

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Гончаровой Лидии Михайловны «Сублимационная кристаллизация функциональных слоев в микроразмерных ростовых ячейках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прогресс в развитии и создании электронных и оптоэлектронных приборов в настоящее время во многом определяется развитием эпитаксиальных технологий, что, в свою очередь, требует проведения исследований в области физики процессов кристаллизации. Одним из приоритетных направлений развития прикладной физики конденсированного состояния является исследование закономерностей получения и изучение свойств полупроводниковых тонких слоев и гетероструктур, в том числе на основе кремния. Гетеросистема «кремний-германий», а также структуры кремния, легированного эрбием, являются перспективными материалами оптоэлектроники. Ожидается, что приборы на основе SiGe и SiEr в ближайшем будущем смогут весьма успешно конкурировать с аналогами, созданными на базе традиционных оптоэлектронных материалов группы A^3B^5 . В настоящее время для получения кремний-германиевых и кремний-эрбиевых структур используется несколько ростовых методов, среди них особую распространенность получили молекулярно-лучевая эпитаксия и газофазное осаждение. Общим недостатком этих методов является снижение эффективности при увеличении размеров подложки, а также, как правило, достаточно высокая стоимость производства указанных структур. Соискателем проведено целенаправленное исследование закономерностей массопереноса и кристаллизации кремниевых, кремний-германиевых и кремний-эрбиевых структур, используя разработанный метод сублимационной кристаллизации через тонкий вакуумный промежуток. Этот метод благодаря простоте используемой технологической оснастки и эффекту защиты ростовой зоны от попадания примесей из вакуумной рабочей камеры установки является в определенной степени экономически оправданной альтернативой молекулярно-лучевой эпитаксии. Следует отметить, что проведенные исследования включали также изучение процессов массопереноса ростового вещества, закономерностей кристаллизации и дефектообразования. В связи с вышесказанным

диссертационная работа Гончаровой Л.М. является актуальной и значимой как в научном, так и в прикладном отношении.

НОВИЗНА НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среди новых и оригинальных научных результатов, полученных соискателем, отмечу следующие:

- установлено, что при толщинах вакуумной плоскопараллельной ростовой микроячейки менее 50 мкм интегральная скорость процесса кристаллизации не зависит от толщины зоны, что согласуется с выводами теоретических расчетов. Показано, что для выращивания эпитаксиальных слоев кремния на 100 мм Si-подложках с кристаллографической ориентацией (100) толщина ростовой зоны должна быть менее 100 мкм, температура подложки 1600 – 1650 К, перепад температуры между источником и подложкой должен быть не менее 240 К, остаточное давление в вакуумной камере должно быть не хуже 10^{-2} Па.

- предложен способ выращивания слоев германия на кремнии путем формирования направленных потоков из гексагонально упорядоченных ячеек, механически высверленных в молибденовой пластине и заполненных германием, находящимся в жидкой фазе при близком расстоянии источника и подложки. Выявлено, что в температурном интервале от 575 до 625 °С возможно управляемое нанесение слоев германия, имеющих минимально возможную для описываемой ростовой методики шероховатость поверхности, не превышающей 2 нм.

- показано, что для выращивания слоев кремния, легированного эрбием, необходимо применять комплексный метод, сочетающий сублимационную кристаллизацию с жидкофазной эпитаксией. На первом этапе сублимационным методом из эрбиевого порошка, нанесенного на пластину-источник, выращивается слой эрбия. Затем молибденовые пластины с нанесенным слоем эрбия объединяются в сэндвич-композицию и проводится легирование кремния эрбием путем жидкофазной эпитаксии.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

К важным практическим результатам диссертации Гончаровой Л.М. можно отнести следующие:

- разработан комплекс технологических операций по управляемому выращиванию низкодефектных монокристаллических слоев кремния в

плоскопараллельных вакуумных микроячейках;

- предложен технологический способ выращивания низкодефектных слоев германия на кремнии путем формирования направленных потоков из гексагонально упорядоченных ячеек, заполненных жидким германием при близком расстоянии источника и подложки;
- разработана методика двухстадийного выращивания слоев кремния, легированного эрбием, сочетающая сублимационную кристаллизацию с жидкофазной эпитаксией.

Полученные результаты могут использоваться для разработки технологии управляемого синтеза полупроводниковых структур и металлических слоев, перспективных для создания устройств фотоники и оптоэлектроники.

СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

Достоверность результатов диссертационного исследования и обоснованность сформулированных обобщений и выводов не вызывает сомнения. Достоверность обеспечивается большим объемом экспериментов, корректностью применения широкого комплекса современных высокоэффективных методов исследования, сопоставлением полученных данных с известными экспериментальными результатами родственных исследований и анализом экспериментальных данных, основанных на современных достижениях физики конденсированного состояния.

Достоверность полученных результатов подтверждается также использованием аттестованных методик исследований с применением метрологически поверенной, сертифицированной в соответствии с российскими и международными Стандартами измерительной аппаратуры.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Личный вклад автора состоял в разработке экспериментальных методик, выполнении расчетов, непосредственном проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных результатов. Результаты, выносимые на защиту и составляющие научную новизну диссертационной работы, получены автором лично. Вклад научного руководителя и соавторов публикаций полученные в диссертации результаты отдельно отмечается в тексте диссертационной работы.

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ И ЕЕ ЗАВЕРШЕННОСТИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Объем диссертации составляет 116 страниц, включая 51 рисунок и список цитированной литературы из 110 источников.

Диссертация отражает значительный объем проделанной теоретической и экспериментальной работы, выполненной на высоком научно-техническом уровне. Поставленные в диссертационной работе задачи решены с использованием комплексного подхода, включающего в себя применение широкого спектра современных методов исследования.

Диссертация производит хорошее впечатление как по широте охвата изучаемой проблемы, так и по стилю изложения, оформлению графического материала, четкости и ясности сформулированных выводов.

Тематика и содержание диссертации отвечают формуле Паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Автореферат корректно отражает содержание и основные результаты диссертации.

ПУБЛИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в диссертационной работе результаты отражены в 10 публикациях, из них 3 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, 1 статья в журнале из перечня ВАК, 6 публикаций в трудах международных и всероссийских конференций.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. В уравнениях (2.7) на стр. 38, (2.15) на стр. 44, (2.26) на стр. 49 используются параметры, которые определяют угол вылета сублимированного атома в трехмерной системе координат. В тексте диссертации соискатель неизменно отмечает, что эти коэффициенты подчиняются «косинусоидальному закону». Однако, в указанных выражениях используется обратная тригонометрическая функция арккосинуса, в которую в качестве аргумента входит квадратный корень разности единицы и случайного параметра, выбираемого равновероятностным способом в интервале от нуля до единицы. Необходимо пояснить почему такой достаточно сложный закон, задающий направление движения испаренного атома, называют «косинусоидальным»?

2. В главе 4 графики с экспериментальными результатами, представленными на рис. 4.1, рис. 4.2 и рис. 4.3, не содержат сведений о

погрешности измерений. Хотя очевидно, что, используя метод определения линейных размеров выращенных металлических и полупроводниковых слоев, полученных путем измерения толщины по поперечным срезам на сканирующем электронном микроскопе, погрешность складывается как из неточности визуального определения границ объекта, так и размытия границ измеряемого объекта.

3. При обсуждении результатов исследования фотолюминесценции выращенных кремний-эрбиевых структур на рис. 4.16 на стр. 94, на наш взгляд необходимо было бы более подробно обсудить роль рекомбинационных процессов, в том числе безызлучательных через уровни, образованные дефектами слоя.

4. По тексту диссертации автор многократно отмечает сублимационная кристаллизация через «тонкую вакуумную зону», «вакуумный зазор», «ростовую микроячейку». Однако, во всех случаях очевидно речь идет о пространстве между источником и подложкой. Какой смысл в таком специально расширяемом синонимичном ряде?

5. Приведенные на графиках обозначения единиц в некоторых случаях не поясняются. Зачастую используются относительные единицы как по оси ординат, так и по оси абсцисс (например, на рис. 2.4 и 2.5 на стр. 42, рис. 2.6 на стр. 43, рис. 2.7 на стр. 47, рис. 2.8 на стр. 48 и т.д.). Введение относительных единиц, на наш взгляд, зачастую оправдано в теоретических работах, но ухудшает восприятие материала в представленной работе, которая скорее относится к ряду экспериментальных. Кроме того, в подписях на рис. 4.14 используются англоязычные символы, а на аналогичном по типу рис. 4.16 – русскоязычные обозначения, что несколько запутывает восприятие полученных зависимостей.

Однако, отмеченные недостатки и сделанные замечания не ставят под сомнение полученные результаты, не снижают научной новизны и практической ценности диссертационной работы и, в целом, не влияют на общее положительное впечатление от диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По объему проведенных исследований, научной новизне, практической ценности и достоверности полученных результатов можно сказать, что диссертация Гончаровой Л.М. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей существенное значение для развития физики и технологии

полупроводниковых гетероструктур на основе кремний-германиевых и кремний-эрбиевых структур, применяемых в фотонике и оптоэлектронике.

Считаю, что диссертационная работа «Сублимационная кристаллизация функциональных слоев в микроразмерных ростовых ячейках» удовлетворяет критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном Правительством Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (пп. 9–14), а ее автор, Гончарова Лидия Михайловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент –
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией наноразмерных
активных сред и материалов
ФИЦ «Южный научный центр
Российской академии наук»



Павленко Анатолий Владимирович

Подпись  ф.-м.н. Павленко А.В. заверяю:

Ученый секретарь ЮНЦ РАН

03.02.2020 г.

Булышева Наталья Ивановна



344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова 41

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр
Российской академии наук»»

тел.+7 (863) 219-87-61

факс: +7 (863) 266-43-20

tolik_260686@mail.ru

<http://www.ssc-ras.ru>