



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-17-25>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.315.592; 544.653

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА И МЕДИ

ТКАЧЁНОК Н.М., ЧУБЕНКО Е.Б., БОНДАРЕНКО В.П.

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

*Поступила в редакцию 11 сентября 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Методом электрохимического осаждения на подложках из монокристаллического кремния получены структуры на основе ZnO и Cu, представляющие собой поликристаллический композит, состоящий из кристаллического ZnO с кристаллографической ориентацией (002) и (101), легированного Cu, и кристаллитов металлической Cu. При исследовании полученных пленок методом рамановской спектроскопии было подтверждено образование кристаллического ZnO. Было получено, что на спектрах комбинационного рассеяния всех образцов присутствует полоса с максимумом, относящаяся к колебательной моде ZnO  $2A_1(LO)$ . Также на спектрах каждого из образцов присутствует полоса в области  $649\text{ см}^{-1}$ , не связанная с колебательными модами решетки собственного кристаллического ZnO. Показано, что при увеличении плотности тока осаждения в диапазоне 2–10  $\text{mA}/\text{cm}^2$  концентрация Cu в материале снижается, при этом уменьшается количество кластеров Cu, но возрастает степень легирования ZnO ионами Cu. Композиты на основе ZnO демонстрируют широкую полосу фотолюминесценции в диапазоне длин волн 500–700 нм, связанную с наличием вакансий и междоузельных атомов кислорода в кристаллической решетке. При плотности тока осаждения  $5\text{ mA}/\text{cm}^2$  наблюдается коротковолновый сдвиг полосы фотолюминесценции, обусловленный легированием Cu, так как в запрещенной зоне создаются примесные уровни, связанные с присутствием Cu в пленках ZnO. Наблюдалось изменение интенсивности излучения при плотности тока  $10\text{ mA}/\text{cm}^2$ , что обусловлено большей толщиной полученных пленок. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии изготовления оптоэлектронных и фотовольтаических приборов, фотокаталитических покрытий на основе ZnO.

**Ключевые слова:** электрохимическое осаждение, нанокompозитные материалы, рентгеновская дифрактометрия, рамановская спектроскопия, фотолюминесценция.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Данная работа выполнена в рамках задания 2.1.02 ГПНИ Республики Беларусь «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задания 2.21 ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии». Авторы выражают благодарность Д.В. Жигулину за проведение растровой электронной микроскопии и ЭДР-спектроскопии образцов.

**Для цитирования.** Ткачёнок Н.М., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование электрохимическим методом композитных материалов на основе оксида цинка и меди. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 17-25.

## ELECTROCHEMICAL FORMING OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON ZINC AND COPPER OXIDE

NIKITA M. TKACHYONOK, EUGENE B. CHUBENKO, VITALY P. BONDARENKO

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

*Submitted 11 September 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** Structures based on ZnO and Cu, which are a polycrystalline composite consisting of crystalline ZnO with a crystallographic orientation of (002) and (101) doped with Cu and crystalline metallic Cu, were obtained by electrochemical deposition on substrates of single crystal origin. In the study of the obtained films by Raman spectroscopy, the forming of crystalline ZnO was confirmed. ZnO  $2A_1$  (LO), also in the spectra of each of the bands present in the  $649\text{ cm}^{-1}$  region, not related to the vibrating lattice modes of the intrinsic crystalline ZnO. It was shown that with an increase in the deposition current density in the range of  $2\text{--}10\text{ mA/cm}^2$ , the concentration of Cu in the material weakens, while the number of Cu clusters decreases, but the degree of doping of ZnO with Cu ions increases. ZnO-based composites exhibit a broad photoluminescence band in the long wavelength range of  $500\text{--}700\text{ nm}$ , related with vacancies and interstitial oxygen atoms in the crystal lattice. At a current density of  $5\text{ mA/cm}^2$ , short-wavelength shifts of the photoluminescence bands are observed, due to the doping of Cu, since impurity levels are created in the band gap associated with the presence of Cu in ZnO films. A change in the radiation intensities was observed at a current density of  $10\text{ mA/cm}^2$ , which is due to the greater thickness of the obtained films. The results can be used to develop the manufacturing technology of optoelectronic and photovoltaic devices, photocatalytic coatings based on ZnO.

**Keywords:** electrochemical deposition, nanocomposite materials, X-ray diffractometry, Raman spectroscopy, photoluminescence.

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

**Acknowledgments.** This work was carried out in the framework of assignment 2.1.02 of the State Scientific Inspection of the Republic of Belarus “Photonics, Optoelectronics and Microelectronics”, assignment 2.21 of the State Scientific Inspection of the Republic of Belarus “Physical Materials Science, New Materials and Technologies”. The authors also thank D.V. Zhigulin for conducting scanning electron microscopy and EDR spectroscopy of samples.

**For citation.** Tkachyonok N.M., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Electrochemical forming of composite materials based on zinc and copper oxide. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 17-25.

### Введение

Оксид цинка (ZnO) представляет собой уникальный материал, сочетающий в себе множество разнообразных свойств. Он является прямозонным полупроводником с большой шириной запрещенной зоны, равной  $3,37\text{ эВ}$  при  $300\text{ K}$  [1]. Энергия связи экситонов в ZnO ( $60\text{ мэВ}$ ) [1] значительно выше, чем в других широзонных полупроводниках, таких как CdS ( $30\text{ мэВ}$ ) [2] или GaN ( $25\text{ эВ}$ ) [3]. ZnO обладает коэффициентом пропускания в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах не менее  $80\%$ , проявляет пьезоэлектрические и фотокаталитические свойства [4]. Благодаря необычному их сочетанию в одном материале, ZnO широко используется в форме наночастиц, тонких пленок и массивов наноструктур в оптоэлектронных и светоизлучающих устройствах, фотокаталитических покрытиях, фотовольтаических приборах и «прозрачной» электронике [5].

Легирование ZnO определенными химическими элементами позволяет управлять его оптическими и электрофизическими свойствами [4]. Такой подход является более предпочтительным при оптимизации оптических свойств ZnO. Известно, что металлы группы IB – серебро (Ag) и медь (Cu) – являются быстродиффундирующими примесями

в полупроводниковых соединениях. Диффузия Cu в ZnO приводит к изменению структуры его кристаллической решетки и, соответственно, его физических свойств. Среди других элементов группы IB Cu хорошо подходит в качестве легирующей примеси для повышения эффективности люминесценции, смещая пик фотолюминесценции в синюю область, что было показано в работе [6]. ZnO может быть получен большим количеством лабораторных и промышленных методов: магнетронным распылением [7, 8], молекулярно-лучевой эпитаксией [9], импульсным лазерным осаждением [10], химическим и электрохимическим осаждением [11]. Метод электрохимического осаждения привлекателен низкой стоимостью и технологической простотой реализации. Этот метод применим для осаждения металлов и их оксидов, в том числе и ZnO. Он позволяет совместно осаждать из одного раствора несколько материалов и, регулируя концентрацию исходных реагентов, управлять степенью легирования или составом получаемых структур. Изменяя плотность тока, концентрацию реагентов в растворе, температуру и pH, можно контролировать структуру осаждаемого материала, его состав и физические свойства.

Получение тонкопленочных гетероструктур и композитных материалов на их основе простыми низкотемпературными методами является важной задачей для создания технологии изготовления фотокаталитических покрытий, фотовольтаических и оптоэлектронных приборов. В этой связи в данной работе были проведены исследования закономерностей формирования электрохимическим методом композитных материалов на основе пленок ZnO и Cu из водных растворов электролита.

### Методика эксперимента

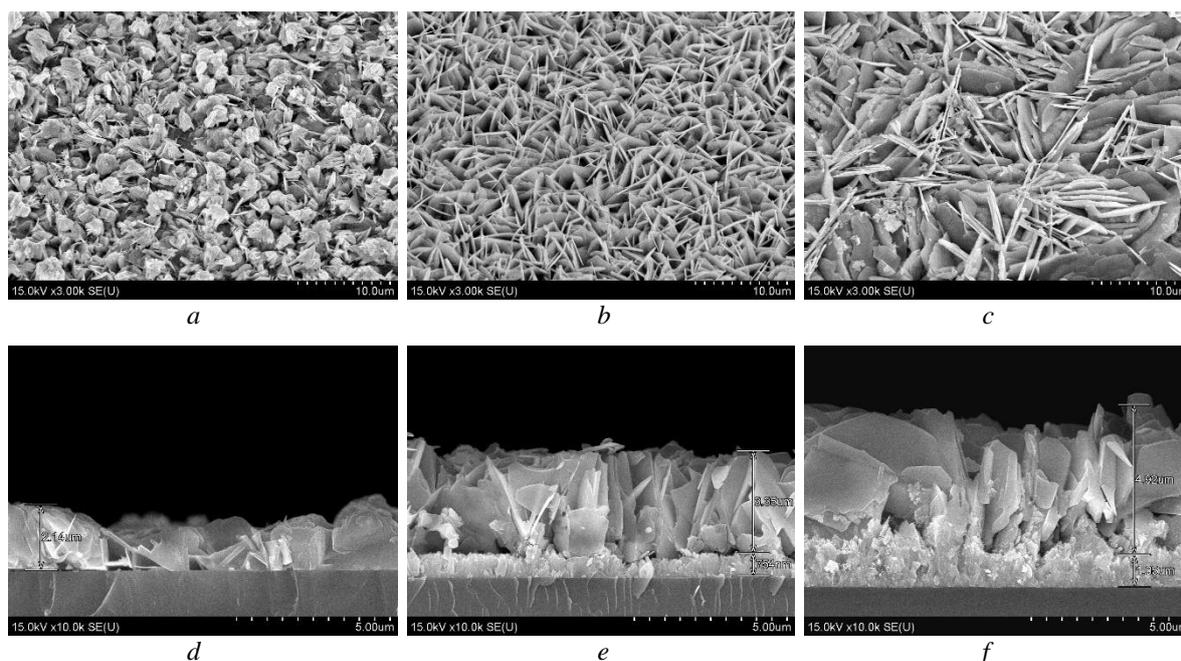
Для формирования композитных материалов на основе ZnO и Cu в качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния электронного типа проводимости, легированного сурьмой марки КЭС с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см и кристаллографической ориентацией (111). Поверхность подложек предварительно очищалась в насыщенном растворе оксида хрома (VI), в концентрированной серной кислоте и 4,5 % растворе плавиковой кислоты. Затем подготовленная подложка помещалась в водный раствор электролита, содержащий нитрат цинка  $Zn(NO_3)_2$  и сульфат меди  $CuSO_4$  в концентрации 0,1 М и 1 мМ соответственно. Раствор в процессе осаждения нагревался до температуры 80 °С. Осаждение полупроводникового соединения осуществлялось в гальваностатическом режиме при катодной поляризации при плотности тока 2–10 мА/см<sup>2</sup> в течение 5 мин. Процесс проводился в стандартной двухэлектродной ячейке. В качестве вспомогательного электрода использовалась платиновая спираль, располагавшаяся напротив подложки на достаточном удалении от нее для равномерного распределения силовых линий тока.

Структура образцов ZnO была исследована методом растровой электронной микроскопии на микроскопе Hitachi S-4800. Элементный состав исследовался методом энергодисперсионной рентгеновской (ЭДР) спектроскопии с помощью ЭДР-спектрометра Bruker QUANTAX 200. Спектры фотолюминесценции были записаны при помощи измерительного комплекса на основе монохроматора-спектрографа Solar TII MS 7504i, оснащенного охлаждаемой элементом Пельтье цифровой камерой с ПЗС-матрицей Hamamatsu S7031-1006S. Для возбуждения фотолюминесценции использовалась ксеноновая лампа мощностью 1 кВт. Монохроматические линии из широкого спектра лампы выделялись при помощи двойного монохроматора Solar TII DM 160. Во всех экспериментах длина волны возбуждающего света составляла 345 нм. Спектры комбинационного рассеяния образцов были исследованы на сканирующем лазерном конфокальном рамановском микроскопе SOL Instruments Confotec NR500 с использованием лазера Cobolt Blues 25 DPSS с рабочей длиной волны 473 нм. Все оптические измерения проводились при комнатной температуре ~20 °С.

## Результаты экспериментов

На рис. 1 приведены электронные микрофотографии поверхности и поперечного скола полученных композитных материалов на основе ZnO и Cu. Осажденные полупроводниковые пленки состоят из двух слоев, между которыми видна хорошо различимая на фотографиях граница. Верхний слой состоит из массива пластинчатых кристаллов. При возрастании плотности тока осаждения их размер постепенно увеличивается от 2 мкм при 2 мА/см<sup>2</sup> до 4 мкм при 5 мА/см<sup>2</sup> и до 7,5 мкм при 10 мА/см<sup>2</sup>. Нижний сплошной слой виден только на сколе образцов, полученных при плотности тока 5 и 10 мА/см<sup>2</sup>. На образце, соответствующем 2 мА/см<sup>2</sup>, данный слой отсутствует. Суммарная толщина полученных пленок увеличивается в соответствии с электрохимическим законом Фарадея пропорционально плотности тока и составляет 2,14, 4,14 и 5,97 мкм при 2, 5 и 10 мА/см<sup>2</sup> соответственно. Также с увеличением плотности тока возрастает и толщина плотного нижнего слоя композитного материала, от 0,754 мкм при плотности тока 5 мА/см<sup>2</sup> до 1,05 мкм при 10 мА/см<sup>2</sup>. При этом разница плотности тока составляет 50 %, а толщины составляют разницу в 28 %, что обусловлено протеканием побочных реакций в процессе осаждения, например, связанных с выделением H<sub>2</sub>.

По данным ЭДР-спектроскопии, сформированные электрохимическим методом композитные пленки ZnO с Cu содержат приблизительно 66 ат.% кислорода (O) и 31 ат.% цинка (Zn). Это отклонение от стехиометрического соотношения компонентов в ZnO (C<sub>O</sub>/C<sub>Zn</sub> = 50/50 ат.%) говорит о наличии пероксида цинка (ZnO<sub>2</sub>) или гидроксида цинка (Zn(OH)<sub>2</sub>) в их составе. В зависимости от плотности тока изменяется и процент содержания Cu: 3 ат.% при 2 мА/см<sup>2</sup>, 1,74 % при 5 мА/см<sup>2</sup> и 1 ат.% при 10 мА/см<sup>2</sup>.



**Рис. 1.** Электронные микрофотографии поверхности и поперечного скола композитных материалов на основе ZnO и Cu, сформированных при плотности тока 2 (a, d), 5 (b, e), 10 мА/см<sup>2</sup> (c, f)

**Fig. 1.** Electron micrographs of the surface and transverse cleavage of composite materials based on ZnO and Cu formed at a current density of 2 (a, d), 5 (b, e), 10 mA/cm<sup>2</sup> (c, f)

По данным рентгеновской дифрактометрии, полученные композиты независимо от плотности тока осаждения состоят из кристаллитов ZnO с кристаллографической ориентацией (002) и (101) (рис. 2), а также небольшой концентрации кристаллитов ZnO с широким набором других ориентаций. Также на рентгенограмме присутствуют линии, соответствующие кристаллическим фазам Cu с кристаллографической ориентацией (111), (200), (220) и (311).

При исследовании полученных пленок методом рамановской спектроскопии было подтверждено образование кристаллического ZnO. На рис. 3, a видно, что на спектрах комбинационного рассеяния всех образцов присутствует полоса с максимумом около 1039 см<sup>-1</sup>,

относящаяся к колебательной моде ZnO  $2A_1(LO)$ , и соответствующая волновому числу  $442\text{ см}^{-1}$  полоса, связанная с модой ZnO  $E_2^{high}$  [12]. На спектре комбинационного рассеяния образца, полученного при плотности тока  $2\text{ мА/см}^2$ , присутствует также ряд полос, соответствующих другим колебательным модам ZnO: полоса с максимумом, расположенным около  $324\text{ см}^{-1}$ , соответствующая моде  $E_1^{high}-E_1^{low}$ , полоса на  $568\text{ см}^{-1}$ , связанная с модой  $A_1(LO)$ , и полоса  $1122\text{ см}^{-1}$ , обусловленная модой  $2LO$  [12]. Также на спектрах каждого из образцов присутствует полоса в области  $649\text{ см}^{-1}$ , не связанная с колебательными модами решетки собственного кристаллического ZnO.

На спектрах фотолюминесценции (рис. 3, *b*) образцов композитных материалов на основе ZnO и Cu выделяется одна широкая полоса с максимумом в желто-оранжевом диапазоне спектра. Для образцов, полученных при плотности тока 2 и  $10\text{ мА/см}^2$ , положение ее максимума практически совпадает и приходится на длину волны  $593\text{ нм}$ . На образце, полученном при плотности тока  $5\text{ мА/см}^2$ , максимум сдвигается в зеленую область, на длину волны  $566\text{ нм}$ .

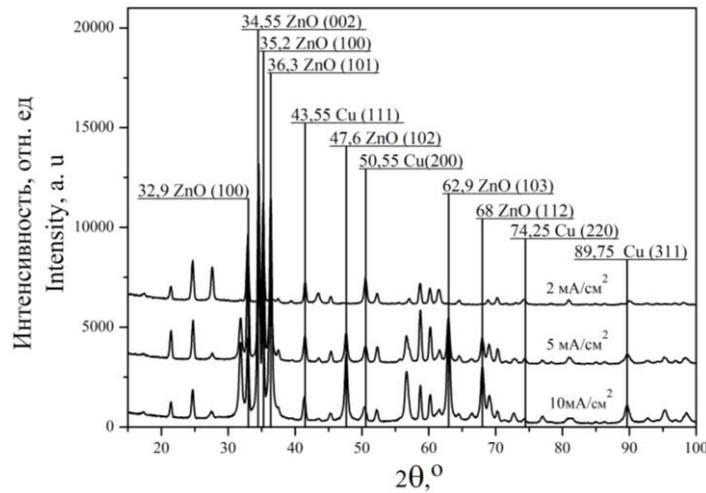


Рис. 2. Рентгенограммы композитных материалов на основе ZnO и Cu, полученных при различной плотности тока осаждения

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of composite materials based on ZnO and Cu obtained at different deposition current densities

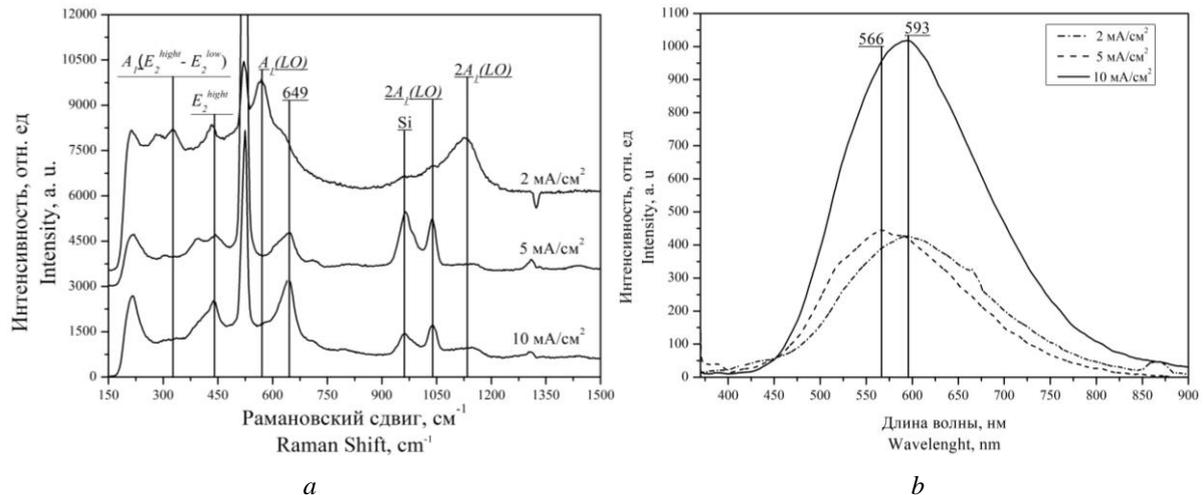


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния (*a*) и спектры фотолюминесценции (*b*) композитных материалов на основе ZnO и Cu, полученных при различной плотности тока осаждения

Fig. 3. Raman spectra (*a*) and photoluminescence spectra (*b*) of composite materials based on ZnO and Cu obtained at different deposition current densities

### Обсуждение результатов

Наблюдаемое на микрофотографиях поперечного скола образцов формирование нижнего плотного слоя ZnO при увеличении плотности тока характерно для электрохимического метода осаждения [13], так как при больших плотностях тока увеличивается концентрация центров зарождения на поверхности кремниевой подложки. Рост отдельных пластинчатых кристаллов при низкой плотности тока осаждения  $2 \text{ mA/cm}^2$  также связан с малой плотностью центров зарождения зародышей на поверхности подложки. Переход от роста сплошной пленки к формированию отдельных кристаллов происходит при использовании больших плотностей тока из-за увеличения концентрации структурных дефектов по мере увеличения толщины формируемой пленки ZnO.

Результаты исследования образцов, полученные методом рентгеновской дифрактометрии, показывают, что осажденный электрохимическим методом материал представляет собой поликристаллический ZnO, в который включены кластеры металлической Cu. Линия с максимумом на  $649 \text{ cm}^{-1}$ , наблюдаемая на спектрах комбинационного рассеяния, не связана с собственным кристаллическим ZnO, поэтому может быть обусловлена легированием ZnO ионами  $\text{Cu}^{2+}$ . Так как ионный радиус  $\text{Cu}^{2+}$  (77 пм) больше, чем ионный радиус  $\text{Zn}^{2+}$  (74 пм) [14], то в том случае, когда ионы Cu занимают места в узлах и междоузлиях кристаллической решетки, изменяется длина связей между атомами, вследствие чего происходит изменение энергии колебательных мод [15]. Поэтому полученный материал является поликристаллическим композитом, состоящим из ZnO, легированного Cu, и кристаллитов металлической Cu. Спектры фотolumинесценции полученных композитов обусловлены процессами излучательной рекомбинации через уровни в запрещенной зоне полупроводника, связанные с дефектами или примесями [1]. ZnO обычно содержит различные дефекты кристаллической решетки, обусловленные вакансиями кислорода ( $V_O$ ) или цинка ( $V_{Zn}$ ), а также междоузельными атомами кислорода ( $O_i$ ), цинка ( $Zn_i$ ) или водорода ( $H_i$ ). Для структур, полученных электрохимическим методом, наиболее характерны дефекты, связанные с вакансиями кислорода и кислородом в междоузлиях.

Широкая полоса фотolumинесценции, наблюдаемая на образцах композитных материалов на основе ZnO и Cu, обусловлена как излучательными переходами через уровни в запрещенной зоне полупроводника, связанными с дефектами, представляющими собой вакансии кислорода в узлах кристаллической решетки широкозонного полупроводника  $V_O$ , так и междоузельными атомами кислорода  $O_i$  (рис. 4). Наличие примесных уровней в запрещенной зоне, связанных с присутствием Cu в пленках ZnO, приводит к сдвигу максимума фотolumинесценции в коротковолновую область [1]. Такой сдвиг отмечается на образце, полученном при плотности тока  $5 \text{ mA/cm}^2$ .

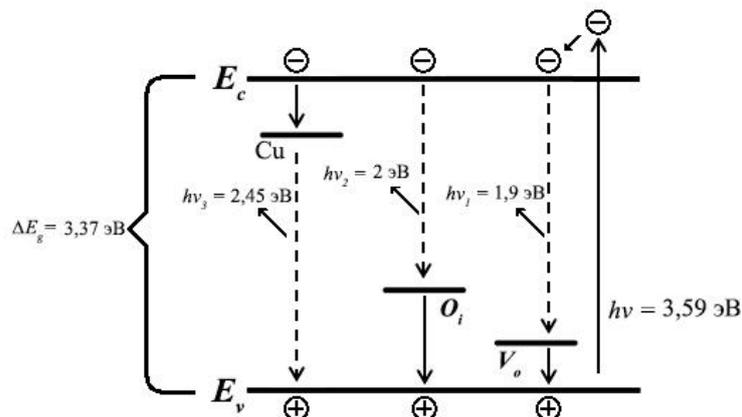


Рис.4. Схематическое изображение излучательных и безызлучательных переходов в ZnO (с использованием данных из [1, 5])

Fig. 4. Schematic representation of radiative and nonradiative transitions in ZnO (using data from [1, 5])

Результаты ЭДР-спектроскопии показывают, что концентрация Cu в композитном материале уменьшается с возрастанием плотности тока осаждения, поэтому можно было бы

ожидать, что максимальный коротковолновой сдвиг фотолюминесценции должен наблюдаться в структурах, полученных при минимальной использованной плотности тока  $2 \text{ mA/cm}^2$ . Однако при повышении плотности тока осаждения до  $5 \text{ mA/cm}^2$  происходит изменение структуры и состава композитов. На спектрах комбинационного рассеяния появляется полоса с максимумом на  $649 \text{ cm}^{-1}$ , связанная с легированием ZnO ионами  $\text{Cu}^{2+}$ , и одновременно исчезает ряд линий, соответствующих колебательным модам ZnO:  $E_1^{\text{high}}-E_1^{\text{low}}$ ,  $A_1(\text{LO})$  и  $2\text{LO}$ . То есть в структурах, полученных при низкой плотности тока, Cu находится в составе металлических кластеров. При возрастании плотности тока осаждения степень легирования ZnO ионами Cu увеличивается, и концентрация кластеров металлической Cu уменьшается. При дальнейшем росте плотности тока до  $10 \text{ mA/cm}^2$  концентрация Cu в пленке продолжает снижаться, и влияние легирующей примеси Cu на положение максимума суммарной полосы фотолюминесценции уменьшается. Поэтому интенсивность фотолюминесценции композитного материала, полученного электрохимическим осаждением при  $10 \text{ mA/cm}^2$ , возрастает за счет снижения количества кластеров меди и путей безызлучательной рекомбинации, но спектральное положение пика уже в первую очередь определяется собственными дефектами полупроводника.

### Заключение

Методом электрохимического осаждения на подложках из монокристаллического кремния получены структуры на основе ZnO и Cu, представляющие собой поликристаллический композит, состоящий из ZnO, легированного Cu, и кристаллитов металлической Cu. Основной компонентой полученного материала является поликристаллический ZnO, включающий множества фаз, наиболее выраженными из которых являются (101) и (002). Показано, что концентрация меди уменьшается с 3 до 1 ат.% при увеличении плотности тока осаждения от 2 до  $10 \text{ mA/cm}^2$ . При возрастании плотности тока также меняется морфология пленок – за счет увеличения центров зарождения на поверхности кремниевой подложки формируется сплошной слой композитного материала, на поверхности которого образуются пластинчатые кристаллы. При большей плотности тока толщина сплошного слоя увеличивается. Изменение спектров комбинационного рассеяния при возрастании плотности тока осаждения  $\geq 5 \text{ mA/cm}^2$  свидетельствует об изменении энергии колебательных мод в материале, указывающих на встраивание ионов Cu в кристаллическую решетку ZnO. Максимальное влияние легирования ZnO ионами Cu на оптические свойства отмечено в материалах, полученных при плотности тока  $5 \text{ mA/cm}^2$ . Максимум полосы фотолюминесценции в оптическом диапазоне в этом случае сдвигается в более коротковолновую область, с 593 нм на длину волны 566 нм. При иных значениях плотности тока осаждения положение максимума полосы фотолюминесценции определяется рекомбинационными процессами через уровни в запрещенной зоне полупроводника, связанными с вакансиями кислорода в узлах кристаллической решетки ZnO и междоузельными атомами кислорода.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработки технологии изготовления оптоэлектронных и фотовольтаических приборов, а также фотокаталитических покрытий на основе модифицированного ZnO.

### Список литературы / References

1. Özgür Ü., Alivov Ya.I., Liu C., Teke A., Reshchikov M.A., Dogan S., Avrutin V., Cho S.J., Morkoc H. Comprehensive review of ZnO materials and devices. *J. Appl. Phys.* 2005;98:1 103. DOI:10.1063/1.1992666.
2. Покутний С.И. Энергия связи экситона в полупроводниковых квантовых точках. *Физика и техника полупроводников.* 2010;4:508-512. Pokutny S.I. [Exciton binding energy in semiconductor quantum dots]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov.* 2009;44:508-512. (In Russ.)
3. Johnson C., Choi Heon-Jin, Knutsen P., Richard D., Yang Peidong, Richard J. Single gallium nitride nanowire lasers. *Nat. Mater.* 2002;1:106-110. DOI:10.1038/nmat728.
4. J. Yu, X. Yu. Hydrothermal synthesis and photocatalytic activity of zinc oxide hollow spheres. *Environ. Sci. Technol.* 2008;42:4902-4907. DOI:10.1021/es800036n.

5. Kaviyarasu K., Maria Magdalane C., Kanimozhi K., Kennedy J., Siddhardha B., Subba Reddy E., Rotte N.K., Sharma C.S., Therma F.T., Letsholathebe D., Mola G.T., Maaza M. Elucidation of photocatalysis, photoluminescence and antibacterial studies of ZnO thin films by spin coating method. *J. Photochem. Photobiol.* 2017;173:466-475. DOI:10.1016/j.jphotobiol.2017.06.026.
6. Zhang Z., Yi J.B., Ding J., Wong L.M., Seng H.L., Wang S.J., Tao J.G., Li G.P., Xing G.Z., Sum T.C., Alfred Huan C.H., Wu T. Cu-Doped ZnO nanoneedles and nanonails: morphological evolution and physical properties. *J. Phys. Chem.* 2008;122:9579-9585. DOI:10.1021/jp710837h.
7. Kasuga M., Mochizuki M. Orientation relationships of zinc oxide on sapphire in heteroepitaxial chemical vapor deposition. *J. Cryst. Growth.* 1981;185-194. DOI:10.1016/0022-0248(81)90459-0.
8. Srikant V., Sergio V., Clarke D.R. Epitaxial aluminum-doped zinc oxide thin films on sapphire: i, effect of substrate orientation. *Appl. Phys. Lett.* 1995;54:1931-1934. DOI:10.1111/j.1151-2916.1995.tb08912.x.
9. Izyumskaya N., Avrutin V., Wladimir S., El-Shaer A., Reub F., Gruber Th., Waag A. Molecular beam epitaxy of high-quality ZnO using hydrogen peroxide as an oxidant. *J. Cryst. Growth.* 2004;269:356-361. DOI:10.1016/j.jcrysgr.2004.04.120.
10. Tsukazaki A., Ohtomo A., Onuma T., Ohtani M., Makino T., Sumiya M., Ohtani K., Chichibu S.F., Fuke S., Segawa Y., Ohno H., Koinuma H., Kawasaki M. Repeated temperature modulation epitaxy for p-type doping and light-emitting diode based on ZnO. *Nat. Mater.* 2004;4:42-46. DOI:10.1038/nmat1284.
11. Xu L., Guo Y., Liao Q., Zhang J., Xu D. Morphological control of ZnO nanostructures by electrodeposition. *J. Phys. Chem.* 2005;109:13519-13522. DOI:10.1021/jp051007b.
12. Cuscó R., Alarcón-Lladó E., Ibáñez J., Artús L., Jiménez J., Wang B. Temperature dependence of Raman scattering in ZnO. *Physical Review.* 2007;75:1-11. DOI:10.1103/PhysRevB.75.165202.
13. Chubenko E.B., Klyshko A.A., Bondarenko V.P., Balucani M. Electrochemical deposition of zinc oxide on a thin nickel buffer layer on silicon substrates. *Electrochim. Acta.* 2011;56:4031-4036. DOI:10.1016/j.electacta.2011.02.008.
14. Michael W.E., Norman H., Tyler B.C., John K.B., Michael B., Willi A.B. Atomic weights of the elements. *Pure Appl. Chem.* 2013;85:1047-1078. DOI:10.1351/PAC-REP-13-03-02.
15. Cong C.J., Liao L., Liu Q.Y., Li J.C., Zhan K.L. Effects of temperature on the ferromagnetism of Mn-doped ZnO nanoparticles and Mn-related Raman vibratio. *Nanotechnology.* 2006;17:1520-1526. DOI:10.1088/0957-4484/17/5/059.

### Вклад авторов

Ткачёнук Н.М. выполнил изготовление пленок на основе оксида цинка, а также провел сравнительный анализ спектров фотолюминесцентного излучения и структуры.

Чубенко Е.Б. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принял участие в интерпретации их результатов.

Бондаренко В.П. принял участие в интерпретации результатов исследований.

### Authors' contribution

Tkachyonok N.M. made films based on zinc oxide, and also performed a comparative analysis of the spectra of photoluminescent radiation and structure.

Chubenko E.B. identified the tasks that needed to be solved during the research, and also took part in the interpretation of their results.

Bondarenko V.P. took part in the interpretation of their results.

### Сведения об авторах

Ткачёнук Н.М., инженер-электроник НИЛ 4.3 НИЧ БГУИР, 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

Tkachyonok N.M., electronic engineer R&D Laboratory 4.3 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, 6,  
Беларуский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-29-293-88-54;  
e-mail: fransresto@gmail.com  
Ткаченок Никита Михайлович

**Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. + 375-29-293-88-54;  
e-mail: fransresto@gmail.com  
Tkachyonok Nikita Mikhailovich