

ОТЗЫВ  
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Хлыбова Олега Анатольевича

**«ВЛИЯНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТЕПЛОМАССООБМЕН  
ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДАМИ  
НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа посвящена численному и экспериментальному изучению влияния вращающегося магнитного поля на тепло- и массообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации. Актуальность исследования определяется потребностью современной промышленности в полупроводниковых монокристаллах с низкой концентрацией дефектов. В процессе выращивания кристаллов методами направленной кристаллизации необходимо учитывать конвективный массоперенос легирующей примеси в расплаве с целью уменьшения их макро- и микронеоднородностей в получаемых кристаллах. Для достижения этой цели используют различные методы управления: варьирование распределением температуры, вращение, вибрации, нестационарные магнитные поля. В диссертационном исследовании изучается эффективность использования вращающегося магнитного поля как метода управления тепло- и массообменом при выращивании кристаллов методами вертикальной направленной кристаллизации и осевого теплопотока на фронте кристаллизации. Поскольку выращивание кристаллов процесс длительный и трудоемкий, для его изучения эффективно наряду с лабораторными экспериментами использовать численное моделирование.

Первая глава диссертации посвящена численному и экспериментальному исследованию влияния однородного вращающегося магнитного поля на процессы тепло- и массообмена при выращивании кристаллов методом вертикальной направленной кристаллизации. Впервые проведено численное моделирование влияния вращающегося магнитного поля на массоперенос в расплаве с учетом искривления фронта кристаллизации и обнаружено, что вращающееся магнитное поле приводит к уменьшению прогиба последнего. Показано, что при некоторых условиях использование вращающегося магнитного поля позволяет уменьшить неоднородность радиального распределения примеси в кристалле. Вращающееся магнитное поле также индуцирует азимутальное течение расплава, которое при достижении критической интенсивности магнитного поля теряет устойчивость, что приводит к появлению неоднородности концентрации примеси в

выращенном кристалле. В рамках диссертационного исследования автором показано, что искривление фронта кристаллизации приводит к значительному понижению порога устойчивости течения, что подтверждено экспериментальными исследованиями других авторов.

Во второй главе диссертации впервые численно исследуется влияние однородного вращающегося магнитного поля на тепло- и массообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методом осевого теплопотока на фронте кристаллизации с учетом движения и искривления последнего. Расчеты показывают, что при выбранных значениях параметров задачи неоднородность радиального распределения примеси на уменьшается наполовину, что существенно превышает результат, полученный при исследовании влияния вращающегося магнитного поля на рост кристалла методом вертикальной направленной кристаллизации. При этом влияние вращающегося магнитного поля на осевую неоднородность распределения примеси выражено слабо.

В третьей главе представлен пакет прикладных программ для численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных сеточными методами. Пакет использовался в численных экспериментах, представленных в первой и второй главах диссертации, а также для решения других гидродинамических задач.

**Новизна** полученных результатов и их научная ценность заключается в том, что впервые проведено численное моделирование влияния вращающегося магнитного поля на массоперенос в расплаве и распределение легирующей примеси в кристалле при выращивании кристаллов методами направленной кристаллизации с учетом искривления фронта кристаллизации.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что разработанный пакет прикладных программ для численного решения сеточных задач может быть использован для решения широкого круга проблем, в том числе задач механики жидкостей.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием апробированных численных методов, а также сравнением полученных результатов с данными других исследований, в том числе лабораторных экспериментов.

Материалы диссертации со всей полнотой изложены в публикациях автора.

**Автореферат** соответствует основному содержанию диссертации.

В целом, диссертационная работа производит весьма хорошее впечатление. Из недостатков работы можно отметить следующие.

1. В первой главе диссертационной работы объединены результаты численного расчета и лабораторного эксперимента по выращиванию кристаллов методом вертикальной направленной кристаллизации. Представляется логичным провести

подробный сравнительный анализ результатов, полученных различными способами. В диссертационной работе приводится только качественное сравнение полученных данных.

2. При обсуждении выбора размеров используемых в расчетах сеток отсутствуют количественные данные, позволяющие читателю оценить оптимальность сделанного автором диссертации выбора.
3. На стр. 71 приведена микрофотография продольного среза кристалла, сделанная во время лабораторного эксперимента. Для улучшения понимания представленных на фотографии данных автор диссертационной работы проводит линию через фронт кристаллизации, что, напротив, делает невозможным для читателя разобраться, каким образом оценивалось положение фронта.
4. В работе присутствуют ошибки, опечатки и неточности в оформлении. Например, в предложении могут одновременно встретиться размеры, приведенные в дюймах и миллиметрах (стр. 66).

Тем не менее, указанные недостатки не снижают ценности полученных результатов.

### Заключение

Диссертационная работа Хлыбова Олега Анатольевича выполнена на высоком научном уровне. Приведенные в диссертационном исследовании результаты являются новыми, обоснованными и имеют практическое и научное значение.

Диссертационная работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, 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.

Кандидат физико-математических наук, декан  
физического факультета Пермского государственного  
гуманитарно-педагогического университета

Денис Александрович Полежаев

16 сентября 2016 г.

Адрес: 614990, ул. Сибирская, 24, НГГПУ

Тел.: +7 (342) 212-98-84

E-mail: polezhaev@pspu.ru



Собственноручная подпись	
<i>Д. А. Полежаев</i>	
УДОСТОВЕРЯЕТСЯ	
Зав. отделом	ОДП НГГПУ
<i>полежаев</i>	