

СМЫСЛОВА ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ С
ПОВЕРХНОСТЬЮ КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫРАЩИВАНИЯ СЛОЕВ
МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ЭПИТАКСИИ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Нижний Новгород –2013

Работа выполнена в Нижегородском государственном техническом университете
им. Р.Е.Алексеева

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, с.н.с, в.н.с. ИФМ
РАН
Орлов Лев Константинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, зав. лаб. электроники твердого тела
ФГБОУ ВПО ННГУ им. Н.И. Лобачевского
Шенгуров Владимир Геннадьевич

доктор химических наук,
в.н.с. Института прикладной физики РАН
Родченков Владимир Ильич

Ведущая организация: **Институт физики полупроводников
им.А.В. Ржанова
Сибирского отделения РАН**

Защита состоится 9 октября 2013г. в ____ часов на заседании диссертационного
совета Д 212.166.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И.
Лобачевского (603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп.3.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан __ сентября 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета



М.О. Марычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Эпитаксиальный рост современных кремниевых структур при пониженных температурах ориентируется сегодня в основном на метод вакуумной газофазной эпитаксии с гидридными источниками молекулярных потоков [1] (UHVCVD, GSMBE). Использование в эпитаксиальном процессе гидридов кремния с меньшей энергией диссоциации молекул, чем у хлоргидридов [2], обеспечивает возможность проведения эпитаксиального процесса при более низких температурах и скоростях роста, позволяя выращивать гетерокомпозиции, не уступающие по своим характеристикам структурам, полученным методом традиционной МВЕ с атомарными пучками кремния и германия [3]. Аналитическое описание процесса роста даже в этом традиционном методе эпитаксии сопряжено со значительными сложностями, связанными с трудностью учета в кинетических уравнениях всех ключевых процессов, протекающих на поверхности растущей пленки. В значительной степени это обусловлено тем, что поверхностная атомная диффузия происходит в условиях сложного рельефа поверхности, изменяющегося во времени, и, дополнительно, подверженного влиянию возможных реконструкционных перестроек. Все это привело к необходимости разработки довольно сложных компьютерных моделей, основанных на методах молекулярной динамики. Численные расчеты, базирующиеся на методе молекулярной динамики [4] либо использующие метод иммерсионного моделирования [5], хотя и позволяют при вычислениях проводить учет взаимодействия мигрирующего адатома с поверхностью и с соседними атомами, однако, остаются весьма непростыми и требуют значительных затрат времени на проведение вычислений. Несмотря на существующие трудности, в последние годы активно проводилась работа по построению аналитических моделей для описания распределения адатомов на поверхности роста. Активно изучались также процессы адсорбции, десорбции, диффузии адатомов, процессы захвата последних ступенями роста, зарождения и роста островковых поверхностных структур. Это позволило к настоящему времени не только найти условия устойчивого роста на вицинальных гранях [6] и оценить влияние барьера Швевеля на режим роста плоской грани [7], но и изучить особенности диффузионного транспорта вдоль потенциальной канавы у края ступени [8]. В ростовых технологических задачах, решаемых с использованием газофазных источников рабочего вещества, задача дополнительно усложняется необходимостью рассмотрения процессов захвата и пиролиза молекул, адсорбируемых ростовой поверхностью. Специфические закономерности, наблюдаемые при взаимодействии молекулярных пучков гидридов с поверхностью Si в диапазоне ростовых ($400^{\circ}\text{C} < T_{\text{gr}} < 800^{\circ}\text{C}$) температур и связанные с особенностями протекания физико-химических процессов на эпитаксиальной поверхности, остаются, однако, по

многим аспектам проблемы еще не понятными, несмотря на повышенный интерес, проявляемый к ним со стороны исследователей.

Очевидно, что успешное решение проблемы низкотемпературной гетероэпитаксии в реакторе вакуумной газофазной технологической установки предполагает проведение, непосредственно в процессе выращивания структур, прецизионного контроля концентраций продуктов пиролиза молекул рабочих газов, адсорбируемых эпитаксиальной поверхностью. Контроль концентрации адсорбируемых фрагментов молекул на поверхности роста пленки, в свою очередь, невозможен без детального понимания кинетики и энергетики физико-химических процессов, протекающих на поверхности роста. Решение этой задачи, однако, сильно осложнено многообразием и сложностью реакций, протекающих на горячей поверхности при взаимодействии с ней молекулярных пучков. С другой стороны, в данном методе роста зачастую является проблематичным и использование методов контроля чистой поверхности, разработанных ранее и прошедших успешную апробацию в методе традиционной МВЕ. Все вышесказанное делает чрезвычайно актуальным как разработку методик анализа характеристик поверхности в условиях выращивания эпитаксиальных структур из молекулярных пучков, так и детальную проработку механизмов взаимодействия пучков разнообразных молекул, используемых в эпитаксиальном процессе, с поверхностью кремния.

Целью настоящей работы являлось изучение физико-химических процессов, протекающих на поверхности слоя кремния в условиях его взаимодействия с пучками различных молекул в вакууме. Особое внимание при этом предполагалось уделять не только оценке вероятностей присутствия на эпитаксиальной поверхности растущего слоя кремния того или иного фрагмента молекулы рабочего газа, но и анализу основных кинетических коэффициентов, описывающих скорости протекания того или иного поверхностного процесса. На базе разрабатываемых кинетических моделей, с привлечением накопленных в литературе данных технологических экспериментов, предполагалось: определить характерный диапазон скоростей распада различных радикалов гидрида на ростовой поверхности, связать данный параметр с другими кинетическими коэффициентами, установить взаимосвязь наблюдаемых закономерностей с особенностями захвата поверхностью атомов водорода. В связи с явными различиями адсорбционных процессов, проявляющихся при взаимодействии с поверхностью кремния молекулярных пучков моно- и дисилана, фундаментальный интерес представляет изучение особенностей температурного поведения скоростей пиролиза рассматриваемых молекул. В связи с этим одной из целей данной работы являлось выявление возможности использования для расчетов поверхностных концентраций температурных зависимостей кинетических коэффициентов активационного типа. В свете решаемых технологических задач по

низкотемпературной гетероэпитаксии углеродсодержащих слоев кремния, наряду с изучением поверхностных процессов пиролиза молекул газов, определенное внимание нами было обращено также на детали формирования структуры пленок карбида кремния и обуславливающих их особенности протекания в карбидном слое диффузионных процессов.

В связи с заявленными общими целями **основное внимание в диссертационной работе было уделено:**

- проведению сопоставительного анализа наиболее обсуждаемых физико-химических моделей, используемых для описания процессов, протекающих на поверхности Si при выращивании слоев в вакууме с использованием гидридных источников;
- поиску аналитических решений общей кинетической задачи с целью установления явной связи скорости пиролиза молекул гидрида с другими кинетическими коэффициентами и параметрами системы, определяемыми из эксперимента;
- определению характера температурной зависимости скорости распада фрагментов молекул гидрида и скорости десорбции водорода с поверхности кремния, с целью определения либо уточнения значений энергий активации физико-химических процессов, сопровождающих процесс пиролиза молекул гидридов в реакторе установки;
- изучение, по характеру наблюдаемых температурных зависимостей, возможных различий в поведении молекул гидрида и дигидрида кремния в условиях их распада в диапазоне ростовых температур;
- прогнозированию возможностей повышения скорости роста пленок Si в условиях низкотемпературной эпитаксии за счет увеличения скорости не термоактивированного процесса распада молекул гидрида и дигидрида кремния, либо скорости десорбции водорода с поверхности слоя Si;
- анализу механизмов роста карбидных слоев кремния, получаемых на поверхности кремния методом химической конверсии с использованием только одного источника углеводородов.

Научная новизна

В рамках проводимой работы были решены следующие задачи и получены следующие новые результаты:

- разработаны кинетические ростовые модели, описывающие процесс роста слоя кремния с использованием моно- и дисилана и явно учитывающие конечную скорость распада фрагментов рабочих молекул на ростовой поверхности;

- получены аналитические зависимости, связывающие скорость пиролиза молекул гидрида со скоростью роста слоя, позволяющие учесть влияние на поверхностные

процессы специфики захвата поверхностью атомов водорода и особенностей его десорбции;

- для основных моделей пиролиза определен характерный диапазон скоростей распада молекул силана и дисилана в интервале ростовых температур;

- в диапазоне ростовых температур обнаружена неидентичность температурного поведения десорбции водорода с поверхности Si в условиях роста пленок из моно- и дисилана, указывающая на проявление механизма десорбции водорода преимущественно в атомарной либо молекулярной форме, соответственно;

- В рассматриваемом диапазоне температур характер температурной зависимости скорости распада молекул гидрида и дигидрида кремния не описывается простой кривой активационного вида, вследствие влияния на процессы пиролиза адсорбируемых молекул поверхностного водорода;

- продемонстрирована эффективность использования вакуумного газофазного метода для выращивания на Si при пониженных ростовых температурах высокоморфологичных наноструктурированных слоев карбида кремния. Построена теория карбидизации поверхностного слоя кремния в условиях его взаимодействия с потоком углеводородов в ростовой камере.

Научная и практическая значимость работы

Данная работа повышает уровень нашего понимания физико-химических процессов, протекающих на поверхности растущего слоя кремния. Проведенные расчеты позволили оценить характерные времена распада молекул силана и дисилана на ростовой поверхности и связать трудно определяемые кинетические константы, необходимые для расчета поверхностных концентраций продуктов распада молекул, с измеряемыми в технологическом эксперименте характеристиками системы. Разработанные методики могут быть использованы при построении схем контроля поверхностных реакций в эпитаксиальном гидридном процессе.

Метод получения низкотемпературных слоев карбида кремния может быть использован для создания поверхностных наноструктурированных гетерокомпозиций на основе кремния и его кубической карбидной фазы.

Основные положения, выносимые на защиту

Десорбция водорода с ростовой поверхности кремния в молекулярной форме с энергией активации $E_a \approx 1,9$ эВ более вероятна при росте слоев кремния с использованием дисилана и в атомарной форме с энергией активации $E_a \approx 1,8$ эВ в условиях пиролиза моносилана.

Скорости распада молекул моно- и дисилана на поверхности роста определяются особенностями взаимодействия молекулярного пучка с поверхностью Si и описываются соотношениями, содержащими две активационные зависимости с разными энергиями

активации в области низких и высоких температур роста и с предъэкспоненциальными множителями, зависящими от степени покрытия поверхности водородом.

Повышение скорости пиролиза адсорбируемых молекул либо скорости десорбции водорода с поверхности позволяет без дополнительного нагрева подложки увеличить скорость роста слоя Si в условиях низкотемпературной эпитаксии (450-550)°С, но не более чем в 2-3 раза, в первом случае, и до двух порядков величины – во втором случае.

Образования пустот под формируемым карбидным слоем в матрице кремния и возможность формирования развитой морфологии поверхности (островковый рост пленки) даже в условиях использования в реакторе только одного потока углеводорода являются следствием проявления особенностей механизма карбидизации поверхности кремния, связанных с наличием встречных, от подложки к поверхности структуры, диффузионных потоков атомов кремния.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации представлены 10 статьями в реферируемых журналах, 2 статьями в трудах международных конференций, а также 18 тезисами на 4 Международных и 14 Российских конференциях и симпозиумах, в том числе на 5th межд. конф. «Физика низкоразмерных структур и приборов» (Cancun – Mayan Riviera, Мексика, 2004), межд. Конф. “Микро- и нанoeлектроника, (Звенигород, 2005), на 8th межд. конф по структуре поверхностей (ICSOS’8, Munich, Germany, 2005), на 11 Межд. симпозиуме "Упорядочение в минералах и сплавах", (Ростов-на Дону – Лоо 2008), на XX симпозиуме "Современная химическая физика", (МГУ – Буревестник, Туапсе, ИПХФ РАН, 2008), на межд конф «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии». Кисловодск, 2008), на 9-ом международном семинаре EХМАТЕС 2008 (Lodz, Польша, 2008), на 9-ой и 10-ой молодежной школе - семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2009, 2010), на I и II межд. конф. «Современные проблемы физики поверхности и наноструктур» (Ярославль, 2010,2012), на XI и XIV национальных конференциях по росту кристаллов (Москва, ИК РАН, 2004, 2010), на Межд. конференциях “Кремний-2008” (Черноголовка), “Кремний-2009” (Новосибирск, 2009), “Кремний-2010” (Нижний Новгород), “Кремний-2011” (Москва), на XXVII и XXX Научных чтениях, посвященных памяти акад. Н.В.Белова в Нижегородском госуниверситете им. Н.И.Лобачевского, на IV и V Всеросс. Конф. «Химия поверхности и наноструктуры» (Санкт-Петербург – Хилово, 2009, 2012), а также на семинарах Института физики микроструктур РАН, Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского и Нижегородского технического университета им. Р.Е.Алексеева.

Публикации

Основные результаты диссертации представлены 10 статьями в реферируемых

журналах, 2 статьями в трудах международных конференций, а также 18 тезисами на 4 Международных и 16 Российских конференциях и симпозиумах.

Личный вклад автора диссертации

Основные оценки и расчетные работы, представленные в диссертации при анализе процессов в ростовых установках с источниками гидридов кремния, включая вывод основных закономерностей и написание вычислительных программ, получены непосредственно автором диссертации под руководством руководителя. Автор также принимал участие в работах, проводимых на вакуумной технологической установке, использующей гидриды и углеводороды в качестве рабочих газов. Работа выполнялась в рамках проектов МНТЦ 2003-2005 г.г. пр.2373, РФФИ гр. 08-02-00065, 08-02-97017 р - «поволжье», федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, шифры заявок «2011-1.3.2-200-023-030» и «2012-1.2.1-12-000-2013-095».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 172 страницы машинописного текста, содержит 63 рисунка и 9 таблиц. Список литературы включает 175 наименований источников.

Первая глава диссертации носит обзорный вступительный характер. В ней рассмотрены основные этапы развития вакуумного гидридного метода для эпитаксиального наращивания кремниевых слоев. Первый параграф настоящего раздела диссертации посвящен анализу основных достоинств и явных преимуществ данного метода эпитаксии по сравнению с существующими методами эпитаксии кремния. К основным достоинствам гидридного метода эпитаксии можно отнести высокую технологичность процессов, относительную дешевизну и высокую производительность используемого оборудования, возможность использования широкого спектра высокочистых материалов, включающих наряду с гидридами углеводороды и элементоорганические соединения, выпускаемые промышленностью.

В качестве основного недостатка гидридного метода следует отметить высокую эффективность покрытия поверхности Si водородом в диапазоне температур ниже 500°C, приводящего к некоторым ограничениям возможностей низкотемпературной эпитаксии слоев, вследствие значительного снижения их скорости роста [9]. Определенные проблемы существуют и в ясности понимания процессов захвата и распада молекул на ростовой поверхности, обусловленного отсутствием простых доступных методов диагностики фрагментов распадающихся молекул на поверхности роста пленок [10].

Во втором параграфе первой главы обсуждаются основные физико-химические процессы, протекающие на ростовой поверхности, которые необходимо учитывать при проведении анализа закономерностей, наблюдаемых при взаимодействии

молекулярного пучка с чистой эпитаксиальной поверхностью кремния. В отличие от традиционной МВЕ [16], в которой используются атомарные потоки вещества и рост слоя Si зависит только от особенностей поверхностной диффузии адатомов и их встраивания в растущий кристалл, в системе с молекулярными пучками принципиально необходим учет процессов адсорбции и десорбции молекул, особенностей их распада на ростовой поверхности в условиях значительного заполнения поверхностных связей продуктами распада и, в частности, водородом [17].

Проводимый в диссертации кинетический анализ невозможен без привлечения конкретных моделей распада молекул, учитывающих скорость протекания различных поверхностных процессов, а также характер захвата и удаления с поверхности адсорбируемого водорода. Поэтому в данном разделе значительное внимание уделено основным моделям пиролиза моносилана и дисилана, рассматриваемым в литературе. Высказываемые в пользу той или иной модели пиролиза аргументы, относительно захвата поверхностью радикалов гидрида определенного типа, обычно основываются на данных различных экспериментов. Наиболее распространенными среди них являются эксперименты, использующие метод термо-программируемой десорбции (TPD) и метод инфракрасной спектроскопии. Отдельные зависимости, полученные данными методами, и наглядно указывающие на необходимость учета в моделях радикалов вполне определенного типа, представлены в последнем разделе настоящего параграфа.

Более детально механизмы молекулярной адсорбции молекул гидридов изложены в последнем третьем параграфе первой главы. Здесь не только обсуждаются основные особенности захвата поверхностью кремния молекул силана и дисилана, но и изложены основные проблемы, возникающие при численном моделировании поверхностного сорбционного потенциала. Основные проблемы связаны с наблюдаемыми значительными различиями в величинах коэффициентов захвата молекул моно- и дисилана поверхностью кремния и характере их температурного поведения. В связи с этим в данном разделе диссертации проведено детальное сопоставление основных моделей распада молекул силана и дисилана и рассчитываемых на их основе энергетических характеристик поверхностного потенциала, отражающих различия в наблюдаемой адсорбционной способности поверхности кремния по отношению к рассматриваемым молекулам.

Во второй главе диссертации представлена к обсуждению общая физико-химическая модель поверхностных процессов и соответствующая ей математическая модель, позволяющая рассчитывать и изучать особенности пиролиза молекул силана и дисилана на эпитаксиальной поверхности кремния. При выводе кинетических уравнений были использованы физико – химические модели, отличающиеся различными схемами распада молекул и характером захвата радикалов молекулы и атомов водорода поверхностью [13,14]. Развиваемые кинетические модели процессов

роста в общем случае базируются на общепринятых представлениях и включают в себя различные стадии ростового процесса в условиях молекулярного течения газов: адсорбцию молекул ростовой поверхностью, их пиролиз и процессы десорбции, процессы кристаллизации. Введение временных производных в исходную систему уравнений позволяет рассматривать нестационарную кинетику роста и исследовать динамику протекания физико-химических процессов на ростовой поверхности [14,15].

В диссертационной работе обсуждаются только стационарные модели пиролиза гидридов с привлечением данных технологических экспериментов. Использование при расчетах реальных технологических зависимостей позволяет оценить порядок величины наиболее важных кинетических коэффициентов, входящих в уравнения баланса, таких как частоты распада радикалов молекул, адсорбируемых поверхностью, энергии активации процессов пиролиза и десорбции, коэффициенты кристаллизации. В соответствии с этим одной из целей проводимого в настоящей главе диссертации анализа являлось показать, насколько сильно выбор физико-химической модели ростового процесса, протекающего в реакторе вакуумной газофазной установки, влияет на вид зависимостей, связывающих поверхностные концентрации продуктов пиролиза молекул рабочих газов с характеристиками ростового процесса [А3, А8].

В первом параграфе второй главы диссертации обсуждаются форма записи кинетических уравнений и сделанные при их написании приближения. Даны общие определения вводимых обозначений. Кинетические уравнения записаны для молекулярных потоков моно- и дисилана, взаимодействующих с поверхностью кремния. Полученные уравнения позволяют анализировать различные схемы распада молекул и разный характер захвата поверхностью продуктов их распада. Решение системы кинетических уравнений базируется на знании кинетических коэффициентов, ответственные за скорость протекания того или иного поверхностного процесса. Для уточнения наиболее важных констант, в число основных рабочих уравнений были включены также выражения, определяющие температурные зависимости скорости роста и закономерности покрытия поверхности кремния водородом в различных температурных режимах. Указанные зависимости могут быть получены непосредственно в ходе проводимых технологических экспериментов [9].

Во втором параграфе на примере взаимодействия с поверхностью кремния пучка молекул моносилана для стационарного случая рассмотрен общий характер решений рассматриваемых уравнений. Прежде всего, нами проанализирована простейшая схема физико-химических реакций, соответствующая полному распаду молекулы моносилана на атомы непосредственно у поверхности в момент хемосорбции. Данная схема в литературе является основной при анализе температурной зависимости скорости роста слоя Si [13]. Однако данная схема, отбрасывающая из рассмотрения возможность захвата поверхностью более сложных фрагментов молекулы силана, не только не

описывает с достаточной точностью наблюдаемые закономерности, но и противоречит, результатам многочисленных экспериментов по определению состава газов, адсорбируемых поверхностью кремния. Поэтому проведен предварительный анализ кинетических уравнений численными методами с целью демонстрации возможности нахождения характерных зависимостей поверхностных концентраций продуктов распада моносилана от скорости распада молекул. При вычислениях предполагался активационный характер температурной зависимости частоты распада молекул на поверхности роста в допустимом интервале ростовых температур. Выбор схемы пиролиза слабо влиял на качественный вид получаемых кривых. Однако, количественные характеристики зависели не только от выбора типа радикала, доминирующего на поверхности, но и от того, на какой стадии и в каком количестве водород адсорбировался поверхностью кремния.

Основным физико-химическим процессом, определяющим скорость роста пленок кремния в диапазоне пониженных ростовых (450-550°C) температур, является процесс десорбции водорода. Присутствие водорода на поверхности роста во многом определяет и характер протекания других поверхностных реакций и процессов, что сказывается на поведении изучаемых в этом интервале температурных зависимостей. При этом может наблюдаться смена механизмов, отвечающих за те или иные явления, наблюдаемые на чистой поверхности кремния (в области повышенных температур), либо на поверхности кремния, заполненной водородом [13,16] (в условиях пониженных температур). Водород в данном случае может выступать в качестве сурфактанта, обуславливая изменение активационной энергии того или иного процесса, а возможно и принципиально меняя механизмы захвата и десорбции продуктов распада молекул с поверхности пленки.

В соответствие с этим были изучены температурные зависимости коэффициента десорбции водорода с ростовой поверхности кремния с целью определения соответствующих энергий активации и величин предэкспоненциальных множителей [A5]. Проведенные с использованием различных моделей пиролиза моно- и дисилана расчеты (рис.1) позволили не только продемонстрировать принципиальную возможность использования для описания десорбционного процесса активационной модели, но и показали, что наблюдаемый вид кривых зависит от того, в какой форме (атомарной или молекулярной) происходит десорбция водорода с поверхности роста. Оценка энергии активации для соответствующего десорбционного процесса и сопоставление полученных величин с результатами, полученными различными авторами другими способами, показала большую вероятность десорбции водорода с поверхности в молекулярной форме для дисилана, и в атомарной форме - для моносилана. Анализ полученных зависимостей показал, что величина коэффициента десорбции водорода в реальном технологическом эксперименте не зависит от того, на

какой стадии процесса пиролиза происходит переход атомов водорода от молекулы гидрида на поверхностные состояния. Энергия активации данного процесса, однако, сильно зависит от того в какой форме (атомарной или молекулярной) осуществляется процесс десорбции водорода с поверхности роста.

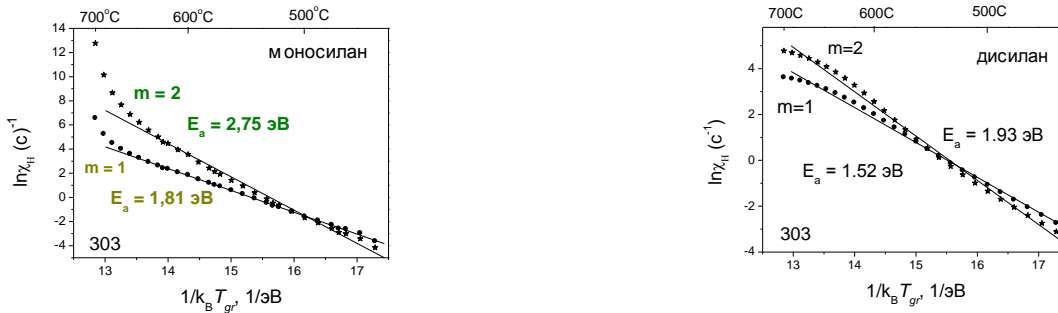


Рисунок 1. Зависимости константы десорбции водорода $\chi_H = 1/(l_0 m!)(k+n)V_{gr}/\theta_H^m$ от температуры (символы) при давлении гидрида ($P_{SiH_4}, P_{Si_2H_6} \approx 0.3 \text{ МТорр}$) в рамках модели $(jkn)=(303)$ с $m = 1$ и 2 (сплошные линии - линейные аппроксимации).

Была предпринята попытка исключить в уравнениях поверхностные концентрации и связать скорость распада молекулы гидрида на поверхности роста с другими кинетическими коэффициентами $[A_{20}, A_{25}]$ и значениями технологических и ростовых параметров, определяемых на сегодняшний день из эксперимента. Показано, что для однокомпонентных газовых смесей такая связь существует и для нее удастся найти соответствующие аналитические выражения. В данном параграфе такие выражения впервые были получены как для распада молекул моносилана ($l=1$), так и для дисилана ($l=2$). Данные выражения не только в явном виде демонстрируют связь скорости пиролиза молекул гидрида $Si_l H_{2l+2}$ со скоростью встраивания атомов Si в решетку растущего слоя, но и легко позволяют провести анализ изучаемой зависимости от типа радикала, адсорбируемого поверхностью, характера его распада и особенностей захвата поверхностью атомов водорода. На основе полученных соотношений было показано, что для всех рассмотренных моделей низким значениям частоты распада молекул соответствуют высокие значения коэффициента встраивания (адсорбционной способности) и, наоборот, высоким значениям скорости пиролиза молекул соответствуют низкие значения коэффициента встраивания атомов кремния в решетку кристалла. Однозначная связь скорости распада молекул гидрида v_{SiH_j} с коэффициентом встраивания Γ_{Si}
$$v_{SiH_j} = \{j(1+1/j)^{n+1}/l(n+1)!\} \alpha / \{(\gamma - \alpha/r_{Si}) [\gamma + (1+1/j)\beta^{1/(k+1)} - \alpha/r_{Si}]^n \}$$
 позволяет легко найти соответствующие зависимости основных поверхностных концентраций продуктов распада молекулы рабочего вещества от величины соответствующих кинетических коэффициентов.

Полученные в главе 2 формулы в совокупности с имеющимися в литературе экспериментальными данными позволяют провести детальный анализ температурных

зависимостей кинетических констант, ответственных за скорости протекания процессов распада молекул на поверхности кремния. В литературе имеется, однако, весьма незначительное число работ, где бы одновременно определялись скорость роста V_{gr} слоя Si и степень покрытия поверхности водородом θ_H [9,18,19]. В рамках проводимого кинетического анализа данная информация может быть использована для однозначного определения скорости распада молекул рабочего газа на ростовой поверхности и вида температурных зависимостей соответствующих кинетических коэффициентов.

Выполненные в третьей главе диссертации расчеты для различных моделей распада моно- и дисилана однозначно показали, что температурное поведение скорости распада молекул в диапазоне ростовых температур не описывается простыми активационными зависимостями. Вид кривых для процесса пиролиза молекул заметно отличается от характера температурной зависимости для скорости десорбции водорода, подчиняющейся закону Аррениуса. Детальный анализ температурной зависимости частоты пиролиза молекул гидридов, проведенный в первом параграфе демонстрирует более сложный вид кривых, связанный с разным характером и разными механизмами взаимодействия молекулярного пучка с поверхностью кремния в различных интервалах температур, отвечающих высокому и низкому уровню заполнения поверхностных связей атомами водорода. Сопоставление температурных зависимостей для моносилана и дисилана, показало, что поведение кривых для обоих типов молекул, может быть качественно описано суммой двух активационных зависимостей, имеющих разные энергии активации и предэкспоненциальные множители, зависящие от степени покрытия поверхности водородом. Разные значения энергий активации в диапазоне низких и высоких температур указывают на разные механизмы взаимодействия молекул с поверхностью кремния [A25]. В области низких температур доминирует механизм распада молекул, в котором участие атомов поверхностного водорода является определяющим.

Детальные расчеты температурной зависимости скоростей распада молекул моносилана и дисилана выполнены во втором параграфе третьей главы диссертации. Анализ, проведенный для моносилана, показал, что характер ожидаемого температурного поведения соответствующего кинетического коэффициента слабо зависит от характера связи молекулы с поверхностью (через одиночную, либо двойную связь). Соответствующие зависимости, полученные для пиролиза дисилана в условиях низкой плотности падающего пучка молекул, практически идентичны зависимостям, получаемым при пиролизе моносилана. Однако они могут сильно отличаться для высоких плотностей потока молекул Si_2H_6 вследствие более сильной адсорбционной способности последнего (рис.2). В этом случае неактивационный характер температурной зависимости оказывается максимально выраженным (рис.2b), показывая

возможность появления на кривых двух участков с разными значениями энергии активации [A28].

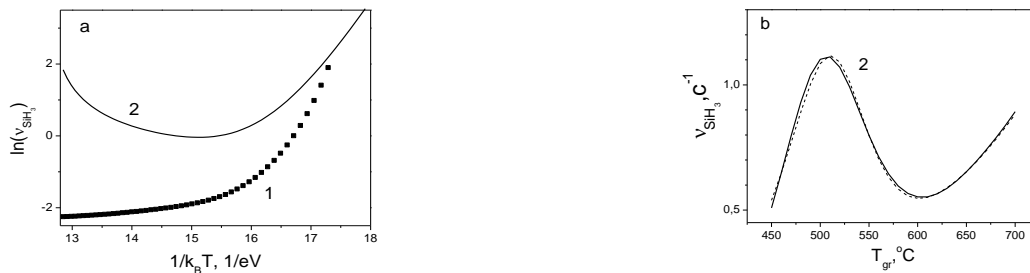


Рисунок 2. Температурные зависимости частоты пиролиза молекул моносилана (кр.1, а - символ) и дисилана (кр.2, а,b - линии) на ростовой поверхности кремния, полученные для моделей (313) - моносилан, (303) - дисилан с разным характером покрытия поверхности Si водородом. Штриховые линии на рис.2b - температурные зависимости частоты распада дисилана, полученные по формуле $v_{SiHj} = v_{01} \times \exp(-E_{a1}/k_B T) + v_{02}(\theta_H) \times \exp(-E_{a2}/k_B T)$.

В этом же параграфе детально прослеживается зависимость вида наблюдаемого температурного поведения частоты пиролиза от количества атомов водорода, участвующих в адсорбционном процессе и характера их перехода с молекулы на поверхность. Впервые было продемонстрировано, что вид рассматриваемых кривых в значительной степени определяется схемой распада молекулы, то есть зависит от того, на какой стадии распада (предхемосорбционной или поверхностной) находится молекула гидрида в момент распада.

В третьем параграфе изучена возможность повышения эффективности низкотемпературного ростового процесса за счет повышения эффективности распада молекул на поверхности роста, либо за счет повышения эффективности десорбции поверхностного водорода. Расчет проведен как для моносилана, так и дисилана. В обоих случаях показано, что скорость роста слоя кремния в принципе может быть увеличена в несколько раз без изменения температуры подложки, но повышение эффективности десорбции водорода с поверхности приводит к более заметному эффекту, чем при увеличении скорости поверхностного распада молекул (рис.3).

Четвертая глава диссертации посвящена вопросам взаимодействия поверхности кремния с пучком молекул углеводородов в установке с молекулярными источниками. Цель проводимого исследования заключалась в демонстрации достоинств вакуумного газофазного метода эпитаксии при выращивании неспецифических для традиционной МВЕ слоев. С другой стороны, нами были предприняты попытки показать возможность и перспективность совмещения данного ростового оборудования с высокочастотной спектроскопической аппаратурой для диагностики в реакторе установки состава молекулярных потоков [19, A1].



Рисунок 3. Зависимость скорости роста пленки Si от частоты распада молекул моно- (a) и дисилана (b) при $P_{gas} = 0.3 \text{ мТор}$, $T_{gr} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, $S_{Si_2H_6} = 0.56$, $S_{SiH_3} = 0.005$ для разных моделей пиролиза, определяемых совокупностью индексов (jkn) и разных значений θ_H : a) $\theta_H = 0.839$; b) $\theta_H = 0.721$ (1), 0.1 (2) в модели (212).

Неординарность совмещения ростового и диагностического оборудования явилась причиной краткого описания в первом параграфе 4-ой главы диссертации, использованного в диссертационной работе технологического и измерительного оборудования. На примере анализа концентрации атомов кислорода в напускаемой в реактор газовой смеси показана принципиальная возможность совмещения ростовой вакуумной технологической установки со спектрометрами, работающими в субмиллиметровой области спектрального диапазона длин волн [19, A9]. Показано, что наряду с явными достоинствами, выражающимися в принципиальной возможности диагностики молекулярных спектров молекул и их фрагментов как в объеме реактора, так и на адсорбирующей поверхности растущего слоя, существует и множество разнообразных проблем. Основные проблемы, связаны с потерями мощности излучения в волноводном тракте и с необходимостью детектирования весьма слабого полезного сигнала на чрезвычайно высоких резонансных частотах возбуждаемых молекул. Для применяемых при выращивании слоев газов наиболее важные частоты, соответствующие переходам в спектре молекул гидридов, чаще всего лежат в диапазоне субмиллиметровых длин волн (около 1 терагерца), что требует привлечения слабо отработанных на сегодняшний день методов измерения, базирующихся, кроме того, на весьма дорогостоящем специальном оборудовании.

Поэтому во втором параграфе данной главы основные усилия были направлены на демонстрацию достоинств вакуумного газофазного метода на примере выращивания углеродсодержащих слоев кремния. Общеизвестны многочисленные проблемы, существующие на практике при выращивании этих слоев традиционными методами [20,21]. Использование вакуумного газофазного метода эпитаксии не только позволяет обойти многие технические трудности, но и реализовать условия низкотемпературной гетероэпитаксии на кремнии углеродсодержащих кремниевых и карбидных слоев. Снижение температуры роста при одновременном повышении плотности

молекулярного потока углеводорода, не только показало возможность выращивания слоев карбида кремния при температурах ниже 800°C , но и позволило получить поликристаллические текстурированные слои кубической фазы карбида кремния с нанокристаллической структурой зерен. Данная особенность полученных слоев 3C-SiC была продемонстрирована различными методами, включающими метод рентгенодифракционного анализа, электронографии, просвечивающей электронной микроскопии [22, A10, A16, A17].

Особое внимание при анализе выращенных слоев было уделено исследованию характеристик их поверхности. Анализ морфологии поверхности проводился методами зондовой, оптической интерференционной и электронной микроскопии на пленках кубической фазы карбида кремния, выращенных на подложках кремния, вырезанных по различным кристаллографическим направлениям (100), (110), (111). Использование принципиально различных методик анализа, с одной стороны, позволило детализировать характеристики ростовой поверхности, с другой – проанализировать достоинства и недостатки различных методов, используемых для изучения морфологии поверхности пленок [A16,A17]. Проведенные исследования показали принципиальную возможность получения карбидизированных пленок кремния с достаточно гладкой морфологией внешней поверхности, что, вообще говоря, нехарактерно для гетероэпитаксии слоев с существенно различающимися постоянными кристаллических решеток.

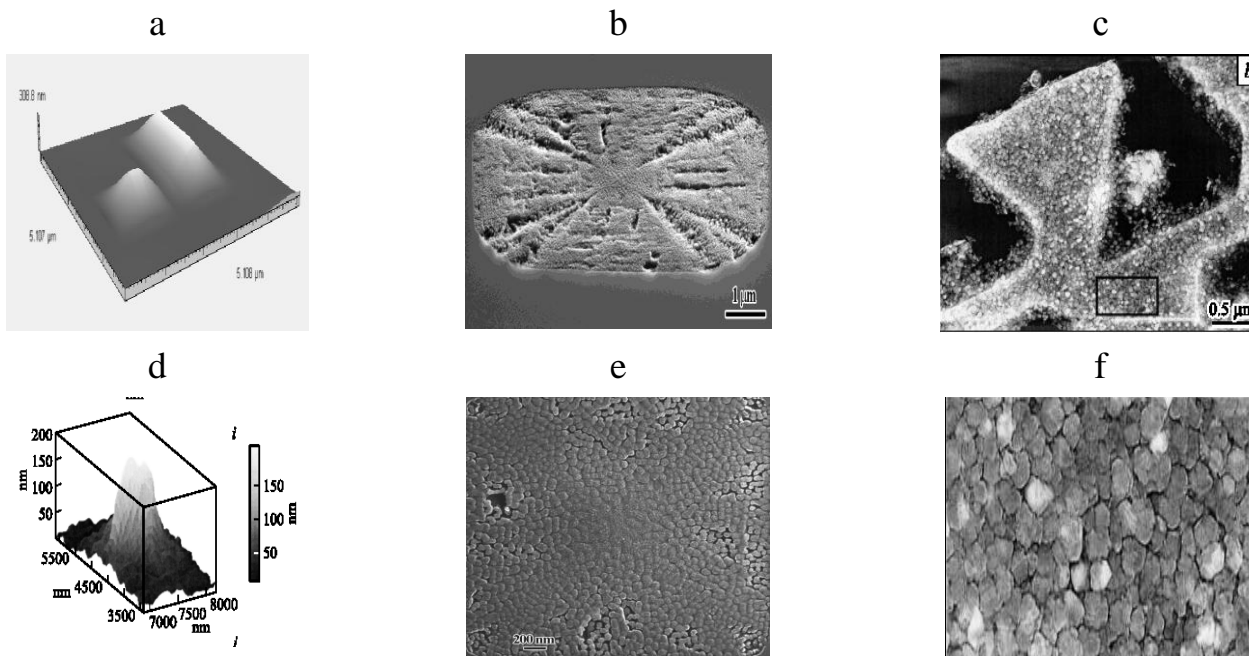


Рисунок 4. Изображения формы (a-d) и нанокристаллической структуры (e,f) 3C-SiC островков на карбидизированной поверхности Si(100) – (a,b,e) и Si(111) – (c,d,f), полученные методами оптической интерференционной (a), сканирующей зондовой (d) и сканирующей электронной (b,c,e,f) микроскопии.

В ряде случаев, однако, на гладком карбидизированном поверхностном слое кремния наблюдалось появление островковых структур (рис.4), сопровождающихся развитой морфологией поверхности, трудно объяснимой на базе традиционных моделей карбидизации.

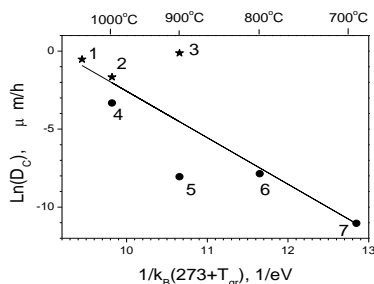


Рисунок 5. Активационная зависимость ($E_a \approx 2.7$ эВ) коэффициента диффузии атомов углерода D_C в пленке карбида кремния от температуры роста T_{gr} : кружки – результаты наших экспериментов, звездочки – данные, взятые из литературных источников.

В связи с возникшими вопросами третий параграф четвертой главы посвящен обсуждению механизмов карбидизации поверхности слоя кремния в методе химической конверсии, когда в реакторе вакуумной установки использовались только потоки молекул углеводорода (пентана либо гексана). В этом случае для описания процесса формирования карбидного слоя необходимо было учитывать, наряду с кинетикой пиролиза молекул рабочего газа на ростовой поверхности, также диффузионные процессы, направленные поперек плоскости растущего слоя [A29]. Разработка соответствующей модели роста позволила не только понять основные механизмы роста слоя и возникающие на внешней и внутренней сторонах пленки морфологические особенности, но и дала возможность провести оценку энергии активации основных диффузионных процессов, протекающих в карбидном слое (рис.5).

В заключении сформулированы наиболее значимые результаты работы.

1. Для основных физико-химических моделей пиролиза гидрида и дигидрида кремния на поверхности растущего слоя получена система кинетических уравнений, позволяющая проводить анализ поверхностных концентраций продуктов распада на поверхности кремниевой пластины в условиях эпитаксиального роста слоя с учетом скорости и особенностей распада продуктов пиролиза молекул на ростовой поверхности кремния.

2. Впервые найдена зависимость поверхностной концентрации свободных связей для различных фрагментов распада гидридной фракции и зависимость эффективности встраивания адатомов кремния в растущий слой от скорости распада радикалов молекул, адсорбируемых поверхностью. Определен нижний порог значений коэффициента встраивания адатомов кремния в решетку Si ($r_{Si} \geq 0.2$), соответствующий максимально высокой скорости распада молекул на поверхности роста ($v_{SiH_j} \gg 1$), и нижний порог частоты распада молекул ($v_{SiH_j} \geq 0.3 \text{ c}^{-1}$), соответствующий предельно высоким значениям коэффициента встраивания ($r_{Si} \gg 1$). Продемонстрирована

зависимость пороговых значений кинетических коэффициентов от выбора температуры роста слоя и модели пиролиза.

3. По данным технологических экспериментов в диапазоне ростовых (450°C - 700°C) температур определены коэффициенты десорбции атомарного и молекулярного водорода с поверхности кремния и соответствующие этим процессам энергии активации. Сопоставление соответствующих десорбционных характеристик с результатами других авторов позволили выявить отличия в характере и количественных характеристиках коэффициента десорбции водорода с поверхности кремния в условиях пиролиза моно- и дисилана. Десорбция водорода с поверхности кремния в молекулярной форме более вероятна для пиролиза дисилана, в атомарной форме – для пиролиза моносилана.

4. Впервые получены аналитические выражения, связывающие скорость встраивания атомов кремния в растущий кристалл с характерной частотой пиролиза молекул на ростовой поверхности и параметрами используемой физико-химической модели, отражающими характер захвата водорода с молекулы поверхностью. Анализ полученных соотношений показал наличие взаимосвязи всех кинетических коэффициентов, входящих в систему кинетических уравнений, демонстрируя тем самым неправомочность традиционного отбрасывания в них при анализе ростовых процессов слагаемых, содержащих захватываемые поверхностью радикалы молекул.

5. На основе данных технологических экспериментов, полученных на сегодняшний день, для ряда кинетических моделей определена область характерных частот распада радикалов молекул (в диапазоне ростовых температур), адсорбируемых поверхностью, и изучен характер зависимости поверхностных концентраций продуктов распада молекул от скорости распада фрагментов моно- и дисилана на поверхности кремния. Для наиболее широко используемых моделей пиролиза диапазон характерных частот распада радикалов молекул на поверхности кремниевой пластины в интервале температур 450 - 700°C составляет для моносилана ($0.3 \div 10 \text{ c}^{-1}$), для дисилана ($0.15 \div 0.3 \text{ c}^{-1}$).

6. На основе данных технологических экспериментов, полученных на сегодняшний день, для ряда кинетических моделей пиролиза моно- и дисилана впервые рассчитаны зависимости скорости распада фрагментов гидрида на поверхности кремния от температуры. Полученные кривые показывают немонотонное поведение, характер которого существенно различен в разных температурных режимах. Данный факт указывает на неправомочность традиционного использования при анализе поверхностных физико-химических процессов в интервале ростовых температур зависимостей Аррениусова типа для частоты распада молекул гидридов на поверхности кремния.

7. Наблюдаемые зависимости скорости распада молекул моно- и дисилана на поверхности роста определяются особенностями взаимодействия соответствующего молекулярного пучка с поверхностью в условиях низкого и высокого уровня заполнения поверхностных связей водородом и описываются соотношениями, содержащими две активационные зависимости с разными энергиями активации в области низких и высоких температур и предъэкспоненциальными множителями, зависящими от степени покрытия адсорбционной поверхности водородом.

8. Наиболее ярко указанная выше особенность проявляется в случае захвата поверхностью водорода с молекулы, адсорбированной поверхностью. Температурный характер кривых $v_{\text{SiH}_3}(T_{\text{gr}})$ близок к зависимостям активационного вида с одной энергией активации только для процессов распада с доминирующим захватом водорода поверхностью из предхемосорбционного состояния молекулы.

9. Конкретный вид рассчитываемых зависимостей коррелирует с особенностями протекающих поверхностных реакций и может быть использован как для независимого определения основного типа захватываемого поверхностью радикала, так и для определения характера и момента захвата поверхностью водорода с молекулы.

10. Показана принципиальная возможность повышения скорости роста пленки в условиях низкотемпературного эпитаксиального процесса за счет повышения скорости распада радикалов гидрида, либо скорости десорбции водорода с поверхности. Изменение скорости пиролиза адсорбируемых молекул либо скорости десорбции водорода с поверхности позволяет в принципе без дополнительного нагрева подложки увеличить скорость роста слоя Si в условиях низкотемпературной эпитаксии (450-550)°C, но не более чем в 2-3 раза, в первом случае, и до двух порядков величины – во втором случае.

11. Рассмотрена возможность и перспектива использования спектрометра субмиллиметрового излучения для исследования кинетики поверхностного пиролиза газов и диагностики состава газов и продуктов распада молекул непосредственно в условиях выращивания пленки в установках вакуумной газофазной эпитаксии.

12. С использованием разнообразных методов проанализированы состав, морфология поверхности и кристаллическая структура пленок карбида кремния, выращиваемых при пониженных температурах (1000-600°C) на подложках кремния различной ориентации методом химической конверсии из паров углеводородов. Обнаружено, что фигуры роста, формируемые на поверхности слоя образуют нанокристаллическую плотноупакованную текстурированную пленку с размерами зерен менее 50 нм.

13. Слои кубической фазы 3С-SiC карбида кремния толщиной более 100 нм, выращиваемые на Si(100) и Si(110), имеют низкий уровень шероховатости поверхности, сопоставимый с морфологическими характеристиками подложек Si ~ 1 ÷ 2 нм.

14. По данным морфологических исследований поверхности растущей пленки по аналогии с теорией термического окисления кремния построена теория карбидизации поверхностных слоев кремния. Отличительной особенностью рассмотренной модели является включение в нее встречных, от подложки к поверхности структуры, диффузионных потоков атомов кремния. Проведены оценки скорости роста пленок и энергии активации диффузионных процессов. Проведенные эксперименты, в совокупности с разработанной моделью роста, объясняют наблюдаемые на практике образования пустот под формируемым карбидным слоем в матрице кремния и возможность формирования развитой морфологии поверхности (островковый рост пленки) даже в условиях использования в реакторе только одного потока углеводорода.

Основные публикации автора по теме диссертации

[A1] Orlov, L.K. Kinetics of hydride disintegration in a 2D Si channel formation by the GSMBE and demonstration of a Si/SiGe interface blurring in electrical characteristics of heterostructures. / L.K. Orlov, S.V. Ivin, A.V. Potapov, **T.N. Smyslova**, L.M. Vinogradsky, Zs.J. Horvath. // Abstr. 5th Int.Conf. on Low Dimensional structures and devices. Cancun – Mayan Riviera, Mexico.- 2004.- P.206.

[A2] Орлов, Л.К. Особенности кинетики распада молекул моно и дисилана на поверхности при росте пленок кремния из газовой фазы в вакууме. / Л.К. Орлов, **Т.Н. Смыслова**, С.В. Ивин, В.М. Фомиин, С.А. Никитина.// Тезисы VI национальной конференции по росту кристаллов, ИК РАН Москва.- 2004. - С. 438.

[A3] Орлов, Л.К. Особенности кинетики распада молекул силана на поверхности при росте пленок кремния из газовой фазы в вакууме / Л.К. Орлов, **Т.Н. Смыслова**// Поверхность, Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.- 2005.- №11.- С. 99-106.

[A4] Orlov, L.K. Kinetics of hydride disintegration in a 2D Si channel formation by the GSMBE and demonstration of a Si/SiGe interface blurring in electrical characteristics of heterostructures / L.K. Orlov, S.V. Ivin, A.V. Potapov, **T.N. Smyslova**, L.M. Vinogradsky, Zs.J. Horvath // Microelectronics Journal.-2005.-V.36, N.3-6.- P.518-521.

[A5] Орлов, Л.К. Десорбция водорода с поверхности в условиях эпитаксиального наращивания слоев кремния из моносилана в вакууме / Л.К. Орлов, Т.Н. Смыслова // ФТП.- 2005.- Т.39, №11.- С. 1320-1324.

[A6] Orlov, L.K. The peculiarities of silicon carbide layers forming by vacuum gas phase epitaxy. / L.K. Orlov, Yu.N. Drozdov, A.V. Potapov, N.L. Ivina, V.A. Bozhenkin, N.A. Alyabina, A.S. Sobolev, V.M. Vorotyntsev, **T.N. Smyslova**, V.I. Vdovin. // Abstr. Int. Conf.

“Micro- and Nanoelectronics, ICMNE 2005, Moscow, Zvenigorod, Russia.- 2005.- V.1.- P.23.

[A7] Orlov, L.K. Dissociation kinetics of the molecules hydrides on a surface of a SiGe layer growing by GSMBE. / L.K. Orlov, A.V. Potapov, S.V. Ivin, **T.N. Smyslova**, Matt Stokker.// Abstr. 8th Int. Conf on the Structure of Surfaces. ICSOS’8, Munich, Germany.- 2005.- P.198.

[A8] Орлов, Л.К. Сопоставительный анализ моделей кинетики распада молекул силана на поверхности при эпитаксиальном росте пленок кремния в вакууме / Л.К. Орлов, **Т.Н. Смыслова** // ФТП.- 2006.- Т.40, №1.- С. 45-51.

[A9] Орлов, Л.К. Кинетика пиролиза молекул гидридов на ростовой поверхности и особенности использования метода субмиллиметровой спектроскопии в вакуумной газофазной эпитаксии слоев SiGe / Л.К. Орлов, С.В. Ивин, В.Л. Вакс, **Т.Н. Смыслова** // Тезисы докладов XX симпозиума "Современная химическая физика", Пансионат МГУ – Буревестник, г.Туапсе.- 2008.- С.81.

[A10] Орлов, Л.К. Фазовые превращения и эффекты упорядочения в нанокристаллических углерод содержащих пленках кремния / Л.К. Орлов, Ю.Н. Дроздов, Н.А. Алябина, В.И. Вдовин, Ю.И. Тарасова, **Т.Н. Смыслова** // Материалы 11 Межд. симпозиума "Упорядочение в минералах и сплавах", Ростов-на Дону – Лоо.- 2008.- Т.2.- С. 96-99.

[A11] Орлов, Л.К. Морфология поверхности и структура нанокристаллических пленок 3C-SiC, выращиваемых на Si в вакууме. / Л.К. Орлов, Ю.Н. Дроздов, Е.А. Питиримова, Н.А. Алябина, **Т.Н. Смыслова**, О.А. Подъячева, М.С. Жаркова, Ю.И. Тарасова, В.И. Вдовин // Тезисы докл. XXX научной конф. посв. памяти ак. Н.В. Белова, Нижний Новгород.- 2008.- С.44-45.

[A12] Орлов Л.К. Морфология поверхности, структура и фотолюминесцентные свойства нанокристаллических пленок 3C-SiC, выращиваемых на Si в вакууме. / Л.К. Орлов, В.И. Вдовин, Ю.И. Тарасова, **Т.Н. Смыслова**, И.Н. Дмитрук, С.В. Ивин.//Тезисы IX молодежной школы - семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества “СПФКС09, Екатеринбург. - 2008.- с.138-139.

[A13] Orlov, L.K. Surface morphology, crystal structure and photoluminescent properties of the 3C-SiC epitaxial layers, grown on Si. / L.K. Orlov, Yu.N. Drozdov, N.L. Ivina, V.I. Vdovin, Yu.I. Tarasova, **T.N. Smyslova**, N.A. Alyabina, I.N. Dmitruk. // Proceed. 9TH Int. Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies (EXMATEC 2008).- Lodz.- Poland.- 2008.- p.76.

[A14] Орлов Л.К. Морфология поверхности, структура и фотолюминесцентные свойства нанокристаллических пленок 3C-SiC, выращиваемых на подложках Si в вакууме./ Л.К. Орлов, Ю.Н. Дроздов, Н.А. Алябина, В.И. Вдовин, Н.Л. Ивина, Ю.Н. Бузынин, Ю.И. Тарасова, **Т.Н. Смыслова**, И.Н. Дмитрук. // Труды VIII межд. Конф. «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии». г. Кисловодск.- 2008.

- [A15] Орлов, Л.К. Морфология поверхности и структура нанокристаллических пленок карбида кремния, выращиваемых на кремнии. / Л.К. Орлов, Ю.Н. Дроздов, Ю.Н. Бузынин, Н.А. Алябина, В.А. Боженкин, В.И. Вдовин, Н.Л. Ивина, Ю.И. Тарасова, **Т.Н. Смыслова**, И.Н. Дмитрук // Тезисы докл. V межд. Конф. и IV школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе "Кремний - 2008".- Черногоровка.-2008.- С.162.
- [A16] Орлов, Л.К. Особенности морфологии и структура нанокристаллических пленок кубического карбида кремния, выращиваемых на поверхности Si / Л.К. Орлов, Ю.Н. Дроздов, В.И. Вдовин, Ю.И. Тарасова, **Т.Н. Смыслова** // ФТТ.- 2009.- Т.51, № 5.- С.1018-1023
- [A17] Орлов, Л.К. Фазовые превращения и эффекты упорядочения в нанокристаллических углерод содержащих пленках кремния / Л.К. Орлов, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, Ю.И. Тарасова, **Т.Н. Смыслова**, Н.А. Алябина, Е.А. Питиримова, В.И. Вдовин. // Изв. РАН, серия физическая.- 2009.- Т.73, № 7.- С.1034-1037.
- [A18] Орлов, Л.К. Вакуумная гидридная эпитаксия кремния: особенности адсорбции и пиролиза молекул моно- и диметилсилана на поверхности кремния в условиях ростового процесса. / Л.К. Орлов, С.В. Ивин, **Т.Н. Смыслова** // Тезисы 10 юбилейной молодежной школы - семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества "СПФКС09, Екатеринбург. - 2009.- С.109-110.
- [A19] Орлов, Л.К. Кинетика роста пленок Si и SiGe и особенности пиролиза молекул гидридов в установках вакуумной газофазной эпитаксии. / Л.К. Орлов, С.В. Ивин, **Т.Н. Смыслова** // Тезисы докладов VI Межд. Конф. и V школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе "Кремний - 2009", Новосибирск.- 2009.- С.105.
- [A20] Ивин, С.В., Особенности ростовой кинетики в установках вакуумной газофазной эпитаксии в условиях радиационной стимуляции процессов пиролиза радикалов молекул./ С.В. Ивин, **Т.Н. Смыслова**, Н.Л. Ивина, Л.К. Орлов.// Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции «Химия поверхности и нанотехнология», Санкт-Петербург-Хилово.- 2009- С.213-214.
- [A21] **Смыслова, Т.Н.** Адсорбционные и кинетические характеристики молекул моносилана на ростовой поверхности Si(100) в условиях формирования двойных связей радикалов с поверхностью / Т.Н. Смыслова, С.В. Ивин, Л.К. Орлов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.- 2010.- №3.- С. 243-248

- [A22] Орлов, Л.К. Особенности встраивания адатомов кремния в растущий слой в условиях пиролиза молекул дисилана на ростовой поверхности в методе вакуумной газофазной эпитаксии / Л.К. Орлов, **Т.Н. Смыслова** // Тезисы докл. XI нац. конф. по росту кристаллов. НКРК–2010.- Москва.- 2010.- Т.1.- С.69.
- [A23] Орлов, Л.К. Особенности и механизмы карбидизации поверхности кремния при выращивании пленок кубического карбида кремния методом вакуумной химической эпитаксии. / Л.К. Орлов, В.И. Вдовин, **Т.Н. Смыслова**, А.С. Бондаренко // Тезисы докл. XI нац. конф. по росту кристаллов. НКРК–2010.- Москва.- 2010.- Т.1.- С.50.
- [A24] Ивин, С.В. Вакуумная гидридная эпитаксия кремния: особенности адсорбции и пиролиза молекул моно- и дисилана на поверхности кремния в условиях ростового процесса. / С.В. Ивин, **Т.Н. Смыслова**, Л.К. Орлов. // Тезисы VII Межд. конф. Кремний –2010, Нижний Новгород.- 2010.- С.116.
- [A25] Orlov, L.K. Spectra and mechanisms of ultraviolet photoluminescence from nanostructured 3C-SiC/Si heterocompositions grown in vacuum from hydrides and hydrocarbon mixture. / L.K. Orlov, Yu.N. Drozdov, E.A. Shteiman, V.I. Vdovin, M.L. Orlov, O.A. Pod'yacheva, **T.N. Smyslova**, N.L. Ivina, A.S. Bondarenko. // Abstr. Int. Conf. Modern problems in physics of surface and nanostructures. – Ярославль.- 2010 P.01-3.
- [A26] Орлов, Л.К. Особенности адсорбции и кинетика распада молекул моносилана на эпитаксиальной поверхности кремния / Орлов Л.К., Ивин С.В., **Смыслова Т.Н.** // Химическая физика.- 2011.-Т.30.- № 2.- С.88-96.
- [A27] Орлов, Л.К. Особенности и механизмы низкотемпературного наращивания пленок карбида кремния на кремнии в вакууме. / Орлов Л.К., Вдовин В.И., **Смыслова Т.Н.** // Тезисы докл. XXX научной конф. посв. памяти ак. Н.В.Белова, Нижний Новгород.- 2011.- С.149-150.
- [A28] Орлов, Л.К. Отличительные особенности пиролиза молекул моно- и дисилана при выращивании пленок кремния из газовой фазы в вакууме. / Орлов Л.К., **Смыслова Т.Н.**, Ивин С.В. // Тезисы докл. XXX научной конф. посв. памяти ак. Н.В.Белова, Нижний Новгород.- 2011.- С.170-171.
- [A29] Орлов, Л.К. Скорость распада молекул дисилана на эпитаксиальной поверхности кремния. / Орлов Л.К., **Смыслова Т.Н.** // Тезисы докл. XXX научной конф. посв. памяти ак. Н.В.Белова, Нижний Новгород.- 2011.- С.170-171.
- [A30] Орлов, Л.К. Особенности и механизмы роста пленок кубического карбида кремния на кремнии. / Л.К. Орлов, Э.А. Штейнман, **Т.Н. Смыслова**, Н.Л. Ивина, А.Н. Терещенко. // ФТТ.- 2012.- Т.54, №4.- С.666-672.
- [A31] Орлов, Л.К. Особенности распада молекул моно- и дисилана на поверхности кремния в условиях эпитаксиального роста. / Л.К. Орлов, Н.Л. Ивина, **Т.Н. Смыслова** // Доклады IV Всероссийской конференции «Химия поверхности и нанотехнология», Санкт-Петербург-Хилово.-2012.- С.89-91.

[A32] Орлов, Л.К. Особенности распада молекул дисилана на поверхности кремния в условиях эпитаксиального процесса. / Л.К. Орлов, Т.Н. Смыслова // ЖТФ.- 2012.- Т.82, №11.- С.83-92.

[A33] Ивина, Н.Л. Кинетика распада молекул дисилана на ростовой поверхности кремния в методе вакуумной химической эпитаксии. / Н.Л. Ивина, Т.Н. Смыслова // Химическая физика.- 2013.- Т.32, №5.- С.42-49.

Список цитированной литературы

[1] Werner, K. Evidence for non-hydrogen desorption limited growth of Si from disilane at very low temperatures in gas source molecular beam epitaxy / K. Werner, S. Butzke, S. Radelaar, F. Balk // J. Crystal Growth.-1994.- V. 136, № 1.- P. 338-344.

[2] Yokoyama, S. Self-limiting atomic-layer deposition of Si on SiO₂ by alternate supply of Si₂H₆ and SiCl₄ / S. Yokoyama, K. Ohba, A. Nakajima // Appl. Phys. Lett. – 2001.- V.79, N.5.- P. 617-619.

[3] Bean, J.C. Silicon molecular beam epitaxy: 1984-1986. / J.C. Bean // J. Cryst. Growth.- 1987. -V.81.- P.411-420.

[4] Itoh, M. Island Nucleation and Growth on Reconstructed GaAs(001) Surfaces. / M. Itoh, G.R. Bell, A.R. Avery, T.S. Jones, B.A. Joyce, D.D. Vvedenski. // Phys. Rev. Lett. - 1998.- V.81, - P. 633.

[5] Brunev, D.V. Kinetic of atomic surface transformation during Stransky-Krastanov growth mode. / D.V. Brunev, A.N. Karpov, I.G. Neizvestny, N.L. Shwartz, Z.Sh. Yanovitskaya. // Int. J. Nanoscience.- 2004.- V.3, N.1-2, - P.9-17.

[6] Myers-Beaghton, A.K. Nonlinear model for temporal evolution of stepped surfaces during molecular-beam epitaxy. /A.K. Myers-Beaghton, D.D. Vvedenski.// Phys. Rev. B. – 1990- V. 42. – P.9720.

[7] Tersoff, J. Critical island size for layer-by-layer growth. / J. Tersoff, D.W. Denier van de Gon, R.M. Tromp. // Phys. Rev. Lett. - 1994. - V.72.- P.266.

[8] Алейнер, И.Л. Морфологическая стабильность вицинальной поверхности при молекулярной эпитаксии. / И.Л. Алейнер, Р.А. Сурис.// ФТТ.- 1992.- Т.34.- С.1522.

[9] Kim, K.J. Effects of mixing germane in silane GSMBE / K.J. Kim, M. Suemitsu, M. Yamanaka, N. Miyamoto // Appl. Phys.Lett.- 1993.- V.62, N.26.- P.3461-3463.

[10] Taylor, N. Si(011)16x2 gas-source molecular beam epitaxy: Growth kinetics/ N. Taylor, H. Kim, P. Desjardins, Y. L. Foo, and J. E. Greene // Appl. Phys. Lett.- 2000.- V.76.- P.2853

[11] Nishizawa, J. Surface reaction and selective growth investigation of temperature modulation Si molecular-layer epitaxy/ J. Nishizawa, A. Murai, T. Oizumi, T. Kurabayashi, K. Kanamoto, T. Yoshida //J. Crystal Growth.-2001.- V.233.-N.1-2. - P.161-166.

[12] Gates, S.M. Hydrogen coverage during Si growth from SiH₄ and Si₂H₆/ S.M. Gates, S.K. Kilkarni //Appl. Phys. Lett.- 1992.- V.60, No.1.- P.53-55.

- [13] Bramblett, T.R. Si(001) 2×1 gas source molecular beam epitaxy from Si₂H₆: Growth kinetics and boron doping/ T.R. Bramblett, Q. Lu, T. Karasawa, M.A. Hasan, S.K. Jo, J.E. Greene // J. Appl. Phys.- 1994.- V.76, N.3.- P. 1884-1888.
- [14] Greve, D.W. Growth of epitaxial Ge-Si heterostructures by chemical vapour deposition/ D.W. Greve// Materials Science and Engineering.- 1993.- V. B18.- P.22-51.
- [15] Potapov, A.V. The growth kinetics of SiGe layers from SiH₄ and GeH₄/ A.V. Potapov, L.K. Orlov, S.V. Ivin // Thin Solid Films.- 1999.- V.336, N.1-2.- P.191-195.
- [16] Suda, Y. New Si atomic-layer-controlled growth technique with thermally cracked hydride molecule. / Y. Suda, N. Hosoya, D. Shiratori. // J. Cryst. Growth. - 2002.- V.237-239.- P.1404-1409.
- [17] Joyce, B.A. Growth and doping of Si and SiGe films by hydride gas-source molecular beam epitaxy / B.A. Joyce, J.M. Fernandez, M.H. Xie, J. Zhang, A. Matsumura, A.G. Taylor // J. Crystal Growth.-1996.-V.164. –N.1-4.-P.214-222
- [18] Murata, T. Role of adsorption kinetics in the low-temperature Si growth by gas-source molecular beam epitaxy: In situ observations and detailed modelling of the growth / T. Murata, H. Nakazawa, Yo. Tsukidate, M. Suemitsu // Appl. Phys. Lett.- 2001.- V.79. №.6.- P.746-74
- [19] Orlov, L.K The use of the submillimeter wave technique in growth layer technology / L.K. Orlov, A.S. Sobolev, L.M. Vinogradskii, V.L. Vaks // Abstr. 8th Int. Conf on the Structure of Surfaces. ICSOS'8, Munich, Germany.- 2005.- P. 152.
- [20] Лебедев, А.А. Формирование наноуглеродных пленок на поверхности SiC методом сублимации в вакууме / А.А. Лебедев, И.С. Котоусова, А.А. Лаврентьев, С.П. Лебедев, И.В. Макаренко, В.Н. Петров, А.Н. Титков. // ФТТ.- 2009.- Т.51.- №.4.- С.783-786.
- [21] Konagai, M. Deposition of new microcrystalline materials, μс-SiC, μс-GeC by HWCVD and solar cell applications. / M. Konagai. // Thin Solid Films.-2008.-V.516.-P.490-495.
- [22] Орлов, Л.К. Комплексный анализ структуры пленок карбида кремния, выращиваемых на кремнии в установках вакуумной эпитаксии из гидридов и углеводородов. / Орлов Л.К., Дроздов Ю.Н., Дроздов М.Н., Подъячева О.А, Вдовин В.И.// Журнал структурной химии. – 2010.- Т.51.- С. S148-S154.

Смылова Татьяна Николаевна

Особенности взаимодействия молекулярных пучков с поверхностью кремния в условиях выращивания слоев методом вакуумной химической эпитаксии

Автореферат

Подписано к печати 18.07.13 Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Нижегородском государственном техническом университете им.Р.Е.Алексеева
603950, Нижний Новгород, ул.Минина, 24