

УДК 666.3.017:535.37

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЦЕРИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ПРИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

¹Полисадова Е.Ф., ²Тао Хан, ¹Олешко В.И., ¹Валиев Д.Т., ¹Ваганов В.А.,
²Шонши Джанг, ³Бураченко А.Г.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, e-mail: elp@tpu.ru;

²Исследовательский институт новых материалов и технологий Чунцинского университета искусства и науки, Чунцин, e-mail: danbaiht@126.com;

³Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, e-mail: bag@loi.hcei.tsc.ru

Люминофоры на основе иттрий-алюминиевого граната (ИАГ), состава $Y_3Al_5O_{12}$, активированные различной концентрацией Ce^{3+} , были синтезированы методом твердотельной реакции из порошкообразных оксидов с добавлением BaF_2 . Изучены оптические, структурные и морфологические свойства образцов. Исследовано влияние концентрации церия на люминесцентные характеристики при различных способах возбуждения излучением УФ-диапазона. Было установлено, что при возбуждении ксеноновой лампой (стационарный режим), излучением эксилампы, азотного лазера (импульсный режим) наблюдается смещение в длинноволновую область максимума спектра люминесценции. Введение иона церия в состав ИАГ приводит к увеличению интенсивности свечения в «желтой» полосе. С увеличением концентрации церия наблюдается уменьшение интенсивности люминесценции в «синей» полосе. Показано, что полоса излучения в области 1,8–2,6 эВ (450–650 нм) имеет сложную структуру и состоит из двух элементарных полос с максимумами $2,19 \pm 0,04$ эВ и $2,38 \pm 0,02$ эВ. Обсуждается природа центров люминесценции.

Ключевые слова: люминофор ИАГ, ИАГ с церием, морфология, люминесцентные свойства, УФ-возбуждение, центры люминесценции, дефекты

EFFECT OF CERIUM CONCENTRATION ON LUMINESCENT PROPERTIES OF $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ UNDER ULTRAVIOLET EXCITATION

¹Polisadova E.F., ²Tao Han, ¹Oleshko V.I., ¹Valiev D.T., ¹Vaganov V.A.,
²C. Zhanga, ³Burachenko A.G.

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: elp@tpu.ru;

²Research Institute for New Materials Technology, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing, e-mail: danbaiht@126.com;

³Institute of High current electronics SB RAS, Tomsk, e-mail: bag@loi.hcei.tsc.ru

The phosphor powders of $Y_3Al_5O_{12}$ doped with different Ce^{3+} concentration were synthesized by solid state reaction method with the addition of BaF_2 . Optical, structural and morphological properties of YAG powders were studied. The effect of cerium ions on the luminescent characteristics at various types of photoexcitation by UV emission was investigated. It was found that the different positions of maximum the luminescence spectrum observed at excitation of the samples YAG and YAG:Ce powders by xenon lamp (steady-state mode), excilamp radiation and nitrogen laser (pulse mode). Introduction of the cerium ion into YAG powders increases the emission intensity in the «yellow» band ~530-570 nm. With increasing concentrations of cerium, a decrease of the luminescence intensity in the «blue» band 410 nm. It is shown that the emission band in the 1,8–2,6 eV (450–650 nm) has a complex structure and consists of two elementary bands with maxima and $2,19 \pm 0,04$ 2,38 $\pm 0,02$ eV.

Keywords: YAG, YAG:Ce phosphor, morphology, luminescent properties, UV-excitation, luminescence centers, defects

Использование соединений со структурой граната чрезвычайно разнообразно. Они используются в качестве лазерных материалов [1, 2], применяются в качестве твердотельных люминесцентных дозиметров и люминесцентных детекторов за счет повышенной радиационной стойкости [3, 4]. Широкое применение находят соединения со структурой граната, активированные церием в светоизлучающих диодах белого цвета свечения [5–7].

Оптические свойства иттрий-алюминиевого граната в виде монокристаллов, пленок, нанокристаллов и керамики очень широко исследованы авторами [2–9]. Од-

нако, несмотря на то, что люминофоры на основе ИАГ изучаются длительное время, механизм люминесценции и модели центров свечения в этом веществе до сих пор остаются предметом дискуссий. Поэтому актуальной остаётся задача изучения физических процессов возбуждения и релаксации центров люминесценции, процессов переноса энергии возбуждения, в совокупности определяющих квантовый выход люминофора. Исследование технологических особенностей синтеза на эффективность люминофора является необходимым с точки зрения совершенствования технологий производства.

Исследованию собственной люминесценции ИАГ люминофоров посвящён ряд работ [10–14]. Обсуждаются различные модели центров, излучающих в УФ-области. Авторы в работе [12] приписывают излучение в области 340 нм автолокализованному экситону (АЛЭ). В работе [13] авторы связывают свечение монокристаллов граната состава $Y_3Al_5O_{12}$ в области 300 нм с «решеточными» дефектами, а излучение основной полосы с максимумом около 550 нм связано излучательным 5d-4f-переходом в ионе Ce^{3+} . В работе [14] авторы связывают свечение «чистых» и активированных ионами Ce^{3+} гранатов в УФ-области с антиузельными дефектами. Известно, что ионы Y^{3+} , занимающие позицию Al^{3+} , играют роль изоэлектронных примесей в структуре граната и образуют два типа центров свечения: экситоны, локализованные около антиузельного дефекта (полоса с $\lambda_{max} = 296$ нм); и излучательная рекомбинация свободных электронов с дырками, локализованными на антиузельных дефектах (полоса с $\lambda_{max} = 330$ нм). Полоса излучения на 400 нм, по мнению [14, 15], вызвана люминесценцией F^+ центров, локализованных возле центров типа Y_{Al} . Как показано в работах [13,14], свечение ионов церия тесно связано с дефектами, образующимися в решетке ИАГ. Наибольшим световым выходом обладают монокристаллы ИАГ, активированные церием, выращенные методом Чохральского в атмосфере аргона и кислорода. Полосы люминесценции собственных дефектов значительно перекрываются с 4f–5d поглощением иона церия (по данным [14] максимум приходится на 347 нм), и поэтому эти дефекты включены в процесс возбуждения люминесценции церия.

Целью данной работы является исследование люминесцентных свойств образцов нанопорошков ИАГ и ИАГ:хмол %Ce при воздействии УФ-излучением с различной энергией квантов с использованием для возбуждения источников с нано- и пикосекундной длительностью импульса.

Материалы и методы исследования

Образцы были синтезированы методом высокотемпературной твердотельной реакции в атмосфере азота. Исходные компоненты Al_2O_3 (99,99%), Y_2O_3 (99,99%), CeO_2 (99,99%) смешивались согласно расчётному соотношению $Y_3-x: Al_5: xCe$, ($x = 0,02; 0,04; 0,08$ и $0,1$), с добавлением 5% BaF_2 от расчетной массы. Смесь с добавлением спирта перемешивалась в течение 6 часов во вращательном устройстве. Затем образцы порошков подвергались двухстадийной сушке при $120^\circ C$ и при $800^\circ C$ в течение двух часов. Далее проводилась высокотемпературная обработка в печи при температуре $1600^\circ C$ в течение 12 часов, и затем при температуре $550^\circ C$ в течение 4 часов. По-

сле термообработки все образцы измельчались для придания гомогенности порошку.

Морфологию поверхности люминофоров исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM, Quanta 250, FEI, США) с ускоряющим напряжением 10 кВ. Для регистрации кристаллической фазы для всех образцов использовался рентгеновский дифрактометр (TD-3500, Dandong, China) с использованием излучения $Cu K\alpha 1$ при 30 KV и 20 mA. Спектр фотолюминесценции (PL) и спектр возбуждения (PLE) регистрировали флуоресцентным спектрофотометром (F-7000, Hitachi, Япония) с ксеноновой лампой мощностью 150 Вт при комнатной температуре. Для записи спектров поглощения использовался спектрофотометр UV-Vis-NIR серии Cary.

Для измерений люминесценции были применены два типа источников возбуждения: импульсный азотистый лазер ($\lambda_{ex} = 337,1$ нм, 7 нс FWHM) и УФ-импульсная эксилампа $KrCl$ ($\lambda_{ex} = 222$ нм, 150 ps FWHM) [16]. Регистрация кинетики люминесценции осуществлялась фотоэлектронным умножителем ФЭУ-84-6 с использованием монохроматора МДР-3 и цифрового осциллографа TDS5052 (Tektronix). Для регистрации интегральных спектров люминесценции использовался спектрометр AvaSpec-2048, время интегрирования 2 мс.

Результаты исследования и их обсуждение

Структура и морфология

Полученные люминофоры представляют собой порошок, состоящий из микрокристаллических частиц со средним размером 1–2 мкм (рис. 1). Структура люминофора и размеров практически не изменяется от присутствия церия и представляет собой набор округлых частиц неправильной формы. Наблюдаемые дифрактограммы (рис. 2, а) показывают отсутствие фазовых превращений в образцах, полученных в данном эксперименте. Интенсивность и ширина пиков для полученных образцов не меняются при изменении концентрации ионов церия.

То есть введение церия не влияет на процессы кристаллизации в образцах. Следует отметить, что положение максимумов пиков для разных образцов может смещаться в пределах погрешности измерения дифрактометра.

Оптические свойства

Структура спектров поглощения показана на рис. 2, б. Для всех образцов характерно поглощение в области от 200 до 520 нм. Зарегистрировано наличие двух интенсивных полос поглощения с максимумами при 259 и 457 нм. Кроме того, наблюдаются полосы поглощения в области 315 и 357 нм. Для образцов ИАГ, не содержащих церия, максимум полосы поглощения в коротковолновой области смещен и приходится на 244 нм, при этом полосы на 315 и 357 нм не регистрируются.

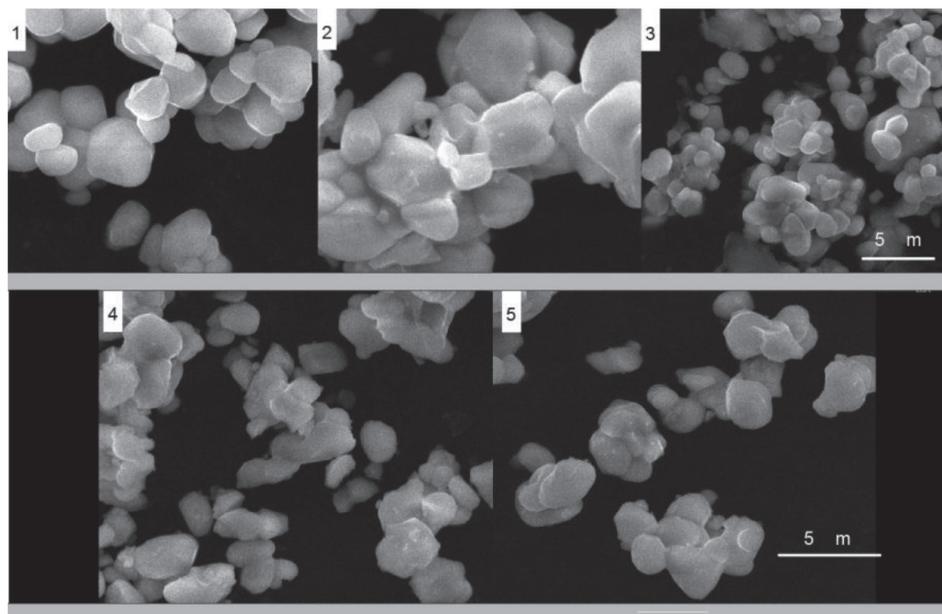


Рис. 1. Морфология образцов люминофоров состава $Y_3Al_5O_{12}$, активированных Ce (Xwt. %), где X = 0; 0,02; 0,04; 0,08; 0,1

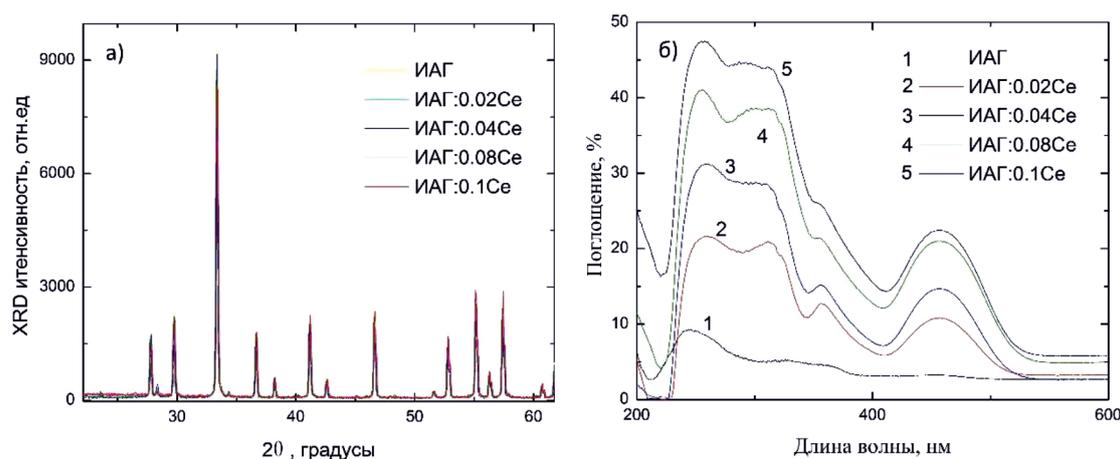


Рис. 2. Рентгеноструктурный анализ (XRD) (а) и спектры поглощения (б) люминофоров $Y_3Al_5O_{12} \cdot (X \text{ wt. \%})\text{Ce}$, где X = 0; 0,02; 0,04; 0,08; 0,1

Пик поглощения с максимумом в области 245–249 нм проявляется и в активированных, и в неактивированных образцах YAG, следовательно, ответственными за это поглощение являются собственные дефекты, образующиеся в YAG в процессе синтеза. Как известно из литературных данных [15], за поглощение в области 240 нм ответственны F-центры (кислородная вакансия, захватившая два электрона). За поглощение области 235 и 370 нм могут отвечать F^+ -центры (кислородная вакансия, захватившая один электрон). По-

лосы поглощения 360 и 480 нм связывают с поглощением F^- -центров (кислородная вакансия, захватившая три электрона). Однако такие центры в ИАГ термически не стабильны, и их существование при комнатной температуре маловероятно. То есть в синтезированных микрокристаллах неактивированного ИАГ могут присутствовать F и некоторое количество F^+ -центров, так как в области 360–370 нм регистрируются слабые пики поглощения (рис. 2). Введение церия приводит к появлению в спектре полос поглощения

на 315, 357 и 457 нм, при этом наблюдается увеличение интенсивности поглощения во всех полосах с ростом концентрации церия. Это может означать, что присутствие церия способствует образованию F и F⁺ центров, поглощающих в областях 259 и 360 нм. В работе [17] поглощение в области 450 и 340 нм приписывается переходам в ионах церия. Такие полосы мы наблюдаем в спектрах возбуждения (рис. 3, б). Однако, по нашему мнению, нет достаточных оснований связывать полосы поглощения 357 и 457 с переходами 4f–5d в ионе церия.

Пик поглощения в области 315 нм проявляется в исследованных образцах ИАГ, активированных церием. Данный пик в литературе по поглощению ИАГ не описан. Природа пика на 315 нм в спектре поглощения требует дополнительного изучения. Возможно, он связан с особенностями технологии синтеза порошков. Однако важно отметить, что в стеклообразной матрице, как было показано в работах [18], поглощение в этой области связано с переходами в ионах церия из основного 4f состояния на различные компоненты возбужденного 5d-состояния.

Люминесцентные свойства

Для полосы свечения $\lambda_{\text{max}} = 530$ нм были изучены спектры возбуждения. Как видно на рис. 3, б, в спектре возбуждения наблюдаются две полосы 342 и 452 нм. Причем данные полосы регистрируются как в образце порошка ИАГ, неактивированного церием, так и в образцах фосфора с примесью Ce³⁺. Результаты показывают, что интенсивность данных полос суще-

ственно возрастает при введении церия в состав ИАГ.

При воздействии на образцы коротковолнового излучения с $\lambda = 342$ нм возбуждается спектр люминесценции, состоящий из двух полос – 414 нм (2,99 eV) и 530 нм (2,33 eV) (рис. 3, б – слева). Возбуждение светом с длиной волны 450 нм приводит к появлению в спектре полосы люминесценции на 533 нм (2,33 eV) (рис. 3, б – справа). Следует отметить, что такие люминесцентные свойства характерны как для «чистого» порошка ИАГ, так и для активированных церием образцов. При этом интенсивность свечения при введении церия почти на два порядка больше, чем для чистого ИАГ. Для образцов с максимальной концентрацией (0,1%) наблюдается некоторое снижение интенсивности люминесценции.

При возбуждении излучением азотного лазера с наносекундной длительностью импульса, в спектрах люминесценции образцов фосфоров, при регистрации «во временном окне», наблюдается полоса в области 460–670 нм с максимумом на 557 нм как для чистых, так и для легированных образцов, и менее интенсивная полоса с максимумом на 414 нм (рис. 4, а).

Как показывают наши результаты, соотношение интенсивностей «синей» и «желтой» полос излучения значительно зависит от концентрации введенного в образец церия. С ростом содержания церия наблюдается уменьшение амплитуды полосы 414 нм относительно полосы 557 нм.

Использование методики спектрометрии с временным разрешением позволило обнаружить следующее.

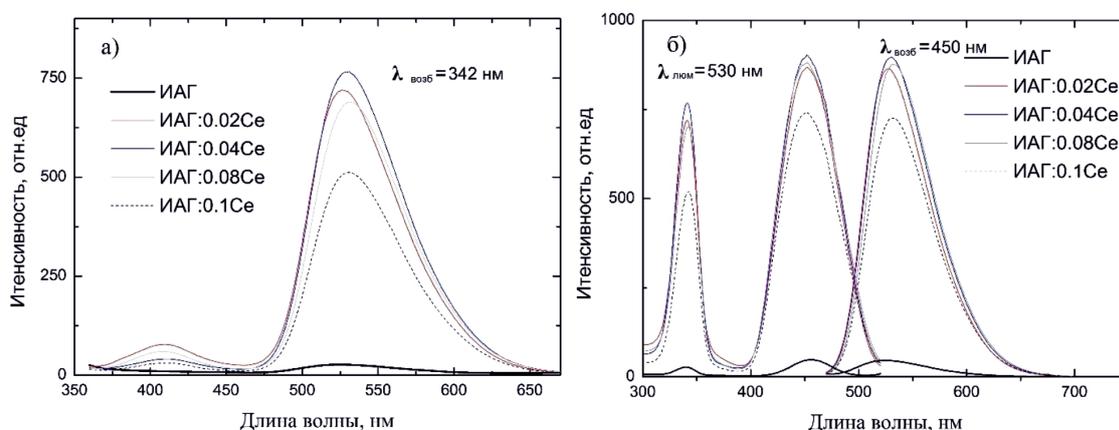


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции при $\lambda_{\text{воз}} = 342$ (а), $\lambda_{\text{воз}} = 450$ (а) и спектры возбуждения (б) люминофоров $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ (X мас. %), где X = 0; 0,02; 0,04; 0,08; 0,1

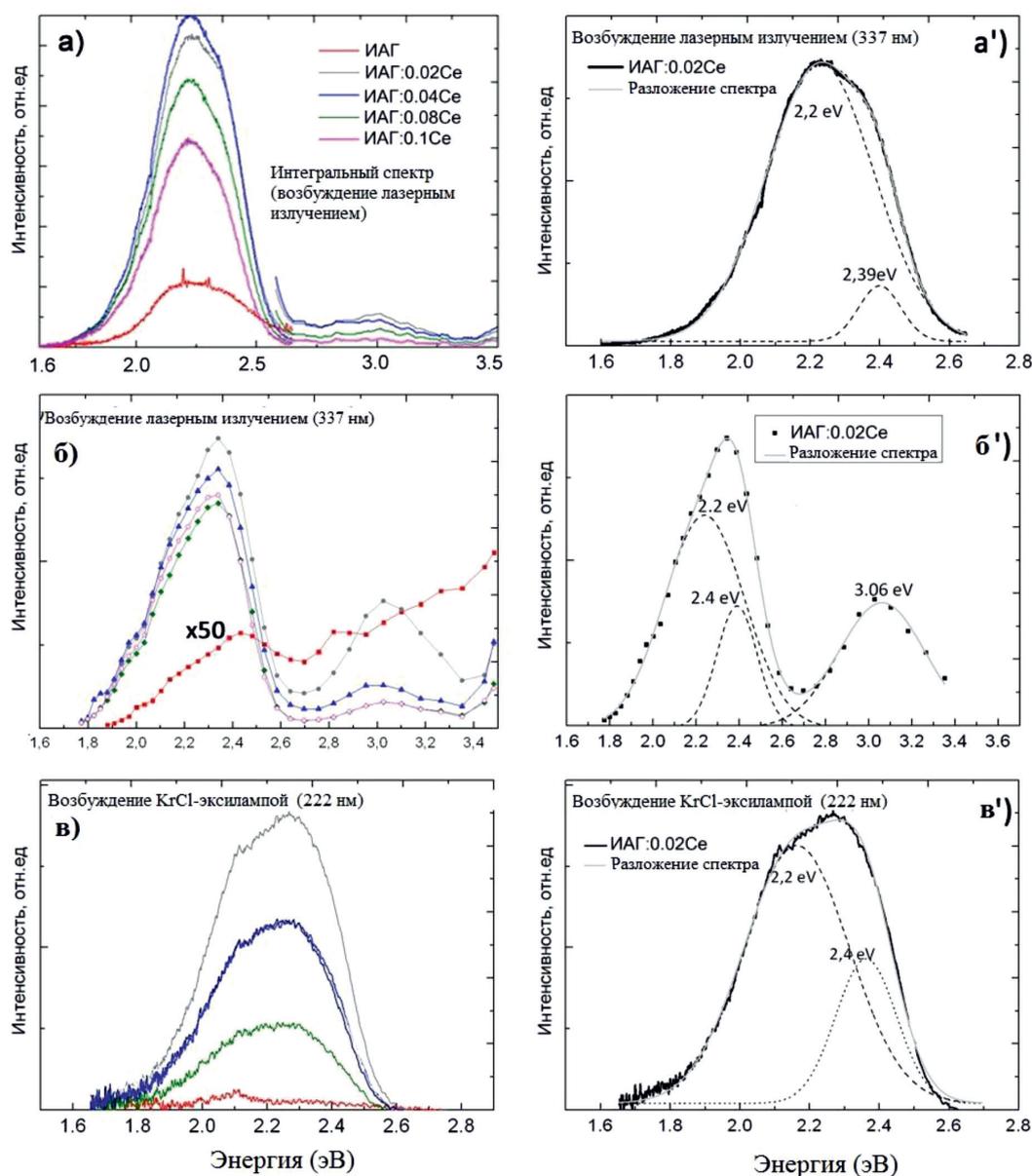


Рис. 4. Интегральные (а, в) и спектры люминесценции с временным разрешением (б) при различном типе возбуждения для люминофоров ИАГ и ИАГ: Се. Разложение спектра образца YAG:0.02Ce на гауссианы (а', б', в')

В спектре люминесценции неактивированного образца ИАГ, измеренного в начальный момент после окончания возбуждения, наблюдается широкая полоса в области 440–570 нм с максимумом в области 510 нм (2,43 эВ). В области 3,54–2,75 эВ (350–450 нм) наблюдается рост интенсивности в коротковолновую (высокоэнергетическую) область. Интенсивность свечения данного образца на несколько порядков слабее, чем свечение ИАГ:Се. В спектрах люминесценции образцов ИАГ:Се наблюда-

ются две полосы свечения с максимумами интенсивности 414 и 530 нм. Соотношение интенсивностей данных полос зависит от концентрации церия, наибольшая интенсивность для полосы на 414 нм характерна для образца с концентрацией церия 0,02 %, (рис. 4, б).

Использование дальнего УФ-излучения для возбуждения люминесценции ИАГ (излучение эксилампы) позволило обнаружить следующие результаты. В спектре люминесценции неактивированного ИАГ

регистрируется широкая полоса, максимум ее интенсивности приходится на 590 нм. В спектрах образцов фосфора, активированного церием при таких условиях возбуждения мы наблюдаем полосу люминесценции с максимумом на 545 нм и дополнительным пиком на 585 нм (рис. 4, в). Концентрация ионов церия не влияет на форму спектра люминесценции.

Была исследована кинетика затухания люминесценции порошков ИАГ при возбуждении импульсом лазера.

Как было установлено, кинетика люминесценции значительно различается в области 370–450 нм и 450–700 нм. В «синей» области спектра свечение коротковременное, в кинетике регистрируются две компоненты с длительностью затухания $\tau_1 \sim 12\text{--}15$ нс, $\tau_2 \approx 40$ нс (рис. 5, а).

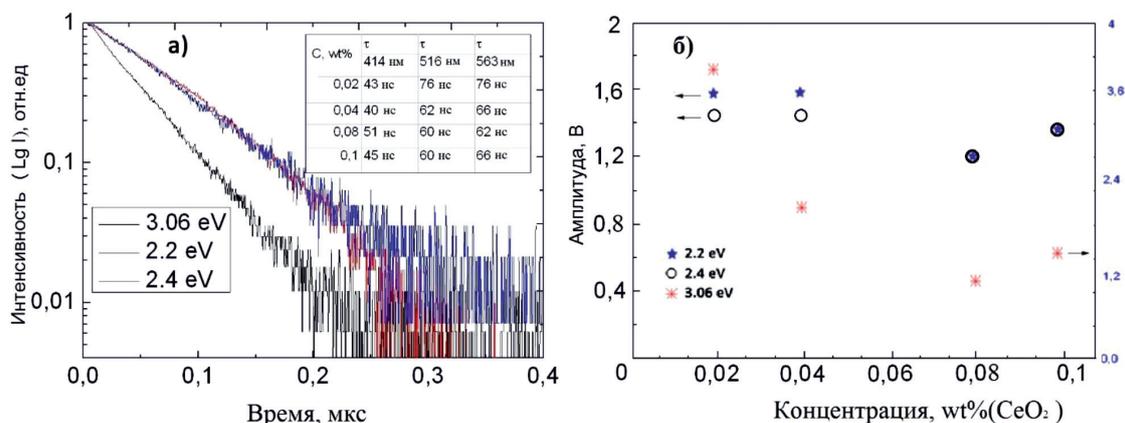


Рис. 5. Кинетика затухания импульсной фотолюминесценции возбужденного азотного лазера (337,1 нм) для YAG: Ce (0,02 wt. %) (а); амплитуда интенсивностей (б) в полосах 2,2, 2,4 и 3,06 эВ. Вставка – время затухания для образцов YAG: Ce

По данным [19] в полосе 3,0 эВ при возбуждении 266 нм лазерным импульсом нанокристаллы ИАГ:Се, регистрируются две компоненты в кинетике затухания люминесценции с временами жизни $\tau_1 \approx 4 \pm 3$ нс и $\tau_2 \approx 17 \pm 5$ нс.

В спектральном диапазоне (1,8–2,6 эВ) люминесценция затухает по закону близкому к экспоненциальному, с постоянной времени $\sim 60\text{--}70$ нс. На рис. 5 представлены кинетики в области 516 (2,4 эВ) и 563 (2,2 эВ) нм. Нам не удалось обнаружить существенных различий в кинетике затухания в различных спектральных участках основной полосы люминесценции.

Таким образом, мы можем сделать вывод, что, во-первых, при возбуждении образцов порошков ИАГ, активированного церием, потоком фотонов различных энергий,

возникает люминесценция, спектр которой состоит из одной или двух полос. Как правило, полоса несимметрична, положение максимума амплитуды меняется от 530 до 560 нм, и в структуре полосы наблюдаются два пика. Разложение спектра на гауссианы показывает, что во всех зарегистрированных спектрах в основной «желтой» полосе свечения можно выделить две составляющих с максимумами на $2,19 \pm 0,04$ и $2,38 \pm 0,02$ эВ. (рис. 4, а', б', в'). Соотношение интенсивностей данных полос различается при разных способах возбуждения люминесценции. Изменение соотношения амплитуд приводит к смещению положения максимума интенсивности в спектрах свечения образцов.

Интенсивность полос свечения при регистрации спектра «во временном окне»,

либо в стационарном режиме (рис. 4 а, в), для образцов с концентрацией церия 0,02–0,08 меняется незначительно (возможно, в пределах ошибки измерений). В наших экспериментах не наблюдается четкой зависимости I в максимуме полосы от концентрации Се. Однако уменьшение интенсивности для образца с концентрацией 0,1% меньше относительно других образцов во всех экспериментах. Видимо, в этом случае для образования эффективных центров свечения может играть роль соотношение количества вакансий и ионов церия.

Мы измерили амплитуду вспышки свечения в спектральных областях 516 и 563 нм при лазерном возбуждении для всех синтезированных образцов с изменяющейся концентрацией церия при идентичных условиях. Как показано на рис. 5, б, интенсивность

свечения в полосах 516 и 563 нм, измеренная в начальный момент времени после возбуждения, слабо зависит от количества церия в исследованном диапазоне концентраций. Таким образом, прямой зависимости между количеством ионов церия и интенсивностью люминесценции не наблюдается. Как было установлено, амплитуда вспышки в полосу 3.06 eV уменьшается с введением церия (рис. 5, б). Свечение в этой области в кристаллах ИАГ связывают с F^+ -центрами [15, 20]. С данными центрами также связана полоса поглощения 370 нм. Такие центры, как правило, образуются в кристаллах при дефиците Al_2O_3 (или избытке Y_2O_3). Как можно видеть, при воздействии излучением эксцил лампы наиболее эффективно возбуждается излучение в области 2,16 эВ. Также следует отметить, что при таком способе в спектре не было зарегистрировано свечение в области 400 нм. Это может быть связано с тем, что при УФ-воздействии может наблюдаться преобразование F и F^+ -центров вследствие их ионизации, как это происходит в сапфире [21]. При возбуждении светом с длиной волны 342 нм наиболее эффективно возбуждается свечение в области 2,36 эВ (530 нм). Это приводит к изменению соотношения интенсивностей, составляющих 2,19 и 2,38 эВ и, соответственно, к изменению максимума полосы при различных типах воздействия.

Закключение

Были изучены оптические, структурные и морфологические свойства образцов порошков ИАГ, синтезированных твердофазным способом. Исследовано влияние церия на люминесцентные характеристики при различных способах фотовозбуждения. Смещение положения максимума полосы свечения происходит при изменении условий возбуждения (энергии квантов, длительности импульса возбуждения). Введение иона церия в состав ИАГ приводит к увеличению интенсивности свечения в «желтой» полосе в области 530–570 нм. С увеличением концентрации церия наблюдается уменьшение интенсивности люминесценции в «синей» полосе 414 нм. Показано, что полоса излучения в области 450–650 нм имеет сложную структуру и состоит из двух элементарных полос с максимумами $2,19 \pm 0,04$ и $2,38 \pm 0,02$ эВ. Эффективность люминесценции каждой из этих полос зависит от условий возбуждения. Обнаружено, что спектральные характеристики чистых и активированных образцов порошков ИАГ идентичны. Показано, что центры, излучающие в области 450–650 нм, присутствуют в чистых образцах ИАГ и введение церия способствует их образованию. Сделано предположение, что природа дан-

ного свечения обусловлена собственными дефектами, стабилизированными ионами церия. С ростом количества церия наблюдается уменьшение интенсивности свечения F^+ -центров, поэтому, возможно, образование таких дефектов связано с преобразованием F^+ -центров в сложные комплексные дефекты.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 17-13-01233.

Список литературы

1. Ikesue A., Aung Y.L. Ceramic laser materials, *Nature photonics*, 2 (2008) 721–727.
2. Kostica S., Lazarevica Z.Z., Radojevic V., et al Study of structural and optical properties of YAG and Nd:YAG single crystals, *Mater. Res. Bull.* 63 (2015) 80–87.
3. Osipov V.V., Ishchenko A.V., Shitov V.A. et al Fabrication, optical and scintillation properties of transparent YAG:Ce ceramics, *Opt. Mater.* 71 (2016) 45–49.
4. Kamada K., Yanagida T., Pejchal J., Nikl M. et al Scintillator-oriented combinatorial search in Ce-doped $(Y,Gd)(Ga,Al)_3O_{12}$ multicomponent garnet compounds, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44 (2011) 1–8.
5. Kottaisamy M., Thiagarajan P., Mishra J., Ramachandra M.S. Rao Color tuning of $Y_3Al_5O_{12}$:Ce phosphor and their blend for white LEDs, *Mater. Res. Bull.* 43 (2008) 1657–1663.
6. Ye S., Xiao F., Pan Y.X., Ma Y.Y., Zhang Q.Y. Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties, *Mater. Sci. and Engin. R* 71 (2010) 1–34.
7. Nishiura S., Tanabe S., Fujioka K., Fujimoto Y. Properties of transparent Ce:YAG ceramic phosphors for white LED, *Opt. Mater.* 33 (2011) 688–691.
8. Zhiguo X., Meijerink A. Ce^{3+} -Doped garnet phosphors: composition modification, luminescence properties and applications, *Chem. Soc. Rev.* Review article, (2016) 1–27.
9. Zorenko Yu., Voznyak T., Gorbenko V. et al Luminescence properties of $Y_3Al_5O_{12}$:Ce nanoceramics, *J. Lumin.* 131 (2011) 17–21.
10. Varney C.R., Mackay D.T., Pratt A., Reda S.M., Selim F.A. Energy levels of exciton traps in yttrium aluminum garnet single crystals, *J. of App. Phys.* 111 (2012) 063505.
11. Vakhidov Sh.A., Rakov A.F. Radiation stimulated recombination processes in $Y_3Al_5O_{12}$ crystals, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 80 (1983) 175–178.
12. Wong C.M., Rotman S.R., Warde C. Optical studies of cerium doped yttrium aluminum garnet single crystals, *App. Phys. Lett.* 44 (1984) 1038–1040.
13. Zorenko Yu., Zych E., Voloshinovskii A. Intrinsic and Ce^{3+} -related luminescence of YAG and YAG:Ce single crystals, single crystalline films and nanopowders, *Opt. Mater.* 31 (2009) 1845–1848.
14. Zorenko Yu.V., Savchin V.P., Gorbenko V.I. et al Luminescence and scintillation properties of $Y_3Al_5O_{12}$:Ce single crystals and single-crystal films, *Phys. of the Solid State* 53 (2011) 1620–1625.
15. Pujats A., Springis M. The F-type centres in YAG crystals, *Rad. Effects and Defects in Solids* 155 (2001) 65–69.
16. Tarasenko V.F., Sosnin E.A. Barrier-discharge excilamps: History, operating principle, prospects, *J. of Opt. Tech.* 79 (2012) 653–658.
17. Pankratov V., Shirmane L. et al Peculiarities of luminescent properties of cerium doped YAG transparent nanoceramics, *Rad. Measur.* 45 (2010) 392–394.
18. Valiev D.T., Polisadova E.F., Stepanov S.A., Belikov K.N. et al. Luminescence spectroscopy of scintillating glasses doped with Tb^{3+}/Ce^{3+} with different concentrations of cerium under photo- and electron excitation, *J. Lumin.* 162 (2015) 128–133.
19. Pankratov V., Grigorjeva L., Millers D., Chudoba T. Luminescence of cerium doped YAG nanopowders, *Rad. Measur.* 42 (2007) 679–682.
20. Springis M., Pujats A., Valbis J. Polarization of luminescence of color centers in YAG crystals, *J. Phys.: Condens. Matter* 3 (1991) 5457.
21. Vallayer J., Jardin C., Treheux D. Optical and dielectric behaviors of alumina after an electromagnetic irradiation, *Opt. Mater.* 16 (2001) 329–333.