

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Никонов Ф.Д., Селезнев А.С., Шлык И.Р.*

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

*Уткина Е.А. – канд. техн. наук, доцент*

В современных системах преобразования солнечного излучения в электричество одной из главных задач является повышение их эффективности. Одним из направлений является расширение спектрального диапазона и азимутального распределения поглощения солнечного излучения фотоэлектрическими преобразователями солнечной энергии. Использование наноструктурированных оснований-подложек, поиск и разработка новых материалов и методов формирования гетеропереходов солнечных элементов (СЭ) позволяют решать эту задачу.

Фотовольтаический (солнечный) элемент представляет собой фотоэлектрическое устройство, в котором энергия фотонов солнечного света превращается непосредственно в электричество за счет фотовольтаического эффекта. Электрические характеристики солнечных элементов (СЭ), например, фототок, выходное напряжение, электрическое сопротивление изменяются при поглощении фотонов [1].

Наиболее распространенными являются в настоящее время СЭ на основе монокристаллического и поликристаллического кремния. Однако, стоимость таких устройств пока остается достаточно высокой, и их удельная мощность в расчете на единицу стоимости (Вт/руб.) является низкоконтурной в сравнении с другими источниками электрической энергии.

Вторая группа СЭ – это тонкопленочные солнечные элементы (ТП-СЭ). В тоже время, многие современные ТП-СЭ содержат такие токсичные, редкие и дорогие элементы, как кадмий, индий, теллур, галлий и т.д., что повышает стоимость их изготовления, небезопасно с точки зрения экологии и широкомасштабного коммерческого использования. Новые полупроводниковые материалы  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS) и  $SnS_x$  являются одними из наиболее эффективных полупроводников и содержат распространенные, с низкой стоимостью, материалы, обладающие высокой стабильностью – медь, цинк, олово, серу. Благодаря оптимальной для фотоэлектрических элементов ширине запрещенной зоны  $E_g \sim 1.5$  эВ и 1.4 эВ, соответственно, а также высокому коэффициенту поглощения излучения  $\sim 10^4$  см<sup>-1</sup> такие материалы могут служить альтернативой используемым в настоящее время полупроводниковым соединениям.

Один из путей повышения эффективности СЭ - применение наноструктурированных оснований-подложек, на которые производится осаждение пленок полупроводников. К числу таких материалов относятся структуры на основе пористого анодного оксида алюминия, позволяющие значительно повысить эффективность поглощения солнечного излучения в СЭ благодаря увеличению эффективной площади поверхности и расширению спектрального диапазона поглощения солнечного излучения [2].

С точки зрения выбора оптимальных материалов для СЭ – в сравнительном исследовании авторы [1] пришли к заключению, что образец СЭ на основе гетероструктуры  $ZnO:Al/CZTS$ , содержащий внедренный буферный слой  $SnS$ , демонстрирует меньше дефектов, вторичных фаз и обладает более стехиометрическим составом полупроводника CZTS. На рисунке 1 представлено схематическое изображение такого солнечного элемента. Успешно исследуются и другие альтернативные безкадмиевые материалы для буферного слоя СЭ на основе CZTS полупроводников -  $ZnO$ ,  $ZnS$ ,  $In_2S_3$ ,  $Zn(O,S)$  [3].

Обязательным условием разработки современных эффективных СЭ является компьютерное моделирование их электронных и фотоэлектрических характеристик с привлечением специализированных программ [4], что позволяет сократить материальные и временные ресурсы при оптимизации конструкции СЭ, подборе оптимальных материалов и технологических процессов. Так, в работе [5] проведен анализ гетероструктуры на основе CZTS с  $SnS_2$  в качестве буферного слоя и  $SnS$  в качестве тыльного барьерного слоя.

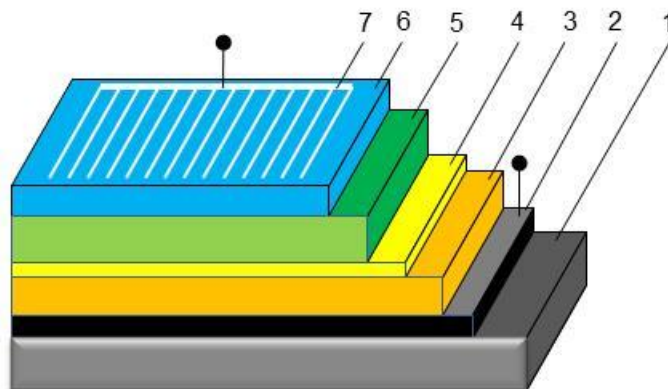


Рисунок 1 – Схематическое изображение тонкопленочного солнечного элемента:  
 1- наноструктурированная подложка; 2- Al тыльный контакт; 3- CZTS слой поглотитель излучения;  
 4- SnS буферный слой; 5- широкозонный ZnO:Al слой; 6- прозрачный проводящий слой;  
 7- Al токосъемный электрод

Таким образом, повышение эффективности преобразования солнечного излучения с помощью ТП-СЭ может быть достигнуто следующими основными методами:

1. Оптимизация конструкции ТП-СЭ с помощью компьютерного моделирования. На этой стадии производится выбор и оптимизация электрофизических параметров материалов и тонких пленок, составляющих гетероструктуру СЭ – толщина слоев, спектральные характеристики поглощения излучения, тип легирующей примеси, уровень легирования, и т.п.

2. Использование наноструктурированной подложки, на которой формируются активные полупроводниковые слои, для повышения эффективности поглощения солнечного излучения. Одним из недорогих способов создания таких подложек является электрохимическое окисление (анодирование) алюминия в режиме формирования пористого оксида алюминия с последующим удалением (полным или частичным) данного оксида, в результате чего образуется наноструктурированная подложка с развитой поверхностью, позволяющей увеличить величину поглощения падающего излучения в активном слое полупроводника CZTS.

3. Разработка новых недорогих методов осаждения полупроводниковых материалов типа  $\text{SnS}_x$  и CZTS, а также методов исследования их свойств. Среди таких перспективных методов – электрохимическое осаждение, а также послойное химическое осаждение – т.н. метод SILAR (successive ionic layer adsorption and reaction).

4. Уменьшение количества дефектов структуры и вредных примесей в объеме активного полупроводникового слоя CZTS с целью увеличения времени жизни неосновных носителей заряда и ограничения их рекомбинации, что достигается оптимизацией процессов препарирования подложки и последующего осаждения слоя основного полупроводника и широкозонного верхнего слоя гетероструктуры.

5. Выбор оптимального материала буферного слоя и метода его формирования.

6. Выбор материала тыльного омического контакта для уменьшения рекомбинации неосновных носителей заряда и снижения резистивных потерь. Сюда же относится и оптимизация конструкции верхнего токособирающего электрода.

**Список использованных источников:**

1. S.A. Khalate, R.S. Kate, R.J. Deokate. A review on energy economics and the recent research and development in energy and the  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) solar cells: A focus towards efficiency // *Solar Energy*. - 2018. – V.169. –P. 616–633.
2. Zhao, L.-R. Anodic aluminum oxide films formed in mixed electrolytes of oxalic and sulfuric acid and their optical constants / Zhao L.-R., Wang J., Li Y., Wang C.-W., Zhou F., Liu W.-M. // *Physica B*. - 2010. – V.405. – P. 456–460.
3. Xin Cui, Kaiwen Sun, Jialiang Huang, Chang-Yeh Lee, Chang Yan, Heng Sun, Yuanfang Zhang, Fangyang Liu, Md. Anower Hossain, Yahya Zakaria, Lydia Helena Wong, Martin Green, Bram Hoex, Xiaojing Hao. Enhanced heterojunction interface quality to achieve 9.3% efficient Cd-free  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  solar cells using atomic layer deposition ZnSnO buffer layer // *Chem. Mater.* - 2018. – V. 30(21). – P. 7860–7871.
4. Интернет-ресурс: <http://scaps.elis.ugent.be>
5. A. Kumar, A.D. Thakur. Analysis of  $\text{SnS}_2$  buffer layer and SnS back surface layer based CZTS solar cells using SCAPS // *arXiv.org >cond-mat>arXiv:1510.05092 (2015)*