

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 06.10.2016 № 126

О присуждении Хлыбову Олегу Анатольевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние вращающегося магнитного поля на тепломассообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 26.07.2016, протокол № 114 диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Хлыбов Олег Анатольевич 1978 года рождения, в 2001 г. окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный университет» (ГОУ ВПО «ПГУ») по направлению «Физика». В 2004 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории вычислительной гидродинамики ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории вычислительной гидродинамики ИМСС УрО РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Любимова Татьяна Петровна, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики ИМСС УрО РАН.

Официальные оппоненты:

Бердников Владимир Степанович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией свободноконвективного теплообмена ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения РАН;

Полежаев Денис Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск, в своем положительном заключении, составленным Кривилевым Михаилом Дмитриевичем, к.ф.-м.н., доцентом, заведующим учебно-научной лабораторией физики конденсированных сред, Карповым Александром Ивановичем, д.ф.-м.н., заведующим кафедрой вычислительной математики и Ветчаниным Евгением Владимировичем, к.ф.-м.н., и утвержденном ректором ФГБОУ ВО УдГУ Г.В. Мерзляковой, указала, что диссертация представляет собой законченное научное исследование, имеющее научное и практическое значение, которое содержит разработку математического описания процессов тепломассообмена в присутствии вращающегося магнитного поля, разра-

ботку метода управления распределением легирующей примеси при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации, и реализацию универсального программного пакета для численного решения сеточных задач, определяемых в терминах систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, примененного для решения широкого круга проблем, в том числе представленных в диссертации задач механики жидкостей; полученные численные результаты положительного влияния вращающегося магнитного поля на однородность распределения примеси в кристаллах, выращенных различными методами направленной кристаллизации; результаты лабораторных экспериментов по выращиванию полупроводниковых кристаллов методом вертикальной направленной кристаллизации в присутствии вращающегося магнитного поля. Диссертация полностью удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Хлыбов Олег Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Соискатель имеет 11 опубликованных работ по теме диссертации, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях (журналах, рекомендуемых ВАК), из которых 1 также индексируется в базах Web of Science и Scopus. Наиболее значительные работы:

1. Lyubimova T.P., Dold P., Croell A., **Khlybov O.A.**, Fayzrakhmanova I.S. Time-Dependent Magnetic Field Influence on GaAs Crystal Growth by Vertical Bridgman Method. *J. Crystal Growth*. V.266. 2004. P.404-410.
2. Lyubimova T.P., **Khlybov O.A.** Effect of rotating magnetic field on mass transfer during directional solidification of semiconductors. *Magnetohydrodynamics*. V.52. № 1. 2016. P.61-69.
3. Любимова Т.П., **Хлыбов О.А.** Численное моделирование влияния вращающегося магнитного поля на процесс выращивания полупроводникового кристалла методом АНР. *Вычислительная Механика Сплошных Сред*. Т.6. № 2. 2013. С. 168-175.
4. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Пономарева К.В., **Хлыбов О.А.** Численное моделирование нестационарного поведения стратифицированной жидкости с помещенным в нее твердым телом в высокочастотном вибрационном поле. *Вычислительная Механика Сплошных Сред*. Т.6. № 3. 2013. С. 269-276.
5. **Хлыбов О.А.** Комбинирование символьной алгебры и генерации кода для решения сложных систем нелинейных дифференциальных уравнений. *Вычислительная Механика Сплошных Сред*. Т.1. № 2. 2008. С. 90-99.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Бердникова Владимира Степановича. В отзыве указывается на то, что диссертация Хлыбова О.А. является оригинальной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой наиболее важными являются новые научные результаты исследований влияния вращающихся магнитных полей на характеристики течений неизотермических расплавов и их влияния на распределения примеси в двух вариантах метода направленной кристаллизации, совокупность которых можно квалифицировать как решение задачи, имеющей важное значение в области технологической гидродинамики. Оппонентом отмечено, что во введении диссер-

тации отсутствует обзор отечественных работ по применению вращающихся магнитных полей, он слишком англоязычный и имеет характер простого перечисления. Нет элементов аналитического подхода и нет четко сформулированных выводов, позволяющих более ясно обосновать постановку решаемых задач. Создается впечатление не достаточно глубокого проникновения в физическую суть технологических проблем, следствием чего явились не достаточно ясное изложение сути процесса сопряженного теплообмена в ампулах (тиглях) с коническим и плоским дном (стр.7) и символическая описка на стр.5: “Исходным материалом для получения монокристаллов служит *поликристаллическая* заправка”. Не корректна интерпретация связи формы фронта кристаллизации и его влияния на конвективное течение, например, на стр.9 и в главе 1, потому что необходимо анализировать влияние разности коэффициентов теплопроводности расплава, кристалла и стенки тигля, соответствующие перетечки тепла и возникновение радиальных градиентов температуры. В списке литературы зачастую отсутствуют полные выходные данные. В главах 1 и 2, посвященных численному моделированию, отсутствуют профили радиальной компоненты скорости в характерных сечениях по радиусу, профили локальных осевых и радиальных тепловых потоков, потоков примеси, а также не сказано, из каких соображений выбраны моменты времени, при которых показаны результаты расчетов. В главе 1 при постановке задачи на стр.29 не объясняется, что на торцах заданы равномерные распределения температуры по радиусу и что значения температуры меняются по мере перемещения нагревателя; не приводятся распределения температуры на внешней стороне стенки тигля, которая является результатом теплообмена с перемещающимся нагревателем. В постановках задач не указаны источники и не обоснован выбор значений коэффициента теплообмена между нагревателем и стенкой тигля и коэффициента сегрегации примеси. Дана слишком поверхностная физическая интерпретация результатов и не сделана оценка целесообразности применения данного метода в технологиях получения полупроводниковых материалов.

2. Положительный отзыв официального оппонента Полежаева Дениса Александровича. В отзыве указано, что диссертационная работа производит весьма хорошее впечатление, выполнена на высоком научном уровне, приведенные результаты являются новыми, обоснованными и имеют практическое и научное значение. Оппонентом отмечено, что в первой главе диссертационной работы объединены результаты численного расчета и лабораторного эксперимента по выращиванию кристаллов методом вертикальной направленной кристаллизации, но приведено только качественное сравнение полученных данных. Представляется логичным провести подробный сравнительный анализ результатов, полученных различными способами. При обсуждении выбора размеров используемых в расчетах сеток отсутствуют количественные данные, позволяющие читателю оценить оптимальность сделанного автором диссертации выбора. На стр.71 приведена микрофотография продольного среза кристалла, сделанная во время лабораторного эксперимента, с проведенной линией через фронт кристаллизации, что, однако, делает невозможным читателю лично оценить положение фронта. В работе присутствуют описки, опечатки и неточности в оформлении, в частности, в предложении могут одновременно встретиться размеры, приведенные в дюймах и миллиметрах.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается актуаль-

ность темы диссертации, основные научные результаты, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность результатов. Ведущая организация в отзыве приводит несколько замечаний. Представленная исходная постановка задачи в общем случае содержит шесть уравнений для семи неизвестных, что указывает на отсутствие уравнения состояния. Краевая задача, сформулированная для метода вертикальной направленной кристаллизации, включает в себя в качестве граничного условия закон теплообмена, выраженный критериальным соотношением, что существенно снижает общий уровень и степень достоверности математической модели; представляется несложным и логичным дополнить расчетную область рассмотрением теплопередачи в ампуле с условием сопряженного теплообмена на ее границе. 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. При выводе выражения для осредненной силы Лоренца не описана и обоснована процедура осреднения, следовательно, не определены границы применимости использованного в работе определения силы. Не описаны границы применимости приближения Буссинеска уравнений Навье-Стокса.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов с замечаниями от: Федюшкина А.И., к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника ФГБУН «Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН»; Малышкина В.Э., д.т.н., профессора, заведующего лабораторией Синтеза параллельных программ ФГБУН «Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН»; Гоника М.А., к.т.н., директора Центра материаловедения «Фотон» (г. Александров); Демина В.А., д.ф.-м.н., заведующего кафедрой теоретической физики ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; Перминова А.В., к.ф.-м.н., доцента, доцента кафедры Общей физики факультета Прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

В качестве замечаний отмечено следующее: Недостаточно четко прописана новизна полученных результатов с учетом большого числа групп, работающих по тематике диссертации. Формулировка положений, выносимых на защиту, представляется не очень удачной. На рис.3 автореферата приведены данные о незначительном влиянии вращающегося магнитного поля на радиальное распределение примеси в кристалле, хотя экспериментальные данные зачастую говорят об обратном. Параметры задачи для метода осевого теплотока на фронте кристаллизации далеки параметров реальных лабораторных экспериментов. Отсутствуют данные по размерам использованных сеток и их влиянию на численные результаты. Не приведено сравнение эффективности использования магнитного поля по сравнению, с другими известными способами управления тепломассопереносом при кристаллизации, например, вращением (постоянными или переменными), уровнем тяжести и вибрационным воздействием. Приведено значение магнитного числа Тейлора, но опущены данные, которые бы характеризовали интенсивность тепловой и концентрационной конвекции, например, числа Рэлея. Для метода Бриджмена с погруженным нагревателем не представлены данные по распределению температуры в расплаве. Недостаточно ясно прописана методика вычисления оценки

уменьшения радиальной неоднородности примеси в кристалле. На стр.9 автореферата упомянуто действие вращающегося магнитного поля на течение проводящей жидкости в цилиндре с твердыми стенками и проставлена ссылка на рис.2, на котором, однако приведены результаты численного моделирования уже для метода вертикальной направленной кристаллизации, из чего можно предположить пропуск соответствующего описанию рисунка. Нет ясности, к какому случаю отсутствия или наличия магнитного поля относятся средние фрагменты на рис.7. автореферата. В описании сеточного метода на стр.8 автореферата не указаны размеры использовавшихся сеток и не освещены вопросы сходимости и устойчивости. Оставлены без пояснения причины использования для дискретизации дифференциальных уравнений комбинированного метода конечных разностей и конечных объемов. Некоторые обозначения на рис. 1 и 6 автореферата, представляющие схематические изображения рассматриваемых процессов, плохо различимы. В автореферате не приведен личный вклад автора.

В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых не вызывает сомнения, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются специалистами в области вычислительной и экспериментальной механики жидкости, имеют большое число публикаций с результатами теоретических и экспериментальных работ по изучению процессов кристаллизации, тепломассообмена в многофазных средах, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» широко известна своими достижениями в области механики жидкости, в университете активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области тепломассообмена в многофазных средах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны теоретические положения, позволяющие описать влияние вращающегося магнитного поля на процессы тепломассообмена при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации;

предложены математические модели неизотермических течений вязкой несжимаемой электропроводной жидкости и тепломассообмена в многофазных средах в присутствии нестационарного магнитного поля в условиях изменения геометрии расчетной области; **доказана** перспективность использования вращающихся магнитных полей умеренной интенсивности для управления течением и тепломассообменом при направленной кристаллизации полупроводников;

введена классификация конвективных структур течений, вызванных комбинацией вращающегося магнитного поля, термогравитационным и концентрационно-гравитационным механизмами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- вращающееся магнитное поле является эффективным средством воздействия на течение электропроводящей жидкости;
- наличие погруженного нагревателя в процессах направленной кристаллизации позволяет более эффективно управлять температурным полем в расплаве;
- основным механизмом массопереноса в расплавах полупроводников является конвективный механизм;
- существование порога устойчивости азимутального течения, генерируемого вращающимся магнитным полем, в цилиндрических полостях;
- течение, индуцированное вращающимся магнитным полем, существенным образом меняет структуру и интенсивность меридионального течения, вызванного термогравитационным и концентрационно-гравитационным механизмами;
- ухудшение качества выращиваемых полупроводниковых кристаллов в части однородности распределения примеси в случае применения вращающегося магнитного поля за критической интенсивности;
- применение вращающегося магнитного поля в задачах направленной кристаллизации в условиях движущегося искривленного фронта кристаллизации приводит к существенному снижению порога устойчивости азимутального течения в расплаве по сравнению со случаем цилиндрической полости с плоскими торцами;
- применение вращающегося магнитного поля к процессам направленной кристаллизации позволяет уменьшить радиальную неоднородность распределения примеси в кристалле;

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

использованы численные методы исследования течений в условиях изменяющейся геометрии задач;

изложены новые результаты, подтверждающие эффективность управления неизотермическими течениями электропроводных жидкостей с помощью вращающегося магнитного поля;

раскрыты особенности взаимодействия течений, индуцированных вращающимся магнитным полем, с течениями, вызванными термогравитационным и концентрационно-гравитационным механизмами;

изучено влияние вращающегося магнитного поля на течения и тепломассообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации;

проведена модернизация существующих численных методов, обеспечившая получение новых результатов по теме диссертации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены рекомендации по использованию вращающегося магнитного поля для управления устойчивостью и течениями электропроводящих жидкостей в замкнутых полостях с изменяющейся геометрией;

определены пределы применимости вращающегося магнитного поля как метода управления качеством получаемых полупроводниковых кристаллов;

создан универсальный пакет для численного решения систем нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики в частных производных сеточными методами;
представлены результаты численного анализа влияния вращающегося магнитного поля на процессы тепломассообмена при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на известных и проверяемых приближениях гидродинамики многофазных сред;

идея базируется на обобщении передового опыта исследования взаимодействия нестационарных магнитных полей с электропроводящими жидкостями;

использованы современные методики обработки исходной информации об объектах исследования и характере изучаемых явлений;

установлено качественное и количественное согласие результатов диссертации в предельных случаях с результатами, представленными в независимых источниках; сходимость результатов численных расчетов при дроблении шага сетки и уменьшении временного шага.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследований, разработке программного кода и проведения численного моделирования, обсуждении полученных результатов и подготовке публикаций; проведение лабораторных экспериментов проводилось в составе рабочей группы; результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

На заседании 06 октября 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Хлыбову О.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

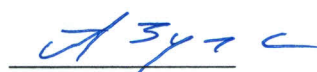
При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 19, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета



/ Матвеенко Валерий Павлович

Ученый секретарь
диссертационного совета



/ Зув Андрей Леонидович

06.10.2016 г.

