

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ  
И НАНОМАТЕРИАЛЫ

УДК 546.161

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ФТОРЦИРКОНАТНЫХ СТЕКОЛ, СОДЕРЖАЩИХ  
ИОНЫ ЦЕРИЯ И МАРГАНЦА

© 2022 г. М. Н. Бреховских<sup>а</sup>, \*, Н. Ю. Кирикова<sup>б</sup>, Л. В. Моисеева<sup>с</sup>,  
В. А. Козлов<sup>б</sup>, В. А. Кондратюк<sup>б</sup>, В. Н. Махов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский пр-т, 53, Москва, 119991 Россия

<sup>с</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: mbrekh@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 24.11.2021 г.

После доработки 17.12.2021 г.

Принята к публикации 21.12.2021 г.

Проведены исследования спектрально-кинетических свойств люминесценции фторидных цирконатных стекол состава  $57\text{ZrF}_4 \cdot 33\text{BaF}_2 \cdot 6\text{CeF}_3 \cdot 4\text{AlF}_3$ , легированных ионами марганца в концентрациях 2–4 мол. %. Продемонстрирован эффект красного смещения пика полосы  ${}^4T_1(G) \rightarrow {}^6A_1$  люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  от 570 до 580 нм при увеличении концентрации легирующих ионов от 2 до 4 мол. %. Красное смещение связано с увеличением (при повышении концентрации) числа образующихся пар ионов  $\text{Mn}^{2+}-\text{Mn}^{2+}$ , дающих более длинноволновую люминесценцию, чем отдельные ионы  $\text{Mn}^{2+}$ . Анализ кинетики люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  показал отсутствие заметного концентрационного тушения люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  при концентрации легирования до 4 мол. %. Показано, что данные стекла, обладающие широкополосной люминесценцией в оранжевой области спектра, имеют потенциал для практического применения в светодиодных источниках белого света.

**Ключевые слова:** фторцирконатные стекла, ионы марганца, люминесценция, красное смещение

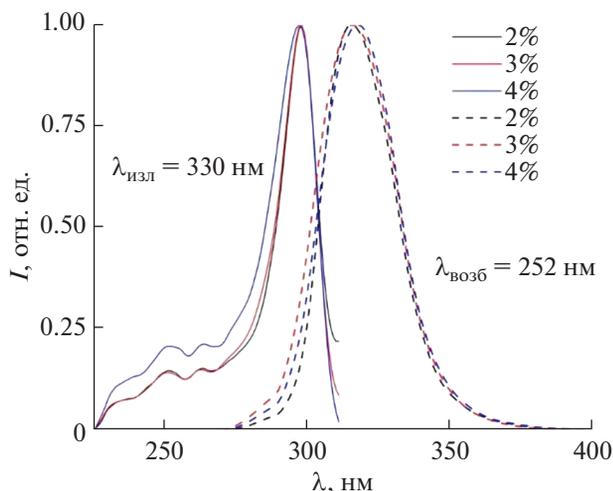
DOI: 10.31857/S0044457X22070042

ВВЕДЕНИЕ

Стекла на основе фторидов тяжелых металлов, активированные ионами церия, на протяжении длительного периода рассматривались как перспективные быстрые сцинтилляторы для радиационных детекторов, используемых в экспериментах по физике высоких энергий [1–6]. Однако существенным недостатком таких стекол является невысокий световыход сцинтилляции (0.5–1% от NaI). Для повышения световыхода стекла соактивировали другими оптически активными ионами. Например, соактивирование стекол ионами марганца позволяет увеличить световыход в несколько раз [1]. К сожалению, при этом существенно возрастает длительность сцинтилляции, поэтому фторидные стекла, соактивированные церием и марганцем, не нашли широкого применения в сцинтилляционной технике. С другой стороны, фторидные стекла, активированные марганцем, активно исследуются как возможные люминофоры для использования в светодиодных источниках белого света [7, 8], в том числе для решения проблемы получения теплого белого света. Холодный белый свет, получаемый в стандартных светодиодных лампах белого света,

основанных на комбинации синего светодиода и желтого люминофора типа YAG : Ce, может быть преобразован в теплый белый свет, комфортный для человеческого глаза, с помощью добавления в спектр излучения лампы красного люминофора, излучающего узкополосный спектр в диапазоне 610–650 нм [9–13]. Наиболее перспективными считаются фторидные люминофоры, активированные ионами  $\text{Mn}^{4+}$ , которые испускают узкополосный спектр в красной области и имеют достаточно сильное поглощение в синей области [14–18].

Во фторидных цирконатных стеклах ионы  $\text{Mn}^{2+}$  дают зеленую полосу люминесценции с пиком в области 550 нм, обусловленную переходом  ${}^4T_1(G) \rightarrow {}^6A_1$  в ионе  $\text{Mn}^{2+}$ . В работах [7, 8] было установлено, что при частичном замещении фтора в составе стекла хлором полоса люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  смещается в красную область до 615 нм. С другой стороны, известно, что длинноволновое смещение полосы люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  можно получить также путем повышения концентрации ионов  $\text{Mn}^{2+}$  [19–21].



**Рис. 1.** Нормированные спектры люминесценции (при возбуждении на длине волны 252 нм) и возбуждения люминесценции (регистрация на длине волны 330 нм) ионов  $\text{Ce}^{3+}$  для стекол, активированных ионами  $\text{Mn}^{2+}$  в концентрации 2, 3 и 4 мол. %.

В настоящей работе исследованы спектрально-кинетические свойства люминесценции фторидных цирконатных стекол состава  $57\text{ZrF}_4 \cdot 33\text{BaF}_2 \cdot 6\text{CeF}_3 \cdot 4\text{AlF}_3$ , активированных ионами марганца в достаточно больших концентрациях (2–4 мол. %), с целью оценки возможности получения на основе таких стекол перспективных люминофоров для светодиодных источников теплого белого света.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза стекол использовали следующие исходные вещества:  $\text{ZrF}_4$  (Sigma-Aldrich, 99.9%),  $\text{BaF}_2$  (Lanhit Ltd., 99.998%),  $\text{CeF}_3$  (Lanhit Ltd., 99.99%),  $\text{AlF}_3$  (Sigma-Aldrich, 99.9%),  $\text{MnF}_2$  (Lanhit Ltd., 99.99%).

Фторцирконатные стекла состава  $57\text{ZrF}_4 \cdot 33\text{BaF}_2 \cdot 6\text{CeF}_3 \cdot 4\text{AlF}_3$  были получены сплавлением исходных фторидов при 850–900°C. Ионы марганца вводили в виде  $\text{MnF}_2$  в концентрации от 2.0 до 4.0 мол. %. Смесь компонентов загружали в тигель из стеклоуглерода, закрепленный на Ni-держателе, затем тигель помещали в кварцевый реактор, заполненный осушенным аргоном. Одновременно с тиглем в кварцевый реактор помещали латунную форму для литья. Реактор с шихтой и латунной формой помещали в печь сопротивления с двумя независимыми зонами нагрева. В высокотемпературной зоне проводили синтез стекла: выдержка при 150°C в течение 30 мин для удаления сорбированной воды, нагревание до температуры синтеза и выдержка 40 мин. В низкотемпературной зоне печи латунная форма на-

гревалась до температуры стеклования  $T_g = 260^\circ\text{C}$ . После плавления тигель охлаждали до 650°C, держатель с тиглем сдвигали в низкотемпературную зону, разворачивали и расплав выливали в латунную форму, которую затем охлаждали в токе аргона до комнатной температуры.

Спектры люминесценции исследовали на установке, созданной на базе светосильного монохроматора МДР-12, управляемого с персонального компьютера через контроллер КСП-3.3.001.0 (ОКБ “Спектр”) [8]. В качестве источника возбуждения использовали светодиод LCS-0400-03-11 (максимум полосы излучения при 400 нм) фирмы Mightex, управляемый контроллером SLA-1000-2, излучающий квазимонохроматический свет с шириной полосы на полувысоте ~10 нм. Спектры возбуждения люминесценции и кинетику люминесценции анализировали, используя спектрофлуориметр СМ 2203 (“Солар”, Республика Беларусь). Источник излучения в приборе – импульсная ксеноновая лампа FX-4401 (Perkin-Elmer Optoelectronics) с длительностью импульса несколько микросекунд, что позволяет проводить кинетические исследования люминесценции в субмиллисекундном временном диапазоне. Типичное спектральное разрешение при измерении спектров люминесценции и возбуждения люминесценции составляло 2 нм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны спектры люминесценции и возбуждения люминесценции стекол в УФ-области, где оптические свойства обусловлены межконфигурационными переходами  $4f \leftrightarrow 5d$  в ионе  $\text{Ce}^{3+}$ . Спектр люминесценции  $\text{Ce}^{3+}$  обычно представляет собой “дублет”, две полосы которого обусловлены переходами с нижайшего  $5d$ -уровня на расщепленные спин-орбитальным взаимодействием уровни  ${}^2F_{5/2}$  и  ${}^2F_{7/2}$  основного  $4f$ -состояния  $\text{Ce}^{3+}$ . Однако в исследованных стеклах из-за сильного неоднородного уширения эти две полосы перекрываются, и “дублетная” структура проявляется в несимметричной форме общей широкой полосы люминесценции. Интересным фактом является наличие люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  при возбуждении в полосе церия, что указывает на эффективную передачу энергии от церия на марганец (см. ниже).

На рис. 2 показаны спектры люминесценции трех образцов стекол с концентрацией марганца 2, 3 и 4 мол. % при внутрицентровом возбуждении ионов  $\text{Mn}^{2+}$  на переходе  ${}^6A_1 \rightarrow [{}^4E({}^4G), {}^4A_1({}^4G)]$ . Видно, что наблюдается заметное длинноволновое (красное) смещение полосы люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  при увеличении концентрации. Причем для концентрации 2 мол. % пик полосы уже смещен до 570 нм по сравнению с пиком при 550 нм, ко-

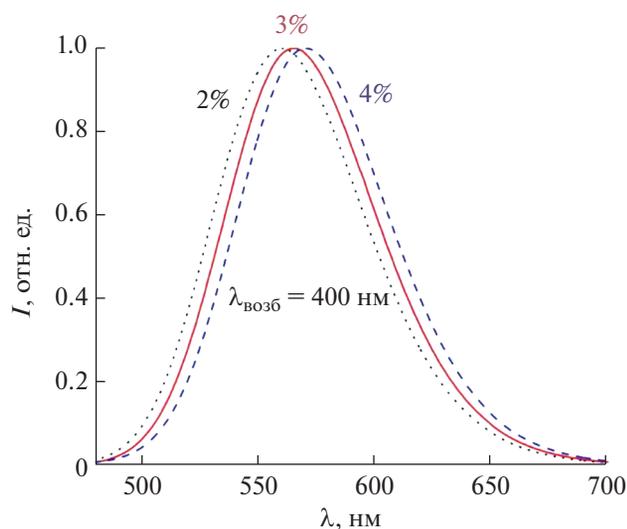


Рис. 2. Нормированные спектры люминесценции стекла, активированного ионами  $\text{Mn}^{2+}$  в концентрации 2, 3 и 4 мол. %. Возбуждение на длине волны 400 нм.

торый наблюдается во фторидных стеклах для малых концентраций марганца [7, 8]. Для концентрации 4 мол. % пик полосы смещается до 580 нм. Можно предположить, что при дальнейшем повышении концентрации марганца будет происходить дальнейшее красное смещение полосы люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$ . Как было показано в работах [19, 20], такое красное смещение спектра связано с ростом вклада люминесценции от пар ионов  $\text{Mn}^{2+}-\text{Mn}^{2+}$  при увеличении концентрации. При этом красное смещение полосы люминесценции пар ионов  $\text{Mn}^{2+}-\text{Mn}^{2+}$ , а также укорочение времени затухания люминесценции являются результатом обменного взаимодействия в парах ионов  $\text{Mn}^{2+}-\text{Mn}^{2+}$ . Полосы люминесценции отдельных ионов  $\text{Mn}^{2+}$  и пар ионов  $\text{Mn}^{2+}-\text{Mn}^{2+}$  спектрально перекрываются, и красное смещение визуально проявляется в длинноволновом сдвиге суммарного спектра люминесценции.

На рис. 3 показаны спектры возбуждения люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  для трех образцов стекол с концентрацией марганца 2, 3 и 4 мол. %. На спектре указаны переходы в ионе  $\text{Mn}^{2+}$ , ответственные за наблюдаемые полосы возбуждения. Ряд полос перекрываются друг с другом из-за типичного эффекта неоднородного уширения в стеклянной матрице. Тем не менее видно, что полосы возбуждения не смещаются при изменении концентрации  $\text{Mn}^{2+}$ , т.е. поглощение осуществляется на переходах для отдельных ионов  $\text{Mn}^{2+}$ , а не для пар ионов  $\text{Mn}^{2+}-\text{Mn}^{2+}$ , концентрация которых, следовательно, достаточно мала. В коротковолновой области спектра возбуждения имеется интенсивная структурированная полоса, которая

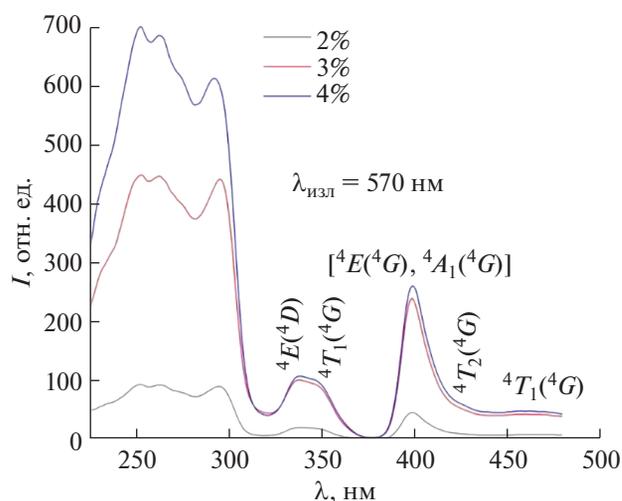
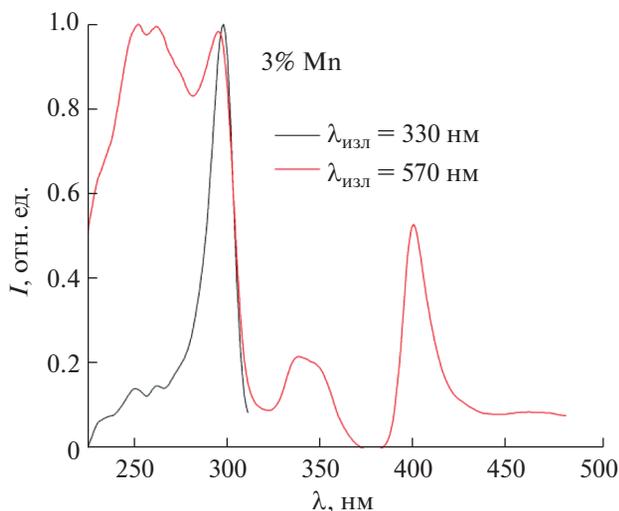


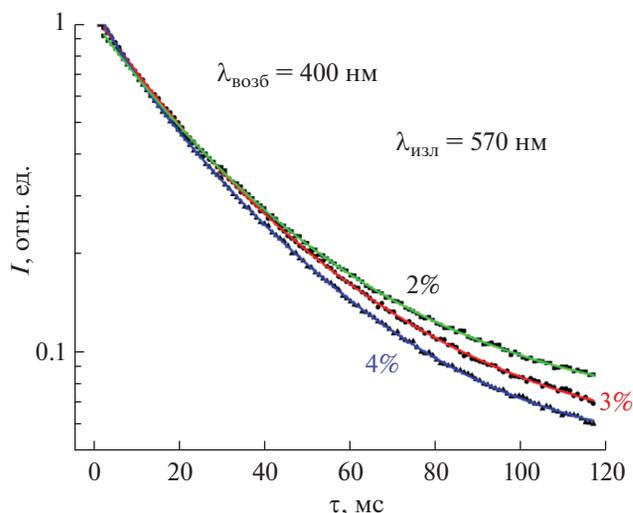
Рис. 3. Спектры возбуждения люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  (регистрация на длине волны 570 нм), полученные для стекол, активированных ионами  $\text{Mn}^{2+}$  в концентрации 2, 3 и 4 мол. %. Показаны конечные состояния для переходов в ионе  $\text{Mn}^{2+}$  из основного состояния  ${}^6A_1$ .

спектрально перекрывается с полосой возбуждения  $\text{Ce}^{3+}$  и имеет схожие особенности в форме спектра (пик в районе 300 нм и слабые пики в районе 250–265 нм, рис. 4), что подтверждает передачу энергии от  $\text{Ce}^{3+}$  на  $\text{Mn}^{2+}$ . Дополнительным подтверждением процесса передачи энергии могла бы быть форма кривых кинетики люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  при возбуждении в полосе поглощения  $\text{Ce}^{3+}$ , обусловленной разрешенными  $5d-4f$ -переходами, составляет  $\sim 20$  нс [1], т.е. оно значительно короче, чем время затухания люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  (десятки мс, рис. 5), и на кривых затухания люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$ , полученных в миллисекундном временном диапазоне, такое короткое время разгорания не видно. Остальная часть широкой коротковолновой полосы возбуждения люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  (помимо той, которая относится к возбуждению ионов  $\text{Mn}^{2+}$  через передачу энергии от ионов  $\text{Ce}^{3+}$ ) может быть обусловлена переходом с переносом заряда типа  $\text{F}^--\text{Mn}^{3+}$ , поскольку наличие ионов марганца другой валентности во фторидных стеклах вполне ожидаемо [21].

Еще одним эффектом увеличения концентрации  $\text{Mn}^{2+}$  может быть концентрационное тушение люминесценции. Из сравнения спектров возбуждения люминесценции в области прямого возбуждения ионов  $\text{Mn}^{2+}$  (в районе 400 нм) обнаружено, что при концентрации 4 мол. % не происходит заметного увеличения интенсивности лю-



**Рис. 4.** Нормированные спектры возбуждения люминесценции  $Mn^{2+}$  (регистрация на длине волны 570 нм) и  $Ce^{3+}$  (регистрация на длине волны 330 нм) для стекла, активированного ионами  $Mn^{2+}$  в концентрации 3 мол. %.



**Рис. 5.** Кривые затухания люминесценции  $Mn^{2+}$  (регистрация на длине волны 570 нм) при возбуждении на длине волны 400 нм, полученные для стекол, активированных ионами  $Mn^{2+}$  в концентрации 2, 3 и 4 мол. %. Линии – моделирование кривых по формуле (1).

минесценции по сравнению с концентрацией 3 мол. %, что может указывать на наличие концентрационного тушения. Кривые затухания люминесценции при прямом возбуждении  $Mn^{2+}$  (рис. 5) показывают небольшое укорочение времени распада с ростом концентрации, хотя кинетика не является одноэкспоненциальной. Поскольку спектр люминесценции представляет собой наложение спектров от отдельных ионов  $Mn^{2+}$  и пар ионов  $Mn^{2+}-Mn^{2+}$ , неэкспоненциальность кинетики вполне ожидаема. Моделирование кривых затухания суммой двух экспонент, т.е. функцией:

$$I(t) = A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} \quad (1)$$

дает оценку средних времен затухания, вычисленных по формуле:

$$\tau = \frac{A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2}{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2} \quad (2)$$

31.4, 29.7 и 26.7 мс для концентраций  $Mn^{2+}$  2, 3 и 4 мол. % соответственно, что практически не отличается от времен затухания люминесценции  $Mn^{2+}$ , полученных из кривых затухания люминесценции, измеренных при возбуждении в полосе поглощения  $Ce^{3+}$ . Видно, что уменьшение времени затухания люминесценции с ростом концентрации в исследованном диапазоне до 4 мол. % является незначительным. С учетом того, что ускорение кинетики люминесценции может быть частично обусловлено вышеупомянутым эффектом укорочения времени затухания люминесценции от пар ионов  $Mn^{2+}-Mn^{2+}$ , можно предположить, что при концентрации 4 мол. %

эффект концентрационного тушения еще не сильно выражен, и данная концентрация может считаться близкой к оптимальной, когда достигнуто достаточно большое красное смещение (до 580 нм), но концентрационное тушение еще не сильно влияет на выход люминесценции.

Из спектров возбуждения люминесценции видно, что люминесценция стекол эффективно возбуждается в полосе 400 нм, т.е. в фиолетовой области, а не в синей, что обычно требуется для люминофоров, используемых в стандартных коммерческих лампах белого света. Однако наличие эффективного возбуждения люминофора в районе 400 нм также представляет интерес для некоторых схем светодиодных источников света [22], принимая во внимание тот факт, что уже имеются светодиодные чипы, испускающие свет в фиолетовой области спектра с такой же эффективностью, что и синие светодиодные чипы [23]. Полосы люминесценции исследованных нами фторцирконатных стекол, активированных большими концентрациями марганца, расположены в желто-оранжевой области спектра, а значит, эти люминофоры можно рассматривать как альтернативу стандартному желтому люминофору YAG : Ce, используемому в коммерческих лампах белого света. Меняя концентрацию активатора, можно подстраивать спектр люминесценции люминофора в требуемую спектральную область, в частности, увеличивая долю красной компоненты в спектре излучения, т.е. можно утверждать, что данные стекла имеют потенциал для практиче-

ского применения в светодиодных источниках белого света.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования люминесцентных свойств фторидных цирконатных стекол состава  $57\text{ZrF}_4 \cdot 33\text{BaF}_2 \cdot 6\text{CeF}_3 \cdot 4\text{AlF}_3$ , легированных ионами марганца в достаточно больших концентрациях (2–4 мол. %), показали красное смещение пика полосы  ${}^4T_1(G) \rightarrow {}^6A_1$  люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  от 570 до 580 нм при увеличении концентрации легирующих ионов от 2 до 4 мол. %. Красное смещение при повышении концентрации обусловлено увеличением вклада в эмиссионный спектр люминесценции от пар ионов  $\text{Mn}^{2+}-\text{Mn}^{2+}$ , дающих более длинноволновую люминесценцию, чем отдельные ионы  $\text{Mn}^{2+}$ . Сравнение спектров возбуждения люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  и  $\text{Ce}^{3+}$  показало передачу энергии от ионов  $\text{Ce}^{3+}$  к ионам  $\text{Mn}^{2+}$ . Анализ кинетики люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  указывает на отсутствие заметного концентрационного тушения люминесценции  $\text{Mn}^{2+}$  при концентрации легирования до 4 мол. %. Данные стекла имеют потенциал для применения в светодиодных источниках белого света как широкополосные люминофоры с повышенным вкладом красной компоненты свечения по сравнению со стандартным коммерческим люминофором YAG : Ce.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект РНФ № 18-13-00407). Исследования проводили с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН, ИОФ РАН и ФИАН.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Devitsin E.G., Dmitruk L.N., Kozlov V.A. et al.* // Proc. Int. Workshop on Heavy Scintillators for Scientific and Industrial Application, Sept. 22–26, 1992, Chamonix, France / Eds. De Notaristefani F. et al. Cedex, 1993. P. 401. ISBN 2-86332-128-5
2. *Auffray E., Bouttet D., Dafinei I., Fay J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 380. № 3. P. 524. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00717-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00717-6)
3. *Hobson P.R., Imrie D.C., Price T. et al.* // J. Non-Cryst. Solids. 1997. V. 213/214. P. 147. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(96\)00664-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(96)00664-3)
4. *Батыгов С.Х., Бреховских М.Н., Виноградова Н.Н. и др.* // Неорганич. материалы. 2002. Т. 38. № 6. С. 755. [*Batygov S.Kh., Brekhovskikh M.N., Vinogradova N.N. et al.* // Inorg. Mater. 2002. V. 38. № 6. P. 625. <https://doi.org/10.1023/A:1015829906101>]
5. *Dmitruk L., Vinogradova N., Kozlov V. et al.* // J. Non-Cryst. Solids. 1997. V. 213, 214. P. 311. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00042-2)
6. *Shaukat S.F., McKinlay K.J., Flower P.S. et al.* // J. Non-Cryst. Solids. 1999. V. 244. P. 197. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(99\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(99)00020-4)
7. *Brekhovskikh M.N., Batygov S.Kh., Makhov V.N. et al.* // Phys. Status Solidi B. 2020. V. 257. № 8. P. 1900457. <https://doi.org/10.1002/pssb.201900457>
8. *Батыгов С.Х., Бреховских М.Н., Моисеева Л.В. и др.* // Журн. неорганич. химии. 2021. Т. 66. № 10. С. 1491. [*Batygov S.Kh., Brekhovskikh M.N., Moiseeva L.V. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 10. P. 1577. <https://doi.org/10.1134/S0036023621100028>]
9. *Zhou Q., Dolgov L., Srivastava A.M. et al.* // J. Mater. Chem. C. 2018. V. 6. P. 2652. <https://doi.org/10.1039/c8tc00251g>
10. *Zhou Z., Zhou N., Xia M. et al.* // J. Mater. Chem. C. 2016. V. 4. P. 9143. <https://doi.org/10.1039/C6TC02496C>
11. *Lin Y.-C., Karlsson M., Bettinelli M.* // Top. Curr. Chem. (Z). 2016. V. 374. P. 21. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0023-5>
12. *Li J., Yan J., Wen D. et al.* // J. Mater. Chem. C. 2016. V. 4. P. 8611. <https://doi.org/10.1039/C6TC02695H>
13. *Li Y., Qi S., Li P. et al.* // RSC Adv. 2017. V. 7. P. 38318. <https://doi.org/10.1039/C7RA06026B>
14. *Song E., Wang J., Shi J. et al.* // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017. V. 9. № 10. P. 8805. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00749>
15. *Adachi S.* // J. Lumin. 2018. V. 197. P. 119. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.01.016>
16. *Hoshino R., Nakamura T., Adachi S.* // J. Solid State Sci. Technol. 2016. V. 5. № 3. R37. <https://doi.org/10.1149/2.0151603jss>
17. *Chen D., Zhou Y., Zhong J.* // RSC Advances. 2016. V. 6. P. 86285. <https://doi.org/10.1039/C6RA19584A>
18. *Xu Y.K., Adachi S.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 013525. <https://doi.org/10.1063/1.3056375>
19. *Ronda C.R., Amrein T.* // J. Lumin. 1996. V. 69. № 5–6. P. 245. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(96\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(96)00103-2)
20. *Vink A.P., de Bruin M.A., Roke S. et al.* // J. Electrochem. Soc. 2001. V. 148. № 7. P. E313. <https://doi.org/10.1149/1.1375169>
21. *Machado I.E.C., Prado L., Gomes L. et al.* // J. Non-Cryst. Solids. 2004. V. 348. P. 113. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2004.08.135>
22. *Piquette A., Bergbauer W., Galler B. et al.* // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2016. V. 5. P. R3146. <https://doi.org/10.1149/2.0191601jss>
23. *Zhang T., Li N., Yu Z. et al.* // J. Lumin. 2020. V. 225. P. 117318. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117318>