

## Влияние температуры на люминесцентные свойства керамики $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$ , синтезированной методом искрового плазменного спекания

© Е.Ф. Полисадова, В.А. Ваганов, Д.Т. Валиев, С.А. Степанов, В.Д. Пайгин, Э.С. Двилис, О.Л. Хасанов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

E-mail: dtdamirka@gmail.com

Поступила в Редакцию 6 мая 2019 г.

В окончательной редакции 6 мая 2019 г.

Принята к публикации 14 мая 2019 г.

Методом электроимпульсного плазменного спекания синтезированы образцы прозрачной керамики  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$ . Исследованы оптические свойства, фото- и катодолюминесценция, кинетики затухания свечения, изучено влияние температуры на спектрально-кинетические характеристики люминесценции. В спектрах регистрируется свечение ионов  $\text{Dy}^{3+}$  458 ( ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^5H_{15/2}$ ), 480 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ ), 573 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ ), 665 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$ ), 750 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$ ), примесных ионов хрома  $\text{Cr}^{3+}$  ( ${}^2E_g \rightarrow {}^4A_{2g}$ ), собственных [6 дефектов  $F^+$ -центров (460 nm). Наблюдается температурное тушение люминесценции в видимом спектральном диапазоне при изменении температуры от 100 до 300 К. Показано, что в керамике  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$  закономерности тушения для примесных и собственных центров различаются. Обсуждаются механизмы температурного тушения.

**Ключевые слова:** алюмомагниева шпинель, люминесцентная керамика, Спарк-плазменное спекания, редкоземельные элементы.

DOI: 10.21883/FTT.2019.10.48263.472

### 1. Введение

Термические, механические и оптические свойства алюмо-магниева шпинели (АМШ) определяют широкий спектр ее применения в качестве функционального материала фотоники и оптики [1,2]. Шпинель находит применение в качестве материала для пассивной оптики [3] для активных элементов лазеров [4,5], сцинтилляторов [6], термолюминесцентной дозиметрии [7], как преобразователя излучения для „белых“ светодиодов [8–10]. Физико-химические свойства оптически прозрачной поликристаллической АМШ во многом превосходят свойства оптических материалов в стеклообразном и монокристаллическом состоянии [11,12], что определяет перспективность ее применения. Известно также, что АМШ способна удерживать большое количество двухвалентных и трехвалентных катионов в твердом растворе [13], что позволяет создавать активированные материалы для преобразователей излучений, лазерной техники и т.д. В работе [14] авторы показали возможность использования шпинели, активированной ионами диспрозия для высокодозной дозиметрии. Ярко-синий люминофор  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$  с высокой световой эффективностью был синтезирован в работе [15] методом твердотельной реакции. Нанопоршок  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$  (1–11 mol.%) для „белого света“ был синтезирован и исследован авторами [16]. Квантовая эффективность такого люминофора составляет ~ 66%, показана его хорошая фотокаталитическая активность

под воздействием УФ-света. Авторы полагают, что процесс возбуждения и релаксации ионов диспрозия  $\text{Dy}^{3+}$  происходит с участием вакансии магния  $V_{\text{Mg}}$ , комплексы  $V_{\text{Mg}}\text{O}_{12}$  играют роль акцептора. Люминесцентные свойства алюмосиликата магния, активированного диспрозием  $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}:\text{Dy}$  были исследованы в работе [17]. Показана роль кислородных вакансий в процессе люминесценции и возможность регулирования цветовых характеристик свечения люминофора посредством отжига, а также перспективность его применения для получения теплого белого света в комбинации с УФ-светодиодом. При содопировании шпинели европием и диспрозием, как показано в работе [18], путем изменения температуры отжига образцов от 700°C до 900°C наблюдается сдвиг цветовых координат в красную область спектра. Предполагается, что это может происходить за счет переноса заряда  $\text{O} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$  лиганд-металл, при этом в спектре люминесценции шпинели могут возбуждаться одновременно полосы  $\text{Eu}^{2+}$  и  $\text{Eu}^{3+}$ . Нанопоршки  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$ , согласно работе [9], обладают высокой квантовой эффективностью люминесценции, ~ 67%. В работе [19] обсуждается влияние иона  $\text{Dy}^{3+}$  на эффективность люминесценции и послесвечение европия в шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ . Наблюдается увеличение интенсивности полосы свечения 480 nm, которая связана с переходом  $4f^6 5d^1 \rightarrow 4f^7$  в ионе  $\text{Eu}^{2+}$  и изменение кинетики послесвечения. Возможно, что вклад в послесвечение дает свечение  $V_k^{3+}$ -центров, как предполагают авторы [19]. Авторы работы [20] связывают широко-

полосное свечение с максимумом на 460 nm (2.7 eV) положительно заряженным вакансиям,  $F^+$ -центрам, в кристаллах шпинели  $MgAl_2O_4$ , однако данное свечение не обладает высоким квантовым выходом ( $\sim 20\%$ ). Таким образом, шпинель, активированная диспрозием, является перспективным многофункциональным люминесцентным материалом. Исследования последних лет подтверждают перспективность использования шпинели в виде керамики [1,8,21], в том числе и для светодиодных применений. В основном, результаты по исследованию люминесцентных свойств  $MgAl_2O_4:Dy^{3+}$  получены на нанопорошках или кристаллах. Однако, как показывает анализ, большое влияние на люминесцентные свойства активированной шпинели оказывает наличие собственных и примесных дефектов. В связи с этим актуальным является разработка технологий получения керамики на основе АМШ, активированной диспрозием и поиск способов получения образцов керамики с оптимальными люминесцентными свойствами.

Традиционным способом синтеза  $MgAl_2O_4$  керамики является твердофазная реакция между  $MgO$  высокой чистоты и  $Al_2O_3$  с последующим спеканием. Температура для такой реакции составляет более  $1400^\circ C$ . В последние десятилетия наблюдается значительный прогресс в технологиях синтеза прозрачной керамики АМШ [1–3]. Одним из наиболее эффективных является метод электроимпульсного плазменного спекания (СПС). Короткое время спекания, характерное для метода СПС, обеспечивает минимальный рост зерен исходных компонентов, формирование совершенных межзеренных границ, равномерное распределение плотности в объеме керамики, и, соответственно, высокое оптическое качество материала [12,22–24]. В данной работе образцы керамики на основе шпинели, допированной диспрозием впервые получены методом СПС [23]. Целью данной работы является разработка технологических условий синтеза нанокерамики оптического качества  $MgAl_2O_4:Dy^{3+}$  методом СПС и комплексное исследование люминесцентных свойств полученных образцов.

## 2. Образцы и методика эксперимента

В качестве исходных материалов для изготовления образцов люминесцентной керамики были использованы коммерческие нанопорошки алюмомагниевого шпинели (S30CR, Baikowski Malakoff Inc. США, чистота 99.999%, средний размер частиц 200 nm), и порошок оксида диспрозия  $Dy_2O_3$  (Университет науки и искусств Чунцин, Китай, средний размер частиц 100 nm), 0.1 wt.%. Смешивание порошковых компонентов проводили путем мощного ультразвукового воздействия ( $\approx 1.2$  kW) в этаноле. Длительность воздействия составляла 20 min. Полученную смесь прокаливали в сушильном шкафу при температуре  $160^\circ C$  до полного испарения влаги.

Спекание порошковых смесей и не допированного порошка АМШ проводили методом электроимпульсного

плазменного спекания на установке SPS 515S (Syntex Inc., Япония). Процесс проводили в вакууме  $10^{-3}$  Pa при температуре  $1400^\circ C$  со скоростью нагрева  $5^\circ C/min$ . Давление подпрессовки в графитовой пресс-форме было постоянным — 72 МПа. Длительность изометрической выдержки — 10 min.

Полученные образцы люминесцентной керамики цилиндрической формы высотой 2.5 mm, диаметром 20 mm. Дальнейшие исследования керамики выполняли после механической полировки ее торцевых поверхностей при помощи полировально-шлифовальной системы 300 Pro (Buehler, Германия) с применением алмазных суспензий MetaDi (Buehler, Германия).

Оптические свойства образцов в видимой и ближней ИК областях исследованы на двухлучевых сканирующих спектрофотометрах СФ-256 УВИ (190–1100 nm) и СФ-256 БИК (1000–2500 nm). Для возбуждения катодлюминесценции (КЛ) использовался малогабаритный высокоэнергетический ускоритель электронов ГИН-600 на основе вакуумного диода, входящий в состав импульсного оптического спектрометра. Ускоритель является источником импульсов электронов с длительностью на полувывоте  $\sim 10$  ns и средней энергией 250 keV. Плотность энергии возбуждения составляла  $\sim 70$  mJ/cm<sup>2</sup>. Интегральные спектры КЛ зарегистрированы оптоволоконным спектрометром AvaSpec-2048 (200–1100 nm), временное окно интегрирования 250 ms. Кинетика затухания люминесценции регистрировалась с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-106 и цифрового осциллографа LeCROY 6030A. Для фотовозбуждения и регистрации спектров возбуждения использовался флуоресцентный спектрофотометр Agilent Cary Eclipse.

## 3. Результаты и их обсуждение

Синтезированная керамика  $MgAl_2O_4:Dy^{3+}$  прозрачна в видимом и ИК-диапазонах (рис. 1). Край оптического поглощения образца шпинели лежит в области 300 nm. В видимой области ( $\sim 700$  nm) пропускание составляет около 40%, а в ИК области ( $\sim 1500$  nm) 60% при толщине образца 1.5 mm.

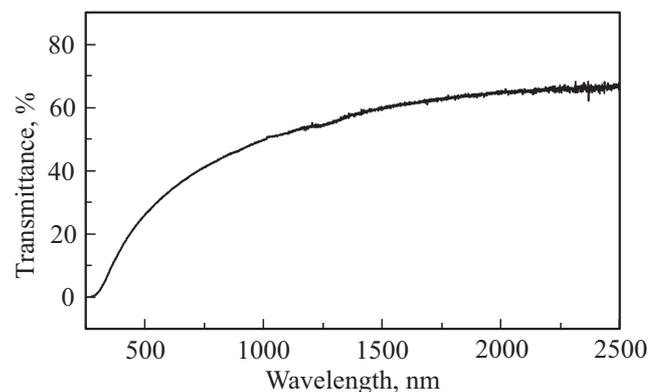


Рис. 1. Спектр пропускания  $MgAl_2O_4:Dy^{3+}$  шпинели.

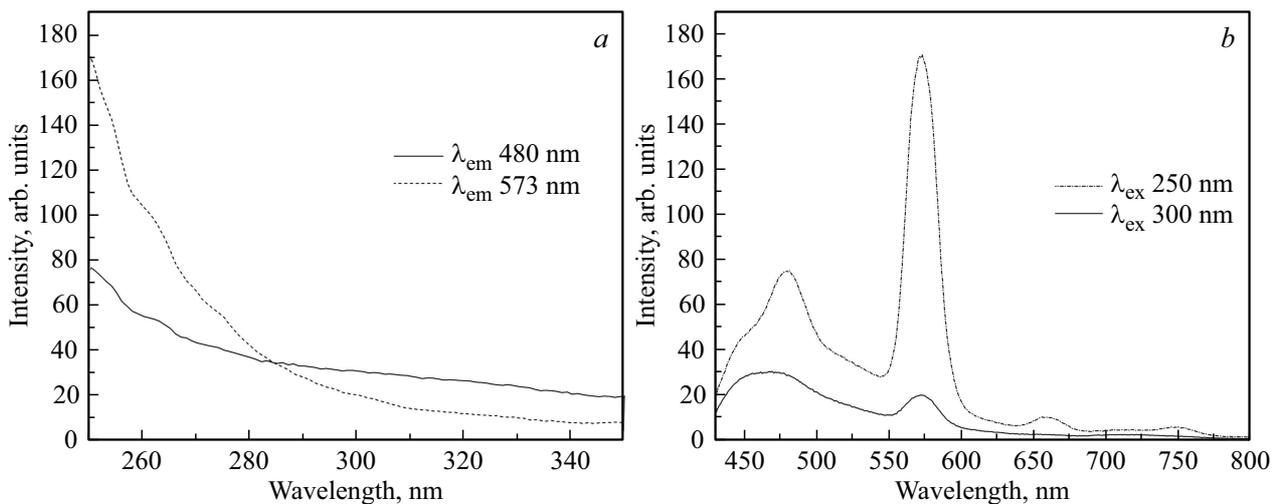


Рис. 2. Спектры возбуждения (а) и фотолюминесценции (б) образца нанокерамики  $MgAl_2O_4:Dy^{3+}$ .

В спектре фотолюминесценции керамики  $MgAl_2O_4:Dy$  регистрируются полосы свечения, обусловленные излучательными переходами в ионе  $Dy^{3+}$ : 480 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ ), 573 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ ), 665 nm ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$ ) (рис. 2, б). Слабый пик в области 750 nm (рис. 2, б) может быть приписан переходу  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$  в ионе диспрозия, согласно [25]. Следует отметить, что данная полоса свечения ранее не была зарегистрирована в спектрах АМШ, активированной диспрозием. При возбуждении излучение с  $\lambda = 250$  nm в составе „синей“ полосы свечения диспрозия наблюдается слабовыраженный пик на 458 nm (рис. 2, б). Авторы [26] наблюдали подобное свечение в иттрий-алюмо-боратных фосфорах, активированных ионами диспрозия (YAB:Dy), который приписывается излучательному переходу  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^5H_{15/2}$ . На рис. 2, а приведен спектр возбуждения  $MgAl_2O_4:Dy$ , где показано, что максимум возбуждения основных полос лежит в области спектра с  $\lambda < 250$  nm. Высокая степень рассеяния образца в данной области не позволяет детально измерить возбуждения в коротковолновой области. В работе [15] авторы зарегистрировали в этой области несколько полос возбуждения для  $\lambda_{em} = 480$  nm (300, 316, 340, 345, 369, 380 nm) которые связаны переходами из уровня основного состояния  ${}^6H_{15/2}$  на возбужденные уровни  ${}^6P_{3/2}$ ,  ${}^6P_{7/2}$ ,  ${}^6P_{5/2}$ ,  ${}^4G_{11/2}$ ,  ${}^4I_{15/2}$  и  ${}^4F_{9/2}$  иона  $Dy^{3+}$ , соответственно. Как показывают наши результаты, для образца керамики возбуждение наиболее эффективно происходит при облучении светом с  $\lambda = 250$  nm (рис. 2, а).

При возбуждении образца  $MgAl_2O_4:Dy$  потоком ускоренных электронов наблюдается интенсивная люминесценция в области 350–800 nm (рис. 3). Спектр катодолюминесценции (КЛ) был зарегистрирован после однократного воздействия электронным импульсом, время интегрирования сигнала составляло 250 ms. В спектре наблюдается выраженная полоса свечения иона диспрозия с  $\lambda_{max} = 573$  nm. Кроме того, наблюдается

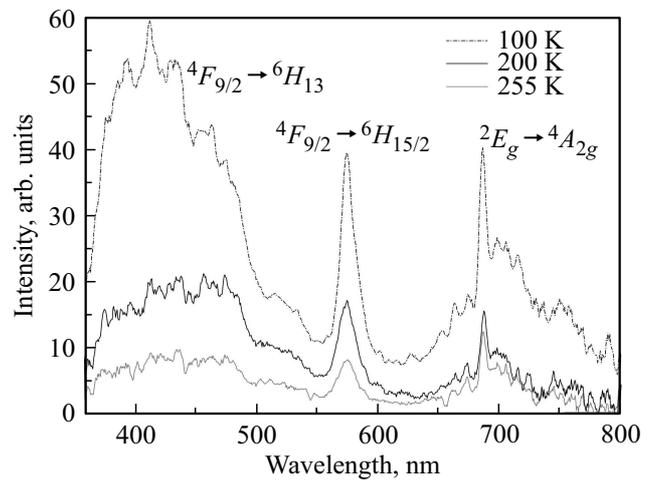
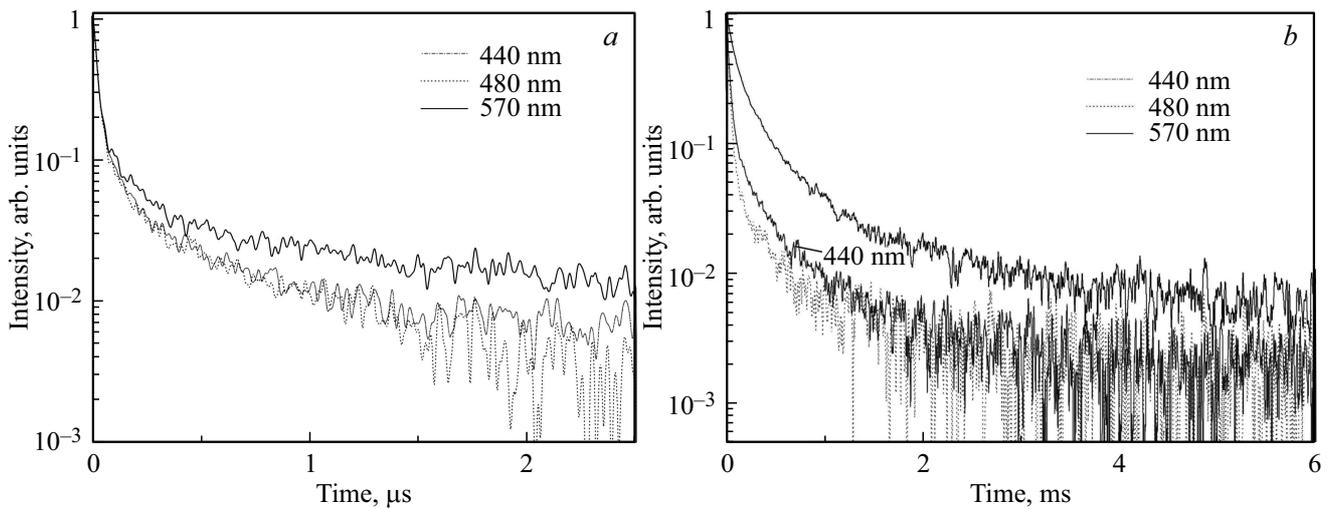


Рис. 3. Интегральный спектр катодолюминесценции шпинели  $MgAl_2O_4:Dy^{3+}$ , измеренный при различных температурах.

широкополосное свечение в „синей“ области спектра со слабовыраженным максимумом в области 440–480 nm при комнатной температуре. Надо полагать, что в составе этой полосы присутствует свечение диспрозия, соответствующее переходам  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$  (480 nm) и  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^5H_{15/2}$  (458 nm). Свечение в данной области чаще всего связывают с собственными дефектами шпинели, как например, в работах [20,27], с  $F^+$ -центрам (460 nm). В работе [28] наблюдали пик свечения на 440 nm, который авторы связывают со свечением вакансий  $Mg^{2+}$ . Кроме того, в красной области спектра наблюдается серия полос с наиболее интенсивным узком пиком на 693 nm (рис. 3). Подобное свечение характерно для АМШ [29] и обусловлено оно свечением неконтролируемой примеси хрома, ионов  $Cr^{3+}$ . На фоне свечения ионов хрома, полоса свечения на 665 nm при данных условиях эксперимента не детектируется. Как



**Рис. 4.** Кинетики затухания КЛ  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$  в полосах 400, 480 и 574 нм в микро- и миллисекундном временном диапазоне при  $T = 293$  К.

показывают результаты при возбуждении электронным пучком интенсивность свечения ионов хрома сравнима по интенсивности с люминесценцией иона-активатора  $\text{Dy}^{3+}$  в его основной полосе (573 нм).

Исследована зависимость спектральных характеристик КЛ  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$  керамики при изменении температуры в диапазоне от 100 до 300 К (рис. 3). Как показывают результаты, процессы возбуждения и люминесценции примесных и собственных дефектов АМШ являются температурно-зависимыми. Так, установлено, при повышении температуры в наблюдаемом диапазоне происходит уменьшение интенсивности свечения во всех полосах (рис. 3, *b*). Причем, изменение интенсивности люминесценции ионов диспрозия и ионов хрома происходит синхронно (полосы 573 и 693 нм), тогда как для собственного свечения (420 нм) характерна более высокая скорость спада интенсивности (рис. 3, *b*). Следует отметить, что здесь речь идет об интенсивности, интегрированной во временном окне, как описано в п. 2 (методика измерений).

Свечение центров *F*-типа в „синей“ области спектра наиболее интенсивно при низких температурах, и оно является доминирующим в спектре. При температуре ближе к комнатной, интенсивность собственной и примесной люминесценции сравнима. Температурное тушение люминесценции может быть связано с ростом температуры роли безызлучательных переходов из возбужденных уровней центров свечения. Кроме того, изменение подвижности зарядов с изменением температуры может влиять на процессы захвата электронов и перезарядку собственных дефектов в шпинели. Наблюдаемое смещение максимума „синей“ полосы при изменении температуры от 100 до 255 К может быть связано с изменением эффективности образования и возбуждения *F*-центров и вакансионных центров при электронном возбуждении.

Исследование кинетики затухания люминесценции показали следующее. Кинетика затухания КЛ в исследованных областях сложная, многокомпонентная и может быть описана суммой нескольких экспоненциальных составляющих:  $I(t) = \sum A_i \exp(-t/\tau_i)$ , где  $I(t)$  — интенсивность люминесценции,  $A_i$  — амплитуда,  $t$  — временной диапазон, и  $\tau_i$  — постоянная времени затухания люминесценции  $i$ -го компонента. Закономерности затухания свечения в полосах 440 и 480 нм в микросекундном диапазоне (рис. 4, *a, b*) близки, при этом затухание в основной полосе свечения диспрозия 574 нм происходит медленнее. Время затухания микросекундного компонента  $\tau_{\mu\text{s}}$  составляет 1.1, 1.2 и 3  $\mu\text{s}$  в полосах 440, 480 и 574 нм соответственно. Кроме того, в кинетике указанных полос присутствует кратковременной компонент  $\tau_{\text{ns}}$  с временем затухания  $> 20$  ns. На рис. 4, *b* показана миллисекундная стадия затухания в диапазоне до 8 ms. Как показывают результаты, в интервале 3–8 ms интенсивность слабо меняется. Оценка длительности медленного компонента затухания исследуемых областей показывает следующее: при комнатной температуре  $\tau_{\text{ms}}$  составляет 0.53, 0.71 и 0.84 ms в полосах 440, 480 и 574 нм соответственно.

Исследовалось влияние температуры на кинетические параметры затухания КЛ. Рост температуры от 100 до 300 К приводит к изменению кинетики люминесценции в полосе на 480 нм, в миллисекундном диапазоне (рис. 5, *a*). Это свидетельствует об изменении вероятности излучательного перехода в центре свечения и наличии потенциального барьера активации безызлучательных процессов. В этой спектральной области наблюдается спад интенсивности медленного компонента с температурой (рис. 4, *b*). При комнатной температуре время затухания при фотовозбуждении по данным работы [10] в области 480–483 нм составляет 0.35–0.4 ms для фосфора на основе шпинели с 0.01 mol.%  $\text{Dy}^{3+}$ .

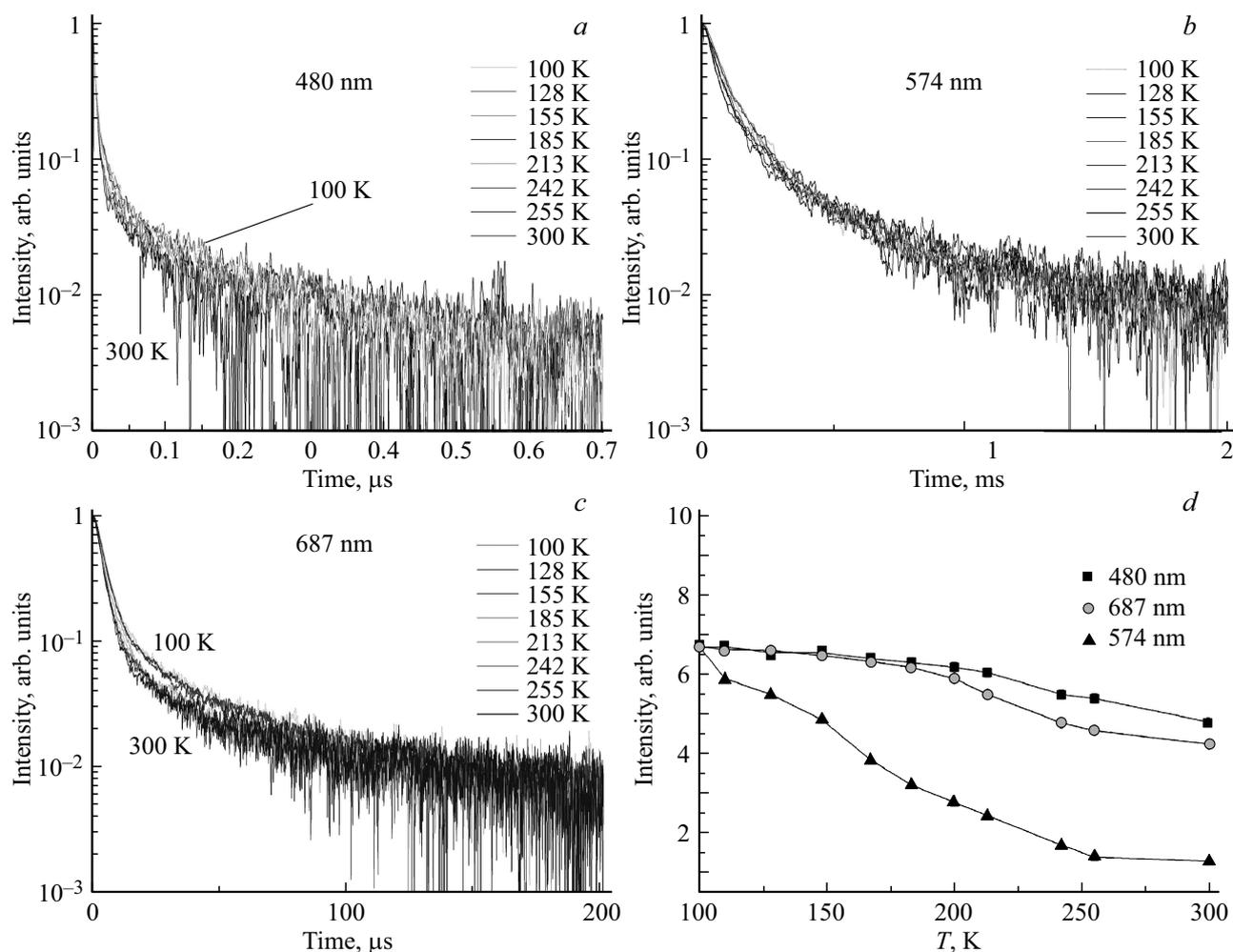


Рис. 5. Кинетики затухания КЛ в полсах 480 nm (a), 574 nm (b), 693 nm (c), d — зависимость интенсивности быстрого компонента.

В полосе свечения ионов диспрозия 573 nm изменение температуры не приводит к значительному изменению кинетики затухания (рис. 5, b). Это свидетельствует о внутрицентровом характере процесса свечения. В полосе люминесценции примесных ионов хрома  $Cr^{3+}$  также наблюдается слабая зависимость кинетики от температуры (рис. 5, c). Интенсивность, измеренная в начальный момент времени после возбуждения импульсным электронным пучком, меняется по иному закону (рис. 5, d). Наблюдается уменьшение интенсивности с ростом температуры в полосе свечения 573 nm, при этом, в полосе излучения ионов хрома 683 nm и в области собственного свечения мы наблюдаем незначительное изменение интенсивности от 5 до 6 условных единиц.

#### 4. Заключение

В данной работе исследованы оптические и люминесцентные свойства впервые синтезированной методом электроимпульсного плазменного спекания керамики на основе алюмомагниевого шпинели, допированной ионами

диспрозия (0.1 wt.%). Получены оптически прозрачные в видимой и ИК области образцы керамики, перспективной для использования в качестве функционального материала в лазерах, дозиметрах ионизирующего излучения, светодиодах.

Показаны особенности спектральных характеристик люминесценции при фото- и электронном возбуждении. В спектрах свечения регистрируются полосы свечения диспрозия 458 nm ( $^4I_{15/2} \rightarrow ^5H_{15/2}$ ), 480 nm ( $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$ ), 573 nm ( $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$ ), 665 nm ( $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{11/2}$ ), 750 nm ( $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{9/2}$ ). Следует отметить, что полосы 458 nm и 750 nm были впервые зарегистрированы и идентифицированы по АМШ, допированной диспрозием. Ранее данные полосы не наблюдались в спектрах  $MgAl_2O_4:Dy^{3+}$ . В спектрах КЛ также регистрируется свечение неконтролируемой примеси — ионов трехвалентного хрома.

Изучено влияние температуры на люминесцентные характеристики керамики  $MgAl_2O_4:Dy^{3+}$ . Наблюдается температурное тушение люминесценции во всем исследованном спектральном диапазоне, что обусловлено изменением интенсивности и амплитуды колебательных

процессов в системе, и, как следствие, увеличением числа безызлучательных переходов. Однако, установлено что закономерности тушения для примесных и собственных центров различны. Возможно, что в изменение в области свечения собственных дефектов (420–480 nm) интенсивности и кинетики затухания люминесценции с температурой связано с процессами перезарядки F-центров.

### Финансирование работы

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

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] I.A. Ganesh. *Int. Mater. Rev.* **58**, 2 (2013).
- [2] Mark Patterson, Jenni E. Caiazza, Don W. Roy, Gary Gilde. *Int. Soc. Opt. Eng.* **4102**, (2000).
- [3] М.К. Алексеев, Г.И. Куликова, М.Ю. Русин, Н.Н. Саванина, С.С. Балабанов, А.В. Беляев, Е.М. Гавришук, А.В. Иванов, Р.Н. Ризаханов. *Неорган. материалы* **52**, 3 (2016).
- [4] A. Jouini, A. Yoshikawa, A. Brenier, T. Fukuda, G. Boulon. *Phys. Status Solidi* **4**, 3 (2007).
- [5] K. Lemanski, P.J. Deren, W. Walerczyk, W. Strek, R. Boulesteix, R. Epherre. *J. Rare Earths*. **32**, 3 (2014).
- [6] C.F. Chen, F.P. Doty, R.J.T. Houk, R.O. Loutfy, H.M. Volz, P. Yang. *J. Am. Ceram. Soc.* **93**, 8 (2010).
- [7] K.K. Satapathy, G.C. Mishra. *J. Optoelectr. Adv. Mater.* **17**, 5 (2015).
- [8] J. Chen, H. Lan, Y. Cao, Z. Deng, Z. Liu, F. Tang, W. Guo. *J. Alloy. Compd.* **709**, 30 (2017).
- [9] K. Panigrahi, S. Saha, S. Sain, R. Chatterjee, A. Das, U.K. Ghorai, D.N. Sankar, K.K. Chattopadhyay. *Dalton Transact.* **47**, 35 (2018).
- [10] I. Omkaram, S. Buddhudu. *Opt. Mater.* **32**, 1 (2009).
- [11] Е.С. Лукин, Н.А. Попова, В.С. Глазачев, Л.Т. Павлюкова, Н.А. Куликов. *Конструкции из композиционных материалов*. **3**, 139 (2015).
- [12] А.А. Качаев, Д.В. Гращенков, Ю.Е. Лебедева, С.С. Солнцев. *Стекло и керамика* **4** (2016).
- [13] E. Alagu Raja, Bhushan Dhabekar, Sanjeev Menon, S.P. More, T.K. Gundu Rao, R.K. Kher. *Indian J. Pur. Appl. Phys.* **47**, 421 (2009).
- [14] K. Kabita Satapathy, G.C. Mishra. *J. Chem.* **2013**, 930818 (2013).
- [15] I. Omkaram, S. Buddhudu. *Opt. Mater.* **32**, 1 (2009).
- [16] C. Pratakumar, S.C. Prashantha, H. Nagabushana, M.R. Anilkumar, C.R. Ravikumar, H.P. Nagaswarupa, D.M. Jnaneshwara. *J. All. Comp.* **728**, 1124 (2017).
- [17] C.Z. Sun, Q.S. Qin, M. Sun, X. Jiang, X. Zhang, Y. Wang. *Phys. Chem. Ann Chem. Phys.* **16**, 23 (2014).
- [18] Alessandra S. Maia, Roberval Stefani, Cláudia A. Kodaira, Maria C.F.C. Felinto, Ercules E.S. Teotonio, Hermi F. Brito. *Opt. Mater.* **31**, (2008).
- [19] Haoyi Wu, Yahong Jin. *J. Physica B* **488**, 1 (2016).
- [20] S. Sawai, T. Uchino. *J. Appl. Phys.* **112**, 103523 (2012).
- [21] Kai Li, Hao Wang, Xin Liu, Weimin Wang, Zhengyi Fu. *J. Eur. Cer. Soc.* **37**, 13, (2017).
- [22] S.F. Wang, J. Zhang, D.W. Luo, F. Gu, D.Y. Tang, Z.L. Dong, G.E.B. Tan, W.X. Que, T.S. Zhang, S. Li, L.B. Kong. *Progr. Solid State Chem.* **41**, 1 (2013).
- [23] O.L. Khasanov, E.S. Dvilis, A.O. Khasanov, E.F. Polisadova, A.A. Kachaev. *J. Phys. Status Solidi C* **10**, 1 (2013).
- [24] C. Wanga, Z. Zhao. *Scripta Mater.* **61**, 4 (2009).
- [25] М.А. Ельяшевич. *Атомная и молекулярная спектроскопия*. 2-е изд. Эдиториал УРСС, М. (2001). 896 с.
- [26] G.V. Lokeswara Reddy, L. Rama Moorthy, B.C. Jamalalaih, T. Sasikala Preparation. *Ceram. Int.* **39**, 1 (2013).
- [27] A. Lushchik, S. Dolgov, E. Feldbach, R. Pareja, A.I. Popov, E. Shablonin, V. Seeman. *Nuc. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **435**, 15 (2017).
- [28] S.K. Gupta, P. Ghosh, N. Pathak, R. Kadam. *RSC Adv.* **2016**, 49 (2016).
- [29] D. Valiev, O. Khasanov, E. Dvilis, S. Stepanov, E. Polisadova, V. Paygin. *Cer. Int.* **44**, 20768 (2018).

*Редактор Т.Н. Василевская*