

Отзыв официального оппонента

Корсакова Александра Сергеевича на диссертационную работу **Котова Артема Николаевича** «Методы и средства исследования тепловой релаксации конденсированных сред при локальном импульсном воздействии с микросекундным разрешением», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

Исследования тепловой релаксации материалов при локальном импульсном воздействии необходимы для развития технологий обработки с потоками энергии высокой плотности, например, в производстве новых материалов, энергетике, металлургии. Расчеты теплового режима обработки в часто встречающихся переходных процессах носят оценочный характер из-за почти полного отсутствия сведений о теплофизических свойствах материалов в экстремальных и неравновесных условиях. Исследование фазового перехода, в том числе, сосредоточенного во времени и в пространстве, сопровождается серьезными требованиями к быстродействию и разрешающей способности аппаратуры. Выяснить характерные черты теплового процесса в области с неизвестными свойствами вещества возможно при исследованиях его тепловой релаксации. В этой связи, решаемая автором задача разработки быстродействующих методов и средств исследования тепловой релаксации конденсированных сред в экстремальных условиях является сложной по сути, актуальной по тематике и практически значимой по содержанию.

Научная новизна работы состоит в разработке и применении новых методов измерения, приборов и экспериментальных установок для исследования импульсных тепловых процессов в малоразмерных образцах на микро- и субмикросекундных интервалах времени, позволяющие проводить измерения в ранее недоступных условиях для кратковременно неравновесных состояний вещества.

В ходе экспериментальных работ получены следующие новые результаты:

- определены характерные признаки процессов растворения примесей и расслаивания в растворах при импульсном изменении температуры проволочного зонда;
- определены необходимые уровни мощности импульсного лазерного излучения на торце одномодового световода для активации вскипания *n*-пентана в зависимости от степени его перегрева;
- измерены значения скорости движения паровой фазы на границе световод-перегретая жидкость при разных температурах перегрева *n*-пентана

для начальной стадии фазового перехода;

- получены данные о температурной релаксации полупроводников Ge, ZnSe:Ni, InSb при криогенных температурах.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке оптоволоконных методов для измерения скорости перемещения границы раздела пар-жидкость и термодформационного смещения поверхности твердого образца. С помощью лазерной доплеровской велосиметрии измерены скорости движения парового фронта при вынужденном вскипании жидкости в широком диапазоне температур перегрева. Выяснена определяющая роль эффекта термодформации поверхности на величину сигнала термоотражения в экспериментах с исследованием непрозрачных твердых образцов по принципу «накачка-зондирование» с передачей излучения через световод.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов, проведением калибровочных измерений, подтверждается анализом погрешностей, повторяемостью экспериментальных данных в серии опытов при идентичных начальных параметрах системы, а также публикацией результатов исследований в научных журналах, в том числе, первого квартала.

Личный вклад автора Вклад автора состоял в разработке и модернизации методов и средств исследований, проектировании и изготовлении экспериментальных установок, проведении представленных в работе опытов с обработкой результатов, подготовке публикаций в журналах и докладов на конференциях.

Структура диссертации

Введение обосновывает актуальность, практическую значимость объекта изучения, формулировку цели и задач исследования, научную новизну полученных результатов.

Первая глава содержит достаточно полный обзор состояния исследований и разработок в области нестационарных теплофизических методов и экспериментальных установок. Автор уделит внимание обсуждению современных методов «накачка-зондирование». Дано подробное описание метода нагрева нити двумя импульсами постоянного тока, сделан вывод о применимости метода в зависимости от возможности прибора варьировать основные параметры импульсного эксперимента: температуру и уровни токов нагрева.

Показано, что применение оптических систем в теплофизических установках привлекательно с точки зрения возможности производить локальное управляемое тепловое воздействие с получением температурного сигнала по оптическому отклику. Сделан вывод о перспективности применения световодной техники для изучения тепловых свойств в установках различных

конструкций для исследования скоростных процессов в конденсированных средах.

В выводах по первой главе, в частности, отмечено, что для детального исследования импульсных тепловых процессов потребуется разработка экспериментальных методов с высоким пространственным и временным разрешением.

Во второй главе подробно описана созданная под поставленную задачу экспериментальная установка для управляемого двухимпульсного нагрева проволочного зонда по принципу «накачка-зондирование», разработанные методики измерений, обработка первичных данных.

Выбрана организация структуры прибора на основе комбинации программного управления и аналого-цифровой схемы управления нагревом. Аналоговая электрическая схема решает задачу управления скоростными процессами стабилизации тока и преобразованием измерительных сигналов. Аналого-цифровая часть под управлением микроконтроллера обеспечивает задание и контроль режима нагрева, считывание и сохранение измерительного сигнала. Программное обеспечение на персональном компьютере организует взаимодействие с оператором и настройку режимов нагрева, вывод диагностики проведения эксперимента, считывание, предварительную обработку и сохранение измерительного сигнала в базе данных.

Суть измерений состояла в отслеживании термограмм и компенсации температурных отклонений при двухимпульсном нагреве зонда в растворах с различной концентрации примесей. Для этого от устройства требовалась высокая повторяемость условий нагрева, настройка с малым шагом амплитуды тока второго импульса и температуры нагрева, а также регистрация температурного отклика с высоким разрешением. Продемонстрировано применение разработанного прибора для определения теплофизических свойств расслаивающихся растворов в области неустойчивых и не вполне устойчивых состояний. Методика и устройство показали высокую чувствительность к наступлению фазового перехода по механизму жидкость-жидкость. Сделан вывод о возможности применения прибора для экспресс-контроля фазового состояния среды в химическом аналитическом оборудовании.

Третья глава содержит подробное описание разработки оптоволоконной системы для воздействия на образец лазерным импульсным накачки и измерения интенсивности отраженного зондирующего излучения. Разработанная схема с объединением излучения накачки и зондирования в один волоконный зонд позволяет получить одновременно инструмент воздействия и датчик, с помощью которого можно отслеживать возмущения параметров среды после воздействия с точной временной синхронизацией. Для создания оптоволоконной схемы в

данной работе использовались технологии спектрального и поляризационного уплотнения. Для объединения излучения используют сумматоры-мультиплексоры, для выделения сигналов – спектральные делители. Исследование скоростных тепловых процессов по методу «накачка-зондирование» потребовало применение источника, способного за короткое время создать контролируемое возмущение среды, необходимое в данных условиях опыта. Для изучения быстрых процессов решена задача генерации импульсов наносекундной длительности с регулируемой интенсивностью излучения. Учитывая специфику измерений, был разработан специализированный фотодетектор, имеющий высокую чувствительность в широкой полосе пропускания с функцией компенсации постоянного оптического смещения. На основе данной системы построены две экспериментальные установки для исследования твердых и жидких сред по принципу «накачка-зондирование».

В четвертой главе описывается автоматизированная установка для исследования перегретых жидкостей с помощью оптоволоконного зонда в чистой пузырьковой камере. Хорошо известная пузырьковая камера на основе кварцевого капилляра дополнена кварцевым световодом. Торцевой оптоволоконный датчик чувствителен к изменению фазового состояния среды вследствие изменения ее показателя преломления. Объединение в одном световоде мощного лазерного импульса накачки и маломощного считывающего зондирующего излучения позволяет активировать и отследить вскипание перегретой жидкости при температурах ниже предельных, что расширяет доступную область исследований перегретых жидкостей. Достоинством работы является применение торцевого оптоволоконного датчика для измерения скорости движения границы «жидкость-пар» вблизи торца световода. Автор применил методику лазерной велосиметрии для точного определения скорости движения границы раздела фаз в первые микросекунды фазового перехода. Ранее делались только попытки скоростной фотографии, однако точные измерения были затруднены из-за нечеткого изображения и длительной подсветки. Разработан и продемонстрирован новый метод исследования процесса вскипания перегретой жидкости в ранее недоступной области слабо перегретых состояний.

В пятой главе рассмотрены разработанные метод и установка для исследования процессов тепловой релаксации на поверхности образцов металлов и полупроводников через световод. Разработан оптоволоконный нагреватель и интерферометр для изучения локальных тепловых процессов, использующий сочетание принципов лазерной диагностики и метода оптической терморефлектометрии по методу «накачка-зондирование».

Импульсное лазерное излучение накачки возбуждает в образце температурную неоднородность, скорость релаксации которой несет информацию о теплофизических свойствах облучаемой области. Параметры температурной релаксации неоднородности определяются по синхронному с нагревающим импульсом изменению амплитуды отраженного излучения зондирующего лазера. В данной установке дополнительный вклад в сигнал термоотражения вносит интерферометр Фабри-Перо, образованный в зазоре между торцем световода и поверхностью образца. Достоинством работы является совмещение относительно широкой нагреваемой области с интерферометрией ограниченного участка измерений в центре нагреваемой области за счет свойства расходимости лазерного излучения на выходе световода. Данный подход позволил применить известную модель для «теплового зеркала». В результате было подтверждено соответствие модели в случае металлических образцов и продемонстрирована более сложная зависимость для полупрозрачных полупроводниковых образцов. В итоге получен новый метод оценки тепловых свойств поверхности твердого образца, применимый на малых образцах в экстремальных условиях, например, при криогенных температурах или при лазерной обработке поверхности.

Замечания и вопросы по диссертации

1. Выбор путей решения поставленных задач не всегда полный и понятный. Например, выбор комбинации маломощного импульсного лазера с оптическим усилителем против известных мощных лазерных диодов недостаточно показан и обоснован.

2. Какова стабильность профиля единичного импульса используемого лазера и каковы отклонения между различными импульсами? Как эти характеристики лазерного излучения влияют на погрешность конечных измерений?

3. Результаты измерений по методу лазерной велосиметрии зависят от длины волны используемого излучения. Какие меры были приняты для стабилизации длины волны лазерного излучения и какой вклад неопределенности длины волны в общую неопределенность измерений?

4. На схеме роста пузыря (рис. 4.2) начальную границу раздела «пар-жидкость» следовало бы рисовать ближе к сердцевине световода.

Замечания сформулированы с учетом перспектив развития исследования и не влияют на его общую положительную оценку. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, основанном на применении современной измерительной и вычислительной базы.

Заключение

Диссертация «Методы и средства исследования тепловой релаксации

конденсированных сред при локальном импульсном воздействии с микросекундным разрешением», представленная А.Н. Котовым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, представляет собой научно-квалификационную работу, выполненную на высоком исследовательском уровне и на актуальную тему. Текст диссертации написан технически грамотным языком, соответствующим по стилю общепринятому в технической литературе. Текст автореферата дает представление о сути выполненного исследования. Результаты работы опубликованы в международных журналах, в том числе, по материалам российских конференций, имеется 1 патент РФ.

Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики.

Считаю, что диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а её автор Котов Артем Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

Корсаков Александр Сергеевич,

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Институт новых материалов и технологий, профессор кафедры технологии стекла.

Адрес: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Телефон: +7 9043891537.

E-mail: a.s.korsakov@urfu.ru

Корсаков А.С.

Подпись Корсаков А.С. заверяю:

Ученый секретарь ФГАОУ ВО

«Уральский федеральный университет

имени первого Президента

России Б.Н. Ельцина»

28.05.2024

Морозова В.А.