

На правах рукописи



Роголо Дмитрий Игоревич

**КИНЕТИКА ДВУМЕРНО-ОСТРОВКОВОГО ЗАРОЖДЕНИЯ
ПРИ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОМ РОСТЕ НА ПОВЕРХНОСТИ Si(111)**

01.04.07 — физика конденсированного состояния

01.04.10 — физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН).

Научные руководители:

Федина Людмила Ивановна, кандидат физико-математических наук

Латышев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, академик РАН

Официальные оппоненты:

Эрвье Юрий Юрьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», доцент кафедры физики полупроводников физического факультета

Азатьян Сергей Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, научный сотрудник отдела физики поверхности

Ведущая организация:

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»

Защита состоится «10» октября 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу:
630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук:

http://www.isp.nsc.ru/comment.php?id_dissert=924.

Автореферат разослан «__» августа 2017 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современная полупроводниковая электроника является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей мировой промышленности. Прогресс в этой области во многом обеспечен совершенствованием эпитаксиальных технологий на основе понимания атомных процессов на ростовой поверхности кристалла. Под действием кинетических ограничений, упругих напряжений и других факторов, такие элементарные процессы как диффузия адсорбированных атомов (адатомов), их взаимодействие между собой и с атомными ступенями могут приводить к зарождению двумерных (2D) островков и неустойчивости морфологии поверхности. Глубокое понимание этих фундаментальных процессов лежит в основе контролируемого изменения морфологии ростовой поверхности кристалла и технологий создания полупроводниковых систем с заданной структурой и морфологией границ раздела. Основным элементом структуры атомно-чистой поверхности кристалла являются моноатомные ступени [1], высота которых связана с ориентацией поверхности и равна расстоянию между соответствующими плоскостями, выходящими на поверхность кристалла. В частности, высота моноатомной ступени на поверхности Si(111) равна $a_{(111)} = 3.14 \pm 0.01$ Å, и может быть использована, например, в метрологии. На основе минимизации концентрации ступеней, достигаемой за счёт управления неустойчивостью морфологии вицинальной поверхности Si(111) при сублимации [2], в ИФП СО РАН разработаны способы создания высотных калибровочных тест-объектов в диапазоне 0.1–20 нм.

Структура атомно-чистой поверхности полупроводника в условиях сверхвысокого вакуума, как правило, отличается от структуры аналогичной грани в его объёме и, при наличии поверхностной сверхструктуры, характеризуется бóльшим периодом трансляции. Присутствие сверхструктуры существенно модифицирует процессы на поверхности кристалла, а механизм эпитаксиального роста становится более сложным. В частности, эпитаксиальный рост на поверхности Si(111)-(7×7) является, по данным *in situ* исследований методом сканирующей туннельной микроскопии, сложным многостадийным процессом, включающим образование кластеров атомов диаметром до 1 нм, называемых нанокластерами. В процессе роста нанокластеры совершают диффузионные скачки и взаимодействуют с атомными ступенями [3]. Необходимым условием эпитаксиального Si/Si(111)-(7×7) роста является трансформация структуры нанокластеров и нижележащего атомного слоя к атомной структуре объёма кристалла. Необходимость такой трансформации затрудняет не только зарождение 2D островков, но и двойных изломов на прямолинейных участках ступеней типа $[\bar{1}\bar{1}2]$, которые имеют на поверхности Si(111)-(7×7) размер

сверхструктурной полужайки. В присутствии сверхструктуры механизм эпитаксиального роста настолько усложняется, что все процессы, составляющие 2D зарождение и рост, характеризуются гораздо большим количеством параметров (критических размеров зародышей, их энергий связи, энергий активации диффузии и взаимодействия с атомными ступенями, и др.), чем в соответствии с классической теорией зародышеобразования [4]. Поскольку фактически все эпитаксиальные технологии связаны с использованием реконструированных поверхностей, детальное изучение атомных процессов, их количественная характеристика и определение влияния сверхструктуры на эволюцию морфологии поверхности представляют собой важную научную проблему. Однако, большинство параметров атомных процессов, обусловленных поверхностной сверхструктурой, остаются неизвестными, их экспериментальное измерение затруднено, а классические теории движения ступеней и зарождения двумерных островков (2D зарождения) [4] требуют расширения.

Для экспериментального изучения атомных процессов на ростовой поверхности кристалла особенно информативен метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), который в ряде случаев позволяет непосредственно (*in situ*) визуализировать атомные процессы в динамике при температурах вплоть до 500°C. Помимо непосредственного наблюдения, для получения качественной и количественной информации о механизме эпитаксиального роста применяются теоретические подходы к анализу распределения атомных ступеней, размеров 2D островков, их концентрации, площадей захвата и критической ширины террасы для 2D зарождения в зависимости от температуры подложки и скорости осаждения атомов. Однако, обобщение доступных экспериментальных данных о 2D зарождении на поверхности Si(111), полученных различными методами обнаруживает большой разброс значений эффективной энергии активации 2D зарождения и роста E_{2D} , а также резкий скачок E_{2D} при 500°C. В опубликованных работах данный скачок не обсуждается, несмотря на то, что его величина ($E_{2D} \lesssim 1$ эВ при $T \lesssim 450^\circ\text{C}$, $E_{2D} \gtrsim 2$ эВ при $T \gtrsim 500^\circ\text{C}$) предполагает существенное изменение механизма 2D зарождения.

Одним из наиболее дискуссионных является вопрос о проницаемости атомных ступеней и кинетике массопереноса на поверхности Si(111)-(7×7). Наблюдаемое экспериментально формирование двух- и трёхслойных 2D островков в процессе роста Si при $T=400\text{--}550^\circ\text{C}$ предполагает появление массопереноса с нижележащей террасы на поверхность 2D островков (восходящего потока адатомов) через ограничивающие их ступени без встраивания. Данное явление известно в литературе как *проницаемость* ступеней и краёв островков для адатомов. Однако, согласно другим данным, полученным на вицинальной поверхности Si(111)-(7×7), при $T=530^\circ\text{C}$ массоперенос через ступени пренебрежимо мал. Теоретический подход к описанию проницаемости ступеней,

развиваемый Филимоновым и Эрвье [5], показывает, что процессы встраивания адатомов в ступень и их перехода на соседнюю террасу взаимозависимы и определяются скоростями элементарных атомных процессов, а также концентрацией изломов ступени. Экспериментальная проверка и применение этой теории для изучения эволюции морфологии ростовой поверхности на примере Si/Si(111)-(7×7) эпитаксии является актуальной задачей, но ограничивается скудностью данных об элементарных процессах и противоречивостью информации о кинетике 2D зарождения и роста. В частности, сообщается, что при $T \sim 500^\circ\text{C}$ кинетика массопереноса лимитируется поверхностной диффузией (DL кинетика, *diffusion limited*), либо встраиванием в ступени, связанным с преодолением дополнительных энергетических барьеров Швёбеля (AL кинетика, *attachment limited*), либо находится в промежуточном режиме. Проблема определения режима кинетики Si/Si(111)-(7×7) роста усложняется также отсутствием надёжных экспериментальных данных о таких ключевых параметрах, как барьеры Швёбеля.

Попытка установления связи между режимом кинетики роста и эволюцией морфологии вицинальной поверхности Si(111)-(7×7) в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при $T = 650\text{--}800^\circ\text{C}$ предпринята в работе [6]. Обнаружено, что вплоть до $T \approx 680^\circ\text{C}$ регулярное распределение ступеней сохраняется, но при более высоких $T = 700\text{--}800^\circ\text{C}$ возникает морфологическая неустойчивость в виде различных типов эшелонирования атомных ступеней. Показано, что смена типов эшелонирования сопровождается изменением структуры ступеней и изломов на них, что указывает на взаимосвязь между режимом морфологической неустойчивости и кинетикой взаимодействия адатомов со ступенями. При этом, используемый авторами феноменологический подход позволяет макроскопически описать эволюцию морфологии поверхности, но не проясняет физические причины смены режимов кинетики. Поэтому в данном интервале T представляется актуальным изучение взаимодействия адатомов со ступенями при Si/Si(111)-(7×7) эпитаксии на основе анализа движения ступеней, зарождения и роста 2D островков, их концентрации, размеров, формы и других макроскопических характеристик с использованием взаимодополняющих *in situ* и *ex situ* экспериментальных методов, а также соответствующих теоретических подходов.

В настоящей работе использован метод сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ ОЭМ) [2], обладающий временным и пространственным разрешением, достаточным для визуализации динамики таких элементов морфологии поверхности, как моноатомные ступени и 2D островки. Данный метод позволяет проводить *in situ* эксперименты в условиях МЛЭ в широком диапазоне скоростей осаждения и температур

(вплоть до $T_{пл}$). Из-за специфических особенностей метода СВВ ОЭМ, приводящих к сжатию изображений, для детального анализа морфологии поверхности использовался *ex situ* метод атомно-силовой микроскопии (АСМ). В ряде случаев проведение экспериментальных исследований сопровождалось кинетическим Монте-Карло моделированием¹.

Целью данной работы являлось определение количественных параметров двумерно-островкового зарождения и взаимодействия адатомов со ступенями, а также установление физических закономерностей морфологической нестабильности ростовой поверхности Si(111).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Изучение процессов 2D зарождения на начальных и поздних стадиях гомоэпитаксиального роста (в первом слое и при длительном росте) в зависимости от размера террасы, температуры подложки и скорости осаждения;
2. Получение количественной информации о поверхностной диффузии и энергетических барьерах для встраивания адатомов в ступени, размере критического зародыша, режиме кинетики роста, проницаемости атомных ступеней, кинетической длине на поверхности Si(111);
3. Изучение закономерностей 2D зарождения и роста на сингулярных участках поверхности Si(111), ограниченных эшелонами ступеней и в их отсутствие. Определение условий перехода от двумерно-островкового к многослойному механизму роста Si/Si(111).

Научная новизна работы:

- Экспериментально определено значение энергетического барьера $E_{ES} \approx 0.9$ эВ для формирования двойного излома на прямолинейных участках ступеней с ориентацией типа $[1\bar{1}2]$ при встраивании сверху-вниз.
- Обнаружено формирование пирамидальных волн на террасах эшелонированной поверхности, которое связано с непрерывным стоком адатомов в эшелоны ступеней и постепенно сокращающейся до критического значения шириной террасы с областью 2D зарождения.
- Обнаружен переход режима роста Si/Si(111)-(7×7) от AL кинетики (при $T < 720^\circ\text{C}$) к DL кинетике (при $T > 720^\circ\text{C}$), при котором исчезает огранка

¹ Кинетическое Монте-Карло моделирование проводилось под руководством Натальи Львовны Шварц при активном участии сотрудников её группы: А. Г. Насовьяк, С. В. Усенкова и А. Н. Карпова. Автор выражает им свою благодарность за помощь в построении кМК моделей и обсуждении полученных результатов.

ступеней и эффективная энергия активации 2D зарождения и роста изменяется от $E_{2D} \approx 2.4$ эВ к $E_{2D} \approx 0.5$ эВ, соответственно.

- Показано, что при росте пирамидальной волны на эшелонированной поверхности Si(111)-(7×7) размер критического зародыша 2D островка Si меняется от $i=1$ в первом слое (на широких террасах вдали от ступеней) до $i=2-10$ на наивысшей террасе пирамидальной волны в зависимости от температуры подложки и количества моноатомных ступеней в пирамидальной волне, что связано с их проницаемостью и формированием нисходящего потока с наивысшей террасы в удалённые стоки.
- Обнаружена морфологическая неустойчивость сингулярной поверхности Si(111)-(7×7) в процессе длительного 2D зарождения и роста Si при температурах $\geq 600^\circ\text{C}$ и достаточно больших скоростях осаждения.
- Анализ экспериментальных данных о 2D зарождении в первом слое на основе развитой теоретической модели 2D зарождения свидетельствует о доминирующей роли нанокластеров в массопереносе и 2D зарождении в процессе Si/Si(111)-(7×7) роста при $T \gtrsim 600^\circ\text{C}$.

Теоретическая и практическая значимость работы

Вскрыты механизмы морфологической нестабильности ростовой поверхности Si(111), которые определяют дополнительные возможности управления её рельефом в процессе эпитаксиального роста при повышенных температурах. Результаты могут быть использованы для оптимизации технологий выращивания эпитаксиальных наноструктур (пирамидальных волн, отдельных холмов) либо для сохранения планарной морфологии ростовой поверхности. Полученные количественные данные о параметрах взаимодействия адатомов со ступенями и механизмах массопереноса представляют интерес для построения адекватных моделей 2D зарождения и роста кремния, а также эволюции морфологии ростовой поверхности при повышенных температурах в условиях существования сверхструктуры Si(111)-(7×7).

На защиту выносятся следующие положения

1. Высокотемпературное зарождение и рост 2D островков округлой формы на поверхности Si(111)-(1×1) в интервале $T=850-1090^\circ\text{C}$ характеризуется кинетикой, не лимитированной встраиванием, с эффективной энергией активации $E_{2D} \approx 1.02$ эВ и размером критического зародыша $i \gg 9$, который свидетельствует о нестабильности зародышей 2D островков при высоких температурах.
2. Зарождение и рост ограниченных 2D островков Si в первом слое на широкой террасе Si(111)-(7×7) в интервале $T=600-750^\circ\text{C}$ с эффективной энергией ак-

тивации $E_{2D} \approx 1.8$ эВ и $i=1$ соответствуют кинетике, лимитированной встраиванием в прямолинейные края островков типа $[\bar{1}\bar{1}2]$. Близость экспериментального и теоретического значения $E_{2D} \approx 1.9$ эВ, полученного на основе предложенной модели 2D зарождения с учётом нанокластеров, позволяет декларировать их доминирующую роль в массопереносе и встраивании в края 2D островков на поверхности Si(111)-(7×7) при $T \gtrsim 500^\circ\text{C}$.

3. Формирование пирамидальных волн на эшелонированной поверхности Si(111)-(7×7) в процессе длительного осаждения Si связано со стоком в эшелон ступеней, который приводит к постепенному уменьшению ширины террасы с 2D зарождением до критического значения $\lambda(R, T)$. Режим 2D зарождения на пирамидальной волне контролируется кинетикой встраивания в нисходящие ступени, лимитированной барьером Швёбеля $E_{ES}^- \approx 0.9$ эВ, который связан с образованием двойных изломов на ступенях с огранкой типа $[\bar{1}\bar{1}2]$. Такая огранка обеспечивает проницаемость ступеней и нисходящий поток адатомов в удалённые стоки, определяющий размер критического зародыша на узких террасах шириной λ .
4. Рост пирамидальных волн и холмов при длительном 2D зарождении на террасах Si(111)-(7×7) и высокой скорости осаждения R связан с асимметрией барьеров Швёбеля для встраивания в ступени типа $[\bar{1}\bar{1}2]$ сверху-вниз (E_{ES}^-) и снизу-вверх (E_{ES}^+) и проницаемостью таких ступеней. Чуть меньшее значение E_{ES}^- , по сравнению с E_{ES}^+ , и неполная коалесценция 2D островков в нижележащих слоях обеспечивают при $T < 720^\circ\text{C}$ доминирующий нисходящий поток адатомов и формирование пирамидальных волн, но при $T > 720^\circ\text{C}$ начинает преобладать восходящий поток, что приводит к образованию отдельных холмов.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность представленных результатов обеспечивается использованием уникального метода *in situ* СВВ ОЭМ для визуализации 2D зарождения и эволюции морфологии поверхности при повышенных температурах, высокой воспроизводимостью результатов, а также с использованием адекватных теоретических подходов для их анализа.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конкурсах научных работ сотрудников ИФП СО РАН, конкурсах молодых учёных ИФП СО РАН, а также следующих российских и международных научных конференциях: 19th European Workshop on Molecular Beam Epitaxy (Korobitsyno, St. Petersburg, Russia, 2017), XI Конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния,

нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний 2016» (Новосибирск, 2016), 5th European Conference on Crystal Growth (Bologna, Italy, 2015), Excellent Graduate Schools 2012 Annual Meeting in conjunction with Japan-Russia Workshop on Advanced Materials Synthesis Process and Nanostructure (Sendai, Japan, 2013), Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (Vladivostok, 2013), Asia-Pacific Academy of materials topical SEMINAR “Films and Structures for Innovative Applications” (Novosibirsk, 2012), 4-я школа «Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и nanoиндустрии. Функциональные наноматериалы» (Новосибирск, 2012), Международная молодёжная конференция «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Новосибирск, 2012), X Российская конференция по физике полупроводников, секция «Поверхность, плёнки, слои» (Нижний Новгород, 2011), International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (Erlagol, Russia, 2011), XXIII и XXV Российская конференция по электронной микроскопии (Черноголовка, 2010, 2012).

Публикации

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных журналах, 1 главе в монографии и 12 тезисах докладов в трудах российских и международных конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами и заключения с общими выводами. Список литературы содержит 161 наименование. Общий объём диссертации составляет 205 страниц, включая 52 рисунка и 5 таблиц.

Личный вклад соискателя заключался в разработке системы компьютерного управления экспериментом для метода СВВ ОЭМ, проведении *in situ* экспериментов, *ex situ* измерений методом АСМ и численных расчётов методом кинетического Монте-Карло моделирования, обработке и анализе экспериментальных данных, формулировке выводов, их представлении на научных семинарах, конференциях и конкурсах, а также написании научных статей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся обоснование актуальности темы исследований, сформулирована цель работы, указана её новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор основных опубликованных теоретических и экспериментальных результатов о закономерностях 2D зарождения и

морфологических неустойчивостях ростовой поверхности. В рамках классических теоретических представлений рассмотрены атомные процессы на поверхности кристалла. Описаны основные механизмы эпитаксиального роста. Кратко изложены основные выводы классической теории скоростей зародышеобразования [4], применяемой при анализе результатов экспериментов и численных расчётов для изучения механизмов 2D зарождения. Обсуждаются основные отличия кинетики роста и 2D зарождения реальных эпитаксиальных систем от классических теоретических моделей, не учитывающих, в частности, обратимость агрегирования адатомов, возможность их диффузии через ступени без встраивания (проницаемость ступеней) и формирование многослойных островков. Кратко описан эффект эшелонирования атомных ступеней на вицинальной поверхности Si(111) при сублимации. Рассмотрена структура реальной поверхности Si(111) в условиях существования поверхностной сверхструктуры (7×7). Приводятся известные экспериментальные данные о режиме кинетики массопереноса на атомно-чистой поверхности Si(111) при температурах существования сверхструктуры (7×7) ($T < 830^\circ\text{C}$) и в условиях её отсутствия ($T > 830^\circ\text{C}$). Указываются имеющиеся в литературе противоречия, ограничения современных экспериментальных методов и теоретических подходов. Подробно обсуждается формирование атомных кластеров в полуячейках сверхструктуры Si(111)-(7×7). Представлено современное понимание механизмов взаимодействия нанокластеров между собой, с адатомами и атомными ступенями, а также их вклада в зарождение 2D островков. На основе анализа литературных данных делается вывод об актуальности изучения физических закономерностей эпитаксиального роста на поверхности Si(111) при повышенных температурах ($T > 500^\circ\text{C}$) и формулируются основные научные задачи, решаемые в диссертационной работе.

Во второй главе представлены основные принципы метода сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ ОЭМ) и его возможности *in situ* визуализации трансформаций морфологии поверхности кристалла в реальном времени, используемые для экспериментального изучения атомных процессов на поверхности Si(111). Описаны методики подготовки поверхности образцов кремния, используемые для проведения *in situ* экспериментов. Приводится подробное описание компьютерного приложения, разработанного для расширения возможностей *in situ* метода СВВ ОЭМ за счёт использования прецизионных программируемых источников электрического тока для нагрева образца и испарителей. Изложены основные возможности *ex situ* метода атомно-силовой микроскопии (АСМ), необходимого для детального анализа морфологии поверхности образцов Si(111) по окончании *in situ* экспериментов. Описаны численные модели, используемые для кинетического Монте-Карло (кМК) моделирования гомоэпитаксиального роста.

Третья глава посвящена изучению процессов 2D зарождения Si в первом эпитаксиальном слое на поверхности Si(111) в температурном диапазоне 600–1100°C. Результаты данной главы опубликованы в работах [A2–A4]. Для реализации 2D зарождения во всём интервале температур использовались сингулярные участки поверхности, размеры которых существенно превышали критическую ширину террасы для 2D зарождения.

Для реализации роста Si/Si(111) при $T > 830^\circ\text{C}$ по двумерно-островковому механизму использовалось предварительное препарирование образцов пучками низкоэнергетических ионов Ar^+ с последующим высокотемпературным ($\sim 1300^\circ\text{C}$) отжигом в СВВ ОЭМ. Применение данной методики позволило создавать террасы диаметром ~ 100 мкм, достаточно широкие для изучения зарождения 2D островков при $T > 830^\circ\text{C}$, когда диффузионная длина адатомов становится велика ($\chi_s \gg 1$ мкм) (рис.1а,б). Методом *in situ* СВВ ОЭМ получены зависимости концентрации 2D островков $N_{2D}(R, T)$ в интервале $T = 850$ – 1100°C и $R = 0.01$ – 0.3 МС/с (рис.1в,г). Обнаружено, что данные зависимости хорошо описываются аппроксимацией $N_{2D} \propto R^\chi \exp(E_{2D}/kT)$ с показателем масштабирования $\chi \approx 0.82$ и эффективной энергией активации 2D зарождения и роста $E_{2D} \approx 1.02$ эВ. Анализ экспериментальных χ и E_{2D} показал, что на поверхности Si(111)-(1×1) размер критического зародыша составляет величину порядка нескольких десятков адатомов ($i \gg 9$), энергия активации диффузии которых равна $\epsilon_d \approx 1.13$ эВ. Полученные результаты демонстрируют нестабильность 2D зарождения при $T > 830^\circ\text{C}$, обусловленную высокой скоростью эмиссии адатомов из зародышей, приводящей к их диссоциации.

Обзор известных в литературе данных о величинах χ и E_{2D} , полученных ранее при изучении 2D зарождения на поверхности Si(111)-(7×7) различными экспериментальными методами, показывает, что E_{2D} претерпевает вблизи

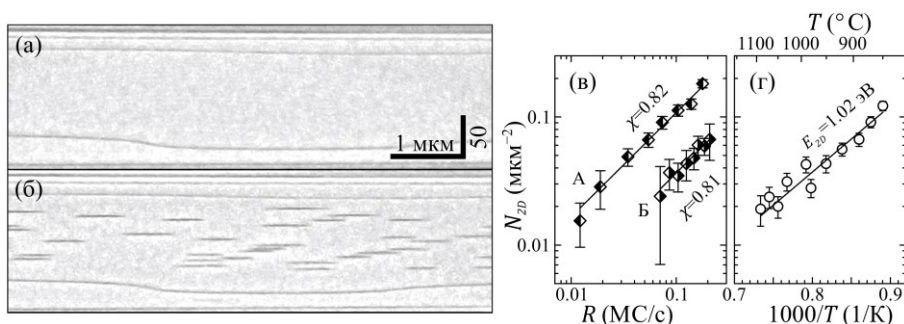


Рисунок 1. (а,б) ОЭМ изображения широкой террасы Si(111) (а) до и (б) после зарождения 2D островков Si при $T = 950^\circ\text{C}$. (в) Зависимости $N_{2D}(R)$ при T :

А — 850°C , Б — 950°C . (г) Зависимость $N_{2D}(T)$ при $R = 0.125$ МС/с.

$T=500^{\circ}\text{C}$ скачок от $\lesssim 1$ эВ при $T<500^{\circ}\text{C}$ до $\gtrsim 2$ эВ при $T>500^{\circ}\text{C}$. Эти данные свидетельствуют о существенном изменении кинетики 2D зарождения на поверхности Si(111)-(7 $\times$ 7), но в литературе данный переход детально не проанализирован. Предполагается, что данный кинетический переход может быть связан с началом диффузии нанокластеров при $T\gtrsim 500^{\circ}\text{C}$, которая приводит к изменению кинетики массопереноса, и, как следствие, E_{2D} .

Для изучения 2D зарождения в первом слое на поверхности Si(111)-(7 $\times$ 7) в интервале $T=650\text{--}750^{\circ}\text{C}$ использованы широкие (~ 10 мкм) террасы, созданные с использованием эффекта эшелонирования атомных ступеней на поверхности Si(111) [2]. Описана методика подготовки поверхности образца Si(111) со сверхструктурными доменами площадью до 100 мкм², позволяющая исключить взаимодействие адатомов с доменными границами и атомными ступенями. В этих условиях методом *ex situ* АСМ проанализирована морфология поверхности Si(111)-(7 $\times$ 7) после осаждения 0.15 МС Si в интервале $T=650\text{--}750^{\circ}\text{C}$ (рис.2а,б). Измерены зависимости $N_{2D}(R, T) \propto R^{\chi}$, описывающиеся величинами $\chi=0.52\text{--}0.62$ и $E_{2D}\approx 1.8$ эВ (рис.2в). Показано, что полученные значения χ соответствует критическому зародышу 2D островка, состоящему из одной частицы, а для интерпретации значения E_{2D} требуется учёт формирования и диффузии атомных кластеров (нанокластеров) на поверхности Si(111)-(7 $\times$ 7).

На основе классического подхода скоростей зародышеобразования предложена теоретическая модель, рассматривающая зарождение 2D островка как процесс, состоящий из следующих последовательных стадий: (1) адсорбции атомов на поверхности, (2) их диффузии и встраивания в 2D островки, (3) зарождения нанокластеров в результате взаимодействия адатомов, (4) диффузии

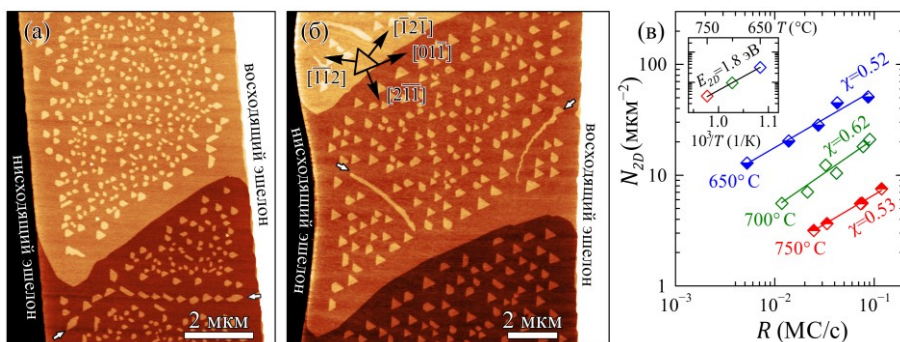


Рисунок 2. АСМ изображения 2D островков, зародившихся в первом слое на широких террасах поверхности Si(111)-(7 $\times$ 7) после осаждения $\Theta\approx 0.15$ МС Si при T : (а) 650°C и (б) 750°C . (в) Зависимости $N_{2D}(R)$; вставка — зависимость $N_{2D}(T)$, построенная на основе степенных аппроксимаций $N_{2D} \propto R^{\chi}$.

нанокластеров и их встраивания в 2D островки, (5) зарождения 2D островков в результате взаимодействия нанокластеров. Приводятся уравнения скоростей, описывающие изменение концентрации адатомов, нанокластеров и 2D островков в рамках данной модели. Сформулированы основные модельные режимы кинетики 2D зарождения в условиях доминирования адатомов либо нанокластеров в качестве частиц, реализующих массоперенос. Представлен вывод соответствующих им зависимостей $N_{2D}(R, T)$ и параметров χ и E_{2D} .

Рассчитанное в соответствии с предложенной теоретической моделью значение $E_{2D} \approx 1.9$ эВ хорошо согласуется с полученным экспериментально $E_{2D} \approx 1.8$ эВ (рис.2в). Это подтверждает вывод об определяющем вкладе диффузии нанокластеров с энергией активации около 2 эВ в кинетику поверхностного массопереноса на поверхности Si(111)-(7×7) при $T \gtrsim 500^\circ\text{C}$, причём каждый одиночный нанокластер на широкой атомно-гладкой террасе является критическим зародышем 2D островка. Таким образом, рост Si на поверхности Si(111)-(7×7) демонстрирует кардинальное изменение механизма эпитаксиального роста и с началом диффузии нанокластеров при $T \sim 500^\circ\text{C}$ и в результате $(1 \times 1) \Leftrightarrow (7 \times 7)$ сверхструктурного перехода при $T = 830^\circ\text{C}$.

В четвёртой главе приводятся данные о процессе 2D зарождения при длительном росте Si на широких террасах эшелонированной поверхности Si(111)-(7×7), размеры которых существенно превышают критическую ширину λ для 2D зарождения. Результаты данной главы опубликованы в работах [A1–A4]. Методом *in situ* СВВ ОЭМ обнаружено, что в процессе длительного роста на террасах шириной $W_{in} \sim 1.8\text{--}10$ мкм, ограниченных эшелонами ступеней, при $T = 600\text{--}750^\circ\text{C}$ происходит формирование пирамидальных волн, состоящих из протяжённых 2D слоёв, расположенных друг на друге так, что их поперечное сечение напоминает усечённую пирамиду (рис.3). ОЭМ изображения исходной террасы и 2D островков, зарождающихся на ней на начальной стадии формирования пирамидальной волны (в первом слое), представлены на рис.3а,б. На основе асимметричности зон обеднения по 2D островкам, формирующихся вблизи эшелонов ступеней за счёт стока адатомов в них, показано, что встраивание в ступени нисходящего эшелона преобладает над встраиванием в восходящий эшелон. В процессе длительного осаждения Si непрерывный сток в эшелоны приводит к постепенному уменьшению ширины области периодического 2D зарождения и, как следствие, к формированию пирамидальных волн между эшелонами ступеней (рис.3в–д). Атомные ступени пирамидальных волн приобретают зигзагообразную форму (см. рис.3г), что приводит к размытости их ОЭМ изображений (рис.3в).

При фиксированных T и R временная эволюция пирамидальных волн является периодической с периодом, равным времени осаждения одного моно-слоя Si (рис.4а–в). При постоянном R 2D слои расширяются за счёт движения ступеней, обусловленного встраиванием адатомов. Когда ширина наивысшего слоя пирамидальной волны достигает критического значения λ , на нём происходит 2D зарождение (рис.4а). Рост 2D островков (рис.4б) и их последующая коалесценция (рис.4в) приводят к формированию нового 2D слоя. Приводится подробное описание и анализ морфологических особенностей пирамидальных волн (количество атомных слоёв, форма ступеней, распределение заполненности 2D слоёв) в зависимости от температуры подложки, скорости осаждения и ширины исходной террасы. Анализ этих данных указывает на определяющую роль проницаемости зигзагообразных ступеней с огранкой прямолинейными участками типа $[\bar{1}\bar{1}2]$ в формировании нисходящих и восходящих потоков адатомов через ступени при росте пирамидальных волн при $T < 720^\circ\text{C}$ (рис.5а) и отдельных «холмов» $T > 720^\circ\text{C}$ (рис.5б) на поверхности Si(111)-(7×7). На основе зарегистрированного перераспределения адатомов между террасами пирамидальных волн, влияющего на величину критического зародыша формулируется вывод о проницаемости ступеней с огранкой прямолинейными краями типа $[\bar{1}\bar{1}2]$.

На основе периодического 2D зарождения на наивысшей террасе пирамидальной волны, наблюдаемого в процессе *in situ* СВВ ОЭМ эксперимента, был разработан подход к измерению зависимостей критической ширины

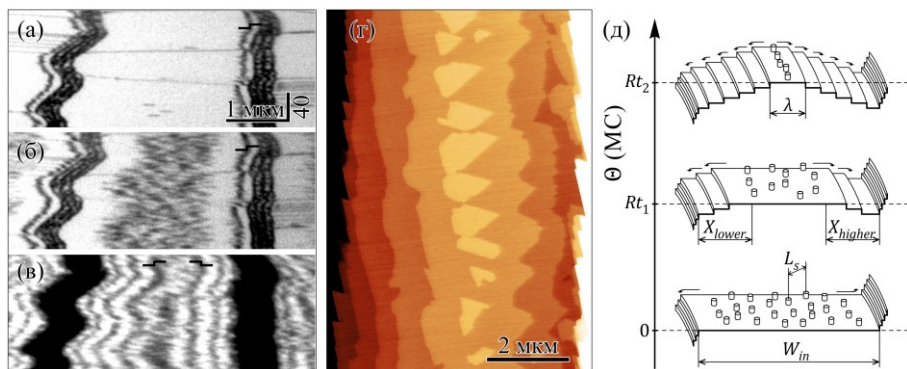


Рисунок 3. (а–в) ОЭМ изображения широких террас между эшелонами ступеней (а) до начала осаждения Si, (б) после осаждения $\Theta \approx 0.12$ МС, (в) после формирования пирамидальной волны. (г) Топографическое АСМ изображение пирамидальной волны. (д) Схематическое представление формирования пирамидальной волны за счёт стока адатомов в эшелоны ступеней.

$\lambda(R, T)$ (рис.4г,д). Зависимости $\lambda^2(R)$, полученные при $T=650\text{--}720^\circ\text{C}$ на широких террасах ($W_{in}>2$ мкм), характеризуются степенной аппроксимацией $\lambda^2 \propto R^{-\chi}$ с показателем масштабирования $\chi \approx 1.3\text{--}1.5$ (в зависимости от T). Такие значения χ указывают на то, что кинетика роста Si/Si(111)-(7×7) при $T<720^\circ\text{C}$ лимитирована встраиванием в ступени (AL кинетика), а размер критического зародыша составляет $i=6\text{--}10$ частиц. Огранка ступеней и краёв 2D островков участками типа $[\bar{1}\bar{1}2]$, наблюдаемая на АСМ изображениях (рис.3г), обусловлена их движением по механизму «ряд-за-рядом», кинетически лимитированным зарождением двойных изломов на прямолинейных участках с указанной ориентацией. Однако, при уменьшении T до 600°C , либо W_{in} до 1.8 мкм, наклон $\lambda^2(R)$ уменьшается до $\chi \approx 0.8$, что соответствует уменьшению i до 2. Это свидетельствует о возрастающей стабильности зародышей 2D островков, связанной в первом случае с понижением T , а во втором — с уменьшением оттока адатомов при их перераспределении за счёт проницаемости ступеней между террасами пирамидальной волны, состоящей из меньшего количества 2D слоёв. Важно заметить, что в отсутствие стоков в ступени (по результатам анализа $N_{2D}(R)$ в первом слое) критический зародыш состоит из одной частицы, а на критической террасе пирамидальной волны — возрастает в несколько раз и сильно зависит от количества слоёв пирамидальной волны из-за стока адатомов не только в ближайшие, но и в удалённые ступени.

Методом *in situ* СВВ ОЭМ измерены зависимости $\lambda^2(T)$, графики которых в координатах Аррениуса характеризуются резкой сменой наклона $\lambda^2 \propto \exp(-E_{2D}/kT)$ от $E_{2D} \approx 2.4$ эВ при $T<720^\circ\text{C}$ до $E_{2D} \approx 0.5$ эВ при $T>720^\circ\text{C}$

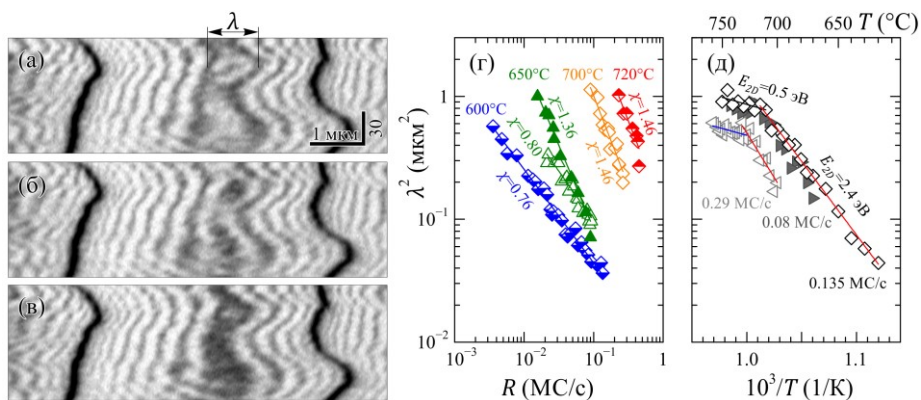


Рисунок 4. (а–в) Последовательные ОЭМ изображения повторяющихся стадий пирамидального роста (см. описание в тексте). Полное ОЭМ видео доступно online в качестве дополнительного материала к статье [A3].

(г,д) Экспериментальные зависимости $\lambda^2(R)$ и $\lambda^2(T)$.

(рис.4д), которая сопровождается постепенным исчезновением огранки ступеней прямолинейными краями типа $[\bar{1}\bar{1}2]$. Такое значительное изменение E_{2D} свидетельствует об изменении кинетики роста. С учётом опубликованных данных, полученных методом *in situ* СТМ, это соответствует снятию кинетических ограничений, связанных с зарождением двойных изломов на таких прямолинейных участках, и, как следствие, переходу к диффузионно-лимитированному режиму кинетики роста (DL кинетика). На основе обнаруженного кинетического $AL \Leftrightarrow DL$ перехода, а также E_{2D} и i , измеренных экспериментально, получена оценка величины барьера Швёбеля для нисходящего встраивания в моноатомную ступень, который обеспечивает AL кинетику, кинетические ограничения зарождения двойных изломов, огранку ступеней и 2D островков и связанную с ней проницаемость ступеней [A1]:

$$E_{ES}^- = \frac{i+3}{2(i+1)} E_{2D}^{AL} - \frac{i+2}{i+1} E_{2D}^{DL} \approx 0.9 \text{ эВ.}$$

Связь огранки ступеней, их проницаемости и AL кинетики, а также возможность изменения свойств ступеней в процессе роста разрешают ряд противоречий о кинетике Si/Si(111)-(7×7) роста и проницаемости ступеней, имеющих в литературе. Тот факт, что скорость встраивания в нисходящие ступени лишь незначительно отличается от скорости встраивания в восходящие ступени (различие зон обеднения не более 30%, см. рис.3б) указывает на малость различия барьеров Швёбеля $E_{ES}^+ - E_{ES}^- \sim 0.01$ эВ. Однако эта разница обеспечивает более быстрое возрастание восходящего потока адатомов и его преобладание над нисходящим потоком при $T > 720^\circ\text{C}$.

С использованием сингулярных террас диаметром ~ 100 мкм впервые зарегистрирована морфологическая нестабильность сингулярной поверхности Si(111)-(7×7) в процессе длительного роста Si в интервале $T = 600\text{--}770^\circ\text{C}$ [A3]. Показано, что при достаточно больших $R = 10^{-3}\text{--}10^{-1}$ МС/с рост происходит по многослойному механизму и наблюдается образование пирамидальных волн (при $T \leq 720^\circ\text{C}$, рис.5а) либо отдельных холмов (при $T > 720^\circ\text{C}$, рис.5б), аналогичных наблюдаемым на эшелонированной поверхности Si(111)-(7×7) (рис.5в,г). Послойный двумерно-островковый рост наблюдается только при $T = 650\text{--}750^\circ\text{C}$ и значениях $R \leq 5 \cdot 10^{-2}$ МС/с. Переход к многослойному росту происходит, если характерное расстояние между 2D островками L_s сопоставимо или превышает критическую ширину λ . Из аналогичности обнаруженных пирамидальных волн и холмов формирующимся на эшелонированной поверхности следует, что их образование связано с большой величиной барьеров Швёбеля $E_{ES}^\pm$, проницаемостью ступеней и образованием соответствующих потоков адатомов.

В результате сравнительного анализа заполненности слоёв пирамидальных волн и треугольных холмов (рис.5д,е) установлено, что восходящий и нисходящий потоки адатомов практически сбалансированы проницаемостью ступеней. Отмечается, что нисходящий поток адатомов через ступени обеспечивается проницаемостью ступеней и наличием на поверхности вакансионных островков, сформированных за счёт неполной коалесценции 2D островков нижележащих слоёв. На ~ 0.01 эВ бóльшая величина E_{ES}^+ , по сравнению с E_{ES}^- , а также возрастающая проницаемость ступеней приводят при $T > 720^\circ\text{C}$ к преобладанию восходящего потока над нисходящим и формированию отдельных холмов. На примере эпитаксиальной системы Si/Si(111)-(1 $\times$ 1), в которой рост при постоянных T и R происходит по двумерно-островковому механизму с сохранением планарной морфологии поверхности, продемонстрировано, что изменение T и R может быть использовано для контролируемого создания многослойных морфологических структур за счёт постепенного уменьшения критического диаметра террасы λ_d для 2D зарождения.

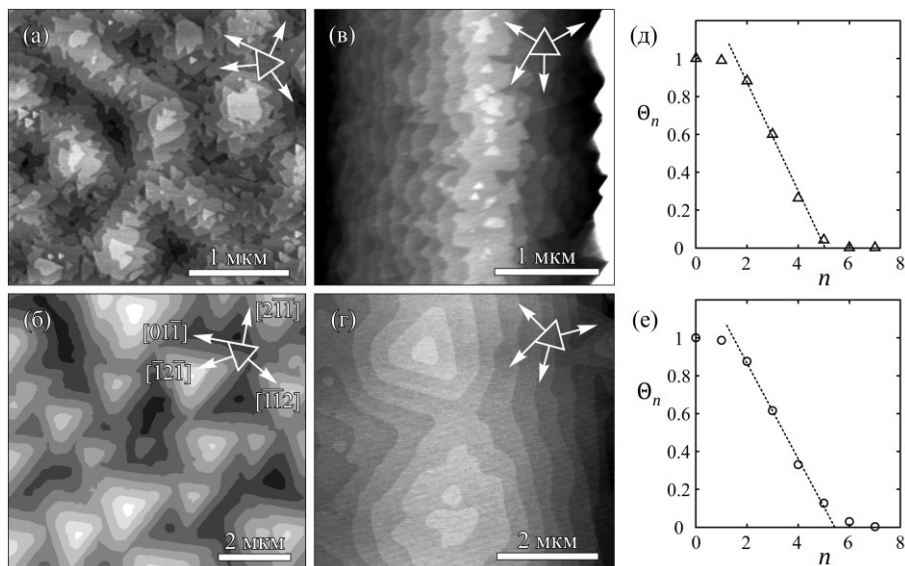


Рисунок 5. АСМ изображения (а,в) пирамидальных волн и (б,г) отдельных холмов, сформированных (а,б) в отсутствие ступеней на террасах диаметром ~ 100 мкм и (в,г) на террасах эшелонированной поверхности Si(111)-(7 $\times$ 7) при T : (а) 600°C , (б) 750°C , (в) 650°C , (г) 750°C . (д,е) Распределения заполненности слоёв $\theta_n(n)$ для (а) и (б), соответственно.

В пятой главе приводятся результаты кинетического Монте-Карло (кМК) моделирования² гомоэпитаксиального роста в отсутствие сверхструктуры на поверхности (111) кристалла с решёткой типа алмаза. Результаты данной главы опубликованы в работах [А3]. В рамках упрощённой одномерной теоретической модели ступенчато-слоевого роста на вицинальной поверхности кристалла анализируется понятие кинетической длины $d = b \exp(\epsilon_{ES}/kT)$ и её связь с режимом кинетики эпитаксиального роста, где $b=0.384$ нм — параметр решётки поверхности (111), ϵ_{ES} — барьер Швёбеля для встраивания в ступень, и k — постоянная Больцмана. Продemonстрировано, каким образом соотношение величины d и расстояния между атомными ступенями L контролирует вид распределения адатомов на террасе между ступенями, режим кинетики роста (AL либо DL) и масштабирование зависимостей $N_{2D}(R, T)$ и λ . Приводится вывод критериев реализации AL и DL кинетики: $d \gg L$ и $d \ll L$, соответственно.

Необходимость кМК моделирования гомоэпитаксиального роста связана с выяснением роли T , R , барьеров Швёбеля и стока адатомов в ступени при формировании пирамидальных волн и 2D зарождении на их террасах. Для изучения основных закономерностей 2D зарождения использована кМК модель с энергией активации диффузии адатомов $\epsilon_d=1.3$ эВ, барьером Швёбеля $\epsilon_{ES}=0.1$ эВ и возможностью диссоциации зародышей 2D островков. КМК моделирование МЛЭ проводилось на исходной подложке, представляющей собой атомно-гладкую сингулярную поверхность (111) с периодическими граничными условиями. В результате диффузии и взаимодействия адатомов происходило зарождение и рост 2D островков, концентрация которых N_{2D} измерялась в зависимости от модельной скорости осаждения R при нескольких значениях температуры T (рис.6а). Обнаружено, что показатель масштабирования χ степенных аппроксимаций $L_s^{-1} \equiv N_{2D}^{-1} \propto R^{-\chi}$ возрастает при повышении T , что свидетельствует об увеличении размера критического зародыша от $i \approx 1$ до $i \geq 2$. Кроме того показано, что при повышении R кинетический DL $\Rightarrow$ AL переход происходит в точности при L_s , совпадающих с кинетической длиной d .

Для определения основных закономерностей и необходимых условий формирования пирамидальных волн на эшелонированной поверхности проводилось кМК моделирование роста с нулевыми барьерами Швёбеля ϵ_{ES} и $\epsilon_{ES}=0.1$ эВ. Анализ эволюции морфологии поверхности показал, что если расстояние между эшелонами ступеней существенно превышает λ , то сток адатомов в эшелоны приводит к формированию вблизи них зон обеднения по

² Кинетическое Монте-Карло моделирование проводилось под руководством Натальи Львовны Шварц с использованием программного пакета SilSim3D, разработанного в ИФП СО РАН.

2D островкам. Длительный рост в условиях такого непрерывного стока адатомов сопровождается уменьшением ширины террасы с 2D зарождением и приводит к постепенному увеличению количества 2D слоёв между эшелонами и формированию пирамидальной волны. На основе этого делается вывод, что длительное 2D зарождение и рост на широких террасах, ограниченных эшелонами, в условиях значительной проницаемости ступеней неизбежно приводит к формированию пирамидальных волн независимо от величины ϵ_{ES} , причём основные закономерности этого процесса при кМК моделировании хорошо согласуются с ростом Si на реальной поверхности Si(111)-(7×7).

кМК моделирование роста с $\epsilon_d=1.3$ эВ, $\epsilon_{ES}=0.1$ эВ, проницаемостью ступеней и возможностью диссоциации зародышей 2D островков на эшелонированной кМК подложке с пирамидальной волной позволяет получить зависимости $\lambda^2(R)$ (рис.6б). Степенные аппроксимации $\lambda^2 \propto R^{-\chi}$ характеризуются большими значениями χ , чем $L_s^2(R)$, полученные для 2D зарождения на сингулярной кМК поверхности в первом слое (в отсутствие стоков), что соответствует увеличению i с 1–2 атомов в первом слое до 3–7 атомов на террасах критической ширины (в зависимости от модельных T и R). Такое увеличение размера критического зародыша обусловлено непрерывным стоком адатомов в ступени, ограничивающие узкую террасу, что на качественном уровне согласуется с результатами *in situ* экспериментов по изучению Si/Si(111)-(7×7) роста при $T \sim 700^\circ\text{C}$ и подтверждает выводы данной диссертационной работы.

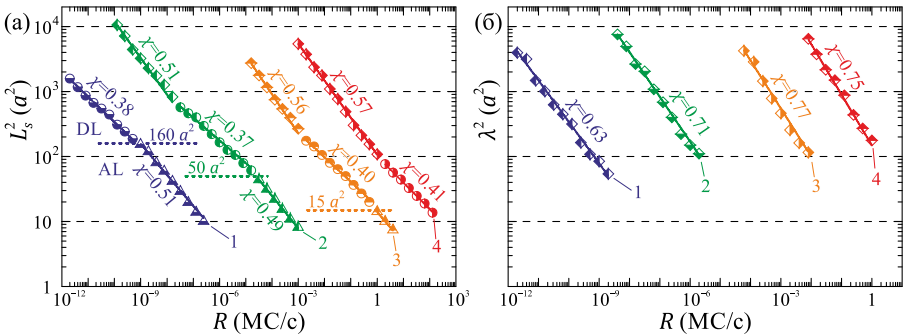


Рисунок 6. Зависимости (а) $L_s^2(R)$ и (б) $\lambda^2(R)$, полученные в результате кМК моделирования при T : 1 — 400 К, 2 — 500 К, 3 — 675 К, 4 — 850 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Показано, что зависимость концентрации округлых 2D островков $N_{2D} \propto R^x \exp(E_{2D}/kT)$ на сингулярных террасах Si(111) диаметром ~ 100 мкм в интервале $T=850\text{--}1090^\circ\text{C}$ характеризуется эффективной энергией активации $E_{2D} \approx 1.02$ эВ и показателем масштабирования $\chi \approx 0.82$. Из анализа зависимостей $N_{2D}(R, T)$ в рамках теории скоростей зародышеобразования [4] следует, что в отсутствие сверхструктуры 2D зарождение контролируется диффузией адатомов с энергией активации $\epsilon_d \approx 1.13$ эВ, а размер критического зародыша составляет $i \gg 9$, что свидетельствует о нестационарности 2D зарождения при $T > 830^\circ\text{C}$.
2. Экспериментально методом *in situ* CBV ОЭМ и на основе расчётов методом кинетического Монте-Карло моделирования роста показано, что в процессе длительного 2D зарождения и роста на широких террасах эшелонированной поверхности, размеры которых существенно превышают критическую ширину λ для 2D зарождения, непрерывный сток адатомов через проницаемые ступени в эшелоны ступеней приводит к постепенному уменьшению ширины области 2D зарождения и формированию пирамидальных волн. После уменьшения ширины террасы с 2D зарождением до λ , эволюция пирамидальных волн становится периодической и повторяется после осаждения каждого целого монослоя.
3. Показано, что конкуренция между процессами 2D зарождения и непрерывным стоком в проницаемые ступени при росте пирамидальных волн на эшелонированной поверхности Si(111)-(7×7) в интервале $T=600\text{--}770^\circ\text{C}$ приводит к увеличению размера критического зародыша 2D островка от $i=1$ в первом слое (в отсутствие стоков в ступени) до $i=2\text{--}10$ на террасах критической ширины (в условиях стока в нижележащие ступени) с ростом температуры подложки и количества ступеней в пирамидальной волне.
4. На основе периодического 2D зарождения на наивысшей террасе пирамидальной волны разработан новый подход к экспериментальному измерению зависимостей критической ширины $\lambda(R, T)$. Обнаружено, что зависимость $\lambda^2(T)$ характеризуется изменением эффективной энергии активации 2D зарождения от $E_{2D} \approx 2.4$ эВ до $E_{2D} \approx 0.5$ эВ при достижении $T \approx 720^\circ\text{C}$, что соответствует кинетическому $AL \rightleftharpoons DL$ переходу. Из анализа $\lambda^2(T)$ в рамках современного теоретического подхода [7] к описанию этого перехода определена величина барьера Швёбеля для встраивания в нисходящие ступени.

пени $E_{ES}^- \approx 0.9$ эВ, который связан с образованием двойных изломов на прямолинейных участках типа $[1\bar{1}2]$, обеспечивает огранку ступеней и их проницаемость.

5. Показано, что зависимость концентрации островков $N_{2D} \propto R^x \exp(E_{2D}/kT)$ при 2D зарождении в первом слое вдали от ступеней характеризуется в интервале $T=650\text{--}750^\circ\text{C}$ параметрами $E_{2D} \approx 1.8$ эВ и $x \approx 0.52\text{--}0.62$, соответствующими размеру критического зародыша $i=1$. Для анализа данной зависимости на основе классического подхода скоростей зародышеобразования предложена расширенная теоретическая модель 2D зарождения с учётом динамики не только адатомов, но и нанокластеров, из которой следует, что одиночный нанокластер является критическим зародышем 2D островка. Близость экспериментальной $E_{2D} \approx 1.8$ эВ и теоретической $E_{2D} \approx 1.9$ эВ свидетельствует о доминирующей роли нанокластеров в массопереносе на поверхности Si(111)-(7×7) при $T \gtrsim 500^\circ\text{C}$, когда они становятся подвижными.
6. Обнаружено, что длительное 2D зарождение и рост Si на сингулярных террасах (диаметром ~ 100 мкм) поверхности Si(111)-(7×7) при $T=600\text{--}770^\circ\text{C}$ аналогичны наблюдаемому на эшелонированной поверхности и, при достаточно больших R ($10^{-3}\text{--}10^{-1}$ МС/с), сопровождаются возникновением пирамидальных волн и отдельных холмов с близкими линейными распределениями заполненности слоёв, связанными с проницаемостью ступеней и небольшим различием барьеров Швёбеля E_{ES}^- и E_{ES}^+ для встраивания в ступень сверху-вниз и снизу-вверх, соответственно ($E_{ES}^+ - E_{ES}^- \sim 0.01$ эВ). Большая величина E_{ES}^+ , по сравнению с E_{ES}^- , приводит к преобладанию нисходящего потока адатомов над восходящим вплоть до $T \approx 720^\circ\text{C}$, которое обеспечивает формирование пирамидальных волн. При $T > 720^\circ\text{C}$ преобладает восходящий поток, и образуются отдельные холмы. Послойный двумерно-островковый рост наблюдается только при $T=650\text{--}750^\circ\text{C}$ и $R \lesssim 5 \cdot 10^{-2}$ МС/с.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

- [A1] Rogilo, D. I. Critical Terrace Width for Two-Dimensional Nucleation during Si Growth on Si(111)-(7×7) Surface / D. I. Rogilo, L. I. Fedina, S. S. Kosolobov, B. S. Rangelov, A. V. Latyshev // Phys. Rev. Lett. — 2013. — Vol. 111. — P. 036105.
- [A2] Рогило, Д. И. Формирование двумерных островков на поверхности Si(111) при гомоэпитаксиальном росте / Д. И. Рогило, Л. И. Федина, С. С. Косолюбов, А. В. Латышев // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. — 2014. — Т. 9, № 2. — СС. 156–166.

- [A3] Rogilo, D. I. 2D Si island nucleation on the Si(111) surface at initial and late growth stages: On the role of step permeability in pyramidlike growth / D. I. Rogilo, L. I. Fedina, S. S. Kosolobov, B. S. Rangelov, A. V. Latyshev // *J. Cryst. Growth*. — 2017. — Vol. 457. — PP. 188–195.
- [A4] Latyshev, A. V. 8 – Atomic Processes on the Silicon Surface / A. V. Latyshev, L. I. Fedina, S. S. Kosolobov, S. V. Sitnikov, D. I. Rogilo, E. E. Rodyakina, D. A. Nasimov, D. V. Sheglov, A. L. Aseev // *Advances in Semiconductor Nanostructures*. — Elsevier, 2017. — PP. 189–221.

Список цитируемой литературы

1. Burton, W. K. The growth of crystals and the equilibrium structure of their surfaces / W. K. Burton, N. Cabrera, F. C. Frank // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*. — 1951. — Vol. 243, No. 866. — PP. 299–358.
2. Latyshev, A. V. Transformations on clean Si(111) stepped surface during sublimation / A. V. Latyshev, A. L. Aseev, A. B. Krasilnikov, S. I. Stenin // *Surf. Sci.* — 1989. — Vol. 213, No. 1. — PP. 157–169.
3. Ho, M.-S. Formation of Si clusters and their role in homoepitaxial growth on Si(111)-7×7 surface / Mon-Shu Ho, Ing-Shouh Hwang, Tien T. Tsong // *Surf. Sci.* — 2004. — Vol. 564, No. 1–3. — PP. 93–107.
4. Venables, J. A. Rate equation approaches to thin film nucleation kinetics / J. A. Venables // *Philos. Mag.* — 1973. — Vol. 27, No. 3. — PP. 697–738.
5. Filimonov, S. N. Terrace-edge-kink model of atomic processes at the permeable steps / S. N. Filimonov, Yu. Yu. Hervieu // *Surf. Sci.* — 2004. — Vol. 553, No. 1–3. — PP. 133–144.
6. Omi, H. New Types of Unstable Step-Flow Growth on Si(111)-(7×7) during Molecular Beam Epitaxy: Scaling and Universality / Hiroo Omi, Yoshikazu Homma, Vesselin Tonchev, Alberto Pimpinelli // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — Vol. 95. — P. 216101.
7. Rangelov, B. Critical terrace width for step flow growth: Effect of attachment-detachment asymmetry and step permeability / Bogdan Rangelov, M. S. Altman, Ivan Markov // *Phys. Rev. B*. — 2007. — Vol. 75. — P. 245419.