

Уникальные спектрально-люминесцентные свойства наноструктурированной поверхностно-замкнутой углеродной формы – фуллерена  $C_{60}$  – относят его к соединению, на основе которого могут быть разработаны новые материалы, имеющие значительные перспективы их использования в электронике, оптоэлектронике и других областях техники. Такие материалы обладают огромным потенциалом оптических приложений, в частности, как материалы, проявляющие оптическую нелинейность, т.е. данное соединение может быть использовано в устройствах по ограничению интенсивного светового излучения видимого диапазона. Более того, выполненные исследования показали, что фуллерен  $C_{60}$  в жидком растворе и твердотельной ТЭОС гель-матрице может быть использован в качестве компонента СЭ. Исследования показали, что наиболее перспективной технологией формирования наноструктурированных гетеропереходов СЭ является формирование нанокристаллитов фталоцианина меди в композитной матрице аморфного  $C_{60}$  в процессе вакуумного соосаждения компонент.

1. Harnessing Light. Optical Science and Engineering for the 21-st Century / Washington, 1998. – 550 p.
2. J. Plastic Solar Cells. / C. Brabec [et al.] // Adv. Funct. Mater. – 2001. – Voll. 11, № 1. – P.15-26.
3. Peumans, P. Very-high-efficiency double-heterostructure copper phthalocyanine- $C_{60}$  photovoltaic cells / P. Peumans, R. Forrest // Appl. Phys. Lett. – 2001. – Vol. 79, № 17. – P. 126-128.

УДК 541.16

### ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДНЫХ ФТАЛОЦИАНИНОВ И ПЕРИЛЕНОВ

<sup>1</sup>Чернявский В.А. (канд. физ.-мат. наук), <sup>2</sup>Шулицкий Б.Г., <sup>1</sup>Арабей С.М. (доктор физ.-мат. наук), <sup>1</sup>Болодон В.Н. (канд. биолог. наук), <sup>1</sup>Дымонт В.П. (канд. физ.-мат. наук, доцент), <sup>1</sup>Бутылина И.Б. (канд. хим. наук, доцент), <sup>1</sup>Нехайчик А.А.

<sup>1</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь

Для решения проблемы ограниченности спектрального диапазона и эффективности светопоглощения донорно-акцепторными компонентами гетероперехода солнечных элементов (СЭ) в последнее время успешно разрабатываются многоуровневые конструкции СЭ на основе комбинации гетеропереходов, эффективно поглощающих в узких спектральных диапазонах, но в совокупности перекрывающих большую часть спектрального диапазона солнечного излучения.

В настоящей работе для создания слоистой архитектуры СЭ последовательно формировались тонкие пленки органических материалов, пригодных в качестве компонент гетеропереходов. Для этого в работе использовались фталоцианин меди (CuPc), дибензимидазол-перилен-3,4,9,10-тетракарбоновой кислоты (PTCBI), а также 3,4-полиэтилен-диокситиофен полистиреносульфат (PEDOT:PSS). Были сформированы многослойные тонкопленочные системы и исследованы их фотоэлектрические и спектральные свойства одноуровневая ячейка СЭ (ячейка №1) – ITO/PEDOT:PSS/CuPc/PTCBI/Ag и двухуровневая ячейка СЭ (ячейка №2) – ITO/PEDOT:PSS/CuPc/PTCBI/Ag/CuPc/PTCBI/Ag. Толщина и последовательность слоев ячеек, а также их фотоэлектрические параметры ( $I_{кз}$  – ток короткого замыкания,  $U_{хх}$  – напряжение холостого хода, и  $\eta$  – интегральная энергетическая эффективность) при освещении модельным источником солнечного излучения AM1.5 ( $W = 75$  мВт/см<sup>2</sup>) представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Толщина (в нм) и последовательность слоев фотовольтаических ячеек.

| Номер ячейки | ITO   | PEDOT: PSS | CuPc | PTCBI | Ag    | CuPc | PTCBI | Ag    |
|--------------|-------|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 1            | 276,5 | 56,0       | 13,3 | 24,4  | 275,0 | –    | –     | –     |
| 2            | 296,0 | 51,0       | 13,6 | 25,4  | 1,5   | 13,5 | 25,3  | 250,0 |

Таблица 2. Фотоэлектрические параметры ячеек СЭ при освещении модельным источником солнечного излучения AM1,5.

| Номер ячейки | И <sub>кз</sub> , мА/см <sup>2</sup> | U <sub>хх</sub> , В | η, % |
|--------------|--------------------------------------|---------------------|------|
| 1            | 3,5                                  | 0,51                | 0,76 |
| 2            | 2,6                                  | 0,86                | 1,13 |

Спектральное распределение тока короткого замыкания  $I_{кз}$  для исследованных ячеек и их спектры поглощения представлены на рисунке 1а и 1б.

Моделирование процессов взаимодействия электромагнитного излучения с исследуемыми ячейками в диапазоне эффективного поглощения донорно-акцепторных компонент CuPc и PTCBI (400 ÷ 800 нм) с учетом интерференционных явлений свидетельствует, что ячейка № 1 способна поглощать порядка 26,5% от энергии солнечного излучения в диапазоне 400 ÷ 800 нм. Расчеты показывают, что максимально возможное значение плотности фототока ячейки при освещении модельным источником солнечного излучения AM1,5 с  $W = 75$  мВт/см<sup>2</sup> в диапазоне 400 ÷ 800 нм при 100 %-ной квантовой эффективности преобразования фотон→электрон составит 19,5 мА/см<sup>2</sup>. Для ячейки № 1 при 26,5 % поглощении этот параметр соответственно 5,1 мА/см<sup>2</sup>.

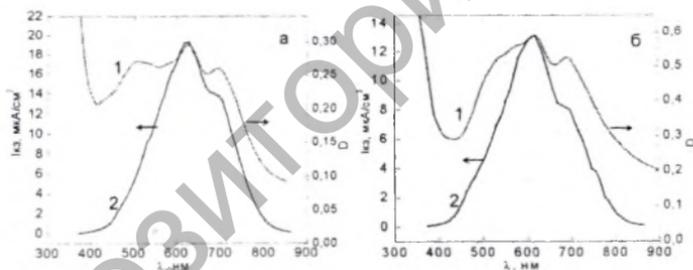


Рис. 1. Спектральное распределение токов короткого замыкания  $I_{кз}$  (кривые 1) и спектры поглощения (кривые 2) ячеек № 1 (а) и № 2 (б).

Полученные значения  $I_{кз}^{№2} = 3,5$  мА/см<sup>2</sup> свидетельствуют об очень высокой интегральной внутренней квантовой эффективности (IQE = 68 %) ячейки №2 в диапазоне 400 ÷ 800 нм. Рассчитанные на основании фотоэлектрических параметров спектральные распределения внутренней и внешней квантовой эффективности (IQE и EQE соответственно) представлены на рисунке 2. Значение IQE = 95 % в диапазоне 600 ÷ 700 нм (рисунок 2а) свидетельствует, что наиболее эффективно в ячейке № 1 работает слой CuPc, в то время как для области поглощения PTCBI параметры значительно хуже. Значительное падение IQE для двухуровневой ячейки № 2 связано с возрастанием внутреннего сопротивления, но при этом значительно повышается последовательное сопротивление, свидетельствующее о снижении в двухуровневой ячейке рекомбинационных потерь и внутренних проколов на структурных дефектах.

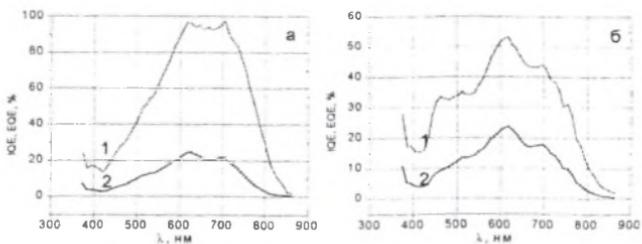


Рис.2. Спектральные распределения IQE (1) и EQE (2) для ячеек № 1 (а) и № 2 (б). Освещение модельным источником солнечного излучения AM1,5.

Высокое значение  $IQE = 95\%$ , полученной для ячейки №1 в области поглощения  $CuPc$   $600 + 700$  нм свидетельствует об эффективности процессов формирования тонких пленок  $CuPc$  в условиях наведенного молекулярного дипольного момента УФ-возбуждением на резонансных частотах поглощения. В предположении аналогичного повышения внутренней квантовой эффективности в спектральной области поглощения  $PTCBI$  ( $450 + 600$  нм) можно говорить о большом потенциале данной донорно-акцепторной пары полупроводниковых фоторезистивных материалов для конструирования высокоэффективных фотовольтаических ячеек с многоуровневой архитектурой гетеропереходов.

Таким образом, в результате проведенных исследований получена высокая интегральная внутренняя квантовая эффективность ( $IQE = 68\%$ ) в диапазоне  $400 + 800$  нм для одноуровневой ячейки на основе  $CuPc/PTCBI$ . Значение  $IQE = 95\%$  в диапазоне  $600 + 700$  нм свидетельствует, что наиболее эффективно в фотовольтаической паре работает слой  $CuPc$  (действенный процесс формирования тонких пленок  $CuPc$  в условиях наведенного дипольного момента молекул  $CuPc$  УФ-возбуждением на резонансных частотах поглощения), в то время как для области поглощения  $PTCBI$  параметры значительно хуже. Значительное падение  $IQE$  для двухуровневой ячейки связано с возрастанием внутреннего сопротивления и уменьшением последовательного сопротивления.