

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Boettinger, W.J.* Rapidly solidified alloys: processes, structures, properties, applications / Boettinger W.J., Perepezko J.H., Liebermann H.H. // New York: Marcel Dekker Inc.. 1993. 251.
2. *Gallo C.F.* Transport Properties of Bismuth Single Crystals / Boettinger W.J., Perepezko J.H., Liebermann H.H. // J. Appl. Phys. 1963. 11. 268.
3. *Kochowski S.* Concentration and mobility of charge carriers in thin polycrystalline films of bismuth. / Kochowski S, Opilski A. // Thin Solid Films. 1978. 48. 345.
4. *Jeun M.H.* Magnetoresistance in Semimetallic Bismuth Thin Films / Jeun MH, Lee KI, Lee WY. // J Korean Phys. Soc. 2005. 46. S80.
5. *Seeger K.* Semiconductor Physics: An Introduction. // 6th ed. Berlin: Springer. 1997. 403.
6. *Ehrstein J.R.* Nondestructive Evaluation of Semiconductor Materials and Devices. // New York: Springer US. 1979. 521.
7. *Lax B.* Infrared magnetoreflection in bismuth. / Lax B, Mavroides J.G., Zeiger H.J., Keyes R.J. // Phys. Rev. Lett. 1960. 5. 241.
8. *Nakamura D.* Thermoelectric properties for single crystal bismuth nanowires using a mean free path limitation model. / Nakamura D, Murata M, Yamamoto H, Hasegawa Y et al. // J Appl Phys. 2011. 110. 053702.
9. *Heremans J.* Influence of non-parabolicity on intravalley electron-phonon scattering: the case of bismuth. / Heremans J, Hansen OP. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1979. 12. 3483.
10. *Kittel C.* Introduction to Solid State Physics. // 8th ed. New Caledonia: John Wiley & Sons. 2004. 564.

## ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК И МАССИВОВ НАНОКРИСТАЛЛОВ ZnO/Er ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Е. Б. Чубенко, В. П. Бондаренко**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
eugene.chubenko@gmail.com*

## ВВЕДЕНИЕ

Оксид цинка (ZnO) – широкозонный полупроводник ( $\Delta E_g = 3,37$  при  $T = 300$  K), обладающий уникальным сочетанием физических свойств, обеспечивающим широкий спектр его применений [1]. Высокий коэффициент пропускания в видимом и ближнем ИК-диапазоне открывает возможность использования ZnO в тонкопленочных солнечных элементах [2]. Введение различных примесей приводит к изменению оптических и электрофизических свойств ZnO, позволяя применять его в качестве материала прозрачных проводящих электродов или функциональных слоев [1, 2]. Пленки ZnO могут выступать в качестве матрицы, содержащей люминесцентные частицы веществ, участвующих в процессе поглощения квантов света. Введение ионизированных атомов эрбия (Er) позволяет увеличить эффективность работы тонкопленочных солнечных элементов, так как ионы Er способны поглощать излучение в инфракрасном диапазоне в области длин волн 1,54 мкм, переизлучая поглощенную энергию в виде более высокоэнергетических фотонов, и расширяя, таким образом, спектр поглощаемого солнечным элементом излучения [3].

ZnO может быть получен методом электрохимического осаждения [4], обладающего такими существенными для изготовления тонкопленочных элементов преимуществами, как возможность одновременной обработки больших площадей и низкой

температурой процесса. Электрохимический метод также позволяет вводить примеси в ZnO непосредственно в процессе осаждения [4].

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для осаждения ZnO использовался водный раствор на основе нитрата цинка [4], содержащий 5 мМ  $Zn(NO_3)_2$ , 1 мМ  $Er(NO_3)_3$  и 0,1 М  $NaNO_3$  для увеличения электропроводности. Исследование проводилось в трехэлектродной ячейке при температуре раствора 80 °С. При исследовании вольтамперограмм в качестве электрода сравнения использовался стандартный хлорсеребряный электрод. На рис. 1 представлены полученные в данном растворе циклические вольтамперограммы электродов из платины и монокристаллического кремния марки КЭС-0,01 (111). Из рисунка видно, что в случае платинового электрода плотность катодного тока выше, что связано с большей скоростью протекания электрохимических реакций, обусловленной более высокой проводимостью металлического электрода по сравнению с кремниевым. На кривых не было обнаружено пиков тока, соответствующих выделению Er и его соединений, однако при снятии вольтамперограмм было отмечено формирование  $Er(OH)_3$  в прикатодной области. В области 0,8 – 1 В на кривых присутствует характерное плато тока, связанное с формированием ZnO [4]. Поэтому использованный раствор был признан подходящим для осаждения системы ZnO/Er.

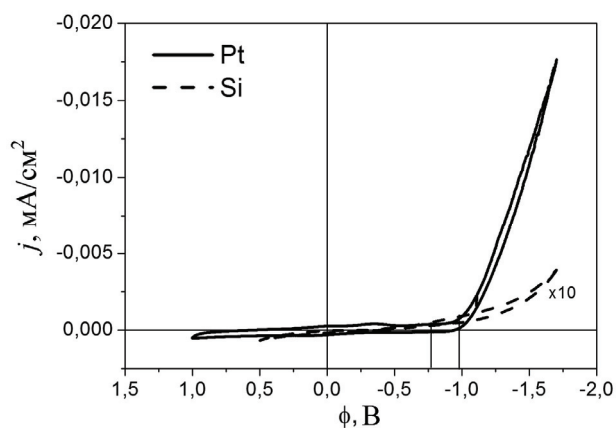


Рис. 1. Циклические вольтамперограммы платинового и кремниевого электродов в водном растворе 5 мМ  $Zn(NO_3)_2$ , 1 мМ  $Er(NO_3)_3$  при 80 °С

Формирование пленок ZnO/Eg проводилось на никелевых подложках и пластинах монокристаллического кремния марки КЭС-0,01 (111) в гальваностатическом режиме при плотностях тока 1 – 7,5 мА/см<sup>2</sup>. На рис. 2 представлены электронные фотографии поверхности и поперечного скола полученных пленок.

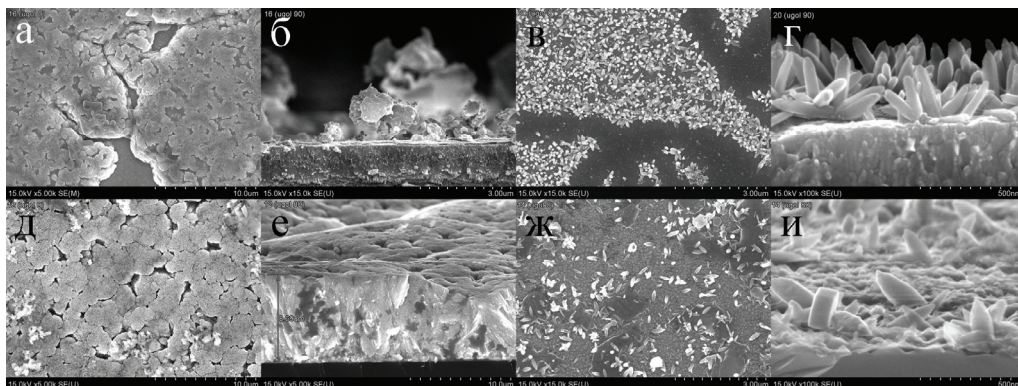


Рис. 2. Электронные фотографии поверхности и поперечного скола образцов пленок ZnO/Eg, осажденных на никель при плотности тока 1 мА/см<sup>2</sup> (а, б) и 5 мА/см<sup>2</sup> (в, з) и на монокристаллический кремний при плотности катодного тока 1 мА/см<sup>2</sup> (д, е) и 5 мА/см<sup>2</sup> (ж, и)

На представленных фотографиях видно, что в зависимости от плотности катодного тока сформированные пленки оксида цинка обладают различной морфологией. Не зависимо от типа подложки при малых плотностях тока (1 мА/см<sup>2</sup>) происходит формирование сплошной пленки ZnO/Eg, включающей по данным рентгеновского микроанализа 3 – 7 ат.% атомов Eg, находящегося в составе оксида или гидроксида. При плотностях тока 5 мА/см<sup>2</sup> и более наблюдается формирование массива нанокристаллов ZnO/Eg, имеющих диаметр 50 – 100 нм, с несколько меньшей концентрацией атомов эрбия от 1,2 до 6 ат.%. Для никелевых подложек характерно более плотное расположение нанокристаллов ZnO/Eg, что связано с уменьшением критического диаметра зародышей с ростом проводимости подложки на начальных стадиях роста пленки ZnO [5]. Отличия в морфологии формирующихся при малых и больших плотностях тока пленок ZnO/Eg связаны с изменением скорости протекания электрохимических реакций. Так как процесс электрохимического осаждения оксидов металлов из водных растворов солей азотной кислоты протекает в несколько стадий, одна из которых является чисто химической и связана с непосредственным разложением образующегося в прикатодной области гидроксида металла с образованием соответствующего оксида, скорость которой не зависит от электрических параметров процесса осаждения, то при увеличении плотности тока возрастает скорость только электрохимической стадии процесса, в результате которой образуется гидроксид. Это приводит к тому, что большое количество образующихся гидроксидов Zn и Eg может не успевать разлагаться с выделением оксидов и блокирует подход реагентов к поверхности катода. При этом формируются отдельные нанокристаллы. При низких плотностях тока образуется сплошная пленка ZnO с встроенными частицами оксида эрбия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность получения пленок ZnO/Er с различной морфологией электрохимическим методом. При плотностях тока около  $1 \text{ мА/см}^2$  формируется сплошная пленка ZnO/Er, подходящая для использования в качестве прозрачного проводящего электрода в тонкопленочных солнечных элементах, способного эффективно конвертировать низкоэнергетические фотоны в более высокоэнергетические за счет высокой концентрации атомов эрбия (до 7 ат.%). При плотностях тока больше  $5 \text{ мА/см}^2$  происходит формирование массивов нанокристаллов ZnO/Er диаметром 50 – 100 нм. Такие структуры могут быть использованы для создания фотоприемников и светоизлучающих устройств.

Работа выполнялась в рамках задания 1.2.08 ГПНИ Республики Беларусь «Электроника и фотоника» и задания 1.09 ГПНИ Республики Беларусь «Функциональные и композитные материалы, наноматериалы».

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Özgür, Ü.* A comprehensive review of ZnO materials and devices / Özgür, Ü. [et al.] // Journal of applied physics. 2005. Vol. 9. P. 041301.
2. *Ohta, H.* Transparent oxide optoelectronics / H. Ohta, H. Hosono // Materials today. 2004. Vol. 7. P. 42.
3. *Liu, B.* Multiscaled hierarchical nanostructures for enhancing the conversion efficiency of crystalline silicon solar cells / B. Liu [et al.] // Applied surface science. 2012. Vol. 259. P. 705.
4. *Goux, A.* Deposition of mixed zinc oxide/lanthanide films by electrochemical precipitation: The ZnO/Er system / A. Goux, T. Pauporte, D. Lincot // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2006. Vol. 587. P. 193.
5. *Wellings, J.S.* Growth and characterisation of electrodeposited ZnO thin films / J. S. Wellings, N. B. Chaure, S. N. Heavens, I. M. Dharmadasa // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. P. 3893.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ ГАЛЬВАНОСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

**Е. Б. Чубенко, С. В. Редько, А. И. Шерстнёв,  
В. А. Петрович, В. П. Бондаренко**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
eugene.chubenko@gmail.com*

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов получения наноструктур является осаждение материалов в полупроводниковые или диэлектрические пористые матрицы, диаметр пор которых задает диаметр поперечного сечения формируемых наноструктур [1, 2]. Одним из материалов, предоставляющих такие возможности, является пористый кремний [3–5]. При заполнении пор пористого кремния другими материалами для создания массивов наноструктур или нанокомпозитов важным значением имеет структура пор и состояние поверхности кремниевых кристаллитов [3]. Структурой пор можно управлять изменением параметров анодной обработки непосредственно в процессе формирования пористого кремния. Однако из-за большого количества данных параметров на