

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.399

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА В ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКЛАХ

© 2014 г. Д. С. Агафонова^{*, **}; Е. В. Колобкова^{**}, доктор хим. наук;
Н. В. Никонов^{**}, доктор физ.-мат. наук; А. И. Сидоров^{*, **}, доктор физ.-мат. наук

^{*}Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

^{**}Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: aisidorov@qip.ru

Проведено исследование влияния температуры на спектральный состав и интенсивность люминесценции оксифторидных стекол, содержащих молекулярные кластеры серебра и ионы редкоземельных металлов самария и тербия. Показано, что введение в состав стекла этих ионов увеличивает интенсивность люминесценции молекулярных кластеров серебра и температурную чувствительность интенсивности их люминесценции. У оксифторидного стекла с молекулярными кластерами серебра и ионами Tb³⁺ ослабление интегральной интенсивности люминесценции в диапазоне температур 20–250 °С составляет 50 раз. Показано, что молекулярным кластерам серебра характерна температурная чувствительность интенсивности люминесценции в диапазоне 0,045–0,099 дБ/°С.

Ключевые слова: люминесценция, молекулярный кластер, редкоземельные металлы, оксифторидное стекло, температурное тушение люминесценции.

Коды OCIS: 160.2540, 160.5690, 280.4788

Поступила в редакцию 14.03.2014

Введение

Молекулярные кластеры (МК) серебра Ag_n ($n = 2-15$), представляющие собой молекулярные структуры из нескольких атомов, обладают интенсивной люминесценцией в видимой области спектра [1–4]. На настоящий момент известны МК серебра, сформированные в различных жидкостях, цеолитах, стеклах и полимерах [5–7]. Люминесценция МК может быть использована для конверсии излучения в люминесцентных лампах, светодиодах, солнечных элементах, а также для создания устройств фотоники и биосовместимых мало-размерных маркеров [8, 9].

Множество работ посвящено исследованию оптических и химических свойств МК в жидких

и твердых органических матрицах, поскольку данные исследования направлены на биомедицинские приложения (биосовместимые люминесцентные маркеры), где использование нетоксичных люминофоров играет важную роль. Для применения в устройствах фотоники, в том числе и для создания волоконных сенсоров, предпочтительнее использование неорганических твердотельных матриц.

К настоящему времени исследованы оптические свойства МК Ag_n в твердом аргоне и цеолите [10]. В работе [11] определены полосы поглощения и люминесценции атомов и ионов серебра, а также молекулярных ионов Ag₂⁺, Ag₃⁺ и димеров Ag⁺-Ag⁺ в матрицах из NaCl и фосфатного стекла. Обзор литературных данных позволяет заключить, что атомарные

и молекулярные ионы серебра обладают люминесценцией в диапазоне длин волн 450–560 нм при возбуждении излучением с длиной волны $\lambda_{\text{exc}} = 250\text{--}350$ нм. У нейтральных МК Ag_n ($n = 2\text{--}8$) полосы люминесценции и ее возбуждения смещаются в длинноволновую область спектра ($\lambda_{\text{exc}} = 300\text{--}500$ нм, $\lambda_{\text{lum}} = 450\text{--}800$ нм) тем больше, чем выше номер n , т.е. крупнее МК.

При создании МК серебра в оптических стеклах серебро может быть введено в стекло непосредственно во время его синтеза [12] либо методом ионного обмена [3]. В последнем случае последующее восстановление ионов серебра и их агрегация при термической диффузии обеспечивают формирование устойчивых МК.

Известно, что состав матрицы оказывает влияние на спектр и интенсивность люминесценции МК серебра [1, 3, 13]. Представляет интерес создание люминесцентных материалов с введением нескольких активаторов, которые могут модифицировать как спектр люминесценции, так и полосы поглощения материала. Взаимодействие между различными люминесцентными центрами может носить резонансный характер, проявляющийся в передаче энергии возбуждения от донора (сенситизатора) к акцептору (активатору). Данное явление используется, например, для повышения эффективности твердотельных лазеров. Большое внимание уделяется исследованию соактивации оптических люминесцентных материалов ионами редкоземельных элементов (РЗЭ). Известна работа, в которой изучено влияние МК золота и серебра на интенсивность люминесценции ионов РЗЭ [1]. Авторы работы исследовали силикатные стекла системы $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$, легированные серебром (0,037 мол %) или золотом (0,005 мол %), а также активированные некоторыми лантаноидами (Sm, Eu, Tb, Dy (0,19 мол %)). Молекулярные кластеры формировались путем воздействия на образцы рентгеновского излучения для восстановления ионов серебра $\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}^0$ и последующей термообработки при температурах 300–550 °С. В данной работе получено увеличение интенсивности люминесценции ионов РЗЭ в стеклах с МК серебра в 1,3 раза для Tb^{3+} , в 2,6 раза для Dy^{3+} , в 5 раз для Sm^{3+} и в 250 раз для Eu^{3+} по сравнению со стеклами, содержащими только ионы РЗЭ. Авторы объясняют результат переносом энергии между МК металлов в возбужденном синглетном и в триплетном состояниях с последующим резонансным пере-

носом энергии ионами РЗЭ в мультиплетном состоянии при совпадении соответствующих энергетических уровней. Вопрос о влиянии РЗЭ на люминесценцию МК в литературе не освещен.

Известно, что изменение температуры в той или иной степени может оказывать влияние на спектр и интенсивность оптической эмиссии люминофоров. Характерным является температурное тушение люминесценции, которое может носить как общий характер (равномерное ослабление интенсивности по всему спектру), так и избирательный (с преобладанием ослабления интенсивности отдельных спектральных компонент). В литературе практически отсутствуют данные по влиянию температуры на люминесценцию МК серебра за исключением работы [14], где исследована область температур 15–300 К для оксифторидных (ОФ) стекол разного состава системы $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CdF}_2\text{-PbF}_2\text{-ZnF}_2$ с введением при синтезе добавки AgNO_3 (5 мол %). В работе показано, что стеклам характерна люминесценция МК серебра в диапазоне длин волн 420–800 нм и температурное тушение люминесценции в интервале от –170 до 25 °С. Исследования влияния температуры на люминесценцию МК благородных металлов важны с практической точки зрения для применения данных люминесцентных материалов в устройствах фотоники, например, в детекторах оптического излучения, светодиодах, солнечных элементах [15], для конверсии оптического излучения в другие области спектра [16], а также для создания люминесцентных датчиков температуры [3].

Целью работы является исследование влияния температуры в диапазоне 20–250 °С и ионов редкоземельных металлов на спектральный состав и интенсивность люминесценции ОФ стекол, содержащих МК серебра.

Методика экспериментов

В работе исследовались ОФ стекла системы $\text{SiO}_2\text{-AlF}_3\text{-PbF}_2\text{-CdF}_2\text{-ZnF}_2$ с добавкой AgNO_3 (5 мол %), SmF_3 (2 мол %) или TbF_3 (2 мол %). Стекла были изготовлены на кафедре технологии стекла СПб ГТИ (ТУ). Синтез стекол проводился в корундовых тиглях в атмосфере воздуха при температуре 950 °С в течение 0,5–1 ч. Продолжительность и температурный режим синтеза определялись опытным путем из условий получения стекла, прозрачного в видимой области спектра и не содержащего металличе-

ских наночастиц серебра. Известно, что при более высоких температурах синтеза формирование и рост наночастиц могут происходить уже при охлаждении расплава. Фторидная матрица и ионы свинца создают ионам серебра слабую восстановительную среду. Поэтому в процессе варки стекла и охлаждения расплава происходит восстановление ионов серебра до нейтральных атомов. При этом также образуются нейтральные МК серебра Ag_n ($n = 2-8$) [12]. Образцы стекол имели слабовыраженную бледно-желтую окраску. Спектральные измерения проводились на спектрометре EPP2000-UVN-SR (*StellarNet*) с возбуждением люминесценции полупроводниковым лазером ($\lambda_{\text{exc}} = 405$ нм). Спектры поглощения стекол измерялись на спектрофотометре Carry500 (*Varian*) при комнатной температуре. Измерения интенсивности люминесценции при различных температурах проводились в печи с кварцевыми окнами.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры оптической плотности ОФ стекол с МК серебра (далее ОФ(Ag)) и ионами Sm^{3+} и Tb^{3+} (далее ОФ(Ag, Sm) и ОФ(Ag, Tb) соответственно). Представлены данные в пересчете на толщину образцов 4 мм. Из рисунка видно, что этим стеклам характерно сильное поглощение в спектральной области $\lambda < 450$ нм. При введении ионов РЗЭ на спектре появляются относительно узкие пики, соответствующие 401, 437 и 470 нм, у стекол с Sm^{3+} и более размытый пик на 440 нм у стекло с Tb^{3+} .

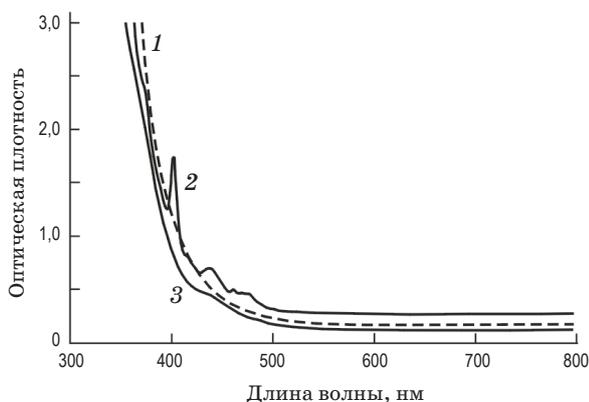


Рис. 1. Спектры оптической плотности ОФ стекол с добавкой $AgNO_3$ (1), с добавками $AgNO_3$ и SmF_3 (2), $AgNO_3$ и TbF_3 (3).

Спектры люминесценции ОФ стекол, содержащих добавки $AgNO_3$ и фторидов РЗЭ, приведены на рис. 2. Если в стекле сформированы только МК серебра (кривая 1), наблюдается люминесценция в диапазоне длин волн от 450 до 800 нм, спектр не имеет особенностей. Ранее авторами настоящей статьи было проведено исследование люминесцентных свойств ОФ стекол, синтезированных по аналогичной технологии и содержащих добавку $AgNO_3$ [12]. В ней показано, что люминесценция таких стекол обусловлена возбуждением нейтральных структур типа Ag_n . Высокие температуры обеспечивают диффузию атомарного серебра с образованием МК Ag_n ($n = 2-8$). Наблюдаемый широкий спектр люминесценции (рис. 2) является результатом наложения люминесценции МК разного размера. На длине волны возбуждения 405 нм наибольший вклад в люминесценцию вносят кластеры с $n = 2-4$ [12].

Спектры оптической эмиссии стекол с ионами РЗЭ являются суперпозицией широкой спектральной полосы люминесценции МК серебра I_{Ag} (аналогичной спектру ОФ(Ag) стекла, кривая 1) и относительно узких линий люминесценции ионов РЗЭ I_{ion} с максимумами, соответствующими длинам волн 563, 600, 646 и 710 нм для Sm^{3+} (кривая 2) и 546, 566 нм для Tb^{3+} (кривая 3). Относительная высота пиков Tb^{3+} значительно меньше, чем у Sm^{3+} . Коротковолновая область спектров, особенно ОФ(Ag, Sm) стекла, соответствует преимущественно области люминесценции МК серебра. Из рис. 2 видно,

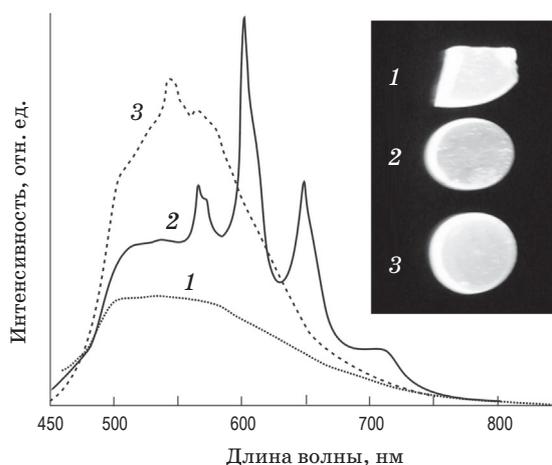


Рис. 2. Спектры люминесценции ОФ стекол с добавкой $AgNO_3$ (1), с добавками $AgNO_3$ и SmF_3 (2), $AgNO_3$ и TbF_3 (3). На вставке – фотография люминесценции этих образцов ($\lambda_{\text{exc}} = 365$ нм).

что при введении в состав стекла ионов РЗЭ интенсивность люминесценции МК серебра возрастает в 1,5–2 раза.

Как уже было отмечено ранее, формирование в ОФ стекле МК серебра и золота приводит к увеличению интенсивности люминесценции ионов РЗЭ [1]. В настоящей работе получен противоположный эффект, т.е. увеличение интенсивности люминесценции МК серебра при введении в ОФ матрицу ионов Sm^{3+} и Tb^{3+} .

На рис. 3 представлены спектры люминесценции ОФ(Ag) стекол при разных температурах и температурные зависимости интенсивности люминесценции. Из рисунка видно, что с ростом температуры в стеклах наблюдается тушение люминесценции, при этом интенсивность в коротковолновой части спектра ослабевает сильнее. На спектре можно выделить три пика с длинами волн 506, 536 и 578 нм, соот-

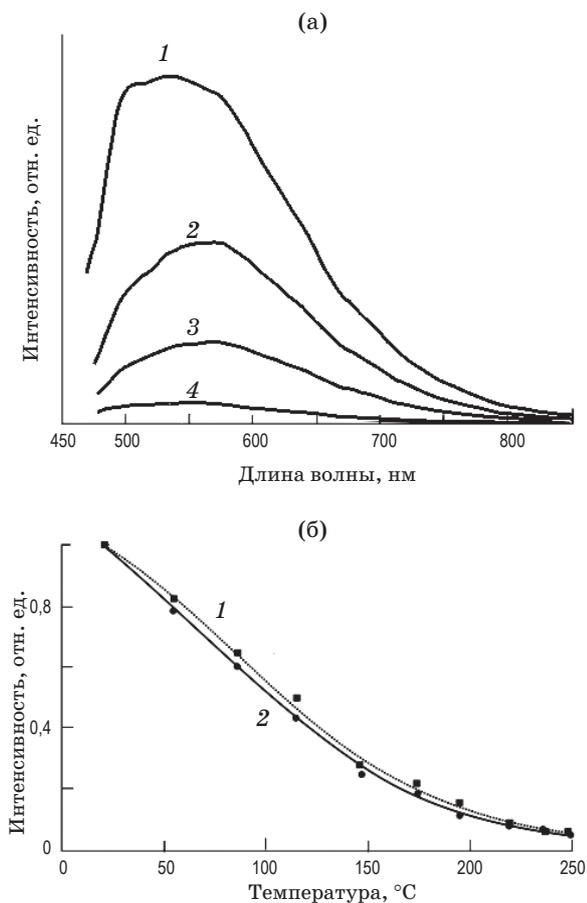


Рис. 3. Влияние температуры на люминесценцию ОФ(Ag) стекла. Спектры люминесценции при температурах 20 (1), 115 (2), 175 (3), 250 °C (4) – а. Температурные зависимости интенсивности люминесценции (б), интегральная интенсивность в спектральном диапазоне 470–800 нм (1), на $\lambda_{lum} = 536$ нм (2).

ветствующие МК разного типа. Из рисунка видно, что тушение люминесценции наиболее эффективно для коротковолнового пика и наименее – для длинноволнового. За счет этого исходно размытый спектральный максимум сдвигается в длинноволновую область. Интегральная интенсивность люминесценции при нагреве от 20 до 250 °C уменьшается в 18 раз. Ход зависимости не имеет экспоненциального характера.

Люминесценция МК в стеклах – результат излучательной рекомбинации носителей заряда из возбужденных синглетного S_1 и триплетного T_2 состояний в основное состояние S_0 [14, 17]. Тушение люминесценции обусловлено захватом носителей заряда дефектами стекла (дефекты по Френкелю), этот процесс наиболее вероятен для возбужденного состояния T_2 , поскольку оно обладает большим временем жизни. При достижении некоторой энергии активации в системе может происходить эффективная передача энергии между состояниями S_1 и T_2 , что проявляется в спектрах люминесценции как более заметное тушение коротковолновой части. Авторы работы [14] наблюдали данный механизм в диапазоне температур от –170 до 25 °C у ОФ стекол с МК серебра, наиболее сильно проявляющийся у стекол состава, обуславливающего большее количество дефектов.

Ранее были проведены исследования по влиянию температуры на люминесценцию фототерморефрактивных силикатных стекол, содержащих МК серебра [3]. В данных стеклах, содержащих светочувствительные добавки, восстановление ионов серебра происходит при ультрафиолетовом облучении, последующая термообработка при температуре ниже температуры стеклования приводит к диффузии атомарного серебра и формированию МК. Стеклам в интервале температур от 25 до 250 °C характерно неселективное по длине волны температурное тушение люминесценции с высокой температурной чувствительностью интенсивности люминесценции. Изменение интегральной интенсивности люминесценции у ОФ(Ag) стекла в 1,6–1,8 раза выше, чем у фототерморефрактивных стекол.

На рис. 4а представлены спектры люминесценции ОФ(Ag, Sm) стекла. При изменении температуры наблюдается температурное тушение люминесценции, при этом форма спектральной полосы меняется, поскольку скорость тушения при нагреве различна в областях спектра с преимущественным вкладом в общий

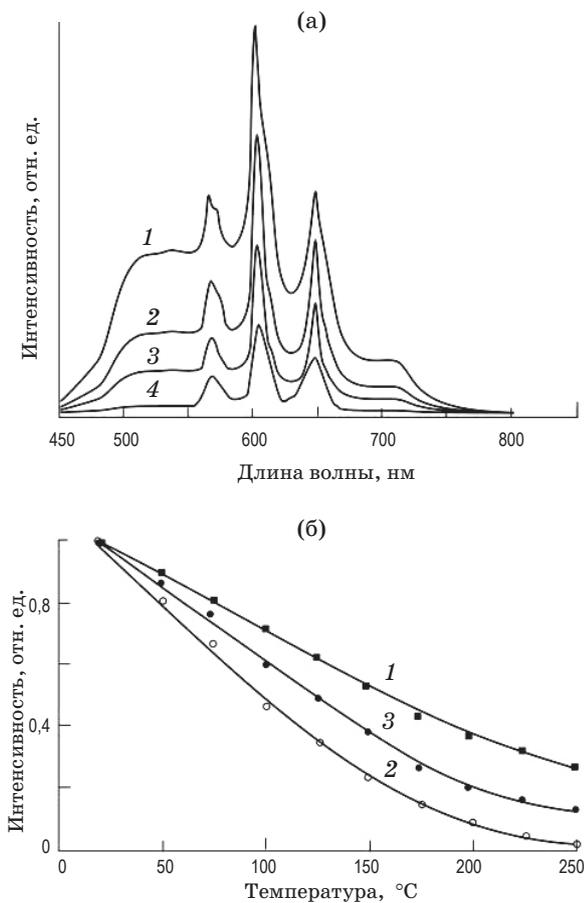


Рис. 4. Влияние температуры на люминесценцию ОФ(Ag, Sm) стекла. Спектры люминесценции при температурах 20 (1), 125 (2), 175 (3), 250 °C (4) – а. Температурные зависимости интенсивности люминесценции (б) на длинах волн 600 (1), 520 нм (2), интегральная интенсивность люминесценции в спектральном диапазоне 470–800 нм (3).

спектр I_{Ag} и на длинах волн, соответствующих вкладу $I_{Ag} + I_{ion}$.

На рис. 4б приведены температурные зависимости интенсивности люминесценции ОФ(Ag, Sm) стекол на длинах волн, соответствующих преимущественно люминесценции МК серебра (кривая 2) и ионам Sm^{3+} (кривая 1), а также интегрально по спектру (кривая 3). Из рисунков видно, что ослабление интенсивности люминесценции значительно выше в области более коротких длин волн, соответствующих преимущественно вкладу I_{Ag} (470–550 нм). Ослабление интенсивности люминесценции на длине волны 520 нм в интервале температур 20–250 °C оставляет 20 раз, что немногим превышает значение ослабления люминесценции ОФ(Ag) стекла. Наиболее яркому пику люминесценции Sm^{3+} (600 нм) характерна ми-

нимальная температурная чувствительность. Таким образом, интегрально по спектру (470–800 нм) ослабление меньше (6–7 раз), чем у ОФ(Ag) стекол без легирования самарием.

Аналогичные измерения проведены для ОФ(Ag, Tb) стекол. На рис. 5а приведены спектры люминесценции этого стекла при различных температурах. В спектре наблюдаются пики люминесценции ионов Tb^{3+} на длинах волн 546 и 566 нм, однако их вклад в суммарный спектр значительно меньше, чем у стекол с ионами Sm^{3+} . С увеличением температуры пики становятся практически неразличимыми. По этой причине стекло демонстрирует меньшую спектральную селективность температурной чувствительности интенсивности люминесценции.

У ОФ(Ag, Tb) стекла температурная чувствительность интенсивности люминесценции

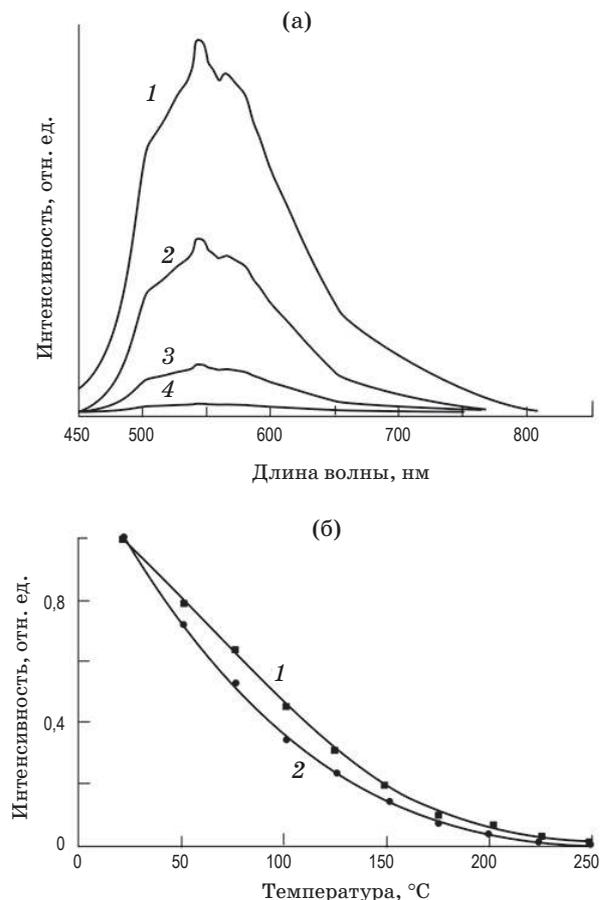


Рис. 5. Влияние температуры на люминесценцию ОФ(Ag, Tb) стекла. Спектры люминесценции при температурах 20 (1), 100 (2), 175 (3), 250 °C (4) – а. Температурные зависимости интенсивности люминесценции (б), интегральная интенсивность в спектральном диапазоне 450–800 нм (1), на $\lambda_{lum} = 505$ нм (2).

Температурная чувствительность интенсивности люминесценции ОФ стекол с молекулярными кластерами серебра

Тип стекла	Люминесцентные центры	Длина волны люминесценции, нм	Средняя температурная чувствительность интенсивности люминесценции, дБ/°С	
			20–150 °С	150–250 °С
ОФ(Ag)	Ag _n	506	0,057	0,061
		536	0,047	0,063
		460–750	0,045	0,067
ОФ(Ag, Sm)	Ag _n	520	0,045	0,073
	Ag _n , Sm ³⁺	600	0,021	0,027
		470–800	0,030	0,042
ОФ(Ag, Tb)	Ag _n	505	0,060	0,083
	Ag _n , Tb ³⁺	546	0,053	0,093
		470–800	0,053	0,099

на длинах волн люминесценции ионов Tb³⁺ немногим выше, чем на участке спектра с преимущественным вкладом МК серебра, однако она варьируется незначительно во всем диапазоне длин волн. Ослабление интегральной интенсивности люминесценции в интервале температур 20–250 °С составляет 50 раз, что выше в 3–4 раза по сравнению с фототермореправительными и ОФ стеклами без легирования РЗЭ.

Представленные результаты показывают, что легирование ОФ стекол ионами Sm и Tb позволяет увеличить температурную чувствительность люминесценции МК серебра. Существует несколько точек зрения на механизмы взаимодействия МК металлов и ионов РЗЭ. Во-первых, это возможность процессов переноса энергии, ранее уже обсуждаемых, которые приводят к увеличению интенсивности люминесценции того или иного активатора [1]. Во-вторых, возможно образование комплексов типа МК+ион РЗЭ, которому характерно большее значение силы осциллятора, и, соответственно, увеличение интенсивности люминесценции и изменение температурной чувствительности люминесценции. На настоящий момент единой точки зрения по этому вопросу нет, однако авторы данной работы придерживаются второго взгляда. Подробное изучение наблюдаемого явления требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

У всех исследованных стекол температурная зависимость интегральной интенсивности лю-

минесценции не имеет температурного гистерезиса и многократно повторяется. Столь сильная температурная зависимость люминесценции ОФ стекол делает перспективным их использование в люминесцентных датчиках температуры. В таблице приведены значения температурных чувствительностей интенсивности люминесценции исследованных стекол на длинах волн, соответствующих спектральным пикам, и интегрально по спектру. Из таблицы видно, что для МК серебра характерна температурная чувствительность интенсивности люминесценции в диапазоне 0,045–0,099 дБ/°С. В качестве сравнения приведем данные некоторых люминофоров на основе РЗЭ, используемых для измерения температуры. У ионов Nd³⁺, Er³⁺ в различных матрицах (KGW, YVO₄, YAG, алюмосиликатные стекла) и их сложных композиций, например, комплекс Er³⁺-Eu³⁺-Yb³⁺ в Y₂O₃ в диапазоне температур 20–250 °С, температурная чувствительность интенсивности люминесценции составляет 0,0021–0,0073 дБ/°С [18, 19]. Таким образом, значения температурной чувствительности исследованных в настоящей работе стекол выше на порядок.

Заключение

Исследованы спектральные характеристики ОФ стекол, содержащих МК серебра и ионы РЗЭ. Исследовано влияние температуры в диапазоне 20–250 °С на спектральный состав и интенсивность люминесценции стекол. Обнаружено

увеличение интенсивности люминесценции МК серебра при легировании стекол ионами Sm и Tb в 1,5–2 раза. При воздействии температуры происходит тушение люминесценции МК серебра, усиливающаяся при введении в стекла ионов РЗЭ. У ОФ стекла с МК серебра и Tb³⁺ ослабление интегральной интенсивности люминесценции в диапазоне температур 20–250 °С составляет 50 раз. Люминесцентные характеристики исследованных стекол стабильны и

* * * * *

возобновляемы, не имеют температурного гистерезиса. Сильная температурная зависимость люминесценции ОФ стекол с МК серебра и добавками РЗЭ делает перспективным их применение в люминесцентных датчиках температуры.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), а также грантов для аспирантов и молодых ученых КЭОП-43 (СПбГЭТУ).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Eichelbaum M., Rademann K.* Plasmonic enhancement or energy transfer? On the luminescence of gold-, silver-, and lanthanide-doped silicate glasses and its potential for light-emitting devices // *Advanced Functional Materials*. 2009. V. 19. № 13. P. 2045–2052.
2. *Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Шахвердов Т.А.* Влияние ультрафиолетового облучения и термообработки на люминесценцию молекулярных кластеров серебра в фото-термо-рефрактивных стеклах // *Опт. спектр.* 2013. Т. 114. № 5. С. 838–844.
3. *Агафонова Д.С., Егоров В.И., Игнатьев А.И., Сидоров А.И.* Влияние ультрафиолетового облучения и температуры на люминесценцию молекулярных кластеров серебра в фототерморефрактивных стеклах // *Оптический журнал*. 2013. Т. 80. № 8. С. 51–56.
4. *Cuong N.T., Tikhomirov V.K., Chibotaru L.F., Stesmans A., Rodríguez V.D., Nguyen M.T., Moshchalkov V.V.* Experiment and theoretical modeling of the luminescence of silver nanoclusters dispersed in oxyfluoride glass // *J. Chem. Phys.* 2012. V. 136. 174108.
5. *Ozin G.A., Hugues F.* Silver atoms and small silver clusters stabilized in zeolite. Y: *Optical Spectroscopy* // *J. Phys. Chem.* 1983. V. 87. № 1. P. 94–97.
6. *Zhong L.Y., Tao W.W., Wei C.* Copper nanoclusters: Synthesis, characterization and properties // *Chin. Sci. Bull.* 2012. V. 57. P. 41–47.
7. *Molard Y., Dorson F., Brylev K.A.* Red-NIR luminescent hybrid poly(methyl methacrylate) containing covalently linked octahedral rhenium metallic clusters // *Chemistry – A European Journal*. 2010. V. 16. № 19. P. 5613–5619.
8. *Kuznetsov A.S., Tikhomirov V.K., Moshchalnikov V.V.* Polarization memory of white luminescence of Ag nanoclusters dispersed in glass host // *Opt. Exp.* 2012. V. 20. № 19. P. 21576–21582.
9. *Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А., Шахвердов Т.А.* Широкополосная люминесценция меди в калиево-алюмо-боратных стеклах // *Опт. спектр.* 2013. Т. 114. № 3. С. 417–421.
10. *Felix C., Sieber C., Harbich W.* Fluorescence and excitation spectra of Ag₄ in an argon matrix // *Chem. Phys. Lett.* 1999. V. 313. № 1. P. 105–109.
11. *Zheng W., Kurobori T.* Assignments and optical properties of X-ray-induced colour centres in blue and orange radiophotoluminescent silver-activated glasses // *J. Lumin.* 2011. V. 131. № 1. P. 36–40.
12. *Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Шахвердов Т.А.* Люминесценция молекулярных кластеров серебра в оксифторидных стеклах // *Опт. спектр.* 2013. Т. 114. № 2. С. 260–264.
13. *Banerjee A., Ghanty T., Chakrabarti A.* Nonlinear optical properties of Au₁₉M (M = Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag) clusters // *J. Phys. Chem. (c)*. 2012. V. 116. № 1. P. 193–200.
14. *Kuznetsov A.S., Velázquez J.J., Tikhomirov V.K., Mendez-Ramos J., Moshchalkov V.V.* Quantum yield of luminescence of Ag nanoclusters dispersed within transparent bulk glass vs. glass composition and temperature // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. 251106.

15. *Афанасьев В.П., Васильев В.Н., Игнатьев А.И., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А.* Новые люминесцентные стекла и стеклокерамики и перспективы их использования в тонкопленочной солнечной энергетике // *Оптический журнал*. Т. 80. № 10. С. 69–79.
16. *Kuznetsov A.S., Tikhomirov V.K., Moshchalkov V.V.* UV-driven efficient white light generation by Ag nanoclusters dispersed in glass host // *Materials Lett.* 2013. V. 92. P. 4–6.
17. *Velázquez J.J., Tikhomirov V.K., Chibotaru L.F., Cuong N.T., Kuznetsov A.S., Rodriguez V.D., Nguyen M.T., Moshchalkov V.V.* Energy level diagram and kinetics of luminescence of Ag nanoclusters dispersed in a glass host // *Opt. Exp.* 2012. V. 20. № 12. P. 13582–13591.
18. *Rai V.K., Pandey A., Dey R.* Photoluminescence study of $Y_2O_3:Er^{3+}-Eu^{3+}-Yb^{3+}$ phosphor for lighting and sensing applications // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. 083104.
19. *Zhang Z.Y., Grattan T.V., Palmer A.W., Meggitt B.T.* Potential for temperature sensor applications of highly neodymium-doped crystals and fiber at up to approximately 1000 °C // *Review of Scientific Instruments*. 1997. V. 68. № 7. P. 2759–2763.