
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

Ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович,
В.К. Конопелько, А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов,
В.В. Муравьев, Ю.В. Писецкий, А.С. Сигов, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус,
И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков,
В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк,
В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, В.А. Куренев,
В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, В.Е. Матюшков, Ф.И. Пантелеенко,
В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль,
В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Республика Беларусь

Телефон редакции: +375 17 293-88-41

www.doklady.bsuir.by; doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Вышинский Н. В. Исследование упругого скольжения в механизмах с гибким звеном с фрикционным сцеплением	5
Юник А. Д., Шидловский А. Г. Использование лазерной интерферометрии для определения времени окончания плазмохимического травления слоев р-GaN и AlGaN гетероструктуры р-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом	12

Пилипенко В. А., Солодуха В. А., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А., Шестовский Д. В., Жигулин Д. В. Влияние термической нагрузки при формировании контактов Al-Al на электрические параметры интегральных микросхем с контактами алюминий-поликремний.....	20
Лашковская Е. И., Гога А. В., Плиговка А. Н., Чубенко Е. Б., Живулько В. Д., Монайко Э. В., Гапоненко Н. В. Ап-конверсионная люминесценция в ксерогеле титаната бария, легированном эрбием и иттербием, в пористом анодном оксиде алюминия.....	28
Емельянов В. В. Многослойные системы металлизации субмикронных интегральных схем	36
Пикуза М. О. Улучшение статистических характеристик аппаратного генератора случайных чисел программным способом	43
Пеньялоса Овальес Д. И., Бойправ О. В., Тумилович М. В., Гусинский А. В., Балтрукович П. И. Обоснование возможности использования электромагнитных экранов на основе порошкообразных алюмооксидов для снижения энергии электромагнитного излучения приборов электронной техники.....	48
Мордачев В. И., Ционенко Д. А. Влияние пространственной избирательности излучения базовых станций мобильной связи на уровень создаваемого ими электромагнитного фона	56
Апорович В. А. Отождествление сопровождаемых траекторий и отметок методом притяжения при вторичной обработке радиолокационной информации.....	65
Казючиц В. О., Боровиков С. М., Шнейдеров Е. Н. Модель прогнозирования времени тестирования компьютерной программы автоматизированной оценки надежности полупроводниковых приборов	72
Шарамет А. В. Многопоточная реализация свертки на основе блочных методов	81
Будько А. А., Дворникова Т. Н., Мисулин Е. А., Снапко Р. Ю. Сжатие изображений с использованием функций Уолша	88
Щербина Н. В. Прогнозирование способности к выработке навыка релаксации у машинистов локомотивных бригад.....	95

Ответственный секретарь редакции Т. В. Мироненко
Корректурa И. Н. Зюзикова
Верстка Л. В. Кондакова

Подписано в печать 29.11.2022. Формат 60×84 ¼. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 10,5. Тираж 85 экз. Заказ 226.
Индекс для индивидуальной подписки 00787.
Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2022

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal is being published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No. 1087.

The journal included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Researches in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)

Chief Editor

Vadim Anatol'evich Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Editor office address: P. Brovka St., 6, off. 326,

Minsk, 220013, Republic of Belarus

Editor office phone number: +375 17 293-88-41

www.doklady.bsuir.by; doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Vyshinski N. V. Investigation of Elastic Sliding in Mechanisms with a Flexible Link with a Friction Clutch	5
Yunik A. D., Shydouski A. H. Use of Laser Interferometry to Determine the End Time of the Plasma-Chemical Etching of p-GaN and AlGa _N Layers of the p-GaN/AlGa _N /Ga _N Heterostructure with Two-Dimensional Electron Gas.....	12
Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov J. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V. Thermal Load Influence during the Formation of Al-Al Contacts on the Electrical Parameters of the Integrated Circuits with Aluminum-Polysilicon Contacts.....	20
Lashkovskaya E. I., Hoha A. V., Pligovka A. N., Chubenko E. B., Zhivulko V. D., Monaico E. V., Gaponenko N. V. Upconversion Luminescence in Barium Titanate Xerogel Doped with Erbium and Ytterbium in Porous Anodic Aluminum Oxide.....	28
Emelyanov V. V. Multilayer Metallization Systems of Submicron Integrated Circuits.....	36
Pikuza M. O. Statistical Characteristics Improvement of a Hardware Random Number Generator by a Software Method.....	43
Penialosa Ovalies D. I., Boiprav O. V., Tumilovich M. V., Gusinsky A. V., Baltrukovich P. I. Substantiation of the Possibility to Use the Electromagnetic Shields Based on Powdered Aluminum Oxides to Reduce the Electromagnetic Radiation Energy of Electronic Devices	48

Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. Influence of Spatial Selectivity of Radiation of Mobile Communication Base Stations on the Level of Electromagnetic Background Introduced by them.....	56
Aparovich U. A. Association of the Tracked Trajectories and Marks by the Attraction Method during Secondary Processing of Radar Information.....	65
Kaziuchyts V. O., Borovikov S. M., Shneiderov E. N. Model for Prediction of Testing Time of a Computer Program for Automated Reliability Evaluation of Semiconductor Devices.....	72
Sharamet A. V. Multithreaded Convolution Implementation Based on Block Methods	81
Budzko A. A., Dvornikova T. N., Misulin E. A., Snapko R. U. Image Compression Using Walsh Functions	88
Shcherbina N. V. Prediction of the Ability to Develop the Relaxation Skill in Drivers of Locomotive Crews.....	95



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-28-35>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 666.3

АП-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В КСЕРОГЕЛЕ ТИТАНАТА БАРИЯ, ЛЕГИРОВАННОМ ЭРБИЕМ И ИТТЕРБИЕМ, В ПОРИСТОМ АНОДНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ

Е. И. ЛАШКОВСКАЯ¹, А. В. ГОГА¹, А. Н. ПЛИГОВКА¹, Е. Б. ЧУБЕНКО¹, В. Д. ЖИВУЛЬКО²,
Э. В. МОНАЙКО³, Н. В. ГАПОНЕНКО¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
(г. Минск, Республика Беларусь)

³Технический университет Молдовы (г. Кишинёв, Республика Молдова)

Поступила в редакцию 24.08.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье рассмотрен золь-гель-синтез и люминесцентные свойства титаната бария, легированного эрбием и иттербием ($\text{BaTiO}_3:\text{Er},\text{Yb}$), в пористом анодном оксиде алюминия. Пористый анодный оксид алюминия с его хорошо известной ячеистой структурой был выбран в качестве матрицы для золь-гель-синтеза $\text{BaTiO}_3:\text{Er},\text{Yb}$. Пористый анодный оксид алюминия изготавливали на кремниевой пластине и алюминиевой фольге. Раствор, соответствующий составу ксерогеля $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$, осаждался на пористый анодный оксид алюминия методом центрифугирования с последующей сушкой и термообработкой при относительно низкой температуре $450\text{ }^\circ\text{C}$ на алюминиевой фольге или при $800\text{ }^\circ\text{C}$ на кремнии. Пористый анодный оксид алюминия, известный также как оптически анизотропная структура, в эксперименте отличался размером пор и толщиной. По результатам испытаний установлено, что все изготовленные образцы демонстрируют ап-конверсионную люминесценцию эрбия при комнатной температуре при возбуждении диодным модулем в непрерывном режиме сфокусированным излучением лазерного диода на длине волны 980 нм мощностью 200 мВт . Ап-конверсионная люминесценция эрбия характеризуется полосами с максимумом на длинах волн $410, 523, 546$ и 658 нм и соответствующими им переходами ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, ап-конверсия, люминесценция, золь-гель-метод, многослойные структуры, пористый анодный оксид алюминия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ГКНТ-Молдова Ф22МЛДГ-002; ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», задание 1.9; ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 2.02, и Национального агентства исследований и разработок Молдовы (проект #22.80013.5007.4VL «Нано- и гетероструктуры на основе оксида цинка и соединений AzB_5 для оптоэлектроники, фотоники и биосенсорики»).

Для цитирования. Лашковская Е. И., Гога А. В., Плиговка А. Н., Чубенко Е. Б., Живулько В. Д., Монайко Э. В., Гапоненко Н. В. Ап-конверсионная люминесценция в ксерогеле титаната бария, легированном эрбием и иттербием, в пористом анодном оксиде алюминия. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 28–35.

UPCONVERSION LUMINESCENCE IN BARIUM TITANATE XEROGEL DOPED WITH ERBIUM AND YTTERBIUM IN POROUS ANODIC ALUMINUM OXIDE

EKATERINA I. LASHKOVSKAYA¹, ALIAKSANDR V. HOHA¹, ANDREI N. PLIGOVKA¹,
EUGENE B. CHUBENKO¹, VADIM D. ZHIVULKO², EDUARD V. MONAICO³,
NIKOLAI V. GAPONENKO¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

³Technical University of Moldova (Kishinev, Republic of Moldova)

Submitted 24.08.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. In this work, sol-gel synthesis and luminescence properties of erbium and ytterbium doped BaTiO₃ (BaTiO₃:Er,Yb) in porous anodic alumina are reported. Porous anodic alumina with its well-known tailor-made honeycomb structure was chosen as a template for the sol-gel synthesis of BaTiO₃:Er,Yb. Porous anodic alumina was fabricated either on silicon wafer or aluminum foil. The sol corresponding to xerogel content of Ba_{0,76}Er_{0,04}Yb_{0,20}TiO₃ was deposited on porous anodic alumina by spinning, which was followed by drying and heat treatment at a relatively low temperature 450 °C on aluminum foil or 800 °C on silicon. Porous anodic alumina known also as an optically anisotropic structure differed in the experiments by diameter of the pores and thickness. Evidently, all fabricated samples demonstrated a room-temperature erbium upconversion luminescence under excitation in the continuous-wave (CW) mode with a focused 980 nm laser beam of a 200 mW diode module. Erbium upconversion luminescence is characterized by the bands at 410, 523, 546, and 658 nm, corresponding to the ²H_{9/2} → ⁴I_{15/2}, ²H_{11/2} → ⁴I_{15/2}, ⁴S_{3/2} → ⁴I_{15/2} and ⁴F_{9/2} → ⁴I_{15/2}.

Keywords: erbium, ytterbium, upconversion, luminescence, sol-gel method, multilayer structures, porous anodic alumina.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was supported financially by the SCNT-Moldova project F22MLDG-002; SPNI “Photonics and electronics for innovation”, task 1.9; SPNI “Materials Science, New Materials and Technologies”, task 2.02, and by National agency for research and development of Moldova under the grant #22.80013.5007.4BL “Nano- and heterostructures based on zinc oxide and A₃B₅ compounds for optoelectronics, photonics and biosensors”.

For citation. Lashkovskaya E. I., Hoha A. V., Pligovka A. N., Chubenko E. B., Zhivulko V. D., Monaico E. V., Gaponenko N. V. Upconversion Luminescence in Barium Titanate Xerogel Doped with Erbium and Ytterbium in Porous Anodic Aluminum Oxide. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 28–35.

Введение

Ап-конверсионная люминесценция наблюдается в материалах, легированных некоторыми трехвалентными лантаноидами – эрбием, тулием, гольмием и неодимом [1, 2]. Сущность эффекта ап-конверсионной люминесценции заключается в поглощении двух и более фотонов меньшей энергии с излучением фотона большей энергии. Для сенсбилизации ап-конверсионной люминесценции эрбия применяется солегирование ионами иттербия, имеющими более высокое сечение поглощения в области 980 нм по сравнению с эрбием. Ап-конверсионная люминесценция используется и исследуется для визуализации лазерного ИК-излучения в медицине, технологиях изготовления солнечных элементов, лазерах.

В некоторых научных публикациях уже была продемонстрирована ап-конверсионная люминесценция эрбия в различных образцах, изготовленных с использованием золь-гель-синтеза титаната бария – порошке, пленочных структурах на кремнии Si/LaNiO₃, Si/SrTiO₃/BaTiO₃:Er и BaTiO₃:Er,Yb, микрорезонаторе на кварцевом стекле SiO₂/BaTiO₃:Er,Yb и мишени BaTiO₃:Er, полученной методом взрывного прессования [3–8]. В данной статье проведено исследование

ап-конверсионной люминесценции эрбия в структурах ксерогель ВаTiO₃:Er,Yb/пористый анодный оксид алюминия (ПАОА).

Ранее в [9–12] была показана интенсивная стоксовая фотолюминесценция (ФЛ) эрбия, тербия и европия в структурах ксерогель/ПАОА. При возбуждении УФ-излучением интенсивность ФЛ тербия и европия возрастает с увеличением как толщины ПАОА, так и количества нанесенных слоев ксерогеля, что, наряду с повышением содержания люминофора на единицу облучаемой поверхности, связано с многократным рассеянием возбуждающего излучения и перераспределением мод излучения в оптически анизотропной структуре ксерогель/ПАОА [9–11]. Интенсивность стоксовой люминесценции эрбия на 1,54 мкм возрастает с увеличением числа нанесенных слоев ксерогеля диоксида титана для длины волны возбуждения 532 нм, для которой обе матрицы – ксерогель диоксида титана и ПАОА – являются достаточно прозрачными [12]. Ап-конверсионная люминесценция эрбия и других лантаноидов в ксерогелях различного состава, в частности ВаTiO₃ в ПАОА, по нашим данным, ранее не исследовалась.

Методика проведения эксперимента

Однослойные и многослойные структуры типа ксерогель/ПАОА были изготовлены с использованием золь титаната бария ВаTiO₃, содержащего эрбий и иттербий в молярном соотношении 1 к 5 для получения ксерогеля состава Ва_{0,76}Er_{0,04}Yb_{0,20}TiO₃. В табл. 1 приведены характеристики образцов, полученные в процессе исследований.

Таблица 1. Характеристики образцов
Table 1. Characteristics of samples

№ образца / Sample No	Толщина ПАОА, мкм / Thickness of PAAO, μm	Диаметр поры, нм / Pore diameter, nm	Подложка / Substrate	Количество слоев ксерогеля / Number of xerogel layers	T _{отжига} , °C / T _{anneal} , °C
1	2,2	20	Кремний / Silicon	8	800
2	1,4	120–150		8	800
3	1,7	240–270		8	800
4	1,5	210–240	Алюминиевая фольга / Aluminium foil	1	450
5	3,0	210–240		1	450
6	7,5	210–240		1	450
7	15,0	210–240		1	450

Золь титаната бария, содержащий компоненты лантаноидов, готовили с использованием изопророксида титана (Ti(OC₃H₇)₄) (97 %, Sigma-Aldrich, Индия), ацетилацетона (CH₃COCH₂COCH₃) (ЧДА, АО «Вектон», Россия), ацетата бария ((Ba(CH₃COO)₂) (ACS reagent 99 %, Sigma-Aldrich, Германия), гидрата ацетата эрбия (Er(CH₃COO)₃·H₂O) (99,9 % trace metal basis, Sigma-Aldrich, США) и гидрата ацетата иттербия (Yb(CH₃COO)₃·H₂O) (99,95 % trace metal basis, Sigma-Aldrich, Россия) по методике [7]. В качестве основания для нанесения ксерогеля использовали ПАОА, сформированный на подложках двух типов – на монокристаллическом кремнии и на алюминиевой фольге. На кремниевой подложке формирование ПАОА осуществляли анодированием тонкой пленки алюминия толщиной 1,5 мкм, нанесенной методом магнетронного распыления на кремниевую пластину *p*-типа с ориентацией поверхности <111>. Анодирование проводилось в специальной двухэлектродной вертикальной электрохимической ячейке из политетрафторэтилена. Электрохимическую ячейку подключали к программируемому источнику тока Keysight N5752A и мультиметру Keysight 34470A в режиме измерения тока, которые управлялись с компьютера при помощи программного обеспечения, разработанного в среде LabView.

Все процессы анодирования проводились при постоянном перемешивании электролита и его начальной температуре 21 °С. Экспериментальные образцы формировали в гальваностатическом режиме при плотности тока 6 мА·см⁻². Первый образец ПАОА на кремнии был сформирован в 0,6 М водном растворе щавелевой кислоты (ЩК), второй и третий ПАОА на кремнии – в 0,6 М водном растворе винной кислоты (ВК) (табл. 1).

Третий образец ПАОА, сформированный в ВК на кремнии, подвергали селективному травлению в 1,1 М водном растворе ортофосфорной кислоты и 0,65 М хромового ангидрида при температуре 62 °С в течение 18 мин. Образцы ПАОА 4–7 (табл. 1) были сформированы на алюминиевой фольге (99,99 %) в 0,6 М водном растворе ВК.

Золь наносили центрифугированием со скоростью 1500 об/мин в течение 30 с, затем сформированные пленки сушили при 150 °С в течение 10 мин. Для образцов 1–3 на кремнии по такому маршруту было подготовлено восемь слоев, после чего образцы подвергали отжигу при 800 °С в течение 30 мин. Для однослойных образцов 4–7 окончательный отжиг проводили при 450 °С в течение 30 мин.

Возбуждение ап-конверсионной люминесценции эрбия в полученных образцах осуществлялось 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 $^4I_{15/2}$ во второе возбужденное состояние $^4I_{11/2}$. В качестве детектора для регистрации ап-конверсионной люминесценции видимого диапазона использовали фотоэлектронный умножитель R9110 (Hamamatsu, Япония). Обработку сигналов с фотодетектора проводили с помощью метода синхронного фазового детектирования с автоматической компьютерной регистрацией и обработкой спектров. Морфологию образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе S-4800 (Hitachi, Япония).

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, *a* представлена кинетика формирования ПАОА на кремниевой подложке для образца № 1 (табл. 1). Алюминий толщиной 1,5 мкм образца № 1 был окислен в течение 786 с, что соответствует расчетной толщине ПАОА 2,2 мкм при коэффициенте объемного роста (КОР) для ЩК, равном 1,45 [13]. На рис. 1, *b* показана кинетика формирования ПАОА на кремниевой подложке для образца № 2. Продолжительность анодирования составляла 563 с, что соответствует толщине окисленного алюминия 940 нм и расчетной толщине ПАОА 1,4 мкм при КОР для ВК, равном 1,5 [14]. Продолжительность анодирования третьего образца составляла 680 с, что соответствует толщине окисленного алюминия 1133 нм и расчетной толщине ПАОА 1,7 мкм. Кроме того, для третьего образца проводили расширение пор селективным травлением. Расширение пор было необходимо для лучшего заполнения пор ксерогелем.

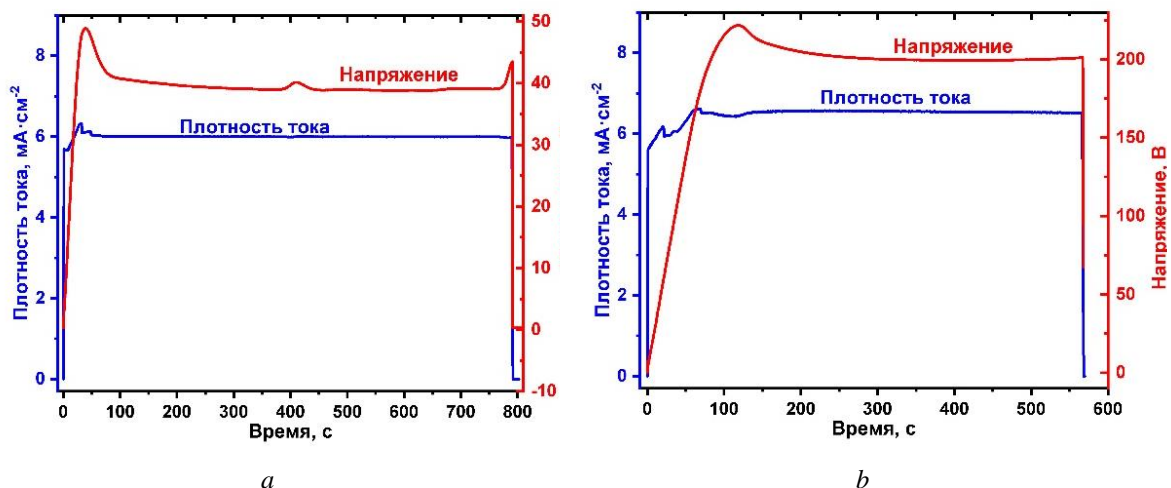


Рис. 1. Кинетика формирования пористого анодного оксида алюминия на кремниевых подложках в 0,6 М водном растворе: *a* – щавелевой кислоты; *b* – винной кислоты

Fig. 1. Porous anodic aluminum oxide current-voltage-time responses on Si wafer formation in an 0,6 M aqueous solution: *a* – of oxalic acid; *b* – of tartaric acid

Анализ кинетических зависимостей позволяет сделать вывод, что для ПАОА, сформированного на алюминиевой фольге, размер пор составляет 210–240 нм. Различный диаметр пор ПАОА для образцов на алюминиевой фольге и кремнии при одинаковых условиях

формирования (образец № 3 и образцы № 4–7 соответственно) объясняется разным исходным алюминием. Так, для ПАОА на фольге характерно более высокое стационарное напряжение анодирования, чем для ПАОА на кремниевой пластине.

На рис. 2 представлены РЭМ-изображения образца № 1 с восьмью слоями ксерогеля титаната бария. ПАОА по всей толщине обладает равномерной, упорядоченной структурой с регулярно расположенными порами, остатков алюминия не наблюдается. Толщина ПАОА соответствует расчетной и составляет ~2,2 мкм. На поверхности ПАОА отчетливо различаются слои ксерогеля равномерной толщины ~200 нм. Анализ поверхности ПАОА на рис. 2, *a* позволяет сделать вывод, что ксерогелю не удалось проникнуть в поры, что объясняется довольно малым диаметром пор (~20 нм) (табл. 1).

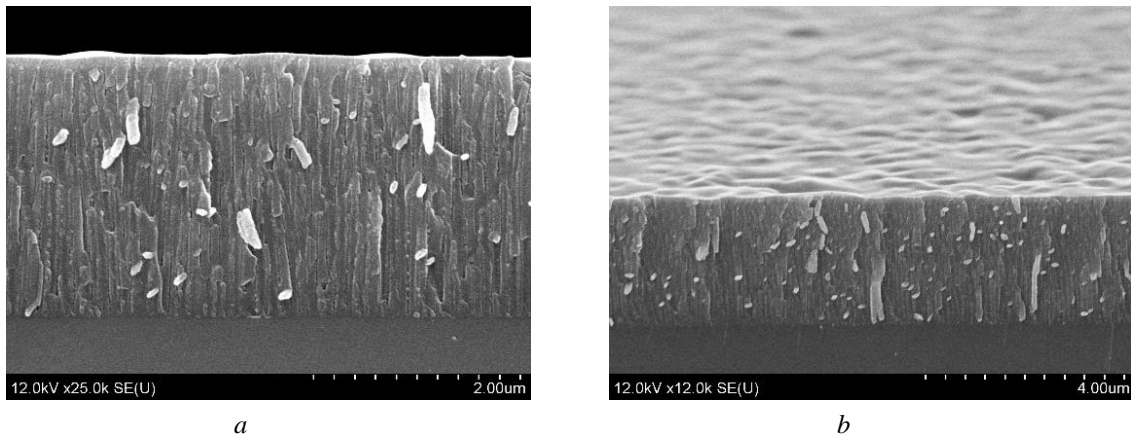


Рис. 2. РЭМ-изображение образца № 1 (табл. 1) с восьмью слоями ксерогеля титаната бария в пористом оксиде алюминия на кремниевой подложке после отжига при температуре 800 °С: *a* – скол; *b* – вид сверху

Fig. 2. SEM image of sample No 1 (Tabl. 1) with 8 layers of barium titanate xerogel in porous anodic aluminum oxide on Si wafer after annealing at 800 °С: *a* – plane view; *b* – cleaved edge

Для всех образцов наблюдались характерные для эрбия полосы ап-конверсионной люминесценции с максимумом на длинах волн 410, 523, 546 и 658 нм, обусловленных переходами $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (рис. 3). Ап-конверсионная люминесценция для длины волны возбуждения 980 нм может быть обусловлена как поглощением одним ионом эрбия из возбужденного состояния, так и ион-ионным взаимодействием лантаноидов с участием иттербия как иона-сенситизатора (рис. 4). Существенно, что ап-конверсионная люминесценция наблюдается даже на структурах ксерогель / ПАОА, приготовленных на алюминиевой фольге, т. е. после термообработки при температуре 450 °С. В отличие от стоксовой люминесценции тербия и европия [9], для структур, содержащих один слой ксерогеля, интенсивность ап-конверсионной люминесценции не увеличивается с увеличением толщины ПАОА, а наоборот, убывает (рис. 3, графики 4–7). Значительное восьмикратное увеличение ап-конверсионной люминесценции наблюдается для структур с ПАОА меньшей толщины, но подвергнутых термообработке при более высокой температуре (800 °С) и содержащих восемь слоев ксерогеля (рис. 3, графики 1–3). При этом более интенсивная ап-конверсионная люминесценция наблюдается для ПАОА с диаметром пор 120–150 нм (рис. 3, сравнить график 2 с графиками 1, 3).

По мнению авторов статьи, многократное рассеяние возбуждающего излучения в структурах ксерогель/ПАОА для длины волны 980 нм не столь существенно для усиления ап-конверсионной люминесценции в рассматриваемых структурах, как для ультрафиолетового диапазона при возбуждении тербия и европия. Увеличение интенсивности ап-конверсионной люминесценции при повышении температуры отжига для ксерогеля титаната бария наблюдалось и в микрорезонаторе $BaTiO_3/SiO_2$, что может быть связано с уплотнением структуры ксерогеля и увеличением коэффициента поглощения в области возбуждения [7, 15]. Кроме этого, повышение температуры отжига уменьшает концентрацию гидроксильных групп, ослабляющих ап-конверсионную люминесценцию лантаноидов.

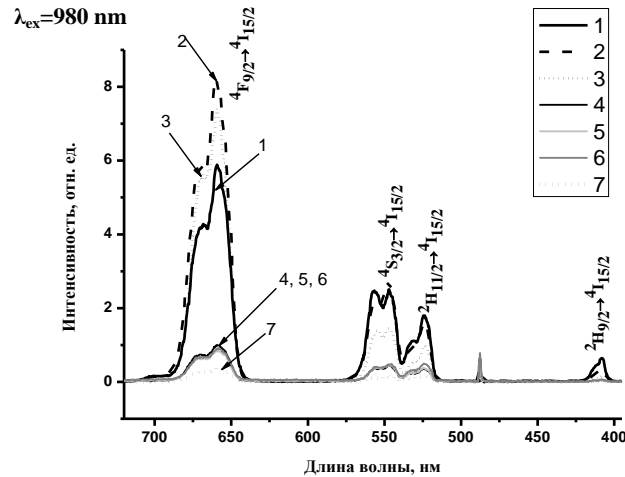


Рис. 3. Спектры ап-конверсионной люминесценции для образцов ксерогель $\text{BaTiO}_3:(\text{Er},\text{Yb})/\text{пористый}$ анодный оксид алюминия (длина волны возбуждения 980 нм): 1–3 – на кремниевой подложке с восьмью слоями ксерогеля и $T_{\text{отжига}} = 800^\circ\text{C}$; 4–7 – на алюминиевой фольге с одним слоем ксерогеля и $T_{\text{отжига}} = 450^\circ\text{C}$

Fig. 3. Upconversion luminescence spectra for $\text{BaTiO}_3:(\text{Er},\text{Yb})/\text{porous}$ anodic alumina xerogel samples (excitation wavelength 980 nm): 1–3 – on silicon substrate with 8 xerogel layers annealed at $T_{\text{anneal}} = 800^\circ\text{C}$; 4–7 – on aluminum foil with 1 xerogel layer annealed at $T_{\text{anneal}} = 450^\circ\text{C}$

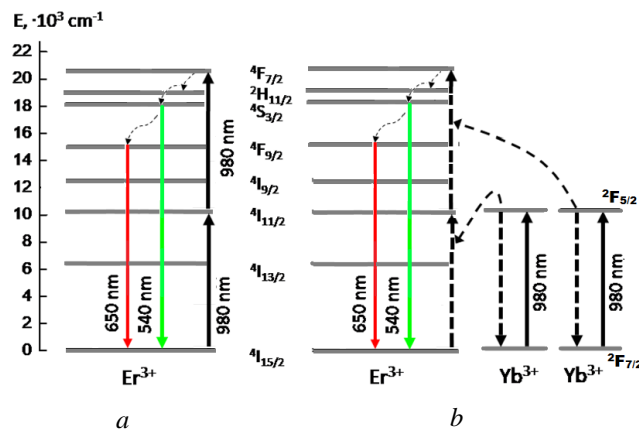


Рис. 4. Диаграмма энергетических уровней, демонстрирующая механизмы ап-конверсионной люминесценции при возбуждении на длине волны 980 нм: *a* – поглощение ионом эрбия из возбужденного состояния; *b* – ап-конверсионный перенос энергии между ионами в материале, легированном эрбием и иттербием [7]

Fig. 4. Energy level diagram demonstrating the mechanisms of upconversion PL under excitation at a wavelength of 980 nm: *a* – absorption by one erbium ion from the excited state; *b* – energy transfer upconversion in the material doped with erbium and ytterbium [7]

Заключение

Показана ап-конверсионная люминесценция трехвалентных ионов эрбия в видимом диапазоне при возбуждении на длине волны 980 нм в ксерогелях $\text{BaTiO}_3:(\text{Er},\text{Yb})/\text{пористый}$ анодный оксид алюминия после термообработки при температуре 450 и 800 °С. Ап-конверсионную люминесценцию демонстрируют структуры, сформированные как на алюминии, так и на кремнии. Наиболее интенсивную ап-конверсионную люминесценцию показывают образцы, содержащие восемь слоев ксерогеля и подвергнутые термообработке при 800 °С. Ап-конверсионная люминесценция характеризуется полосами излучения в диапазоне 400–700 нм с наиболее интенсивной полосой перехода трехвалентного эрбия $4\text{F}_{9/2} \rightarrow 4\text{I}_{15/2}$ с максимумом на длине волны 658 нм. Подобные структуры представляют интерес для пленочных визуализаторов ИК-излучения, в частности, лазеров с длиной волны генерации 980 нм, для люминесцентных изображений на алюминии и его сплавов с целью защиты от подделки [16] и преобразователей

для тыльной стороны солнечных элементов, прозрачных в ближнем ИК-диапазоне. Кроме этого, образцы пористого анодного оксида алюминия с размерами пор 90 нм и более, содержащие однократно нанесенный слой ксерогеля, как правило, оставляют устья пор открытыми [17], что обеспечивает возможность для проникновения в них жидкостей и может быть использовано в технологии мезо- и макропористых материалов для фотокаталитической очистки воды при облучении ИК-излучением.

Список литературы / References

1. Goldschmidt J. C., Fischer S. (2015) Upconversion for Photovoltaics – a Review of Materials, Devices and Concepts for Performance Enhancement. *Advanced Optical Materials*. 3 (4), 510–535. DOI: 10.1002/adom.201500024.
2. Gusakova N. V., Kurilchik S. V., Yasukevich A. S., Kisel V. E., Dashkevich V. I., Orlovich V. A., Pavlyuk A. A., Vatnik S. M., Bagaev S. N., Kuleshov N. V. (2018) Spectroscopy and Microchip Laser Operation of Tm, Ho:KYW Crystals with Different Ho Concentrations. *Laser Physics Letters*. 15 (2), 025001. DOI: 10.1088/1612-202X/aa9972.
3. Ghosh P., Sadhu S., Sen T., Patra A. (2008) Upconversion Emission of BaTiO₃:Er Nanocrystals. *Bulletin of Materials Science*. 31 (3), 461–465. DOI: 10.1007/s12034-008-0072-7.
4. Meneses-Franco A., Campos-Vallette M., Vásquez S. O., Soto-Bustamante E. A. (2018) Er-Doped Nanostructured BaTiO₃ for NIR to Visible Upconversion. *Materials (Basel)*. 11 (10), 1950. DOI: 10.3390/ma11101950.
5. Chen L., Wei X.-H., Fu X. (2012) Effect of Er Substituting Sites on Upconversion Luminescence of Er³⁺-Doped BaTiO₃ Films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 22 (5), 1156–1160. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61299-5.
6. Rudenko M. V., Gaponenko N. V., Chubenko E. B., Lashkovskaya E. I., Shustsikava K. V., Radyush Yu. V., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Wang M., Monaico E. V., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N. (2022) Erbium Upconversion Luminescence from Sol-Gel Derived Multilayer Porous Inorganic Perovskite Film. *Journal of Advanced Dielectrics*. 12 (2), 2150031. DOI: 10.1142/S2010135X21500314.
7. Lashkovskaya E. I., Gaponenko N. V., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Andreev B. A., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Martynov I. L., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Labunov V. A., Raichenok T. F., Tikhomirov S. A., Timoshenko V. Yu. (2022) Optical Properties and Upconversion Luminescence of BaTiO₃ Xerogel Structures Doped with Erbium and Ytterbium. *Gels*. 8 (6), 347. DOI: 10.3390/gels8060347.
8. Gaponenko N. V., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Lashkovskaya E. I., Shustsikava K. V., Radyush Yu. V., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Kazuchits N. M., Rusetsky M. S. (2022) Upconversion luminescence of Er³⁺ Ions from Barium Titanate Xerogel Powder and Target Fabricated by Explosive Compaction Method. *Journal of Applied Spectroscopy*. 89 (2), 184–190. DOI: 10.1007/s10812-022-01349-x.
9. Gaponenko N. V. (2007) Luminescence of Lanthanides from Xerogels Embedded in Mesoporous Matrices. *Acta Physica Polonica A*. 112 (5), 737–749. DOI: 10.12693/APhysPolA.112.737.
10. Gaponenko N. V., Molchan I. S., Gaponenko S. V., Mudryi A. V., Lyutich A. A., Misiewicz J., Kudrawiec R. (2003) Luminescence of Eu³⁺ and Tb³⁺ Ions in the Structure Microporous Xerogel/Mesoporous Anodic Aluminum Oxide. *Journal of Applied Spectroscopy*. 70 (1), 59–64. DOI: 10.1023/A:1023268324339.
11. Lutich A. A., Gaponenko S. V., Gaponenko N. V., Molchan I. S., Sokol V. A., Parkhutik V. (2004) Light Scattering in Nanoporous Materials: a Photon Density of States Effect. *Nano Letters*. 4 (9), 1755–1758. DOI: 10.1021/nl049620e.
12. Gaponenko N. V., Molchan I. S., Tsyrukunov D. A., Maliarevich G. K., Aegerter M., Puetz J., Al-Dahoudi N., Misiewicz J., Kudrawiec R., Lambertini V., Pira N. Li, Repetto P. (2005) Optical and Structural Properties of Sol-Gel Derived Materials Embedded in Porous Anodic Alumina. *Microelectronic Engineering*. 81 (2), 255–261. DOI: 10.1016/j.mee.2005.03.016.
13. Sulka G. D. (2008) Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self-Organized Anodizing. *Nanostructured Materials in Electrochemistry*. 1, 1–116. DOI: 10.1002/9783527621507.ch1.
14. Sarganov V. F., Gorokh G. G. (1993) Anodic Oxide Cellular Structure Formation on Aluminum Films in Tartaric Acid Electrolyte. *Materials Letters*. 17, 121–124. DOI: 10.1016/0167-577X(93)90069-A.
15. Gaponenko N. V., Kholov P. A., Karnilava Yu. D., Lashkovskaya E. I., Labunov V. A., Martynov I. L., Osipov E. V., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Raichenok T. F., Tikhomirov S. A. (2021) Sol-Gel Derived Photonic Crystals BaTiO₃/SiO₂. *Semiconductors*. 55 (11), 831–834. DOI: 10.1134/S1063782621100110.
16. Gaponenko N. V., Orekhovskaya T. I., Meledina M. V., Prislipsky S. Ya., Gaponenko S. V., Tsirkunov D. A., Borisenko V. E., Turtsevich A. S. (2011) Method for Forming a Pattern for Obtaining a Luminescent Image on an Aluminum Surface: Patent No a20091888 of Rep. Belarus. Publ. 07.13.2011 (in Russian).
17. Gaponenko N. V., Orekhovskaya T. I., Nikolaenko I. A., Linnik O. P., Zhukovskii M. A., Smirnova N. P., Prislipskii S. Ya. (2010) Titanium Oxide Xerogel Films in Porous Aluminum Oxide for Photocatalytic Application. *Journal of Applied Spectroscopy*. 77 (3), 432–436. DOI: 10.1007/s10812-010-9350-4.

Вклад авторов

Лашковская Е. И. отработала методику формирования золя и выполнила синтез пленок ксерогелей титаната бария.

Гога А. В. приготовил образцы пористого анодного оксида алюминия.

Плиговка А. Н. отработал режимы анодирования, принял участие в обработке и интерпретации результатов исследований.

Чубенко Е. Б. принял участие в обсуждении результатов и подготовки рукописи статьи.

Живулько В. Д. выполнил люминесцентный анализ образцов.

Монайко Э. В. принял участие в обсуждении результатов и подготовки рукописи статьи.

Гапоненко Н. В. определил цели и задачи исследования, подготовил рукопись статьи.

Authors' contribution

Lashkovskaya E. I. worked out a method of forming film-forming sols and performed the synthesis of barium titanate xerogel films. Hoha A. V. prepared samples of porous anodic aluminum oxide. Pligovka A. N. worked out the modes of anodizing, took part in the processing and interpretation of the research results. Chubenko E. B. participated in the discussion of the results and preparation of the manuscript of the article. Zhivulko V. D. performed luminescent analysis of samples. Monaico E. V. participated in the discussion of the results and preparation of the manuscript of the article. Gaponenko N. V. defined the objectives of the research and prepared the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Лашковская Е. И., инженер НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гога А. В., стажер, младший научный сотрудник НИЛ 4.10 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Плиговка А. Н., к.т.н., старший научный сотрудник НИЛ 4.10 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чубенко Е. Б., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Живулько В. Д., к.ф.-м.н., заведующий лабораторией Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению.

Монайко Э. В., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Национального центра по изучению и тестированию материалов Технического университета Молдовы.

Гапоненко Н. В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Lashkovskaya E. I., Engineer of R&D Laboratory 4.5 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hoha A. V., Junior Researcher at R&D Laboratory 4.10 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pligovka A. N., Cand. of Sci., Senior Researcher at R&D Laboratory 4.10 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Chubenko E. B., Cand. of Sci., Associated Professor, Leading Researcher of R&D Laboratory 4.3 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zhivulko V. D., Cand. of Sci., Head of the Laboratory of Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus.

Monaico E. V., Cand. of Sci., Leading Researcher at the National Center for Materials Study and Testing of Technical University of Moldova.

Gaponenko N. V., Dr. Sci, Professor, Head of R&D Laboratory 4.5 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 17 293-88-75
E-mail: gaponenko@bsuir.by
Гапоненко Николай Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. +375 17 293-88-75
E-mail: gaponenko@bsuir.by
Gaponenko Nikolai Vasil'evich