

“УТВЕРЖДАЮ”

И. о. ректора, проректор по  
учебной и воспитательной работе

ФГБОУ ВО «Тверской

государственный технический

университет»

д.филос.н., доцент Майкова Э. Ю.

---

«11» сентября 2017 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе Айдиняна Нарека Вааговича “Кинетика роста крупногабаритных монокристаллов парателлурита и германия в методе Чохральского”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Важнейшей предпосылкой для целенаправленного повышения структурного совершенства и увеличения размеров искусственно получаемых монокристаллов является развитие теории роста, включающей описание кинетики с помощью тех или иных приближенных моделей. С этой точки зрения диссертационная работа Н.В. Айдиняна, посвященная изучению кинетических характеристик и механизмов роста кристаллов парателлурита и германия, является актуальной. В работе исследована кинетика роста кристаллов веществ и их расплавов, сильно различающихся по структуре, свойствам и по большинству физических материальных констант. А это особенно ценно в плане возможности оценок корректности и общности положений и соотношений известных ростовых теорий. Актуальна

в научном отношении и та часть работы, в которой теоретически и экспериментально исследованы особенности теплопереноса в методе Чохральского – одном из самых сложных с точки зрения описания и измерительных экспериментов.

**Критерию научной новизны** отвечает большинство из представленных в диссертации результатов исследования. Среди них можно выделить некоторые новые результаты, представляющиеся наиболее интересными:

- С помощью нового бесконтактного способа, обеспечивающего высокую точность позиционирования и высокую точность измерения температуры, впервые исследованы температурные поля на поверхностях расплава в тиглях и на трехфазных границах, а также их изменения во времени, происходящие при вытягивании методом Чохральского крупногабаритных кристаллов парателлурида и германия. Благодаря этому впервые получены уникальные данные о переохлаждениях в соответствующих расплавах, а также о гидродинамике, в том числе, об условиях возникновения и существования, о характере движения конвективных ячеек – вихрей Тейлора в расплаве диоксида теллура.
- Выведены соотношения для истинных значений вертикальных мгновенных линейных скоростей роста кристаллов методом Чохральского, впервые учитывающие понижение уровня расплава, в том числе, из-за его испарения со свободной поверхности в тигле. Определены законы изменения во времени механической скорости вытягивания, обеспечивающие постоянство истинной скорости роста и, как следствие постоянства кинетики, улучшение структурного качества кристаллов.
- Обоснованы теоретически для общего случая и подтверждены экспериментально при изучении микроморфологии боковых поверхностей, вытянутых по Чохральскому кристаллов парателлурида и германия явления, указывающие на асимметрию кинетики роста и плавления, заключающуюся в различии линейных скоростей этих процессов при равных по модулю переохлаждении и перегреве расплава.

**Практическая значимость** результатов диссертационных исследований достаточно обоснована. Данные и закономерности, полученные при изучении тепломассопереноса и связи кинетики роста кристаллов парателлурита и германия с дефектами структуры и оптическим качеством, использованы для оптимизации соответствующих ростовых технологий. Достигнутые при этом увеличение размеров кристаллических буль парателлурита и германия, повышение коэффициентов оптического пропускания материалов, а также снижение плотности дислокаций в кристаллах обоих типов до уровня  $10^3 \text{ см}^{-2}$  безусловно способствуют расширению функциональных возможностей и улучшению технических характеристик целого ряда оптических и оптоэлектронных устройств, акустооптических дефлекторов, модуляторов и фильтров излучения, а также поляризационных призм (в случае парателлурита), линз и объективов тепловизионных устройств, инфракрасных акустооптических дефлекторов (в случае германия).

Найденные в ходе исследований общие закономерности и сделанные из них выводы также имеют практическую значимость при разработке или коррекции технологий выращивания других веществ способом Чохральского.

Полученные в работе результаты представляются нам достоверными, а выводы и основные положения, выносимые на защиту, обоснованными. Это обеспечивается применением апробированных экспериментальных методик, использованием современного исследовательского оборудования, воспроизводимостью полученных результатов и их детальным анализом с точки зрения теорий роста кристаллов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 128 наименования. Работа изложена на 158 страницах печатного текста и содержит 77 рисунков и 2 таблицы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

**Во введении** сформулированы цель и задачи диссертационной работы, выносимые на защиту, обоснованы актуальность работы, ее новизна и практическая значимость.

**В первой главе** представлен литературный обзор по теме диссертации. Рассмотрены основные теории роста кристаллов из расплава, механизмы роста и параметры, описывающие ростовую кинетику. Проанализированы известные данные об анизотропии кинетики при росте парателлурита, об особенностях распределения примесей в германии. Произведены сравнительные оценки протяженности тепловых, гидродинамических и диффузных пограничных слоев при выращивании кристаллов методом Чохральского. Сделаны выводы о возможности реализации как нормального, так и тангенциального (послойного) механизмов при выращивании кристаллов обоих веществ из расплава.

**Во второй главе** представлены вывод и анализ уравнений для истинных радиальной и вертикальной скоростей роста кристалла в методе Чохральского, в которых учитывается понижение уровня расплава в тигле, в том числе, из-за его испарения со свободной поверхности. Определены режимы изменения во времени механической скорости вытягивания кристаллов парателлурита и германия, обеспечивающие постоянство кинетики на межфазных границах. Теоретически рассмотрены классические выражения для скоростей роста и кинетических коэффициентов, выведенные из термодинамических представлений. Показано, что при отказе от обычно применяемых математических упрощений из них следует асимметрия процессов роста и плавления, и при одинаковых по модулю отклонениях от равновесия на фронте кристаллизации – переохлаждении и перегреве расплава – линейная скорость роста кристалла должна превышать линейную скорость плавления. Данный вывод подвергнут экспериментальной проверке при выращивании кристаллов парателлурита и германия.

**В третьей главе** различными методами определены кинетические характеристики процессов роста парателлурита и германия методом Чохральского. Приведены известные ростовые параметры, применяемые при вытягивании этих кристаллов. Проведены исследования температурных полей в ростовом пространстве, а также гидродинамики расплава, измерены

переохлаждения и скорости роста. При измерении температуры на поверхности расплава и на трехфазной границе использована оригинальная методика, включающая компьютерный анализ цветных цифровых изображений тигля с вытягиваемым кристаллом. Установлены диапазоны управляющих технологических параметров, обеспечивающие стабильность кинетики. Различными способами произведены численные оценки кинетических коэффициентов, характерных для роста парателлурита и германия методом Чохральского.

**В четвертой главе** представлены результаты сравнительных исследований структурных и морфологических характеристик, а также коэффициентов пропускания и оптической однородности монокристаллов парателлурита и германия, выращенных способом Чохральского. Методами АСМ, РЭМ и интерференционной профилометрии изучен микрорельеф поверхностей кристаллов, позволяющий оценить флуктуации температуры и скорости роста, происходившие во время вытягивания. Исследовано различие в структурном совершенстве и оптическом качестве объемов кристаллов парателлурита и германия, сформулированных в условиях нормального и тангенциального механизмов роста. Показано, что в результате оптимизации технологий выращивания, произведенной на основании проведенных в диссертационной работе исследований, получены крупногабаритные монокристаллы парателлурита и германия с заметно улучшенными структурными и оптическими характеристиками.

**В заключении** представлены основные результаты проведенных исследований и сделаны выводы, из которых следует, что цель и задачи, поставленные в диссертационной работе, успешно выполнены.

Диссертация Н.В. Айдиняна не лишена недостатков. Укажем на некоторые из них:

1. В первой и второй главах диссертации приведены численные значения переохлаждений расплавов различных веществ, в том числе, диоксида теллура и германия, полученные в известных работах исключительно

расчетным путем – из теоретических представлений. Поэтому, на наш взгляд, следовало бы представить более подробный анализ известных экспериментальных данных о переохлаждениях и, в случае, если таковые имеются, привести сравнительный анализ методов измерений температуры с характерным для них погрешностями, использованных в диссертационной работе и в известных публикациях.

2. В четвертой главе, на рисунках 4.4 и 4.10, показаны полученные интерференционным методом профилограммы боковых поверхностей кристаллов парателлурифта и германия. При их изучении в работе сделан на качественном уровне вывод о превышении скоростью роста скорость плавления при равных по модулю переохлаждении и перегреве расплава. Между тем, измерив разности углов наклона неровностей профиля на участках роста и плавления, вызванных флуктуациями температуры, можно было бы получить численные значения разности кинетических коэффициентов для этих процессов. Это значительно усилило бы научную и практическую ценность результатов диссертации в части, касающейся малоисследованного вопроса об асимметрии процессов роста-плавления кристаллов.
3. Диссертация изложена в целом хорошим литературным языком, в четком, ясном стиле. Но в отдельных ее частях обнаруживаются неточности, оговорки и опечатки. Так, на странице 126 одна и та же физическая величина – кинетический коэффициент – по несколько раз приведена в различных размерностях:  $\text{см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  и  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ . На рисунках 4.4 и 4.15 мелкий трудно читаемый шрифт надписей.

Отмеченные выше недостатки не изменяют общую положительную оценку работы. Диссертация Н.В. Айдиняна является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Полученные в ней результаты не только интересны в теоретическом отношении, но и могут быть использованы в научных лабораториях, а также в организациях и на предприятиях, разрабатывающих технологии

выращивания монокристаллов, применяемых в современных оптических, оптоэлектронных и полупроводниковых устройствах.

Диссертация по актуальности избранной темы, обоснованности научных положений, достоверности, новизне и практической значимости полученных результатов соответствует критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней (п. 9 – п. 14)», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842, а ее автор Айдинян Нарек Ваагович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв заслушан и обсужден на расширенном заседании кафедры Технологии металлов и материаловедения Тверского государственного технического университета 7 сентября 2017 г., протокол № 2.

Заведующий кафедрой «Технология металлов и материаловедение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственной технической университет»,

доцент, к.т.н.

Барчуков Д.А.

Служебный адрес и телефон: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д.22  
+7 (4822) 78-62-89

E-mail: bda@mail.ru