

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-679-685

УДК 539.211, 539.25

## Кинетика трансформации формы эшелонов атомных ступеней на поверхности Si(001) в условиях электромиграции

Марина Эдуардовна Разживина<sup>1</sup>, Екатерина Евгеньевна Родякина<sup>2</sup>, Сергей Васильевич Ситников<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Российская Федерация

<sup>1</sup> razz-m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2470-753X>

<sup>2</sup> rodyakina@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4940-7074>

<sup>3</sup> sitnikov@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2398-8272>

### Аннотация

**Предмет исследования.** На качество кремниевых эпитаксиальных структур значительное влияние оказывает как начальная морфология поверхности, так и ее трансформация в процессе роста. Одним из явлений огрубления поверхности кремния в процессе отжига, роста, воздействия электрического тока, и адсорбции инородного материала является формирование эшелонов ступеней. В работе приведены результаты экспериментального исследования кинетики трансформации эшелонов атомных ступеней на поверхности Si(001) в условиях электромиграции при нагреве постоянным электрическим током в направлении вниз по ступеням в интервале температур 1000–1150 °С. **Метод.** Отжиг образцов выполнен в сверхвысоковакуумной камере отражательного электронного микроскопа с последующей закалкой до комнатной температуры. В атмосферных условиях с применением атомно-силового микроскопа получены данные о зависимости среднего расстояния между ступенями от количества ступеней в эшелоне. **Основные результаты.** Установлено, что экспериментально построенная зависимость подчиняется степенному закону  $l \propto N^\alpha$ , где  $\alpha$  изменялся от  $-0,68$  до  $-0,36$ . Подтверждено изменение потенциала упругого взаимодействия ступеней в эшелонах с ростом температуры. **Практическая значимость.** Результаты работы определяют понимание процесса эшелонирования Si(001) при повышенных температурах.

### Ключевые слова

кремний(001), эшелоны атомных ступеней, реконструкция, электромиграция, потенциал упругого взаимодействия

### Благодарности

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

**Ссылка для цитирования:** Разживина М.Э., Родякина Е.Е., Ситников С.В. Кинетика трансформации формы эшелонов атомных ступеней на поверхности Si(001) в условиях электромиграции // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 679–685. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-679-685

## Kinetics of transformation of the atomic step bunches shape under electromigration conditions on the Si(001) surface

Marina E. Razzhivina<sup>1</sup>, Ekaterina E. Rodyakina<sup>2</sup>, Sergey V. Sitnikov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>1</sup> razz-m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2470-753X>

<sup>2</sup> rodyakina@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4940-7074>

<sup>3</sup> sitnikov@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2398-8272>

© Разживина М.Э., Родякина Е.Е., Ситников С.В., 2021

**Abstract**

The quality of the epitaxial structures is significantly influenced by both the initial surface morphology and its transformation during growth. One of the phenomena of surface roughness of silicon occurring during annealing, growth, exposure to electric current, and adsorption of foreign material is the formation of step bunches. The paper presents experimental studies of the transformation kinetics of an atomic step bunches shape on the Si(001) surface that were carried out under electromigration conditions when heated by a constant electric current down the steps in the temperature range of 1000–1150 °C. The samples were annealed in an ultra-high vacuum chamber of a reflection electron microscope, followed by quenching to room temperature. The dependence of the average distance between steps on the number of the bunch steps was observed using an atomic force microscope under atmospheric conditions. It was found that the experimentally obtained dependence obeys a power law ( $l \propto N^\alpha$ ), where  $\alpha$  varies from  $-0.68$  to  $-0.36$ . The study confirmed the change in the elastic interaction potential of steps in bunches with the increase in temperature. The results of the work advance understanding of a bunching process of Si(001) at elevated temperatures.

**Keywords**

Si(001), atomic step bunches, reconstruction, electromigration, elastic interaction potential

**Acknowledgements**

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

**For citation:** Razzhivina M.E., Rodyakina E.E., Sitnikov S.V. Kinetics of transformation of the atomic step bunches shape under electromigration conditions on the Si(001) surface. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 679–685 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-679-685

**Введение**

На вицинальных поверхностях Si(111) и Si(001) при нагреве постоянным электрическим током возникает эффект электромиграции, который заключается в направленном дрейфе адатомов. Данный процесс приводит к перераспределению атомных ступеней и формированию эшелонов ступеней – областей высокой плотности атомных ступеней под действием электрического поля [1–3].

Значительное влияние на эшелонирование поверхности Si(001) оказывает сверхструктурная реконструкция ( $2 \times 1$ ), стабильная вплоть до температуры 1180 °C [1]. Терраса со сверхструктурой ( $2 \times 1$ ) представляет собой ряды попарно объединенных атомов, образующих димеры. Скорость диффузии адатомов вдоль димерных рядов быстрее, чем поперек, поэтому доминирующим является массоперенос в направлении, параллельном димерным рядам [4]. При нагреве образца постоянным электрическим током атомные ступени объединяются в пары с последующим объединением в эшелоны, направление тока к атомным ступеням определяет преобладающую реконструкцию ( $2 \times 1$ ) или ( $1 \times 2$ ) на террасах между эшелонами [5, 6].

Ширина террас в эшелоне – результат взаимодействия двух противоположных сил: электромиграции [7–9], сжимающей эшелон, и упругой [10–12], расталкивающей ступени. Потенциал упругого взаимодействия формируется дальнедействующим монополярным и близкодействующим дипольным потенциалами [13, 14]. Упругий монополярный потенциал носит логарифмическую зависимость от среднего расстояния между ступенями и является результатом деформации рядов димеров. Упругий дипольный потенциал обратно пропорционален квадрату среднего расстояния между ступенями и описывает деформацию решетки непосредственно вблизи области ступени.

Аналитические модели показывают степенную зависимость вида  $l \propto N^\alpha$  среднего расстояния  $l$  между ступенями от числа ступеней  $N$  в эшелоне, где величина  $\alpha$  зависит от потенциала взаимодействия ступеней.

Для Si(001) в работе [15] приведено численное моделирование на основе расширенной теории Бартона, Кабреры, Франка [16]. Каждый показатель  $\alpha$  (табл. 1) соответствует тому виду потенциала взаимодействия ступеней, который использовался при моделировании с нормировочными коэффициентами  $A$ ,  $A_0$ ,  $A_1$  и  $A_2$ .

Такое же значение  $\alpha = -0,38$  для моделирования с потенциалом  $U \propto 1/l^2$  получено в работе [17] для Si(001). В работе [5] показано, что для поверхности Si(001) показатель составил  $\alpha = -0,48 + 0,05$  при температуре 1150–1170 °C. Кроме того показано, что зависимость количества ступеней от времени отжига  $t$  имеет вид  $N \propto t^\beta$ , где  $\beta = 0,53 + 0,05$  [5]. Авторы работы [18] показали, что  $\beta$  зависит от температуры, а именно:  $\beta = 0,34 + 0,02$  для 1000 °C и  $\beta = 0,31 + 0,03$  для 1100 °C. Таким образом, можно предположить, что и  $\alpha$ , и потенциал взаимодействия ступеней также зависят от температуры.

Цель настоящей работы — изучение температурной зависимости расстояния между ступенями в эшелонах, характеризующей изменение потенциала взаимодействия ступеней на поверхности Si(001) в условиях электромиграции.

**Эксперимент**

Образцы Si(001) размером  $8 \times 1,1 \times 0,37$  мм отжигались при температурах от 1000 °C до 1150 °C в сверхвысоковакуумной камере отражательного электронного

Таблица 1. Результаты моделирования. Показатель степени  $\alpha$  в зависимости от вида потенциала взаимодействия ступеней [15]

Table 1. Simulation results. The  $\alpha$  exponent depending on the type of the interaction potential of the steps [15]

$\alpha$ для Si(001)	Потенциал упругого взаимодействия ( $U$ )
$-0,375$	$A/l^2$
$-0,750$	$A_0 \ln(l)$
$-0,500$	$A_1 \ln(l) + A_2/l^2$

микроскопа резистивным нагревом [19]. Через образцы был пропущен постоянный электрический ток в сторону нижележащих террас в течение 5–100 мин. После чего они были быстро охлаждены и помещены в атмосферные условия.

Данные о морфологии поверхности образцов с высоким разрешением получены с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) MultiMode 8 (Bruker, USA) в атмосферных условиях. В работе использовался контактный режим, размер сканируемого участка составил  $7 \times 14$  мкм. Информация о рельефе поверхности записывалась компьютерной программой микроскопа в виде двух типов изображений: топографического и фазового.

Анализ полученных топографических и фазовых изображений поверхности Si(001) выполнен с помощью программы для обработки изображений Gwyddion<sup>1</sup>. Типичные фазовые изображения эшелонов ступеней на поверхности после отжига при температуре 1000 °С представлены на рис. 1. Эшелоны визуализируются в виде широких линий темного контраста. Времена от-

жига для данных образцов составили соответственно 10, 20, 40, 60 и 100 мин.

Разработанная методика программного анализа морфологии поверхности позволила получить из топографического изображения информацию о высоте эшелона, а из фазового — о его ширине.

На топографическом изображении (рис. 2, а) показан участок поверхности, содержащий эшелон. АСМ-изображение сначала было обработано для удаления шумов сканирования и выравнено, чтобы террасы слева и справа от эшелона были горизонтальными (рис. 2, б). Затем построено статистическое распределение площади поверхности  $\rho$  от высоты  $z$  и измерено расстояние между двумя пиками, образованными точками двух прилегающих к эшелону террас, которое соответствовало высоте эшелона (рис. 2, с).

У выделенного участка фазового изображения (рис. 3, а) сначала удалены шумы сканирования, затем маской выделена область эшелона (рис. 3, б), и из координат маски контура (рис. 3, с) определена ширина эшелона.

### Обсуждение результатов

На рис. 1 видно, что с увеличением времени отжига эшелоны объединяются, т. е. среднее число ступеней

<sup>1</sup> Руководство пользователя Gwyddion [Электронный ресурс]. URL: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/> (дата обращения: 20.05.2021).

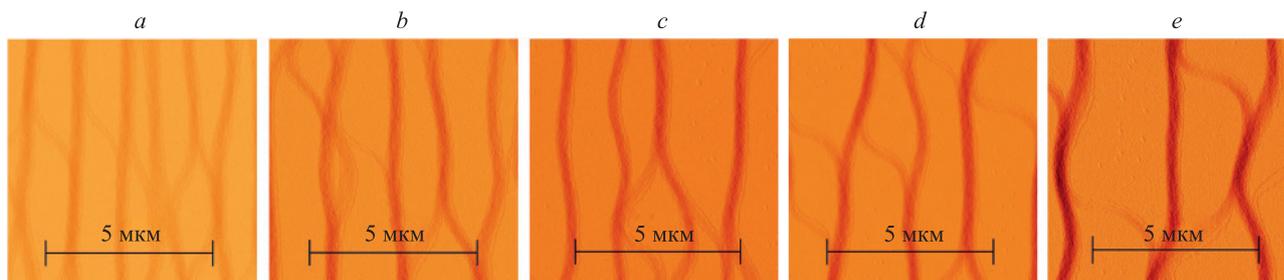


Рис. 1. Фазовые АСМ-изображения морфологии поверхности образцов после отжига при 1000 °С в течение различного времени: 10 мин (а); 20 мин (б); 40 мин (с); 60 мин (д); 100 мин (е)

Fig. 1. AFM phase images of the surface morphology of the samples after annealing at 1000 °С for various time points: 10 min (а); 20 min (б); 40 min (с); 60 min (д); 100 min (е)

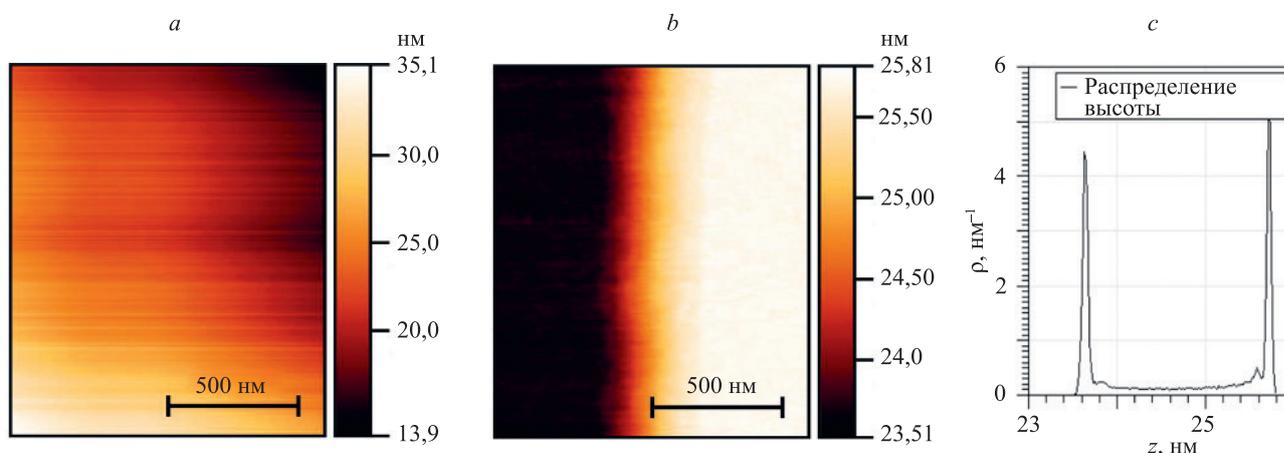


Рис. 2. Топографическое АСМ-изображение до обработки (а) и после обработки (б); распределение точек изображения по высоте (с)

Fig. 2. Topographic AFM image before processing (а); and after processing (б); the height distribution of image points (с)

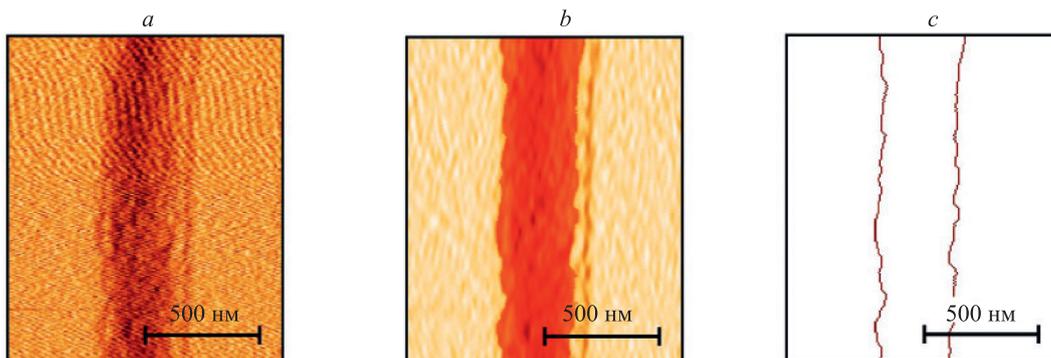


Рис. 3. Фазовое изображение (a); маска на области эшелона (b); контур области эшелона (c)

Fig. 3. Phase image (a); a mask on the bunch area (b); contour of the bunch area (c)

внутри эшелонов и расстояние между эшелонами увеличивается. Это позволяет анализировать зависимость расстояний между ступенями в широком интервале высот эшелонов.

Из полученных данных о высоте и ширине эшелонов построена зависимость среднего расстояния между ступенями от количества ступеней в эшелоне для температур 1000–1150 °С в интервале времени 5–100 мин. С учетом высоты моноатомной ступени (0,136 нм) из высоты всего эшелона было получено количество ступеней. Основания к такому подходу дает малая разориентация экспериментальных образцов (менее 0,1°),

на поверхности в таком случае присутствуют только моноатомные ступени [20]. Среднее расстояние между ступенями рассчитано на основании измеренной ширины эшелона и вычисленного количества составляющих его ступеней. Делается допущение, что средняя ширина террас остается одинаковой во всем эшелоне [13], хотя может меняться от нижней террасы к верхней.

Измерения выполнены для каждого образца с определенным временем отжига при температурах 1000 °С, 1050 °С, 1100 °С, 1150 °С и представлены в виде графиков, построенных в двойных логарифмических координатах (рис. 4). Цветом на рисунке обозначены

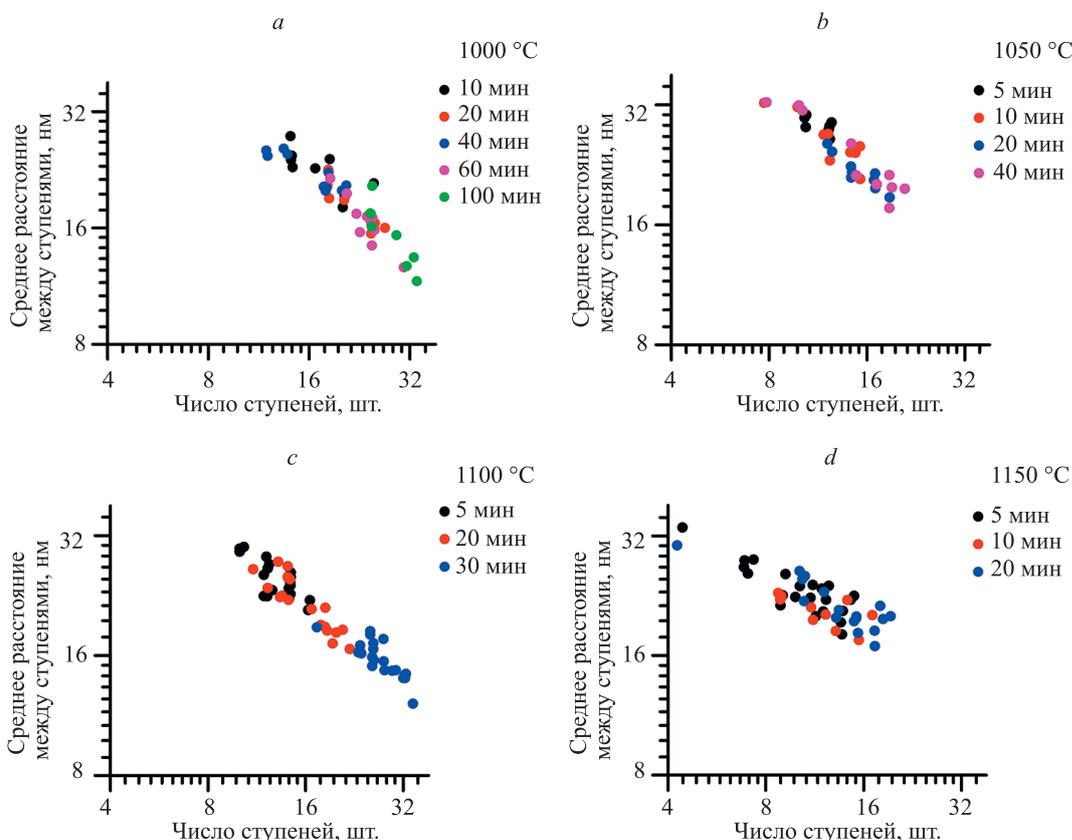


Рис. 4. Экспериментальные данные о количестве ступеней в эшелоне и среднего расстояния между ними для образцов с разным временем отжига для температур: 1000 °С (a); 1050 °С (b); 1100 °С (c); 1150 °С (d)

Fig. 4. Experimental data on the number of steps in the bunch and the average distance between them for samples with different annealing times for the following temperatures: 1000 °С (a); 1050 °С (b); 1100 °С (c); 1150 °С (d)

Таблица 2. Показатель  $\alpha$  степенной зависимости  $l \propto N^\alpha$  при разных температурах эшелонирования  
 Table 2. The  $\alpha$  exponent is a power-law dependence at different separation temperatures

$\alpha$ для Si(001)	$T, ^\circ\text{C}$
$-0,68 \pm 0,04$	1000
$-0,64 \pm 0,04$	1050
$-0,61 \pm 0,03$	1100
$-0,36 \pm 0,03$	1150

различные времена отжига. На графиках видно, что с увеличением количества ступеней в эшелоне, расстояние между ступенями уменьшается. Это результат силы электромиграции, сжимающей эшелон [1].

Линейный характер графиков свидетельствует о степенной зависимости ширины террас от количества ступеней в эшелоне. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы степенной зависимостью вида  $l \propto N^\alpha$ . Результаты аппроксимации (показатель степени  $\alpha$ ) при различных температурах представлены в табл. 2. Отметим, что показатель  $\alpha$  при данной температуре определен по всему массиву данных, т. е. по всем временам отжига в совокупности.

Из результатов видно, что с увеличением температуры степенной показатель  $\alpha$  по модулю уменьшается. В соответствии с работами [15, 17] для Si(001) (табл. 1), при 1000 °C значение  $\alpha$  близко к  $-0,75$  и соответствует логарифмической зависимости потенциала взаимодействия ступеней. Значения  $\alpha$ , близкие к  $-0,5$ , соответствуют групповому вкладу логарифмической и обратно квадратичной зависимостей, в то время как  $\alpha = -0,37$  принадлежит вкладу исключительно обратно квадратичной составляющей также как для изотропной поверхности Si(111).

Сопоставляя данные из табл. 2 и из [15, 17], можно сделать вывод, что с увеличением температуры до 1150 °C, близкой к температуре разупорядочения поверхностной реконструкции Si(001) (1180 °C), логарифмический вклад в упругий потенциал исчезает вместе с образующей его анизотропией поверхностной диффузии [18, 21].

На рис. 5 показаны фазовые изображения для образцов после отжига в течение 20 мин при 1000 °C и 1100 °C. Видно, что с повышением температуры число эшелонов на единицу длины уменьшается, что соответствует результатам работы [18].

Для количественного анализа влияния температуры на количество ступеней и расстояния между ними построен график измерений, подчиняющийся зависимости  $l \propto N^\alpha$ , при 20 мин отжига для температур от 1000 °C до 1150 °C (рис. 6).

Видно, что с повышением температуры количество ступеней в эшелоне уменьшается, а среднее расстояние между ними увеличивается. Данный эффект возникает из-за того, что при повышении температуры возрастает

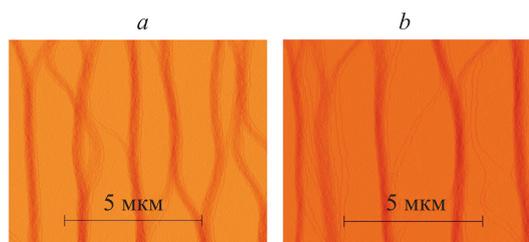


Рис. 5. Фазовые АСМ-изображения морфологии поверхности образцов после отжига в течение 20 мин при температурах: 1000 °C (a); 1100 °C (b)

Fig. 5. AFM phase images of the surface morphology of the samples after annealing for 20 minutes at the following temperatures: 1000 °C (a); 1100 °C (b)

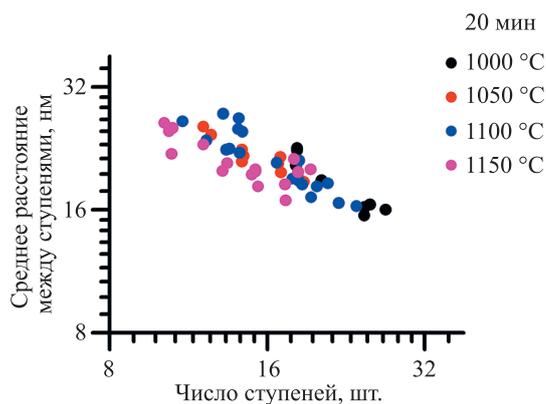


Рис. 6. Данные экспериментов для температур 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C, 1150 °C при 20 мин отжига

Fig. 6. Experimental data for the following temperatures: 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C, 1150 °C with 20 minutes of annealing

скорость обмена адатомами и термическая флуктуация ступеней, которая является дестабилизирующим фактором формирования эшелона.

### Закключение

В работе выполнены термические отжиги поверхности Si(001) при нагреве постоянным током в направлении вниз по ступеням в интервале температур 1000–1150 °C на протяжении от 5 до 100 мин. Экспериментально получены значения показателя степени функции  $l \propto N^\alpha$ , описывающей зависимость среднего расстояния между ступенями от количества ступеней в эшелоне. Установлено, что показатель  $\alpha$  изменяется от  $-0,68$  до  $-0,36$  при увеличении температуры. Результат эксперимента свидетельствует об увеличении части потенциала с обратно квадратичной зависимостью и уменьшении логарифмической составляющей при температуре, близкой к температуре разрушения поверхностной реконструкцией ( $2 \times 1$ ), присущей поверхности Si(001), что согласуется с аналитическими исследованиями [15, 17].

## Литература

## References

1. Latyshev A.V., Aseev A.L., Krasilnikov A.B., Stenin S.I. Transformation on clean Si(111) stepped surface during sublimation // *Surface Science*. 1989. V. 213. N 1. P. 157–169. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(89\)90256-2](https://doi.org/10.1016/0039-6028(89)90256-2)
2. Родякина Е.Е., Ситников С.В., Роголо Д.И., Латышев А.В. Управление рельефом подложки Si(001) при термическом отжиге в вакуумной камере // *Микроэлектроника*. 2018. Т. 47. № 6. С. 407–413. <https://doi.org/10.31857/S054412690002766-9>
3. Sato M., Uwaha M., Takahashi T. Motion of step pairs during drift-induced step bunching on a Si(001) vicinal face // *Journal of Crystal Growth*. 2007. V. 303. N 1. P. 85–89. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.11.147>
4. Nielson J.-F., Pettersen M.S., Pelz J.P. Anisotropy of mass transport on Si(001) surfaces heated with direct current // *Surface Science*. 2001. V. 480. N 1-2. P. 84–96. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)01010-X](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01010-X)
5. Latyshev A.V., Litvin L.V., Aseev A.L. Peculiarities of step bunching on Si(001) surface induced by DC heating // *Applied Surface Science*. 1998. V. 130-132. P. 139–145. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(98\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00040-3)
6. Латышев А.В., Красильников А.Б., Асеев А.Л., Стенин С.И. Влияние электрического тока на соотношение площадей доменов (2 × 1) и (1 × 2) на чистой поверхности кремния (001) в процессе сублимации // *Письма в ЖЭТФ*. 1988. Т. 48. № 9. С. 484–487.
7. Pai W.W., Ozcomert J.S., Bartelt N.C., Einstein T.L., Reutt-Robey J.E. Terrace-width distributions on vicinal Ag(110): evidence of oscillatory interactions // *Surface Science*. 1994. V. 307-309. P. 747–754. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(94\)91487-7](https://doi.org/10.1016/0039-6028(94)91487-7)
8. Frohn J., Giesen M., Poensgen M., Wolf J.F., Ibach H. Attractive interaction between steps // *Physical Review Letters*. 1991. V. 67. N 25. P. 3543–3546. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.3543>
9. Redfield A.C., Zangwill A. Attractive interactions between steps // *Physical Review B*. 1992. V. 46. N 7. P. 4289–4291. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.46.4289>
10. Andreev A.F., Kosevich A.Y. Capillary phenomena in the theory of elasticity // *Soviet Physics — JETP*. 1981. V. 54. N 4. P. 761–765.
11. Pearson E.M., Halicioglu T., Tiller W.A. Long-range ledge-ledge interactions on Si(111) surfaces. I. No kinks or surface point defects // *Surface Science*. 1987. V. 184. N 3. P. 401–424. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(87\)80366-7](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(87)80366-7)
12. Andreev A.F. Faceting phase transitions of crystals // *Soviet Physics — JETP*. 1981. V. 53. N 5. P. 1063–1069.
13. Leroy F., Müller P., Métois J.J., Pierre-Louis O. Vicinal silicon surfaces: From step density wave to faceting // *Physical Review B*. 2007. V. 76. N 4. P. 045402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.045402>
14. Alerhand O.L., Vanderbilt D., Meade R.D., Joannopoulos J.D. Spontaneous formation of stress domains on crystal surfaces // *Physical Review Letters*. 1988. V. 61. N 17. P. 1973–1976. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.1973>
15. Sato M., Mori T., Uwaha M., Hirose Y. Growth of step bunches on a Si(001) vicinal face with drift of adatoms // *Journal of the Physical Society of Japan*. 2004. V. 73. N 7. P. 1827–1832. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.73.1827>
16. Бартон В., Кабрера Н., Франк Ф. Рост кристаллов и равновесная структура их поверхностей // *Элементарные процессы роста кристаллов*. М.: Иностранная литература, 1959. С. 10–109.
17. Zhao T., Weeks J.D., Kandel D. From discrete hopping to continuum modeling on vicinal surfaces with applications to Si(001) electromigration // *Physical Review B*. 2005. V. 71. N 15. P. 155326. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.155326>
18. Rodyakina E.E., Sitnikov S.V., Rogilo D.I., Latyshev A.V. Step bunching phenomena on Si(001) surface induced by DC heating during sublimation and Si deposition // *Journal of Crystal Growth*. 2019. V. 520. P. 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.05.026>
19. Sitnikov S.V., Rodyakina E.E., Latyshev A.V. Electromigration effect on vacancy islands nucleation on Si(100) surface during sublimation // *Semiconductors*. 2019. V. 53. N 6. P. 795–799. <https://doi.org/10.1134/S106378261906023X>
20. Sakamoto K., Sakamoto T., Miki K., Nagao S. Observation of Si(001) vicinal surfaces on RHEED // *Journal of the Electrochemical Society*. 1989. V. 136. N 9. P. 2705–2710. <https://doi.org/10.1149/1.2097562>
21. Родякина Е.Е., Ситников С.В., Латышев А.В. Критический размер террасы кремния (001) для зарождения вакансионных островков при высокотемпературном отжиге // *Сибирский физи-*
1. Latyshev A.V., Aseev A.L., Krasilnikov A.B., Stenin S.I. Transformation on clean Si(111) stepped surface during sublimation. *Surface Science*, 1989, vol. 213, no. 1, pp. 157–169. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(89\)90256-2](https://doi.org/10.1016/0039-6028(89)90256-2)
2. Rodyakina E.E., Sitnikov S.V., Rogilo D.I., Latyshev A.V. Controlling the Si(001) surface morphology upon thermal annealing in a vacuum chamber. *Russian Microelectronics*, 2018, vol. 47, no. 6, pp. 365–370. <https://doi.org/10.1134/S1063739718060069>
3. Sato M., Uwaha M., Takahashi T. Motion of step pairs during drift-induced step bunching on a Si(001) vicinal face. *Journal of Crystal Growth*, 2007, vol. 303, no. 1, pp. 85–89. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.11.147>
4. Nielson J.-F., Pettersen M.S., Pelz J.P. Anisotropy of mass transport on Si(001) surfaces heated with direct current. *Surface Science*, 2001, vol. 480, no. 1-2, pp. 84–96. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)01010-X](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01010-X)
5. Latyshev A.V., Litvin L.V., Aseev A.L. Peculiarities of step bunching on Si(001) surface induced by DC heating. *Applied Surface Science*, 1998, vol. 130-132, pp. 139–145. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(98\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00040-3)
6. Latyshev A.V., Krasilnikov A.B., Aseev A.L., Stenin S.I. Effect of electric current on the ratio of the areas of the (2 × 1) and (1 × 2) domains at the clean (001) surface of silicon during sublimation. *JETP Letters*, 1989, vol. 48, no. 9, pp. 529–529.
7. Pai W.W., Ozcomert J.S., Bartelt N.C., Einstein T.L., Reutt-Robey J.E. Terrace-width distributions on vicinal Ag(110): evidence of oscillatory interactions. *Surface Science*, 1994, vol. 307-309, pp. 747–754. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(94\)91487-7](https://doi.org/10.1016/0039-6028(94)91487-7)
8. Frohn J., Giesen M., Poensgen M., Wolf J.F., Ibach H. Attractive interaction between steps. *Physical Review Letters*, 1991, vol. 67, no. 25, pp. 3543–3546. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.3543>
9. Redfield A.C., Zangwill A. Attractive interactions between steps. *Physical Review B*, 1992, vol. 46, no. 7, pp. 4289–4291. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.46.4289>
10. Andreev A.F., Kosevich A.Y. Capillary phenomena in the theory of elasticity. *Soviet Physics — JETP*, 1981, vol. 54, no. 4, pp. 761–765.
11. Pearson E.M., Halicioglu T., Tiller W.A. Long-range ledge-ledge interactions on Si(111) surfaces. I. No kinks or surface point defects. *Surface Science*, 1987, vol. 184, no. 3, pp. 401–424. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(87\)80366-7](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(87)80366-7)
12. Andreev A.F. Faceting phase transitions of crystals. *Soviet Physics — JETP*, 1981, vol. 53, no. 5, pp. 1063–1069.
13. Leroy F., Müller P., Métois J.J., Pierre-Louis O. Vicinal silicon surfaces: From step density wave to faceting. *Physical Review B*, 2007, vol. 76, no. 4, pp. 045402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.045402>
14. Alerhand O.L., Vanderbilt D., Meade R.D., Joannopoulos J.D. Spontaneous formation of stress domains on crystal surfaces. *Physical Review Letters*, 1988, vol. 61, no. 17, pp. 1973–1976. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.1973>
15. Sato M., Mori T., Uwaha M., Hirose Y. Growth of step bunches on a Si(001) vicinal face with drift of adatoms. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2004, vol. 73, no. 7, pp. 1827–1832. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.73.1827>
16. Barton V., Cabrera N., Frank F. The growth of crystals and the equilibrium structure of their surfaces. *Elementary Crystal Growth*, Moscow, Inostrannaja Literatura Publ., 1959, pp. 10–109. (in Russian)
17. Zhao T., Weeks J.D., Kandel D. From discrete hopping to continuum modeling on vicinal surfaces with applications to Si(001) electromigration. *Physical Review B*, 2005, vol. 71, no. 15, pp. 155326. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.155326>
18. Rodyakina E.E., Sitnikov S.V., Rogilo D.I., Latyshev A.V. Step bunching phenomena on Si(001) surface induced by DC heating during sublimation and Si deposition. *Journal of Crystal Growth*, 2019, vol. 520, pp. 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.05.026>
19. Sitnikov S.V., Rodyakina E.E., Latyshev A.V. Electromigration effect on vacancy islands nucleation on Si(100) surface during sublimation. *Semiconductors*, 2019, vol. 53, no. 6, pp. 795–799. <https://doi.org/10.1134/S106378261906023X>
20. Sakamoto K., Sakamoto T., Miki K., Nagao S. Observation of Si(001) vicinal surfaces on RHEED. *Journal of the Electrochemical Society*, 1989, vol. 136, no. 9, pp. 2705–2710. <https://doi.org/10.1149/1.2097562>
21. Rodyakina E.E., Sitnikov S.V., Latyshev A.V. Critical terrace width for vacancy islands nucleation on wide terrace of silicon (001) surface

ческий журнал. 2019. Т. 14. № 1. С. 77–85. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2019-14-1-77-85>

under high temperature annealing. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 1, pp. 77–85. (in Russian). <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2019-14-1-77-85>

#### Авторы

**Разживина Марина Эдуардовна** — лаборант, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2470-753X>, [razz-m@mail.ru](mailto:razz-m@mail.ru)

**Родякина Екатерина Евгеньевна** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, [sc 6508030193](https://orcid.org/0000-0003-4940-7074), <https://orcid.org/0000-0003-4940-7074>, [rodyakina@isp.nsc.ru](mailto:rodyakina@isp.nsc.ru)

**Ситников Сергей Васильевич** — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, [sc 35184235100](https://orcid.org/0000-0002-2398-8272), <https://orcid.org/0000-0002-2398-8272>, [sitnikov@isp.nsc.ru](mailto:sitnikov@isp.nsc.ru)

#### Authors

**Marina E. Razzhivina** — Laboratory Assistant, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2470-753X>, [razz-m@mail.ru](mailto:razz-m@mail.ru)

**Ekaterina E. Rodyakina** — PhD, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Senior Researcher, Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, [sc 6508030193](https://orcid.org/0000-0003-4940-7074), <https://orcid.org/0000-0003-4940-7074>, [rodyakina@isp.nsc.ru](mailto:rodyakina@isp.nsc.ru)

**Sergey V. Sitnikov** — PhD, Scientific Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, [sc 35184235100](https://orcid.org/0000-0002-2398-8272), <https://orcid.org/0000-0002-2398-8272>, [sitnikov@isp.nsc.ru](mailto:sitnikov@isp.nsc.ru)

*Статья поступила в редакцию 18.07.2021*  
*Одобрена после рецензирования 09.08.2021*  
*Принята к печати 27.09.2021*

*Received 18.07.2021*  
*Approved after reviewing 09.08.2021*  
*Accepted 27.09.2021*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»