsenic incorporation kinetics in GaAs(001) homoepitaxy revisited // *Surf. Sci.* – 1997. – Vol. 374. – P. 397.
20. Morgan C.G., Kratzer P., Scheffler M. Arsenic Dimer Dynamics during MBE Growth: Theoretical Evidence for a Novel Chemisorption State of As<sub>2</sub> Molecules on GaAs Surfaces // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – Vol. 82(24). – P. 4886.
21. Nishinaga T., Shen X.Q. Surface diffusion and adatom stoichiometry in GaAs MBE studied by microprobe-RHEED/SEM MBE // *Appl. Surf. Sci.* – 1994. – Vol. 82-83. – P. 141.
22. Nishinaga T. Atomistic aspects of molecular beam epitaxy // *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* – 2004. – Vol. 48-49. – P. 104-122.
23. Higuchi Y., Uemura M., Masui Y., Kitada T., Shimomura S., Hiyamizu S. V/III ratio dependence of surface migration length of As<sub>4</sub> molecules during molecular beam epitaxy of GaAsP on (4 1 1)A GaAs substrates // *J. Cryst. Growth*. – 2003. – Vol. 251. – P. 80-84.
24. Tatsuoka Y., Kamimoto H., Kitano Y., Kitada T., Shimomura S., Hiyamizu S. GaAs/GaAs<sub>0.8</sub>P<sub>0.2</sub> quantum wells grown on (n11)A GaAs substrates by molecular beam epitaxy // *J. Vac. Sci. Technol. B*. – 1999. – Vol. 17(3). – P. 1155-1157.
25. Tok E.S., Neave J.H., Allegretti F.E., Zhang J., Jones T.S., Joyce B.A. Incorporation kinetics of As<sub>2</sub> and As<sub>4</sub> on GaAs(110) // *Surf. Sci.* – 1997. – Vol. 371. – P. 277.

26. Garcia J.C., Neri C., Massies J. A comparative study of the interaction kinetics of As<sub>2</sub> and As<sub>4</sub> molecules with Ga-rich GaAs (001) surfaces // *J. Cryst. Growth*. – 1989. – Vol. 98. – P. 511-518.
27. Балакирев С.В., Блинов Ю.Ф., Солодовник М.С. Модель начальной стадии гомоэпитаксиального роста GaAs методом МЛЭ с учётом соотношения потоков ростовых компонент // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 9 (158). – С. 93-105.
28. Itoh M., Bell G.R., Avery A.R., Jones T.S., Joyce B.A., Vvedensky D.D. Island Nucleation and Growth on Reconstructed GaAs(001) Surfaces // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. – Vol. 81 (3). – P. 633-636.
29. Ratsch C., Smilauer P., Zangwill A., Vvedensky D.D. Submonolayer epitaxy without a critical nucleus // *Surf. Sci.* – 1995. – Vol. 329 (1-2). – P. L599-L604.
30. Joyce B.A., Vvedensky D.D., Bell G.R., Belk J.G., Itoh M., Jones T.S. Nucleation and growth mechanisms during MBE of III-V compounds // *Mat. Sci. Eng. B*. – 1999. – Vol. 67. – P. 7-16.

## REFERENCES

1. Manfra M.J. Molecular Beam Epitaxy of Ultra-High-Quality AlGaAs/GaAs Heterostructures: Enabling Physics in Low-Dimensional Electronic Systems, *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 2014, Vol. 5, pp. 347-373.
2. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Mikhaylichenko A.V., Smirnov V.A., Ptashnik V.V., Solodovnik M.S., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Klimin V.S., Il'in O.I., Gromov A.L., Rukomoikin A.V. Poluchenie nanorazmernykh struktur na osnove nanotekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Nanoscale structures' production based on modular nanotechnological platform NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114). pp. 109-116.
3. Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A., Konoplev B.G. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. Opyt realizatsii v NOTs «Nanotekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for R&D center. The experience in implementing of SEC «Nanotechnology» SFedU] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
4. Ageev O.A., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Rukomoikin A.V., Smirnov V.A., Solodovnik M.S. Studying the effect of geometric parameters of oriented GaAs nanowhiskers on Youngs modulus using atomic force microscopy, *Nanotechnologies in Russia*, 2013, Vol. 8, No. 1-2, pp. 23-28.
5. Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Rukomoikin A.V., Avilov V.I. A study of the formation modes of nanosized oxide structures of gallium arsenide by local anodic oxidation, *Semiconductors*, 2012, Vol. 46, No. 13, pp. 1616-1621.
6. Hata M., Isu T., Watanabe A., Katayama Y. Distributions of growth rates on patterned surfaces measured by scanning microprobe reflection high-energy electron diffraction, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1990, Vol. 8 (4), pp. 692.
7. LaBella V.P., Bullock D.W., Ding Z., Emery C., Harter W.G., Thibado P.M. Monte Carlo derived diffusion parameters for Ga on the GaAs(001)-(2×4) surface: A molecular beam epitaxy-scanning tunneling microscopy study, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2000, Vol. 18 (4), pp. 1526-1531.
8. Avery A.R., Dobbs H.T., Holmes D.M., Joyce B.A., Vvedensky D.D. Nucleation and Growth of Islands on GaAs Surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, Vol. 79 (20), pp. 3938-3941.
9. Itoh M., Bell G.R., Joyce B.A., Vvedensky D.D. Transformation kinetics of homoepitaxial islands on GaAs(001), *Surf. Sci.*, 2000, Vol. 464 (2-3), pp. 200.
10. Kratzer P., Morgan C.G., Scheffler M. Model for nucleation in GaAs homoepitaxy derived from first principles, *Phys. Rev. B*, 1999, Vol. 59(23), pp. 15246.
11. Amrani A., Djafari Rouhani M., Mraoufel A. A Monte Carlo investigation of Gallium and Arsenic migration on GaAs(100) surface, *Appl. Nanosci.*, 2011, Vol. 1, pp. 59-65.
12. Kratzer P., Scheffler M. Reaction-Limited Island Nucleation in Molecular Beam Epitaxy of Compound Semiconductors, *Phys. Rev. Lett.*, 2002, Vol. 88 (3), pp. 036102.



13. Smilauer P., Wilby M.R., Vvedensky D.D. Reentrant layer-by-layer growth: A numerical study, *Phys. Rev. B*, 1993, Vol. 47 (7), pp. 4119.
14. Kley A., Ruggerone P., Scheffler M. Novel Diffusion Mechanism on the GaAs(001) Surface: The Role of Adatom-Dimer Interaction, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, Vol. 79 (26), pp. 5278.
15. Pashley M.D. Electron counting model and its application to island structures on molecular-beam epitaxy grown GaAs(001) and ZnSe(001), *Phys. Rev. B*, 1989, Vol. 40 (15), pp. 10481.
16. Daweritz L., Ploog K. Contribution of reflection high-energy electron diffraction to nanometre tailoring of surfaces and interfaces by molecular beam epitaxy, *Semicond. Sci. Tech.*, 1994, Vol. 9 (2), pp. 123-136.
17. Kangawa Y., Ito T., Taguchi A., Shiraishi K., Irisawa T., Ohachi T. Monte Carlo simulation for temperature dependence of Ga diffusion length on GaAs(001), *Appl. Surf. Sci.*, 2002, Vol. 190, pp. 517-520.
18. Foxon C.T., Joyce B.A. Interaction kinetics of As<sub>4</sub> and Ga on {100} GaAs surfaces using a modulated molecular beam technique, *Surf. Sci.*, 1975, Vol. 50, pp. 434.
19. Tok E.S., Neave J.H., Zhang J., Joyce B.A., Jones T.S. Arsenic incorporation kinetics in GaAs(001) homoepitaxy revisited, *Surf. Sci.*, 1997, Vol. 374, pp. 397.
20. Morgan C.G., Kratzer P., Scheffler M. Arsenic Dimer Dynamics during MBE Growth: Theoretical Evidence for a Novel Chemisorption State of As<sub>2</sub> Molecules on GaAs Surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 1999, Vol. 82 (24), pp. 4886.
21. Nishinaga T., Shen X.Q. Surface diffusion and adatom stoichiometry in GaAs MBE studied by microprobe-RHEED/SEM MBE, *Appl. Surf. Sci.*, 1994, Vol. 82-83, pp. 141.
22. Nishinaga T. Atomistic aspects of molecular beam epitaxy, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, 2004, Vol. 48-49, pp. 104-122.
23. Higuchi Y., Uemura M., Masui Y., Kitada T., Shimomura S., Hiyamizu S. V/III ratio dependence of surface migration length of As<sub>4</sub> molecules during molecular beam epitaxy of GaAsP on (4 1 1)A GaAs substrates, *J. Cryst. Growth.*, 2003, Vol. 251, pp. 80-84.
24. Tatsuoka Y., Kamimoto H., Kitano Y., Kitada T., Shimomura S., Hiyamizu S. GaAs/GaAs<sub>0.8</sub>P<sub>0.2</sub> quantum wells grown on (111)A GaAs substrates by molecular beam epitaxy, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1999, Vol. 17 (3), pp. 1155-1157.
25. Tok E.S., Neave J.H., Allegretti F.E., Zhang J., Jones T.S., Joyce B.A. Incorporation kinetics of As<sub>2</sub> and As<sub>4</sub> on GaAs(110), *Surf. Sci.*, 1997, Vol. 371, pp. 277.
26. Garcia J.C., Neri C., Massies J. A comparative study of the interaction kinetics of As<sub>2</sub> and As<sub>4</sub> molecules with Ga-rich GaAs (001) surfaces, *J. Cryst. Growth.*, 1989, Vol. 98, pp. 511-518.
27. Balakirev S.V., Blinov Yu.F., Solodovnik M.S. Model' nachal'noy stadii gomoepitaksial'nogo rosta GaAs metodom MLE s uchetom sootnosheniya potokov rostovykh komponent [Model of the initial stage of gaas homoepitaxial growth by mbe considering growth components flux ratio], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 93-105.
28. Itoh M., Bell G.R., Avery A.R., Jones T.S., Joyce B.A., Vvedensky D.D. Island Nucleation and Growth on Reconstructed GaAs(001) Surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 1998, Vol. 81 (3), pp. 633-636.
29. Ratsch C., Smilauer P., Zangwill A., Vvedensky D.D. Submonolayer epitaxy without a critical nucleus, *Surf. Sci.*, 1995, Vol. 329 (1-2), pp. L599-L604.
30. Joyce B.A., Vvedensky D.D., Bell G.R., Belk J.G., Itoh M., Jones T.S. Nucleation and growth mechanisms during MBE of III-V compounds, *Mat. Sci. Eng. B*, 1999, Vol. 67, pp. 7-16.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

**Балакирев Сергей Вячеславович** – Южный федеральный университет; e-mail: s.v.balak@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +79604642791; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

**Еременко Михаил Михайлович** – e-mail: mmeremenko@gmail.com; тел.: +79518400057; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

**Солодовник Максим Сергеевич** – e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Balakirev Sergey Vyacheslavovich** – Southern Federal University; e-mail: s.v.balak@gmail.com; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79604642791; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

**Eremenko Mikhail Mikhailovich** – e-mail: mmeremenko@gmail.com; phone: +79518400057; the department of nanotechnologies and microsystems; student.

**Solodovnik Maxim Sergeevich** – e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.