

Критический размер террасы кремния (001) для зарождения вакансионных островков при высокотемпературном отжиге

Е. Е. Родякина^{1,2}, С. В. Ситников¹, А. В. Латышев^{1,2}

¹ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

² Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

Аннотация

С применением *in situ* метода сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии исследован процесс формирования на поверхности кремния (001) системы концентрических ступеней, разделенных широкими террасами. Показана возможность управления шириной террас с помощью компенсации сублимации внешним потоком атомов. Измерены температурные зависимости критического диаметра террас для зарождения нового вакансионного островка в интервале температур 1070–1160 °С в двух направлениях – вдоль и поперек димерных рядов атомов сверхструктуры (1 × 2). Продемонстрировано увеличение критического диаметра с ростом потока атомов. Установлено, что с увеличением температуры анизотропия критического размера уменьшается и при температурах выше 1125 °С критический размер террасы вдоль и поперек димерных рядов атомов в пределах погрешности совпадает. В рамках атомистической теории зарождения круглого двумерного островка определена кинетика зарождения островков, оценены величины критического зародыша, энергии связи в зародыше и разницы энергий диффузии вдоль и поперек димерных рядов.

Ключевые слова

атомные процессы, поверхность, вакансии, кремний (001), широкие террасы

Благодарности

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Наноструктуры» ИФП СО РАН при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-32-60199) и Министерства науки и высшего образования (гос. задание № 0306-2019-0011).

Авторы благодарят канд. физ.-мат. наук Д. И. Роголо за обсуждение полученных результатов.

Для цитирования

Родякина Е. Е., Ситников С. В., Латышев А. В. Критический размер террасы кремния (001) для зарождения вакансионных островков при высокотемпературном отжиге // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 1. С. 77–85. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-1-77-85

Critical Terrace Width for Vacancy Islands Nucleation on Wide Terrace of Silicon (001) Surface under High Temperature Annealing

E. E. Rodyakina^{1,2}, S. V. Sitnikov¹, A. V. Latyshev^{1,2}

¹ A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS

² Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The process of forming a system of concentric steps on the silicon (001) surface, separated by wide terraces, has been studied *in situ* by means of ultrahigh vacuum reflection electron microscopy. The possibility of controlling terraces width by compensating atoms sublimation by an external atoms flux has been shown. The temperature dependences of the critical diameter of the terraces for the nucleation of a new vacancy island have been measured in along and across dimer row of superstructure 1 × 2 direction in the temperature range 1070–1160 °C. The increase in the critical diame-

ter with increasing atomic flux has been demonstrated. The anisotropy of a critical terrace size decreases with an increase in temperature independently of deposition flux and the critical size of the terrace along and across the dimer row coincides with an error accuracy at temperatures above 1 125 °C. The kinetics of vacancy islands nucleation has been determined in the framework atomic nucleation theory, and the values of the critical nucleus, the binding energy in the nucleus and the difference of diffusion energies along and across dimer rows have been estimated.

Keywords

atomic process, surface, vacancy, silicon (001), wide terrace

Acknowledgements

The research was performed on the equipment of CKP ISP SBRAS "Nanostructure" and supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 16-32-60199) and by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (0306-2019-0011).

The authors thank PhD D. I. Rogilo for discussing the results.

For citation

Rodyakina E. E., Sitnikov S. V., Latyshev A. V. Critical Terrace Width for Vacancy Islands Nucleation on Wide Terrace of Silicon (001) Surface under High Temperature Annealing. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 1, p. 77–85. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-1-77-85

Введение

В связи с уменьшением размеров функциональных наноструктур, становится актуальной задача совершенствования границ раздела, в частности поверхности кремния (001), являющейся подложкой для многих гетеросистем. Морфология поверхности кремния (Si), слабо разориентированная от плоскости (001), после отжига при высоких температурах представляет собой систему чередующихся террас размерами несколько сотен нанометров со сверхструктурной реконструкцией 1×2 и 2×1 соответственно, разделенных моноатомными ступенями высотой порядка 0,14 нм [1]. Ступени являются активным стоком и источником для адсорбированных частиц и значительным образом влияют на их распределение. Ранее была показана возможность создания концентрических ступеней на поверхности Si (111), разделенных широкими террасами, размер которых зависит от внешних воздействий в процессе отжига при высоких температурах, таких как внешний поток атомов или травление кислородом [2; 3]. В результате была разработана технология создания ультрагладких зеркал, используемых в качестве опорного зеркала интерференционного оптического микроскопа, что позволило повысить его вертикальное разрешение до 0,005 нм [4]. Также была показана возможность создания мер высоты в широком диапазоне высот от 0,314 нм (высота одиночной ступени на Si (111)) до 31,4 нм на основе формирования сгустков из счетного количества ступеней [5]. Перенос данной технологии на подложки Si (001) позволит уменьшить, во-первых, шаг изменения высоты при создании мер из-за меньшей высоты ступени, а во-вторых, шероховатость поверхности широких террас из-за отсутствия на данной поверхности сверхструктурного перехода, сопровождающегося образованием разупорядоченного слоя адатомов, присутствовавших при высоких температурах [6]. Однако такой перенос невозможен без понимания атомных процессов, происходящих на поверхности Si (001) при высоких температурах.

Прямое наблюдение за диффундирующими по поверхности частицами (адатомами и вакансиями), как это, например, возможно при низких температурах методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) [7], при высоких температурах затруднено из-за существенного массопереноса и десорбции частиц. Однако об энергетических характеристиках и распределении частиц можно судить по их коллективному взаимодействию при изменении параметров эксперимента, проводя исследования такими *in situ* методами, как отражательная электронная микроскопия [8; 9], высокотемпературная СТМ [7; 10], микроскопия медленных электронов [11–13]. При этом наличие атомных ступеней на поверхности, являющихся активными стоком и источником для адсорбированных частиц (адатомов и вакансий), оказывает существенное влияние. Использование в данной работе искусственно созданных широких террас позволило уменьшить влияние ступеней и увеличить влияние диффузии и взаимодей-

ствия частиц между собой на их распределение. В работе изучались атомные процессы на поверхности Si(001) на широких террасах при высоких температурах в условиях высокотемпературной сублимации, скомпенсированной внешним потоком атомов.

Эксперимент

Основные исследования проводились *in situ* методом сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ ОЭМ), который позволяет визуализировать морфологию поверхности кристалла кремния вплоть до отдельных атомных ступеней в процессах высокотемпературных (вплоть до температуры плавления кристалла кремния) сублимации и эпитаксиального роста [14]. Дополнительные *ex situ* исследования проводились с применением метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) на воздухе после быстрого (до 400 °С/с) охлаждения образцов, при этом смещением атомных ступеней в процессе охлаждения можно пренебречь.

Образцы размером $8 \times 1,1 \times 0,4$ мм³ вырезались из пластины кремния, легированной фосфором (0,5 Ом·см), с отклонением от кристаллографической грани (001) менее 0,1°. Методом бомбардировки низкоэнергетическими (5 кэВ) ионами аргона на поверхности образца формировалось углубление диаметром ~ 1 мм и глубиной ~ 1 мкм. Далее в течение 10 минут образец отжигался при температуре 1350 °С в камере СВВ ОЭМ, нагрев осуществлялся прямым пропусканием через образец переменного тока. После этого температура понижалась до 1100 °С для восстановления ступенчатой морфологии поверхности с реконструкцией. Отметим, что на поверхности Si(001) при температуре до 1180 °С на смежных террасах присутствует сверхструктурная реконструкция (1×2) и (2×1) (вследствие попарного сближения соседних атомов поверхности). Наличие реконструкции приводит к анизотропии диффузии адсорбированных частиц, вдоль димерных рядов (перпендикулярно оси димера) быстрее диффундируют как адатомы, так и вакансии [7; 9]. При температурах выше 1180 °С сверхструктура разрушается, происходит разупорядочение поверхности и ступени перестают визуализироваться [15].

Результаты и обсуждение

В процессе отжига на дне углубления формировалась система концентрических атомных ступеней (схематический профиль ступеней представлен на рис. 1, а) высотой 0,14 нм, разделяющих террасы со сверхструктурой (1×2) и (2×1). На ОЭМ-изображении (рис. 1, б) этим сверхструктурам соответствуют области темного и светлого контраста, граница между которыми является ступенью. Отметим, что из-за малого угла падения электронного пучка на поверхность исследуемого образца ОЭМ-изображения имеют различное увеличение в вертикальном и горизонтальном направлениях [14]. На АСМ-изображении на рис. 1, в представлен тот же островок, что и на ОЭМ-изображении, окруженный системой концентрических ступеней, и на вставке показан участок террасы между ступенями (чем темнее контраст, тем ниже по уровню находится терраса). На вставке видно наличие возникающих в процессе охлаждения мелких вакансионных островков, визуализирующихся на ОЭМ-изображении в виде пятнистого контраста, что свидетельствует о высокой концентрации вакансий, диффундирующих при высоких температурах.

В процессе сублимации из-за отрыва из ступени атомов и встраивания вакансий ступени двигаются в сторону вышележащих террас, при достижении нижней террасой критического размера D_{crit} в ее центре зарождается вакансионный островок (см. рис. 1, а). Зарождение островка в центре обусловлено достижением критического значения концентрации вакансий в условиях пониженной концентрации адатомов в этой области. Далее процесс повторяется циклически.

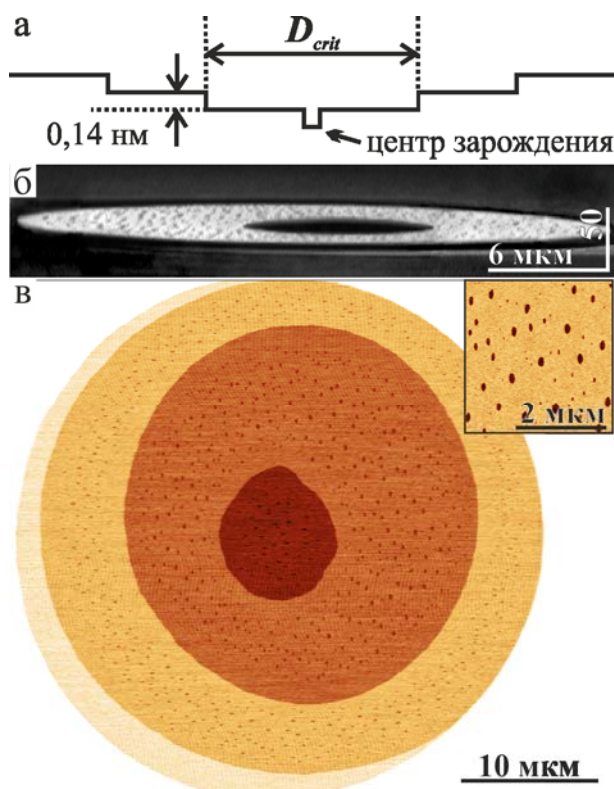


Рис. 1. Схематическое изображение профиля концентрических ступеней в момент зарождения островка (а); ОЭМ-изображение (б) и АСМ-изображение (в) поверхности Si(001) после охлаждения с сформированной на дне углубления островком

Fig. 1. Schematic representation of the profile of the concentric steps at the time of island nucleation (a); REM image (b) and AFM image (c) of the Si (001) surface after cooling with an island formed at the bottom

In situ эксперименты показывают рост частоты зарождения вакансионного островка и уменьшение критического размера с ростом температуры подложки, которое продемонстрировано на серии ОЭМ-изображений на рис. 2, снятых через несколько секунд после зарождения островков. Отсутствие на изображениях пятнистого контраста свидетельствует об отсутствии мелких вакансионных островков при высоких температурах. Таким образом, вакансии, диффундирующие при высоких температурах, образуют единственный островок в центре террасы при достижении ею критического размера.

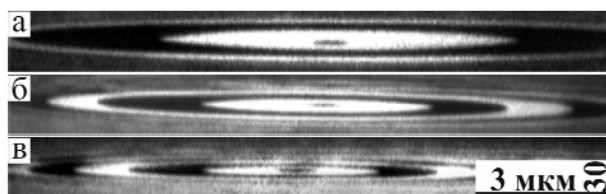


Рис. 2. ОЭМ-изображения системы концентрических ступеней, полученные при температуре образца: 1 010 °C (а), 1 090 °C (б) и 1 110 °C (в)

Fig. 2. REM images of the system of concentric steps, obtained at a sample temperature: 1 010 °C (a), 1 090 °C (b) and 1 110 °C (c)

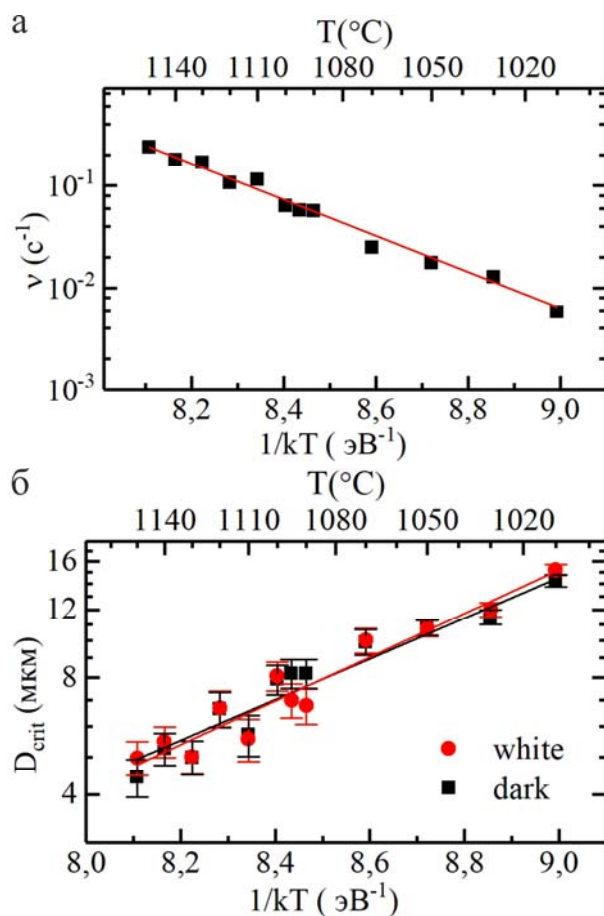


Рис. 3. Температурные зависимости частоты зарождения вакансионных островков (а) и критического диаметра террасы (б)

Fig. 3. Temperature dependences of (a) the nucleation rate of vacancy islands and (b) the critical diameter of the terrace

На рис. 3, а приведены результаты измерения температурной зависимости частоты зарождения вакансионных островков. Данная зависимость носит экспоненциальный характер, с энергией активации, соответствующей энергии десорбции порядка $4,1 \pm 0,1$ эВ, и обусловлено увеличением потока атомов, сублимирующих с поверхности. Температурная зависимость D_{crit} характеризуется энергией активации $1,2 \pm 0,2$ эВ как вдоль, так и поперек димерных рядов (рис. 3, б). В простейшем случае процесс, определяющий размер террасы, – это диффузия адатомов в центр террасы от атомной ступени, окружающей террасу и являющейся источником частиц. Тогда D_{crit} пропорциональна длине диффузии и соответственно, по соотношению Эйнштейна, корню из коэффициента диффузии частицы, умноженному на время жизни, каждый из которых зависит от температуры. Время жизни адатома определяется процессом десорбции с поверхности, и энергия $1,2 \pm 0,2$ эВ соответствует половине разности энергий десорбции и диффузии.

Однако в данной ситуации рассмотрение осложнено наличием двух типов диффундирующих частиц: адатомов и вакансий. При охлаждении образца на широких террасах наблюдается появление вакансионных островков (см. рис. 1, б, в), что свидетельствует о значительном превышении концентрации вакансий над концентрацией адатомов. Поэтому в дальнейшем вакансии можно считать основными диффундирующими частицами. Кроме того, из-за наличия сверхструктурной реконструкции стабильной частицей является дивакансия [17],

а моновакансии нестабильны и либо аннигилируют с адатомами, либо образуют дивакансии. Диффузия дивакансий из-за наличия реконструкции на поверхности может зависеть от направления, поэтому были проведены измерения критического размера черных и белых террас на ОЭМ-изображениях, которые соответствуют направлениям вдоль и поперек димерных рядов. Отметим, что формирование островков является статистически вероятным процессом и имеется разброс значений для D_{crit} , поэтому были измерены средние значения этой величины [18].

Для получения данных об энергетических характеристиках процессов в рамках атомистической теории зарождения необходимо измерить зависимости от температуры и потока частиц. В данной работе предлагается не увеличивать, а уменьшать концентрацию вакансий за счет увеличения концентрации адатомов, поступающих извне (компенсировать сублимацию). Были проведены *in situ* измерения в интервале температур 1070–1160 °С и компенсирующих потоках R (монослоев за секунду – МС/с, $1 \text{ МС} = 6,78 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) от 0 до потоков, близких к потоку десорбирующихся атомов для каждой из температур. С увеличением потока кремния на поверхность наблюдалось увеличение критического размера наподобие роста критического размера с понижением температуры, продемонстрированного на рис. 2. Видно, что с увеличением температуры независимо от величины потока кремния на поверхность различие критического размера террасы вдоль и поперек димерных рядов уменьшается, и при температуре больше 1125 °С они совпадают, и терраса приобретает круглую форму. Результаты изменения критического диаметра террасы от R представлены на рис. 4. Такие изменения диаметра наблюдались ранее для более низких температур (1000–1040 °С) и одного потока ($R = 0,007 \text{ МС/с}$) [11], где основной диффундирующей частицей, согласно работе [13], являются аддимеры. Подобное поведение наблюдается и для террас на поверхности Si(111), где диффундирующими частицами являются адатомы, и их равновесная концентрация достигает 0,2 МС при температуре около 850 °С [6].

Рассмотрим более подробно процессы, происходящие на широкой террасе. Профиль концентрации частиц имеет симметричный куполообразный вид с равновесной концентрацией частиц на ступенях, при этом к центру террас для дивакансий концентрация повышается, для адатомов – понижается. При этом чем больше размер террасы, тем больше отклонение величины концентрации в центре от равновесного значения. Для зарождения островка при преобладании дивакансий (адатомов) необходимо достижение максимума (минимума) концентрации частиц определенного критического значения n_{crit} . Во внешнем потоке атомов (скомпенсированной сублимации) отклонение концентрации всех частиц в центре террасы от равновесной уменьшается и для достижения n_{crit} системе необходимо увеличить D_{crit} для обоих типов частиц.

В рамках простой атомистической теории зарождения зависимость D_{crit}^2 от обратной частоты зарождения (ν) должна иметь следующий вид:

$$D_{\text{crit}}^2 \sim (1/\nu)^{\chi} \cdot \exp(-E/kT),$$

где E – энергия двумерного зарождения стабильного островка, k – постоянная Больцмана [19]. Перестроенные данные рис. 4 в трехкоординатной системе $\ln(D_{\text{crit}}^2)$ от T и $1/\nu$ аппроксимируются плоскостью с коэффициентами $\chi = 0,57 \pm 0,05$, $E = 1,6 \pm 0,2 \text{ эВ}$ и $\chi = 0,78 \pm 0,05$, $E = 1,5 \pm 0,2 \text{ эВ}$ для зарождения на террасе со сверхструктурой 2×1 и 1×2 соответственно. Величина показателя степени соответствует анизотропной двумерной (т. е. определяется диффузией как вдоль, так и поперек димерных рядов) кинетике зарождения, ограниченной диффузией, с величиной критического зародыша от 3 до 5 дивакансий, и от 6 до 10 дивакансий для 2×1 и 1×2 соответственно. При этом стабильным островком является комплекс, содержащий от 6 до 10 вакансий. Полученные результаты напрямую подтверждают данные работы [9], где предположено, что стабильным при травлении поверхности

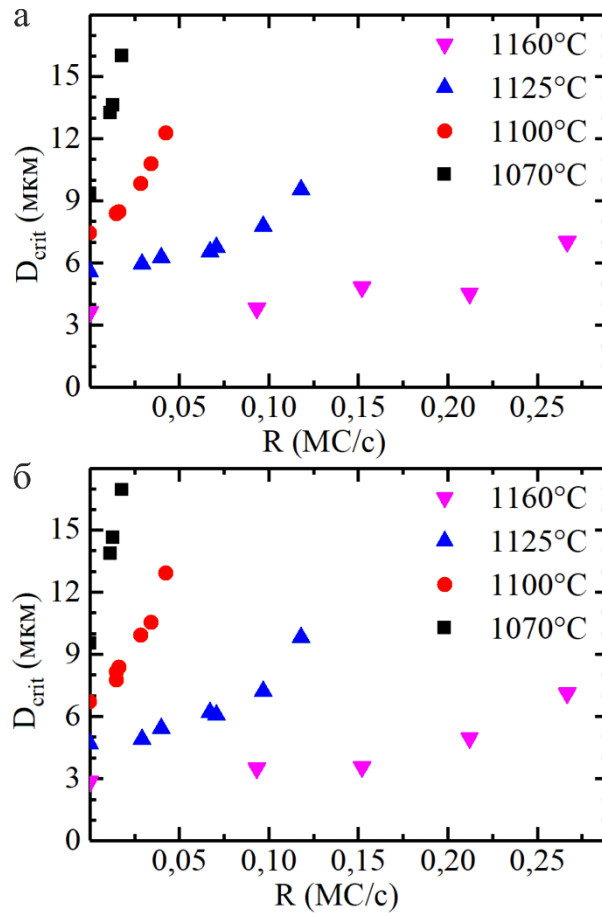


Рис. 4. Зависимость критического диаметра террас с реконструкцией (а) 2×1 и (б) 1×2 для зарождения вакансионного островка от величины компенсирующего потока при различных температурах

Fig. 4. The dependence of the critical diameter of the terraces with the reconstruction of (a) 2×1 and (b) 1×2 for the nucleation of a vacancy island on the value of the compensating flow at different temperatures

аргоном при высокой температуре подложки является не одиночная дивакансия, а дивакансионный комплекс. Энергия двумерного зарождения для кинетики ограниченной диффузией состоит из умноженной на χ суммы энергии диффузии дивакансии (E_{dif}) и энергии связей в зародыше (E_i), приходящейся на одну дивакансию. Получаем, что $E_{dif} + E_i = 2,8 \pm 0,4$ эВ при диффузии поперек димерных рядов и $E_{dif} + E_i = 1,9 \pm 0,3$ эВ – вдоль рядов. Энергия связи в зародыше не зависит от направления диффузии, поэтому можно оценить разницу энергий диффузии в двух перпендикулярных направлениях как $0,9 \pm 0,5$ эВ. Согласно литературным данным E_{dif} вдоль димерных рядов для дивакансий составляет $1,7 \pm 0,4$ эВ [20], соответственно E_i не превышает $0,7$ эВ.

Заключение

В работе изучены процессы зарождения вакансионных островков в центре системы концентрических ступеней при высокотемпературном отжиге. Для разных температур подложки

и внешнего потока атомов получены зависимости критического диаметра от компенсирующего потока атомов в двух направлениях – вдоль и поперек димерных рядов атомов сверхструктуры (1×2). В рамках теории зарождения круглого двумерного островка полученные данные свидетельствуют о кинетике зарождения ограниченной диффузией, большом размере стабильного зародыша, разнице энергий диффузии в двух перпендикулярных направлениях $0,9 \pm 0,5$ эВ и энергии связи дивакансий в зародыше до 0,7 эВ. Таким образом, меняя температуру подложки и внешний поток атомов, можно контролируемо менять расстояние между концентрическими ступенями и размер центральной террасы в широком диапазоне.

Список литературы / References

1. **Mo Y.-W., Swartzentruber B., Kariotis R., Webb M., Lagally M.** Growth and equilibrium structures in the epitaxy of Si on Si(001). *Phys. Rev. Lett.*, 1989, vol. 63, no. 21, p. 2393–2396.
2. **Sitnikov S. V., Kosolobov S. S., Latyshev A. V.** Nucleation of two-dimensional islands on Si(111) during high-temperature epitaxial growth. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 2, p. 203–206.
3. **Sitnikov S. V., Latyshev A. V., Kosolobov S. S.** Advacancy-mediated atomic steps kinetics and two-dimensional negative island nucleation on ultra-flat Si(111) surface. *J. Cryst. Growth*, 2017, vol. 457, p. 196–201.
4. **Sysoev E., Kosolobov S., Kulikov R., Latyshev A., Sitnikov S., Vykhristyuk I.** Interferometric Surface Relief Measurements with Subnano / Picometer Height Resolution. *Meas. Sci. Rev.*, 2017, vol. 17, no. 5, p. 213–218.
5. **Sheglov D. V., Kosolobov S. S., Fedina L. I. et al.** High-precision nanoscale length measurement. *Nanotechnologies Russ.*, 2013, vol. 8, no. 7–8, p. 518–531.
6. **Rogilo D. I., Rybin N. E., Fedina L. I., Latyshev A. V.** Adatom concentration distribution on an extrawide Si(111) terrace during sublimation. *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, 2016, vol. 52, no. 5, p. 501–507.
7. **Mo Y. W., Kleiner J., Webb M. B., Lagally M. G.** Activation energy for surface diffusion of Si on Si(001): A scanning-tunneling-microscopy study. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, vol. 66, no. 15, p. 1998–2001.
8. **Sitnikov S., Kosolobov S., Latyshev A.** Attachment – detachment limited kinetics on ultra-flat Si(111) surface under etching with molecular oxygen at elevated temperatures. *Surf. Sci.*, Elsevier B.V., 2015, vol. 633, p. L1–L5.
9. **Watanabe H., Ichikawa M.** Anisotropic kinetics of vacancy diffusion and annihilation on Si(001) surfaces studied by scanning reflection electron microscopy. *Phys. Rev. B – Condens. Matter Mater. Phys.*, 1997, vol. 55, no. 15, p. 9699–9705.
10. **Wang S.-H., Cai Q.** Anisotropic Diffusion Evolution of Vacancies Created by Oxygen Etching on a Si Surface. *Chinese Phys. Lett.*, 2011, vol. 28, no. 7, p. 076801.
11. **Nielsen J. F., Pelz J. P., Hibino H., Hu C. W., Tsong I. S. T.** Enhanced Terrace Stability for Preparation of Step-Free Si(001)-(2 × 1) Surfaces. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 87, no. 13, p. 136103.
12. **Bartelt N. C., Tromp R. M., Williams E. D.** Step capillary waves and equilibrium island shapes on Si(001). *Phys. Rev. Lett.*, 1994, vol. 73, no. 12, p. 1656–1659.
13. **Tromp R., Mankos M.** Thermal Adatoms on Si(001). *Phys. Rev. Lett.*, 1998, vol. 81, no. 5, p. 1050–1053.
14. **Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L.** Application of ultrahigh vacuum reflection electron microscopy for the study of clean silicon surfaces in sublimation, epitaxy, and phase transitions. *Microsc. Res. Tech.*, 1992, vol. 20, no. 4, p. 341–351.

15. **Métois J. J., Heyraud J. C.** Silicon (001), an atypical low index surface. *Surf. Sci.*, 2000, vol. 446, no. 3, p. L127–L133.
16. **Bartelt M. C., Evans J. W.** Scaling analysis of diffusion-mediated island growth in surface adsorption processes. *Phys. Rev. B.*, 1992, vol. 46, no. 19, p. 12675–12687.
17. **Alerhand O. L., Berker N. A., Joannopoulos J. D., Vanderbilt D., Hamers R. J., Demuth J. E.** Finite-temperature phase diagram of vicinal Si(100) surfaces. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, vol. 64, no. 20, p. 2406–2409.
18. **Theis W., Tromp R. M.** Nucleation in Si (001) Homoepitaxial Growth. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, vol. 76, no. 15, p. 2770–2773.
19. **Ranguelov B., Altman M. S., Markov I.** Critical terrace width for step flow growth: Effect of attachment-detachment asymmetry and step permeability. *Phys. Rev. B.*, 2007, vol. 75, no. 24, p. 245419.
20. **Kitamura N., Swartzentruber B. S., Lagally M. G., Webb M. B.** Variable-temperature STM measurements of step kinetics on Si (001). *Phys. Rev. B.*, 1993, vol. 48, no. 8, p. 5704–5707.

Материал поступил в редколлегию

*Received
26.02.2019*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Родякина Екатерина Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия); Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Ekaterina E. Rodyakina, Candidate of Science (Physics and Mathematics), A. V. Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (13 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

rodyakina@isp.nsc.ru

ORCID 0000-0003-4940-7074

Ситников Сергей Васильевич, кандидат физико-математических наук, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия)

Sergey V. Sitnikov, Candidate of Science (Physics and Mathematics), A. V. Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (13 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

sitnikov@isp.nsc.ru

ORCID 0000-0002-2398-8272

Латышев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, академик РАН, профессор, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия); Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Aleksandr V. Latyshev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Academician of RAS, Professor, A. V. Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (13 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

latyshev@isp.nsc.ru