00

Эффективность захвата возбуждения излучательного уровня $^5D_0$ европия в $Gd_{0.94-x}Eu_xNb_yTa_{1-y}O_4$

© Г.А. Гусев [1], С.М. Маслобоева [2], М.В. Заморянская [1]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия
[2] Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева — обособленное подразделение ФИЦ „Кольский научный центр Российской академии наук“,
Апатиты, Россия

e-mail: ggusev@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 26.05.2025 г.
В окончательной редакции 22.09.2025 г.
Принята к публикации 24.09.2025 г.

Статья посвящена изучению эффективности захвата возбуждения излучательных уровней Eu^{3+} в твердых растворах $Gd_{1-x}Eu_xNb_yTa_{1-y}O_4$ ($x = 0.01-0.4$, $y = 0-1$). На основе анализа спектров люминесценции показано, что основная фазовая модификация исследуемых материалов — моноклинная (M-политип, $I2/a$). Впервые получено количественное описание эффективности захвата возбуждения для этих материалов. Установлено, что для всех твердых растворов, содержащих Nb, эффективность захвата возбуждения уровня $^5D_0$ Eu^{3+} одинакова в пределах погрешности измерения ($\sim 2500\,\mu m^2 ms^{-1} nA^{-1}$). В танталатах гадолиния эффективность захвата выше на $\sim 15\%$. Данное явление связано с различными каналами возбуждения уровня $^5D_0$ Eu^{3+} в тантало-ниобатах гадолиния в зависимости от соотношения Nb/Ta.

Ключевые слова: тантало-ниобаты гадолиния, Eu^{3+}, катодолюминесценция, эффективность захвата возбуждения, керамика.

DOI: 10.61011/OS.2025.10.61954.8207-25

Введение

Сцинтилляторы и люминофоры широко применяются в различных областях, таких как наука, добывающая и атомная промышленности, медицина [1,2]. В качестве подобных материалов большой популярностью пользуются сложные оксиды, в том числе активированные редкоземельными ионами (РЗИ) [3,4]. При этом РЗИ выступают эффективными центрами люминесценции.

При разработке новых перспективных сцинтилляторов и люминофоров, важным вопросом является изучение механизмов преобразования высокоэнергетического возбуждения в оптическое излучение. Эффективность этих механизмов напрямую влияет на важнейший параметр подобных веществ — выход люминесценции. Интенсивность люминесценции зависит от вероятности захвата возбуждения излучательных уровней и от вероятности релаксации возбуждения. Экспериментально разделить эти два процесса довольно сложно. Однако ранее была предложена методика, позволяющая количественно оценить эффективность захвата возбуждения излучательных уровней люминесцентных центров [5]. Метод основан на определении зависимости скорости нарастания интенсивности полос катодолюминесценции (КЛ) от плотности мощности возбуждения [6].

Исследование эффективности захвата возбуждения РЗИ-центров люминесценции может способствовать разработке новых каскадных схем передачи энергии возбуждения в сцинтилляторах или люминофорах. Так, на примерах $YAG:Tm^{3+},Cr^{3+}$ и $YAG:Eu^{3+}$ было показано, что на этот параметр могут влиять сенсибилизаторы или дефекты (межзеренные границы) [5]. Кроме того, установлено, что для различных возбужденных уровней одного и того же редкоземельного иона в $YAG:Eu^{3+}$ эффективность захвата может различаться [7].

Интересным вопросом является, как будет влиять на эффективность захвата возбуждения РЗИ-активаторами плавное замещение одного из элементов сложного оксида-матрицы другим. Другими словами, как данный параметр будет меняться в твердых растворах. Для исследования подобного замещения хорошо подходят твердые растворы тантало-ниобатов гадолиния. Они интересны тем, что Nb и Ta в их составе имеют практически одинаковый ионный радиус [8]. Кроме того, данные материалы характеризуются полосами собственной люминесценции, связанными с группами NbO_4^{3-} или TaO_4^{3-} [9,10], а ионы гадолиния могут активно участвовать в передаче энергии возбуждения к активаторам [11,12].

Имеется ограниченное количество исследований тантало-ниобатов гадолиния, активированных РЗИ. Твердые растворы, активированные Tb^{3+}, изучены в работе [13]. Однако больший интерес представляют материалы, активированные европием. Европий обладает богатым спектром люминесценции с хорошо разделенными узкими полосами, что позволяет использовать его

в качестве люминесцентного зонда для исследования локального окружения [14]. Спектры люминесценции и кинетики затухания КЛ в тантало-ниобатах гадолиния, активированных Eu^{3+}, были подробно рассмотрены в работе [15]. Также было рассмотрено влияние соотношения Nb/Ta на тонкую структуру спектров КЛ [16]. Однако эффективность захвата возбуждения уровней Eu^{3+} в данных материалах ранее не исследовалась, модель передачи энергии возбуждения в них не предлагалась.

Целью настоящей работы являлось исследование эффективности захвата высокоэнергетического возбуждения излучательных уровней европия 3+ в твердых растворах тантало-ниобатов гадолиния.

Образцы и методы исследования

Подробная схема метода соосаждения для получения порошков тантало-ниобатов гадолиния, активированных европием, представлена в работе [17]. Методика получения керамических образцов, а также исследования их элементного, фазового составов, структурных параметров, описаны в работах [15,16].

В настоящей работе исследовались серии $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ ($x = 0.01-0.4$; $y = 0-1$).

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) при длине волны возбуждения 260 nm, а также спектры возбуждения ФЛ были получены с помощью спектрофлуориметра *Fluorolog-3 „Horiba“* (спектральное разрешение около 0.25 nm).

Катодолюминесцентные (КЛ) свойства материалов исследовались на установке *Camebax* (спектральное разрешение — 0.1–0.2 nm, временное разрешение — до 0.3 μs). Для измерений использовался спектрометр оптического диапазона оригинальной конструкции [18]. Ускоряющее напряжения при получении КЛ спектров и кинетических зависимостей КЛ составляло 20 kV, поглощенный ток — 10-50 nA, диаметр электронного зонда — $\sim 2\,\mu$m. Спектры КЛ были измерены несколько раз в случайных точках образца и усреднены.

Кинетические зависимости КЛ Eu^{3+} были получены в режиме отклонения электронного пучка. Было проведено несколько локальных измерений в случайных областях каждого образца с последующим усреднением.

Все описанные исследования выполнялись при комнатной температуре.

Определение эффективности захвата возбуждения излучательными уровнями проводилась на основе измерения зависимости времени разгорания полосы излучения от плотности тока первичного электронного пучка. Методика основана на предположении, что излучающий центр может быть рассмотрен как двухуровневая система [5]. Основными условиями применимости данного приближения являются сильная локализация возбужденного и основного состояний и отсутствие взаимодействия между возбужденными уровнями. Такие требования в первом приближении соответствуют излучательным уровням Eu^{3+} в матрице при низкой концентрации активатора. В рамках этой модели интенсивность люминесценции пропорциональна содержанию возбужденных центров. Скорость изменения количества возбужденных центров определяется двумя процессами: захватом возбуждения и спонтанной дезактивацией. Этот процесс можно описать следующим выражением [5]:

$$\frac{dn_1}{dt} = LJn_0 - n_1P,$$

где n_0, n_1 — количества возбужденных и невозбужденных центров люминесценции, L — коэффициент, пропорциональный эффективности захвата возбуждения излучающим уровнем ($m^2s^{-1}A^{-1}$) при облучении электронным пучком, J — плотность тока первичного электронного пучка (A/m^2), P — скорость спонтанного перехода (s^{-1}). При решении уравнения учитывалось то, что сумма возбужденных и невозбужденных центров равна общему содержанию центров люминесценции $N = n_0 + n_1$. Решение этого уравнения дает следующую зависимость количества возбужденных центров (интенсивности КЛ) с момента начала возбуждения:

$$I \sim n_1 = \frac{LJN\tau^{-1}}{LJ + \tau^{-1}}(1 - \exp(-(LJ + \tau^{-1})t),$$

где τ — время жизни излучательного перехода. Как видно из уравнения, скорость разгорания $\tau_{\text{rise}}^{-1} = LJ + \tau^{-1}$ зависит не только от времени жизни возбужденного уровня, но также от плотности тока первичного электронного пучка и коэффициента L. Данный коэффициент показывает количество актов возбуждения центров люминесценции за единицу времени (1 s) при плотности тока 1 A/m^2. Он позволяет оценить эффективность возбуждения центра люминесценции для различных энергетических уровней активатора.

Времена разгорания определялись аппроксимированием экспонентой полученных кинетических кривых для участков нарастания интенсивности КЛ. По наклону зависимости скорости разгорания $1/\tau_{\text{rise}}$ от плотности тока первичного пучка J была оценена эффективность захвата возбуждения L для различных излучательных уровней РЗИ в тантало-ниобатах гадолиния.

Для измерений методом КЛ керамику фиксировали в кассетах с помощью сплава Розе. После этого на ее поверхность напыляли тонкий слой углеродной пленки с помощью вакуумного универсального поста JEE-4C для обеспечения электропроводности.

Результаты и обсуждение

Фазовый состав

Для корректного определения коэффициента L для уровней РЗИ в твердых растворах необходимо быть

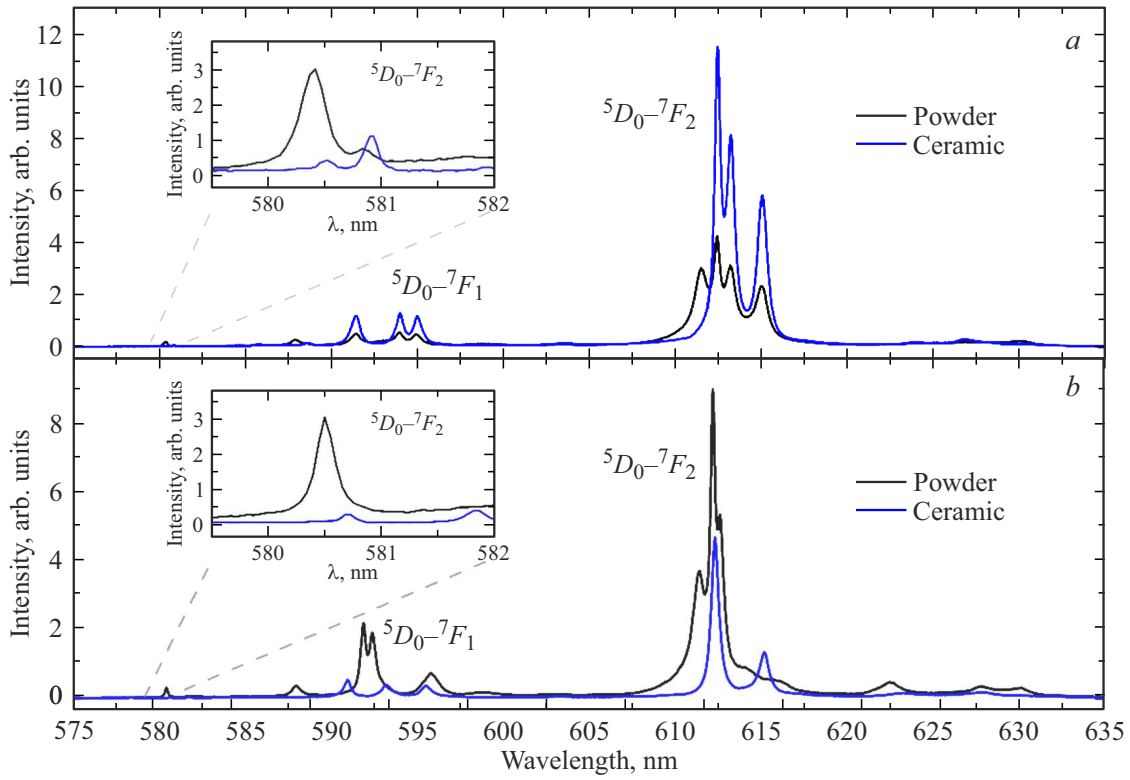

Рис. 1. Спектры ФЛ порошков и керамики составов $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_4$ (a) и $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})TaO_4$ (b) .

уверенным, что все образцы имеют одинаковую структурную модификацию. Тантало-ниобаты гадолиния могут иметь три основные фазовые модификации: высокотемпературную тетрагональную T и две различные низкотемпературные моноклинные — $M\,(I2/a)$ и $M'\,(P2/a)$. Известно, что трехвалентные ионы европия можно использовать в качестве люминесцентного зонда для исследования их локального окружения [14]. Для этих целей были получены спектры ФЛ в диапазоне 575–635 nm, пример которых представлен на рис. 1. Их интерпретация была проведена с помощью литературных данных [19,20] и диаграммы Дике [21]. В спектрах наблюдались только низкоэнергетические переходы с уровня $^5D_0$ на уровни $^7F_0$, $^7F_1$ и $^7F_2$. Важно, что также наблюдалась линия перехода $^5D_0$–$^7F_0$, которую нельзя выделить в спектрах КЛ из-за ее перекрытия с полосами, относящимися к уровню энергии $^5D_1$. Этот переход представлял особый интерес. Максимальное число штарковских расщеплений для него равно 1 [16]. Следовательно, наличие двух линий перехода $^5D_0$–$^7F_0$ в спектре ФЛ должно свидетельствовать о наличии двух разных люминесцирующих фаз в составе материала. В спектрах некоторых исследованных образцов, например порошка и керамики $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_4$ (рис. 1, a) или керамики $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})TaO_4$ (рис. 1, b) наблюдались две линии $^5D_0$–$^7F_0$. Это указывало на наличие люминесцирующих примесных фаз в этих образцах. Наблюдаемые отличия полос $^5D_0$–$^7F_1$ и $^5D_0$–$^7F_2$ в спектрах ФЛ Eu^{3+} совпадали с существующими литературными данными, относящимися к политипам M и M' [22]. Они позволили по форме спектра определить основную фазу тантало-ниобата гадолиния, активированного европием. Форма большинства спектров соответствовала моноклинному политипу M. Образцы порошка серии танталатов $(Gd_{1-x}Eu_x)TaO_4$, демонстрировали отличающуюся от остальных образцов форму спектра, соответствующую политипу M. В то же время, в этих образцах наблюдался только один переход $^5D_0$–$^7F_0$, что говорило о превалировании люминесценции одной фазы M'. Также в некоторых образцах порошков наблюдалась дополнительная полоса Eu^{3+} в районе 610 nm. Скорее всего она была связана с люминесценцией примесной фазы оксида гадолиния, поскольку остальная форма ФЛ спектров оставалась неизменна, а в районе 612 nm имелось две линии, связанные с переходом $^5D_0$–$^7F_0$.

Полученные с помощью ФЛ данные о фазовом составе хорошо согласуются с данными, полученными с помощью рентген-дифракционного фазового анализа (РДФА) [15]. Таким образом подтверждено, что исследованные керамики $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ имеют одну и ту же основную фазовую модификацию — политип M с пространственной группой $I2/a$.

Эффективность захвата возбуждения

Спектры КЛ $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ подробно изучены в работах [15,16]. На этих спектрах наблюда-

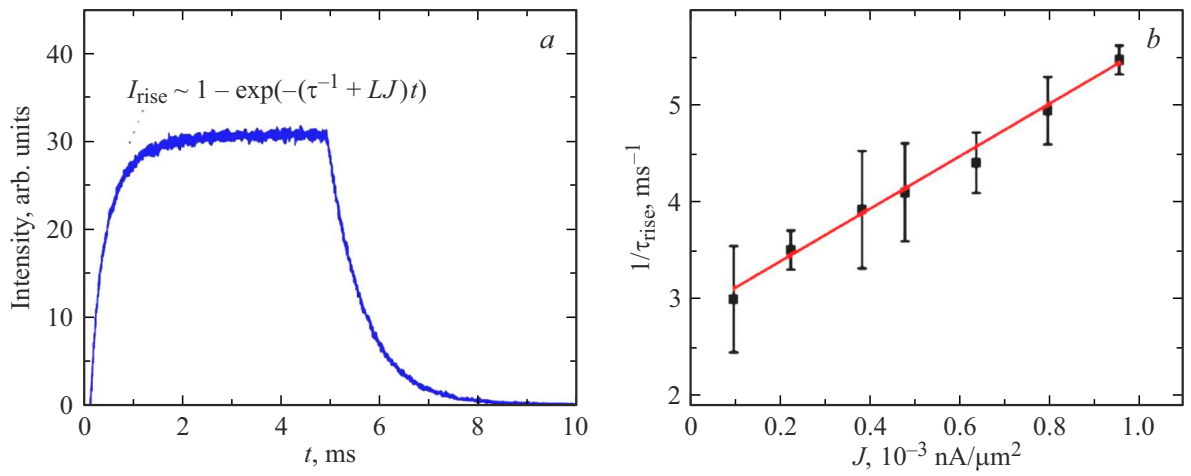

Рис. 2. Примеры кинетики КЛ для образца $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})NbO_4$ (*a*) и зависимости скорости разгорания $1/\tau_{rise}$ от плотности тока первичного пучка J для $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_{0.3}Ta_{0.7}O_4$ (*b*).

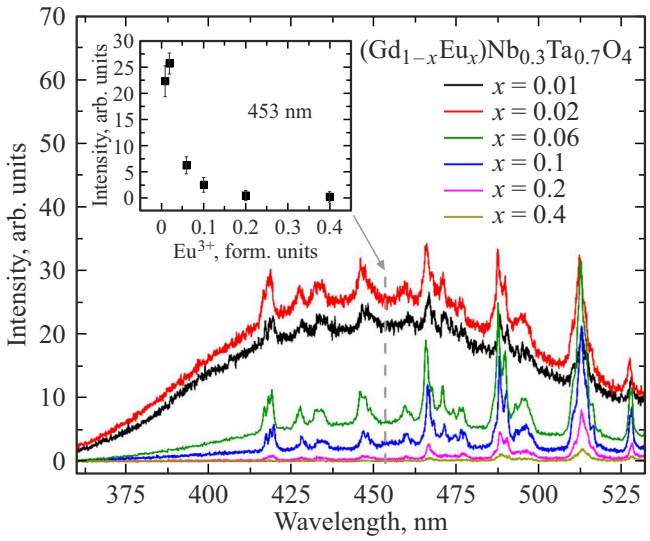

Рис. 3. Участок спектра КЛ серии $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_{0.3}Ta_{0.7}O_4$ с широкой полосой, связанной с группой NbO_4^{3-} (во вставке — зависимость максимума интенсивности широкой полосы, связанной с группой NbO_4^{3-}, от содержания Eu^{3+}).

Значения коэффициентов L для образцов $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_yTa_{1-y}O_4$ с различными соотношениями Nb/Ta

Образец керамики	L, $\mu m^2 ms^{-1} nA^{-1}$
$(Gd_{0.94}Eu_{0.06})NbO_4$	2300±600
$(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_4$	2300±300
$(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_{0.3}Ta_{0.7}O_4$	2700±150
$(Gd_{0.94}Eu_{0.06})TaO_4$	3400±400

лись не только переходы с уровня $^5D_0$, но и более высокоэнергетические переходы с уровней $^5D_1$, $^5D_2$, $^5D_3$. Для полосы излучения, соответствующей самому интенсивному переходу $^5D_0-^7F_2$ Eu^{3+} в серии керамики $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_yTa_{1-y}O_4$ была произведена оценка эффективности захвата возбуждения для керамических образцов с различным соотношением Nb/Ta. Важно заметить, что эффективность захвата возбуждения излучательным уровнем активатора не зависит от концентрации этого активатора [7]. Для каждого образца были получены кинетические зависимости КЛ полосы $^5D_0-^7F_2$ Eu^{3+} (рис. 2, *a*). После их обработки были получены зависимости обратного времени разгорания интенсивности КЛ с момента начала возбуждения от плотности тока первичного электронного пучка в диапазоне $10^{-4}-10^{-3}$ nA/μm^2. При этом зависимости экспериментальных обратных времен разгорания от плотности тока для всех измеренных образцов имели линейный характер (рис. 2, *b*). По их наклону было получено значение коэффициентов L — эффективностей захвата возбуждения. Для образцов с различным соотношением Nb/Ta эти значения представлены в таблице.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для всех составов с присутствием Nb эффективность захвата возбуждения уровня $^5D_0$ Eu^{3+} одинакова ($L \sim 2500\,\mu m^2 ms^{-1} nA^{-1}$) в пределах погрешности измерения. Для танталата гадолиния эффективность захвата выше на величину $\sim 15\%$.

Различие в эффективностях захвата возбуждения уровня $^5D_0$ Eu^{3+} в $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_yTa_{1-y}O_4$ при $y = 0$ и всех остальных составах твердого раствора могло быть связано с различными каналами передачи энергии возбуждения к активатору. В работе [5] показано, что при наличии сенсибилизатора излучающего центра эффективность захвата его излучательных уровней может увеличиваться. Были получены спектры катодолюминесценции в диапазоне 350–530 nm для исследования поведения широкой полосы собственной люминесценции в $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$. Для материалов, содержащих Nb и Eu^{3+} в концентрациях до 0.2 form. units, наблюда-

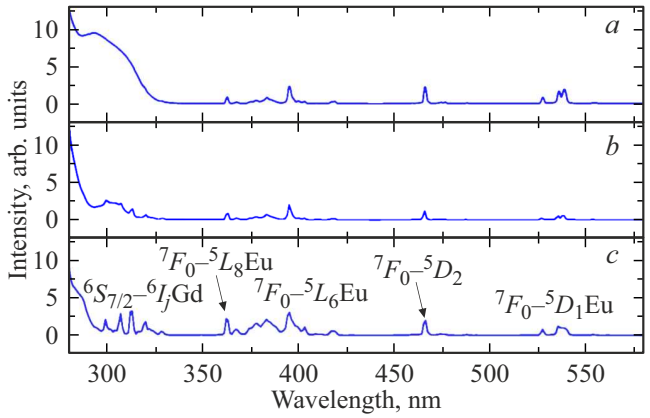

Рис. 4. Спектры возбуждения (для полосы 612 nm) $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})NbO_4$ (*a*), $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_4$ (*b*) и $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})TaO_4$ (*c*).

лась широкая полоса собственной люминесценции в диапазоне 350–550 nm с максимумом интенсивности около 450 nm (пример для серии $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_{0.3}Ta_{0.7}O_4$ — рис. 3). Группы NbO_4^{3-}, отвечающие за эту полосу, могут участвовать в передаче энергии возбуждения к РЗИ-активатору [12]. Этот процесс был косвенно подтвержден полученными зависимостями максимума интенсивности широкой полосы от содержания Eu^{3+} (вставка на рис. 3). При увеличении концентрации европия интенсивность широкой полосы уменьшалась. Также известно, что чем больше в составе твердого раствора Ta, тем менее яркая собственная люминесценция группы NbO_4^{3-} [8]. В серии танталатов гадолиния $(Gd_{1-x}Eu_x)TaO_4$, полосы, относящейся к группам TaO_4^{3-}, не наблюдалось даже при низкой концентрации ионов активатора. Это могло быть связано с более эффективной передачей энергии возбуждения от группы TaO_4^{3-} к атомам Gd^{3+} в танталатах гадолиния [22] и температурным тушением. По всей видимости эти процессы в танталате гадолиния обусловливают более эффективную передачу энергии возбуждения к Eu^{3+}.

Для более детального изучения каналов возбуждения уровня $^5D_0$ Eu^{3+} были получены спектры возбуждения люминесценции на полосе 612 nm (рис. 4). Соответствующие энергетическим переходам линии на спектрах возбуждения были расшифрованы по литературным данным [20,23]. Видно, что для всех исследованных образцов возбуждение уровня $^5D_0$ Eu^{3+} происходило с уровней $^5D_1$, $^5D_2$, $^5L_6$ и $^5L_8$ Eu^{3+}. Однако в области 280–330 nm форма спектров значительно отличалась. Для танталата гадолиния в этой области захват активно происходил с уровней Gd^{3+}. Для ниобата гадолиния данные уровни не проявились, а в области 280–330 nm наблюдалась широкая полоса, связанная с вакансиями кислорода [23]. Интенсивность этой широкой полосы значительно снижалась как только в состав добавлялся Ta. Промежуточные твердые растворы обладали смешанными каналами возбуждения, однако полосы, связанные с гадолинием, проявлялись менее явно, чем в $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})TaO_4$.

Можно предположить, что более активный перенос энергии от гадолиния к активатору в танталатах гадолиния обусловливает более высокую эффективность захвата возбуждения уровнем $^5D_0$ Eu^{3+} в этом материале.

Таким образом, хотя каналы возбуждения уровня $^5D_0$ для ниобатов и танталатов гадолиния хорошо изучены, количественное исследование эффективности захвата возбуждения через эти каналы было проведено впервые.

Полученная на основании экспериментальных данных модель передачи возбуждения в $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$, учитывающая данные КЛ из работы [15], представлена на рис. 5. На схеме показано, что возбуждение уровня $^5D_0$ Eu^{3+} происходит через ионы гадолиния (для $GdTaO_4$), уровни кислородных вакансий и уровни люминесценции группы NbO_4^{3-} (для $GdNbO_4$). Положение уровней кислородных вакансий весьма неопределенно. Определение их более точного положения требует дальнейших исследований.

Выводы

Были исследованы образцы $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$ ($x = 0.01, 0.02, 0.06, 0.1, 0.2, 0.4$; $y = 0, 0.3, 0.9, 1$).

На основе анализа спектров фотолюминесценции подтверждено, что основная структурная модификация керамических образцов — моноклинная модификация с пространственной группой $I2/a$ (M-политип).

Для материалов, содержащих Nb и Eu^{3+} в концентрациях до 0.2 form. units, наблюдалась широкая полоса собственной люминесценции, связанная с группами NbO_4^{3-}. При увеличении концентрации европия интенсивность этой полосы уменьшалась. Это косвенно подтвердило передачу энергии возбуждения от групп NbO_4^{3-} к Eu^{3+}.

Впервые получено количественное описание эффективности захвата возбуждения для уровня $^5D_0$ Eu^{3+} в $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$. Для всех образцов с Nb в составе эффективность захвата возбуждения уровня $^5D_0$ Eu^{3+} была одинакова ($L \sim 2500\,\mu m^2 ms^{-1} nA^{-1}$) в пределах погрешности измерения. При этом для танталата гадолиния эффективность захвата оказалась выше на $\sim 15\%$.

Различие в эффективностях захвата возбуждения уровня $^5D_0$ Eu^{3+} в $(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_yTa_{1-y}O_4$ при $y = 0$ и всех остальных составах твердого раствора могло быть связано с различными каналами передачи энергии возбуждения к активатору. Это показано на основе анализа спектров возбуждения тех же образцов.

Результаты работы могут помочь в понимании механизмов передачи энергии возбуждения в твердых растворах. Подобные исследования могут быть полезны при разработке новых эффективных люминофоров и сцинтилляторов.

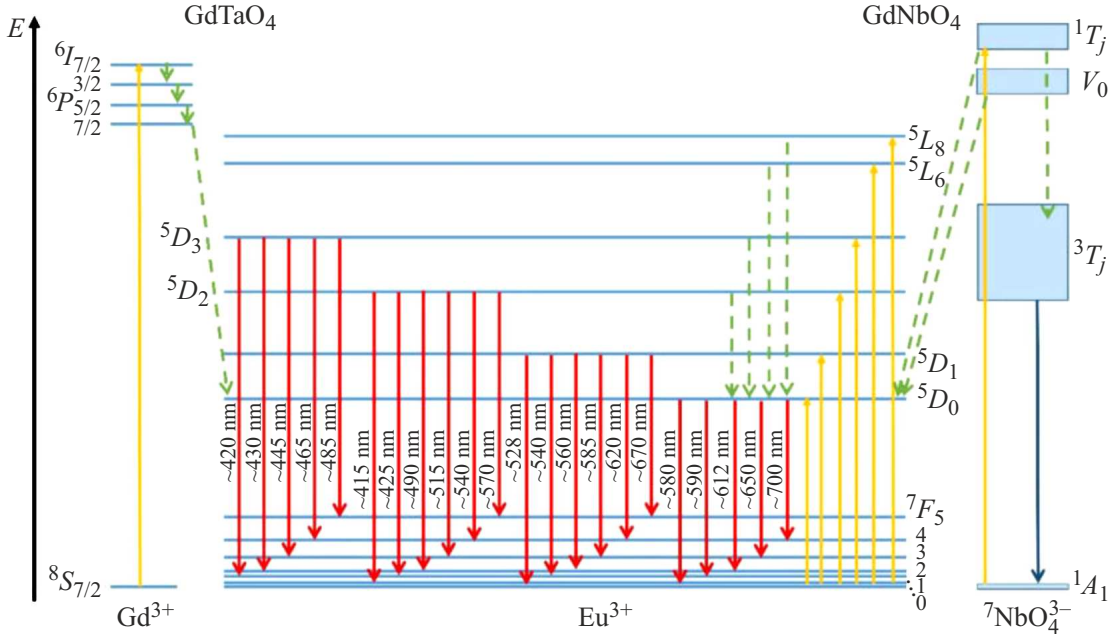

Рис. 5. Схема передачи энергии возбуждения между различными энергетическими уровнями для $(Gd_{1-x}Eu_x)Nb_yTa_{1-y}O_4$.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.А. Васильеву за помощь в получении экспериментальных данных по фотолюминесценции.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Li, X. Chen, M. Nikl. Scintillators, *Processing of Ceramics: Breakthroughs in Optical Materials*, ed. by A. Ikesue (The American Ceramic Society, 2021). DOI: 10.1002/9781119538806.ch3

[2] P. Lecoq, A. Gektin, M. Korzhik. *Inorganic Scintillators for Detector Systems: Physical Principles and Crystal Engineering*, second ed. (Springer, Switzerland, 2017). DOI: 10.1007/978-3-319-45522-8

[3] M. Nikl, V.V. Laguta, A. Vedda. Phys. Status Solidi B., **245**, 1701 (2008). DOI: 10.1002/pssb.200844039

[4] V. Kumar, Z. Luo. Photonics., **8**, 71 (2021). DOI: 10.3390/photonics8030071

[5] M.V. Zamoryanskaya, K.N. Orekhova, E.V. Dementeva, V.A. Kravets, G.A. Gusev. J. Lumin., **239**, 118350 (2021). DOI: 10.1016/j.jlumin.2021.118350

[6] A.N. Trofimov, M.V. Zamoryanskaya. J. Surf. Invest., **3**, 15 (2009). DOI: 10.1134/S1027451009010030.

[7] G.A. Gusev, K.N. Orekhova, V.A. Kravets, A.I. Isakov, A.N. Trofimov, M.V. Zamoryanskaya. J. Lumin., **222**, 117084 (2020). DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117084

[8] O.V. Voloshyna, I.A. Boiaryntseva, V.N. Baumer, A.I. Ivanov, M.V. Korjik, O.T. Sidletskiy. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A., **764**, 227 (2014). DOI: 10.1016/j.nima.2014.07.044

[9] O. Voloshyna, S.V. Neicheva, N.G. Starzhinskiy, I.M. Zenya, S.S. Gridin, V.N. Baumer, O.T. Sidletskiy. Mater. Sci. Eng. B., **178**, 1491 (2013). DOI: 10.1016/j.mseb.2013.08.003

[10] H. Brunckova, H. Kolev, L.A. Rocha, E.J. Nassar, S.B. Moscardini, L. Medvecky. Appl. Surf. Sci., **504**, 144358 (2020). DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144358

[11] S.K. Lee, H. Chang, C.H. Han, H.J. Kim, H.G. Jang, H.D. Park. J. Solid State Chem., **156**, 267 (2001). DOI: 10.1006/jssc.2000.8941

[12] M.V. Nazarov, D.Y. Jeon, J.H. Kang, E.J. Popovici, L.E. Muresan, M.V. Zamoryanskaya, B.S. Tsukerblat. Solid State Commun., **131**, 307 (2004). DOI: 10.1016/j.ssc.2004.05.025

[13] G.A. Gusev, S.M. Masloboeva, M.A. Yagovkina, M.V. Zamoryanskaya. Opt. Spectrosc., **130**, 265 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.02.53221.2759-21

[14] S.W. Wi, J.W. Seo, Y.S. Lee, J.-S. Chung. Ceram. Int., **49**, 19766 (2023). DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.03.094

[15] G.A. Gusev, S.M. Masloboeva, M.A. Yagovkina, T.B. Popova, M.V. Zamoryanskaya. Ceram. Int., **49**, 30403 (2023). DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.06.302

[16] G.A. Gusev, S.M. Masloboeva, T.B. Popova, M.A. Yagovkina, M.V. Zamoryanskaya. J. Lumin., **252**, 119281 (2022). DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.119281

[17] G.A. Gusev, S.M. Masloboeva, V.A. Kravets, M.A. Yagovkina. Inorg. Mater., **57**, 383 (2021). DOI: 10.1134/S0020168521040063

[18] M.V. Zamoryanskaya, S.G. Konnikov, A.N. Zamoryanskii. Instrum. Exp. Tech., **47**, 477 (2004).

[19] B. Liu, M. Gu, X. Liu, K. Han, S. Huang, C. Ni, G. Zhang, Z. Qi. Appl. Phys. Lett., **94**, 061906 (2009). DOI: 10.1063/1.3079413

[20] K. Binnemans. Coord. Chem. Rev., **295**, 1 (2015). DOI: 10.1016/j.ccr.2015.02.015

[21] P.S. Peijzel, A. Meijerink, R.T. Wegh, M.F. Reid, G.W. Burdick. J. Solid State Chem., **178**, 448 (2005). DOI: 10.1016/j.jssc.2004.07.046
[22] B. Li, Z. Gu, J. Lin, M.-Z. Su. Mater. Res. Bull., **35**, 1921 (2000). DOI: 10.1016/S0025-5408(00)00404-9
[23] O. Voloshyna, O. Sidletskiy, D. Spassky, I. Gerasymov, I. Romet, A. Belsky. Opt. Mater., **76**, 382 (2018). DOI: 10.1016/j.optmat.2018.01.003