

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 539.211

### КИНЕТИКА ТРАВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ Si(111) МОЛЕКУЛЯРНЫМ ПУЧКОМ СЕЛЕНА

© С. А. Пономарев<sup>1,2</sup>, Д. И. Рогило<sup>1</sup>, А. С. Петров<sup>1</sup>, Д. В. Щеглов<sup>1</sup>,  
А. В. Латышев<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: rogilo@isp.nsc.ru

Методом *in situ* сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии выделено три режима кинетики травления поверхности Si(111) молекулярным пучком селена. В области низких температур ( $\lesssim 650$  °С в зависимости от скорости осаждения Se) кинетика травления лимитирована энергией формирования и десорбции молекул SiSe<sub>2</sub> и поверхность полностью покрыта примесно-индуцированной фазой селенида кремния «1×1»-Se. В интервале температур  $\sim 700$ – $1100$  °С скорость травления ограничивается величиной осаждаемого потока Se и не зависит от температуры, структуры поверхности и механизма травления (ступенчато-слоевой или двумерно-островковый). При высоких температурах ( $\gtrsim 1150$  °С) наибольший вклад в поток кремния с поверхности начинает вносить сублимация атомов Si. Построена теоретическая модель, описывающая температуру и кинетику переходов между режимами травления.

*Ключевые слова:* кремний, селен, травление, сублимация, поверхность, отражательная электронная микроскопия.

DOI: 10.15372/AUT20200501

**Введение.** Изучение способов синтеза плёнок халькогенидов металлов толщиной в несколько нанометров и анализ их свойств являются динамично развивающимся направлением физики конденсированного состояния. Уникальные квантовые свойства новых двумерных материалов имеют большой потенциал для применения в спинтронике и оптоэлектронике [1]. Один из перспективных классов двумерных материалов — слоистые халькогениды металлов, но синтез их высококачественных эпитаксиальных слоёв на кремниевых подложках является проблемой, которая препятствует их применению в полупроводниковой электронике [2]. Источником данной проблемы является особенность многих слоистых материалов, заключающаяся в сильной зависимости их структурного совершенства и электронных свойств от морфологии поверхности подложки. В частности, атомные ступени, всегда существующие на поверхности кристаллической подложки, искажают решётку плёнки халькогенида металла, что приводит к образованию дислокаций при выращивании гетероструктур на основе слоистых халькогенидов металлов [3]. С этой точки зрения контроль распределения атомных ступеней на поверхности позволяет регулировать свойства выращиваемой на ней плёнки, а знание особенностей взаимодействия атомов халькогена с поверхностью подложки (в частности, с кремнием) и атомными ступенями даёт возможность применять процессы самоорганизации для управления морфологией поверхности. Таким образом, контроль морфологии поверхности подложки и свойств плёнки позволяет в перспективе использовать свойства плёнок слоистых халькогенидов металлов в полупроводниковых структурах на основе кремния.

Структурные и морфологические трансформации поверхности кремния хорошо изучены в различных условиях, включающих резистивный нагрев подложки, адсорбцию атомов металлов и эпитаксиальный рост элементов группы IV [4–6]. Одним из условий выращивания двумерных слоёв халькогенидов металлов с высоким структурным совершенством является пассивация поверхности подложки атомами халькогена до начала осаждения металла для уменьшения связи плёнки с подложкой (например, при  $\sim 100$  °С в случае пассивации поверхности Si(111) атомами селена [6]). Исследования, проведённые методом *in situ* сканирующей туннельной микроскопии и подтверждённые *ab initio* расчётами, показывают, что атомы Se начинают реагировать с поверхностью Si(111) даже при комнатной температуре и ослабляют связь между поверхностными атомами Si [7]. При повышенных температурах (выше 550 °С) молекулы SiSe<sub>2</sub> начинают десорбироваться с поверхности Si(111), покрытой плёнкой селена, и при покрытии 0,25 бислоя (БС) Se (1 БС =  $1,56 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) на поверхности Si(111) образуется примесно-индуцированная фаза «1×1»-Se [8, 9]. В [10] показано, что травление подложки Si(111) селеном происходит послойно: по двумерно-островковому (при низких температурах) либо по ступенчато-слоевому механизму (при высоких температурах). Такой процесс известен как монослойное химическое лучевое травление (monolayer chemical beam etching) [11] и может применяться для прецизионного утонения кремниевых слоёв, однако зависимость кинетики травления поверхности кремния непрерывным потоком селена от температуры и скорости осаждения остаётся слабо изученной. Целью данной работы являются определение режимов кинетики травления поверхности Si(111) молекулярным пучком селена в широком температурном диапазоне и теоретическое описание зависимости температур переходов между режимами кинетики от скорости осаждения селена.

**Теоретическая модель.** В общем случае выражение для изменения усреднённой по поверхности концентрации селена на подложке со временем в условиях осаждения атомов Se на поверхность Si(111) можно записать в виде

$$\frac{d\langle n_{\text{Se}} \rangle}{dt} = R_{\text{Se}} - J_{\text{Se}} - 2J_{\text{SiSe}_2},$$

где  $n_{\text{Se}}$  — концентрация селена на поверхности,  $R_{\text{Se}}$  — поток осаждаемых атомов Se,  $J_{\text{Se}}$  и  $J_{\text{SiSe}_2}$  — потоки десорбирующихся атомов Se и молекул SiSe<sub>2</sub> (десорбция других молекул с поверхности Si(111), покрытой селеном, не наблюдается [8]). В условиях когда концентрация селена на образце постоянна ( $d\langle n_{\text{Se}} \rangle/dt = 0$ ), поток Se на поверхность выражается следующим образом:

$$R_{\text{Se}} = J_{\text{Se}} + 2J_{\text{SiSe}_2}. \quad (1)$$

Потоки атомов Se и молекул SiSe<sub>2</sub> с поверхности в вакуум определяются Больцмановской статистикой, и полученное выражение будет иметь вид

$$R_{\text{Se}} = \nu_{\text{Se}} n_{\text{Se}} \exp\left(-\frac{E_{\text{Se}}}{kT}\right) + 2\nu_{\text{SiSe}_2} \frac{n_{\text{Se}}^2}{n_0} \exp\left(-\frac{E_{\text{SiSe}_2}}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $n_0 = 7,8 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> — поверхностная концентрация атомов Si,  $E_{\text{Se}}$  — энергия десорбции атомов Se,  $E_{\text{SiSe}_2}$  — энергия формирования и десорбции молекулы SiSe<sub>2</sub>,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура подложки,  $\nu_{\text{Se}}$  и  $\nu_{\text{SiSe}_2}$  — константы скоростей десорбции.

Согласно [8] при температурах ниже 600 °С, когда сублимацией кремния можно пренебречь, селен десорбируется с подложки Si(111) преимущественно в виде отдельных атомов Se ( $J_{\text{Se}} \gg J_{\text{SiSe}_2}$ ). При более высоких температурах начинает доминировать поток молекул SiSe<sub>2</sub> ( $J_{\text{Se}} \ll J_{\text{SiSe}_2}$ ), что позволяет переписать выражение (1) в виде

$$R_{\text{Se}} \approx 2J_{\text{SiSe}_2} = 2\nu_{\text{SiSe}_2} \frac{n_{\text{Se}}^2}{n_0} \exp\left(-\frac{E_{\text{SiSe}_2}}{kT}\right). \quad (3)$$

Экспериментально показано, что для каждой температуры подложки Si(111) в интервале 630–750 °С существует критическая скорость осаждения  $R_{\text{Se}}^*$ , при которой образуется примесно-индуцированная фаза Si(111)-«1×1»-Se с покрытием Se около 0,25 БС [9, 10]. Каждый атом Se данной фазы образует ковалентные связи с двумя атомами подложки с суммарной энергией связи  $E_{\text{Se}} = 2,9$  эВ [8]. В момент полного покрытия поверхности примесно-индуцированной фазой «1×1»-Se из формулы (3) можно выразить

$$2J_{\text{SiSe}_2} = \frac{\nu_{\text{SiSe}_2}}{8} n_0 \exp\left(-\frac{E_{\text{SiSe}_2}}{kT}\right) \approx R_{\text{Se}}. \quad (4)$$

Однако при бóльших покрытиях поступающие на поверхность атомы Se не образуют ковалентных связей с атомами Si-подложки и обладают меньшей энергией десорбции [8]. Поэтому в области более высоких скоростей осаждения либо низких температур использованное приближение  $J_{\text{Se}} \ll J_{\text{SiSe}_2}$  перестаёт действовать и десорбция селена происходит одновременно в виде атомов Se и в составе молекул SiSe<sub>2</sub>. Таким образом, уравнение (4) соответствует границе перехода от режима кинетики с преимущественной десорбцией атомарного селена с поверхности, полностью покрытой фазой Si(111)-«1×1»-Se, к режиму с преимущественной десорбцией молекул SiSe<sub>2</sub>. Из этого уравнения можно выразить температуру перехода между данными двумя режимами кинетики ( $T_1$ ), которую можно зарегистрировать по появлению/исчезновению рефлексов сверхструктуры Si(111)-7×7:

$$T_1(R_{\text{Se}}) = \frac{E_{\text{SiSe}_2}}{k \ln(\nu_{\text{SiSe}_2} n_0 / 8R_{\text{Se}})}, \quad (5)$$

где  $\nu_{\text{SiSe}_2} = 5,4 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$  можно определить на основе данных, опубликованных в работе [10]. По этой формуле рассчитывается характерный диапазон температур данного перехода ( $T_1 = 650\text{--}700$  °С) для типичных скоростей осаждения  $R_{\text{Se}} = 0,1\text{--}1$  БС/с. Согласно выражению (3) при  $T > T_1$  скорость травления кремния потоком Se будет постоянна и равна  $J_{\text{SiSe}_2} \approx R_{\text{Se}}/2$ , а при меньших температурах значительная доля Se, осаждаемого на поверхность, не будет участвовать в травлении подложки.

В области высоких температур скорость сублимации кремния  $J_{\text{Si}}$  может превысить скорость травления  $J_{\text{SiSe}_2}$  и суммарный поток кремния с поверхности будет состоять из двух слагаемых:

$$J_{\text{Si}}^{\Sigma} = J_{\text{Si}} + J_{\text{SiSe}_2}, \quad (6)$$

где  $J_{\text{Si}} = \nu_0 n_0 \exp(-E_{\text{Si}}/kT)$  — скорость сублимации атомов кремния с поверхности Si(111);  $\nu_0 = 2,59 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  и  $E_{\text{Si}} = 4,09$  эВ — атомная частота и энергия сублимации кремния, определённые с высокой точностью для поверхности Si(111) в работе [12]. Тогда переход от режима эффективного травления кремния селеном к преимущественной сублимации будет происходить при условии  $J_{\text{Si}} > J_{\text{SiSe}_2}$ , выполняющемся при  $T > T_2$ :

$$T_2(R_{\text{Se}}) = \frac{E_{\text{Si}}}{k \ln(2\nu_0 n_0 / R_{\text{Se}})}. \quad (7)$$

Рассчитанный по данной формуле диапазон температур перехода составляет  $T_2 = 1150\text{--}1250$  °С для скоростей осаждения  $R_{\text{Se}} = 0,1\text{--}1$  БС/с. На рис. 1 изображены температуры переходов  $T_1(R_{\text{Se}})$  и  $T_2(R_{\text{Se}})$  между режимами кинетики травления поверхности Si(111) селеном, наложенные на диаграмму структуры поверхности Si(111) в условиях воздействия молекулярного пучка селена, построенную на основе известных экспериментальных данных [10]. Диаграмма демонстрирует структурные переходы поверхности в

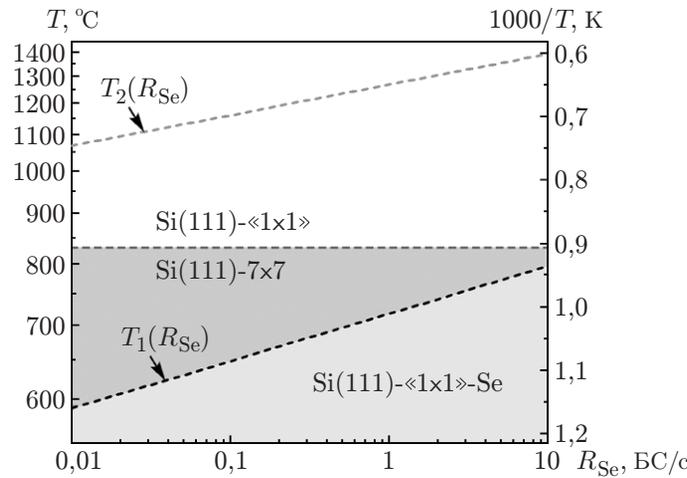


Рис. 1. Структурно-кинетическая диаграмма поверхности Si(111) при взаимодействии с молекулярным пучком селена. Пунктирная линия  $T_1(R_{Se})$  соответствует переходу из низкотемпературного режима травления, лимитированного скоростью формирования и десорбции молекул  $SiSe_2$ , к режиму, лимитированному скоростью осаждения Se (энергия активации —  $E_{SiSe_2} = 2,65$  эВ). Пунктирная линия  $T_2(R_{Se})$  соответствует переходу к преимущественной высокотемпературной сублимации атомов Si с поверхности (энергия активации —  $E_{Si} = 4,09$  эВ). Оттенками серого обозначены типы наблюдаемой структуры поверхности Si(111)

зависимости от потока селена на поверхность и температуры подложки. При превышении температуры  $T_1$  происходит обратимый переход от примесно-индуцированной фазы  $Si(111)\text{-}\langle 1 \times 1 \rangle\text{-Se}$  к сверхструктуре  $Si(111)\text{-}7 \times 7$  со сменой режима кинетики от преимущественной десорбции атомов Se с ограниченной десорбцией молекул  $SiSe_2$  к доминированию десорбции молекул  $SiSe_2$ , за счёт которой осуществляется травление поверхности Si(111). При дальнейшем увеличении температуры выше  $830$  °C происходит фазовый переход от сверхструктуры  $Si(111)\text{-}7 \times 7$  к структуре  $Si(111)\text{-}\langle 1 \times 1 \rangle$  без смены режима кинетики травления. При росте температуры выше  $T_2$  наблюдается смена режима кинетики без видимого изменения структуры поверхности: сублимационный поток атомов кремния начинает преобладать над потоком молекул  $SiSe_2$ .

**Методика эксперимента.** Эксперименты проводились с использованием метода *in situ* сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ ОЭМ). В данном методе электронный пучок с энергией 100 кэВ падает на поверхность полупроводниковой подложки под малым углом (порядка брэгговского), что обеспечивает высокую чувствительность к морфологии поверхности, а также возможность анализа структуры поверхности на основе дифракции быстрых электронов на отражение. В режиме электронно-микроскопического изображения данный метод позволяет визуализировать процессы на поверхности в реальном времени.

Образцы размерами  $7 \times 1 \times 0,38$  мм вырезались из пластин Si(111) *n*-типа ( $0,3$  Ом·см) с углом разориентации  $0,1^\circ$  от сингулярной грани. После химической очистки (кипячение в растворе ацетона  $\sim 15$  мин) поверхность образцов подвергалась воздействию ионизированного пучка аргона с энергией 5 кэВ в течение 30 мин для получения на поверхности круглого углубления (лунки) [13]. Далее образцы обрабатывались петролевым эфиром и отжигались 10 мин в СВВ-камере микроскопа путём пропускания электрического тока при  $T \approx 1300$  °C для удаления поверхностного оксида и частиц загрязнений [14]; при этом

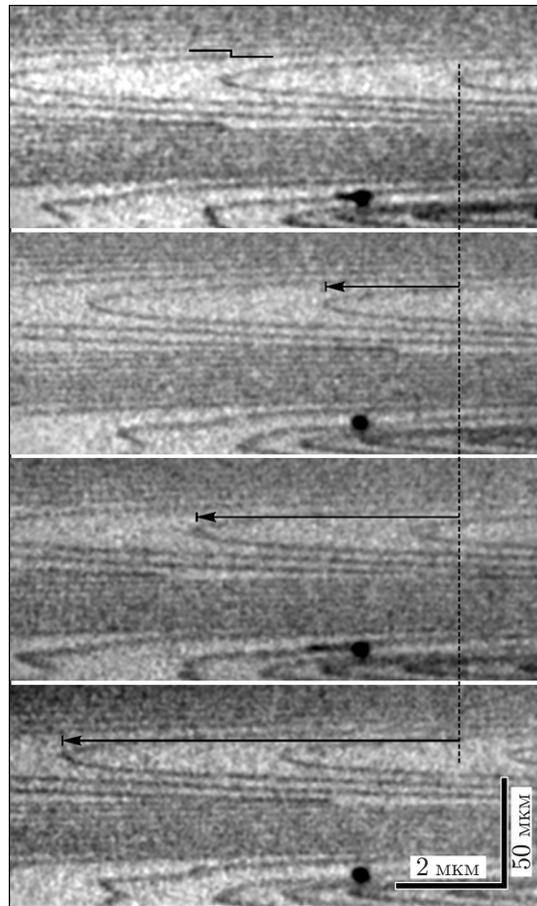


Рис. 2. Изображения поверхности Si(111) с широкими террасами, полученные методом *in situ* ОЭМ с интервалом 5 с при температуре 870 °С и скорости травления 0,11 БС/с. Вышележащие террасы расположены слева. Тёмная частица внизу на изображениях служит неподвижным репером для измерения величины смещения ступеней в процессе травления, отмеченного чёрными стрелками

на дне лунки образовывалась широкая круглая терраса диаметром порядка нескольких десятков микрон [15]. Важная особенность СВВ ОЭМ заключается в  $\sim 50$ -кратном сжатии изображения в направлении падения электронного пучка, искажающем изображение всех элементов морфологии поверхности, в частности атомных ступеней и двумерных островков. В качестве испарителя использовался керамический тигель с загруженными гранулами селена чистотой 99,9996 %. Спектр молекулярного пучка, испускаемого нагретым тиглем, состоит не только из атомов Se, но также содержит значительную долю молекулярных кластеров  $\text{Se}_2$ ,  $\text{Se}_4$ ,  $\text{Se}_6$  и др. [16]. Однако после осаждения на нагретую поверхность Si(111) кластеры распадаются и десорбция таких кластеров не наблюдается [8].

**Результаты экспериментов и обсуждение.** На рис. 2 представлена серия ОЭМ-изображений поверхности Si(111) с широкими (около 3 мкм) террасами при температуре 870 °С в процессе травления молекулярным пучком селена. После открытия заслонки испарителя Se на поверхности начиналось движение моноатомных ступеней (тонкие линии тёмного контраста) в направлении вышележащих террас (показано чёрными стрелками), что соответствует травлению поверхности по ступенчато-слоевому механизму. Экспериментально показано, что скорость такого движения при 870 °С пропорциональна скорости осаждения селена  $R_{\text{Se}}$  и постоянна при быстром изменении температуры образца в пре-

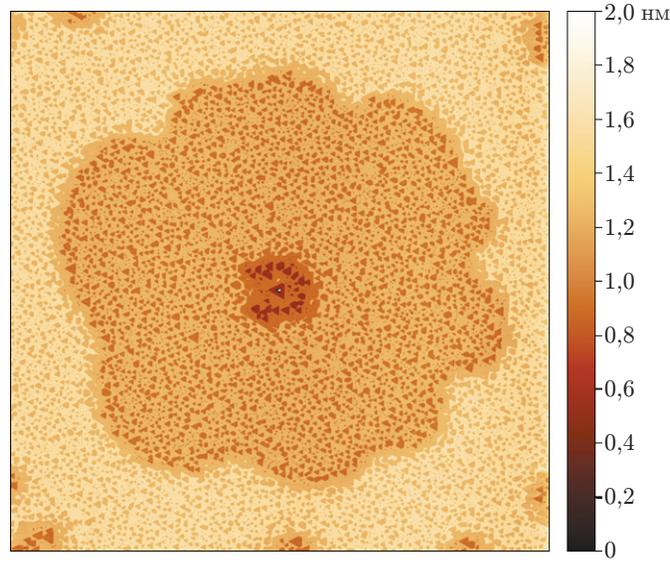


Рис. 3. АСМ-изображение ( $30 \times 30$  мкм) поверхности Si(111) с широкими террасами после травливания 9,3 БС при  $750^\circ\text{C}$  и последующего отжига без потока Se при  $750^\circ\text{C}$  в течение 10 с

делах  $T_1 < T < T_2$  (см. (5) и (7)), несмотря на происходящий вблизи  $T = 830^\circ\text{C}$  сверхструктурный переход « $1 \times 1$ »  $\Leftrightarrow 7 \times 7$  [17] и переход к двумерно-островковому механизму травления при высоких скоростях травления и  $T < 830^\circ\text{C}$ . На рис. 3 представлено типичное топографическое изображение, полученное методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на поверхности Si(111) с широкими террасами, травление которых происходило за счёт периодического зарождения, роста и коалесценции двумерных вакансионных островков. Независимость скорости травления от структуры поверхности и механизма травления свидетельствует о том, что скорость травления определяется скоростью осаждения Se и весь Se, прибывающий на поверхность, десорбируется с поверхности в составе молекул  $\text{SiSe}_2$ . Иными словами, приближение  $J_{\text{Se}} \ll J_{\text{SiSe}_2}$  и формула (3) справедливы во всём интервале  $T_1 < T < T_2$ . В таком случае, используя уравнения (3) и (6), можно выразить температурную зависимость суммарного потока кремния с поверхности:

$$J_{\text{Si}}^{\Sigma} = J_{\text{Si}} + J_{\text{SiSe}_2} = \nu_0 n_0 \exp\left(-\frac{E_{\text{Si}}}{kT}\right) + \frac{R_{\text{Se}}}{2}. \quad (8)$$

Использование образцов с широкими террасами обеспечивало высокую точность измерения зависимости скорости движения ступеней от температуры подложки (от  $850$  до  $1250^\circ\text{C}$ ). Это позволило построить зависимости  $J_{\text{Si}}^{\Sigma}(T)$  при нескольких фиксированных  $R_{\text{Se}}$  (рис. 4). Можно видеть, что при  $T < T_2$  каждый из графиков 1–4, полученных при ненулевых  $R_{\text{Se}}$ , принимает приблизительно постоянное значение на уровне  $J_{\text{SiSe}_2} \approx R_{\text{Se}}/2$ , линейно возрастающее с увеличением  $R_{\text{Se}}$  от 0,01 до 2 БС/с. При  $T > T_2(R_{\text{Se}})$  графики 2–4 демонстрируют рост, связанный с появлением значительного сублимационного потока  $J_{\text{Si}}$  с поверхности. Температурный диапазон графика 1 ( $850$ – $1200^\circ\text{C}$ ), полученного при максимальной  $R_{\text{Se}} = 2$  БС/с, полностью лежит в области травления поверхности Si(111), лимитированного скоростью осаждения Se. В пределе высоких температур  $J_{\text{Si}}$  становится много больше  $J_{\text{SiSe}_2}$  и графики 1–4 приближаются к графику 5, полученному при нулевой  $R_{\text{Se}}$ . Таким образом, кинетика травления поверхности Si(111) в интервале  $T_1 < T < T_2$  лимитирована скоростью осаждения Se, а при  $T > T_2$  доминирует сублимационный поток кремния с поверхности, что хорошо описывается аппроксимацией (8) на рис. 4.

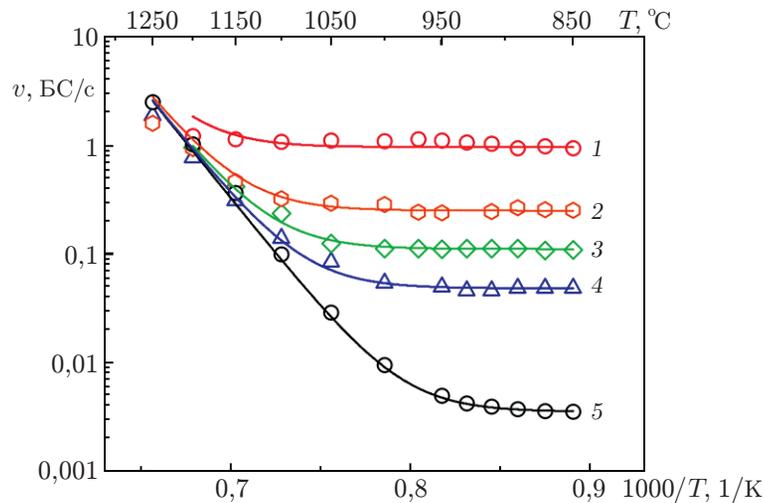


Рис. 4. Графики температурных зависимостей скорости потока кремния с поверхности Si(111)  $J_{Si}^{\Sigma}(T)$  при скоростях осаждения селена  $R_{Se}$  (БС/с): 1 — 2; 2 — 0,5; 3 — 0,2; 4 — 0,1; 5 — 0. Низкотемпературная часть графика 5  $J_{Si}^{\Sigma}(T) \approx 3,5 \cdot 10^{-3}$  БС/с соответствует скорости травления поверхности кислородом остаточной атмосферы

При охлаждении образца ниже  $T_1(R_{Se})$  и одновременном осаждении Se на поверхность на картинах дифракции быстрых электронов на отражение исчезали рефлексы сверхструктуры Si(111)- $7 \times 7$ , что соответствовало формированию примесно-индуцированной фазы « $1 \times 1$ »-Se [9] и быстрому замедлению скорости травления  $J_{SiSe_2}$  при постоянной  $R_{Se}$ . Это свидетельствует о существенных ограничениях кинетики травления поверхности Si(111) при  $T < T_1$ , связанных со значительной величиной энергии формирования и десорбции молекул SiSe<sub>2</sub> ( $E_{SiSe_2} = 2,65$  эВ [10]). Несмотря на это на поверхности не наблюдалось накопление Se, поскольку энергия десорбции атомов Se при покрытиях более 0,25 БС уменьшается, как следствие, поток  $J_{Se}$  возрастает. Это обеспечивает соблюдение условия  $d\langle n_{Se} \rangle / dt = 0$ , и соотношение между потоками  $J_{Se}$  и  $J_{SiSe_2}$  регулируется уравнением (2).

**Заключение.** Методом *in situ* ОЭМ показано, что при травлении поверхности Si(111) молекулярным пучком селена можно выделить три режима кинетики. В области низких температур (ниже  $T_1 \sim 650$  °C, зависящей от скорости осаждения Se) кинетика молекулярно-лучевого травления лимитирована формированием и десорбцией молекул SiSe<sub>2</sub>, энергия активации которых составляет 2,65 эВ. При более высоких температурах происходит переход к режиму травления, скорость которого ограничена интенсивностью потока Se, поступающего на поверхность. При температурах вблизи  $T_2 \sim 1150$  °C скорость сублимации кремния начинает вносить значительный вклад в суммарный поток кремния с поверхности и в пределе высоких температур преобладает над травлением поверхности Si(111).

**Благодарности.** Работа проводилась на оборудовании Центра коллективного пользования «Наноструктуры» в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржано-ва СО РАН.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-72-10063).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Li X., Tao L., Chen Z. et al.** Graphene and related two-dimensional materials: Structure-property relationships for electronics and optoelectronics // *Appl. Phys. Rev.* 2017. **4**, N 2. P. 021306.
2. **Fiori G., Bonaccorso F., Iannaccone G. et al.** Electronics based on two-dimensional materials // *Nature Nanotechnol.* 2014. **9**, N 10. P. 768–779.
3. **Vishwanath S., Liu X., Rouvimov S. et al.** Controllable growth of layered selenide and telluride heterostructures and superlattices using molecular beam epitaxy // *Journ. Mater. Research.* 2016. **31**, N 07. P. 900–910.
4. **Prieto J. E., Markov I.** Stranski–Krastanov mechanism of growth and the effect of misfit sign on quantum dots nucleation // *Surface Sci.* 2017. **664**. P. 172–184.
5. **Kandel D., Kaxiras E.** The surfactant effect in semiconductor thin-film growth // *Solid State Phys.* 2000. **54**. P. 219–262.
6. **Yagi K., Minoda H., Degawa M.** Step bunching, step wandering and faceting: Self-organization at Si surfaces // *Surface Sci. Rep.* 2001. **43**, N 2–4. P. 45–126.
7. **Wu S. Q., Zhou Y., Wu Q.-H. et al.** Adsorption of selenium atoms at the Si(111)-7×7 surface: A combination of scanning tunnelling microscopy and density functional theory studies // *Chem. Phys.* 2011. **382**, N 1–3. P. 41–46.
8. **Papageorgopoulos A. C., Kamaratos M. A.** Study of the restoration of Se/Si(111)-7×7 reconstructed surfaces: Preservation of the bulk-terminated state // *Surface Sci.* 2002. **504**. P. L191–L195.
9. **Dev B. N., Thundat T., Gibson W. M.** An x-ray standing wave interference spectrometric analysis of chemisorption of selenium on silicon(111) and (220) surfaces // *Journ. Vacuum Sci. & Technol. A.* 1985. **3**, N 3. P. 946–949.
10. **Rogilo D. I., Fedina L. I., Ponomarev S. A. et al.** Etching of step-bunched Si(111) surface by Se molecular beam observed by in situ REM // *Journ. Crystal Growth.* 2020. **529**. P. 125273.
11. **Tsang W. T., Chiu T. H., Kapre R. M.** Monolayer chemical beam etching: Reverse molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1993. **63**, N 25. P. 3500–3502.
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. P. 115424.
13. **Sitnikov S., Kosolobov S., Latyshev A.** Attachment–detachment limited kinetics on ultra-flat Si(111) surface under etching with molecular oxygen at elevated temperatures // *Surface Sci.* 2015. **633**. P. L1–L5.
14. **Latyshev A. V., Fedina L. I., Rogilo D. I. et al.** Atomically Controlled Silicon Surface. Novosibirsk: Parallel, 2016. 222 p.
15. **Рогило Д. И., Рыбин Н. Е., Федина Л. И. и др.** Распределение концентрации адатомов на экстраширокой террасе поверхности Si(111) в условиях сублимации // *Автометрия.* 2016. **52**, № 5. С. 103–110. DOI: 10.15372/AUT20160512.
16. **Завилопуло А. Н., Шпеник О. Б., Мылымко А. М.** Исследование молекулярного пучка Se масс-спектрометрическим методом с электронной ионизацией // *Журнал технической физики.* 2017. **87**, № 3. С. 335–340.
17. **Takayanagi K., Tanishiro Y., Takahashi S. et al.** Structure analysis of Si(111)-7×7 reconstructed surface by transmission electron diffraction // *Surface Sci.* 1985. **164**, N 2–3. P. 367–392.

*Поступила в редакцию 29.06.2020*

*После доработки 29.07.2020*

*Принята к публикации 03.08.2020*