

УДК 621.311.001.57

ВЛИЯНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ $\text{SiO}_2 : \text{Me}$ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**А. А. БОЙКО, Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, МАРВАН Ф. С. Х. АЛЬ-КАМАЛИ, Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ, Ю. А. АЛЕКСЕЕНКО, Н. Е. ДРОБЫШЕВСКАЯ***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь***НИВАЗИ А. С. АЛЬ-АРИКИ***Кафедра химии, факультет прикладных наук, Таузский университет, Республика Йемен***Д. А. ГОЛОСОВ, Х. Т. ДОАН***Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск*

Представлены результаты исследований влияния тонкопленочных покрытий на основе $\text{SiO}_2 : \text{Cu}_x$ и $\text{SiO}_2 : \text{Ni}_x$ на КПД фотоэлементов (использовались фотоэлементы Aoshike). Отработаны технологические режимы получения мишеней, содержащих наночастицы ионов переходных металлов, и определены режимы нанесения тонких пленок на подложки методом импульсного лазерного испарения. Результаты исследований вольт-амперных характеристик показали, что покрытия с применением никеля, а также покрытия с минимальной концентрацией меди являются наилучшими. Эффективность фотоэлементов с этими покрытиями практически такая же, как у чистых образцов. Значения P_{max} у них даже несколько выше, однако о явном увеличении КПД говорить преждевременно, так как полученные отклонения P_{max} находятся в рамках погрешности измерений и разброса параметров покрытий.

Ключевые слова: тонкие пленки, ионы меди, ионы никеля, фотоэлемент, вольт-амперная характеристика, последовательное сопротивление, КПД.

INFLUENCE OF SiO_2 THIN FILM COATINGS : ME ON EFFICIENCY OF PHOTOGENERATING ELEMENTS**A. A. BOIKO, D. I. ZALIZNY, MARWAN F. S. H. AL-KAMALI, E. N. PODDENEZHNY, Y. A. ALEKSEENKO, N. E. DROBYSHEVSKAYA***Educational institution "Sukhoi State Technical University of Gomel", the Republic of Belarus***NIAYAZI A. S. AL-AREKI***Department of Chemistry, Faculty of Applied Science, Taiz University, the Republic of Yemen***D. A. HOLOSOV, H. T. DOAN***Educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Minsk*

The results of studies of the influence of thin film coatings based on $\text{SiO}_2 : \text{Cu}_x$ and $\text{SiO}_2 : \text{Ni}_x$ on the efficiency of photocells (Aoshike photocells were used) are presented. Technological modes of obtaining targets containing nanoparticles of transition metal ions were worked out, and modes of applying thin films to substrates were determined by pulse laser evaporation. The results of studies of voltage-ampere characteristics showed that coatings us-

ing nickel, as well as coatings with a minimum copper concentration, are the best. The efficiency of photocells with these coatings is practically the same as that of pure samples. They have even slightly higher Pmax values, but it is premature to talk about a clear increase in efficiency, since the resulting Pmax deviations are within the measurement error and spread of coating parameters.

Keywords: thin films, copper ions, nickel ions, photocell, voltage-ampere characteristic, serial resistance, efficiency.

Введение

Полупроводниковые фотоэлементы являются основой для фотоэлектрических модулей (солнечных батарей), применяющихся для построения солнечных электростанций. Каждый фотоэлектрический модуль состоит из нескольких десятков фотоэлементов, соединенных последовательно [1], [2]. Коэффициент полезного действия (КПД) современных модулей составляет от 10 до 15 % и, естественно, зависит от эффективности отдельных фотоэлементов, а также от качества электрических контактов между ними [3].

В научной литературе присутствует множество публикаций, в которых предлагаются способы увеличения КПД фотоэлементов. Так, в [4] изучаются защитные покрытия для фотоэлементов из перовскита (оксида титаната кальция). Указана их максимальная эффективность в 16,7 %. Однако такие фотоэлементы не нашли пока широкого распространения из-за относительно высокой стоимости.

В [5] предложены тонкопленочные покрытия на основе соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_x\text{Se}_x$ и раствора гидразина, позволившие, по утверждению авторов, повысить КПД классических полупроводниковых фотоэлементов с 11,1 до 12,6 %. При этом в статье не раскрываются подробности производства покрытий и теоретические предпосылки их влияния на эффективность фотогенерации.

В [6] разработана методика теоретического анализа эффективности c-Si гетероструктурных фотоэлементов с двойными антибликовыми покрытиями. Показано, что применение покрытий может повысить КПД фотоэлементов до 20 %. Вместе с тем в публикации отсутствуют какие-либо практические подтверждения полученных выводов.

В [7] рассматриваются широко распространенные покрытия из метиламмония, покрытого иодидом свинца. Предложено для повышения устойчивости этих покрытий вместо PbI_3 использовать PbI_2 . Экспериментально показано, что КПД фотоэлементов возрастает с 16,7 до 17,2 %.

Различные антибликовые покрытия изучаются и в [8]–[10].

Таким образом, задача повышения КПД фотоэлементов за счет нанесения тонкопленочных покрытий актуальна и перспективна.

В последние годы в ГГТУ им. П. О. Сухого в сотрудничестве с ГГУ им. Ф. Скорины разрабатываются тонкопленочные покрытия на основе $\text{SiO}_2 : \text{Cu}_x$ и $\text{SiO}_2 : \text{Ni}_x$ [11]. Целью данных исследований является изучение влияния таких покрытий на КПД фотоэлементов.

Теоретический анализ возможного влияния медьсодержащих покрытий на КПД фотоэлементов

Медьсодержащие силикатные материалы находят широкое практическое применение как в качестве оптически активных сред (люминофоров, фильтров, фотохромных стекол), так и в виде материалов, используемых при фотокатализе органических соединений, а также как антибактериальные покрытия. Например, в работе [12] показано, что фототропными средами для электрофотографических и фототермопластических носителей информации, а также нелинейно-оптическими материалами могут служить термостойкие органические комплексы переходных металлов типа Cu^+ , Cd^{2+} , Pt^{2+} , Ru^{2+} с дипиридилными лигандами, сформированные в виде свето-

чувствительных наногибридов на поверхности или в системе открытых пор SiO_2 -каркаса ксерогеля. Комплексообразование подобного рода для ионов Cu(II) на поверхности силикагеля, соактивированной амино- и меркаптопропильными группами, изучалось в работе [13]. Установлено, что комплексообразование меди имеет «двухъярусный» характер: в области SiO_2 -групп медь имеет координацию Cu(II) (с аминпропильными группами и водой или силанольными группами), а сверху имеет место координация Cu(I) с меркаптопропильными группами. Авторы [13] показали, что модифицированные кремнеземы подобного рода могут быть использованы в качестве комплексообразующих сорбентов, применяемых в аналитической химии и катализе.

В работе [14] сообщается о синтезе и характеристике высокоэффективного фотопроводящего нанокompозита, состоящего из двух обычных оксидов металлов: оксида меди (CuO) и диоксида кремния (SiO_2). Нанокompозит CuO/SiO_2 получали, используя золь-гель метод. Авторами изучены структурные, химические и оптические свойства нанокompозита. Исследование фотопроводимости нанокompозита показало повышенный фототок, что делает такие материалы перспективными для применения в солнечных элементах, особенно в качестве материала фотоанода в сенсibilизированных ионами солнечных элементах.

Авторами работы [15] установлено, что для тонких пленок, содержащих CuO , оптическая ширина запрещенной зоны уменьшается с 3,68 до 2,44 эВ, когда молярная концентрация растворов предшественников увеличивается с 0,1 до 0,5 М. Электрические измерения показывают, что удельное сопротивление пленок незначительно изменяется от 84 до 124 Ом · см при увеличении молярной концентрации.

Методика нанесения $\text{SiO}_2 : \text{Cu}_x$ и $\text{SiO}_2 : \text{Ni}_x$ покрытий на поверхность фотоэлементов

В качестве исходных образцов были использованы поликристаллические фотоэлементы Aoshike со следующими параметрами:

- напряжение при максимальной мощности: 0,5 В;
- ток при максимальной мощности: 0,3 А;
- максимальная отдаваемая мощность: 0,16 Вт;
- площадь поверхности: 52×19 мм.

Для получения покрытий использовался метод импульсного лазерного испарения, а в качестве источника лазерного излучения применялся лазер L-2137U+HG-5 (фирма «Лотисс-ТИИ», Беларусь). Диаметр пятна лазерного излучения на мишени составлял ~ 7 мм. Мишень испаряли импульсным излучением с длиной волны $\lambda = 532$ нм, длительностью – 6 нс, частотой следования импульсов – 10 Гц и энергией в импульсе – 448 мДж. Время испарения составляло 40 мин. Покрытия осаждали на подложки из высоколегированного монокристаллического кремния ЭКЭС 0,01(100).

Мишени для формирования пленок были синтезированы с использованием золь-гель метода. Исходными компонентами служили пирогенный кремнезем марки А-380 (техническое название – аэросил); нитрат меди: ТУ 6-09-3757–74 ($\text{Cu(NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$); нитрат цинка: ГОСТ 5106–77 ($\text{Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$); сернокислый никель: ГОСТ 4465–74 ($\text{Ni}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

Получение мишеней включало проведение следующих операций.

На первом этапе исходный золь получался при ультразвуковом диспергировании ($\nu = 18$ кГц) кремнезема марки А-380, что приводило к его однородному перемешиванию.

После этапа УЗ-обработки в полученный золь добавлялись соли легирующих элементов с различным массовым отношением относительно 1 моля SiO_2 . После полного растворения нитрата меди проводилась его стабилизация: при нормальных условиях путем гелирования в пластиковых литевых формах.

Последующая сушка получившегося геля осуществлялась в электрическом термощкафу при $T = 50\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$ (до образования состояния ксерогеля). Отжиг ксерогелей до формирования жесткого кремний-кислородного каркаса проводился в муфельной электропечи на воздухе при $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ (время выдержки на указанной температуре составляло 1 ч). При этом получались ксерогельные заготовки структурно-фазового состава $\text{SiO}_2 : \text{MeO}$ ($\text{Me} = \text{Cu}, \text{Ni}, \text{Zn}$) [16]. Далее ксерогели размалывались в фарфоровой ступке до состояния микропорошков и методом одноосного прессования формировались в мишени диаметром 20 мм, толщиной 10 мм.

Отжиг полученных мишеней проводили в потоке осушенного водорода при $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ (время выдержки – 1 ч, степень химической чистоты H_2 соответствовала марке ОСЧ), в результате чего формировались композиционные мишени состава $\text{SiO}_2 : \text{Me}^\circ$ [17].

Порядок проведения экспериментальных исследований

Для экспериментальных исследований было использовано следующее оборудование: светодиодный прожектор, прибор Solar I-Vw IT Italia, электронный милливольтметр, электронный миллиамперметр, стенд с нагрузочными сопротивлениями. Схема установки показана на рис. 1.

Схема работает следующим образом. Светодиодный прожектор 1 является источником излучения, которое попадает на датчик излучения 2 и исследуемый фотоэлемент 6, находящийся на подставке 5, предназначенной для размещения поверхности фотоэлемента на одном уровне с поверхностью датчика излучения.

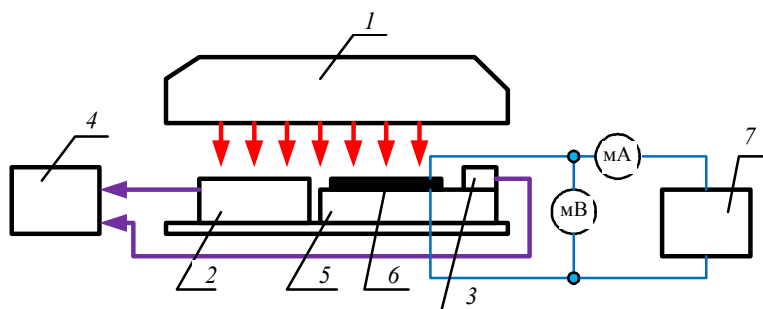


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – прожектор; 2 – датчик излучения; 3 – датчик температуры;
4 – прибор Solar I-Vw; 5 – подставка; 6 – исследуемый фотоэлемент;
7 – стенд с нагрузочными сопротивлениями

Датчик излучения 2 и датчик температуры 3 подключены к соответствующим входам прибора Solar I-Vw 4. Стенд с нагрузочными сопротивлениями 7 соединен последовательно с миллиамперметром и исследуемым образцом 6. Милливольтметр подключен непосредственно к выходам исследуемого образца. Стенд 7 позволяет изменять значения нагрузочных сопротивлений с помощью переключателей.

Описанная установка имеет следующую особенность: в процессе работы прожектора температура образца повышалась, а значение излучения несколько снижалось. Это объясняется особенностью работы светодиодов прожектора: при повышении температуры их излучательная способность падает.

В процессе измерений излучение от окружающей среды практически не влияло на результаты, так как измерения проводились в помещении с зашторенными окнами.

Обработка результатов измерений

Таким образом, для каждого образца выполнялись измерения значений излучения, температуры, напряжения и тока при разных значениях сопротивления нагрузки.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) для образца без покрытия и для образца с покрытием $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ (1 : 1)$ при высоком и при низком уровнях излучения.

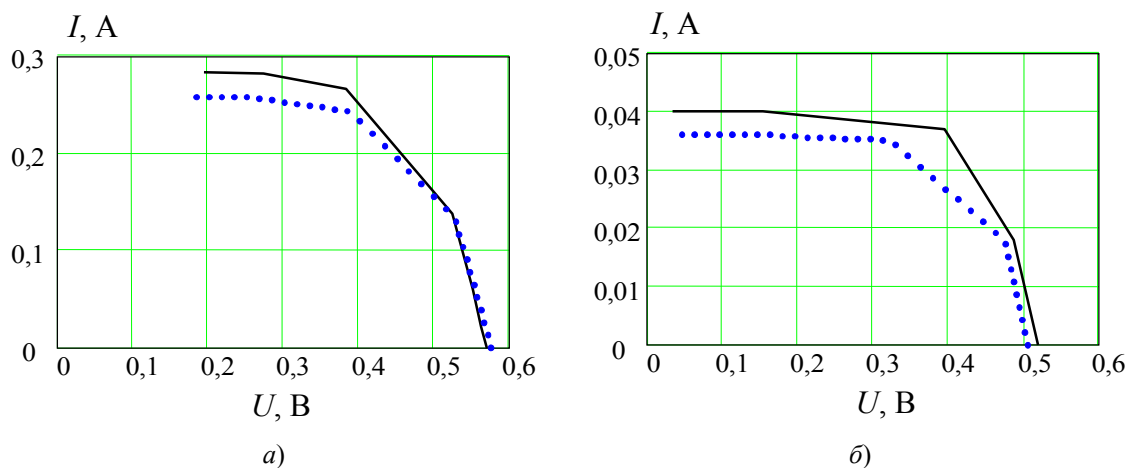


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики фотоэлементов:
 а – при высоком уровне излучения; б – при низком уровне излучения:
 — с покрытием; – без покрытия

Ломаный характер ВАХ объясняется ограниченным количеством нагрузочных сопротивлений в процессе измерений.

В табл. 1 приведены условия, при которых проводились измерения для рассматриваемых образцов.

Таблица 1

Условия при измерениях ВАХ фотоэлементов

Образец	Диапазон излучения, Вт/м ²	Диапазон температуры, °С
Без покрытия	От 844 до 832	От 33,5 до 35,8
С покрытием $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ (1 : 1)$	От 845 до 833	От 32,7 до 36,7
Без покрытия	От 218 до 217	От 36,3 до 34,7
С покрытием $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ (1 : 1)$	От 218 до 217	От 36,5 до 35,2

Из табл. 1 следует, что измерения осуществлялись при разных условиях и по этой причине непосредственно по результатам сравнение эффективности фотоэлементов проводить нельзя.

Для того чтобы провести сравнение эффективности различных образцов, разработаем методику нормировки ВАХ, т. е. методику их приведения к единым условиям.

В соответствии с [1], [12], ВАХ фотоэлемента описывается формулой

$$I = K_{ph}S - I_0 \left(e^{\frac{qU}{K_B(T+273)}} - 1 \right) = K_{ph}S - I_0 \left(e^{\frac{11594,2U}{(T+273)}} - 1 \right), \quad (1)$$

где I – ток через фотоэлемент, А; K_{ph} – коэффициент фототока, А · м²/Вт; S – солнечное излучение; Вт/м²; I_0 – обратный ток фотоэлемента при отсутствии солнечного излучения, А; q – заряд электрона, Кл; U – напряжение на фотоэлементе, В; K_B – постоянная Больцмана, Кл · В/К, В; T – температура фотоэлемента, °С.

Параметры I_0 и K_{ph} являются расчетными для конкретного типа фотоэлемента. Чтобы их определить, необходимы два уравнения, которые можно получить для крайних точек экспериментальной ВАХ при значениях величин I_1 , U_1 , S_1 и T_1 для первой точки и соответственно I_2 , U_2 , S_2 и T_2 – для второй точки. Тогда, решив систему на основе (1) относительно неизвестных, получим:

$$\begin{cases} I_0 = \frac{I_1 - \frac{S_1}{S_2} I_2}{\frac{S_1}{S_2} \left(e^{\frac{11594,2U_2}{(T_2+273)}} - e^{\frac{11594,2U_1}{(T_1+273)}} \right)}; \\ K_{ph} = \frac{I_1 + I_0 \left(e^{\frac{11594,2U_1}{(T_1+273)}} - 1 \right)}{S_1}. \end{cases} \quad (2)$$

Однако в [1], [18] показано, что теоретическая ВАХ существенно отличается от экспериментальной, даже если значения I_0 и K_{ph} получены на основе экспериментальных данных. Для более точного приближения расчетной ВАХ к экспериментальной следует учесть влияние последовательного сопротивления фотоэлемента R_s . В [18] дана методика расчета этого сопротивления. Суть данной методики заключается в том, что из расчетных значений тока, полученных по (1), необходимо вычитать корректирующие значения тока по формуле

$$I_{calc} = I - I_{corr} = K_{ph} S - I_0 \left(e^{\frac{11594,2U}{(T+273)}} - 1 \right) - \frac{U_{max} - U}{R_s}, \quad (3)$$

где I_{calc} – расчетный ток; I_{corr} – корректирующий ток; U_{max} – максимальное значение напряжения (режим холостого хода); R_s – эквивалентное последовательное сопротивление фотоэлемента.

Значение R_s определяется следующим образом [12]:

$$R_s = \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad (4)$$

где ΔU – приращение напряжения на участке ВАХ, где отсутствует насыщение по току (стремление ВАХ к горизонтали); ΔI – соответствующее приращение тока на том же участке ВАХ.

Отметим, что вычитать значения I_{corr} в выражении (3) необходимо только на участке ВАХ, где определялось значение R_s , на оставшемся участке ВАХ $I_{corr} = 0$.

В качестве примера в табл. 2 даны расчетные значения I_0 , K_{ph} и R_s , соответствующие условиям в табл. 1 и рассчитанные по формулам (2) и (4).

Таблица 2

Расчетные значения I_0 , K_{ph} и R_s

Образец	Условие	I_0 , А	K_{ph} А · м ² /Вт	R_s , Ом
Без покрытия	Высокое излучение	$12,4 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,463
С покрытием SiO ₂ : Cu ^o (1 : 1)	Высокое излучение	$8,81 \cdot 10^{-11}$	$3,09 \cdot 10^{-4}$	0,551
Без покрытия	Низкое излучение	$14,8 \cdot 10^{-11}$	$1,84 \cdot 10^{-4}$	3,37
С покрытием SiO ₂ : Cu ^o (1 : 1)	Низкое излучение	$22,8 \cdot 10^{-11}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$	4,78

Рассмотрим пример построения ВАХ для образца без покрытия (рис. 3).

В расчетных ВАХ на рис. 2 использовались такие же значения излучения и температуры, как и в соответствующих точках экспериментальных кривых.

Из ВАХ на рис. 2 видно, что расчет без учета сопротивления R_s дает значительные отклонения от эксперимента. Если влияние R_s учитывается, то расчетная кривая находится очень близко к экспериментальной кривой. Это позволяет сделать вывод, что экспериментальная кривая может быть заменена соответствующей расчетной кривой, при этом значения излучения и температуры можно принять фиксированными для всех точек с целью нормировки ВАХ для всех образцов.

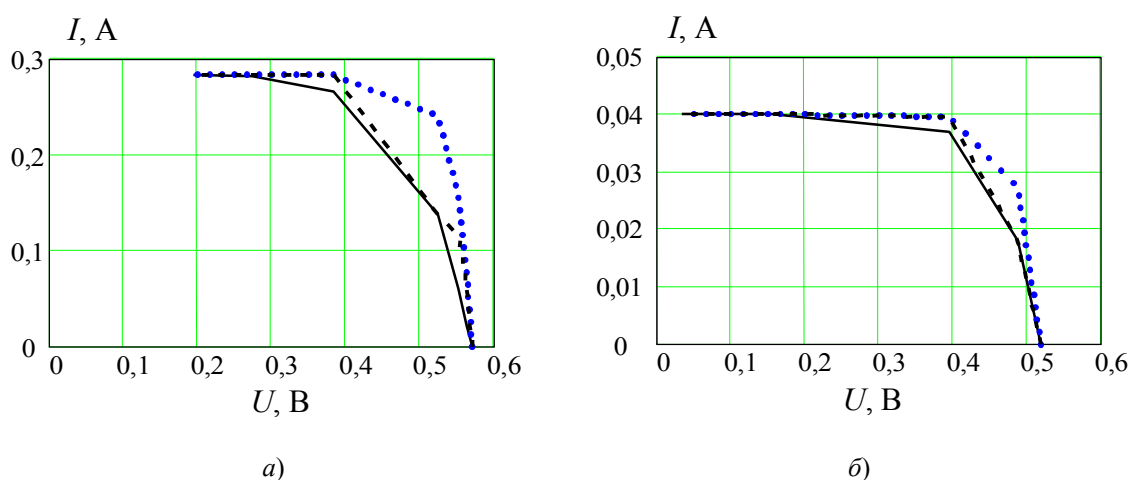


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики фотоэлемента без покрытия:
 а – при высоком уровне излучения; б – при низком уровне излучения:
 — эксперимент; – расчет без учета R_s ; - - - - - расчет с учетом R_s

В качестве фиксированных примем средние значения излучения и температуры, которые были получены в процессе экспериментов:

- для высокого излучения: $S = 840 \text{ Вт/м}^2$; $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$;
- для низкого излучения: $S = 220 \text{ Вт/м}^2$; $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 4 показаны ВАХ, соответствующие ВАХ на рис. 1, но после операции нормировки. На рис. 5 приведены вольт-ваттные характеристики, полученные на основе ВАХ.

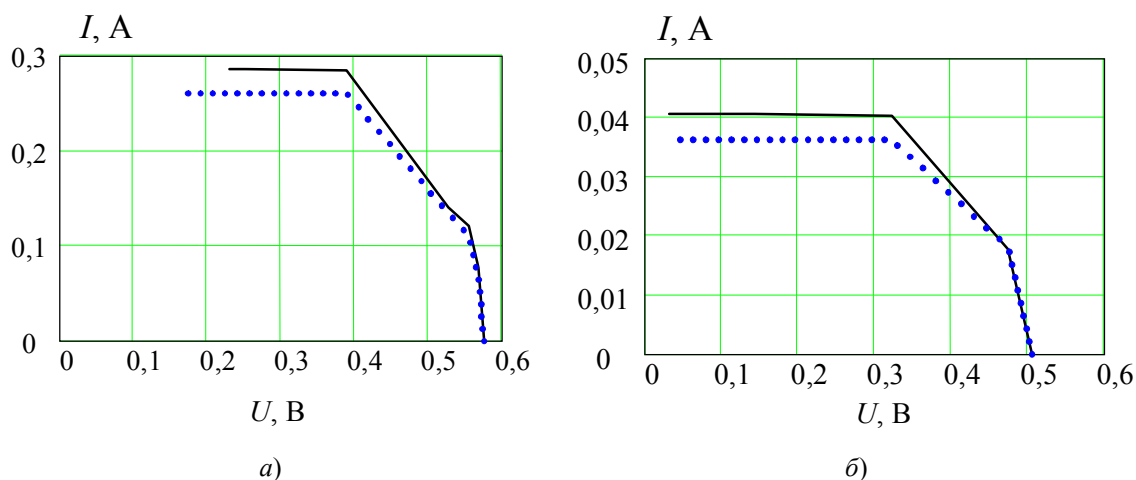


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики фотоэлементов после операции нормировки:
 а – при высоком уровне излучения; б – при низком уровне излучения:
 — без покрытия; с покрытием

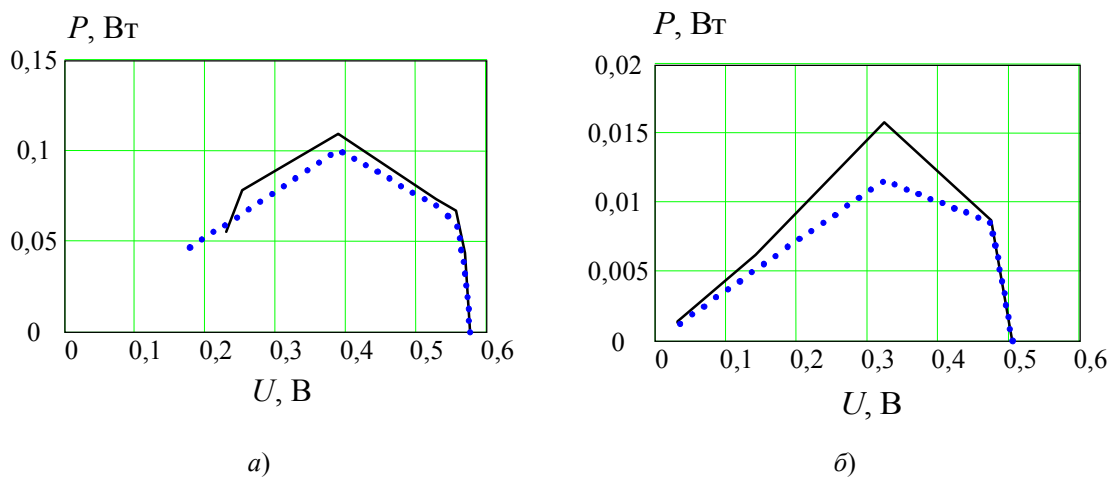


Рис. 5. Вольт-ваттные характеристики фотоэлементов после операции нормировки:
 а – при высоком уровне излучения; б – при низком уровне излучения:
 — без покрытия; с покрытием

Отсюда следует, что после операции нормировки можно выполнять сравнение эффективности исследованных фотоэлементов. Поскольку все образцы имели одинаковую площадь поверхности и значения излучения и температуры были нормированы, то в качестве критерия эффективности будем использовать максимальное значение мощности P_{\max} , отдаваемой в нагрузку, которое, очевидно, будет соответствовать КПД фотоэлемента. На рис. 5 эти максимумы явно видны и характеризуют фотоэлемент без покрытия как имеющий более высокую эффективность.

Результаты расчетов P_{\max} , полученные в соответствии с экспериментальными данными и разработанной методикой нормировки, приведены в табл. 3.

Расчетные значения максимальной мощности фотоэлементов

Тип покрытия фотоэлемента	P_{\max} , Вт при $S = 840 \text{ Вт/м}^2$; $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$		P_{\max} , Вт при $S = 220 \text{ Вт/м}^2$; $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 1	Образец № 2
Без покрытия	0,109 (рис. 5, а)	0,112	0,016 (рис. 5, б)	0,012
SiO ₂ : Cu° (1 : 1)	0,1 (рис. 5, а)	0,1	0,012 (рис. 5, б)	0,013
SiO ₂ : Cu° (1 : 1,25)	0,099	0,094	0,012	0,012
SiO ₂ : Cu° (1 : 1,5)	0,089	0,091	0,013	0,011
SiO ₂ : Cu° (1 : 1,75)	0,092	0,089	0,012	0,012
SiO ₂ : Cu° (1 : 2)	0,088	0,08	0,011	0,0095
SiO ₂ : Ni° (1 : 0,4)	0,115	0,114	0,013	0,012
SiO ₂ : Cu° / SiO ₂ : Ni° (1 : 0,4)	0,105	0,113	0,011	0,014
SiO ₂ : Cu° (1 : 0,4)	0,114	0,102	0,012	0,014
SiO ₂ : CuO : ZnO (1 : 0,4 : 0,4) 100 % Ar	0,073	0,079	0,0064	0,0087
SiO ₂ : CuO : ZnO (1 : 0,4 : 0,4) 50 % Ar	0,086	0,077	0,0097	0,012
SiO ₂ : CuO _m ZnO (1 : 0,4 : 0,4) 100 % O ₂	0,084	0,086	0,0098	0,0083

Измерения выполнялись для двух образцов каждого типа покрытия, обозначенных в табл. 3 как образец № 1 и образец № 2.

Из табл. 3 видно, что существует некоторый разброс значений для одних и тех же типов покрытий. Этот разброс обусловлен наличием методической погрешности измерений, а также отличием уровня интенсивности покрытий на поверхности образцов, что наблюдается даже визуально по различию цвета их поверхностей.

Из табл. 3 следует, что большинство исследованных покрытий приводят к некоторому снижению эффективности фотоэлементов. Наилучшие результаты показали покрытия с применением никеля, а также покрытия с минимальной концентрацией меди. Таким образом установлено, что КПД для фотоэлементов с нанесенными нами покрытиями ниже, чем у образцов без покрытий.

Заключение

Исходя из результатов проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Отработаны технологические режимы получения мишеней, содержащих наночастицы ионов переходных металлов, и определены режимы нанесения тонких пленок на подложки методом импульсного лазерного испарения.

2. В процессе измерения ВАХ фотоэлементов обнаружено, что значения излучения и температуры могут изменяться, поэтому для сравнения эффективности различных образцов необходимо выполнять операцию нормировки. Исследование ВАХ следует проводить при фиксированных значениях мощности излучения и температуры. Предложено для нормировки ВАХ учитывать значение эквивалентного последовательного сопротивления фотоэлемента.

3. Показано, что большинство исследованных покрытий привели к снижению эффективности фотоэлементов, поскольку пленки наносились на фотоэлементы,

имеющие защитное покрытие. Считаем, что эффект усиления будет наблюдаться при нанесении пленки на рабочий слой фотоэлемента.

4. Установлено, что наиболее перспективными для дальнейших исследований являются покрытия на основе никеля, а также покрытия с малой концентрацией меди.

Литература

1. Foster, R. Solar Energy: Renewable Energy and the Environment / R. Foster, M. Ghassemi, Alma Cota. – Boca Raton : CRC Press : Taylor & Francis Group, 2010. – 382 p.
2. Зализный, Д. И. Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPower-Systems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2020. – Т. 63, № 6. – С. 513–523.
3. Зализный, Д. И. Контроль эффективности фотоэлектрических модулей / Д. И. Зализный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2021. – № 12. – С. 23–29.
4. Improving efficiency and stability of perovskite solar cells with photocurable fluoropolymers / F. Bella [et al.] // Science. – 2016. – № 10. – P. 1126–1136.
5. Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency / W. Wang [et al.] // Advanced Energy Materials. – 2014. – Vol. 4, № 7. – P. 1301465.
6. Improving the efficiency of a-Si : H/c-Si thin heterojunction solar cells by using both antireflection coating engineering and diffraction grating / H. Bencherif [et al.] // Optik. – 2019. – Vol. 182. – P. 682–693.
7. Coating Evaporated MAPI Thin Films with Organic Molecules: Improved Stability at High Temperature and Implementation in High-Efficiency Solar Cells / F. Palazon [et al.] // ACS Energy Letters. – 2018. – Vol. 3, № 4. – P. 835–839.
8. Aiken, D. J. High performance anti-reflection coatings for broadband multi-junction solar cells / D. J. Aiken // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2000. – Vol. 64, № 4. – P. 393–404.
9. Improved efficiency of multicrystalline silicon solar cells by TiO₂ antireflection coatings derived by APCVD process / D. Hocine [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2013. – Vol. 16, № 1. – P. 113–117.
10. Processing additives for improved efficiency from bulk heterojunction solar cells / J. K. Lee [et al.] // Journal of the American Chemical Society. – 2008. – Т. 130, № 11. – С. 3619–3623.
11. Электрические свойства тонких пленок SiO₂ : Cu⁰, нанесенных методом импульсного лазерного испарения / М. Ф. С. Х. Аль-Камали [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2. – С. 7–11.
12. Синтез, структура и фотофизические свойства нанокomпозитов в системе органический комплекс Cu⁺-SiO₂ / Н. Н. Химич [и др.] // Физика и химия стекла. – 2003. – Т. 29, № 4. – С. 555–561.
13. Особенности взаимодействия Cu(II) на поверхности силикагеля, активированной одновременно амино- и меркаптопропильными группами / А. К. Трофимчук [и др.] // Журн. неорган. химии. – 2005. – Т. 50, № 3. – С. 424–430.
14. Investigation of sol-gel processed CuO/SiO₂ nanocomposite as a potential photoanode material / T. Tenkyong [et al.] // Materials Science-Poland. – 2015. – № 33 (4). – P. 826–834. – Mode of access: <http://www.materialsscience.pwr.wroc.pl/>. – DOI: 10.1515/msp-2015-009.

- 15 Physical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Sol-Gel Spin-Coating Method / M. Dhaouadi [et al.] // American Journal of Physics and Applications. – 2018. – Vol. 6, № 2. – P. 43–50.
16. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Структурообразование SiO₂-ксерогелей, содержащих соединения меди различного фазового состава / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Алексеенко, О. А. Титенков // Проблемы физики, математики и техники. Сер.: Физика. – 2020. – № 3 (44). – С. 7–12.
17. Алексеенко, А. А. Синтез и свойства ксерогелей состава SiO₂ : Cu⁰, предназначенных для применения в биомедицинских исследованиях / А. А. Алексеенко, М. Ф. С. Х. Аль-Камали, О. А. Титенков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 1 (80). – С. 40–47.
18. Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 135–145.

Получено 25.08.2022