

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук,  
ведущего научного сотрудника Доленко Татьяны Альдефонсовны  
на диссертационную работу Ромшина Алексея Максимовича  
«Термометрия на основе люминесцентных центров "кремний-вакансия"  
в наноалмазах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа А.М.Ромшина посвящена созданию новых оптических методов измерения температуры в наноскопических объемах. Разработка методов бесконтактной нанотермометрии является одним из ключевых направлений современной науки, востребованным в биомедицинских исследованиях, материаловедении и микроэлектронике. Измерение температуры с субмикронным разрешением необходимо для изучения тепловых процессов на уровне отдельных клеточных органелл, микро- и наноструктур, а также для разработки новых функциональных материалов и устройств. Особую ценность представляют люминесцентные наночастицы, способные точно регистрировать локальные температурные изменения. Среди различных классов люминесцентных термометров наноалмазы с дефектами типа «кремний-вакансия» (SiV) выделяются яркой и фотостабильной люминесценцией, нечувствительной к нетемпературным параметрам, что делает их особенно перспективными для высокоточных температурных измерений в сложных средах.

Диссертационная работа Ромшина А.М. полностью соответствует мировым тенденциям развития нанофотоники и квантовых сенсорных технологий. Исследования, направленные на создание и применение нанотермометров на основе SiV-центров в алмазах, имеют не только фундаментальную значимость, но и открывают широкие практические перспективы для развития новых методов диагностики, мониторинга биохимических процессов и теплового контроля в наноразмерных системах. Таким образом, актуальность работы определяется как высокой научной новизной поставленных задач, так и их соответствием современным требованиям прикладных исследований.

Диссертационная работа А.М.Ромшина изложена на 128 страницах, состоит из Введения, 4 глав, Заключение и Списка литературы, включающего 132 источника. Диссертационная работа иллюстрирована 46 рисунками. Изложение материала последовательно и логично.

Во Введении обсуждается актуальность проводимых исследований, формулируются цель, основные задачи, положения, выносимые на защиту, научная новизна диссертационной работы. Актуальность и цель работы хорошо обоснованы

с привлечением большого числа научных статей за последние годы. Поставленные задачи полностью соответствуют цели работы.

В первой главе представлен обзор современного состояния области люминесцентной нанотермометрии, рассмотрены существующие методы измерения температуры на субмикронном уровне, их преимущества и ограничения. Обоснован выбор алмазных наночастиц с SiV-центрами в качестве перспективной платформы для высокоточных температурных измерений. Показано, что несмотря на наличие различных типов люминесцентных термометров, использование алмазных частиц с SiV-центрами обладает рядом существенных преимуществ для решения задач нанотермометрии.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию люминесцентных характеристик алмазных частиц различного происхождения и размеров, содержащих SiV-центры. Проанализирована их пригодность для применения в задачах нанотермометрии. Представлены результаты измерений спектральных параметров люминесценции при комнатных и криогенных температурах, изучены эффекты лазерного нагрева частиц и количественно охарактеризован уровень шума показаний алмазного термометра-нагревателя. Следует отметить высокую грамотность и корректность работы со спектрами.

В третьей главе диссертационной работы исследуются пространственные и временные профили наноразмерных источников тепла в водной среде. Представлены результаты картирования температурных распределений вблизи микронного теплового источника с использованием алмазного термометра размером 500 нм. Показано, что такой термометр способен воспроизводимо картировать температурные градиенты до 40 °C/мкм. Измеренные экспериментальные данные хорошо согласуются с законом Фурье и результатами численного моделирования. Проведен анализ факторов, влияющих на точность измерений. Изучена динамика нагрева и остывания алмазных частиц различного размера под действием импульсного лазерного излучения. Установлена квадратичная зависимость времени установления температуры от диаметра частиц, а также определен коэффициент температуропроводности водной среды, результаты которого согласуются с известными табличными данными.

Большой научный интерес представляет материал четвертой главы диссертации, посвященный применению алмазных термометров на основе SiV-центров для измерения температуры в биологических системах, в частности, в митохондриях. В реальных условиях проведена апробация разработанного нанотермометра для измерения температуры митохондрий, изолированных из мозга мыши.

В Заключение соискателем сформулированы основные результаты, полученные при выполнении работы.

Диссертационная работа построена в полном соответствии с внутренней логикой развития исследования и изложения его результатов. Среди достоинств работы следует отметить тщательность и грамотность проведения спектроскопических исследований и обработки данных. Благодаря этому А.М.Ромшину удалось получить целый ряд совершенно новых важных результатов. Исследована температурная чувствительность люминесценции SiV-центров в алмазных частицах различного происхождения и выявлении ее зависимости от метода синтеза. Установлено, что наилучшие характеристики демонстрируют наноалмазы, полученные HPHT-синтезом из адамантана, обладающие рекордно узкой шириной линии люминесценции одиночного SiV-центра (94 МГц) при криогенных температурах. Показано, что поликристаллические CVD-алмазы совмещают свойства термометра и эффективного локального нагревателя. Разработан метод исследования динамики тепловых процессов с использованием одиночных алмазных частиц. Впервые осуществлены температурные измерения вблизи биологических объектов субмикронного размера с применением CVD-алмазов с SiV-центрами.

Достоверность основных результатов диссертационной работы обоснована корректным применением методов и методик исследования, использованием адекватных физических моделей и правомерных допущений. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных журналах (в том числе первого квартиля) из списка ВАК и в 8 тезисах конференций. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на многочисленных Всероссийских и Международных конференциях.

При общей положительной оценке работы считаю необходимым сделать следующие замечания:

- 1) К сожалению, в главе 1 – обзоре литературы – отсутствует сравнительный анализ основных характеристик имеющихся люминесцентных нанотермосенсоров локального окружения, что позволило бы четче обосновать преимущества разработанного автором диссертационной работы термосенсора на основе наноалмазов с Si-V центрами.
- 2) Из характеристик термометров более информативной является относительная чувствительность параметра к температуре. Такая величина показывает зависимость точности измерения температуры от диапазона ее изменения (п.2.1.3.).
- 3) Каковы квантовые выходы люминесценции исследованных наноалмазов/ансамблей Si-V центров на длинах волн возбуждающего излучения – 473 нм, 532 нм? Как эта характеристика зависит от методов синтеза и очистки наноалмазов с Si-V центрами?
- 4) Почему уровень шума термометра был исследован только для термометра на основе (HPHT+CVD) алмазов, если в предыдущем параграфе был сделан вывод,

что наиболее оптимальными для использования в качестве термосенсоров являются НРНТ-алмазы (раздел 2.4.)?

- 5) В разделе 2.4 уровень шума термометров анализируется для частиц четырех размеров, но в каждом случае представлены данные только для одной частицы. Отсутствие усреднения по ансамблю частиц или анализа разброса параметров делает выводы по размерной зависимости чувствительности и уровня шума менее надежными. Следовало бы показать повторяемость измерений хотя бы на 3–5 термометрах каждого размера.
- 6) В п.3.1. очень подробно исследованы особенности влияния на температурное поле нагревателя и точность измерения пространственного распределения температуры характеристик алмазной частицы в водной среде. В заключении к главе 3 сделан следующий вывод: «Полученные результаты позволяют точно оценивать тепловые свойства на границе раздела «алмаз-среда» и подчеркивают потенциал алмазных люминесцентных нанотермометров для измерения температуры в биологических объектах». Какие среды имеются в виду? Проводились ли подобные оценки для биологических тканей, в которых содержание воды зависит от вида клеток и тканей и колеблется от 10 % в клетках эмали зуба до 90 % в клетках развивающегося зародыша? Этот вопрос тем более интересен, так как апробация нанотермометра проведена на митохондриях, в состав которых входит целый ряд различных белков, ферментов, жирных кислот и т.д.

Сделанные замечания не несут принципиального характера и не могут существенным образом повлиять на общую, несомненно, положительную, оценку рецензируемой работы. Все выносимые на защиту результаты являются новыми, обоснованными и значимыми. Материалы диссертации полностью отражены в опубликованных научных работах по тематике исследования. Полученные данные являются основанием для дальнейшего развития исследований. Автореферат удовлетворяет предъявленным требованиям, и в полной мере отражает результаты и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа Ромшина Алексея Максимовича «Термометрия на основе люминесцентных центров "кремний-вакансия" в наноалмазах» является законченной научно-квалифицированной работой, которая выполнена на высоком научном уровне, имеет очевидную новизну и практическую значимость, соответствует паспорту специальности «Лазерная физика» (1.3.19) и отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года (ред. от 16 октября 2024 года), полностью соответствует требованиям новизны, научно-практической значимости и достоверности, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации Ромшин Алексей Максимович показал себя



высококвалифицированным специалистом и безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник физического факультета

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, руководитель группы лазерной спектроскопии наносистем в жидких средах, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03 Радиофизика, включая квантовую радиофизику

Адрес места работы: 119991. Москва. Ленинские горы, д. 1

Контактные данные:

Тел.: +79165146388

E-mail: tdolenko@mail.ru

Доленко Татьяна Альдефонсовна

12 мая 2025 г.

Согласна на обработку персональных данных

Доленко Татьяна Альдефонсовна

12 мая 2025 г.

Подпись ведущего научного сотрудника к.ф.-м.н. Доленко Татьяны Альдефонсовны заверяю

И.О.Декана физического факультета МГУ,  
профессор

В.В.Белокуров

12 мая 2025 г.