

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУЛЛЕРЕНА C<sub>60</sub> – КОМПОНЕНТА ГЕТЕРОПЕРЕХОДА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

<sup>1</sup>Чернявский В.А. (канд. физ.-мат. наук), <sup>1</sup>Арабей С.М. (доктор физ.-мат. наук),  
<sup>2</sup>Павич Т.А. (канд. хим. наук), <sup>1</sup>Болодон В.Н. (канд. биолог. наук), <sup>1</sup>Дымонт В.П. (канд.  
физ.-мат. наук, доцент), <sup>1</sup>Бугылина И.Б. (канд. хим. наук, доцент), <sup>1</sup>Полушкина С.И.

<sup>1</sup>*Белорусский государственный аграрный технический университет  
Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

Причиной ограниченной конкурентоспособности экологически чистой солнечной энергетики является высокая стоимость электрической энергии, конвертируемой солнечными элементами (СЭ) на основе Si, соединений A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> и A<sup>2</sup>B<sup>6</sup> (30 ÷ 50 цент/кВт·ч при средневропейской стоимости электроэнергии 5 цент/кВт·ч) [1]. Прорыв к резкому удешевлению солнечных элементов ожидается в области твердотельных тонкопленочных конверторов солнечной энергии на основе гетеропереходов в донорно-акцепторных органических и гибридных органо-неорганических материалах на гибкой полимерной подложке рулонного типа. Сдерживающим фактором является низкая энергетическая эффективность таких СЭ (2 ÷ 4 %), вместо теоретически прогнозируемой – 30 % [2,3]. Увеличить эффективность СЭ позволит создание объемно-распределенных гетеропереходов, одним из компонентов которого будет являться фуллерен C<sub>60</sub>. Установлено, что наиболее перспективной технологией формирования наноструктурированных гетеропереходов является формирование нанокристаллитов фталоцианина меди в композитной матрице аморфного фуллерена C<sub>60</sub> в процессе вакуумного соосаждения компонент. Важным этапом при создании гетеропереходов СЭ на основе предлагаемых органических компонентов является всестороннее исследование спектрально-люминесцентных и нелинейно-оптических свойств фуллерена C<sub>60</sub> в жидких растворах и твердотельных полимерных матрицах, что и явилось целью настоящей работы.

Исследование спектрально-люминесцентных свойств фуллерена C<sub>60</sub> выполнено в растворе ароматического углеводорода – толуоле, в котором растворимость C<sub>60</sub> одна из самых высоких, а также в твердотельной матрице тетраэтоксисилана (ТЭОС, матрица получена золь-гель методом). Спектр поглощения фуллерена C<sub>60</sub> в толуоле при комнатной температуре изображен на рисунке 1а, в ТЭОС гель-матрице – на рисунке 1б. Слабоинтенсивные полосы поглощения в области 650–500 нм соответствуют S<sub>1</sub>←S<sub>0</sub> переходу, а интенсивная полоса с максимумом при 335 нм – S<sub>2</sub>←S<sub>0</sub> переходу. Как видно из рисунка 1а, полоса поглощения при 475 нм, типичная для C<sub>70</sub>, свидетельствует о присутствии незначительного количества данного фуллерена (как примеси) в исследуемом растворе. Спектр флуоресценции фуллерена C<sub>60</sub>, полученный при возбуждении излучением с λ<sub>возб</sub> = 475 нм, также изображен на рисунке 1а. На основании анализа зеркальной симметрии спектров флуоресценции и поглощения в области S<sub>1</sub>↔S<sub>0</sub> переходов можно сделать вывод, что 0–0-полоса S<sub>1</sub>→S<sub>0</sub> флуоресценции имеет максимум при 621 нм. Внедрение фуллерена C<sub>60</sub> в ТЭОС гель-матрицу слабо влияет на спектр поглощения фуллерена C<sub>60</sub> (рисунок 1б).

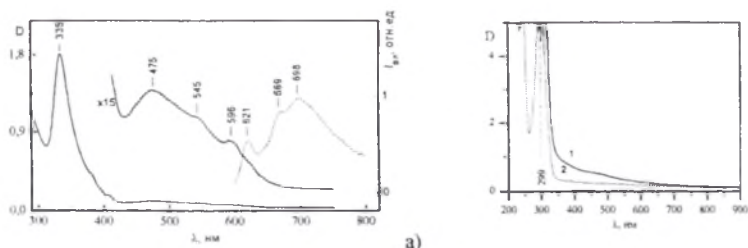


Рис. 1. Спектры поглощения (сплошная) и люминесценции (пунктирная,  $\lambda_{\text{возб}} = 475 \text{ нм}$ ) фуллерена  $C_{60}$  в толуоле (а) и ТЭОС гель-матрице (б) (1 - ТЭОС гель-матрица, полученная из пиридинового раствора; 2 - ТЭОС гель-матрица, полученная из водной суспензии).

Методом пикосекундной лазерной спектроскопии было исследовано наведенное поглощение раствора фуллерена  $C_{60}$  в толуоле и в ТЭОС гель-матрице. Возбуждение осуществлялось третьей гармоникой Nd:YAG-лазера ( $\lambda_{\text{возб}} = 354 \text{ нм}$ ) с частотой 1 Гц и длительностью импульса  $\tau_{\text{имп}} = 30 \text{ пс}$ . Зондирование раствора проводилось континуумом белого света, возбуждаемого основной гармоникой Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 1064 \text{ нм}$ ). Пропускание исследуемого раствора регистрировалось ПЗС-матрицей, которая позволяла одновременно фиксировать как опорный, так и исследуемый сигналы в режиме накопления, что значительно увеличивало точность измерений. На рисунке 2 представлены спектры наведенного синглет-синглетного (1) и триплет-триплетного (2) поглощения раствора фуллерена  $C_{60}$  в толуоле (рисунок 2а) и ТЭОС гель-матрице (рисунок 2б). Синглет-синглетное поглощение регистрировалось при нулевой задержке зондирующего импульса относительно импульса возбуждения, а триплет-триплетное поглощение – при задержке, равной 7,5 нс. Выбор такой временной задержки (7,5 нс) связан с тем, что время интеркомбинационной конверсии (переход  $S_1 \rightsquigarrow T_1$ ) молекулы  $C_{60}$  ( $\tau_{ST} \approx 0,6 \text{ нс}$ ) значительно меньше этой задержки, а квантовый выход флуоресценции незначителен. Как видно из рисунка 2а, раствор фуллерена обладает слабым синглет-синглетным поглощением в спектральной области 450 – 630 нм. Можно полагать, что широкая полоса поглощения с максимумом при 533 нм соответствует, вероятнее всего,  $S_1 \rightarrow S_3$  переходу (в спектре стационарного поглощения имеется очень интенсивная полоса поглощения в области 260–290 нм (на рисунке 1а не показана)). Напротив, в спектре триплет-триплетного поглощения в области 550 – 850 нм наблюдается интенсивная полоса с максимумом при 748 нм. Этой полосе соответствует  $T_1 \rightarrow T_n$  переход, т.е. переход на  $T_n$ -уровень, лежащий выше  $T_1$ -уровня на  $\sim 13370 \text{ см}^{-1}$ . Как видно из рисунка 2б, в спектре триплет-триплетного поглощения фуллерена  $C_{60}$  в ТЭОС гель-матрице в области 650 – 800 нм наблюдается интенсивная полоса с максимумом при 758 нм. Максимум этой полосы смещен относительно соответствующего максимума для раствора примерно на 10 нм. Не исключено, что такая полоса Т-Т-поглощения фуллерена  $C_{60}$  (интенсивная и сдвинутая в длинноволновую область) может способствовать повышению эффективности СЭ.

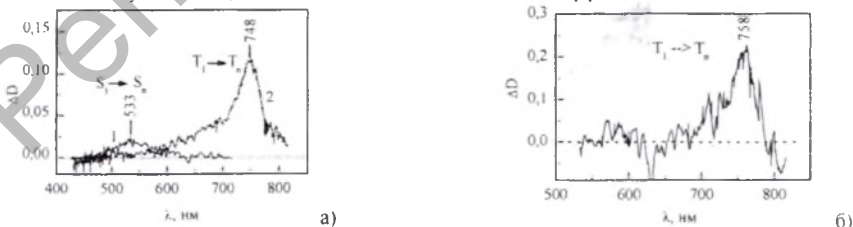


Рис. 2. Спектры наведенного поглощения раствора  $C_{60}$  в толуоле (а) и ТЭОС гель-матрице (б) при возбуждении третьей гармоникой Nd:YAG-лазера ( $\lambda_{\text{возб}} = 354 \text{ нм}$ ,  $\tau_{\text{имп}} = 30 \text{ пс}$ )

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,  $U_{ох}$  – 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.