

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Федерального государственного
бюджетного учреждения высшего
образования «Московский государственный



А. А. Федягин

сентябрь 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу Пестовского Николая Валерьевича «Излучательные процессы при возбуждении импульсной катодолюминесценции конденсированных сред», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

Диссертационная работа Пестовского Николая Валерьевича «Излучательные процессы при возбуждении импульсной катодолюминесценции конденсированных сред» посвящена исследованию процессов электромагнитного излучения в видимой и ультрафиолетовой области спектра, возбуждаемых при бомбардировке широкозонных материалов, атмосферного воздуха и металлов импульсным сильноточным взрывоэмиссионным пучком электронов.

В настоящее время в различных научных центрах введены в эксплуатацию новые мощные источники ионизирующего излучения - лазеры на свободных электронах, мощные ультрафиолетовые лазеры, сильноточные синхротроны, а также мощные ускорители электронов и ионов. В связи с этим расширились возможности для изучения механизмов сцинтиляционных процессов в твердом теле под действием ионизирующего излучения высокой мощности. Эти исследования представляют интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Общетеоретические аспекты воздействия мощного ионизирующего излучения на вещество связаны с изучением возникающих ионизационных треков с высокими (до $\sim 10^{22}$ см $^{-3}$) значениями объемной плотности электронных возбуждений (ЭВ), при которых становится существенным их взаимодействие. Механизмы этого взаимодействия в различных конкретных веществах в настоящее время изучены недостаточно и нуждаются в разработке новых экспериментальных методов исследования. Требует уточнения также механизм взаимодействия ЭВ твердого тела с частицами окружающего газа.

С точки зрения практики, важнейшей сферой применения явлений сцинтиляции служит измерение параметров ионизирующего излучения – его энергии, длительности, спектрального состава и др. Сцинтиляционные детекторы в настоящее время широко применяются в медицине, промысловой геологии, физике высоких энергий и в других областях. В частности, существенными для практики служат задачи разработки методов спектрометрии ионизирующего излучения, имеющего высокую мощность (10^6 МВт/см² и более), для которых требуется понимание механизмов сцинтиляционных процессов при большой плотности потока ионизирующих квантов. Актуальной задачей является поиск новых составов, имеющих высокие сцинтиляционные параметры и поиск их защиты от радиационной деградации.

Одним из перспективных методов неразрушающего люминесцентного анализа является метод импульсной катодолюминесценции (ИКЛ). Он заключается в исследовании люминесценции под действием мощного импульсного пучка электронов. Детальных исследований влияния высокой плотности ЭВ при возбуждении ИКЛ и взаимодействия ЭВ, созданных электронным пучком, с газами окружающей атмосферы на данные, получаемые методом ИКЛ, до настоящего времени проведено не было.

В диссертации Н. В. Пестовского исследуются механизмы возбуждения излучения при бомбардировке электронами нанопорошка SiO₂, помещенного в атмосферный воздух, и влияние плотности ЭВ на параметры ИКЛ ряда хорошо изученных сцинтиляторов с собственной люминесценцией - PbWO₄, CeF₃, Bi₄Ge₃O₁₂ и BaF₂. Для решения последней задачи была разработана оригинальная методика измерений.

Несомненно, тема представленной диссертации актуальна для физики сцинтиляционных процессов и техники сцинтиляционных детекторов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературы содержит 172 наименования. Общий объем диссертации составляет 184 страницы, включая 67 рисунков и 9 таблиц.

Во введении сформулированы актуальность, цель работы, задачи и методы исследований, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, достоверность и обоснованность результатов, представлена информация о публикациях и апробации работы.

Первая глава диссертации посвящена анализу современного состояния исследований процессов формирования ионизационных треков электронов, физических механизмов нелинейности сцинтиляции, литературным данным о механизмах люминесценции веществ, исследованных в диссертации, а также о процессах взаимодействия ЭВ SiO₂ и пористого кремния с молекулами окружающих газов.

Во второй главе дано описание экспериментального стенда, использовавшегося в диссертационной работе. Приведены параметры электронного пучка ускорителя РАДАН-ЭКСПЕРТ и измерительной аппаратуры.

Третья глава содержит результаты исследования излучения второй положительной системы полос молекул N₂ (2⁺N₂) окружающего воздуха при бомбардировке электронами высокодисперсного порошка SiO₂. Выполнено сравнение

спектра и кинетики излучения молекул N_2 при бомбардировке электронами воздушного промежутка и мишней из меди, алюминия и нанопорошка SiO_2 .

На основе совпадения ширины запрещенной зоны SiO_2 и порога возбуждения 2^+N_2 автор высказывает предположение о том, что дополнительное возбуждение 2^+N_2 при бомбардировке электронами SiO_2 происходит при передаче энергии от ЭВ SiO_2 молекулам N_2 , расположенным вблизи поверхности SiO_2 . Этот результат несомненно является новым и показывает, что взаимодействие ЭВ с окружающим газом может влиять на параметры сцинтиляции веществ.

Четвертая глава посвящена исследованию нелинейности ИКЛ сцинтиляторов $PbWO_4$, CeF_3 , $Bi_4Ge_3O_{12}$ и BaF_2 . Для ее изучения предложен оригинальный метод измерений, основанный на одновременной регистрации рентгеновского излучения, вызываемого электронным пучком, и сигнала люминесценции. К достоинствам предложенного метода относится отсутствие ограничения на ширину запрещенной зоны материала.

В главе оценена зависимость средней плотности ЭВ, создаваемой электронным пучком в $Bi_4Ge_3O_{12}$, от его энергии. Оценка выполнена на основе сравнения полученных в работе кривых нелинейности ИКЛ $Bi_4Ge_3O_{12}$.

В пятой главе диссертации приводятся исследованию сцинтилляционных характеристик новых веществ методом ИКЛ. Показано, что кинетика ИКЛ кристалла LFS-3 под действием пучка электронов и гамма-квантов с энергией 660 кэВ одинакова.

Измерены спектры и кинетика ИКЛ новых сцинтилляционных составов $Lu_2SiO_5:0,1\%Ce:0,25\%Sc:0,5\%Li$, $LuScSiO_5$, $GdVO_4:Ca^{2+}$ и $YVO_4:Ca^{2+}$. Кристаллы $Lu_2SiO_5:0,1\%Ce:0,25\%Sc:0,5\%Li$, $GdVO_4:Ca^{2+}$ и $YVO_4:Ca^{2+}$ представляют собой хорошо исследованные сцинтиляторы, в которые введены новые добавки. Кристалл $LuScSiO_5$ исследован впервые. Обнаружена его яркая собственная люминесценция при комнатной температуре. Также в главе исследованы радиационно-индукционные изменения спектров ИКЛ кристаллов $Lu_{3,01-x}Y_xAl_{4,99}O_{12}:Ce:Cr$ и LFS-3 под действием значительных доз ионизирующего излучения.

В заключении кратко сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В качестве основных результатов диссертационной работы можно выделить следующее:

1. Впервые установлено, что при бомбардировке электронами высокодисперсного SiO_2 на воздухе излучение 2^+N_2 возбуждается не только прямым электронным ударом первичных и вторичных электронов, но и иным механизмом, состоящим в передаче энергии от ЭВ SiO_2 молекулам N_2 при их обменном взаимодействии.
2. Предложен и обоснован как теоретически, так и экспериментально новый способ измерения нелинейных характеристик сцинтиляции, не имеющий ограничений по ширине запрещенной зоны исследуемых веществ, основанный на одновременном измерении энергии рентгеновского излучения и энергии ИКЛ. Разработанный метод применен для исследованы зависимости энергии ИКЛ кристаллов $Bi_4Ge_3O_{12}$, $PbWO_4$, CeF_3 и BaF_2 от энергии электронного пучка.

3. 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 различным механизмом излучения.
4. Определены критерии применимости метода ИКЛ для исследования с его помощью сцинтилляционных характеристик веществ. 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.
5. Измерены спектрально-кинетические параметры ИКЛ новых кристаллов-сцинтилляторов $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce:Sc:Li}$, LuScSiO_5 , $\text{GdVO}_4:\text{Ca}^{2+}$ и $\text{YVO}_4:\text{Ca}^{2+}$ и исследованы радиационные повреждения сцинтилляционных характеристик нестехиометрических кристаллов $\text{Lu}_{3,01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4,99}\text{O}_{12}:\text{Ce:Cr}$ и LFS-3. У кристалла LuScSiO_5 впервые обнаружена и описана яркая собственная люминесценция при комнатной температуре.

Существенных недостатков в работе нет. Отметим лишь следующие замечания, возникшие в ходе ознакомления с работой:

1. При рассмотрении возможных механизмов, объясняющих наблюдаемое в работе дополнительное возбуждение излучения 2^+N_2 , в работе не рассматриваются альтернативные механизмы возбуждения кроме передачи энергии от ЭВ SiO_2 .
2. Утверждение о том, что при неизменности функции распределения электронных пучков по энергиям в разных импульсах энергия рентгеновского излучения электронного пучка при торможении в газе и твердом теле прямо пропорциональна его полной кинетической энергии, выглядит тривиальным.
3. Значения коэффициента нелинейности ИКЛ, полученные в работе для кристаллов PbWO_4 , CeF_3 , $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ и BaF_2 , зависят от геометрии измерений и не являются универсальным свойством этих материалов.

Отмеченные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку работы и не снижают ценность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов обеспечиваются высоким уровнем проведенных экспериментов, воспроизводимость результатов которых подтверждена обширной статистикой, согласованностью результатов измерений, проведенных разными методами. Результаты работы прошли серьёзную апробацию на российских и международных научных конференциях и опубликованы в престижных рецензируемых журналах.

Результаты диссертации перспективны для практического применения. Так, явление взаимодействия ЭВ, созданных в широкозонных материалах под действием ионизирующего излучения, следует принимать во внимание разработчикам и пользователям детекторов ионизирующего излучения при работе со сцинтилляторами на основе наночастиц, так как оно может ухудшать световойход и другие параметры сцинтилляции. Изученные в работе критерии применимости метода ИКЛ для измерения сцинтилляционных характеристик веществ позволяют внедрить этот метод на практике, в частности, - при производстве сцинтилляторов. При этом реализуются преимущества

метода ИКЛ - удобство измерений, отсутствие необходимости в использовании радиоактивных материалов и высокое соотношение сигнала к шуму при измерениях. Полученные в работе сведения о сцинтилляционных характеристиках конкретных составов полезны при поиске новых сцинтилляторов.

Результаты работы могут быть рекомендованы к использованию в научных организациях, занимающихся исследованием и применением мощных электронных пучков, иных типов ионизирующего излучения, изучением физических процессах в твердых телах, а также разработкой сцинтилляционных детекторов: Институте сильноточной электроники СО РАН, Институте электрофизики УРО РАН, Институте Кристаллографии РАН, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, Институте спектроскопии РАН, Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, Московском инженерно-физическом институте, АО «Гиредмет», ФГУП ВНИИА, РФЯЦ – ВНИИТФ и др.

Материал диссертации хорошо и понятно изложен и наглядно проиллюстрирован. Полученные результаты опубликованы в 12 работах в отечественных и зарубежных научных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, и входящих в перечень ВАК РФ. Результаты работы неоднократно докладывались на ведущих международных и российских научных конференциях по тематике взаимодействия ионизирующего излучения с веществом и оптике.

Содержание диссертационной работы Пестовского Н. В. «Излучательные процессы при возбуждении импульсной катодолюминесценции конденсированных сред» соответствует указанной специальности. Автореферат полно и правильно отражает основные результаты и выводы работы и соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Пестовского Николая Валерьевича «Излучательные процессы при возбуждении импульсной катодолюминесценции конденсированных сред» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Пестовский Николай Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 - Оптика.

Доклад Пестовского Н. В. по материалам диссертации заслушан на Семинаре кафедры Оптики, спектроскопии и физики наносистем Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова 14 сентября 2022 г.

Отзыв на диссертацию составлен заместителем заведующего кафедрой Оптики, спектроскопии и физики наносистем Физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова кандидатом физико-математических наук, доцентом Каменских Ириной Александровной и заведующим отделом физических проблем квантовой электроники НИИЯФ МГУ доктором физико-математических наук профессором Васильевым Андреем Николаевичем. Отзыв одобрен на семинаре кафедры Оптики, спектроскопии и физики наносистем Физического

факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова 14 сентября 2022 г.

Заместитель заведующего кафедрой
Оптики, спектроскопии и физики наносистем
Физического факультета МГУ,
к.ф.-м.н., доцент
Каменских Ирина Александровна,

тел.:

e-mail: ikamenskikh@bk.ru

Заведующий отделом физических проблем
квантовой электроники НИИЯФ МГУ
д.ф.-м.н., профессор
Васильев Андрей Николаевич
тел.: +7 495 939 26 73

e-mail: anv@sinp.msu.ru, anvasiliev@rambler.ru

Ученый секретарь кафедры Оптики, спектроскопии и
физики наносистем Физического факультета
ФГБУО ВО МГУ имени М. В. Ломоносова
кандидат физико-математических наук

О.М. Вожник

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (физический факультет), 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

Список основных работ сотрудников Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по теме диссертации Н.В. Пестовского в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. Korzhik M., Abashev R., Fedorov A., Dosovitskiy G., Gordienko E., Kamenskikh I., Kazlou D., Kuznecova D., Mechinsky V., Pustovarov V., Retivov V., Vasil'ev A., Towards effective indirect radioisotope energy converters with bright and radiation hard scintillators of $(\text{Gd}, \text{Y})_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ family //Nuclear Engineering and Technology. - 2022. - T. 54. - №. 7. - C. 2579-2585.
2. Nargelas S., Talochka Y., Vaitkevičius A., Dosovitskiy G., Buzanov O., Vasilyev A., Malinauskas T., Korzhik M., Tamulaitis G., Influence of matrix composition and its fluctuations on excitation relaxation and emission spectrum of Ce ions in $(\text{Gd}_x \text{Y}_{1-x})_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$: Ce scintillators //Journal of Luminescence. – 2022. – T. 242. – C. 118590.
3. Sedov V., Kuznetsov S., Kamenskikh I., Martyanov A., Vakalov D., Savin S., Rubtsova E., Tarala V., Omelkov S., Kotlov A., Ralchenko V., Konov V., Diamond composite with embedded YAG: Ce nanoparticles as a source of fast X-ray luminescence in the visible and near-IR range //Carbon. – 2021. – T. 174. – C. 52-58.
4. Sedov V., Kuznetsov S., Martyanov A., Proydakova V., Ralchenko V., Khomich A., Voronov V., Osin Yu, Batygov S., Kamenskikh I., Spassky D., Savin S., Fedorov P., Diamond–rare earth composites with embedded $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$ nanoparticles as robust photo-and X-ray-luminescent materials for radiation monitoring screens //ACS Applied Nano Materials. – 2020. – T. 3. – №. 2. – C. 1324-1331.
5. Kamenskikh I. A., Tishchenko E., Kirm M., Omelkov S., Belsky A., Vasil'ev A. N., Decay kinetics of CeF_3 under VUV and x-ray synchrotron radiation //Symmetry. – 2020. – T. 12. – №. 6. – C. 914.
6. GektinAleksandr, Vasil'ev Andrey N., Suzdal Victor, SobolevAleksandr, Energy resolution of scintillators in connection with track structure //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2020. – T. 67. – №. 6. – C. 880-887.
7. Tamulaitis G., Auffray E., Gola A., Korzhik M., Mazzi A., Mechinski V., Nargelas S., Talochka Y., Vaitkevicius A., Vasil'ev A., Improvement of the timing

properties of Ce-doped oxyorthosilicate LYSO scintillating crystals //Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2020. – T. 139. – C. 109356.

8. Belsky A., Gektin A., Vasil'ev A. N. Influence of disorder in scintillating solid solutions on thermalization and recombination of electronic excitations //physica status solidi (b). – 2020. – T. 257. – №. 8. – C. 1900535.
9. Chylii M., Malyi T., Rovetskyi I., Demkiv T., Vistovskyy V., Rodnyi P., Gektin A., Vasil'ev A., Voloshinovskii A., Diffusion of 5p-holes in BaF₂ nanoparticles //Optical Materials. – 2019. – T. 91. – C. 115-119.
10. Spassky D., Vasil'ev A., Belsky A., Fedorov N., Martin P., Markov S., Buzanov O., Kozlova N., Shlegel V., Excitation density effects in luminescence properties of CaMoO₄ and ZnMoO₄ //Optical Materials. – 2019. – T. 90. – C. 7-13.
11. Belsky A., Lebbou K., Kononets V., Sidletskiy O., Gektin A., Auffray E., Spassky D., Vasil'ev A., Mechanisms of luminescence decay in YAG-Ce, Mg fibers excited by γ -and X-rays //Optical Materials. – 2019. – T. 92. – C. 341-346.
12. Gektin A., Vasil'ev A. Scintillator energy resolution and a way to improve it by kinetic waveform analysis //Radiation Measurements. – 2019. – T. 122. – C. 108-114.
13. Belsky A., Fedorov N., Gridin S., Gektin A., Martin P., Spassky D., Vasil'ev A., Time-resolved luminescence Z-scan of CsI using power femtosecond laser pulses //Radiation Measurements. – 2019. – T. 124. – C. 1-8.
14. Levushkina V.S., Spassky D.A., Tretyakova M.S., Zadneprovski B.I., Kamenskikh I.A., Vasil'ev A.N., Belsky A., Luminescence properties of solid solutions Lu_xY_{1-x}PO₄: Eu³⁺ //Optical Materials. – 2018. – T. 75. – C. 607-611.
15. Dujardin C., Auffray E., Bourret E., Dorenbos P., Lecoq P., Nikl M., Vasil'ev A. N., Yoshikawa A., Zhu R., Needs, trends, and advances in inorganic scintillators //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2018. – T. 65. – №. 8. – C. 1977-1997.