Министерство науки и высшего образования Российской Федерации НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ) Радиофизический факультет Кафедра квантовой электроники и фотоники

> ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК Руководитель ООП к.физ.-мат.н., с.н.с.

А.Г. Коротаев подпись " OB » UNCHS 2023г.

#### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

# ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРОВ КАОТДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АЗОТ-ВАКАНСИОННЫХ ЦЕНТРОВ В АЛМАЗЕ

По направлению подготовки 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» направленность (профиль) «Квантовые системы и приборы»

Переседова Дарья Александровна

Руководитель ВКР м.н.с. ЛКИТ РФФ ТГУ В.С. Рипенко подпись 08 >> unons 20 23 г.

Автор работы студент группы № 071905 Д.А. Переседова подпись 2023г. « 02 » UNOMS

Томск-2023

#### Министерство науки и высшего образования Российской Федерации НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ) Радиофизический факультет Кафедра квантовой электроники и фотоники

**УТВЕРЖДАЮ** Руководитель ООП к.физ.-мат.н. с.н.с. А.Г. Коротаев подпись « 01 » Mapta 2023 г.

#### ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра / специалиста /магистра обучающемуся

Переседовой Дарье Александровне

Фамилия Имя Отчество обучающегося

По направлению подготовки 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии, направленность (профиль) «Квантовые системы и приборы»

1 Тема выпускной квалификационной работы

Температурная зависимость спектров катодолюминесценции азот-вакансионных центров в алмазе

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы: а) в учебный офис / деканат – б) в ГЭК – 08.06.2023

3 Исходные данные к работе:

| Объект исследования –  | Азот-вакансионные центры в синтетических алмазных      |
|------------------------|--|
|                        | образцах   |
| Предмет исследования – | Спектры излучения, ИК поглощения и комбинационного     |
|                        | рассеяния.   |
| Цель исследования –    | Регистрация спектров катодолюминесценции синтетических |
|                        | алмазных образцов с различным азот-вакансионным        |
|                        | составом в температурном диапазоне от 80 до 500 К.     |
|                        |  |

Задачи:

<u>Регистрация спектров катодолюминесценции синтетических алмазов, содержащих</u> различные азот-вакансионные центры,

<u>Проведение аналитического сравнения спектров люминесценции образцов, содержащие  $NV^0$ ,  $NV^-$ ,  $N_2V^{0-}$  центры,</u>

Рассмотрение реабсорбции в нескольких образцах при воздействии электронного пучка, ионизация NV<sup>-</sup> центров,

Теоретическое описание полученных спектров при помощи разложения спектров катодолюминесценции на составляющие,

Рассмотрение возможности потенциального практического применения алмазов, содержащих те или иные центры окраски.

Методы исследования:

Катодолюминесценция, ИК и КР спектроскопия

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа, – <u>Томский государственный университет</u>

4 Краткое содержание работы

В ходе проделанной работы были получены и исследованы спектры катодолюминесценции четырех синтетических алмазных образцов (малопримесного, с содержанием NV<sup>-</sup> центров, NV<sup>0</sup> центров, N<sub>2</sub>V<sup>0</sup> центров). Также были исследованы спектры ИК-поглощения и комбинационного рассеяния алмазных образцов. Построены температурные зависимости интенсивности бесфононных линий и максимумов фонноных крыльев. Рассчитаны спектры катодолюминесценции образца с содержанием NV<sup>0</sup> центров. Были выделены компоненты разложения и построены температурные зависимости для каждой из компонент.

Руководитель выпускной квалификационной работы м.н.с. ЛКИТ РФФ ТГУ

должность, место работы Задание принял к исполнению <u>Студент РФФ ТГУ</u>

должность, место работы

подпись

юдпись

В.С. Рипенко И.О. Фамилия

Д.А. Переседова И.О. Фамилия

### АННОТАЦИЯ

Отчёт по выпускной квалификационной работе содержит: 42 страницы, 2 главы, 21 рисунок, 2 таблицы и 48 литературных источников.

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, АЛМАЗ, ЭКСИТОН, ДЕФЕКТ, NV ЦЕНТРЫ

Целью данной работы является регистрация спектров катодолюминесценции синтетических алмазных образцов с различным азотвакансионных составом в широком температурном диапазоне.

Залачи работы: регистрация спектров катодолюминесценции синтетических алмазов, содержащих различные азот-вакансионные центры. Проведение аналитического сравнения спектров люминесценции образцов, содержащие  $NV^0$ ,  $NV^-$ ,  $N_2V^{0-}$  центры. Рассмотрение реабсорбции в нескольких образцах при воздействии электронного пучка, ионизация NV<sup>-</sup> центров. Теоретическое описание полученных спектров при помощи разложения спектров катодолюминесценции составляющие. Рассмотрение на возможности потенциального практического применения алмазов, содержащих те или иные центры окраски.

Объектом исследования являются азот-вакансионные центры в синтетических алмазных образцах

Предметом исследования являются спектры излучения, ИК поглощения и комбинационного рассеяния.

В ходе проделанной работы были получены и исследованы спектры катодолюминесценции четырех синтетических алмазных образцов (малопримесного, с содержанием  $NV^-$  центров,  $NV^0$  центров,  $N_2V^0$  центров). Также были исследованы спектры ИК-поглощения и комбинационного рассеяния алмазных образцов. Построены температурные зависимости интенсивности бесфононных линий и максимумов фонноных крыльев. Рассчитаны спектры катодолюминесценции образца с содержанием  $NV^0$ 

центров. Были выделены компоненты разложения и построены температурные зависимости интенсивности для каждой из компонент.

# оглавление

| введени    | Е                                     |    |
|------------|---------------------------------------|----|
| 1 Литерату | ирный обзор                           | 6  |
| 1.1 Синт   | сез алмазов                           | 6  |
| 1.1.1      | Историческая справка                  | 6  |
| 1.1.2      | Метод температурного градиента        | 7  |
| 1.1.3      | Метод газохимического осаждения (ГХО) |    |
| 1.2 Мето   | оды исследования                      | 9  |
| 1.2.1      | Катодолюминесценция                   | 9  |
| 1.2.2      | Инфракрасная- Фурье спектроскопия     | 10 |
| 1.2.3 I    | Комбинационное рассеяние              | 10 |
| 1.3 Види   | ы дефектов                            | 12 |
| 1.4 Азот   | -вакансионные центры                  | 14 |
| 1.4.1      | Электронная структура                 | 15 |
| 1.4.2      | Создание азот-вакансионных комплексов | 15 |
| 1.5 Дост   | ижения последних лет                  |    |
| 2 Экспери  | ментальная часть                      |    |
| 2.1 Схем   | а экспериментальной установки         | 24 |
| 2.2 Резул  | ьтаты эксперимента                    |    |
| ЗАКЛЮЧІ    | ЕНИЕ                                  |    |
| СПИСОК     | ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ             |    |

#### введение

Актуальность

Среди веществ, встречающихся в природе алмаз является одним из наиболее ценных кристаллических веществ применяющийся как в науке, так и промышленности.

Алмаз является широкозонным полупроводником (5,5 эВ) имеющий уникальные свойства по сравнению с другими полупроводниками (Si, GaAs, InP), такие как, высокая плотность укладки атомов в решетке (0.16-0.18 · 10<sup>-6</sup> см<sup>2</sup>/кг), высокая дырочная подвижность (3800 см<sup>2</sup>·В<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>) и электронная подвижность (4500 см<sup>2</sup>·B<sup>2</sup>·c<sup>-1</sup>), а также сильные межатомные связи, малая масса атома углерода и простая структура кристаллической решетки. Кроме того, все эти свойства обуславливают высокую теплопроводность (900-2400 Вт/м·К) [1]. Так как алмаз обладает самой высокой температурой Дебая 2357 К [2, 3], комнатная температура в таком случае считается пониженной. Это обстоятельство позволяет, например, наблюдать люминесценцию свободных экситонов даже при комнатных температурах. Данный кристалл является химически инертным и имеет высокую радиационную стойкость (энергия образования вакансии 80 мэВ) что позволяет создавать устройства, работающие в экстремальных средах [4, 5]. Все эти свойства сделали алмаз уникальным и ценным материалом, что привело к необходимости развития технологий формирования синтетических алмазов и его применения в различных областях науки и техники.

Изучением алмаза, его свойств и потенциального применения занимаются многие научные группы по всему миру. Так, например научная группа из Франции занималась изучением синтетических алмазных образцов, легированных бором. Данные образцы использовались в качестве электродов для восстановления нитрат-ионов в нейтральных растворах и аммиака в основных растворах [6]. В г. Сан-Пауло научная группа создавала алмазоподобные углеродные пленки для микромеханических устройств [7]. В

России в г. Троицк на основе природного алмаза создали детекторы импульсного рентгеновского и нейтронного излучения [8].

Несмотря на многолетнюю историю исследования алмаза, интерес к данному кристаллу не утихает до сих пор, а спектр его применения увеличивается с каждым годом. Существующие методы синтеза пока не позволяют создавать идентичные кристаллы, поэтому каждый синтетический алмазный кристалл обладает своими уникальными свойствами, на изучение которых и направлена данная работа.

Цель работы:

Регистрация спектров катодолюминесценции синтетических алмазных образцов с различным азот-вакансионным составом в температурном диапазоне от 80 до 500 К.

Задачи работы:

- 1. Регистрация спектров катодолюминесценции синтетических алмазов, содержащих различные азот-вакансионные центры.
- 2. Проведение аналитического сравнения спектров люминесценции образцов, содержащие NV<sup>0</sup>, NV<sup>-</sup>, N<sub>2</sub>V<sup>0-</sup>центры.
- 3. Рассмотрение реабсорбции в нескольких образцах при воздействии электронного пучка, ионизация NV<sup>-</sup> центров.
- 4. Теоретическое описание полученных спектров при помощи разложения спектров катодолюминесценции на составляющие.
- 5. Рассмотрение возможности потенциального практического применения алмазов, содержащих те или иные центры окраски.

Объект, предмет и метод исследования.

В рамках данной работы были использованы методы исследования оптических свойств алмазных кристаллов такие как катодолюминесценция беспримесных алмазов и содержащих различные азот- вакансионные центры в широком диапазоне температур. Кроме того, алмазные образцы были исследованы методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и инфракрасной (ИК) спектроскопии.

При воздействии пучком электронов на алмазный образец возникает свечение, называемое катодолюминесценцией. При малых энергиях электронов данный метод воздействия на образец является методом неразрушающего контроля совершенства кристаллической структуры. При длительном облучении кристалла электронами с достаточной энергией в структуре алмаза появляются дефекты, которые влияют на изменение цвета образца (образование вакансий И др. центров) или дислокацию кристаллической решетки. Таким образом, катодолюминесценция является важным методом контроля дефектов в кристаллической структуре алмазов, которые могут оказать влияние на их потенциальное использование в качестве датчиков, детекторов, вычислительных элементов и квантовых сенсоров.

Предметом исследования являются спектры излучения, ИК поглощения и комбинационного рассеяния.

Научная новизна

Предложенные в данной работе идеи, полученные результаты, а также предложенные методы исследования характеризуются несомненной новизной. В частности, в данной работе были исследованы зависимости интенсивности катодолюминесценции при температурах от 80 до 500 К.

Теоретическое и прикладное назначение

Результаты, полученные в данной работе, позволят уточнить сложившуюся физическую картину о примесно-дефектных центрах в алмазе за счёт использования импульсных сильноточных пучков для возбуждения катодолюминесценции и расширить возможности их применения.

Так, например, в дальнейшем нашей лабораторией будут создаваться оптоэлектронные алмазные детекторы и визуализаторы рентгеновского пучка.

# 1 Литературный обзор

В связи с тем, что данная работа направлена на изучение синтетических алмазных образцов, остановимся подробнее на краткой исторической справке процесса синтеза алмазов и существующих методов синтеза.

# 1.1 Синтез алмазов

Еще с начала двадцатых годов двадцатого века велось активное исследование алмазов, начиналась активная разработка методов их синтезирования. Первые статьи по теоретически вычисленным условиям синтеза начали появляется с 1939 года [9]. С 1955 года начинают выходить статьи описывающий практический результат синтеза алмазов [10, 11].

# 1.1.1 Историческая справка

Самые первые попытки в синтезировании алмазов были предприняты в 1880 году английским химиком Джеймсом Хэннеем. Его метод синтеза заключался в том, что в стальную трубу заливался парафин или костяное масло, а в качестве затравки использовались соли лития. После этого трубу с двух сторон наглухо заваривали и нагревали докрасна весь день. В общем таких труб было создано 80, опыт выдержали 3 и только в одной удалось найти блестящие кристаллы, которые не растворялись в плавиковой кислоте и без остатка сгорали в пламени паяльной лампы. Данные кристаллы нельзя было назвать алмазами, но первая попытка синтеза была совершена.

В 1939 году исследовательской группе, в которую входил Овсей Ильич Лейпунский, удалось найти необходимое давление и температуру, при которой атомы углерода должны перестроится из графитного состояния в алмазное. Температура составляла 2000 К и давление 60 000 атм.

Первый синтезированный алмаз удалось получить в 1953 году шведским инженером Больцаром фон Платеном при T=2500 К и P=80 000 атм. На

следующий год американский химик Трейси Холл получил искусственный алмаз при T=1560 К и P=85 000 атм. В СССР синтез алмаза доверили Рябину и Верещагину и в 1960 году они добились успеха [12].

В настоящее время существует множество методов синтеза алмазов такие как ударный синтез, газохимическое осаждение (ГХО), электронно- и ионно- лучевые методы, метод температурного градиента. Поподробнее остановимся на двух самых широко применяемых методах.

# 1.1.2 Метод температурного градиента

Метод температурного градиента заключается в том, что имеется несколько гидравлических симметрично расположенных прессов, они существуют одно- двух-, трех- и четырехосевые, которые образуют рабочий объем [13]. В пресс помещается затравка в виде синтетического алмаза, графит и металл-катализатор. В условиях высокого давления и высокой температуры (ВДВТ) и создания условий температурного градиента (температура затравки меньше на ~50 °C) начинает синтезироваться алмаз (давления от 80 – 300 кбар и температуры от 1900 °C до 3000 °C) [11]. Алмазы, синтезированные данным методом, имеют в себе большое содержание примесей азота, что придает ему желтый цвет. В каждом направлении роста кристалла впитываемость примесей разная, поэтому цвет таких алмазов неравномерный. На рисунке 1 представлена схема роста синтетических ВДВТ алмазов.



Рисунок 1 – Направления роста в алмазе

Алмазы, синтезированные методом ВДВТ, будут использоваться (исследоваться) в данной работе.

#### 1.1.3 Метод газохимического осаждения (ГХО)

Не менее интересным с точки зрения научного и практического интереса является метод газохимического осаждения. В этом методе синтез алмаза происходит в ГХО реакторе. Процесс синтеза происходит при непрерывной откачке воздуха в смеси газов. Обычно, соотношение газов такое - 92-98 % водорода и 2-8 % метана. Синтез начинается при температурах подложки выше 800 С. В качестве подложки в ГХО синтезе используются пластины ВДВТ алмазов. Достоинством данного метода является то, что можно получать как беспримесные образцы, так и контролировать количество примесей в алмазе, а также рост кристаллов проходит в одном кристаллографическом направлении.

В таблице 1 представлено сравнение методов ГХО и температурного градиента.

| Температурный градиент           | Газохимическое осаждение       |
|----------------------------------|--------------------------------|
| При синтезе встраивается         | При синтезе встраивается малое |
| большое количество примеси азота | количество примеси             |
| Невозможно контролировать        | Возможно контролировать        |
| количество примеси               | количество примеси             |
| Неравномерное                    | Равномерное распределение      |
| распределение цвета              | цвета                          |
| Включения металлического         | Мельчайшие включения           |
| катализатора                     | графита                        |
| Имеет 14 степеней свободы        | Имеет 1 степень свободы        |

Таблица 1 – Сравнение методов синтеза алмазов

#### 1.2 Методы исследования

Как правило для исследования веществ используются различные оптические методы. В данной работе используются катодолюминесцентная спектроскопия, КР спектроскопия, ИК спектроскопия. Поподробнее остановимся на каждом из них.

# 1.2.1 Катодолюминесценция

Катодолюминесценция – это люминесценция, возникающая при возбуждении вещества потоками электронов. В случае возбуждения люминесценции катодным лучом речь идет об электронах, которые возникают под действием внешнего электрического поля. Так, катодолюминесценцию можно рассматривать как радио- и рентгенолюминесценция. Возбудителями в них служат так же электроны, но каскады образуются внутри люминофора как результат торможения первичного носителя энергии.

Катодолюминесценция была обнаружена задолго до открытия электрона, впервые была описана в 1858 г Плюккером. Свое начало определение получило от катодного луча, который вызывал свечение стенок стеклянных вакуумных трубок. Поэтому взяли начало приставки «катодо-» для характеристики некоторых явлений, связанных с поведением электронного потока в вакууме.

Изучением катодолюминесценции как физического явления, впервые занялся У. Крукс [14]. Он выяснил, что, как и другие виды люминесценции, катодолюминесценция обладает инертностью послесвечения, температурным, динамическим и другими видами тушения, а также спектром тушения характерными для данного вещества. Имеется так же свойство, при котором кинетическая энергия заряженной частицы преобразуется в кванты излучения с меньшей энергией, это многоэтапный процесс, при котором наблюдается нелинейная связь яркости свечения от напряжения и плотности тока.

Катодолюминесценция используется для исследования оптических свойств кристаллов, но данный вид люминесценции, как говорилось выше, может создавать в кристаллах дефекты.

# 1.2.2 Инфракрасная- Фурье спектроскопия

Инфракрасная спектрометрия — это метод основан на поглощении инфракрасного излучения веществом. Данный метод основан на пропускании излучения через образец в широком частном диапазоне. Затем из полученной интерференционной картины с помощью Фурье преобразования рассчитывают ИК спектр. Поглощение ИК излучения подчиняется основным законам светопоглощения.

ИК Фурье спектроскопия используется для определения различных примесей (органических и неорганических веществ) [15].

# 1.2.3 Комбинационное рассеяние

Комбинационное рассеяние (КР) света или рамановская спектроскопия — это неразрушающий метод исследования при помощи спектрального сканирования. В спектральном диапазоне видимого и ближнего ИК оптического диапазона для анализа химических и биологических субстанций в твердом, жидком и газообразном состоянии. Данный метод

основывается на свойствах фотонов к рамановскому рассеянию. Поэтому все что нужно для сбора спектра – это направить падающий луч на образец, а затем собрать рассеянный свет [16, 17].

Спектроскопия с использованием рамановского рассеяния позволяет регистрировать колебания, микроскопические смещения и другие изменения на молекулярном уровне. Плюсами данного метода исследования является то, что он дает один и тот же результат при любых колебательных процессах объекта на молекулярном уровне и не требует специальной обработки образца, позволяет различать молекулы довольно похожие между собой [18].

При рамановском рассеянии происходит излучение или поглощение колебаний молекул, то если при рассеянии частота света уменьшается, такой процесс называется стоксовый [19]. В спектрах данный процесс будет смещен относительно рэлеевского В низкочастотную область. рассеяния Антистоксовое, напротив, появляется, когда отраженного света больше и область. Пример высокочастотную смещение идет в стоксового И антистоксового смещения представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Положение линий КР относительно рэлеевского рассеяния

Когда в спектре появляются новые линии это говорит о том, что произошло изменение энергии фотона, а значит и изменение энергии

молекулы, т.е. переход ее на другой энергетический уровень. Каждое вещество обладает индивидуальным колебательным спектром.

КР можно использовать в сочетаниях с другими методами исследования для более полного представления о природе образца. Например: для симметричного растяжения используем КР- спектроскопию, а оценки изгиба и асимметричного растяжения -ИК спектроскопию.

В настоящее время рамановское рассеяние широко используется для анализа фазовых переходов, полиморфных состояний и изучение кристалличности. Области применения КР спектроскопии: судебная экспертиза, геология и минералогия, медицина, пищевая, полупроводниковая промышленность и т.д.

#### 1.3 Виды дефектов

Описанные выше спектроскопические методы используются для определения примесно-дефектного состава различных кристаллов. Содержание примесей и дефектов в кристаллической решетке материалов существенно влияет на их физико-механические свойства.

Модель кристалла, которая обладает строгой периодичностью расположения атомов, не содержащая примесей или дефектов структуры кристаллом. Но называется идеальным реальные кристаллы имеют несовершенства. Поподробнее остановимся на точечных дефектах. Они связаны с отсутствием или наоборот с появлением лишнего атома или междоузлия. Вокруг вакансии или лишнего атома в междоузлии решетка искажена.

Одним из примеров точечных дефектов являются примеси. Самой распространенной примесью в алмазе, создающей большое количество дефектов, является замещающий азот. Современная физическая классификация, основанная на количестве степени агрегации примесного азота, делит алмазы на 4 основных типа [20, 21].

Типу Ia принадлежит около 90 % всех природных алмазов. Примесь азота составляет 0.3 %. Наиболее распространенным азотным дефектом является A и B центры. А центр включает два атома азота, расположенные рядом друг с другом. В центр содержит четыре атома азота, которые располагаются симметрично вокруг вакансии. Содержание и концентрацию данных центров оценивают при помощи ИК- спектроскопии.

К типу Ib относятся почти все синтетические алмазы, среди природных к нему относится только 0.1 %. Азотные примеси в таких кристаллах распределены однородно.

К типу IIa относят малопримесные алмазы, которые бесцветные и имеют высокую теплопроводность. Среди природных алмазов к данному типу относятся 1-2 %.

В типе IIb преобладает примесь бора, а среди природных алмазов к нему относятся лишь 0.1 %. Данный тип примеси можно обнаружить при ИК спектроскопии с увеличением интенсивности поглощения в красной области видимого спектра.

Ha Дефекты влияют на физические свойства кристалла. электропроводность влияют точечные дефекты, а при наложении электрического поля данные дефекты определяют ионную проводимость. Дефекты так же влияют и на подвижность кристалла, например, большое количество дислокаций вызывает внутренние напряжения, вследствие чего кристалл начинает разрушаться. Объемные дефекты, такие как, скопление вакансий или зоны роста, снижают пластичность, прочность, ухудшают электрические и оптические свойства кристаллов. Наиболее проводимыми синтетическими кристаллами являются те, в которых большое содержание азота.

Как было сказано ранее дефекты влияют на окраску алмаза, например, большое количество азота окрашивает алмаз в желтый цвет, при облучении такого образца мощными электронными пучками будут иметь голубой цвет.

При дальнейшем отжиге возможно образование различных азотвакансионных комплектов каждый из которых будет окрашивать образец в свой цвет  $NV^0$  фиолетовый,  $NV^-$  розовый [22, 23]. Самыми распространёнными центрами окраски в алмазе являются NV-центры (nitrogen vacancy), которые окрашивают алмаз либо в фиолетовый  $NV^-$ , либо розовый  $NV^0$ .

#### 1.4 Азот-вакансионные центры

NV-центры представляют из себя азот-вакансионные комплексы, образующиеся из азот-замещенного атома в кристаллической решетке и находящиеся рядом вакансии.

Люминесценция данных дефектов применяется в биологии и метрологии в качестве чувствительных элементов для биосовместимой термометрии [24, 25] и магнитометрии [26, 27], визуализации ядерномагнитного резонанса, квантовых технологиях [28-30].

Данные центры встречаются как в природных, так и в синтетических алмазах. В природном и синтетическом алмазе, выращенном методом температурного градиента, NV центры располагаются неравномерно, а при методе газохимического осаждения концентрацию и глубину залегания NV центров можно контролировать методом дельта-легирования.

Имеется две конфигурации: отрицательно заряженные NV<sup>-</sup>-центры, и нейтральные NV<sup>0</sup>, которые имеют разные свойства.

Отличительной чертой NV-центров являются интенсивные бесфононные линии на 575 нм соответствующие  $NV^0$  центру и на 638 нм соответствующие  $NV^-$  центру, что позволяет, в том числе, проводить измерения на одиночных центрах [31].

# 1.4.1 Электронная структура

Энергетическая структура NV-центра представлена на рисунке 3. Люминесценция происходит за счет рекомбинации между уровнями, образованными дефектами.



Рисунок 3 – Энергетическая диаграмма NV центров

# 1.4.2 Создание азот-вакансионных комплексов

NV-центры могут быть обнаружены как в природных, так и синтетических алмазах. Для достижения требуемой концентрации NVцентров можно использовать методы синтеза ВДВТ и ГХО, однако, только метод ГХО позволяет контролировать глубину расположения и однородность распределения дефектов в материале алмаза.

Как следует из названия данного дефекта N (nitrogen) – азот, V (vacancy) – вакансия, для того чтобы создать подобный центр необходимо иметь кристалл алмаза, который содержит как атомы замещающего азота, так и вакансии. При этом нужно создать такие условия, при которых азот и вакансия «встретились» и образовали азот-вакансионный комплекс.

При ВДВТ синтезе внедрение атомов азота в алмазный образец происходит непосредственно в процессе самого синтеза.

При ГХО синтезе существует два метода внедрение примеси азота. Первый метод — это ионная имплантация. Суть метода заключается в том, что происходит разгон ионов азота до высоких скоростей, которыми облучают алмаз. Минусами метода является его «грубость», т.е. атомы, которые проникают в структуру алмаза нарушают кристаллическую решетку, а также не позволяет контролировать глубину залегания [32,33].

Второй метод — это дельта легирование Суть метода заключается во внедрении примесей, которые локализованы в тонком слое. При легировании не происходит нарушение кристаллической решетки и глубину легирования можно определять с точностью до нескольких нанометров.

Для создания NV центров, как говорилось выше, в алмазных образцах атомов замещающего азота необходимы помимо вакансии, которые образуются путем облучения образца электронным пучком. Чтобы обеспечить равномерное распределение вакансий в образце, энергия электронов таких пучков составляет 3 МэВ и плотность электронов – 10<sup>18</sup> см<sup>-2</sup> [34]. Однако, при более высоких энергиях, от 5 МэВ, возникает наведенная радиация. Далее, после получения отдельных атомов замещающего азота и вакансий, представленный образец подвергается отжигу при температурах 800-1000 °С. Это позволяет сделать вакансии подвижными. Затем, подвижные вакансии захватываются атомами азота, образуя пару азот-вакансия или так называемый NV<sup>0</sup> центр (рисунок 4). При этом, если в образце содержится большое количество атомов замещающего азота к комплексу азот-вакансия из соседнего атома азота туннелируется электрон и образуется NV<sup>-</sup>центр [35,36].



Рисунок 4 – Образование NV<sup>-</sup> и NV<sup>0</sup> центров

 $N_2V$  центр является более сложным дефектом и до недавнего времени его находили только в природных алмазах (рисунок 5). Для данного типа дефектного центра необходим алмаз с содержанием атомов замещающего азота, далее такой кристалл подвергают облучению высокоэнергичными пучками электронов, в результате чего образуются вакансии, после этого образцы подвергаются высокотемпературному отжигу в инертной среде. При этом, температуры отжига могут достигать значений сильно больше, чем температура графитизации в данной среде.



Рисунок 5 – Образование  $N_2V$  центров

Сложность создания данного центра заключается в образовании связи между вакансией и двумя атомами азота [37].

### 1.5 Достижения последних лет

NV центры в алмазе на данный момент начинают применятся в различных областях.

Самым популярной областью применения алмазов является ювелирное дело и производство абразивных инструментов. [38.] Однако последнее время наблюдается интереса К применению спад алмаза В ювелирной промышленности и рост интереса к применению синтетических алмазов в высокотехнологичной промышленности, сенсорике, для квантовых технологий и т.д.

Например, в области навигации. Так, в работе [39] представлен квантовый гироскоп на основе алмаза, который работает на изменении фазы Берри (описывает параметр, включаемый в геометрический фазовый фактор, связанный с динамическим фазовым фактором волновой функции, который возникает при прохождении замкнутой траектории в квантово-механической системе в пространстве параметров. Этот параметр активируется в условиях циклического адиабатического возмущения системы.). В основе лежит одиночный ядерный спин <sup>13</sup>С в сочетании с NV центром. Данное устройство сможет работать при комнатных температурах, отсутствие необходимости в сильном магнитном поле и компактность.

Для детектирования высокоэнергичных частиц в термоядерных установках применяется черенковские детекторы на основе алмаза [40]. Данный детектор основан на эффекте Черенкова-Вавилова.

Следующим немаловажным применением алмазных дефектов является квантовый компьютер. Он создается на естественных дефектах в кристаллической структуре алмаза для создания квантовых битов. Главная проблема состоит в том, что состояние суперпозиции является нестабильным и быстро разрушается до более простого состояния, данный эффект называется декогеренцией. Данные разрушения требуется избегать т.к. они

образуют ошибки в вычислениях. Для избегания декогеренции используются микроволновые импульсы.

В области медицины используются наноалмазы, так как они обладают высокой биосовместимостью с низкой цитотоксичностью [41,42].

# 2 Экспериментальная часть

В эксперименте использовалось четыре алмазных образца, описание которых представлено в таблице 2. Данные образцы были произведены ООО «Велман» г. Новосибирск.

| Образец  | Способ получения                                 | Наличие примеси  | Размеры, мм |
|----------|--|--|-------------|
| 1 (C78)  | ВДВТ   | Малопримесный  | 5x5x0.25    |
| 2 (C43)  | ВДВТ, облучение<br>электронами, отжиг            | NV <sup>-</sup>  | 3.3x3.7x0.5 |
| 3 (C122) | ВДВТ, облучение<br>электронами, отжиг            | $NV^0$   | 2.4x2.4x0.3 |
| 4 (C64)  | ВДВТ, облучение<br>электронами,<br>ударный отжиг | Различные азот-<br>вакансионные центры<br>(NV <sup>0</sup> , NV <sup>-</sup> , N <sub>2</sub> V <sup>0</sup> ) | 5x3.5x0.55  |

Таблица 2 – Описание алмазных образцов

Для регистрации спектров экситонной катодолюминесценции использовался спектрометр Ocean Optics HR4000 с рабочей полосой 200-300 нм и Ocean Optics HR2000 (с рабочей полосой 200-1100 нм) для регистрации катодолюминесценции образцов с примесно-дефектными центрами.

Спектры ИК поглощения и комбинационного рассеяния света (КР) регистрировались на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 5700 с Raman модулем. Спектры ИК поглощения регистрировались в диапазоне 4000–400 см<sup>-1</sup> с разрешением 4 см<sup>-1</sup>. Спектры КР измерялись с разрешением 4 см<sup>-1</sup> и усреднялись по 64 измерениям. Полученные в результате спектры ИК поглощения исследуемых образцов, представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Спектры ИК поглощения алмазных образцов

Как видно из рисунка 6 в диапазоне от 1500 – 2750 см<sup>-1</sup> наблюдается собственное поглощение. Образцы №2(С43) и №4 (С64) имеют пик на 1331 см<sup>-1</sup>, соответствующий С-центру, который представляет собой дефект в виде нейтрального одиночного замещающего атома азота [43]. На 1280 см<sup>-1</sup> обнаружен азотный А-центр показывающий, что имеется пара атомов азота в соседних узлах кристаллической решетки, также в образце №2 (С43) наблюдается пик с максимумом на 1051 см<sup>-1</sup> который не проявляется у образца №4 (С64) [44]. Он образуется в процессе ВДВТ синтеза алмазов при температуре выше 1350°С. Линия на 1502 см<sup>-1</sup> часто обнаруживается у алмазов, подвергнутых радиационно-термической обработке. Кроме того, в образце №2 (С43) имеется пик на 1344 см<sup>-1</sup>, соответствующие С-центру, и на 1450 см<sup>-1</sup>, соответствующие центру H1a, который также наблюдается у алмазов, подвергнутых радиационно-термической обработке.

В образце №3 (С122) наблюдается линия на 1450 см<sup>-1</sup>.

В образцах №1 (С78), №2 (С43), №3(С122) имеется дублет линий на 2933 см<sup>-1</sup> и 2852 см<sup>-1</sup>, соответствующий sp<sup>3</sup>-гибридизированным метиленовым группам -СН2-.

Также были получены спектры КР, которые представлены на рисунке 7. На нем мы можем заметить характерную линию на 1332 см<sup>-1</sup> принадлежащую алмазной фазе углерода. В спектре КР образца №2 (С43) можно заметить бесструктурные области от 150 до 2000 см<sup>-1</sup> и от 2000 до 3500 см<sup>-1</sup>, которые, по всей видимости, соответствуют аморфному углероду. Действительно, на образце №2 (С43) присутствовала графитизированная область, которая была получена в результате облучения образца пучком электронов. В спектре образца №3 (С122) также обнаружены полосы от 150 до 750 см<sup>-1</sup> и от 1520 до 1540 см<sup>-1</sup>, природа которых не ясна.



Рисунок 7 – Спектры КР алмазных образцов

Для возбуждения катодолюминесценции использовался электронный ускоритель типа НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА-3 150Э. Характерные осциллограмма тока и автограф пучка представлены на рисунке 8. Регистрация импульсов тока проводилась с помощью коллектора тока.



Рисунок 8 – Осциллограмма тока пучка и автограф пучка, полученные на ускорите НОРА

Восстановление энергетического спектра электронов пучка производилось при помощи метода фильтров, в котором использовался набор алюминиевых фольг от 10 до 200 мкм [45]. Распределение электронов в пучке представлено на рисунке 9. Видно, что максимальное количество электронов в пучке обладают энергией 50 и 170 кэВ.



Рисунок 9 – Распределение энергии электронов в пучке

# 2.1 Схема экспериментальной установки

На рисунке 10 представлена блок-схема экспериментальной установки для регистрации спектров катодолюминесценции алмазных образцов с возможностью изменения температуры исследуемого образца от 80 до 800 К, в зависимости от поставленных задач. В рамках данной работы исследования проводились в диапазоне температур от 80 до 500 К.



Рисунок 10 – Схема экспериментальной установки

Образец 1 помещался в камеру 2, из которой с помощью форвакуумного насоса откачивался воздух. Алмаз закреплялся на медном держателе 3. Импульсный электронный пучок, который возникает в ускорителе электронов 4 НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА - 3 150Э, возбуждал катодолюминесценцию в алмазном образце. В установке были предусмотрены сменные блоки для охлаждения и нагрева образцов. В рамках данной работы исследование проводилось только при пониженных температурах, охлаждали образец жидким азотом заливая его в специальный резервуар 5. Температура контролировалась с помощью измерителя-регулятора 6 ТРМ-210 к которому была присоединена хромель-алюмелевая термопара 7 ТХА (тип К). Излучение катодолюминесценции, прошедшее через образец, собиралось коллиматором 8 и посредством световода 9 направлялось в спектрометр 10. После этого записывались на персональный компьютер 11. Затем, спектры при восстановлении спектров, с помощью программного обеспечения, учитывалась спектральная чувствительность спектрометра и пропускание световода.

#### 2.2 Результаты эксперимента

На рисунке 11 представлен спектр катодолюминесценции алмазного образца № 1 (С78) при различных температурах. Так как данный образец является беспримесным для него характерна краевая люминесценции, поэтому спектры снимались в ультрафиолетовой области.



Рисунок 11 – Спектры экситонной катодолюминесценции образца С78 при температуре от 90 – 470 К

Для большей наглядности представлен спектр при самой низкой (93 К), самой высокой (471 К) и комнатной температурах (300 К) (рисунок 12).



Рисунок 12 – Спектры экситонной катодолюминесценции образца С78 при температуре 93 К, 300 К, 471 К

Максимум интенсивности на 235 нм соответствует люминесценции свободных экситонов в алмазе, однофононный процесс. Кроме того, видно, что при повышении температуры исчезает максимум в районе 242 нм, который соответствует двухфононному процессу.

Также можно заметить, что при температуре 500 К все еще наблюдается экситонная люминесценция. Эта особенность открывает потенциальное применение таких алмазов в качестве УФ источников, работающих при высоких температурах.

На рисунке 13 представлена зависимость длины волны от температуры, видно, что максимум основного экситонного пика меняет свое положение от 234,9 до 236,4 нм с повышением температуры. Это связано с разной скоростью заполнения четырех основных экситонных состояний [46].



Рисунок 13 – Зависимость длины волны от температуры основного экситонного пика на 235 нм

На рисунке 14 представлены спектры катодолюминесценции алмазного образца № 2 (С43) при температуре от 80 К до 480 К данного образца.



Рисунок 14 – Спектры катодолюминесценции образца С43 с NVцентрами при температурах от 81 – 476 К

При увеличении температуры происходит температурное тушение, бесфононные линии уходят. Это связано с тем, что с увеличением температуры вероятность прямых переходов уменьшается. Видно, что с увеличением температуры образца исчезают линии в спектрах катодолюминесценции. Бесфононная линия на 575 нм соответствует  $NV^0$ -центру [зайцев]. Также на 637 нм должна была быть бесфононная линия, соответствующая отрицательно заряженным азот-вакансионным центрам  $NV^-$ , но мы ее видим, как полосу самопоглощения.

Полученный спектр является не типичным для алмазов с содержанием NV<sup>-</sup> центра. Характерный спектр люминесценции для NV<sup>-</sup> центра имеют бесфононную линию на 637 нм и широкое фононное крыло от 500 нм до 850 нм [48]. Однако в нашем случаем имеется полоса самопоглощения. Это связано с тем, что согласно рисунку 3 электронный пучок имеет энергию, не превышающую 300 кэВ. Электронный пучок с такой энергией может попасть на глубину только на 250 мкм (рисунок 15).

Как видно из таблицы 2, толщина образца №2 500 мкм, поэтому возбуждение люминесценции происходит только в его части.



Рисунок 15 Глубина проникновения электронов для разных энергий в алмазе

Электронный пучок возбуждает катодолюминесценцию в тонком слое алмазного образца NV<sup>-</sup> центров. Под действием электронного пучка  $NV^0$ ИХ до центров. После происходит ионизация ЭТОГО катодолюминесценция NV<sup>0</sup> центров возбуждает фотолюминесценцию NV<sup>-</sup> центров в невозбужденной части образца, поскольку излучение NV<sup>0</sup> центров попадает в максимум поглощения NV- центров. А область, в которой происходит фотолюминесценция, является также областью поглощения  $NV^0$  на  $NV^-$  центрах, поэтому на спектрах мы видим провал в виде полосы самопоглощения (рисунок 16).

Таким образом на рисунке 13 мы видим, катодолюминесценцию  $NV^0$  центров, фотолюминесценцию  $NV^-$ , и самопоглощение  $NV^0$  на  $NV^-$  центрах.



Рисунок 16 – Возбуждение люминесценции в алмазном образце толщиной 500 мкм

На рисунке 17 представлены спектры катодолюминесценции алмазного образца  $N \ge 3$  (C122). На 575 нм имеется бесфононная линия, принадлежащая  $NV^0$  центру. В области от 380 до 500 нм с бесфононной линией 389 нм, что соответствует центру характерному для радиационнотермической обработки алмаза [48.] и сходится с данными производителя. И действительно, для создания в данном образце  $NV^0$  центров образец сначала облучали пучком электронов с энергией 3 МэВ и затем отжигали при температуре 800-1000 К в вакууме. На спектрах также имеется бесфононная линия на 575 нм, соответствующая  $NV^0$  центру, интенсивность которой с повышением температуры изменяется от 157 до 67 отн.ед.



NV<sup>0</sup> центра

Для данного образца были проведены расчеты спектров катодолюминесценции в программе Mathcad (рисунок 18). Представленные результаты описывают однофононную область спектра.



Рисунок 18 – Сравнение экспериментальных спектров КЛ с расчетными и их разложение по компонентам для образца №4 (С122) А и Б при температуре 93 К, В и Г при температуре 153 К, Д и Е при температуре 273 К

Для каждой компоненты (бесфононной линии и пяти фононных повторений) были построены температурные зависимости интенсивности (рисунок 19). Полученные зависимости хорошо описывается эмпирическим законом Мотта [48].



Рисунок 19 – Температурная зависимость интенсивности свечения бесфононной линии и пяти фононных повторений

На рисунке 20 представлены спектры катодолюминесценции алмазного образца №4 (С64) с содержанием N<sub>2</sub>V<sup>0</sup> центров.



Рисунок 20 – Спектры катодолюминесценции алмазного образца с содержанием  $N_2 V^0$  центров

С повышением температуры происходит тушение катодолюминесценции. На 503,4 нм находится максимум бесфононной линии, принадлежащий  $N_2V^0$  центру. Также в спектрах наблюдалось широкое крыло люминесценции с максимумом на 520 нм. Мы предполагаем, что в этом крыле содержатся компоненты фононных повторений  $N_2V^0$ ,  $NV^0$ ,  $NV^-$  центрам [22]. На рисунке 21 представлена температурная зависимость интенсивности бесфононной линии  $N_2V^0$  центра на 503,4 нм и широкого крыла с максимумом на 520 нм. С повышением температуры интенсивность изменяется с 168 отн. ед. при температуре 93 К до 96 отн. ед. при температуре 273 К для максимума широкого крыла. И с 143 отн. ед. при температуре 93 К до 82.5 отн. ед. при температуре 273 К для бесфононной линии  $N_2V^0$  центра.



Рисунок 21 – Температурные зависимости интенсивности бесфононной линии N<sub>2</sub>V<sup>0</sup> центра и максимума широкого крыла

Таким образом образцы, содержащие NV-центры обладают интенсивной люминесценцией в видимом диапазоне, что делает их потенциально пригодными для применения в качестве датчиков солнечного ветра, мониторов рентгеновского пучка, светодиодов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведен анализ литературных данных по теме исследования, были исследованы спектры ИК поглощения, КР спектры, зарегистрированы спектры катодолюминесценции синтетических алмазных образцов с различным азот-вакансионным составом в температурном диапазоне от 80 до 500 К.

На основе проведенных экспериментальных исследований можно сделать выводы.

1. При экситонной люминесценции в беспримесных образцах, при увеличении температуры, происходит смещение максимума пика свободных экситонов от 234,9 нм до 236,4 нм. Что связано с разной скоростью заполнения четырех экситонных состояний.

2. Было зарегистрировано свечение экситонов при температуре выше комнатной (500 К).

 Малопримесные алмазные образцы, имеющие люминесценцию в ультрафиолетовой области, потенциально могут применяться в качестве источников УФ излучения.

 Рассмотрены механизмы возникновения полосы самопоглощения образца С43 содержащего NV<sup>-</sup> центры при возбуждении высокоэнергичным пучком.

5. Алмазные образцы с содержанием NV центров, имеющие люминесценцию в видимом диапазоне, потенциально могут применяться в качестве визуализаторов рентгеновских и электронных пучков, а также в качестве детекторов излучения.

6. При малых временах воздействия электронным пучком на образец, катодолюминесценцию можно использовать как метод неразрушающего контроля совершенства кристаллической структуры образца, а также анализа примесно-дефектного состава.

7. Были рассчитаны спектры катодолюминесценции алмазного образца с содержанием  $NV^0$  центров. Были выделены компоненты и построена температурная зависимость интенсивности каждой компоненты. Это поможет исследовать изменение интенсивности каждой компоненты разложения от температуры.

8. В будущем планируется продолжать работу по расчетам спектров катодолюминесценции. Исследовать большее количество образцов. Поучаствовать в создании монитора рентгеновского пучка, и детектора солнечного ветра.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Chris J. H. Wort Diamond as an electronic material/ J. H. Chris Wort,
 S. Richard Balmer// Materialstoday. – 2008. – Vol. 11, is 1-2. P. 22-28.

 The Debye temperature for diamond //Physics. [S.1.], 2014 – URL: https://translated.turbopages.org/proxy\_u/en-ru.ru.bfa3ca9c-63be8862-3153b6df-74722d776562/https/physics.stackexchange.com/questions/ 143650/the-debye-temperature-for-diamond (access date: 14.10.2022).

3. Spear H. E. Synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology / H. E. Spear, J. P. Dismukes // A Wiley-Interscience Publication / eds. John Wiley & Sons. – Chichester, 1994. – P. 57-90.

4. Корляков А. В. Сенсоры «жесткого» ультрафиолетого излучения на основе широкозонных материалов / А.В. Корляков., В. В. Лучинин., М. В Четвергов // Микросистемная техника – 2000. № 2. – С. 9 – 15.

5. Sadowski M. J Generation and diagnostics of fast electrons within tokamak plasmas // Nukleonika. – 2011. –Vol. 56, is 2. – P. 85-98.

6. Boron doped diamond electrodes for nitrate elimination in concentrated wastewater / C. Levy-Clement, N. A. Ndao , A. Katty [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2003. – Vol. 12, – P. 606–612.

7. Micro-machine fabrication using diamond-like carbon films / A.P.Mousinho, R.D.Mansano, M.Massi [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2003. – Vol. 12, – P. 1041–1044.

 Детекторы импульсного рентгеновского и нейтронного излучения на основе природного алмаза / А. Г. Алексеев, В. Н. Амосов, И. Н. Растягаев [и др.] // Техника ядерного эксперимента. – 2004. – № 2. – С. 21–24.

Лейпунский О. И. Об искусственных алмазах // Успехи химии.
 1939. – № 10. – С. 1519–1534.

Liander, H. Artificial diamonds / H. Liander, E. Lundblad // ASEA
 Journal. –1955. – Vol. 28, is 5-6. – P. 97-98.

11. Man-made diamonds / F. P. Bundy, H.T. Hall, H.M. Strong and R.H. Wentorf // Nature. –1955. – Vol. 176. – P. 51-55.

12. Рич. В. И. Неоконченная история искусственных алмазов /
В. И. Рича и М. Б. Черненко. – Москва: Наука, 1976. – 137 с.

Бланк В. Д. Исследование вторичной электронной эмиссии монокристалла алмаза: дис. канд. физ.-мат. Наук / В. Д. Бланк. – Долгопрудный, 2016. – 187.

14. Crookes, W. On the Illumination of Lines of Molecular Pressure, and the Trajectory of Molecules // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. -1879. - Vol. 170. - No 5. - P. 135-164.

Редькин Н. А. ИК-Фурье спектрометрия и масс-спектрометрия в идентификации органических соединений / Н. А. Редькин. – Самара: Изд- во Самар. ун-та, 2019. – 92.

16. Рамановская спектроскопия. // Спектр-М. – [Б.м], 2020. – URL: https://enspectr.ru/news/ramanovskaya-spectroskopiya/ (дата обращения: 15.10.2022).

17. Спектрометрия комбинационного рассеивания (Раман спектрометрия). // StudFiles. – [Б.м], 2019. – URL: https://studfile.net/preview/7708832/page:20/ (дата обращения: 15.10.2022).

18. Метод спектроскопии комбинационного рассеяния света //

Институт физики им. Киренского. – [Б.м], 2017. – URL: http://kirensky.ru/ru/institute/labs/mc/ramansp (дата обращения: 15.10.2022).

19. Рамановская спектроскопия (комбинационного рассеяния). Основы, методы, применение. // CZL. – [Б.м], 2005. – URL: https://www.czl.ru/tgroups/introduction-to-raman-spectroscopy/ (дата обращения: 15.10.2022).

Field J. E. The Properties of Natural and Synthetic Diamonds. / J. E.
 Field – London. : Academic press. – 1992. – 710 p.

21. Бескрованов В.В. Онтогения алмаза. / В. В. Бескрованов. – Новосибирск: Наука, 2000. – 263 с.

Zaitsev A. M. Optical properties of diamond: A data handbook. / A. M.
 Zaitsev. - Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 502 p.

23. Идентификацияприродных,синтетическихиобработанных алмазов. // Драгоценные металлы – [Б. м.], 2016 – URL:http://jewelpreciousmetal.ru/technology\_gems\_identificationdiamond.php/(дата обращения: 15.10.2022).

24. Quantum measurement and orientation tracking of fluorescent nanodiamonds inside living cells // L. P. McGuinness, Y. Yan, A. Stacey [et al.] // Nat. Nanotechnol. – 2011. – Vol. 6. – P. 358-363.

25. Nuclear magnetic resonance spectroscopy on a (5-Nanometer)3 sample volume // T. Staudacher, F. Shi, S. Pezzagna [et al.] // Science. – 2013. – Vol. 339. – P. 561-564.

26. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond // J. R. Maze, P. L. Stanwix, J. S. Hodges [et al.] // Nature. – 2008. – Vol. 455. – P. 644-647.

27. Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions // G. Balasubramanian, I. Y. Chan, R. Kolesov [et al.] // Nature. – 2008. – Vol. 455. – P. 648-651.

Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register //
G. Waldherr, Y. Wang, S. Zaiser [et al.] // Nature. – 2014. – Vol. 506. – P. 204211.

29. Room-temperature quantum bit memory exceeding one second //
P. C. Maurer, G. Kucsko, C. Latta [et al.] // Science. – 2012. – Vol. 336. – P. 1283-1286.

30. Decoherence-protected quantum gates for a hybrid solid-state spin register // T. van der Sar, Z. H. Wang, M. S. Blok [et al.] // Nature. – 2012. – Vol. 484. – P. 82-86.

31. Doherty M.W. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond /
M. W. Doherty, N.B. Manson, P. Delaney [et al.] // Physics Reports. – 2013 – V.
528 – P. 1- 45.

32. Quantum information processing with diamond / I. Aharonovich,
C. Santori, B. A. Fairchild [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 106, is 12. –
P. 124904.

33. Increasing the coherence time of single electron spins in diamond by high temperature annealing / B. Naydenov, F. Reinhard, A. Lammle [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2010. – Vol. 97, is 24. – P. 242511.

34. Винс В. Г. Генерация и отжиг радиационных дефектов в алмазах, облученных электронами/ В. Г. Винс, А. П. Елисеев, М. Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – № 8. – С. 66–79.

35. Implantation of labelled single nitrogen vacancy centers in diamond using / J. R. Rabeau, P. Reichart, G. Tamanyan [et al.] // Phys. Lett. – 2006. – Vol. 88. – P. 023113.

36. Creation efficiency of nitrogen-vacancy centres in diamond /
S. Pezzagna, B. Naydenov, F. Jelezko [et al.] // New J. Phys. – 2010. – Vol. 12.
– P. 065017.

37. The formation of NV centers in diamond: A theoretical study based on calculated transitions and migration of nitrogen and vacancy related defects /
P. Deak, B. Aradi, M. Kavian [et al.] // Phys. Rev. B. - 2014. - Vol. 89. P. 075203.

38. Polini R. Wear resistance of nano-and micro-crystalline diamond coatings onto WC–Co with Cr/CrN interlayers / R. Polini, M. Barletta, G. Cristofanilli // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 519, is. 5. – P. 1629–1635.

39. Nanoscale quantum gyroscope using a single 13C nuclear spin coupled with a nearby NV center in diamond / Song X., Wang L., Feng F. [et al.] // Journal of Applied Physics. 2018. – Vol. 123. – P. 114301.

40. Cherenkov-type diamond detectors for measurements of fast electrons in the TORESUPRA tokamak / Jakubowski L., Sadowski M. J., Zebrowski J. [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2018. – Vol. 81. – P. 013504.

41. Are Diamond Nanoparticles Cytotoxic? / A. M. Schrand, H. Huang,
C. Carlson, J.J. Schlager // The Journal of Physical Chemistry B. – 2007. – Vol.
111, is. 1. – P. 2–7.

42. Peptide-grafted nanodiamonds: preparation, cytotoxicity and uptake in cells / S. Vial, M. Christelle, S. Sagan, T. Eirinopoulou // ChemBioChem. – 2008.
– Vol. 9, is. 13. – P. 2113–2119.

43. Electron-Spin Resonance of Nitrogen Donors in Diamond /
W. V. Smith, P. Sorokin, I. L. Gelles, G. Lasher // Physical Review. – 1959. –
Vol. 115, is. 6 – P. 1546–1552.

44. Davies G. A nitrogen aggregate in diamond-its symmetry and possible structure // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1976. – Vol. 9. – P. L537-L542.

45. Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes / A. Kozyrev, V. Kozhevnikov, M. Vorobyov [et al.] // Laser and Particle Beams. – 2015. – Vol. 33, is. 2. – P. 183–192.

46. Hazama Yu. Harmonization of private law on a global level / Yu. Hazama, N. Naka // Physical review. – 2014. – Vol. 90, is. 4. – P. 045209.

47. Pulsed Cathodoluminescence of Natural and Synthetic Diamonds Excited by Nanosecond and Subnanosecond Electron Beams. Cathodoluminescence / E.I. Lipatov, V.M. Lisitsyn, V.I. Oleshko, E.F. Polisadova, V.F. Tarasenko and E.H. Baksht. - DOI: 10.5772/32321 // Cathodoluminescence. 2012. P. \_ 51-70. URL: -https://www.intechopen.com/chapters/34036 (access date: 01.04.2022). - Access mode: open access.

48. Luminescence spectra of diamonds containing nitrogen-vacancy and interstitial photoactive centers / A. G. Burachenko, E.I. Lipatov, D. E. Genin [et al.] // Journal of Luminescence. – 2021. – Vol. 237, is. 10. – P. 118214 (1-8).



СПРАВКА

#### Томский Государственный Университет

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

#### ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

| Автор работы:    | Переседова Дарья Александровна  |
|------------------|---|
| Самоцитирование  |   |
| рассчитано для:  | Переседова Дарья Александровна  |
| Название работы: | ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРОВ КАОТДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АЗОТ-ВАКАНСИОННЫХ ЦЕНТРОВ В АЛМАЗЕ |
| Тип работы:      | Выпускная квалификационная работа   |
| Подразделение:   | Радиофизический факультет   |
|                  |   |

| СОВПАДЕНИЯ                          | 4.71% |       |   |
|-------------------------------------|-------|-------|---|
| ОРИГИНАЛЬНОСТЬ                      | 90.3% | 4.99% |   |
| ЦИТИРОВАНИЯ                         | 0%    | 4.71% |   |
| САМОЦИТИРОВАНИЯ                     | 4.99% |       |   |
|                                     |       | 90.39 | 6 |
|                                     |       |       |   |
| ДАТА ПОСЛЕДНЕИ ПРОВЕРКИ: 13.06.2023 |       |       |   |

Структура документа: Модули поиска:

**PE3VJbTATbl** 

Проверенные разделы: титульный лист с.1, содержание с.2, основная часть с.3-37

ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс\*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley ; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразированные

Работу проверил: Каширский Данила Евгеньевич

ФИО проверяющего

Дата подписи:

13 WHOME 2023

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет. Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.