

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук
Глушкова Владимира Витальевича 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.

Диссертация Пестовского Н.В. «Излучательные процессы при возбуждении импульсной катодолюминесценции конденсированных сред» посвящена исследованию процессов излучения, возбуждаемых при бомбардировке импульсным сильноточным электронным пучком диэлектриков и металлов, которые происходят как в объеме твердого тела, так и в окружающем образец атмосферном воздухе.

Явление импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) веществ возникает при воздействии на них мощных ($\sim 10^6$ МВт/см²) электронных пучков с энергиями частиц 50-300 кэВ и длительностью от единиц пикосекунд до десятков наносекунд. Неразрушающая диагностика конденсированных сред методом ИКЛ обладает следующими преимуществами: (1) высокая интенсивность возбуждаемой люминесценции позволяет исследовать вещества как с яркой, так и со слабой люминесценцией при комнатной температуре; (2) глубина проникновения электронов с энергией порядка сотен кэВ в вещество составляет сотни микрометров, что позволяет не осуществлять специальной подготовки образцов; (3) электроны с такой энергией имеют достаточно большие (~ 1 м) длины пробега в атмосферном воздухе, за счет чего исследования можно проводить на воздухе, не прибегая к вакуумированию камеры с образцом, что приводит к значительному упрощению и ускорению процедуры измерений; (4) при исследовании методом ИКЛ нет ограничения на ширину запрещенной зоны исследуемого вещества; (5) малая длительность возбуждающих импульсов позволяет эффективно исследовать кинетику затухания люминесценции веществ.

Благодаря перечисленным выше преимуществам ИКЛ перед другими методами люминесцентного анализа и широкому распространению ускорителей электронов на основе явления взрывной электронной эмиссии, метод ИКЛ находит обширное применение в геологии минералов, физике и технике лазерных активных сред, измерении параметров черенковских счетчиков и др. В

связи с этим, тема диссертационной работы Пестовского Н.В. приобретает особую актуальность, поскольку применение метода требует понимания процессов, связанных со взаимодействием атмосферного воздуха и исследуемых образцов при возбуждении ИКЛ, а также нелинейных свойств ИКЛ, вызванных высокой концентрацией создаваемых сильноточным электронным пучком электронных возбуждений (ЭВ), которые до настоящего времени не были подробно исследованы. В то же время необходимо учитывать влияние указанных факторов на результаты измерений при диагностике веществ методом ИКЛ.

Не менее актуальны поиск и характеристика новых сцинтилляционных составов, поскольку современные сцинтилляторы не достигают своих теоретически предсказанных предельных параметров, что ограничивает характеристики сцинтилляционных детекторов (амплитудное разрешение, световой выход, временное разрешение, радиационная стойкость, и др) и их практическое использование. В этой связи применение метода ИКЛ, обладающего многими преимуществами для измерения сцинтилляционных свойств веществ по сравнению с используемыми сейчас методами, основанными на использовании радиоактивных источников, представляет значительный интерес.

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

Во **введении** излагаются актуальность, цель, задачи и методы исследований работы, её научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, достоверность и обоснованность результатов, апробация работы и публикации.

Первая глава представляет анализ литературы, содержащий описание современных представлений об ионизационных треках, физике нелинейности сцинтилляции, сведения о люминесценции исследованных в работе веществ, о физике взаимодействия ЭВ SiO_2 и пористого кремния с молекулами окружающих газов. В конце главы сформулирована цель и поставлены задачи, решаемые в работе.

Вторая глава посвящена описанию техники и методики эксперимента. Автор детально описывает параметры возбуждающего электронного пучка и состав и характеристики измерительной аппаратуры. Особое внимание уделено

калибровке экспериментального оборудования и анализу калибровочных кривых.

Третья глава содержит результаты исследования излучения второй положительной системы полос молекул N_2 (2^+N_2), входящих в состав окружающего образец воздуха, которое возникает при бомбардировке электронами воздушного промежутка, не содержащего высокодисперсного SiO_2 , и металлов. В работе обнаружено, что при бомбардировке высокодисперсного SiO_2 спектрально-кинетические параметры излучения 2^+N_2 , а также их зависимость от температуры, заметно различаются при бомбардировке электронами SiO_2 и металлов. На основе этого сделан вывод о том, что механизм возбуждения 2^+N_2 при бомбардировке электронами SiO_2 и металлических мишеней, главным образом – алюминия, различен. Основываясь на близости ширины запрещенной зоны SiO_2 (8,0-11,5 эВ) и энергетического порога возбуждения 2^+N_2 (11,03 эВ), в работе делается предположение о том, что часть возбуждения 2^+N_2 при бомбардировке электронами SiO_2 происходит при передаче энергии от ЭВ SiO_2 молекулам N_2 , расположенным вблизи поверхности SiO_2 .

Четвертая глава посвящена исследованию нелинейности ИКЛ сцинтилляторов $PbWO_4$, CeF_3 , $Bi_4Ge_3O_{12}$ и BaF_2 . В работе нелинейность ИКЛ определяется как зависимость параметров ИКЛ (выхода, энергии ИКЛ и др.) от средней плотности ЭВ, которая создается мощным импульсным электронным пучком. Для изучения нелинейности ИКЛ в диссертации предложен новый оригинальный метод измерений с одновременной регистрации рентгеновского излучения, вызываемого электронным пучком, и сигнала ИКЛ. В основе предложенного метода лежит прямая пропорциональность энергии рентгеновского излучения и суммарной кинетической энергии электронов пучка, подтвержденная в работе экспериментально.

Разработанным методом изучены зависимости энергии ИКЛ от энергии электронного пучка для кристаллов $PbWO_4$, CeF_3 , $Bi_4Ge_3O_{12}$ и BaF_2 . Обнаружено, что все измеренные кривые имеют форму, близкую к степенной зависимости с показателем степени, лежащим в пределах от 1,07 до 1,32. Автор объясняет сверхлинейный характер зависимости эффектами кулоновского расталкивания электронов, которое возрастает с ростом числа электронов в каждом импульсе, что приводит к уменьшению средней плотности возбуждения.

В работе оценены зависимости средней плотности ЭВ, создаваемой электронным пучком в кристалле $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, от его энергии. Результат оценок дает значение в области 10^{18} - 10^{19} см^{-3} . Автор отмечает приближенный характер полученных им оценок, которые, тем не менее, согласуются с результатами других исследований. На основе зависимости средней плотности ЭВ от энергии возбуждающего электронного пучка для $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ получены кривые выхода ИКЛ от средних плотностей ЭВ в кристаллах PbWO_4 , CeF_3 и BaF_2 .

В главе имеется приложение, посвященное оценке точности измерений нелинейности ИКЛ, а также содержащее оценки длины пробега электронов в исследуемых кристаллах и оценки пространственного распределения ЭВ, созданных электронным пучком.

Пятая глава содержит характеристики ИКЛ ряда новых веществ. В ней обсуждаются факторы искажения измеренных сцинтилляционных характеристик, обусловленные особенностями ИКЛ. Приведены спектры и кинетика ИКЛ ряда новых сцинтилляционных кристаллов: $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:0,1\%\text{Ce}:0,25\%\text{Sc}:0,5\%\text{Li}$, LuScSiO_5 , $\text{GdVO}_4:\text{Ca}^{2+}$ и $\text{YVO}_4:\text{Ca}^{2+}$.

В работе изучено влияние радиационно-индуцированных дефектов на спектр ИКЛ нестехиометрических кристаллов $\text{Lu}_{3,01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4,99}\text{O}_{12}:\text{Ce}:\text{Cr}$ и LFS-3. Определено, что кристаллы семейства $\text{Lu}_{3,01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4,99}\text{O}_{12}:\text{Ce}:\text{Cr}$ не являются радиационно-стойкими по отношению к разрушающему воздействию гамма-квантов источника ^{60}Co при поглощенной кристаллами дозе облучения 45 Мрад. Одновременно, при облучении пучком протонов с энергией 150 МэВ и плотностью потока частиц $4 \cdot 10^{12}$ $\text{ч}/\text{см}^2$ кристалла LFS-3 деградации спектра не было обнаружено.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Результаты работы Пестовского Н. В. обладают значительной научной новизной. В частности, автором впервые обнаружен новый механизм возбуждения излучения молекул N_2 при бомбардировке электронами высокодисперсного SiO_2 на воздухе. Несомненно новым является предложенный метод изучения нелинейности ИКЛ, основанный на изучении зависимости параметров ИКЛ от параметров рентгеновского излучения. Автором впервые получены зависимости энергии ИКЛ от энергии возбуждающего электронов пучка кристаллов PbWO_4 , CeF_3 , $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ и BaF_2 , а также оценки зависимостей выхода сцинтилляции кристаллов PbWO_4 , CeF_3 и

BaF₂ от средней плотности ЭВ. Следует подчеркнуть, что материалы CeF₃ и BaF₂ обладают запрещенной зоной шириной более 10 эВ.

Автор впервые сформулировал ряд ограничений, накладываемых методом ИКЛ при измерении сцинтилляционных характеристик веществ. В работе впервые измерены спектрально-кинетические параметры ИКЛ новых кристаллов Lu₂SiO₅:0,1%Ce:0,25%Sc:0,5%Li, LuScSiO₅, GdVO₄:Ca²⁺ и YVO₄:Ca²⁺, автором обнаружена яркая собственная люминесценция нового кристалла LuScSiO₅ при комнатной температуре. Впервые получены характеристики радиационной деградации кристаллов семейства Lu_{3,01-x}Y_xAl_{4,99}O₁₂:Ce:Cr и LFS-3.

Результаты работы имеют высокую значимость и для практических применений. В частности, критерии применимости метода ИКЛ для измерения сцинтилляционных характеристик конденсированных сред, определенные в диссертационной работе, позволяют использовать метод ИКЛ для измерения сцинтилляционных параметров веществ как в научных лабораториях, так и на производстве. Измеренные в работе характеристики сцинтилляции новых кристаллов Lu₂SiO₅:Ce³⁺:Li⁺:Sc³⁺, LuScSiO₅, GdVO₄:Ca²⁺ и YVO₄:Ca²⁺, а также параметры радиационно-индуцированной деградации сцинтилляционных свойств кристаллов LFS-3 и Lu_{3,01-x}Y_xAl_{4,99}O₁₂:Ce:Cr важны для разработки новых сцинтилляционных материалов и сцинтилляционных детекторов. Предложенный в работе метод исследования нелинейности ИКЛ веществ также может быть внедрен как на производстве, так и в научных лабораториях.

Вместе с тем, по тексту диссертации можно сделать ряд замечаний:

1. Вывод о различии процессов взаимодействия электронного пучка и молекул азота (Глава 3) построен на сравнительном исследовании спектров ИКЛ пиролитического аэрогеля SiO₂ и алюминиевой фольги. Между тем, за счет малого размера частиц (до 40 нм) исследуемый порошок содержит заметное количество молекул азота в межчастичном пространстве, что, даже с учетом сильного рассеяния излучения ИКЛ, может усилить интенсивность регистрируемых линий за счет выхода ИКЛ молекул азота, находящихся в приграничном слое. В этом смысле вероятность реализации механизма возбуждения 2⁺N₂ при передаче энергии от электронных возбуждений, предложенного автором, может быть достаточно малой, однако суммарная интенсивность ИКЛ оказывается увеличенной за счет большой удельной поверхности порошка.

2. Автору желательно пояснить утверждение о том, что «между диффузным и зеркальным отражением нет существенной разницы» (стр.61), поскольку в используемой схеме рис.2-5 оптокабель расположен под углом у поверхности образца ($\sim 45^\circ$) и условия отражения излучения ИКЛ на границах для порошка SiO₂ и алюминиевой фольги, вообще говоря, разные.

3. В работе отмечается неэкспоненциальный характер кинетики люминесценции на длине волны 300 нм для CeF₃ (стр.135, рис.5-1). Поскольку выход ИКЛ зависит от средней объемной плотности ЭВ (рис.4-18а), было бы правильно указать условия, при которых реализуется неэкспоненциальное уменьшение интенсивности ИКЛ.

4. В тексте диссертации присутствует ряд опечаток: сформулирована (стр.18), ИОФАН им. А.М.Прохорова (стр.33 и далее, правильно – ИОФ РАН), по меньшей мере (стр.55), с точностью до нескольких процентов можно считать, что спектр... совпадает... с точностью несколько процентов (стр.133). Достаточно часто в словах встречаются лишние дефисы: коле-баний, излу-чения, уско-ренными (стр.23), кото-рых (стр.32) и т.д.

Отмеченные замечания носят частный характер, не влияют на общую высокую положительную оценку работы и не снижают научную ценность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы обеспечены тем, что все измерения в работе проведены на высоком техническом уровне с использованием сертифицированного измерительного оборудования, которое прошло процедуру всех необходимых калибровок. Воспроизводимость результатов диссертации подтверждается обширной статистикой, включающей для некоторых измерений тысячи экспериментальных зависимостей. Достоверность результатов подтверждается согласованностью физических величин, измеренных разными методами, что подробно отражено в диссертационной работе. Результаты работы прошли обширную апробацию на российских и международных научных конференциях и опубликованы в престижных рецензируемых журналах.

Содержание диссертации хорошо и грамотно изложено, работа логически целостна. Результаты работы опубликованы в 12 статьях в отечественных и зарубежных научных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, и входящих в перечень ВАК РФ. Результаты работы

были многократно доложены на ведущих международных и российских научных конференциях и научных семинарах.

Заключение

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.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент

Глушков Владимир Витальевич,

заместитель директора по научно-организационной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

/ Глушков Владимир Витальевич /
21.09.2022

Адрес: Российская федерация, 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38
ИОФ РАН

тел: 8(910)4550297

e-mail: glushkov@lt.gpi.ru

Подпись Глушкова Владимира Витальевича заверяю.

заместитель директора ИОФ РАН по научной работе



/ Кочиев Давид Георгиевич /
21.09.2022

Адрес: Российская федерация, 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38
ИОФ РАН

тел: 8(499)5038702

Список основных публикаций официального оппонента

В. В. Глушкова по теме диссертации Н. В. Пестовского в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

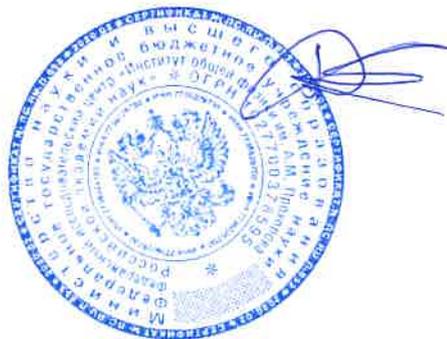
1. Bozhko A.D., Bortyakov D.E., Brazhkin V.V., Dubkov V.P., Glushkov V.V., Universal temperature corrections to the conductivity of niobium-carbon nanocomposites //Physica B: Condensed Matter. – 2021. – Т. 610. – С. 412860.
2. Хорошилов А.Л., Азаревич А.Н., Богач А.В., Глушков В.В., Демишев С.В., Краснорусский В.Н., Красиков К.М., Кузнецов А.В., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Случанко Н.Е. Анизотропия эффекта Холла в парамагнитной фазе каркасного стекла $\text{Ho}_{0.8}\text{Lu}_{0.2}\text{B}_{12}$ //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 113. – №. 8. – С. 533-538.
3. Anisimov M.A., Samarin N.A., Zhurkin V.S., Bogach A.V., Demishev S.V., Voronov V.V., Shitsevalova N.Yu., Levchenko A.V., Filipov V.B. and Glushkov V.V. Evolution of thermoelectric properties in $\text{Eu}_x\text{Yb}_{1-x}\text{B}_6$ family //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2020. – Т. 32. – №. 46. – С. 465601.
4. Semeno A.V., Anisimov M.A., Bogach A.V., Demishev S.V., Gilmanov M.I., Filipov V.B., Shitsevalova N.Yu. & Glushkov V.V. Role of spin-glass behavior in the formation of exotic magnetic states in GdB_6 //Scientific Reports. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-10.
5. Демишев С.В., Анисимов М.А., Воронов В.В., Гильманов М.И., Глушков В.В., Карасев М.С., Филипов В.Б., Шицевалова Н.Ю. Поверхностная проводимость топологического кондо-изолятора SmB_6 , легированного иттербием //Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 493. – №. 1. – С. 23-28.
6. Krasikov K.M. Bogach A.V., Bozhko A.D., Glushkov V.V., Demishev S.V., Khoroshilov A.L., Shitsevalova N. Yu., Filipov V., Gabáni S., Flachbart K., Sluchanko N.E. Anisotropy of the charge transport in $\text{Ho}_{11}\text{B}_{12}$ antiferromagnet with dynamic charge stripes //Solid State Sciences. – 2020. – Т. 104. – С. 106253.
7. Глушков В.В., Анисимов М.А., Богач А.В., Божко А.Д., Демишев С.В., Краснорусский В.Н., Самарин А.Н., Филипов В.Б., Шицевалова Н.Ю., Аномальный эффект Холла в фрустрированных магнетиках //Физика твердого тела. – 2019. – Т. 61. – №. 9. – С. 1672-1675.

8. Краси́ков К.М., Аза́ревич А.Н., Глушко́в В.В., Деми́шев С.В., Хороши́лов А.Л., Бога́ч А.В., Ши́цевалова Н.Ю., Фили́пов В.Б., Случа́нко Н.Е. Нарушение кубической симметрии в редкоземельных додекаборидах с динамическими зарядовыми страйпами //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 112. – №. 7. – С. 451-457.
9. Krasnorussky V., Bogach A., Sluchanko N., Demishev S., Shitsevalova N., Filipov V., Pristas G., Gabani S., Flachbart K. and Glushkov V. Anomalous Magnetic Contributions to Hall Effect in $\text{Ho}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{B}_{12}$ //Acta Physica Polonica A. – 2020. – Т. 137. – №. 5. – С. 767-769.
10. Bogach A., Azarevich A., Demishev S., Glushkov V., Samarin A., Shitsevalova N., Filipov V., Gabani S., Flachbart K. and Sluchanko N. Bogach A. et al. Evidence of Griffiths Phase Behavior in Paramagnetic State of Heavy Fermion Compounds $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{B}_6$ ($0.01 \leq x \leq 1$) //Acta Physica Polonica, A. – 2020. – Т. 137. – №. 5.
11. Demishev S.V., Gilmanov M.I., Samarin A.N., Semeno A.V., Sluchanko N.E., Samarin N.A., Bogach A.V., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Karasev M.S. & Glushkov V.V. Spin fluctuations at the surface of strongly correlated topological insulator SmB_6 //Applied Magnetic Resonance. – 2020. – Т. 51. – №. 1. – С. 71-84.
12. Деми́шева С.В., Аза́ревич А.Н., Бога́ч А.В., Ги́льманов М.И., Фили́пов В.Б., Ши́цевалов Н.Ю., Глушко́в В.В. Магнитные свойства топологического Кондо изолятора SmB_6 : локализованные магнитные моменты и парамагнетизм Паули //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. – Т. 109. – №. 3. – С. 152-159.
13. Ани́симов М.А., Бога́ч А.В., Кузнецо́в А.В., Аза́ревич А.Н., Самари́н Н.А., Деми́шев С.В., Ши́цевалова Н.Ю., Ду́хненко А.В., Фили́пов В.Б., Случа́нко Н.Е., Глушко́в В.В. Магнитные свойства $\text{Eu}_{0.9}\text{Yb}_{0.1}\text{B}_6$ //Физика твердого тела. – 2019. – Т. 61. – №. 4. – С. 688-693.
14. Случа́нко Н.Е., Хороши́лов А.Л., Бога́ч А.В., Га́врилкин С.Ю., Глушко́в В.В., Деми́шев С.В., Красно́русский В.Н., Ши́цевалов Н.Ю., Фили́пов В.Б., Га́бани С., Фла́хбарт К., Ма́лкин Б.З. Магнитная анизотропия низкотемпературной теплоемкости в соединении с динамическими зарядовыми страйпами $\text{Ho}_{0.01}\text{Lu}_{0.99}\text{B}_{12}$ //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т. 108. – №. 7. – С. 487-492.

15. Sluchanko N., Bogach A., Bolotina N., Glushkov V., Demishev S., Dudka A., Krasnorussky V., Khrykina O., Krasikov, Mironov V., Filipov V.B., and Shitsevalova N. Rattling mode and symmetry lowering resulting from the instability of the B₁₂ molecule in LuB₁₂ //Physical Review B. – 2018. – Т. 97. – №. 3. – С. 035150.

«Верно»

заместитель директора ИОФ РАН по научной работе



/ Кочиев Давид Георгиевич /
21.09.2022