



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-37-44>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 54-31; 544.654

ФОРМИРОВАНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСАЖДЕННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ ОКСИДА ЦИНКА

ЯНУШКЕВИЧ К.О., ЧУБЕНКО Е.Б., БОНДАРЕНКО В.П.

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

Поступила в редакцию 1 октября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Цель работы заключалась в исследовании закономерностей формирования электрохимическим методом пленок оксида цинка, легированных никелем, а также регистрации и исследовании спектров фотолюминесценции и рамановского рассеяния. Осаждение пленок оксида цинка, легированных никелем, проводилось методом электрохимического осаждения на подложки кремния марки ЭКЭС-0,01 (111). Осаждение проводилось из водных растворов нитратов цинка и никеля в гальваностатическом режиме в диапазоне плотностей тока от 5 до 20 мА/см² и времени осаждения от 5 до 30 мин. На лазерном Рамановском спектрометре SOL Instruments Confotec NR500 проведено исследование рамановского рассеяния на пленках легированного никелем оксида цинка. Анализ рамановских спектров показал, что увеличение катодной плотности тока осаждения приводит к возрастанию концентрации примеси в пленках. Регистрация спектров фотолюминесценции образцов проводилась на лазерном спектральном измерительном комплексе на основе монохроматора-спектрографа SOLAR ТП MS 7504i, где в качестве источника возбуждающего излучения использовалась монохроматическая линия с длиной волны 345 нм, выделенная из спектра ксеноновой лампы при помощи двойного монохроматора Solar ТП DM160. Исследование показало, что интенсивность излучения растет с увеличением толщины осажденной пленки, а положение максимумов полосы излучения, в видимом диапазоне длин волн, на спектрах фотолюминесценции, остается неизменным при заданной плотности тока, независимо от продолжительности процесса осаждения. Изменение величины плотности катодного тока приводит к сдвигу положения максимума спектра фотолюминесценции, что указывает на перестройку структуры дефектов и примесей в легированном полупроводнике, приводящую к изменению положения соответствующих уровней в запрещенной зоне материала.

Ключевые слова: оксид цинка, электрохимическое осаждение, тонкие пленки, фотолюминесценция, рамановская спектроскопия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках задания 1.15 ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии».

Для цитирования. Янушкевич К.О., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование и оптические свойства осажденного электрохимическим методом легированного никелем оксида цинка. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 37-44.

SYNTHESIS AND OPTICAL PROPERTIES OF Ni-DOPED ZnO GROWN BY ELECTROCHEMICAL DEPOSITION

KONSTANTIN O. YANUSHKEVICH, EUGENE B. CHUBENKO, VITALY P. BONDARENKO

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

Submitted 1 Oktober 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This paper is targeted at studying the patterns of deposition by electrochemical method of Ni-doped ZnO films, including registering and analyzing their photoluminescence and Raman scattering spectra. We have studied the electrochemical deposition of nickel-doped zinc oxide films on single-crystal silicon substrates from aqueous solutions of zinc and nickel nitrates. The deposition was conducted from aqua solutions of Zn and Ni nitrates in a standard double-electrode electrochemical cell in galvanostatic mode with the current density from 5 to 20 mA/cm² and deposition time from 5 to 30 min. The Raman scattering on nickel-doped zinc oxide films was examined via laser Raman spectrometer SOL Instruments Confotec NR500. The analysis of Raman spectra showed that an increase of cathodic current density deposition leads to an enhanced concentration of a doping agent in the films. Photoluminescence spectra of the samples were registered on a laser spectral measuring system based on monochromator-spectrograph SOLAR TII MS 7504i where a monochromatic line with the 345-nm wavelength, which was extracted from the spectrum of Xe-lamp by means of double monochromator Solar TII DM160, was used as the excitation source. The research demonstrates that the emission intensity increases with the thickness of the deposited film, and the position of maximums of the radiation line remains unchanged in a visible wavelength range and on photoluminescence spectra with fixed current density. The change in the density of the cathode current leads to a shift in the position of the photoluminescence spectra maximum, which indicates restructuring of defects and dopant atoms in the doped semiconductor, which in turn changes the position of the corresponding levels in the band gap of the material.

Keywords: zinc oxide, electrochemical deposition, thin films, photoluminescence, Raman scattering.

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

Gratitude. This work was carried out in the scope of Assignment 1.15 of the State Program of Scientific Research of Republic of Belarus “Physical materials science, new materials and technologies”.

For citation. Yanushkevich K.O., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Synthesis and optical property of Ni-doped ZnO grow by electrochemical deposition. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 37-44.

Введение

Тонкопленочные покрытия из оксидов металлов являются обширной группой материалов современной микро- и наноэлектроники, наиболее востребованных в оптоэлектронных приборах, фотовольтаике и функциональной электронике. Оксид цинка представляет собой прямозонный полупроводник с большой шириной запрещенной зоны (3,37 эВ при 300 К) и высокой энергией связи экситонов (60 мэВ). Среди них оксид цинка (ZnO) и композитные материалы на его основе являются одними из наиболее перспективных и многофункциональных материалов благодаря уникальной совокупности электрических, оптических и химических свойств [1]. Будучи нетоксичным широкозонным полупроводником с высокой подвижностью электронов, ZnO является перспективным материалом для синтеза наноструктур и их последующего применения в солнечных элементах [2].

Значительно изменяются свойства и расширяется область применения ZnO при вводе в его объем атомов различных примесей. Легирование ZnO позволяет модифицировать и управлять его электрофизическими, оптическими и структурными свойствами. Установлено,

что исходное ферромагнитное состояние ZnO стабилизируется легированием переходными металлами железа, кобальта или никеля. С точки зрения практического применения имеется возможность реализации ферромагнетика с высокой температурой Кюри [3]. Наличие примесных атомов в структуре ZnO также существенно влияет на люминесцентные свойства полупроводника и позволяет управлять длиной волны излучаемого им света, уменьшать его удельное сопротивление, изменять спектры пропускания и поглощения.

Существует много различных способов получения тонких пленок ZnO, легированных примесями переходных металлов. Среди множества методов метод катодного электроосаждения из водных растворов отличается простотой, экономичностью и хорошим качеством получаемых пленок без использования более сложного вакуумного оборудования [4]. Кроме того, он позволяет проводить синтез и легирование пленок ZnO в едином процессе.

Основной задачей данной работы было исследование процесса электрохимического синтеза материалов на основе ZnO и никеля осаждением из водных растворов электролита, а также их оптических и структурных свойств для разработки технологии формирования функциональных покрытий для устройств опто- и магнитоэлектроники.

Методика проведения эксперимента

Формирование пленок ZnO проводилось методом электрохимического осаждения на подложках монокристаллического кремния марки ЭКЭС-0,01 с кристаллографической ориентацией (111). В качестве прекурсоров для осаждения ZnO и легирования его примесью никеля использовались водные растворы 0,1М нитрата цинка $Zn(NO_3)_2$ и 0,01М нитрата никеля $Ni(NO_3)_2$. Для очистки кремниевых подложек от органических загрязнений использовался насыщенный безводный раствор оксида хрома (VI) в концентрированной серной кислоте с последующей длительной промывкой в деионизованной воде. Далее подложки помещались на 5 мин в 4,5 % водный раствор плавиковой кислоты для удаления с их поверхности слоя оксида кремния.

Катодное осаждение ZnO проводилось в стандартной двухэлектродной электрохимической ячейке. В качестве рабочего электрода использовалась кремниевая подложка, в качестве вспомогательного – платиновая проволока. Процесс осаждения контролировался при помощи управляемого компьютером потенциогальваностата Metrohm Autolab PGSTAT 302N. Для осаждения использовался гальваностатический режим при плотностях тока 5–20 мА/см² и температуре электролита 80 °С.

Спектры фотолюминесценции регистрировались при комнатной температуре на лазерном спектральном измерительном комплексе на основе монохроматора-спектрографа SOLAR TII MS 7504i. Детектирование фотолюминесценции происходило цифровой камерой с кремниевой ПЗС матрицей. В качестве источника возбуждающего излучения использовалась ксеноновая лампа мощностью 1000 Вт, из спектра которой, при помощи двойного монохроматора Solar TII DM160, выделялась монохроматическая линия с длиной волны 345 нм.

Анализ химического состава и кристаллической структуры полученных пленок ZnO проводился методом рамановской спектроскопии на 3D-сканирующем лазерном Рамановском спектрометре SOL Instruments Confotec NR500, в котором в качестве источника возбуждающего излучения использовался лазер с длиной волны 473 нм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры рамановского рассеяния пленок легированного никелем ZnO, сформированных при различной плотности тока. Полученные зависимости показывают, что с увеличением плотности тока (j) и времени осаждения (t) толщина пленки увеличивается, о чем можно судить по увеличению интенсивности пиков ZnO и убыванию интенсивности пиков кремния.

Оксид цинка относится к материалам группы симметрии C_{6v}^4 и обладает шестью ветвями оптических фононов в точке Г (центре зоны Бриллюэна) $\Gamma = A_1 + E_1 + 2B_1 + 2E_2$. Фононные моды симметрии A_1 и E_1 полярны в точке Г и расщепляются на продольные (LO)

и поперечные (TO) оптические колебания. Неполлярные фононные моды симметрии E_2 имеют две частоты колебаний: $E_2(low)$, отвечающую колебаниям атомов кислорода и $E_2(high)$ – колебаниям атомов цинка. Моды B_1 – «немые моды» и не проявляются в оптических спектрах [5].

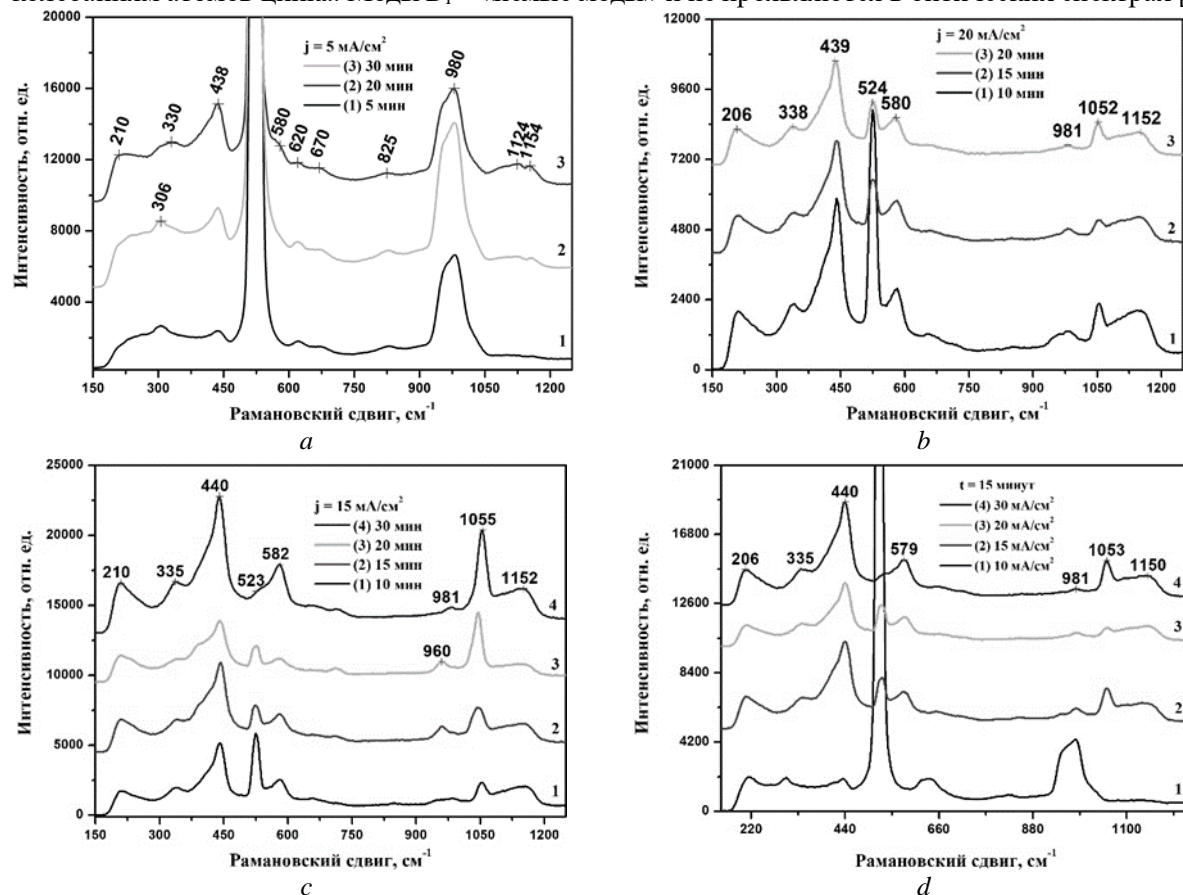


Рис. 1. Спектры рамановского рассеяния пленок легированного никелем ZnO, полученных электрохимическим методом: при постоянной плотности тока 5 (a), 15 (b), 20 (c) mA/cm^2 для различного времени осаждения; при постоянном времени осаждения 15 мин для различных плотностей тока (d)

Fig. 1. Raman spectra of Ni-doped ZnO films, grown by electrodeposition at constant current density of 5 (a), 15 (b), 20 (c) mA/cm^2 and constant depositing time of 15 minutes (d)

На всех полученных спектрах представлены полосы, соответствующие колебательным модам, характерным для кристаллических ZnO и кремния: $E_2(high)$ и $A_1(LO)$ ZnO, которые располагаются соответственно на частотах 440 и 580 cm^{-1} , моды с максимумами интенсивности при 206, 335 и 1040–1200 cm^{-1} , относящиеся к вибрациям второго порядка ZnO, и полосы с максимумами около 523, 620, 980 cm^{-1} , связанные с подложкой из монокристаллического кремния. Мода $E_1(LO)$ зависит от наличия и концентрации примесей и дефектов кристаллической решетки ZnO [6]. Интенсивный пик, расположенный около 440 cm^{-1} , соответствует неполярной моде $E_2(high)$ и указывает на то, что полученные пленки имеют гексагональную кристаллическую структуру типа вюрцита, наиболее характерную для ZnO. Увеличение интенсивности этого пика, по сравнению с пиками других колебательных мод, является показателем лучшего качества кристаллической структуры ZnO [7]. Доминирующее влияние на моду $E_2(high)$ оказывают колебания кислородных связей. Выраженная асимметрия обусловлена неупорядоченностью решетки, а также негармоническими фонон-фононными взаимодействиями [6]. Широкий пик, расположенный около 584 cm^{-1} , относится к колебательной моде $E_1(LO)$, которая характерна для объемного, тонкопленочного и нанокристаллического ZnO. В [8] сообщают, что положение максимума интенсивности пика полосы $E_1(LO)$ смещается с характерной для объемного материала частоты 591 cm^{-1} на 588 и 584 cm^{-1} для частиц размером 8,5 и 4 нм соответственно. Однако в [7] было отмечено, что сдвиг пика в сторону меньших частот не всегда соответствует именно такой размерности кристаллов, однако всегда связан с уменьшением размера кристаллитов ZnO. На всех

расположенных выше спектрах (рис. 1) наблюдается полоса $E_1(LO)$, максимум которой сдвинут на частоту 580 см^{-1} . Поэтому можно предположить, что осажденные пленки состоят из кристаллитов с размером около 10 нм.

Наличие колебательной моды с максимумом около 530 см^{-1} свидетельствует о наличии в составе пленки ZnO примеси никеля [9]. Однако использованный в качестве материала подложки монокристаллический кремний маскирует данную моду собственной модой (около 521 см^{-1}). Исключения составляют толстые пленки ZnO, в которых соответствующие кремнию колебательные моды уже не проявляются на спектрах рамановского рассеяния. С увеличением времени осаждения ZnO при постоянной плотности тока, а значит, и с увеличением количества сформированного осадка, интенсивность полосы с максимумом около 1050 см^{-1} возрастает, в то время как полоса с пиком 1150 см^{-1} постепенно сглаживается, что соответствует увеличению концентрации дефектов, создаваемых в кристаллической решетке ZnO ионами примеси (замещение атомов кислорода и/или цинка атомами никеля) с ростом толщины пленки [10]. Это указывает на увеличение относительной концентрации примеси никеля в составе пленки ZnO.

Спектры фотолюминесценции полученных тонких пленок ZnO:Ni представлены на рис. 2.

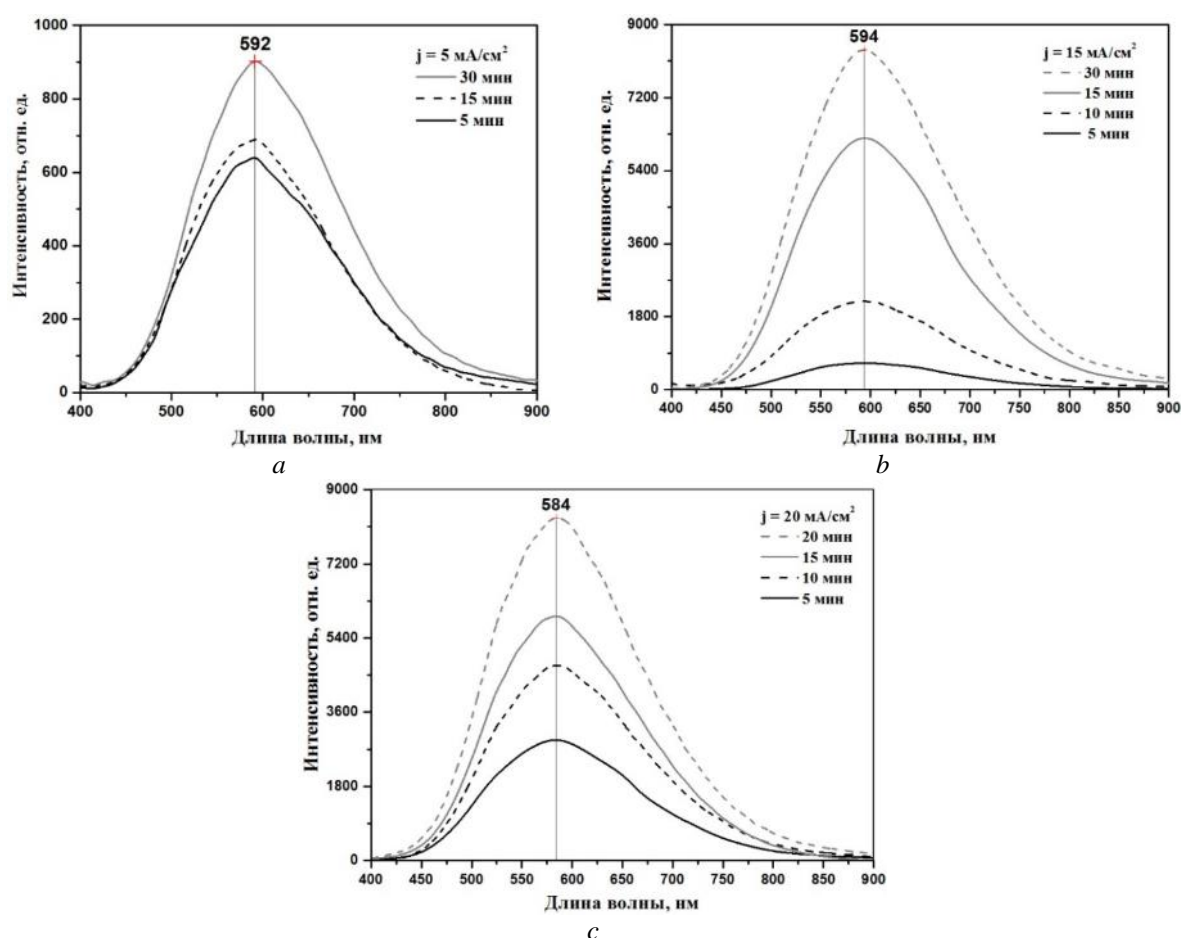


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции пленок легированного никелем ZnO, полученных электрохимическим методом при постоянной плотности тока осаждения: 5 (a), 15 (b), 20 (c) mA/cm^2
Fig. 2. Photoluminescence spectra of Ni-doped ZnO films grown by electrodeposition at a constant current density of 5 (a), 15 (b), 20 (c) mA/cm^2

На всех исследованных спектрах наблюдается единственная интенсивная интегральная полоса фотолюминесценции в видимом диапазоне длин волн, которая соответствует излучательным переходам через глубокие уровни в запрещенной зоне полупроводникового ZnO ($\sim 2,12 \text{ эВ}$). Это полоса должна состоять из нескольких отдельных более узких полос, соответствующих процессам излучательной рекомбинации, протекающим по различным путям. Обычно происхождение наблюдаемой желтой фотолюминесценции связывают

с вакансиями и междоузельными атомами кислорода в кристаллической решетке ZnO [11]. Положение максимума интегральной полосы фотолюминесценции имеет постоянное значение в пределах одной величины плотности тока осаждения. Из этого можно предположить, что при постоянной плотности тока количественные соотношения дефектов, через энергетические уровни которых проходят процессы излучательной рекомбинации, остаются постоянными.

При аппроксимации спектров фотолюминесценции набором функций симметричного распределения Гаусса были определены положения максимумов полос фотолюминесценции, соответствующих отдельным излучательным процессам в полупроводники и установлена их природа (рис. 3). Как видно из рис. 3, на всех спектрах фотолюминесценции присутствует три основные группы повторяющихся полос. Максимум интенсивности полос первой группы (1) располагается около 525 нм (что соответствует энергии излучения 2,36 эВ). Второй (2) – 570 нм (2,17 эВ). Третьей (3) – 625 нм (1,98 эВ). Полученные результаты для (1)–(3) групп хорошо согласуются с теоретически рассчитанными в работе [12] энергиями связанных с дефектами кристаллической решетки состояний в запрещенной зоне ZnO. Поэтому наблюдаемые полосы фотолюминесценции обусловлены излучательными переходами со дна зоны проводимости полупроводника на уровни, связанные с комплексами вакансий кислорода и междоузельных атомов цинка (1), атомами кислорода в междоузлиях цинка (2) и вакансиями кислорода в узлах кристаллической решетки (3). Данные полосы встречаются при аппроксимации всех полученных спектров, и указанные излучательные переходы являются основной причиной фотолюминесценции оксида цинка в видимом диапазоне.

В спектрах фотолюминесценции исследованных образцов также выделяются еще две группы полос: первая, с максимумом, расположенным около 700 нм (1,77 эВ) (4), и вторая – около 745 нм (1,66 эВ) (5). Наиболее вероятными источником полос могут быть излучательные переходы на уровни вакансий кислорода со дна зоны проводимости и с донорных уровней никеля соответственно. Из рисунка видно, что при достижении некоторой величины прошедшего через образец количества электричества, составившего 18 кКл, в спектрах фотолюминесценции появляется полоса излучения (5) и исчезает полоса (4), что подтверждает установленное по спектрам рамановского рассеяния увеличение относительной концентрации никеля при увеличении продолжительности процесса осаждения и, как показывают результаты фотолюминесцентной спектроскопии, плотности тока. Также при этом наблюдается сдвиг максимумов группы в красную сторону с 625 к 640 нм (от 1,98 к 1,93 эВ), что может быть следствием перестройки кристаллической структуры с увеличением толщины пленки, и, как следствие, изменение положения уровней вакансий кислорода.

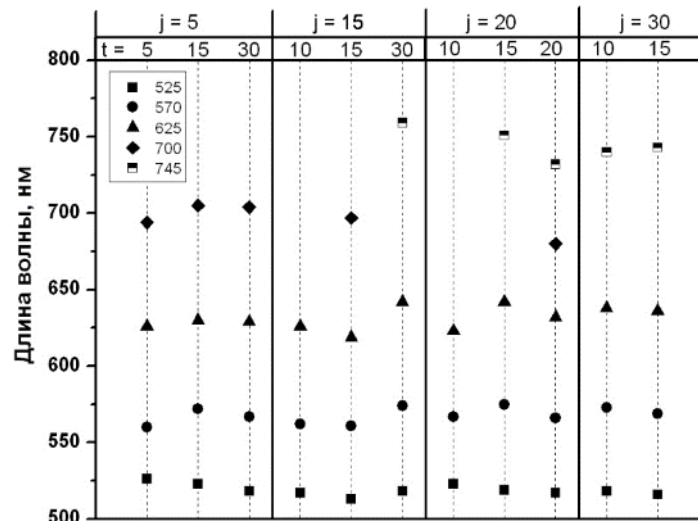


Рис. 3. Расположение максимумов функций симметричного распределения Гаусса, которым были аппроксимированы спектры фотолюминесценции для различной плотности тока и времени осаждения

Fig. 3. The position of the maximums of Gaussian functions to which photoluminescence spectra for different current density and deposition time were approximated

Заклучение

Методом электрохимического осаждения получены пленки легированного никелем ZnO на подложках из монокристаллического кремния. Исследованы закономерности формирования и легирования ZnO никелем. Проведено исследование пленок методом рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии. Показано, что спектры рамановского рассеяния полученных пленок содержат набор пиков, соответствующих кристаллическому ZnO с гексагональной кристаллической решеткой типа вюрцита. Смещение максимума колебательной моды $E_1(LO)$ на 580 см^{-1} указывает на то, что полученные пленки могут состоять из кристаллитов с характерным размером около 10 нм. Интенсивная колебательная мода с максимумом около 440 см^{-1} , соответствующая неполярной моде $E_2(high)$, имеет заметную симметрию, из чего следует, что полученные пленки ZnO отличаются хорошим качеством кристаллической решетки.

Полученные пленки ZnO демонстрируют единственную широкую полосу фотолюминесценции в видимом диапазоне длин волн. Анализ полученных спектров показал, что переходы, связанные с процессами излучательной рекомбинации, преимущественно происходят из зоны проводимости на энергетические уровни дефектов в запрещенной зоне ZnO – вакансий и междоузельных атомов кислорода, а также комплексов вакансий кислорода и междоузлий цинка. Увеличение количества проходимого в ходе осаждения через образцы количества электричества приводит к изменению положения энергетических уровней дефектов кислорода в запрещенной зоне ZnO.

Наличие на рамановских спектрах моды колебаний около 530 см^{-1} , интенсивной моды около 1050 см^{-1} и слабой по сравнению с ней моды 1150 см^{-1} указывает на легирование ZnO никелем. Увеличение относительной разницы в интенсивностях последних двух режимов в пользу 1050 см^{-1} предполагает увеличение относительного количества примеси никеля в составе пленки ZnO.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработки технологии изготовления оптоэлектронных и магнитоэлектронных приборов на основе ZnO, легированного переходными металлами.

Список литературы / References

1. Özgür Ü, Alivov Y, Liu C, Teke A, Reshchikov M, Dogan S, Avrutin V, Cho S, Morkoç H. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *J. Appl. Phys.* 2005;98:041301. DOI: 10.1063/1.1992666.
2. Consonni V., Briscoe J., Kärber E., Li X., Cossuet T. ZnO nanowires for solar cells: a comprehensive review. *Nanotechnol.* 2019;30(36):362001. DOI: 10.1088/1361-6528/ab1f2e.
3. Sato K., Katayama-Yoshida H. Stabilization of ferromagnetic states by electron doping in Fe-, Co- or Ni-Doped ZnO. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2001;40:334-336. DOI: 10.1143/JJAP.40.L334.
4. Izaki M., Omi T. Electrolyte optimization for cathodic growth of zinc oxide films. *J. Electrochem. Soc.* 1996;143(3):53-55. DOI: 10.1002/chin.199633014.
5. Redka D., Mukhin N., Zakharov I. Variations in optical and structural properties of zinc oxide films after laser processing. *Technical Physics.* 2016;6:1744-1746. DOI: 10.1134/S1063784216110207.
6. Scepanovic M., Grujić-Brojčin M., Vojisavljevic K., Bernik S., Sreckovic T. Raman study of structural disorder in ZnO nanopowders. *J. Raman Spectrosc.* 2010;41(9):914-921. DOI: 10.1002/jrs.2546.
7. Singh N.K., Tripathi N., Rath S., Subramanian A. Structural, morphological, and optical characterization of ZnO nanostructures fabricated by electrochemical deposition. *J. Nanosci Nanotechnol.* 2009;9(9):5608-5613. DOI: 10.1166/jnn.2009.1149.
8. Rajalakshmi M., Arora A., Bendre B., Mahamuni S. Optical phonon confinement in zinc oxide nanoparticles. *J. Appl. Phys.* 2000;87(5):2445-2448. DOI: 10.1063/1.372199.
9. Vijayaprasath G., Murugan R., Subramanian P., Prabhu N., Mahalingam T., Hayakawa Y., Ravi G. Role of nickel doping on structural, optical, magnetic properties and antibacterial activity of ZnO nanoparticles. *Mater. Res. Bull.* 2016;76:48-61. DOI: 10.1016/j.materresbull.2015.11.053.
10. Tripathi N., Kalimuthu V., Rath S. Raman spectroscopic study of structural evolution of electrochemically deposited ZnO films with deposition time. *Mater. Chem. Phys.* 2011;126(3):568-572. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.01.026.

11. Lima SAM, Sigoli F, Miguel J, Davolos M. Luminescent properties and lattice defects correlation on zinc oxide. *Int. J. Inorg. Mater.* 2001;3:749-754. DOI: 10.1016/S1466-6049(01)00055-1.
12. Djurišić A., Leung Y.H. Optical Properties of ZnO Nanostructures. *Small.* 2006;2:944-961. DOI: 10.1002/smll.200600134.

Вклад авторов

Янушкевич К.О. выполнил изготовление образцов легированного никелем оксида цинка в соответствии с выбранной методикой, а также регистрацию и графическое оформление спектров рамановского рассеяния и спектров фотолюминисценции. Принимал участие в интерпритации полученных результатов.

Чубенко Е.Б. принимал участие в выборе методик формирования и исследования полученных образцов, а также в интерпритации полученных результатов.

Бондаренко В.П. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований.

Authors contribution

Yanushkevich K.O. produced samples of Ni-doped ZnO in accordance with the chosen method and carried out registration and graphic design of Raman scattering and photoluminescence spectra. He also took part in the interpretation of the results.

Chubenko E.B. participated in the selection of methods to create and study the obtained samples, as well as in the interpretation of the results.

Bondarenko V.P. set the tasks to be solved during the research.

Сведения об авторах

Янушкевич К.О., инженер-электроник НИЛ 4.8 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Yanushkevich K.O., electronic engineer, R&D Laboratory 4.8 BSUIR, undergraduate of the Department of Micro and Nanoelectronics of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Chubenko E.B., PhD, Leading Researcher, R&D Laboratory 4.3 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarenko V.P., PhD, Associate Professor, Head of R&D Laboratory 4.3 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Беларусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-298-77-50;
e-mail: yanushkevichconstantine@gmail.com
Янушкевич Константин Олегович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. + 375-29-298-77-50;
e-mail: yanushkevichconstantine@gmail.com
Yanushkevich Konstantin Olegovich