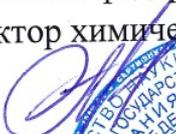


«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по научной
и исследовательской деятельности
Южного федерального университета,
доктор химических наук


Метелица А.В.
18 февраля 2020 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Гончаровой Лидии Михайловны на тему «Сублимационная кристаллизация функциональных слоев в микроразмерных ростовых ячейках» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертационной работы

Кремний относится к одним из основных материалов современной твердотельной электроники. Однако, кремний является непрямозонным полупроводниковым материалом и по этой причине практически не используется для создания оптоэлектронных устройств. Недавние исследования показали, что гетеропара Ge/Si с наноразмерными германиевыми слоями проявляет прямозонные свойства, что позволит создать новое направление полупроводникового приборостроения – кремний-германиевую оптоэлектронику. Кроме того, использование кремний-эрбиевых комплексов также открывает новые возможности создания оптоэлектронных устройств и приборов.

Одной из основных технологий выращивания полупроводниковых гетероструктур является молекулярно-лучевая эпитаксия, позволяющая получить достаточно совершенные приборные структуры. Отдельными причинами недостаточного массового производства светоизлучающих структур на основе кремния методом молекулярно-лучевой эпитаксии являются малые коэффициенты переноса ростового вещества и активных

примесей, а также проблематичное выращивание равномерных слоев на подложках большого диаметра. Одной из возможных разновидностей молекулярно-лучевой эпитаксии является сублимационная кристаллизация при близком расположении источника и подложки.

Диссертационная работа соискателя Гончаровой Л.М. направлена на решение актуальной задачи изучения физических закономерностей сублимационной кристаллизации полупроводниковых и металлических слоев в условиях вакуумной микроячейки различной конфигурации и исследовании их свойств. Для этого автором теоретически и экспериментально исследована кинетика массопереноса кремния, германия, молибдена, эрбия в ростовых микроячейках плоской, цилиндрической, рельефной форм при различных размерах вакуумной зоны, температурах источника и подложки, перепадах температур на границах зоны, а также изучена морфология поверхности, основные типы дефектов, сопровождающие данный технологический процесс. Учитывая вышеизложенное, тема диссертационной работы Гончаровой Л.М. является актуальной и перспективной для развития физики конденсированного состояния и полупроводникового материаловедения.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации состоит в:

1) разработке модели транспорта вещества при сублимационной кристаллизации в ростовых ячейках произвольной конфигурации, в которую в качестве параметров входят температуры источника и подложки, толщина вакуумной зоны, поперечные размеры зоны, коэффициенты сублимации и конденсации;

2) разработке способа расчета скорости процесса и распределение толщины слоя по поверхности подложки в условиях многократного переотражения от границ ростовой зоны;

3) установлении экспериментальных закономерностей массопереноса в ростовых зонах различной геометрии: линейной, цилиндрической, с прямоугольным рельефом и дискретными источниками;

4) выявлении зависимостей относительной скорости сублимационной кристаллизации и продольное распределение толщины слоя от линейных размеров ростовых микроячеек;

5) установлении температурной зависимости массопереноса при сублимационной кристаллизации, а также изучении краевых эффектов, обусловленных снижением температуры на границах ростовой зоны.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы достигаются корректностью поставленных задач, использованием современного научного оборудования, физической обоснованностью используемых автором подходов, а также

согласованностью полученных данных с известными результатами в области процессов роста тонких пленок с другими альтернативными методами – молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазного осаждения. Достоверность разработанной модели, подтверждается хорошим согласованием результатов расчетов и экспериментальных исследований.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях (4 статьи в журналах из перечня ВАК и Scopus), всего по теме диссертации опубликовано 10 работ. Результаты диссертационного исследования докладывались на 6 международных и всероссийских конференциях.

Научная ценность работы состоит в теоретическом и экспериментальном исследовании закономерностей сублимационной кристаллизации полупроводниковых (кремний, германий) и металлических (эрбий, молибден) слоев в ростовых микроячейках различной геометрии. Разработана имитационная модель массопереноса при сублимационной кристаллизации в ростовых ячейках произвольной конфигурации, учитывающая температуры источника и подложки, толщину вакуумной зоны, поперечные размеры зоны, коэффициенты сублимации и конденсации. Продемонстрирована применимость разработанного соискателем технологического подхода для синтеза гетероструктур, востребованных при создании элементов фотоники с уникальными характеристиками.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке технологических основ создания воспроизводимой технологии роста пленок кремний-германиевых и кремний-эрбиевых комплексов методом сублимационной кристаллизации в условиях тонкого вакуумного зазора. Предложена методика выращивания низкодефектных слоев германия на кремнии путем формирования направленных потоков из гексагонально упорядоченных ячеек, заполненных жидким германием при близком расстоянии источника и подложки. Продемонстрированы возможности равномерной металлизации внутренней поверхности полых тел цилиндрической формы, используя резистивно нагреваемые сублимирующей источник, изготовленные из тугоплавких металлов.

Соответствие диссертационной работе и автореферата критериям Положения о присуждении ученых степеней

Представленная диссертация соответствует требованиям Паспорта научной специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а полученные результаты в полной мере удовлетворяют формуле этой специальности и соответствуют следующим областям исследований:

– п. 2 «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы и дисперсные системы» (в работе описаны теоретические и экспериментальные исследования физических свойств низкодефектных слоев кремния, слоев германия на кремнии, слоев металлов на графите, слоев кремния, легированных редкоземельным материалом);

– п. 5 «Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения» (в работе представлена физико-математическая модель массопереноса при сублимационной кристаллизации в ростовых ячейках произвольной конфигурации, учитывающая температуры источника и подложки, толщину вакуумной зоны, поперечные размеры зоны, коэффициенты сублимации и конденсации).

Диссертация Гончаровой Л.М. обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе соискателя. Содержание диссертации отражено на 116 страницах, содержащих 51 рисунок. Наличие некорректного заимствования материала в диссертационной работе без ссылки на автора и (или) источник заимствования не обнаружено. Диссертация оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Автореферат диссертации по содержанию, актуальности, степени разработанности темы исследования, цели и задачам, научной новизне, теоретической и практической значимости соответствует диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту, а также новизна и значимость обоснованы и раскрыты полностью.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в исследованиях процессов роста тонких полупроводниковых пленок и гетероструктур, а также для отработки технологии создания оптоэлектронных приборов в ИОФ РАН (Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), СПбГТУ-ЛЭТИ (Санкт-Петербург), ФИ РАН (Москва), МИФИ (Москва), МИСиС (Москва), ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), ЮФУ (Ростов-на-Дону), ЮНЦ РАН (Ростов-на-Дону), НИИ «Полюс» (Москва), ЗАО «Телеком-СТВ» (Зеленоград), ОАО «Сатурн» (Краснодар), а также в других научных и образовательных учреждениях.

Замечания по диссертационной работе

1. Разработанная модель массопереноса при сублимационной кристаллизации использует в качестве входных параметров коэффициенты конденсации сублимированных атомов от твердофазной поверхности подложки. Эти коэффициенты в расчетах выбираются достаточно условным образом путем их варьирования от 0,005 до 1. Полученные автором экспериментальные результаты показывают, что коэффициент конденсации в действительности стремится к единице, но в точности не равен этому значению. Следует отметить, что в настоящее время существуют компьютерные модели, позволяющие провести их численную оценку для используемых в диссертации материалов. В этой связи было бы весьма полезно провести сравнительную оценку полученных автором результатов с результатами такого компьютерного моделирования.

2. При обсуждении дифракционных кривых структуры «германивая пленка на кремнии» для рефлекса кремния, выращенных сублимационной кристаллизацией в тонком вакуумном зазоре, автор по сдвигу максимумов отмечает характер изменения дефектности слоя. Представляется, что для лучшего понимания механизма дефектообразования, свойственного этому технологическому процессу, необходимо было бы применить также дополнительные аналитические методы.

3. На рисунке 3.4 диссертации показана практически линейная зависимость температуры подложки от индуцированной эдс. Очевидно, что на характер этой зависимости также влияют оптические свойства поверхности подложки, которые в процессе роста германиевого слоя изменяются. Однако автором указанные изменения не учтены и температура подложки, вероятно, определена с некоторой погрешностью.

4. Рассматривая на рисунке 4.1 на стр. 74 теоретические кривые, полученные на основе разработанной модели массопереноса, и аналогичные им экспериментальные результаты соискатель искусственно «обрезает» интервал отображения данных, ограничиваясь толщиной зоны не более 1000 мкм, что несколько снижает возможность сопоставления данных с результатами молекулярно-пучковой эпитаксии.

5. В тексте диссертации не соблюдается единство обозначений. Например, температура подложки и источника обозначаются в некоторых случаях T_1 и T_2 а в некоторых $T_{ист}$ и $T_{подл}$; символом ε обозначается элемент телесного угла, а в другом случае погрешность измерений электрических характеристик. Кроме того, в диссертации отсутствует список сокращений.

Отмеченные замечания не являются критическими, не снижают ценности полученных результатов и не сказываются на высоком уровне проведенных исследований.

Общее заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа «Сублимационная кристаллизация функциональных слоев в микроразмерных ростовых ячейках» по своему содержанию, актуальности, научной новизне, теоретической значимости и практической ценности соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» (пп. 9–14), утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Гончарова Лидия Михайловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

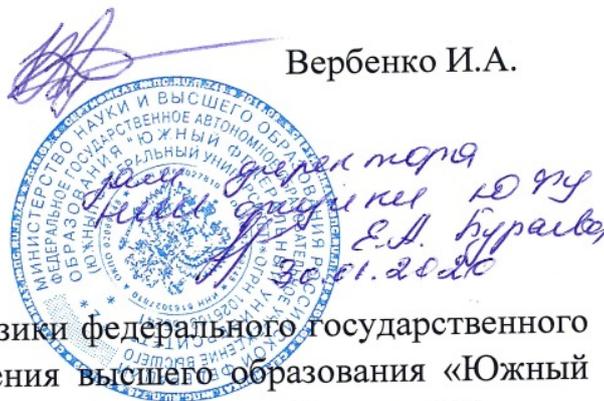
Отзыв составлен доктором физико-математических наук, директором НИИ физики ЮФУ Вербенко Ильей Александровичем (место работы: ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», научно-исследовательский институт физики, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194; тел. +7 (863) 243 40 66, e-mail: ilich001@yandex.ru).

Диссертационная работа Гончаровой Л.М. и отзыв о ней заслушаны и обсуждены на научном семинаре научно-исследовательского института физики Южного федерального университета «30» января 2020 г., протокол № 1.

Директор
НИИ физики ЮФУ,
доктор физ.-мат. наук

Вербенко И.А.

Подпись Вербенко И.А. заверяю:



Научно-исследовательский институт физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194
тел. +7(863) 243 36 76,
факс +7(863) 243 40 44
сайт: <http://www.ip.sfedu.ru>,
e-mail: iphys@sfedu.ru