

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П. Н. Лебедева

Российской академии наук

На правах рукописи

Пестовский Николай Валерьевич

**ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ИМПУЛЬСНОЙ  
КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД**

Специальность 1.3.6 – Оптика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук  
**Савинов Сергей Юрьевич**

Официальные оппоненты:

**Глушков Владимир Витальевич**, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук»

**Соломонов Владимир Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»

Защита состоится «10» октября 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru)

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.262.01  
доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

## **I. Общая характеристика работы**

Работа посвящена изучению излучательных процессов при возбуждении наносекундным электронным пучком с энергиями частиц 50-300 кэВ и силой тока  $\sim 100$  А импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) широкозонных веществ в атмосферном воздухе при нормальных условиях.

### **Актуальность темы исследования**

В физике твёрдого тела и геологии получил широкое распространение метод диагностики конденсированных сред, основанный на исследовании импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) под действием пучков электронов наносекундной длительности с энергией частиц порядка сотен кэВ и силой тока до  $\sim 10^3$  А [1]. Высокие плотности тока (вплоть до  $\sim 1$  кА/см<sup>2</sup>) с энергиями электронов  $\sim 100$  кэВ возбуждают яркую ИКЛ многих веществ при комнатной температуре и дают возможность выполнять измерения на воздухе при нормальных условиях, позволяя проводить методом ИКЛ поточные исследования значительных количеств образцов.

Высокая мощность воздействия ( $\sim 10$  МВт/см<sup>2</sup>) и взаимодействие образца с частицами окружающей атмосферы влияют на излучательные процессы при возбуждении ИКЛ. Действительно, в этом случае в веществе формируется высокая плотность электронных возбуждений (ЭВ). Известно, что при плотностях ЭВ на уровне  $10^{17}$ - $10^{18}$  см<sup>-3</sup> наблюдаются нелинейные сцинтилляционные эффекты: зависимость выхода сцинтилляции и её кинетических параметров от плотности ЭВ и др. Одной из основных причин этих явлений служит взаимодействие ЭВ между собой [2]. Также известно, что взаимодействие твёрдого тела с окружающим газом может приводить к появлению новых каналов тушения ЭВ, изменяя механизмы люминесценции [3]. Влияние этих процессов на спектрально-кинетические параметры ИКЛ к настоящему моменту не было исследовано.

Нелинейные сцинтилляционные явления сейчас активно изучаются, так как они ограничивают параметры сцинтилляционных детекторов – амплитудное разрешение, линейность отклика и др. [2,4]. В настоящее время в литературе недостаточно экспериментальных данных о нелинейных характеристиках сцинтилляции многих веществ. В частности, отсутствуют экспериментальные данные о зависимости выхода сцинтилляции от плотности ЭВ для материалов с шириной запрещенной зоны более 7 эВ [4,5].

Разработка метода измерений нелинейности ИКЛ и применение его к конкретным веществам представляют значительный интерес, так как позволяют получить новые данные о нелинейности их сцинтилляции, а также выявить влияние высокой плотности ЭВ на получаемую методом ИКЛ информацию о материале. Отметим, что метод ИКЛ не имеет ограничений на ширину запрещенной зоны исследуемого материала.

Явление сцинтилляции широко применяется для измерения параметров ионизирующего излучения. В то же время, характеристики существующих сцинтилляторов (выход и время высвечивания сцинтилляции, радиационная стойкость и др) не достигают своих теоретических пределов, и поиск составов с более высокими параметрами актуален. Метод ИКЛ перспективен для измерения параметров сцинтилляции веществ, так как обеспечивает высокое отношение сигнала к шуму и не требует работы с опасными радиоактивными веществами. До настоящего времени применимость метода ИКЛ для этих задач не была исследована.

В настоящей работе исследуются нелинейные характеристики ИКЛ, взаимодействие твердого тела с частицами воздуха при возбуждении ИКЛ, и устанавливаются границы применимости метода ИКЛ при измерении параметров новых сцинтилляторов. На основе полученных данных определяются сцинтилляционные характеристики ряда новых кристаллов.

## Цель работы и задачи исследований

Цель работы – изучение излучательных процессов в твердом теле и газе при бомбардировке широкозонных веществ электронами с энергией 50-300 кэВ на воздухе при нормальных условиях. Установление в них роли взаимодействия ЭВ твердого тела с частицами газа и друг с другом при их высокой плотности. Определение на основе этих данных сцинтилляционных характеристик ряда новых кристаллов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать спектрально-кинетические параметры ИКЛ при бомбардировке электронами свободного воздушного промежутка, мишеней из алюминия и высокодисперсного  $\text{SiO}_2$  в атмосфере воздуха, и выяснить механизмы наблюдаемых излучательных процессов.

2. Разработать метод исследования нелинейности зависимостей параметров ИКЛ широкозонных материалов от энергии пучка электронов.

3. Исследовать разработанным методом нелинейные характеристики ИКЛ кристаллов  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{CeF}_3$ ,  $\text{BaF}_2$  и  $\text{PbWO}_4$ .

4. Определить ограничения, накладываемые на измерения спектрально-кинетических параметров сцинтилляции веществ, при их измерении методом ИКЛ и, используя эти данные:

а) определить спектрально-кинетические параметры ИКЛ новых составов  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}^{3+}:\text{Li}^+:\text{Sc}^{3+}$ ,  $\text{LuScSiO}_5$ ,  $\text{GdVO}_4:\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{YVO}_4:\text{Ca}^{2+}$ ,

б) исследовать радиационные повреждения, наведенные гамма-облучением, в сцинтилляторах LFS-3 и  $\text{Lu}_{3,01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4,99}\text{O}_{12}:\text{Ce}:\text{Cr}$ .

## Научная новизна работы

1. Впервые исследованы механизмы возбуждения второй положительной системы полос излучения молекул  $\text{N}_2$  ( $2^+\text{N}_2$ ) при

бомбардировке электронами высокодисперсного  $\text{SiO}_2$ . Установлено, что наряду с возбуждением прямым электронным ударом  $2^+\text{N}_2$  возбуждается некоторым иным новым механизмом с вполне сопоставимой эффективностью. Предложен возможный механизм возбуждения  $2^+\text{N}_2$  при передаче энергии от ЭВ, созданных в  $\text{SiO}_2$  электронным пучком.

2. Разработан новый метод исследования нелинейных параметров сцинтилляции, в основе которого измерение зависимости спектрально-кинетических параметров ИКЛ от энергии возбуждающего электронного пучка. Этим методом впервые исследованы нелинейные зависимости энергии ИКЛ от энергии пучка электронов ряда широкозонных кристаллов, в частности – с шириной запрещенной зоны более 10 эВ ( $\text{BaF}_2$  и  $\text{CeF}_3$ ).

3. На основе полученных данных о нелинейности ИКЛ и особенностях её возбуждения найдены ограничения при измерении сцинтилляционных параметров веществ методом ИКЛ. Впервые исследованы спектрально-кинетические параметры ИКЛ новых кристаллов  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Ce:Li:Sc}$ ,  $\text{LuScSiO}_5$ ,  $\text{Ca:GdVO}_4$  и  $\text{Ca:YVO}_4$  и радиационные повреждения сцинтилляционного механизма кристаллов-сцинтилляторов  $\text{Lu}_{3.01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}\text{:Ce:Cr}$  и LFS-3.

4. Обнаружено, что новый кристалл  $\text{LuScSiO}_5$ , люминесценция которого впервые исследована в работе, обладает яркой собственной люминесценцией (СЛ) при комнатной температуре, свойства которой близки к свойствам СЛ  $\text{Sc}_2\text{SiO}_5$  и  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ .

### **Научная и практическая значимость работы**

Значимый с научно-практической точки зрения результат работы состоит в том, что механизмы возбуждения излучения при бомбардировке электронами широкозонных веществ в атмосфере газа могут сопровождаться процессами взаимодействия ЭВ твёрдого тела и частиц газа,

способных иметь достаточно высокую эффективность, что было продемонстрировано на примере  $\text{SiO}_2$  и молекул  $\text{N}_2$ . Эти процессы могут влиять на механизм люминесценции исследуемого вещества, приводить к безызлучательным потерям энергии, и их следует принимать во внимание при работе со сцинтилляцией в атмосфере газов. В частности, эти процессы могут приводить к падению световыхода сцинтилляции высокодисперсных сцинтилляторов, работающих в таких условиях.

Также значимый результат работы состоит в создании нового метода исследования нелинейных сцинтилляционных параметров веществ. Нелинейность люминесценции ограничивает ряд важных характеристик сцинтилляторов (пропорциональность отклика, амплитудное разрешение и др.). Определены нелинейные параметры ИКЛ и выполнены оценки зависимости выхода ИКЛ от плотности ЭВ широко используемых на практике сцинтилляторов  $\text{Vi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{CeF}_3$ ,  $\text{BaF}_2$  и  $\text{PbWO}_4$ . Отметим, что кристаллы  $\text{CeF}_3$  и  $\text{BaF}_2$  обладают шириной запрещенной зоны более 10 эВ.

В работе показано, что метод ИКЛ может быть использован для измерения сцинтилляционных параметров веществ. При этом он имеет много практических преимуществ по сравнению с методами, использованными ранее: высоким отношением сигнала к шуму, отсутствием необходимости в работе с радиоактивными препаратами и др. Вместе с этим при исследовании сцинтилляции веществ методом ИКЛ следует учитывать нелинейность разных полос ИКЛ и параметры возбуждающего электронного пучка. Используя эти результаты, методом ИКЛ исследованы параметры сцинтилляции новых кристаллов  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Ce:Li:Sc}$ ,  $\text{LuScSiO}_5$ ,  $\text{Ca:GdVO}_4$  и  $\text{Ca:YVO}_4$ , и радиационные повреждения сцинтилляционного механизма кристаллов  $\text{Lu}_{3,01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4,99}\text{O}_{12}\text{:Ce:Cr}$  и LFS-3. Исследованные составы представляют интерес для ряда приложений.

## Методы исследований.

Основными методами исследования параметров ИКЛ в работе служат методы оптической времязрешенной эмиссионной спектроскопии и цифровой обработки данных.

## Положения, выносимые на защиту

1. При бомбардировке электронами высокодисперсного  $\text{SiO}_2$  на воздухе при нормальных условиях интенсивность излучения полос  $2^+\text{N}_2$  на 50-70% превышает их интенсивность при бомбардировке алюминия в тех же условиях. Дополнительное возбуждение  $2^+\text{N}_2$  не осуществляется прямым электронным ударом и объясняется передачей энергии от электронных возбуждений, создаваемых в  $\text{SiO}_2$  электронным пучком, молекулам  $\text{N}_2$  при их контакте с поверхностью  $\text{SiO}_2$ .
2. При неизменности функции распределения электронных пучков по энергиям в разных импульсах и энергиях электронов 100-300 кэВ энергия рентгеновского излучения электронного пучка при торможении в газе и твердом теле прямо пропорциональна его полной кинетической энергии. Этот факт может быть использован для измерения полной энергии пучка электронов по энергии возбуждаемого им рентгеновского излучения.
3. Зависимости энергии  $E_l$  ИКЛ кристаллов  $\text{Vl}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{CeF}_3$  и  $\text{BaF}_2$  от энергии импульсного сильнофокусированного взрывоэмиссионного электронного пучка  $E_b$  приближенно описываются степенной функцией  $E_l(E_b) \sim E_b^B$ . Показатели нелинейности  $B$  для интегрального по длине волны излучения для этих кристаллов равны  $1,177 \pm 0,004$ ,  $1,08 \pm 0,02$ ,  $1,072 \pm 0,011$  и  $1,282 \pm 0,007$ , соответственно. То, что  $B > 1$ , объясняется возрастанием кулоновского расталкивания электронов пучка с ростом их числа в каждом импульсе, приводящем к снижению с ростом  $E_b$  средней объемной плотности создаваемых им электронных возбуждений, которое сопровождается ростом выхода ИКЛ.

4. Спектральная плотность энергии и время высвечивания  $\tau$  сцинтилляции веществ могут быть определены методом ИКЛ при учете нелинейностей полос ИКЛ и зависимости тока возбуждающего пучка от времени. Кристалл  $\text{LuScSiO}_5$  обладает  $\tau = 990 \pm 1$  нс,  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}:\text{Sc}:\text{Li}$  -  $\tau = 39.1 \pm 0.1$  нс,  $\text{GdVO}_4:\text{Ca}$  -  $\tau = 5 \pm 1$  мкс и  $\text{YVO}_4:\text{Ca}$  -  $\tau = 12 \pm 1$  мкс.

### **Личный вклад автора**

Результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Все измерения ИКЛ и обработка полученных данных в диссертационной работе выполнены лично автором.

**Достоверность и обоснованность результатов**, полученных в диссертационной работе, подтверждена многократным их воспроизведением во многих экспериментах с использованием современного оборудования и современных методов статистической обработки результатов измерений. Результаты работы многократно докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях: First MIPT-UEC International workshop, 2013 г., Москва, Россия; XXIX International Conference on Equations of State for Matter, 2014 г., пос. Эльбрус, Россия; XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 2015 г., пос. Эльбрус, Россия; VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, 2015 г., Звенигород, Россия; XXXI International Conference on Equations of State for Matter, 2016 г., пос. Эльбрус, Россия; 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 2019 г., Долгопрудный, Россия, Школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электро-

магнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2019 (2019 г., Москва, Россия), БПИО-2020 (2020 г., Москва, Россия) и БПИО-2021 (2021 г., Москва, Россия); 64-ая Всероссийская научная конференция МФТИ, 2021 г., онлайн.

Основные результаты работы опубликованы в двенадцати статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных *Web of Science*, в двух главах в коллективных монографиях и в тринадцати трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 21-26.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект №19-79-30086).

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и Заключения. Объём диссертации включает 184 стр., включая 67 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 172 наименования.

### **II. Основное содержание работы**

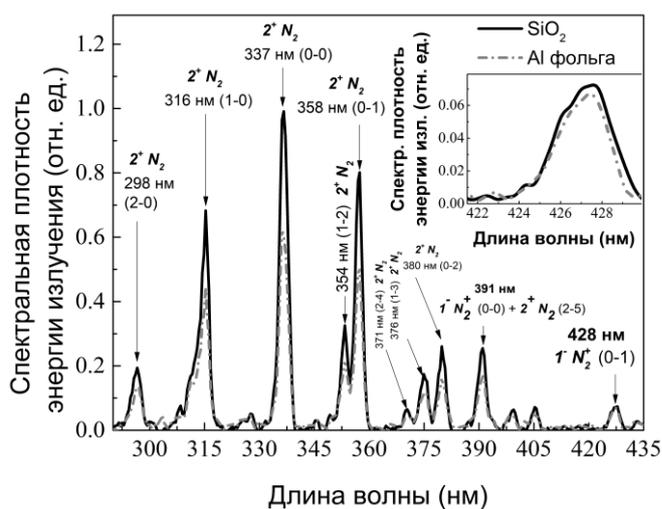
**Во введении** дана краткая характеристика работы, обоснована её актуальность, сформулированы цели и задачи исследований.

**В первой главе** приведен обзор литературы о процессах, происходящих при распространении электронного пучка с энергией частиц 50-300 кэВ в конденсированных средах. Приведены литературные данные о применении метода ИКЛ для исследования веществ в физике твёрдого тела и геологии, современные представления о структуре треков электронов в веществе и о явлениях нелинейности сцинтилляций. Кратко приведены имеющиеся в литературе данные о люминесценции материалов, исследованных в работе. Даны спектроскопические характеристики второй положительной ( $2^+N_2$ ) и первой отрицательной ( $1^-N_2^+$ ) систем полос

излучения молекулярного азота. Рассмотрены результаты работ о влиянии окружающего газа на тушение фотолюминесценции (ФЛ) высокодисперсного  $\text{SiO}_2$  и о наблюдении передачи энергии от экситонов пористого кремния молекулам  $\text{O}_2$  путем обменного взаимодействия. В заключении к главе сформулирована цель работы и поставлены решаемые в ней задачи.

**Во второй главе** описаны техника и методики экспериментов, использованные для измерения спектрально-кинетических характеристик ИКЛ. Приведены параметры электронного пучка ускорителя электронов РАДАН-ЭКСПЕРТ и используемой измерительной аппаратуры. Представлена кривая спектральной чувствительности используемого спектрометра.

**Третья глава** посвящена исследованиям механизма возбуждения излучения молекулярного азота при бомбардировке электронами пиролитического аэрогеля  $\text{SiO}_2$  с удельной площадью поверхности  $380 \text{ м}^2/\text{г}$  (размер частиц 4-40 нм). Установлено, что при бомбардировке электронами высокодисперсного  $\text{SiO}_2$  на воздухе при атмосферном давлении интенсивность излучения  $2^+$  системы полос молекулы  $\text{N}_2$  (переход  $\text{C}^3\Pi_u \rightarrow \text{B}^3\Pi_g$ ) выше на 50–70%, чем при бомбардировке алюминия в тех же условиях. Сравнение спектров излучения  $2^+\text{N}_2$  и  $1^-\text{N}_2^+$  при бомбардировке электронами  $\text{SiO}_2$  и алюминия приведено на рис. 1. Из спектра на рис. 1 вычтен вклад, обусловленный ИКЛ  $\text{SiO}_2$ , спектральная плотность энергии излучения которой сравнительно мала и не превышает 4% от таковой для полосы 0-0  $2^+\text{N}_2$  на длине волны 337 нм. При бомбардировке алюминия никакого излучения кроме полос  $\text{N}_2$  и  $\text{N}_2^+$  не наблюдается.



**Рис. 1.** Спектры излучения молекулярного азота при бомбардировке электронами алюминия (сплошная линия) и высокодисперсного SiO<sub>2</sub> (штрихпунктирная линия). **Вставка:** те же спектры в области излучения полосы 0-1 1-N<sub>2</sub><sup>+</sup> в увеличенном масштабе.

Установлено, что при нагреве образца SiO<sub>2</sub> от 30°C до 60°C энергия излучения на длине волны 337 нм (колебательный переход 0-0 2<sup>+</sup>N<sub>2</sub>) падает на ~30%, в то время как при нагреве алюминия – возрастает на ~20%, что свидетельствует о разных механизмах возбуждения состояния N<sub>2</sub>(C<sup>3</sup>Π<sub>u</sub>).

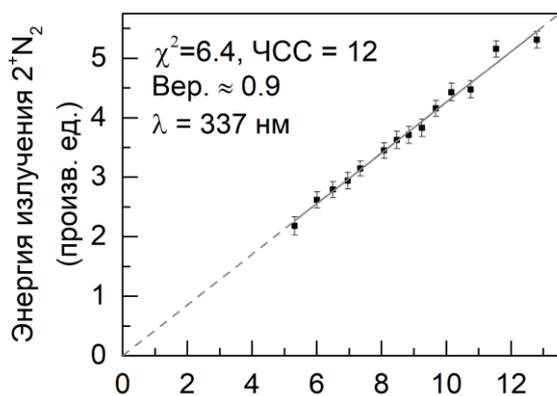
В работе показано, при бомбардировке электронами на воздухе металлической мишени 2<sup>+</sup>N<sub>2</sub> возбуждается прямым электронным ударом. Следовательно, при бомбардировке электронами SiO<sub>2</sub> на воздухе реализуется некоторый дополнительный механизм возбуждения 2<sup>+</sup>N<sub>2</sub> с вполне сопоставимой эффективностью. Вторичная электронная эмиссия не может иметь такой острой зависимости от температуры образца. Следовательно, возбуждение наблюдаемого излучения прямыми ударами вторичных электронов полностью исключается.

Пороговая энергия перехода молекулы N<sub>2</sub> из основного состояния X<sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup> в C<sup>3</sup>Π<sub>u</sub>, равная 11,032 эВ, близка к ширине запрещенной зоны SiO<sub>2</sub>, которая для разных модификаций SiO<sub>2</sub> равна 8,0÷11,5 эВ [6,7]. На основе этого высказано предположение, что при бомбардировке электронами SiO<sub>2</sub> возбуждение состояния N<sub>2</sub>(C<sup>3</sup>Π<sub>u</sub>) происходит не только прямым ударом электронов первичного пучка и вторичных электронов, но и путем передачи энергии от экситонов и других ЭВ, возникающих в SiO<sub>2</sub> под действием пучка электронов, молекулам N<sub>2</sub> при их контакте с поверхностью SiO<sub>2</sub>.

**Четвёртая глава** посвящена исследованию нелинейности ИКЛ. Под нелинейностью ИКЛ в работе понимается зависимость выхода ИКЛ от средней объёмной плотности ЭВ, создаваемых электронным пучком. К причинам нелинейности ИКЛ относится, в частности, возрастание безызлучательного тушения неравновесных ЭВ при их высоких плотностях  $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и более, обусловленное взаимодействием ЭВ друг с другом [2].

Предложен метод измерения зависимости спектрально-кинетических параметров ИКЛ от энергии возбуждающего электронного пучка. Теоретически показано, что для пучка электронов с энергией частиц 50-300 кэВ, теряющих энергию в веществе главным образом на ударную ионизацию, в случае, если число электронов в пучке меняется, но функция распределения его электронов по энергиям остаётся постоянной, энергия тормозного излучения прямо пропорциональна полной кинетической энергии пучка  $E_b$ , равной сумме всех кинетических энергий его электронов. Показано, что в текущем эксперименте эти условия выполнены, и одновременное измерение параметров ИКЛ и рентгеновского излучения, генерируемого под действием пучка, позволяет получить зависимость этих параметров от  $E_b$ .

Теоретически показано, что при распространении электронов в свободном воздушном промежутке энергия излучения  $2^+N_2$ , возбуждаемого прямым электронным ударом, так же прямо пропорциональна  $E_b$ . Следова-

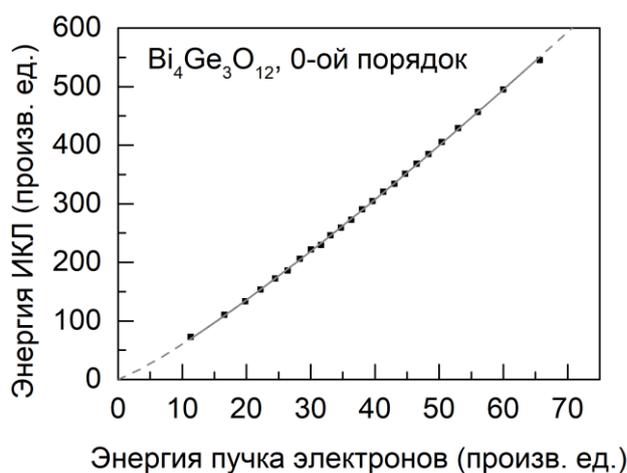


**Рис. 2.** Зависимость энергии излучения  $2^+N_2$  на длине волны 337 нм от энергии рентгеновского излучения при распространении электронного пучка через свободный воздушный промежуток.

Энергия рентгеновского излучения (произв. ед.)

тельно, используя это свойство, можно экспериментально проверить правильность предложенной методики измерения  $E_b$ .

На рис. 2 представлены зависимость энергии излучения  $2^+N_2$  на длине волны 337 нм от энергии рентгеновского излучения при прохождении электронного пучка через свободный воздушный промежуток и её приближение линейной функцией. Согласно критерию  $\chi^2$ , вероятность линейной зависимости равна 90%. Следовательно, энергия рентгеновского излучения, генерируемая пучком электронов, прямо пропорциональна  $E_b$ , что подтверждает применимость предложенного метода.



**Рис. 3.** Зависимость энергии ИКЛ кристалла  $Bi_4Ge_3O_{12}$  от энергии электронного пучка в 0-ом порядке ДР монохроматора.

Используя этот результат, измерены зависимости энергии ИКЛ от  $E_b$  для кристаллов  $Bi_4Ge_3O_{12}$ ,  $PbWO_4$ ,  $CeF_3$  и  $BaF_2$ . На рис. 3. приведена зависимость энергии ИКЛ кристалла  $Bi_4Ge_3O_{12}$  от  $E_b$ , измеренная интегрально по длине волны, когда монохроматор был настроен на нулевой порядок дифракционной решетки (ДР). Сплошной линией представлено наилучшее приближение экспериментальных данных степенной функцией:

$$E_l(E_b) = AE_b^B \quad (1),$$

где  $A$  и  $B$  – подгоночные параметры,  $E_l$  – энергия ИКЛ и  $E_b$  – энергия пучка электронов. Значения  $B$  исследуемых материалов, впервые полученные в работе, для излучения в области ряда отдельных длин волн и для интегрального по длине волны излучения представлены в Табл. 1.

**Табл. 1.** Характеристики нелинейности ИКЛ исследованных кристаллов

Кристалл	$\lambda$ , нм	Время высвечивания ИКЛ, нс	Нелинейность зависимости $E_l(E_b)$	
			$B^{a)}$	$\chi^2$ ; ЧСС <sup>b)</sup> ; Вероятность <sup>c)</sup>
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	0-ой пор.	345±0,1	1,177±0,004	31,1; 22; 0,09
	505	345±0,1	1,207±0,012	28,8; 20; 0,09
PbWO <sub>4</sub>	0-ой пор	2,8±0,1	1,080±0,020	21,5; 18; 0,25
	420	2,9±1	1,073±0,018	32,8; 20; 0,03
CeF <sub>3</sub>	0-ой пор.	23,1±0,5	1,072±0,011	26,3; 15; 0,03
	300	13,4±0,7	1,149±0,019	27,8; 19; 0,09
	350	36,7±0,6	1,275±0,015	20,6; 19; 0,36
BaF <sub>2</sub>	0-ой пор.	712±1	1,282±0,007	13,2; 17; 0,72
	300	728±2	1,301±0,012	37,0; 19; 0,01
	390	720±2	1,317±0,012	20,2; 19; 0,38

<sup>a)</sup> Результат наилучшего приближения экспериментальных данных формулой (1);

<sup>b)</sup> Число степеней свободы выборки;

<sup>c)</sup> Фактор значимости при описании данных зависимостью (1) согласно критерию  $\chi^2$ .

Из Табл. 1 видно, что для всех исследованных зависимостей  $E_l(E_b)$  выполняется условие  $B > 1$ , то есть все они сверхлинейны. В работе дано объяснение этого факта на основе представления о росте кулоновского расталкивания электронов пучка при увеличении их числа в импульсе.

Действительно, в этом случае, если начальная объёмная плотность электронов в пучке выше, то сильнее их кулоновское расталкивание, следовательно, распределение углов разлёта частиц шире, что приводит к уменьшению средней плотности тока пучка и плотности создаваемых им ЭВ. Известно, что с ростом плотности ЭВ выход сцинтилляции падает [4,5]. Следовательно, уменьшение плотности ЭВ, создаваемой пучком с более высоким значением  $E_b$ , приводит к сверхлинейному росту энергии ИКЛ.

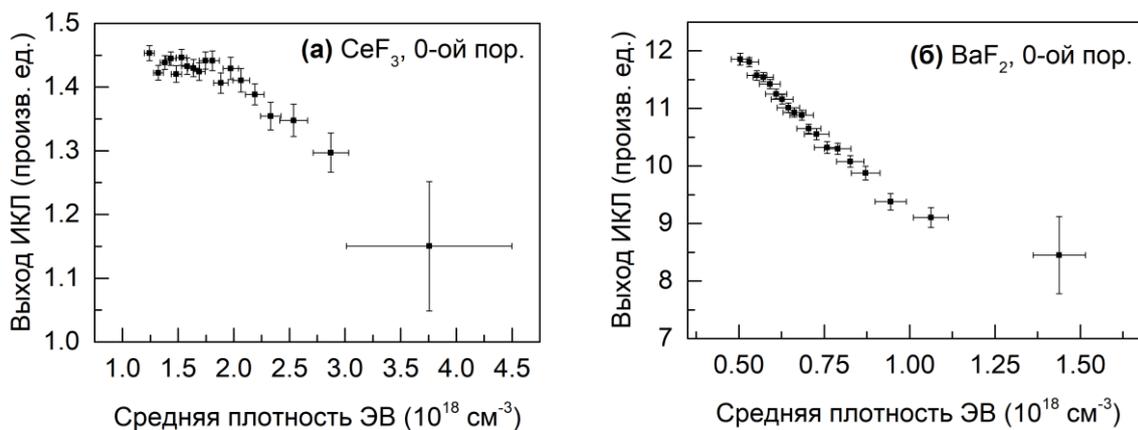
В работе также показано, что выражение (1) дает правильное, но, вместе с тем, приближенное описание измеренных зависимостей  $E_l(E_b)$ ,

справедливо воспроизводя их общее поведение, но игнорируя их малые особенности, несущие при этом информацию о физических процессах в веществах. Это выражается в значениях вероятностей описания кривых  $E_l(E_b)$  на основе выражения (1), равных 1-72% (Табл. 1). Так, для кривой на рис. 3 описание на основе выражения (1) даёт вероятность 9%, в то время как вероятность линейной зависимости для неё составляет  $\sim 10^{-34}$  %.

Проведены оценки зависимостей выхода ИКЛ  $Y_{CL} = E_l/E_b$  от средней плотности ЭВ  $\bar{n}$ , создаваемых электронным пучком, в кристаллах  $PbWO_4$ ,  $CeF_3$  и  $BaF_2$ . Оценки сделаны на основе сопоставления зависимости выхода ФЛ  $Y_{PL}$  от  $n$  для кристалла  $Vi_4Ge_3O_{12}$ , опубликованной в литературе [5], и измеренной нами зависимости  $Y_{CL}(E_b)$  для этого материала. Предполагалось, что (1) мощный электронный пучок создаёт распределение ЭВ, близкое к равномерному по всему возбужденному объёму; (2) главные нелинейные свойства сцинтилляции связаны с ЭВ, имеющими энергии, близкие к ширине запрещенной зоны вещества; и (3) электронный пучок расширяется из-за кулоновского расталкивания.

В этом случае нелинейные процессы тушения ЭВ, вызываемые в веществе квантами света с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны, и мощным электронным пучком, можно считать одинаковыми. Это означает, что  $Y_{PL}(n) \approx Y_{CL}(\bar{n})$  при  $n = \bar{n}$ . Из предположения, что рост  $E_b$  приводит к росту кулоновского расталкивания электронов, следует, что зависимость средней объёмной плотности ЭВ, создаваемой электронным пучком, от энергии пучка электронов  $E_b$  имеет вид  $\bar{n}(E_b) = c_1(c_2 + E_b)^{-1}$ , где  $c_1$  и  $c_2$  – некоторые подгоночные параметры. Эти параметры для текущего эксперимента определены на основе сопоставления зависимостей  $Y_{PL}(n)$  и  $Y_{CL}(E_b)$  для  $Vi_4Ge_3O_{12}$ . Затем для остальных исследованных кристаллов  $\bar{n}(E_b)$  были пересчитаны с учетом массовой плотности,

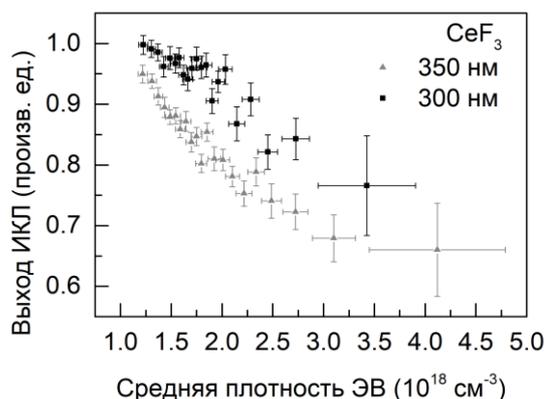
атомного номера и среднего потенциала ионизации веществ. На основе этих данных получены кривые  $Y_{CL}(\bar{n})$ .



**Рис. 4.** Зависимости выхода ИКЛ кристаллов  $\text{CeF}_3$  (а) и  $\text{BaF}_2$  (б) от средней плотности ЭВ в 0-ом порядке ДР.

Зависимости  $Y_{CL}(\bar{n})$  кристаллов  $\text{CeF}_3$  и  $\text{BaF}_2$  с шириной запрещенной зоны более 10 эВ для интегрального по длине волны излучения приведены на рис. 4. Обнаружено, что для кристалла  $\text{CeF}_3$  зависимости  $Y_{CL}(\bar{n})$  полос ИКЛ в области 300 нм и 350 нм различны (рис. 5). Эти полосы имеют разную природу люминесценции и связаны с переходами в ионах  $\text{Ce}^{3+}$ , находящиеся в регулярных и искаженных дефектами областях кристаллической решетки  $\text{CeF}_3$ , соответственно.

**В пятой главе** исследуются ограничения на использование метода ИКЛ при измерении сцинтилляционных характеристик кристаллов, и



**Рис. 5.** Зависимости выхода ИКЛ  $\text{CeF}_3$  на длинах волн 300 нм (квадраты) и 350 нм (треугольники) от средней плотности ЭВ.

получены спектрально-кинетические параметры ИКЛ ряда новых сцинтиллирующих составов. Спектр ИКЛ совпадает со спектром сцинтилляции под действием других ионизирующих частиц, если он состоит из одной или нескольких полос люминесценции, значения нелинейности ИКЛ которых одинаковы. Это условие выполнено не всегда. Так, оно не выполнено для  $\text{CeF}_3$  (рис. 5). Кинетика ИКЛ может совпадать с кинетикой сцинтилляции под действием других частиц, если она не зависит от плотности ЭВ. Показано, что существенным образом точность измерения кинетики ИКЛ ограничивается формой зависимости тока пучка электронов от времени, которая может быть определена по зависимости от времени интенсивностей рентгеновского излучения и  $2^+N_2$ .

Впервые исследованы спектрально-кинетические параметры ИКЛ новых составов  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:0,1\%\text{Ce}:0,25\%\text{Sc}:0,5\%\text{Li}$ ,  $\text{LuScSiO}_5$ ,  $\text{GdVO}_4:\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{YVO}_4:\text{Ca}^{2+}$ . Кристаллы  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}:\text{Sc}:\text{Li}$ ,  $\text{GdVO}_4:\text{Ca}$  и  $\text{YVO}_4:\text{Ca}$  - развитие хорошо известных сцинтилляторов  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$  и  $\text{ReVO}_4$  (Re-редкоземельный ион) с новыми добавками, цель которых - в улучшении сцинтилляционных характеристик: повышении выхода и радиационной стойкости, уменьшении времени высвечивания и др. В работе впервые обнаружена и описана яркая СЛ нового кристалла  $\text{LuScSiO}_5$  при комнатной температуре.

Установлено, что максимум спектральной плотности энергии ИКЛ кристаллов LFS-3 и  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}:\text{Sc}:\text{Li}$  расположен на длине волны 405 нм,  $\text{LuScSiO}_5$  - 310 нм,  $\text{GdVO}_4:\text{Ca}$  - на 440 нм и  $\text{YVO}_4:\text{Ca}$  - на 430 нм. Время высвечивания ИКЛ  $\tau_{\text{ИКЛ}}$  кристаллов LFS-3 и  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}:\text{Sc}:\text{Li}$  на длине волны 405 нм равно  $36,2 \pm 0,1$  нс и  $39,1 \pm 0,1$  нс, кристалла  $\text{LuScSiO}_5$  на длине волны 310 нм -  $990 \pm 1$  нс,  $\text{GdVO}_4:\text{Ca}$  и  $\text{YVO}_4:\text{Ca}$  -  $12 \pm 1$  и  $5 \pm 1$  мкс (интегрально по длинам волн). Экспериментально показано, что  $\tau_{\text{ИКЛ}}$  кристаллов LFS-3 и  $\text{LuScSiO}_5$  равны временам их высвечивания под действием гамма-излучения. Установлено, что введение примеси  $\text{Ca}^{2+}$

уменьшает  $\tau_{\text{ИКЛ}}$  кристалла  $\text{YVO}_4$  в  $\sim 4$  раза. В то же время, введение примесей  $\text{Li}^+$  и  $\text{Sc}^{3+}$  не приводит к существенному уменьшению времени высвечивания сцинтилляции  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ .

Исследованы спектры ИКЛ кристаллов  $\text{Lu}_{3,01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4,99}\text{O}_{12}:\text{Ce}:\text{Cr}$  и LFS-3 до и после их облучения значительными дозами ионизирующего излучения: гамма-излучения источника  $^{60}\text{Co}$  при поглощенной дозе 45 Мрад (кристаллы  $\text{Lu}_{3,01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4,99}\text{O}_{12}:\text{Ce}:\text{Cr}$ ) и пучком протонов энергией 155 МэВ при плотности потока частиц  $4,4 \cdot 10^{12}$  частиц/см<sup>2</sup> (кристалл LFS-3). Обнаружена сильная деградация спектров ИКЛ  $\text{Lu}_{3,01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4,99}\text{O}_{12}:\text{Ce}:\text{Cr}$ : отношение спектральных плотностей энергии ИКЛ полос  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$  изменилась в 1,6-8,0 раз после облучения. В то же время, изменений спектра ИКЛ LFS-3 с точностью  $\leq 10\%$  не обнаружено.

### Основные результаты работы

1. В результате спектрально-кинетических исследований излучения при бомбардировке электронами высокодисперсного  $\text{SiO}_2$  на воздухе обнаружено, что излучение  $2^+\text{N}_2$  возбуждается не только прямым электронным ударом первичных и вторичных электронов, но и некоторым иным механизмом. На это указывают следующие факты: при бомбардировке электронами высокодисперсного  $\text{SiO}_2$  на воздухе интенсивность излучения  $2^+\text{N}_2$  выше на 50-70%, чем при бомбардировке алюминия, и температурная зависимость энергии излучения  $2^+\text{N}_2$  в этих случаях имеет разный вид.
2. Так как ширина запрещенной зоны  $\text{SiO}_2$  (8,0-11,5 эВ) близка к порогу возбуждения  $2^+\text{N}_2$  (11,03 эВ), дополнительный механизм возбуждения  $2^+\text{N}_2$  может состоять в передаче энергии от ЭВ  $\text{SiO}_2$  молекулам  $\text{N}_2$  при их обменном взаимодействии вблизи границы « $\text{SiO}_2$  – окружающая атмосфера».
3. Разработан способ измерения нелинейных характеристик сцинтилляции, не имеющий ограничений по ширине запрещенной зоны исследуемых веществ, основанный на одновременном измерении энергии рент-

геновского излучения и энергии ИКЛ. Достоверность метода подтверждена экспериментально на основе анализа зависимости энергии излучения  $2^+N_2$  от энергии рентгеновского излучения при прохождении электронного пучка через свободный воздушный промежуток.

4. Используя разработанный метод, исследованы зависимости энергии ИКЛ кристаллов  $Bi_4Ge_3O_{12}$ ,  $PbWO_4$ ,  $CeF_3$  и  $BaF_2$  от энергии электронного пучка. Все полученные зависимости сверхлинейны. Этот факт объясняется ростом кулоновского расталкивания сильноточного электронного пучка с ростом числа электронов в импульсе.

5. Оценены средние плотности ЭВ, создаваемых электронным пучком в исследованных материалах. Значения по порядку величины составляют  $10^{18}$ - $10^{19}$   $см^{-3}$ , что соответствует характерным значениям плотности ЭВ, при которой в сцинтилляционных материалах наблюдается сильное тушение люминесценции, вызванное взаимодействием ЭВ.

6. Получены оценки зависимостей выхода ИКЛ  $PbWO_4$ ,  $CeF_3$  и  $BaF_2$  от средней плотности ЭВ. Для кристалла  $CeF_3$  обнаружен разный характер этих зависимостей для полос ИКЛ с разным механизмом излучения.

7. Показано, что метод ИКЛ может быть использован для измерения спектра и времени высвечивания сцинтилляции веществ с учетом явления нелинейности сцинтилляции и вида зависимости тока пучка электронов от времени. Измерены спектрально-кинетические параметры ИКЛ новых кристаллов-сцинтилляторов  $Lu_2SiO_5:Ce:Sc:Li$ ,  $LuScSiO_5$ ,  $GdVO_4:Ca^{2+}$  и  $YVO_4:Ca^{2+}$  и исследованы радиационные повреждения нестехиометрических кристаллов  $Lu_{3,01-x}Y_xAl_{4,99}O_{12}:Ce:Cr$  и LFS-3.

## Публикации автора по теме диссертации

### Публикации в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных *Web of Science* и *Scopus*:

1. Завертяев М. В., Козлов В. А., Пестовский Н. В., Петров А. А., Родионов А. А., Савинов С. Ю., Цхай С. Н., Заварцев Ю. Д., Загуменный А. И., Кутовой С. А., *Излучение молекулярного азота при бомбардировке электронами пиролитического аэрогеля  $SiO_2$  и алюминия* //Письма в ЖЭТФ. – 2019. – Т. 110. – №. 10. – С. 652-657.

2. Kozlov V. A., Kutovoi S. A., Mislavskii V. V., Pestovskii N. V., Petrov A. A., Rodionov A. A., Savinov S. Yu., Tskhai S. N., Zagumennyi A. I., Zavartsev Yu. D. and Zavertyaev M. V., *Effect of Pressing on Luminescence Spectra of Fumed Silica* //Journal of Russian Laser Research. – 2019. – Т. 40. – №. 1. – С. 42-47.

3. Belov M. V., Koutovoi S. A., Kozlov V. A., Pestovskii N. V., Savinov S. Yu., Zagumennyi A. I., Zavartsev Yu. D., and Zavertyaev M. V., *Measurement of non-linearity in the cathodoluminescence yield for non-doped scintillators* //Journal of Applied Physics. – 2021. – Т. 130. – №. 23. – С. 233101.

4. Belov M. V., Koutovoi S. A., Kozlov V. A., Pestovskii N. V., Savinov S. Yu., Vlasov V. I., Zagumennyi A. I., Zavartsev Yu. D., and Zavertyaev M. V., *Wavelength-Resolved Photoluminescence and Cathodoluminescence Decay Times of LSO: Ce Scintillator Co-doped with Lithium and Scandium* //Journal of Russian Laser Research. – 2021. – Т. 42. – №. 3. – С. 313-317.

5. Белов М. В., Заварцев Ю. Д., Завертяев М. В., Загуменный А. И., Козлов В. А., Кутовой С. А., Пестовский Н. В., Савинов С. Ю., *Сцинтилляционные характеристики новых кристаллов  $LuScSiO_5$*  //Краткие сообщения по физике ФИАН – 2021. – Т. 48. – №. 4. – С. 3-8.

6. Андреев С. Н., Белов М. В., Заварцев Ю. Д., Завертяев М. В., Загуменный А. И., Козлов В. А., Кутовой С. А., Пестовский Н. В., Савинов С. Ю., *Выращивание и исследование сцинтилляционных свойств кристаллов-ортованадатов  $\text{Ca:GdVO}_4$  и  $\text{Ca:YVO}_4$*  //Краткие сообщения по физике ФИАН – 2018. – Т. 45. – №. 6. – С. 29-36.

7. Белов М. В., Завертяев М. В., Загуменный А. И., Козлов В. А., Кондратюк В. А., Пестовский Н. В., Савинов С. Ю., *Влияние дефектов на сцинтилляционные свойства кристаллов оксиортосиликатов  $\text{Ce: Sc: LFS}$*  //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2017. – Т. 44. – №. 8. – С. 25-33.

8. Завертяев М.В., Загуменный А.И., Козлов В.А., Очкин В.Н., Пестовский Н.В., Петров А.А., Савинов С.Ю., *Сопоставление спектров катодо- и гамма-люминесценции сцинтилляционных кристаллов* //Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – №. 10. - С. 73-79.

9. Загуменный А. И., Лобанов А. Н., Михайлов А. В., Очкин В. Н., Пестовский Н. В., Петров А. А., Савинов С. Ю., *Сопоставление времен затухания катодо- и гамма-люминесценции сцинтилляционных кристаллов* //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2015. – Т. 42. – №. 1. - С. 15-20.

10. Kozlov V. A., Ochkin V. N., Pestovskii N. V., Petrov A. A., Savinov S. Yu., Zagumennyi A. I., Zavertyaev M. V., *Pulsed cathodoluminescence and  $\gamma$ -luminescence of scintillation crystals* //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2015. – Т. 653. – №. 1. – С. 012017.

11. Андреев С.Н., Завертяев М.В., Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Козлов В.А., Пестовский Н.В., Кутовой С.А., Петров А.А., Савинов С.Ю., *Исследование радиационной деградации оптических свойств нестехиометрических кристаллов  $\text{Li}_{3.01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}$ , допированных ионами  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , и  $\text{Sc}^{3+}$ , под действием гамма-излучения* //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2016. – Т. 43. – №. 10. – С. 38-47.

12. Заварцев Ю.Д., Завертяев М.В., Загуменный А.И., Зерроук А.Ф., Козлов В.А., Кутовой С.А., Пестовский Н.В., Петров А.А., Савинов С.Ю., *Природа радиационной стойкости кристаллов-оксиортосиликатов LFS, допированных ионами Ce, Sc, Ca и Y*//Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2016. – Т. 43. – №. 11.-С.31-38.

### **Главы в монографиях:**

1. Андреев С.Н., Заварцев Ю.Д., Завертяев М.В., Загуменный А.И., Козлов В.А., Кутовой С.А., Пестовский Н.В., Петров А.А. и Савинов С.Ю., *«Исследование широкозонных полупроводников и диэлектриков методом импульсной катодолюминесценции»*, глава в коллективной монографии «Нано-, пико- и фемтосекундная электроника и фотоника», под редакцией академика Г.А. Месяца. – М.: «Печатный салон «Шанс», 2017. – 297 с.

2. Гижа С.С., Заварцев Ю.Д., Завертяев М.В., Загуменный А.И., Козлов В.А., Кутовой С.А., Пестовский Н.В., Петров А.А., Савинов С.Ю., *«Спектроскопия импульсной катодолюминесценции твёрдых оксидов»*, Глава в коллективной монографии "Электрофизические и оптические процессы в плазменных и твердотельных средах и наноструктурах" под ред. Г.А. Месяца. Москва : РУСАЙНС, 2019. — 372 с. ISBN 978-5-4365-3174-8

### **Труды конференций:**

1. Pestovskii N.V. *Pulse Cathodoluminescence spectra and spectra of luminescence under the influence of Gamma-irradiation* // First MIPT-UEC international workshop - book of abstracts, РИИС ФИАН, 2013.

2. Kozlov V.A., Ochkin V.N., Pestovskiy N.V., Petrov A.A., Savinov S.Yu., Zagumenniy A.I., Zavertyaev M.V. *Comparison between pulsed cathodoluminescence spectra and spectra of luminescence of the same crystals under the action of gamma-irradiation*//XXIX International Conference on Equations of State for Matter, March 1-6, 2014, Elbrus, Russia, Book of abstracts pp. 142-143.

3. Kozlov V.A., Mikhailov A.V., Pestovsky N.V., Petrov A.A., Savinov S.Yu., Zagumenniy A.I., *Comparision of cathodoluminescence and gamma luminescence decay times of scintillators* // XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, March 1-6, Elbrus, Russia. 2015. Book of Abstracts, p. 52.

4. Завертяев М.В., Загуменный А.И., Козлов В.А., Пестовский Н.В., Петров А.А. и Савинов С.Ю., *Сопоставление спектров и времен затухания импульсной катодолюминесценции и гамма-люминесценции сцинтилляционных кристаллов* // Всероссийская конференция «Импульсная Сильноточная и Полупроводниковая Электроника – 2015», 27-28 мая 2015 г., ФИАН, Сборник трудов, сс. 58-62 (5 стр.)

5. Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Завертяев М.В., Козлов В.А., Кутовой С.А., Пестовский Н.В., Петров А.А., Савинов С.Ю., *Спектры импульсной катодолюминесценции кристаллов и неупорядоченных сред сходного химического состава* // VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, 15-20 ноября 2015 года Москва, ФИАН, Сборник трудов с. 70 (1 стр.)

6. Kozlov V.A., Kutovoi S.A., Pestovskii N.V., Petrov A.A., Savinov S.Yu., Zagumennii A.I., Zavartsev Yu.D. and Zavertiaev M.V., *Comparison of pulsed cathodoluminescence spectra of LFS crystals, doped by different elements, before and after gamma-irradiation* // XXXI International Conference on Equations of State for Matter, March 1-6, 2016, Elbrus, Russia, Books of Abstracts, p. 283 (2016).

7. Завертяев М.В., Козлов В.А., Пестовский Н.В., Петров А.А., Родионов А.А., Савинов С.Ю., Цхай С.Н., Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Кутовой С.А., *Излучение молекулярного азота при бомбардировке электронами диоксида кремния* // Труды 62-й Всероссийской научной конференции

МФТИ, 18–24 ноября 2019 г., секция Фундаментальная и прикладная физика, сс. 172-173.

8. Завертяев М. В., Козлов В. А., Пестовский Н. В., Петров А. А., Родионов А. А., Савинов С. Ю., Цхай С. Н., Заварцев Ю. Д., Загуменный А. И., Кутовой С. А., *Механизм возбуждения излучения молекулярного азота при бомбардировке электронами пиролитического аэрогеля  $SiO_2$*  // Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2019, 12-14 ноября 2019 г., М., ФИАН, сс. 65-68.

9. Белов М. В., Заварцев Ю. Д., Завертяев М. В., Загуменный А. И., Козлов В. А., Кутовой С. А., Пестовский Н. В., Савинов С. Ю., *Времена высвечивания стинтилляционных кристаллов при возбуждении ионизирующим излучением высокой плотности энергии* // Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2020, Москва, 24-26 ноября 2020 г., сс. 19-20.

10. Белов М. В., Заварцев Ю. Д., Завертяев М. В., Загуменный А. И., Козлов В. А., Кутовой С. А., Пестовский Н. В., Савинов С. Ю., *Измерение зависимости мощности наносекундного электронного пучка, распространяющегося в воздухе, от времени* // Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2020, Москва, 24-26 ноября 2020 г., сс. 21-22.

11. Белов М. В., Заварцев Ю. Д., Завертяев М. В., Загуменный А. И., Козлов В. А., Кутовой С. А., Пестовский Н. В., Савинов С. Ю., Тажитдинов Д. М., Шляхтун О. С., *Нелинейность импульсной катодоллю-*

*минесценции широкозонных кристаллов // Тезисы докладов шк. мол. уч. «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике БПИО-2021», 16-18 ноября 2021 г., ФИАН, с. 17-18 (2021).*

12. Белов М. В., Заварцев Ю. Д., Завертяев М. В., Загуменный А. И., Козлов В. А., Кутовой С. А., Пестовский Н. В., Савинов С. Ю., Тажитдинов Д. М., Шляхтун О. С., *Измерение энергии электронного пучка по энергии его тормозного излучения // Тезисы докладов шк. мол. уч. «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике БПИО-2021», 16-18 ноября 2021 г., ФИАН, с. 19 (2021).*

13. Белов М. В., Заварцев Ю. Д., Завертяев М. В., Загуменный А. И., Козлов В. А., Кутовой С. А., Пестовский Н. В., Савинов С. Ю., Тажитдинов Д. М., Шляхтун О. С., *Нелинейность импульсной катодолюминесценции кристалла LFS-3 // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 29 ноября – 03 декабря 2021. Фундаментальная и прикладная физика — Москва–Долгопрудный-Жуковский : МФТИ, 2021. – СС. 275-276.*

### **Литература, цитированная в автореферате**

[1] Соломонов В. И. и Михайлов С. Г., *Импульсная катодолюминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ // Екатеринбург: УРО РАН. - 2003. –184 с.*

[2] Vasil'ev A. N., *From luminescence non-linearity to scintillation non-proportionality // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008. – Т. 55. – №. 3. – С. 1054-1061.*

- [3] Spallino L., Vaccaro L., Agnello S., Gelardi F. M., Zatsepin A. F., Cannas M., *Insight into the defect–molecule interaction through the molecular-like photoluminescence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles* //RSC advances. – 2016. – T. 6. – №. 95. – C. 93010-93015.
- [4] Bizarri G., Moses W. W., Singh J., Vasil'ev A. N., Williams R. T., *An analytical model of nonproportional scintillator light yield in terms of recombination rates* //Journal of Applied Physics. – 2009. – T. 105. – №. 4. – C. 044507.
- [5] Grim J. Q., Ucer K. B., Burger A., Bhattacharya P., Tupitsyn E., Rowe E., Buliga V. M., Trefilova L., Gektin A., Bizarri G. A., Moses W. W., Williams R. T., *Nonlinear quenching of densely excited states in wide-gap solids* //Physical Review B. – 2013. – T. 87. – №. 12. – C. 125117.
- [6] Alexandrov Yu. M., Vishnjakov V. M., Makhov V. N., Sidorin K. K., Trukhin A. N., Yakimenko M. N., *Electronic properties of crystalline quartz excited by photons in the 5–25 eV range* //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1989. – T. 282. – №. 2-3. – C. 580-582.
- [7] Trukhin A. N., *Excitons in SiO<sub>2</sub>: a review* //Journal of non-crystalline solids. – 1992. – T. 149. – №. 1-2. – C. 32-45.