

УДК 621.315.592

**ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ОКСОСУЛЬФИДА И ТИОИОДИДА ВИСМУТА:  
СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Свито И.А.<sup>1</sup>, Ксеневиц В.К.<sup>1</sup>, Бондаренко Е.А.<sup>3</sup>, Хорошко Л.С.<sup>1</sup>,  
Кулак А.И.<sup>2</sup>, Стрельцов Е.А.<sup>1</sup>, Мазаник А.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет*

<sup>2</sup>*Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси*

*Минск, Республика Беларусь*

<sup>3</sup>*Силезский технологический университет*

*Гливице, Польша*

**Аннотация.** Методом химического осаждения на стеклянных подложках синтезированы пленки оксосульфида и тииодида висмута. Согласно данным сканирующей электронной микроскопии, пленки оксосульфида висмута сформированы тонкими (несколько десятков нанометров) пластинчатыми кристаллами, а пленки тииодида висмута имеют игольчатую структуру. Это обеспечивает большое соотношение «поверхность/объем» и создает предпосылки к созданию сенсоров газов или влажности на основе данных материалов. Показана зависимость сопротивления резистивной структуры на основе оксосульфида висмута от относительной влажности, демонстрирующая ее высокую чувствительность и быстродействие.

**Ключевые слова:** оксосульфид висмута; тииодид висмута; тонкие пленки; сенсор; относительная влажность.

**BISMUTH OXYSULFIDE AND THIOIODIDE THIN FILMS:  
STRUCTURE AND POSSIBILITIES OF CREATING SENSING DEVICES**

**Svito I.<sup>1</sup>, Ksenevich V.<sup>1</sup>, Bondarenko E.<sup>3</sup>, Khoroshko L.<sup>1</sup>,  
Kulak A.<sup>2</sup>, Streltsov E.<sup>1</sup>, Mazanik A.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Belarusian State University*

<sup>2</sup>*Institute of General and Inorganic Chemistry of NAS of Belarus,*

*Minsk, Republic of Belarus*

<sup>3</sup>*Silesian University of Technology, Faculty of Chemistry,*

*Department of Physical Chemistry and Technology of Polymers*

*Gliwice, Poland*

**Abstract.** Bismuth oxysulfide and thioiodide films were synthesized by the chemical bath deposition on glass substrates. According to the scanning electron microscopy, bismuth oxysulfide films are formed by thin (several tens of nanometers) platelet crystals, whereas bismuth thioiodide films have a needle-shaped structure. This provides a large surface-to-volume ratio and creates prerequisites for the formation of gas or humidity sensors based on these materials. Dependence of the resistance on relative humidity of a resistive structure based on bismuth oxysulfide demonstrates its high sensitivity and fast response.

**Key words:** bismuth oxysulfide; bismuth thioiodide; thin films; sensor; relative humidity.

*Адрес для переписки: Мазаник А.В., пр. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: mazanikalexander@gmail.com*

**Введение.** В настоящее время в материаловедении наблюдается повышенный интерес как к сплавам на основе висмута, так и к полупроводниковым соединениям на его основе. Это обусловлено тем, что висмут – сравнительно доступный и недорогой химический элемент. Он существенно менее токсичен по сравнению с другими тяжелыми металлами («зеленый свинец»). Полупроводниковые соединения висмута могут быть синтезированы простыми и недорогими методами химического или электрохимического осаждения. Представляет интерес использование данных материалов в солнечной энергетике, для термоэлектрического преобразования энергии, создания детекторов высокоэнергетических квантов и др. В настоящей работе исследуются пленки оксосульфида и тииодида висмута, полученные методом

химического осаждения, в контексте возможности создания на их основе сенсоров относительной влажности.

**Методика эксперимента.** Пленки оксосульфида висмута были получены методом химического осаждения из раствора на основе нитрата висмута, триэтанолamina и тиомочевины, методика синтеза подробно описана в работах [1–3]. Для получения пленок тииодида висмута также был использован метод химического осаждения из раствора, содержащего нитрат висмута, тиомочевину и иодид калия [4].

Для оценки чувствительности сенсорных структур на поверхности пленок с помощью серебряной пасты формировали два параллельных контакта на расстоянии 0,3 мм. Образец помещали в вакуумируемую камеру с регулируемой

относительной влажностью и подключали к источнику-измерителю Keithley 2450, от которого подавалось постоянное напряжение 20 В. В ходе эксперимента относительная влажность в камере циклически изменялась посредством напуска/откачки паров воды, при этом регистрировалась зависимость силы тока (с погрешностью в пределах  $\pm 110$  пА) от времени.

**Результаты и их обсуждение.** Электронно-микроскопические исследования показали, что пленки оксосульфида висмута сформированы тонкими (несколько десятков нанометров) пластинчатыми кристаллами, а пленки тииодида висмута имеют игольчатую структуру (рис. 1 и 2).

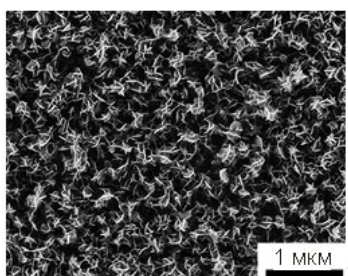


Рисунок 1 – Изображение сканирующей электронной микроскопии поверхности пленки оксосульфида висмута

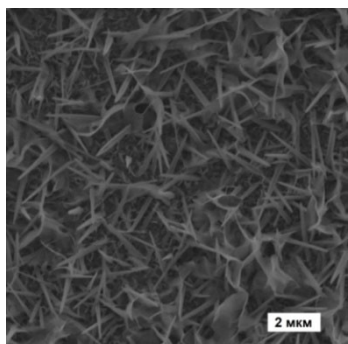


Рисунок 2 – Изображение сканирующей электронной микроскопии поверхности пленки тииодида висмута

В качестве примера реакции исследованных пленок на изменение относительной влажности от 0 до 85 % на рис. 3 приведены участки хроноамперограммы для пленки оксосульфида висмута непосредственно после напуска и откачки паров воды. Как видно, пленки характеризуются быстрым откликом на изменения относительной влаж-

ности и высокой чувствительностью. Установленные механизмы, ответственных за изменение сопротивления пленок при изменении влажности, а также долговременная стабильность характеристик требуют дополнительных исследований.

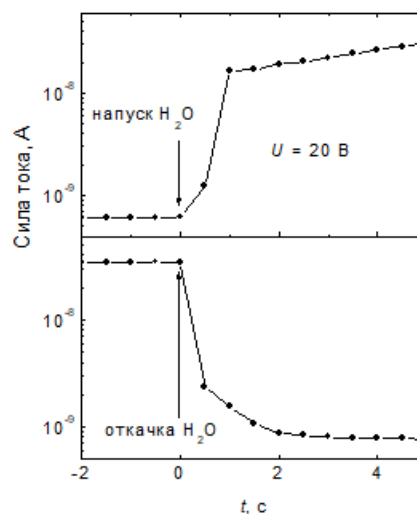


Рисунок 3 – Участки хроноамперограммы для пленки оксосульфида висмута при подаче постоянного напряжения непосредственно после напуска и откачки паров воды

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (подпрограмма «Опто- и СВЧ-электроника»).

#### Литература

1. Giant incident photon-to-current conversion with photoconductivity gain on nanostructured bismuth oxysulfide photoelectrodes under visible-light illumination / E. A. Bondarenko [et al.] // *Adv. Mater.* – 2017. – Vol. 29 (40). – P. 1702387.
2. EBismuth oxysulfide film electrodes with giant incident photon-to-current conversion efficiency: dynamics of properties with deposition time / E. A. Bondarenko [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2018. – Vol. 20. – P. 20340–20346.
3. Bismuth oxysulfide photoelectrodes with giant incident photon-to-current conversion efficiency: chemical stability in aqueous solutions / E.A. Bondarenko [et al.] // *ChemElectroChem.* – 2019. – Vol. 6. – P. 2474–2481.
4. Синтез и фотоэлектрохимические свойства тииодида висмута / М.Е. Козыревич [и др.] // *Весті НАН Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2018. – Т. 54, №4. – С. 413–418.