НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2021, том 57, № 12, с. 1352–1358

УДК 546.47:535.37

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В НАНОКОМПОЗИТАХ ОКСИДА ЦИНКА С ОКСИДАМИ ЭРБИЯ И ИТТЕРБИЯ

© 2021 г. И. О. Собина[1], В. Ю. Тимошенко[1], С. В. Савилов[1], А. Ю. Стеблянко[2], А. Н. Баранов[1, *]

[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия*

[2]*Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет), ул. Трубецкая, 8, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: anb@inorg.chem.msu.ru*

Поступила в редакцию 01.07.2021 г.
После доработки 29.07.2021 г.
Принята к публикации 29.07.2021 г.

Нанокомпозиты, состоящие из наночастиц оксида цинка и оксида эрбия и иттербия, были синтезированы из спиртовых растворов и подвергнуты термическому отжигу на воздухе. Фазовый и химический состав, а также микроструктура полученных образцов исследованы методами рентгеновской дифракции, рентгенофлуоресцентным анализом, методами просвечивающей электронной микроскопии, включая рентгеноспектральный микроанализ, и фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии. В спектрах ФЛ нанокристаллов ZnO, декорированных нанокристаллами Yb_2O_3, обнаружено возрастание относительной интенсивности полосы ФЛ ионов Yb^{3+} при приближении к двойной энергии возбуждения ионов Yb^{3+}, что указывает на наличие кооперативного механизма возбуждения ионов при передаче энергии электронного возбуждения от матрицы ZnO. Установлено, что при совместном присутствии ионов Er^{3+} и Yb^{3+} в фазе оксида редкоземельных элементов (РЗЭ) интенсивность ФЛ ионов Yb^{3+} уменьшается, что указывает на конкуренцию процессов возбуждения ионов Er^{3+} и Yb^{3+} при передаче энергии от ZnO к ионам РЗЭ. Полученные результаты указывают на пути использования нанокомпозитов на основе ZnO и РЗЭ для создания люминесцентных источников в широком спектральном диапазоне.

Ключевые слова: нанокристаллы, нанокомпозиты, оксид цинка, эрбий, иттербий, фотолюминесценция

DOI: 10.31857/S0002337X21120137

ВВЕДЕНИЕ

Ионы редкоземельных элементов (**РЗЭ**) имеют низкий коэффициент поглощения света, поэтому для их эффективного возбуждения нужно использовать различные сенсибилизаторы широкополосного поглощения, например, органические лиганды [1] или полупроводниковую матрицу [2].

Известным сенсибилизатором ионов РЗЭ является матрица ZnO, которая уже была успешно применена для передачи энергии к ионам РЗЭ при поглощении внешнего УФ-излучения [3, 4]. Оксид цинка благодаря широкой запрещенной зоне (порядка 3.3 эВ) проявляет эффективную люминесценцию в УФ-диапазоне за счет экситонных состояний и в видимом диапазоне за счет дефектных состояний [5, 6].

Расширение спектра люминесценции в ближний ИК-диапазон важно для многих приложений, например, для понижающего преобразования энергии в солнечных батареях [7], а также для ИК-люминесцентных меток в целях биовизуализации в области наибольшей прозрачности биологической ткани [8]. Известно, что ион Yb^{3+} из-за наличия только двух уровней для возбуждения требует обычно резонансных условий. Присутствие наночастиц Yb_2O_3 на поверхности наночастиц ZnO может увеличить эффективность возбуждения ионов Yb^{3+} для последующего излучения в ближнем ИК-диапазоне [8]. В таких нанокомпозитах эффективное возбуждение ионов Yb^{3+} объясняется переносом энергии от фотовозбужденных наночастиц ZnO по механизму Ферстера, в частности по механизму “разрезания кванта”, когда возбуждение от матрицы ZnO в виде высокоэнергетичного кванта передается одновременно двум ионам Yb^{3+} и реализуется в виде испускания двух низкоэнергетичных фотонов [8–11].

Увеличение интенсивности в видимом диапазоне через повышающее преобразование энергии может использоваться в оптоэлектронике, биовизуализации, детекторах ИК-излучения [12, 13]. Этого

Таблица 1. Элементный состав исследуемых образцах по данным РФлА

Образец	ZOEr1Yb1	ZOEr1Yb5	ZOEr2Yb2	ZOEr2Yb5
Zn, ат. %	96.6 ± 0.1	90.5 ± 0.1	94.9 ± 0.1	90.8 ± 0.1
Er, ат. %	2.0 ± 0.1	1.8 ± 0.1	3.6 ± 0.1	2.9 ± 0.1
Yb, ат. %	1.4 ± 0.1	7.7 ± 0.1	1.5 ± 0.1	6.3 ± 0.1

можно достичь, используя пару ионов Er^{3+} + Yb^{3+} [14–17]. За счет наличия совпадающих каналов возбуждения уровней ионов Er^{3+} и Yb^{3+} на длине волны около 980 нм (переходы $^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ с длиной волны 988 нм и $^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ с длиной волны 964 нм для Er^{3+}; переход $^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$ с длиной волны около 980 нм для Yb^{3+}) они могут обмениваться энергией [18]. В частности, может происходить перенос энергии от ионов Yb^{3+} к ионам Er^{3+} с последующим ап-конверсионным возбуждением уровней ионов Er^{3+}.

В данной работе для получения нанокомпозитов $ZnO/(Er,Yb)_2O_3$ была использована методика синтеза из спиртовых растворов, с помощью которой ранее была показана эффективность передачи энергии от ZnO отдельно к ионам Yb^{3+} [8]. Предполагалось исследовать фотолюминесценцию (**ФЛ**), механизмы передачи энергии в таких нанокомпозитах от полупроводниковой матрицы ZnO к ионам Er^{3+} и Yb^{3+} и механизмы обмена энергией между ионами РЗЭ.

Целью работы являлось изучение зависимости эффективности люминесценции ионов иттербия и эрбия от состава нанокомпозита на основе оксида цинка, а также исследование особенностей возбуждения ионов РЗЭ квантами света с различной энергией, что позволит выяснить потенциал таких нанокомпозитов для создания светоизлучающих устройств в широком спектральном диапазоне.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы были приготовлены с использованием следующих реагентов:

$Zn(CH_3COO)_2{\cdot}2H_2O$ (Aldrich), $Er(NO_3)_3{\cdot}5H_2O$ (“х. ч.”), $Yb(NO_3)_3{\cdot}4H_2O$ (“х. ч.”), $LiOH{\cdot}H_2O$ (“х. ч.”), CH_3OH (для хроматографии).

Нанокомпозиты $ZnO/(Er,Yb)_2O_3$ были приготовлены из спиртовых растворов с последующим термическим отжигом на воздухе при 700°C по методике, описанной в работе [8]. Синтез проводили из спиртовых растворов в метаноле по следующей реакции:

$$\{Zn(CH_3COO)_2 + xEr(NO_3)_3 + yYb(NO_3)_3\} + (2 + 3(x + y))LiOH \rightarrow ZnO/(xEr + yYb)O_{1.5} + 2CH_3COOLi + 3H_2O + 3(x + y)LiNO_3,$$

где x – атомное содержание Er, y – атомное содержание Yb. Этот метод позволил получить наночастицы $ZnO/(Er,Yb)_2O_3$, которые были стабильны в спиртовом растворе за счет ацетатных групп, адсорбированных на их поверхности.

В обозначении образцов, например ZOEr2Yb2, отражаются содержания в мольных процентах РЗЭ в оксиде цинка (2 мол. % Er и 2 мол. % Yb).

Для контроля элементного состава приготовленных образцов был проведен рентгенофлуоресцентный анализ (**РФлА**) на приборе ДР-02 “Радиан” при напряжении 15 кВ и силе тока 3 мА. Анализировались относительные интенсивности сигналов и соответствующие атомные доли Zn, Er, Yb.

Исследование образцов $ZnO/(Er,Yb)_2O_3$ методом просвечивающей электронной микроскопии (**ПЭМ**) проводили на приборе JEM 2100F (JEOL Co. Ltd., Япония) с ускоряющим напряжением 200 кВ, снабженном корректором сферических и хроматических аберраций, установленным в просвечивающей моде, и энергодисперсионным рентгеноспектральным анализатором для определения элементного состава. Методика приготовления образца для анализа включала в себя диспергирование навески образца (1 мг) в воде при воздействии ультразвука в течение 15 мин. После этого каплю полученной суспензии наносили на медную сетку, предварительно покрытую слоем поливинилформаля.

РФА проводили на дифрактометре Rigaku D/MAX 2500 (излучение CuK_α).

Спектры ФЛ образцов измеряли при комнатной температуре на воздухе с помощью спектрометра Mightex при возбуждении различными непрерывными лазерными источниками с длинами волн 365, 405, 465, 532, 650 нм и мощностями 300, 500, 100, 50, 180 мВт соответственно. Порошки образцов наносились на металлические пластинки и фиксировались спиртовым раствором (этанолом).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные методом РФлА значения концентраций элементов исследуемых образцов в целом коррелируют с заложенными (табл. 1).

Согласно РФА (рис. 1), синтезированные наночастицы в основном представляют собой хоро-

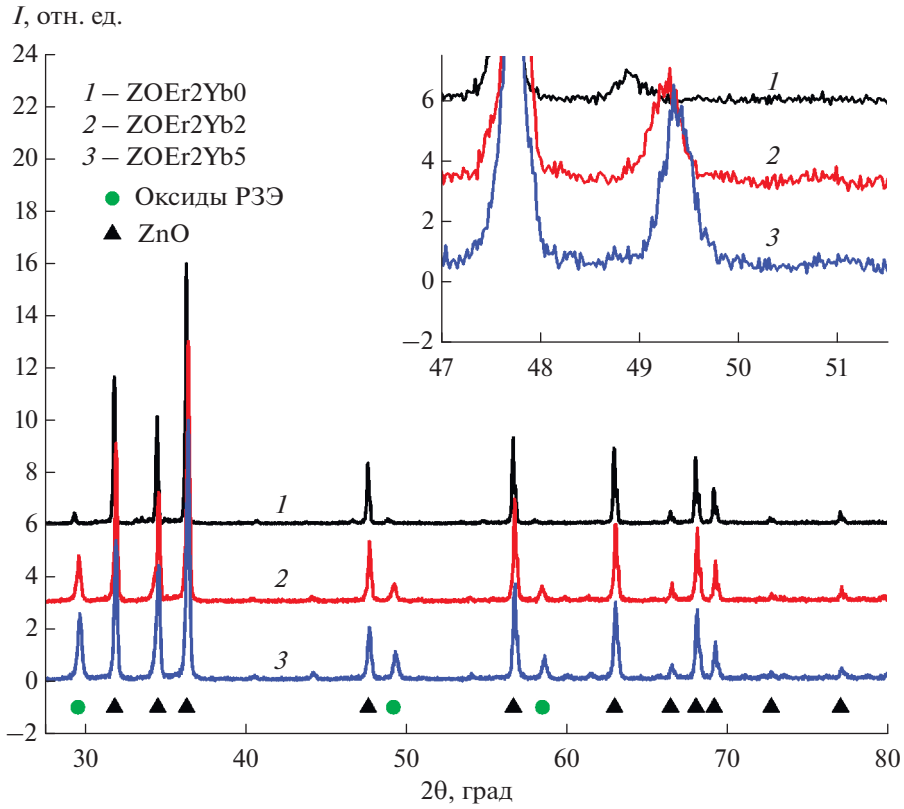

Рис. 1. Рентгенограммы образцов ZOEr2Yb с содержанием Yb от 0 до 5%.

шо закристаллизованную фазу ZnO (структура вюрцита, пр. гр. $P6_3mc$, карточка 36-1451) и твердый раствор оксидов эрбия и иттербия.

Рассчитанные параметры кристаллических решеток и размеры областей когерентного рассеяния (**ОКР**) для ZnO и оксидов РЗЭ показаны в табл. 2. Параметры решетки ZnO не находятся в явной связи с концентрациями РЗЭ, что косвенно подтверждает отсутствие катионов РЗЭ в решетке оксида цинка [8, 9]. Изменение относительной концентрации Er_2O_3 и Yb_2O_3 приводит к линейному сдвигу пиков, соответствующих твердому раствору оксидов РЗЭ, в котором, согласно рассчитанным параметрам решетки, крайними составами являются Er_2O_3 (кубическая структура, пр. гр. $Ia3$, карточка 8-50) и Yb_2O_3 (кубическая структура, пр. гр. $Ia3$, карточка 41-1106).

Размер ОКР образцов, определяемый уширением дифракционных пиков, находится в пределах 40–70 нм для ZnO и 14–48 нм для оксидов РЗЭ. Размеры нанокристаллов Er_2O_3 составляют 43–48 нм и уменьшаются в твердом растворе при увеличении содержания Yb_2O_3. Размеры нанокристаллов ZnO не находятся в явной связи с суммарной концентраций РЗЭ.

Средний размер кристаллитов ZnO, определенный из соответствующих пиков дифракции по

Таблица 2. Размеры кристаллитов в исследуемых образцах по данным РФА с использованием формулы Шеррера

Образец	*a*, нм	*c*, нм	*D*, нм	*a*, нм	*D*, нм
	ZnO			$(Er,Yb)_2O_3$	
ZOEr1Yb1	3.2526(2)	5.2110(4)	48 ± 9	10.488(3)	31 ± 15
ZOEr1Yb5	3.2504(6)	5.212(2)	40 ± 6	10.4332(3)	14 ± 6
ZOEr2Yb2	3.2528(1)	5.2099(2)	54 ± 9	10.501(2)	34 ± 13
ZOEr2Yb5	3.2526(2)	5.2100(6)	42 ± 7	10.461(3)	30 ± 14
ZOEr1	3.2516(1)	5.2073(2)	66 ± 17	10.538(2)	43 ± 29
ZOEr2	3.2534(8)	5.212(3)	71 ± 8	10.543(1)	48 ± 36

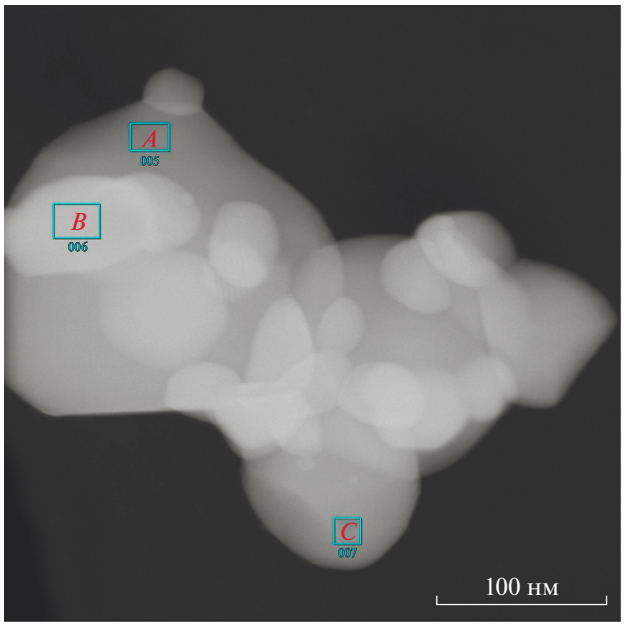

Рис. 2. ПЭМ-снимок образца ZOEr2Yb5.

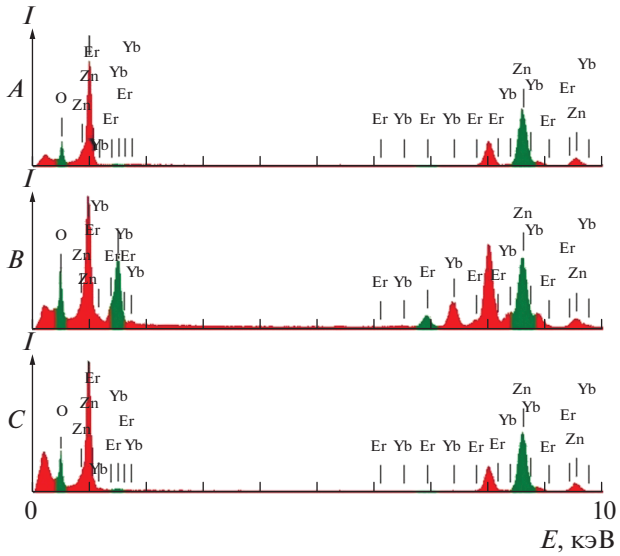

Рис. 3. Спектр характеристического рентгеновского излучения выделенных областей на ПЭМ-снимке (рис. 2).

методу Вильямсона–Холла, для образца ZOEr2Yb5 составил 40.7 ± 5.1 нм ($\varepsilon = 5.6 \times 10^{-4}\%$), что близко к определенному по формуле Шеррера. Следовательно, деформации в нанокристаллах малы и основную роль в уширении пиков играют размерные эффекты.

Данные ПЭМ показывают, что наночастицы ZOEr2Yb5, отожженные при 700°C, имеют форму, близкую к сферической, а их размер составляет 80–500 нм для более темных по контрасту частиц и 10–80 нм для более светлых (рис. 2). Можно предположить, что более темный контраст отвечает частицам ZnO, а более светлый – оксидам РЗЭ, что находится в соответствии с рассчитанными ранее по данным РФА размерами кристаллитов, если предположить, что крупные частицы ZnO могут состоять из нескольких кристаллитов. Данное предположение подтверждается спектрами характеристического рентгеновского излучения (рис. 3). Хорошо видно, что крупные (темные) наночастицы соответствуют ZnO (области *A*, *C*), а мелкие (светлые) – твердому раствору оксидов РЗЭ (область *B*). Причем на других спектрах характеристического излучения пики Er и Yb также всегда присутствовали вместе, что подтверждает нахождение Er_2O_3 и Yb_2O_3 в одной кристаллической решетке. Это предположение подтверждает и рис. 4. Можно заметить, что наночастицы отличаются типом кристаллических решеток, причем крупная наночастица имеет гексагональную структуру (ZnO), а мелкая кубическую (оксиды РЗЭ).

Согласно рис. 5, в спектре ФЛ нанокомпозитов на основе ZnO присутствуют широкая полоса с максимумом около 580–600 нм, которая связана с электронными переходами в состояниях дефектов, а также узкая линия около 980 нм, соответствующая переходу $^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ в ионах Yb^{3+}. Появление ФЛ иона Yb^{3+} сопровождается уменьшением интенсивности ФЛ полосы дефектных состояний. Этот факт можно интерпретировать как возбуждение ионов Yb^{3+} за счет передачи энергии от фотовозбужденных наночастиц ZnO.

Зависимость нормированной интенсивности ФЛ ионов Yb^{3+} образца ZOYb0.5 от энергии возбуждающих квантов немонотонная и имеет выраженный максимум (рис. 6). Это указывает на то, что эффективность возбуждения ионов Yb^{3+} значительно возрастает при приближении энергии возбуждающих фотонов к удвоенной энергии уровней Yb^{3+} –

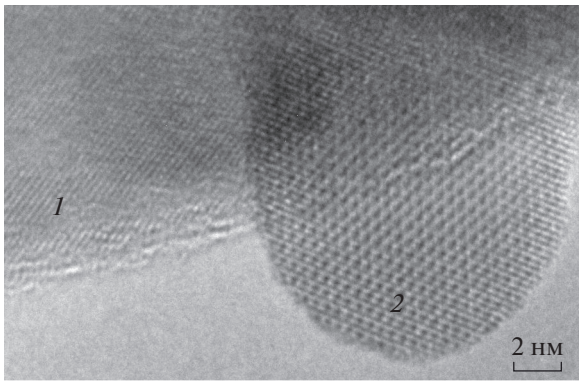

Рис. 4. ПЭМ-снимок с высоким разрешением образца ZOEr2Yb5 (*1* – ZnO, *2* – оксиды РЗЭ).

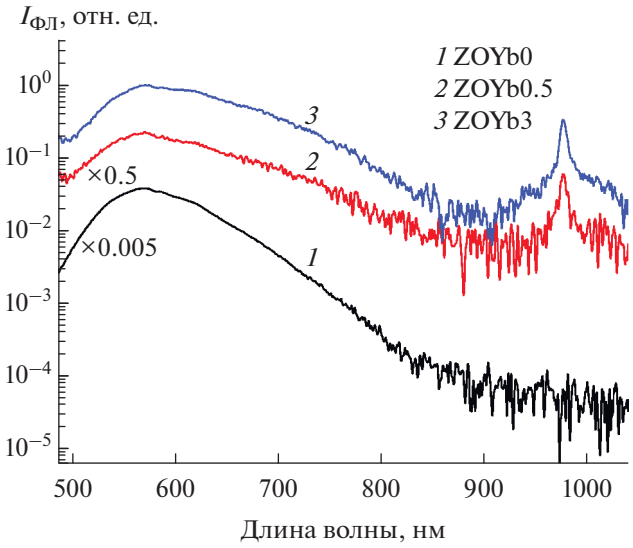

Рис. 5. Спектры ФЛ нанокомпозитов на основе ZnO с различным содержанием Yb (длина волны возбуждающего света 465 нм).

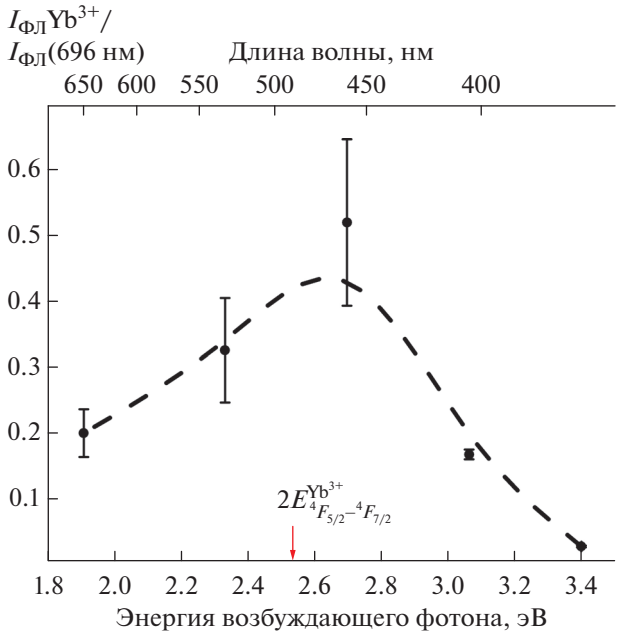

Рис. 6. Зависимость отношения интенсивности ФЛ ионов Yb^{3+} к интенсивности дефектной полосы (696 нм) от длины волны возбуждения (непрерывный лазер) для нанокомпозита ZOYb0.5.

2.52 эВ. Данный эффект свидетельствует о том, что наиболее эффективное возбуждение ионов Yb^{3+} идет по механизму “разрезания кванта”, когда передача энергии от фотовозбужденной матрицы ZnO происходит одновременно к двум ионам Yb^{3+}.

Рис. 7 показывает, что при добавлении ионов Yb^{3+} в нанокомпозит ZOEr1 пик на длине волны около 980 нм становится более узким и смещается влево. Это говорит о том, что этот пик ФЛ есть сумма вкладов от ионов Er^{3+} и Yb^{3+} и доминирует ФЛ иона, концентрация которого выше.

При увеличении концентрации Er до 2% и различных концентрациях Yb пик в области 980 нм ведет себя качественно так же (рис. 8). Можно заметить, при увеличении концентрации Yb от 2 до 5% в спектре ФЛ появляются небольшие пики в области 640–690 нм, которые могут быть отнесены к переходу $^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в ионе Er^{3+} (уровень $^4F_{9/2}$ расщеплен). Это указывает на кооперативный механизм передачи энергии, например, от нескольких (двух) ионов Yb^{3+} к Er^{3+}.

На рис. 9 при равной концентрации Er и Yb видны только пики от ионов Er^{3+}. При увеличении концентрации Yb пики от ионов Er^{3+} исчезают, но появляется пик от ионов Yb^{3+} – значительно менее интенсивный, чем в отсутствие фазы Er_2O_3 (черная кривая). Данный факт указывает на конкуренцию процессов возбуждения ионов Er^{3+} и Yb^{3+} при передаче энергии от фотовозбужденной матрицы ZnO.

Итак, можно предложить следующий механизм ФЛ в нанокомпозитах $ZnO/(Er,Yb)_2O_3$ (рис. 10). Фотовозбужденная матрица ZnO благодаря наличию дефектных уровней посредством диполь-дипольного механизма Ферстера передает энергию на ионы Er^{3+} и на ионы Yb^{3+}, причем последний процесс происходит как с потерей энергии, так и по механизму “разрезания кванта”. Ионы РЗЭ могут также обмениваться энергией между собой

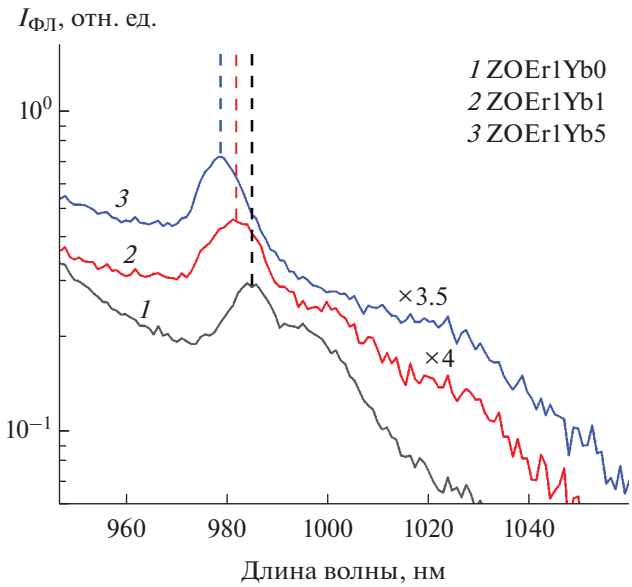

Рис. 7. Спектры ФЛ нанокомпозитов ZOEr1 с различным содержанием Yb (длина волны возбуждающего света 405 нм).

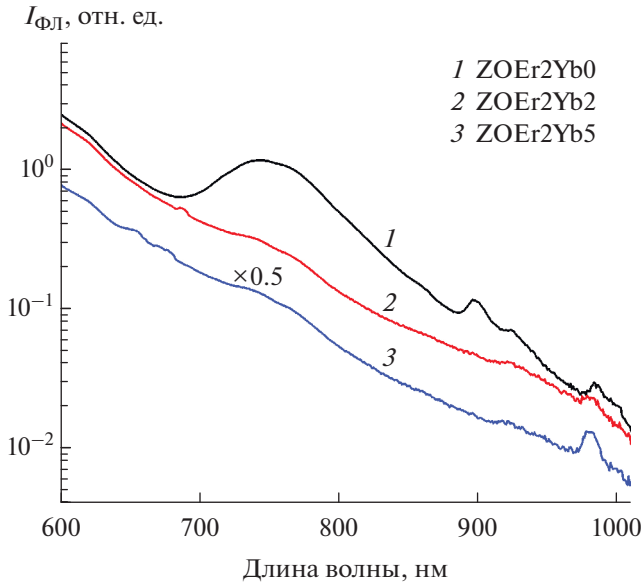

Рис. 8. Спектры ФЛ нанокомпозитов ZOEr2 с различным содержанием Yb (длина волны возбуждающего света 405 нм).

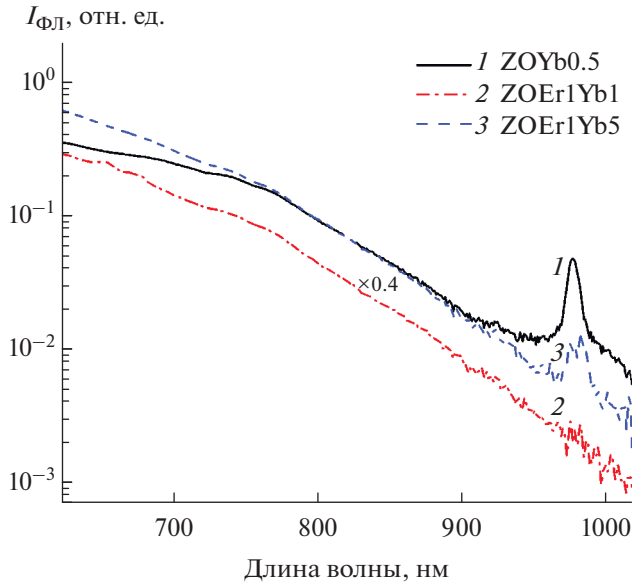

Рис. 9. Спектры ФЛ нанокомпозитов на основе ZnO с различным содержанием Er и Yb (длина волны возбуждающего света 465 нм).

по механизму Ферстера за счет близких по энергии переходов с длинами волн около 980 нм (переходы в ионах Er^{3+}: $^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, $^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и переход в ионах Yb^{3+}: $^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$). Передача энергии с ионов Er^{3+} затруднена вследствие, во-первых, того, что энергия между уровнями ионов Er^{3+} немного меньше, чем у Yb^{3+}, а во-вторых, наличия в Er^{3+} более низколежащих уровней, на которые релаксирует электрон ($^4I_{13/2}$ и др.). При некоторых длинах волн и некоторых соотношениях концентраций РЗЭ наблюдается ап-конверсионный перенос энергии от ионов Yb^{3+} к ионам Er^{3+} с последующими релаксацией электронов по уровням и излучением, в частности в диапазоне 640–690 нм. В целом взаимодействие между катионами РЗЭ слабое и в основном идет конкуренция процессов возбуждения ионов РЗЭ от матрицы ZnO.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы структурные свойства и ФЛ наночастиц ZnO с осажденными на них наночастицами оксидов эрбия и иттербия. Наиболее эффективная ФЛ ионов Yb^{3+} на длине волны около 980 нм наблюдалась в нанокристаллах ZnO, декорированных нанокристаллами Yb_2O_3, при энергии возбуждающих квантов, близкой к удвоенной энергии возбуждения ионов Yb^{3+}. Это указывает на передачу энергии от фотовозбужденных нанокристаллов ZnO одновременно двум ионам Yb^{3+}.

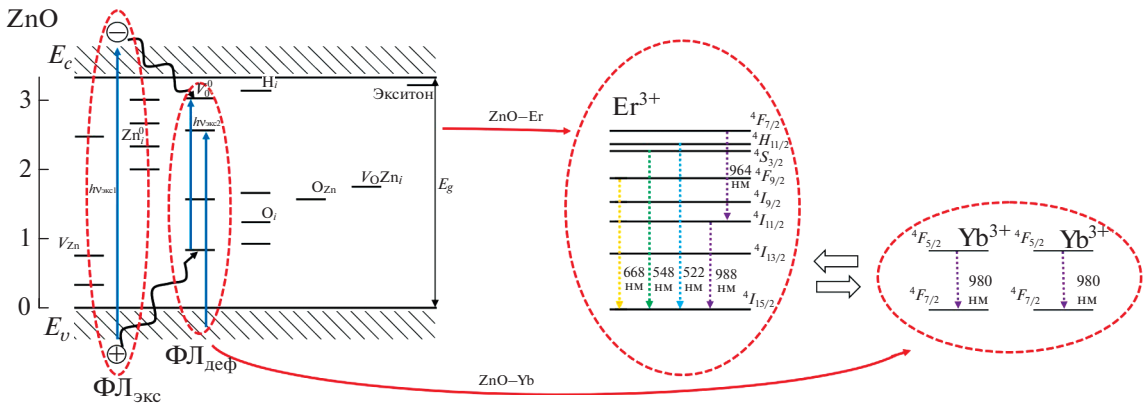

Рис. 10. Схема возбуждения и ФЛ в нанокомпозитах ZO/$(Er,Yb)_2O_3$.

Добавление Er приводит к уменьшению интенсивности ФЛ ионов Yb^{3+} и появлению линий свечения ионов Er^{3+}.

Полученные результаты представляют интерес для понимания процессов передачи энергии от полупроводниковой матрицы к ионам РЗЭ, а также для создания светоизлучающих источников в широком спектральном диапазоне.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа была поддержана грантом президента РФ для ведущих научных школ (№ 2726.2020.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каткова М.А., Витухновский А.Г., Бочкарев М.Н.* Координационные соединения редкоземельных металлов с органическими лигандами для электролюминесцентных диодов // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 12. С. 1193–1215.

2. *Chen D., Wang Y., Hong M.* Lanthanide Nanomaterials with Photon Management Characteristics for Photovoltaic Application // Nano Energy. 2012. V. 1. № 1. P. 73–90. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2011.10.004

3. *Du Y.P., Zhang Y.W., Sun L.D., Yan C.H.* Efficient Energy Transfer in Monodisperse Eu-Doped ZnO Nanocrystals Synthesized from Metal Acetylacetonates in High-Boiling Solvents // J. Phys. Chem. C. 2008. V. 112. № 32. P. 12234–12241. https://doi.org/10.1021/jp802958x

4. *Bang J., Yang H., Holloway P.H.* Enhanced Luminescence of SiO_2:Eu^{3+} by Energy Transfer from ZnO Nanoparticles // J. Chem. Phys. 2005. V. 123. № 8. P. 084709. https://doi.org/10.1063/1.2007647

5. *Kumar E.S., Singh S., Rao M.S.R.* Zinc Oxide: The Versatile Material with an Assortment of Physical Properties // Springer Ser. Mater. Sci. 2014. V. 180. P. 1–38. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1160-0_1

6. *Карипидис Т.К., Чукичев М.В., Мальцев В.В., Волкова Е.А., Леонюк Н.И.* Влияние отжига на катодолюминесценцию синтетических монокристаллов цинкита // Неорган. материалы. 2009. Т. 46. № 1. С. 46–49. https://doi.org/10.1134/S0020168509010075

7. *Balestrieri M., Ferblantier G., Colis S., Schmerber G., Ulhaq-Bouillet C., Muller D., Slaoui A., Dinia A.* Structural and Optical Properties of Yb-Doped ZnO Films Deposited by Magnetron Reactive Sputtering for Photon Conversion // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2013. V. 117. P. 363–371. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.032

8. *Shalygina O.A., Nazarov I.V., Baranov A.V., Timoshenko V.Yu.* Structure and Photoluminescence Properties of Zinc Oxide/ Ytterbium Oxide Nanocomposites // J. Sol-Gel Sci. Technol. 2017. V. 81. № 2. P. 333–337. https://doi.org/10.1007/s10971-016-4258-y

9. *Shestakov M.V., Baranov A.N., Tikhomirov V.K., Zubavichus Ya.V., Kuznetsov A.S., Veligzhanin A.A., Kharin A.Yu., Rösslhuber R., Timoshenko V.Yu., Moshchalkov V.V.* Energy-Transfer Luminescence of a Zinc Oxide/Ytterbium Oxide Nanocomposite // RSC Adv. 2012. V. 2. № 23. P. 8783–8788. https://doi.org/10.1039/C2RA20755A

10. *Dexter D.L.* Possibility of Luminescent Quantum Yields Greater than Unity // Phys. Rev. 1957. V. 108. № 3. P. 630–633. https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.630

11. *Shestakov M.V., Tikhomirov V.K., Kirilenko D.A., Kuznetsov A.S., Chibotaru L.F., Baranov A.N., Tendeloo G., Moshchalkov V.V.* Quantum Cutting in Li (770 nm) and Yb (1000 nm) Co-Dopant Emission Bands by Energy Transfer from the ZnO Nano-Crystalline Host // Opt. Express. 2011. V. 19. № 17. P. 15955–15964. https://doi.org/10.1364/OE.19.015955

12. *Kolesov R., Xia K., Reuter R., Stöhr R., Zappe A., Meijer J., Hemmer P.R., Wrachtrup J.* Optical Detection of a Single Rare-Earth Ion in a Crystal // Nat. Commun. 2012. V. 3. № 1. P. 1029. https://doi.org/10.1038/ncomms2034

13. *Gamelin D.R., Gudel H.U.* Upconversion Processes in Transition Metal and Rare Earth Metal Systems // Bern. Top. Curr. Chem. 2001. V. 214. P. 1–56. https://doi.org/10.1007/3-540-44474-2_1

14. *Auzel F.* Upconversion and Anti-Stokes Processes with f and d Ions in Solids // Chem. Rev. 2004. V. 104. № 1. P. 139–173. https://doi.org/10.1021/cr020357g

15. *Sokolov S.A., Rösslhuber R., Zhigunov D.M., Latukhina N.V., Timoshenko V.Yu.* Photoluminescence of Rare Earth Ions (Er^{3+}, Yb^{3+}) in a Porous Silicon Matrix // Thin Solid Films. 2014. V. 562. P. 462–466. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.03.084

16. *Huang X., Han S., Huang W., Liu X.* Enhancing Solar Cell Efficiency: the Search for Luminescent Materials as Spectral Converters // Chem. Soc. Rev. 2013. V. 42. № 1. P. 173–201. https://doi.org/10.1039/C2CS35288E

17. *He S., Xia H., Zhang J., Zhu Y., Chen B.* Highly Efficient Up-Conversion Luminescence in Er^{3+}/Yb^{3+} Co-Doped $Na_5Lu_9F_{32}$ Single Crystals by Vertical Bridgman Method // Sci. Rep. 2017. V. 7. № 1. P. 8751. https://doi.org/10.1038/s41598-017-09222-0

18. *Волкова Е.А., Ксенофонтов Д.А., Мальцев В.В., Леонюк Н.И., Кабалов Ю.К., Барило С.Н., Бычков Г.Л., Толстик Н.А., Кулешов Н.В.* Жидкофазная эпитаксия монокристаллических слоев $YAL_3(BO_3)_4$, соактивированных Er и Yb, – основы планарных волноводов // Неорган. материалы. 2011. Т. 47. № 9. С. 1079–1082. https://doi.org/10.1134/S0002337X11090120