

УДК 535.37;620.3

КИНЕТИКА ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ИТТРИЙ (ЛЮТЕЦИЙ)-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТОВ И АЛЮМИНАТА ГАДОЛИНИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ

Юмашев К.В.¹, Хорт А.А.², Подболотов К.Б.³, Шиманский В.И.⁴

¹*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

²*Королевский технологический институт
Стокгольм, Швеция*

³*Физико-технический институт НАНБ*

⁴*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследована кинетика затухания люминесценции наноструктурированных порошков иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов и алюмината гадолиния, активированных ионами европия, синтезированных методом экзотермического горения в растворах. Для исследуемых материалов определены времена затухания люминесценции, определяемое временем жизни в состоянии 5D_0 ионов европия.

Ключевые слова: наноструктурированные порошки, люминесценция, время жизни.

LUMINESCENCE DECAY KINETICS OF NANOSTRUCTURED POWDERS OF YTTRIUM (LUTETIUM)-ALUMINUM GARNETS AND GADOLINIUM ALUMINATE DOPED WITH EUROPIUM IONS

Yumashev K.V.¹, Khort A.A.², Podbolotov K.B.³, Shimanski V.I.⁴

¹*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

²*KTH Royal Institute of Technology
Stockholm, Sweden*

³*Physical Technical Institute of NASB*

⁴*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Luminescence decay kinetics of europium-doped nanostructured powders of yttrium-aluminum garnet, lutetium-aluminum garnet, and gadolinium aluminate synthesized by the solution combustion technique have been studied. For the materials under study, the luminescence decay times determined by the lifetime in the 5D_0 state of europium ions were determined.

Key words: nanostructured powders, luminescence, lifetime.

*Адрес для переписки: Юмашев К.В., проспект Независимости, 65/17, Минск, 220113, Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by*

В настоящей данной работе исследуется кинетика затухания люминесценции наноструктурированных порошков иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов и алюмината гадолиния, активированных ионами европия, синтезированных методом экзотермического горения в растворах. Сочетание хороших механических и теплофизических свойств данных материалов с отличительными особенностями люминесцентных свойств иона европия делает их перспективными средами для применения в качестве люминофоров с люминесценцией в красной области спектра, в детектировании искажения кристаллической структуры материала, в термографической люминофорной термометрии. Достоинством метода экзотермического горения в растворах, с помощью которого синтезированы исследуемые в данной работе материалы, является сочетание простота и низкой стоимости с высоким структурным совершенством и однородно-

стью синтезированных материалов [1]. Для исследуемых материалов ранее были исследованы спектры люминесценции и определены для них координаты цвета, которые находятся в оранжевой области спектра [2].

Из синтезированных порошков 10 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{GdAlO}_3$ (орторомбическая сингония, пространственная группа точечной симметрии P_{6mm}) и 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, 11 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (кубическая сингония, пространственная группа точечной симметрии $Ia\bar{3}d$) после их соответствующей термообработки (прикалывания) приготавливались образцы в виде таблеток. Для образцов 10 ат. % $\text{Eu}:\text{GdAlO}_3$ средний радиус нанокристаллов составлял ~24 нм, а для 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и 11 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – ~20 нм.

Возбуждение люминесценции осуществлялось на длине волны 0,355 мкм импульсами излучения третьей гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом с длительностью

20 нс. Люминесценция регистрировалась на длине волны 0,605 мкм, соответствующей переходу ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ иона европия Eu^{3+} .

На рисунке 1 представлены кинетики затухания люминесценции для исходного (синтезированного) и прокаленных при температурах 800 °C и 1300 °C образцов 10 ат.% $\text{Eu}:\text{GdAlO}_3$.

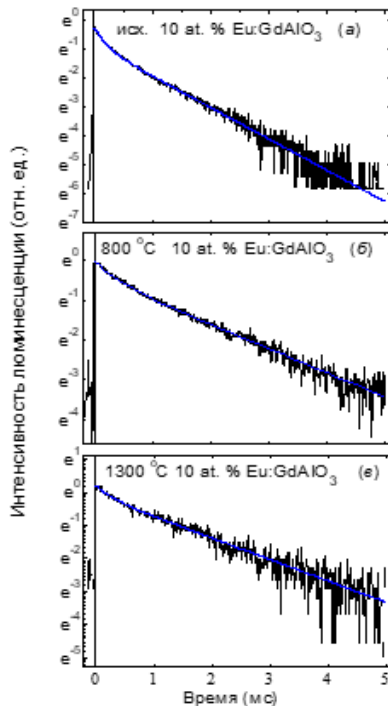


Рисунок 1 – Кинетики затухания люминесценции исходного (а) и прокаленных при температурах 800 °C (б) и 1300 °C (в) образцов 10 ат. % $\text{Eu}:\text{GdAlO}$.

Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных данных двухэкспоненциальной функцией с помощью метода наименьших квадратов. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9980$ (а); 0,9914 (б); 0,9815 (в)

Для всех образцов кинетика затухания не является моноэкспоненциальной и может быть описана двухэкспоненциальной функцией $I(t) = I_1(t) + I_2(t) = I_{10}\exp(-t/\tau_1) + I_{20}\exp(-t/\tau_2)$, где $I(t)$ – интенсивность люминесценции. Для исходного образца времена быстрой и медленной компонент затухания составляют $\tau_1 = 0,2$ мс и $\tau_2 = 0,9$ мс. Для термообработанных образцов времена затухания τ_1 и τ_2 одинаковы и равны $\tau_1 = 0,3$ нс и $\tau_2 = 1,6$ мс. При этом относительный вклад быстрой компоненты затухания в общий общую интенсивность люминесценции $[\int I_1(t)dt / \int I(t)dt]$ уменьшается при термообработке и составляет 14,9, 9,5 и 6,5 % соответственно для исходного и прокаленных при температурах 800 °C и 1300 °C образцов.

Быструю компоненту τ_1 затухания можно отнести к ионам европия, находящимся в аморфной фазе и дефектах кристаллической решетки, а медленную компоненту τ_2 затухания отнести к ионам европия в нанокристаллах GdAlO_3 . Термообработка

приводит к уменьшению доли аморфной фазы в образце, а также к снижению дефектности нанокристаллической фазы и, следовательно, к ослаблению безызлучательной релаксации, что проявляется в уменьшении вклада быстрой компоненты затухания (величины A_1) и возрастании времени τ_2 .

На рисунке 2 приведены кинетики затухания люминесценции для исходного и прокаленных при температурах 800 °C и 1300 °C образцов 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и 11 ат.% $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

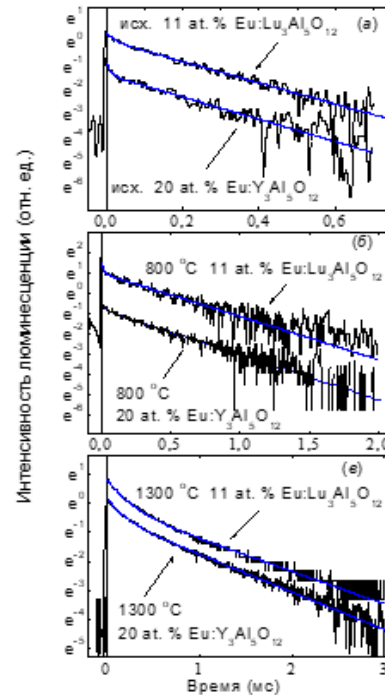


Рисунок 2 – Кинетика затухания люминесценции исходного (а) и прокаленных при температурах 800 °C (б) и 1300 °C (в) образцов 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и 11 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных данных двухэкспоненциальной функцией с помощью метода наименьших квадратов.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9769$ и 0,9427 (а); 0,9333 и 0,9741 (б); 0,9745 и 0,9970 (в)

Для образцов 20 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и 11 ат. % $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, также, как и для 10 ат. % $\text{Eu}:\text{GdAlO}$, кинетика затухания люминесценции не является одноэкспоненциальной и может быть представлена в виде суммы двух экспонент – быстрой и медленной с постоянными времени τ_1 и τ_2 . Для исходного образца $\tau_1 = 0,01$ мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), 0,02 мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и $\tau_2 = 0,2$ мс для обоих образцов. Быструю компоненту τ_1 затухания можно связать с ионам европия в аморфной фазе и дефектах кристаллической решетки, а медленную компоненту τ_2 – с ионам европия в нанокристаллах. Термообработка приводит к увеличению времен затухания. При прокаливании при 800 °C времена $\tau_1 = 0,04$ мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), 0,14 мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и $\tau_2 = 0,5$ мс для обоих образцов. После прокаливании при

1300 °C: $\tau_1 = 0,14$ мс, $\tau_2 = 0,8$ мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и $\tau_1 = 0,18$ мс, $\tau_2 = 0,9$ мс ($\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Относительный вклад быстрой компоненты затухания $[I_1(t)dt/I(t)dt]$ после термообработки увеличивается с 3,0 % до 12,5 % (1300 °C) для $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и с 3,2 % до 23,1 % (1300 °C) для $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Наблюдаемое увеличение при прокаливании образцов времени затухания люминесценции и относительного ее вклада для быстрой компоненты увеличивает немонотонный характер затухания и, вероятнее всего, связано с конкуренцией эффектов уменьшения доли аморфной фазы в образце и снижения дефектности нанокристаллической фазы с эффектом концентрационного тушения люминесценции.

Если затухание люминесценции не является монотонным, то в некоторых случаях интерес представляет ее средняя длительность. Исходя из математического определения среднего значения функции, средняя длительность

люминесценции можно определить по формуле $\tau_{\text{cp}} = \int tI(t)dt / \int I(t)dt$. Следует отметить, что в случае монотонного затухания значение τ_{cp} будет равно ее постоянной времени затухания. Для образца 10 ат. % $\text{Eu}:\text{GdAlO}$ τ_{cp} составляет 0,8 мс для исходного и 1,3 мс для термообработанных образцов. Для образцов $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Eu}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ τ_{cp} одинаково и составляет 0,2 мс для исходного и 0,4 мс и 0,65 мс для прокаленных при температуре 800 °C и 1300 °C соответственно.

Литература

1. Chemistry – A European Journal / E. Carlos [et. al.]. – 2020 – Vol. 26 – P. 9099–9125.
2. Спектрально-люминесцентные свойства нанокристаллов иттрий(лютеций)-алюминиевого гранатов и алюмината гадолиния, активированных ионами европия / Юмашев К.В. [и др.] // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2022, 16–18 ноября 2022 г., Минск, Республика Беларусь. – БНТУ, Минск. – С. 419–421.

УДК 535 012.2 621.373.826.038.82

ХАОТИЧЕСКИЕ И СТОХАСТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРАХ С АНИЗОТРОПНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Свирина Л.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. На основании экспериментально апробированных моделей проанализированы сценарии возникновения детерминированного хаоса, а также причины появления индуцированных шумом сложных хаотических и стохастических колебаний в лазерах класса А и класса В с анизотропными резонаторами при наличии линейной связи волн генерации. Установлено, что для сложной динамики в анизотропных лазерах с различными активными средами характерны следующие общие свойства: наличие асимметричного хаоса, локализованного в цилиндрическом фазовом пространстве и, вследствие инволютивной симметрии моделей, бистабильности таких аттракторов, а также индуцированных шумом стохастических колебаний, возникающих при рождении периодического режима вблизи порога генерации.

Ключевые слова: анизотропные лазеры с линейной связью, хаотические и стохастические колебания.

CHAOTIC AND STOCHASTIC OSCILLATIONS IN ANISOTROPIC-CAVITY LASERS

Svirina L.P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. On the basis of the experimentally tested models the routes to deterministic chaos and the reasons for the appearance of the noise-induced complicated chaotic and stochastic oscillations in anisotropic-cavity class A and class B lasers with linear coupling of the emitted waves have been elucidated. It has been shown that complicated dynamics of anisotropic-cavity lasers with different active media manifests the followings common features: localized in cylindrical phase space asymmetric chaos, and due to the involutive symmetry of the models, the bistability of such attractors, as well as noise-induced stochastic oscillations, arising when the Hopf bifurcation line comes closely to the lasing threshold.

Key words: anisotropic-cavity lasers with linear coupling, deterministic and noise-induced chaos.

*Адрес для переписки: Свирина Л.П., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: lpsvirina@bntu.by*

Проведено обобщение полученных результатов с целью создания представлений о механизмах формирования сложных (хаотических и стохастических) режимов генерации в анизотропных лазерах класса А и класса В с линейной связью генерируемых волн.

Динамика генерации одномодового четырех-частотного кольцевого газового лазера (ЧКГЛ) подробно изучена в работе [1], где показано, что учет эллиптичности в условиях многомодовой генерации в зависимости от коэффициента линейной связи r приводит к возникновению сложных