

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гончаровой Лидии Михайловны на тему «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 диссертационного исследования

Одной из основных тенденций современной полупроводниковой технологии является разработка и совершенствование методов получения функциональных гетероструктур, включающих тонкие слои и островковые структуры на подложках большого диаметра. Универсальным методом получения подобных структур является молекулярно-лучевая эпитаксия. Обеспечивая высокое качество подобных структур, молекулярно-лучевая эпитаксия обладает рядом недостатков, сдерживающих использование этого метода в производстве массовой продукции. К недостаткам метода относятся низкие коэффициенты переноса ростового вещества и активных примесей, и в особенности с малыми коэффициентами прилипания, высокие требования к вакууму в рабочей камере, трудности создания однородных структур на подложках большой площади. Поэтому актуальны разработки таких модификаций молекулярно-лучевой эпитаксии, которые в применении к тем или иным частным задачам полупроводниковой технологии, не обладали бы описанными выше недостатками классического варианта этого технологического метода.

В последнее десятилетие наблюдается значительный рост интереса к изучению кремниевых структур, в сочетании с германием или редкоземельными комплексами. Диссертация Гончаровой Л.М. посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию закономерностей сублимационной кристаллизации полупроводниковых и металлических слоев в условиях вакуумной микроячейки различной конфигурации и изучению их свойств. В работе также исследована кинетика массопереноса

полупроводников и металлов при кристаллизации из сублимирующихся источников с учетом потерь вещества и переотражения атомов. В этом контексте тема рецензируемой диссертации представляется актуальной и имеющей важную научную значимость и практическую ценность.

Новизна научных результатов и выводов

В работе разработан экспериментальный метод выращивания низкодефектных монокристаллических слоев кремния в вакуумных микроячейках, а также получена совокупность экспериментальных результатов по исследованию закономерностей выращивания германиевых слоев на поверхности кремния и слоев кремния, легированных эрбием. К основным научным результатам диссертации можно отнести следующие:

- Разработана 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.
- Предложен способ и проведен расчет скорости процесса и распределение толщины слоя по поверхности подложки в условиях многократного переотражения от границ ростовой зоны.
- Получены новые экспериментальные результаты, характеризующие закономерности массопереноса в ростовых зонах различной геометрии: линейной, цилиндрической, с прямоугольным рельефом и дискретными источниками.
- Получены сведения о температурной зависимости массопереноса при сублимационной кристаллизации, а также изучены краевые эффекты, обусловленные снижением температуры на границах ростовой зоны.

Практическая значимость результатов

- Установлены закономерности управления процессом кристаллизации слоев кремния в условиях плоскопараллельной ростовой ячейки.
- Разработана лабораторная методика выращивания низкодефектных монокристаллических слоев кремния в плоскопараллельных вакуумных микроячейках.
- 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.
- Сформулирован научно-обоснованный подход к получению слоев кремния, легированных эрбием, сочетающий сублимационную кристаллизацию с жидкофазной эпитаксией.

Достоверность полученных результатов и обоснованность положений

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выносимых на защиту научных положений диссертационной работы обусловлена тем, что они получены с использованием апробированных экспериментальных методов исследования и применением современного и адекватного математического аппарата. Автор диссертации применены методы электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, атомно-силовой микроскопии, масс-спектропии и фотоэлектронной спектроскопии для изучения геометрических размеров, химического состава, электрических и оптических свойств выращенных структур.

Оценка содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 116 страниц, включая 51 рисунок. Список литературы содержит 110 источников.

Результаты исследований представлены в 4 статьях, опубликованных в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК и в журналах, индексируемых в наукометрической системе Scopus. Результаты представлены и опубликованы в сборниках трудов 6 международных и всероссийских конференций. Всего по теме диссертации опубликовано 10 научных работ. Опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации. Результаты исследований были использованы при выполнении научно-исследовательских работ как фундаментального, так и прикладного характера.

Личный вклад автора состоял в разработке концептуальных подходов, выполнении расчетов, непосредственном проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и обобщении полученных результатов. Положения, выносимые на защиту и составляющие научную новизну, получены лично автором.

Автореферат корректно передает содержание диссертационной работы и содержит краткое изложение всех выносимых на защиту положений.

Замечания по диссертационной работе

1. В главе 2 на стр. 36-37 приводятся выражения (2.2), (2.3), (2.5), в которых используется константа E , характеризующая, по утверждению автора, «энергию активации сублимации атома». Хотелось бы услышать пояснение, касающееся использования термина «активация сублимации атома», а также обоснование способа оценки этого параметра. Это же замечание относится к уравнениям (2) – (5) на стр. 8 автореферата.

2. В той же главе 2 на стр. 52 приведено выражение для распределения толщины слоя, полученного методом дискретного жидкофазного источника,

в котором используется параметр, характеризующий размеры локальных точечных источников. Однако, в главе 4 при обсуждении свойств слоев германия на стр. 87-90 влияние размеров локальных источников не обсуждается.

3. В главе 3 на стр. 64 представлена схема нагревательного устройства для исследования сублимационной кристаллизации в условиях цилиндрической зоны. Показано, что ростовая зона располагается нижним торцом на сапфировом изоляторе. Этот особенность расположения очевидно приводит к некоторой неоднородности теплового поля, что не может не сказаться на симметрии толщины слоя на диаметрально расположенных границах цилиндрической подложки. При теоретическом анализе эта экспериментальная особенность не обсуждается и не учитывается.

4. В главе 4 на стр. 89 приведен рисунок 4.13 – дефекты слоев германия на кремнии, на которых представлены дислокации несоответствия, формирующиеся при температурах 550, 650 и 750 °С. К сожалению, в диссертации не приведены результаты по изучению изменения плотности прорастающих дислокаций от температуры, в то время как изменение шероховатости подробно проанализировано и отражено на рисунке 4.12. Кроме того, в тексте диссертации крайне лаконично описана методика расчета плотности дислокаций.

Отмеченные замечания носят частный и, по большей части, дискуссионный характер, не затрагивают основных научных положений работы и сказываются на общей высокой оценке работы в целом.

Заключение

Диссертационная работа Гончаровой Л.М. изложена грамотно и доказательно, ее научное содержание и стиль изложения соответствует современному уровню исследований в области физики конденсированного состояния. Диссертацию можно охарактеризовать как завершенную научно-квалификационную работу, в которой решена научная проблема, имеющая

существенное значение для развития физики и технологии полупроводникового материаловедения.

Считаю, что диссертационная работа «Сублимационная кристаллизация функциональных слоев в микроразмерных ростовых ячейках» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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,
профессор, Лауреат Государственной
премии РФ в области науки и техники,
Почетный работник высшего
профессионального образования,
Вице-президент АО НПП «Радий»



Подпись Бавижева М.Д. заверяю:
Президент АО НПП «Радий»
Конов Магомед Абубекирович


БАВИЖЕВ Михаил Данильевич
07 февраля 2020 г.

Акционерное общество
«Научно-производственное
предприятие» «Радий»,
125315, г. Москва, ул. Часовая, д.28,
тел. +7 495 151-49-67,
e-mail: mbavizhev@mail.ru,
<http://www.npp-radiy.ru>