

*На правах рукописи*

*Ромшин*

**Ромшин Алексей Максимович**

**ТЕРМОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЦЕНТРОВ  
“КРЕМНИЙ-ВАКАНСИЯ” В НАНОАЛМАЗАХ**

Специальность: 1.3.19. Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

**Научный руководитель:**

**Власов Игорь Иванович** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Углеродной Нанопластики ОСПЯ ЦЕНИ ИОФ РАН

**Официальные оппоненты:**

**Маньшина Алина Анвяровна** – доктор химических наук, профессор кафедры лазерной химии и лазерного материаловедения Института химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского государственного университета.

**Доленко Татьяна Альдефонсовна** – кандидат физико-математических наук, 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.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук.

Защита диссертации состоится 02 июня 2025 года в 16:30 на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при ИОФ РАН по адресу: 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН и на сайте <https://diss.gpi.ru/all/>

Автореферат диссертации разослан

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.223.03

канд. физ.-мат. наук  
тел.: +7 (499) 503-8780

Александр Валентинович Осадчий

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность выбранной темы** обусловлена современным интенсивным развитием люминесцентных методов измерения температуры в наноскопических объемах для решения задач в области биомедицины, биохимии и микроэлектроники. Первые работы, демонстрирующие перспективы использования люминесцентных наночастиц для температурных измерений, были опубликованы в начале 2000-х годов [1, 2]. Несмотря на значительный прогресс в разработке таких материалов, люминесценция большинства из них остается недостаточно фотостабильной, подверженной эффектам самопоглощения и фотообесцвечивания, а также чувствительной к нетемпературным параметрам внешней среды, таким как локальные электромагнитные поля, pH, вязкость, показатель преломления и прочие, что сильно затрудняет их применение в задачах, связанных с изучением тепловых процессов в биологических средах и полупроводниковых наноструктурах.

Одним из наиболее перспективных направлений для микро- и наноскопической термометрии представляется применение наноалмазов (<1 мкм), содержащих примесные дефекты, люминесцентные и спиновые свойства которых зависят от температуры. Наноалмазы с термочувствительными центрами представляют собой закрытую термодинамическую систему, что предотвращает прямой контакт датчика температуры с окружающей средой, и делает его идеальным наноразмерным термометром слабо чувствительным к другим внешним параметрам.

Применение наноалмазов для измерения температуры было предложено впервые в 2013 году. Локальные температурные измерения были проведены с помощью оптически детектируемого магнитного резонанса (ODMR) для спиновых переходов в наноалмазах, содержащих центры «азот-вакансия» (NV) [3], включая измерения внутри живой клетки [4]. Позднее был изготовлен наногибрид – флуоресцентный наноалмаз (нанотермометр) и золотой наностержень (наноагрегатор) [5, 6], позволивший получить контролируемый наноразмерный источник тепла. К недостаткам такого подхода относятся чувствительность спиновых состояний NV-центров к внешним параметрам и необходимость использования высокочастотного электро-магнитного поля для контроля спинового состояния NV-центра.

В настоящей работе в качестве люминесцентного зонда предложено использовать алмазные частицы, содержащие центры окраски “кремний-вакансия” (SiV, англ. Silicon-Vacancy). Люминесценция SiV-центров характеризуется яркой и узкой бесфононной линией (БФЛ) в первом биологическом окне прозрачности, стабильна и не подвержена фотообесцвечиванию. Механизм считывания температуры основан на зависимости спектрального положения и ширины БФЛ SiV-центров. Такой полностью оптический подход к измерению температуры свободен от недостатков, присущих ранее предложенному методу, основанному на использовании спиновых переходов центров «азот-вакансия» в алмазе [3].

На сегодняшний день алмазные частицы с SiV-центрами получают преимущественно методами высокого давления и температуры (HPHT) или газофазного осаждения (CVD), что позволяет оптимизировать их характеристики для конкретных задач.

Автор настоящей работы входит в состав научного коллектива (лаборатория Углеродной нанофотоники ИОФ РАН), который одним из первых в мире начал развивать оптический метод детектирования локальных температурных полей с помощью наноалмазов, содержащих люминесцирующие SiV-центры [7, 8]. Благодаря результатам, полученным автором в ходе диссертационной работы, в настоящее время коллектив занимает лидирующие позиции в мире в области оптической наноалмазной термометрии.

### **Цель и задачи**

**Целью** настоящего диссертационного исследования является разработка нового оптического метода детектирования локальных температурных полей с помощью наноалмазов, содержащих люминесцирующие центры “кремний-вакансия” (SiV-центры).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование особенностей температурной зависимости спектральных характеристик SiV-центров для алмазных частиц различного происхождения и различного размера при комнатных и криогенных температурах.
2. Объединение свойств температурного сенсора и управляемого нагревателя в одной алмазной частице.

3. Изучение временных процессов установления стационарной температуры в алмазных термометрах-нагревателях различных размеров в водной среде с субмикросекундным разрешением.
4. Апробация алмазного термометра для высокоточных измерений локальной температуры внутри или вблизи живых клеток и органелл.

### **Научная новизна работы**

1. Обнаружено, что температурная чувствительность SiV-центров зависит от метода синтеза алмазных частиц. Наибольшей температурной чувствительностью обладают алмазы, синтезированные при высоком давлении и высокой температуре (НРНТ методом) из адамантана.
2. Установлено, что наноалмазы, синтезированные НРНТ методом из адамантана, имеют самую узкую ширину линии (94 МГц) излучения одиночного SiV-центра при криогенных температурах среди известных SiV-содержащих наноалмазов, полученных НРНТ и CVD методами.
3. Установлено, что поликристаллические алмазные частицы, синтезированные CVD методом и содержащие люминесцирующие SiV-центры, сочетают в себе свойства как термометра, так и эффективного нагревателя.
4. Предложен новый метод изучения динамики тепловых процессов в наноразмерных системах, основанный на использовании одиночной алмазной частицы, сочетающей свойства термометра и нагревателя.
5. Впервые CVD алмазные частицы с SiV-центрами успешно апробированы для измерения температуры вблизи органелл размером  $\sim 1$  мкм.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Развитый в настоящей работе оптический метод детектирования локальных температурных полей с помощью наноалмазов, содержащих люминесцирующие SiV-центры, открывает новые технологические возможности как в области биомедицины:

- достоверный мониторинг теплопродукции вблизи/внутри живой клетки,
- ультралокальное термическое управление структурными и биохимическими процессами в клетке,

так и в области микроэлектроники:

- выявление конструктивных недостатков на стадии разработки электронных интегральных схем и контроль качества при их серийном производстве.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке нового подхода для точного определения спектрального положения линий различных люминесцентных источников.

### **Методология и методы исследований**

1. В данном исследовании используется комплексный подход, объединяющий оптические, спектроскопические и криогенные методы анализа для изучения алмазных наночастиц с SiV-центрами. Методология включает в себя этапы подготовки образцов, измерения при различных температурных режимах и последующего анализа данных с использованием математического моделирования и статистической обработки.
2. Рамановская спектроскопия применяется для оценки структурного качества алмазных частиц, выявления примесей и дефектов в кристаллической решетке.
3. Люминесцентная микроскопия и спектроскопия используется для детектирования люминесценции и анализа спектральных параметров SiV-центров в алмазных наночастицах и термометров на их основе.
4. Исследования при криогенных температурах проводят с помощью метода резонансной стоксовой флуоресценции, что позволяет выявить дублетную структуру переходов и снизить тепловое уширение линий.
5. Для определения спектрального положения и ширины бесфононной линии (БФЛ) SiV-люминесценции используется метод Левенберга-Марквадта.
6. Все эксперименты проводятся с использованием конфокального микроскопа, оснащенного лазерными источниками возбуждения люминесценции и охлаждаемой ПЗС-матрицей для регистрации люминесценции, а также высокоразрешающего спектрометра для спектрального анализа.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В наноалмазах, синтезированных НРНТ методом из адамантана, коэффициенты температурной чувствительности спектрального положения и ширины бесфононной линии люминесценции SiV-центров, составляют  $0.013 \text{ нм}/^\circ\text{C}$  и  $0.05 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ , соответственно, в температурном диапазоне от  $20$  до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2. Алмазная частица размером 200 нм, синтезированная НРПТ методом из адамантана, демонстрирует самую узкую ширину линии излучения одиночного SiV-центра при криогенных температурах среди известных SiV-содержащих алмазных частиц аналогичного размера – 94 МГц.
3. Поликристаллическая CVD-алмазная частица, содержащая люминесцирующие SiV-центры, сочетает в себе свойства как термометра, так и управляемого нагревателя. Амплитуда локального нагрева такой частицы размером 250 нм в водной среде под воздействием излучения на длине волны 473 нм достигает 6.5 °С на пошаговое увеличение плотности мощности 1 мВт/мкм<sup>2</sup>.
4. Для алмазной частицы размером 900 нм в водной среде время, необходимое для достижения стационарной температуры при нагреве на 10 °С, составляет 1.31 мкс, тогда как время остывания до температуры окружающей среды составляет 21.9 мкс.
5. Локальное повышение температуры вблизи метаболически активных митохондрий размером ~1 мкм, измеренное с помощью алмазного термометра, составляет в среднем 12 °С.

### **Личный вклад**

Личный вклад соискателя в диссертационную работу является определяющим и заключается в активном участии в постановке задач, определении способов их решения, сборке и юстировке экспериментальных установок, автоматизации измерений, проведении экспериментов и численных расчетов, анализе, обработке и интерпретации полученных данных, написании текстов статей. Все результаты, представленные в работе получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

### **Степень достоверности**

Достоверность полученных данных обеспечивается высоким уровнем использованного экспериментального оборудования; применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных; сравнением полученных результатов с имеющимися литературными данными; воспроизводимостью результатов; публикацией материалов исследования в высокорейтинговых научных журналах и докладами на всероссийских и международных конференциях.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на Всероссийских и международных конференциях: XXIV Объединенная международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» и «Квантовая информатика и квантовые сенсоры на основе алмазов», Казань, 10-11 декабря 2020; Школа-конференция молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели», Москва, 8-10 декабря 2020; VIII International School and Conference on Photonics “Photonica2021”, Belgrade, Serbia, 23-27 August 2021; VI International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2022», Moscow, 3-7 October 2022; XXVI научная школа-конференция молодых учёных по физиологии высшей нервной деятельности и нейрофизиологии, Москва, 26-27 октября 2022; VII Съезд биофизиков России, Краснодар, 17-23 апреля 2023; 31st international conference Advanced Laser Technologies (ALT 2024), Vladivostok, 23-27 September 2024.

### **Публикации по теме диссертации**

Основные результаты диссертационного исследования представлены в 8 тезисах конференций и 8 публикациях в рецензируемых научных изданиях, включая 7 статей в журналах, индексируемых в международной базе данных Web of Science.

### **Объем и структура диссертации**

Работа изложена на 123 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 132 источника. Диссертационная работа иллюстрирована 46 рисунками.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель исследования, указываются научная новизна и практическая значимость, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер. В ней приведены сведения о современных методах наноразмерной термометрии, их преимуществах и недостатках, а



также обоснован выбор алмазных наночастиц с SiV-центрами для температурных измерений на субмикронном масштабе.

В п. 1.1 рассматриваются основные принципы наноразмерной термометрии, вводятся основные характеристики нанотермометров на основе люминесцентных материалов, включая абсолютную и относительную чувствительность, пространственное разрешение, диапазон измерений, время отклика, неопределенность показаний и другие.

В п. 1.2 описаны основные принципы и стратегии люминесцентной термометрии. Проведен краткий обзор люминесцентных материалов, использующих температурную зависимость интенсивности, времени жизни, спектрального положения, соотношения между спектральными полосами излучения (возбуждения), анизотропии поляризации люминесценции, частотного сдвига оптически детектируемого магнитного резонанса в оптической нанотермометрии. Среди таких материалов особо выделяются органические красители, квантовые точки, легированные редкоземельными комплексами наночастицы, углеродные точки, полимерные комплексы и наноалмазы. Представлены основные методы получения алмазных наночастиц. Кратко описаны пространственная и энергетическая структура центров окраски “азот-вакансия” и “кремний-вакансия” в алмазе. Проведен обзор работ, посвященных разработке сенсоров температуры на основе наноалмазов. Обозначены недостатки сенсоров, использующих зависимость спинового состояния NV-центров от температуры.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию люминесцентных свойств алмазных частиц различного происхождения и размеров, содержащих SiV-центры, а также анализу их применимости в качестве нанотермометров. Представлены результаты измерений спектральных параметров люминесценции при комнатных и криогенных температурах, амплитуды нагрева алмазных частиц под действием лазерного излучения, а также уровня шума показаний алмазного термометра-нагревателя (АТН).

П. 2.1 посвящен изучению температурной чувствительности люминесценции SiV-центров в алмазных частицах различного происхождения.

В п. 2.1.1 описаны методы синтеза алмазных частиц, процедура подготовки их к измерениям и представлена экспериментальная установка для измерения температурной чувствительности (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для измерения температурной чувствительности SiV-центров в алмазных частицах.

В п. 2.1.2 описывается процедура аппроксимации и алгоритм определения спектрального положения и полной ширины на полувысоте (далее - ширина) бесфоновой линии люминесценции SiV-центров. Приводятся значения систематических погрешностей.

В п. 2.1.3 содержатся результаты экспериментальных измерений, описание которых начинается с демонстрации РЭМ-изображений алмазных частиц различного происхождения, свидетельствующих о том, что HPHT-алмазные частицы обладают ярко выраженной сингулярной огранкой и являются монокристаллами, тогда как для комбинированных (HPHT+CVD) и CVD-алмазных частиц характерна поликристаллическая структура. Последующий спектральный анализ обнаруживает наличие аморфной  $sp^2$ -углеродной фазы в (HPHT+CVD)- и CVD-частицах, которая характерна для межкристаллитных границ алмазных поликристаллов. В спектре КР HPHT-частицы аморфной фазы не наблюдается. Для всех типов частиц наблюдается яркий пик люминесценции SiV-центров на длине волны  $\sim 738$  нм (Рисунок 2). В конце раздела приводятся результаты измерений температурной зависимости спектрального

положения и ширины БФЛ SiV-центров в диапазоне температур от 20 до 60 °С (Рисунок 3). В соответствии с литературными данными, полученные зависимости аппроксимируются кубической функцией температуры, что обуславливается взаимодействием Яна-Теллера второго порядка между  $E$ -симметричными электронными состояниями центра и  $E$ -симметричными акустическими фоновыми модами в алмазной решетке [9]. Приводятся результаты определения температурной чувствительности спектрального положения и ширины БФЛ SiV-центров в алмазах различной природы. Наибольшую чувствительность демонстрируют HPHT-частицы  $\langle S_{\lambda_{center}}^{HPHT} \rangle = 1.3 \cdot 10^{-2}$  нм/°С и  $\langle S_{FWHM}^{HPHT} \rangle = 5.0 \cdot 10^{-2}$  нм/°С с минимальными среди всех частиц стандартными отклонениями  $1.5 \cdot 10^{-3}$  и  $6.1 \cdot 10^{-3}$  нм/°С соответственно. Аналогичные характеристики для CVD-частицы уступают HPHT- и (HPHT+CVD)-частицам в 1.4 и 1.7 раза по ширине и положению соответственно.

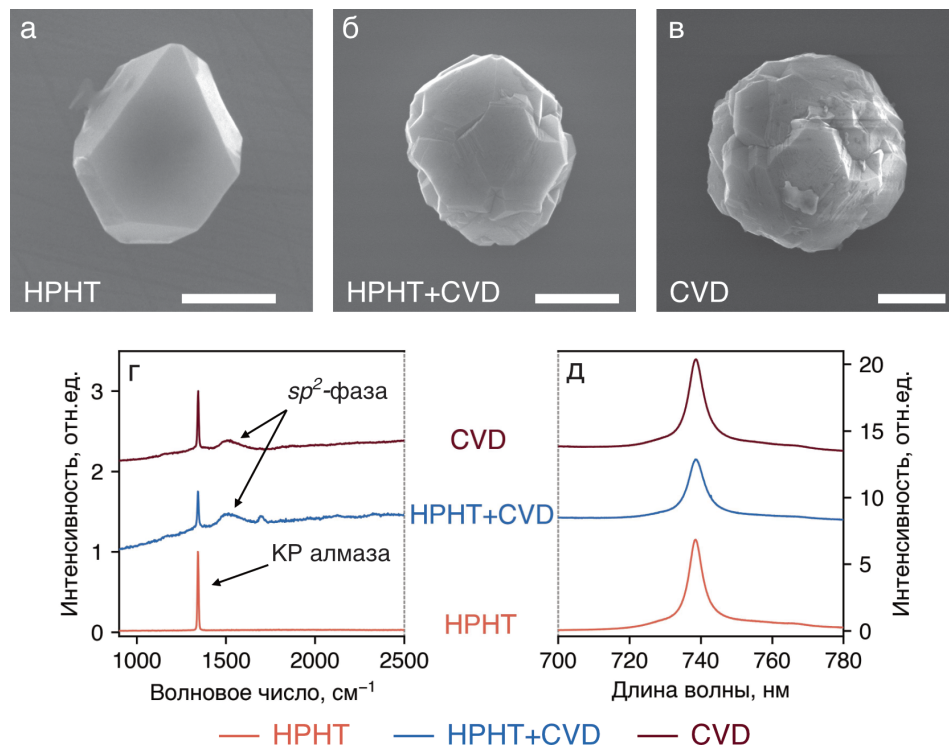


Рисунок 2 – Репрезентативные РЭМ-изображения HPHT- (а), (HPHT+CVD)- (б) и CVD- (в) алмазных микрочастиц. Масштабная линия в правом нижнем углу соответствует 1 мкм. (г)-(д) Соответствующие спектры КР и люминесценции SiV-центров при 473-нм лазерном возбуждении.

В п. 2.2 изучается люминесценция SiV-центров в алмазных микрочастицах различного типа при криогенных температурах. Приводится объяснение высокой температурной чувствительности таких наноалмазов, измеренной в п. 2.1.

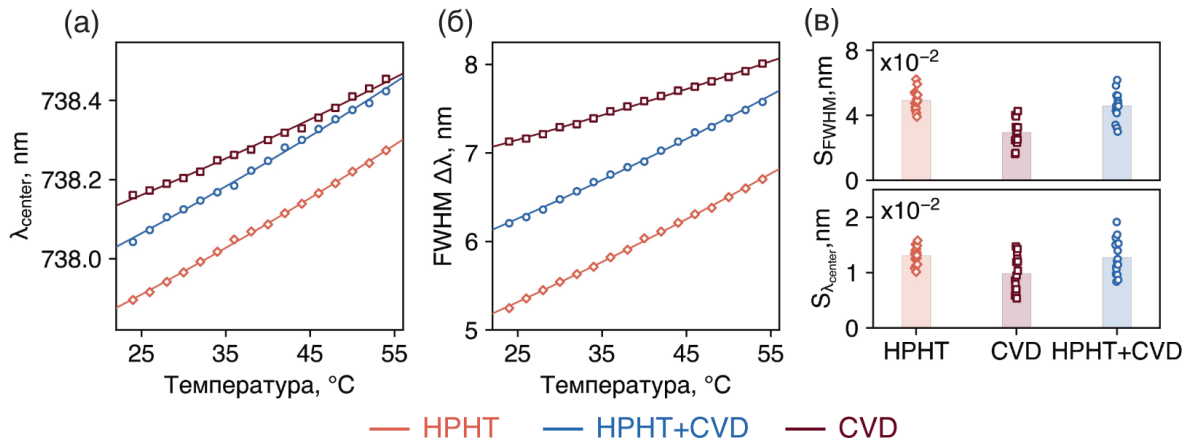


Рисунок 3 – Температурная зависимость сдвига (а) и ширины (б) БФЛ люминесценции SiV-центров в алмазных микрочастицах различного типа. (в)-(г) Чувствительность ширины и положения БФЛ к температуре соответственно для частицы каждого типа, определенная между последовательными парами экспериментальных точек зависимостей (а)-(б).

В п. 2.2.1 описываются экспериментальные методы изучения люминесценции SiV-центров при резонансном и нерезонансном возбуждении при криогенных температурах.

В п. 2.2.2 приводятся результаты спектральных измерений для микронной алмазной частицы, содержащей около  $10^3$  SiV-центров, и частицы размером 200 нм, содержащей один SiV-центр (Рисунок 4). Для первой частицы определяются величины минимального неоднородного уширения, связанного с перекрытием спектральных линий отдельных центров. Для одиночного SiV-центра в 200-нм алмазной частице приводятся значения ширин отдельных переходов с минимальным значением для D-перехода (94 МГц), определяемым временем жизни люминесценции при данной температуре.

В п. 2.3 представлены результаты измерений амплитуды нагревания алмазных частиц, расположенных (а) на германиевой подложке и (б) в водной среде, под действием лазерного излучения на длине волны 473 нм. Описывается метод конструирования системы “алмаз-микрокапилляр”. Приведены зависимости температуры нагревания частиц различного происхождения от мощности возбуждения (Рисунок 5). Наибольшую эффективность нагрева 3 °C/мВт (германий) и 6.5 °C/мВт (вода) демонстрируют

поликристаллические алмазные частицы, синтезированные CVD-методом, ввиду повышенного поглощения лазерного излучения  $sp^2$ -гибридизованным углеродом, присутствующем на межкристаллитных границах.

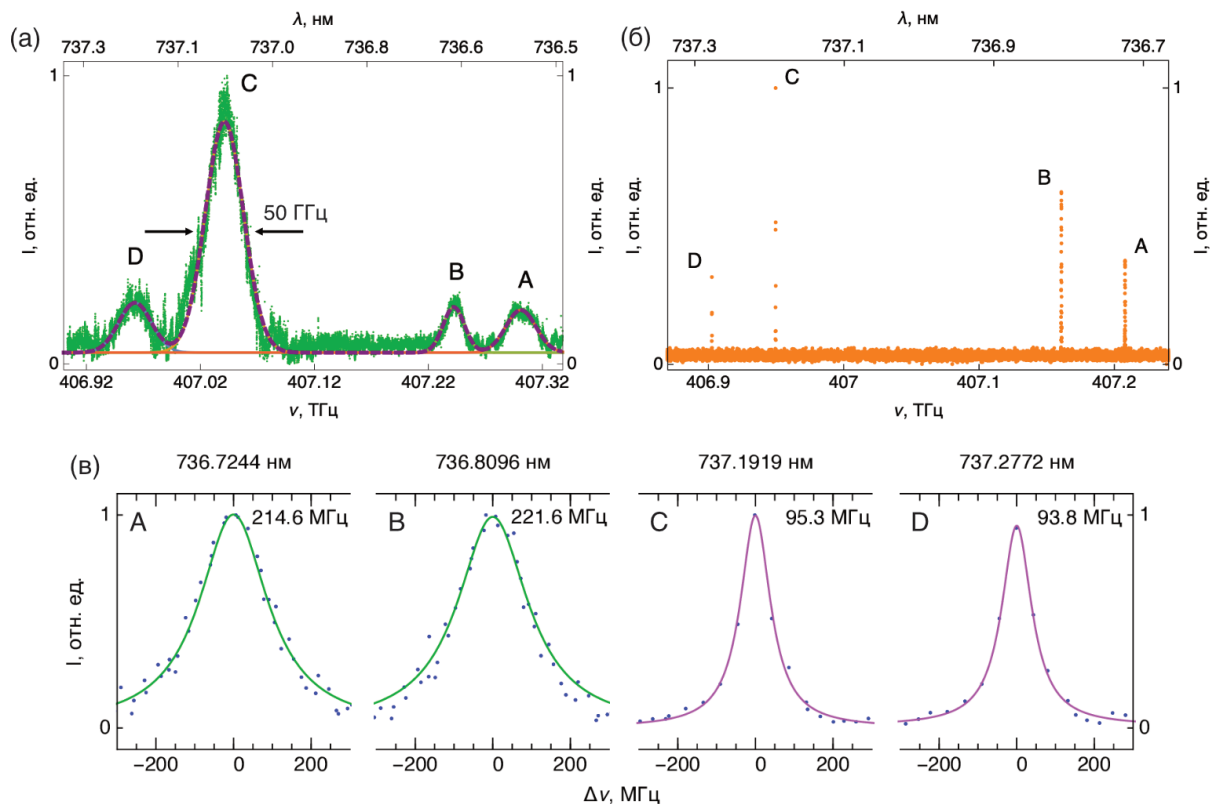


Рисунок 4 – Спектры резонансного возбуждения люминесценции (а) ансамбля SiV-центров в частице размером 1 мкм, измеренный при 2.3 К, (б-в) одиночного SiV-центра в частице размером 200 нм: (б) полный спектр, (в) четыре пика А-В-С-Д в увеличенном масштабе; в правом верхнем углу показана их ширина на полувысоте.

В п. 2.4 представлены результаты экспериментальных измерений уровня шума алмазных термометров-нагревателей (АТН), полученных комбинированным методом НРНТ+CVD, в зависимости от их размера и мощности возбуждающего лазерного излучения на длине волны 532 нм. Проведен анализ флуктуаций спектрального положения и ширины бесфонной линии SiV-центров в зависимости от длительности накопления сигнала.

**Третья глава** посвящена изучению пространственных и временных профилей наноразмерных источников тепла в водной среде.

В п. 3.1 приводятся результаты картирования распределения температуры вблизи микронного теплового источника (агрегат алюминиевых частиц) в водной среде с

помощью алмазного термометра размером 500 нм. Представлены результаты численного моделирования измеряемой алмазом температуры, выявляющие температурное плато внутри алмазного термометра из-за его высокой теплопроводности. Проведено сравнение экспериментальных данных с распределением температуры, определяемым законом Фурье, а также с модельными расчетами. Установлено, что алмазный термометр воспроизводимо картирует температурные градиенты вплоть до 40 °С/мкм. Проанализированы факторы, вносящие неопределенность в измерения.

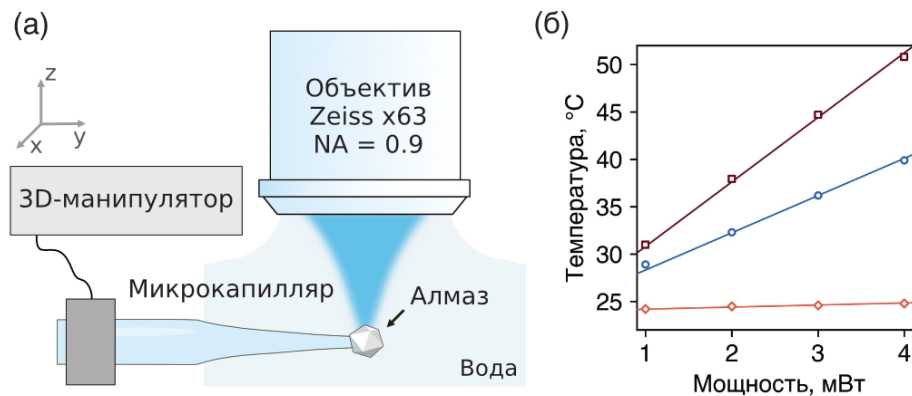


Рисунок 5 – (а) Схема измерений амплитуды локального нагрева алмазных микрочастиц на торце микрокапилляра в водной среде. (б) - Зависимость температуры локального нагрева от мощности лазерного излучения 473 нм. Аппроксимация осуществлялась линейной функцией вида  $T(P) = k \cdot P + 24$ .

В п. 3.2 представлены результаты изучения динамики установления стационарной температуры алмазных частиц различных размеров в водной среде под действием импульсного лазерного излучения на длине волны 640 нм. Описана экспериментальная установка, а также сценарий измерения времен нагрева и остывания алмазного термометра-нагревателя. Представлены результаты измерений времен нагрева (Рисунок 6) и остывания частиц размером от 200 нм до 2 мкм. Проанализированы временные профили, выявлена квадратичная зависимость времени установления температуры от размера частицы. Приводится расчет коэффициента теплопроводности среды и его сравнение с табличными данными для воды.

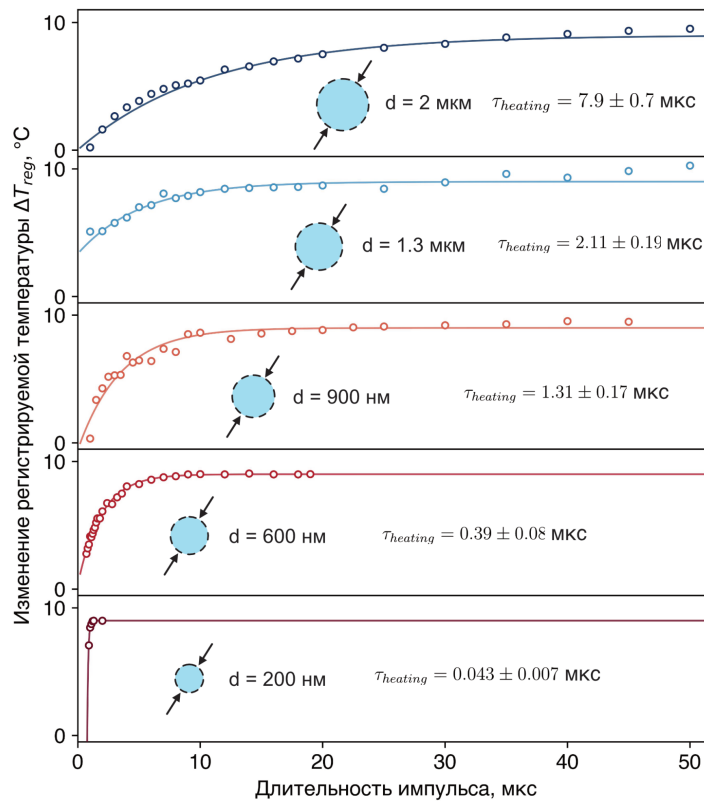


Рисунок 6 – Зависимости изменений регистрируемой температуры от длительности импульсов лазера 640 нм для алмазных нагревателей различных размеров при оптической мощности, соответствующей стационарному нагреву  $\Delta T_{continuous} = 10$  °С.

**Четвертая глава** посвящена применению алмазных термометров на основе SiV-центров для измерения температуры в биологических системах, в частности, в митохондриях.

В п. 4.1 описана экспериментальная установка для регистрации температуры вблизи агрегатов изолированных митохондрий.

В п. 4.2 представлены экспериментальные данные о нагреве митохондрий при различных физиологических состояниях: при нормальных условиях и при добавлении биологически активного вещества – протонофора – приводящего к активному ионному транспорту и выделению тепла в митохондриях (Рисунок 7). Выявляется повышение локальной температуры на 4–22 °С с абсолютным максимумом 45 °С при температуре всего раствора 22 °С.

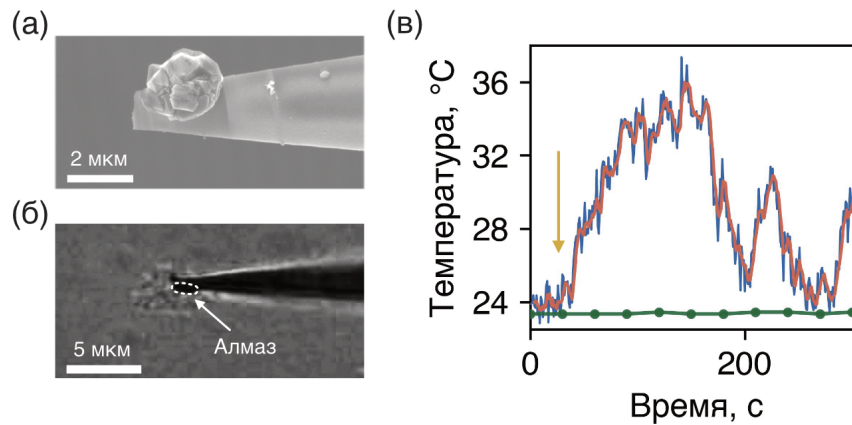


Рисунок 7 – (а) РЭМ-изображение алмазного термометра; (б) оптическое изображение АТ вблизи заранее выбранного агрегата митохондрий. (в) Типичная временная зависимость температурных показаний алмазного термометра (синие линии), расположенного вблизи агрегата митохондрий. Зеленые кривые – температурные показания термопары для всего раствора. Желтые стрелки указывают момент добавления ингибитора.

В **заключении** представлены основные выводы к работе.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

Установлены основные закономерности метода оптического считывания температуры с использованием люминесцирующих SiV-центров в наноалмазах различного происхождения, создан макет устройства для наноразмерного контроля температуры и определены его основные характеристики, проведена апробация метода на биологических объектах.

- 1) Определена температурная чувствительность ширины и положения БФЛ люминесценции SiV-центров в алмазных частицах, синтезированных различными методами, в диапазоне температур от 20 до 60 °С.

Установлено, что температурная чувствительность зависит от способа синтеза алмазов. Наибольшую температурную чувствительность демонстрируют частицы, синтезированные методом высоких давлений и температур (НРНТ) из адамантана (0.013 нм/°С и 0.05 нм/°С по положению и ширине, соответственно). Эффект объясняется высоким структурным качеством адамантановых наноалмазов.



- 2) Исследованы спектральные характеристики алмазанных НРНТ алмазов размером 200 нм и 1-2 мкм, содержащих как одиночные SiV-центры, так и их ансамбли при температуре 4 К. Установлено, что при резонансном возбуждении люминесценции одиночных SiV-центров в наноалмазах размером 200 нм наименьшая ширина линии отдельного оптического перехода Фурье-ограничена и составляет 94 МГц, что является рекордным значением среди известных наноалмазов, синтезированных НРНТ- и CVD-методами. Для ансамблей SiV-центров ( $\sim 10^3$  в одной алмазной частице размером 1-2 мкм) минимальное неоднородное уширение оптических переходов, равное 50 ГГц, объясняется высоким структурным качеством алмазанных НРНТ-алмазов, что обеспечивает согласованное и синхронное температурное изменение спектральных характеристик для всех SiV-центров в ансамбле. Полученные результаты ставят алмазанные НРНТ-наноалмазы, содержащие SiV-центры, в ряд наиболее перспективных материалов для высокоточной криогенной термометрии.
- 3) Обнаружено, что поликристаллические алмазные частицы, синтезированные CVD методом и содержащие люминесцирующие SiV-центры, сочетают в себе свойства как термометра, так и эффективного нагревателя. Под воздействием лазерного излучения с длиной волны 473 нм эффективность нагрева в водной среде составила 6.5 °С/мВт. На основе полученных результатов предложен новый термометрический подход, основанный на использовании одиночной алмазной CVD-частицы для управляемого локального нагрева, что открывает новые возможности в решении широкого класса биомедицинских задач, в частности, в таргетированной тепловой стимуляции живых клеток.
- 4) Разработан новый метод изучения динамики тепловых процессов в наноразмерных системах, основанный на использовании одиночной алмазной частицы, сочетающей свойства термометра и нагревателя. С субмикросекундным разрешением определены времена нагрева и остывания алмазных частиц широкого диапазона размеров, от 200 нм до 2 мкм, расположенных в водной среде. Установлено, что для алмаза диаметром 900 нм в водной среде время, необходимое для достижения стационарной температуры при нагреве на 10 °С, составляет  $1.31 \pm 0.17$  мкс, тогда как остывание до температуры окружающей среды занимает  $21.9 \pm 1.1$  мкс. Выявлена квадратичная зависимость убывания времен нагрева и

остывания с размером АТН, что согласуется с диффузионным транспортом тепловой энергии от частицы к среде даже при размерах 200 нм. Определенный по измеренным характеристикам коэффициент температуропроводности среды с высокой точностью соответствует значению для воды. Предложенный метод может быть использован для определения локальной температуропроводности живых клеток и органелл.

- 5) Разработан и испытан прототип устройства для наноразмерного контроля температуры с использованием алмазного термометра. Продемонстрирована применимость разработки для однозначных измерений температуры митохондрий, изолированных из мозга мыши. При введении биологически активного соединения температура вблизи таких органелл размером  $\sim 1$  мкм повышается на 4–22 °С относительно окружающей среды с абсолютным максимумом 45 °С. Широкое разнообразие температурных откликов связано с гетерогенностью характеристик самих митохондрий, а также их агрегацией в изолированной суспензии. Проведенные эксперименты подтверждают перспективность практического применения разработанного алмазного термометра в исследовании живых объектов с высоким пространственным разрешением и точностью определения температуры.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Fluorescent Molecular Thermometers Based on Polymers Showing Temperature-Induced Phase Transitions and Labeled with Polarity-Responsive Benzofurazans / S. Uchiyama, Y. Matsumura, A.P. De Silva [et al.] // *Analytical Chemistry*. – 2003. – Т. 75. – № 21. – С. 5926-5935.
2. Nanoscale thermometry via the fluorescence of YAG:Ce phosphor particles: measurements from 7 to 77 °C / S.W. Allison, G.T. Gillies, A.J. Rondinone [et al.] // *Nanotechnology*. – 2003. – Т. 14. – № 8. – С. 859-863.
3. High-Precision Nanoscale Temperature Sensing Using Single Defects in Diamond / P. Neumann, I. Jakobi, F. Dolde [et al.] // *Nano Letters*. – 2013. – Т. 13. – № 6. – С. 2738-2742.
4. Nanometre-scale thermometry in a living cell / G. Kucsko, P.C. Maurer, N.Y. Yao [et al.] // *Nature*. – 2013. – Т. 500. – № 7460. – С. 54-58.
5. Fluorescent Nanodiamond–Gold Hybrid Particles for Multimodal Optical and Electron Microscopy Cellular Imaging / W. Liu, B. Naydenov, S. Chakraborty [et al.] // *Nano Letters*. – 2016. – Т. 16. – № 10. – С. 6236-6244.
6. Measuring Nanoscale Thermostability of Cell Membranes with Single Gold–Diamond Nanohybrids / P. Tsai, C.P. Epperla, J. Huang [et al.] // *Angewandte Chemie*. – 2017. – Т. 129. – № 11. – С. 3071-3076.
7. All-optical nanoscale thermometry with silicon-vacancy centers in diamond / C.T. Nguyen, R.E. Evans, A. Sipahigil [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2018. – Т. 112. – № 20. – С. 203102.
8. Toward Performance and Applications of Large Area Optical Thermometry Based on the Luminescence of Germanium-Vacancy Defects in Diamond Nanocrystals / C. Miller, L. Puust, E. Ekimov [et al.] // *physica status solidi (a)*. – 2021. – Т. 218. – № 5. – С. 2000217.
9. Electron–phonon processes of the silicon-vacancy centre in diamond / K.D. Jahnke, A. Sipahigil, J.M. Binder [et al.] // *New Journal of Physics*. – 2015. – Т. 17. – № 4. – С. 043011.

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ, ВКЛЮЧЕННЫХ В  
ПЕРЕЧЕНЬ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ**

1. Fourier Transform Limited Linewidth of Optical Transitions in Single SiV Centers in ‘Adamantane’ Nanodiamonds / A.M. Romshin, O.S. Kudryavtsev, E.A. Ekimov, A.B. Shkarin, D. Rattenbacher, M.V. Rakhlin, A.A. Toropov, I.I. Vlasov // JETP Letters. – 2020. – Vol. 112. – P. 13-16. DOI: 10.1134/S002136402013010X
2. A new approach to precise mapping of local temperature fields in submicrometer aqueous volumes / A.M. Romshin, V. Zeeb, A.K. Martyanov, O.S. Kudryavtsev, D.G. Pasternak, V.S. Sedov, V.G. Ralchenko, A.G. Sinogeikin, I.I. Vlasov // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – P. 14228. DOI: 10.1038/s41598-021-93374-7
3. Heat Release by Isolated Mouse Brain Mitochondria Detected with Diamond Thermometer / A.M. Romshin, A.A. Osypov, I.Yu. Popova, V.E. Zeeb, A.G. Sinogeikin, I.I. Vlasov // Nanomaterials. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 98. DOI: 10.3390/nano13010098
4. Temperature characteristics of ‘silicon-vacancy’ luminescent centers in diamond particles synthesized by various methods / A.M. Romshin, Pasternak D.G., Altakhov A.S., Bagramov R.K., Filonenko V.P., Vlasov I.I. // Optics and Spectroscopy. – 2023. – Vol. 131. – № 2. – P. 133. DOI: 10.61011/EOS.2023.02.55773.18-23
5. Nanoscale thermal control of a single living cell enabled by diamond heater-thermometer / A.M. Romshin, V. Zeeb, E. Glushkov, A. Radenovic, A.G. Sinogeikin, I.I. Vlasov // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – P. 8546. DOI: 10.1038/s41598-023-35141-4
6. Warm Cells, Hot Mitochondria: Achievements and Problems of Ultralocal Thermometry / A.G. Kruglov, A.M. Romshin, A.B. Nikiforova, A. Plotnikova, I.I. Vlasov // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24. – № 23. – P. 16955. DOI: 10.3390/ijms242316955
7. The Relationship between the Temperature in the Deep Layers of the Somatosensory Cortex and Blood Flow Velocity in the Brain of Anesthetized Mice / A.M. Romshin, A.A. Osypov, V.K. Krohaleva, S.G. Zhuravlev, O.N. Egorova, I.I. Vlasov, I.Yu. Popova // Biophysics. – 2024. – Vol. 69. – № 2. – P. 306-313. DOI: 10.1134/S0006350924700374
8. Rapid neurostimulation at the micron scale with an optically controlled thermal-capture technique / A.M. Romshin, N.A. Aseyev, O.S. Idzhilova, A.A. Koryagina, V.E. Zeeb,

I.I. Vlasov, P.M. Balaban // *Biomaterials Science*. – 2025. – Vol. 13. – P. 250-260. DOI:  
10.1039/D4BM01114G