

спорта. Отмечу, что еще есть множество открытых вопросов по особенностям каждого формата льда. Поэтому смело можно утверждать, что авторами тематика статьи актуальна и требует комплексного рассмотрения

#### Список использованных источников

1. Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 14.11.2017 №1536. Правила проектирования. Спортивные сооружения. Использую основные правила проектирования ледовых арен и техническое обеспечение искусственного льда.  
<https://minsport.gov.ru/2018/PrikazMinstroya1536-ot14112017.pdf>
2. Гончарова Г.Ю. Создание новых ледовых покрытий спортивного назначения методом молекулярного воздействия исследования их свойства. Москва 2011 с.28. Использую информацию о том, каким способом создается искусственный лед.  
<https://www.dissercat.com/content/sozдание-novykh-ledovykh-pokrytii-sportivnogo-naznacheniya-metodom-molekulyarnogo-vozdeistvi>
3. Электронный ресурс. Статья. Дата публикации 03.07.2017 21:53  
<http://www.kremlinrus.ru/article/804/69154/> Особенности искусственного льда.
4. Руководство ИИХФ по ледовым аренам. Дата издательства 2002г. Издатель Международная федерация хоккея на льду (ИИХФ).  
[https://blob.iihf.com/iihf-media/iihfmvc/media/downloads/projects/ice%20rink%20guide/iihf\\_ice\\_rink\\_guide\\_rus\\_web.pdf](https://blob.iihf.com/iihf-media/iihfmvc/media/downloads/projects/ice%20rink%20guide/iihf_ice_rink_guide_rus_web.pdf) Технически-материальная база ледовых арен, их специфика, степени эксплуатации.

УДК 621.794.4:661.862.22

**Н.В. Богомазова, И.М. Жарский**

Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Беларусь

### СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ZnO/SnS

*Аннотация.* Задачей исследований являлось изучение особенностей химического наслаивания и электрохимического осаждения полупроводниковых пленок SnS и гетероструктур на его основе, а также исследование

электрофизических, оптических и фоточувствительных свойств пленочных структур. Комбинированным методом была получена гетероструктура ZnO/SnS с параметрами  $I_{кз} = 0,25 \text{ мА}$ ,  $U_{xx} = 0,2 \text{ В}$  и  $F=0,348$ .

**N.V. Bogomazova, I.M. Zharsky**  
Belarusian State Technological University,  
Minsk, Belarus

## SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF PHOTOVOLTAIC HETEROSTRUCTURE ZnO/SnS

***Abstract.** The objectives of the research were to study the features of chemical layering and electrochemical deposition of semiconductor films of tin sulfide and heterostructures based on it, as well as to study the electrophysical, optical and photosensitive properties of film structures. Using the combined method "electrochemical deposition – chemical layering" a heterostructure was obtained with output parameters  $I_{кз} = 0,25 \text{ мА}$ ,  $U_{xx} = 0,2 \text{ В}$  и  $F=0,348$ .*

Актуальность данной работы в области инновационного материаловедения и нанотехнологий обусловлена активным развитием технологий формирования современных пленочных структур, включая гетероструктуры, с использованием полупроводниковых оксидов и халькогенидов в качестве функциональных слоев для различных электронных устройств, в частности фотоэлементов. Комбинирование доступных нанотехнологических процессов формирования функциональных гетероструктур с традиционными промышленными пленочными технологиями представляет актуальную химико-технологическую задачу.

Современный этап развития полупроводникового материаловедения характеризуется активным поиском эффективных некремниевых материалов и многослойных гетероструктур. В этой связи перспективным материалом является моносульфид олова SnS, который относится к классу полупроводников  $A^{IV}B^{VI}$  с проводимостью p- и n-типа в зависимости от элементного состава и характеризуется орторомбической кристаллической структурой. Сульфид олова характеризуется слоистой кристаллической структурой, атомные слои которой связаны силами Ван-дер-Ваальса, что приводит к снижению содержания поверхностных уровней. Это благоприятно сказывается на решении проблемы создания гетероструктур с достаточно высоким качеством гетеропереходов на основе поликристаллических и нанокристаллических слоев [1].

Солнечные элементы на основе тонких пленок SnS имеют недостаточно высокие параметры и стабильность характеристик, а

также нуждаются в конструктивном решении проблем, возникающих при использовании той или иной технологии изготовления [2].

В гетероструктурах для солнечных элементов на основе поглощающего слоя SnS в качестве слоя, выполняющего функцию широкозонного окна, по-прежнему активно изучаются такие широкозонные полупроводники, как халькогениды CdS, ZnS,  $Cd_xZn_{1-x}S$ , а также оксиды ZnO, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> и другие материалы. Среди актуальных лидеров фотовольтаических структур можно отметить авторов [3] и [4], которым удалось достигнуть эффективности преобразования солнечной энергии в структурах на основе SnS на уровне 4,36 % [3] и 4,8 % [4]. Так, в работе [3] повышение эффективности работы гетероструктуры SnS/SnO<sub>2</sub>/Zn(O,S):N/ZnO/ITO было достигнуто за счет снижения рекомбинационных потерь фотоносителей на функциональном гетеропереходе при формировании барьерного оксидного монослоя SnO<sub>2</sub> между поглощающим слоем SnS и контактным оксидно-сульфидным нанослоем Zn(O,S):N

В качестве объекта исследования в данной работе выступали электроосажденные пленки моносulfида олова SnS<sub>x</sub>, которые были сформированы на поверхности планарных подложек ITO/стекло и на фольгированном медью текстолите, а также пленки ZnO, которые химически наслаивались на подложки ITO/стекло или на поверхность пленок SnS в составе гетероструктур.

Электрохимическое осаждение пленок SnS<sub>x</sub> осуществлялось в импульсном потенциостатическом режиме с использованием комплексного электролита при концентрации компонентов SnCl<sub>2</sub> – 0,03 моль/л, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,1 моль/л, CH<sub>3</sub>COONa – 0,06 моль/л и pH = 1,5–2,2. Количество циклов поляризации составляло от 60 до 120 в зависимости от омического состояния подложки ITO/стекло.

При химическом наслаивании пленок ZnO в качестве катионного прекурсора использовался аммиачный раствор 0,01 М ZnSO<sub>4</sub> (pH 11) при комнатной температуре, а в качестве анионного прекурсора – 1%-ный раствор H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> при температуре 65–75°C. Температура окончательного отжига в воздушной атмосфере составляла 375–450°C в течение 30–60 мин. В экспериментах по формированию пленок ZnO количество циклов обработки варьировалось от 20 до 60.

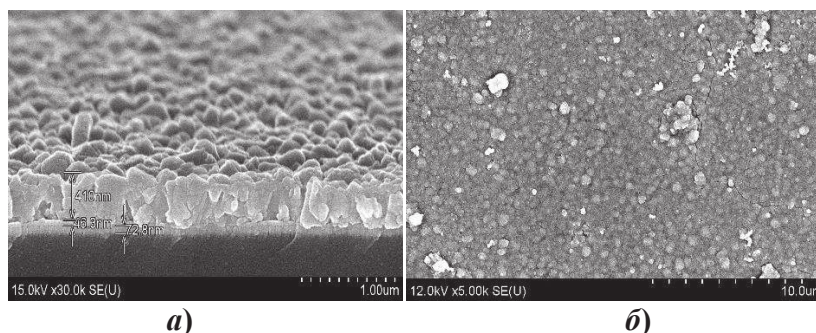
Гетероструктуры ZnO/SnS были получены комбинированным методом в цикле «электроосаждение SnS – химическое наслаивание ZnO». По данным электронной микроскопии можно заключить, среди полученных образцов наиболее четкой границей раздела слоев

характеризовалась гетероструктура 10ZnO/120SnS/ITO (цифры указывают количество циклов осаждения) (таблица 1, рис. 1).

**Таблица 1 – Структурно–химические характеристики гетероструктур**

Характеристика	10ZnO/120SnS/ITO	20ZnO/120SnS/ITO
$h_{ITO}, \text{нм}$	87	115
$h_{SnS}, \text{нм}$ (нач.)	465	196
$h_{SnS}, \text{нм}$ (в гетероструктуре)	341	граница слоев не выражена
$h_{ZnO}, \text{нм}$	202	
$h_{ZnO/SnS}, \text{нм}$	630	306

В этом случае общая высота полученной гетероструктуры составляла 630 нм. Толщина поглощающего электроосажденного слоя SnS от первоначального значения 465 нм (рисунок 1, *a*) уменьшилась до 341 нм, что может быть связано с химическим растворением пленки SnS при наслаивании ZnO. Полученные микроизображения поверхности гетероструктуры 10ZnO/120SnS/ITO (рисунок 3.14, *a*) указывают на то, что верхняя пленка ZnO является сплошной, без микротрещин, кристаллиты ZnO однородны по форме и размеру.



**Рис. 1 – Электронномикроскопические изображения скола образца 120SnS/ITO (*a*) и поверхности гетероструктуры 10ZnO/120SnS/ITO (*б*)**

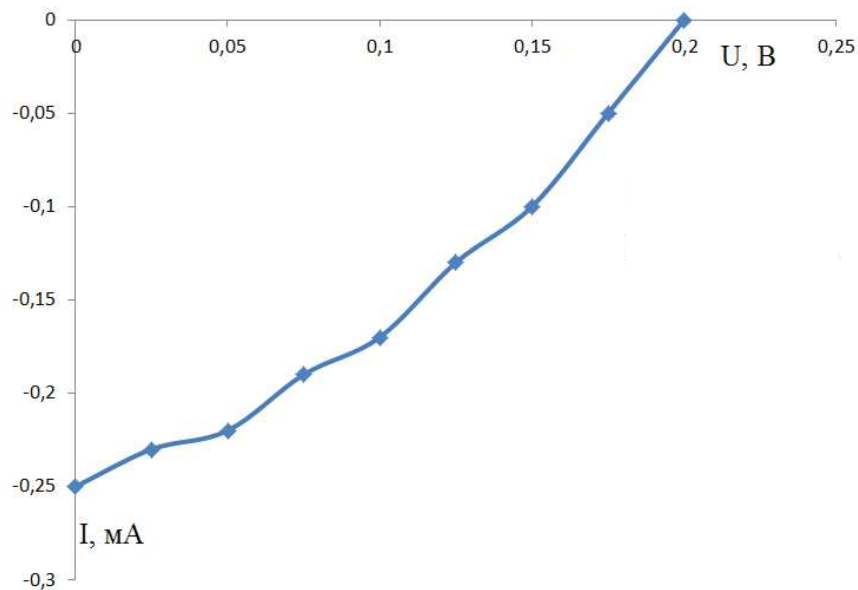
Использование пленочных структур на основе моносульфида олова в электронных устройствах предполагает наличие достоверных данных об электрофизических свойствах базовых слоев SnS, которые включают омическое состояние пленок при обычных условиях, особенности температурной зависимости электросопротивления, значение энергии активации и проводимости.

Измеренные нами значения электросопротивления функциональных пленок и гетероструктур по схеме, приведенной на рисунке 2, отличались от проводящего слоя ITO на подложке в 2 – 20 раз. Анализ полученных значений поверхностного сопротивления показывает, что пленка SnS<sub>x</sub> характеризовалась средним значением на уровне 600–800 кОм, а пленка ZnO (20 слоев) наиболее высокими значениями порядка 8,50–8,74 МОм. Контакт ZnO /SnS<sub>x</sub>, оказался более высокоомным, в сравнении с контактом SnS<sub>x</sub>/ZnO/ITO.

Результаты измерений среднего поверхностного сопротивления для образцов гетероструктур показывают, что оксидный поверхностный слой ZnO характеризовался повышенным электросопротивлением в сравнении с поглощающим сульфидным слоем, что решающим образом влияет на электросопротивление гетероструктуры, от чего зависит величина токов, например, солнечных элементов. Более низкоомное состояние зафиксировано в случае 10 циклов наслаивания ZnO.

Все пленки проявляли полупроводниковый характер электропроводности в отличие от пленки ITO. Величина температурного коэффициента электросопротивления и соответственно энергия активации проводимости увеличивалась с увеличением толщины пленки. Для непрозрачной пленки SnS<sub>x</sub> энергия активации проводимости составила 0,222 эВ, что указывает на генерацию носителей заряда с участием глубоких электроактивных центров.

В рамках исследования была получена омическая линейная ВАХ для пленки SnS, а для гетероструктуры – нелинейная ВАХ асимметричного вида, которая характеризуется повышенными значениями токов в области прямых смещений и пониженными значениями токов в области обратных смещений, что свидетельствует о наличии контактных явлений приводящих к проявлению выпрямляющего эффекта. Также для гетероструктур ZnO/SnS/ITO были получены предварительные данные по световым ВАХ (рис. 2), с помощью которых зафиксированы следующие функциональные параметры: ток короткого замыкания  $I_{кз} = 0,25$  мА, напряжение холостого хода  $U_{хх} = 0,2$  В и фактор заполнения световой ВАХ  $F = 36,8\%$ .



**Рис. 2 – Световая ВАХ гетероструктуры ZnO/SnS**

Таким образом, полученные данные показывают, что разработанная методика формирования фоточувствительных планарных субмикронных гетероструктур ZnO/SnS с использованием комбинированного цикла «электроосаждение SnS – ионное наслаивание ZnO» обеспечивает формирование планарных субмикронных гетероструктур ZnO/SnS, которые проявляют перспективные фоточувствительные свойства, в частности, обеспечивают по сравнению с индивидуальными пленками SnS повышение генерируемой величины фотоэдс до 0,2 В или в 2,8 раза.

### **Список использованных источников**

1. Electronic structure and defect physics of tin sulfides: SnS, Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> and SnS<sub>2</sub> / Y.Kumagai [et al.] // Physical review applied.– 2016.–Vol. 6, №16.– 15p.
2. Siebentritt, S. Progress in Photovoltaics: Research and Applications / S. Siebentritt, S. Schorr // Solar Mater. – 2012. – Vol.20, N.5. – P. 512–519.
3. Overcoming efficiency limitations of SnS-based solar cells / P. Sinsermsuksakul, L.Sun, S.W. Lee [et al.] // Adv. Energy Mater. – 2014. – Ar. 1400496. – 7 p.
4. Efficient nanostructured TiO<sub>2</sub>/SnS heterojunction solar ceels / H.S. Yun, B. Park, J. Im [et al.] // Adv. Energy Mater. – 2019. – Vol. 9, No.35. – P. 99–105.