

УДК 541.64:537.3:543.422.27

## ЭПР ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОГЕНЕРАЦИИ СПИНОВЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ В ПОЛИМЕРНЫХ БЕЗФУЛЛЕРЕНОВЫХ КОМПОЗИТАХ PBDB-T:IT-M

© 2021 г. Е. И. Юданова<sup>а</sup>, \*, В. И. Криничный<sup>а</sup>, Н. Н. Денисов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем химической физики РАН, просп. Академика Семенова, 1, Черноголовка, 142432 Россия

\*E-mail: yudan@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 11.01.2021 г.

После доработки 05.03.2021 г.

Принята к публикации 12.03.2021 г.

В работе представлены результаты ЭПР исследования нового органического фотовольтаического композита с нефуллереновым акцептором PBDB-T:IT-M. Определены параметры спектров ЭПР всех спиновых носителей зарядов, как локализованных, так и подвижных, возникающих в композите под действием света, которые хорошо согласуются с полученными ранее литературными данными. Зависимости концентрации спинов всех локализованных и подвижных носителей зарядов от энергии фотонов демонстрируют экстремальный рост в области 2.37 эВ, что совпадает с шириной запрещенной зоны полимерного композита PBDB-T:IT-M. Введение в систему микродобавок фотоактиватора 2,5-дифенилоксазола (PPO) улучшает морфологию композита за счет более интенсивного  $\pi$ - $\pi$  взаимодействия между компонентами, что способствует увеличению обменного взаимодействия между ними и стабилизации числа спиновых носителей зарядов, в основном локализованных в энергетических ловушках полимерной матрицы. Обменное взаимодействие в композите между полимерами и дифенилоксазолом приводит к двукратному увеличению числа спинов в области энергии близкой к ширине запрещенной зоны композита.

**Ключевые слова:** безфуллереновые органические солнечные элементы, поляроны, светоиндуцированный ЭПР (СЭПР), перенос зарядов, рекомбинация зарядов, спиновая релаксация

**DOI:** 10.31857/S0023119321040161

Проблема синтеза и исследования органических композитов является центральной в создании электронных [1, 2] и спинтронных [3] приборов нового поколения. В полимерных фотовольтаических композитах в качестве акцепторов электронов обычно используются производные фуллерена. Однако фуллереновые акцепторы характеризуются слабым поглощением фотонов в инфракрасной и красной областях оптического спектра, что существенно ограничивает энергопреобразующие свойства таких молекулярных приборов. Более перспективным оказалось использование нефуллереновых акцепторов электронов на основе малых молекул с сопряженной системой  $\pi$ -связей. Одним из наиболее оптимальных доноров электронов полимерных композитов с высокой энергопреобразующей эффективностью объемных гетеропереходов (ОГП) оказался поли[(2,6-(4,8-бис(5-(2-этилгексил)тиофен-2-ил)бензо[1,2-В:4,5-В']дитиофен))-альт-(5,5-(1',3'-ди-2-тиенил-5',7'-бис(2-этилгексил)бензо[1',2'-с:4',5'-с']дитиофен-4,8-диона)] (PBDB-T) [4]. На основе этого полимера и 3,9-бис(2-метил-

нон))-5,5,11,11-тетракис(4-гексилфенил)-дитиен[2,3-д:2',3'-д']-с-индацено[1,2-б:5,6-б']дитиофен (IT-M) удалось создать безфуллереновый композит, в котором эффективность преобразования световой энергии в электрическую превышала 12% [5]. Такое увеличение эффективности стало возможным за счет ускорения диссоциации исходных экситонов и более медленной бимолекулярной рекомбинации носителей заряда в ОГП композита PBDB-T:IT-M [5]. Аналогичные параметры были достигнуты и в других солнечных ячейках с инвертированной архитектурой полимера PBDB-T и нефуллереновых акцепторов на основе ITIC и IT-M [5, 6]. Данные устройства отличались хорошей термостабильностью, необходимой для продолжительной службы органических фотовольтаических систем. Полимер PBDB-T также может быть использован в качестве транспортера дырок в широко используемых перовскитных солнечных элементах благодаря оптимальному сочетанию уровней энергии его занятой наивысшей молекулярной орбитали (НОМО) и валентной зоны перовскитов.

Носители заряда (дырки и электроны), возникающие в донорно-акцепторных полимерных системах под действием света парамагнитны. Это позволяет с успехом использовать метод светоиндуцированного ЭПР (СЭПР) для исследования процессов, протекающих в указанных композициях с участием таких спиновых носителей заряда [7, 8]. Например, в работе [9] было проведено исследование композита PBDB-T:ITIC методом СЭПР при частоте регистрации 94 ГГц. Это позволило получить основные слабо анизотропные магнитно-резонансные параметры спиновых ансамблей, возникающих в PBDB-T и ITIC под действием света. Используемый в настоящей работе акцептор IT-M имеет комплементарную PBDB-T структуру и высокую эффективность преобразования света, что является следствием планарной конформации компонентов, приводящей к более интенсивным  $\pi$ - $\pi$  взаимодействиям между ними. Однако детальных ЭПР исследований этого и других безфуллереновых композитов до настоящего времени проведено не было. Поэтому неясным остается влияние структурных, электронных и магнитных параметров составляющих таких композитов на их эффективные функциональные свойства.

Ранее нами была продемонстрирована возможность существенного улучшения электронных свойств органических солнечных ячеек на основе полимер : фуллереновых ОГП при добавлении в них малых органических молекул 1,2-бензопирона (BP) и 2,5-дифенилоксазола (PPO), проявляющих свойства квази-2D-фотоактиваторов или сцинтилляторов [10, 11]. Было показано, что добавление BP и PPO в композит P3DDT/PCBM улучшает морфологию образцов, что усиливает обменное взаимодействие между спинами подвижных и локализованных носителей заряда и в итоге увеличивает эффективную концентрацию подвижных спиновых носителей заряда. В работе [12] при изучении коллоидных перовскитов CsPbA<sub>3</sub> (A: Cl, Br, I) было обнаружено существенное увеличение радиoluminesцентного квантового выхода в системе при добавлении PPO. Авторы предложили механизм, согласно которому PPO играет ключевую роль в повышении радиoluminesценции нанокompозитов CsPbA<sub>3</sub> в октане за счет поверхностной гибридизации галогенидных перовскитных нанокompозитов с PPO в неполярной жидкой среде растворителя. Однако механизмы взаимодействия полимеров с 2D-фотоактиваторами в полимерных композитах требуют дальнейшего изучения.

Настоящая работа посвящена детальному ЭПР исследованию магнитно-резонансных, релаксационных и электронных свойств спинов носителей зарядов, возникающих под действием света различных частот в сополимерном композите с нефуллереновым акцептором PBDB-T:IT-M и ана-

лизу влияния на них микродобавки 2D-фотоактиватора PPO.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовались PBDB-T и IT-M производства Ossila® (Великобритания) и PPO производства Aldrich® (США). Энергии верхней занятой НОМО и нижней незанятой молекулярных орбиталей LUMO для PBDB-T равны:  $-5.33$  и  $-3.53$  эВ соответственно, а ширина запрещенной зоны  $E_g$  этого сополимера равна  $E_g = 1.8$  эВ. Эти же параметры для IT-M составляют:  $-5.50$ ,  $-3.35$  и  $E_g = 2.15$  эВ соответственно [5]. В качестве малой добавки использовался органический фотоактиватор/сцинтиллятор 2,5-дифенилоксазол (PPO) с  $E_g = 3.79$  эВ и  $E_{LUMO} = -3.31$  эВ [13].

Химические структуры этих компонентов схематически показаны на рис. 1.

Образцы для ЭПР измерений готовили следующим образом. Навеску 10 мг PBDB-T, растворяли в 1 мл хлорбензола. Полученный раствор обрабатывали ультразвуком мощностью 50 Вт в течение 10 мин в ультразвуковой бане DADI DA-968 и прогревали 10 мин при  $T = 50^\circ\text{C}$  для лучшего растворения. Затем приготовили раствор IT-M в хлорбензоле в концентрации  $C = 10$  мг/мл, и соединили растворы PBDB-T и IT-M так, чтобы отношения компонентов PBDB-T:IT-M было 1 : 1, а концентрация по 10 мг/мл. Образец **1** представляет собой раствор композита без добавок (PBDB-T:IT-M). Образец **2** (PBDB-T:IT-M/PPO) получили путем добавки раствора PPO в хлорбензоле в раствор композита **1** так, чтобы соотношение PPO/полимер составляло 6 вес. %. Полученные растворы **1** и **2** наливали постепенно по каплям  $V = 5$  мкл на керамические подложки до полного высыхания. На каждой подложке получали 25 мкл образца. Готовые образцы на керамической подложке дополнительно прогревали 30 мин при  $160^\circ\text{C}$ . Для оптических измерений 5 мкл растворов **1** и **2** наносили на кварцевые стекла с последующим удалением растворителя. Ультрафиолетовые/видимые /ближние инфракрасные спектры (UV/VIS/NIR) поглощения пленок композитов были получены на спектрофотометре Specord 250 (Analytik Jena) при  $T = 298$  К.

ЭПР измерения проводились с использованием спектрометра ПС-100Х 3-см диапазона (9.7 ГГц) с максимальной мощностью СВЧ излучения 150 мВт и частотой ВЧ синхронного/фазового детектирования 100 кГц. Спектры СЭПР образцов регистрировали при 77 К путем погружения в кварцевую ячейку, наполненную жидким азотом. Отношение сигнал/шум спектров СЭПР увеличивали накоплением сигналов при многократном сканировании. Обработка и моделирование спектров СЭПР проводились с использованием программ

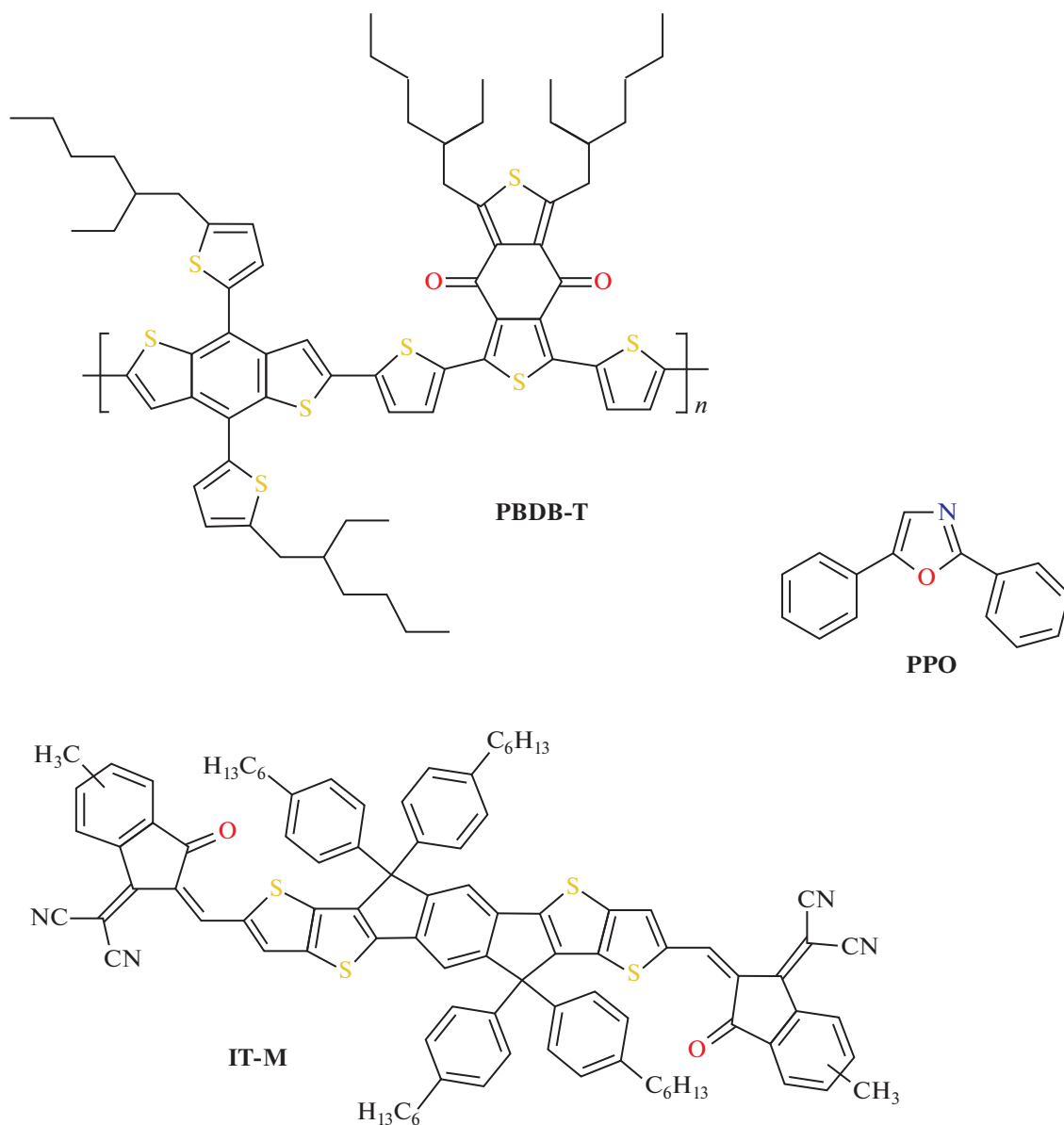


Рис. 1. Химические структуры соединений PBDB-T, IT-M и PPO.

EasySpin и OriginLab. Вклады неспаренных электронов различных носителей заряда в эффективную восприимчивость образца определялись путем разложения его спектров СЭПР на составляющие, как было описано в [14–16]. Парамагнитная восприимчивость  $\chi$  образца была определена путем двойного интегрирования спектров поглощения индивидуальных спиновых пакетов вдали от условий СВЧ насыщения. Освещение образцов проводилось непосредственно в резонаторе спектрометра с помощью кварцевого световода и источников ахроматического, белого света Luxeon®, мощностью 5 Вт, с цветовой температурой  $T_c = 5000$  К, а также почти монохроматического све-

та с энергией фотонов  $h\nu_{ph}$ : 1.32, 1.46, 1.61, 1.88, 1.97, 2.10, 2.34, 2.48, 2.64, 2.95 и 3.14 эВ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В отличие от акцепторов фуллереновых производных, имеющих максимум поглощения в области 400 нм, нефуллереновые акцепторы типа IT-M имеют узкую энергетическую щель в спектре и начинают поглощать при 700 нм в растворе. На рис. 2 приведены спектры поглощения пленок отдельных образцов, изучаемых в данной работе. IT-M имеет полосы поглощения в ультрафиолетовой области (198 и 227 нм), а также сильное поглощение в ВИД-ИК области 500–800 нм, что

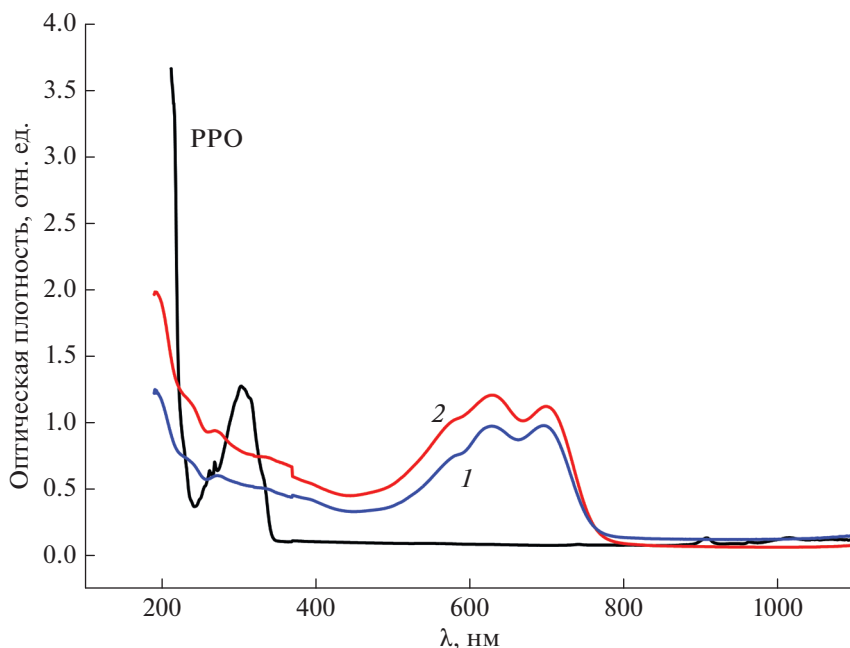
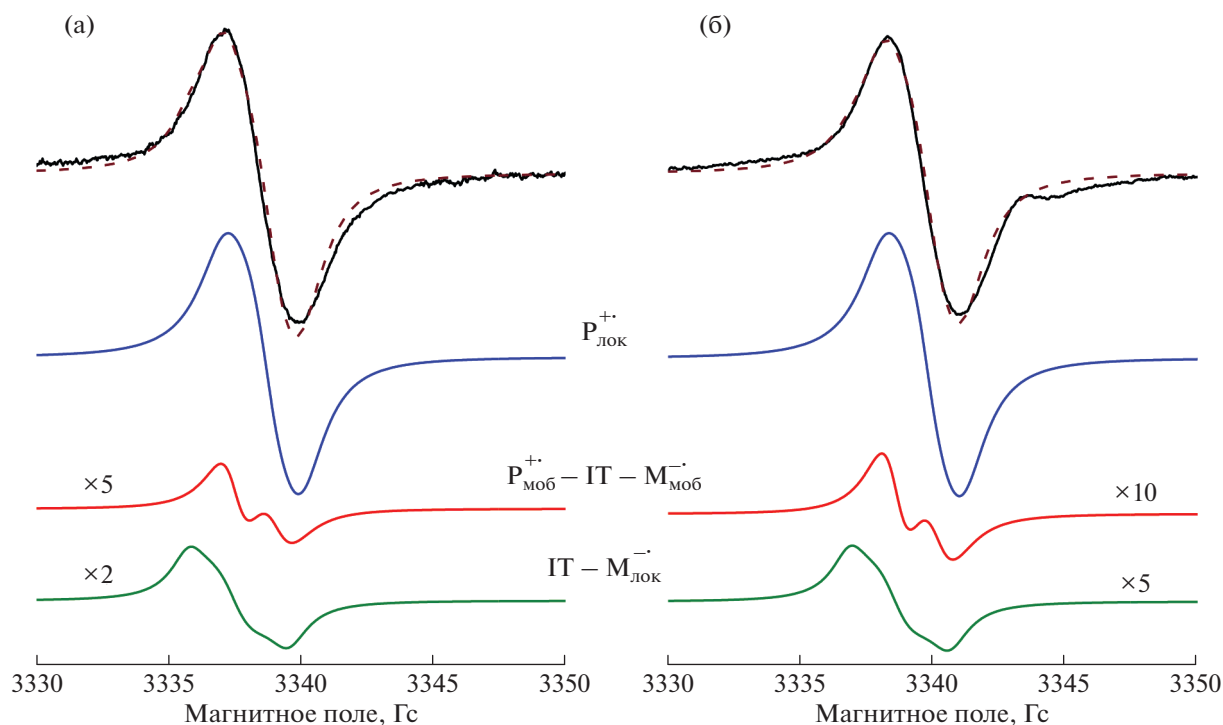


Рис. 2. Спектры поглощения UV/VIS/NIR композитов **1** и **2**, полученные при  $T = 298$  К.

приписывают переходу НОМО  $\pi - \text{LUMO } \pi^*$  [5, 17]. PBDB-T проявляет полосы поглощения 250, 360, 580 и 612 нм [18]. Очевидно, что спектры поглощения PBDB-T и IT-M существенно перекрываются в видимой области и комплементарны друг другу. Максимум поглощения для PPO приходится на область 303–305 нм ( $\sim 4.1$  эВ) [13]. Из рис. 2 видно, что спектры поглощения композитов **1** и **2** слабо отличаются друг от друга, причем стоит отметить небольшой батохромный сдвиг пиков от PBDB-T и IT-M в композите **2** при добавлении PPO.

При освещении композитов **1** и **2** светом видимого спектра в образцах регистрируется спектр СЭПР (рис. 3), представляющий суперпозицию спектров отдельных спиновых носителей заряда — положительных поляронов на PBDB-T —  $P^{+\bullet}$  и анион-радикалов IT-M —  $P_{\text{лок}}^-$ . Деконволюция эффективных спектров СЭПР позволила разделить значения  $g$ -факторов и ширин линий ЭПР  $\Delta B_{\text{pp}}$  от составляющих спектральных вкладов поляронов и анион-радикалов IT-M в изученных композитах. Эти параметры приведены в табл. 1. Следует отметить хорошее соответствие значений параметров ЭПР, полученных нами и величинами,  $g_{zz} = 2.0032$ ,  $g_{yy} = 2.0022$ ,  $g_{xx} = 2.0019$ , полученными ранее в работе [6] для захваченных ловушками поляронов  $P_{\text{лок}}^{+\bullet}$  полимера PBDB-T, а также  $g_{zz} = 2.0044$ ,  $g_{yy} = 2.0034$ ,  $g_{xx} = 2.0025$ , полученными для анион-радикалов IT-M $_{\text{лок}}^-$ . Были выделены все составляющие спектров СЭПР от подвиж-

ных и локализованных спинов поляронов  $P_{\text{моб}}$  и  $P_{\text{лок}}$  и анион-радикалов IT-M в композитах. Моделирование эффективного спектра СЭПР и каждого из его вкладов позволило отдельно определить ширины линии ЭПР, спиновые восприимчивости  $\chi$  и концентрации спинов для  $P_{\text{моб}}$ ,  $P_{\text{лок}}$  и IT-M $_{\text{лок}}$ /IT-M $_{\text{моб}}$  (рис. 3). Относительные значения концентрации спинов носителей зарядов были вычислены из спиновых восприимчивостей отдельных компонент моделированного спектра. На рис. 4 приведены зависимости концентрации спинов носителей зарядов, при различных энергиях фотовозбуждения образцов **1** и **2**. Эти зависимости характеризуются пиковым максимумом концентраций для всех составляющих спинов в области 522 нм (2.37 эВ), что близко к значению ширины запрещенной зоны полимерного композита PBDB-T:IT-M. Характерный пик концентраций проявляется для всех спиновых носителей, как подвижных, так и локализованных, однако наибольший рост наблюдается для спинов, локализованных на полимере. При добавлении PPO в композите **2** количество локализованных поляронов возрастает более чем в 2 раза по сравнению с образцом **1** без PPO, в то время как число подвижных поляронов и анион-радикалов IT-M $^-$  изменяется слабо. Механизм влияния 2D-фотоактиватора PPO на образование спинов в композите пока не совсем ясен, поэтому его идентификация требует дальнейших исследований. В этой связи необходимо отметить, что при изучении коллоидных перовскитов CsPbA $_3$  (A: Cl, Br, I) с добавками PPO было обнаружено существенное увеличение ра-



**Рис. 3.** СЭПР спектры композитов **1** (а) и **2** (б), полученные экспериментально при непрерывном освещении их белым светом с  $T_c = 5000$  К при  $T = 77$  К, а также рассчитанные с использованием магнитно-резонансных параметров, приведенных в табл. 1. Спектральные вклады захваченных спиновыми ловушками поляронов  $P_{лок}^{++}$  и анион-радикалов  $IT - M_{лок}^{-}$ , а также мобильных пар этих носителей заряда,  $P_{моб}^{++} - IT - M_{моб}^{-}$ , показаны сплошными линиями.

диолюминисцентного квантового выхода в системе [12], что авторы объясняли поверхностной гибридизацией атомов азота N допанта РРО и Рb перовскита за счет обменного взаимодействия. Такого же обменного взаимодействия можно было бы ожидать между молекулами РРО и РВДВ-Т и IT-М в композите **2**. Действительно, молекула РРО имеет плоское строение и расширенную  $\pi$ -систему. Она может легко встроиться из раствора при приготовлении композитов между цепочками полимеров и молекулой IT-М, увеличивая перекрывание энергетических зон и образуя Ван-дер-Ваальсовы связи между ними. Расположение уровня энергии наименьшей незанятой молекулярной орбитали (LUMO) молекулы РРО  $E_{LUMO} = -3.31$  эВ, близко к значениям LUMO для IT-М и РВДВ-Т:  $-3.35$  и  $-3.53$  эВ соответственно. Однако в атоме азота N молекулы РРО существенный вклад в перенос энергии вносят также уровни LUMO, LUMO + 1, и LUMO + 4 [12], которые расположены выше по энергии уровней молекул РВДВ-Т и IT-М и могут эффективно индуцировать перенос фотонов от РРО к РВДВ-Т и IT-М по механизму безызлучательного переноса энергии. Для более обоснованных заключений о взаимодействии молекул в композитах мы планируем в дальнейшем провести расчеты методом

функционала плотности. Обменное взаимодействие между РРО и композитом приводит к увеличению числа спинов в области энергии близкой к ширине запрещенной зоны композита более чем в 2 раза. Кроме того добавка молекул РРО улучшает морфологию композита, что было показано в работе [11]. Таким образом, введение микродобавок РРО в композит способствует увеличению числа спиновых носителей зарядов в системе, которые в основном локализуются в энергетических ловушках на полимере.

На рис. 5 приведена кинетика рекомбинации подвижных и локализованных спинов в изучаемых фотовольтаических композитах **1** и **2** при выключении света. Этот процесс определяется числом и пространственным распределением спиновых ловушек, образующихся в ОГП композитов вследствие разупорядоченности их полимерных матриц. Как и в случае других композитов [4, 5], он может быть описан в рамках теории последовательных захватов и высвобождений подвижных носителей заряда высокоэнергетическими ловушками [19]. Согласно этому представлению, взаимодействие носителей заряда с такими ловушками должно приводить к временному изменению их концентрации вида:

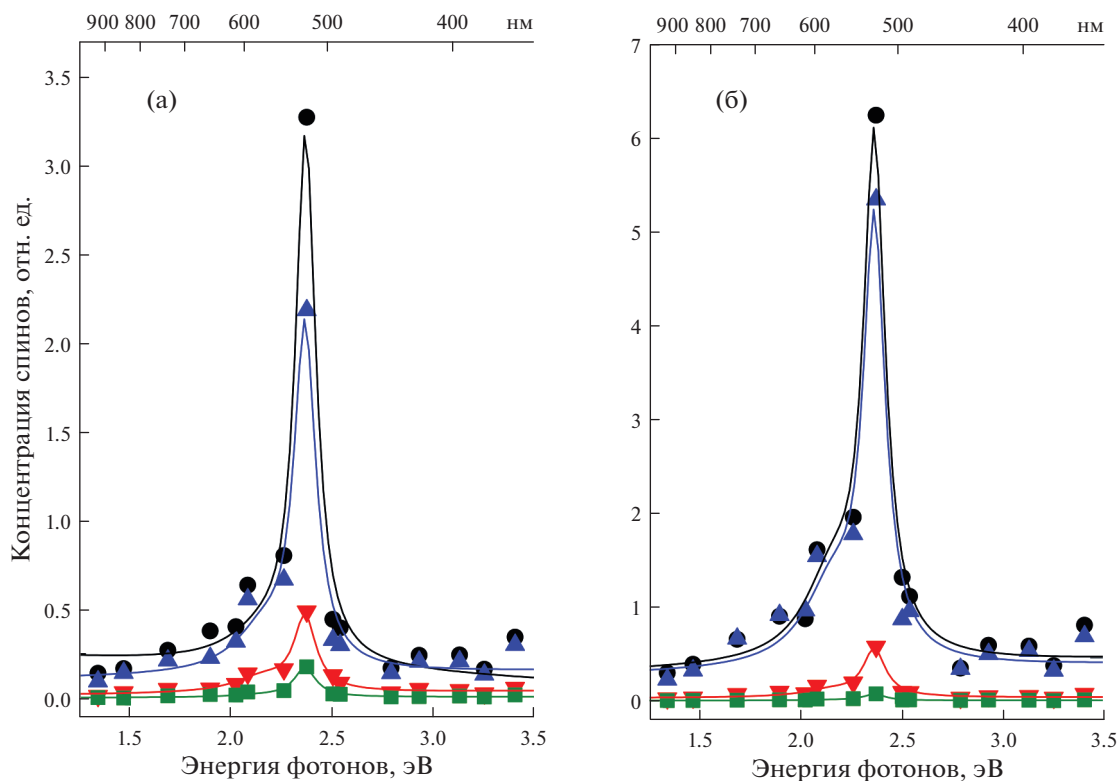
**Таблица 1.** Параметры спектров СЭПР спинов поляронов  $P^{+\bullet}$  полимера PBDB-T и анион-радикалов IT-M $^{\bullet-}$  в композите **1**, в третьей строчке приведены параметры для анион-радикала IT-M $^{\bullet-}$  в композите **2**

Носители зарядов	$g_{zz}$	$g_{yy}$	$g_{xx}$	$g_{iso}$	$\Delta B_{pp}^X$	$\Delta B_{pp}^Y$	$\Delta B_{pp}^Z$	$\Delta B_{pp}^{iso}$
Поляроны в PBDB-T	2.00327	2.00224	2.00146	2.00232	1.42	1.58	1.42	1.47
Анион-радикалы IT-M	2.00401	2.00304	2.00170	2.00292	1.56	1.70	1.56	1.61
PBDB-T: IT-M/PPO	2.00403	2.00299	2.00176	2.00293	1.57	1.73	1.57	1.62

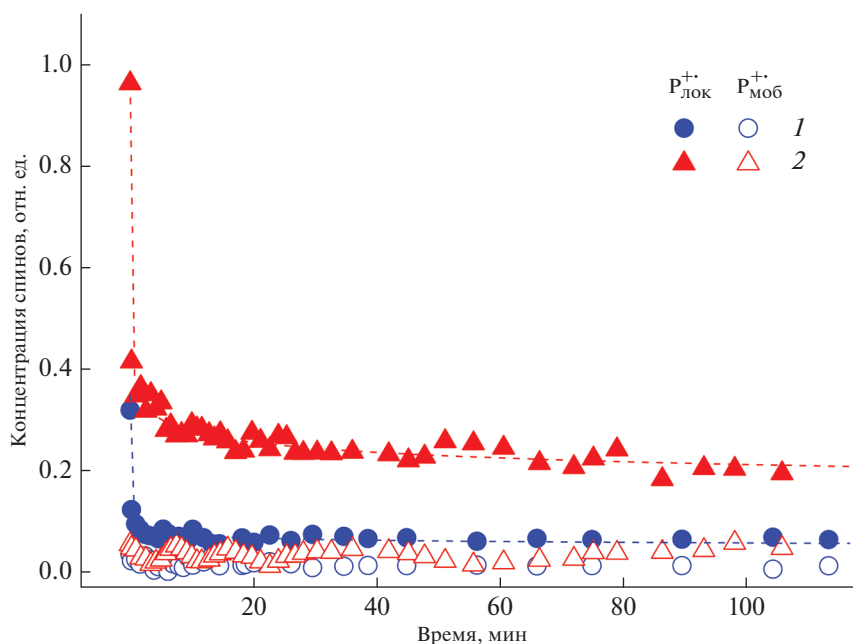
$$n(t) = n_0 \frac{\pi \kappa \delta(1 + \kappa) \nu_d}{\sin(\pi \kappa)} t^{-\kappa}, \quad (1)$$

где  $\kappa = k_B T / E_0$ ,  $E_0$  – дисперсия энергий ловушек,  $\delta$  – гамма-функция и  $\nu_d$  – частота прыжковой диффузии полярона при его высвобождении из ловушки. На рис. 5 приведены зависимости, рассчитанные из уравнения (1). Экспериментальные данные, полученные для поляронов, локализованных в матрицах исходного и PPO-модифицированного образцов **1** и **2**, хорошо описываются уравнением (1) с энергиями  $E_0 = 0.0566$  и  $0.0690$  эВ соответственно. Следовательно, процесс рекомбинации долгоживущих спиновых носителей заря-

да, фотоиндуцированных в изученных композитах **1** и **2**, может быть описан в рамках указанной выше модели. Увеличение дисперсии энергии ловушек  $E_0$  при модификации композита допированием PPO должно также свидетельствовать об изменении морфологии его полимерной матрицы. Отметим, что после выключения источника света остаточный сигнал ЭПР со стабилизированными носителями заряда оставался практически неизменным в течение суток при  $T = 77$  К. Такой эффект замедления фотодеградации может способствовать улучшению работы энергопреобразующих и аккумулирующих устройств на основе полимерных композитов.



**Рис. 4.** Зависимости концентраций спиновых носителей заряда в композитах **1** (а) и **2** (б) от энергии источников света при  $T = 77$  К: ● – суммарное количество спинов, ▲ –  $P_{лок}^{+\bullet}$  поляроны, локализованные на полимере PBDB-T, ▼ – подвижные поляроны  $P_{моб}^{+\bullet}$  – IT-M $_{моб}^{+\bullet}$ , ■ – локализованные анион-радикалы IT-M $_{лок}^{\bullet-}$ .



**Рис. 5.** Кинетика рекомбинации локализованных (заполненные точки) и подвижных (незаполненные точки) поляронов в композитах **1** и **2** после выключения источника белого цвета с  $T_c = 5000$  К при  $T = 77$  К. Верхней и нижней линиями показаны зависимости, рассчитанные из уравнения (1) с  $E_0 = 0.0566$  и  $0.0690$  эВ соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено фотоиндуцированное СЭПР исследование нового органического фотовольтаического композита с нефуллереновым акцептором PBDB-T:IT-M. Параметры спектров ЭПР, определенные для всех спиновых носителей зарядов, возникающих в композите, хорошо согласуются с полученными ранее литературными данными. Показана зависимость магнитно-резонансных параметров ЭПР образцов **1** и **2** от энергии возбуждающих фотонов. Зависимости концентрации спинов локализованных и подвижных носителей зарядов от энергии фотонов демонстрируют экстремальный рост в области 2.37 эВ (522 нм), что близко ширине запрещенной зоны полимерного композита PBDB-T:IT-M. Введение микродобавок PPO в композит PBDB-T:IT-M улучшает морфологию композита за счет более интенсивного  $\pi$ - $\pi$  взаимодействием между ними, что способствует увеличению обменного взаимодействия между компонентами композита и стабилизации в нем числа спиновых носителей зарядов, в основном локализованных в энергетических ловушках полимерной матрицы. Обменное взаимодействие в композите **2** приводит к двукратному увеличению числа спинов в области энергии, близкой к ширине запрещенной зоны композита.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственного задания, номер Госрегистрации № АААА-А19-119032690060-9 при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-29-20011-мк.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petty M.C. Organic and Molecular Electronics: From Principles to Practice. 2nd: Wiley-Blackwell. 2018. P. 512.
2. Hu W. ed. Organic Optoelectronics // Wiley-VCH Verlag Weinheim. 2013. P. 507.
3. Meng L., Zhang Y., Wan X., Li C., Zhang X., Wang Y., Ke X., Xiao Z., Ding L., Xia R., Yip H.-L., Cao Y., Chen Y. // Science. 2018. V. 361. № 6407. P. 1094.
4. Weuchao Zhao, Deping Qian, Sunsun Li, Olle Inganas, Feng Gao, Jianhui Hou // Advanced Materials. 2016. V. 28. P. 4734.
5. Li S., Ye L., Zhao W., Zhang S., Mukherjee S., Ade H., Hou J. Energy-Level // Advanced Materials. 2016. T. 28. № 42. P. 9423.
6. Qi Wang, Shaoqing Zhang, Bowei Xu, Sunsun Li, Bei Yang, Wenxia Yuan, and Jianhui Hou // J. Phys. Chem. C. 2017. V. 121. № 9. P. 4825.
7. Krinichnyi V.I. EPR spectroscopy of polymer : fullerene nanocomposites // Spectroscopy of Polymer Nanocomposites Thomas S., Rouxel D., Ponnamma D. 1. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 202.
8. Niklas J., Mardis K.L., Banks B.P., Grooms G.M., Sperlich A., Dyakonov V., Beauprè S., Leclerc M., Xu T., Yue L., Poluektov O.G. // Physical Chemistry Chemical Physics. 2013. T. 15. № 24. P. 9562.

9. *Van Landeghem M., Maes W., Goovaerts E., Van Doorslaer S.* // *J. Magnetic Resonance*. 2018. Т. 288. С. 1.
10. *Krinichnyi V.I., Yudanova E.I., Denisov N.N., Bogatyrenko V.R.* // *Synthetic Metals*. 2020. V. 267. P. 116462.
11. *Юданова Е.И., Криничный В.И., Денисов Н.Н.* // *Химия высоких энергий*. 2020. Т. 54(4). С. 269.
12. *Sangeun Cho, Sungwoo Kim, Jongmin Kim, Yongcheol Jo, Ilhwan Ryu, Seongsu Hong, Jae-Joon Lee, SeungNam Cha, Eun Bi Nam, Sang Uck Lee, Sam Kyu Noh, Hyungsang Kim, Jungwon Kwak, Hyunsik Im* // *Light: Science & Applications*. 2020. V. 9. P. 156.
13. *Silva D.L., De Boni L., Correa D.S., Costa S.C.S., Hidalgo A.A., Zilio S.C., Canuto S., Mendonca C.R.* // *Optical Materials*. 2012. Т. 34. № 7. С. 1013.
14. *Krinichnyi V.I.* EPR spectroscopy of polymer:fullerene nanocomposites / Ed. by *S. Thomas, D. Rouxel, D. Ponnamma*. Amsterdam. 2016. P. 202.
15. *Poluektov O.G., Filippone S., Martín N., Sperlich A., Deibel C., Dyakonov V.J.* // *Phys. Chem. B*. 2010. V. 14. № 45. P. 14426.
16. *Юданова Е.И., Криничный В.И., Богатыренко В.Р., Денисов Н.Н., Назаров Д.И.* // *Химия Высоких Энергий*. 2019. Т. 53. № 3. С. 214.
17. *H. Bin, Zhi-Guo Zhang, L. Gao, S. Chen, L. Zhong, Li Xue, Ch. Yang and Y. Li.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2016, V. 138. P. 4657.
18. *Wenchao Zhao, Sunsun Li, Shaoqing Zhang, Xiaoyu Liu, and Jianhui Hou* // *Adv. Mater.* 2017. V. 29. P. 1604059.
19. *Tachiya M., Seki K.* // *Phys. Rev. B*. 2010. V. 82. № 8. P. 085201.