ХИМИЯ

УДК 541.1 + 661.143

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА ЛЮМИНОФОРОВ С ДЛИТЕЛЬНЫМ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ОКСОСУЛЬФИДА ИТТРИЯ

СООБЩЕНИЕ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ Y_2O_2S : Ti, Mg

© 2006 г. А.А. Богатырева[1], В.М. Ищенко[2], О.Я. Манаширов[3], В.Б. Гутан[4], Ю.П. Тимофеев[4]

Изучено влияние ионов РЗЭ (Ce–Yb) на яркость послесвечения и спектральный состав излучения люминофора Y_2O_2S : Ti, Mg. Установлено, что ионы Ce^{3+}, Pr^{3+}, Tb^{3+} являются эффективными тушителями яркости послесвечения этого люминофора, а соактивация Y_2O_2S : Ti, Mg ионами Eu^{3+}, Sm^{3+}, Yb^{3+} приводит к образованию на его основе практически важных фотолюминофоров с новым комплексом свойств.

Настоящая работа является продолжением проводимого нами комплексного исследования, посвященного разработке научно обоснованной технологии получения эффективных и стабильных люминофоров желтого, оранжевого и красного цветов свечения с длительным послесвечением (ЛДП) на основе оксосульфида иттрия. Полученные на первом этапе этого исследования результаты по изучению люминесцентных свойств концентрационных серий Y_2O_2S : Ti_x; Y_2O_2S : Mg_y и Y_2O_2S : Ti$x$$Mg_y$ позволили установить, что среди изученных систем наиболее благоприятным сочетанием яркостных, спектральных и инерционных параметров обладает ЛДП состава Y_2O_2S : $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ [1]. Цвет свечения данного ЛДП определяется связанной с ионами титана широкой полосой излучения с максимумом излучения примерно при 625 нм.

Анализ спектров люминесценции концентрационной серии образцов Y_2O_2S : Ti_xMg_y при различных значениях x и y показал, что изменение концентрации ионов титана и магния и их соотношения в оксосульфиде иттрия в широких пределах не оказывает существенного влияния на спектральный состав ЛДП.

В связи с вышесказанным возникла необходимость в поиске способов направленного изменения цветности ЛДП состава Y_2O_2S : $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ в заданную область треугольника цветности. Одним из возможных способов направленного регулирования цветности данного ЛДП может являться введение в его состав ионов РЗЭ, способных излучать в различных областях видимого спектра. Кроме того, соактивация ЛДП состава Y_2O_2S : Ti, Mg ионами РЗЭ способна оказать влияние и на другие его люминесцентные свойства, что, в свою очередь, может привести к созданию практически важных люминофоров с заданным комплексом светотехнических параметров.

Так как сведения по влиянию ионов РЗЭ на люминесцентные свойства ЛДП состава Y_2O_2S : Ti, Mg весьма немногочисленны [2–4], цель настоящей работы заключалась в систематическом изучении влияния некоторых РЗЭ (от Ce до Yb) на люминесцентные свойства данного ЛДП и установлении на основе полученных результатов возможности создания ЛДП с новым комплексом светотехнических параметров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходного сырья для синтеза люминофоров использовали Y_2O_3 марки ИТО-В, LiF марки “чда для спектрального анализа” и другие реагенты марки “осч”. Синтез образцов для исследований осуществляли по оригинальной методике, основанной на сульфидизации оксидов РЗЭ в расплавах различных серусодержащих соедине-

[1] Ставропольский государственный университет, Ставрополь.
[2] Южный научный центр Российской Академии наук, Ростов-на-Дону.
[3] Закрытое акционерное общество «Научно-производственная фирма “Люминофор”», Ставрополь.
[4] Физический институт Российской Академии наук, Москва.

Таблица 1. Относительная яркость послесвечения ЛДП состава $Y_{1,995}Ln_{0,005}O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ и $Y_{1,95}Ln_{0,05}O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ через 10 и 20 мин после прекращения возбуждения (Ln – ион РЗЭ)

Ln	Относительная яркость послесвечения, %			
	$x = 0{,}005$		$x = 0{,}05$	
	через 10 мин	через 20 мин	через 10 мин	через 20 мин
Ce	0	0	0	0
Pr	0	0	0	0
Nd	37	36	0	0
Sm	89	87	26	24
Eu	89	86	29	27
Tb	0	0	0	0
Dy	76	72	18	17
Ho	58	55	0	0
Er	75	74	10	9
Tm	74	72	10	9
Yb	88	84	27	25

ний щелочных металлов и минерализаторов в атмосфере SO_2. Полноту протекания реакций образования ЛДП контролировали при помощи рентгенофазового (РФА) и химического (ХА) методов анализа. Съемку рентгенограмм по методу порошка проводили на дифрактометре ДРОН-2 (CuK_α-излучение, N-фильтр, чувствительность – 0,3–3% определяемой фазы). Идентификацию фаз изучаемых материалов осуществляли с помощью картотеки ASTM [5]. Измерение относительной яркости послесвечения образцов ЛДП при фотовозбуждении проводили по стандартной методике, относительно типового образца ФВ-626 состава Y_2O_2S : Ti, Mg, длительность возбуждения составляла 10 мин. Яркость антистоксовой люминесценции образцов измеряли относительно типового образца ФСД-546–2. Спектры возбуждения и люминесценции записывали в автоматическом режиме на спектрофотометре Hitachi-850.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты проведенных исследований позволили установить (табл. 1), что по степени влияния на яркость послесвечения ЛДП состава $Y_2O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ изученные ионы РЗЭ можно разделить на три группы. В первую группу входят ионы Ce^{3+}, Pr^{3+}, Tb^{3+}, способные проявлять наряду с наиболее характерной для РЗЭ степенью окисления +3, более высокую степень окисления +4. Это явление объясняется различиями в энергетических состояниях на подуровне $4f$ и стремлением электронных оболочек указанных элементов за счет потери электрона принимать электронную конфигурацию ближайшего из устойчивых трехвалентных ионов РЗЭ [6–8]. Среди РЗЭ выделяются своей устойчивостью ионы трех электронных конфигураций. Конфигурация La^{3+} является наиболее устойчивой, так как она изоэлектронна электронной конфигурации благородного газа ксенона ($5s^25p^6$). Конфигурация иона Gd^{3+} имеет наполовину заполненную $4f$-оболочку (f^7). Согласно [6], ионы Ce^{3+}, Pr^{3+}, Tb^{3+} при окислении могут легко достигать устойчивых конфигураций ионов La^{3+} и Gd^{3+}. По-видимому, благодаря такой способности, указанные выше ионы среди остальных РЗЭ являются наиболее сильными тушителями яркости послесвечения ЛДП состава $Y_2O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$. Как следует из табл. 1, ионы Ce^{3+}, Pr^{3+}, Tb^{3+} даже при минимально вводимой концентрации ($5 \cdot 10^{-3}$ ат. д.) практически полностью подавляют яркость послесвечения образцов ЛДП состава $Y_2O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$.

Ко второй группе относятся относительно устойчивые трехвалентные ионы Nd^{3+}, Dy^{3+}, Ho^{3+}, Er^{3+}, Tm^{3+}, занимающие промежуточное положение по степени влияния на яркость послесвечения ЛДП изучаемого состава. Характер влияния этих ионов РЗЭ на яркость послесвечения Y_2O_2S : Ti, Mg зависит от их концентрации в люминофоре. В наибольшей степени эта зависимость проявляется для ионов Nd^{3+} и Ho^{3+} (табл. 1). Согласно табл. 1, увеличение содержания ионов Nd^{3+} и Ho^{3+} в ЛДП состава Y_2O_2S : Ti, Mg до $x = 0{,}05$ ат. д. приводит к полному тушению яркости послесвечения образцов.

Особое место среди указанных выше ионов РЗЭ занимает диспрозий (III). Ион Dy^{3+} существенно отличается от остальных ионов второй группы по степени воздействия на яркость послесвечения ЛДП Y_2O_2S : Ti, Mg и близок к ионам Eu^{3+}, Yb^{3+} и Sm^{3+} (табл. 1).

В третью группу входят ионы Sm^{3+}, Eu^{3+}, Yb^{3+}, которые оказывают наименьшее среди изучен-

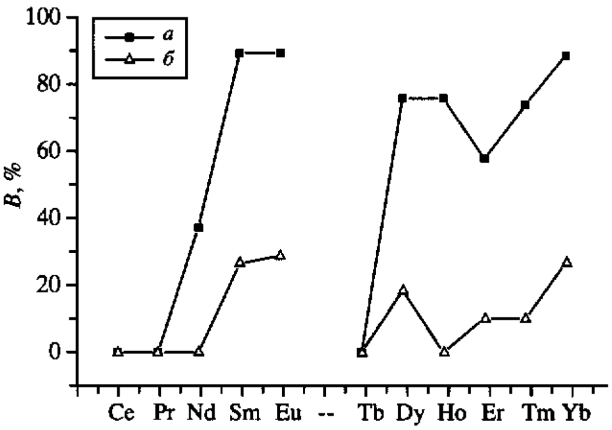


Рис. 1. Зависимость яркости послесвечения ЛДП $Y_{2-x}Ln_xO_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ через 10 мин после прекращения возбуждения от порядкового номера РЗЭ: *а* – *x* = 0,005; *б* – *x* = 0,05

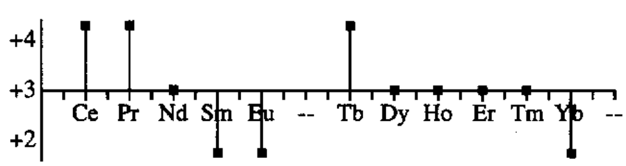


Рис. 2. Схема зарядовых состояний РЗЭ в ряду Ce–Yb

ных элементов тушащее действие на яркость послесвечения ЛДП $Y_2O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$.

Отличительной особенностью последней группы ионов РЗЭ является их способность проявлять наряду со степенью окисления +3 более низкую степень окисления +2 [6]. Это явление связано со стремлением электронных оболочек этих элементов к образованию стабильных конфигураций f^7 и f^{14} в результате захвата электрона. Например, электронная структура иттербия такова, что у нормально ионизированного состояния на 4*f*-подуровне недостает всего лишь одного электрона для реализации конфигурации типа Lu^{3+}, устойчивость которой объясняется предельным заполнением 4*f*-оболочки (f^{14}). Переход электрона в определенных условиях и обусловливает возможность существования ионов иттербия в двухвалентном состоянии [7]. Стремление к созданию конфигурации Gd^{3+} (f^7) делает понятным и переход европия и самария в двухвалентное состояние [6]. Наиболее наглядно влияние изменения зарядового состояния РЗЭ на степень тушения яркости послесвечения ЛДП состава $Y_2O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ проявляется при сравнении данных, приведенных на рис. 1 и 2.

Анализ спектров стационарной люминесценции образцов ЛДП состава $Y_{1,95}Eu_{0,05}O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ и $Y_{1,95}Sm_{0,05}O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ позволил установить, что соактивация $Y_2O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ ионами Eu^{3+} и Sm^{3+} приводит к изменению его спектрального состава излучения вследствие подавления связанной с ионами титана широкой полосы излучения с максимумом при 625 нм и появления характерных для ионов Eu^{3+} и Sm^{3+} узких полос излучения в желто-красной области спектра (рис. 3, 4).

Значительный интерес для науки и практики представляют полученные нами результаты по изучению влияния ионов Yb^{3+} на спектральный состав ЛДП состава Y_2O_2S : Ti, Mg. В ходе исследований по изучению влияния возбуждающего

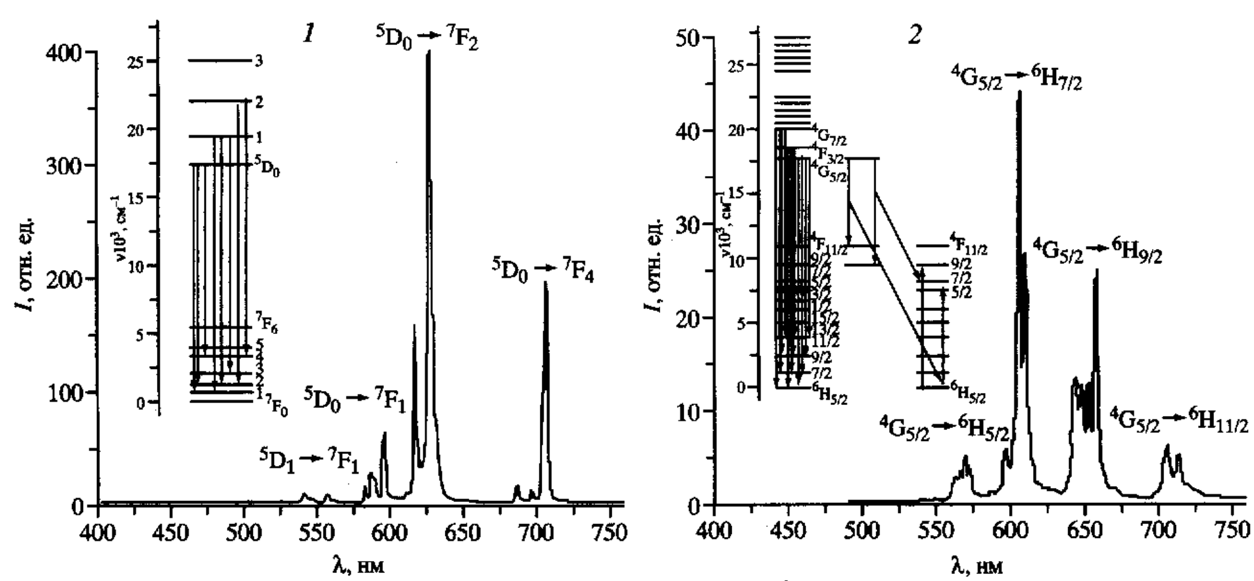


Рис. 3. Спектры стационарной люминесценции ($\lambda_{возб}$ = 254 нм) образцов ЛДП состава: *1* – $Y_{1,95}Eu_{0,05}O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$; *2* – $Y_{1,95}Sm_{0,05}O_2S : Ti_{0,12}Mg_{0,04}$

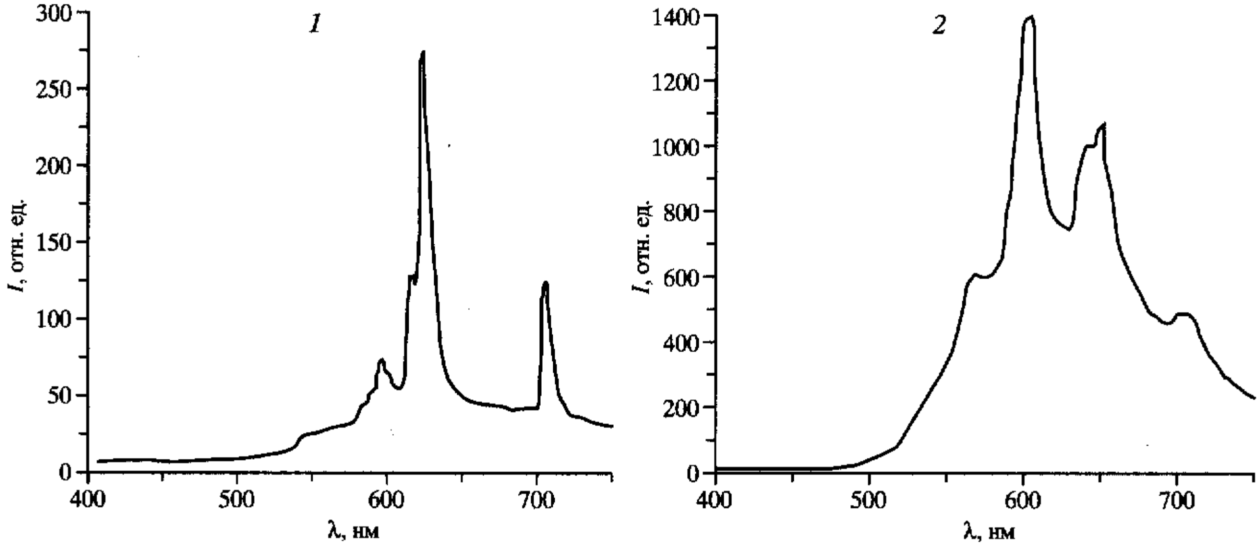


Рис. 4. Спектры послесвечения (через 1 мин) образцов ЛДП состава: *1* – $Y_{1,95}Eu_{0,05}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$; *2* – $Y_{1,95}Sm_{0,05}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$

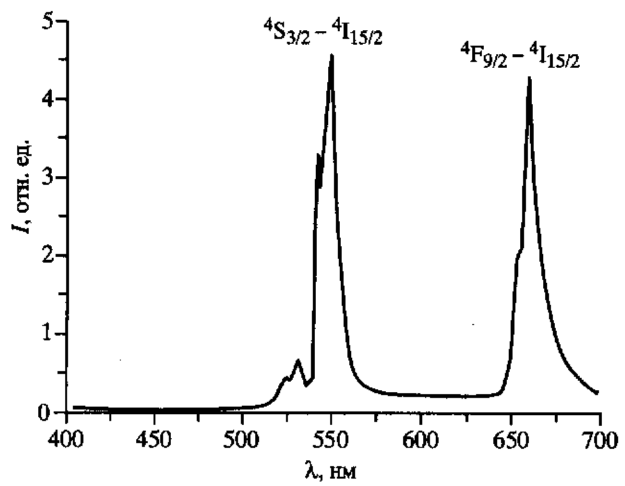


Рис. 5. Спектр излучения образца ЛДП $Y_{1,975}Yb_{0,025}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ при возбуждении ИК-излучением (960 нм)

света различных длин волн на спектральный состав излучения ЛДП данного состава удалось впервые установить, что соактивация ионами иттербия (III) приводит при возбуждении GaAs : Si-диода ИК-излучением (λ_{max} = 960 нм) к появлению антистоксовой люминесценции. Как предполагается, причиной ее возникновения является наличие в исходных материалах неконтролируемой примеси ионов эрбия. Это подтверждается наличием в спектре люминесценции характерных для иона Er^{3+} полос излучения в области 520–580 и 650–680 нм (переходы $^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и $^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, соответственно) (рис. 5).

Таблица 2. Относительная яркость послесвечения через 10 мин (В) и антистоксовой люминесценции (*I*) ЛДП состава $Y_{1,975}Yb_{0,025}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ и $Y_{1,975-x}Yb_{0,025}Er_xO_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$

№	Формула ЛДП	*B*, %	*I*, %
1	$Y_{1,975}Yb_{0,025}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$	47,6	1
2	$Y_{1,974}Yb_{0,025}Er_{0,001}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$	43,9	2,6
3	$Y_{1,97}Yb_{0,025}Er_{0,005}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$	42,7	6,1
4	$Y_{1,965}Yb_{0,025}Er_{0,01}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$	37,9	8,2
5	$Y_{1,95}Yb_{0,025}Er_{0,025}O_2S$: $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$	19,8	10,8

Можно ожидать, что введение ионов эрбия усилит антистоксовые свойства состава Y_2O_2S : Yb, Ti, Mg, что и было подтверждено экспериментально. Исследование образцов концентрационной серии по эрбию показало принципиальную возможность создания люминофора, сочетающего в себе способность к длительному послесвечению и к антистоксовой люминесценции (табл. 2).

При возбуждении излучением 960 нм люминесценция образцов состава Y_2O_2S : Yb, Er, Ti, Mg имеет спектр, характерный для антистоксового люминофора с зеленым цветом свечения с преобладанием полосы 546 нм. Кроме того, зеленая антистоксовая люминесценция наблюдается для образцов $Y_{1,975-x}Yb_{0,025}Er_xO_2S$: Ti, Mg до и после облучения УФ- или дневным светом.

Приведенная часть экспериментальных данных свидетельствует, что введение ионов иттербия (III) и эрбия (III) в ЛДП состава Y_2O_2S : Ti, Mg позволяет создать люминесцентный материал с новым сочетанием люминесцентных свойств, который может найти практическое применение в изделиях, где в одном материале требуется максимальное количество отличительных признаков, а именно наличие:

- широкополосной титановой и узкополосной стоксовой эрбиевой люминесценций при стационарном возбуждении УФ-излучением ($\lambda_{возб}$ = 254 и 365 нм), соотношение между интенсивностями которых может регулироваться концентрацией ионов Er^{3+};
- узкополосной антистоксовой эрбиевой люминесценции с двумя группами полос – зеленой (520–580 нм) и красной (650–680 нм) при возбуждении ИК-излучением ($\lambda_{возб.}$ = = 960 нм) (соотношение интенсивностей этих полос можно менять в определенных пределах);
- относительно длительной широкополосной титановой и узкополосной эрбиевой люминесценций после прекращения возбуждения УФ-излучением ($\lambda_{возб.}$ = 254 и 365 нм);
- узкополосной антистоксовой эрбиевой люминесценции при возбуждении ИК-излучением ($\lambda_{возб.}$ = 960 нм) предварительно облученного УФ-светом люминофора.

Таким образом, полученные результаты позволили установить, что ряд ионов РЗЭ, способных менять свое зарядовое состояние от +3 до +4 (Ce, Pr, Tb), являются эффективными тушителями яркости послесвечения ЛДП состава Y_2O_2S : $Ti_{0,12}Mg_{0,04}$ и не могут быть использованы в работе по созданию ЛДП на основе оксосульфида иттрия. Эти результаты позволяют также обосновать технические требования к качеству исходного сырья и сформулировать важный для практических целей вывод. Учитывая чрезвычайную чувствительность ЛДП Y_2O_2S : Ti, Mg к микропримесям указанных РЗЭ, их содержание в исходных материалах не должно превышать 1-5,10-4%. Кроме того, полученные данные указывают, что среди изученных систем максимальной яркостью послесвечения обладают ЛДП, соактивированные Eu, Yb и Sm, обладающими в ряду Ce–Yb наибольшим сродством к электрону [6]. Соактивация ЛДП Y_2O_2S : Ti, Mg ионами Sm^{3+}, Eu^{3+} и Yb^{3+}, Er^{3+} приводит к получению на его основе практически важных ЛДП с новым комплексом спектральных свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богатырева А.А., Ищенко В.М., Манаширов О.Я.* Физико-химические аспекты синтеза люминофоров с длительным послесвечением на основе оксисульфида иттрия. Сообщение 1: Синтез и исследование Y_2O_2S : Ti, Y_2O_2S : Mg и Y_2O_2S : Ti, Mg // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2. № 1. С. ?
2. *Wang X., Zhang Z., Tang Z., Lin Y.* Characterization and properties of a red and orange Y_2O_2S – based long afterglow phosphor // Mater. Chem. Phys. 2003. V. 80. P. 1–5.
3. *Lei B., Liu Y., Tang G., Ye Z., Shi C.* Spectra and long lasting properties of Sm^{3+}-doped yttrium oxysulfide phosphor // Materials Chemistry and Physics 2004. V. 87. P. 227–232.
4. *Murazaki Y., Arai K.* Red light emitting long afterglow photoluminescence phosphor and afterglow lamp thereof. Пат. США № 6617781 B2 от 09.09.2003 кл. 252/301. 4S.
5. X-ray Powder Diffraction Data File American Society for testing and Materials. Philadelphia, 1972.
6. Химия и технология редких и рассеянных элементов / Под ред. К.А. Большакова. Часть II. М.: "Высшая школа", 1976, 360 с.
7. *Рябчиков Д.И, Рябухин В.А.* Аналитическая химия редкоземельных элементов и иттрия. М.: Изд-во "Наука", 1966, 380 с.
8. Физика и химия редкоземельных элементов: Справочник / Под. ред. К. Гшнайднера и Л. Айринга / Пер. с англ. М.: "Металлургия", 1982. 336 с.

THE PHYSIOCHEMICAL POINTS OF SYNTHESIS OF LONG PERSISTENCE PHOSPHORS ON THE BASIS OF YTTRIUM OXOSULFIDES

REPORT 2. STUDYING OF CERTAIN RARE-EARTH ELEMENTS INFLUENCE ON Y_2O_2S : Ti, Mg LUMINESCENCE

A.A. Bogatureva, V.M. Ishchenko, O.Y. Manashirov, V.B. Gutan, Y.P. Timofeev

The influence of ions of (Ce–Yb) on the light luminosity and spectral distribution of phosphor Y_2O_2S : Ti, Mg. It is determined that the Ce^{3+}, Pr^{3+}, Tb^{3+} ions are the effective quenching agents of luminosity persistence of the given phosphor and Y_2O_2S : Ti, Mg coactivation with Eu^{3+}, Sm^{3+}, Yb^{3+} ions leads to the formation of new practical important phosphors possessing new characteristics.

ВЕСТНИК ЮЖНОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН, том 2, № 2, 2006, стр. 29-36

ХИМИЯ

УДК 547.514.72+541.623

ФЛУКТУИРУЮЩИЕ ЦИКЛОПЕНТАДИЕНОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ – ЭФФЕКТИВНЫЕ ПЕРЕНОСЧИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП

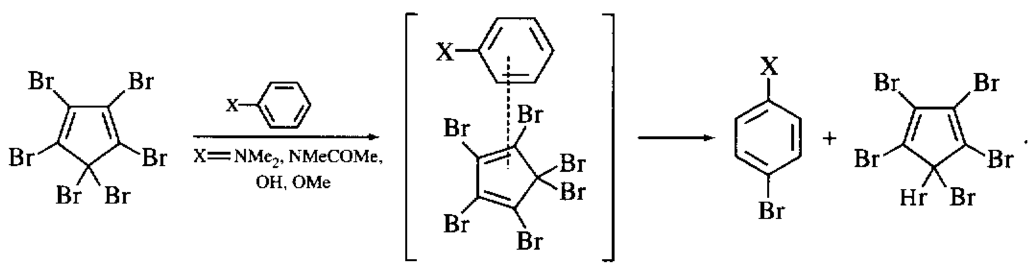
© 2006 г. Г.А. Душенко[1], И.Е. Михайлов[1], академик В.И. Минкин[2]

Арилазо- и арилтио- пентаметоксикарбонилциклопентадиены, легко вступая в реакции с нуклеофильными реагентами при комнатной температуре, а также будучи устойчивыми и растворимыми в большинстве органических растворителей, могут использоваться как удобные и "мягкие" реагенты для селективного введения арилазо и арилтио групп в соединения, содержащие нуклеофильные углеродные и азотные центры.

Характерной чертой производных циклопентадиена, в которых осуществляются карусельные внутримолекулярные низкоэнергетические миграции элементцентрированных групп, является лабильность связи циклопентадиеновое кольцо – мигрант. Кроме того, известна устойчивость циклопентадиенид-аниона, особенно стабилизированного электроноакцепторными заместителями, и его способность выступать в качестве хорошей уходящей группы.

Известны лишь единичные примеры подобного рода реакций переноса. Потенциально флуктуирующий гексабромциклопентадиен способен к межмолекулярному переносу брома к нуклеофильным углеродным центрам [1, 2]. Этот реагент гладко бромирует ароматические амины и спирты, фураны, тиофены, а также кетоны с активированными α-углеродными атомами, причем реакции электрофильного замещения ароматических соединений происходят селективно в *пара*-положение благодаря образованию промежуточных π-комплексов (схема I).

Схема I



Циклопентадиенильный лиганд проявляет свойства хорошей уходящей группы и в реакциях обмена флуктуирующих P-, Ga-, Si-, Sn-, Ge-центрированных производных пентаметилциклопентадиена с нуклеофилами [3].

В связи с этим в данной работе была предпринята попытка осуществить межмолекулярные переносы элементцентрированных групп от соответствующих производных циклопентадиена на нуклеофильные центры других молекул. В качестве таких переносчиков были выбраны арилазо- и арилтио- производные пентаметоксикарбонилциклопентадиена, в которых перегруппировки элементцентрированных групп происходят с наиболее низкими активационными барьерами ($\Delta G^{\#}_{25\,°C}$, ккал/моль: $-N=NAr$ 13.6–15.3, $-SAr$ 16.0–20.7 [4–6]).

[1] Южный научный центр Российской Академии наук, Ростов-на-Дону.
[2] Научно-исследовательский институт физической и органической химии Ростовского государственного университета, Ростов-на-Дону.

REFERENCES

1. Bogatyreva A.A., Ishchenko V.M., Manashirov O.Ya. 2006. [The physicochemical points of synthesis of long persistence phosphors of the basis of yttrium oxysulfide. Report 1: Y_2O_2S:Ti, Y_2O_2S:Mg and Y_2O_2S:Ti,Mg synthesis and studying]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 2(1): 37–43. (In Russian).
2. Wang X., Zhang Z., Tang Z., Lin Y. 2003. Characterization and properties of a red and orange Y_2O_2S – based long afterglow phosphor. *Mater. Chem. Phys*. 80: 1–5.
3. Lei B., Liu Y., Tang G., Ye Z., Shi C. 2004. Spectra and long lasting properties of Sm^{3+}-doped yttrium oxysulfide phosphor. *Materials Chemistry and Physics*. 87: 227–232.
4. Murazaki Y., Arai K. 2003. *Red light emitting long afterglow photoluminescence phosphor and afterglow lamp thereof*. Pat. USA No 6617781 B2, 09.09.2003 kl. 252/301. 4S.
5. *X-ray Powder Diffraction Data File American Society for testing and Materials*. 1972. Philadelphia.
6. *Khimiya i tekhnologiya redkikh i rasseyannykh elementov*. [*Chemistry and technology of rare and scattered elements*]. 1976. (Ed. K.A. Bolshakov). Part II. Moscow, Vysshaya shkola Publ.: 360 p. (In Russian).
7. Ryabchikov D.I., Ryabukhin V.A. 1966. *Analiticheskaya khimiya redkozemel'nykh elementov i ittriya*. [*Analytical chemistry of rare earth elements and yttrium*]. Moscow, Nauka Publ.: 380 p. (In Russian).
8. Gshnaydner K., Ayring L. (Ed.). 1982. *Fizika i khimiya redkozemel'nykh elementov: Spravochnik. Per. s angl.* [*Physics and chemistry of rare earth elements: Directory. Transl. from eng.*]. Moscow, Metallurgiya Publ.: 336 p. (In Russian).