

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



КОТОВ Артем Николаевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ИМПУЛЬСНОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ С МИКРОСЕКУНДНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в лаборатории «Высокотемпературные измерения» ФГБУН
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
СТАРОСТИН Александр Алексеевич

Официальные оппоненты:

ВОЛКОВ Николай Борисович,
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Екатеринбург, главный научный сотрудник
лаборатории нелинейной динамики;

КОРСАКОВ Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», профессор
кафедры технологии стекла;

СЕРДЮКОВ Владимир Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, ФГБУН
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Си-
бирского отделения Российской академии наук,
г. Новосибирск, старший научный сотрудник лабо-
ратории низкотемпературной теплофизики

Защита диссертации состоится «07» июня 2024 г. в 15-00 часов на заседании
диссертационного совета УрФУ 1.3.02.06 по адресу: 620002, г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=5924>

Автореферат разослан: «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Тепловые процессы, имеющие место в природе и технологиях, практически во всех случаях сопровождаются изменением их параметров во времени. Возможность получения детальной информации о динамике переходных тепловых режимов является необходимым условием для эффективного построения оборудования во многих отраслях промышленности. Обычно для предсказания хода динамических процессов используют комплексные модели физических систем. Однако, получение удовлетворительного результата возможно только при наличии достаточной информации о теплофизических свойствах объектов системы. В случае моделирования нестационарных процессов в релаксирующих средах часто требуется учет изменения свойств объектов от времени и температуры, что при недостатке справочных данных вызывает затруднения. Развитие экспериментальных методов дает возможность получать информацию о теплообмене непосредственно из опыта за малые времена. Успешно применяются методы импульсного нагрева миниатюрного проволочного зонда, с помощью которых получают данные о теплообмене в сложных системах зонд-многокомпонентная жидкость с тепловыми потоками до 10 МВт/см^2 . Методами периодического нагрева, импульсного лазерного нагрева получают свойства таких специфических объектов как тонкие металлические пленки, нанопокртия, свойства многослойных полупроводниковых структур. Отдельным направлением современных теплофизических измерений можно выделить исследование малоразмерных объектов (менее 1 мм^3) и объектов с анизотропией свойств. Для подобных измерений экспериментальные методы должны обладать возможностями локализации приложения теплового воздействия и измерения сигналов отклика.

Предметом данной работы стало создание методов и экспериментальных установок для изучения динамики тепловых процессов при управляемом локальном импульсном воздействии на вещество по принципу «накачка-зондирование». Методом управляемого нагрева тонкого проволочного зонда обеспечивается регулируемая плотность теплового потока для исследования особенностей теплообмена вблизи температуры достижимого перегрева жидкостей. Методами управляемого импульсного лазерного облучения с использованием оптоволоконных зондов исследуются условия возникновения и динамика роста паровой фазы в приграничном слое микронного масштаба, а также тепловая релаксация миниатюрного твердого образца при криогенных температурах.

Работа поддержана Российским научным фондом, проекты № 19-19-00115, № 22-29-00789.

Цель работы заключается в разработке и модернизации средств физического эксперимента для исследования импульсных тепловых процессов в малоразмерных образцах на микро- и субмикросекундных интервалах времени по принципу «накачка-зондирование».

Задачи исследования

1. Разработка устройства для измерения теплоотдачи к жидким средам с использованием программируемого двухимпульсного нагрева проволочного зонда. Обеспечение повторяемости режима нагрева проволочного зонда для регистрации малых изменений относительной теплоотдачи (10^{-3}) на миллисекундных интервалах времени.

2. Разработка метода и модернизация установки с пузырьковой камерой для исследования условий возникновения оптически активированного фазового перехода в перегретом *n*-пентане и измерения скорости перемещения границы раздела пар-жидкость вблизи твердой поверхности кварцевого световода.

3. Разработка метода и установки на основе оптоволоконной техники для исследования процесса тепловой релаксации при импульсном облучении микрометрического участка поверхности твердых малоразмерных образцов при комнатных и криогенных температурах.

Научная новизна состоит в применении новых методов измерения, устройств 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 данной работе:

- выполнен мониторинг процессов растворения примесей и расслаивания в растворах при изменении температуры на установке с импульсно нагреваемым проволочным зондом;

- впервые получены значения скорости движения паровой фазы на границе световод-перегретая жидкость при разных температурах перегрева *n*-пентана для начальной стадии фазового перехода;

- найдены необходимые уровни мощности импульсного лазерного излучения и энергии для активации вскипания *n*-пентана в зависимости от степени перегрева;

- впервые получены данные о температурной релаксации полупроводников Ge, ZnSe:Ni, InSb при криогенных температурах на установке лазерного импульсного нагрева поверхности твердых образцов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке метода измерения скорости перемещения границы раздела пар-жидкость с использованием принципа лазерной доплеровской велосиметрии при вынужденном вскипании жидкости в широком диапазоне степеней перегрева. Разработан метод регистрации процесса тепловой релаксации микрометрического участка поверхности твердого образца после нагрева оптическим импульсом. Выявлена 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.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения разработанного оборудования и методов для экспресс-диагностики технологических жидкостей и конструкционных материалов в экстремальных условиях.

Устройство с проволочным зондом позволяет отслеживать содержание микроколичеств влаги в энергетических маслах на производственных установках, а также контролировать фазовое состояние многокомпонентных жидкостей в процессах химического синтеза. Разработанный метод импульсного лазерного нагрева поверхности может быть применен для исследования образцов малых размеров при экстремальных внешних условиях. Метод позволяет проводить измерения температуропроводности приповерхностных слоев твердых непрозрачных тел с локализацией области измерения порядка 20–100 мкм. Возможно применение метода для определения неоднородности свойств по площади образца. Практическая ценность метода и установки обусловлена возможностью локальных измерений тепловых свойств тонких приповерхностных слоев материала в технологических циклах производства.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанное устройство для измерений нестационарной теплоотдачи от проволочного зонда с автоматической калибровкой каналов, обеспечивающее повторяемость режимов нагрева для регистрации малых изменений теплоотдачи (10^{-3}) на миллисекундных интервалах времени.

2. Метод и экспериментальная установка для исследования вскипания жидкости в миниатюрной пузырьковой камере со световодом, позволяющие исследовать условия оптической активации фазового перехода и скорость перемещения границы раздела жидкость-пар на микросекундных интервалах времени.

3. Разработанный метод и приборная база для импульсной лазерной терморефлектометрии через световод, позволяющие проводить измерения тепловых процессов на поверхности твердых образцов с локальностью 20–100 мкм на микросекундных интервалах времени.

4. Экспериментальные данные импульсной лазерной терморефлектометрии, определенные по временным зависимостям релаксации наведенной температурной неоднородности, которые находятся в соответствии с термомодеформационной моделью для металлических образцов.

Личный вклад автора заключается в разработке и изготовлении оптоэлектронных устройств, примененных как отдельно, так и в составе экспериментальных установок. При непосредственном участии автора проведена разработка и модернизация методов и средств исследований, проектирование и сборка установок, проведение экспериментов, анализ результатов выполнения расчетов.

Постановка задач исследования и обобщение данных опытов выполнены автором совместно с руководителем А.А. Старостиным и научным консультантом – профессором П.В. Скриповым.

Достоверность результатов обеспечивается применением апробированных средств цифровой измерительной техники, метрологическим обеспечением приборной базы, проведением калибровочных опытов, воспроизводимостью результатов, сравнением с данными общепризнанных методов теплофизических измерений и результатами численного моделирования.

Апробация работы

Применение разработанных методов и средств исследований выполнено совместно с сотрудниками Института теплофизики и Института физики металлов УрО РАН. Результаты работы докладывались на 13 конференциях, среди которых: Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ, РКТС-16, 2023; Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2023, 2023; VIII Российская национальная конференция по теплообмену 2022; Международная научно-техническая конференция по современным методам и средствам теплофизических исследований, Санкт-Петербург, 2015, 2017, 2019, 2021, 2023.

Работа поддержана Российским научным фондом, проекты: № 19-19-00115, № 22-29-00789.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, из них 14 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из которых 9 проиндексированы в базах Scopus и Web of Science; 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка сокращений, списка использованной литературы из 93 наименований. Работа изложена на 133 страницах, содержит 2 таблицы и 66 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы основные особенности проведения исследований в выбранном направлении предметной области, вводится понятие принципа «накачка-зондирование». Кратко представлено описание трех экспериментальных направлений, развиваемых в данной работе. Приведена актуальность темы исследования, научная новизна и практическая значимость, основные защищаемые положения.

В первой главе в хронологическом порядке приводится обзор эволюции нестационарных теплофизических методов и экспериментальных установок, повлиявших на появление современных средств исследований быстропротекающих тепловых процессов. Основное внимание уделено методам, объединенным общим принципом «накачка-зондирование». Отдельно выделена группа методов импульсного нагрева тонкого платинового зонда, традиционно применяемая для исследования перегретых состояний жидкости в Институте теплофизики УрО РАН. Дано подробное описание метода нагрева нити двумя импульсами постоянного тока и особенностей работы одной из его первых аппаратурных реализаций. Сделан вывод, что применимость метода в значительной степени зависит от возможности устройства 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 управ-

ляемое тепловое воздействие с получением температурного сигнала отклика по оптическим каналам. Вместе с этим открываются возможности преодоления инерционного барьера зондовых методов и достижения высоких скоростей нагрева, не достижимых, например, с применением проволочного зонда. Находят также применение и комбинированные установки, в которых контактный миниатюрный нагреватель совмещается с оптической системой регистрации температуры.

Приводится описание принципа «накачка-зондирование», который, в основном, используется в контексте оптических средств организации импульсного воздействия на образец и измерения температурного отклика. Уделено внимание методам и установкам, реализующим принцип «накачка-зондирование»: методам нестационарного термоотражения – transient thermoreflectance (TTR), термоотражения во временной области – time-domain thermoreflectance (TDTR). Идея методов TTR, TDTR состоит в быстром локальном нагреве поверхности твердого образца импульсом накачки, затем считывании процесса тепловой релаксации нагретой поверхности по изменению амплитуды зондирующего излучения. По полученным данным могут быть рассчитаны теплоемкость и температуропроводность образца.

Затем дается описание экспериментальных установок с применением волоконно-оптических систем. Показано, что волоконные зонды нашли применение для измерения плотности и отслеживания фазового состояния жидких сред, как в стабильной области, так и в перегретых состояниях жидкости. Сделан вывод о перспективности применения световодной техники для изучения тепловых свойств в установках различных конструкций для исследования скоростных процессов в конденсированных средах.

Глава завершается постановкой задачи исследования.

Во второй главе описывается разработка устройства [1–5, 7, 15] для управляемого двухимпульсного нагрева проволочного зонда по принципу «накачка-зондирование». Выдвигаются требования к устройству. Описываются состав устройства и принцип работы.

Устройство построено на основе комбинации программного управления и аналого-цифровой схемы управления нагревом. Аналоговая часть решает задачу управления скоростными процессами стабилизации тока и преобразования измерительных сигналов. Аналого-цифровая часть под управлением микроконтроллера обеспечивает задание и контроль режима нагрева, считывание и сохранение полезного сигнала. Программное обеспечение на персональном компьютере организует настройку режимов оператором, вывод диагностики хода измерения, контроль проведения эксперимента, считывание, предварительную обработку и сохранение сигнала в базе данных.

При построении аналого-цифровой схемы была решена задача обеспечения высокого уровня повторяемости условий двухимпульсного нагрева и цифровой регулировки амплитуды тока зондирующего импульса с малым шагом. Выполнение данных требований было необходимо для реализации метода компенса-

онного нагрева и получения высокой чувствительности метода к малым добавкам водных примесей. Структурная схема устройства импульсного нагрева показана на рисунке 1.

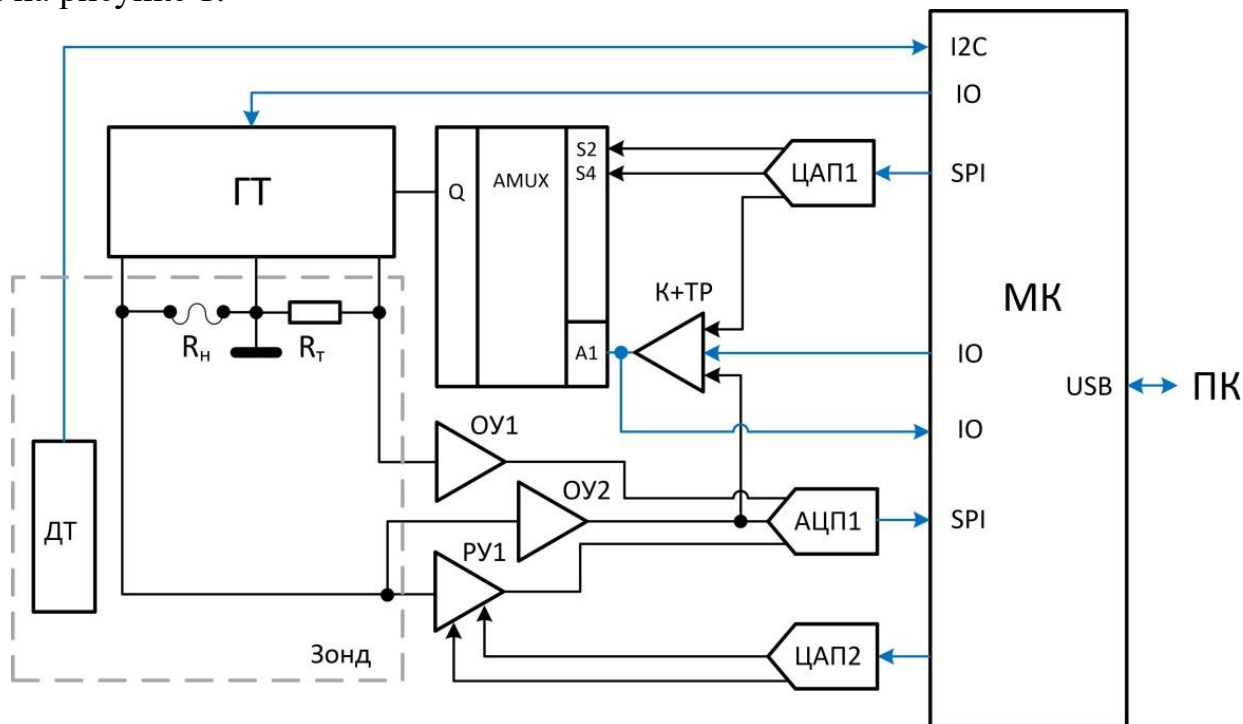


Рисунок 1 – Структурная схема устройства импульсного нагрева с зондом. ОУ – операционный усилитель, ГТ – генератор тока, РУ – регулируемый усилитель, ДТ – датчик температуры, АМУХ – аналоговый мультиплексор, К+ТР – компаратор с триггером, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – управляющий микроконтроллер, ПК – персональный компьютер, R_n – проволочный нагреватель, R_t – токоизмерительное сопротивление.

Разработанная аналого-цифровая схема позволяет, не изменяя аппаратной конфигурации, исследовать образцы на существенно отличающихся температурных режимах, а также использовать проволочные нагреватели различной длины.

На рисунке 2 показан результат проведения модельного эксперимента при измерении относительного коэффициента теплоотдачи для чистого этанола и 10 % раствора изопропанол-этанол. На графике можно видеть принцип компенсации с достижением одинакового хода температурной кривой для двух образцов. На серии кривых № 1 – три измерения раствора при токе 0,650 А. На серии кривых № 2 – три измерения чистого образца при токе 0,650 А (сплошная линия) и три измерения раствора при токе 0,646 А (пунктир). На врезке укрупненно показан участок термограммы вблизи 0,8 мс, где можно видеть различие хода температурных кривых в 0,5 °С. Чтобы добиться совпадения температурных кривых при компенсации, потребовалось снизить ток зондирующего импульса на 4 мА для раствора.

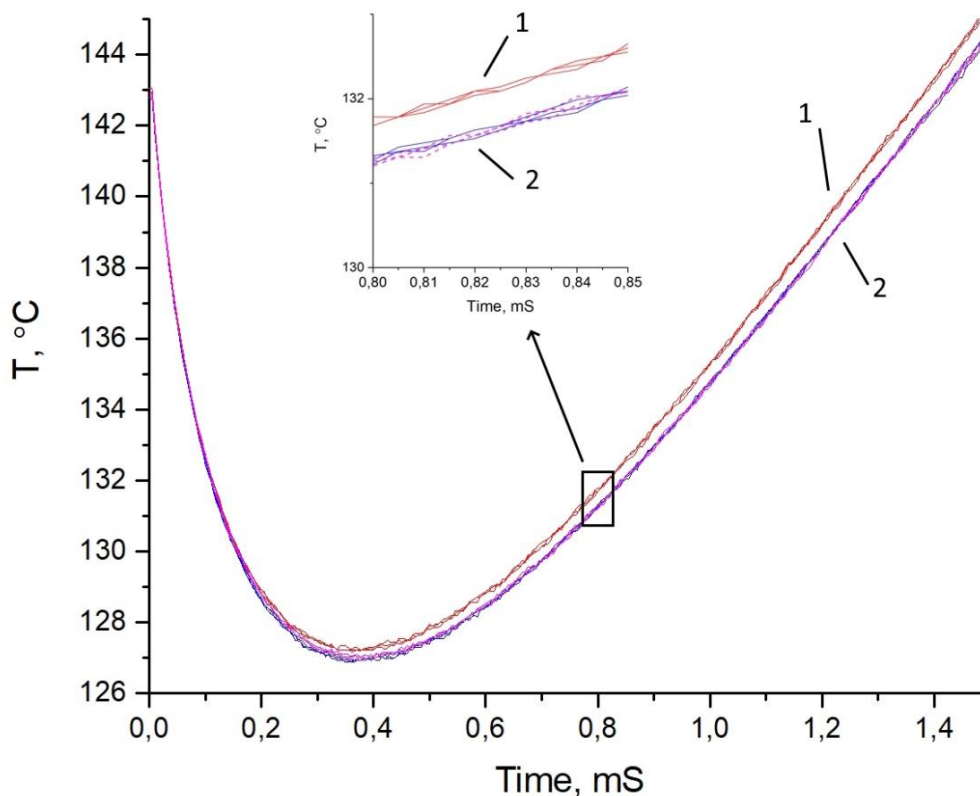


Рисунок 2 – Термограммы нагрева зонда с разным током для чистого образца (2 - этанол) и раствора (1 - этанол + изопропанол) при компенсации температурных различий снижением тока нагрева на 4 мА.

Устройство также применено для отслеживания динамики процесса расщепления растворов в области неустойчивых и не вполне устойчивых состояний. Измерения проводились с помощью разработанного устройства двухимпульсного нагрева. Метод и устройство показали высокую чувствительность к наступлению фазового перехода по механизму жидкость-жидкость. Оценивалась длительность зондирующих импульсов в серии опытов. Сделан вывод о возможности применения устройства для экспресс-контроля фазового состояния среды в химическом оборудовании.

В третьей главе дается описание разработанной оптоэлектронной системы, реализующей принцип «накачка-зондирование» и примененной для исследования динамических тепловых процессов в конденсированных средах. В состав системы входит схема на оптоволоконных компонентах, лазерные источники постоянного и импульсного излучения, фотодетектор и быстродействующая регистрирующая аппаратура.

В оптоволоконной схеме (рисунок 3) использовались технологии спектрального и поляризационного уплотнения. Для объединения излучения применены сумматоры-мультиплексоры, для выделения сигналов – спектральные и поляризационные делители. Для совмещения и разделения лучей встречных направлений одной длины волн применено специализированное устройство – оптоволоконный циркулятор.

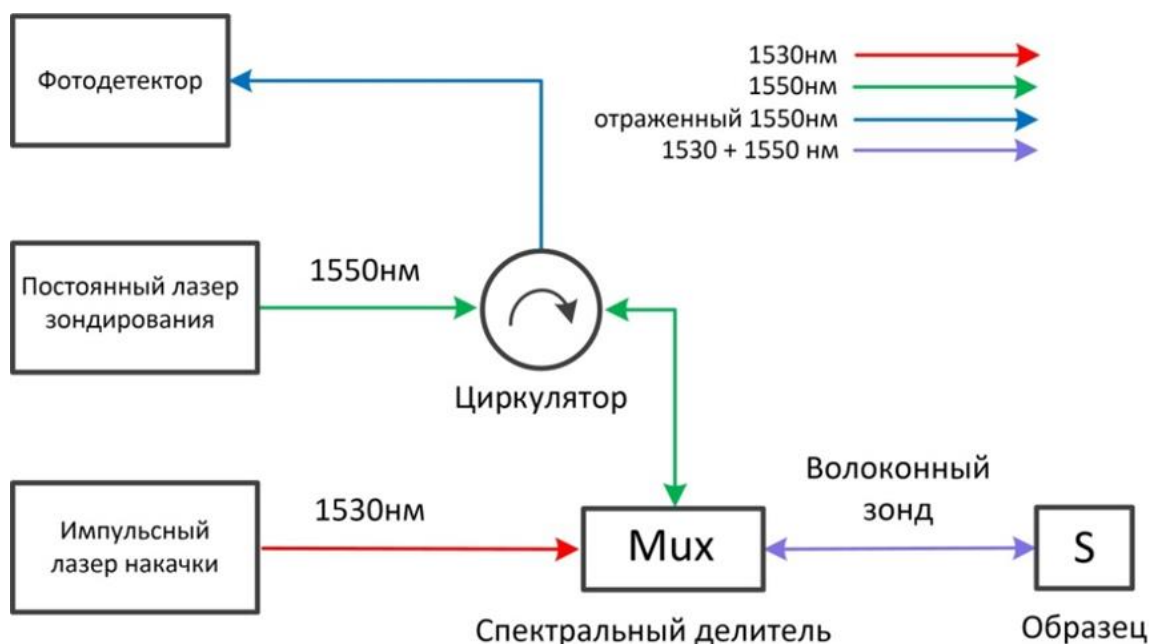


Рисунок 3 – Схема со спектральным совмещением излучения накачки и зондирования в оптоволоконном зонде.

В спектральный делитель на входной порт поступает излучение зондирующего лазера с длиной волны 1550 нм, практически без ослабления проходя через циркулятор. Излучение накачки ($\lambda = 1530$ нм) проходит в спектральный делитель, где лучи объединяются в одном световоде. Комбинированный луч на длинах волн накачки и зондирования распространяется по волоконному зонду, торец которого взаимодействует с измеряемой средой. Часть комбинированного излучения, вышедшего в среду, отражается и распространяется в обратном направлении по волоконному зонду. Отраженное от образца зондирующее излучение на длине волны 1550 нм выделяется спектральным делителем и волоконным циркулятором, попадая на фотодетектор.

Таким образом, разработанная оптоволоконная схема обеспечивает одновременную подачу в образец излучений накачки и зондирования со спектральным разделением, дополнительно позволяя выделить отраженную от образца часть зондирующего излучения.

Для подачи на образец излучения накачки был применен разработанный импульсный лазерный источник наносекундной длительности.

На рисунке 4 показана функциональная схема разработанного импульсного источника наносекундных импульсов. Источник состоит из электронного блока управления, волоконного усилителя с активным оптоволоконном типа EDFA, мало-мощного задающего лазера 1530 нм.

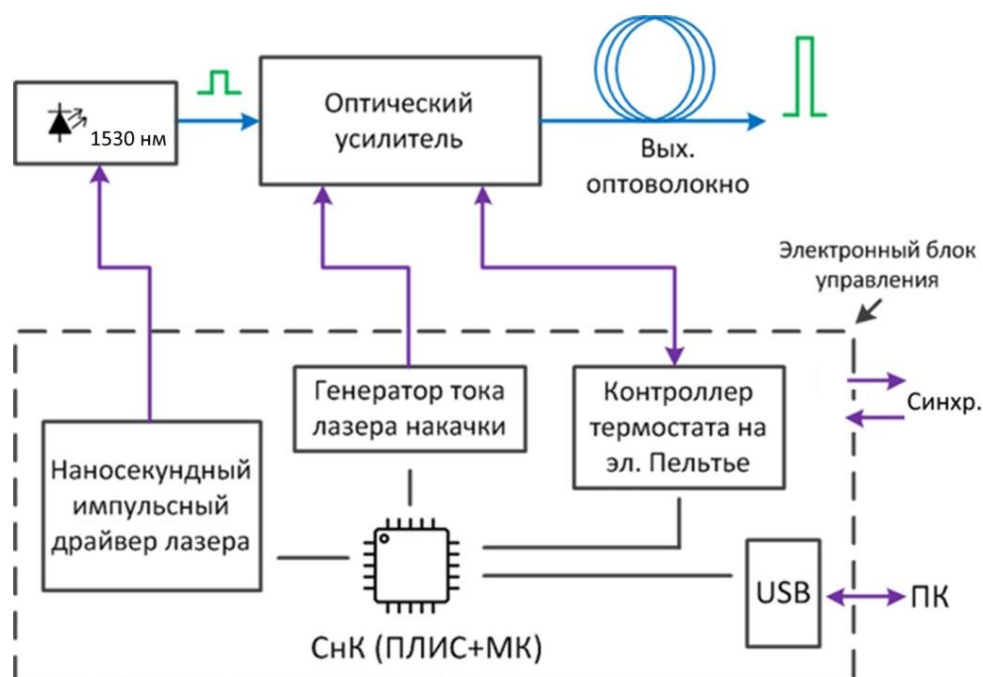


Рисунок 4 – Функциональная схема наносекундного источника с регулируемой мощностью и выходом в одномодовое волокно.

Электронный блок выполняет следующие задачи:

- формирование импульса накачки для маломощного задающего лазера с цифровой регулировкой амплитуды и длительности наносекундного разрешения с субнаносекундным фронтом;
- цифровое управление током накачки лазера оптического усилителя, обеспечивающего регулировку уровня амплитуды выходного оптического импульса;
- температурная стабилизация лазера накачки оптического усилителя с относительной стабильностью поддержания температуры не хуже $\pm 0,1$ °С;
- прием и выдача сигналов синхронизации уровня ТТЛ для сопряжения с дополнительными устройствами записи и управления, входящими в состав экспериментальной установки;
- цифровой обмен данными с ПК для загрузки и отображения настроек режимов работы блока с использованием программной оболочки для ПК.

Электронный блок выполнен в виде печатной платы, на которой смонтирована микросхема цифрового управления – «система на кристалле» (СНК) SmartFusion2, вспомогательные модули и USB-интерфейс связи с ПК.

Основные характеристики разработанного импульсного лазерного источника накачки:

- задание амплитуды выходного оптического сигнала: **от 50 мВт до 16 Вт $\pm 1,5$ %**;
- задание ширины импульса: **от 1 нс до 14 мкс с шагом 1 нс**;
- длительность фронта и спада оптического импульса: **не более 0,3 нс**;
- 3 вида синхронизации: **внешняя, одиночная, внутренняя**;
- периодическая выдача импульсов с использованием внутренней синхронизации: **от 50 мкс до 100 мс с шагом 1 мкс**;

- регулировка фазы выходного сигнала синхронизации в интервале **0–14 мкс** с шагом **1 нс**.

Для исследования скоростных процессов фазовых переходов в жидкости и релаксации температурного поля в твердых образцах разработан фотодетектор повышенной чувствительности (не менее 50 мВ/мкВт), дающий отклик в диапазоне частот от постоянного излучения до 100 МГц.

Специфика детектирования сигнала отражения в схеме оптоволоконного рефлектометра (рисунок 3) заключается в наличии некоторого уровня постоянного смещения, поступающего на фотодетектор. Данная особенность была учтена при проектировании схемы фотодетектора.

Функциональная схема фотодетектора показана на рисунке 5.

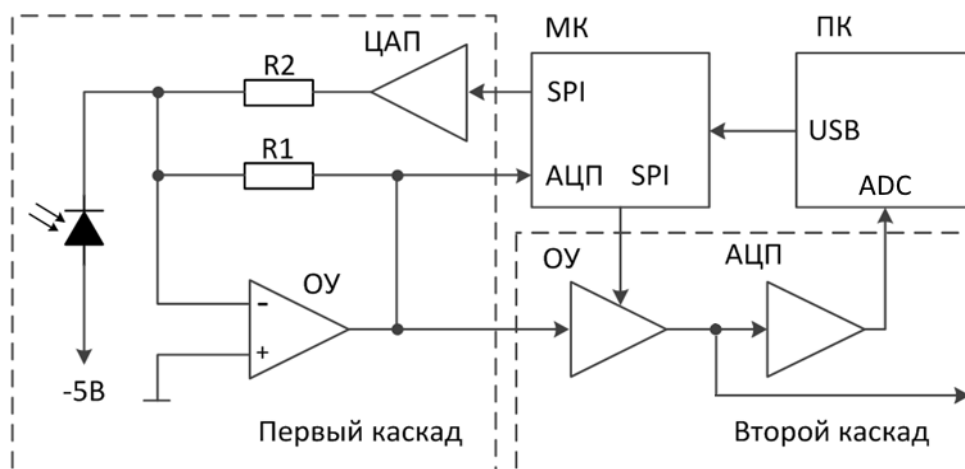


Рисунок 5 – Функциональная схема фотодетектора с компенсацией постоянной составляющей оптического сигнала.

Для выделения слабого переменного сигнала на фоне постоянного смещения применена цепь цифровой компенсации. Если уровень постоянной засветки приводит к насыщению усилителя второго каскада, включается цепь дополнительного контура обратной связи на микроконтроллере с внешним ЦАП. Изменяя напряжение на выходе ЦАП, возможно регулировать ток обратной связи, компенсируя токи утечки через фотодиод при некотором уровне его постоянной засветки.

Основные характеристики разработанного устройства:

- аналоговая полоса пропускания **100 МГц (-3 дБ)**;
- порог чувствительности **200 нВт**;
- динамический диапазон до **10 мкВт**;
- компенсируемый уровень излучения до **1 мВт**;
- фотодиод InGaAs, чувствительный в спектральном диапазоне **1200–1700 нм**.

В четвертой главе описываются опыты по активации вскипания и определению скорости переходных процессов на торце световода в перегретой жидко-

сти по принципу «накачка-зондирование». Опыты проведены на модернизированной установке миниатюрной пузырьковой камеры [8, 9].

Установка пузырьковой камеры была модернизирована для проведения экспериментов по активированному вскипанию перегретого *n*-пентана путем внедрения разработанной оптоэлектронной системы. Автоматизированная установка миниатюрной пузырьковой камеры с волоконными зондами представлена на рисунке 6.

Исследуемая жидкость загружается в толстостенный капилляр из молибденового стекла с внутренним диаметром 1,4 мм и наружным диаметром 6 мм. Образец переводится в перегретое состояние путем резкого сброса давления. Внутри капилляра размещено три зонда из оптоволоконна SMF-28 с внешним диаметром 125 мкм и диаметром световедущей жилы 9 мкм.

Капилляр находится в жидкостном термостате.

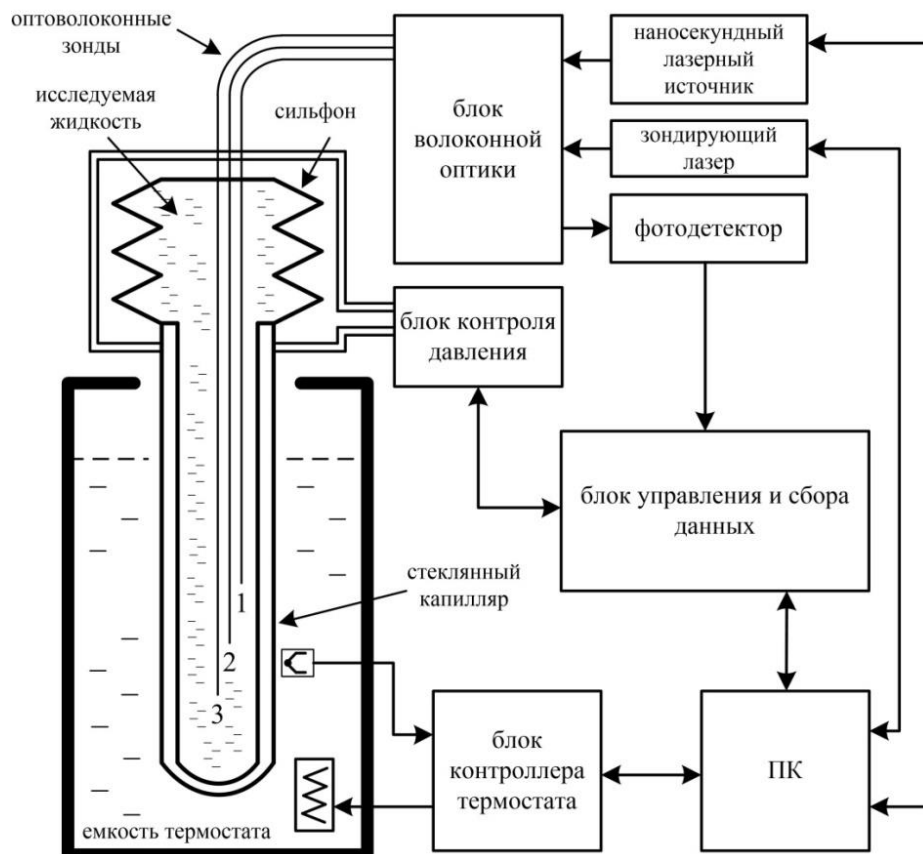


Рисунок 6 – Функциональная схема установки миниатюрной пузырьковой камеры с волоконными зондами.

Оптоволоконная система подключается к одному из трех волоконных зондов для одновременной подачи активирующего импульса накачки и отслеживания сигнала обратного отражения рефлектометра. Сигнал отражения направляется в фотодетектор, а затем обрабатывается с помощью высокочастотного осциллографа Rigol MSO5354. На рисунке 7 (б) схематично приведен процесс роста активированного пузыря на торце световода и формирование отраженных зондирующих лучей от границы раздела пар-жидкость. На рисунке 7 (а) показана

фотография парового пузыря на торце световода, полученная методом стробоскопической съемки с задержкой в 50 мкс после действия импульса активации. Опыт проведен на перегретом *n*-пентане при температуре в 123 °С.

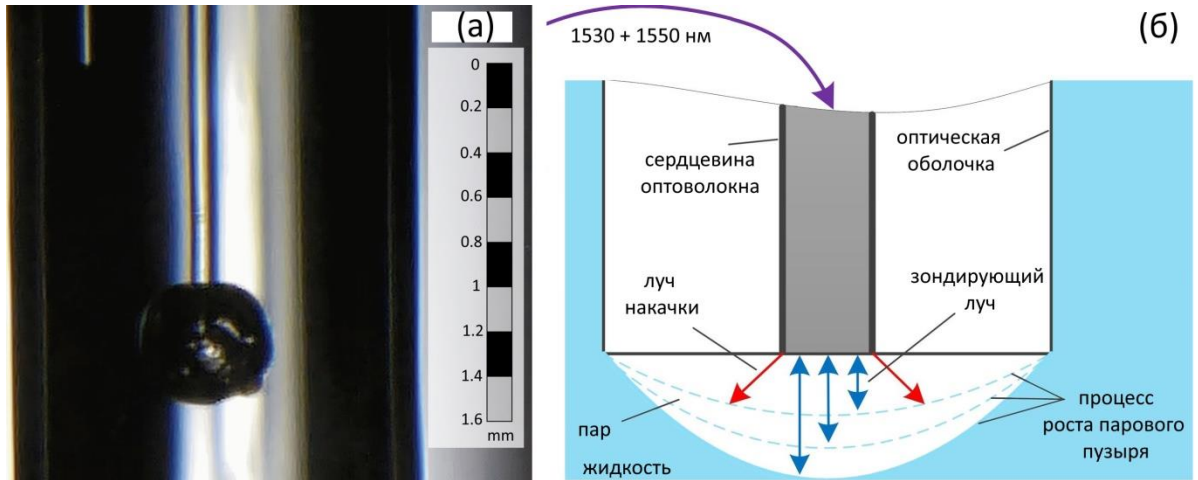


Рисунок 7 – Активированное вскипание: а – фотография парового пузыря на торце световода в перегретом *n*-пентане при задержке 50 мкс от момента активации и температуре опыта 123 °С; б – формирование отраженного зондирующего излучения по мере роста паровой пленки.

Условия активации вскипания *n*-пентана на торце световода

Опыты проводились в широкой области перегретых состояний *n*-пентана, от 80 °С до 135 °С, со сбросом давления до атмосферного. Использовались три одномодовых световода в рабочей части капилляра пузырьковой камеры. На рисунке 8 показана серия кривых минимальной мощности импульсов P_{im} , необходимых для активации вскипания перегретого *n*-пентана при разных температурах для каждого световода. Обнаружено, что световоды значительно различаются по уровню минимальной мощности импульсов, активирующих вскипание жидкости. Иницированное вскипание происходило на торце световода и носило ярко выраженный пороговый характер. Уменьшение мощности на 1–2 % ниже порога приводило к известной картине спонтанного вскипания.

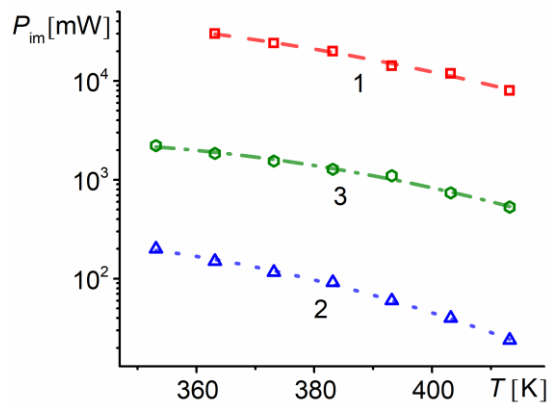


Рисунок 8 – Зависимости пороговых значений P_{im} мощности активирующих импульсов от значений температуры перегретого *n*-пентана на трех световодах (1, 2, 3) при длительности импульса 2 нс.

Измерения скорости переходных процессов при активации вскипания перегретого *n*-пентана

В ходе экспериментов по оптоволоконной денситометрии перегретой жидкости после активации вскипания было замечено появление высокочастотных колебаний на выходе быстродействующего фотодетектора отраженного излучения (рисунок 9).

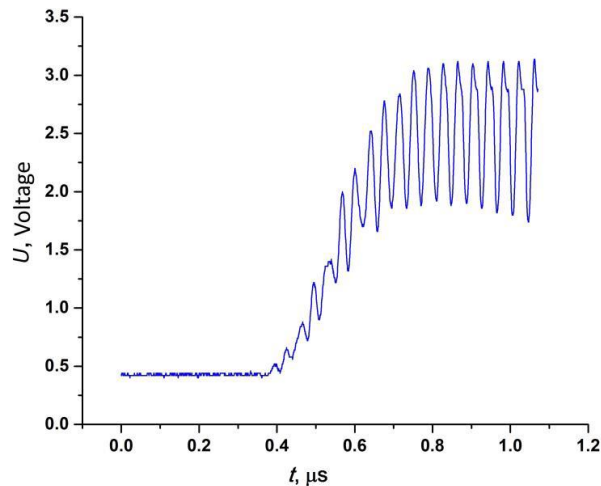


Рисунок 9 – Структура отраженного сигнала с интерференцией отраженных лучей от торца световода и движущейся границы раздела фаз после активации вскипания *n*-пентана при 125 °С лазерным импульсом.

Наблюдаемые колебания не связаны с изменениями плотности среды, а появляются в результате интерференции отраженных лучей. Поскольку зарождение и распространение границы раздела фаз приводит к образованию дополнительного отраженного сигнала, то в результате наложения его с отражением световых волн от неподвижного торца световода может образоваться бегущая интерференционная картина (рисунок 9), характерная для интерферометров с движущимся отражателем. Измеряя частоту регистрируемых колебаний, можно определить скорость перемещения отражающей границы раздела фаз. Соответствующий метод лазерных измерений носит название лазерной доплеровской велосиметрии.

Скорость перемещения границы раздела фаз определялась по соотношению доплеровской велосиметрии:

$$V(t) = F_D(t) \cdot \lambda / 2n(t), \quad (1)$$

где F_D – текущее доплеровское смещение частоты (МГц), λ – длина волны излучения лазерного диода (1,55 мкм), $n(t)$ – текущий показатель преломления среды:

$$n(t) = [n_{\text{liq}} - (n_{\text{liq}} - n_{\text{vap}}) \cdot U(t) - U_{\text{min}}] / (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}), \quad (2)$$

где n_{liq} , n_{vap} – показатели преломления жидкой и паровой фаз на линии насыщения при температуре опыта, соответственно; U_{min} , U_{max} – минимальное и максимальное средние значения выходного сигнала фотодетектора, соответствующие значениям n_{liq} , n_{vap} ; $U(t)$ – текущее среднее значение выходного сигнала.

ла фотодетектора. В большинстве случаев колебания развивались при разуплотнении до паровой фазы, поэтому $n(t) \Rightarrow 1$.

Скорость процесса роста паровой фазы была рассчитана по методу доплеровской велосиметрии. Зависимость сигнала рефлектометра от времени, полученная в процессе парообразования, содержит информацию об изменении среднего показателя преломления от времени, а также величины доплеровского смещения частоты от времени.

На рисунке 10 показаны зависимости, рассчитанные по частоте колебаний скорости движения парового фронта от времени при различных температурах опыта. Определение частоты колебаний и скорости было возможно только при достижении достаточной амплитуды сигнала, что проявляется в задержке начала измерений.

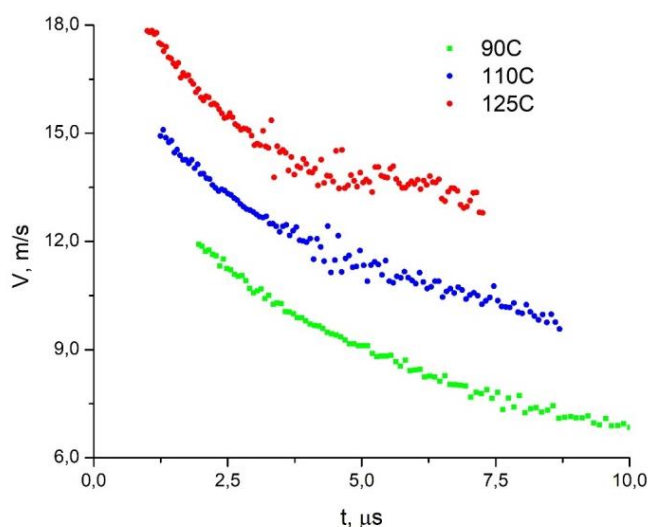


Рисунок 10 – Изменение скорости движения парового фронта от времени при различных начальных температурах перегретого *n*-пентана. Задержка отсчетов увеличивается для более низких температур в связи с уменьшением амплитуды регистрируемого сигнала в начале процесса.

В пятой главе рассмотрены разработанные метод и установка для исследования процессов тепловой релаксации на поверхности образцов металлов и полупроводников [6, 10–14, 16]. Обсуждается постановка задачи, метод и конструкция установки для проведения опытов по принципу «накачка-зондирование» с использованием световодов.

Разработаны метод и установка для изучения локальных тепловых процессов, использующие сочетание принципов лазерной диагностики и метода оптической терморефлектометрии по принципу «накачка-зондирование». Схема разработанной установки показана на рисунке 11. 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.

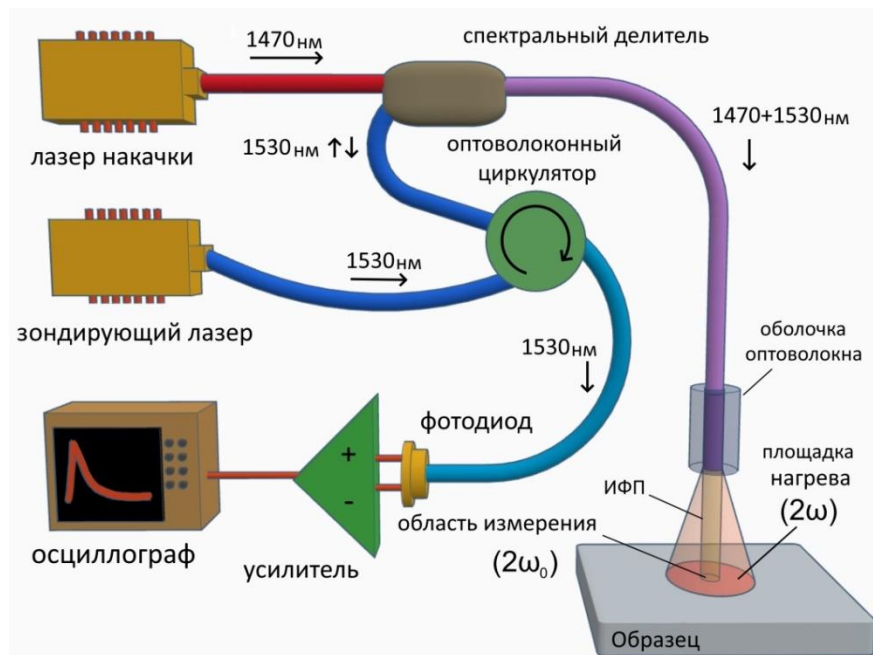


Рисунок 11 – Экспериментальная установка лазерного нагрева поверхности с помощью волоконно-оптического интерферометра (ИФП).

В качестве источников излучения использовались полупроводниковые лазерные диоды с оптоволоконным выходом. Лазерный диод мощностью $0,1\text{--}0,2\text{ Вт}$ с импульсной накачкой работает на длине волны 1470 нм и обеспечивает импульсный нагрев образца. Источник зондирующего излучения на основе лазерного диода работает на длине волны 1530 нм с непрерывной мощностью 1 мВт . Принцип работы волоконно-оптической схемы подробно описан в главе 3 (рисунок 3). Однако в данной установке дополнительный вклад в сигнал термоотражения вносит образованный в зазоре между торцом световода и поверхностью интерферометр Фабри-Перо (ИФП).

На рисунке 12 показана схема формирования интерферометра в зазоре световод-образец. На рисунке a_0 – падающий луч постоянного зондирующего излучения, зеленый – луч, образованный в результате интерференции, красный и синий – отраженные лучи от поверхности образца и границы раздела световод-воздух соответственно.

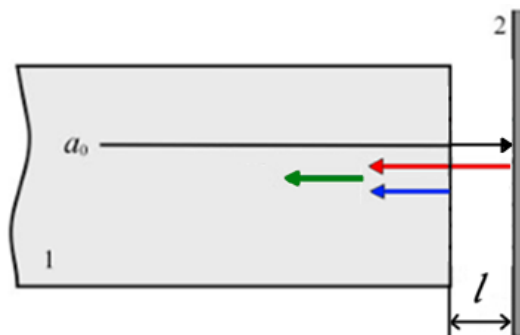


Рисунок 12 – Низкодобротный интерферометр Фабри-Перо в зазоре между торцом световода (1) и поверхностью нагреваемого образца (2).

В образовавшемся интерферометре можно пренебречь многократными отражениями и уравнение интерференции для зондирующего луча выразить в известной форме, связанной с гармоническим приближением функции Эйри:

$$I_r(t) = I_0 \cdot \eta \cdot (1 - R)^2 \cdot \left[1 + 2R \cdot \cos \left(\frac{4\pi n L(t)}{\lambda} + \varphi(t) \right) \right] \quad , (3)$$

где $I_r(t)$ – зависимость интенсивности излучения от времени на выходе ИФП, I_0 – начальная интенсивность излучения на входе ИФП, n – показатель преломления среды в зазоре интерферометра ($n \approx 1$), $L(t)$ – зависимость величины зазора от времени, λ – длина волны зондирующего излучения, $\varphi(t)$ – зависимость сдвига фазы отраженного от образца излучения от времени, η – коэффициент ослабления интенсивности излучения за счет расхождения пучка в зазоре интерферометра, R – совокупный коэффициент отражения поверхностей ИФП.

Относительная доля η мощности отраженного от образца зондирующего излучения, которая будет «захвачена» волокном в виде излучения основной моды, будет определяться интегралом перекрытия поля моды и падающего на торец излучения:

$$\eta = 1/(1+(L/L_0)^2), \quad (4)$$

где L_0 – Рэлеевская длина пучка – расстояние, на котором пучок расширяется в два раза, L – зазор интерферометра.

Моделирование процесса генерации сигнала термоотражения при импульсном нагреве поверхности

При импульсном нагреве поверхности наряду с изменениями оптических свойств присутствуют также термомодеформационные эффекты. Импульсный лазерный нагрев сопровождается локальным тепловым расширением приповерхностного слоя основного материала, которое приводит к возникновению механических напряжений в нагреваемом слое. Тепловое расширение происходит в тонком приповерхностном слое толщиной порядка $(a\tau)^{1/2}$, где a – температуропроводность материала поверхностного слоя, τ – длительность импульса излучения (для микросекундного импульса $(a\tau)^{1/2}$ составляет величину порядка нескольких микрон).

ИФП, образующийся в оптическом зазоре установки, обладает повышенной чувствительностью к локальным термоупругим эффектам. ИФП использован для обнаружения смещения поверхности образца из-за теплового расширения, вызванного повышением температуры. На рисунке 13 показана схема нагрева поверхности образца расходящимся лучом с выхода световода.

В данной схеме нагрева принято допущение о распределении мощности в нагреваемом луче по гауссову закону.

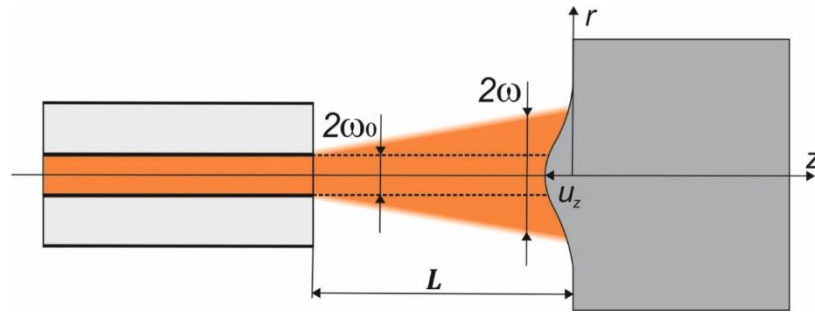


Рисунок 13 – Схема нагрева поверхности расходящимся лучом с выхода световода через зазор L . Диаметр поля моды световода $2\omega_0$, диаметр площадки нагрева 2ω . Амплитуда термодеформаций u_z связана с расширением материала образца от нагрева и может быть измерена интерферометром.

При поверхностном поглощении излучения размер нагретой области много больше глубины поглощения, и можно исходить из модели локального поверхностного теплового источника (использовано приближение Винценца [14]) :

$$W(r, t) = \frac{(1-R)}{c_p \rho_0} I(r, t) \delta(z), \quad (5)$$

где R , c_p , ρ_0 – коэффициент отражения света, удельная теплоемкость и плотность материала соответственно, $\delta(z)$ – дельта-функция.

Изменение температуры $T(r, t)$ для теплоизолированной поверхности:

$$T(r, t) = \frac{2E_0}{c_p \rho_0} \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2 + 4a\Delta t}\right)}{(4\pi a\Delta t)^{1/2} \pi(\omega^2 + 4a\Delta t)} f(t') dt', \quad (6)$$

где $E_0 = E(1 - R)$ – поглощенная энергия; a – температуропроводность материала; $\Delta t = t - t'$.

Сопутствующие термодформации по нормали к нагреваемой поверхности:

$$u_z = -u_0 \exp(-r^2/\omega^2) F(t) - u_0 \frac{2}{\pi} \int_0^t \int_0^{\pi/2} \frac{\exp\left(-\frac{r^2 \cos^2 \beta / \omega^2}{1 + \Delta t / \tau}\right)}{(1 + \Delta t / \tau)^{3/2} (\Delta t / \tau)^{1/2}} \times \left(\frac{r^2 \cos^2 \beta / \omega^2}{(1 + \Delta t / \tau)} - 1 \right) \frac{F(t') \cos^2 \beta}{\tau} dt' d\beta, \quad (7)$$

где $u_0 = 2(1 + \nu) \alpha_t \frac{E}{c_p \rho_0 \pi \omega^2}$ – амплитуда квазиодномерного режима, α_t – коэффициент линейного теплового расширения, ν – коэффициент Пуассона;

$F(t) = \int_0^t f(t') dt'$; $\tau = \omega^2 / 4a$ – характерное тепловое время.

Результаты апробации метода

Проведены сопоставления численного моделирования термодформационных эффектов в центре пятна нагрева и экспериментальных результатов измерения оптических сигналов тепловой релаксации.

Сопоставляя экспериментальные данные с данными моделирования, можно оценить влияние каждого фактора на формирование результирующего сигнала. На рисунке 14 приведены соответствующие зависимости, демонстрирующие преобладание механизма термодформаций в случае металлического образца. На приведенном графике зеленым показано относительное изменение температуры $T(0, t)$, синим – деформации $u_z(0, t)$ в центре пятна нагрева.

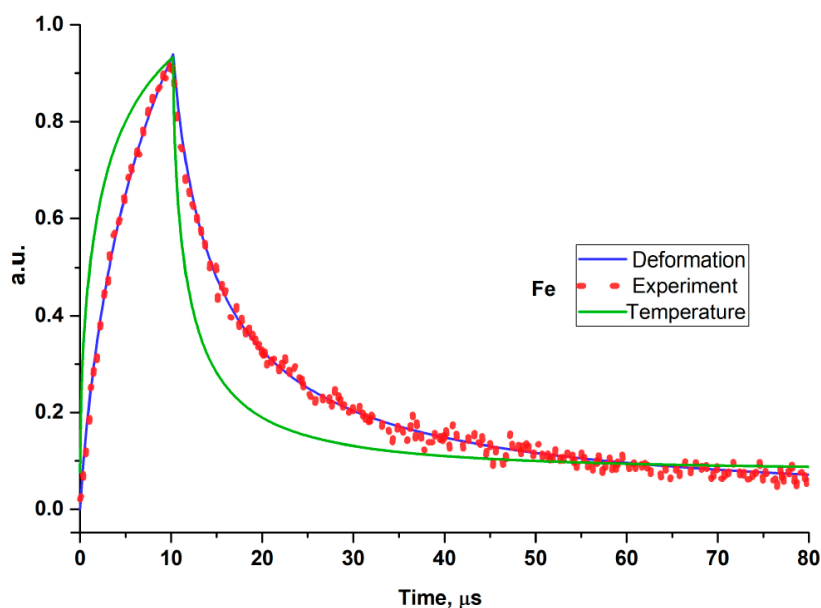


Рисунок 14 – Сравнение нормированных расчетных зависимостей изменения температуры и деформации в центре пятна нагрева с экспериментальными данными на образце Fe.

Можно видеть хорошее согласие экспериментальных данных с расчетной кривой деформации и запаздывание механической реакции в центре пятна нагрева относительно изменения температуры.

В заключении подведены итоги и сформулированы основные результаты исследования.

Основным итогом диссертационной работы автор считает возможность приложения разработанной техники и методов к современным теплофизическим исследованиям, в частности нестационарным и неравновесным тепловым процессам в конденсированных средах.

Основные результаты исследования

1. Разработано и изготовлено устройство с цифровым управлением для измерения относительного коэффициента теплоотдачи и исследования тепловых эффектов по методу двухимпульсного нагрева проволочного зонда. Устройство позволяет производить контролируемый нагрев зонда двумя импульсами постоянного тока регулируемой амплитуды до 5 А с шагом регулировки 0,1 мА (разрешение 10^{-4}). Малый шаг регулировки тока, а также стабильность условий нагрева, обеспечили высокую чувствительность (10^{-3}) к изменениям среднего относительного коэффициента теплоотдачи при малых добавках (10^{-5} – 10^{-4}) водных примесей в образцах углеводородов. Цифровая настройка параметров импульсного эксперимента позволила провести подбор условий нагрева для обеспечения высокой чувствительности при определении начала фазового перехода по механизму жидкость-жидкость для серии образцов расслаивающихся растворов.

2. Разработана оптоэлектронная схема «накачка-зондирование» для проведения импульсных экспериментов с лазерным воздействием на образец и одно-

временным считыванием отклика через один оптоволоконный зонд. Разработан и апробирован импульсный лазерный источник с цифровым управлением, обеспечивающий генерацию импульсов длительностью 1–100 нс с шагом регулировки в 1 нс, регулировку интенсивности в диапазоне от 50 мВт до 16 Вт с погрешностью установки в $\pm 1,5$ %. Разработан и изготовлен фотодетектор с коэффициентом передачи 100 мВ/мкВт, порогом чувствительности 200 нВт, цифровой компенсацией постоянной составляющей до 1 мВт и полосой пропускания в 100 МГц.

3. Разработанные оптоэлектронные устройства применены в установке с миниатюрной пузырьковой камерой для исследования активированного вскипания перегретой жидкости. Получены данные о пороге активации вскипания перегретого *n*-пентана на торце кварцевого световода в диапазоне температур перегрева 80–140 °С. Методом доплеровской велосиметрии впервые проведены измерения скорости перемещения границы паровой фазы после активации вскипания.

4. Разработана компактная оптоволоконная установка импульсного лазерного нагрева и считывания отраженного излучения на поверхности твердых образцов по принципу «накачка-зондирование». Проведены исследования изменения интенсивности отражения зондирующего излучения после локального импульсного нагрева (термоотражения) на образцах металлов и полупроводников в широкой области температур. Выполнены расчеты зависимостей температуры и деформации в центре пятна нагрева от времени при импульсном облучении поверхности лазерным пучком с гауссовым распределением мощности. Показано согласие результатов расчетов по термомодеформационной модели и экспериментальных данных для металлических образцов. Для полупроводниковых образцов выявлено различие данных эксперимента с моделью, которое, предположительно, объясняется дополнительным вкладом неравновесного поверхностного заряда в термооптический сигнал.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Лукьянов К.В. Импульсно-тепловой контроль летучих примесей в диэлектрических технологических жидкостях / К.В. Лукьянов, **А.Н. Котов**, А.А. Старостин // Датчики и системы. – 2014. – № 10. – С. 46-49. 0,25 п.л. / 0,08 п.л.

2. Starostin A. Digital device for thermophysical measurements by wire probe / A. Starostin, K. Luk'yanov, **A. Kotov**, P. Skripov, D. Volosnikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1327. – № 1. – P. 012031. 0,76 п.л. / 0,05 п.л. (Scopus).

3. Lukianov K.V. Heat transfer enhancement in superheated hydrocarbons with traces of water: the effect of pressure / K.V. Lukianov, **A.N. Kotov**, A.A. Starostin, P.V. Skripov // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2019. – Vol. 7. – № 3. – P. 283-294. 0,76 п.л. / 0,19 п.л. (Web of Science, Scopus).

4. Lukianov K.V. The effect of water traces on heat transfer in liquid hydrocarbons under pulse heating mode / K.V. Lukianov, **A.N. Kotov**, A.A. Starostin, P.V. Skripov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1385. – № 1. – P. 012057. 0,43 п.л. / 0,1 п.л. (Scopus).

5. **Котов А.Н.** Устройство для контролируемого импульсного теплового воздействия на вещество / **А.Н. Котов**, К.В. Лукьянов, В.Н. Сафонов, А.А. Старостин, В.В. Шангин // *Приборы и техника эксперимента*. – 2020. – № 6. – С. 133-134. 0,13 п.л. / 0,03 п.л.

6. Starostin A.A. Laser Pump Probe Fiber Optic Technique for Characterization of Near Surface Layers of Solids: Development and Application Prospects for Studying Semiconductors and Weyl Semimetals / A.A. Starostin, V.V. Shangin, A.T. Lonchakov, **A.N. Kotov**, S.B. Bobin // *Annalen der Physik*. – 2020. – Vol. 532. – № 8. – P. 1900586. 0,5 п.л. / 0,1 п.л. (Web of Science, Scopus).

7. **Котов А.Н.** Мониторинг качества масел и топлив по их тепловой прочности / **А.Н. Котов**, В.Н. Сафонов, А.А. Старостин, В.В. Шангин, Е.М. Шлеймович, П.В. Скрипов // *Инженерная экология*. – 2021. – № 2021. – С. 170. 0,07 п.л. / 0,01 п.л.

8. **Kotov A.N.** Low-energy activation of superheated n-pentane boiling-up by laser pulse at the fiber-liquid interface / **A.N. Kotov**, A.L. Gurashkin, A.A. Starostin, P.V. Skripov // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2022. – Vol. 10. – № 3. – P. 15-23. 0,57 п.л. / 0,14 п.л. (Web of Science, Scopus).

9. **Kotov A.N.** Nucleation of a Vapor Phase and Vapor Front Dynamics Due to Boiling-Up on a Solid Surface / **A.N. Kotov**, A.L. Gurashkin, A.A. Starostin, K.V. Lukianov, P.V. Skripov // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 19. – P. 6966. 0,88 п.л. / 0,17 п.л. (Web of Science, Scopus).

10. Lonchakov A.T. Study of the mercury chalcogenide single crystals by means of a combination of laser pump-probe thermoreflectance technique with Fabry–Perot interferometer / A.T. Lonchakov, A.A. Starostin, V.V. Shangin, S.B. Bobin, **A.N. Kotov** // *Journal of Applied Physics*. – 2023. – Vol. 133. – № 20. – P. 205701. 0,5 п.л. / 0,1 п.л. (Web of Science, Scopus).

11. Лончаков А.Т. Терморекфлектометрия монокристаллов селенида ртути в диапазоне 35-300 К в оптоволоконной схеме накачка-зондирование с интерферометром Фабри-Перо / А.Т. Лончаков, С.Б. Бобин, **А.Н. Котов**, А.А. Старостин, В.В. Шангин // *Письма в журнал технической физики*. – 2023. – Т. 49. – № 3. – С. 11-14. 0,25 п.л. / 0,05 п.л.

12. **Котов А.Н.** Установка для терморекфлектометрии полупроводниковых материалов в сильном магнитном поле при низких температурах / **А.Н. Котов**, А.А. Старостин, В.В. Шангин, С.Б. Бобин, А.Т. Лончаков // *Приборы и техника эксперимента*. – 2023. – № 4. – С. 89-91. 0,2 п.л. / 0,04 п.л.

13. **Kotov A.N.** Investigation of Semiconductor Materials by the Thermo-Optical Method in a Magnetic Field / **A.N. Kotov**, A.A. Starostin, V.V. Shangin, S.B. Bobin, A.T. Lonchakov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2023. – Vol. 87. – № 11. – P. 1580-1585. 0,38 п.л. / 0,08 п.л. (Scopus).

14. **Kotov A.N.** Thermo-Optical Measurements and Simulation in a Fibre-Optic Circuit Using an Extrinsic Fabry–Pérot Interferometer under Pulsed Laser Heating / **A.N. Kotov**, A.A. Starostin, V.I. Gorbatov, P.V. Skripov // *Axioms*. – 2023. – Vol. 12. – № 6. – P. 568. 0,76 п.л. / 0,19 п.л. (Web of Science, Scopus).

Патент на изобретение:

15. Пат. № 2699241 Российская Федерация, RU 2 699 241 C1, МПК G01N 25/56(2006.01), G01N 22/04(2006.01), G01F 23/24(2006.01). Устройство влагометрии технологических жидкостей / А.А. Старостин, В.Н. Сафонов, П.В. Скрипов, К.В. Лукьянов, **А.Н. Котов**; заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью Научно-внедренческая фирма «ТермоЭкспрессКонтроль» (RU). - № 2019103546; заявл. 07.02.2019; опубл. 04.09.2019; Бюл. № 25. 1,38 п.л. / 0,28 п.л.

Другие публикации:

16. Лукьянов К.В. Разработка устройства импульсно-теплового контроля технологических жидкостей / К.В. Лукьянов, **А.Н. Котов**, П.В. Скрипов // Сб. тез. III Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика - 2014». – г. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2014. – С. 86-91. 0,38 п.л. / 0,13 п.л.

17. Лукьянов К.В. Особенности теплообмена при импульсном нагреве растворов гексадекана с водой / К.В. Лукьянов, **А.Н. Котов**, А.А. Старостин, П.В. Скрипов // Сб. тез. Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ, Санкт-Петербург, 20–22 мая 2015 года. – г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015. – С. 90-96. 0,44 п.л. / 0,11 п.л.

18. **Котов А.Н.** Устройство импульсно-теплового контроля технологических жидкостей / **А.Н. Котов**, К.В. Лукьянов, А.А. Старостин, Д.А. Галкин // Сб. тез. Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ, Санкт-Петербург, 20–22 мая 2015 года. – г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015. – С. 71-76. 0,38 п.л. / 0,1 п.л.

19. **Котов А.Н.** Быстродействующая оптоволоконная денситометрия углеводородных флюидов / **А.Н. Котов**, А.А. Акашев, А.Л. Гурашкин, А.А. Старостин // Сб. тез. Международная научная конференция «Фазовые превращения в углеводородных флюидах: теория и эксперимент», Москва, 14–16 сентября 2016 года. – г. Москва: Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. – С. 51. 0,06 п.л. / 0,02 п.л.

20. Старостин А.А. Термооптический способ локальной диагностики приповерхностных слоев малых образцов / А.А. Старостин, **А.Н. Котов**, В.В. Шангин, А.Т. Лончаков // Сб. тез. Инновации в неразрушающем контроле, Екатеринбург, 26–28 июня 2019 года. – г. Томск: НИУ «Томский политехнический университет», 2019. – С. 63. 0,06 п.л. / 0,02 п.л.

21. Котов А.Н. Применение метода импульсной терморелефлектотрии на образцах селенида ртути / **А.Н. Котов**, А.А. Старостин, В.В. Шангин // Сб. тез. Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ, Санкт-Петербург, 23–24 мая 2019 года. – г. Санкт-Петербург: ФГАОУВО «НИУ ИТМО», 2019. – С. 120-124. 0,31 п.л. / 0,1 п.л.

22. Старостин А.А. Устройство теплового контроля диэлектрических жидкостей с программируемыми режимами нагрева / А.А. Старостин, **А.Н. Котов**, К.В. Лукьянов, Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий, П.В. Скрипов // Сб. тез. Инновации в неразрушающем контроле, Екатеринбург, 26–28 июня 2019 год. – г. Томск: НИУ «Томский политехнический университет», 2019. – С. 64. 0,06 п.л. / 0,01 п.л.

23. Лукьянов К.В. Влияние давления и влаги на теплообмен при импульсном нагреве проволочного зонда в предельных углеводородах / К.В. Лукьянов, **А.Н. Котов**, А.А. Старостин, П.В. Скрипов // Сб. тез. Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ, Санкт-Петербург, 23–24 мая 2019 года. – г. Санкт-Петербург: ФГАОУВО «НИУ ИТМО», 2019. – С. 138-143. 0,38 п.л. / 0,1 п.л.

24. Старостин А.А. Импульсная терморелефлектотрия полупроводников / А.А. Старостин, В.В. Шангин, А.Т. Лончаков, **А.Н. Котов**, С.Б. Бобин // Сб. тез. Электронные свойства низкоразмерных систем. Структура и свойства полупроводников с примесями переходных элементов. Новые электронные явления и материалы, Екатеринбург, 17–22 февраля 2020 года. – г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2020. – С. 195-196. 0,13 п.л. / 0,03 п.л.

25. Лукьянов К.В. Метод исследования теплоотдачи к предельным углеводородам с примесью влаги при импульсном нагреве / К.В. Лукьянов, **А.Н. Котов**, А.А. Старостин // Сб. тез. Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ, Санкт-Петербург, 27–28 мая 2021 года. – г. Санкт-Петербург: ФГАОУВО «НИУ ИТМО», 2021. – С. 58-63. 0,38 п.л. / 0,13 п.л.

26. Старостин А.А. Исследование релаксации тепловых возмущений в полупроводниковых материалах с помощью термооптического метода / А.А. Старостин, В.В. Шангин, **А.Н. Котов**, С.Б. Бобин, А.Т. Лончаков // Сб. тез. Материалы восьмой российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 17–22 октября 2022 года. – г. Москва: НИУ «МЭИ», 2022. – Т. 2. – С. 269-270. 0,13 п.л. / 0,03 п.л.

27. **Котов А.Н.** Настройка рабочей точки интерферометра Фабри-Перо в установке импульсного лазерного нагрева твердых тел при низких температурах / **А.Н. Котов**, А.А. Старостин, В.В. Шангин, С.Б. Бобин // Сб. тез. XXII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-22) памяти М.И. Куркина. – г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2022. – С. 208. 0,06 п.л. / 0,02 п.л.

28. Старостин А.А. Применение торцевого оптоволоконного датчика для термооптических исследований / А.А. Старостин, А.Л. Гурашкин, **А.Н. Котов**, В.В. Шангин // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. – 2023. – № 6. – С. 306. 0,065 п.л. / 0,02 п.л.