

свечи). Чтобы исключить эффект автоматической настройки тепловизором контраста на изображении в кадре были размещены два объекта с известными температурами. В качестве таких объектов выступали два абсолютно черных тела с температурами 80 °С и 461 °С. Регистрация производилась двумя тепловизорами: MWIR – GAVIN615A; LWIR – Zenmuse H20T.

Спектральный диапазон тепловизора по уровню 0,7 составляет 3,55–4,98 мкм.

Наличие резкого уменьшения относительной чувствительности в районе 4,4 мкм объясняется влиянием линии поглощения углекислого газа в атмосфере и не может исключено в условиях атмосферы.

Тепловизор LWIR диапазона смог определить температуру двух эталонных объектов: 84,2 ±2,6°С и 462,8 ±98,7 °С.

Тепловизор MWIR диапазона не смог оценить температуру, ввиду насыщения детектора даже при минимальном времени накопления сигнала.

Однако смог отобразить разогретые продукты горения свечи, что в совокупности с тепловизором LWIR способно уменьшить количество ложных срабатываний.

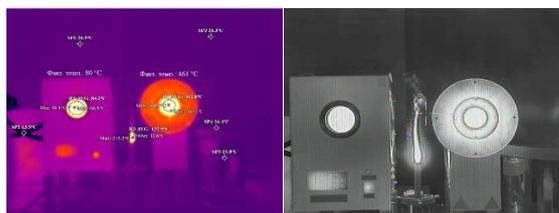


Рисунок 4 – примеры изображений для определения температуры пламени: LWIR – слева; MWIR – справа

Литература

1. Archeological Treasures Protection based on early Forest Wildfire Multi Band Imaging Detection System / B. Gouverneur [et al.] // *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IX*. – 2012. – 85410J.

Equation Chapter 1 Section 1УДК 621

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ Yb³⁺ И Er³⁺ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ Yb, Er:YLuAG

Вакалов Д. С., Чикулина И. С., Кичук С. Н.

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Ставрополь, Российская Федерация

Аннотация. Впервые методом неактивного вакуумного спекания были получены образцы оптической керамики Yb, Er:YLuAG с различной концентрацией активаторов. Показано влияние концентрации Yb³⁺ и Er³⁺ на интенсивность люминесценции и время жизни возбужденного состояния Yb³⁺.

Ключевые слова: оптическая керамика, YLuAG, люминесценция, время жизни

EFFECT OF Yb³⁺ AND Er³⁺ CONCENTRATION ON THE LUMINESCENT PROPERTIES OF Yb, Er:YLuAG OPTICAL CERAMICS

Vakalov D., Chikulina I., Kichuk S.

North Caucasus Federal University
Stavropol, Russian Federation

Abstract. For the first time, samples of Yb, Er:YLuAG optical ceramics with different concentrations of activators were obtained using non-reactive vacuum sintering. The influence of the concentration of Yb³⁺ and Er³⁺ on the luminescence intensity and lifetime of the excited state of Yb³⁺ is shown.

Key words: optical ceramics, YLuAG, luminescence, lifetime.

Адрес для переписки: Вакалов Д. С., ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь 355017, Российская Федерация
e-mail: megadims@gmail.com

Введение. Одним из перспективных направлений современного материаловедения является разработка активных сред усиления, работающих в области длин волн 1,5–1,65 мкм, так называемом «безопасном для глаз» диапазоне [1]. Лазеры работающие в этой области спектра могут применяться в медицине, в области инфокоммуникаций и т. д. Оптическая керамика со структурой граната, активированная Er³⁺ может успешно применяться для этих целей. Однако, малое сечение поглощения Er³⁺ в рабочем диапазоне излучения коммерческих диодов (940–980 нм) делает накачку малоэффективной. Для повышения эф-

фективности используются сенсбилизаторы, которые поглощают излучение и передают его активатору. Для Er³⁺ идеальным сенсбилизатором является Yb³⁺ из-за близкого расположения энергетических уровней возбужденного состояния.

Для мощных лазеров необходимо использовать матрицы с высокой теплопроводностью, при высоком уровне легирования. Этим критериям соответствует керамика на основе LuAG. Для удешевления производства ведется поиск составов с частичным замещением катионов Lu другими металлами при сохранении высоких теплофизических характеристик.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, исследования люминесцентных свойств оптической керамики Yb, Er:YLuAG являются актуальными и перспективными. Особенно учитывая тот факт, что сведения об оптимальных концентрациях Yb и Er в матрице YAG являются немногочисленными и противоречивыми [1, 2], а для матриц YLuAG полностью отсутствуют.

Эксперимент. Образцы оптической керамики Yb, Er:YLuAG были получены путем нереактивного спекания керамических порошков в вакууме при температуре 1825 °С. Керамические порошки были изготовлены прокаливанием при 1150 °С порошков-прекурсоров, полученных методом обратного химического соосаждения из солей металлов, взятых в стехиометрическом соотношении. Для проведения эксперимента по влиянию концентрации активаторов на люминесцентные характеристики были изготовлены образцы керамики следующих составов: Yb (1 ат.%), Er (0,25 ат. %):YLuAG, Yb (3 ат.%), Er (0,5 ат. %):YLuAG, Yb (5 ат.%), Er (1 ат. %):YLuAG, Yb (10 ат. %), Er (3 ат. %):YLuAG, Yb (15 ат. %), Er (5 ат. %):YLuAG. Измерения спектров люминесценции и времени жизни возбужденного состояния проводили на спектрофлуориметре СФЛ-МДР.

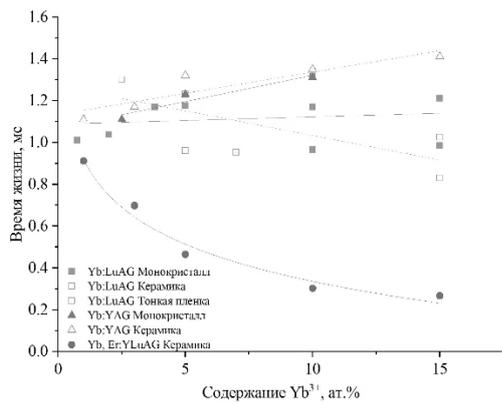


Рисунок 1 – Зависимости времени жизни возбужденного состояния от концентрации Yb³⁺ в керамике и монокристаллах на основе Yb:YAG, Yb:LuAG [3–11] и Yb, Er:YLuAG

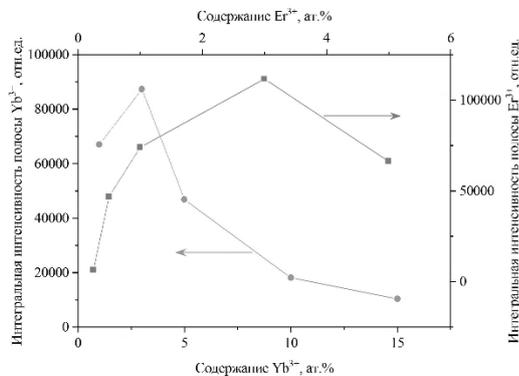


Рисунок 2 – Зависимости интегральной интенсивности люминесцентных полос Yb³⁺ и Er³⁺ от их концентрации в керамике Yb, Er:YLuAG

Результаты. Были проведены исследования керамических порошков, используемых для изготовления образцов оптической керамики. Результаты рентгенофазового анализа показали наличие во всех образцах фазы граната без каких-либо примесных фаз. Наблюдается увеличение параметра кристаллической решетки с ростом концентрации вводимых активаторов. Размеры кристаллитов порошка не зависят от концентрации активатора и составляют 90 ± 2 нм.

Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что керамические порошки представляют собой слабоагломерированные частицы, форма которых близка к сферической, а размеры частиц согласуются с данными рентгеновской дифракции.

Были проведены измерения кривых затухания полосы люминесценции Yb³⁺ (1030 нм) при возбуждении на длине волны 980 нм и определены времена жизни возбужденного состояния. Сравнение полученных результатов с литературными данными представлено на рисунке 1. Из рисунка видно, что для всех рассматриваемых материалов по литературным данным время жизни с увеличением концентрации Yb³⁺ увеличивается за исключением керамики на основе LuAG. При этом значения времени жизни полосы Yb³⁺, полученные для керамики Yb, Er:YLuAG существенно меньше, что указывает на перенос энергии возбуждения от Yb³⁺ к Er³⁺.

Эффективность передачи энергии от Yb³⁺ к Er³⁺ можно определить, используя выражение:

$$\eta_{ET} = 1 - \frac{\tau_s}{\tau_0}, \quad (1)$$

где τ_s – время жизни возбужденного состояния Yb³⁺; τ_0 – время жизни возбужденного состояния Yb³⁺ керамики без Er³⁺.

Используя данные из литературных источников и экспериментальные результаты, было определено, что наилучшая эффективность достигается при концентрации активаторов 10 ат. % Yb³⁺ и 3 ат. % Er³⁺ (таблица 1).

Таблица 1 – Эффективность передачи энергии от Yb³⁺ к Er³⁺

Yb ³⁺ ат. % / Er ³⁺ ат. %	τ_s , мс	η_{ET} , %
1/0,25	0,912	29,8
3/0,5	0,698	36,5
5/1	0,464	51,7
10/3	0,302	68,9
15/5	0,267	67,8

Были проведены измерения спектров люминесценции полос Yb³⁺ и Er³⁺ при возбуждении лазерным диодом 940 нм. Зависимости интенсивности исследуемых полос представлены на рисунке 2.

Также критерием эффективности передачи энергии можно считать отношение интенсивностей по-

лос люминесценции Er^{3+} к Yb^{3+} . С учетом этого, анализ экспериментальных результатов свидетельствует о том, что наиболее оптимальной концентрацией Er^{3+} является 3 ат.%, а оптимум концентраций Yb^{3+} лежит в области от 10 до 15 ат.%

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-23-00084) <https://rscf.ru/project/23-23-00084/>, использовано научное оборудование центра коллективного пользования СКФУ.

Литература

1. Optical properties of Er, Yb co-doped YAG transparent ceramics / J. Zhou [et al.] // *Ceram. Int.* – 2011. – V. 37, № 2. – P. 513–519.
2. 1532 nm sensitized luminescence and up-conversion in Yb,Er:YAG transparent ceramics / I. O. Vorona [et al.] // *Opt. Mater. (Amst.)*. – 2018. – V. 77. – P. 221–225.
3. Growth, spectroscopic, and laser properties of Yb³⁺-doped Lu₃Al₅O₁₂ garnet crystal / A. Brenier [et al.] // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2006. – V. 23, № 4. – P. 676.
4. Toncelli, A. Optical properties of Yb³⁺ doped Lu₃Al₅O₁₂ crystal fibers grown by μ -pulling down

technique / A. Toncelli, M. Alshourbagy, M. Tonelli // *J. Appl. Phys.* – 2008. – V. – 104, № 10.

5. Fabrication and properties of highly transparent Yb:LuAG ceramics / Y. Fu [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2016. – V. 664. – P. 595–601.

6. Comparative investigation on Yb:YAG and Yb:LuAG transparent laser ceramics / C. Ma [et al.] // *Ceram. Int.* – 2015. – V. 41, № 10. – P. 14635–14640.

7. Yb:LuAG laser ceramics: a promising high power laser gain medium / D. Luo [et al.] // *Opt. Mater. Express.* – 2012. – V. 2, № 10. – P. 1425.

8. Characterisation and laser performance of a Yb:LuAG double-clad planar waveguide grown by pulsed laser deposition / S. V. Kurilchik [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2019. – V. 125, № 11. – P. 201.

9. Thermal and laser properties of Yb:LuAG for kW thin disk lasers / K. Beil [et al.] // *Opt. Express.* – 2010. – V. 18, № 20. – P. 20712.

10. Photoluminescence and laser behavior of Yb:YAG ceramic / F. Tang [et al.] // *Opt. Mater. (Amst.) Elsevier B. V.* 2012. – V. 34, № 5. – P. 757–760.

11. Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet / J. Dong [et al.] // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2003. – V. 20, № 9. – P. 1975

УДК 621.327

ВЛИЯНИЕ ДЕГРАДАЦИИ РАЗРЯДНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЫ

Гавриш С. В., Чиликина П. А.

ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»
Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена изучению влияния деградации внутренней поверхности разрядной оболочки под воздействием импульсного ксенонового разряда короткой длительности с энергией 60 Дж на эксплуатационные характеристики излучения. Изучены зависимости энергии излучения от срока службы лампы, трансформация пространственного распределения ультрафиолетового и инфракрасного излучения после осаждения слоев материала электродов и испарения разрядной оболочки.

Ключевые слова: импульсная лампа, деградация оболочки, УФ-излучение, плазменный канал, индикатриса, энергия излучения, телесный угол, распыление электродов, испарение оболочки.

THE EFFECT OF DISCHARGE SHELL DEGRADATION ON THE CHARACTERISTICS UV-RADIATION OF A PULSED XENON LAMP

Gavrish S., Chilikina P.

Scientific and Production Enterprise “Melitta”, Ltd
Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the study of the influence of the degradation of the inner surface of the discharge shell under the influence of a pulsed xenon discharge of short duration with an energy of 60 J on the operational characteristics of the radiation. The dependences of the energy of radiation on the service life of the lamp, the transformation of the spatial distribution of ultraviolet and infrared radiation after the deposition of layers of electrode material and evaporation of the discharge shell are studied.

Key words: flash lamp, degradation of the shell, UV radiation, plasma channel, indicatrix, radiation energy, solid angle, electrode sputtering, shell evaporation.

Адрес для переписки: Гавриш С. В., ул. Миклухо-Маклая, 16/10, г. Москва, 117997, Российская Федерация
e-mail: svgavr@list.ru

Импульсный ксеноновый разряд короткой длительности ($\tau < 150$ мкс) является источником мощного УФ-излучения. Поэтому сегодня газоразрядные лампы на основе импульсного разряда

в ксеноне получили широкое распространение в установках УФ-обеззараживания воздуха и поверхностей [1]. Наиболее важной эксплуатационной характеристикой данного класса ламп явля-