НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2022, том 58, № 2, с. 173–180

УДК 535.343.2;535.37

СИНТЕЗ, ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+},Eu^{3+}$

© 2022 г. Н. В. Васильева[1, *], Д. А. Спасский[2, 3], С. И. Омельков[3], В. Г. Плотниченко[4], Д. А. Васильев[4]

[1]Московский политехнический университет, ул. Б. Семеновская, 38, Москва, 107023 Россия

[2]Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, ГСП-1, 119991 Россия

[3]Институт физики Тартуского университета, ул. Оствальди, 1, Тарту, 50411 Эстония

[4]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова Российской академии наук, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Россия

*e-mail: natasha@myprism.ru

Поступила в редакцию 03.10.2021 г.
После доработки 09.11.2021 г.
Принята к публикации 10.11.2021 г.

Методом жидкофазной эпитаксии выращены пленки $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+},Eu^{3+}$ из переохлажденного раствора-расплава на основе системы $PbO–B_2O_3$. Измерены и проанализированы спектры поглощения, фотолюминесценции и возбуждения фотолюминесценции. Показано, что имеет место перенос энергии от Ce^{3+} к Eu^{3+} с тушением люминесценции Ce^{3+}.

Ключевые слова: оптическое поглощение, ионы Ce^{3+} и Eu^{3+}, фотолюминесценция

DOI: 10.31857/S0002337X22020154

ВВЕДЕНИЕ

Гранаты, активированные ионами редкоземельных элементов, представляют интерес для использования в качестве сцинтилляторов и люминофоров. Одним из новых гранатовых материалов, синтезированных в последние годы, является монокристалл $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}$:Ce (GAGG:Ce). Так, сцинтиллятор на основе GAGG:Ce диаметром 4 дюйма, выращенный методом Чохральского, продемонстрировал световой выход около 53000 фотонов/МэВ при времени затухания быстрой компоненты 76 нс [1], что значительно лучше традиционных оксидных сцинтилляторов. GAGG:Ce обладает ярким свечением в желто-зеленой области спектра и может также представлять интерес в качестве люминофора, однако недостаточная интенсивность красной компоненты свечения является проблемой при их использовании в белых светодиодах. Ранее было показано, что введение ионов Eu^{3+} в наночастицы YAG:Ce^{3+} способствовало усилению интенсивности фотолюминесценции в красной области за счет появления узкого пика излучения ионов Eu^{3+} на длине волны 610 нм [2]. Спектроскопические свойства монокристаллов $Gd_3Ga_3Al_2O_{12}$ (GGAG), совместно активированных различными конфигурациями ионов Eu + Tb, Eu + Ce, Tb + Ce и Eu + Tb + Ce, изучены в работе [3]. Показано, что в монокристалле GGAG:Ce,Eu, помимо полосы люминесценции Ce^{3+} в зелено-желтой области спектра, наблюдалась более слабая узкая линия излучения Eu^{3+} с максимумом при 708 нм, которая незначительно усиливала красную часть спектра, но при этом не наблюдался перенос энергии от Ce к Eu.

Эпитаксиальные пленки $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}$:Ce^{3+}, выращенные методом жидкофазной эпитаксии (**ЖФЭ**), показали неплохие сцинтилляционные свойства [4], а именно: максимальный световыход катодолюминесценции около 51500 фотонов/МэВ при времени затухания медленной компоненты 61.0 нс (доля выхода излучения 68%) [5] и сцинтилляционный световой выход около 20000 фотонов/МэВ при временах 3.9 (7%) и 43.6 нс (93%) при облучении гамма-квантами [6]. Основное отличие эпитаксиальных пленок от объемных монокристаллов заключается во вхождении в состав выращиваемой пленки примесных ионов из раствора-расплава и отсутствие межузельных дефектов из-за низкой температуры роста [7]. При выращивании из переохлажденных раство-

Таблица 1. Ростовые характеристики эпитаксиальных пленок $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}$:Ce,Eu

Пленка	Состав	t_g, °C	Δt, °C	h, мкм
I-1	$Pb_{0.01}Ce_{0.02}Gd_{2.97}Al_{3.13}Ga_{1.87}O_{12}$	1062	20	43.3
II-1	$Pb_{0.06}Ce_{0.05}Eu_{0.26}Gd_{2.63}Al_{3.14}Ga_{1.86}O_{12}$	1022	36	11.6
II-2	$Pb_{0.01}Ce_{0.04}Eu_{0.23}Gd_{2.72}Al_{3.14}Ga_{1.86}O_{12}$	1054	2	43.2
II-3	$Pb_{0.01}Ce_{0.05}Eu_{0.17}Gd_{2.77}Al_{3.14}Ga_{1.86}O_{12}$	1042	14	68.1

Примечание. t_g – температура роста, Δt – переохлаждение, $\Delta t = t_s - t_g$, где t_s – температура насыщения.

ров-расплавов на основе системы $PbO–B_2O_3$ примесными ионами являются Pb^{2+} или пара $Pb^{2+}–Pb^{4+}$ в зависимости от переохлаждения [4]. Влияние ионов Eu^{3+} на фотолюминесценцию Ce^{3+} в пленках $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}$:Ce^{3+},Eu^{3+}, выращенных методом ЖФЭ, ранее не исследовали.

Целью настоящей работы являлось выращивание эпитаксиальных пленок $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}$:Ce^{3+}, Eu^{3+} и исследование их оптического поглощения, фотолюминесценции и возбуждения фотолюминесценции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методом ЖФЭ из переохлажденного раствора-расплава на основе системы $PbO–B_2O_3$ на монокристаллических подложках $Gd_3Ga_5O_{12}$ (ГГГ) с ориентацией (111) были выращены гранатовые пленки $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}$:Ce^{3+},Eu^{3+}. Концентрации оксидов в растворе-расплаве составляли (мол. %): $C(Gd_2O_3) = 0.4$, $C(Al_2O_3) = 4.5$, $C(CeO_2) = 0.2$ и $C(Eu_2O_3) = 0.05$. Для приготовления шихты были использованы оксиды следующих квалификаций и марок: PbO Д/СПА – “х. ч.”, B_2O_3 – ОСЧ 11-3, Gd_2O_3 – ГдО-1, CeO_2 – ЦеО-СС, Ga_2O_3 – ОСЧ 15-2, Al_2O_3 – “ч. д. а.”, Eu_2O_3 – EbO-1. Ростовые характеристики выращенных пленок представлены в табл. 1. Время роста составляло от 45 до 120 мин, скорость вращения подложки – 174 об./мин.

Суммарную толщину ($2h$) пленок, выращенных на обеих сторонах подложки, определяли методом взвешивания [8]. СЭМ-снимки пленок и спонтанных монокристаллов, а также результаты количественного химического анализа были получены с использованием электронно-ионного сканирующего микроскопа Quanta 3D FEG фирмы FEI. Спектры пропускания пленок измеряли на спектрофотометре Lambda 900 фирмы Perkin-Elmer при комнатной температуре в диапазонах длин волн от 200 до 600 нм и от 1700 до 3000 нм. Оптическую плотность D рассчитывали из спектров пропускания по формуле $D = \ln(T_{sub}/T_{sam})$, где T_{sub} – спектр пропускания подложки и T_{sam} – спектр пропускания образца. Для анализа и сравнения спектров поглощения пленок использовали нормализованную оптическую плотность $D/2h$.

Спектры фотолюминесценции при возбуждении фотонами с длинами волн 165 и 440 нм получены с использованием дейтериевой ВУФ-лампы Heraeus D-200 и монохроматора McPherson 234/302. Для регистрации использовался вторичный монохроматор Andor Shamrock 303i с ФЭУ Hamamatsu H8259. Спектры возбуждения фотолюминесценции при регистрации на 540 и 600 нм измерены в области 200–500 нм при 80 K с использованием дейтериевой лампы ДДС-400 и монохроматора ДМР-4. Для регистрации использовался вторичный монохроматор ARC SpectraPro-308i с ФЭУ Hamamatsu H8259.

Измерения спектров люминесценции пленок при электронном возбуждении проводились под импульсным немонохроматическим пучком из генератора Радан-303А с максимальной энергией 120 кэВ, плотностью тока 10 А/см^2 и длительностью импульса 200 пс [9]. Регистрация люминесценции при 300 K осуществлялась спектрографом Andor Shamrock 303i и камерой Andor iStar iCCD в области 350–720 нм и диапазоне времен 0–2 мс после импульса возбуждения. Все спектры люминесценции нормированы на спектральную чувствительность аппаратуры, а спектры возбуждения фотолюминесценции – на равное число падающих фотонов с использованием желтого люмогена.

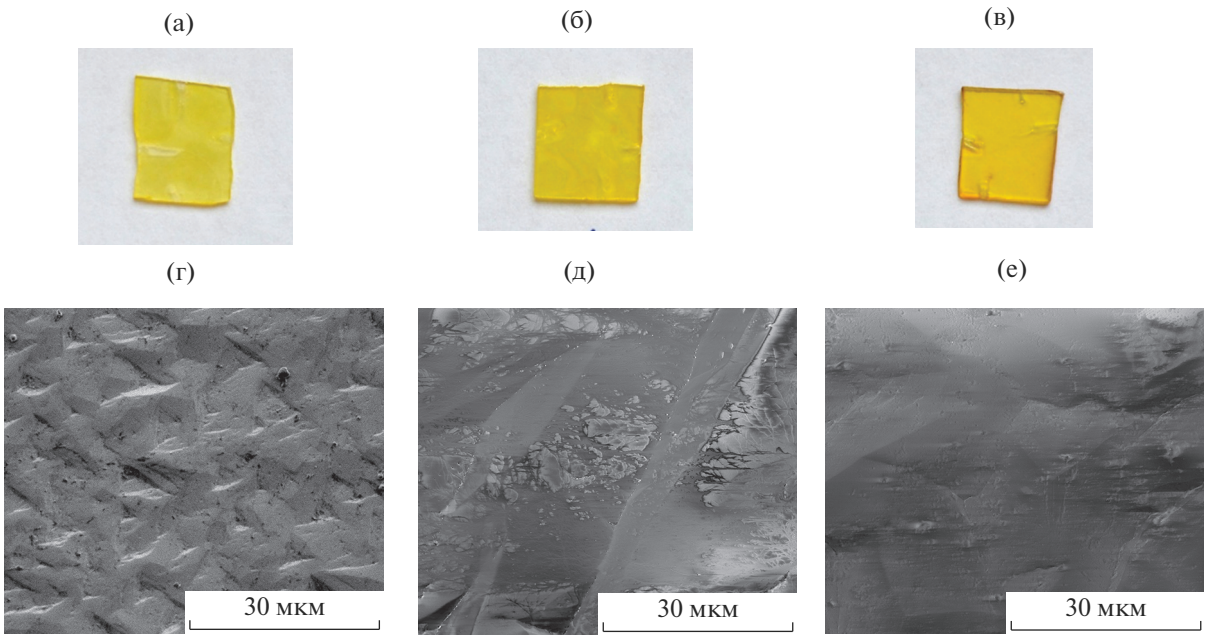

Рис. 1. Фотографии образцов эпитаксиальных пленок II-1 (а), II-2 (б), II-3 (в) и микрофотографии их поверхностей (г–е) соответственно (см. табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методом ЖФЭ были выращены образцы пленок $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+},Eu^{3+}$, фотографии которых представлены на рис. 1а–1в. Как видно, поверхность пленки II-1 (см. рис. 1г) не гладкая и состоит из сростков монокристаллических зерен, ориентированных как по направлению оси [111], так и в плоскости подложки, что подтверждается рентгеновскими исследованиями [10]. С увеличением толщины пленки с 11.6 до 68.1 мкм поверхность становится более гладкой (см. рис. 1г–1е).

Выращивание этих пленок сопровождалось спонтанной кристаллизацией монокристаллов граната на поверхности раствора-расплава в форме тетрагонтриоктаэдра с гранями {211} (рис. 2).

Спектральные зависимости нормализованной оптической плотности пленок и подложки представлены на рис. 3 и 4. В спектре поглощения подложки ГГГ узкие полосы в диапазонах 240–255, 265–280 и 298–313 нм соответствуют 4*f*–4*f*-электронным переходам $^8S_{7/2} \rightarrow {}^6D$, $^8S_{7/2} \rightarrow {}^6I$ и $^8S_{7/2} \rightarrow {}^6P$ в ионах Gd^{3+} ($4f^7$-конфигурация) соответственно (рис. 3а, 3б, кривые *1*). Спектр поглощения пленки II-1 содержит пять полос поглощения (рис. 3а, кривая *5*). Широкая полоса в интервале 260–278 нм с максимумом при 271 нм соответствует, согласно [11], электронному переходу $^1S_0 \rightarrow {}^3P_1$ в ионах Pb^{2+} ($6s^2$-конфигурация). На ней видна узкая полоса с максимумом при 273 нм, соответствующая переходу $^8S_{7/2} \rightarrow {}^6I_{17/2}$ в ионах Gd^{3+}. Сдвиг этой полосы в длинноволновую область в пленке II-1 составил 2 нм по сравнению с ее положением в подложке, что говорит о наличии напряжений в пленке [8]. Две другие широкие полосы поглощения в диапазонах 400–500 нм

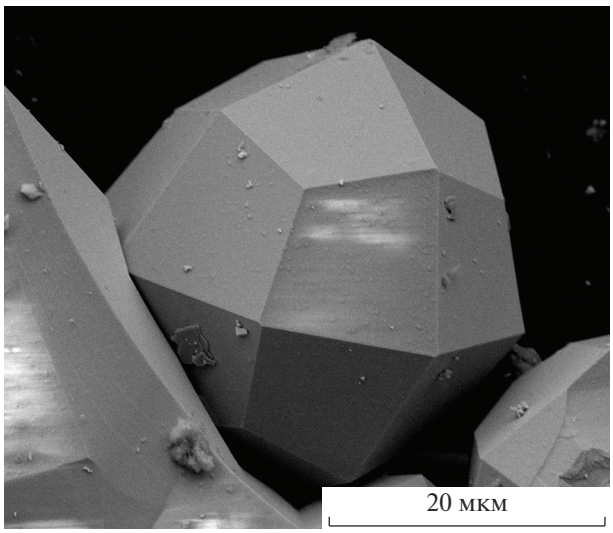

Рис. 2. Микрофотография спонтанно выросших на поверхности раствора-расплава кристаллов граната состава $Pb_{0.01}Ce_{0.02}Eu_{0.26}Gd_{2.71}Al_{3.25}Ga_{1.75}O_{12}$.

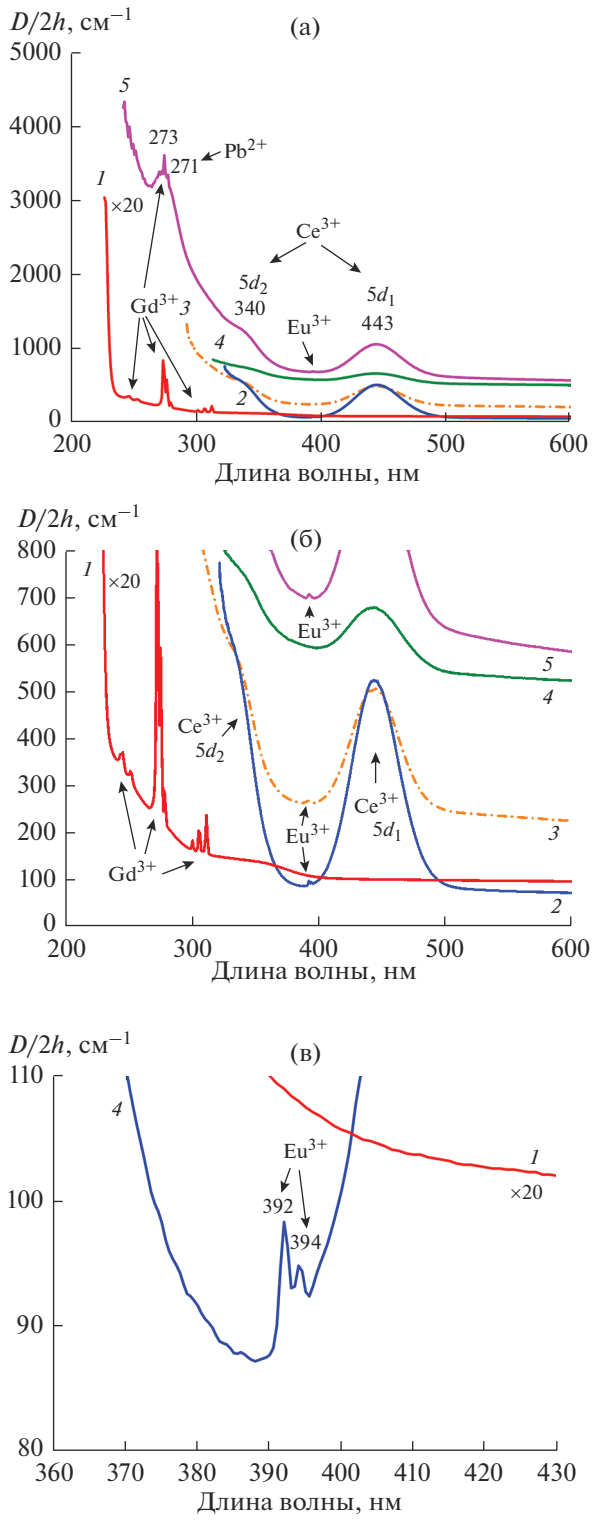

Рис. 3. Спектры нормализованной оптической плотности $D/2h$ подложки ГГГ (*1*) и эпитаксиальных пленок: II-3 (*2*), II-2 (*3*), I-1 (*4*), II-1 (*5*) при 300 K.

и 325–360 нм соответствуют $4f$–$5d$-межконфигурационным электронным переходам в ионах Ce^{3+} ($4f^1$-конфигурация). Малоинтенсивная полоса поглощения в диапазоне 390–395 нм (рис. 3б), состоящая из двух полос с максимумами 392 и 394 нм (рис. 3в), соответствует $4f$–$4f$-электронным переходам $^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ в ионах Eu^{3+} ($4f^6$-конфигурация) [12]. Для сравнения полос поглощения приведен спектр поглощения пленки I-1 (рис. 3а, 3б, кривые *4*), выращенной из раствора-расплава при концентрациях $C(Gd_2O_3)$ = 0.4 мол. %, $C(Al_2O_3)$ = 4.5 мол. %, $C(CeO_2)$ = 0.2 мол. %, не содержащей ионов Eu^{3+}. Введение ионов Eu^{3+} в полученной концентрации не привело к сдвигу полос поглощения ионов Ce^{3+} (рис. 3а, 3б).

На рис. 4 представлены полосы поглощения иона Eu^{3+} для эпитаксиальной пленки II-3 в диапазоне 1700–3000 нм, соответствующие $4f$–$4f$-электронным переходам $^7F_0 \rightarrow {}^7F_6$, $^7F_1 \rightarrow {}^7F_6$ и $^7F_0 \rightarrow {}^7F_5$, $^7F_1 \rightarrow {}^7F_5$ в ионах Eu^{3+}. Идентификация полос проведена согласно работе [13].

Спектры фотолюминесценции эпитаксиальных пленок при возбуждении в области фундаментального поглощения на 165 нм представлены на рис. 5а. Широкая интенсивная полоса фотолюминесценции с максимумом при 534 нм, которая соответствует излучательному переходу $5d$–$4f$ Ce^{3+}, наблюдается в пленке I-1, не содержащей Eu^{3+} (рис. 5а, кривая *1*). Введение ионов Eu^{3+} в концентрации 6–8 ат. % в состав эпитаксиальной пленки привело к тушению фотолюминесценции ионов Ce^{3+} и возникновению слабого излучения ионов Eu^{3+} в диапазоне длин волн 575–725 нм (рис. 5а, кривые *2*, *3*). Спектр фотолюминесценции эпитаксиальной пленки II-2 при возбуждении на 165 нм, на котором видны узкие полосы излучения, соответствующие $4f$–$4f$-переходам в ионе Eu^{3+}, представлен на рис. 5б (кривая *1*). Самая интенсивная полоса фотолюминесценции с максимумом при 594 нм в диапазоне длин волн 580–605 нм соответствует переходу $^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$, который является магнитным дипольным переходом [14]. Интенсивность этого перехода почти не зависит от окружения иона европия. Отсутствие в спектре фотолюминесценции полосы перехода $^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$ подтверждает вхождение иона Eu^{3+} в додекаэдрическую подрешетку граната с к.ч. 8 и локальной симметрией D_2 (класс 222, ромбическая сингония). В диапазоне длин волн 605–621 нм наблюдается полоса фотолюминесценции с максимумом при 612 нм, соответствующая электрическому дипольному переходу $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$. Далее наблюдаются слабоинтенсивные полосы фотолюминесценции с максимумами в областях 650 и 711 нм, соответствующие переходам $^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$ и $^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$.

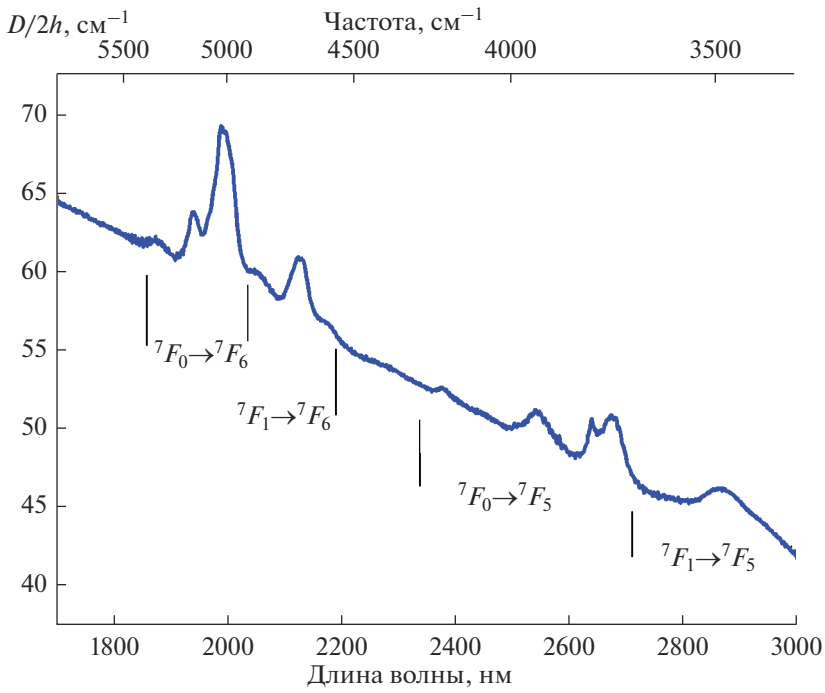

Рис. 4. Спектр нормализованной оптической плотности $D/2h$ эпитаксиальной пленки II-3 при 300 K.

В спектре фотолюминесценции при возбуждении на 440 нм в полосу поглощения иона Ce^{3+} (рис. 5б, кривая *2*) также наблюдаются только узкие полосы излучения, соответствующие свечению иона Eu^{3+}. Это свидетельствует о наличии переноса энергии от Ce^{3+} к Eu^{3+}. Спектры люминесценции ионов Ce^{3+} наблюдались только с использованием метода время-разрешенной спектроскопии. В спектре люминесценции, измеренном при электронном возбуждении во временном окне 0–32 нс, характерном для времен затухания цериевого свечения (рис. 5б, вставка), наблюдается широкая полоса люминесценции церия. Свечение европия проявляется в виде слабого пика в области 620 нм, что связано с существенно бóльшими значениями времен, которые характерны для затухания свечения Eu^{3+}. При этом относительная интенсивность в максимуме свечения Eu^{3+} во всем временном диапазоне измерений (0–2 мс) превышает интенсивность цериевой люминесценции на два порядка. Кинетика затухания свечения Eu^{3+} представлена на рис. 6. Она может быть аппроксимирована суммой двух экспонент с характерными временами 205 мкс и 1.07 мс.

Спектры возбуждения фотолюминесценции, представленные на рис. 7, были измерены при регистрации на 540 и 600 нм для эпитаксиальных пленок I-1 и II-2 соответственно. В спектре возбуждения эпитаксиальной пленки I-1 наблюдаются четыре полосы. Полосы с максимумами при 344 и 450 нм соответствуют $4f$–$5d_{1,2}$-электронным переходам в ионах Ce^{3+}. Полоса с максимумом при 278 нм представляет суперпозицию двух полос, относящихся к переходам ${}^1S_0 \rightarrow {}^3P_1$ и ${}^8S_{7/2} \rightarrow {}^6I$ в ионах Pb^{2+} и Gd^{3+} соответственно. Наличие этой полосы доказывает возможность переноса энергии от ионов Pb^{2+} и Gd^{3+} на ионы Ce^{3+}. Четвертая полоса с максимумом при 230 нм соответствует $4f$–$5d_{3\text{-}5}$-электронным переходам в ионах Ce^{3+}, а также возбуждению Ce^{3+} через электронные уровни дефектов и, возможно, уровни центров Ce^{4+}. В спектре возбуждения эпитаксиальной пленки II-2 наблюдаются три полосы. Наиболее интенсивная полоса с максимумом вблизи 228 нм соответствует переходу с переносом заряда от Eu^{3+} к O^{2-}, она не наблюдается в спектрах поглощения пленок из-за слишком интенсивного поглощения. Малоинтенсивная узкая полоса с максимумом вблизи 398 нм, соответствующая внутрицентровым электронным переходам ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ в ионах Eu^{3+}, наблюдается также в спектрах поглощения пленок (см. рис. 3). Кроме того, в спектрах возбуждения люминесценции проявляется широкая полоса с максимумом вблизи 463 нм, соответствующая $4f$–$5d_1$-электронным переходам в ионах Ce^{3+}, также присутствую-

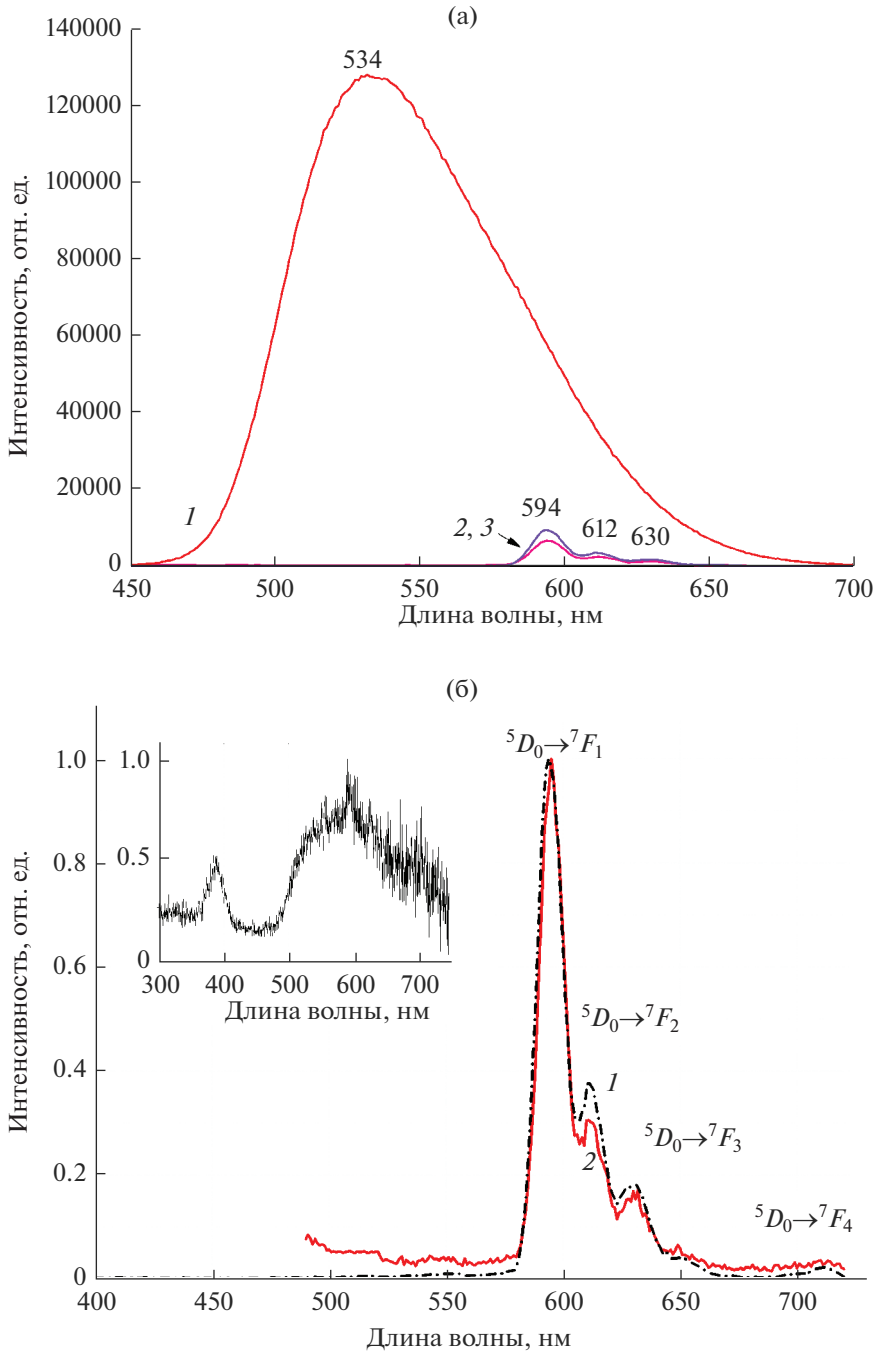

Рис. 5. Спектры фотолюминесценции эпитаксиальных пленок I-1 (*1*), II-2 (*2*), II-3 (*3*) при возбуждении на 165 нм (а) и II-2 при возбуждении на 165 (*1*) и 440 нм (*2*) при 300 K (б), на вставке представлен спектр катодолюминесценции пленки II-2, измеренный во временном интервале 0–32 нс.

щая в спектрах поглощения. Наличие этой полосы в спектре свечения Eu^{3+} свидетельствует о переносе энергии от ионов Ce^{3+} к ионам Eu^{3+}. Отсутствие полосы при 278 нм свидетельствует о том, что ионы Pb^{2+} и Gd^{3+} не принимают участия в процессе переноса энергии на ионы Eu^{3+} в эпитаксиальных пленках $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+},Eu^{3+}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована серия пленок $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+}$, Eu^{3+}, выращенных методом ЖФЭ. По спектрам поглощения определены максимумы полос поглощения ионов, входящих в состав этих пленок: Pb^{2+} (271 нм), Gd^{3+} (273 нм), Ce^{3+} (340 и 443 нм) и Eu^{3+} (392 и 394 нм), и проведена идентификация

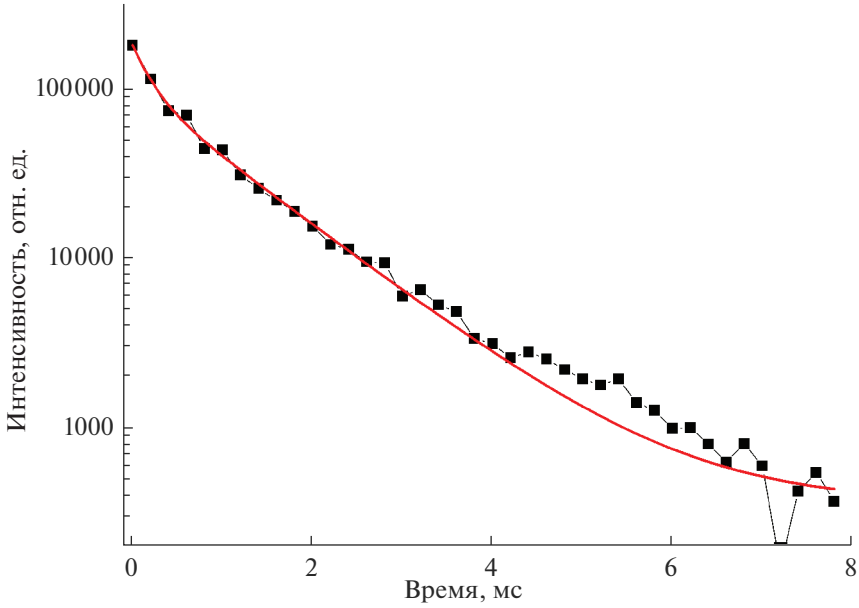

Рис. 6. Кинетика затухания свечения Eu^{3+} при возбуждении пленки II-2 электронным пучком при 300 K и ее аппроксимация суммой двух экспонент с временами затухания 205 мкс и 1.07 мс.

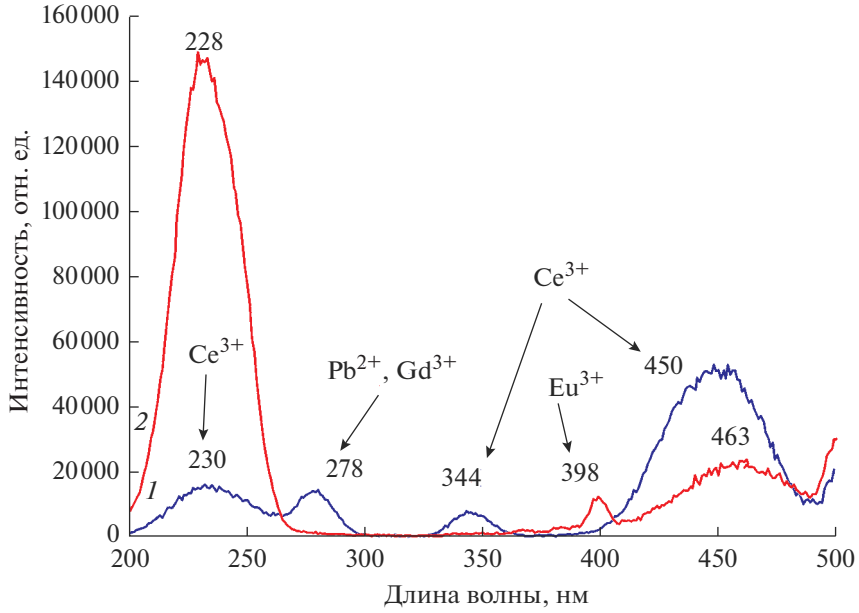

Рис. 7. Спектры возбуждения фотолюминесценции при регистрации на 540 и 600 нм эпитаксиальных пленок I-1 (*1*) и II-2 (*2*) при 80 K.

полос поглощения иона Eu^{3+} в ближней ИК-области.

Проведено исследование люминесцентных свойств эпитаксиальных пленок $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+},Eu^{3+}$. Показано, что введение европия в состав пленки $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+}$ сопровождается появлением узких полос свечения в красной области, связанных с переходами $^5D_0 - {}^7F_J$ в ионах Eu^{3+}, и практически полным тушением цериевого свечения, что обусловлено переносом энергии от Ce^{3+} к Eu^{3+}.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа поддержана European Social Fund's Doctoral Studies and Internationalisation Programme DoRa (Д.А. Васильев).

Д.А. Спасский благодарит Estonian Research Council (project PUT PRG111).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kochurikhin V., Kamada K., Kim K.J., Ivanov M., Gushchina L., Shoji Y., Yoshino M., Yoshikawa A.* Czochralski Growth of 4-inch Diameter Ce:$Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ Single Crystals for Scintillator Applications // J. Cryst. Growth. 2020. V. 531. Article 125384. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125384
2. *Lee J.-W., Lee J.-H., Woo E.-J., Ahn H., Kim J.-S., Lee Ch.-H.* Synthesis of Nanosized Ce^{3+}, Eu^{3+}-Codoped YAG Phosphor in a Continuous Supercritical Water System // Ind. Eng. Chem. Res. 2008. V. 47. P. 5994–6000. https://doi.org/10.1021/ie800421w
3. *Lisiecki R., Solarz P., Komar J., Głowacki M., Berkowski M., Ryba-Romanowski W.* Spectroscopic Peculiarities of Excitation and Emission Processes as well as Relaxation Dynamic of Excited States in Doubly and Triply Doped $Gd_3Ga_3Al_2O_{12}$:Ln^{3+} (Ln^{3+} = Eu^{3+}, Tb^{3+}, Ce^{3+}) Crystals // Opt. Mater. 2019. V. 88. P. 492–499. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.12.021
4. *Vasil'eva N.V., Spassky D.A., Randoshkin I.V., Aleksanyan E.M., Vielhauer S., Sokolov V.O., Plotnichenko V.G., Kolobanov V.N., Khakhalin A.V.* Optical Spectroscopy of Ce^{3+} Ions in Gd_3 $(Al_xGa_{1-x})_5O_{12}$ Epitaxial Films // Mater. Res. Bull. 2013. V. 48. № 11. P. 4687–4692.
5. *Васильев Д.А., Спасский Д.А., Омельков С.И., Васильева Н.В., Хахалин А.В., Плотниченко В.Г.* Исследование оптического поглощения и фотолюминесценции в эпитаксиальных пленках $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}$:Ce, выращенных из содержащих Pb растворов-расплавов // Квантовая электроника 2017. Т. 47. № 10. С. 922–926. https://doi.org/10.1070/QEL16340
6. *Vasil'ev D.A., Spassky D.A., Kurosawa Sh., Omelkov S.I., Vasil'eva N.V., Plotnichenko V.G., Khakhalin A.V., Voronov V.V., Kochurikhin V.V.* Epitaxial Growth of Ce-doped $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}$ Films and Their Optical and Scintillation Properties // J. Sci.: Adv. Mater. Devices. 2020. V. 5. P. 95–103. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2020.01.005
7. *Zorenko Yu., Voloshinovskii A., Savchyn V., Voznyak T., Nikl M., Nejezchleb K., Mikhailin V., Kolobanov V., Spassky D.* Exciton and Antisite Defect-related Luminescence in $Lu_3Al_5O_{12}$ and $Y_3Al_5O_{12}$ Garnets // Phys. Status Solidi B. 2007. V. 244. P. 2180–2189. https://doi.org/10.1002/pssb.200642431
8. *Васильева Н.В., Рандошкин В.В., Плотниченко В.Г., Пырков Ю.Н., Воронов В.В., Галстян А.М., Сысоев Н.Н.* Влияние примесного иона свинца на оптическое поглощение эпитаксиальных пленок $Gd_3Ga_5O_{12}$:Pb // Неорган. материалы. 2008. Т. 44. № 1. С. 82–87. https://doi.org/10.1134/S0020168508010135
9. *Omelkov S.I., Nagirnyi V., Vasil'ev A.N., Kirm M.* New Features of Hot Intraband Luminescence for Fast Timing // J. Lumin. 2016. V. 176. P. 309–323. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.03.039
10. *Васильев Д.А., Спасский Д.А., Воронов В.В., Соколов В.О., Хахалин А.В., Васильева Н.В., Плотниченко В.Г.* Влияние концентрации ионов Al и Ce на поглощение и люминесценцию эпитаксиальных пленок $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}$:Ce^{3+} // Неорган. материалы. 2015. Т. 51. № 10. С. 1090–1097. https://doi.org/10.1134/S0020168515090198
11. *Scott G.B., Page J.L.* Pb Valence in Iron Garnets // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. № 3. P. 1342–1349. https://doi.org/10.1063/1.323728
12. *Xu J., Ueda J., Tanabe S.* Design of Deep-Red Persistent Phosphors of $Gd_3Al_{5-x}Ga_xO_{12}$:Cr^{3+} Transparent Ceramics Sensitized by Eu^{3+} as an Electron Trap Using Conduction Band Engineering // Opt. Mater. Express. 2015. V. 5. № 5. P. 963–968. https://doi.org/10.1364/OME.5.000963
13. *Gruber J.B., Valiev U.V., Burdick G.W., Rakhimov S.A., Pokhrel M., Sardar D.K.* Spectra, Energy Levels, and Symmetry Assignments for Stark Components of $Eu^{3+}(4f^6)$ in Gadolinium Gallium Garnet ($Gd_3Ga_5O_{12}$) // J. Lumin. 2011. V. 131. № 9. P. 1945–1952. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.03.057
14. *Харчева А.В.* Люминесценция органо- и водорастворимых комплексов европия с N-гетероциклическими лигандами: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. 2019. 150 с.