

УДК 546.561+535.37

ПЕРЕИЗЛУЧАЮЩИЕ ПЛЕНКИ СОСТАВА ОКСИД – ЙОДИД МЕДИ(I) ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г. П. ШЕВЧЕНКО¹⁾, Ю. В. БОКШИЦ¹⁾, Е. А. КОВЕЛЬ¹⁾, Н. В. ШИНКЕВИЧ²⁾,
А. В. МАЗАНИК²⁾, Д. А. ШЕРБАН³⁾, Н. Н. КУРМЕЙ³⁾, Л. И. БРУК³⁾, П. П. ПЕРШУКЕВИЧ⁴⁾

¹⁾Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ,
ул. Ленинградская, 14, 220006, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Институт прикладной физики, ул. Академией, 5, MD-2028, г. Кишинев, Молдова

⁴⁾Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Беларусь

Исследовано влияние пленок состава $Al_2O_3 - CuI$ на фотоэлектрические параметры кремниевых солнечных элементов (СЭ). Наибольший прирост внешней квантовой эффективности фотоэлектрического преобразования СЭ в ближнем ультрафиолетовом диапазоне наблюдается для однослойных пленок состава $50Al_2O_3 - 50CuI$, прошедших термообработку при 280 °С в течение 30 мин, что соответствует относительному увеличению фототока при воздействии излучения спектрального состава AM1,5 (1000 Вт/м²) более чем на 35 %. Это подтверждает эффективность использования переизлучающих пленок состава $Al_2O_3 - CuI$ для увеличения КПД кремниевых СЭ.

Образец цитирования:

Шевченко ГП, Бокшиц ЮВ, Ковель ЕА, Шинкевич НВ, Мазаник АВ, Шербан ДА, Курмей НН, Брук ЛИ, Першукевич ПП. Переизлучающие пленки состава оксид – йодид меди(I) для кремниевых солнечных элементов. *Журнал Белорусского государственного университета. Химия.* 2021; 1:50–57.

<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-1-50-57>

For citation:

Shevchenko GP, Bokshyts YuV, Kovel CA, Shynkevich NV, Mazanik AV, Serban DA, Curmei NN, Bruk LI, Pershukovich PP. Re-emitting oxide – copper iodide(I) films for silicone solar cells. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry.* 2021;1:50–57. Russian.

<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-1-50-57>

Авторы:

Гвидона Петровна Шевченко – кандидат химических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории нанохимии.

Юлия Валентиновна Бокшиц – кандидат химических наук; научный сотрудник лаборатории нанохимии.

Екатерина Алексеевна Ковель – младший научный сотрудник лаборатории нанохимии.

Надежда Владимировна Шинкевич – инженер кафедры энергофизики физического факультета.

Александр Васильевич Мазаник – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий кафедрой энергофизики физического факультета.

Дормидонт Архипович Шербан – кандидат физико-математических наук, профессор; главный научный сотрудник.

Николай Николаевич Курмей – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник.

Леонид Измайлович Брук – кандидат физико-математических наук, доцент; ведущий научный сотрудник.

Петр Павлович Першукевич – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник.

Authors:

Gvidona P. Shevchenko, PhD (chemistry), docent; leading researcher at the laboratory of nanochemistry.

gvidonashevchenko@gmail.com

Yuliya V. Bokshyts, PhD (chemistry); researcher at the laboratory of nanochemistry.

julias106@mail.ru

Catherine A. Kovel, junior researcher at the laboratory of nanochemistry.

gvidonashevchenko@gmail.com

Nadzeya V. Shynkevich, engineer at the department of energy physics, faculty of physics.

nadya.shinkevich.98@mail.ru

Alexander V. Mazanik, PhD (physics and mathematics), docent; head of the department of energy physics, faculty of physics.

mazanikalexander@gmail.com

Dormidont A. Serban, PhD (physics and mathematics), full professor; chief researcher.

serban@phys.asm.md

Nicolai N. Curmei, PhD (physics and mathematics); senior researcher.

nicolai.curmei@phys.asm.md

Leonid I. Bruk, PhD (physics and mathematics), docent; leading researcher.

leonid.bruc@phys.asm.md

Piotr P. Pershukovich, PhD (physics and mathematics); senior researcher.

p.persh@ifanbel.bas-net.by

Ключевые слова: солнечные элементы; спектры пропускания; спектрально-люминесцентные свойства; фотоэлектрические параметры.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БРФФИ (№ X19MLDG-002).

RE-EMITTING OXIDE – COPPER IODIDE(I) FILMS FOR SILICONE SOLAR CELLS

G. P. SHEVCHENKO^a, Yu. V. BOKSHYTS^a, C. A. KOVEL^a, N. V. SHYNKEVICH^b, A. V. MAZANIK^b,
D. A. SERBAN^c, N. N. CURMEI^c, L. I. BRUK^c, P. P. PERSHUKEVICH^d

^aResearch Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University,
14 Lieninhradskaja Street, Minsk 220006, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^cInstitute of Applied Physics, 5 Academiei Street, Chisinau, MD-2028, Moldova

^dB. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,
68-2 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220072, Belarus

Corresponding author: Yu. V. Bokshyts (julias106@mail.ru)

The effect of Al_2O_3 – CuI oxide films on the photoelectric parameters of silicon solar cells (SCs) has been studied. The largest increase in the external quantum efficiency of photoelectric conversion of SCs in the near UV range is observed for monolayer films of the $50\text{Al}_2\text{O}_3$ – 50CuI composition, heat-treated at $280\text{ }^\circ\text{C}$ for 30 min, which corresponds to a relative increase in the photocurrent upon exposure to radiation of spectral composition AM1.5 (1000 W/m^2) by more than 35 %. This confirms the efficiency of using re-emitting Al_2O_3 – CuI films to increase the efficiency of silicon SCs.

Keywords: solar cell; transmission spectra; spectral and luminescent properties; photovoltaic parameters.

Acknowledgements. The work was supported by Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. X19MLDG-002).

Введение

Одним из существенных факторов, ограничивающих применение солнечных элементов (СЭ), является низкая результативность преобразования ультрафиолетовых (УФ) квантов солнечного излучения в электричество [1; 2]. Поэтому особенно актуальна задача поиска систем, которые могли бы эффективно трансформировать УФ-излучение солнца в область максимальной спектральной чувствительности СЭ. Авторами данной статьи разработана оригинальная технология по созданию коллоидно-химическими методами люминесцирующих оксидных пленок на основе оксидов кремния, алюминия, германия и др., активированных редкоземельными ионами и наночастицами металлов или полупроводников, в частности CuI [3–8]. Эти пленки при их возбуждении УФ-излучением способны люминесцировать в видимой области спектра, в которой фоточувствительность кремниевых СЭ существенно выше. Так, люминесцирующие пленки состава оксид – CuI при $\lambda_{\text{возб}} = 370\text{ нм}$ трансформируют УФ-излучение в красную область спектра с эффективностью $\sim 80\%$, причем с излучаемыми при $\lambda \sim 720\text{ нм}$ квантами, доля которых достигает почти 100% [3]. Представленные данные позволяют предположить, что модификация поверхности СЭ путем нанесения на нее люминесцирующих оксидных пленок, активированных CuI , может привести к существенному увеличению их КПД.

Цель работы – исследовать влияние пленок состава оксид – CuI на фотоэлектрические параметры кремниевых СЭ для установления возможности повышения их эффективности. В качестве оксидной матрицы использовали Al_2O_3 . Применение других оксидов будет предметом следующих публикаций.

Материалы и методы исследования

Для формирования переизлучающих пленок золь Al_2O_3 получали гидролизом 10% водного раствора $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ в присутствии аммиака (1 : 1) с последующей отмывкой полученного осадка до начала самопептизации и ультразвуковым (УЗ) диспергированием (рН золя Al_2O_3 составил 5,5; $w = 4,7\text{ мас. \%}$; размер частиц колебался в пределах 5–35 нм). К указанному золю при интенсивном перемешивании добавляли определенное количество порошка CuI марки «ч.» и проводили УЗ-обработку до получения

однородной суспензии. Одно- или двухслойные пленки формировали центрифужным способом путем нанесения суспензии на поверхность кварцевых подложек для измерения люминесцентных свойств и (или) на поверхность кремниевых СЭ для измерения их фотоэлектрических параметров. Каждый слой сушили на воздухе при 150 °С в течение 10 мин. Указанный режим термообработки был выбран опытным путем: данной температуры и времени достаточно для удаления адсорбированной и (частично) химически связанной воды и формирования гелеобразного слоя оксида. В работе использовали стандартные СЭ на основе монокристаллического кремния дырочной проводимости, в котором $p-n$ -переход сформирован высокотемпературной диффузией фосфора.

Рентгенографическое исследование CuI проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2 (ИЦ «Буревестник», Россия) с использованием CuK_α -излучения. Размеры и форму частиц изучали на сканирующем электронном микроскопе LEO-1420 (*Carl Zeiss*, Германия). Спектры пропускания пленок снимали на спектрофотометре HR2000+ (*Ocean Optics*, США) по отношению к чистому кварцевому стеклу, коэффициент пропускания ($K_{\text{проп}}$) которого принимали за 100 %. Спектры люминесценции (СЛ) и спектры возбуждения люминесценции (СВЛ) пленок регистрировали на спектрофлуориметре СДЛ-2 (Россия) в интервале длин волн 200–900 нм. Нормировку СЛ осуществляли приведением интенсивности к единице в максимуме спектра. Измерения проводились при температуре 298 К. Для исследования темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) солнечных элементов до и после нанесения пленок использовали источник-измеритель Keithley 2400 (США), работающий в режиме генератора напряжения и измерителя силы тока. Погрешность определения напряжения и силы тока не превышала 0,1 %. Спектры ампер-ваттной фоточувствительности СЭ изучались посредством измерения фототока в области 200–1000 нм с помощью спектрофотометра МС 122 (*Proscan Special Instruments*, Беларусь). Спектральная ширина щели составляла 3 нм. В качестве контрольного фотоприемника применялся калиброванный фотодиод Hamamatsu S1336 8Q051 (США) с известной ампер-ваттной спектральной характеристикой. Знание ампер-ваттной чувствительности СЭ позволяло рассчитать его внешнюю квантовую эффективность.

Результаты и их обсуждение

По результатам рентгенодифракционного исследования (рис. 1, *а*) исходный порошок CuI имеет кубическую структуру (γCuI). Согласно данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) размеры частиц лежат в пределах 1–1,5 мкм (рис. 1, *б*).

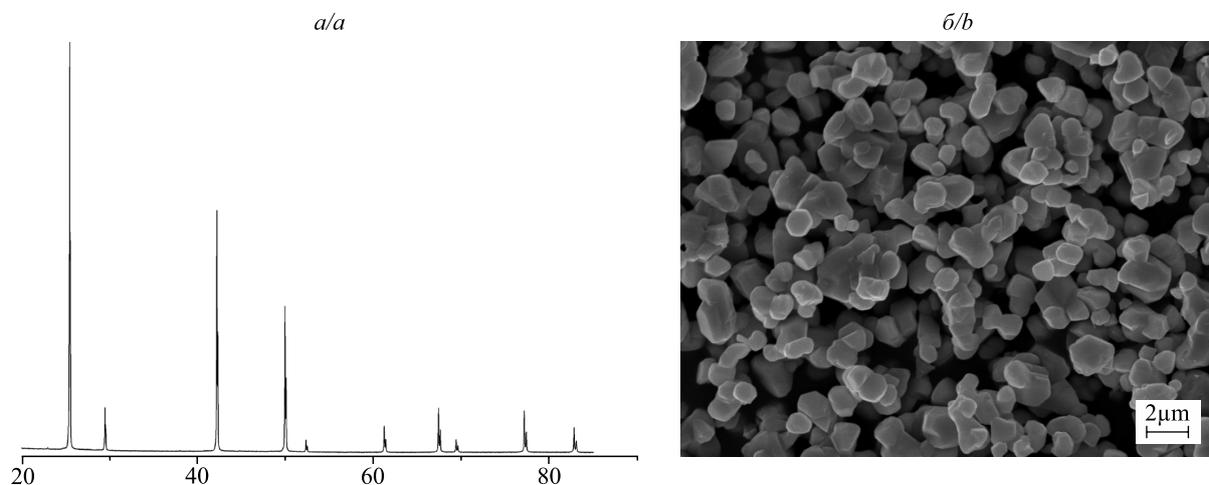


Рис. 1. Рентгенограмма (*а*) и СЭМ-изображение (*б*) порошка CuI
Fig. 1. XRD patterns (*a*) and SEM-image (*b*) for CuI powder

Спектр фотолюминесценции CuI (рис. 2, *а*) при $\lambda_{\text{возб}} = 360$ нм имеет две характерные полосы: узкую ($\lambda_{\text{max}} \sim 420$ нм) и менее интенсивную широкую ($\lambda_{\text{max}} \sim 720$ нм). С учетом литературных данных [9–11] коротковолновая полоса соответствует излучательной рекомбинации свободных экситонов, длинноволновая связана с рекомбинацией электронов и дырок на поверхностных дефектах CuI (вакансиях йода).

СВЛ CuI (рис. 2, *б*) является бесструктурным в области 250–400 нм со слабовыраженным максимумом при 410 нм. Наблюдаемый вид СВЛ связан с возбуждением электронов с внутренних уровней валентной зоны в зону проводимости, а при ~ 410 нм – с потолка валентной зоны в зону проводимости.

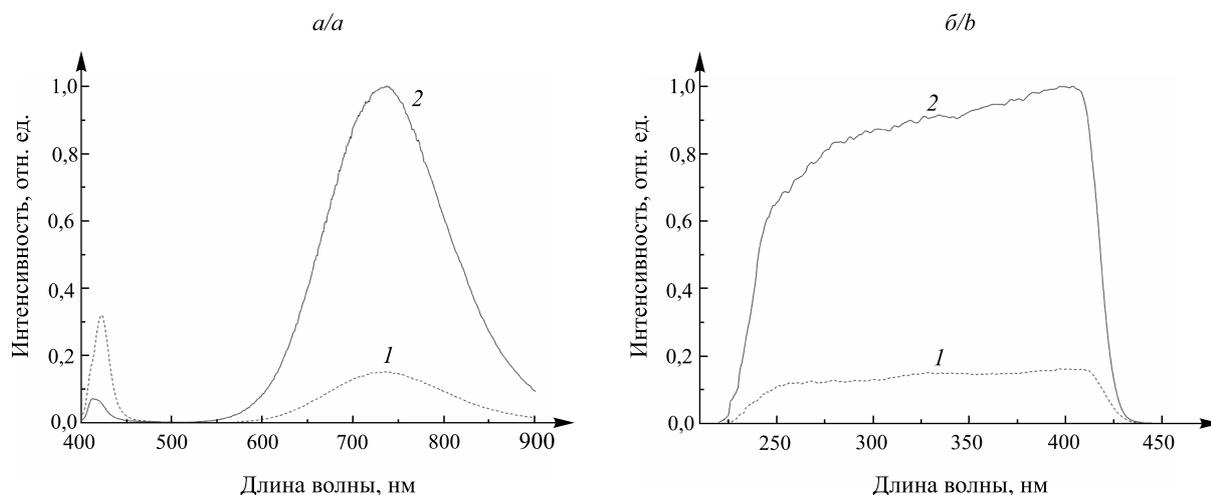


Рис. 2. СЛ (а) и СВЛ (б) порошка CuI в зависимости от термообработки:

1 – исходный, 2 – Ar (при 280 °С в течение 30 мин);

$\lambda_{\text{возб}} = 360 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{рег}} = 720 \text{ нм}$

Fig. 2. Luminescence (a) and excitation luminescence (b) spectra for CuI powder depending on the heat treatment: 1 – initial, 2 – Ar (at 280 °C for 30 min);

$\lambda_{\text{ex}} = 360 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{reg}} = 720 \text{ nm}$

Известно, что термообработка CuI позволяет изменять соотношение Cu и I и варьировать относительную интенсивность полос люминесценции [4]. В нашем случае, как видно из рис. 2, а, после прогрева CuI в аргоне интенсивность коротковолновой люминесценции в области $\lambda \sim 420 \text{ нм}$ снижается приблизительно в 4,5 раза, а интенсивность люминесценции в области $\lambda \sim 720 \text{ нм}$ повышается примерно в 6,5 раза.

На рис. 3 представлены СЛ и СВЛ однослойных прогретых в аргоне пленок $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CuI}$ в зависимости от количественного состава.

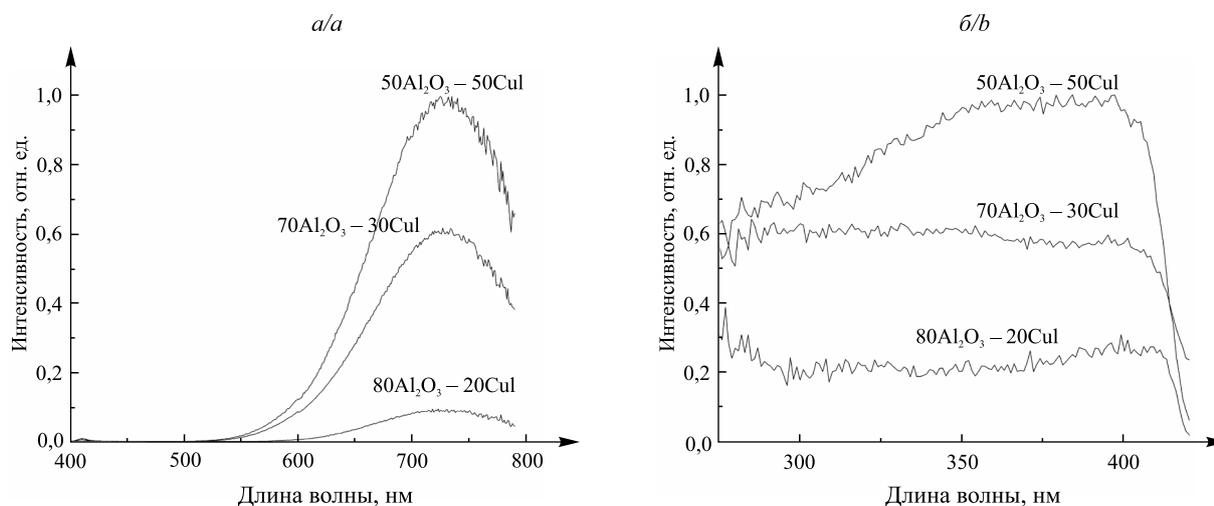


Рис. 3. СЛ (а) и СВЛ (б) однослойных пленок $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CuI}$ в зависимости от соотношения компонентов (мас. %)

($\lambda_{\text{возб}} = 360 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{рег}} = 720 \text{ нм}$)

Fig. 3. Luminescence (a) and excitation luminescence (b) spectra for $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CuI}$ monolayer films depending on the ratio of components (wt. %)

($\lambda_{\text{ex}} = 360 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{reg}} = 720 \text{ nm}$)

Установлено, что с увеличением количества CuI в пленках от 20 до 50 мас. % интенсивность их люминесценции в области 650–800 нм при $\lambda_{\text{возб}} = 360 \text{ нм}$ возрастает практически на порядок (см. рис. 3, а), и при этом они характеризуются достаточно высокими значениями $K_{\text{проп}}$ (90–98 %) в области 400–900 нм. Это согласуется с зависимостью СВЛ пленок от концентрации CuI (см. рис. 3, б). Дальнейшее увеличение содержания CuI в пленках приводит к уменьшению их $K_{\text{проп}}$, что нежелательно.

Было также установлено, что дополнительный прогрев пленок $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CuI}$ в аргоне, как и в случае прогрева порошка CuI, способствует увеличению интенсивности их люминесценции в длинноволно-

вой области. Положительный эффект прогрева, вероятнее всего, обусловлен увеличением количества дефектов – вакансий йода, ответственных за люминесценцию CuI в области 720 нм [12; 13].

В дальнейших исследованиях при измерении фотоэлектрических параметров СЭ формировали одно- и двухслойные пленки состава $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$, при этом исходный порошок CuI и пленки прогревали в аргоне при 280°C в течение 30 мин.

В табл. 1 представлены рассчитанные из темновых ВАХ значения параллельного и последовательного сопротивлений, а также контактная разность потенциалов для исходных СЭ и СЭ с нанесенными переизлучающими пленками $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$. Параллельное и последовательное сопротивления определялись из наклона вольт-амперной характеристики на участках от $-0,8$ до 0 В и от $+0,6$ до $+0,7$ В соответственно (знаки «минус» и «плюс» здесь указывают на обратное и прямое напряжения на $p - n$ -переходе). Контактная разность потенциалов устанавливалась по пересечению касательной к вольт-амперной характеристике, проведенной в области прямых смещений, с осью напряжений (рис. 4).

Таблица 1

Параметры СЭ, рассчитанные из их темновых ВАХ,
до и после нанесения переизлучающих пленок

Table 1

SC parameters calculated from their dark I – V characteristics
before and after deposition films

Образец	Последовательное сопротивление (R_s), Ом	Параллельное сопротивление (R_p), кОм	Контактная разность потенциалов (U_0), В
СЭ-1	1,12	0,78	0,54
СЭ-1 с однослойной пленкой состава $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$	1,10	1,82	0,54
СЭ-2	1,04	2,66	0,56
СЭ-2 с двухслойной пленкой состава $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$	1,08	3,18	0,56

Примечание. СЭ-1, СЭ-2 – исходные СЭ.

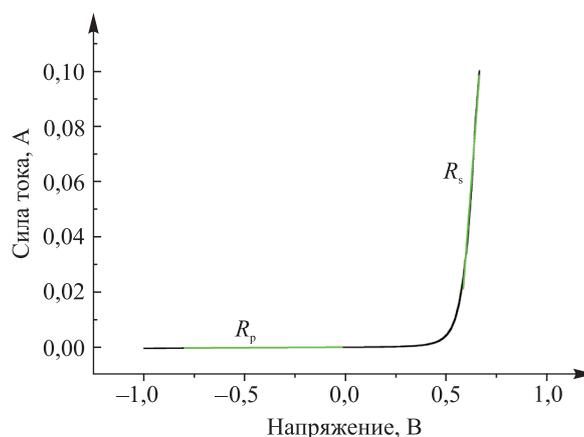


Рис. 4. Характерная темновая ВАХ исследуемого СЭ и линейная аппроксимация ее участков для определения последовательного и параллельного сопротивлений

Fig. 4. Typical dark I – V characteristic of the investigated solar cell and linear approximation of its sections to determine series and parallel resistances

Нанесение пленок практически не влияет на контактную разность потенциалов и последовательное сопротивление исследуемых СЭ, но приводит к заметному возрастанию параллельного сопротивления, которое влечет за собой увеличение отдаваемого во внешнюю цепь тока, и, следовательно, росту эффективности фотоэлектрического преобразования (см. табл. 1). Необходимо отметить более существенное увеличение параллельного сопротивления (в 2,3 раза) для однослойных пленок $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$ по сравнению с двухслойными (в 1,2 раза).

Значительный разброс значений параллельного сопротивления для исходных СЭ не является удивительным и может быть естественным образом объяснен различным состоянием их торцевых поверхностей.

Изучение спектров ампер-ваттной фоточувствительности и внешней квантовой эффективности СЭ до и после нанесения переизлучающих пленок показало увеличение их чувствительности после нанесения переизлучающих пленок, причем не только в УФ-области, но и в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра (рис. 5, а, б). Так, в области 350–390 нм квантовая эффективность СЭ с однослойной пленкой повышается на 60 %, с двухслойной – приблизительно на 40 %.

Знание спектров ампер-ваттной чувствительности позволяет рассчитать фототок, который будет генерироваться СЭ при его освещении излучением любого спектрального состава. В табл. 2 представлены величины плотности фототока СЭ при его освещении солнечным светом АМ1,5 (излучение интенсивностью 1000 Вт/м^2 , спектральный состав которого соответствует солнечному свету, прошедшему в ясную погоду полторы атмосферы).

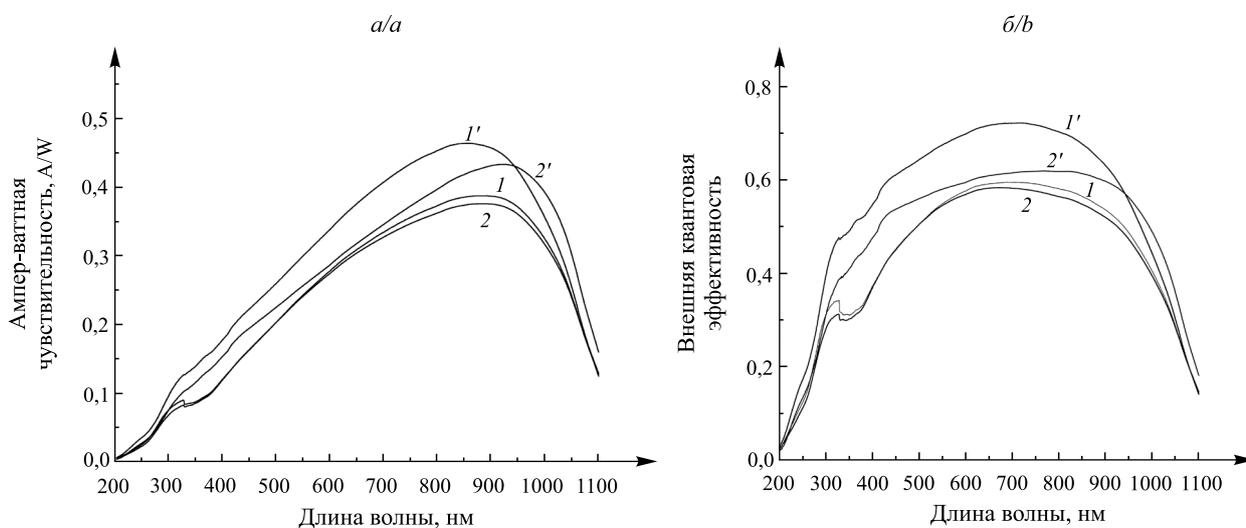


Рис. 5. Спектры ампер-ваттной фоточувствительности (а) и внешней квантовой эффективности (б) исходных СЭ-1 (1), СЭ-2 (2) и СЭ с пленкой состава $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$ (1 слой (1') и 2 слоя (2'))
Fig. 5. Spectra of ampere-watt photosensitivity (a) and external quantum efficiency (b) of initial SC-1 (1), SC-2 (2) and SCs with $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$ film monolayer (1') and double layer (2')

Таблица 2

Рассчитанная плотность фототока СЭ до и после нанесения переизлучающих пленок при освещении солнечным светом АМ1,5 (1000 Вт/м^2)

Table 2

Calculated photocurrent density of solar cell before and after film deposition under AM1.5 sunlight illumination (1000 W/m^2)

Образец	Плотность фототока СЭ		
	До нанесения (j_{ph}), мА/см^2	После нанесения (j_{ph}), мА/см^2	Относительное изменение, %
СЭ-1	15,6	21,3	36,5
СЭ-2	21,4	24,0	12,1

Как видно из табл. 2, для образца с переизлучающей однослойной пленкой состава $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$ наблюдается значительное увеличение плотности фототока СЭ (на 36,5 %), а для образца с двухслойной пленкой – заметно меньшее (приблизительно в 3 раза). Такое снижение плотности фототока, по видимому, связано с уменьшением $K_{\text{проп}}$ двухслойных пленок.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования определены состав пленок $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CuI}$ и условия термообработки, обеспечивающие оптимальный баланс значений интенсивности люминесценции пленок при $\lambda_{\text{возб}} = 360$ нм и их $K_{\text{проп}}$ в области 400–900 нм. Нанесение люминесцирующих пленок не оказало отрицательного влияния на темновые электрические параметры используемых СЭ, но наблюдался рост параллельного сопротивления СЭ, приводящий к увеличению тока, отдаваемого в нагрузку. Наибольший прирост внешней квантовой эффективности фотоэлектрического преобразования СЭ в ближнем УФ-диапазоне наблюдался для однослойных пленок состава $50\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\text{CuI}$, прошедших термообработку при 280 °С в течение 30 мин, что соответствует относительному увеличению фототока более чем на 35 % при воздействии излучения спектрального состава АМ1,5 (1000 Вт/м²). Результаты исследования подтвердили эффективность системы *переизлучающая пленка ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CuI}$) – СЭ*, что делает целесообразным использование люминесцентных пленок, эффективно поглощающих УФ-излучение, для увеличения КПД кремниевых СЭ. Полученные данные представляют интерес для организаций, занимающихся вопросами физики и технологии кремниевых СЭ.

Библиографические ссылки

1. Sen Z. Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004;30(4):367–416. DOI: 10.1016/j.peccs.2004.02.004.
2. Гременок ВФ, Тиванов МС, Залесский ВБ. *Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов*. Минск: Издательский центр БГУ; 2007. 222 с.
3. Малашкевич ГЕ, Шевченко ГП, Бокшиц ЮВ, Фролова ЕВ, авторы; Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, правообладатель. Люминесцирующая пленка. Патент Республики Беларусь 10742. 30 июня 2008.
4. Шевченко ГП, Пискунович ИЮ, Ступак АП, Семкова ГИ. Люминесцирующие пленки оксид – CuI. *Вестник БГУ. Серия 2. Химия. Биология. География*. 2012;1:15–18.
5. Малашкевич ГЕ, Шевченко ГП, Ващенко СВ, Денисенко ГА, Першукевич ПП. Влияние легирования золотом пленок $\text{GeO}_2 - \text{Eu}_2\text{O}_3 - \text{Ag}$ на их спектрально-люминесцентные свойства. *Известия РАН. Серия физическая*. 2006;70(11):1662–1667.
6. Малашкевич ГЕ, Шевченко ГП, Сержкина СВ, Першукевич ПП, Семкова ГИ, Глушонок ГК. Влияние химического состояния серебра на люминесцентные свойства пленок системы $\text{GeO}_2 - \text{Eu}_2\text{O}_3 - \text{Ag}$. *Физика твердого тела*. 2007;49(10):1804–1814.
7. Malashkevich GE, Chukova OV, Nedilko SG, Shevchenko GP, Bokshits YuV, Kouhar VV. Influence of gold nanoparticles on luminescence of Eu^{3+} ions sensitized by structural defects in germanate films. *Journal of Physical Chemistry C*. 2016;120(28):15369–15377. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b02324.
8. Shevchenko GP, Bokshits YV, Piskunovitch IY, Zhuravkov VA, Malashkevich GE. Synthesis and spectral-luminescent properties of CuI nano- and microcrystals. In: Borisenko Victor E, Gaponenko SV, Gurin VS, Kam CH, editors. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Proceedings of International Conference Nanomeeting – 2011; 2011 May 24–27; Minsk, Belarus*. Singapore: World Scientific Publishing Company; 2011. p. 385–388. DOI: 10.1142/9789814343909_0092.
9. Sirimanne PM, Soga T, Jimbo T. Identification of various luminescence centers in cui films by cathodoluminescence technique. *Journal of Luminescence*. 2003;105(2–4):105–109. DOI: 10.1016/S0022-2313(03)00114-5.
10. Yanyan Xu, Dairong Chen, Xiuling Jiao, Long Ba. PEG-assisted fabrication of single-crystalline CuI nanosheets: a general route to two-dimensional nanostructured materials. *Journal of Physical Chemistry C*. 2007;111(1):6–9. DOI: 10.1021/jp066649t.
11. Gogolin O, Mshvelidze G, Tsitsishvili E, Schmidt M, Hepting A, Klingshirn C, et al. Properties of CuI nanocrystallites embedded in a glass matrix: from quantum confinement to bulk-band parameters. *Physical Review B*. 2000;62(19):13053–13056. DOI: 10.1103/PhysRevB.62.13053.
12. Xia Ming, Gu Mu, Liu Xiaolin, Liu Bo, Huang Shiming, Ni Chen. Electrical and luminescence properties of Zn^{2+} doped CuI thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2015;26:2629–2638. DOI: 10.1007/s10854-015-2735-7.
13. Никитенко ВА, Стояхин СГ, Кокин СМ. Красно-оранжевая люминесценция нелегированных кристаллов йодида меди в интервале температур 80–300 К. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2019;86(5):739–745.

References

1. Sen Z. Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004;30(4):367–416. DOI: 10.1016/j.peccs.2004.02.004.
2. Gremenok VF, Tivanov MS, Zaleskii VB. *Solnechnye elementy na osnove poluprovodnikovyykh materialov* [Solar cells based on semiconductor materials]. Minsk: Izdatel'skii tsentr BGU; 2007. 222 p. Russian.
3. Malashkevich GE, Shevchenko GP, Bokshits YuV, Frolova EV, inventors; Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, assignee. Luminescent film. Belarusian patent 10742. 2008 June 30. Russian.

4. Shevchenko GP, Piskunovich IYu, Stupak AP, Semkova GI. Oxide – CuI luminescent films. *Vestnik BGU. Seriya 2. Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2012;1:15–18. Russian.
5. Malashkevich GE, Shevchenko GP, Vashchenko SV, Denisenko GA, Pershukevich PP. Effect of doping with gold of $\text{GeO}_2\text{-Eu}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ film on their spectral luminescent properties. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*. 2006;70(11):1662–1667. Russian.
6. Malashkevich GE, Shevchenko GP, Serezhkina SV, Pershukevich PP, Semkova GI, Glushonok GK. [Influence of the chemical state of silver on the luminescent properties of films of the $\text{GeO}_2\text{-Eu}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ system]. *Fizika tverdogo tela*. 2007;49(10):1804–1814. Russian.
7. Malashkevich GE, Chukova OV, Nedilko SG, Shevchenko GP, Bokshits YuV, Kouhar VV. Influence of gold nanoparticles on luminescence of Eu^{3+} ions sensitized by structural defects in germanate films. *Journal of Physical Chemistry C*. 2016;120(28):15369–15377. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b02324.
8. Shevchenko GP, Bokshits YV, Piskunovitch IY, Zhuravkov VA, Malashkevich GE. Synthesis and spectral-luminescent properties of CuI nano- and microcrystals. In: Borisenko Victor E, Gaponenko SV, Gurin VS, Kam CH, editors. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Proceedings of International Conference Nanomeeting – 2011; 2011 May 24–27; Minsk, Belarus*. Singapore: World Scientific Publishing Company; 2011. p. 385–388. DOI: 10.1142/9789814343909_0092.
9. Sirimanne PM, Soga T, Jimbo T. Identification of various luminescence centers in cui films by cathodoluminescence technique. *Journal of Luminescence*. 2003;105(2–4):105–109. DOI: 10.1016/S0022-2313(03)00114-5.
10. Yanyan Xu, Dairong Chen, Xiuling Jiao, Long Ba. PEG-assisted fabrication of single-crystalline CuI nanosheets: a general route to two-dimensional nanostructured materials. *Journal of Physical Chemistry C*. 2007;111(1):6–9. DOI: 10.1021/jp066649t.
11. Gogolin O, Mshvelidze G, Tsitsishvili E, Schmidt M, Hepting A, Klingshirn C, et al. Properties of CuI nanocrystallites embedded in a glass matrix: from quantum confinement to bulk-band parameters. *Physical Review B*. 2000;62(19):13053–13056. DOI: 10.1103/PhysRevB.62.13053.
12. Xia Ming, Gu Mu, Liu Xiaolin, Liu Bo, Huang Shiming, Ni Chen. Electrical and luminescence properties of Zn^{2+} doped CuI thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2015;26:2629–2638. DOI: 10.1007/s10854-015-2735-7.
13. Nikitenko VA, Stojuhin SG, Kokin SM. Red-orange luminescence of undoped copper iodide crystals in the range of temperature 80–300 K. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*. 2019;86(5):739–745. Russian.

Статья поступила в редакцию 03.12.2020.
Received by editorial board 03.12.2020.