

УДК 621.373.826:533.9+537.9

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO+10 % ITO НА ПОДЛОЖКАХ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Н.И. МУХУРОВ¹, С.В. ДЕНИСЮК¹, А.Н. ЧУМАКОВ², А.А. ШЕВЧЕНОК³, Л.В. БАРАН⁴,
А.Г. КАРОЗА⁴, Т.Ф. РАЙЧЕНОК², Н.А. БОСАК², А.А. ИВАНОВ², Х. ЧЖАН⁵, Г. Ю⁶

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Республика Беларусь

²Институт физики НАН Беларуси, Республика Беларусь

³Белорусский государственный аграрный технический университет, Республика Беларусь

⁴Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

⁵Харбинский инженерный университет, Китай

⁶Харбинский университет науки и технологий, Китай

Поступила в редакцию 9 января 2019

Аннотация. Тонкие пленки оксида цинка ZnO, легированные 10 % ITO (оксидом индия-олова), на подложках из анодного оксида алюминия сформированы в вакууме при высокочастотном импульсно-периодическом лазерном осаждении. Методом атомно-силовой микроскопии изучены морфологии пленок на пористой и беспористой поверхностях подложек. Экспериментально исследованы оптические свойства пленок в видимой, ближней и средней инфракрасных областях спектра электромагнитного излучения, спектры комбинационного рассеяния, а также особенности фотолюминесцентных характеристик. Пленки оксида цинка могут быть использованы в оптоэлектронных преобразователях как люминесцентный материал, в виде прозрачных электродов, чувствительных слоев газовых и биологических сенсоров, катализаторов, детекторов рентгеновского и гамма-излучений.

Ключевые слова: тонкие пленки ZnO, высокочастотное импульсное лазерное осаждение, подложки анодного оксида алюминия.

Abstract. ZnO thin films of zinc oxide doped with 10 % ITO (indium tin oxide) on anodic aluminum oxide substrates are formed in vacuum during high-frequency repetitively pulsed laser deposition. The morphology of films on porous and non-porous surfaces of substrates was studied by atomic force microscopy. The optical properties of the films in the visible, near, and middle IR regions of the electromagnetic radiation spectrum, the Raman spectra, and also the features of the photoluminescence characteristics have been experimentally investigated. Zinc oxide films can be used in optoelectronic transducers, as luminescent material, in the form of transparent electrodes, sensitive layers of gas and biological sensors, catalysts, X-ray and gamma-radiation detectors.

Keywords: ZnO thin films, high-frequency pulsed laser deposition, anodic alumina substrates.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 91-98

Optical properties of thin films ZNO+10 % ITO on the substrate of anodic aluminum oxide
N.I. Mukhurov, S.V. Denisiuk, A.N. Chumakov, A.A. Shevchenok, L.V. Baran, A.G. Karoza,
T.F. Raichenok, N.A. Bosak, A.A. Ivanov, H. Zhang, G. Yu

Введение

Тонкие прозрачные проводящие оксидные пленки успешно применяются как в науке, так и в технике [1–4]. Оксид цинка – широкозонный полупроводник, обладающий уникальными электрофизическими и оптическими свойствами [5–10]. Прозрачные проводящие пленки оксида цинка, относящиеся к группе прозрачных проводящих оксидов (англ. TCO, transparent conducting oxide), 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 ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений [16–18].

Для получения таких пленок используется вакуумное осаждение: термическое, электроннолучевое, ионно-плазменное, магнетронное, импульсно-лазерное, химическое парофазное [19–21]. У каждого из перечисленных методов имеются определенные преимущества и недостатки. Импульсное лазерное осаждение тонких пленок оксидов имеет определенные преимущества [22–26]. Пленки ZnO+10 % ITO осаждались на подложки анодного оксида алюминия методом многоимпульсного высокочастотного лазерного испарения в вакууме. Подложки анодного оксида алюминия были получены электрохимическим окислением (анодированием) алюминия с последующим переводом в γ -оксид путем отжига при температуре 850 °С. Результаты исследования включают морфологии сформированных тонких пленок ZnO+10 % ITO на подложках γ -Al₂O₃, их спектры пропускания и комбинационного рассеяния, а также спектры фотолюминесценции.

Методика получения и исследования тонких пленок

Экспериментальная лазерная установка содержала: источник лазерного излучения с регулируемой частотой повторения лазерных импульсов от 5 до 50 кГц, оптическую систему наведения лазерного излучения на соответствующего состава мишень, вакуумную камеру и измерительно-диагностический модуль. Источником излучения в установке являлся лазер на неодимовом стекле (рабочая длина волны $\lambda = 1,06$ мкм). Для получения многоимпульсного режима генерации лазера с высокой частотой повторения импульсов внутри резонатора вблизи глухого зеркала установлен пассивный оптический затвор кристаллического фторида лития LiF с F₂⁻центрами окраски, подвергнутого предварительно радиационному облучению. Варьированием уровня накачки лазера и оптической плотности затвора достигалось изменение частоты повторения лазерных импульсов, а длительность лазерных импульсов на полувысоте составляла порядка 85 нс. Вакуумная система установки обеспечивала проведение экспериментов при пониженном до 2,7 Па давлении. Рабочий режим эффективного эрозионного плазмообразования реализовывался за счет многоимпульсного высокочастотного лазерного воздействия на поверхность распыляемой мишени. Осаждение макроскопически однородных тонких пленок достигалось при плотности мощности лазерного излучения $q = 32$ МВт/см² и частоте повторения импульсов $f \sim 20$ –30 кГц. Топография поверхности образцов исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47-Pro (НТ-МДТ, Россия) в полуконтактном режиме. Зависимость пропускания оптического излучения тонкими пленками в широком спектральном диапазоне (от ультрафиолетового (УФ) до ближнего инфракрасного (ИК) измерялась на спектрофотометре Cary 500 Scan, представляющем собой многоцелевую, автоматизированную систему, обеспечивающую измерение, обработку выходной информации и ее регистрацию. ИК-спектры пропускания тонких пленок измерялись также с использованием ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (Thermo Nicolet). Спектры регистрировались в спектральном диапазоне 500–4000 см⁻¹ с разрешением 2 см⁻¹ после 128 сканов с помощью DTGS-детектора. Спектры комбинационного рассеяния (КРС) регистрировались в спектральном интервале 320–2500 см⁻¹ на спектрометре SpectroPro 500i после 30 сканов. Рассеяние возбуждалось излучением с длиной волны 532 нм, мощность которого на образце не превышала 25 мВт. Геометрия сбора рассеянного излучения – «обратное рассеяние». Спектры фотолюминесценции регистрировались на автоматизированном спектрофлуориметре CM 2203 (фирма SOLAR).

Полученные результаты и их обсуждение

Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что исходная подложка γ -оксида алюминия имеет пористую (рис. 1, *a, б*), и беспористую поверхности (рис. 1, *з, д*). Как видно из рис. 1, *a, з* поры упорядоченно расположены по всей поверхности подложки. Анализ профиля сечений вдоль выделенных линий на рис. 1, *в, е* показал, что средний диаметр пор составляет 50 нм, при этом расстояние между порами равно 40–60 нм.

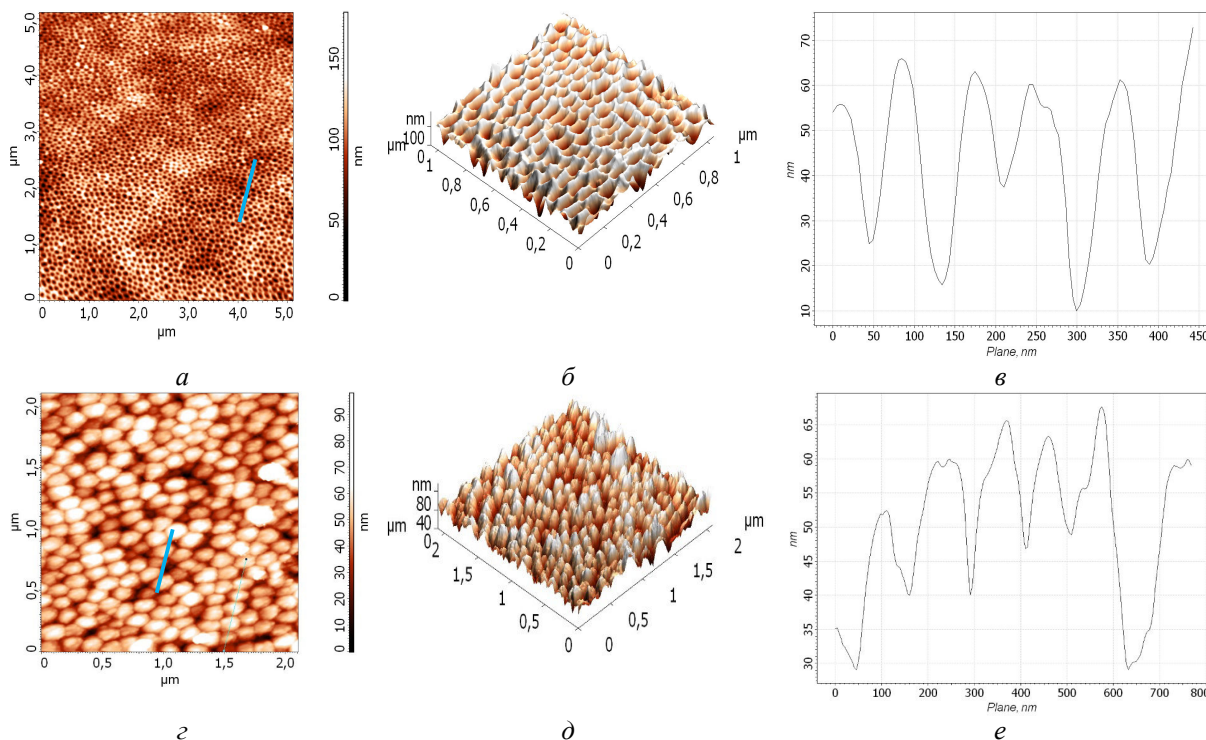


Рис. 1. Топографии поверхности исходной подложки γ -оксида алюминия: с пористой стороны: *a* – двумерное изображение, *б* – трехмерное изображение, *в* – профиль сечения; с беспористой стороны: *з* – двумерное изображение, *д* – трехмерное изображение, *е* – профиль сечения вдоль выделенной линии

При осаждении пленки ZnO+10 % ITO на подложку из γ -оксида алюминия методом многоимпульсного высокочастотного лазерного испарения в вакууме формируется наноразмерная структура. Как видно из рис. 2, пленка повторяет структуру подложки, при этом поры подложки заполняются частично или полностью осаждаемым материалом. Средний размер структурных элементов пленки составляет 50 нм, однако на поверхности встречаются частицы с латеральным размером 80–100 нм, но доля их незначительна.

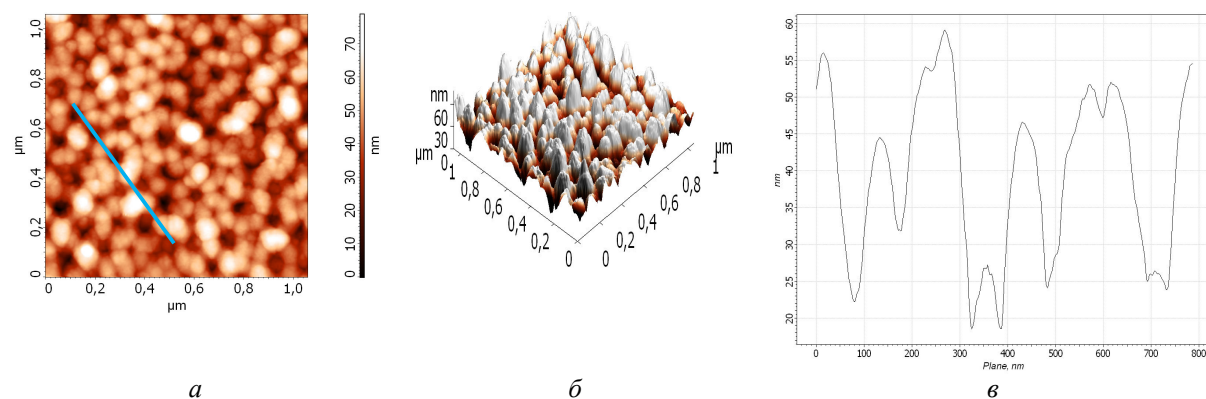


Рис. 2. Топография поверхности лазерно-осажденной тонкой пленки ZnO + 10 % ITO на подложке γ -оксида алюминия с пористой стороны: *a, в* – двумерное изображение; *б* – трехмерное изображение; *з* – профиль сечения вдоль выделенной линии

Пропускание подложки γ -оксида алюминия с беспористой стороны и осажденных на ней пленок оксида цинка ZnO, легированных 10 % ИТО (оксидом индия-олова) (образец № 1), представлены на рис. 3, *а*. Спектры пропускания подложки γ -оксида алюминия со стороны пористой поверхности и осажденных на ней пленок оксида цинка (образец № 2), показанные на рис. 3, *б*, регистрировались на спектрофотометре Cary 500 Scan в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах спектра. Пропускание подложки оксида алюминия с беспористой стороны 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 с беспористой стороны характеризуется плавным ростом, причем в обоих случаях в области длин волн свыше 1100 нм заметны осцилляции пропускания с характерным периодом 30 нм.

Пропускание подложки оксида алюминия с 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 пористой поверхности характеризуется заметным ростом, причем в обоих случаях в области длин волн свыше 1200 нм заметны осцилляции пропускания.

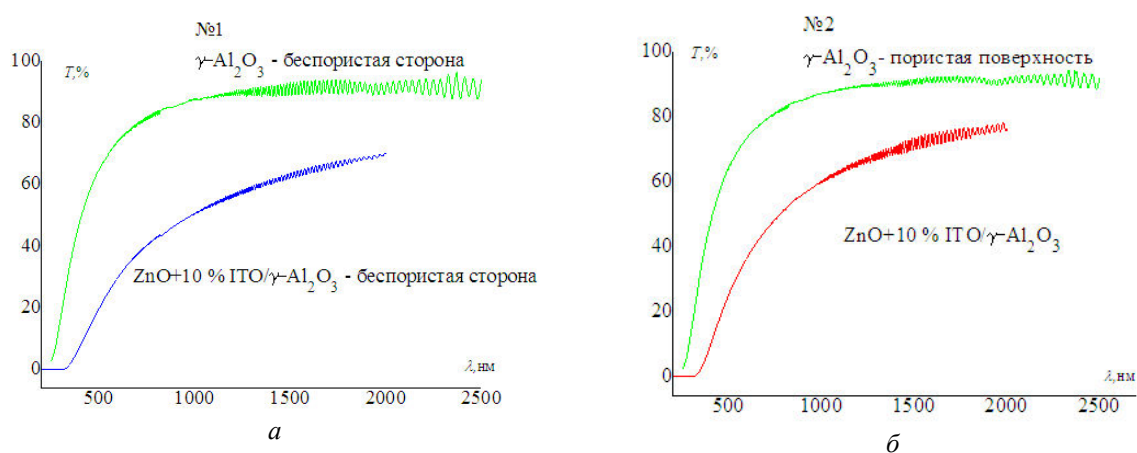


Рис. 3. Спектры пропускания в видимой и ближней ИК-области подложки γ -оксида алюминия с беспористой стороны и пленки оксида цинка с добавками ИТО на ней (№ 1, *а*) и спектры пропускания подложки γ -оксида алюминия со стороны пористой поверхности и пленки оксида цинка с добавками ИТО на ней (№ 2, *б*)

На рис. 4, *б* и 5, *б* видна полоса пропускания в области 1260 см^{-1} , а интенсивность поглощения группы ОН в ИК-спектре (3500 см^{-1}) существенно уменьшилась. При записи КР-спектров максимум люминесценции наблюдается для исходного образца при 1726 см^{-1} (рис. 6, *а*), а для образца с покрытием – при 1892 см^{-1} (рис. 6, *б*).

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

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

С учетом первого порядка интерференции $m = 1$, длины волны $\lambda = 1,5 \text{ мкм}$ и показателя преломления оксида цинка $n = 2,02$ получаем приближенное значение толщины нанесенной пленки оксида цинка $h \approx 0,4 \text{ мкм}$.

Спектры люминесценции образцов № 1 и № 2 практически совпадают по форме (рис. 7) и не зависят от длины волны возбуждения. Спектры возбуждения люминесценции образцов № 1 и № 2 так же практически совпадают по форме и не зависят от длины волны регистрации (рис. 8). Эти экспериментальные факты говорят о том, что свечение принадлежит центрам испускания одного типа. Однако интенсивность свечения образца № 2 более, чем в 2 раза превосходит интенсивность свечения образца № 1.

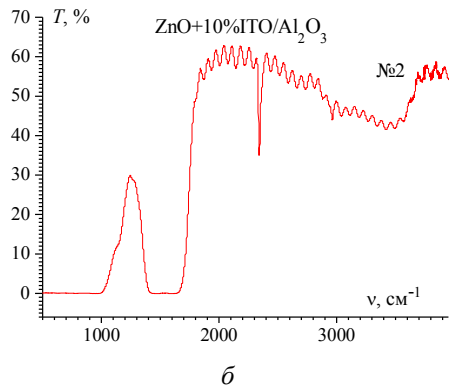
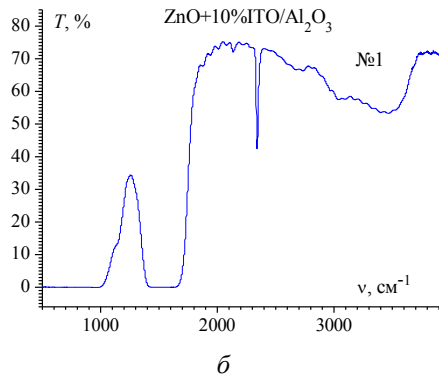
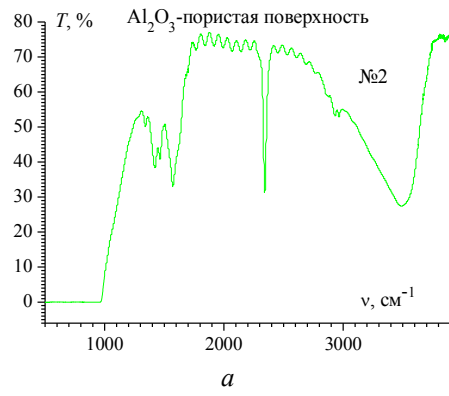
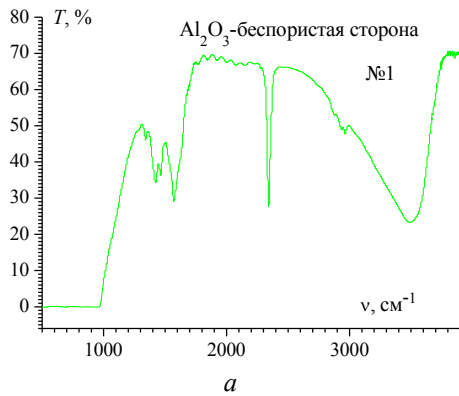


Рис. 4. Спектры пропускания в средней ИК-области подложки γ -оксида алюминия с беспористой стороны (а) и пленки оксида цинка с добавками ИТО на ней (б)

Рис. 5. Спектры пропускания в средней ИК-области подложки γ -оксида алюминия со стороны пористой поверхности (а) и пленки оксида цинка с добавками ИТО на ней (б)

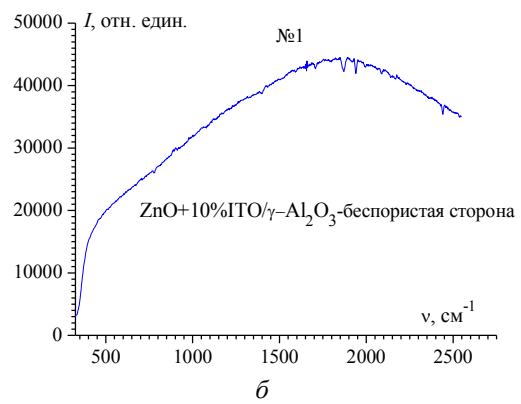
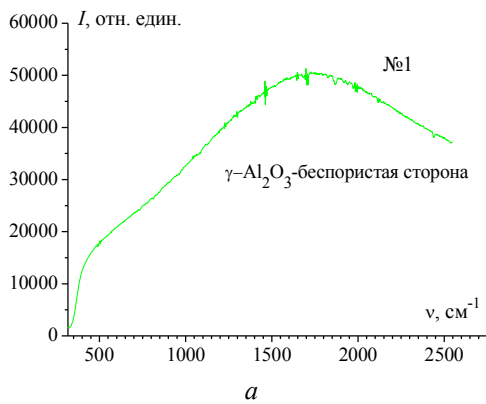


Рис. 6. Спектр КР подложки γ -оксида алюминия с беспористой стороны (а) и спектр КР пленки оксида цинка с добавками ИТО на ней (б)

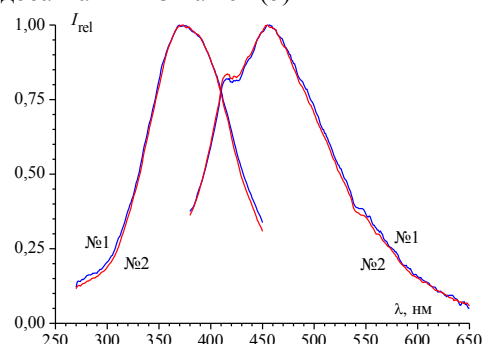
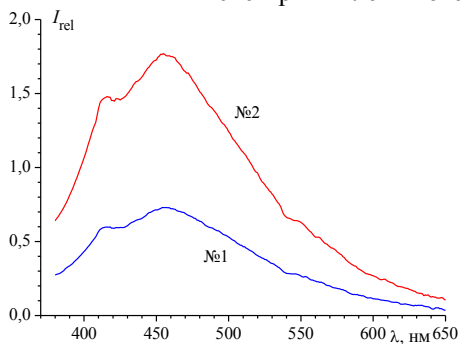


Рис. 7. Спектры фотолуминесценции образцов № 1 и № 2, полученные при возбуждении на длине волны 320 нм

Рис. 8. Спектры люминесценции ($\lambda_{\text{в}} = 320$ нм) и спектры возбуждения люминесценции ($\lambda_{\text{рег}} = 520$ нм) образцов № 1 и № 2, приведенные к единице

Заключение

Методом импульсного высокочастотного лазерного осаждения керамических мишеней в вакууме получены тонкие пленки оксида цинка ZnO, легированные оксидом индия-олова (10 % ИТО), на подложке γ -Al₂O₃. Пленки сформированы на поверхности с беспористой стороны с барьерным слоем (образец № 1) и пористой поверхности (образец № 2). Представлены результаты исследований спектров пропускания и спектров фотолюминесценции пленок легированного оксида цинка на подложке анодного оксида алюминия γ -модификации. Наблюдается полоса пропускания в области 1260 см⁻¹. Независимость спектров люминесценции и возбуждения люминесценции от длин волн возбуждения и регистрации свидетельствует об идентичности центров испускания образцов № 1 и № 2. Структуры тонкопленочного оксида цинка ZnO, легированного 10 % ИТО, сформированного на подложке анодного оксида алюминия в качестве чувствительного слоя, могут быть применены для разработки газовых и биологических сенсоров, солнечных элементов, в том числе тандемной конструкции.

Список литературы

1. Yu X., Marks T.J., Facchetti A. Metal oxides for optoelectronic applications // *Nature Materials Review*. 2016. Vol. 15. P. 383–396.
2. Stadler A. Transparent Conducting Oxides - An Up-To-Date Overview // *Materials*. 2012. No. 5. P. 661–683.
3. Семикина Т.В., Комашенко В.Н., Шмырева Л.Н. Оксидная электроника как одно из направлений прозрачной электроники // *Электроника и связь*. 2010. № 3. С. 20–28.
4. Wagner J.F., Keszler D.A., Presley R.E. Transparent electronics // *Springer Science+Business Media, LLC*, 2008. 217 p.
5. Wöll C. The chemistry and physics of zinc oxide surfaces // *Prog. Surf. Sci.* 2007. Vol. 82. P. 55–120.
6. Janotti A., Van de Walle C. Fundamentals of zinc oxide as a Semiconductor // *Rep. Prog. Phys.* 2009. Vol. 72. P. 126501–126529.
7. A comprehensive review of ZnO materials and devices / Ü. Özgür [et al.] // *J. of Appl. Phys.* 2005. Vol. 98. P. 041301–041494.
8. Ellmer K. ZnO and Its Applications, in: *Transparent Conductive Zinc Oxide. Basics and Applications in Thin Film Solar Cells* // *Springer Series in Materials Science*. 2008. Vol. 104. P. 1–33.
9. Djurišić A.B., Ng A.M.C., Chen X.Y. Review ZnO nanostructures for optoelectronics: material properties and device applications // *Prog. Quant. Electron.* 2010. Vol. 34. P. 191–259.
10. Evolution of ZnO microstructures from hexagonal disk to prismoid, prism and pyramid and their crystal facet-dependent gas sensing properties / N. Qin [et al.] // *Cryst. Eng. Comm.* 2014. Vol. 16. P. 7062–7073.
11. Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film / M. Caglar [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* 2009. Vol. 255. P. 4491–4496.
12. Physics of high-conductivity transparent materials on the basis of wide-gap zinc oxide / G.V. Lashkaryov [et al.] // *Low Temperature Physics*. 2017. Vol. 43, No. 4. P. 643–648.
13. Synthesis and characterization of nanostructured zinc oxide layers for sensors / L.K. Krastev [et al.] // *FTI*. 2013. Vol. 47, No. 4. P. 564–569.
14. Nanostructured materials based on zinc oxide for heterostructural solar cells / A.A. Bobkov [et al.] // *FTI*. 2015. Vol. 49, No. 10. P. 1402–1406.
15. Synthesis of nanostructures based on zinc oxide to create heterostructural photovoltaic elements / N.A. Lashkova [et al.] // *FTI*. 2016. Vol. 50, No. 9. P. 1276–1282.
16. Crystallinity, Stoichiometry, and Luminescence of High Quality ZnO Nanoclusters / D. Tainoff [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. 2008. Vol. 112. P. 12623–12627.
17. Ellmer K. Transparent Conductive Zinc Oxide and Its Derivatives, in: *Handbook of transparent conductors*. New York: Springer, 2010. P. 193–263.
18. Lianguzov N.V. Synthesis of nanostructures based on zinc oxide and their physical properties / *Diss. ... cand. fiz.-mat. sciences*. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2014. 105 p.
19. Зима В.Н., Козлов А.Г., Танская Т.Н. Структура и морфология пленок оксида цинка, полученных реактивным магнетронным напылением // *Вест. Омского ун-та*. 2013. № 2. С. 75–79.
20. Перспективы импульсного электроосаждения иерархических наноструктур оксида цинка / Н.П. Ключко [и др.] // *ФТП*. 2013. Т. 47, вып. 8. С. 1129–1136.
21. Семикина Т.В. Диодные структуры и электрические свойства пленок ZnO, полученных методом атомного послойного осаждения // *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. 2016. Вып. 51. С. 150–157.

22. Кашкул И.Н.К. Технология и свойства пленок оксида цинка для тонкопленочных солнечных модулей / Дисс... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 2017. 117 с.
23. Чумаков А.Н., Авраменко В.Б., Босак Н.А. Плазмообразование при высокочастотном импульсно-периодическом лазерном воздействии на металлы в воздухе при пониженном и атмосферном давлении // ЖПС. 2012. Т. 79, № 2. С. 279–287.
24. Структура и оптические свойства углеродных пленок, полученных при многоимпульсном лазерном осаждении / А.Н. Чумаков [и др.] // ЖПС. 2012. Т. 79, № 4. С. 681–685.
25. Оптические свойства лазерно-осаждаемых тонких пленок оксида цинка / А.Н. Чумаков [и др.] // Электроника-инфо. 2016. № 2. С. 32–37.
26. Чумаков А.Н., Босак Н.А., Панина А.В. Приповерхностное плазмообразование в воздухе при двухимпульсном лазерном воздействии на двух длинах волн // ЖПС. 2017. Т. 84, № 4. С. 595–602.

References

1. Yu X., Marks T.J., Facchetti A. Metal oxides for optoelectronic applications // *Nature Materials Review*. 2016. Vol. 15. P. 383–396.
2. Stadler A. Transparent Conducting Oxides - An Up-To-Date Overview // *Materials*. 2012. No. 5. P. 661–683.
3. Semikina T.V., Komashhenko V.N., Shmyreva L.N. Oksidnaja jelektronika kak odno iz napravlenij prozrachnoj jelektroniki // *Jelektronika i svjaz'*. 2010. № 3. S. 20–28. (in Russ.)
4. Wagner J.F., Keszler D.A., Presley R.E. Transparent electronics // Springer Science+Business Media, LLC, 2008. 217 p.
5. Wöll C. The chemistry and physics of zinc oxide surfaces // *Prog. Surf. Sci.* 2007. Vol. 82. P. 55–120.
6. Janotti A., Van de Walle C. Fundamentals of zinc oxide as a Semiconductor // *Rep. Prog. Phys.* 2009. Vol. 72. P. 126501–126529.
7. A comprehensive review of ZnO materials and devices / Ü. Özgür [et al.] // *J. of Appl. Phys.* 2005. Vol. 98. P. 041301–041494.
8. Ellmer K. ZnO and Its Applications, in: *Transparent Conductive Zinc Oxide. Basics and Applications in Thin Film Solar Cells* // Springer Series in Materials Science. 2008. Vol. 104. P. 1–33.
9. Djurišić A.B., Ng A.M.C., Chen X.Y. Review ZnO nanostructures for optoelectronics: material properties and device applications // *Prog. Quant. Electron.* 2010. Vol. 34. P. 191–259.
10. Evolution of ZnO microstructures from hexagonal disk to prismoid, prism and pyramid and their crystal facet-dependent gas sensing properties / N. Qin [et al.] // *Cryst. Eng. Comm.* 2014. Vol. 16. P. 7062–7073.
11. Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film / M. Caglar [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* 2009. Vol. 255. P. 4491–4496.
12. Physics of high-conductivity transparent materials on the basis of wide-gap zinc oxide / G.V. Lashkaryov [et al.] // *Low Temperature Physics*. 2017. Vol. 43, No. 4. P. 643–648.
13. Synthesis and characterization of nanostructured zinc oxide layers for sensors / L.K. Krastev [et al.] // *FTI*. 2013. Vol. 47, No. 4. P. 564–569.
14. Nanostructured materials based on zinc oxide for heterostructural solar cells / A.A. Bobkov [et al.] // *FTI*. 2015. Vol. 49, No. 10. P. 1402–1406.
15. Synthesis of nanostructures based on zinc oxide to create heterostructural photovoltaic elements / N.A. Lashkova [et al.] // *FTI*. 2016. Vol. 50, No. 9. P. 1276–1282.
16. Crystallinity, Stoichiometry, and Luminescence of High Quality ZnO Nanoclusters / D. Tainoff [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. 2008. Vol. 112. P. 12623–12627.
17. Ellmer K. Transparent Conductive Zinc Oxide and Its Derivatives, in: *Handbook of transparent conductors*. New York: Springer, 2010. P. 193–263.
18. Lianguzov N.V. Synthesis of nanostructures based on zinc oxide and their physical properties / Diss. ... cand. fiz.-mat. sciences. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2014. 105 p.
19. Zima V.N., Kozlov A.G., Tanskaja T.N. Ctruktura i morfologija plenok oksida cinka, poluchennyh reaktivnym magnetronnym napyleniem // *Vest. Omskogo un-ta*. 2013. № 2. S. 75–79.
20. Perspektivy impul'snogo jelektroosazhdenija ierarhicheskikh nanostruktur oksida cinka / N.P. Klochko [i dr.] // *FTP*. 2013. Т. 47, вып. 8. S. 1129–1136. (in Russ.)
21. Semikina T.V. Diodnye struktury i jelektricheskie svojstva plenok ZnO, poluchennyh metodom atomnogo poslojnogo osazhdenija // *Optojelektronika i poluprovodnikovaja tehnika*. 2016. Vyp. 51. S. 150–157. (in Russ.)
22. Kashkul I.N.K. Tehnologija i svojstva plenok oksida cinka dlja tonkoplenochnyh solnechnyh modulej / Diss... kand. teh. nauk. Sankt-Peterburg, 2017. 117 s. (in Russ.)
23. Chumakov A.N., Avramenko V.B., Bosak N.A. Plazmoobrazovanie pri vysokochastotnom impul'sno-periodicheskom lazernom vozdejstvii na metally v vozduhe pri ponizhennom i atmosfernom davlenii // *ZhPS*. 2012. Т. 79, № 2. S. 279–287. (in Russ.)

24. Struktura i opticheskie svoystva uglerodnyh plenok, poluchennyh pri mnogoimpul'snom lazernom osazhdenii / A.N. Chumakov [i dr.] // ZhPS. 2012. T. 79, № 4. S. 681–685. (in Russ.)
25. Opticheskie svoystva lazerno-osazhdaemyh tonkih plenok oksida cinka / A.N. Chumakov [i dr.] // Jelektronika-info. 2016. № 2. S. 32–37. (in Russ.)
26. Chumakov A.N., Bosak N.A., Panina A.V. Pripoverhnostnoe plazmoobrazovanie v vozduhe pri dvuhimpul'snom lazernom vozdeystvii na dvuh dlinah voln // ZhPS. 2017. T. 84, № 4. S. 595–602. (in Russ.)

Информация об авторах

Мухуров Н.И., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Денисюк С.В., научный сотрудник лаборатории микро- и наносенсорики ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

Чумаков А.Н., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией радиационной плазмодинамики Института физики Национальной академии наук Беларуси.

Шевченко А.А., к.т.н., доцент Белорусского государственного аграрного технического университета.

Баран Л.В., к.ф.-м.н., заведующая сектором Белорусского государственного университета.

Кароза А.Г., ведущий инженер Центра аналитических и спектральных измерений Института физики Национальной академии наук Беларуси.

Райченко Т.Ф., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики инфракрасных лучей Института физики Национальной академии наук Беларуси.

Босак Н.А., к.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории радиационной плазмодинамики Института физики Национальной академии наук Беларуси.

Иванов А.А., магистрант Белорусского государственного университета.

Чжан Х., доктор философии, профессор Харбинского инженерного университета.

Ю Г., доктор философии, профессор Харбинского университета науки и технологий.

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 68,
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника
и лазерная техника»
тел. +375-17-281-32-30;
e-mail: n.mukhurov@oelt.basnet.by
Мухуров Николай Иванович

Information about the authors

Mukhurov N.I., D.Sci, professor, head of the laboratory of the micro- and nanosensorics of SSPA «Optics, optoelectronics and laser technology».

Denisiuk S.V., researcher of the laboratory of micro- and nanosensorics of SSPA «Optics, optoelectronics and laser technology».

Chumakov A.N, D.Sci, head of the laboratory of radiation plasmadynamics of Institute of physics of National academy of sciences of Belarus.

Shevchenok A.A., PhD, associate professor of Belarusian state agrarian technical university.

Baran L.V., PhD, head of the sector of Belarusian state university.

Karoza A.G., leading engineer of the Center for analytical and spectral measurements of Institute of physics of National academy of sciences of Belarus.

Raichenok T.F., Ph.D, Leader researcher of the laboratory of physics of infrared rays of Institute of physics of National academy of sciences of Belarus.

Bosak N.A., PhD, leader researcher of the laboratory of radiative plasmadynamics of Institute of physics of National academy of sciences of Belarus.

Ivanov A.A., master student of Belarusian state university.

Zhang H., doctor of philosophy, professor of Harbin engineering university.

Yu G., doctor of philosophy, professor of Harbin university of science and technology.

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 68,
SSPA «Optics, optoelectronics
and laser technology»
tel. + 375-17-281-32-30;
e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by
Mukhurov Nikolai Ivanovich