

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»,
доктор исторических наук, профессор

.В. Мерзлякова

«15 сентября 2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Удмуртский государственный университет» на диссертационную работу Хлыбова Олега Анатольевича на тему «Влияние вращающегося магнитного поля на тепломассообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы исследования

Методы направленной кристаллизации лежат в основе современных технологий получения полупроводниковых кристаллов. Развитие электронной промышленности как расширяет спектр востребованных производством материалов, так и повышает требования к качеству выращиваемых кристаллов, особенно в части их химической однородности и отсутствия дефектов. Получение кристаллов соответствующего качества невозможно без надлежащего исследования процессов кристаллизации и нахождения методов эффективного воздействия на них. Управление конвективными течениями в расплаве является важнейшим фактором воздействия на характеристики и качество получаемых кристаллов. В этом ключе задача исследования влияния вибрационных и магнитных полей для различных конструктивов установок по выращиванию кристаллов исследована в научной литературе недостаточно полно. Исследуемое в диссертационной работе воздействие вращающимся магнитным полем (ВМП) позволяет воздействовать на тепломассоперенос в зоне кристаллизации, однако его воздействие не было до настоящего времени классифицировано и оценено количественно. На основании вышеизложенного представленная работа о численном моделировании влияния ВМП на процессы выращивания полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации является актуальной.

Структура работы, решаемые ею задачи

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Она изложена на 147 страницах машинописного текста, включает 41 рисунок и 4 таблицы. Список цитируемых источников составляет 146 работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении диссертации обоснована ее актуальность, сформулирована цель работы – исследование влияния вращающегося магнитного поля на течения и тепло- и массоперенос при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации (ВНК) и определение оптимальных параметров применения ВМП для управления указанными процессами. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Численное моделирование влияния вращающегося магнитного поля на течение и тепло- и массообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методом ВНК.
2. Экспериментальное исследование влияния ВМП на поля гидродинамических течений и массообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методом ВНК.
3. Численное моделирование влияния ВМП на течение и тепло- и массообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методом осевого теплопотока на фронте (ОТФ).

Дополнительно во введении указаны положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов и личный вклад автора.

В главе 1 автором проанализированы и обобщены литературные данные по методу ВНК и использованию магнитного поля для ускорения процессов конвективного перемешивания расплава с целью уменьшения осевой неоднородности распределения примесного компонента. Отмечено, что вращающееся и бегущее магнитные поля приводят к изменению структуры течений. Далее сформулирована замкнутая физико-математическая модель термоконцентрационной конвекции для описания нестационарных полей температуры, концентрации и полей течений в осесимметричной постановке. Большое внимание удалено корректной постановке краевой задачи и учету воздействия магнитного поля. С этой целью выполнены анализ и упрощение уравнений Максвелла для получения явного выражения для силы Лоренца. Модель записана в терминах функции тока и завихренности для упрощения анализа трехмерной задачи с учетом осевой симметрии решения. Разработан численный метод решения задачи и ее дискретизация методами конечных разностей и конечного объема. Проведено численное моделирование ВНК германия, легированного галлием. Грамотно проведена серия вычислительных экспериментов, позволившая исследовать и классифицировать влияние отдельно термогравитационной конвекции и вращающегося магнитного поля. Проанализирована устойчивость вихревого течения и взаимосвязь азимутального и меридионального компонентов скорости. Важно отметить, что для апробации расчетных моделей выполнен полномасштабный эксперимент по выращиванию арсенида галлия, легированного кремнием методом ВНК-ВМП.

Глава 2 содержит анализ влияния ВМП на процессы теплообмена другой модификации ВНК – метода осевого теплопотока на фронте кристаллизации (ОТФ). Аналогично методологии, использованной при решении задачи описания кристаллизации в методе ВНК-ВМП, сделан критический обзор литературы, выполнена постановка краевой задачи. Проведен вычислительный эксперимент по расчету температурных и концентрационных полей при учете или пренебрежении различными физическими факторами. Как показали вычисления, представленные в работе, в отличие от предыдущего метода, наличие в установке погруженного нагревателя позволяет лучше контролировать устойчивость конвективного течения в зоне кристаллического роста. Вместе с тем, данный конструктив накладывает ограничения на геометрические размеры рабочей зоны кристаллизации, поскольку возникает осевой массоперенос легирующих компонентов. В результате при превышении порогового значения скорости кристаллического роста конвективный механизм переноса не успевает выровнять концентрацию легирующего элемента на фронте кристаллизации.

В главе 3 описан программный пакет Finita для решения сложных систем нелинейных уравнений в частных производных сеточными методами. Отмечена известная проблема, что существующие коммерческие вычислительные платформы предоставляют пользователям проработанные расчетные модели для определенного класса задач. При постановке и решении нестандартной задачи пользователь сталкивается с ограниченными возможностями подобных систем для построения дискретной и численной моделей. В качестве альтернативы в работе предложено использование в разработанном пакете Finita гибридной архитектуры, сочетающей интерпретируемый объектно-ориентированный язык высокого уровня для символьных вычислений, дискретизации дифференциальных уравнений и автоматической генерации кода с компилируемым языком низкого уровня для написания специфического кода. Сочетание пакета со стандартными библиотеками для решения СЛАУ позволяет достичь одновременно высокой эффективности программ на распределенных вычислительных системах и гибкой программной реализации сложных задач.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые проведено численное моделирование влияния вращающегося магнитного поля на течение и массоперенос в расплаве и распределение легирующего компонента в кристалле при выращивании полупроводниковых кристаллов методом ВНК с учетом искривления фронта кристаллизации.
2. Показано, что ВМП приводит к понижению радиального градиента температуры вблизи фронта кристаллизации и уменьшению его прогиба с последующим переходом от вогнутого фронта к W-образному фронту с локальным поднятием на оси симметрии.
3. Продемонстрирован эффект потери устойчивости азимутального течения, генерируемого ВМП, при превышении азимутальной скоростью некоторого критического значения. Обнаружен экспериментально подтвержденный эффект понижения порога устойчивости азимутального течения в условиях

искривленного фронта кристаллизации.

4. Проведен лабораторный эксперимент по выращиванию полупроводникового кристалла арсенида галлия, легированного кремнием, Si:GaAs, при воздействии вращающегося магнитного поля. Анализ результатов эксперимента показал удовлетворительную корреляцию расчетных и натуральных данных. Подтверждено, что участки кристаллов, соответствующие этапам роста при воздействии ВМП высокой интенсивности, характеризуются наличием полосчатой неоднородности, свидетельствующей о нестационарности течения и массообмена в расплаве.
5. Впервые проведено численное моделирование влияния ВМП на процессы тепло- и массообмена при выращивании полупроводниковых кристаллов методом осевого теплопотока на фронте с учетом искривления фронта кристаллизации.
6. Обнаружен эффект смены направления меридионального течения вблизи фронта кристаллизации и соответствующей смены знака радиального градиента концентрации примеси в выращенном кристалле под действием ВМП. Определены тепловые условия на погруженном нагревателе, для которых при действии ВМП наблюдается существенное уменьшение радиальной неоднородности примеси в выращенном кристалле.

Научная и практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в разработке математического описания процессов тепломассообмена и разработке метода управления распределением легирующей примеси при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации. Показано, что на распределение примеси в кристалле решающее влияние в методах ВНК оказывает конвективный массоперенос в расплаве. Вращающееся магнитное поле является эффективным методом управления течениями в электропроводящих жидкостях. Разработанный и реализованный универсальный программный пакет для численного решения сеточных задач, определяемых в терминах систем нелинейных дифференциальных уравнений в частых производных, может быть использован для решения широкого круга проблем, в том числе задач механики жидкостей.

Публикации и апробация результатов исследования

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 полнотекстовых статьях, включая 4 работы в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертаций. Основные результаты диссертации доложены на 8 международных конференциях.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждена сопоставлением результатов численного и натурного экспериментов и их хорошей корреляцией.

Соответствие содержания автореферата содержанию работы

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы. Реферат включает основные результаты и выводы диссертации.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности Диссертация О.А. Хлыбова полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Замечания по диссертационной работе:

1. Представленная исходная постановка задачи в общем случае содержит шесть уравнений для семи неизвестных. Можно предположить, что отсутствует уравнение состояния.
2. Краевая задача, сформулированная для метода вертикальной направленной кристаллизации, включает в себя в качестве граничного условия закон теплообмена, выраженный критериальным соотношением, что несколько снижает общий уровень математической модели. Представляется несложным и логичным дополнить расчетную область рассмотрением теплопередачи в ампуле с условием сопряженного теплообмена на ее внешней границе.
3. В тексте диссертации не приведен полный анализ протекающих теплофизических процессов, особенно на фронте кристаллизации. Расширенное описание позволит более точно обосновать формулировку физико-математической модели кристаллизации.
4. При выводе выражения для осредненной силы Лоренца не описана и обоснована процедура осреднения, следовательно, не определены границы применимости использованного в работе определения силы.
5. Не описаны границы применимости приближения Буссинеска уравнений Навье-Стокса.

Заключение

Отмеченные замечания не снижают значения диссертационной работы О.А. Хлыбова. Сформулированная в ней цель исследования достигнута и все поставленные задачи решены. Положения диссертации, выносимые на защиту, обоснованы, её результаты достаточно полно представлены в публикациях автора, доложены на ряде всероссийских конференций.

Считаем, что диссертация Хлыбова Олега Анатольевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена задача анализа влияния вращающегося магнитного поля на тепломассообмен в методе вертикальной направленной кристаллизации.

Диссертационная работа «Влияние вращающегося магнитного поля на тепломассообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации» полностью отвечает требованиям п. 8 Положения о порядке присуждения ученых степеней от 30.01.2002 г (№74) и п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней от 29.09.2013 г (№842), внесшего изменения в первое Положение (от 30.01.2002 г.), и паспорту специальности, по которой представлена к защите, а ее автор Хлыбов Олег Анатольевич заслуживает

присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв заслушан, обсужден и утвержден на расширенном научном семинаре, проведенном в Институте математики, информационных технологий и физики УдГУ (протокол № 9 кафедры вычислительной механики).

Эксперт, кандидат физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика
конденсированных сред, доцент, заведующий
учебно-научной лабораторией физики
конденсированных сред


Кривилев
Михаил Дмитриевич

Заведующий кафедрой вычислительной
механики, доктор физико-математических наук
по специальности 05.13.18 – математическое
моделирование, численные методы и комплексы
программ


Карпов
Александр Иванович

Ученый секретарь семинара, кандидат физико-
математических наук по специальности 01.02.05
– механика жидкости, газа и плазмы


Ветчанин
Евгений Владимирович

426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, ФГБОУ ВО «Удмуртский
государственный университет», тел. 8-3412-916-230, e-mail: mk@udsu.ru

Подписи вышеуказанных лиц заверяю:

Ученый секретарь ЧС УГРУ
должность



Зоенкова А.В./
расшифровка