

УДК 538.97

## ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПОЛИДИФЕНИЛЕНФТАЛИДА, ДОПИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДНЫМИ ФУЛЛЕРЕНА

© 2020 г. А. Р. Юсупов<sup>1, \*</sup>, Р. М. Гадиев<sup>1</sup>, А. Н. Лачинов<sup>1, 2</sup>, Л. М. Халилов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Башкирский государственный педагогический университет имени М. Акмуллы”, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное подразделение  
Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального  
исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

<sup>3</sup>Институт нефтехимии и катализа – обособленное структурное подразделение Федерального  
государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра  
Российской академии наук, Уфа, Россия

\*E-mail: azat.yusupov@bk.ru

Поступила в редакцию 28.11.2019 г.

После доработки 19.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Использование полимерных диэлектриков в качестве матрицы для производных фуллеренов позволяет индуцировать фотопроводящие свойства, характерные для материалов, содержащих фуллерен. В работе представлены результаты исследования свойств полидифениленфталида (ПДФ), допированного производными фуллеренов.

DOI: 10.31857/S0367676520050439

Полимерные материалы обладают уникальным сочетанием механических, физико-химических и электронных свойств [1]. Одной из особенностей полимерных материалов является то, что один и тот же полимер в зависимости от способов изготовления или сочетания с другими материалами может приобретать различные полезные свойства [2, 3]. В связи с этим цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния на электропроводность и фотопроводимость тонких пленок ПДФ производных молекул фуллерена.

Структурная формула ПДФ приведена на рис. 1. В настоящей работе в качестве легирующей примеси были использованы производные фуллерена C<sub>60</sub>(AAR-1339-1) и C<sub>60</sub>(AAR-1343-1) (рис. 2). Экспериментальные образцы представляли собой трехслойную структуру вида ИТО (оксид индия и олова) – полимер–Al. Тонкие пленки полимера формировали методом центрифугирования. Алюминиевые электроды осаждались методом термодиффузионного напыления. Для измерения электрофизических свойств использовали вольтамперные характеристики (ВАХ). Для оценки параметров носителей заряда был использован метод, основанный на токах, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) [4]. Оценку величины потенциального барьера проводили с использованием метода, основанного на модели барьера Шоттки [5, 6].

Производные фуллерена, используемые в работе, обладают фоточувствительностью, поэтому измерения ВАХ проводили в двух режимах: тем-

нотной (I) и фото (УФ) (2). Без добавления фуллеренов. В обычных координатах слева и в двойных логарифмических координатах справа.

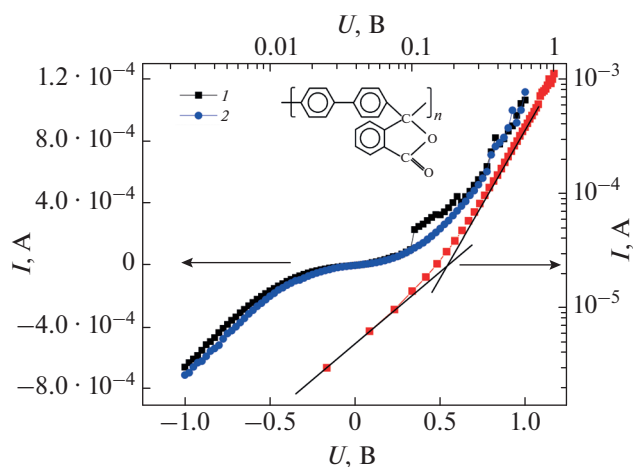


Рис. 1. ВАХ образца ИТО/ПДФ/Al (I – темновой, 2 – фото (УФ)). Без добавления фуллеренов. В обычных координатах слева и в двойных логарифмических координатах справа.

новом и при ультрафиолетовом облучении (УФ). Для измерения ВАХ был использован источник-измеритель Keithley 2400 и УФ-лампа мощностью 25 Вт с  $\lambda_{max} = 365$  нм, расстояние между источником освещения и образцом составляло 10 см.

На рис. 1 в обычных и двойных логарифмических координатах представлены ВАХ экспериментальной структуры на основе ПДФ. Как можно видеть из рисунка, облучение полимерного нелегированного образца оказывает очень слабое влияние на величину протекающего тока. Представленные на рис. 2 результаты измерений на структурах с фуллеренами демонстрируют разное влияние освещения на проводимость образцов. Так, для образца № 1 при облучении ток увеличивается при прямом смещении и уменьшается при обратном смещении. На образце № 2 при освещении ток уменьшается и при прямом, и при обратном смещении.

В табл. 1 представлены результаты оценки подвижности носителей заряда в рамках модели ТОПЗ [4] и результаты оценки потенциальных барьеров на границе металл/полимер. Согласно полученным результатам, подвижность носителей заряда при введении фуллеренов C60 (AAR-1339-1 и AAR-1343-1) существенно уменьшается по сравнению с подвижностью носителей заряда в исходном полимере. Оценить подвижность носителей заряда при темновом измерении на образце № 1 не удалось из-за отсутствия в измеряемом диапазоне напряжений перехода ВАХ на сверхлинейный участок. Подвижность носителей заряда на образце № 2 при освещении уменьшается в ~5 раз, а концентрация носителей заряда увеличивается в ~8 раз. По-видимому, фуллерены C60 (AAR-1339-1 и AAR-1343-1) формируют дополнительные ловушечные состояния с различными значениями энергий в запрещенной зоне.

Расчет потенциальных барьеров на границе металл/полимер показал, что введение фуллеренов приводит к увеличению потенциального барьера на 0.2 эВ по сравнению с чистым ПДФ. В то же время УФ-освещение образца № 1 приводит к незначительному уменьшению барьера (таблица), а образца № 2 – к увеличению потенциально-

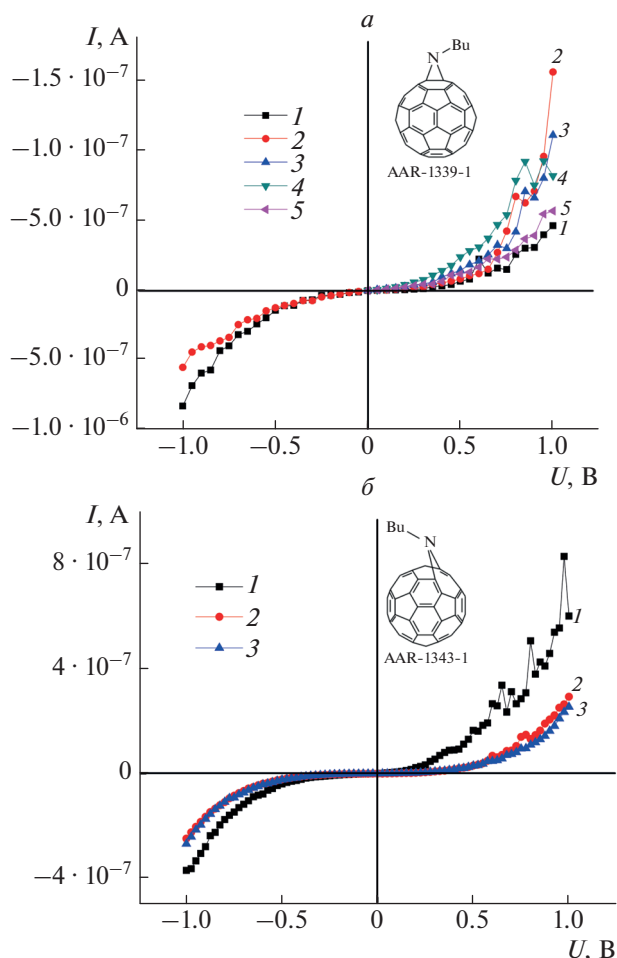


Рис. 2. ВАХ структур на основе ПДФ с добавками C60 (AAR-1339-1) (образец № 1) и C60 (AAR-1343-1) (образец № 2). Влияние освещения на ВАХ легированных полимерных образцов: а – ВАХ структур на основе ПДФ, легированных C60 (AAR-1339-1) 1, 3, 4 – темновые измерения; 2, 5 – при УФ облучении; б – ВАХ структур на основе ПДФ, легированных C60 (AAR-1343-1): 1, 3 – темновые измерения, 2 – при УФ-облучении.

го барьера, что хорошо коррелирует с результатами измерения ВАХ. Необходимо учитывать, что введение таких достаточно активных акцепторов как фуллерены может повлиять на энергетику

Таблица 1. Подвижность носителей заряда и величина потенциального барьера на границе с алюминиевым электродом

Образец	Режим измерения тока	Подвижность, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$\phi_{\text{В}}$ , эВ
ПДФ	Темновой	$4.73 \cdot 10^{-4}$	0.7
№ 1 ПДФ + AAR1339-1	Темновой	не определена	0.9
	УФ	$1.69 \cdot 10^{-7}$	0.87
№ 2 ПДФ + AAR1343-1	Темновой	$2.90 \cdot 10^{-7}$	0.86
	УФ	$5.49 \cdot 10^{-8}$	0.92

комплекса ПДФ + фуллерен. При этом изменение электронного сродства комплекса может существенным образом модифицировать транспорт носителей заряда внутри пленки и характеристики потенциального барьера. В соответствии с моделью Свораковского [7, 8] примесные электронные состояния будут формироваться практически вблизи середины области запрещенных энергий. Это может существенным образом повлиять на транспорт носителей заряда в полимерной пленке и на параметры потенциального барьера на границе металл/полимер.

Таким образом, в работе показано влияние производных фуллеренов на электрофизические параметры пленок ПДФ. Установлен разный вклад в электропроводность экспериментальных структур при фотовозбуждении.

Работа выполнена при поддержке грантом Республики Башкортостан молодым ученым (договор 30ГР) на оборудовании ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса

России на 2014–2020 годы” (проект № 075-15-2019-1651).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лачинов А.Н., Воробьева Н.В.* // УФН. 2006. Т. 176. № 12. С. 1249; *Lachinov A.N., Vorobeva N.V.* // Phys. Usp. 2006. V. 49. № 12. P. 1223.
2. *Gadiev R.M., Lachinov A.N., Salikhov R.B. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. Art. № 173305.
3. *Гадиев Р.М., Лачинов А.Н., Карамов Д.Д. и др.* // ЖЭТФ. 2016. Т. 149. № 6. С. 1237; *Gadiev R.M., Lachinov A.N., Karatov D.D. et al.* // JETP. 2016. V. 123. № 1. P. 149.
4. *Ламперт М.А., Марк П.* Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 413 с.
5. *Dieter K.S.* Semiconductor material and device characterization. Wiley: Interscience, 2006. 790 p.
6. *Dekker A.J.* Solid state physics. New Jersey: Prentice-Hall. Inc., 1957. 220 p.
7. *Sworakowski J.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1970. V. 11. P. 1.
8. *Sworakowski J.* // Synth. Metals. 2018. V. 235. P. 125.