

# Общая физика

УДК 535.343.2; 535.37

## Влияние ионов Al на оптические и кинетические свойства эпитаксиальных пленок $(\text{Pb,Gd})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$

Д. А. Васильев, К. А. Верещагин, А. К. Верещагин, Д. А. Спасский, В. О. Соколов,  
А. В. Хахалин, Н. В. Васильева, А. М. Галстян, В. Г. Плотниченко

*Исследованы спектры оптического поглощения и кинетика затухания люминесценции пленок состава  $(\text{Pb,Gd})_{3-y}\text{Ce}_y\text{Al}_x\text{Ga}_{5-x}\text{O}_{12}$  ( $x = 0; 3,43$  и  $4,29$  и  $y = 0,03; 0,04$  и  $0,05$ ), выращенных методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденных растворов-расплавов на основе системы  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ . Определен сдвиг полос поглощения ионов  $\text{Pb}^{2+}$  и уровней  $5d_1$  и  $5d_2$  ионов  $\text{Ce}^{3+}$  при введении Al в плёнки. Измерена кинетика люминесценции ионов церия при возбуждении одиночным ультракоротким электронным импульсом и определены времена затухания, которые составили для быстрой компоненты 22 нс, а для медленной — 67 нс.*

PACS: 06.60.Jn, 06.90+v, 07.07.Hj, 07.68.+m, 78.20.-e, 78.20.Jq, 85.60.-q

*Ключевые слова:* эпитаксиальные гранатовые пленки, оптическое поглощение, время затухания,  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Ce}^{4+}$ .

### Введение

В связи с разработкой диссектора следующего поколения, способного контролировать про-

дольные параметры электронного банча в источниках синхротронного излучения [1] с временным разрешением порядка единиц пикосекунд, встал вопрос об использовании в конструкции электронно-оптического преобразователя (ЭОП) типа ПИФ-01 [2] нового люминофора с быстрым временем затухания.

Помимо короткого времени затухания, искомый люминофор должен обладать: значительным поглощением электронов, высокими световым выходом и оптической прозрачностью в области свечения, низкой гигроскопичностью, большой радиационной стойкостью и механической прочностью. При этом длина волны излучения должна находиться в интервале 500—600 нм, а также должен быть обеспечен низкий уровень послесвечения, не превышающий 0,04 % после 2 мс.

Ионы церия, обладающие ярким свечением и быстрым временем затухания (десятки нс), являются наиболее распространенным активатором для сцинтилляционных детекторов, в которых излучение связано с полностью разрешенным  $5d-4f$  электронным переходом, обеспечивающим высокий световой выход сцинтилляций. Люминесценция иона  $\text{Ce}^{3+}$  в матрице  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  при комнатной температуре и атмосферном давлении полностью потушена из-за расположения уровня  $5d_1$  в зоне проводимости [3, 4], но приложение давления [5] или введение в матрицу ионов Al восстанавливают свечение [6]. Время затухания люминесценции ионов  $\text{Ce}^{3+}$  в монокристалле граната состава  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (1 ат. %) составило 88 нс при длине волны излучения 520 нм. При этом световых выход составил 46000 фотон/МэВ [6]. Время за-

Васильев Дмитрий Антонович, аспирант<sup>1,2</sup>.  
Верещагин Константин Александрович, ст. науч. сотрудник<sup>3</sup>.  
Верещагин Алексей Константинович, мл. сотрудник<sup>3</sup>.  
Спасский Дмитрий Андреевич, научный сотрудник<sup>4,5</sup>.  
Соколов Вячеслав Олегович, ст. науч. сотрудник<sup>2</sup>.  
Хахалин Андрей Владимирович, ст. науч. сотрудник<sup>6</sup>.  
Васильева Наталья Владимировна, зав. отделом<sup>3</sup>.  
Галстян Александр Михайлович, ст. науч. сотрудник<sup>3</sup>.  
Плотниченко Виктор Геннадиевич, зав. лабораторией, профессор<sup>2,7</sup>.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Россия, 125009, Москва, Моховая ул., 11, корп. 7.

<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН.

Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8 (499) 135-80-93. E-mail: dimaphys@gmail.ru

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8 (499) 503-81-95. E-mail: veresch@kapella.gpi.ru

<sup>4</sup>НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>5</sup>Институт физики Тартуского университета.

Эстония, 50411, Тарту, ул. Равила, 14с.

Тел. 8 (495) 939-31-69. E-mail: deris2002@mail.ru

<sup>6</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Тел. 8 (495) 939-40-34. E-mail: avkhakhalin@phys.msu.ru

<sup>7</sup>Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская область, г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Тел. 8 (499) 135-80-93. E-mail: victor@fo.gpi.ac.ru

Статья поступила в редакцию 7 июля 2015 г.

© Васильев Д. А., Верещагин К. А., Верещагин А. К., Спасский Д. А., Соколов В. О., Хахалин А. В., Васильева Н. В., Галстян А. М., Плотниченко В. Г., 2015

тухания можно уменьшить, если ввести в состав монокристалла  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$  двухвалентные ионы, такие как Ca или Mg [7]. В статье [7] показано, что введение Mg приводит к уменьшению времени затухания до 39,5 нс (55 %) при незначительном уменьшении световых выходов. Это уменьшение связано с образованием ионов  $Ce^{4+}$ , которые выполняют роль центров для захвата электронов из зоны проводимости с последующим быстрым излучением.

В ЭОП применяют люминофоры толщиной до 100 мкм, поэтому из объемных монокристаллов необходимо различными технологическими процессами (распиловкой, шлифовкой, полировкой, травлением) приготовить пластины требуемой толщины, что гораздо сложнее, чем вырастить эпитаксиальную пленку с заданными параметрами на недорогой подложке методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Пленки гранатов, выращенные методом ЖФЭ, обладают рядом уникальных преимуществ перед монокристаллами, выращенными методом Чохральского, с точки зрения люминесцентных свойств. Преимущества связаны с отсутствием ряда дефектов кристаллической структуры, например, таких как вакансии и антиузельные дефекты, которые негативно влияют на кинетику затухания люминесценции легирующих ионов [8].

В работе [9] проведены исследования спектроскопических свойств эпитаксиальных пленок состава  $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ , выращенных из переохлажденных растворов-расплавов на основе системы  $PbO-B_2O_3$  с концентрацией оксида алюминия  $C(Al_2O_3) = 1; 1,5$  и  $2$  мол. % и с концентрацией оксида церия  $C(CeO_2) = 0,03$  и  $0,2$  мол. % в шихте на монокристаллических подложках  $Gd_3Ga_5O_{12}$  методом ЖФЭ. Было показано, что с увеличением концентрации алюминия в пленке до 1,9 формульных единиц (ф.е.) происходит сдвиг двух полос поглощения иона  $Ce^{3+}$ , увеличение в 8 раз интенсивности полосы люминесценции иона  $Ce^{3+}$  с максимумом на 550 нм (при увеличении концентрации иона Al от 1,1 до 1,9 ф.е.) и увеличение ширины запрещенной зоны на 0,2 эВ. Обнаружен устойчивый рост интенсивности люминесценции

при увеличении энергии возбуждения в широкой области от УФ-диапазона до мягкого рентгена (220 эВ), что свидетельствует об эффективном преобразовании высокоэнергетического излучения в люминесценцию ионов церия.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния ионов Al на оптическое поглощение и кинетику затухания люминесценции иона Ce в монокристаллических пленках  $(Pb, Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ .

### Экспериментальная часть

Эпитаксиальные пленки  $(Pb,Gd)_3Ga_5O_{12}:Ce$  и  $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$  были выращены на воздухе методом ЖФЭ из двух переохлажденных растворов-расплавов на основе системы  $PbO-B_2O_3$  с различными концентрациями оксидов  $C(Gd_2O_3)$ ,  $C(CeO_2)$  и  $C(Al_2O_3)$  на монокристаллических подложках  $Gd_3Ga_5O_{12}$  с ориентацией (111) (табл. 1).

Для приготовления шихты были использованы оксиды следующих квалификаций:  $PbO$  Д/СПА — ХЧ,  $B_2O_3$  — ОСЧ 11-3,  $Gd_2O_3$  — ГДО-1,  $CeO_2$  — ЦеО-СС,  $Ga_2O_3$  — ОСЧ 15-2,  $Al_2O_3$  — ЧДА.

Перед ростом пленок раствор-расплав гомогенизировали в платиновом тигле не менее 4 часов при температуре 1100 °С. Далее снижали температуру до температуры роста пленки  $t_g$ . При этой температуре в раствор-расплав производили полное горизонтальное погружение подложки, вращающейся со скоростью 50 или 132 об./мин, закрепленной в платиновом держателе. Нарастание пленки происходило с обеих сторон подложки. Цвет выращенных пленок был желтовато-зеленый.

Суммарную толщину  $2h$  пленок, выращенных на обеих сторонах подложки, определяли методом взвешивания [10]. Определение химического состава пленок проводилось с использованием электронно-ионного сканирующего микроскопа Quanta 3D FEG фирмы FEI. Спектры пропускания пленок измерялись на спектрофотометре Lambda 900 фирмы Perkin-Elmer при комнатной температуре в диапазоне длин волн от 186 до 860 нм.

Таблица 1

Ростовые характеристики эпитаксиальных пленок  $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$

№ серии – № пленки	$C(Gd_2O_3)$ , мол. %	$C(CeO_2)$ , мол. %	$C(Al_2O_3)$ , мол. %	Состав пленки	$t_g$ , °С	$h$ , мкм	$\lambda_{Pb}$ , нм	$\lambda_{Ce}$ , нм	
								5d <sub>1</sub>	5d <sub>2</sub>
I-1	0,2	0,2	—	$Pb_{0,02}Ce_{0,03}Gd_{2,95}Ga_5O_{12}$	917	3,6	282	426	346
II-1	0,4	0,3	4,5	$Pb_{0,02}Ce_{0,05}Gd_{2,93}Al_{4,29}Ga_{0,71}O_{12}$	1062	23,1	—	444	339
II-2	0,4	0,3	4,5	$Pb_{0,02}Ce_{0,05}Gd_{2,93}Al_{4,29}Ga_{0,71}O_{12}$	1066	49,9	—	444	339
II-3	0,4	0,3	4,5	$Pb_{0,01}Ce_{0,04}Gd_{2,96}Al_{3,43}Ga_{1,57}O_{12}$	1066	5,0	275	443	340

Спектры нормализованной оптической плотности  $D/2h$  рассчитывались из спектров пропускания по формуле  $D = [\ln(T_{\text{sab}}/T_{\text{sam}})]$ , где  $T_{\text{sab}}$  — спектр пропускания подложки и  $T_{\text{sam}}$  — спектр пропускания образца.

Для измерения кинетики затухания люминесценции ионов церия был выбран образец с максимальной толщиной № II-2, у которого с одной стороны была сошлифована эпитаксиальная пленка. Этот образец приклеивался с помощью серебряной пасты на внутреннюю часть волоконно-оптического диска экранного узла ЭОП типа ПИФ-01, имеющего серебряно-кислородно-цеиевый фотокатод (S1). При облучении сверхкоротким световым импульсом фотокатод ЭОП эмитировал электронный пучок такой же длительности и формы, который ускорялся напряжением до 12 кВ (напряженность электрического поля у поверхности фотокатода ~ 2,6 кВ/мм), и который при попадании на исследуемую пленку вызывал ее люминесценцию. Световое излучение с выходного экрана преобразователя регистрировалось фотоумножителем с фотокатодом S20 (модель СНФТ-3), имеющим временное разрешение ~4 нс. Электрический сигнал с фотоумножителя записывался и анализировался с помощью 500-МГц-осциллографа (LeCroy, модель Wavesurfer 3054). Временное разрешение всей регистрирующей системы позволяло проводить измерения времени затухания люминофора с точностью до единиц наносекунд.

В качестве источника импульсного излучения на входе ЭОП использовался Nd<sup>3+</sup>:YAP-лазер, работающий в режиме самосинхронизации мод и генерирующий цуг пикосекундных импульсов на длине волны 1,08 мкм. С помощью электрооптической ячейки Поккельса выделялся одиночный импульс длительностью ~ 8 пс с энергией ~ 3 мкДж. Нейтральными светофильтрами энергия импульса уменьшалась до уровня, соответствующего линейному по входу режиму работы ЭОП и ФЭУ. Ин-

тенсивность падающего электронного импульса оценивалась исходя из измеренных величин энергии лазерного импульса и спектральной чувствительности фотокатода ЭОП.

### Результаты и их обсуждение

Спектральные зависимости нормализованной оптической плотности пленок представлены на рис. 1 и 2. Особенности этих кривых позволяют отслеживать вхождение примесей из раствора-расплава в выращенные пленки. Так, полоса поглощения, соответствующая, согласно [11], электронному переходу  $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$  ионов Pb<sup>2+</sup> (6s<sup>2</sup>) {Pb<sup>2+</sup> (6s<sup>2</sup>,  $^1S_0$ )  $\rightarrow$  Pb<sup>2+</sup> (6s<sup>1</sup> 6p<sup>1</sup>,  $^3P_1$ )}, для пленки № I-1 с максимумом на длине волны 282 нм (35460 см<sup>-1</sup>) (рис.1 кривая 1) смещается на 7 нм в коротковолновую часть спектра при введении в состав пленки ионов Al в количестве 3,43 ф.е. (рис. 1 кривая 4). Две широкие полосы поглощения, соответствующие электронным переходам 4f ( $^2F_{5/2,7/2}$ ) – 5d ионов Ce<sup>3+</sup>, для пленки № I-1 с максимумами на длинах волн 426 нм (23470 см<sup>-1</sup>) (уровень 5d<sub>1</sub> — первая полоса) и 346 нм (28900 см<sup>-1</sup>) (уровень 5d<sub>2</sub> — вторая полоса) (рис. 1 кривая 1) также смещаются при введении в состав пленки ионов Al. Смещение первой полосы происходит в длинноволновую часть спектра на 17 нм с 426 нм до 443 нм (22570 см<sup>-1</sup>) и второй полосы в коротковолновую область на 6 нм с 346 нм до 340 нм (29410 см<sup>-1</sup>) при введении в состав пленки ионов Al в количестве 3,43 ф.е. (рис. 1 кривые 1 и 4). Пленки № II-1 и № II-2 имеют одинаковый химический состав и концентрацию иона Al в количестве 4,29 ф.е., что выше концентрации этого иона в пленке № II-3. Поэтому в спектральной зависимости нормализованной оптической плотности этих пленок первая полоса поглощения смещается в длинноволновую часть спектра на 1 нм, а вторая — в коротковолновую на такую же величину.

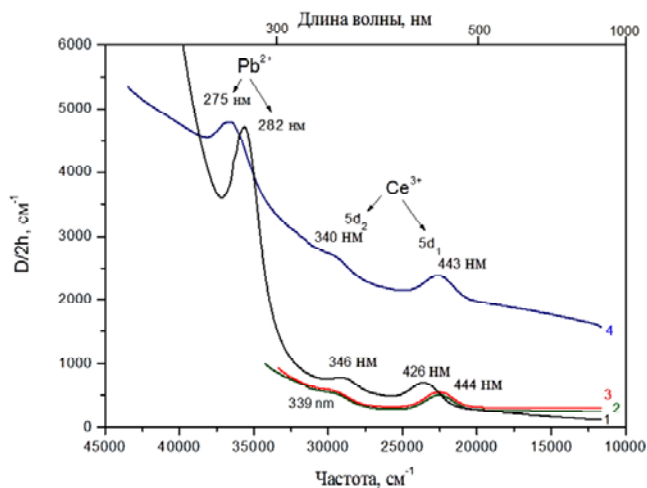


Рис. 1. Спектральные зависимости нормализованной оптической плотности  $D/2h$  от частоты для эпитаксиальных пленок: пленка I-1 (1), пленка II-1 (2), пленка II-2 (3), пленка II-3 (4). Нумерация пленок соответствует табл. 1

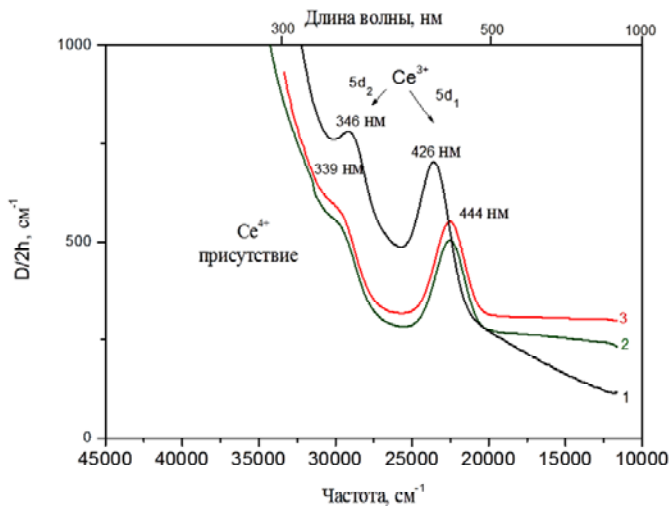


Рис. 2. Спектральные зависимости нормализованной оптической плотности  $D/2h$  от частоты для эпитаксиальных пленок: пленка I-1 (1), пленка II-1 (2), пленка II-2 (3). Нумерация пленок соответствует табл. 1

Форма второй полосы поглощения с максимумом на 346 нм для пленки № I-1 более выражена, чем для пленок № II-1 и № II-2 (рис. 2). Основываясь на результатах анализа формы второй полосы поглощения, с учетом присутствия ионов  $Pb^{2+}$  в составе эпитаксиальных пленок, выращенных из № II раствора-расплава, а также на результатах работы [7], можно заключить, что введение ионов Al в состав эпитаксиальных пленок  $(Pb,Gd)_3Ga_5O_{12}:Ce$  приводит к образованию как ионов  $Ce^{3+}$ , так и ионов  $Ce^{4+}$ .

На рис. 3 приведена кинетика затухания люминесценции пленки № II-2, возбужденной пикосекундным электронным пучком в трубке ПИФ-01, описываемая суммой двух экспонент:

$$I(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right). \quad (1)$$

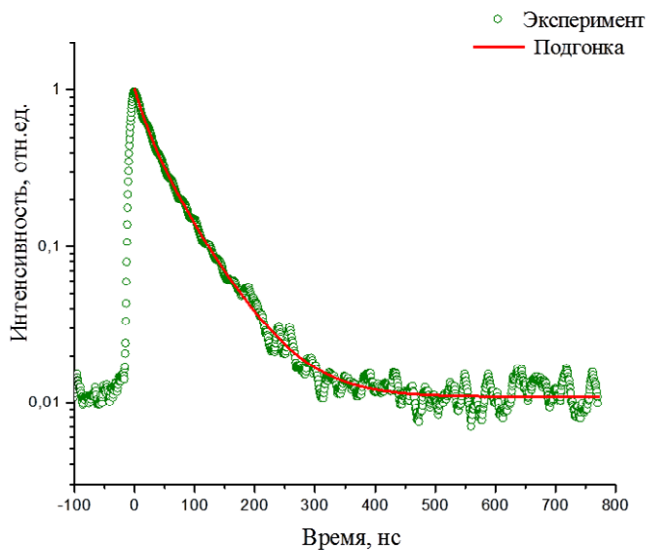


Рис. 3. Кинетика люминесценции пленки II-2 при возбуждении пикосекундным электронным пучком в трубке ПИФ-01. Кружки — эксперимент, сплошная линия — подгонка двухэкспоненциальной кривой. Постоянная времени быстрой компоненты  $\tau_f = 22$  нс, постоянная времени медленной компоненты  $\tau_s = 67$  нс

В формуле (1) постоянная времени быстрой компоненты  $\tau_f = 22$  нс, а постоянная времени медленной —  $\tau_s = 67$  нс. Из соотношения площадей под соответствующими экспонентами следует, что ~20 % энергии излучения приходится на быструю компоненту  $\tau_f$ .

Характерное время затухания люминесценции  $Ce^{3+}$  в кристаллах  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$  и  $Gd_3Al_4Ga_1O_{12}$  без введения дополнительных добавок, приводящих к появлению  $Ce^{4+}$ , составляет 52,8 (73 %) и 316 (100 %) нс соответственно [12]. Присутствие в пленке № II-2 ионов  $Ce^{4+}$  приводит к уменьшению быстрой составляющей времени затухания люминесценции до 22 нс (20 %), что примерно в 14 раз меньше этой составляющей в монокристалле соответствующего состава.

Механизм быстрого излучения заключается в следующем [13]. При наличии только ионов  $Ce^{3+}$  в матрице кристалла граната люминесценция связана с электронными переходами в ионе. При возбуждении кристалла высокоэнергетическим излучением, создающим электроны проводимости и дырки в валентной зоне, ионом  $Ce^{3+}$  захватывается сначала дырка на уровень основного состояния 4f, а только затем происходит заселение верхнего 5d уровня электроном из зоны проводимости с последующий рекомбинацией электрона и дырки с испусканием света. В случае присутствия в матрице ионов  $Ce^{4+}$ , первая стадия описанной последовательности (захват дырки из валентной зоны) исключается из процесса переноса энергии на ионы церия. Таким образом, начальный этап релаксации для  $Ce^{4+}$  состоит в захвате электрона из зоны проводимости, что ведёт к образованию возбужденного иона  $Ce^{3+}$ , который испускает фотон синтилляций. Уже после излучательной рекомбинации происходит безызлучательный захват дырки из валентной зоны с образованием вновь иона  $Ce^{4+}$ . Исключение необходимости захвата дырки способствует уменьшению быстрой составляющей времени затухания.

### Заключение

В работе методом жидкофазной эпитаксии выращены эпитаксиальные пленки состава  $(\text{Pb,Gd})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  из переохлажденного раствора-расплава на основе системы  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$  на монокристаллических подложках  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (111). Экспериментально показано, что сдвиг полосы поглощения ионов  $\text{Pb}^{2+}$  составляет 7 нм. Одновременно происходят сдвиги двух полос поглощения иона  $\text{Ce}^{3+}$  на 17 и 6 нм соответственно при введении в состав пленки ионов Al в количестве 3,43 ф.е.

Измерена кинетика затухания люминесценции пленки  $\text{Pb}_{0,02}\text{Ce}_{0,05}\text{Gd}_{2,93}\text{Al}_{4,29}\text{Ga}_{0,71}\text{O}_{12}$ , и обнаружено, что время затухания люминесценции составляет 22 нс (20 %) для быстрой компоненты и 67 нс (80 %) для медленной компоненты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект РНФ №14-29-00295.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вячеславов Л. Н., Иванецкий М. В., Мешков О. И. и др. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2012. Т. 43. Вып. 2. С. 451.
2. Degtyareva V. P., Kulikov Yu. V., Monastyrskiy M. A. et. al. // Proc. of the 16-th ICHSPP, Strasbourg, France, SPIE. 1984. V. 491. P. 239.
3. Дорошенко М. Е., Иванов М. А., Сугачев В. Б. и др. // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 7. С. 638.
4. Kamińska A., Duzynska A., Berkowski M., et. al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 85. P. 155111.
5. Syvorotka I. I., Sugak D., Wierzbicka A., et. al. // Journal of Luminescence 2015. V. 164. P. 31.
6. Kamada K., Yanagida T., Endo T., et. al. // Journal of Crystal Growth. 2012. V. 352. Issue 1. P. 88.
7. Kamada Kei, Nikl Martin, Kurosawa Shunsuke, et. al. // Optical Materials. 2015. V. 41. P. 63.
8. Zorenko Yu., Voloshinovskii A., Savchyn V., et. al. // Physica Status Solidi [Sectio] B: Basic Research. 2007. V. 244. P. 2180.
9. Vasil'eva. N. V., Spassky D. A., Randoshkin I. V., et. al. // Materials Research Bulletin. 2013. V. 48. Issue 11. P. 4687.
10. Васильева Н. В., Рандошкин В. В., Плотниченко В. Г. и др. // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 1. С. 82.
11. Scott G. B., Page J. L. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. P. 1342.
12. Nikl M., Yoshikawa A., Kamada K., et. al. // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2013. V. 59. P. 47.
13. Nikl Martin and Yoshikawa Akira // Adv. Optical Mater. 2015. V. 3. Issue 4. P. 463.

## Influence of Al ions on optical and kinetic properties of $(\text{Pb, Gd})_3(\text{Al, Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ epitaxial films

D. A. Vasil'ev<sup>1,2</sup>, K. A. Vereshchagin<sup>3</sup>, A. K. Vereshchagin<sup>3</sup>, D. A. Spassky<sup>4,5</sup>, V. O. Sokolov<sup>2</sup>, A. V. Khakhalin<sup>6</sup>, N. V. Vasil'eva<sup>3</sup>, A. M. Galstyan<sup>3</sup>, and V. G. Plotnichenko<sup>2,7</sup>

<sup>1</sup>Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences  
b.7, h. 11 Mokhovaya str. Moscow, 125009, Russia  
E-mail: dimaphys@gmail.ru

<sup>2</sup>Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences  
38 Vavilova str. Moscow, 119333, Russia  
E-mail: dimaphys@gmail.ru; vence.s@gmail.com; victor@fo.gpi.ac.ru

<sup>3</sup>Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov str. Moscow, 119991, Russia  
E-mail: veresch@kapella.gpi.ru; iofan.fe@mail.ru; natasha@myprism.ru; amg\_50@mail.ru

<sup>4</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University  
1(2) Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia  
E-mail: deris2002@mail.ru

<sup>5</sup>Institute of Physics, University of Tartu  
142 Riia, Tartu, 51014, Estonia  
E-mail: deris2002@mail.ru

<sup>6</sup>Physics Department, Lomonosov Moscow State University,  
1(2) Leninskie gory, Moscow 119991, Russia  
E-mail: avkhakhalin@phys.msu.ru

<sup>7</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskii al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia  
E-mail: victor@fo.gpi.ac.ru

Received July 7, 2015

***Spectra of optical absorption and luminescence kinetics of  $(\text{Pb}, \text{Gd})_{3-y}\text{Ce}_y\text{Al}_x\text{Ga}_{5-x}\text{O}_{12}$  films ( $x = 0; 3.43$  and  $4.29$  and  $y = 0.03; 0.04$  and  $0.05$ ) grown by liquid-phase epitaxy method from supercooled  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$  were explored. Shift of absorption bands of  $\text{Pb}^{2+}$  ions as well as levels  $5d_1$  and  $5d_2$  of  $\text{Ce}^{3+}$  ions were determined at occurrence of Al ions in films. Luminescence kinetics of cerium ions under single ultrashort electron beam excitation was measured, and decay times were determined which for fast component constituted 22 ns, and for the slow one — 67 ns.***

PACS: 06.60.Jn, 06.90+v, 07.07.Hj, 07.68.+m, 78.20.-e, 78.20.Jq, 85.60.-q

**Keywords:** epitaxial garnet films, optical absorption, decay time,  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Ce}^{4+}$

## REFERENCES

1. L. N. Vyacheslavov, M. V. Ivantzivskiy, O. I. Meshkov, et al., Physics of the elementary particles and atomic nuclei, **43** (2), 451 (2012) [in Russian].
2. V. P. Degtyareva, Yu. V. Kulikov, M. A. Monastyrskiy et al., in *Proc. of the 16-th ICHSPP*, (Strasbourg, France), SPIE. **491**, 239 (1984).
3. M. E. Doroshenko, M. A. Ivanov, V. B. Sigachev, et al., Sov. J. Quantum Electron. **22** (7), 588 (1992).
4. A. Kamińska, A. Dużyńska, M. Berkowski, et al., Phys. Rev. B. **85**, 155111 (2012).
5. I. I. Syvorotka, D. Sugak, A. Wierzbicka, et al., Journal of Luminescence. **164**, 31 (2015).
6. K. Kamada, T. Yanagida, T. Endo, et al., Journal of Crystal Growth. **352** (1), 88 (2012).
7. Kamada Kei, Nikl Martin, Kurosawa Shunsuke, et al., Optical Materials. **41**, 63 (2015).
8. Yu. Zorenko, A. Voloshinovskii, V. Savchyn, et al., Physica Status Solidi [Sectio] B: Basic Research. **244**, 2180 (2007).
9. N. V. Vasil'eva, D. A. Spassky, I. V. Randoshkin, et al., Materials Research Bulletin. **48** (11), 4687 (2013).
10. N. V. Vasil'eva, V. V. Randoshkin, V. G. Plotnichenko, et al., Inorganic Materials. **44**(1), 76. (2008).
11. G. B. Scott and J. L. Page, J. Appl. Phys. **48**, 1342 (1977).
12. M. Nikl, A. Yoshikawa, K. Kamada, et al., Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. **59**, 47 (2013).
13. Nikl Martin and Yoshikawa Akira / Adv. Optical Mater. **3** (4), 463 (2015).