10

Локализация заряда в материалах на основе YAG:Nd при облучении электронным пучком

© К.Н. Орехова, Е.В. Дементьева, М.В. Заморянская

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: orekhova.kseniia@gmail.com

Поступила в редакцию 20.04.2026 г.
В окончательной редакции 07.05.2026 г.
Принята к публикации 12.05.2026 г.

Особенности локализации неравновесного заряда в сцинтилляционных материалах в значительной степени обусловливают кинетику люминесценции и эффективность преобразования высокоэнергетического возбуждения в оптическое излучение. В работе представлены результаты анализа динамики поглощенного тока и катодолюминесценции при непрерывном электронном облучении монокристалла и нанокерамики на основе иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами Nd^{3+}. Впервые определены основные типы ловушек носителей заряда и их характерное время захвата носителей заряда, а также полный локализованный заряд для каждого из материалов.

Ключевые слова: локализация заряда, катодолюминесценция, YAG:Nd, нанокерамика, эффект памяти, ловушки носителей заряда.

DOI: 10.61011/OS.2026.07.63555.9494-26

Введение

Среди оксидных материалов, перспективных для сцинтилляционной техники, особое место занимает иттрий-алюминиевый гранат ($Y_3Al_5O_{12}$, YAG), активированный ионами редкоземельных элементов. Ранее многочисленными исследовательскими группами было показано, что керамическая форма YAG по своим люминесцентным и сцинтилляционным характеристикам незначительно уступает монокристаллическим аналогам, при этом технология получения керамики характеризуется меньшими трудозатратами, более высокой воспроизводимостью и возможностью масштабирования. Это делает керамические материалы на основе YAG привлекательной альтернативой монокристаллам для широкого круга применений, включая медицинскую визуализацию, детектирование ионизирующих излучений и оптоэлектронику [1–5].

Вместе с тем наличие межзеренных границ в керамике вносит дополнительные структурные неоднородности, которые могут существенно влиять на процессы переноса энергии и преобразования высокоэнергетического возбуждения в оптическое излучение. В частности, границы зерен могут служить центрами захвата носителей заряда (ловушками) и оказывать влияние на кинетику затухания люминесценции. Ранее нами было показано, что кинетика затухания катодолюминесценции (КЛ) в керамических образцах YAG носит немоноэкспоненциальный характер, что принципиально отличает их от монокристаллов [6]. Данное различие объясняется наличием в керамике системы межзеренных границ, которые создают дополнительные каналы релаксации возбуждения и вносят вклад в формирование сложной временной кинетики люминесцентного отклика.

Таким образом, несмотря на очевидные технологические преимущества керамических сцинтилляторов, влияние границ зерен и связанных с ними дефектов на фундаментальные процессы преобразования высокоэнергетического возбуждения остается недостаточно изученным, что открывает перспективы для дальнейших систематических исследований в данной области.

Важнейшей характеристикой сцинтилляторов является выход люминесценции, на который существенное влияние оказывают не только процессы захвата высокоэнергетического возбуждения непосредственно люминесцентными центрами, но и механизмы преобразования высокоэнергетического излучения кристаллической матрицей. К числу ключевых процессов, определяющих эффективность этого преобразования, относятся захват носителей возбуждения на ловушки и дефекты кристаллической структуры. Ловушечные состояния могут оказывать влияние на люминесценцию — как усиливая, так и ослабляя её. В большинстве современных работ, посвященных изучению ловушечных уровней, основное внимание уделяется термолюминесцентной спектроскопии, позволяющей определить энергию активации ловушек, влияющих на люминесцентные свойства материала [7–12]. Также исследовать наличие ловушек возможно при анализе времен затухания люминесцентных переходов [13–14].

Особенно важно учитывать процессы захвата возбуждения зарядовыми ловушками при исследовании динамических процессов при стационарном облучении электронным пучком. Для этого применяется методика

одновременного измерения интенсивности КЛ в стационарном режиме и поглощенного образцом тока [15]. При облучении образца электронным пучком происходит генерация неравновесных носителей заряда. Если в образце есть ловушки, то с момента начала облучения образца электронным пучком они захватывают носители заряда (электроны или дырки), что отражается в динамике поглощенного тока. Подход, основанный на синхронной регистрации токовых и люминесцентных характеристик, позволяет разделить вклады электронных и дырочных ловушек, оценить характерные времена заполнения центров захвата и выявить особенности локализации заряда и их влияние на транспорт неравновесных носителей. Методика была апробирована на тонких пленках SiO_2 [16] и HfO_2 [17], и на объемных кристаллах Ga_2O_3 [15] и InP [18].

Ранее было показано, что при непрерывном облучении электронным пучком материалов на основе YAG может наблюдаться как разгорание интенсивности КЛ, так и её затухание. В работе [19] было описано влияние контаминационной пленки, образованной молекулами паров масляного насоса, на интенсивность КЛ и рассчитан её коэффициент поглощения в оптическом диапазоне. Впервые разгорание КЛ видимого и УФ диапазонов при непрерывном облучении электронным пучком было обнаружено при получении КЛ спектров YAG:Nd нанокерамики в работе [20]. Были получены зависимости интенсивности КЛ от времени при непрерывном облучении электронным пучком для различных полос YAG:Nd как монокристалла, так и нанокерамики. В работе [21] был описан эффект памяти в нанокерамике при непрерывном облучении электронным пучком и предложена модель, включающая участие ловушечных состояний в процессах преобразования высокоэнергетического излучения в оптическое. Для более подробного исследования влияния ловушек на КЛ в материалах на основе YAG:Nd в настоящей работе применялась методика, основанная на одновременной регистрации динамики интенсивности полос КЛ и поглощенного тока при непрерывном облучении образцов электронным пучком.

Целью настоящей работы было определить влияние локализации заряда на люминесцентные характеристики в монокристалле и нанокерамике на основе YAG:Nd при облучении электронным пучком.

Образцы и методы исследования

В качестве образцов для исследования были выбраны известные и ранее подробно изученные образцы монокристалла и нанокерамики на основе YAG:Nd. Содержание Nd в образцах было близко к концентрационному максимуму интенсивности люминесценции в лазерных кристаллах YAG:Nd и составляло 0.15 at% в образце монокристалла и 0.11 at% в образце нанокерамики. Размер зерен в образце нанокерамики составлял порядка 50 nm [6].

Монокристалл YAG:Nd был выращен методом направленной кристаллизации (Бриджмена) [22] в Государственном оптическом институте имени С.И. Вавилова (Санкт-Петербург, Россия) при температуре 1930 °C. Образец нанокерамики YAG:Nd был синтезирован из нанопорошков с использованием метода низкотемпературного прессования при высоком давлении [23] в Институте низких температур и структурных исследований (Вроцлав, Польша). Компакт помещали в контейнер тороидального типа и прессовали при следующих условиях: давление 8 GPa, температура 450 °C, время выдержки 1 min. После спекания образец дополнительно отжигали на воздухе при 1000 °C в течение 8 h.

Для исследования образцы прошли шлифовку и полировку с использованием алмазной пасты. Кроме того, на поверхность образцов была нанесена углеродная плёнка с помощью универсального вакуумного поста JEE-4C (JEOL, Япония) для обеспечения электропроводности при облучении электронным пучком.

КЛ-свойства образцов исследовали с помощью электронно-зондового микроанализатора Camebax (Cameca, Франция), оснащённого оптическим спектрометром оригинальной конструкции [24], который был установлен на оптический порт микроанализатора. Спектры КЛ были получены в оптическом диапазоне от 380 до 650 nm при комнатной температуре. Параметры электронного пучка были следующие: 15 keV, ток 50 nA, диаметр 2 μm. В режиме регистрации динамики КЛ при непрерывном облучении электронным пучком спектрометр настраивался на определенную длину волны и регистрировал сигнал интенсивности КЛ с временным шагом 100 ms. Ток электронного пучка варьировался от 20 до 30 nA.

При бомбардировке твёрдого тела (мишени) пучком первичных электронов происходит их взаимодействие с атомами и электронами кристаллической решётки, некоторая доля электронов отражается, остальные электроны теряют энергию при упругих взаимодействиях, возбуждая электронную подсистему. Избыточный заряд стекает с образца и регистрируется амперметром. Если в образце присутствуют точечные дефекты — ловушки электронов или дырок, то часть носителей заряда, образованных при торможении первичных электронов, может быть захвачена этими ловушками. Этот процесс влияет на динамику поглощенного тока.

Изменение зарядового состояния ловушек может влиять на интенсивность полос КЛ. Тогда процесс захвата носителей заряда может проявляться в динамике интенсивности полос КЛ при непрерывном облучении электронным пучком, причем характерные времена динамики поглощенного тока и динамики КЛ в этом случае должны совпадать.

Была разработана специальная система для измерения динамики поглощенного тока, которая представляет собой токовый предусилитель, преобразующий ток в напряжение, и подключенную к нему систему индикации. Параллельно системе индикации подключалась

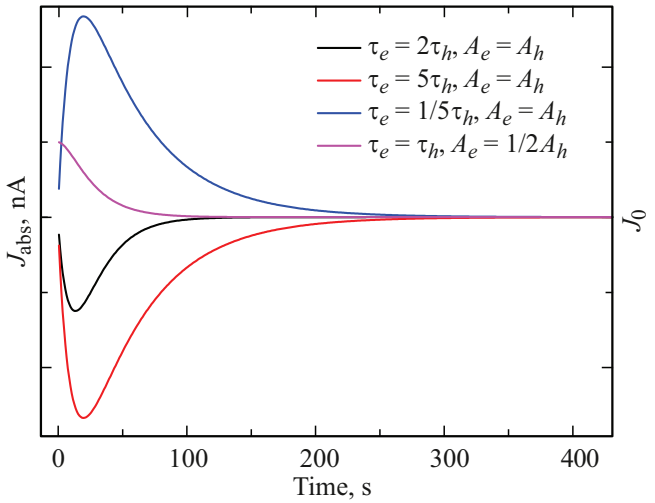

Рис. 1. Модельные зависимости динамики поглощенного тока при наличии в материале зарядовых ловушек обоих типов.

схема оцифровки на основе микроконтроллера (МК) ATmega328, подключенного к персональному компьютеру. В качестве опорного напряжения использовался встроенный в МК источник напряжения в 1.1 V, а аналогово-цифровые преобразования производились 10-битовым АЦП. Таким образом, собственная погрешность данной схемы составляла 1 mV. Период регистрации тока составлял 100 ms. Регистрация динамики поглощенного тока производилась одновременно с регистрацией динамики КЛ. Характерное время захвата носителей, которые позволяет изучать данное оборудование, составляет от долей секунд до нескольких часов.

В работе [16] предложена модель описания динамики поглощенного тока, которая применялась в настоящей работе. В общем виде зависимость поглощенного тока от времени облучения электронным пучком для образца, содержащего по одному типу ловушек электронов и дырок, может быть описана следующим образом:

$$J_{\text{abs}} = J_0 - A_e \exp(-t/\tau_e) + A_h \exp(-t/\tau_h),$$

где экспонента $A_e \exp(-t/\tau_e)$ описывает вклад электронных ловушек, а экспонента $A_h \exp(-t/\tau_h)$ — вклад дырочных ловушек. Коэффициенты $1/\tau_e$ и $1/\tau_h$ — вероятности захвата электронов и дырок ловушками соответственно. Величина полного локализованного заряда, захваченного конкретным типом ловушек, определяется как $Q = A\tau$, где A — вклад конкретного типа ловушек (A_e для электронных, A_h для дырочных), τ — характерное время процесса захвата носителей заряда (τ_e — на электронные ловушки, τ_h — на дырочные). Следует заметить, что ловушек для носителей обоих знаков может быть несколько типов и, соответственно, экспериментальные зависимости могут быть существенно сложнее. Таким образом, измерение динамики поглощенного тока при непрерывном облучении электронным пучком позволяет исследовать захват носителей заряда ловушками. Модельные зависимости поглощенного тока от времени при непрерывном облучении электронным пучком представлены на рис. 1.

Экспериментальные результаты

При облучении электронным пучком в спектрах КЛ YAG:Nd наблюдаются полосы как в ИК, так и в видимом диапазоне. Последние обусловлены переходами с высокоэнергетического уровня иона $Nd^{3+}\,{}^2F(2)_{5/2}$ на нижележащие уровни [25–27]. На рис. 2 представлены спектры КЛ образцов в видимом диапазоне при комнатной температуре. В спектрах наблюдаются полосы характерные для люминесценции Nd^{3+}, соответствующие переходы указаны на рисунке. Видно, что интенсивность люминесценции монокристалла существенно выше, чем интенсивность нанокерамики. Для измерения динамики КЛ была выбрана наиболее интенсивная полоса КЛ 401 nm.

Динамики интенсивности КЛ и поглощенного тока были измерены при комнатной температуре. Для каждого из образцов было получено не менее 10 зависимостей интенсивности КЛ и поглощенного тока при непрерывном облучении электронным пучком от времени облучения в различных областях. Зависимости имели хорошую повторяемость. На рис. 3 представлены характерные зависимости изменения КЛ полосы 401 nm и поглощенного тока в образцах монокристалла и нанокерамики YAG:Nd при непрерывном облучении их электронным пучком.

Полученные данные были обработаны согласно описанной выше модели (таблица). В образце монокристалла YAG:Nd в динамике поглощенного тока наблюдается один процесс, в динамике КЛ — два процесса. Медленное затухание интенсивности КЛ с характерным временем порядка 600 s связано с нарастанием контаминационной пленки, поглощающей интенсивность КЛ [19], поскольку данный процесс не проявляется в

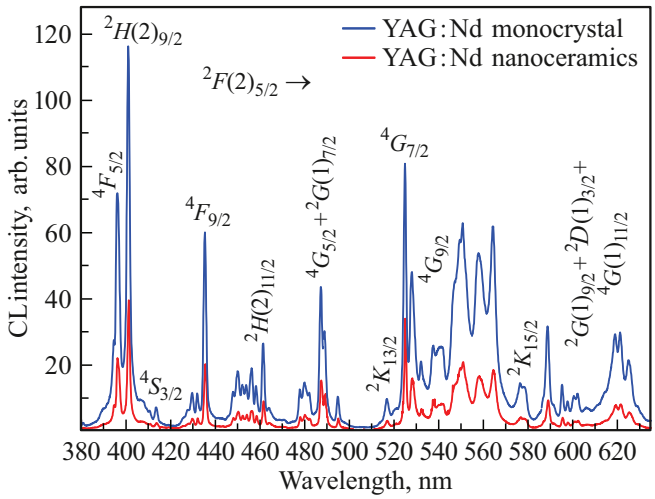

Рис. 2. Спектры КЛ образцов YAG:Nd в видимом диапазоне.

Характерные времена динамики КЛ и поглощенного тока, тип ловушек носителей заряда и полный локализованный заряд для каждого типа ловушек в монокристалле и нанокерамике YAG:Nd

Характерное время динамики КЛ интенсивности 401 nm, s (в скобках указан процесс разгорания (↑) или затухания (↓) КЛ)	Характерное время динамики поглощенного тока, s	Тип ловушек	Величина полного локализованного заряда, nC
Монокристалл YAG:Nd			
3.3 ± 0.1 (↓)	3.2 ± 0.1	e^-	3.2
600 ± 10 (↓)	–	–	–
Нанокерамика YAG:Nd			
4 ± 1 (↓)	3 ± 1	e^-	0.3
–	85 ± 5	e^-	400
125 ± 10 (↑)	120 ± 10	h^+	900
600 ± 10 (↓)	–	–	–

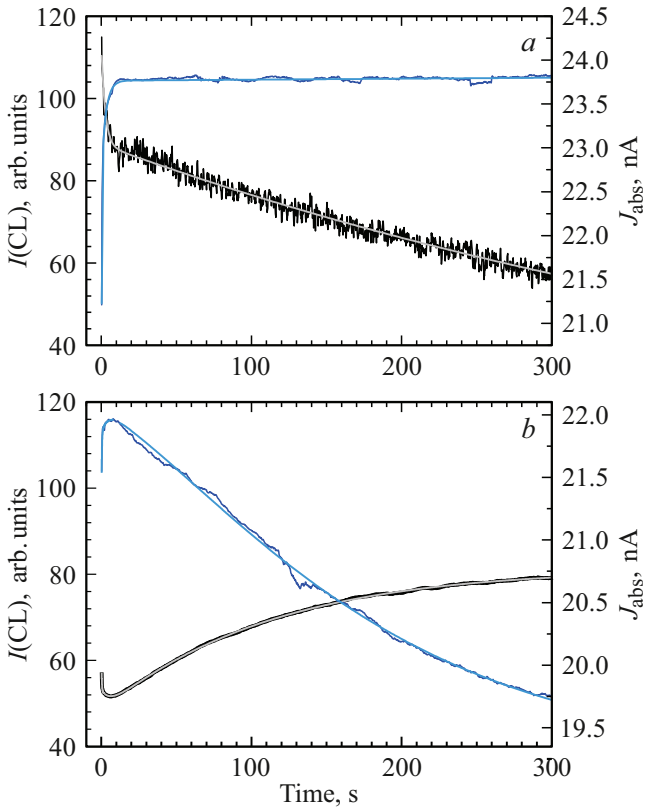

Рис. 3. Динамика интенсивности КЛ (черная линия) и её аппроксимация (серая), и динамика поглощенного тока (синяя) и её аппроксимация (голубая) при непрерывном облучении электронным пучком (*a*) монокристалла YAG:Nd (полоса 401 nm) и (*b*) нанокерамики YAG:Nd (полоса 401 nm).

динамике поглощенного тока. В динамиках поглощенного тока и КЛ наблюдается быстрое затухание КЛ с одновременным увеличением значения поглощенного тока. Характерное время данных процессов составляет порядка 3 s, а полный локализованный заряд (определенный из кривых изменения поглощенного тока) — порядка 3 nC. Это указывает на то, что в данном процессе происходит заполнение электронных ловушек с высокой вероятностью захвата.

В динамике КЛ нанокерамики YAG:Nd также было обнаружено влияние поглощения контаминационной пленкой, как и в монокристалле. Её влияние было учтено при аппроксимации. В образце нанокерамики YAG:Nd в динамике КЛ и поглощенного тока также можно выделить несколько процессов со схожими временами. Во-первых, наблюдается затухание КЛ с одновременным увеличением поглощенного тока, связанное с заполнением электронных ловушек, с характерным временем порядка 3–4 s (аналогично монокристаллу). Однако полный локализованный заряд на таких ловушках в 10 раз меньше, чем в монокристаллах, что указывает на меньшее количество электронных ловушек с таким характерным временем заполнения. Во-вторых, наблюдается увеличение интенсивности КЛ с одновременным уменьшением поглощенного тока с характерным временем 120–125 s. Этот процесс связан с заполнением дырочных ловушек. Полный локализованный заряд данного процесса составляет порядка 900 nC. Также в образце нанокерамики наблюдается процесс заполнения электронных ловушек с характерным временем порядка 85 s и полным локализованным зарядом 400 nC, не отраженный в динамике КЛ.

Интерпретация природы ловушек в YAG:Nd

Из литературных данных известно, что одним из распространенных типов собственных дефектов в иттрий-алюминиевых гранатах является дефект перестановки типа Y_{oct}^{Al} (атом иттрия замещает атом алюминия в

октаэдрической позиции) [28,29]. Такие дефекты создают дополнительные уровни в зоне проводимости, которые выступают в роли центров захвата носителей заряда (ловушек). В работе [30] получены кривые термостимулированной люминесценции (ТСЛ) монокристаллов YAG, возбужденных рентгеновскими квантами при 6 K. Полоса ТСЛ при 120 K связывается авторами с наличием в кристаллах дефектов перестановки типа Y_{oct}^{Al}. В работе [31] авторы исследовали монокристаллы и тонкие пленки LuAG:Ce. Методами ТСЛ и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) было определено присутствие мелких электронных ловушек в запрещенной зоне LuAG:Ce, относящихся к дефектам перестановки.

В работе [32] показано, что дефекты перестановки типа Y_{oct}^{Al} всегда преобладают в YAG, а их содержание стремительно растет с ростом температуры синтеза гранатов. Исходя из условий синтеза нанокерамики на основе YAG можно предположить, что относительное содержание дефектов перестановки типа Y_{oct}^{Al} в них ниже, чем в монокристаллах тех же составов, поскольку нанокерамика синтезируется при гораздо меньших температурах, чем монокристаллы. Можно предположить, что процессы в динимике КЛ и поглощенного тока с характерным временем 3–4 s связаны именно с дефектами перестановки типа Y_{oct}^{Al}. Это предположение согласуется с тем, что полный локализованный заряд на электронных ловушках в нанокерамике на порядок ниже, чем в монокристалле.

О дырочных ловушках в нанокерамике YAG:Nd или в похожих материалах известно не так много. Так, например, при исследовании перовскитов $YAlO_3$ [33] методами ТСЛ и ЭПР были обнаружены дырочные ловушки, связанные с комплексами межузельного кислорода O- или вакансий кислорода VO, пространственно скоррелированных с примесью (в данном случае с ионами Ce^{3+}, Pr^{3+} и Tb^{3+}). В работе предполагается, что носители заряда могут мигрировать с уровней собственных дефектов на уровни ионов редкоземельных элементов, где и происходит радиационная рекомбинация. Схожие комплексные дефекты могут присутствовать и в гранатах. Можно предполагать, что подобные дефекты в нанокерамике YAG:Nd выступают в роли дырочных ловушек и отвечают за наблюдаемый эффект памяти. Поскольку в случае эффекта памяти ловушки остаются заполненными длительное время (более года), вероятность делокализации заряда с них крайне мала при комнатной температуре.

Однозначно связать ловушки носителей заряда с конкретными дефектами в материале — отдельная непростая задача, которая требует комплексный набор различных методов исследования и большой набор образцов с заданными свойствами, а также применение симплекс-решетчатых методов в связи конкретных свойств образцов (в частности, содержание точечных дефектов — потенциальных ловушек носителей заряда) с методами их синтеза и/или другими характеристиками (например, присутствием границ зерен, размерами зерен в поликристаллических образцах и т.д.)

Выводы

Изучено влияние локализации носителей заряда на люминесцентные свойства материалов на основе YAG:Nd. Показано, что в монокристалле YAG:Nd присутствуют зарядовые ловушки электронного типа, которые заполняются в процессе облучения электронным пучком, что увеличивает поглощенный ток и одновременно снижает интенсивность КЛ излучающих центров. В нанокерамике на основе YAG:Nd присутствуют три типа ловушек: электронные ловушки с тем же характерным временем заполнения, что и в монокристаллах, но в меньшем на порядок количестве, дырочные ловушки с характерным временем заполнения в сотни секунд, которые отвечают за ранее обнаруженный эффект памяти в нанокерамике, и электронные ловушки, не влияющие на интенсивность КЛ.

Можно предположить, что электронные ловушки в образцах YAG:Nd, влияющие на интенсивность КЛ при непрерывном облучении электронным пучком, связаны с дефектами перестановки типа Y_{oct}^{Al}, а дырочные ловушки в нанокерамике YAG:Nd, отвечающие за эффект памяти в материале, связаны с комплексами межузельного кислорода или вакансиями кислорода. Однако чтобы однозначно идентифицировать ловушки, необходимо дополнительное комплексное исследование и более широкая выборка образцов.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-72-00112, https://rscf.ru/project/24-72-00112/.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

Список литературы

[1] R. Tomala, L. Marciniak, J. Li, Yu. Pan, K. Lenczewska, W. Strek, D. Hreniak. Opt. Mat., **50**, 59 (2015). DOI: 10.1016/j.optmat.2015.06.042

[2] A.A. Kaminskii, V.V. Balashov, E.A. Cheshev, Yu.L. Kopylov, A.L. Koromyslov, O.N. Krokhin, V.B. Kravchenko, K.V. Lopukhin, V.V. Shemet, I.M. Tupitsyn. J. Phys.: Conf. Ser., **740** 012009 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/740/1/012009

[3] M. Pokhrel, N. Ray, G.A. Kumar, D.K. Sardar. Optical Mater. Express, **2** (3), 235 (2012). DOI: 10.1364/OME.2.000235

[4] J. Zhou, W. Zhang, T. Huang, L. Wang, J. Li, W. Liu, B. Jiang, Yu. Pan, J. Guo. Ceram. Int., **37** (2), 513 (2011). DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.09.031

[5] I.O. Vorona, R.P. Yavetskiy, M.V. Dobrotvorskaya, A.G. Doroshenko, S.V. Parkhomenko, A.V. Tolmachev, D.Yu. Kosyanov, L. Gheorghe, C. Gheorghe, S. Hau, M. Enculescu. Opt. Mat., **77**, 221 (2018). DOI: 10.1016/j.optmat.2018.01.038
[6] K. Orekhova, M. Zamoryanskaya. J. Lumin., **251**, 119228 (2022). DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.119228
[7] K. Wiśniewski, Cz. Koepke, A.J. Wojtowicz, W. Drozdowski, M. Grinberg, S.M. Kaczmarek, J. Kisielewski. Acta Phys. Pol. A., **95** (3), 403 (1999).
[8] X.-B. Yang, J. Xu, H.-J. Li, Q.-Y. Bi, L.-B. Su, Y. Cheng, Q. Tang. J. Appl. Phys., **106**, 033105 (2009). DOI: 10.1063/1.3194794
[9] P. Saadatkia, C. Varney, F. Selim. In: *Luminescence — An Outlook on the Phenomena and their Applications*, ed. by J. Thirumalai, IntechOpen (2016). DOI: 10.5772/65306
[10] J.T. Randall, M.H.F. Wilkins. Proc. R. Soc. A., **184**, 390 (1945). DOI: 10.1098/rspa.1945.0025
[11] H. Guo, Y. Wang, G. Li, J. Liu, P. Feng, D. Liu. J. Mater. Chem. C, **5**, 12090 (2017). DOI: 10.1039/C7TC03579A
[12] A.H. Krumpel, A.J.J. Bos, A. Bessière, E. van der Kolk, P. Dorenbos. Phys. Rev. B, **80**, 085103 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.085103
[13] M. Moszyński, T. Ludziejewski, D. Wolski, W. Klamra, L.O. Norlin. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **345** (3), 461 (1994). DOI: 10.1016/0168-9002(94)90500-2
[14] V.M. Khanin, I.I. Vrubel, R.G. Polozkov, I.D. Venevtsev, P.A. Rodnyi, T. Tukhvatulina, K. Chernenko, W. Drozdowski, M.E. Witkowski, M. Makowski, E.V. Dorogin, N.V. Rudin, C. Ronda, H. Wieczorek, J. Boerekamp, S. Spoor, I.A. Shelykh, A. Meijerink. J. Phys. Chem. C, **123** (37), 22725 (2019). DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b05169
[15] Е.В. Иванова, П.А. Дементьев, М.В. Заморянская, Д.А. Закгейм, Д.Ю. Панов, В.А. Спиридонов, А.В. Кремлева, М.А. Одноблюдов, Д.А. Бауман, А.Е. Романов, В.Е. Бугров. ФТТ, **63** (4), 421 (2021). DOI: 10.21883/FTT.2021.04.50705.236 [E.V. Ivanova, P.A. Dementev, M.V. Zamoryanskaya, D.A. Zakgeim, D.Yu. Panov, V.A. Spiridonov, A.V. Kremleva, M.A. Odnoblyudov, D.A. Bauman, A.E. Romanov, V.E. Bugrov. Phys. Solid State, **63**, 544 (2021). DOI: 10.1134/S1063783421040089].
[16] П.А. Дементьев, Е.В. Иванова, М.В. Заморянская. ФТТ, **61** (8), 1448 (2019). DOI: 10.21883/FTT.2019.08.47968.454 [P.A. Dementev, E.V. Ivanova, M.V. Zamoryanskaya. Phys. Solid State, **61**, 1394 (2019). DOI: 10.1134/S1063783419080110].
[17] E.V. Dementeva, P.A. Dementev, M.A. Yagovkina, M.V. Zamoryanskaya. ACS Appl. Nano Mater., **6** (18), 16212 (2023). DOI: 10.1021/acsanm.3c02178
[18] P.A. Dementev, E.V. Dementeva, T.V. Lvova, V.L. Berkovits, M.V. Lebedev. Semicond., **55** (8), 667 (2021). DOI: 10.1134/S1063782621080066
[19] К.Н. Орехова, Ю.М. Серов, П.А. Дементьев, Е.В. Иванова, В.А. Кравец, В.П. Усачева, М.В. Заморянская. ЖТФ, **89** (9), 1412 (2019) DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48068.43−19 [K.N. Orekhova, Yu.M. Serov, P.A. Dementev, E.V. Ivanova, V.A. Kravets, V.P. Usacheva, M.V. Zamoryanskaya. Tech. Phys., **64** (9), 1336 (2019) DOI: 10.1134/S1063784219090123].
[20] К.Н. Орехова, А.Н. Трофимов, М.В. Заморянская, В. Стренк. Опт. и спектр., **120** (6), 956 (2016). DOI: 10.7868/S0030403416060167 [K.N. Orekhova, A.N. Trofimov, M.V. Zamoryanskaya, W. Strek. Opt. Spectrosc., **120**, 896 (2016). DOI: 10.1134/S0030400X16060163].
[21] K.N. Orekhova, R. Tomala, D. Hreniak, W. Stręk, M.V. Zamoryanskaya. Opt. Mat., **74**, 170 (2017). DOI: 10.1016/j.optmat.2017.02.027
[22] A.G. Petrosyan. J. Cryst. Growth., **139**, 372 (1994) DOI: 10.1016/0022−0248(94)90190−2
[23] R. Fedyk, D. Hreniak, W. Łojkowski, W. Strek, H. Matysiak, E. Grzanka, S. Gierlotka, P. Mazur. Opt. Mat., **29** (10), 1252 (2007). DOI: 10.1016/j.optmat.2006.05.016
[24] М.В. Заморянская, С.Г. Конников, А.Н. Заморянский. ПТЭ **4**, 62 (2004) [M.V. Zamoryanskaya, S.G. Konnikov, A.N. Zamoryanskii. Instrum. Exp. Tech., **4**, 477 (2004)].
[25] К.Н. Гуляева, А.Н. Трофимов, М.В. Заморянская. Опт. и спектр., **114** (5) 773 (2013) [K.N. Gulyaeva, A.N. Trofimov, M.V. Zamoryanskaya. Opt. Spectrosc., **114**, 709 (2013). DOI: 10.1134/S0030400X13050056].
[26] A. Niklas, W. Jelenski. Phys. Status Solidi A, **77** (1), (1983). DOI: 10.1002/pssa.2210770146
[27] D. Kudarauskas, M. Vengris, S. Jursenas, V. Sirutkaitis, A. Piskarskas. Appl. Phys. Lett., **112** (4), 041103 (2018). DOI: 10.1063/1.5009530
[28] S. Tavernier, A. Gektin, B. Grinyov, W.W. Moses. *Radiation Detectors for Medical Applications* (Springer Science & Business Media, 2006), 314 p.
[29] V. Babin, P. Bohacek, L. Grigorjeva, M. Kuera, M. Nikl, S. Zazubovich, A. Zolotarjovs. Opt. Mater., **66**, 48 (2017). DOI: 10.1016/j.optmat.2017.01.039
[30] Yu.V. Zorenko, M.V. Pashkovskij, M.M. Batenchuk, L.M. Limarenko, I.V. Nazar, Opt. Spectrosc., **80** (5), 776 (1996).
[31] M. Nikl, E. Mihokova, J. Pejchal, A. Vedda, Yu. Zorenko, K. Nejezchleb. Phys. Status Solidi B, **242** (14), R119 (2005). DOI: 10.1002/pssb.200541225
[32] Z. Li, B. Liu, J. Wang, L. Sun, J. Wang, Y. Zhou. J. Am. Ceram. Soc., **95** (11), 3628 (2012). DOI: 10.1111/j.1551-2916.2012.05440.x
[33] A. Vedda, M. Fasoli, M. Nikl, V.V. Laguta, E. Mihokova, J. Pejchal, A. Yoshikawa, M. Zhuravleva. Phys. Rev. B., **80** (4), 045113 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.045113