

УДК 539.211 + 538.971

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АДАТОМОВ НА ЭКСТРАШИРОКОЙ ТЕРРАСЕ ПОВЕРХНОСТИ Si(111) В УСЛОВИЯХ СУБЛИМАЦИИ*

Д. И. Рогило¹, Н. Е. Рыбин^{1,2}, Л. И. Федина^{1,2}, А. В. Латышев^{1,2}

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный университет,

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: rogilo@isp.nsc.ru

Методами *in situ* сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии и *ex situ* атомно-силовой микроскопии исследован процесс формирования адсорбционного слоя на поверхности Si(111) в условиях сублимации при температурах 1000–1100 °С и последующей закалки до $T = 750$ °С. Впервые получено распределение концентрации адатомов на экстраширокой (~60 мкм) атомно-гладкой террасе и определена их диффузионная длина $x_s = 31 \pm 2$ мкм при $T = 1000$ °С. В результате анализа температурной зависимости равновесной концентрации адатомов вблизи моноатомной ступени впервые измерена энергия выхода адатома из ступени на террасу $E_{\text{ад}} \approx 0,68$ эВ. На основе данных величин получены оценки энергетических параметров для ряда атомных процессов на поверхности Si(111).

Ключевые слова: кремний, поверхностная диффузия, сверхструктура, атомные ступени, отражательная электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.15372/AUT20160512

Введение. Движение моноатомных ступеней на поверхности кристалла как фундаментальный процесс, отвечающий за эпитаксиальный рост, сублимацию и морфологические перестройки поверхности, является предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований в целях развития новых технологий [1, 2]. Во всех случаях движение ступеней связано с поглощением и эмиссией адатомов, устанавливающими переход к понижению поверхностной энергии кристалла. Однако параметры этих процессов, такие как активационные энергии встраивания и выхода адатомов из ступеней, диффузионная длина адатомов, их концентрация и распределение на террасе чрезвычайно трудны для измерения из-за сложности механизма взаимодействия адатомов со ступенями и зависимости свойств самих ступеней от наличия сверхструктуры, ориентации, плотности кинков [3, 4]. Поэтому большая часть этих параметров остаётся неизвестной.

Тем не менее достигнутый на сегодняшний день уровень понимания процессов роста позволяет разрабатывать различные низкоразмерные полупроводниковые структуры (слои с двумерным электронным газом, квантовые точки, проволоки и т. д.) для современных нано- и оптоэлектроники [5, 6]. Оказалось, что управление процессом сублимации обеспечивает возможность создания экстрашироких атомно-гладких террас на поверхности Si(111) размером до 120 мкм и шероховатостью менее 0,03 нм [7, 8]. Использование их в качестве зеркал в интерферометрическом микроскопе улучшает разрешение прибора по высоте до 5 пм и оптически визуализирует моноатомную ступень на поверхности

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-22-00143) на оборудовании Центра коллективного пользования «Наноструктуры».

Si(111) [9]. Поэтому экспериментальное исследование процессов, связанных с движением моноатомных ступеней на поверхности кристалла, представляет большой интерес и с прикладной, и с фундаментальной точек зрения.

Наиболее подходящим методом для изучения таких процессов является *in situ* сверхвысоковакуумная отражательная электронная микроскопия (СВВ ОЭМ), которая позволяет реализовать исследования фактически любых процессов на атомно-чистой поверхности при сублимации, росте, адсорбции металлов, травлении кислородом [10]. Главное преимущество метода СВВ ОЭМ заключается в непосредственной визуализации в реальном масштабе времени динамики движения моноатомных ступеней на поверхности вплоть до температуры плавления кремния. С использованием этого метода достигнут значительный прогресс в понимании роли вакансий в сублимации Si с поверхности Si(111) и кинетики зарождения двумерных островков роста вблизи ступени при гомоэпитаксии Si [7, 11]. Современные теоретические подходы предполагают возможность точного определения параметров диффузии адатомов и их взаимодействия с атомными ступенями [1, 12]. Однако экспериментальное получение данной информации при высоких температурах затруднено из-за быстрой диффузии адатомов, поэтому требуется применение террас размерами, существенно превышающими их диффузионную длину.

В предлагаемой работе впервые использованы атомно-гладкие террасы Si(111) размером до 100 мкм и метод *in situ* СВВ ОЭМ в сочетании с методом *ex situ* атомно-силовой микроскопии (АСМ) для детального изучения процесса выхода адатомов из окружающей моноатомной ступени при сублимационных температурах 1000–1100 °С с помощью быстрой закалки до $T = 750$ °С, когда эмиссия из ступени прекращается и на поверхности устанавливается квазиравновесие.

Методика эксперимента. Образцы кремния размерами $7 \times 1 \times 0,3$ мм вырезались из стандартных пластин Si(111) *n*-типа с удельным сопротивлением $0,3 \Omega \cdot \text{см}$ и отклонением от кристаллографической грани приблизительно на $0,01^\circ$. Сначала на поверхности образца с помощью ионного травления пучком Ar^+ создавалась лунка глубиной 2 мкм. Затем для формирования атомно-чистой поверхности кремния образец отжигался при $T \approx 1300$ °С в СВВ ОЭМ. Нагрев образца осуществлялся путём пропускания через него электрического тока.

Метод *in situ* СВВ ОЭМ позволяет получать изображения различных элементов морфологии поверхности атомного уровня (атомно-гладких террас, моноатомных ступеней, двумерных островков и др.) [13]. Малый угол падения электронного пучка ($\sim 1^\circ$) в ОЭМ приводит к сжатию изображений в несколько десятков раз вдоль направления падения пучка электронов, что сильно искажает форму элементов морфологии поверхности образца. Подробное описание метода СВВ ОЭМ и подготовки образцов даны в [14]. Морфология поверхности образцов детально анализировалась методом *ex situ* АСМ.

Результаты эксперимента. Последовательный сублимационный отжиг поверхности лунки в СВВ ОЭМ при температурах 1300 и 1000 °С согласно [7] приводит к формированию системы концентрических замкнутых моноатомных ступеней с широкой (58 мкм) атомно-гладкой террасой в центре лунки, представленной на рис. 1, *a*. Из-за сжатия ОЭМ-изображения круглая терраса отображается в виде узкой горизонтальной светлой полосы, ограниченной двумя моноатомными ступенями в виде тёмных линий. С понижением температуры от 1300 до 1000–1100 °С сублимация Si осуществляется исключительно за счёт движения ступеней в сторону вышележащих террас, что соответствует эмиссии адатомов на террасу и их последующей десорбции. Таким образом, в процессе сублимации при пониженных температурах на террасе возникает адсорбционный слой адатомов. Чем выше температура, тем больше скорость эмиссии адатомов из ступени и выше концентрация адатомов в адсорбционном слое. За время, предшествующее десорбции, адатомы распределяются от края ступени по террасе в соответствии с их диффузионной длиной. Эти два

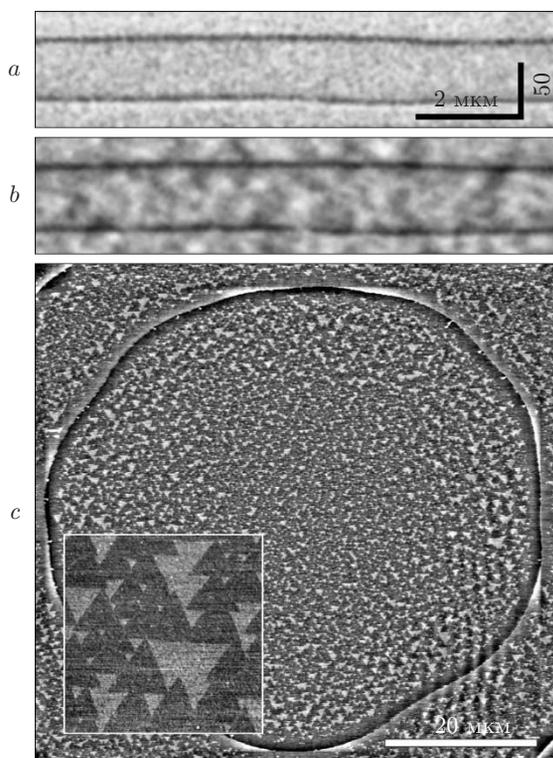


Рис. 1. Экстраширокая терраса на атомно-чистой поверхности Si(111): *a, b* — *in situ* ОЭМ-изображения до ($T = 1100$ °С) и после ($T = 750$ °С) сверхструктурного перехода $(1 \times 1) \Rightarrow (7 \times 7)$; *c* — топографическое *ex situ* АСМ-изображение после закалки от $T = 1000$ °С (на вставке — увеличенный фрагмент поверхности размерами 3×3 мкм)

параметра задают профиль концентрации адатомов на террасе вблизи ступени, который нами визуализирован с помощью закалки.

После завершающего этапа сублимации при $T = 1000$ – 1100 °С температура образца быстро (~ 400 К/с) снижалась до 750 °С и на поверхности происходил сверхструктурный переход $(1 \times 1) \Rightarrow (7 \times 7)$ (критическая температура перехода $T_c = 830$ °С [15]). В этот момент на ОЭМ-изображении возникал пятнистый контраст (рис. 1, *b*), соответствующий реконструкции части поверхности Si(111) в сверхструктуру (7×7) , что подтверждалось появлением дополнительных рефлексов на картине дифракции электронов, отражённых от поверхности образца. После отжига образца при $T = 750$ °С в течение 10 с нагрев отключался и образец вынимался из колонны микроскопа для детального анализа морфологии поверхности методом *ex situ* АСМ. Экспериментально определено, что в течение такого короткого отжига после стока части адатомов в ступень вблизи неё образуется зона обеднения шириной, близкой к миграционной длине адатомов при $T = 750$ °С (~ 2 мкм). В то же время распределение закалочных адатомов, вышедших из ступени при высокой температуре, по остальной части широкой террасы устанавливается в соответствии с их высокотемпературной диффузионной длиной. При этом площадь, занятая сверхструктурой (7×7) в течение 10 с при $T = 750$ °С, достигает максимального значения и при увеличении времени отжига перестаёт расти, что обусловлено невозможностью дальнейшего уплотнения адсорбционного слоя адатомов.

На рис. 1, *c* приведено АСМ-изображение поверхности Si(111), быстрое охлаждение которой до температуры 750 °С начиналось после сублимации при $T = 1000$ °С. Из АСМ-измерений следует, что терраса диаметром 58 мкм ограничивается почти круглой замкну-

той моноатомной ступенью, высота которой равна одному межплоскостному расстоянию 0,314 нм [16]. Можно видеть, что на фоне тёмного контраста, соответствующего структуре (7×7) , визуализируются треугольные области с высокой плотностью светлых (более высоких) точек, размер которых значительно уменьшается по направлению к центру. На вставке рис. 1, с представлено увеличенное АСМ-изображение участка террасы на некотором расстоянии от ступени, где размер светлых треугольных участков достигает максимального значения. Эти светлые области, высота которых относительно поверхности со структурой (7×7) составляет $\sim 0,1$ нм, соответствуют скоплениям закалочных адатомов в виде кластеров различных размеров [17, 18]. Как было показано в [18], такое небольшое возвышение светлых областей связано с локализацией в данных участках кластеров, состоящих из четырёх адатомов (тетраметров) и их плоских конгломератов.

Из рис. 1, с видно, что вблизи ступени на расстоянии ~ 2 мкм формируется зона обеднения за счёт стока части закалочных адатомов при $T = 750$ °С. Аналогичным образом в процессе эпитаксиального роста вблизи ступеней формируются зоны обеднения по двумерным островкам [4, 19, 20]. Однако стока адатомов в ступень из центральных областей экстраширокой террасы не происходит, поскольку скорость массопереноса после сверхструктурного перехода падает на несколько порядков [21]. Таким образом, при температуре 750 °С адатомы могут покидать центральные участки террасы только за счёт сублимации и травления в остаточной атмосфере, вклад которых за 10 с оценивается на уровне $\lesssim 0,01$ МС ($1 \text{ МС} = 1,56 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$). В дальнейших расчётах концентрации закалочных адатомов n будем пренебрегать влиянием данных процессов, поскольку полученные в эксперименте значения $n \gg 0,01$ МС.

Для вычисления концентрации адатомов n , существовавших на поверхности при сублимации, будем считать, что в процессе сверхструктурного перехода адатомы перераспределяются по поверхности Si(111) и образуют участки со структурами (1×1) и (7×7) , имеющими разную высоту на АСМ-изображении. Пусть для формирования каждого типа поверхностной структуры требуется некоторая локальная концентрация адатомов n_+ и n_- для структур (1×1) и (7×7) соответственно, причём известно, что для формирования каждой сверхструктурной ячейки (7×7) площадью $6,26 \text{ нм}^2$ необходимы четыре атома из адсорбционного слоя, откуда $n_- = 4/6,26 \text{ нм}^2 = 0,041 \text{ МС}$ [19]. Исходя из вышеперечисленного, можно установить связь между n , n_+ , n_- и площадями участков светлого и тёмного топографического контраста (S_+ и S_-):

$$n = (n_+ S_+ + n_- S_-) / (S_+ + S_-) = s^* (n_+ - n_-) + n_-, \quad (1)$$

где $s^* = S_+ / (S_+ + S_-)$ — нормированная площадь нереконструированных участков поверхности. Таким образом, доля площади s^* , имеющая светлый контраст на АСМ-изображении, пропорциональна локальной концентрации адатомов n , существовавших при сублимационных температурах и запасённых в виде кластеров в ходе закалки.

Для получения качественного представления о распределении кластеров адатомов на экстраширокой террасе, представленной на рис. 1, с, она была условно разделена на квадратные участки со стороной 3,6 мкм (рис. 2). Для каждого квадрата была вычислена доля его площади s^* , имеющая светлый контраст. На рис. 2 каждый квадрат подписан значением s^* в процентах площади ячейки и более светлые квадраты для наглядности соответствуют большему s^* . Можно видеть, что распределение $s^*(x, y)$ симметрично относительно центра террасы, где $s^* = 0,15\text{--}0,16$, что существенно меньше, чем $s^* = 0,22\text{--}0,23$ вблизи её края.

Кроме значений $n_- = 0,041 \text{ МС}$ и s^* , определяемой из АСМ-изображений, для расчёта концентрации адатомов n на террасе согласно формуле (1) необходимо найти коэффи-

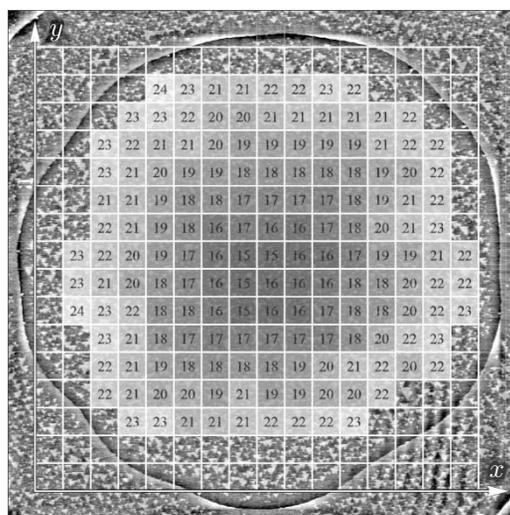


Рис. 2. Распределение доли площади $s^*(x, y)$ (в процентах) участков Si(111)-(1 × 1) на террасе радиусом $R = 29$ мкм при температуре 1000 °С

циент n_+ . Поскольку концентрация адатомов вблизи ступеней при температуре 1000 °С близка к равновесной $n \approx n_{eq}$ [12], для вычисления n_+ достаточно измерить n_{eq} методом, предложенным в [22]. Суть метода состоит в определении величины смещения атомной ступени (в долях монослоя) в процессе сверхструктурного перехода.

На рис. 3 представлены ОЭМ-изображения одних и тех же моноатомных ступеней на поверхности Si(111) при температурах 800 и 1000 °С. Слева на изображениях можно видеть частицу, служащую неподвижным маркером, необходимым для измерения положения ступеней. В процессе сверхструктурного перехода $(7 \times 7) \Rightarrow (1 \times 1)$ моноатомные ступени смещаются в направлении вышележащих террас на величину, равную 0,10 средней ширины прилегающих террас. Это соответствует выходу 0,10 МС адатомов из ступеней на террасы. Поскольку при трансформации сверхструктуры (7×7) в структуру (1×1) на поверхность выходит дополнительно 0,041 МС адатомов, суммарная равновесная концентрация адатомов при $T = 1000$ °С составляет $n_{eq} \approx 0,14$ МС, что сопоставимо с предыдущими оценками, полученными при меньших температурах [19, 22]. Соответствующее данной величине равновесное значение $s^* \approx 0,24$ наблюдается в непосредственной близости к ступени (см. рис. 2). Тогда, используя уравнение (1), можно вычислить коэффициент $n_+ = 0,46$ и на основе зависимости s^* от расстояния до центра террасы r построить экспериментальное распределение $n(r)$, показанное на рис. 4, а.

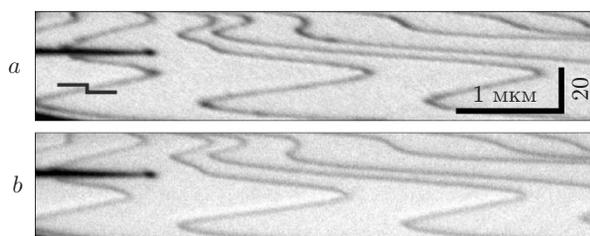


Рис. 3. ОЭМ-изображения моноатомных ступеней: a — при $T = 800$ °С, b — $T = 1000$ °С. При сверхструктурном переходе $(7 \times 7) \Rightarrow (1 \times 1)$ ступени смещаются в направлении вышележащих террас на величину $\approx 0,10$ ширины прилегающих террас относительно неподвижной частицы, расположенной слева на изображениях

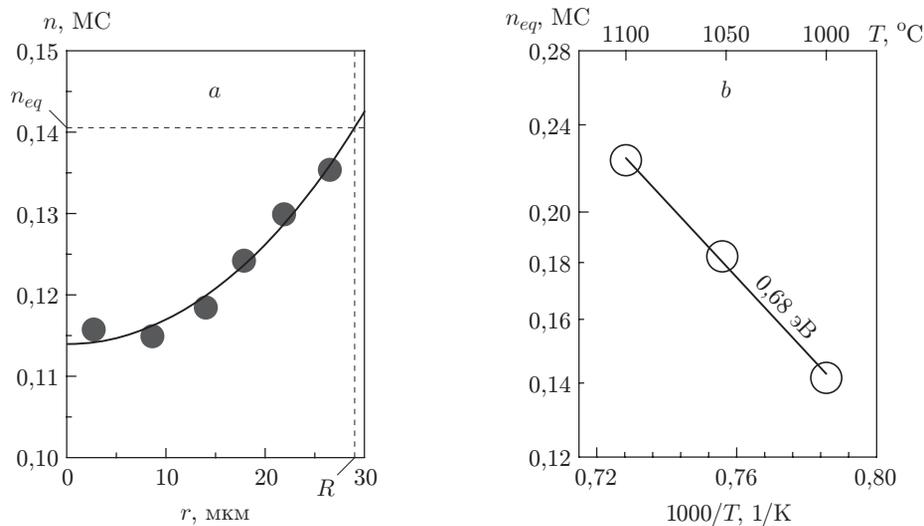


Рис. 4. Концентрация адатомов: *a* — распределение $n(r)$ на террасе радиусом $R = 29$ мкм при $T = 1000$ °С с аппроксимацией (2); *b* — температурная зависимость равновесной концентрации $n_{eq}(T)$

Обсуждение результатов. Из представленного на рис. 4, *a* распределения концентрации адатомов $n(r)$ на круглой террасе радиусом $R = 29$ мкм можно видеть, что при $T = 1000$ °С десорбция адатомов с поверхности приводит к уменьшению их концентрации с $n(R) = n_{eq} \approx 0,14$ МС вблизи ступеней, где равновесная концентрация быстро восстанавливается за счёт генерации адатомов ступенью, до $n(0) \approx 0,11$ МС в центре террасы, где источники адатомов отсутствуют. Таким образом, на террасах с радиусом $R > 10$ мкм разница $n(r) - n_{eq} \gtrsim 0,01$ оказывается достаточно большой для регистрации в эксперименте в отличие от аналогичной поправки $\sim 10^{-5}$ МС, рассчитанной в работе [12] для террас с характерными размерами ~ 1 мкм.

Для дальнейшего количественного анализа $n(r)$ использованы элементы теоретического подхода [12], где в цилиндрических координатах решена задача распределения концентрации адатомов на круглой террасе в условиях их существенной десорбции с поверхности:

$$n(r) = \frac{n_{eq} I_0(r/x_s)}{I_0(R/x_s)}, \quad (2)$$

$$x_s = \frac{\sqrt{m}}{2} a \exp \frac{E_{des} - E_{dif}}{2kT}. \quad (3)$$

Здесь I_0 — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; x_s — длина диффузии адатома до десорбции; a — постоянная решётки на поверхности; m — количество ближайших эквивалентных положений адсорбции для адатома; E_{des} — энергия десорбции адатома; E_{dif} — энергия активации поверхностной диффузии. Для поверхности Si(111)-(1 × 1) $a = 0,384$ нм, $m = 6$. Аппроксимация экспериментальной зависимости $n(r)$ уравнением (2) позволяет определить $x_s = 31 \pm 2$ мкм при $T = 1000$ °С. Все известные данные об x_s либо основывались на расчётах по формуле (3) с использованием экспериментальной E_{dif} [12, 21, 23], либо оценивались по порядку величины [7, 8, 24]. Поэтому считаем полученное значение x_s наиболее точным на сегодняшний день. Кроме того, с учётом $x_s = 31 \pm 2$ мкм и формулы (3) можно вычислить разницу $E_{des} - E_{dif} = 2,45$ эВ.

В результате ряда экспериментов на экстрашироких террасах при температурах 1000, 1050 и 1100 °С были определены экспериментальные распределения $n(r)$. На основе аппроксимации (2) каждой из них получены значения $n_{eq} = n(R)$, образующие температурную зависимость (рис. 4, *b*). Тогда, применяя аппроксимацию $n_{eq}(T) \propto \exp(-E_{ad}/kT)$, из наклона зависимости $n_{eq}(T)$, построенной в координатах Аррениуса, вычисляем энергию формирования адатома при выходе из ступени ($E_{ad} \approx 0,68$ эВ). Данное значение больше оценочного (0,23 эВ), используемого, например, в работе [12]. Такая существенная разница указывает на необходимость более детального рассмотрения процессов эмиссии адатомов ступенью с учётом её структуры, концентрации изломов на ступени, диффузии адатомов вдоль ступеней и других [25], что выходит за рамки предлагаемой работы.

Далее, подставив $E_{ad} = 0,68$ эВ в определённую ранее с высокой точностью сумму $E_{des} + E_{ad} = 4,09$ эВ [12], получим $E_{des} = 3,41$ эВ. Используя экспериментальную разницу $E_{des} - E_{dif} = 2,45$ эВ, вычислим энергию активации поверхностной диффузии $E_{dif} = 0,96$ эВ на поверхности Si(111)-(1 × 1). Экспериментальные значения E_{dif} , E_{ad} и E_{des} отличаются от предыдущих оценок [7, 11, 12, 21, 23], тем не менее их линейные комбинации ($E_{dif} + E_{ad}$) и ($E_{des} - E_{dif}$) хорошо согласуются с наиболее точными оценками 1,53 и 2,56 эВ соответственно [12].

Заключение. В рамках данной работы впервые экспериментально изучено распределение концентрации адатомов $n(r)$ на экстраширокой террасе поверхности Si(111) в условиях сублимации в температурном диапазоне 1000–1100 °С. Обнаружено, что при $T = 1000$ °С концентрация адатомов n в центральной части террас диаметром 58 мкм принимает существенно меньшие значения, чем равновесная n_{eq} , поскольку размеры террасы превышают полученную экспериментально длину диффузии адатомов $x_s = 31 \pm 2$ мкм. Кроме того, впервые измерена зависимость $n_{eq}(T)$, что позволило оценить энергетические параметры следующих атомных процессов на поверхности Si(111)-(1 × 1): диффузии адатомов ($E_{dif} \approx 0,96$ эВ), их выхода из ступени ($E_{ad} \approx 0,68$ эВ) и десорбции с террасы ($E_{des} \approx 3,41$ эВ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Misbah C., Pierre-Louis O., Saito Y. Crystal surfaces in and out of equilibrium: A modern view // Rev. Mod. Phys. 2010. **82**, N 1. P. 981–1040.
2. Evans J. W., Thiel P. A., Bartelt M. C. Morphological evolution during epitaxial thin film growth: Formation of 2D islands and 3D mounds // Surf. Sci. Rep. 2006. **61**, N 1–2. P. 1–128.
3. Rogilo D. I., Fedina L. I., Kosolobov S. S. et al. Critical terrace width for two-dimensional nucleation during Si growth on Si(111)-(7 × 7) surface // Phys. Rev. Lett. 2013. **111**, N 3. 036105.
4. Роголо Д. И., Рыбин Н. Е., Косолюбов С. С. и др. Зарождение двумерных островков Si вблизи монокристаллической ступени на атомно-чистой поверхности Si(111)-(7 × 7) // Автометрия. 2016. **52**, № 3. С. 86–92.
5. Никифоров А. И., Тимофеев В. А., Тийс С. А., Пчеляков О. П. Формирование наногетероструктур Ge/Si и Ge/Ge_xSi_{1-x}/Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2014. **50**, № 3. С. 5–12.
6. Емельянов Е. А., Феклин Д. Ф., Путято М. А. и др. Гетероэпитаксия плёнок A^{III}B^V на вицинальных подложках Si(001) // Автометрия. 2014. **50**, № 3. С. 13–24.
7. 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. 2015. **633**. P. L1–L5.
8. Finnie P., Homma Y. Nucleation and step flow on ultraflat silicon // Phys. Rev. B. 2000. **62**, N 12. P. 8313–8317.

9. Sysoev E., Kosolobov S., Kulikov R. et al. Precision measurements of subnanoscaled relief by interferometric method // Proc. of the 11th Intern. Symp. on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTH). Germany, Aachen, 2013.
10. Латышев А. В., Асеев А. Л. Моноатомные ступени на поверхности кремния. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 241 с.
11. Роголо Д. И., Федина Л. И., Косолюбов С. С., Латышев А. В. Формирование двумерных островков на поверхности Si(111) при гомоэпитаксиальном росте // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2014. 9, № 2. С. 156–166.
12. Pang A. B., Man K. L., Altman M. S. et al. Step line tension and step morphological evolution on the Si(111)(1 × 1) surface // Phys. Rev. B. 2008. 77, N 11. 115424.
13. Latyshev A. V., Aseev A. L., Krasilnikov A. B., Stenin S. I. Transformations on clean Si(111) stepped surface during sublimation // Surf. Sci. 1989. 213, N 1. P. 157–169.
14. Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. Self-diffusion on Si(111) surfaces // Phys. Rev. B. 1996. 54, N 4. P. 2586–2589.
15. Takayanagi K., Tanishiro Y., Takahashi S., Takahashi M. Structure analysis of Si(111)-7 × 7 reconstructed surface by transmission electron diffraction // Surf. Sci. 1985. 164, N 2–3. P. 367–392.
16. Fedina L. I., Sheglov D. V., Kosolobov S. S. et al. Precise surface measurements at the nanoscale // Meas. Sci. and Technol. 2010. 21, N 5. 054004.
17. Nasimov D. A., Sheglov D. V., Rodyakina E. E. et al. AFM and STM studies of quenched Si(111) surface // Phys. Low-Dim. Struct. 2003. 3/4. P. 157–166.
18. Ong W. J., Tok E. S. Real time dynamics of Si magic clusters mediating phase transformation: Si(111)-(1 × 1) to (7 × 7) reconstruction revisited // Surf. Sci. 2012. 606, N 13–14. P. 1037–1044.
19. Yang Y.-N., Williams E. D. High atom density in the 1 × 1 phase and origin of the metastable reconstructions on Si(111) // Phys. Rev. Lett. 1994. 72, N 12. P. 1862–1865.
20. Latyshev A. V., Aseev A. L., Krasilnikov A. B., Stenin S. I. Reflection electron microscopy study of structural transformations on a clean silicon surface in sublimation, phase transition and homoepitaxy // Surf. Sci. 1990. 227, N 1–2. P. 24–34.
21. Hibino H., Hu C.-W., Ogino T., Tsong I. S. T. Decay kinetics of two-dimensional islands and holes on Si(111) studied by low-energy electron microscopy // Phys. Rev. B. 2001. 63, N 24. 245402.
22. Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. et al. Reflection electron microscopy study of clean Si(111) surface reconstruction during the (7 × 7) ⇌ (1 × 1) phase transition // Surf. Sci. Lett. 1991. 254, N 1–3. P. A476.
23. Pimpinelli A., Villain J., Wolf D. E. et al. Equilibrium step dynamics on vicinal surfaces // Surf. Sci. 1993. 295, N 1–2. P. 143–153.
24. Finnie P., Homma Y. Dynamics, interactions, and collisions of atomic steps on Si(111) in sublimation // Phys. Rev. Lett. 1999. 82, N 13. P. 2737–2740.
25. Filimonov S., Hervieu Yu. Terrace-edge-kink model of atomic processes at the permeable steps // Surf. Sci. 2004. 553, N 1–3. P. 133–144.

Поступила в редакцию 16 мая 2016 г.