

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 621.373.826:533.9:537.9

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-341-352>

Поступила в редакцию 10.04.2018

Received 10.04.2018

А. Н. Чумаков¹, Н. И. Мухуров², С. В. Денисюк², А. А. Шевченко³,
Л. В. Баран⁴, Т. Ф. Райченко¹, Н. А. Босак¹

¹Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

³Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

⁴Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO НА ПОДЛОЖКЕ Al₂O₃

Аннотация. Тонкие прозрачные проводящие пленки оксида цинка представляют интерес для применения в различных областях науки и техники, в том числе в антиобледенительных системах стекол в самолетах, в покрытиях, уменьшающих статический электрический заряд на панелях измерительных приборов, в электрических контактах к жидким кристаллам, электрохромных и электролюминесцентных индикаторах для дисплеев, разработках высокоэффективных солнечных элементов. Тонкие пленки оксида цинка на подложках из анодного оксида алюминия сформированы на пористой стороне и на барьерном слое γ -оксида алюминия при высокочастотном импульсно-периодическом лазерном осаждении в вакууме. Методом атомно-силовой микроскопии изучены морфологии полученных пленок и отмечены их различия в зависимости от стороны подложки. Экспериментально исследованы оптические свойства пленок в ближней ИК-области, а также особенности их фотолюминесцентных характеристик. Конструкции подложка Al₂O₃ – пленка ZnO в качестве чувствительного слоя могут быть применены для разработки сенсоров и tandemных солнечных элементов.

Ключевые слова: высокочастотное импульсное лазерное осаждение, тонкие пленки, атомно-силовая микроскопия, оптические и морфологические свойства, фотолюминесцентные характеристики

Для цитирования. Морфологические, оптические и фотолюминесцентные свойства тонких пленок ZnO на подложке Al₂O₃ / А. Н. Чумаков [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 341–352. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-341-352>

A. N. Chumakov¹, N. I. Mukhurov², S. V. Denisiuk², A. A. Shevchenok³, L. V. Baran⁴, T. F. Raichenok¹, N. A. Bosak¹

¹B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus

³Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

⁴Belarusian State University, Minsk, Belarus

MORPHOLOGICAL, OPTICAL AND PHOTOLUMINESCENT PROPERTIES OF A THIN ZnO FILM ON THE Al₂O₃ SUBSTRATE

Abstract. Thin transparent conductive zinc oxide films are of interest for application in various fields of science and technology, including anti-icing systems for glasses in aircrafts, in coatings that reduce static electric charge on instrument panels, in electrical contacts to liquid crystals, electrochromic and electroluminescent indicators for displays, development of high-efficiency solar cells. Thin zinc oxide films on anodic aluminium oxide substrates are formed on the porous side and on the barrier layer of γ -aluminium oxide under high-frequency pulsed-periodic laser deposition in vacuum. The morphology of the obtained films was studied by atomic-force microscopy and their differences were noted, depending on the side of the substrate. The optical properties of films in the near-IR region, as well as the features of their photoluminescence characteristics were studied experimentally. The substrates Al₂O₃–ZnO film as a sensitive layer can be used to design sensors and tandem solar cells.

Keywords: high-frequency pulsed laser deposition, thin films, atomic force microscopy, optical and morphological properties, photoluminescence characteristics

For citation. Chumakov A. N., Mukhurov N. I., Denisiuk S. V., Shevchenok A. A., Baran L. V., Raichenok T. F., Bosak N. A. Morphological, optical and photoluminescent properties of a thin ZnO film on the Al₂O₃ substrate. *Vestsi Natsyianal' nai akademiі navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 341–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-341-352>

Введение. Тонкие прозрачные проводящие оксидные пленки успешно применяются в различных областях науки и техники [1–3]. В частности, они используются в нагревательных элементах в антиобледенительных системах стекол в самолетах, покрытиях, уменьшающих статический электрический заряд на панелях измерительных приборов, электрических контактах к жидким кристаллам, электрохромных и электролюминесцентных индикаторах для дисплеев и т. п. В последние годы исследования пленок такого типа связаны также с возможностью изготовления на их основе высокоэффективных солнечных элементов [4].

Оксид цинка – широкозонный полупроводник, обладающий уникальными электрофизическими и оптическими свойствами [5–10]. Прозрачные проводящие пленки оксида цинка, относящиеся к группе прозрачных проводящих оксидов (англ. transparent conducting oxide – TCO), сочетают в себе относительно высокие значения оптического пропускания и электропроводности и представляют большой интерес для создания различных оптоэлектронных приборов и устройств [11–15]. В качестве материала оксид цинка может быть использован в оптоэлектронных преобразователях как люминесцентный материал в виде прозрачных электродов, чувствительных слоев газовых и биологических сенсоров, катализаторов, детекторов рентгеновского и гамма-излучений [16–18]. Оксид цинка характеризуется высокой чувствительностью электрофизических свойств поверхности к изменению состояния окружающей среды, при этом проявляет стабильность на воздухе, в водных и органических средах. В последнее время в связи с развитием нанотехнологий наблюдается повышенный интерес к нанокристаллам оксида цинка разной размерности: квазиодномерным нитевидным кристаллам, тонким и толстым пленкам оксида цинка [19–22]. На их основе созданы миниатюрные оптоэлектронные преобразователи, химические и физические сенсоры. Недопированный ZnO является полупроводником *n*-типа проводимости, но однозначно причина *n*-типа проводимости и природа донорных дефектов (вакансии кислорода, междоузельные атомы цинка, водород) не установлена. В чистом виде оксид цинка практически не используется, поскольку является высокорезистивным материалом. Низкая проводимость недопированного оксида цинка затрудняет его применение в качестве прозрачных электродов и химических сенсоров, приводит к необходимости понижения сопротивления функционального материала. Повышение проводимости достигается введением в оксид цинка донорных примесей. Одним из способов увеличения проводимости оксида цинка является его допирование трехвалентными катионами, например элементами 13 группы [22–24].

Для получения таких пленок используется вакуумное осаждение: термическое, электронно-лучевое, ионно-плазменное, магнетронное, импульсно-лазерное, химическое парофазное [25–29]. У каждого из перечисленных методов имеются как достоинства, так и недостатки. Импульсное лазерное осаждение тонких пленок оксидов имеет определенные преимущества [30–33]. В работе приводятся результаты исследования морфологии, спектров пропускания и фотолюминесценции пленок ZnO, сформированных на подложках пористого анодного оксида алюминия высокочастотным импульсно-периодическим лазерным осаждением.

Методика получения и исследования подложек и тонких пленок. Нанопористые пленки анодного оксида алюминия (АОА), получаемые электрохимическим окислением алюминия в кислотных электролитах, могут быть использованы в различных оптических устройствах, таких как тонкопленочные лазеры, светофильтры, световоды, оптические диски, интерференционные и поляризационные элементы, светоизлучающие структуры, плоские активные устройства отображения информации, сенсоры и детекторы, в том числе оптические биосенсоры, и т. д. [34–39]. Пленки АОА имеют регулярную периодическую структуру нанопор, расположенных перпендикулярно поверхности подложки. При этом диаметр пор и расстояние между ними можно регулировать в широких пределах (от единиц до сотен нанометров) посредством выбора технологического процесса [40].

Экспериментальная лазерная установка с регулируемой частотой повторения лазерных импульсов от 5 до 50 кГц содержала источник лазерного излучения, оптическую систему транспортировки лазерного излучения к распыляемой мишени, вакуумную камеру и измерительно-диагностический модуль. В качестве источника излучения в установке использован лазер на неодимовом стекле ($\lambda = 1,06$ мкм). Для получения многоимпульсного режима генерации лазера

с высокой частотой повторения импульсов внутри резонатора вблизи глухого зеркала установлен пассивный оптический затвор из радиационно-облученного кристаллического фторида лития LiF с F_2^- -центрами окраски. Частота повторения лазерных импульсов изменялась за счет варьирования уровня накачки лазера и оптической плотности затвора; длительность лазерных импульсов на полувысоте составляла ~ 85 нс. Вакуумная система установки обеспечивала проведение экспериментов при пониженном давлении до 2,7 Па. При многоимпульсном высокочастотном лазерном воздействии на поверхность распыляемой мишени реализовывался режим эффективного эрозионного плазмообразования [31, 32]. Осаждение макроскопически однородных тонких пленок достигалось при плотности мощности лазерного излучения $q = 20$ МВт/см² и частоте повторения импульсов $f \sim 20\text{--}30$ кГц.

Пропускание оптического излучения тонкими пленками в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра измерялось на спектрофотометре Carry 500 Scan. УВИ-спектрофотометр Carry 500 Scan представляет многоцелевую, автоматизированную систему, обеспечивающую измерение, обработку выходной информации и ее регистрацию. Принцип действия УВИ-спектрофотометра основан на измерении отношения двух световых потоков, прошедших через канал сравнения и канал в кюветном отделении. Оптическая система прибора является двухлучевой и состоит из монохроматора с голограммной вогнутой дифракционной решеткой. В качестве фотоприемников в УВИ-спектрофотометрах установлены фотоумножители и фотодиоды. Управление процессом измерения в спектрофотометрах осуществляется от внутреннего контроллера и внешнего компьютера с помощью специального программного обеспечения, работающего в системе WINDOWS. Программный комплекс – это всеобъемлющий пакет программ, предназначенных для наиболее полного использования всех возможностей приборов. Программным образом осуществляется настройка прибора, оптимизация его параметров, управление его работой, обработка выходной информации, печать результатов и их запоминание. Во всех частях программы, в которых требуется какой-либо ввод, в память заложено необходимое установочное значение, принимаемое программой по умолчанию и соответствующее стандартным методикам.

Топография поверхности образцов исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47-Pro (компания «НТ-МДТ», Россия) в полуконтактном режиме. Спектры фотолюминесценции (СФЛ) регистрировались на автоматизированном спектрофлуориметре CM 2203 (компания «SOLAR», Беларусь).

Полученные результаты и их обсуждение. Пропускание подложки γ -оксида алюминия и осажденных пленок оксида цинка на подложке γ -оксида алюминия со стороны барьерного слоя (образец № 1) представлены на рис. 1, а. Спектры пропускания подложки γ -оксида алюминия и осажденных пленок оксида цинка на подложке γ -оксида алюминия со стороны пористой поверхности (образец № 2), показанные на рис. 1, б, регистрировались в УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра.

Пропускание подложки оксида алюминия со стороны барьерного слоя резко нарастает до 600 нм, затем замедляется и достигает 90 % в области длин волн свыше 1100 нм, в то время как пропускание для пленки оксида цинка на подложке γ -оксида алюминия со стороны барьерного слоя плавно растет, причем в обоих случаях в области длин волн свыше 1100 нм заметны осцилляции пропускания с характерным периодом 30 нм.

Пропускание подложки оксида алюминия со стороны пористой поверхности резко нарастает до 600 нм, затем замедляется и достигает 90 % в области длин волн свыше 1200 нм, в то время как пропускание для пленки оксида цинка на подложке γ -оксида алюминия со стороны пористой поверхности заметно растет, причем в обоих случаях в области длин волн свыше 1200 нм фиксируются осцилляции пропускания.

Из условия интерференционных максимумов интенсивности можно оценить толщину нанесенной пленки оксида цинка d :

$$2dn = m\lambda. \quad (1)$$

С учетом первого порядка интерференции $m = 1$, длины волны $\lambda = 2,5$ мкм и показателя преломления оксида цинка $n = 2,02$, получаем оценку максимальной толщины $d \leq 0,6$ мкм нанесенной пленки оксида цинка.

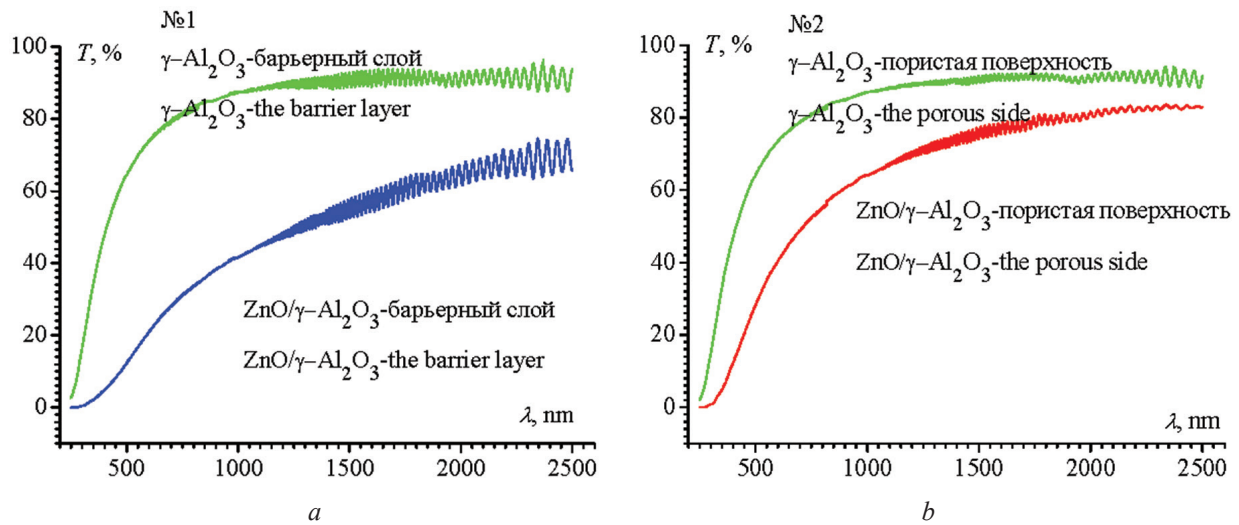


Рис. 1. Спектры пропускания подложки γ -оксида алюминия и пленки оксида цинка на подложке γ -оксида алюминия со стороны барьерного слоя (*a*; образец № 1) и спектры пропускания подложки γ -оксида алюминия и пленки оксида цинка на подложке γ -оксида алюминия со стороны пористой поверхности (*b*; образец № 2)

Fig. 1. Transmission spectra of the γ -alumina substrate and the zinc oxide film on the γ -alumina substrate on the side of the barrier layer (*a*; sample No. 1) and the transmission spectra of the γ -alumina substrate and the zinc oxide film on the γ -alumina substrate on the porous side surface (*b*; sample No. 2)

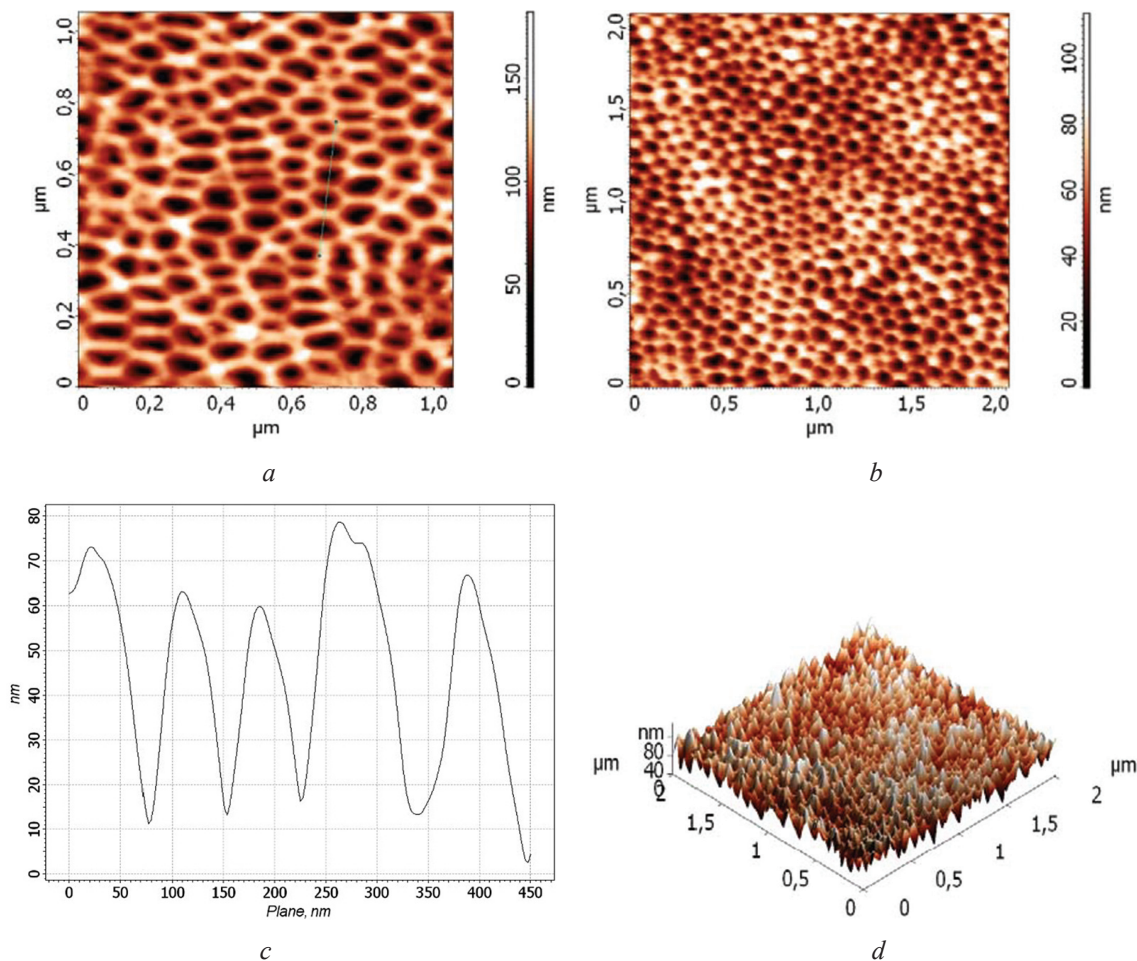


Рис. 2. Топография поверхности исходной подложки γ -оксида алюминия (образец № 0) со стороны барьерного слоя (*a, b, d*) и профиль сечения вдоль выделенной линии (*c*)

Fig. 2. Topography of the surface of the initial substrate γ -aluminum oxide (sample No. 0) on the side of the barrier layer (*a, b, d*) and the section profile along the dedicated line (*c*)

Структура поверхности исходной подложки γ -оксида алюминия (образец № 1, барьерный слой) изучалась методом атомно-силовой микроскопии по изображениям, полученным при сканировании поля размером $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ и $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ (рис. 2) в различных точках образца. Установлено, что подложки обладают упорядоченной пористой структурой с однородным распределением пор по размерам. Так, анализ профиля сечения вдоль выделенной линии показал, что средний диаметр пор составляет $50 \pm 5 \text{ нм}$ (рис. 2, с).

При конденсации оксида цинка на подложке γ -оксида алюминия (образец № 1, барьерный слой) формируется пленка с плотноупакованной упорядоченной структурой. На рис. 3 показано АСМ-изображение пленки с размером исследуемого поля $2 \times 2 \text{ мкм}^2$. По профилю сечения, пример которого приведен на рис. 3, с, выявлено, что средний латеральный размер частиц составляет 75 нм (это значение соответствует периоду пористой структуры подложки), т. е. центрами кристаллизации ZnO выступают участки между порами.

На рис. 4 представлена топография полученных тонких пленок оксида цинка на подложке γ -оксида алюминия (образец № 2, пористая поверхность) с размером исследуемого поля $2 \times 2 \text{ мкм}^2$. Методом атомно-силовой микроскопии по профилю сечения вдоль выделенной линии установлено, что латеральный размер частиц составляет $50\text{--}110 \text{ нм}$.

Определение основных характеристик шероховатости поверхности полученных тонких пленок оксида цинка проводилось по АСМ-изображениям с размером области сканирования $5 \times 5 \text{ мкм}^2$, снятым в пяти разных точках образца. Установлено, что при осаждении пленок на подложке γ -оксида алюминия (образец № 1, барьерный слой) средняя высота неровностей составляет $51,3 \text{ нм}$, при этом среднеарифметическая шероховатость равна $9,0 \text{ нм}$ (рис. 5). При осаждении пленок на подложке γ -оксида алюминия (образец № 2, пористая поверхность) средняя высота неровностей составляет $49,9 \text{ нм}$, при этом среднеарифметическая шероховатость равна $9,6 \text{ нм}$ (рис. 6).

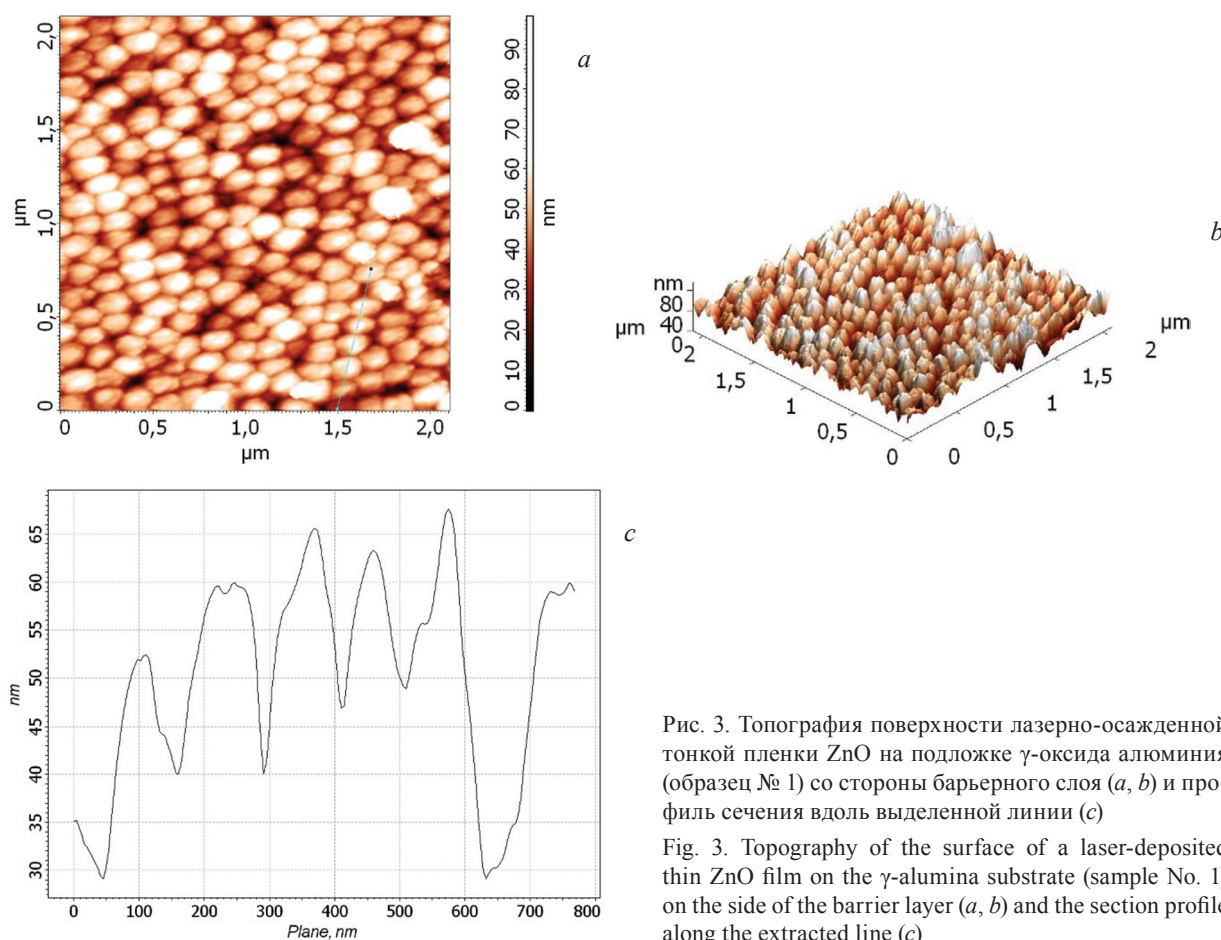


Рис. 3. Топография поверхности лазерно-осажденной тонкой пленки ZnO на подложке γ -оксида алюминия (образец № 1) со стороны барьерного слоя (a, b) и профиль сечения вдоль выделенной линии (c)

Fig. 3. Topography of the surface of a laser-deposited thin ZnO film on the γ -alumina substrate (sample No. 1) on the side of the barrier layer (a, b) and the section profile along the extracted line (c)

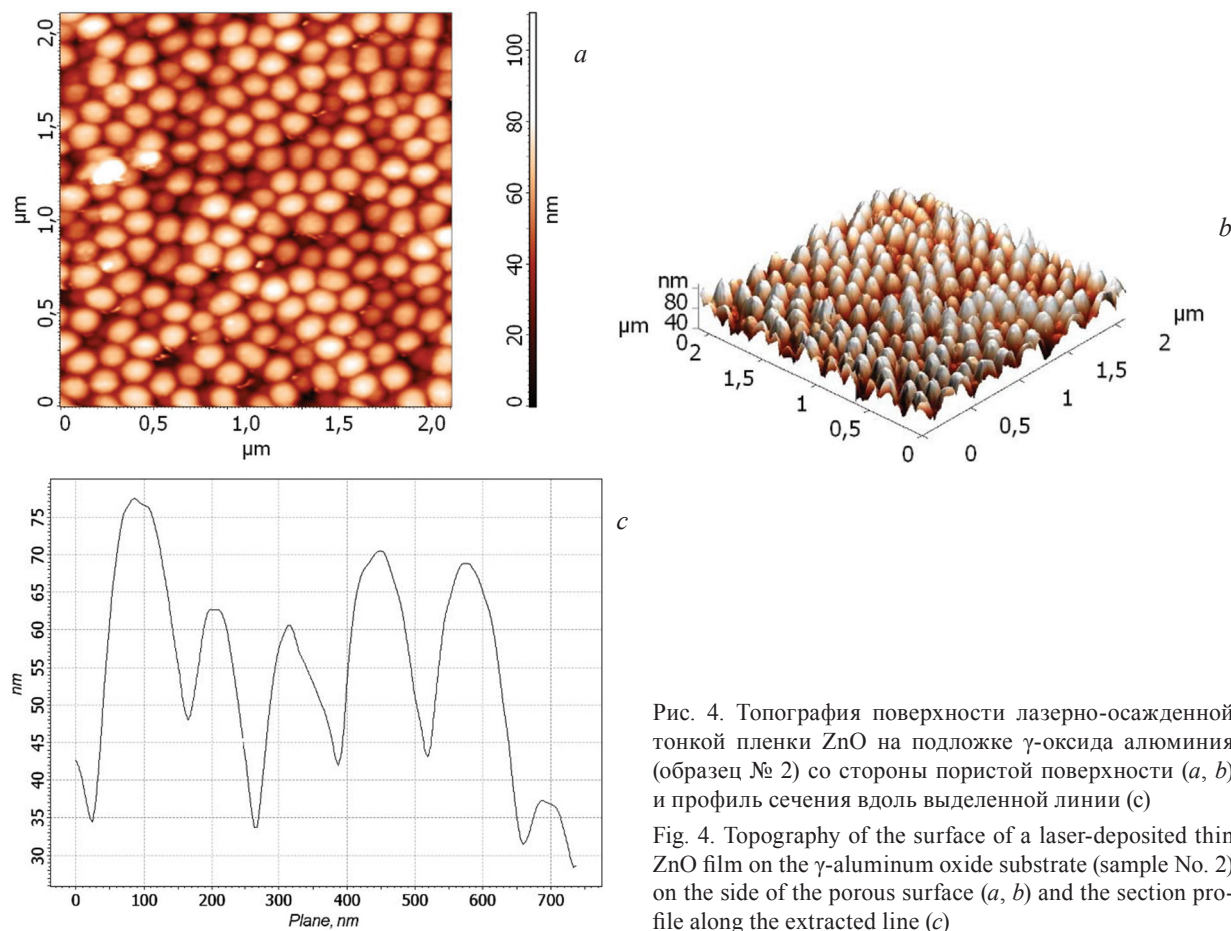


Рис. 4. Топография поверхности лазерно-осажденной тонкой пленки ZnO на подложке γ -оксида алюминия (образец № 2) со стороны пористой поверхности (a, b) и профиль сечения вдоль выделенной линии (c)
 Fig. 4. Topography of the surface of a laser-deposited thin ZnO film on the γ -aluminum oxide substrate (sample No. 2) on the side of the porous surface (a, b) and the section profile along the extracted line (c)

Спектры фотолуминесценции (СФЛ) пленок оксида цинка высокой чистоты, полученные при длинах волн возбуждающего излучения $\lambda_1 = 255$, $\lambda_2 = 270$, $\lambda_3 = 280$, $\lambda_4 = 340$ и $\lambda_5 = 380$ нм (рис. 7), характеризуются полосой, максимум которой сдвигается незначительно в области ~ 400 нм при изменении длины волны возбуждения с 255 до 340 нм и полосой в области 480 нм.

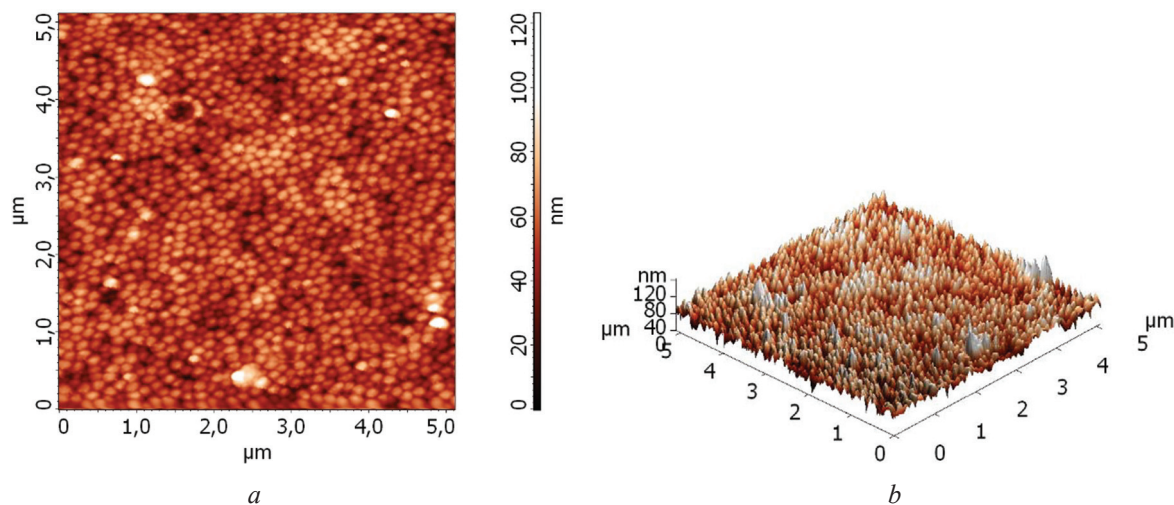


Рис. 5. Топография поверхности лазерно-осажденной тонкой пленки ZnO на подложке γ -оксида алюминия (образец № 1) со стороны барьерного слоя
 Fig. 5. Topography of the surface of a laser-deposited thin ZnO film on the γ -alumina substrate (sample No. 1) on the side of the barrier layer

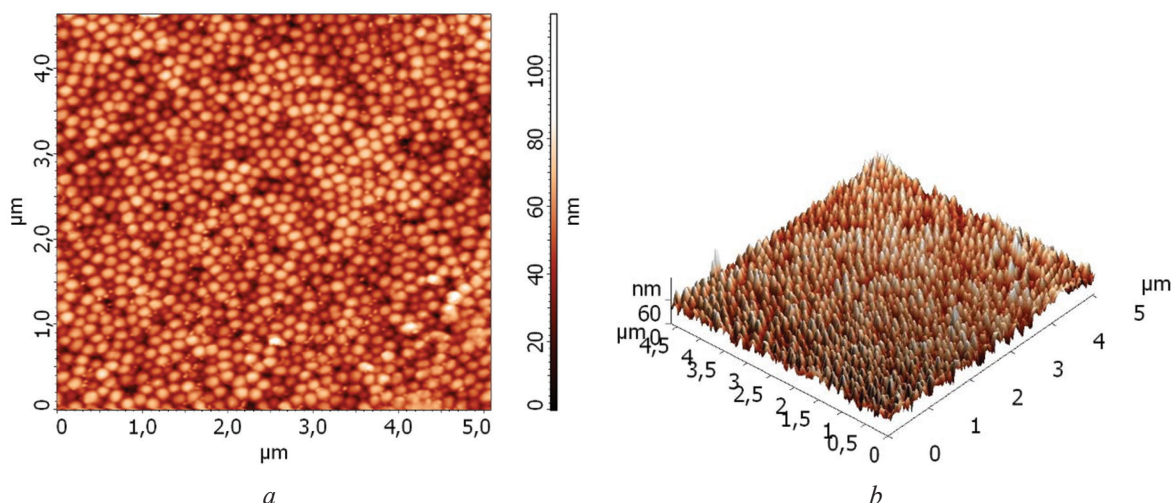


Рис. 6. Топография поверхности лазерно-осажденной тонкой пленки ZnO на подложке γ -оксида алюминия (образец № 2) со стороны пористой поверхности

Fig. 6. Topography of the surface of a laser-deposited thin ZnO film on the γ -alumina substrate (sample No. 2) on the side of the porous surface

Соотношение интенсивностей в максимумах этих полос зависит от длины волны возбуждения. Это связано с наличием двух люминесцирующих хромофоров оксида алюминия и оксида цинка. На рис. 8 представлены спектры фотолюминесценции подложки № 0 и образца № 1 с пленкой, полученные при возбуждении на длине волны 290 нм. Видно, что максимумы интенсивности для образца № 1 смещаются в красную область в сравнении с максимумами для образца № 0.

Нами были изучены спектры возбуждения люминесценции исходных и исследуемых образцов при регистрации свечения в области 400 и 530 нм. Спектры возбуждения люминесценции напыленных образцов, как видно из рис. 9, также смещаются в красную область. Причем наибольшее различие в спектрах проявляется при регистрации в области 530 нм (см. рис. 9, *b*), что свидетельствует о максимальном вкладе свечения оксида цинка в длинноволновой области спектра люминесценции изученных образцов. Свечение напыленных образцов № 1 и № 2, полученное при возбуждении на длине волны 380 нм, практически совпадает по спектру (рис. 10). Идентичными по спектру являются и спектры возбуждения люминесценции образцов № 1 и № 2 (рис. 11). Однако необходимо отметить при этом более высокую интенсивность люминесценции пленки

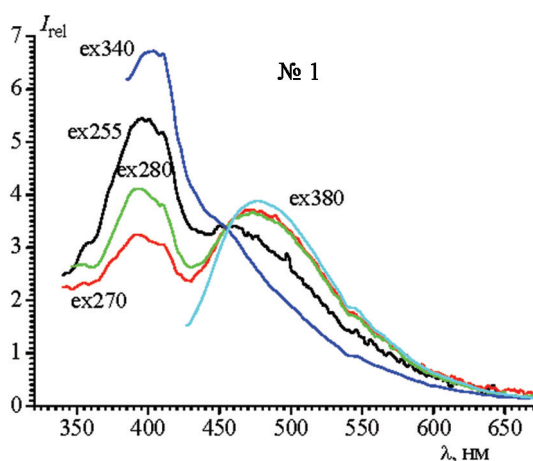


Рис. 7. Спектры фотолюминесценции пленок ZnO образца № 1, полученные при возбуждении на длинах волн 255, 270, 280, 340 и 380 нм

Fig. 7. Photoluminescence spectra ZnO films of sample No. 1, obtained by excitation at wavelengths of 255, 270, 280, 340 and 380 nm

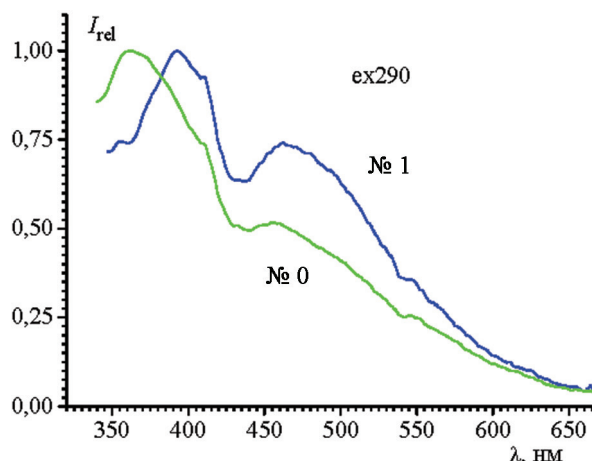


Рис. 8. Спектры фотолюминесценции образцов № 0 и № 1, полученные при возбуждении на длине волны 290 нм

Fig. 8. Photoluminescence spectra of samples No. 0 and No. 1 obtained by excitation at a wavelength of 290 nm

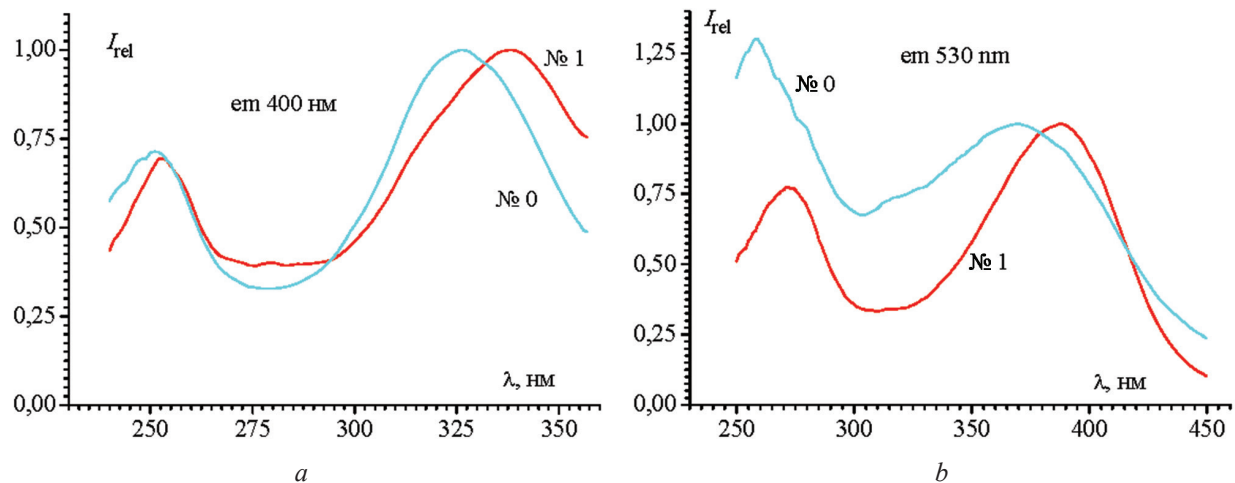


Рис. 9. Спектры возбуждения фотолюминесценции образца № 0 и образца № 1, полученные при регистрации на длинах волн: 400 (а) и 530 (b) нм

Fig. 9. Photoluminescence excitation spectra of sample No.0 and sample No. 1 obtained by recording at wavelengths 400 (a) and 530 (b) nm

оксида цинка, нанесенной на подложку пористого оксида алюминия, по сравнению с подложкой оксида алюминия барьерного слоя.

Заключение. Методом импульсного высокочастотного лазерного осаждения керамических мишеней в вакууме получены тонкие пленки ZnO на подложке γ - Al_2O_3 со стороны барьерного слоя и со стороны пористой поверхности. Представлены результаты исследований спектров пропускания и спектров фотолюминесценции пленок оксида цинка на подложке оксида алюминия. Установлено, что максимальное пропускание в видимой и ближней ИК-области спектра обеспечивается образцами с пленкой ZnO со стороны пористой поверхности подложки из оксида алюминия. Выяснено, что максимумы в спектрах возбуждения фотолюминесценции напыленных образцов смещаются в красную область. При этом более интенсивно люминесцирует пленка ZnO со стороны пористой поверхности подложки из оксида алюминия. Конструкции подложка Al_2O_3 – пленка ZnO в качестве чувствительного слоя могут быть применены для разработки сенсоров и tandemных солнечных элементов.

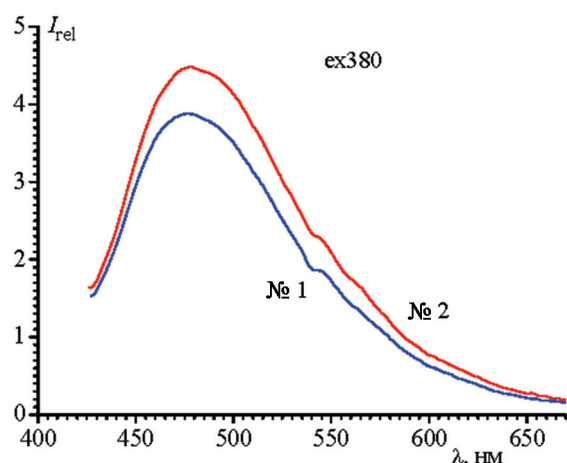


Рис. 10. Спектры фотолюминесценции пленки ZnO на образцах № 1 и № 2, полученные при возбуждении на длине волны 380 нм

Fig. 10. Photoluminescence spectra ZnO films of samples No. 1 and No. 2 obtained by excitation at a wavelength of 380 nm

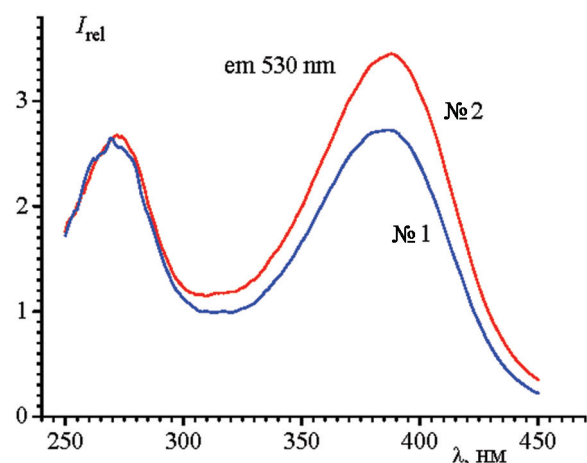


Рис. 11. Спектры возбуждения фотолюминесценции пленки оксида цинка на подложках для образцов № 1 и № 2, полученные при регистрации на длине волны 530 нм

Fig. 11. Photoluminescence excitation spectra of a zinc oxide film on substrates for samples No. 1 and No. 2 obtained by recording at a wavelength of 530 nm

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф17-108, Т17М-059).

Acknowledgements. This work was partially sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project No. F17-108, T17M-059).

Список использованных источников

1. Yu, X. Metal oxides for optoelectronic applications / X. Yu, T. J. Marks, A. Facchetti // *Nat. Mater.* – 2016. – Vol. 15, № 4. – P. 383–396. <https://doi.org/10.1038/nmat4599>
2. Stadler, A. Transparent Conducting Oxides – An Up-To-Date Overview / A. Stadler // *Materials.* – 2012. – Vol. 5, № 12. – P. 661–683. <https://doi.org/10.3390/ma5040661>
3. Wager, J. F. Transparent electronics / J. F. Wagner, D. A. Keszler, R. E. Presley. – Springer Science + Business Media, LLC, 2008. – 217 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-72342-6>
4. Thin film solar cells: fabrication, characterization, and application / eds. J. Poortmans and V. Arkhipov. – John Wiley and Sons Inc, 2006. – 504 p. <https://doi.org/10.1002/0470091282>
5. Wöll, C. The chemistry and physics of zinc oxide surfaces / C. Wöll // *Prog. Surf. Sci.* – 2007. – Vol. 82, № 2/3. – P. 55–120. <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2006.12.002>
6. Janotti, A. Fundamentals of zinc oxide as a Semiconductor / A. Janotti, C. Van de Walle // *Rep. Prog. Phys.* – 2009. – Vol. 72, № 12. – P. 126501 (29 p). <https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/12/126501>
7. A comprehensive review of ZnO materials and devices / Ü. Özgür [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 98, № 4. – P. 041301–041494. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
8. Ellmer, K. ZnO and Its Applications / K. Ellmer, A. Klein // *Transparent Conductive Zinc Oxide. Basics and Applications in Thin Film Solar Cells.* – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – P. 1–33. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73612-7_1
9. Djurišić, A. B. Review ZnO nanostructures for optoelectronics: Material properties and device applications / A. B. Djurišić, A. M. C. Ng, X. Y. Chen // *Prog. Quant. Electron.* – 2010. – Vol. 34, № 4. – P. 191–259. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.04.001>
10. Evolution of ZnO microstructures from hexagonal disk to prismoid, prism and pyramid and their crystal facet-dependent gas sensing properties / Nan Qin [et. al.] // *CrystEngComm.* – 2014. – Vol. 16, № 30. – P. 7062–7073. <https://doi.org/10.1039/c4ce00637b>
11. Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film / M. Caglar [et. al.] // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – Vol. 255, № 8. – P. 4491–4496. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.055>
12. Фізика высокаправяючых празрачных матэрыялаў на аснове шыроказоннага оксідна цынка / Г. В. Лашкарев [и др.] // *Фізика низкіх тэмператур.* – 2017. – Т. 43, № 4. – С. 643–648.
13. Синтез и характеристика наноструктурированных слоев оксидна цынка для сенсорики / Л. К. Крастева [и др.] // *Фізика і тэхніка палупроводнікаў.* – 2013. – Т. 47, № 4. – С. 564–569.
14. Наноструктурираваныя матэрыялы на аснове оксідна цынка для гетэроструктурных сонечных элементаў / А. А. Бобков [и др.] // *Фізика і тэхніка палупроводнікаў.* – 2015. – Т. 49, № 10. – С. 1402–1406.
15. Синтез наноструктур на аснове оксідна цынка для стварэння гетэроструктурных фотавольтаічных элементаў / Н. А. Лашкова [и др.] // *Фізика і тэхніка палупроводнікаў.* – 2016. – Т. 50, № 9. – С. 1276–1282.
16. Crystallinity, Stoichiometry, and Luminescence of High Quality ZnO Nanoclusters / D. Tainoff [et al.] // *J. Phys. Chem. C.* – 2008. – Vol. 112, № 33. – P. 12623–12627. <https://doi.org/10.1021/jp8006156>
17. Ellmer, K. Transparent Conductive Zinc Oxide and Its Derivatives / K. Ellmer // *Handbook of transparent conductors / eds.: D. S. Ginley, H. Hosono, D. C. Paine.* – New York: Springer, 2010. – P. 193–263. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1638-9_7
18. Лянгузов, Н. В. Синтез наноструктур на аснове оксідна цынка і іх фізічныя свойствы: дис. ... канд. фіз.-мат. навук / Н. В. Лянгузов. – Ростов н/Д, 2014. – 105 л.
19. Кашкул, И. Н. К. Тэхналогія і свойствы плёнак оксідна цынка для тонкаплёначных сонечных модулей: дис. ... канд. тэхн. навук / И. Н. К. Кашкул. – СПб., 2017. – 117 л.
20. Наноструктурираваныя матэрыялы на аснове оксідна цынка для гетэроструктурных сонечных элементаў / А. А. Бобков [и др.] // *Фізика і тэхніка палупроводнікаў.* – 2015. – Т. 49, вып. 10. – С. 1402–1406.
21. Крастева, Л. К. Синтез и характеристика наноструктурированных слоев оксидна цынка для сенсорики / Л. К. Крастева [и др.] // *Фізика і тэхніка палупроводнікаў.* – 2013. – Т. 47, вып. 4. – С. 564–569.
22. Воробьева, Н. А. Нанокристаллический ZnO(M) (M = Ga, In) для газовых сенсоров и прозрачных электродов: дис. ... канд. хим. навук / Н. А. Воробьева. – М., 2015. – 180 л.
23. The effect of indium doping on structural, electrical conductivity, photoconductivity and density of states properties of ZnO films / C. E. Venous [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2010. – Vol. 490, № 1/2. – P. 62–67. doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.098
24. Проводимость нанокристаллического ZnO(Ga) / Н. А. Воробьева [и др.] // *Фізика і тэхніка палупроводнікаў.* – 2013. – Т. 47, вып. 5. – С. 637–641.
25. Работкин, С. В. Нанесение прозрачных проводящих покрытий на аснове оксидна цынка методом магнетронного распыления: дис. ... канд. тэхн. навук / С. В. Работкин. – Томск, 2009. – 146 с.
26. Зима, В. Н. Структура и морфология плёнок оксидна цынка, полученных реактивным магнетронным напылением / В. Н. Зима, А. Г. Козлов, Т. Н. Танская // *Вестн. Ом. ун-та.* – 2013. – № 2. – С. 75–79.
27. Перспективы импульсного электроосаждения иерархических наноструктур оксидна цынка / Н. П. Ключко [и др.] // *Фізика і тэхніка палупроводнікаў.* – 2013. – Т. 47, вып. 8. – С. 1129–1136.

28. Получение прозрачных проводящих нанокристаллических пленок оксида цинка методом импульсного лазерного осаждения / Д. Е. Вакулов [и др.] // *Фундамент. исслед.* – 2012. – № 11 (ч. 2). – С. 373–376.
29. Семикина, Т. В. Диодные структуры и электрические свойства пленок ZnO, полученных методом атомного послойного осаждения / Т. В. Семикина // *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.* – 2016. – Вып. 51. – С. 150–157.
30. Чумаков, А. Н. Плазмообразование при высокочастотном импульсно-периодическом лазерном воздействии на металлы в воздухе при пониженном и атмосферном давлении / А. Н. Чумаков, В. Б. Авраменко, Н. А. Босак // *Журн. прикладной спектроскопии.* – 2012. – Т. 79, № 2. – С. 279–287.
31. Структура и оптические свойства углеродных пленок, полученных при многоимпульсном лазерном осаждении / А. Н. Чумаков [и др.] // *Журн. прикладной спектроскопии.* – 2012. – Т. 79, № 4. – С. 681–685.
32. Оптические свойства лазерно-осаждаемых тонких пленок оксида цинка / А. Н. Чумаков [и др.] // *Электроника-инфо.* – 2016. – № 2. – С. 32–37.
33. Чумаков, А. Н. Приповерхностное плазмообразование в воздухе при двухимпульсном лазерном воздействии на двух длинах волн / А. Н. Чумаков, Н. А. Босак, А. В. Панина // *Журн. прикладной спектроскопии.* – 2017. – Т. 84, № 4. – С. 595–602.
34. Photoluminescent properties of nanoporous anodic alumina doped with manganese ions / I. V. Gasenkova [et. al.] // *J. Lumin.* – 2017. – Vol. 185. – P. 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.01.030>
35. Оптические характеристики пористого оксида алюминия, модифицированного оксидом хрома / И. В. Гасенкова [и др.] // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: материалы 6-го Междунар. симп., 19–20 окт. 2017 г., Минск, Беларусь. – Минск, 2017. – С. 298–304.
36. Ахроматические фазовые пластинки с переменной разностью фаз на основе нанопористого оксида алюминия / В. А. Длугунович [и др.] // *Наноструктурные материалы-2016: Беларусь – Россия – Украина (Нано-2016): материалы V Междунар. науч. конф., 22–25 нояб. 2016 г., Минск, Беларусь.* – Минск, 2016. – С. 472–475.
37. Пороговые детекторы ионизирующих и ультрафиолетовых излучений на основе наноструктурированных подложек из анодного оксида алюминия / М. В. Ясин [и др.]; под ред. Н. И. Мухурова. – Минск: Бестпринт, 2016. – 178 с.
38. Gasenkova, I. V. Photoluminescence properties of anodic alumina / I. V. Gasenkova, N. I. Mukhurov, S. P. Zhvavyi // *Photoluminescence: Applications, Types and Efficacy* / eds: Merle A. Case and Bradford C. Stout. – Publishers, Inc. 2012. – P. 195–225. – (Series: Physics Research and Technology Nova Science).
39. Gasenkova, I. V. Photoluminescence properties of anodic alumina for application in optical sensors using SERS / I. V. Gasenkova, N. I. Mukhurov, S. P. Zhvavyi // *Optical Sensors 2011; and Photonic Crystal Fibers V: Proc. SPIE.* – [S. I.], 2011. – Vol. 8073. – P. 807328 (10 p). <https://doi.org/10.1117/12.886464>
40. Mukhurov, N. I. Ordered Growth of Anodic Aluminum Oxide in Galvanostatic and Galvanostatic-Potentiostatic Mode / N. I. Mukhurov, I. V. Gasenkova, I. M. Andruhovich // *J. Mater. Sci. Nanotechnol.* – 2014. – Vol. 1, iss. 1. – P. 1–6. <https://doi.org/10.15744/2348-9812.1.s110>

References

1. Yu X., Marks T. J., Facchetti A. Metal oxides for optoelectronic applications. *Nature Materials*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 383–396. <https://doi.org/10.1038/nmat4599>
2. Stadler A. Transparent Conducting Oxides – An Up-To-Date Overview. *Materials*, 2012, vol. 5, no. 12, pp. 661–683. <https://doi.org/10.3390/ma5040661>
3. Wager J. F., Keszler D. A., Presley R. E. *Transparent Electronics*. Springer Science + Business Media, LLC., 2008. 217 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-72342-6>
4. Poortmans J., Arkhipov V. (eds.) *Thin film solar cells: fabrication, characterization, and application*. John Wiley and Sons Inc., 2006. 504 p. <https://doi.org/10.1002/0470091282>
5. Wöll C. The chemistry and physics of zinc oxide surfaces. *Progress in Surface Science*, 2007, vol. 82, no. 2–3, pp. 55–120. <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2006.12.002>
6. Janotti A., Van de Walle C. Fundamentals of zinc oxide as a Semiconductor. *Reports on Progress in Physics*, 2009, vol. 72, no. 12, pp. 126501 (29 p). <https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/12/126501>
7. Özgür Ü., Alivov Ya. I., Liu C., Teke A., Reshchikov M. A., Doğan S., Avrutin V., Cho S.-J., Morkoç H. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 98, no. 4, pp. 041301–041494. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
8. Ellmer K., Klein A. ZnO and Its Applications. *Transparent Conductive Zinc Oxide. Basics and Applications in Thin Film Solar Cells, Springer Series in Materials Science*. Berlin: Springer-Verlag, 2008, vol. 104, pp. 1–33. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73612-7_1
9. Djurišić A. B., Ng A. M. C., Chen X. Y. Review ZnO nanostructures for optoelectronics: Material properties and device applications. *Progress in Quantum Electronics*, 2010, vol. 34, no. 4, pp. 191–259. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.04.001>
10. Nan Qin, Qun Xiang, Hongbin Zhao, Jincang Zhang, Jiaqiang Xu. Evolution of ZnO microstructures from hexagonal disk to prismoid, prism and pyramid and their crystal facet-dependent gas sensing properties. *CrystEngComm*, 2014, vol. 16, no. 30, pp. 7062–7073. <https://doi.org/10.1039/c4ce00637b>
11. Caglar M., Ilican S., Caglar Y., Yakuphanoglu F. Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, no. 8, pp. 4491–4496. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.055>
12. Lashkarev G. V., Karpyna V. A., Ovsianikova L. I., Kartuzov V. V., Dranchuk M. V., Godlewski M., Pietruszka R., Khomyak V. V., Petrosyan L. I. Physics of high-conductivity transparent materials on the basis of wide-gap zinc oxide. *Low Temperature Physics*, 2017, vol. 43, no. 4, pp. 515–519. <https://doi.org/10.1063/1.4984077>

13. Krasteva L. K., Dimitrov D. T., Papazova K. I., Nikolaev N. K., Peshkova T. V., Moshnikov V. A., Gracheva I. E., Karpova S. S., Kaneva N. V. Synthesis and characterization of nanostructured zinc oxide layers for sensors application. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 4, pp. 586–591. <https://doi.org/10.1134/s1063782613040155>
14. Bobkov A. A., Maximov A. I., Moshnikov V. A., Somov P. A., Terukov E. I. Zinc-oxide-based nanostructured materials for heterostructure solar cells. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 10, pp. 1402–1406. <https://doi.org/10.1134/s1063782615100048>
15. Lashkova N. A., Maximov A. I., Ryabko A. A., Bobkov A. A., Moshnikov V. A., Terukov E. I. Synthesis of ZnO-based nanostructures for heterostructure photovoltaic cells / N. A. Lashkova and others. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 9, pp. 1254–260. <https://doi.org/10.1134/s106378261609013x>
16. Tainoff D., Masenelli B., Boisron O., Guiraud G., Mélinon P. Crystallinity, Stoichiometry, and Luminescence of High Quality ZnO Nanoclusters. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, vol. 112, no. 33, pp. 12623–12627. <https://doi.org/10.1021/jp8006156>
17. Ellmer K. Transparent Conductive Zinc Oxide and Its Derivatives. Ginley D. S., Hosono H., Paine D. C. (eds.) *Handbook of transparent conductors*. New York: Springer, 2010, pp. 193–263. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1638-9_7
18. Lianguzov N. V. *Synthesis of nanostructures based on zinc oxide and their physical properties*. Rostov-on-Don, 2014. 105 p. (in Russian).
19. Kashkul I. N. K. *Technology and properties of zinc oxide films for thin-film solar modules*. Saint Petersburg, 2017. 117 p. (in Russian).
20. Bobkov A. A., Maksimov A. I., Moshnikov V. A., Somov P. A., Terukov E. I. Zinc-oxide-based nanostructured materials for heterostructure solar cells. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 10, pp. 1357–1360. <https://doi.org/10.1134/s1063782615100048>
21. Krasteva L. K., Dimitrov D. Tz., Papazova K. I., Nikolaev N. K., Peshkova T. V., Moshnikov V. A., Gracheva I. E., Karpova S. S., Kaneva N. V. Synthesis and characterization of nanostructured zinc oxide layers for sensor applications. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 4, pp. 564–569. <https://doi.org/10.1134/s1063782613040155>
22. Vorobyeva N. A. *Nanocrystalline ZnO (M) (M = Ga, In) for gas sensors and transparent electrodes*. Moscow, 2015. 180 p. (in Russian).
23. Benouis C. E., Benhaliliba M., Sanchez Juarez A., Aida M. S., Chami F., Yakuphanoglu F. The effect of indium doping on structural, electrical conductivity, photoconductivity and density of states properties of ZnO films. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 490, no. 1–2, pp. 62–67. doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.098
24. Vorobyeva N. A., Romyantseva M. N., Forsh P. A., Gaskov A. M. Conductivity of nanocrystalline ZnO (Ga). *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 5, pp. 650–654. <https://doi.org/10.1134/s1063782613050242>
25. Rabotkin S. V. *Application of transparent conductive coatings based on zinc oxide by the method of magnetron sputtering*. Tomsk, 2009. 146 p. (in Russian).
26. Zima V. N., Kozlov A. G., Tanskaya T. N., Blinov V. I., Lobov I. A. Structure and morphology of zinc oxide films, obtained by reactive magnetron sputtering. *Vestnik Omskogo Universiteta = Herald of Omsk University*, 2013, no. 2, pp. 75–79 (in Russian).
27. Klochko N. P., Myagchenko Y. O., Melnychuk E. E., Kopach V. R., Klepikova E. S., Lyubov V. N., Khrypunov G. S., Kopach A. V. Prospects for the pulsed electrodeposition of zinc-oxide hierarchical nanostructures. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 8, pp. 1123–1129. <https://doi.org/10.1134/s1063782613080101>
28. Vakulov D. E., Vakulov Z. E., Zamburg E. G. et al. Production of transparent conducting nanocrystalline zinc oxide films by pulsed laser deposition. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*, 2012, no. 11 (part 2), pp. 373–376 (in Russian).
29. Semikina T. V. Diode structures and electrical properties of ZnO films obtained by the atomic layer-by-layer deposition method. *Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika = Optoelectronics and Semiconductor Technique*, 2016, iss. 51, pp. 150–157 (in Russian).
30. Chumakov A. N., Avramenko V. B., Bosak N. A. Plasma formation in high-frequency pulsed-periodic laser action on metals in air at reduced and atmospheric pressure. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2012, vol. 79, no. 2, pp. 261–268. doi.org/10.1007/s10812-012-9593-3
31. Chumakov A. N., Petrov S. A., Bosak N. A., Shcherbakova Ye. N. Structure and optical properties of carbon films obtained by multipulse laser deposition. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2012, vol. 79, no. 4, pp. 664–669. <https://doi.org/10.1007/s10812-012-9655-6>
32. Chumakov A. N., Gulai A. V., Shevchenko A. A. et al. Optical properties of laser-deposited thin films of zinc oxide. *Elektronika-info [Electronics-info]*, 2016, no. 2, pp. 32–37 (in Russian).
33. Chumakov A. N., Bosak N. A., Panina A. V. Near-surface plasma formation in air with two-pulse laser action at two wavelengths. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2017, vol. 84, no. 4, pp. 620–626. <https://doi.org/10.1007/s10812-017-0519-y>
34. Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Zhvavyi S. P., Kolesnik E. E., Stupak A. P. Photoluminescent properties of nanoporous anodic alumina doped with manganese ions. *Journal of Luminescence*, 2017, vol. 185, pp. 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.01.030>
35. Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Zhvavyi S. P. et al. Optical characteristics of porous alumina modified with chromium oxide. *Poristye pronitsaemye materialy: tekhnologii i izdeliya na ikh osnove: materialy 6-go Mezhdunar. simp., 19–20 okt. 2017 g., Minsk, Belarus' [Materials of the 6th International Scientific Symposium "Porous permeable materials: technologies and products based on them, October 19–20, 2017, Minsk, Belarus]*. Minsk, 2017, pp. 298–304. (in Russian).
36. Dlugunovich V. A., Zhumar A. Yu., Mukhurov N. I., Gasenkova I. V. Achromatic phase plates with variable phase difference based on nanoporous alumina. *Nanostrukturnye materialy-2016: Belarus' – Rossiya – Ukraina (Nano-2016): materialy V Mezhdunar. nauch. konf., 22–25 noyab. 2016 g., Minsk, Belarus' [Materials V International scientific conference*

“Nanostructural materials-2016: Belarus – Russia – Ukraine (Nano-2016)”, November 22–25, 2016, Minsk, Belarus]. Minsk, 2016, pp. 472–475. (in Russian).

37. Yasin M. V., Mukhurov N. I., Gasenkova I. V., Lynkov L. M. *Threshold detectors of ionizing and ultraviolet radiation based on nanostructured substrates of anodic aluminum oxide*. Minsk, Bestprint Publ., 2016. 178 p. (in Russian).

38. Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Zhvavyi S. P. Photoluminescence properties of anodic alumina. Merle A. Case, Bradford C. Stout (eds.) *Photoluminescence: Applications, Types and Efficacy. Series: Physics Research and Technology Nova Science*. Publishers, Inc., 2012, pp.195–225.

39. Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Zhvavyi S. P. Photoluminescence properties of anodic alumina for application in optical sensors using SERS. *Optical Sensors 2011; and Photonic Crystal Fibers V: Proc. SPIE*, 2011, vol. 8073, pp. 807328 (10 p.) <https://doi.org/10.1117/12.886464>

40. Mukhurov N. I., Gasenkova I. V., Andruhovich I. M. Ordered Growth of Anodic Aluminum Oxide in Galvanostatic and Galvanostatic-Potentiostatic Mode. *Journal of Materials Science and Nanotechnology*, 2014, vol. 1, issue 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.15744/2348-9812.1.s110>

Информация об авторах

Чумаков Александр Никитич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией радиационной плазмодинамики, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: chumakov@dragon.bas-net.by

Мухуров Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: n.mukhurov@ifanbel.bas-net.by

Денисюк Сергей Валентинович – научный сотрудник лаборатории микро- и наносенсорики, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-1, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.denicuk@oelt.basnet.by

Шевченко Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexshev56@mail.ru

Баран Людмила Владимировна – кандидат физико-математических наук, заведующая сектором, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: brlv@mail.ru

Райченко Тамара Фроловна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики инфракрасных лучей, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: raitf@ifanbel.bas-net.by

Босак Николай Александрович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиационной плазмодинамики, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: n.bosak@ifanbel.bas-net.by

Information about the authors

Aleksandr N. Chumakov – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of the Radiation Plasma Dynamics, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chumakov@dragon.bas-net.by

Nikolai I. Mukhurov – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory of the Micro- and Nanosensorics, SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” of the National Academy of Sciences of Belarus (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.mukhurov@ifanbel.bas-net.by

Sergei V. Denisiuk – Researcher of the Laboratory of the Micro- and Nanosensorics, SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” of the National Academy of Sciences of Belarus (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.denicuk@oelt.basnet.by

Aleksandr A. Shevchenok – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexshev56@mail.ru

Liudmila V. Baran – Ph. D. (Physics and Mathematics), Sector Head, Belarusian State University, (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: brlv@mail.ru

Tamara F. Raichenok – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of Physics of Infrared Rays, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: raitf@ifanbel.bas-net.by

Nikolai A. Bosak – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of the Radiative Plasma Dynamics, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.bosak@ifanbel.bas-net.by