УДК 621.383.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА ZnO/CuO

*Саенко Александр Викторович, к.т.н., доцент,* [*avsaenko@sfedu.ru*](mailto:morozov@infway.ru)

*Жейц Виталий Владимирович, лаборант-исследователь, vzhyayc@sfedu.ru*

*Билык Герман Евгениевич, ведущий инженер-конструктор, bilyk@sfedu.ru*

*Смирнов Владимир Александрович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой, vasmirnov@sfedu.ru*

*ЮФУ, г. Таганрог*

Аннотация: В работе проведено численное моделирование солнечного элемента на основе ZnO/CuO и исследовано влияние толщины, концентрации носителей заряда и ширины запрещенной зоны пленки CuO на фотоэлектрические характеристики.

Ключевые слова: солнечный элемент, оксид меди, численное моделирование, толщина пленки, концентрации носителей заряда, эффективность.

Введение

В настоящее время активно ведутся поиски недорогих полупроводниковых материалов для формирования простых и эффективных фотоэлектрических структур. Оксидные полупроводники широко распространены и безопасны для окружающей среды, а также не требуют сложных технологических процессов, что делает их многообещающими материалами для снижения стоимости изготовления солнечных элементов. В частности, ширина запрещенной зоны оксидов меди (CuO и Cu2O) близка к оптимальной (1,0-2,0 эВ) для использования их в фотоэлектрических структурах в качестве поглотителей солнечного излучения, тогда как ZnO, TiO2 или Ga2O3 могут использоваться в качестве широкозонного окна (> 3 эВ) для формирования p-n-гетероперехода, что открывает большие возможности в создании различных структур недорогих оксидных солнечных элементов [1–3].

Моделирование структуры солнечного элемента

Для численного моделирования фотоэлектрических характеристик и параметров гетероструктур солнечных элементов существует широкий выбор программных пакетов, таких как SCAPS, PC1D, AFORS-HET, AMPS и другие [1, 2]. Программа SCAPS (Solar Cell Analysis Program Simulator) является наиболее мощной и удобной системой одномерного численного моделирования для описания физических процессов, протекающих в структурах солнечных элементов. Данная программа позволяет учитывать рекомбинацию носителей заряда через локальные уровни (дефекты) в запрещенной зоне полупроводника и на межфазной границе гетеропереходов, а также задавать тип проводимости и уровень легирования за счет наличия определенной концентрации примеси или структурных дефектов (донорных или акцепторных) [3]. Численное моделирование в SCAPS основано на нестационарной диффузионно-дрейфовой системе уравнений полупроводника, в которую входят уравнения непрерывности для электронов и дырок и уравнение Пуассона [1].

В данной работе при моделировании солнечного элемента на основе гетероперехода ZnO/CuO в качестве фронтального и тыльного контактов использовались прозрачный проводящий оксидный слой (TCO) и золото (Au), а также принималось, что основными дефектами в пленке ZnO являются вакансии кислорода, которые также являются донорами, а основными дефектами в пленке CuO выступают вакансии меди, которые являются акцепторами. Для оксидных пленок эффективное сечение захвата электронов и дырок дефектом принималось равным 10-14 см2, а тепловая скорость носителей заряда 107 см/с. Эффективное сечение захвата электронов и дырок дефектом принималось равным 10-13 см2 [3]. Коэффициент пропускания фронтального электрода составлял 95 % при стандартном спектре плотности потока фотонов AM1.5G. Тип дефектов кристаллической решетки (центров рекомбинации) задавался нейтральным, поэтому механизм рекомбинации описывался согласно теории Шокли-Рида-Холла. Согласно эквивалентной схеме реального солнечного элемента также необходимо учитывать значения шунтирующего и последовательного сопротивлений, которые составляли 2500 и 3,3 Ом·см2 [1, 3].

Проведено моделирование влияния толщины и концентрации носителей заряда (акцепторов) в пленке CuO от 0,1 до 4 мкм и от 1013 до 1019 см-3 на фотоэлектрические характеристики солнечного элемента при толщине пленки ZnO 20 нм и концентрации носителей заряда (доноров) 1019 см-3. Оптимальная концентрация носителей заряда в пленке CuO составила 1017 см-3, а в качестве оптимальной толщины выбрано значение 3 мкм. Показано, что максимальная эффективность солнечного элемента достигается при ширине запрещенной зоны CuO равной 1,4 эВ и величине смещения краев зон проводимости между ZnO и CuO 0,03 эВ. Также улучшение фотоэлектрических характеристик солнечного элемента возможно за счет увеличения коэффициента поглощения пленки CuO с 5∙104 до 105 см-1 [3], а также снижения концентрации дефектов на гетерогранице ZnO/CuO с 1013 до 1010 см-2, что позволяет получить максимальную эффективность солнечного элемента 18,27 %, плотность тока короткого замыкания 28,55 мА/см2 и напряжение холостого хода 0,84 В.

Выводы

В результате моделирования получена максимальная эффективность солнечного элемента на основе ZnO/CuO равная 18,27 %, которая достигается при ширине запрещенной зоны, толщине и концентрации носителей заряда (акцепторов) в пленке CuO равной 1,4 эВ, 3 мкм и 1017 см-3 соответственно, а также величине смещения краев зон проводимости 0,03 эВ на гетерогранице ZnO/CuO. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и изготовлении недорогих и эффективных гетероструктур солнечных элементов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00827, https://rscf.ru/project/23-29-00827/ в Южном федеральном университете.

Список использованных источников

1. A.V. Saenko, G.E. Bilyk, V.A. Smirnov. Study of the Photovoltaic Parameters of Inorganic Solar Cells Based on Cu2O and CuO // Russian Microelectronics, 2024, Vol. 53, No. 4, pp. 319–328.

2. P. Sawicka-Chudy, Z. Starowicz, G. Wisz, R. Yavorskyi, Z. Zapukhlyak, M. Bester, L. Glowa, M. Sibinski, M. Cholewa. Simulation of TiO2/CuO solar cells with SCAPS-1D software // Materials Research Express, 6, 2019, 085918.

3. Nguyen Dinh Lam. Modelling and numerical analysis of ZnO/CuO/Cu2O heterojunction solar cell using SCAPS // Engineering Research Express, 2, 2020, 025033.

MODELING PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF

SOLAR CELLS BASED ON ZnO/CuO HETEROJUNCTION

A.V. Saenko, V.V. Zheits, G.E. Bilyk

Abstract: The paper presents a numerical simulation of a ZnO/CuO-based solar cell and studies the influence of thickness, charge carrier concentration, and band gap of the CuO film on photovoltaic characteristics.

Key words: solar cell, copper oxide, numerical simulation, film thickness, charge carrier concentration, efficiency.