

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

« 08 » июнь 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА-  
ЧЕРЕНКОВА В АЛМАЗЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С  
ЭНЕРГИЯМИ ДО 300 КЭВ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 300-800 К

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

Крылов Александр Александрович

Руководитель ВКР  
к. физ.-мат. н, н.с. ЛКИТ РФФ ТГУ

  
\_\_\_\_\_ А.Г. Бураченко

подпись

« 08 » июнь 2023 г.

Автор работы  
студент группы № 071905

  
\_\_\_\_\_ А.А. Крылов

подпись

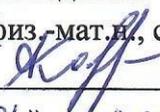
« 08 » июнь 2023 г.

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

«01» март 2023 г.

### ЗАДАНИЕ

По выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра обучающемуся  
Крылову Александру Александровичу

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

1 Тема выпускной квалификационной работы

Исследование катодолуминесценции и излучения Вавилова-Черенкова в алмазе под  
действием электронного пучка с энергиями до 300 кэВ в диапазоне температур 300-800К.

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 – свечение алмазных образцов с различным примесно-дефектным  
составом.

Предмет исследования – определение примесно-дефектного состава алмазных образцов, а  
также определение спектров свечения этих образцов под действием пучков электронов с  
энергией десятки-сотни кэВ в широком диапазоне температур (300-800 К).

Цели исследования – получить информацию о катодолуминесценции и излучения  
Вавилова-Черенкова в спектрах свечения различных алмазных образцов при облучении их  
пучками электронов с энергией десятки-сотни кэВ в диапазоне температур 300–800 К.

Задачи:

1. Изучить литературу по теме исследования.
2. Подготовить экспериментальный стенд по облучению алмазных образцов пучком электронов с энергией десятки-сотни кэВ алмазных образцов.
3. Создать экспериментальную камеру с индукционным нагревательным элементом и системой водяного охлаждения для нагрева алмазных образцов до температуры ~ 800 К.
4. Провести исследование по регистрации спектральных характеристик свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом.
5. Провести исследование примесно-дефектного состава алмазных образцов спектроскопическими методами – ИК-поглощение и КР.
6. Проанализировать полученные результаты.

Методы исследования:

1. Спектральные исследования свечения с помощью спектрометра, чувствительного в диапазоне 190-1100 нм (разрешение 0,9 нм).

- Исследования спектров ИК-поглощения и КР с помощью ИК Фурье спектрометра с подключенным Raman модулем.

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа, –  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, кафедра  
квантовой электроники и фотоники.

#### 4 Краткое содержание работы

В работе исследуется катодолюминесценция и излучение Вавилова-Черенкова в алмазных образцах с различным примесно-дефектным составом под действием электронного пучка с энергиями до 300 кэВ в диапазоне температур 300-800 К. А также спектры ИК-поглощения и КР данных образцов. Получены данные о применимости алмазных образцов в качестве материала радиатора/сцинтиллятора для детекторов заряженных частиц.

Руководитель выпускной квалификационной работы

Канд. физ.-мат. наук, н. с. ЛКИТ РФФ ТГУ

 / А.Г. Бураченко

Задание принял к исполнению

Студент РФФ ТГУ

 / А.А. Крылов

## АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа бакалавра содержит: 28 страниц, 3 раздела, 5 формул, 21 рисунок, 1 таблицу, 24 использованных источника.

Объектом исследования является свечение алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом. Предметом исследования является определение примесно-дефектного состава алмазных образцов, а также определение спектров свечения этих образцов под действием пучков электронов с энергией десятки-сотни кэВ в широком диапазоне температур (300-800 К).

Цель данной работы заключается в получении информации о катодолюминесценции и излучении Вавилова-Черенкова в спектрах свечения различных алмазных образцов при облучении их пучками электронов с энергией десятки-сотни кэВ в диапазоне температур 300–800 К.

В работе представлен литературный обзор по теме выпускной квалификационной работы. Подготовлен экспериментальный стенд по облучению алмазных образцов пучком электронов с энергией десятки-сотни кэВ алмазных образцов. Создана экспериментальную камеру с индукционным нагревательным элементом и системой водяного охлаждения для нагрева алмазных образцов до температуры  $\sim 800$  К. Проведено исследование по регистрации спектральных характеристик свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом. Проведено исследование примесно-дефектного состава алмазных образцов спектроскопическими методами – ИК-поглощение и КР. Проведен анализ полученных результатов. Данные, полученные в настоящем исследовании показали применимость алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом в качестве материала радиатора/сцинтиллятора для детекторов заряженных частиц.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Обозначения и сокращения .....	3
Введение .....	4
1 Основные свойства катодолюминесценции, излучения Вавилова-Черенкова, а также методы спектроскопического анализа образцов. ....	6
1.1 Основные свойства люминесценции. Катодолюминесценция.....	6
1.2 Основные свойства излучения Вавилова-Черенкова .....	9
1.3 Методы исследования состава образцов на основе ИК и КР спектроскопии.....	13
2 Экспериментальное оборудование и методики измерений.....	15
3 Результаты и анализ экспериментальных исследований.....	18
3.1 Результаты и анализ экспериментальных исследований свечения и оптического пропускания различных алмазных образцов. ....	18
3.2 Результаты и анализ экспериментальных исследований спектров ИК-поглощения и спектров КР различных алмазных образцов.....	23
Заключение.....	26
Список использованных источников и литературы.....	27

## **ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

ИВЧ – Излучение Вавилова-Черенкова

ЧД – черенковский детектор

КЛ – катодолюминесценция

УФ – ультрафиолетовый

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ВДВТ – алмазы, полученные методом температурного градиента

ГХО – алмазы, полученные методом газохимического осаждения

БФЛ – бесфононная линия

ИК – инфракрасный

КР – комбинационное рассеяние

## ВВЕДЕНИЕ

Детекторы высокоэнергетических частиц применяются в различных областях науки и техники. Наиболее распространенными являются черенковские детекторы (ЧД), работающие на основе излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) и сцинтилляционные детекторы. Черенковские детекторы позволяют более точно определять такие параметры заряженных частиц, как ее тип, энергию и массу. ЧД чаще применяются для регистрации заряженных частиц с энергией единицы-десятки МэВ, однако существуют области применения ЧД, где они регистрируют потоки электронов с энергией десятки-сотни кэВ. При таких энергиях электронов в материале радиатора ЧД (среды, в которой возникает ИВЧ) помимо ИВЧ может возникать и катодoluminesценция, которая будет искажать сигнал ИВЧ, регистрируемый ЧД. Поэтому информация о вкладе КЛ и ИВЧ в спектр свечения материала радиатора ЧД при воздействии пучком электронов с энергией десятки-сотни кэВ является очень важной.

В настоящее время одной из наиболее важных областей применения ЧД является регистрация убегающих электронов (УЭ) в установках термоядерного синтеза типа токамак. Известно, что основная энергия таких электронов составляет десятки-сотни кэВ [1]. Появление УЭ в токамаках может негативно сказаться на работе самой установки, и привести к частичному или полному выходу её из строя. Поэтому контроль УЭ в токамаках является важной задачей. Во время работы в токамаках создаются экстремальные условия: высокая температура (выше 500 К) и высокий радиационный фон [1]. По этой причине выбору материала радиатора ЧД в токамаках уделяют особое внимание. Наиболее перспективным материалом радиатора, способным работать в таких экстремальных условиях, является алмаз, так как он обладает высокой температурной, радиационной стойкостью и электрической прочностью. Кроме того, за счет высокого показателя преломления, алмаз имеет низкую пороговую энергию возникновения в нем ИВЧ, которая составляет ~ 50 кэВ.

Кроме того, в настоящее время становится перспективным применение черенковских детекторов на основе алмаза для регистрации заряженных частиц солнечного ветра в околоземном космическом пространстве. Такие частицы накапливаются на обшивке космических аппаратов и могут приводить к выходу из строя их электронной аппаратуры. Основная энергия электронов солнечного ветра составляет также десятки-сотни кэВ [2]. Температура окружающей среды в космическом пространстве может варьироваться в диапазоне (150 К - 600 К). Поэтому исследования свечения алмаза при воздействии пучком

электронов с энергией десятки-сотни кэВ, как при низких, так и при высоких температурах (выше 300 К) являются актуальными.

Основной сферой применения сцинтилляционных детекторов является ядерная спектроскопия [3].

Целью данной работы является получение информации о катодолюминесценции и излучения Вавилова-Черенкова в спектрах свечения различных алмазных образцов при облучении их пучками электронов с энергией десятки-сотни кэВ в диапазоне температур 300–800 К.

Задачи данной работы:

1. Изучить литературу по теме исследования
2. Подготовить экспериментальный стенд по облучению алмазных образцов пучком электронов с энергией десятки-сотни кэВ алмазных образцов
3. Создать экспериментальную камеру с индукционным нагревательным элементом и системой водяного охлаждения для нагрева алмазных образцов до температуры ~
4. Провести исследование по регистрации спектральных характеристик свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом
5. Провести исследование примесно-дефектного состава алмазных образцов спектроскопическими методами – ИК-поглощение и КР.
6. Проанализировать полученные результаты.

# **1 Основные свойства катодолюминесценции, излучения Вавилова-Черенкова, а также методы спектроскопического анализа образцов**

Впервые излучение, впоследствии получившее название излучения Вавилова-Черенкова было обнаружено в 1934 г. аспирантом академика С.И. Вавилова – физиком-экспериментатором П.А. Черенковым. Тогда ученые смогли понять, что данный вид излучения не является люминесценцией, а излучением иной природы, возникающего при воздействии на исследуемые образцы гамма-лучами радия. В 1937 г. И.Е. Тамм и И.М. Франк дали полное объяснение этого явления, было доказано, что источником данного явления являются быстрые электроны, распространяющиеся в веществе со скоростью, превышающую фазовую скорость света в этом веществе.

## **1.1 Основные свойства люминесценции. Катодолюминесценция**

Согласно определению, данному С.И. Вавиловым в 1948 г. Люминесценция – свечение, избыточное на тепловым излучением тела, при условии, что оно обладает конечной длительностью послесвечения большей периода световых колебаний ( $\sim 10^{-10}$  с) [4].

Существует три правила люминесценции, справедливые практически для всех люминесцирующих веществ. Первое- принцип Франка-Кондона, гласит о том, что часть электронной энергии при поглощении и испускании света должна расходоваться на увеличение колебаний структуры, т.е. превращаться в тепло. Второе – правило Стокса, которое гласит о том, что спектр люминесценции всегда сдвинут относительно спектра поглощения в длинноволновую область. Данное правило объясняется тем, что часть поглощенной энергии расходуется на нагрев. Третье правило – постоянство спектра люминесценции (правило Каши), гласит о том, что каждое вещество имеет свой уникальный спектр люминесценции, но в зависимости от способа возбуждения может проявляться свечение тех центров люминесценции, которые не проявляются при других способах возбуждения.

По способу возбуждения люминесценцию, как правило, разделяют на несколько видов: хемилюминесценцию, катодолюминесценцию, сонолюминесценцию, радиолюминесценцию, рентгенолюминесценцию, триболлюминесценцию, биоллюминесценцию, электролюминесценцию. По продолжительности процесса свечения люминесценцию так же принято условно разделять на два класса: флуоресценцию и фосфоресценцию. Флуоресценцией называют свечение, свечение которого после

прекращения воздействия затухает за время  $\sim 10^{-9}$  с. Фосфоресценцией же называют свечение, имеющее заметно большее время послесвечения  $> 10^{-6}$  с [5].

Катодолюминесценция это один из видов люминесценции, возбуждаемая в веществе при бомбардировке его электронным пучком. Особенностью катодолюминесценции является то, что при таком виде возбуждения число центров свечения больше, чем при других видах воздействия [6]. По природе возбуждения катодолюминесценция схожа с фотолюминесценцией, в случае воздействия очень коротким ультрафиолетом [7]. Так как только в этих случаях в веществе образуется достаточно большое количество вторичных электронов. Для возбуждения катодолюминесценции достаточно, чтобы энергия возбуждающих ее электронов была в  $\sim 1.5$  раза выше ионизационного потенциала облучаемого вещества. В результате рассеяния возбуждающих электронов в кристалле образуются электронно-дырочные пары, такие как экситоны, плазмоны и т.д. При распространении таких пар могут возбуждаться центры свечения, а при рекомбинации электронов и дырок на этих центрах свечения и возникает катодолюминесценция. Также стоит отметить, что при возбуждении люминесценции электронным пучком может происходить повреждение (модификация) вещества, но при воздействии пучками электронов нано- и субнаносекундной длительности такого повреждения не происходит, что показано в работе [6].

В случае, когда образец содержит малое количество примесей, в нем отсутствуют примесные или так называемые «ловушечные» энергетические уровни, и электронно-дырочные переходы осуществляются непосредственно между валентной зоной и зоной проводимости. При таких переходах может возникать люминесценция, называемая краевой люминесценцией. Энергия излучаемого фотона при краевой люминесценции равна ширине запрещенной зоны вещества. Энергетическая схема уровней и переходов при краевой люминесценции (зона-зона) представлена на рис. 1.

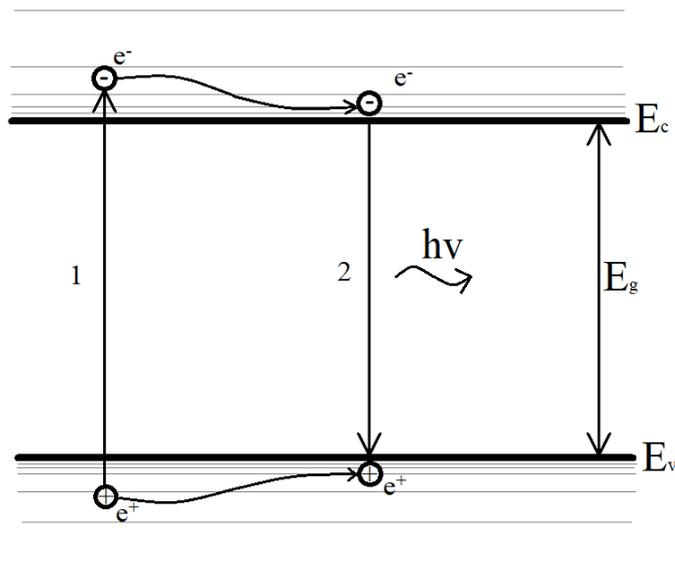


Рисунок 1 – Энергетическая схема уровней и переходов при краевой люминесценции.

На энергетической диаграмме краевой люминесценции (рис. 1) под цифрой 1 изображен переход электрона из стационарного состояния в валентной зоне  $E_v$ , в возбужденное состояние в зоне проводимости  $E_c$ . Под цифрой 2 показан переход электрона из возбужденного состояния в зоне проводимости  $E_c$  в стационарное состояние в валентной зоне  $E_v$ , называемый рекомбинацией, с излучением кванта света с энергией  $E_g = h\nu$ , соответствующей ширине запрещенной зоны полупроводника  $E_g$ .

В случае же, если в веществе содержатся примеси, то они образуют примесные энергетические уровни, через которые, как правило, и происходит процесс рекомбинации электрон-дырочной пары. Энергия излучаемого кванта света в таком случае уже будет зависеть от глубины залегания примесных уровней, и будет равна  $E_1 = h\nu_1$  либо  $E_2 = h\nu_2$ . Энергетическая схема уровней и переходов через примесные уровни представлена на рис. 2.

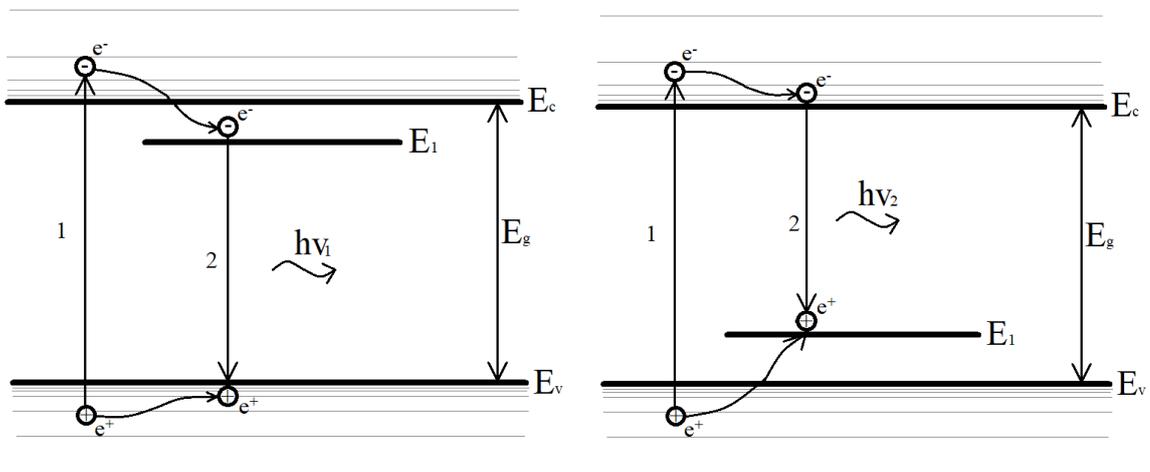


Рисунок 2 – Энергетическая схема уровней и переходов с участием примесных уровней  
(донорный – слева, акцепторный - справа)

Для катодолюминесценции, как и для других видов люминесценции характерны такие физические явления, как инерционность послесвечения, температурные и другие виды тушения. Послесвечением называется длительность свечения, после прекращения воздействия на вещество. Длительность послесвечения определяется характеристиками самого вещества.

Известно, что [5] выход люминесценции из вещества является функцией вероятности внутримолекулярных переходов и распределения центров свечения по частотам электронных переходов. В свою очередь вероятности переходов молекулы из возбужденного состояния в невозбужденное зависят от средней колебательной энергии молекул, которая, как известно, является функцией от температуры. Так же, согласно [8] с ростом температуры по экспоненциальному закону так же увеличивается вероятность безызлучательных переходов, что подтверждается теорией Ван-Русбрека-Шокли [9]. Для большинства излучательных центров зависимость выхода люминесценции от температуры хорошо описывается законом Мотта [10]:

$$\eta(T) = \frac{\eta_0}{1 + A \cdot \exp\left[-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}\right]}, \quad (1)$$

Где  $\eta$  – внешний квантовый выход люминесценции,  $A$  – константа тушения,  $\eta_0$  – максимальный квантовый выход люминесценции (при низких температурах),  $\Delta\varepsilon$  – энергия активации тушения,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

## 1.2 Основные свойства излучения Вавилова-Черенкова

Излучение Вавилова-Черенкова – свечение, возникающее в прозрачной среде, в случае, когда скорость движения электронов выше фазовой скорости света в этой среде [11].

Возникновение и распространение ИВЧ в веществе [12] описывается при помощи принципа Гюйгенса–Френеля. При движении электрона со скоростью  $v$  в прозрачной среде с показателем преломления  $n > 1$  возникает кратковременная поляризация вещества вдоль траектории движущегося электрона. После прохождения электрона через вещество поляризованные молекулы или атомы возвращаются в свое исходное состояние. При этом в среде происходит излучение электромагнитных волн. Если электрон движется в оптически изотропной среде, то в каждой точке его траектории будут излучаться сферические электромагнитные волны. Фазовая скорость распространения таких

электромагнитных волн в среде с показателем преломления  $n$  будет определяться из выражения (2):

$$v = \frac{c}{n} \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

В случае, когда  $v < u$ , интенсивность ИВЧ будет равна 0, и излучения не будет. Если же скорость движения электрона  $v$  будет выше, чем скорость распространения электромагнитных волн  $u$  в этой среде (рис. 3), то огибающая возникающих сферических волн будет образовывать волновой фронт, представляющий собой конус с вершиной в точке, в которой в данный момент времени будет находиться электрон (рис. 3). Нормали к этому волновому фронту будут указывать направление распространения ИВЧ. Угол  $\theta$ , под которым распространяется ИВЧ, можно определить из выражения в [13] (2):

$$\cos\theta = \frac{v_{\text{фаз}}}{v} = \frac{c}{n \cdot v} = \frac{1}{\beta \cdot n}, \text{ где } \beta = v/c \quad (3)$$

Максимально возможный угол, под которым может распространяться ИВЧ в среде с показателем преломления  $n$ , можно также определить из выражения (3), в случае, когда скорость движения электрона равна скорости света ( $\beta=1$ ). Например, для воды ( $n=1.33$ ) максимальный угол распространения ИВЧ приблизительно  $41^\circ$ , а для алмаза ( $n=2.42$ ) примерно равен  $66^\circ$ .

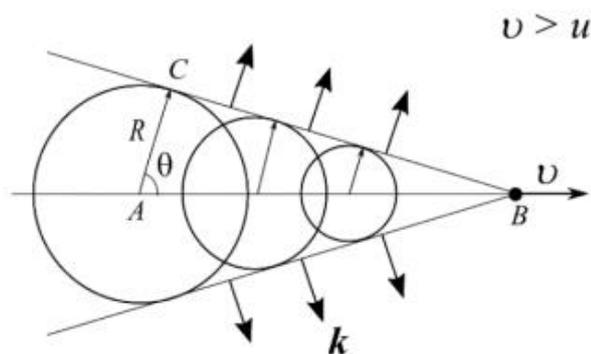


Рисунок 3 – Образование волнового фронта излучения Вавилова-Черенкова

Излучение Вавилова–Черенкова невозможно, если энергия частицы меньше минимальной энергии возникновения ИВЧ, определяемой показателем преломления вещества  $n$ . Эта энергия называется пороговой энергией возникновения ИВЧ. Пороговая

энергия возникновения ИВЧ  $E_{th}(\lambda)$  в [13] определяется из формулы через релятивистскую кинетическую энергию электрона и зависит от показателя преломления среды  $n$ :

$$E_{th}(\lambda) = m_e c^2 \left( \frac{n(\lambda)}{\sqrt{n^2(\lambda) - 1}} - 1 \right) \quad (4)$$

где  $m_e$  – масса покоя электрона.

На рисунке 4 представлена зависимость пороговой энергии возникновения ИВЧ от значения показателя преломления вещества. На данном рисунке указана пороговая энергия для четырех различных веществ, рассчитанная для показателя преломления  $n_D$ . Показатель преломления  $n_D$  измеряется на длине волны 589.3 нм ( $D$ -линия спектра натрия) при атмосферном давлении воздуха и температуре 20°C (см., например [10]).

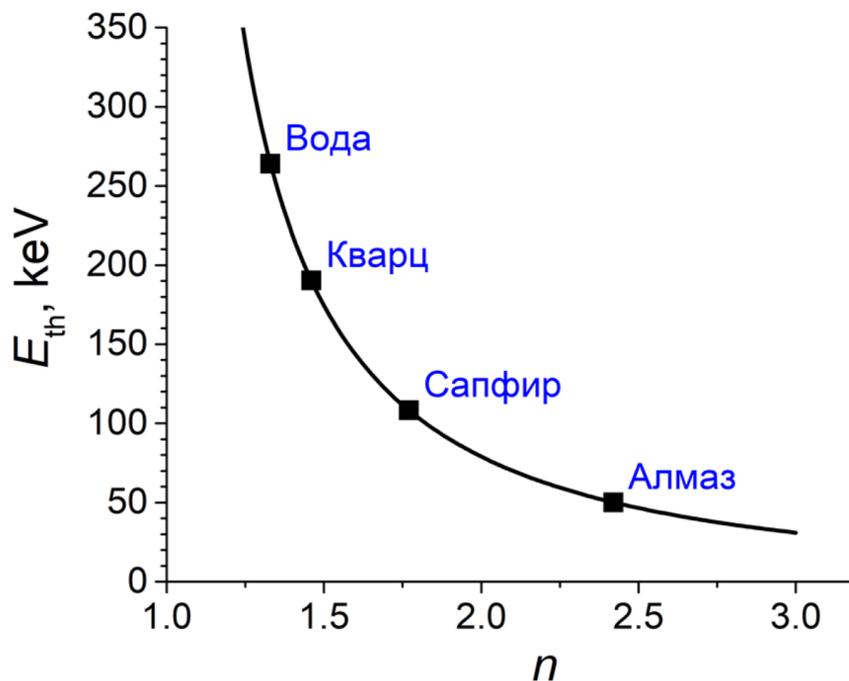


Рисунок 4 – Зависимость пороговой энергии электронов для возникновения ИВЧ от величины показателя преломления среды

Спектральную плотность мощности излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) для одного электрона можно определить из выражения в [13]:

$$dP = 4\pi^2 e^2 V \left( 1 - \frac{c^2}{v^2 n^2} \right) \frac{d\lambda}{\lambda^3} \quad (5)$$

где,

$$V = c \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{E}{mc^2}\right) - 1}{1 + E/mc^2}}$$

Здесь  $n$  – показатель преломления среды,  $m$  – масса электрона,  $c$  – скорость света в вакууме,  $V$  – скорость электрона,  $E$  – кинетическая энергия электрона,  $\lambda$  – длина волны,  $e$  – заряд электрона.

Спектральную плотность энергии ИВЧ можно определить из выражения (5) умножив его на соответствующий временной интервал.

Расчетный спектр ИВЧ в алмазе ( $n=2.42$ ) для различных энергий электрона представлен на рисунке 5.

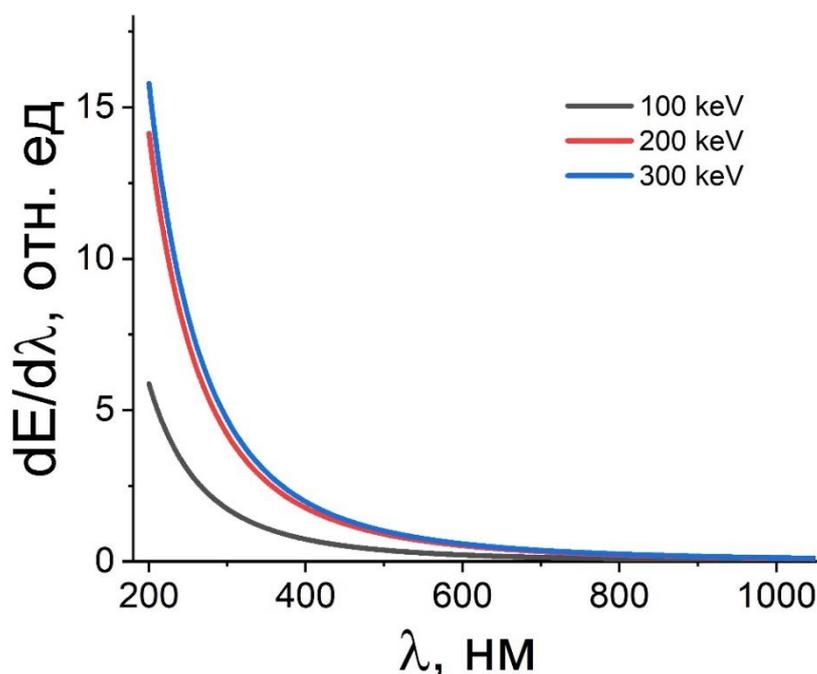


Рисунок 5 – Зависимости спектральной плотности энергии ИВЧ от длины волны для алмаза, рассчитанные для энергий электронов 100, 200 и 300 кэВ

Видно, что интенсивность ИВЧ растёт с уменьшением длины волны и с увеличением энергии электронов обратно пропорционально кубу длины волны (см. выражение 4), а основная энергия ИВЧ сосредоточена в УФ области спектра.

Так же в литературе [14] описаны основные свойства ИВЧ, а также выделены основные отличия между ИВЧ и КЛ:

- ИВЧ имеет пороговый (по энергии/скорости) характер;
- эффект Вавилова–Черенкова, в отличие от люминесценции, является практически безынерционным;
- ИВЧ распространяется под определенным углом к направлению движения заряженной частицы;

- ИВЧ поляризовано;
- ИВЧ имеет непрерывный спектр;
- энергия ИВЧ сосредоточена в основном в УФ области спектра;
- ИВЧ, в отличие от люминесценции, не подвержено ни примесному и ни температурному тушению.

### **1.3 Методы исследования состава образцов на основе ИК и КР спектроскопии**

Инфракрасная спектроскопия (Фурье спектроскопия) – раздел спектроскопии, включающий в себя получение, исследование и физическое применение спектров поглощения, испускания и отражения различных веществ в инфракрасной области спектра. Является одним из самых распространённых методов молекулярной спектроскопии и занимается исследованием колебательных спектров молекул. Эти спектры связаны с энергетическими переходами различных состояний молекул и определяются строением молекулы. Частоты и количество полос определяются потенциальными полями внутримолекулярных сил, а также числом и массами образующих молекулу атомов, и их симметрией. Изучение спектров молекулярного поглощения получило наибольшее распространение, так как поглощение излучения происходит селективно, только на тех частотах, которые совпадают с собственными частотами колебаний атомов в молекулах, и с собственными вращательными частотами целых молекул (собственными частотами колебаний кристаллической решетки в кристаллах) [15]. В результате прохождения ИК излучения через вещество, интенсивность излучения резко падает на резонансных частотах, образуя тем самым полосы поглощения в спектре. Связь между интенсивностями падающего и прошедшего излучения описывается законом Бугера-Ламберта-Бера [16]. На практике ИК-спектр поглощения обычно представляют в виде зависимости коэффициента поглощения от частоты или длины волны [17]. Изучение вращательных и колебательно-вращательных спектров, полученных методами ИК-спектроскопии позволяет определять химический состав и структуру молекул, их моменты инерции и силы межатомного взаимодействия с большой точностью, вследствие однозначной связи между молекулярным спектром молекулы и её строением.

Спектроскопия комбинационного рассеяния (Раман-спектроскопия) – метод молекулярной спектроскопии, основанный на вынужденном рассеянии света, и позволяющий различать вибрационные состояния (фононы) молекул. В отличие от других спектроскопических методов имеет ряд преимуществ, обусловленных спецификой способа. Например, рамановская спектроскопия не требует специальной подготовки образца и

нечувствительна к полосам поглощения самого материала. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) это неупругое рассеяние света, при котором в спектре рассеянного света помимо основной частоты падающей волны  $\omega_0$  присутствуют линии, отличающиеся от неё на величину, равную или кратную частоте внутримолекулярных колебаний [17]. Такие линии, в зависимости от положения, относительно основной полосы называют стоксовыми или антистоксовыми рамановскими линиями. Стоксова рамановская линия  $\omega_s$  образуется при переходе молекулы с нижнего на верхний колебательный уровень в результате поглощения и рассеяния кванта света. Антистоксова рамановская линия  $\omega_{as}$  образуется в результате перехода молекулы с верхнего на нижний колебательный уровень. Интенсивность антистоксовых линий, как правило, мала из-за низкой вероятности переходов с верхних на нижние колебательные уровни, ввиду высокой заселенности последних. На практике в спектроскопии комбинационного рассеяния используют стоксовы линии [18]. Стоксовы и антистоксовы линии описываются следующими выражениями:

$$\omega_s = \omega_0 - m * \omega_v, \quad m = 1, 2, \dots$$

$$\omega_{as} = \omega_0 + m * \omega_v, \quad m = 1, 2, \dots$$

где  $\omega_v$  – частота внутримолекулярных колебаний.

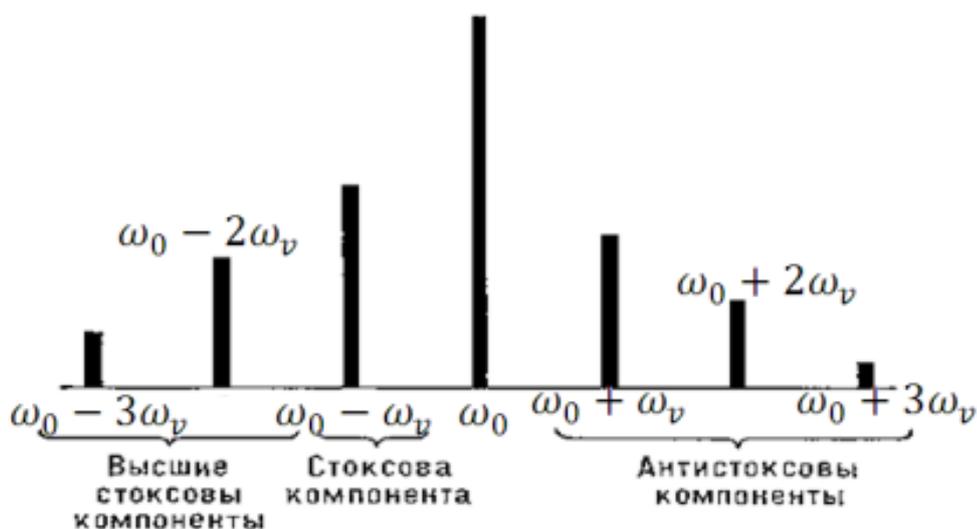


Рисунок 6 - Стоксовы и антистоксовы компоненты рассеянного света

Так как интенсивность рассеянного света напрямую связана с количеством вещества, то КР-спектроскопия позволяет не только качественно, но и количественно получать информацию об образце.

## 2 Экспериментальное оборудование и методики измерений.

Исследования проводились на 4 алмазных образцах с различным примесно-дефектным составом. Образец №1 был номинально-беспримесным, и был получен методом газохимического осаждения (ГХО) [19]. Остальные образцы содержали различную концентрацию примесей азота и азот-вакансионных комплексов, и были получены методом температурного градиента в условиях высокого давления и высокой температуры [19]. Характеристики исследуемых образцов приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Исследуемые образцы и их свойства

Номер образца	Происхождение	Наличие примесей	Размеры, мм
1	ГХО	Номинально-беспримесный	5x5x0,25
2	ВДВТ	Азот, NV центры	2,4x2,4x0,3
3	ВДВТ	Азот, NV центры	4x4x0,4
4	ВДВТ	Азот, NV центры, междуузлия	3,4x6,4x0,6

Для проведения исследований свечения алмазных образцов при температурах в диапазоне 300–800 К была разработана камера с индукционным нагревательным элементом и системой водяного охлаждения [20]. Блок-схема экспериментальной установки представлена на Рис.7. Все исследования проводились при непрерывной откачке камеры форвакуумным насосом.

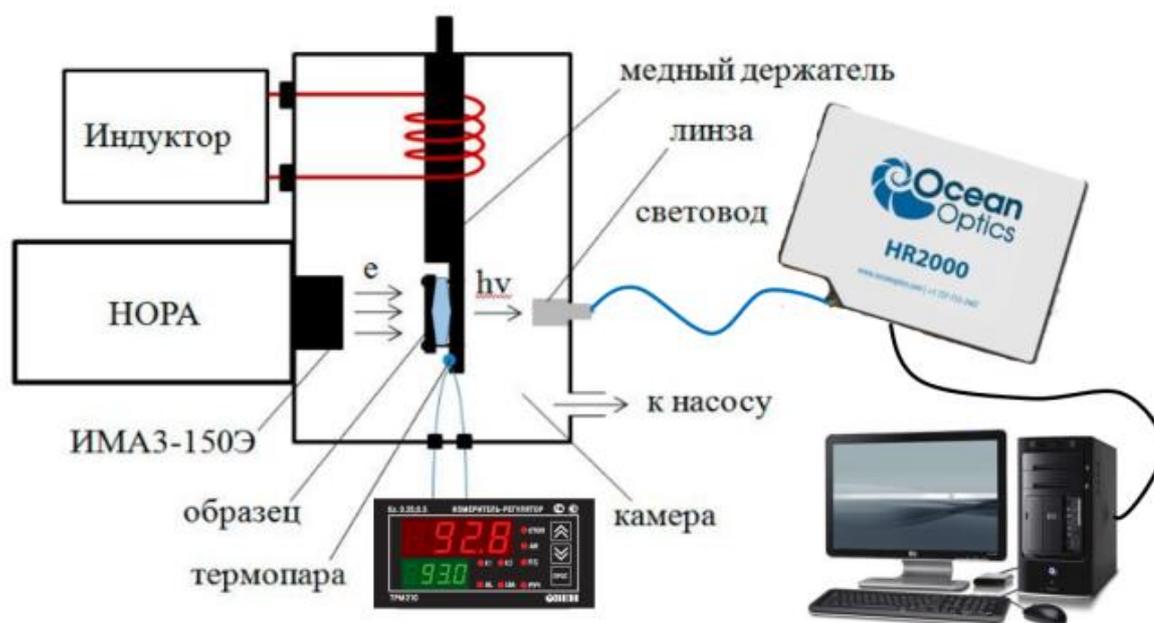


Рисунок 7 – Блок-схема экспериментальной установки.

Возбуждение КЛ исследуемых образцов осуществлялось с помощью пучка электронов, генерируемого ускорителем НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э [21]. Ускоритель работал в импульсно-периодическом режиме с частотой 2 Гц. Энергия электронов в пучке составляла десятки-сотни кэВ (не более 300 кэВ). Исследуемые образцы устанавливались на медном держателе, между двух медных пластин, имеющих отверстия диаметром 3 мм. Расстояние от фольги электронной трубки ИМА3-150Э до образца составляло 14 мм. Медный держатель был соединен с нагревательным элементом индуктора, что позволяло нагревать образцы до температур вплоть до 800 К. Контроль температур осуществлялся с помощью измерителя-регулятора ТРМ-210 к которому была присоединена термопара ТХА (тип К). Рабочий диапазон температур термопары составлял 80–800 К. Термопара закреплялась на медном держателе в непосредственной близости к исследуемому образцу (Рис.7). Излучение от образца попадало в коллимирующую линзу, которая посредством световода была соединена со спектрометром Ocean Optics HR2000, чувствительного в диапазоне длин волн 190–1100 нм. Линза со световодом были прозрачны в спектральном диапазоне чувствительности спектрометра.

Осциллограмма тока пучка электронов для генератора НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э представлена на рисунке 8.

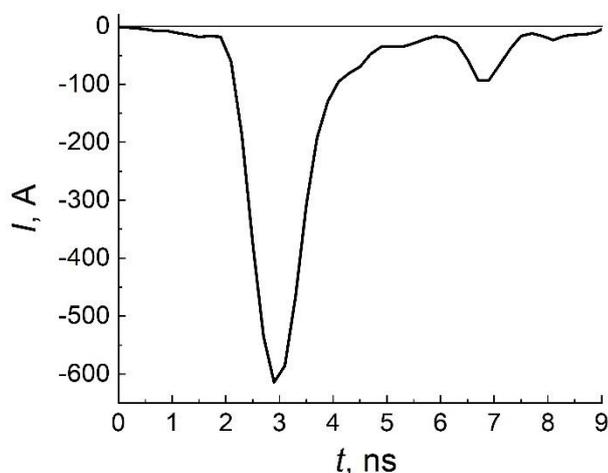


Рисунок 8 – Ток пучка электронов генератора НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э

Импульс тока пучка был зарегистрирован с помощью коллектора [22], с диаметром приемной части 3 см. Длительность импульса тока пучка на полувысоте составляет ~ 1 нс и имеет амплитуду ~ 600 А. Осциллограммы тока пучка снимались с помощью осциллографа Tektronix MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 Гвыб/с).

Распределение пучка электронов по энергиям для генератора НОРА лежит в диапазоне от 30 до 300 кэВ и представлено на рисунке 9.

Данное распределение определялось методом фильтров с помощью сторонней компьютерной программы, работа которой основана на методе регуляризации Тихонова [23].

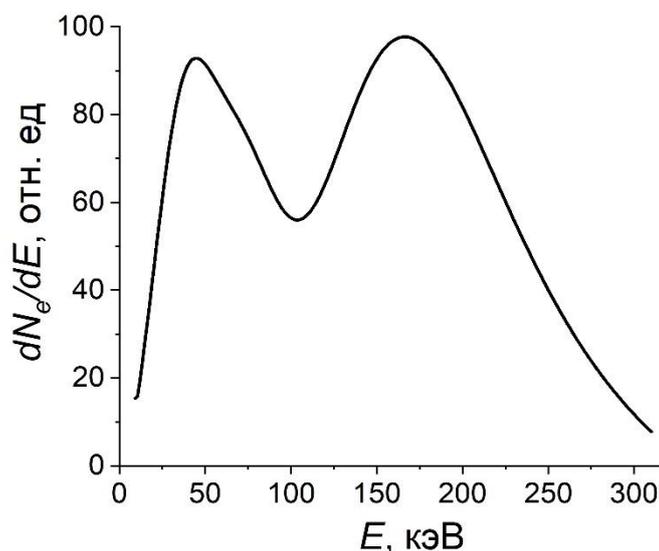


Рисунок 9 – Распределение пучка электронов по энергиям генератора НОРА

Регистрация оптического пропускания исследуемых образцов проводилась с помощью источника широкополосного излучения (190-1100 нм), оптической скамьи с установленными в нее кварцевыми линзами, диафрагмы, световодов, спектрометра HR2000 и компьютера.

Образец закреплялся на диафрагме с отверстием, диаметром 3 мм и толщиной 1 мм, которая крепилась к оптической скамье. Излучение от широкополосного источника излучения проходило через исследуемый образец посредством световодов и линз и полученный спектр пропускания регистрировался спектрометром, который был подключен к компьютеру. Используемые световоды и линзы также были прозрачны в диапазоне длин волн 190–1100 нм.

Спектры ИК нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) и спектры комбинационного рассеяния света регистрировались на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 5700 с различными модулями: с Raman модулем, для получения спектров КР, длина волны возбуждающего лазера 1064 нм, разрешение спектров –  $4 \text{ см}^{-1}$ , ИК НПВО спектры регистрировались при помощи модуля однократного НПВО Smart Performer, разрешение спектров также составляло  $4 \text{ см}^{-1}$ [18].

### 3 Результаты и анализ экспериментальных исследований.

#### 3.1 Результаты и анализ экспериментальных исследований свечения и оптического пропускания различных алмазных образцов.

В данной главе представлено описание полученных спектров излучения, оптического пропускания и температурных зависимостей тушения излучения (рисунки 10-17) для всех исследуемых образцов, а также представлен подробный анализ полученных данных.

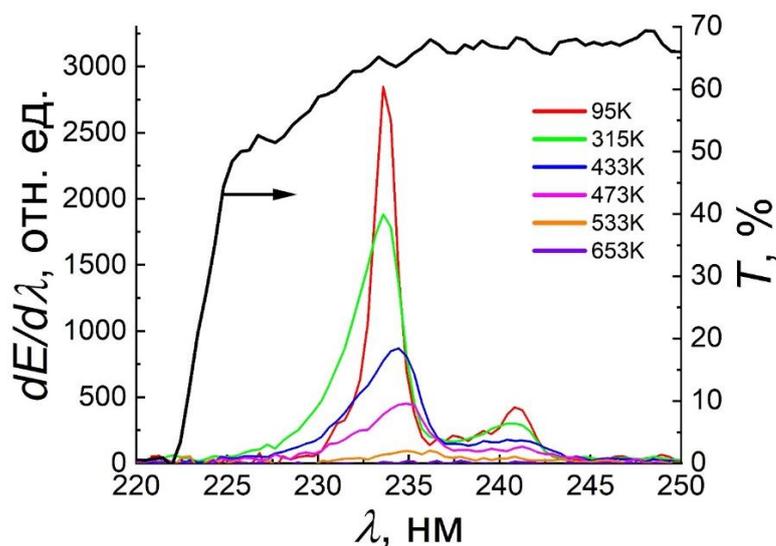


Рисунок 10 – Спектры пропускания и катодолуминесценции для образца №1

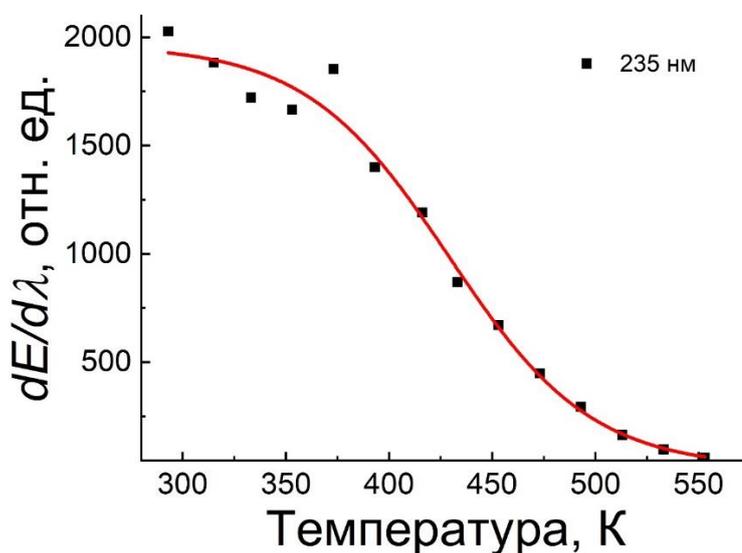


Рисунок 11 – Температурная зависимость тушения экситонной полосы для образца №1

В спектрах КЛ образца №1 (Рис.10) наблюдается экситонная полоса с максимумом на длине волны 233 нм (при комнатной температуре), который с ростом температуры смещается к 235 нм. Данное смещение обусловлено перераспределением вклада состояний тонкого расщепления в общий контур излучательной рекомбинации. Тонкое расщепление

основного экситонного состояния проявляется в виде 4 расщепленных состояний с различной энергией связи [23]. С ростом температуры интенсивность экситонного пика уменьшается, и при температурах выше 600 К в спектрах КЛ не проявляется (рис. 11). Спектр пропускания данного образца продемонстрировал край фундаментального поглощения на 225 нм и отсутствие каких-либо особенностей, что подтверждает его номинальную беспримесность.

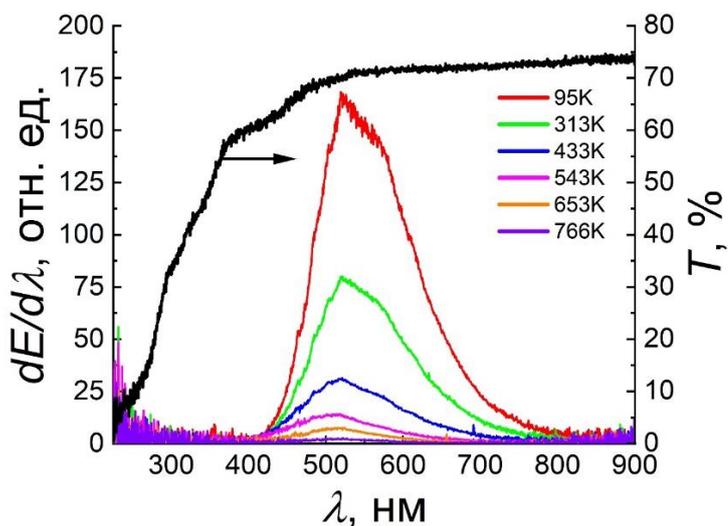


Рисунок 12 – Спектры пропускания и катодолуминесценции для образца №2

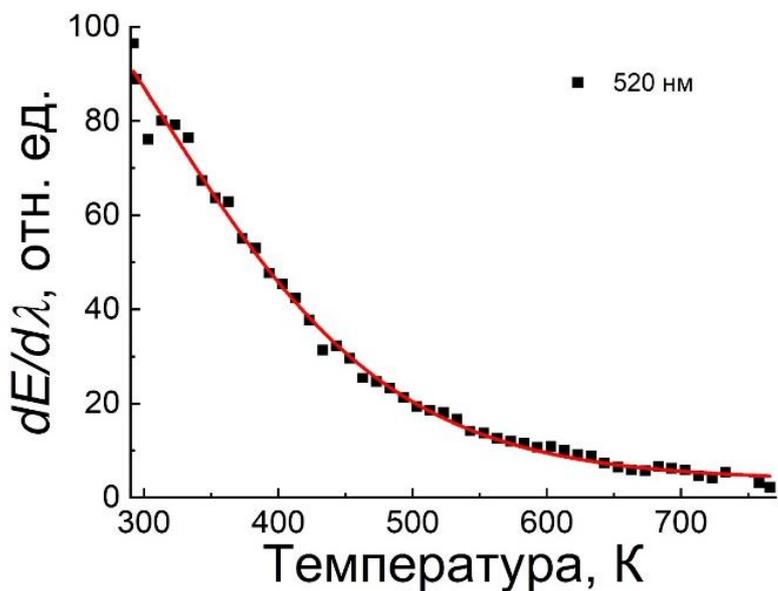


Рисунок 13 – Температурная зависимость тушения максимума полосы люминесценции (400-800 нм) излучения для образца №2

В спектрах КЛ образца №2 (Рис.12) наблюдается широкая бесструктурная полоса в диапазоне 400–800 нм, которая с ростом температуры испытывает сильное тушение. Так

как данный образец содержит азот и подвергнулся радиационно-термической обработке, то предположительно данная широкая полоса связана с  $N_2V^0$  центрами и является электронно-колебательной системой НЗ [14, 24] с нетипичным температурным поведением фоновой крыла. Спектр пропускания образца №2 продемонстрировал вторичный край поглощения с  $\sim 370$  нм и интенсивную широкую полосу на 270 нм на замещающем азоте, что указывает на примерное содержание замещающего азот  $\sim 1.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Кроме того, в спектре данного образца можно отметить слабую электронно-колебательную систему НЗ в диапазоне 370–500 нм (рис. 13).

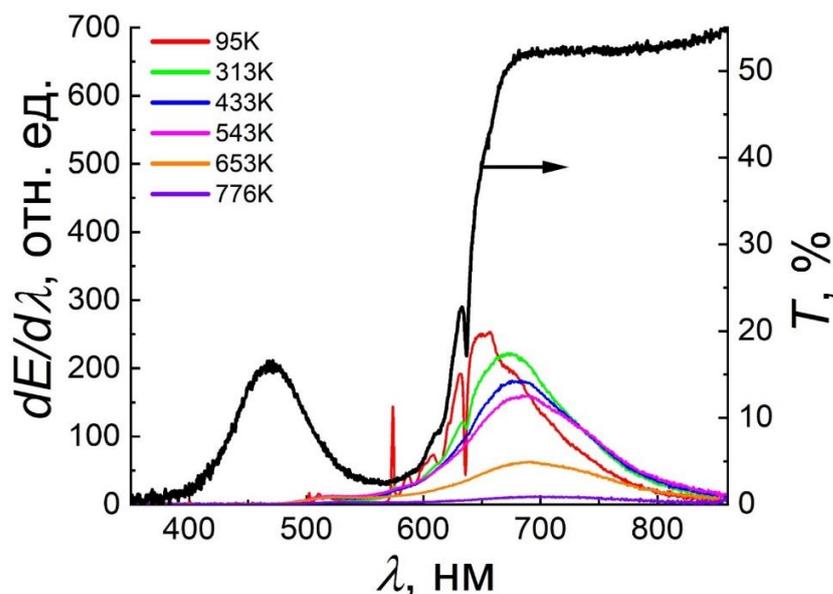


Рисунок 14 – Спектры пропускания и катодолуминесценции для образца №3

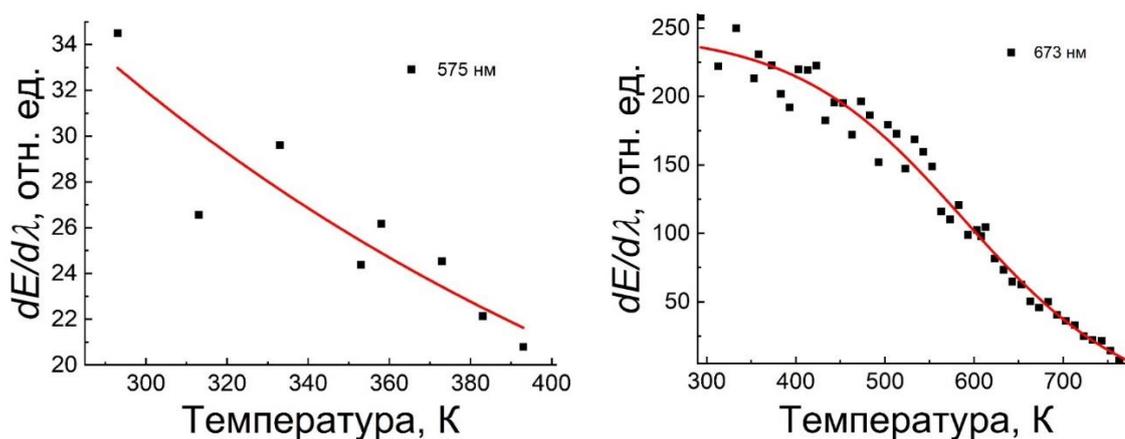


Рисунок 15 – Температурные зависимости тушения излучения  $NV^0$  центров (слева) и фоновой полосы  $NV^-$  центров (справа) для образца №3

В спектре пропускания образца наблюдался континуум поглощения на замещающем азоте. Спектры КЛ образца №3 имели широкую полосу в диапазоне длин волн  $\sim 500$ – $850$  нм с максимумом на длине волны  $\sim 670$  нм (при комнатной температуре), который с ростом

температуры смещался в длинноволновую область спектра. При комнатной температуре (~ 300 К) в спектрах катодолюминесценции наблюдаются бесфононные линии (БФЛ), принадлежащие центрам азот-вакансия [24]: на 575 нм линия, соответствующая  $NV^0$  центру, и на 638 нм – соответствующая  $NV^-$  центру. БФЛ  $NV^-$  центра проявляется как полоса самопоглощения на 638 нм как в спектрах КЛ, так и в спектре пропускания (Рис.14). Самопоглощение на длине волны 638 нм объясняется следующим образом. Электронный пучок, выходящий из электронной трубки ИМАЗ-150Э генератора НОРА имеет энергию не более 300 кэВ. Электроны с такой энергией согласно справочнику [25] могут проникать в алмаз на глубину не более 300 мкм. Таким образом, возбуждение КЛ в образце №2 толщиной 530 мкм происходит не во всем объеме, а только в части образца. В возбужденной области образца происходит ионизация  $NV^-$  центров, и наблюдается КЛ  $NV^0$  центров с БФЛ на 575 нм и фононным крылом 580–750 нм, а невозбужденная область образца является областью поглощения излучения люминесценции  $NV^0$  центров на БФЛ 638 нм и в фононном крыле поглощения  $NV^-$  центров. Однако необходимо отметить, что в спектре КЛ данного образца также присутствует интенсивное свечение  $NV^-$  центров в диапазоне 640–850 нм, которое возбуждается свечением  $NV^0$  центров и в меньшей степени электронами пучка. Широкая полоса в диапазоне длин волн ~ 500–850 нм образована пересечением электронно-колебательных систем люминесценции  $NV^0$  и  $NV^-$  центров. Смещение максимума КЛ, образованного фононными крыльями  $NV^0$  и  $NV^-$  центров, в длинноволновую область спектра по-видимому обусловлено большей скоростью температурного тушения  $NV^0$  центров относительно  $NV^-$  центров. С ростом температуры интенсивность широкой полосы в диапазоне ~ 500–850 нм значительно уменьшается, но наблюдается в спектрах даже при температурах ~ 800 К (Рис.15). Свечение БФЛ  $NV^0$  центров в спектрах КЛ наблюдается при температурах не выше 400 К (Рис.15).

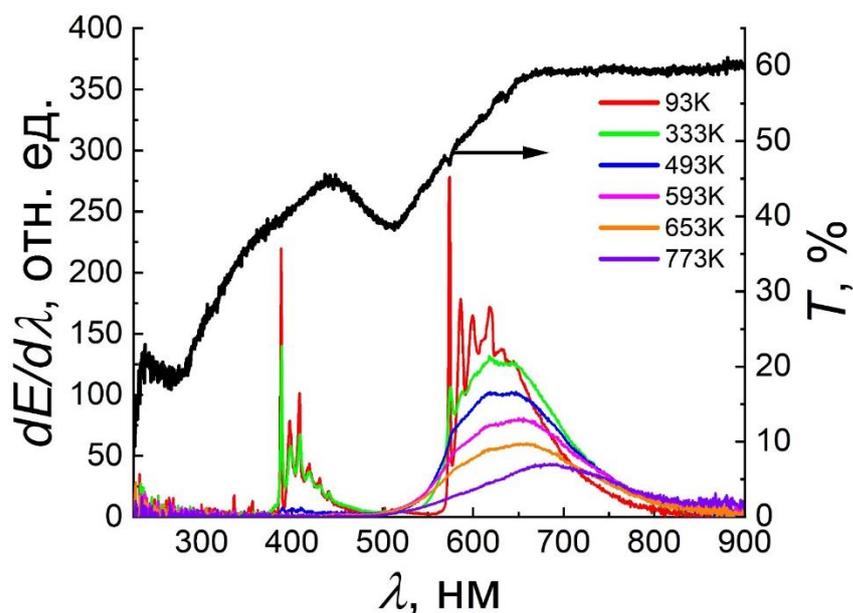


Рисунок 16 – Спектры пропускания и катодолуминесценции для образца №4

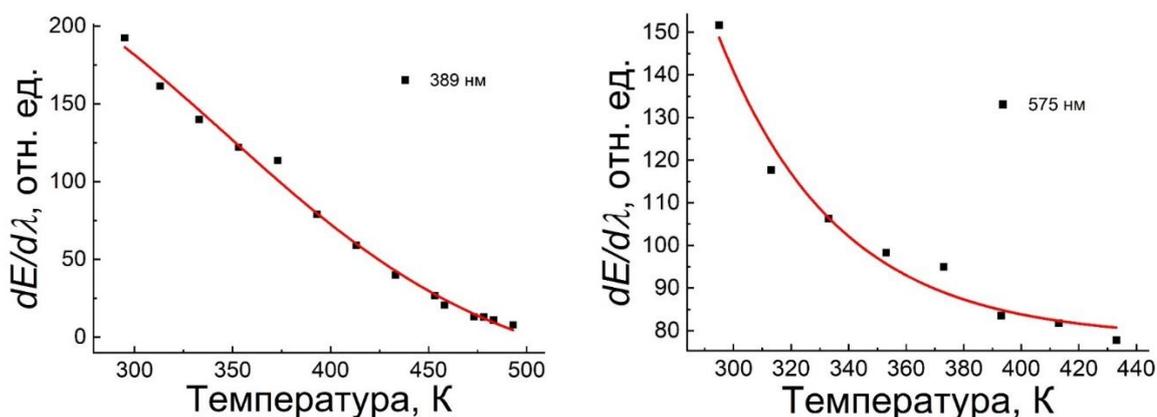


Рисунок 17 – Температурные зависимости тушения полосы на 389 нм (слева) и БФЛ  $NV^0$  центров (справа) для образца №4

В спектрах КЛ данного образца, как и в образце №3, наблюдается БФЛ  $NV^0$  центра, но отсутствует БФЛ  $NV^-$  центра, хотя в спектре пропускания она присутствует в виде слабой линии поглощения на 638 нм, что говорит о низкой концентрации  $NV^-$  в данном образце. В спектрах КЛ образца №4, помимо люминесценции NV центров, также наблюдается электронно-колебательная система с БФЛ на 389 нм и фоновыми повторениями в диапазоне 390–450 нм. Данная электронно-колебательная система обусловлена собственными междоузельными атомами. В спектре пропускания образца №4 наблюдается электронно-колебательная система  $NV^0$  центров, вторичный край поглощения начиная с  $\sim 450$  нм и полоса на 270 нм умеренной интенсивности замещающего азота, что указывает на его концентрацию в диапазоне (рис. 16)  $(1.7-10.0) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Тушение БФЛ на 389 нм наблюдается при температурах порядка 500 К, а БФЛ  $NV^0$  центров при температурах порядка 440 К (рис. 17).

Смещение максимума широкой полосы  $\sim 500\text{--}850$  нм с ростом температуры для образцов №3 и 4 обусловлено большей скоростью температурного тушения  $NV^0$  центров относительно  $NV^-$  центров.

### 3.2 Результаты и анализ экспериментальных исследований спектров ИК-поглощения и спектров КР различных алмазных образцов.

Спектры ИК поглощения и КР всех четырех образцов представлены на рисунках 18-21.

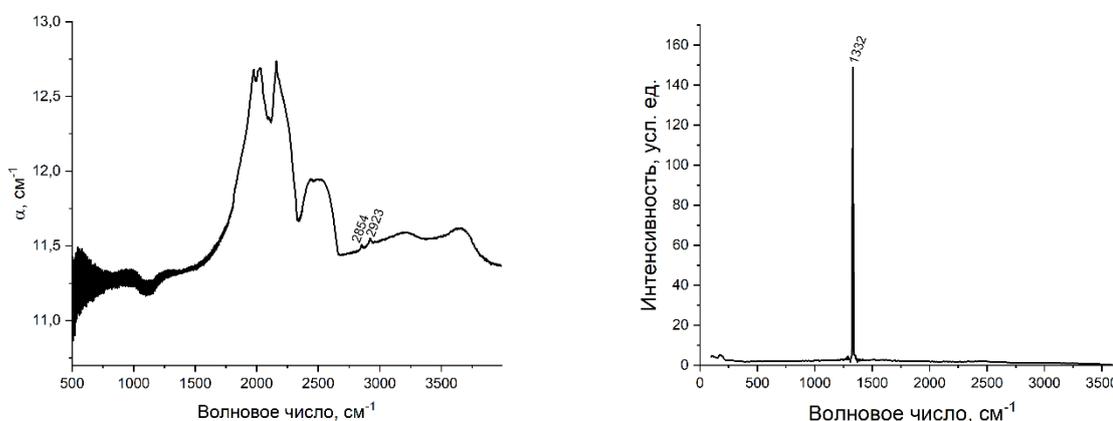


Рисунок 18 – Спектры ИК поглощения (слева) и КР (справа) для образца №1

Для номинально-беспримесного образца №1 в спектрах ИК поглощения, кроме полосы  $\sim 1600\text{--}2600$   $\text{cm}^{-1}$ , обусловленной решеточным поглощением алмаза, наблюдается два пика, на 2854  $\text{cm}^{-1}$ , принадлежащий ассиметричным модам колебаний  $sp^3$ -гибридизированных групп  $-CH_2-$  и на 2923  $\text{cm}^{-1}$ , принадлежащий симметричным модам колебаний  $sp^3$ -гибридизированных групп  $-CH_2-$ . В спектрах КР данного образца наблюдается только интенсивный пик на 1332  $\text{cm}^{-1}$ , называемый алмазным пиком [24].

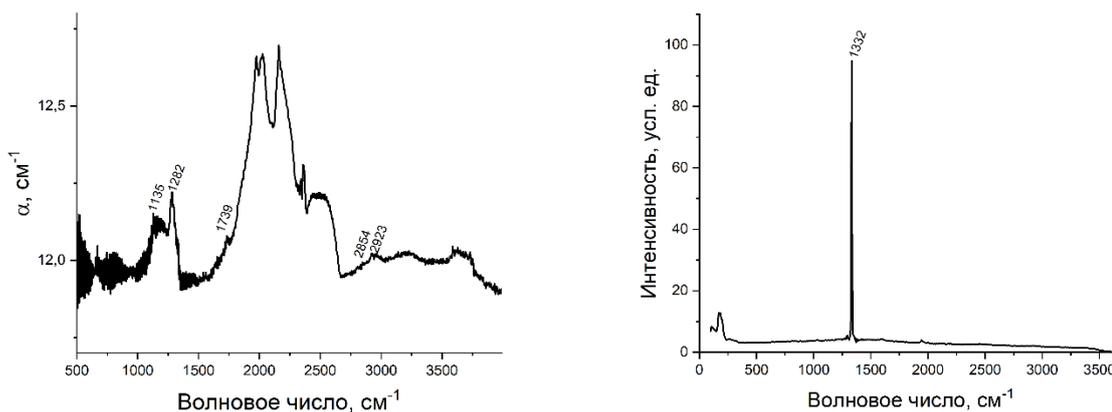


Рисунок 19 – Спектры ИК поглощения (слева) и КР (справа) для образца №2

Для образца №2 в спектрах ИК поглощения, помимо широкой полосы решеточного поглощения, наблюдается линия на  $1135\text{ см}^{-1}$ , принадлежащая полосе  $1000\text{-}1350\text{ см}^{-1}$  в литературе приписывается атомам замещающего азота. Линия на  $1282\text{ см}^{-1}$ , принадлежащая той же полосе  $1000\text{-}1350\text{ см}^{-1}$  характеризуется, как азотный А-центр, что указывает на отжиг данного образца при высокой температуре ( $>1700\text{ °C}$ ). Линия малой интенсивности на  $1739\text{ см}^{-1}$  описывается, как колебания  $\text{C}=\text{O}$  связи карбонильных групп, а также, как абсорбированный на поверхности образца кислород. В данном образце также, как и в образце №1 наблюдаются линии на  $2854\text{ см}^{-1}$  и  $2923\text{ см}^{-1}$ . Спектр КР, также, как и в предыдущем образце содержит только алмазную линию на  $1332\text{ см}^{-2}$  [24].

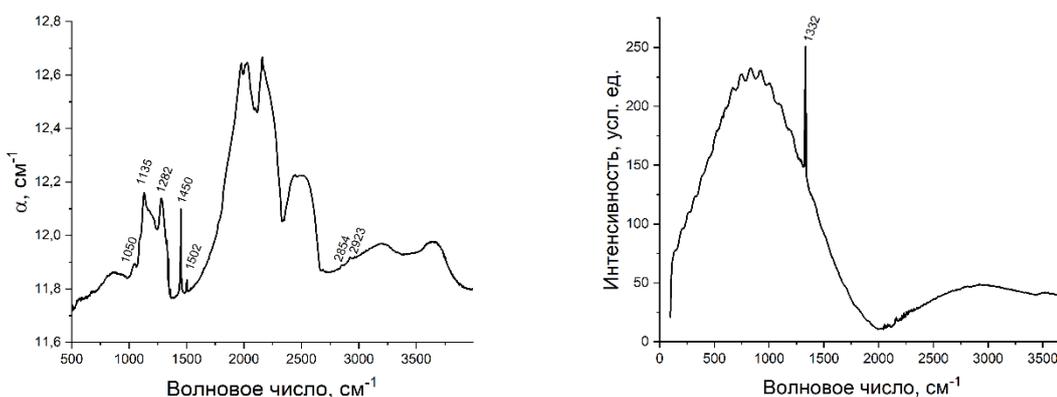


Рисунок 20 – Спектры ИК поглощения (слева) и КР (справа) для образца №3

В спектрах ИК поглощения образца №3, помимо полосы, обусловленной решеточным поглощением алмаза, можно наблюдать слабую линию на  $1050\text{ см}^{-1}$ , которая в литературе описывается как Е-центр, принадлежащий азотсодержащим алмазам. Линии на  $1135\text{ см}^{-1}$  и  $1282\text{ см}^{-1}$ , принадлежащие полосе  $1000\text{-}1350\text{ см}^{-1}$  принадлежащие атомам замещающего азота. Линия на  $1450\text{ см}^{-1}$  характерна для образцов, подвергавшихся

радиационно-термической обработке. Линия на  $1502\text{ см}^{-1}$  наблюдается только в азотсодержащих алмазах, подвергавшихся радиационной обработке и отожженных при температуре  $\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В данном образце также присутствуют линии на  $2854$  и  $2923\text{ см}^{-1}$ , описанные выше. В спектрах КР данного образца наблюдается интенсивная флуоресценция, и алмазная линия на  $1332\text{ см}^{-1}$  [24].

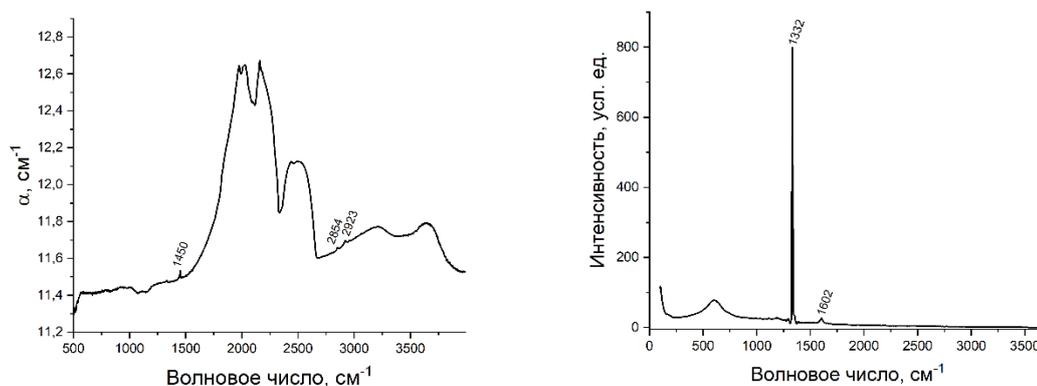


Рисунок 21 – Спектры ИК поглощения (слева) и КР (справа) для образца №4

В спектрах ИК поглощения образца №4 кроме полосы решеточного поглощения алмаза можно наблюдать полосы на  $1450\text{ см}^{-1}$ ,  $2854\text{ см}^{-1}$  и  $2923\text{ см}^{-1}$ , описанные выше. С спектрах КР данного образца, помимо алмазной полосы на  $1332\text{ см}^{-1}$ , можно наблюдать слабоинтенсивную полосу с максимумом на  $1602\text{ см}^{-1}$ , в литературе данная полоса описывается, как G-полоса, данная полоса приписывается включениям графита, в различном их виде [24].

Спектральный анализ образцов подтвердил имеющуюся ранее информацию, о химическом составе кристаллов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам проведенного исследования, можно сделать вывод, что в спектрах свечения исследуемых образцов при облучении их пучком электронов с энергиями до 300 кэВ преобладает катодолуминесценция. Для создания черенковских детекторов, способных работать в экстремальных условиях, необходимо использовать алмазные образцы, в которых отсутствует люминесценция в УФ области спектра, так как интенсивность ИВЧ максимальна именно в этой области спектра.

Обнаружено, что в диапазоне температур 300–800 К скорость температурного тушения  $NV^0$  центров относительно  $NV^-$  центров выше

Показано, что для регистрации ИВЧ в УФ области спектра наиболее подходящим является образец №2, а при температурах выше 700 К можно регистрировать ИВЧ как с помощью образца №1, так и №2 в широком спектральном диапазоне (от 225 до 1100 нм). Причем при температурах выше 700 К предпочтительнее использовать образец №1, так как он имеет большее пропускание в УФ области спектра. Образец №3 хуже подходит для регистрации ИВЧ, так как он имеет более слабое пропускание в УФ области спектра. Данный образец может использоваться в качестве сцинтиллятора, так как в нем наблюдается интенсивная люминесценция NV центров в диапазоне длин волн 500–800 нм, которая в спектрах КЛ наблюдается и при температурах  $\sim 800$  К.

Спектры ИК поглощения исследуемых образцов показали, что наибольшая концентрация азотной примеси содержится в образце №3, что согласуется со спектрами КЛ данного образца.

Спектры КР исследуемых образцов оказались менее информативны, однако они подтверждают данные, полученные из спектров ИК поглощения.

Анализ спектров ИК поглощения и КР, а также спектров КЛ алмазных образцов позволяют определить влияние примесей и дефектов на образование центров свечения алмаза. Данная информация может быть полезна при создании алмазных образцов с необходимыми люминесцентными свойствами, предназначенных для использования в черенковских и сцинтилляционных детекторах.

Полученные данные будут полезны для различных применений алмаза как при создании детекторов излучений или заряженных частиц, способных работать в экстремальных условиях, так и в области высокотемпературной электроники и фотоники.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sadowski M. J. Generation and diagnostics of fast electrons within tokamak plasma // *Nukleonika*. – 2011. – Vol. 56, № 2. – P. 85-98.
2. Гальпер А.М. Радиационный пояс Земли. / А.М. Гальпер. - Москва: Изд-во СОЖ, №6, 1999. – С. 74-81.
3. Волков Н.Г. Методы ядерной спектрометрии. / Н.Г. Волков, В.А.Христофоров, Н.П.Ушакова. – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 256 с.
4. Вавилов С.И. Собрание сочинений. Т. 2. / С.И. Вавилов. – М. : Наука, 1952. – 416 с
5. Левшин Л.В. Люминесценция и ее измерения : Молекуляр. люминесценция / Л. В. Левшин, А. М. Салецкий. - Москва : Изд-во МГУ, 1989. - 277,[2] с.
6. Соломонов В.И. Импульсная катодолюминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ / В.И. Соломонов, С.Г. Михайлов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 181 с.
7. Москвин А.В. Катодолюминесценция Ч.1 Общие свойства явления / А.В. Москвин – Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 349 с
8. Агранович, В. М. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах / В. М. Агранович, М. Д. Галанин. – Москва : Наука, 1978. – 383 с.
9. Шик А.Я. Физика низкоразмерных систем / Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, под ред. А.Я. Шика. – СПб.: Наука, 2001. – 160 с
10. Luminescence spectra os diamonds containing nitrogen-vacancy and interstitial photoactive centers / A.G. Burachenko, E.I. Lipatov, D.E. Genin [et al.] // *J. of Luminescence*. – 2021. – Vol. 237. – P. 118214 (1-8).
11. Болотовский Б. М. "Излучение Вавилова — Черенкова: открытие и применение" // *УФН*. – 2009. – №179. – с. 1161–1173
12. Зрелов В. П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий : в 2 т. / В. П. Зрелов. – М.: Атомиздат, 1968. – Т. 2. – 91 с
13. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. Пособие. В 10 т. Т. IV/ В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. – М.: Наука, 1989.– 728 с.
14. Болотовский Б. М. "Дж.В. Джелли "Излучение Черенкова и его применения"" / Б.М. Болотовский, Е.М. Лейкин // *УФН*. –1959. – №69. – с. 693–703

15. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений / А.В. Васильев, Е.В. Гриненко, А.О. Щукин, Т.Г. Федулina – Санкт-Петербург: Изд-во Темплан, 2007. – 30 с.
16. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика — М. : Наука, 1980. – 752 с.
17. Харланов А.Н. Инфракрасная спектроскопия для исследования адсорбционных, кислотных и основных свойств поверхности гетерогенных катализаторов / А.Н. Харланов, М.И. Шилина, Москва: Изд-во МГУ, 2011. – 111 с.
18. Коботаева Н. С. Каталитические системы окисления кумола на основе многослойных углеродных нанотрубок / Н. С. Коботаева, Т. С. Скороходова, Н. В. Рябова //ЖУРНАЛ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ.– 2015.– № 3, с. 460-466
19. Природные и синтетические алмазы. / Г.Н. Безруков, Г.Б. Бокий, Ю.А. Ключев, А.М. Налетов, В.И. Непша. М. :Наука, 1986 – 221 с.
20. Температурное тушение катодолюминесценции примесно-дефектных центров в алмазе в диапазоне температур 300–800 К / А. Г. Бураченко, Д. А. Переседова, А. А. Крылов [и др.] // Потoki энергии и радиационные эффекты (EFRE-2022) : Congress Proceedings, Tomsk, 02–08 октября 2022 года / Edited by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – С. 1494-1498.
21. Месяц Г.А. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / Г.А. Месяц. – Новосибирск : Наука, 1983. – 169 с
22. Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes / A. V. Kozyrev, V. Yu. Kozhevnikov, M. S. Vorobyev [et al.] // Laser and Particle Beams. –2015. – Vol. 33, № 2. – P. 183–192.
23. Hazama Yu. Mass-anisotropy splitting of indirect excitons in diamond / Yu. Hazama, N. Naka // Phys. Rev. B – 2014. – Vol. 90, is. 4. – P. 045209 (1-7).
24. Zaitsev A. M. Optical properties of diamond: A data handbook. / A. M. Zaitsev. – Berlin: Springer, 2001. – 353 p.
25. Brice D.K. Stopping powers for electrons and positrons // Nuclear Instruments. – 1985. – Vol. 12. – P. 187-188.



## СПРАВКА

Томский Государственный Университет

о результатах проверки текстового документа  
на наличие заимствований

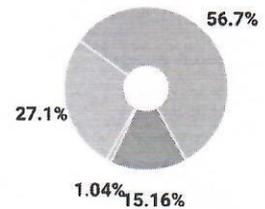
**ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ**

**Автор работы:** Крылов Александр Александрович  
**Самоцитирование**  
**рассчитано для:** Крылов Александр Александрович  
**Название работы:** ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА В АЛМАЗЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ЭНЕРГИЯМИ ДО 300 КЭВ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 300-800 К  
**Тип работы:** Выпускная квалификационная работа  
**Подразделение:** Радиофизический факультет

### РЕЗУЛЬТАТЫ

СОВПАДЕНИЯ		15.16%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		56.7%
ЦИТИРОВАНИЯ		1.04%
САМОЦИТИРОВАНИЯ		27.1%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 13.06.2023



**Структура документа:** Проверенные разделы: титульный лист с.1, содержание с.2, основная часть с.3-26  
**Модули поиска:** 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; Перефразирования по коллекции

**Работу проверил:** Каширский Данила Евгеньевич

ФИО проверяющего

**Дата подписи:** 13 июня 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.