

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ
MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-664-669

УДК 539.211, 537.533

Дрейф двумерных вакансионных островков на поверхности Si(100)
в условиях электромиграцииЮлия Александровна Воронцова¹✉, Сергей Васильевич Ситников²^{1,2} Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Российская Федерация¹ jvorontsova2000@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-4821-7773>² sitnikov@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2398-8272>

Аннотация

Предмет исследования. С применением *in situ* метода сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии выполнено экспериментальное исследование морфологических изменений поверхности Si(100) в условиях электромиграции. Целью исследования является определение температурной зависимости эффективного электрического заряда адсорбированного атома на поверхности Si(100). **Метод.** С помощью бомбардировки низкоэнергетическими ионами аргона и последующего высокотемпературного отжига на поверхности образцов Si(100) сформирована система концентрических двумерных вакансионных островков. На поверхности образцов созданы квазиравновесные условия путем компенсации сублимирующего потока с поверхности из внешнего источника кремния. В условиях электромиграции при компенсации сублимации выполнена запись видеоизображений дрейфа вакансионных островков. **Основные результаты.** В результате обработки и анализа видеоизображений получена зависимость скорости движения вакансионных островков на поверхности Si(100) для различных температур и направлений электрического тока вдоль и поперек димерных рядов сверхструктуры (2 × 1) внутри островка. Показано, что в квазиравновесных условиях скорость дрейфа вакансионных островков не зависит от их размеров. Построена упрощенная одномерная теоретическая модель, которая включает в себя одну атомную ступень. Ступень движется посредством отрыва от нее атомов и их дрейфа под силой электромиграции в условиях отсутствия десорбции и осаждения атомов на поверхность. На основе предложенной модели дана оценка эффективного электрического заряда, и построена температурная зависимость величины эффективного заряда в интервале температур 1010–1120 °С. Абсолютная величина эффективного заряда линейно уменьшается с увеличением температуры. Знак эффективного заряда отрицательный, а его средняя величина составляет $Z = -0,5 \pm 0,3$ элементарных зарядов. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть востребованы при создании структур со счетным количеством атомных ступеней для использования в качестве вторичных мер высоты с привязкой к кристаллической решетке кремния.

Ключевые слова

поверхность кремния, электромиграция, эффективный заряд, сверхвысоковакуумная отражательная электронная микроскопия

Благодарности

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования «Наноструктуры» при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30023).

Ссылка для цитирования: Воронцова Ю.А., Ситников С.В. Дрейф двумерных вакансионных островков на поверхности Si(100) в условиях электромиграции // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 664–669. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-664-669

Drift of two-dimensional vacancy islands on the Si(100) surface under electromigration conditions

Iuliia A. Vorontsova¹✉, Sergey V. Sitnikov²

^{1,2} Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

¹ jvorontsova2000@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-4821-7773>

² sitnikov@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2398-8272>

Abstract

The paper presents an experimental study of morphological changes of the Si(100) surface under electromigration conditions that was carried out using the *in situ* method involving ultrahigh vacuum reflection electron microscopy. The study aims to determine the temperature dependence of the effective electric charge of an adsorbed atom on the Si(100) surface. A system of concentric two-dimensional vacancy islands was formed on the surface of Si(100) samples by low-energy argon ion sputtering and subsequent high-temperature annealing. Quasi-equilibrium conditions were created on the sample surface by compensating the sublimating flow from the surface from an external silicon source. The video images of the drift of vacancy islands were recorded under the conditions of electromigration with the compensation of sublimation. Based on the processing and analysis of video images, the authors described the dependence of the velocity of motion of vacancy islands on the Si(100) surface for various temperatures and the direction of the electric current along and across the dimer rows with the (2×1) superstructure inside the island. It is shown that the drift rate of vacancy islands does not depend on their size under quasi-equilibrium conditions. A simplified one-dimensional theoretical model has been constructed. It includes one atomic step moving by a detachment of atoms from the step and their drift under the force of electromigration in the absence of desorption and deposition of atoms on the surface. Based on the proposed model, the effective electric charge is estimated, and the temperature dependence of the effective charge in the temperature range of 1010 to 1120 °C is obtained. The absolute value of the effective charge decreases linearly with increasing temperature. The sign of the effective charge is negative, and its average value is $Z = -0.5 \pm 0.3$ elementary charges. The obtained results can be used for creating structures with a countable number of atomic steps and act as secondary measures of height with reference to the silicon crystal lattice.

Keywords

silicon surface, electromigration, effective charge, ultrahigh vacuum reflection electron microscopy

Acknowledgements

The work was carried out using the equipment of Collective Use Center “Nanostructures” with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 19-72-30023).

For citation: Vorontsova Iu.A., Sitnikov S.V. Drift of two-dimensional vacancy islands on the Si(100) surface under electromigration conditions. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 664–669 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-664-669

Введение

В настоящее время одна из актуальных задач нанотехнологий — управление процессами формирования наноструктур с заданными свойствами. Кроме управления такими параметрами процессов, как температура и поток веществ, перспективным является использование электрических полей для индуцирования массопереноса в определенных направлениях. Данное явление называется электромиграцией. Первоначально оно было хорошо изучено в другом контексте: протекающий через цепь постоянный электрический ток может привести к образованию бугорков на поверхности или пустот в объеме, что приводит к разрушению металлических проводников.

Элементарный процесс электромиграции атома на поверхности полупроводника заключается в том, что электрический ток приводит к появлению преимущественного направления в случайных элементарных скачках атомов между местами адсорбции. Это явление связано либо с кинетическим обменом импульсом между носителями заряда и адсорбированными атомами (силой «ветра»), либо с прямым воздействием электрического поля на атом (прямой силой) из-за наличия наведенного заряда у адсорбированного атома (адатома). Сила «ветра» должна зависеть от количества

электронов, передающих импульс, и, соответственно, от плотности тока на поверхности, а прямая сила — от напряженности электрического поля. Таким образом, атомы несут эффективный заряд, возникающий в результате вклада этих двух сил, который может достигать двух десятков размеров элементарного заряда электрона для атомов металлов в объеме металлического сплава [1]. На поверхности кристаллических полупроводников, в частности кремния (Si), эффективный заряд адсорбированного атома достоверно не определен по нескольким причинам. Наблюдение за диффузией отдельных адатомов возможно методом сканирующей туннельной микроскопии, однако данный метод работает только при температурах значительно ниже, чем температуры, используемые в процессах эпитаксиального роста. Также важным фактором является наличие сверхструктурной реконструкции, поскольку она изменяет электронные состояния у поверхности, вследствие чего влияет на проводимость вдоль нее, а также оказывает сильное влияние на диффузионный процесс адсорбированных атомов на поверхности [2–4]. Определение эффективного заряда адатома возможно с помощью изучения перераспределения атомных ступеней на поверхности в процессе электромиграции, но использование данного подхода затруднено вследствие необходимости учета многих процессов: встраивание и

отрыв атомов от ступени, движение атомных ступеней, потенциал взаимодействия атомных ступеней между собой, кривизну ступени и зависимость от нее концентрации адатомов и др. [5, 6].

В работе Curiotto и др. [7] был выполнен эксперимент по исследованию дрейфа двумерных вакансионных островков на поверхности Si(100). Эффективный заряд адсорбированного атома на поверхности был оценен в пределах от 7 до 25 элементарных зарядов. Представленный разброс значений в оценке эффективного заряда довольно велик, что может быть связано с его зависимостью от температуры. Однако данный эксперимент не позволяет этого установить, так как в работе было исследовано движение группы вакансионных островков, которые взаимодействуют между собой (процесс освальдовского созревания), а также не был учтен вклад от сублимации.

В настоящей работе исследован дрейф одиночного вакансионного островка на широкой круглой террасе в условиях квазиравновесия на поверхности. Это позволяет исключить дополнительные вклады, возникающие из-за взаимодействия островков и сублимации на поверхности, и описать полученные результаты простой моделью.

Методика эксперимента

В работе выполнены исследования с применением *in situ* метода сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (ОЭМ) [5]. Данный метод обладает высокой чувствительностью к элементам структуры поверхности и позволяет визуализировать моноатомные ступени, сверхструктурные домены и двумерные островки в интервале от температуры жидкого азота ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) до температуры плавления образца (для Si = $1414,85\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для проведения эксперимента предварительно подготавливались образцы Si(100). Ширина образцов лежит в пределах от 1,1 до 2,4 мм. На поверхности образца с помощью бомбардировки низкоэнергетическими ионами аргона сформировано углубление. Затем образец помещался в сверхвысоковакуумную камеру ОЭМ, где для очистки поверхности кристалла от слоя естественного окисла подвергался отжигу при температуре $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 10 мин. В процессе отжига в центре углубления формировалась система концентрических двумерных вакансионных островков. Образец прогревался током с формой сигнала меандр для исключения влияния эффекта электромиграции. В процессе сублимации был подобран внешний поток кремния для создания на поверхности квазиравновесных условий, при которых размер вакансионного островка оставался постоянным. Далее в условиях нагрева постоянным током в направлении [011] островок равномерно перемещался по террасе.

На рис. 1 приведена серия ОЭМ-изображений, демонстрирующая перемещение вакансионного островка по поверхности в процессе эксперимента. Особенностью является сжатие в направлении падения пучка, поэтому почти круглые островки выглядят как сильно вытянутый в одном направлении эллипс.

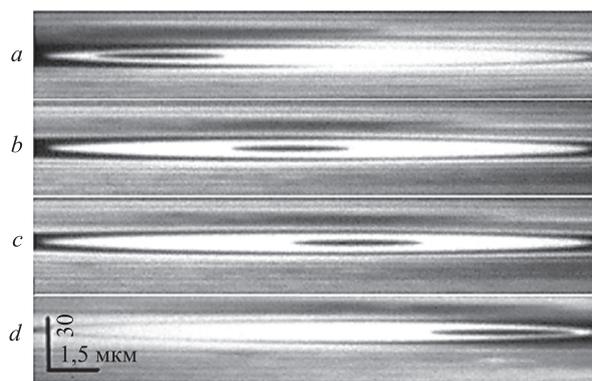


Рис. 1. Серия ОЭМ-изображений, демонстрирующая смещение вакансионного островка на поверхности Si(100): 580 с (a); 620 с (b); 640 с (c); 690 с (d)

Fig. 1. A series of REM images showing the displacement of a vacancy island on the Si(100) surface: 580 s (a); 620 s (b); 640 s (c); 690 s (d)

Темные области на изображении соответствуют реконструкции 1×2 , светлые — 2×1 , граница между областями соответствует атомной ступени. Сначала вакансионный островок смещался от одного края к другому. Когда он приближался к краю террасы, направление электрического поля менялось на противоположное, и островок начинал двигаться в обратном направлении. Важно отметить, что вследствие того, что на поверхности Si(100) диффузия вдоль рядов димеров происходит намного быстрее, чем перпендикулярно к ним, островки движутся по или против направления приложенной силы в зависимости от того, какую они имеют реконструкцию [8]. Быстрая диффузия происходит на темных островках. Светлые островки движутся в направлении действия силы, темные островки — против направления действия силы.

Результаты

По результатам анализа ОЭМ-изображений получены значения скорости вакансионного островка при различных температурах. Значение скорости островка при одной температуре получено по результатам усреднения значений скоростей при каждом движении от одного края террасы к другому. На рис. 2 представлена температурная зависимость скорости для двух типов вакансионных островков с реконструкциями 2×1 и 1×2 . Разброс значений скоростей при одной температуре связан с тем, что они соответствуют разным величинам тока и напряжения.

Рассмотрим экспериментальные данные при изменении размера островка. На рис. 3 представлены временные зависимости диаметра и координаты центра вакансионного островка в условиях небольшого отклонения от равновесия в сторону роста. Выявлено, что даже в данных условиях скорость вакансионного островка остается постоянной. Данный факт можно объяснить, во-первых, тем, что мы следим за скоростью центра островка, а вакансионный островок расширяется или уменьшается в разные стороны относительно своего центра при сублимации или росте, соот-

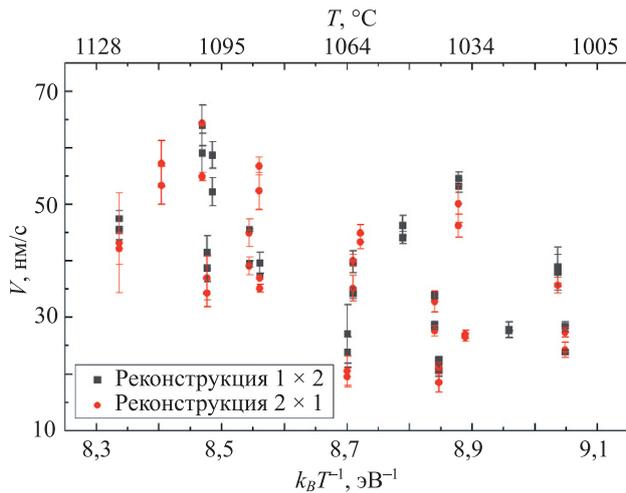


Рис. 2. Зависимость скорости движения V от температуры T для двух видов вакансионных островков, k_B — постоянная Больцмана

Fig. 2. Dependence of the velocity of motion V on temperature T for two types of vacancy islands, k_B — Boltzmann constant

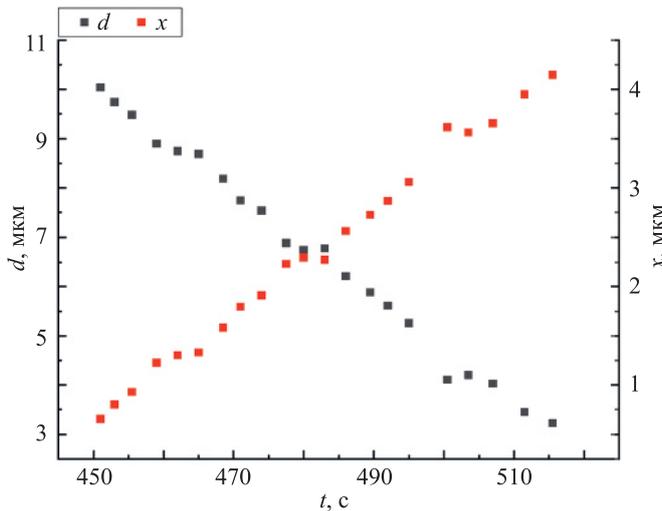


Рис. 3. Зависимость диаметра d и координаты центра x вакансионного островка от времени t

Fig. 3. Dependence of the diameter d and the coordinate of the center x of the vacancy island on time t

ветственно. Во-вторых, важно отметить, что условия эксперимента очень близки к равновесным. Ступень поддерживает равновесную концентрацию около нее, а электрическое поле равномерно перемещает все адатомы на террасе. При этом процесс обмена атомами между ступенью и террасой происходит значительно быстрее, чем процесс миграции адатомов по террасе. Таким образом, концентрация адатомов на всей террасе близка к равновесной, поток атомов к ступени и от нее одинаковый.

Оценка эффективного заряда адатома

Для анализа экспериментальных данных выполнена оценка эффективного заряда адатома в рамках расширенной теории Бартон, Кабреры и Франка [9].

Рассмотрена максимально упрощенная система одной ступени на бесконечной террасе с равновесной концентрацией адатомов. Известно, что на поверхности Si(100) процесс диффузии значительно быстрее происходит вдоль димерных рядов [8], поэтому в системе учитывается только поток к ступени или от нее на террасе, направление быстрой диффузии на которой совпадает с направлением действия силы электрического поля. Размеры островка достаточно большие для пренебрежения эффектами из-за кривизны ступени (Гиббса–Томпсона) [10].

При включении электрического поля E учитывается возникающая электромиграция атомов [11]. Сила, действующая на адатомы, равна:

$$F = eZE,$$

где Z — эффективный заряд атомов; e — заряд электрона. Эффективный заряд Z представляется в виде суммы: $Z = Z_d + Z_w$, где Z_d — заряд, вызванный силой электростатического взаимодействия между атомом и полем, а Z_w — заряд, вызванный силой «ветра», возникающей из-за передачи импульса от носителей заряда при их рассеянии на атоме.

Из уравнения Фика [12] выражена составляющая потока J , связанная с электромиграцией, через скорость дрейфа одного адсорбированного атома $\frac{DF}{k_B T}$, где D — коэффициент поверхностной диффузии, и равновесную со ступенью концентрацию адсорбированных атомов на террасе n_e :

$$J = \frac{DFn_e}{k_B T}.$$

Скорость ступени:

$$V = JS,$$

где S — площадь, приходящаяся на один атом в слое поверхности Si(100) и равная $\frac{1}{n_0}$, где n_0 — поверхностная плотность атомов. Таким образом, скорость смещения атомной ступени имеет следующий вид

$$V = \frac{1}{n_0} \frac{DFn_e}{k_B T}.$$

Концентрация адсорбированных подвижных атомов n_e на кристаллической поверхности в условиях равновесия с атомной ступенью определяется следующим выражением [13]:

$$n_e = n_0 e^{-\frac{E_{ad}}{k_B T}},$$

где E_{ad} — энергия активации перехода атома из излома на ступени в положение адсорбции на поверхности.

Коэффициент диффузии, характеризующий подвижность адатома на поверхности, выражается как:

$$D = \frac{1}{n_0} \vartheta_0 e^{-\frac{E_{dif}}{k_B T}},$$

где E_{dif} — энергия активации поверхностной диффузии; ϑ_0 — частота собственных колебаний атома.

Далее, подставив выражения для D , F и n_e из уравнения скорости смещения атомной ступени, выразим составляющую эффективного заряда:

$$Z = \frac{Vn_0k_B T}{\vartheta_0 e E} e^{\frac{E_{dif} + E_{ad}}{k_B T}}$$

Для поверхности кремния Si(100) из работы [14] были взяты значения следующих параметров: $n_0 = 0,678 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $\vartheta_0 = 2,86 \times 10^{13} \text{ Гц}$, $E_{ad} = 0,35 \text{ эВ}$, $E_{dif} = 1 \text{ эВ}$.

Обсуждение результатов

На рис. 4 представлена зависимость величины эффективного заряда от температуры. Из графика видно, что абсолютная величина эффективного заряда уменьшается с увеличением температуры. Для островков с разной реконструкцией значения эффективного заряда практически совпадают. Для образцов разной ширины значения различаются в зависимости от тока и напряжения. Так как точность проведенного эксперимента не позволяет выявить явной зависимости эффективного заряда от тока и напряжения, невозможно разделить полученную величину эффективного заряда адсорбированного атома на заряд, вызванный силой электростатического взаимодействия между атомом и полем, и заряд, вызванный силой «ветра».

Полученная средняя величина эффективного заряда атомов на поверхности Si(100) в интервале температур 1010–1120 °С гораздо меньше величины, полученной Curiotto и др. [7] $7 < Z < 25$ для Si(100) в диапазоне температур 800–980 °С. Такую большую разницу можно объяснить тем, что модель Curiotto не учитывает дополнительные вклады, возникающие из-за взаимодействия островков и сублимации на поверхности. Результаты Curiotto получены при более низких температурах. Результаты в настоящей работе говорят о том, что абсолютная величина эффективного заряда растет с уменьшением температуры. Также стоит отметить, что экспериментальные данные в работе [7] получены с применением метода микроскопии медленных электронов, в котором образец находится в сильном электрическом поле перпендикулярном его поверхности. Это может приводить к смещению потока носителей заряда внутри полупроводника ближе к поверхности и тем самым к увеличению заряда, вызванного силой «ве-

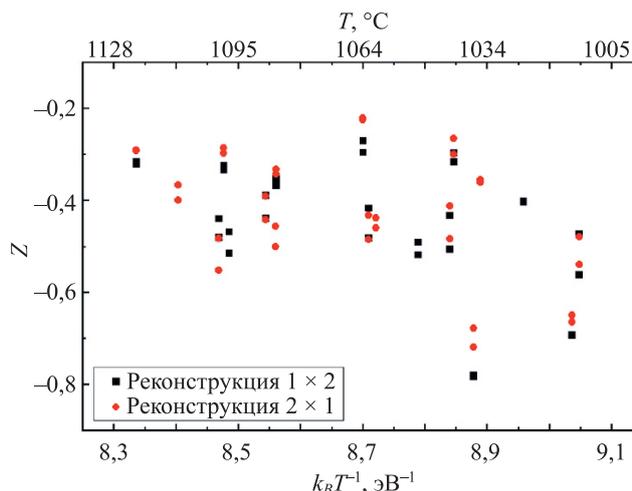


Рис. 4. Зависимость эффективного заряда Z от температуры T для двух типов вакансионных островков

Fig. 4. Dependence of the effective charge Z on temperature T for two types of vacancy islands

тра». В пределах погрешности результаты сопоставимы с оценкой эффективного заряда для Si(100) Stoyanov [10] $Z = 1$ при $T = 1000 \text{ °С}$. Также полученную величину можно сопоставить с результатами Minoda и др. [15] для поверхности Si(111), что $Z \approx +0,02$ при 1270 К и линейно уменьшается с температурой.

Заключение

В представленной работе проведены *in situ* исследования по изучению дрейфа вакансионных островков на поверхности Si(100) в условиях электромиграции при компенсации сублимации. Измерена скорость дрейфа вакансионных островков на поверхности Si(100) при различных температурах. Показано, что в квазиравновесных условиях скорость дрейфа вакансионных островков не зависит от их размеров, из чего можно сделать вывод, что процесс миграции адатомов зависит только от приложенной силы. Разработана упрощенная теоретическая модель. Из сопоставления теоретической модели с экспериментальными данными получена температурная зависимость эффективного заряда. Средняя величина эффективного заряда $Z = -0,5 \pm 0,3$ элементарных зарядов в интервале температур 1010–1120 °С.

Литература

1. Yasunaga H., Natori A. Electromigration on semiconductor surfaces // *Surface Science Reports*. 1992. V. 15. N 6-7. P. 205–280. [https://doi.org/10.1016/0167-5729\(92\)90007-x](https://doi.org/10.1016/0167-5729(92)90007-x)
2. Тамм И.Е. О возможности связанных состояний электронов на поверхности кристалла // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1933. Т. 3. С. 34–43.
3. Rogilo D.I., Fedina L.I., Kosolobov S.S., Latyshev A.V. On the role of mobile nanoclusters in 2D island nucleation on Si(111)-(7 × 7) surface // *Surface Science*. 2018. V. 667. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2017.09.009>
4. Brocks G., Kelly P.J., Car R. Binding and diffusion of a Si adatom on the Si(100) surface // *Physical Review Letters*. 1991. V. 66. N 13. P. 1729–1732. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.1729>

References

1. Yasunaga H., Natori A. Electromigration on semiconductor surfaces. *Surface Science Reports*, 1992, vol. 15, no. 6-7, pp. 205–280. [https://doi.org/10.1016/0167-5729\(92\)90007-x](https://doi.org/10.1016/0167-5729(92)90007-x)
2. Tamm I.E. On the Possible Bound States of Electrons on a Crystal Surface. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1933, vol. 3, pp. 34–43. (in Russian)
3. Rogilo D.I., Fedina L.I., Kosolobov S.S., Latyshev A.V. On the role of mobile nanoclusters in 2D island nucleation on Si(111)-(7 × 7) surface. *Surface Science*, 2018, vol. 667, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2017.09.009>
4. Brocks G., Kelly P.J., Car R. Binding and diffusion of a Si adatom on the Si(100) surface. *Physical Review Letters*, 1991, vol. 66, no. 13, pp. 1729–1732. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.1729>

5. 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 // *Microscopy Research and Technique*. 1992. V. 20. N 4. P. 341–351. <https://doi.org/10.1002/jemt.1070200405>
6. Rogilo D.I., Fedina L.I., Kosolobov S.S., Rangelov B.S., Latyshev A.V. Critical terrace width for two-dimensional nucleation during Si growth on Si(111)-(7x7) surface // *Physical Review Letters*. 2013. V. 111. N 3. P. 036105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.036105>
7. Curiotto S., Müller P., El-Barraj A., Cheynis F., Pierre-Louis O., Leroy F. 2D nanostructure motion on anisotropic surfaces controlled by electromigration // *Applied Surface Science*. 2019. V. 469. P. 463–470. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.049>
8. Curiotto S., Cheynis F., Müller P., Leroy F. 2D manipulation of nanoobjects by perpendicular electric fields: Implications for nanofabrication // *ACS Applied Nano Materials*. 2020. V. 3. N 2. P. 1118–1122. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b02517>
9. Myers-Beaghton A.K., Vvedensky D.D. Generalized Burton-Cabrera-Frank theory for growth and equilibration on stepped surfaces // *Physical Review A*. 1991. V. 44. N 4. P. 2457–2468. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.44.2457>
10. McLean J.G., Krishnamachari B., Peale D.R., Chason E., Sethna J.P., Cooper B.H. Decay of isolated surface features driven by the Gibbs-Thomson effect in an analytic model and a simulation // *Physical Review B*. 1997. V. 55. N 3. P. 1811–1823. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.1811>
11. Kandel D., Kaxiras E. Microscopic theory of electromigration on semiconductor surfaces // *Physical Review Letters*. 1996. V. 76. N 7. P. 1114–1117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.1114>
12. Stoyanov S. Electromigration induced step bunching on si surfaces-how does it depend on the temperature and heating current direction? // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1991. V. 30. N 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1143/JJAP.30.1>
13. Латышев А.В. Атомные процессы на поверхности кристалла: учеб. пособие / Новосибирский государственный университет. Новосибирск, 2006. 96 с.
14. 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 // *Physical Review Letters*. 2001. V. 87. N 13. P. 136103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.136103>
15. Minoda H. Study of an effective charge of si adatoms on a Si(111) 1 × 1 surface // *Journal of the Physical Society of Japan*. 2002. V. 71. N 12. P. 2944–2947. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.71.2944>
5. 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. *Microscopy Research and Technique*, 1992, vol. 20, no. 4, pp. 341–351. <https://doi.org/10.1002/jemt.1070200405>
6. Rogilo D.I., Fedina L.I., Kosolobov S.S., Rangelov B.S., Latyshev A.V. Critical terrace width for two-dimensional nucleation during Si growth on Si(111)-(7x7) surface. *Physical Review Letters*, 2013, vol. 111, no. 3, pp. 036105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.036105>
7. Curiotto S., Müller P., El-Barraj A., Cheynis F., Pierre-Louis O., Leroy F. 2D nanostructure motion on anisotropic surfaces controlled by electromigration. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 469, pp. 463–470. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.049>
8. Curiotto S., Cheynis F., Müller P., Leroy F. 2D manipulation of nanoobjects by perpendicular electric fields: Implications for nanofabrication. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 1118–1122. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b02517>
9. Myers-Beaghton A.K., Vvedensky D.D. Generalized Burton-Cabrera-Frank theory for growth and equilibration on stepped surfaces. *Physical Review A*, 1991, vol. 44, no. 4, pp. 2457–2468. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.44.2457>
10. McLean J.G., Krishnamachari B., Peale D.R., Chason E., Sethna J.P., Cooper B.H. Decay of isolated surface features driven by the Gibbs-Thomson effect in an analytic model and a simulation. *Physical Review B*, 1997, vol. 55, no. 3, pp. 1811–1823. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.1811>
11. Kandel D., Kaxiras E. Microscopic theory of electromigration on semiconductor surfaces. *Physical Review Letters*, 1996, vol. 76, no. 7, pp. 1114–1117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.1114>
12. Stoyanov S. Electromigration induced step bunching on si surfaces-how does it depend on the temperature and heating current direction? *Japanese Journal of Applied Physics*, 1991, vol. 30, no. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1143/JJAP.30.1>
13. Latyshev A.V. *Atomic Processes on a Crystal Surface*. Tutorial. Novosibirsk State University, 2006, 96 p. (in Russian)
14. 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. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 87, no. 13, pp. 136103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.136103>
15. Minoda H. Study of an effective charge of si adatoms on a Si(111) 1 × 1 surface. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2002, vol. 71, no. 12, pp. 2944–2947. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.71.2944>

Авторы

Воронцова Юлия Александровна — лаборант, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4821-7773>, jvorontsova2000@gmail.com

Ситников Сергей Васильевич — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2398-8272>, sitnikov@isp.nsc.ru

Authors

Iuliia A. Vorontsova — Laboratory Assistant, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4821-7773>, jvorontsova2000@gmail.com

Sergey V. Sitnikov — PhD, Scientific Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2398-8272>, sitnikov@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 18.07.2021
Одобрена после рецензирования 09.08.2021
Принята к печати 17.09.2021

Received 18.07.2021
Approved after reviewing 09.08.2021
Accepted 17.09.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»