ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Зотова Арсена Кареновича «Оптические методы мониторинга криодеструкции биологических тканей с использованием сапфировых криоаппликаторов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа Зотова А.К. посвящена актуальной и междисциплинарной задаче разработки оптических методов мониторинга формирования ледяного слоя в биологических тканях в процессе криодеструкции с использованием криоаппликаторов на основе профилированных кристаллов сапфира. Криохирургия, основанная на направленном разрушении патологических тканей экстремально низкими температурами, относится к числу наиболее востребованных минимально инвазивных технологий современной медицины, однако её широкое клиническое применение сдерживается низкой предсказуемостью процесса формирования ледяного слоя и несовершенством существующих методов мониторинга. Традиционные металлические криоаппликаторы обладают рядом ограничений, связанных с неоднородностью теплового поля, адгезией биологических тканей и сложностью интеграции оптических методов контроля. Существующие методы визуализации (УЗИ, МРТ, КТ) характеризуются высокой стоимостью, сложностью интеграции в операционный процесс или недостаточной точностью. Автор диссертации решает комплексную научно-техническую задачу, охватывающую выращивание сапфировых кристаллов сложной геометрии методами с капиллярной подпиткой (EFG) и некапиллярного формообразования (NCS), экспериментальное сопоставление эффективности сапфировых и металлических криоаппликаторов, построение математической модели диффузного рассеяния излучения в двухслойной среде, а также разработку и апробацию двух взаимодополняющих методов оптического мониторинга - на основе анализа интенсивности диффузно рассеянного излучения и ТГц импульсной спектроскопии. Работа обладает выраженной научной и практической значимостью для развития минимально инвазивной криохирургии.

Основные результаты диссертационной работы:

- Выведены аналитические зависимости для программного управления весовым сигналом на этапе формирования переходной зоны, что обеспечило автоматизацию процесса выращивания и полное исключение газовых включений в объёме кристалла.
- Проведено систематическое экспериментальное исследование эффективности криоаппликаторов из различных материалов. Количественно продемонстрировано, что сапфировые аппликаторы по сравнению с медными и латунными аналогами обеспечивают достижение более низких температур, более интенсивное охлаждение биологических тканей и формирование ледяного слоя существенно большего объёма, а также характеризуются минимальной адгезией биологического материала к контактной поверхности.
- Построена математическая модель распространения диффузно рассеянного излучения в двухслойной среде на основе диффузионного приближения теории переноса излучения.
- Разработан и экспериментально верифицирован метод оптического мониторинга процесса криодеструкции на основе анализа интенсивности диффузно рассеянного излучения, обеспечивающий восстановление толщины ледяного слоя до 8 мм. Апробация метода успешно проведена на тканеимитирующих фантомах, а также на тканях печени лабораторных крыс in vivo с последующим гистологическим анализом контрольных срезов, что подтвердило работоспособность метода в условиях естественной вариабельности оптических свойств биологических тканей.
- Предложен метод мониторинга начальной стадии криодеструкции на основе ТГц импульсной спектроскопии, использующий выраженный диэлектрический контраст между

замороженной и незамороженной тканями. Метод обеспечивает восстановление толщины ледяного слоя до 650 мкм на ранних этапах криовоздействия.

- Сконструированы и изготовлены оригинальные сапфировые криоаппликаторы с интегрированными оптическими волокнами для реализации функции оптического мониторинга, а также разработана сапфировая оснастка для проведения ТГц-спектроскопических измерений. Разработанные конструкции защищены патентом РФ.

Замечания по автореферату диссертационной работы

1. Разработанный метод мониторинга на основе ТГц импульсной спектроскопии успешно апробирован на образцах жировой ткани ex vivo. Вместе с тем в клинической практике криодеструкция проводится на различных типах тканей (печень, почки, опухоли различной локализации), которые существенно различаются по содержанию свободной и связанной воды, что определяет их диэлектрические свойства в ТГц диапазоне. Представляется интересным обсудить перспективы применения разработанного метода для мониторинга криодеструкции тканей с различным водосодержанием и как это может повлиять на точность восстановления толщины ледяного слоя.

Отмеченные замечания не снижают научной ценности диссертационной работы и носят характер вопросов, на которые автор может ответить в ходе дискуссии.

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, перечисленным в «Положении о присуждении ученых степеней» ВАК РФ (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, ред. от 16.10.2024), а её автор, Зотов Арсен Каренович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник – заведующий лабораторией квантово-каскадных лазеров Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

_____ / **Хабибуллин Рустам Анварович**

«11» ноября 2026 г.

Согласен на обработку персональных данных

Контактная информация Адрес организации: 141701 Московская область, г. Долгопрудный, Первомайская улица, д. 5

Телефон: +7 910 463 79 30 E-mail: khabibullin.ra@mipt.ru

Подпись руки Р. А. Хабибуллина
заверяю:
Администратор канцелярии
Административного отдела
С.А. Кораблева

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации * Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования * «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ) * ОГРН 1027739266139 * ДЛЯ ДОКУМЕНТОВ * Административный отдел