

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук Соломонова Владимира Ивановича на диссертационную 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. посвящена исследованию процессов импульсной катодолюминесценции (ИКЛ), протекающих в объёме широкозонных материалов и в окружающем образце атмосферном воздухе. Тема является актуальной, так как ранее процессы, связанные с взаимодействием атмосферного воздуха и исследуемых образцов при возбуждении ИКЛ не исследовались, а также подробно не изучались нелинейные свойства самой ИКЛ, вызванные высокой концентрацией электронных возбуждений (ЭВ), создаваемых в облучаемом электронным пучком веществе, поэтому не учитывалось их влияние на результаты измерений при диагностике веществ методом ИКЛ. Поиск новых сцинтилляционных составов также актуален, поскольку современные сцинтилляторы не достигают своих теоретически предсказанных параметров. В этой связи применение метода ИКЛ для измерения сцинтилляционных свойств веществ 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** 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, апробация работы и публикаций.

Первая глава диссертации содержит современные представления о процессах формирования ионизационных треков электронов, физических механизмах нелинейности сцинтилляций, литературные данные о механизмах люминесценции исследованных в диссертации веществ, о физике

взаимодействия ЭВ SiO_2 и пористого кремния с молекулами окружающих газов. В конце главы поставлена цель и задачи исследований.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки, использовавшейся в диссертации. Приведены параметры электронного пучка ускорителя РАДАН-ЭКСПЕРТ и измерительной аппаратуры.

Третья глава посвящена исследованию излучения второй положительной системы полос молекул N_2 (2^+N_2) окружающего воздуха при бомбардировке электронами высокодисперсного порошка SiO_2 , алюминия и меди. Обнаружено, что при бомбардировке электронами SiO_2 интенсивность 2^+N_2 выше на 50-70%, чем при бомбардировке алюминия. Также установлено, что зависимость интенсивности полос излучения 2^+N_2 от температуры при бомбардировке SiO_2 и алюминия разная. Из этого факта сделан вывод о том, что механизм возбуждения 2^+N_2 при бомбардировке электронами SiO_2 и алюминия различен. В частности, на основе близости ширины запрещенной зоны SiO_2 (8,0-11,5 эВ) и порога возбуждения 2^+N_2 (11,03 эВ) делается предположение, 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 .

Четвертая глава посвящена исследованию нелинейности ИКЛ сцинтилляторов PbWO_4 , CeF_3 , $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ и BaF_2 . Под нелинейностью ИКЛ в работе понимается отклонение от линейности зависимости параметров ИКЛ от средней плотности ЭВ, формируемой электронным пучком. Для исследования этих процессов в работе предложен оригинальный метод измерений, основанный на одновременной регистрации рентгеновского излучения, вызываемого электронным пучком, и сигнала люминесценции. Разработанным методом изучены зависимости энергии ИКЛ от энергии рентгеновского излучения для различных полос люминесценции кристаллов PbWO_4 , CeF_3 , $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ и BaF_2 . Обнаружено, что все измеренные кривые имеют не линейные, а близкие к степенной зависимости с показателем более 1. Автор высказывает предположение, что причиной этого является рост кулоновского расталкивания с ростом числа электронов в пучке.

В главе выполнены оценки зависимости средней плотности ЭВ в кристалле $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ от энергии электронного пучка. На основе полученной зависимости построены кривые выхода ИКЛ от средних плотностей ЭВ в кристаллах PbWO_4 , CeF_3 и BaF_2 , причем в кристалле CeF_3 для полос,

имеющих разную природу, обнаружены различающиеся зависимости выхода ИКЛ от плотности ЭВ.

В приложении к четвертой главе дано обоснование вычислений погрешности при измерении зависимости энергии ИКЛ исследуемых веществ от энергии рентгеновского излучения, приведены оценки глубин проникновения электронов в исследуемые материалы, оценки отклонения пространственного распределения ЭВ, создаваемого пучком электронов, от равномерного, обусловленные сложной многопиковой структурой функции распределения электронов возбуждающего пучка по энергиям, и оценки точности определения отношения пробегов электронов в $PbWO_4$, CeF_3 и BaF_2 к пробегу в $Bi_4Ge_3O_{12}$.

Пятая глава посвящена исследованию сцинтилляционных характеристик новых веществ методом ИКЛ. Основываясь на полученных результатах исследования нелинейности ИКЛ, показано, что если вещество имеет несколько полос люминесценции, то спектр его ИКЛ совпадает со спектрами сцинтилляции под действием иных ионизирующих частиц в том случае, если показатели нелинейности ИКЛ каждой из полос одинаковы. Обсуждаются искажения кинетики ИКЛ, вносимые формой зависимости пучка электронов от времени.

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 сцинтилляторы, в которые введены новые добавки. Кристалл $LuScSiO_5$ исследован впервые. В диссертации впервые обнаружена его яркая собственная люминесценция при комнатной температуре. Установлено, что введение кальция сокращает время высовечивания собственной люминесценции YVO_4 , а введение скандия и лития в $Lu_2SiO_5:Ce^{3+}$ уменьшает время высовечивания ионов церия незначительно – до 39 нс.

Также в главе исследована радиационная деградация спектров ИКЛ кристаллов $Lu_{3,01-x}Y_xAl_{4,99}O_{12}:Ce:Cr$ и LFS-3 под действием значительных доз ионизирующего излучения. Обнаружено, что спектры ИКЛ кристаллов группы $Lu_{3,01-x}Y_xAl_{4,99}O_{12}:Ce:Cr$ подвержены сильным радиационным повреждениям, в то время как изменений спектра ИКЛ кристалла LFS-3 в результате облучения обнаружено не было.

В заключении кратко сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Материалы диссертации Пестовского Н. В. обладают значительной научной новизной. Так, к новым результатам относятся наблюдение нового механизма возбуждения излучения молекул N_2 при бомбардировке электронами нанопорошка SiO_2 на воздухе, предложенный автором новый метод исследования нелинейности ИКЛ на основе одновременного измерения интенсивности ИКЛ и рентгеновского излучения, зависимости энергии ИКЛ от энергии возбуждающего электронов пучка кристаллов $PbWO_4$, CeF_3 , $Bi_4Ge_3O_{12}$ и BaF_2 и оценки зависимостей выхода сцинтилляции кристаллов $PbWO_4$, CeF_3 и BaF_2 от средней плотности ЭВ.

Научной новизной обладают выведенный автором критерий применимости метода ИКЛ для исследования сцинтилляционных параметров веществ, результаты измерений сцинтилляционных характеристик новых кристаллов $Lu_2SiO_5:0,1\%Ce:0,25\%Sc:0,5\%Li$, $LuScSiO_5$, $GdVO_4:Ca^{2+}$ и $YVO_4:Ca^{2+}$. Существенную новизну имеет наблюдение яркой собственной люминесценции кристалла $LuScSiO_5$ при комнатной температуре. К новым результатам относятся также изученные автором параметры радиационной деградации ИКЛ кристаллов $Lu_{3,01-x}Y_xAl_{4,99}O_{12}:Ce:Cr$ и LFS-3.

Существенную практическую значимость имеют полученные в диссертации условия применимости метода ИКЛ для исследования сцинтилляционных свойств веществ, результаты исследований сцинтилляционных характеристик новых кристаллов $Lu_2SiO_5:Ce^{3+}:Li^{+}:Sc^{3+}$, $LuScSiO_5$, $GdVO_4:Ca^{2+}$ и $YVO_4:Ca^{2+}$, радиационной деградации сцинтилляционных свойств кристаллов LFS-3 и $Lu_{3,01-x}Y_xAl_{4,99}O_{12}:Ce:Cr$, и разработанная в диссертации методика измерения нелинейности ИКЛ веществ.

Защищаемые положения сформулированы корректно и обоснованы.

К тексту диссертации имеются следующие замечания:

1. В третьей главе обнаружен факт, что небольшой нагрев образцов пористого SiO_2 и металлического алюминия с 30°C до 60°C при бомбардировке электронным пучком приводит к сильному изменению интенсивностей полос излучения 2^+N_2 : падению на ~30%

и росту на ~20% для SiO_2 и Al соответственно. Хотелось бы, чтобы автор проинтерпретировал это явление.

2. На вставках рис.3.2 приведена пичковая структура временного поведения люминесценции азота и рентгеновского излучения в начальный период времени. Повторяет ли эту структуру ток электронного пучка, вышедшего сквозь анод электронной трубки?

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

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы обеспечивается тщательностью и аккуратностью проведенных экспериментов, использованием сертифицированного измерительного оборудования и выполнением всех его необходимых калибровок. Воспроизводимость результатов экспериментов подтверждена обширной статистикой, а достоверность - согласованностью между собой результатов измерений, проведенных разными методами, что подробно отражено в диссертационной работе. Результаты работы прошли серьёзную апробацию на российских и международных научных конференциях и опубликованы в престижных рецензируемых журналах.

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 оптике и тематике взаимодействия ионизирующего излучения с веществом.

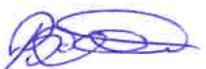
Заключение

Результаты исследований, представленные в диссертации, соответствуют п. 7. (Излучение, поглощение и рассеяние света изолированными и взаимодействующими атомами, молекулами и ионами. Физические основы процессов люминесценции и спектроскопических методов исследования веществ. Поляризационные явления.) и п. 15. (Оптика и спектроскопия сложных атомно-молекулярных систем, наноструктур, мезоскопических систем, метаструктур и наноматериалов) паспорта научной специальности 1.3.6. «Оптика». 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.

Отзыв составил:

Доктор физико-математических наук, Соломонов Владимир Иванович, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)


/ Соломонов Владимир Иванович /
02.09.2022 . дата

Адрес: Российская федерация, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106
ИЭФ УрО РАН, тел: +7 (343) 267-87-79, e-mail: plasma@iep.uran.ru

Подпись Соломонова Владимира Ивановича заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), к. ф.-м.н.

/ Кокорина Елена Евгеньевна /
Российская федерация, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106 ИЭФ УрО РАН, тел: +7 (343) 267-88-18.



Список основных публикаций официального оппонента В. И. Соломонова по теме диссертации Н. В. Пестовского в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Solomonov V. I., Osipov V. V., Spirina A. V., Makarova A. S., Shitov V. A., and Maksimov R. N. Luminescence response of neodymium ions to phase transformations in yttria-based solid-solution nanopowders //Journal of Optical Technology. – 2022. – Т. 89. – №. 2. – С. 66-70.
2. Solomonov V. I., Spirina A. V., Popov M. P., Makarova A. S., Nikolaev A. G., and Orlov A. N. Optical properties of a new decorative stone—rayizite //Journal of Optical Technology. – 2021. – Т. 88. – №. 10. – С. 610-614.
3. Бочарникова Е. Н., Чайковская О. Н., Майер Г. В., Соломонов В. И., Макарова А. С., Орлов А. Н., Осипов В. В., Чайковский С. А. Люминесцентные исследования растворов бисфенола А под действием электронного пучка //Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130. – №. 5. С. 618-622
4. Соломонов В. И., Спирина А. В., Макарова А. С. Специфика кинетики импульсной катодолюминесценции иона неодима в иттрий-алюминиевом гранате и оксида иттрия //Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – №. 11. – С. 1812-1816.
5. Осипов В. В., Соломонов В. И., Подкин А. В., Шитов В. А., Тихонов Е. В., Корсаков А. С., Синтез и исследование нанопорошков и керамики магний-алюминиевой шпинели, активированной медью //Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – №. 1. – С. 157-162.
6. Соломонов В. И., Спирина А. В., Макарова А. С. Разгорание и затухание импульсной катодолюминесценции в монокристаллах и керамиках Nd: ИАГ //Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 7. – С. 857-861.
7. Осипов В. В., Шитов В. А., Лукъяшин К. Е., Платонов В. В., Соломонов В. И., Корсаков А. С., Медведев А. И., Синтез и исследование $\text{Fe}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ -керамики для активных элементов твердотельных лазеров //Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – №. 1. – С. 89-94.
8. Соломонов В.И., Осипов В.В., Шитов В.А., Лукъяшин К.Е., Бубнова А.С. Собственные центры люминесценции керамических иттрий-алюминиевого граната и оксида иттрия //Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – №. 1. – С. 5-9.

9. Бакшт Е.Х., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф., Соломонов В.И., Шитов В. А. Свечение керамики из оксида иттрия под действием электронного пучка //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63. – №. 7. – С. 41-46.
10. Osipov V.V., Shitov V.A., Maksimov R.N., Lukyashin K.E., Solomonov V.I., Ishchenko A.V. Fabrication and characterization of IR-transparent Fe²⁺ doped MgAl₂O₄ ceramics //Journal of the American Ceramic Society. – 2019. – Т. 102. – №. 8. – С. 4757-4764.
11. Menshakov A.I., Surkov Yu.S., Solomonov V.I. and Gavrilov N.V. Optical emission spectroscopy study of the influence of the low-energy electron beam parameters on the content of neutral atomic nitrogen in the beam plasma //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032010.
12. Соломонов В.И., Спирина А.В., Попов М.П., Иванов М.А., Липчак А.И. Статистический люминесцентный метод определения региона происхождения изумрудов //Оптический журнал. – 2019. – Т. 86. – №. 7. – С. 67-73.
13. Kamenetskikh A.S., Gavrilov N.V., Solomonov V.I., Surkov Yu.S., Ershov A.A. and Tretnikov P.V. A study of conditions of Al₂O₃ coatings deposition by the anodic reactive evaporation of aluminum //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032073.
14. Osipov V.V., Solomonov V.I., Platonov V.V., Tikhonov E.V. & Medvedev A.I. Synthesis of Fe: MgAl₂O₄ nanopowders by laser ablation //Applied Physics A. – 2019. – Т. 125. – №. 1. – С. 1-10.