

Д.Л. Газдинский, О.М. Чапура, Л.В. Михнев, Е.А. Бондаренко,
Р.В. Пигулев, У.А. Марьяна

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ СЛОЕВ ОКСИДА ЦИНКА ZnO, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

В настоящее время актуальным направлением является поиск функциональных слоев для различных оптоэлектронных устройств. Перспективным кандидатом в качестве основы для многих подобных структур является оксид цинка (ZnO), сочетающий в себе ряд уникальных оптических и фотоэлектрических свойств. Однако, характеристики тонких плёнок ZnO могут существенно различаться в зависимости от выбранного метода синтеза и конкретных условий получения. Одной из разновидностей золь-гель метода, подходящей для синтеза плёнок нанометрового масштаба, является метод вертикального вытягивания. Поэтому, в этой работе представлены результаты синтеза тонких плёнок ZnO, полученных на стеклянных подложках методом вертикального вытягивания из золя оксида цинка. Методами спектральной эллипсометрии и спектральной фотометрии было изучено влияние скорости вытягивания на структурные и оптические свойства синтезированных плёнок ZnO. Методом спектральной эллипсометрии были установлено, что изменение скорости вытягивания существенным образом влияет на толщину и пористость синтезированных слоев оксида цинка. Анализ полученной нами зависимости толщины плёнки от скорости вытягивания показал, что в методе вертикального вытягивания рост оксида цинка на стеклянных подложках возможно реализовывать в двух режимах: в режиме капиллярных сил и в режиме высыхания. В то же время для синтезированных плёнок ZnO методом спектральной фотометрии были измерены спектры пропускания, анализ которых показал влияние скорости вытягивания на положение края собственного поглощения. Было установлено, что основной причиной приводящей к изменению ширины запрещенной зоны в наноразмерных плёнках ZnO является квантовый размерный эффект.

ZnO; тонкие плёнки; золь-гель; метод вертикального вытягивания.

D.L. Gazdinsky, O.M. Chapura, L.V. Mihnev, E.A. Bondarenko,
R.V. Pigulev, Y.A. Mar'ina

STUDY OF THE OPTICAL PROPERTIES OF THIN LAYERS OF ZINC OXIDE ZnO OBTAINED BY THE SOL-GEL METHOD

Currently, the actual direction is the search for functional layers for various optoelectronic devices. A promising candidate as a basis for many such structures is zinc oxide (ZnO), which combines a number of unique optical and photoelectric properties. However, the characteristics of ZnO thin films can vary significantly depending on the chosen synthesis method and specific production conditions. One of the varieties of the sol-gel method suitable for the synthesis of nanoscale films is the dip-coating method. The paper presents the results of the synthesis of thin films of zinc oxide on glass substrates by the method of vertical drawing from ZnO alcohol sol. The effect of the elongation rate on the structural and optical properties of synthesized ZnO films was studied using spectral ellipsometry and spectral photometry. By the method of spectral ellipsometry, it was found that the change in the rate of elongation significantly affects the thickness and porosity of the synthesized zinc oxide layers. The analysis of the obtained dependence of the film thickness on the pulling speed showed that in the vertical pulling method, the growth of zinc oxide on glass substrates can be realized in two modes: in capillary forces mode and in drying mode. At the same time, transmission spectra were measured for synthesized ZnO films by spectral photometry, the analysis of which showed the effect of the elongation rate on the position of the edge of fundamental absorption. It was found that the main cause of the resulting

ZnO; thin films; sol-gel; dip-coating method.

Введение. В последнее время исследователи уделяют большое внимание широкозонным полупроводниковым материалам. К подобным материалам относится оксид цинка, у которого ширина запрещённой зоны составляет 3,36 эВ. Другой особенностью оксида цинка является высокий показатель преломления ($n=2,015$), сочетающийся с высокой прозрачностью в видимой области спектра [1]. Невысокая стоимость, относительно низкая токсичность и простота получения делают тонкие пленки оксида цинка привлекательными для широкого круга применений. Оксид цинка может применяться для производства светоизлучающих диодов и лазеров, работающих в ультрафиолетовой области излучения [2, 3]. Использовать тонкие пленки оксида цинка (ZnO), возможно также в качестве светофильтров [4], просветляющих покрытий [5] и оптических волноводов [6]. Наличие пьезоэлектрического и пироэлектрического эффектов позволяет использовать тонкие пленки ZnO в качестве датчиков температуры [7]. Также в ряде работ отмечаются уникальные фотоэлектрические свойства тонких плёнок ZnO, предоставляющие возможность для их использования в качестве газовых сенсоров [8] и ультрафиолетовых детекторов [9]. Таким образом, можно сделать вывод, что получение тонких плёнок ZnO является актуальным.

Тонкие пленки оксида цинка можно получать различными способами, такими как реактивное магнетронное распыление, химическое осаждение из газовой фазы и т.д. [10–12]. Особый интерес вследствие дешевизны метода и возможности масштабирования представляет метод вертикального вытягивания из растворов [13]. Различные параметры вытягивания могут существенным образом влиять на оптические и структурные свойства тонких плёнок ZnO, которые являются ключевыми для их практического применения [14]. Одним из важных параметров роста плёнок, который оказывает влияние на механизм формирования пленки, является скорость вытягивания подложек из раствора [15]. В предыдущих работах [14, 16] изучение механизмов роста и параметров плёнок ZnO проводилось при больших скоростях вытягивания, когда реализуется рост плёнок в режиме высыхания. Так, например, в работе [16] было показано влияние скорости вытягивания на кристаллическую ориентацию полученных плёнок ZnO. В тоже время, работ посвященных детальному исследованию влияния скорости на оптические и структурные свойства тонких плёнок ZnO, полученных в режиме капиллярных сил, не проводились. Таким образом, исследование влияния скорости вытягивания подложек на оптические и структурные свойства является актуальным.

Эксперимент. Для синтеза тонких плёнок ZnO был применен золь-гель метод, предполагающий использование золя ZnO. Общая схема синтеза тонких плёнок представлена на рис. 1.

В качестве исходных реактивов для синтеза золя использовался двухводный ацетат цинка ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$), моноэтаноламин (MEA). Растворителем служил безводный изопропиловый спирт (C_3H_7OH).

На первом этапе приготовления золя оксида цинка, в 50 миллилитров изопропилового спирта, предварительно нагретого до 60 градусов, добавляли 2,2 грамма ацетата цинка.

Полученный раствор перемешивали в течение получаса при поддержании постоянной температуры. Далее, к готовому раствору добавляли по каплям моноэтаноламин в объёме 0,61 миллилитра и оставляли перемешиваться в течение двух часов. Перед вытягиванием полученный золь выдерживали в течение 24 часов при комнатной температуре.

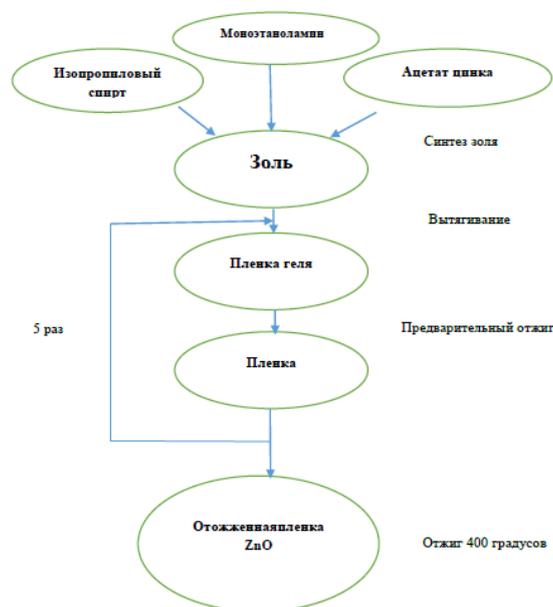


Рис. 1. Схема синтеза тонких плёнок ZnO

Нанесение пленок на подложки осуществлялось методом вертикального вытягивания. Пленки ZnO наносились на стеклянные подложки, предварительно отмытые в хромовой смеси. Скорость вытягивания подложек из раствора поддерживалась постоянной и для разных образцов составляла 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 2; 5; 10; 20 сантиметров в минуту. Для каждого образца было проведено 5 циклов нанесения. После каждого цикла нанесения происходил предварительный отжиг нанесенных слоёв в течение 10 минут при 300°C. На последнем этапе, образцы помещались в печь, где нагревались со скоростью 4°C в минуту до 400°C и затем выдерживались в течение часа при постоянной температуре.

Экспериментальные методы исследования. Спектры пропускания исследуемых образцов были получены при помощи спектрометрической установки, построенной на базе монохроматора МДР41 (ЛОМО). В качестве источника излучения использовалась газоразрядная дейтериевая лампа ДДС-30, приемником излучения служил фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100.

Измерение толщин пленок и оптических констант на стеклянных подложках проводилось на спектроскопическом эллипсометре SE 800 производства SENTECH Instruments GmbH (Германия). Измерения производились в диапазоне от 280 до 850 нм при углах падения 50, 60 и 70°.

Спектральная эллипсометрия. На рис. 2 представлены зависимости эллипсометрических параметров тонких плёнок ZnO от длины волны, измеренные при угле падения 60°.

На основе эллипсометрических измерений были рассчитаны толщина, а также дисперсии показателя преломления и коэффициента экстинкции экспериментальных образцов. Моделирование этих параметров было проведено с использованием программного обеспечения спектрального эллипсометра SENTECH SE 800 – SpectraRay3. При расчете использовалась трехслойная модель, состоящая из слоев воздуха, слоя пористого оксида цинка и полубесконечного стеклянного слоя. Пористый слой оксида цинка моделировался при помощи приближения эффективной

среды (effective medium approximation), предназначенного для описания сплошного слоя (ZnO) с небольшими включениями (воздух) [17]. При моделировании показателя преломления и коэффициента экстинкции оксида цинка использовалась модель дисперсии Тауца-Лорентца, которую можно выразить при помощи реальной ε_1 и мнимой части ε_2 диэлектрической проницаемости как:

$$\varepsilon_2(E) = \begin{cases} \frac{AE_0C(E-E_g)}{(E^2-E_0^2)^2+C^2E^2} \cdot \frac{1}{E} & (E > E_g) \\ 0 & (E \leq E_g) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_1(E) = \varepsilon_\infty + \frac{2P}{\pi} \int_{E_g}^{\infty} \frac{\xi \varepsilon_2(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi$$

где A – это сила осциллятора, E_0 – энергия полосы поглощения, C – коэффициент уширения полосы поглощения, E_g – ширина запрещенной зоны, ε_∞ – величина реальной части диэлектрической функции при высоких энергиях [18]. Рассчитанные в соответствии с этой моделью параметры тонких слоев ZnO представлены в табл. 1.

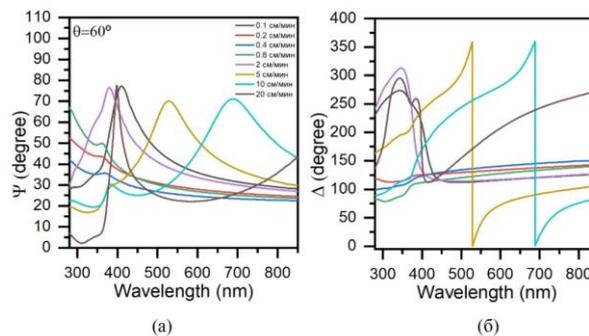


Рис 2. Спектральные зависимости эллисометрических параметров $\Psi(\lambda)$ (а) и $\Delta(\lambda)$ (б) для полученных образцов, измеренные при угле падения 60°

Таблица 1

Экспериментальные параметры тонких пленок, полученные из спектральной эллипсометрии

Скорость вытягивания, см/мин	Толщина, нм	Доля пор	ε_∞	E_g	A	E_0	C	n_{eff}
0,1	43,94	0,167	3,61	3,197	514,82	3,1039	0,1740	2,047
0,2	29,75	0,071	3,263	3,143	399,30	2,8698	0,3467	1,984
0,4	24,478	0,041	3,64	3,142	165,36	3,1071	0,5828	2,066
0,8	33,87	0,087	3,24	3,129	178,31	3,0955	0,5241	1,968
2	49,77	0,077	3,71	3,117	787,40	2,9355	0,2505	2,200
5	81,68	0,217	2,66	3,11	154,27	3,0350	0,5238	1,783
10	119,28	0,502	2,49	3,139	174,08	3,1930	0,3755	1,746
20	185,33	0,659	2,26	3,098	168,44	2,9475	0,4662	1,649

Результаты моделирования, показывающие зависимость толщины пленок ZnO от скорости вытягивания из раствора, показаны на рис. 3.

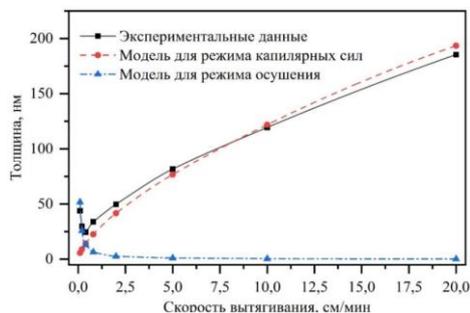


Рис. 3. Зависимость толщины пленок ZnO от скорости вытягивания из раствора

Как видно из рис. 3 в нашем случае, реализуется два режима роста тонких пленок. Аппроксимация экспериментальной кривой с модельными зависимостями, характерными для режима высыхания и режима капиллярных сил, указывает на существование двух механизмов роста для плёнок ZnO [13].

В частности режим роста капиллярных сил реализуется до скорости вытягивания равной 0,4 сантиметра в минуту, а режим высыхания (draining) от 0,4 до 20 сантиметров в минуту. Как и предсказывалось в теоретических работах, в режиме высыхания толщина пленки зависит от скорости вытягивания как $V^{3/2}$, в то время как в режиме капиллярных сил толщина оказывается обратно пропорциональна скорости [19].

Оптическая спектроскопия. Спектры пропускания образцов пленок ZnO, полученных при разных скоростях вытягивания, представлены на рис. 4.

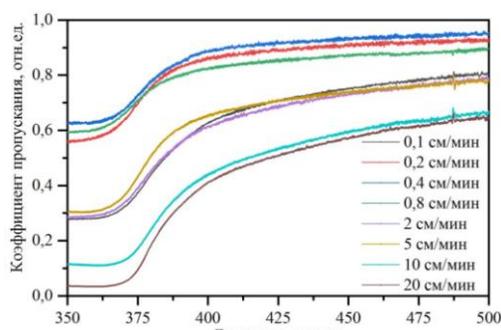


Рис. 4. Спектры пропускания тонких плёнок

Как видно из рис. 4 в области ближнего ультрафиолета у всех образцов наблюдается снижение пропускания, вероятно связанное с фундаментальным поглощением оксида цинка. Анализ этих спектров по методике Тауца позволяет оценить ширину запрещенной зоны полученных образцов [20].

Для определения величины оптической ширины запрещенной использовалась формула зависимости показателя поглощения от энергии квантов для прямозонных полупроводников:

$$\alpha(E) \cdot E = B(E - E_g)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где B — константа, E — энергия кванта света, E_g — ширина запрещенной зоны. На основе формулы (2) можно построить, так называемые графики Тауца в координатах $(\alpha(E)E)^2 = f(E)$ и экстраполяцией их линейных участков оценить величину ширины запрещенной зоны.

Для пересчета пропускания в показатель поглощения использовалась формула:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R_1(\lambda))(1-R_2(\lambda))(1-R_{12}(\lambda))}{T(\lambda)} \right] \quad (3)$$

$T(\lambda)$ – коэффициент пропускания образца. R_1 , R_{12} , R_2 – коэффициенты отражения от границ воздух-плёнка, плёнка-подложка и подложка-воздух, рассчитываемые по формулам Френеля с использованием дисперсии показателей преломления, полученных на основе эллипсометрических данных. Соответствующие графики Тауца, построенные на основании полученных в работе спектров пропускания для всех экспериментальных образцов показаны на рис. 5.

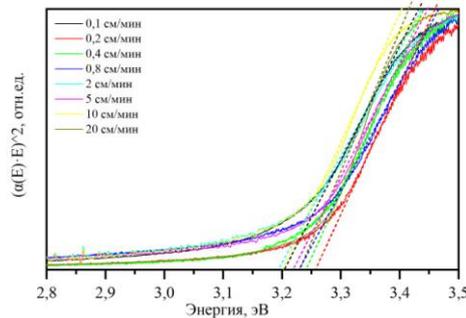


Рис. 5. Графики Тауца для тонких плёнок ZnO

Экстраполяцией линейных участков на этих графиках была проведена оценка ширины запрещенной зоны сформированных пленок ZnO, результаты которой обобщены на рис. 6.

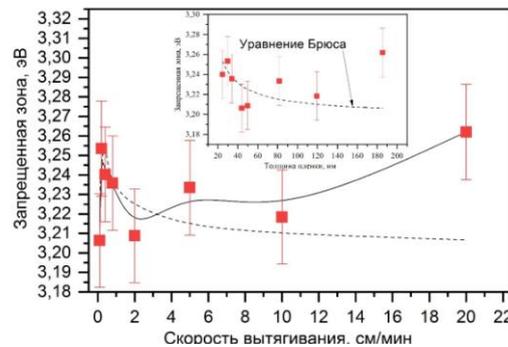


Рис. 6. Зависимость ширины запрещенной зоны от скорости вытягивания.

На вставке: зависимость ширины запрещенной зоны от толщины плёнки

Как видно из рис. 6, ширины запрещенной зоны полученных плёнок ZnO находится в сложной зависимости от скорости вытягивания. По-видимому, в области низких скоростей роста эта зависимость обусловлена в первую очередь эффектом размерного квантования, что подтверждается хорошим соответствием экспериментальных данных уравнению Брюса для образцов с малой толщиной (см. вставку на рис. 6) [21]. В то же время, отклонение от теоретической кривой для образцов с большой толщиной, т.е. полученных при высоких скоростях вытягивания, по-видимому, обусловлено изменением структуры плёнки, что подтверждается значительным увеличением её пористости [22].

Заключение. В ходе исследования было установлено, что в зависимости от скорости вытягивания реализуется два механизма роста тонких пленок ZnO на стеклянных подложках, что подтверждается характерной зависимостью толщины от скорости вытягивания. На скоростях от скорости вытягивания меньше 0,4 сантиметра в минуту осуществляется рост под действием капиллярных сил, в то время как при больших скоростях нанесения происходит рост плёнок в режиме высыхания. При исследовании оптических свойств тонких плёнок ZnO на стекле было установлена взаимосвязь толщины полученного слоя и положения края собственного поглощения, что обусловлено преимущественно влиянием квантового размерного эффекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лашкарев Г.В., Карпина В.А., Лазоренко В.И., Евтушенко А.И., Штеплюк И.И., Храновский В.Д.* Свойства оксида цинка при низких и средних температурах // Физика низких температур. – 2011. – № 37 (3). – С. 289-300.
2. *Zhang X.M., Lu M.Y., Zhang Y., Chen L.J., Wang Z.L.* Fabrication of a high-brightness blue-light-emitting diode using a ZnO-nanowire array grown on p-GaN thin film // *Adv. Mater.* – 2009. – Vol. 21, No. 27. – P. 2767-2770.
3. *Тарасов А.П.* и др. Анализ лазерной генерации тетраподов ZnO, полученных методом карботермического синтеза // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. – Т. 110, № 11. – С. 750-754.
4. *Чумаков А.Н., Мухуров Н.И., Денисюк С.В., Шевченко А.А., Баран Л.В., Райченко Т.Ф., Босак Н.А.* Морфологические, оптические и фотолуминесцентные свойства тонких пленок ZnO на подложке Al₂O₃ // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 91-95.
5. *Тузовский В.К., Гаврилов С.А., Терашкевич И.М.* Солнечные элементы с пассивирующим слоем ZnO:Al, полученным методом ALD // Неорганические материалы. – 2015. – Т. 51, № 11. – С. 1205-1205.
6. *Лерер А.М., Тимошенко П.Е., Черникова Т.Ю.* Дисперсионные характеристики оптических волноводов на основе ZnO- наностержней // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 6. – С. 1-5.
7. *Xue F. et al.* Piezotronic effect on ZnO nanowire film based temperature sensor // *ACS applied materials & interfaces.* – 2014. – Vol. 6, No. 8. – P. 5955-5961.
8. *Soltabayev B., Mentbayeva A., Acar S.* Enhanced gas sensing properties of in doped ZnO thin films // *Materials Today: Proceedings.* – 2022. – Vol. 49. – P. 2495-2500.
9. *Xu Z. et al.* Photoconductive UV detectors based on ZnO films prepared by sol-gel method // *Journal of sol-gel science and technology.* – 2005. – Vol. 36, No. 2. – P. 223-226.
10. *Николаева Н.С., Иванов В.В., Шубин А.А.* Синтез высокодисперсных форм оксида цинка: химическое осаждение и термолиз // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 153-173.
11. *Темиров А.Т., Шаихов Д.А., Магомедов М.А.* Основные методы получения пленок ZnO // Системные технологии. – 2018. – № 3 (28). – С. 104-107.
12. *Laurenti M., Cauda V.* Porous zinc oxide thin films: Synthesis approaches and applications // *Coatings.* – 2018. – Vol. 8, No. 2. – P. 67.
13. *Ceratti D.R. et al.* A new dip coating method to obtain large-surface coatings with a minimum of solution // *Advanced Materials.* – 2015. – Vol. 27, No. 34. – P. 4958-4962.
14. *Malek M. F. et al.* Influence of various sol concentrations on stress/strain and properties of ZnO thin films synthesised by sol-gel technique // *Thin Solid Films.* – 2013. – Vol. 527. – P. 102-109.
15. *Faustini M. et al.* Preparation of sol-gel films by dip-coating in extreme conditions // *The Journal of Physical Chemistry C.* – 2010. – Vol. 114, No. 17. – P. 7637-7645.
16. *Ohyama M., Kouzuka H., Yoko T.* Sol-gel preparation of ZnO films with extremely preferred orientation along (002) plane from zinc acetate solution // *Thin solid films.* – 1997. – Vol. 306, No. 1. – P. 78-85.
17. *Fujiwara H.* Spectroscopic ellipsometry: principles and applications. – John Wiley & Sons, 2007. – 388 p.

18. Bouzouraa M.B. et al. Comparative study of ZnO optical dispersion laws // *Superlattices and Microstructures*. – 2017. – Vol. 104. – P. 24-36.
19. Tang X., Yan X. Dip-coating for fibrous materials: mechanism, methods and applications // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. – 2017. – Vol. 81, No. 2. – P. 378-404.
20. Шелеманов А.А. и др. Влияние поливинилпирролидона на структуру и оптические свойства ZnO-MgO нанокompозитов, полученных полимерно-солевым методом // *Оптика и спектроскопия*. – 2021. – Т. 129, № 9. – С. 1176-1181.
21. Вакалов Д.С. и др. Эффект размерного квантования в наночастицах ZnO, полученных золь-гель методом // *Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета*. – 2012. – № 4. – С. 11-14.
22. Berger R. et al. Study on porosity in zinc oxide ultrathin films from three-step MLD Zn-hybrid polymers // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 6. – P. 1418.

REFERENCE

1. Lashkarev G.V., Karpina V.A., Lazorenko V.I., Evtushenko A.I., Shteplyuk I.I., Khranovskiy V.D. Svoystva oksida tsinka pri nizkikh i srednikh temperaturakh [Properties of zinc oxide at low and medium temperatures], *Fizika nizkikh temperature* [Physics of low temperatures], 2011, No. 37 (3), pp. 289-300.
2. Zhang X.M., Lu M.Y., Zhang Y., Chen L.J., Wang Z.L. Fabrication of a high-brightness blue-light-emitting diode using a ZnO-nanowire array grown on p-GaN thin film, *Adv. Mater.*, 2009, Vol. 21, No. 27, pp. 2767-2770.
3. Tarasov A.P. i dr. Analiz lazernoy generatsii tetrapodov ZnO, poluchennykh metodom karbotermicheskogo sinteza [Analysis of laser generation of ZnO tetrapods obtained by carbothermic synthesis], *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics]. – 2019. – Т. 110, №. 11. – S. 750-754.
4. Chumakov A.N., Mukhurov N.I., Denisyuk S.V., Shevchenok A.A., Baran L.V., Raychenok T.F., Bosak N.A. Morfologicheskie, opticheskie i fotolyuminescentnyye svoystva tonkikh plenok ZnO na podlozhke Al₂O₃ [Analysis of laser generation of ZnO tetrapods obtained by carbothermic synthesis], *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2018, Vol. 54, No. 3, pp. 91-95.
5. Tuzovskiy V.K., Gavrilov S.A., Terashkevich I.M. Solnechnye elementy s passiviruyushchim sloem ZnO:Al, poluchennym metodom ALD [Solar cells with a ZnO:Al passivating layer obtained by the ALD method], *Neorganicheskie materialy* [Inorganic materials], 2015, Vol. 51, No. 11, pp. 1205-1205.
6. Lerer A.M., Timoshenko P.E., Chernikova T.Yu. Dispersionnyye kharakteristiki opticheskikh volnovodov na osnove ZnO- nanosterzhney [Dispersion characteristics of optical waveguides based on ZnO-nanorods], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics], 2016, Vol. 61, No. 6, pp. 1-5.
7. Xue F. et al. Piezotronic effect on ZnO nanowire film based temperature sensor, *ACS applied materials & interfaces*, 2014, Vol. 6, No. 8, pp. 5955-5961.
8. Soltabayev B., Mentbayeva A., Acar S. Enhanced gas sensing properties of in doped ZnO thin films, *Materials Today: Proceedings*, 2022, Vol. 49, pp. 2495-2500.
9. Xu Z. et al. Photoconductive UV detectors based on ZnO films prepared by sol-gel method, *Journal of sol-gel science and technology*, 2005, Vol. 36, No. 2, pp. 223-226.
10. Nikolaeva N.S., Ivanov V.V., Shubin A.A. Sintez vysokodispersnykh form oksida tsinka: khimicheskoe osazhdenie i termoliz [Synthesis of highly dispersed forms of zinc oxide: chemical precipitation and thermolysis], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya* [Journal of the Siberian Federal University. Chemistry], 2010, Vol. 3, No. 2, pp. 153-173.
11. Temirov A.T., Shaikhov D.A., Magomedov M.A. Osnovnyye metody polucheniya plenok ZnO [Basic methods of obtaining ZnO films], *Sistemnye tekhnologii* [System technologies], 2018, No. 3 (28), pp. 104-107.
12. Laurenti M., Cauda V. Porous zinc oxide thin films: Synthesis approaches and applications, *Coatings*, 2018, Vol. 8, No. 2, pp. 67.
13. Ceratti D.R. et al. A new dip coating method to obtain large-surface coatings with a minimum of solution, *Advanced Materials*, 2015, Vol. 27, No. 34, pp. 4958-4962.
14. Malek M.F. et al. Influence of various sol concentrations on stress/strain and properties of ZnO thin films synthesised by sol-gel technique, *Thin Solid Films*, 2013, Vol. 527, pp. 102-109.

15. *Faustini M.* et al. Preparation of sol-gel films by dip-coating in extreme conditions, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, Vol. 114, No. 17, pp. 7637-7645.
16. *Ohyama M., Kouzuka H., Yoko T.* Sol-gel preparation of ZnO films with extremely preferred orientation along (002) plane from zinc acetate solution, *Thin solid films*, 1997, Vol. 306, No. 1, pp. 78-85.
17. *Fujiwara H.* Spectroscopic ellipsometry: principles and applications. John Wiley & Sons, 2007, 388 p.
18. *Bouzouraa M.B.* et al. Comparative study of ZnO optical dispersion laws, *Superlattices and Microstructures*, 2017, Vol. 104, pp. 24-36.
19. *Tang X., Yan X.* Dip-coating for fibrous materials: mechanism, methods and applications, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2017, Vol. 81, No. 2, pp. 378-404.
20. *Shelemanov A.A. i dr.* Vliyanie polivinilpirrolidona na strukturu i opticheskie svoystva ZnO-MgO nanokompozitov, poluchennykh polimerno-solevym metodom [The effect of polyvinylpyrrolidone on the structure and optical properties of ZnO-MgO nanocomposites obtained by the polymer-salt method], *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 2021, Vol. 129, No. 9, pp. 1176-1181.
21. *Vakalov D.S. i dr.* Effekt razmernogo kvantovaniya v nanochastitsakh ZnO, poluchennykh zol'-gel' metodom [The effect of dimensional quantization in ZnO nanoparticles obtained by sol-gel method], *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the North Caucasus State Technical University], 2012, No. 4, pp. 11-14.
22. *Berger R.* et al. Study on porosity in zinc oxide ultrathin films from three-step MLD Zn-hybrid polymers, *Materials*, 2021, Vol. 14, No. 6, pp. 1418.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Марьина Ульяна Андреевна – Северо-Кавказский федеральный университет; e-mail: ulyana-ne@mail.ru; г. Ставрополь, Россия; тел.: 89197368305; кафедра инфокоммуникаций-С; к.т.н.; доцент.

Газдинский Денис Леонидович – e-mail: tenden116@yandex.ru; кафедра инфокоммуникаций; аспирант.

Чапура Олег Михайлович – e-mail: ochapura@ncfu.ru; ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории технологии тонких плёнок и наногетероструктур научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета.

Михнев Леонид Васильевич – e-mail: lmikhnev@ncfu.ru; кафедра инфокоммуникаций; д.ф.-м.н.; профессор.

Бондаренко Евгений Алексеевич – e-mail: evabondarenko@ncfu.ru; кафедра инфокоммуникаций; к.ф.-м.н.; доцент.

Пигулев Роман Витальевич – e-mail: pigulev_r.v@mail.ru; кафедра инфокоммуникаций; к.т.н.; доцент.

Maryina Uliana Andreevna – North-Caucasus Federal University; e-mail: ulyana-ne@mail.ru; Stavropol', Russia; phone: +79197368305; the department of infocommunications-S; cand. of eng. sc.; associate professor.

Gazdinsky Denis Leonidovich – e-mail: tenden116@yandex.ru; the department of infocommunications; postgraduate student.

Chapura Oleg Mikhailovich – e-mail: ochapura@ncfu.ru; Lead engineer of the Research Laboratory of Thin Films and Nanoheterostructures Technology of Research and Laboratory Complex of Clean Zones Faculty of Physics and Technology.

Mikhnev Leonid Vasilevich – e-mail: lmikhnev@ncfu.ru; the department of infocommunications; dr. of phys. and math. sc.; professor.

Bondarenko Evgeny Alekseevich – e-mail: evabondarenko@ncfu.ru; the department of infocommunications; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Pigulev Roman Vitalievich – e-mail: pigulev_r.v@mail.ru; the department of infocommunications; cand. of eng. sc.; associate professor.