

ны волн близки и обе находятся в полосе поглощения $ND1$ -центра. Существенное различие между этими источниками состоит в плотности мощности возбуждениями, которая для лазера, как минимум, на три порядка больше, чем для ртутной лампы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные экспериментальные данные указывают на то, что обнаруженная в спектральном диапазоне 390–450 нм серия линий ФЛ с узкой БФЛ при 393.5 нм и её фонными повторениями с энергией квазилокальных колебаний 76 мэВ непосредственно связана с излучательной рекомбинаций вакансий в отрицательном зарядовом состоянии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Walker J. Optical absorption and luminescence in diamond / J Walker // Reports on progress in physics. – 1979. – Vol. 42. – №. 10. – P. 1605.
2. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook, 1–3 Springer-Verlag Berlin Heidelberg // New York. – 2001. – 502 p.
3. Dischler B. Handbook of spectral lines in diamond: volume 1: tables and interpretations. – Springer Science & Business Media, 2012. – 466 p.
4. Photoluminescence microscopy of TEM irradiated diamond / J.W. Steeds. [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2000. – Vol. 9. – №. 3-6. – P. 397 – 403.
5. Raman scattering in diamond irradiated with high-energy xenon ions / N.M. Kazuchits [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2020. – Vol. 472. – P. 19 – 23.
6. Размеры области формирования сигнала в микрорамановском спектрометре «Nanofinder HE» / А.А Борисевич [и др.] // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы шестой Международной научно-практической конференции, г. Минск, 20 – 21 мая 2021 г. / редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2021. – С. 10 – 12.
7. Пека Г.П. Люминесцентные методы контроля параметров полупроводниковых материалов и приборов. / Г.П. Пека, В.Ф. Коваленко, В.Н. Куценко – Киев: Техника, 1986. – 152 с.
8. Luminescence of negatively charged single vacancies in diamond: $ND1$ center / N.M. Kazuchits [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2022. – Vol. 121. – P. 108741.
9. Davies G. The symmetry properties of the $ND1$ absorption centre in electron-irradiated diamond / G. Davies, E.C. Lightowers // Journal of Physics C: Solid State Physics. – 1970. – Vol. 3. – №. 3. – P. 638.

АП-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ТИТАНАТЕ БАРИЯ, ЛЕГИРОВАННОМ ЭРБИЕМ И ИТТЕРБИЕМ

Ю. Д. Корнилова¹, Н. В. Гапоненко¹, Е. И. Лашковская¹, Л. В. Судник²,
П. А. Витязь², А. Р. Лученок², В. Д. Живулько³, А. В. Мудрый³

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: garopenko@bsuir.by

² Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа НАН Беларуси,
ул. Платонова, 41, 220005 Минск, Беларусь,

³ ГО "НПЦ НАН Беларуси по материаловедению", ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь

Проведен анализ ап-конверсионной люминесценции трехвалентных ионов эрбия в пленочных структурах и материалах, сформированных золь-гель методом. Пленочные структуры и мишень, на основе ксерогеля с составом $Ba_{0.76}Er_{0.04}Yb_{0.20}TiO_3$, демонстрируют видимую невооруженным глазом ап-конверсионную люминесценцию при возбуждении на длине волны 980 нм с полосами люминесценции 410, 523, 546 и

658 нм, соответствующих переходам ${}^2H_{9/2} \rightarrow 4I_{15/2}$, ${}^2H_{11/2} \rightarrow 4I_{15/2}$, ${}^4S_{3/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ и ${}^4F_{9/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ трехвалентных ионов эрбия Er^{3+} . Интенсивность люминесценции стабильна и наблюдается после хранения образцов в комнатных условиях в течение полугода.

Ключевые слова: ап-конверсия; эрбий; иттербий; титанат бария; люминесценция; золь-гель; ксерогель.

UPCONVERSION LUMINESCENCE IN BARIUM TITANATE DOPED WITH ERBIUM AND YTTERBIUM

Yu. D. Karnilava¹, E. I. Lashkovskaya¹, N. V. Gaponenko¹, L. V. Sudnik²,
P. A. Vityaz², A. R. Luchanok², V. D. Zhivulko³, A. V. Mudryi³

¹⁾ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki Street 6,
220013 Minsk, Belarus,

²⁾ State Scientific Institution "Powder Metallurgy Institute named after academician O. V. Roman",
Platonova Street 4, 220005 Minsk, Belarus,

³⁾ Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus,
P. Brovki Street 19, 220072 Minsk, Belarus,
Corresponding author: N. V. Gaponenko (gaponenko@bsuir.by)

Up-conversion luminescence in film structures and materials formed by the sol-gel method is reported. Thin film multilayer structures and target, corresponding to the xerogel $Ba_{0.76}Er_{0.04}Yb_{0.20}TiO_3$ demonstrate visible to the naked eye erbium upconversion luminescence index excitation at 980 nm with the bands at 410, 523, 546 and 658 nm, corresponding to the ${}^2H_{9/2} \rightarrow 4I_{15/2}$, ${}^2H_{11/2} \rightarrow 4I_{15/2}$, ${}^4S_{3/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ and ${}^4F_{9/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ transitions of Er^{3+} ions. Luminescence intensity is stable and observed after storage of samples in room conditions for six month.

Key words: upconversion; erbium; ytterbium; barium titanate; luminescence; sol-gel; xerogel.

ВВЕДЕНИЕ

Легированные лантаноидами материалы и пленочные структуры представляют интерес для различного практического применения, в частности, для разработки лазеров, оптических усилителей и конвертеров излучения для солнечных элементов. Ап-конверсионная люминесценция эрбия (преобразование ИК-излучения в области 0,98 и 1,5 мкм в видимое) вызывает значительный интерес для развития пленочных преобразователей излучения для солнечных элементов. Возможность усиления ап-конверсионной люминесценции эрбия получена в многослойных пленочных микрорезонаторах типа Фабри-Перо [1]. Для создания многослойных структур в виде брэгговских отражателей и микрорезонаторов в качестве материала с высоким показателем преломления нами было предложено использовать пленки титаната бария, сформированные золь-гель методом [2–4]. В данной работе приведены результаты апконверсионной люминесценции в пленочных структурах с ксерогелем титана бария состава $Ba_{0.76}Er_{0.04}Yb_{0.20}TiO_3$ и мишени такого же состава, изготовленной методом взрывного прессования порошка ксерогеля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для сравнения интенсивности ап-конверсионной люминесценции были выбраны различные подложки: монокристаллический кремний КДБ-10 (образцы №1, №2) и кварцевые подложки (№3). Для получения пленок титаната бария (ВАТ) использовался золь на основе тетраизопророксида титана и ацетата бария, которые последовательно растворяли в смеси уксусной кислоты и ацетилацетона, массовая концентрация для золь составляла 60 мг/мл. В золе были дополнительно растворены легирующие компоненты ацетата эрбия $\text{Er}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \times 4,2\text{H}_2\text{O}$ и ацетата иттербия в соотношении $\text{Er}:\text{Yb} = 1:5$ для получения пленок состава $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$. Для пленок оксида кремния был приготовлен золь на основе этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), тетраэтилорто-силиката ($\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$), дистиллированной воды (H_2O) и соляной кислоты (HCl).

Для получения пленок методом центрифугирования золи наносились на подложки. После нанесения каждого слоя проводилась сушка в течение 10 мин при 200°C и последующая термообработка в течение 30 минут при 450°C или 800°C .

Образец №1 представляет собой многослойную структуру микрорезонатора с чередующимися слоями BaTiO_3 и SiO_2 , средний слой титаната бария в которой является полуволновым и легирован эрбием и иттербием в указанной выше пропорции: $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2/\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2/\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2/\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2/2\text{BaTiO}_3:\text{Er, Yb}/\text{SiO}_2/\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2/\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2/\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2/\text{BaTiO}_3$.

Образец №2 представляет собой двухслойную пленку $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$. на кремнии с термообработкой в режиме 5 часов при 450°C и последующей термообработкой 30 мин при 800°C . Образец №2 был изготовлен для корректного сравнения с многослойным образцом №1, совокупный отжиг образца №2 составил 5 часов.

Образец №3 также в виде микрорезонатора формировался подобно образцу №1 с использованием подложки из кварцевого стекла и включал по три пары чередующихся слоев $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ в верхнем и нижнем брэгговских зеркалах с окончательной термообработкой при температуре 600°C . [4]. Микрорезонаторы изготавливались в режимах, при которых резонансная мода находится в видимом диапазоне. Также методом взрывного прессования была изготовлена мишень (образец №4) из порошка $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$, полученного путем многоступенчатой термообработки исходного золя по методике [5] с окончательной термообработкой при 1000°C .

Возбуждение ап-конверсионной люминесценции эрбия в полученных образцах осуществлялась сфокусированным излучением лазерного диода на длине волны ~ 980 нм мощностью ~ 200 мВт в непрерывном режиме. Длина волны этого излучения соответствует полосе поглощения при переходе электронов из основного состояния трехвалентных ионов эрбия $^4\text{I}_{15/2}$ во второе возбужденное состояние $^4\text{I}_{11/2}$, а также переходу $^2\text{F}_{7/2} \rightarrow ^2\text{F}_{5/2}$ трехвалентных ионов иттербия. В качестве детектора использовался фотоэлектронный умножитель R9110 ("Hamamatsu", Япония). Морфологию образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа S-4800 (Hitachi, Japan).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1. представлено РЭМ-изображение типичной многослойной структуры микрорезонатора со средним полуволновым слоем (образец №3). Полученные пленочные структуры (образцы №1–№3), а также мишень (образец №4) демонстрируют

ап-конверсионную люминесценцию ионов Er^{3+} . Спектры ап-конверсионной люминесценции образцов № 1, № 2 и № 4 приведены на рис. 2. Люминесценция ионов эрбия в пленочных структурах и мишени титаната бария характеризуется полосами 410, 523, 546 и 658 нм, наиболее интенсивная из которых наблюдается на 658 нм. Наблюдаемые полосы соответствуют переходам ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ трехвалентных ионов эрбия. Спектры образца №2 при термообработке 450 °С не приведены, поскольку ФЛ зарегистрировать не удалось. Для тонких пленок на кремниевых подложках ап-конверсия наблюдалась только после термообработки 800 °С (рис. 2, образец № 2). Для структур микрорезонаторов удалось зарегистрировать видимую ап-конверсионную люминесценцию, начиная с температуры термообработки 450 °С: образец N1 на монокристаллическом кремнии и образец № 3 – на кварцевой подложке [4], которая имеет сопоставимую интенсивность ФЛ с образцом №2. Интенсивность ФЛ в микрорезонаторах возрастает после их термообработки до 800 °С на порядок. Толщина легированного слоя в образце № 1 составляла 160 нм, как и для образца № 2.

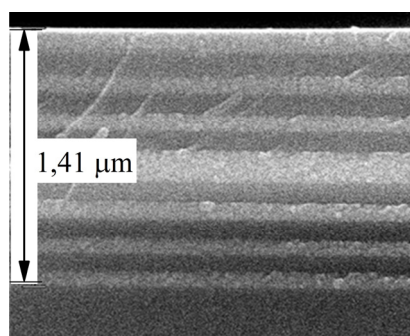


Рисунок 1. РЭМ-изображение микрорезонатора $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ толщиной 1,4 мкм (образец № 3)

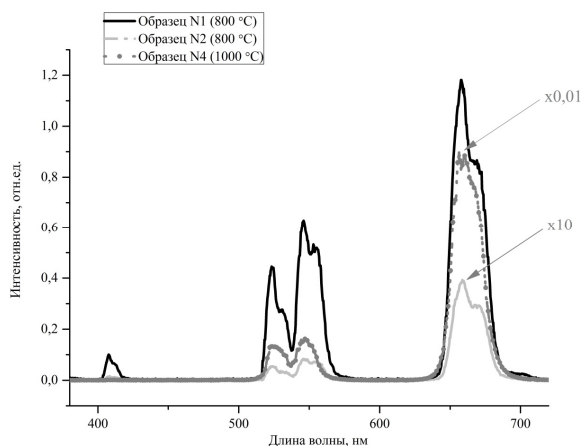


Рисунок 2. Спектры ап-конверсионной люминесценции образцов № 1, 2, 4

Для сравнения интенсивности ФЛ была подготовлена мишень (образец № 4) из порошка такого же состава $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$. Мишень демонстрирует яркую видимую невооруженным глазом апконверсионную люминесценцию, интенсивность которой на два порядка превышает люминесценцию пленочных структур. Следует отметить, что введение иттербия в состав золья повышает интенсивность ап-конверсионной люминесценции мишени в 6 раз по сравнению с мишенью, приготовленной по такой же технологии без иттербия [5]. Мишень и микрорезонатор на кремнии (образцы № 4 и № 1 соответственно) сохраняют ап-конверсионную люминесценцию в течение полугода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зарегистрирована ап-конверсионная люминесценция эрбия для длины волны возбуждения 980 нм в тонких пленках, многослойных структурах и мишени титаната бария с составом $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$. Установлено, что интенсивность ап-

конверсионной люминесценции эрбия может усиливаться на порядок для пленочно-го микрорезонатора с резонансной модой в видимом диапазоне. Пленочные структуры и мишени, демонстрирующие ап-конверсионную люминесценцию, представляют интерес для визуализаторов ИК-излучения, а также его преобразования в видимое для фоточувствительных структур электроники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Up-conversion enhancement in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped 1-D microcavity based on alternating aluminosilicate glass and titania sol-gel layers / R.E. Rojas-Hernandez [et al.] // *Ceram. Int.* – 2020. – V. 46. – P. 26273–26281.
2. Sol-gel fabrication and luminescence properties of multilayer Eu-doped $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ xerogel nanostructures / Yu.D. Karnilava [et al.] // *Int. J. Nanosci.* – 2019. – V. 18. – P. 1940044 (4 pages).
3. Enhanced luminescence of europium in sol-gel derived $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ multilayer cavity structure / N.V. Gaponenko [et al.] // *Opt. Mater.* – 2019. – V. 96C. – P. 109265 (5 pages).
4. Optical properties and upconversion luminescence of BaTiO_3 xerogel structures doped with erbium and ytterbium / E.I. Lashkovskaya [et al.] // *Gels.* – 2022. – V. 8. – P. 347 (15 pages).
5. Ап-конверсионная люминесценция ионов Er^{3+} в порошке ксерогеля титаната бария и мишени, сформированной методом взрывного прессования / Н.В. Гапоненко [и др.] // *ЖПС.* – 2022. – Т. 89, № 2. – С. 184–190.

ВЛИЯНИЕ ГАММА-КВАНТОВ НА ТЕМНОВОЙ ТОК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ С ОПТИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ЯЧЕЕК

Д. А. Огородников¹, Ю. В. Богатырев¹, С. Б. Ластовский¹,
А. М. Лемешевская², В. С. Цымбал², А. В. Кетько², С. В. Шпаковский²

¹) Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: ogorodnikov@iftpr.bas-net.by

²) ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск, Беларусь, e-mail: office@bms.by

Представлены результаты исследования влияния гамма-излучения Co^{60} на темновой ток кремниевых фотоэлектронных умножителей (Si ФЭУ). Активные ячейки Si ФЭУ представляли собой оптически изолированные друг от друга p^+-n-n^+ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоями SiO_2 и Si_3N_4 заполнялись вольфрамом. Вывод металла канавки электрически соединялся с n^+ -областью ячейки. Установлено, что наиболее сильные изменения обратной вольтамперной характеристики наблюдаются у образцов Si ФЭУ, облучаемых в активном электрическом режиме. Показано, что изменения темнового тока с ростом поглощенной дозы носят немономонный характер. Полученные результаты объясняются влиянием электрического поля на величину выхода дырочного заряда в диэлектрических слоях канавок.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель; гамма-излучение; темновой ток; обратная вольт-амперная характеристика.