

УДК 621.315.592

XXV Международный симпозиум „Нанозфизика и наноэлектроника“,
Нижний Новгород, 9–12 марта 2021 г.

Излучательные свойства ап-конверсионных покрытий, формируемых на основе ксерогелей титаната бария, легированных эрбием

© Н.В. Гапоненко¹, Ю.Д. Корнилова¹, Е.И. Лашковская¹, В.Д. Живулько², А.В. Мудрый²,
Ю.В. Радюш², Б.А. Андреев³, М.В. Степихова³, А.Н. Яблонский³, С.А. Гусев³, R. Subasri⁴, D.S. Reddy⁴

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013 Минск, Беларусь

² Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
220072 Минск, Беларусь

³ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
607680 Нижний Новгород, Россия

⁴ Centre for Sol-Gel Coatings, International Advanced Research Centre for Powder Metallurgy and New Materials,
500005 Hyderabad, India

E-mail: nik@nano.bsuir.edu.by

Поступила в Редакцию 12 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Исследована стоксова и антистоксова люминесценция эрбия в ксерогелях титаната бария ($\text{BaTiO}_3:\text{Er}$), полученных золь-гель методом, и в многослойных покрытиях $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$, сформированных на кремниевых подложках. Показано, что ап-конверсия эрбия в ксерогелях титаната бария, сформированных с использованием нитрата или ацетата эрбия, наблюдается при концентрации эрбия > 3 ат%. Ап-конверсия эрбия наблюдается на длине волны возбуждения ~ 980 нм и характеризуется интенсивной полосой в области 520–560 нм, соответствующей излучательным переходам иона эрбия ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, а также полосами в области 650 и 850 нм, связанными с переходами ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. На основе полученных ксерогелей $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ на кремниевых подложках сформированы многослойные структуры $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, обеспечивающие значительное, по сравнению с однослойными структурами $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{Si}$, усиление интенсивности люминесценции эрбия на длине волны основного излучательного перехода (1540 нм). Обсуждаются перспективы разработки ап-конверсионных покрытий на основе титаната бария, легированного эрбием, для практических применений.

Ключевые слова: титанат бария, эрбий, ап-конверсия, люминесценция, золь-гель метод, многослойные структуры.

DOI: 10.21883/FTP.2021.09.51282.09

1. Введение

В настоящее время синтез материалов, демонстрирующих явление ап-конверсии, в частности, преобразование ближнего инфракрасного излучения в видимое, исследуется для различных применений. Ап-конверсионная люминесценция в различных соединениях, легированных эрбием, иттербием и другими лантаноидами, исследуется для различных применений, таких как создание солнечных элементов и дисплейных устройств [1,2], чувствительных биосенсоров [3], дистанционных сенсоров высоких температур [4], технологий для защиты ценных бумаг [5], биологических меток [6] и др. Одним из способов повышения интенсивности люминесценции является введение материалов, легированных лантаноидами, в структуры микрорезонаторов и фотонных кристаллов [7]. Наряду с параэлектриками (оксид крем-

ния, оксид титана, оксид алюминия и др.) проводятся исследования по разработке фотонных наноструктур из материалов, имеющих фазовый переход, например, оксид ванадия или титанат бария [8–10]. Титанат бария, как матрица для лантаноидов, привлекателен благодаря малой энергии фононов и сравнительно низкой температуре синтеза поликристаллической фазы [9]. В настоящее время интенсивно исследуется люминесценция лантаноидов в пленках и порошках титаната бария и других неорганических перовскитах, приготовленных различными методами. Однако вопросы, касающиеся влияния условий синтеза, концентрации примесей, фазы и температуры обработки на ап-конверсию в различных матрицах, требуют дальнейшей проработки.

В данной работе приведены результаты исследований люминесценции легированных эрбием порошков титаната бария, синтезированных золь-гель методом и

отличающихся составом зольей и условиями изготовления, а также многослойных покрытий и суспензий, сформированных из полученных зольей и порошков.

2. Методика эксперимента

Для формирования порошков титаната бария, легированного эрбием, в данной работе были разработаны три типа зольей. В качестве исходных компонентов использовали изопропоксид титана ($\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$), ацетат бария ($\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$), пентагидрат нитрата эрбия ($\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \times 5\text{H}_2\text{O}$) или гидрат ацетата эрбия ($\text{Er}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \times x\text{H}_2\text{O}$), ацетилацетон ($\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COCH}_3$) и уксусную кислоту (CH_3COOH). Количество изопропоксида титана и ацетата бария было выбрано таким образом, чтобы соотношение Ti/Ba соответствовало стехиометрическому составу титаната бария в пленках (т.е. Ti:Ba = 1:1). Смесь перемешивали в течение часа на электромеханической мешалке до полного растворения всех компонентов, в результате чего был сформирован устойчивый пленкообразующий золь. В свежий золь BaTiO_3 добавляли нитрат эрбия и воду (золь #1), или ацетат эрбия (золь #2). Концентрация оксидов составила по нашим расчетам 10.4 мг/мл Er_2O_3 и 32.1 мг/мл BaTiO_3 (золь #1), и 13.0 мг/мл Er_2O_3 и 61.1 мг/мл BaTiO_3 (золь #2).

Для формирования третьего типа зольей (золь #3) нитрат эрбия и ацетат бария растворяли в дистиллированной воде с добавлением уксусной кислоты. Изопропоксид титана растворяли в ацетилацетоне, и после остывания полученную смесь добавляли в раствор нитрата эрбия и ацетата бария с добавлением этанола. После образования из золья #3 геля проводилась его многостадийная термообработка для получения порошка. После термообработки зольей и геля, и получения порошков проводилась окончательная термообработка всех трех порошков при температуре 1000°C. Порошки, полученные из соответствующих зольей, обозначены теми же номерами, что и предшествующие им золи (#1, #2, #3). В последующем порошки добавлялись в пленкообразующие золи на основе тетраэтоксисилана или титаната бария для получения суспензии из порошка люминофора и пленкообразующего золья, последующего распыления суспензии и сушки.

Рентгенофазовый анализ порошка ксерогеля титаната бария проводили на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 в монохроматизированном $\text{CuK}\alpha$ -излучении с шагом 0.04° и экспозицией 2 с.

Энергодисперсионный анализ порошков осуществлялся на базе электронного микроскопа Hitachi-S4800, оснащенного приставкой для рентгеновского микроанализа.

Формирование на кремниевых подложках многослойных структур $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ на основе ксерогелей $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$, полученных из золья #1, осуществлялось методом центрифугирования с последующей сушкой и отжигом каждого слоя при температуре 450°C. Пленки SiO_2 получали из золья на основе тетраэтоксисилана, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ [10]. Толщина слоев $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ и SiO_2 в мно-

гослойных структурах составляла ~ 200 и 250 нм соответственно. Параметры многослойных структур подбирались таким образом, чтобы обеспечить эффективный вывод излучения в области основного излучательного перехода иона эрбия (1540 нм). Для сравнения также были получены однослойные структуры $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{Si}$ с толщиной слоя $\text{BaTiO}_3:\text{Er} \sim 300$ нм. Необходимо отметить, что концентрация эрбия в слоях $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ составляла ~ 1 ат%, что обеспечивало наблюдение интенсивного сигнала ФЛ эрбия в области 1540 нм, но являлось недостаточным для наблюдения сигнала ап-конверсии в полученных многослойных структурах.

Запись спектров фотолюминесценции (ФЛ) эрбия в ИК диапазоне осуществлялась при комнатной температуре при возбуждении лазерным излучением на длине волны 532 нм с использованием решеточного монохроматора Acton 2300i и многоканального фотоприемника на основе линейки фотодиодов InGaAs OMA-V (Acton Research). Запись спектров возбуждения ФЛ эрбия (на длине волны 1535 нм) осуществлялась с помощью параметрического генератора света MPO-SL (диапазон перестройки длины волны возбуждения 450–700 нм, длительность импульса — 5 нс, частота повторения импульсов — 10 Гц) и фотоэлектронного умножителя ИК диапазона („Hamamatsu“, Япония).

Возбуждение ап-конверсионной люминесценции эрбия в полученных образцах осуществлялось сфокусированным излучением лазерного диода на длине волны ~ 980 нм с мощностью ~ 200 мВт в непрерывном режиме. Длина волны этого излучения соответствует полосе поглощения при переходе электронов из основного состояния трехвалентных ионов эрбия $^4I_{15/2}$ в возбужденное состояние $^4I_{11/2}$. В качестве детектора для регистрации ап-конверсионной люминесценции видимого диапазона использовался фотоэлектронный умножитель R9110 („Hamamatsu“, Япония). Обработка сигналов с фотодетектора проводилась с помощью метода синхронного фазового детектирования с автоматической компьютерной регистрацией и обработкой спектров.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1, *a, b* приведены дифрактограммы синтезированных порошков $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ (#1, #2, и #3). На рис. 1, *a* кроме линий, относящихся к перовскиту, наблюдаются линии, которые можно отнести к оксидам и сложным твердым растворам на основе компонентов ксерогеля. На рис. 1, *a* индексы дополнены названиями оксидов, к которым они относятся. Видно, что не все линии удалось соотносить с известными фазами. Для титаната бария на обоих рисунках отмечены индексы, соответствующие кубической модификации перовскита. На рентгеновском дифракционном спектре порошка #3 (рис. 1, *b*) также имеются непроиндексированные нами линии, которые можно отнести к соединениям компонент ксерогеля. Для определения состава и структуры этих фаз образцов #1 и #3 нужны дополнительные исследования. Соотношение интенсивностей основных рефлексов на рентгенограммах порошков #2 и #3 не соответствует

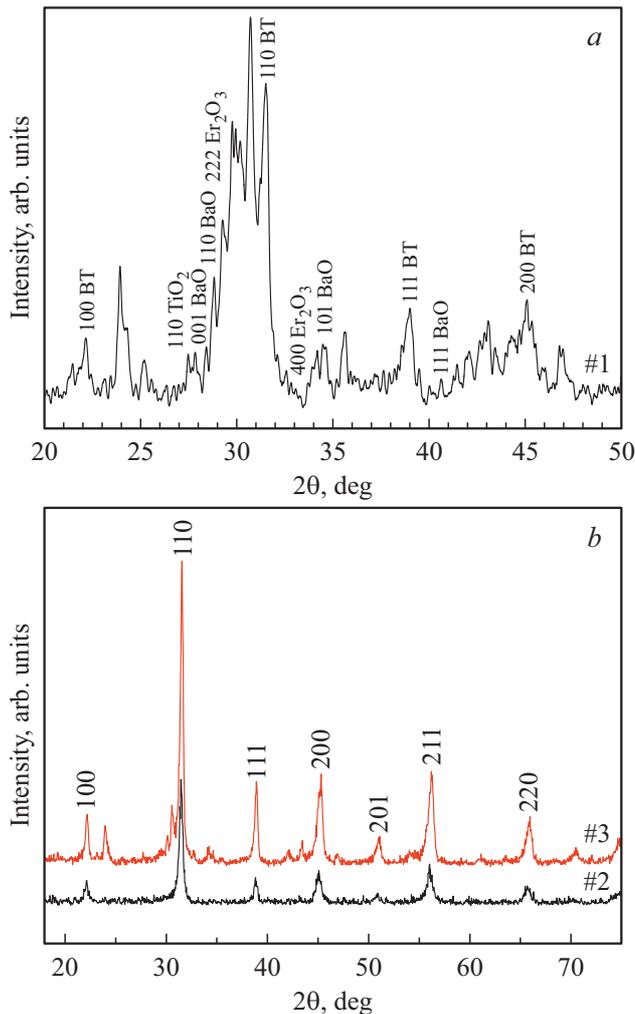


Рис. 1. Дифрактограммы порошков ксерогеля титаната бария: *a* — #1, *b* — #2 и #3.

характерной для пространственной группы $P4mm$ тетрагональной модификации титаната бария (PDF 83-1880, PDF 89-1428). Как видно из рис. 1, *b*, рентгеновские рефлексы 110 и 111 узкие, однако рефлекс 200 имеет уширение с левой стороны, где должен наблюдаться рефлекс 002, характерный для тетрагональной структуры. Столь малое разрешение рефлексов 002 и 200, очевидно, связано с малым различием значений параметров a и c образовавшейся кристаллической решетки. Например, согласно литературным данным (PDF 83-1880), параметр c больше a на $\sim 10\%$, а рефлексы 002 и 200 отстоят друг от друга на $2\theta \approx 0.5^\circ$. В случае, когда параметр c больше a на уровне 1% (PDF 89-1428), рефлексы 002 и 200 отстоят друг от друга чуть больше a на $2\theta \approx 0.1^\circ$. Если предположить, что для нашего случая различие значений параметров a и c мало, то и рентгеновский спектр будет мало отличим от вида, характерного для кубической модификации. Параметр решетки, рассчитанный в кубическом приближении, составляет $a = 4.005 \text{ \AA}$ для порошка #2 и $a = 4.004 \text{ \AA}$ для порошка #3.

По данным энергодисперсионного анализа концентрация эрбия в полученных порошках $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ составила: $\sim 3.5 \text{ ат\%}$ в порошке #1, $\sim 4.7 \text{ ат\%}$ в порошке #2 и $\sim 3 \text{ ат\%}$ в порошке #3.

Во всех трех типах порошков ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ наблюдается сигнал ап-конверсионной ФЛ в видимой области спектра при возбуждении на длине волны 980 нм (рис. 2). Люминесценция зеленого или красного цвета порошка $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ наблюдается при комнатной температуре невооруженным глазом и связана с переходами трехвалентного иона эрбия $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ на длинах волн 525, 550 и 660 нм соответственно. В полученных спектрах ап-конверсионной люминесценции также присутствует менее интенсивная полоса в области 850 нм, обусловленная переходом $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. Механизм ап-конверсии обусловлен, на наш взгляд, кооперативным ион-ионным взаимодействием соседних ионов эрбия, находящихся в возбужденном состоянии $^4I_{11/2}$ вследствие перехода $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ при поглощении возбуждающего излучения на длине волны $\sim 980 \text{ нм}$. Сформированная при температуре 1000°C кристаллическая матрица порошка титаната бария способствует штарковскому расщеплению уровней эрбия, что повышает вероятность обмена энергией между возбужденными соседними ионами. Синтез и анализ дополнительных образцов показал, что при концентрации эрбия менее 1 ат% при тех же условиях возбуждения ап-конверсия эрбия не наблюдается как в порошке титаната бария, так и в порошке алюмоиттриевых композитов, полученных с использованием опубликованной ранее методики [9]. Эти результаты подтверждают кооперативный характер наблюдаемой в титанате бария ап-конверсии при концентрации эрбия более 3 ат%. Отметим также, что механизм поглощения двух фотонов на длине волны $\sim 980 \text{ нм}$ с участием переходов $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ и $^4I_{11/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$, не связанный

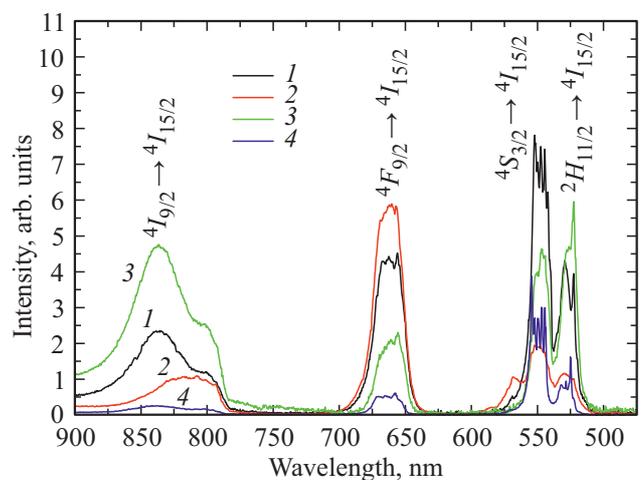


Рис. 2. Спектры ап-конверсионной люминесценции эрбия в порошках $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ #1 (1), #2 (2), #3 (3), а также в покрытии, полученном из суспензии с порошком #3 на кремниевой подложке (4).

с кооперативной ап-конверсией и классифицируемый как поглощение из возбужденного состояния [10], может иметь место и в нашем случае для всех трех порошков. Для уточнения механизма возбуждения ап-конверсионной ФЛ в полученных образцах требуется проведение дополнительных исследований, в частности изучение характерных времен нарастания ФЛ при использовании импульсной оптической накачки.

Сигнал ап-конверсионной ФЛ, наблюдаемый в полученных порошках $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$, сохраняется также в композитах „ксерогель/порошок“, сформированных в виде покрытий распылением или центрифугированием суспензий, состоящих из пленкообразующего золя BaTiO_3 или SiO_2 и любого из трех порошков. В качестве примера на рис. 2 (спектр 4) приведен спектр ап-конверсионной ФЛ в покрытии на Si-подложке, полученном из суспензии порошка #3 и силиказоля. Для этого же покрытия была измерена спектрокинетическая зависимость ФЛ эрбия на длине волны основного излучательного перехода (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) в ИК спектральном диапазоне, а также спектр возбуждения ФЛ, соответствующей данному излучательному переходу, при перестройке длины волны возбуждающего излучения в диапазоне $\lambda_{\text{ex}} = 450\text{--}700$ нм, соответствующем области наблюдения ап-конверсионной ФЛ в полученных структурах (рис. 3). Как видно из сравнения спектров ап-конверсионной ФЛ и спектра возбуждения ФЛ основного излучательного перехода иона Er (1540 нм), приведенных на рис. 2 и 3, *b*, наиболее интенсивные линии в спектре возбуждения ФЛ на длинах волн 525 и 660 нм, соответствующие поглощению на переходах ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ и ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$, наблюдаются также и в спектрах ап-конверсионной ФЛ. Следует отметить, что наиболее интенсивная полоса в спектре возбуждения ФЛ эрбия в области 525 нм наблюдалась нами ранее и для ионов эрбия в ксерогеле оксида титана [11]. В то же время полоса в области 550 нм, дающая основной вклад в сигнал ап-конверсионной ФЛ полученных ксерогелей $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$, соответствующая переходу ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, практически не наблюдается в спектре возбуждения ФЛ эрбия (рис. 3, *b*). Это, по-видимому, связано с тем, что переход ионов эрбия в состояние ${}^4S_{3/2}$ осуществляется в основном через промежуточные состояния ${}^4F_{7/2}$ и ${}^2H_{11/2}$ путем испускания фононов [12], тогда как прямой переход ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$, соответствующий поглощению излучения на длине волны 550 нм, является менее вероятным.

На основе полученных ксерогелей $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ на кремниевых подложках были сформированы тонкопленочные покрытия с толщиной слоев $\text{BaTiO}_3:\text{Er} \sim 200\text{--}300$ нм, демонстрирующие эффективный сигнал стоксовой люминесценции эрбия на длине волны 1540 нм. Необходимо отметить, что концентрация эрбия в полученных слоях $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ составляла ~ 1 ат%, что обеспечивало наблюдение интенсивного сигнала ФЛ эрбия в ИК диапазоне, но, очевидно, являлось недостаточным для наблюдения сигнала ап-конверсии видимого диапазона

в полученных структурах. Наряду с однородными слоями $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ на Si-подложках были сформированы многослойные структуры $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Толщины слоев регулировались скоростью центрифугирования наносимых пленок и подбирались таким образом, чтобы обеспечить окно прозрачности в области длины волны основного излучательного перехода иона эрбия

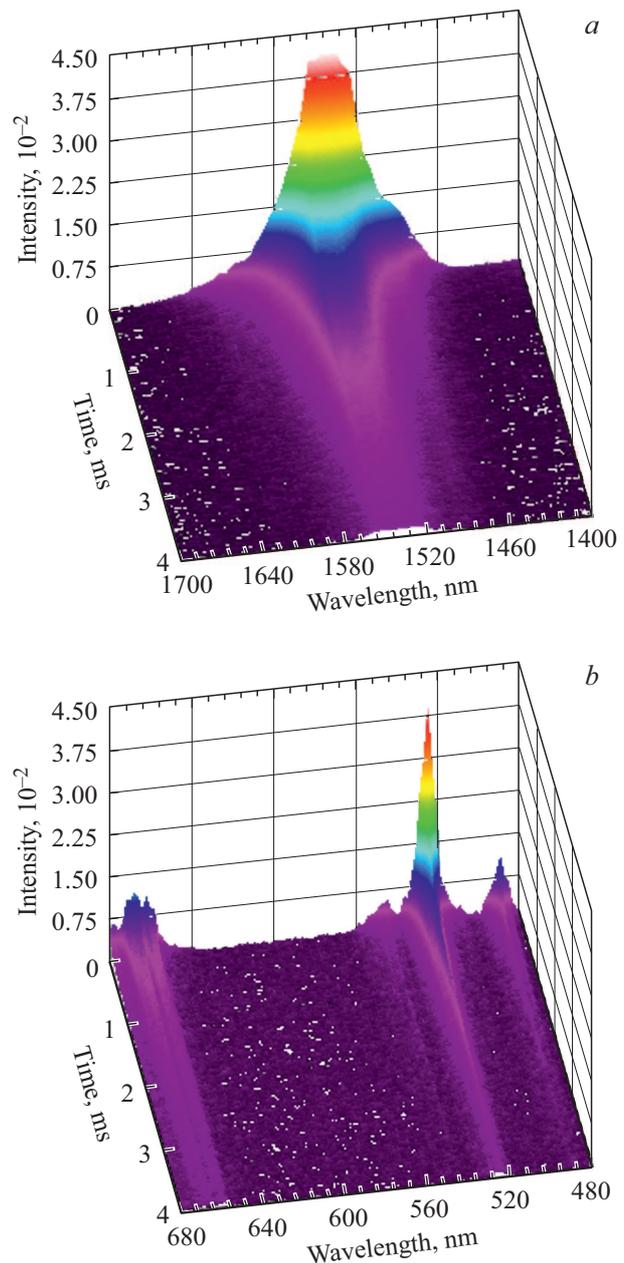


Рис. 3. *a* — спектрокинетическая зависимость ФЛ покрытия на кремнии, полученного на основе суспензии силиказоля с порошком ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ (#3). Полоса ФЛ соответствует основному излучательному переходу ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} ; *b* — спектр возбуждения ФЛ данного покрытия, на длине волны основного излучательного перехода Er^{3+} (1535 нм). Область перестройки длины волны возбуждения $\lambda_{\text{ex}} = 450\text{--}700$ нм соответствует области наблюдения ап-конверсионной ФЛ эрбия.

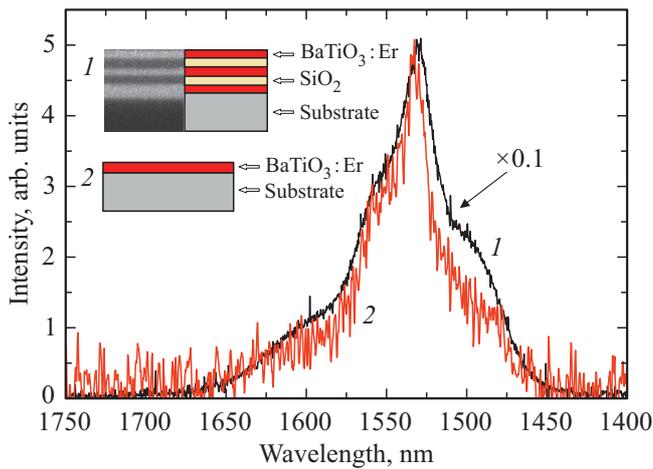


Рис. 4. Спектры ФЛ многослойной структуры $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и однослойной структуры $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{Si}$, сформированных на основе полученных ксерогелей $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ на кремниевых подложках. Для удобства сравнения интенсивность ФЛ однослойной структуры умножена на 10. На вставке — схемы сформированных структур и РЭМ-изображение многослойной структуры.

на 1540 нм (см. рис. 4). Полученные многослойные структуры $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ обеспечивали значительное (в 5 раз, с учетом различия в суммарных толщинах слоев $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$) усиление интенсивности ФЛ эрбия по сравнению с аналогичными однослойными структурами $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{Si}$. Как видно из рис. 4, интенсивность ФЛ многослойной структуры, состоящей из трех слоев $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ (с суммарной толщиной ~ 600 нм), разделенных слоями SiO_2 , более чем на порядок превосходит интенсивность ФЛ аналогичной однослойной структуры $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{Si}$ с толщиной слоя $\text{BaTiO}_3:\text{Er} \sim 300$ нм. Предполагается, что получение пленочных покрытий на основе ксерогелей титаната бария, легированных эрбием, с концентрацией эрбия 3–4 ат% позволит наблюдать в таких структурах эффективный сигнал ап-конверсии в видимой спектральной области. Следует отметить, что пленки BaTiO_3 , формируемые золь-гель методом, в отличие от пленок алюмоиттриевых гранатов, образуют резкий оптический контраст при чередовании их с пленками SiO_2 [10], что в перспективе дает возможность формирования на кремниевых подложках одномерных фотонных кристаллов $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{SiO}_2$, демонстрирующих эффект ап-конверсии. Относительная простота формирования и возможность нанесения таких покрытий на кремниевые подложки с высокой степенью контроля толщины открывает большие перспективы для их практических применений.

4. Заключение

Исследована люминесценция эрбия в ксерогелях $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$, полученных золь-гель методом, и в многослойных покрытиях $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$, сформированных на

кремниевых подложках. Показано, что ап-конверсия эрбия в ксерогелях титаната бария, сформированных с использованием нитрата или ацетата эрбия, наблюдается при концентрации эрбия в титанате бария > 3 ат%. Ап-конверсия эрбия наблюдается на длине волны возбуждения ~ 980 нм и характеризуется интенсивной полосой в области 520–560 нм, соответствующей излучательным переходам иона эрбия ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, а также полосами в области 650 и 850 нм, связанными с переходами ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. На основе полученных ксерогелей $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ на кремниевых подложках сформированы многослойные структуры $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, обеспечивающие значительное, по сравнению с однослойными структурами $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{Si}$, усиление интенсивности люминесценции эрбия на длине волны основного излучательного перехода (1540 нм). Рассматривается перспектива получения структур на основе титаната бария, легированного эрбием, формируемых золь-гель методом, демонстрирующих эффект ап-конверсии. Перспективы использования таких структур связываются с разработкой элементной базы оптоэлектроники, солнечных элементов и дисплейных устройств, дистанционных сенсоров высоких температур, схем фотовольтаики и т.д. [1–4,13,14].

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке совместного гранта РФФИ и БРФФИ (РФФИ 20-52-00039 Бел а, БРФФИ X20P-388) и гранта Department of Science and Technology, India (INT/BLR/P-18/2016) с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W.Q. Zou, C. Visser, J.A. Maduro, M. Pshenitchnikov, J.C. Hummelen. *Nature Photonics*, **6**, 560 (2012).
- [2] J.C. Goldschmidt, S. Fischer. *Adv. Optical Mater.*, **3**, 510 (2015).
- [3] C.-F. Chan, M.-K. Tsang, H. Li, R. Lan, F.L. Chadbourne, W.-L. Chan, G.-L. Law, S.L. Cobb, J. Hao, W.-T. Wong, K.-L. Wong. *J. Mater. Chem. B*, **2**, 84 (2014).
- [4] O.A. Lipina, L.L. Surat, A.Yu. Chufarov, A.P. Tyutyunnik, V.G. Zubkov. *Mendelev Comm.*, **31**, 113 (2021).
- [5] L. Lu, Y. Dong, X. Li, Zh. Ziwen, S. Xianhao, L. Yu, Z. Xuanyu, Zh. Enming, R. Jing, Zh. Jianzhong, L. Hanyang. *J. Luminesc.*, **224**, 117306 (2020).
- [6] M.H. Alkahtani, F.S. Alghannam, C. Sanchez, C.L. Gomes, H. Liang, P.R. Hemmer. *Nanotechnology*, **27**, 485501 (2016).
- [7] R.E. Rojas-Hernandez, L.F. Santos, R.M. Almeida. *Ceramics Intern.*, **46** (16), 26273 (2020).
- [8] V.G. Golubev, V.Yu. Davydov, N.F. Kartenko, D.A. Kurdyukov, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, A.V. Scherbakov, E.B. Shadrin. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (14), 2127 (2001).

- [9] L.S. Khoroshko, N.V. Gaponenko, M.V. Rudenko, K.S. Sukalin, A.V. Mudryi, Yu.V. Radyush. *J. Optical Technol.*, **86**, 124 (2019).
- [10] Qiu Sun, Xiangqun Chen, Zhikai Liu, Fuping Wang, Zhaohua Jiang, ChaoWang. *J. Alloys Compd.*, **509**, 5336 (2011).
- [11] N.V. Gaponenko, G.K. Malyarevich, D.A. Tsyrukunou, E.A. Stepanova, A.V. Mudryi, O.B. Gusev, E.I. Terukov, M.V. Stepikhova, L.V. Krasilnikova, Yu.N. Drozdov. *Optical Mater.*, **28**, 688 (2006).
- [12] B. Cao, J. Wu, X. Wang, Y. He, Zh. Feng, B. Dong. *Sensors*, **15**, 30981 (2015).
- [13] L. Predoana, S. Preda, M. Anastasescu, M. Stoica, M. Voicescu, C. Munteanu, R. Tomescu, D. Cristea. *Optical Mater.*, **46**, 481 (2015).
- [14] A. Siai, P. Haro-Gonzalez, K. Horchani Naifer, M. Ferid. *Optical Mater.*, **76**, 34 (2018).

Редактор Г.А. Оганесян

Radiative properties of up-conversion coatings formed on the basis of erbium-doped barium titanate xerogels

*N.V. Gaponenko*¹, *Yu.D. Karnilava*¹,
*E.I. Lashkovskaya*¹, *V.D. Zhivulko*²,
*A.V. Mudryi*², *Yu.V. Radyush*², *B.A. Andreev*³,
*M.V. Stepikhova*³, *A.N. Yablonskiy*³,
*S.A. Gusev*³, *R. Subasri*⁴, *D.S. Reddy*⁴

¹ Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
220013 Minsk, Belarus

² Scientific-Practical Materials Research Centre
of National Academy of Sciences of Belarus,
220072 Minsk, Belarus

³ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
607680 Nizhny Novgorod, Russia

⁴ Centre for Sol-Gel Coatings,
International Advanced Research Centre
for Powder Metallurgy and New Materials,
500005 Hyderabad, India

Abstract In this work, Stokes and anti-Stokes luminescence of erbium in barium titanate xerogels ($\text{BaTiO}_3:\text{Er}$) obtained by the sol-gel method, as well as in $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ multilayer structures based on these xerogels and formed on silicon substrates, has been studied. It has been shown that the up conversion of erbium in barium titanate xerogels obtained from erbium nitrate or acetate is observed at an erbium concentration of more than 3 at.%. The up-conversion of erbium is observed at an excitation wavelength of ~ 980 nm and is characterized by an intense band in the 520–560 nm region corresponding to the ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ and ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ radiative transitions of the erbium ion, as well as bands in the 650 and 850 nm associated with the ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ and ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ transitions, respectively. Based on the obtained $\text{BaTiO}_3:\text{Er}$ xerogels, multilayer $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ structures were formed on silicon substrates, providing a significant, as compared to single-layer $\text{BaTiO}_3:\text{Er}/\text{Si}$ structures, increase in the luminescence intensity of erbium at the wavelength of the main radiative transition (1540 nm). The prospects for the development of up-conversion coatings based on erbium-doped barium titanate suitable for practical applications are discussed.