

КОРРЕЛЯЦИЯ ДЕГРАДАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ P3HT:PCBM И P3HT:ITIC С ИЗМЕНЕНИЕМ ИХ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Э. А. Захидов^{1*}, М. А. Захидова², М. Х. Имомов¹, В. О. Кувондиков¹,
Ш. К. Нематов³, А. А. Сапарбаев¹, И. И. Тажибаев¹

УДК 535.34;535.37;539.216.2

¹ Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан; e-mail: ezakhidov@hotmail.com

² Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

³ Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

(Поступила 6 января 2020)

Изучены спектры поглощения и фотолюминесценции солнечных фотоэлементов на основе P3HT:PCBM и P3HT:ITIC при одновременном контроле фотовольтаических параметров. Выявлены характерные изменения оптических свойств таких устройств, связанные с деградацией их работоспособности. Установлена прямая корреляция между изменениями фотовольтаических параметров и спектров поглощения и фотолюминесценции с течением времени.

Ключевые слова: органические солнечные фотоэлементы, тонкие пленки P3HT:PCBM и P3HT:ITIC, структурная деградация, спектры поглощения и фотолюминесценции.

We study the absorption and photoluminescence spectra of organic solar cells based on P3HT:PCBM and P3HT:ITIC at simultaneous monitoring the photovoltaic parameters. The characteristic changes of the optical properties of such devices, related to the degradation of their performance, are explored. A direct correlation is established between the changes in the photovoltaic parameters and the absorption and photoluminescence spectra over time.

Keywords: organic solar cells, thin films of P3HT:PCBM and P3HT:ITIC, structural degradation, absorption and photoluminescence spectra.

Введение. Энергетическая эффективность преобразования (ЭЭП) органических солнечных фотоэлементов (ОСФ) на уровне ~15 %, достигнутая в последнее время, характеризует их в качестве важнейшего потенциального конкурента широко распространенных кремниевых фотоэлементов с учетом несомненных преимуществ ОСФ в виде доступности используемых материалов, простоты технологий их изготовления, легкости и гибкости конструкции и др. [1—3]. Однако реальные образцы таких энергопреобразующих устройств, изготовленные из различных органических материалов, имеют очень короткие сроки службы: деградация ОСФ под действием внутренних (взаимной диффузии молекул из различных слоев и их структурных изменений) и внешних (воздействия кислорода, влажности, высоких температур и световой радиации) факторов в зависимости от физико-химических свойств используемых материалов и структурных особенностей таких устройств вызывает спад ЭЭП за времена от единиц до тысяч часов, что на порядки меньше, чем у кремниевых фотоэлементов [4—9]. Таким образом, повышение стабильности работы ОСФ, подавление процессов деградации в них путем подбора оптимальной структуры и составных материалов, а также условий

CORRELATION OF THE DEGRADATION OF ORGANIC SOLAR CELLS ON THE BASIS OF P3HT:PCBM AND P3HT:ITIC WITH THE CHANGE OF THEIR OPTICAL SPECTRA

E. A. Zakhidov^{1*}, M. A. Zakhidova², M. Kh. Imomov¹, V. O. Kuvondikov¹, Sh. K. Nematov³, A. A. Saparbayev¹, I. I. Tazhibayev¹ (¹ Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan; e-mail: ezakhidov@hotmail.com; ² National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan; ³ Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan)

термической обработки для увеличения срока службы таких устройств являются важнейшей научно-технической задачей.

Среди множества типов ОСФ наиболее исследовано устройство с фотоактивным слоем из смеси донорного полимера поли-3-гексилтиофен (РЗНТ) с акцепторными молекулами метилового эфира фенол-С₆₁-бутановой кислоты (PCBM). Установлены важнейшие закономерности взаимосвязи структура—ЭЭП, физические механизмы термического отжига и воздействия различных факторов, вызывающих деградацию ОСФ [10—12]. Это связано с уникальным свойством полимера РЗНТ образовывать в тонкой пленке смеси с PCBM или некоторыми другими акцепторными молекулами небольших размеров развитую объемную гетероструктуру, характеризующуюся высокой степенью упорядоченности (кристалличности) молекул РЗНТ с одновременным агрегированием молекул PCBM в домены оптимальных размеров [13, 14]. Типичные значения ЭЭП в таком ОСФ составляют <4 %, время деградации в зависимости от ее механизма — от нескольких часов до десятков дней [15].

Более высокие значения ЭЭП в ОСФ на основе РЗНТ и подобных ему донорных полимеров достигнуты при замене PCBM на нефуллереновые акцепторы из узкозонных органических материалов, имеющих интенсивные полосы поглощения в длинноволновой области спектра [16—18]. В случае применения в качестве акцептора молекул IDTBR наряду с ЭЭП вплоть до 6.4 % время деградации ОСФ >10000 ч [19].

Еще один узкозонный материал — ITIC (3,9-бис(2-метилен-(3-(1,1-дицианометил)-инданон)-5,5,11,11-тетракис(4-гексилфенил)-дитиено-[2,3-d:2',3'-d']-s-индасено[1,2-b:5,6-b']-дитиофен — наряду с такими же благоприятными спектральными свойствами обладает оптимальной разностью энергий ВЗМО_{донор} – ВЗМО_{акцептор} и НВМО_{донор} – НВМО_{акцептор} при использовании в ОСФ в качестве акцептора, когда донором служит полимер типа РЗНТ [20—22]. Однако в реально изготовленных устройствах на основе ITIC ЭЭП характеризуется крайне низким значением ~1 %, что связано с очень низкой степенью упорядоченности структуры фотоактивного слоя, когда высокое электрическое сопротивление в нем сильно ограничивает фототок [23]. В таком ОСФ даже термический отжиг не позволяет достичь эффективности, сравнимой с другими акцепторными материалами [24]. Качественное различие фотоэлектрических и структурных свойств двух ОСФ, изготовленных в одинаковых условиях из одного донорного полимера РЗНТ, но с разными акцепторами, например PCBM и ITIC, позволяет ставить задачу сравнительного исследования этих ОСФ для выявления причин различия ЭЭП в них, а также стойкости к деградации.

Деградацию ОСФ, как обычно, характеризуют по спаду с течением времени фотовольтаических параметров: тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, ЭЭП и др. Изучение такого спада в определенных условиях, когда главной причиной деградации является определенный внешний или внутренний фактор, позволяет выявить механизмы и масштабы соответствующих процессов деградации. Последние в свою очередь могут вызывать изменения оптических характеристик главным образом спектров поглощения и фотолюминесценции ОСФ [25]. Структурная упорядоченность в самом полимере РЗНТ отражается в спектрах его поглощения и особенно фотолюминесценции как отношение интенсивностей основной электронной полосы и ее обертонов в области 600—700 нм, которые становятся более заметными с ростом кристалличности полимера [26—28]. В таких условиях, исследуя изменения фотовольтаических и оптических характеристик ОСФ, с помощью последних можно оценивать степень деградации устройства. Исходя из этого изучены фотовольтаические параметры, а также спектры поглощения и фотолюминесценции ОСФ на основе РЗНТ:PCBM и РЗНТ:ITIC. Установлена прямая корреляция между изменениями фотовольтаических параметров и оптических характеристик ОСФ при длительной деградации в воздухе. Обсуждены возможные физические причины, вызывающие деградацию.

Эксперимент. Для изготовления образцов подложки из стекла с нанесенным слоем ITO (Shenzhen Display, КНР, сопротивление 15 Ом/м²) очищались в ацетоне, деионизированной воде и изопропиловом спирте по 13 мин в поле ультразвука, осушались с помощью высокочистого азота и обрабатывались кислородной плазмой в течение 6 мин [29]. На очищенные подложки наносился анодный буферный слой PEDOT:PSS из его водного раствора Clevis PVP A14083 (H.C.Starck, Германия) толщиной 40 нм методом центрифугирования при скорости вращения 4000 об/мин в течение 20 с. Образцы полученной структуры стекло/ITO/PEDOT:PSS подвергались отжигу в воздухе при температуре 160 °С в течение 20 мин. Далее на такую структуру методом центрифугирования (800 об/мин, 50 с) наносилась тонкая (~100 нм) пленка фотоактивного слоя из смеси РЗНТ (Sigma-Aldrich, США, чистота 99.995 %) с PCBM (American Dye Sources, Канада, чистота 99.5 %) или ITIC (Solarmer

Materials, КНР, чистота 99 %) — РЗНТ:РСВМ или РЗНТ:ІТІС, заранее приготовленных в виде их раствора в дихлорбензоле. В обеих смесях соотношение компонентов 1:1 по массе, а концентрация смеси в дихлорбензоле 18 мг/мл. На фотоактивный слой наносился катодный буферный слой PFN и далее методом вакуумного напыления с помощью специальной трафаретной маски — катодный слой Al толщиной 100 нм. Для исследования оптических свойств изготовлены аналогичные образцы, но без катодного слоя из Al — структуры РЗНТ:РСВМ и РЗНТ:ІТІС.

Для определения влияния термического отжига на эффективность работы и деградацию ОСФ фотовольтаические и оптические характеристики измерены дважды: в свежеприготовленных образцах и после их высокотемпературного отжига при 160 °С в течение 20 мин.

Для изучения воздействия атмосферного кислорода на скорость деградации ОСФ фотовольтаические параметры измерены в открытом воздухе и атмосфере чистого азота в течение соответствующих периодов времени. Нанесение фотоактивного слоя и отжиг ОСФ проводились также в атмосфере азота в герметичном перчаточном боксе.

Спектры поглощения образцов зарегистрированы в области 300—800 нм с помощью спектрофотометра UV-1280 (Shimadzu, Япония), спектры фотолюминесценции — в области 500—1000 нм при возбуждении на $\lambda = 532$ нм спектрометром Renishaw 2000 (Великобритания). Разброс интенсивности люминесценции, вызываемый переустановкой образцов, составлял 3 % без какой-либо дополнительной подстройки измерительного тракта. Толщина пленок фотоактивного слоя измерена с помощью профилометра DEKТАК 150 (Veeco, США) с точностью 0.6 нм. Для сравнения фотовольтаических и оптических свойств исследованы структуры с толщиной активного слоя 100 нм с возможным ее расхождением от образца к образцу не более 5 нм. Вольтамперные характеристики образцов ОСФ определены при освещении светом от стандартного источника со спектром 1.5 АМ и мощностью 100 мВт/см² симулятором солнечного излучения Newport (США) и вольтметром Keithley 2410 (США).

Результаты и их обсуждение. Фотовольтаические параметры свежеприготовленных ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ и РЗНТ:ІТІС измерены до и после термического отжига при температуре 160 °С в течение 20 мин (табл. 1). Исследования зависимости фотоэлектрических характеристик от температуры и времени отжига ОСФ не проведены, но вышеуказанные условия отжига как оптимальные взяты из работ [4, 23]. Термическая обработка ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ при значительном (в ~1.5 раза) повышении тока короткого замыкания (J_{sc}) и фактора заполнения (FF) также вызывает небольшое увеличение напряжения холостого хода (V_{oc}), что в итоге приводит к почти трехкратному повышению ЭЭП, что согласуется с данными [30]. В ОСФ на основе РЗНТ:ІТІС при термическом отжиге получен несколько иной результат: резкое, почти трехкратное увеличение J_{sc} сопровождается незначительным увеличением FF и небольшим спадом V_{oc} . При этом ЭЭП, оставаясь на существенно низком по сравнению с ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ уровне, возрастает также почти в три раза [24]. Такое различие фотовольтаических характеристик ОСФ двух типов следует отнести к качественному различию структурных особенностей их активных слоев: в первом случае структура полимера РЗНТ, близкая к аморфной [23], обуславливает значительное электрическое сопротивление пленки РЗНТ:ІТІС и, соответственно, низкое напряжение J_{sc} в ней, а также низкое значение FF в ОСФ в целом.

Т а б л и ц а 1. Фотовольтаические параметры ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ и РЗНТ:ІТІС до и после отжига

Активный слой ОСФ	Напряжение холостого хода V_{oc} , В	Ток короткого замыкания J_{sc} , мА/см ²	Фактор заполнения FF, %	Энергетическая эффективность преобразования ЭЭП, %
Свежеприготовленный РЗНТ:РСВМ	0.536	4.15	37.2	0.83
Отожженный РЗНТ:РСВМ	0.648	5.92	58.5	2.25
Свежеприготовленный РЗНТ:ІТІС	0.56	0.88	40.7	0.2
Отожженный РЗНТ:ІТІС	0.53	2.5	43.1	0.57

Таким образом, формирование упорядоченной ламинарной структуры пленки РЗНТ:ІТІС, как в случае с ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ [31], является ключевой задачей повышения ЭЭП рассматриваемого типа ОСФ.

Для определения временного хода деградации основные фотовольтаические параметры исследуемых ОСФ измерены периодически, с определенным временным интервалом. На рис. 1, *а*, *б* показаны кривые спада нормированных к 100 % значений V_{oc} , I_{sc} и ЭЭП в ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ и РЗНТ:ІТІС, выдержанных в открытом воздухе. Экспериментальные значения параметров соответствуют средним, измеренным в пяти идентичных образцах каждого типа ОСФ, пунктир — кривые спада, наиболее точно подходящие экспериментальным данным. Как видно, в обоих ОСФ при почти неизменном V_{oc} значения I_{sc} и ЭЭП за короткое время (~8 ч в ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ и <1 ч в ОСФ на основе РЗНТ:ІТІС) спадают практически до нуля. Такие изменения характерны для изучаемого типа ОСФ [4], их механизм связан с быстрым окислением верхнего катодного слоя Al и его диффузией в фотоактивный слой [7]. Время деградации ЭЭП в ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ примерно такое же, как в [6]. Однако в ОСФ на основе РЗНТ:ІТІС период спада существенно меньше (<1 ч). Исследования времени деградации в таком ОСФ отсутствуют, что, по-видимому, связано с крайне низкой его ЭЭП и отсутствием практического интереса к нему. Короткий период спада показывает качественное изменение природы деградации при замене акцепторных молекул РСВМ на ІТІС в полимерной матрице РЗНТ. Если в данном случае преобладающий механизм деградации также относится к окислению Al и его диффузии в активный слой, то такой процесс в матрице РЗНТ:ІТІС должен быть намного более интенсивным по сравнению с матрицей РЗНТ:РСВМ.

На рис. 1, *в*, *г* показаны кривые спада нормированных значений V_{oc} , I_{sc} и ЭЭП в ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ и РЗНТ:ІТІС, выдержанных (и измеренных) в атмосфере азота. Отсутствие кислорода в этом случае исключает окисление электрода из Al, поэтому во временном ходе деградации отсутствует быстрая компонента с характерным периодом в несколько часов в обоих типах ОСФ. Заметный спад фотовольтаических параметров при этом наблюдается за существенно большее время (720 ч). В течение такого длительного времени наблюдается спад не только тока короткого замыка-

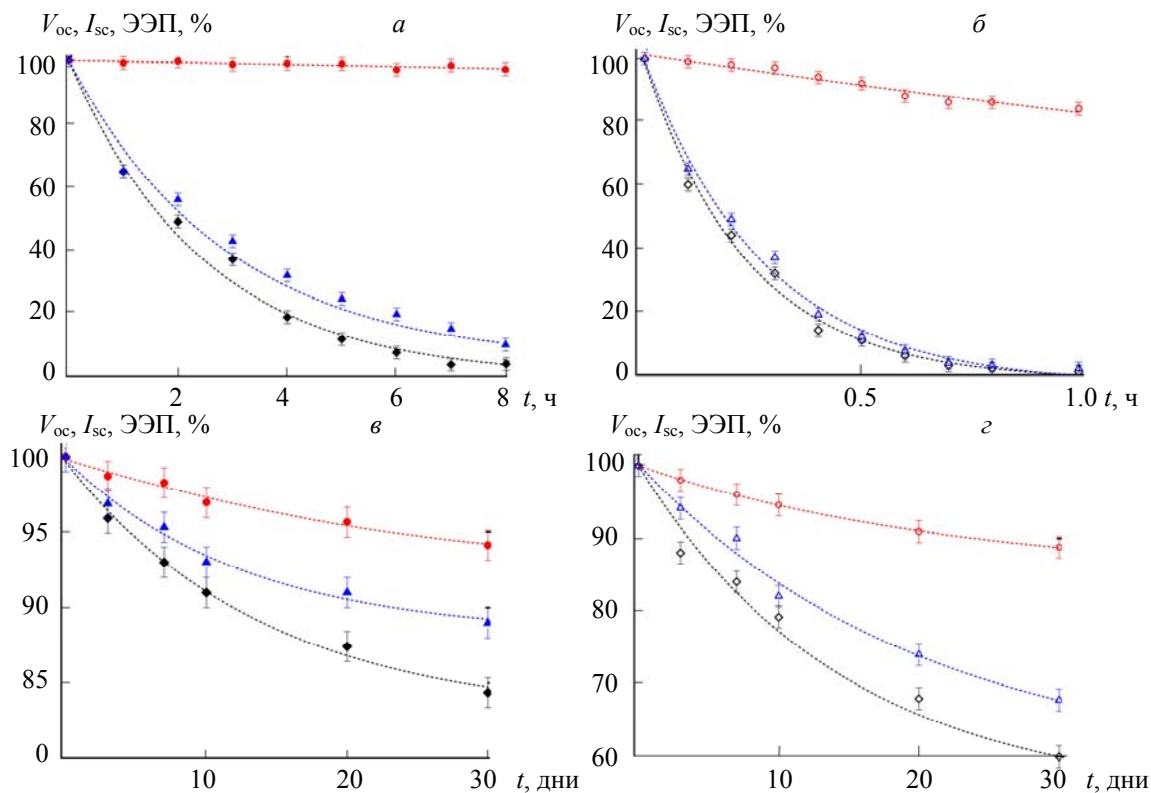


Рис. 1. Кривые спада нормированных к 100 % значений V_{oc} (●), I_{sc} (Δ) и ЭЭП (◆) в ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ (*а*, *в*) и РЗНТ:ІТІС (*б*, *г*), выдержанных в открытом воздухе (*а*, *б*) и в атмосфере азота (*в*, *г*)

ния I_{sc} (11 и 32 % в двух указанных типах ОСФ) и ЭЭП (16 и 40 %), но и напряжения холостого хода V_{oc} (6 и 11%). Хотя спад фотовольтаических параметров в этом случае на порядок медленнее, чем в случае деградации в атмосферном воздухе, но, как и в предыдущих зависимостях, спад ЭЭП в ОСФ на основе РЗНТ:ІТІС быстрее, чем в ОСФ на основе РЗНТ:РСВМ, а небольшое уменьшение V_{oc} свидетельствует о возможных изменениях в энергетических уровнях донорно-акцепторных молекул.

Оптические характеристики. Качественное различие в структурной упорядоченности фотоактивных слоев РЗНТ:РСВМ и РЗНТ:ІТІС также должно отражаться в их оптических характеристиках. Отсутствие электрода из Al в таких структурах, необходимое для выполнения оптических измерений, должно исключить первую, быструю фазу деградации, связанную с окислением и диффузией Al в фотоактивный слой. На рис. 2 показаны спектры поглощения структур РЗНТ:РСВМ и РЗНТ:ІТІС, измеренные в свежеприготовленных образцах и после их выдержки в течение 240 и 720 ч на воздухе. В изменениях спектров поглощения обеих структур с течением времени не выявлена быстрая компонента с характерным периодом порядка нескольких часов, как это наблюдалось в соответствующих ОСФ из-за окисления и диффузии Al [25]. Постепенный спад поглощения имеется в областях поглощения РСВМ (~400 нм) и РЗНТ (450—550 нм) в структуре РЗНТ:РСВМ, так же как РЗНТ (450—550 нм) и ІТІС (650—700 нм) в структуре РЗНТ:ІТІС [24]. Причем изменения во втором случае более значительные, чем в первом. Кроме того, спад за первые 240 ч более значительный, чем в последующие 720 ч, что согласуется с изменениями фотовольтаических характеристик (рис. 2). Поскольку другие составные материалы этих структур, включая подложку, не поглощают свет, спектры поглощения и флуоресценции отражают характерные изменения именно активного слоя этих структур. Выявлено, что скорость уменьшения поглощения заметно ниже в образцах, подвергнутых термическому отжигу (не показано). Такой показатель деградации, как снижение поглощения с течением времени, типичен для органических материалов ОСФ, и его связывают со структурными изменениями в составных материалах и их распадом [23].

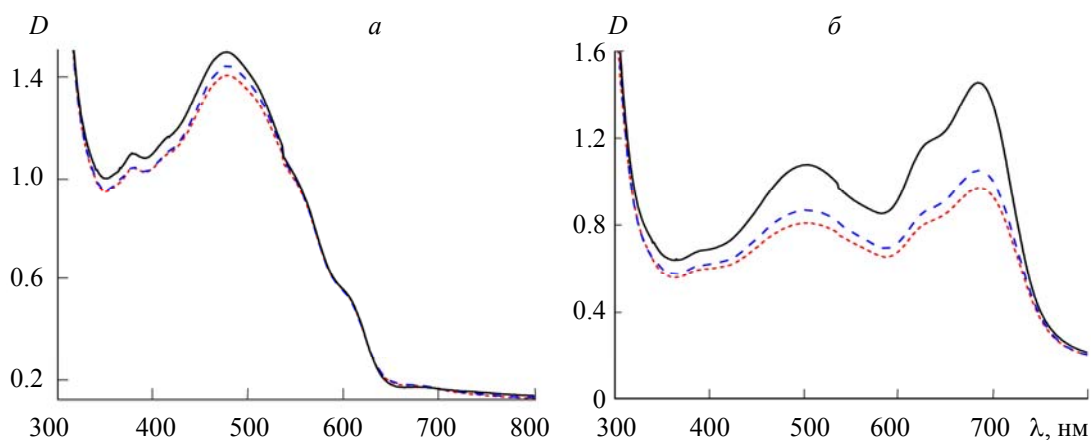


Рис. 2. Спектры поглощения структур РЗНТ:РСВМ (а) и РЗНТ:ІТІС (б), измеренные в свежеприготовленных образцах (сплошные линии) и после их выдержки в течение 240 (пунктир) и 720 ч (штриховые линии) на воздухе

На рис. 3, а, б показаны спектры фотолюминесценции структур РЗНТ:РСВМ и РЗНТ:ІТІС, измеренные при возбуждении на $\lambda = 532$ нм в свежеприготовленных образцах и после 720 ч их выдержки на воздухе. Эти спектры представляют собой спектры РЗНТ, так как последний значительно более интенсивно поглощает возбуждающий свет, а квантовый выход фотолюминесценции у обеих акцепторных молекул незначителен [23, 32]. Тем не менее в спектре фотолюминесценции образца РЗНТ:ІТІС в области ~750 нм наблюдается небольшая полоса, относящаяся к фотолюминесценции ІТІС [33], которая практически исчезает при отжиге (см. ниже). Деградация с течением времени в обеих структурах вызывает увеличение фотолюминесценции, причем в РЗНТ:ІТІС значительно больше, чем в РЗНТ:РСВМ (63 и 35%).

Термический отжиг, стимулирующий повышение упорядоченности структуры фотоактивного слоя и одновременно пространственное разделение донорной и акцепторной фаз с образованием их доменов [10], вызывает характерное увеличение фотолюминесценции из-за увеличения длины диф-

фузии экситонов, при этом высокая упорядоченность длинных полимерных молекул РЗНТ обуславливает повышение относительного вклада обертоновых полос их фотолюминесценции (~730 нм) по сравнению с основной электронной полосой (~640 нм) (рис. 3, в, з). В отожженной структуре РЗНТ:PCBM увеличение фотолюминесценции за счет временной деградации меньше (22 %, рис. 3, в), чем в неотожженной (35 %, рис. 3, а). Отметим, что в структуре РЗНТ:ITIC термический отжиг вызывает обратный эффект: масштаб временной деградации в нем больше (100 %, рис. 3, з) по сравнению с неотожженным образцом (60 %, рис. 3, б). Это можно объяснить конкуренцией двух процессов: уменьшение поглощения при отжиге вызывает уменьшение фотолюминесценции, при этом увеличение размеров доменов донорной и акцепторной фаз приводит к уменьшению вероятности диссоциации экситонов на свободные заряды на границе этих фаз. В смеси РЗНТ:ITIC из-за значительно более низкой по сравнению с РЗНТ:PCBM структурной упорядоченности второй процесс менее эффективен, чем первый. Поэтому даже после термического отжига деградация во времени происходит более интенсивно.

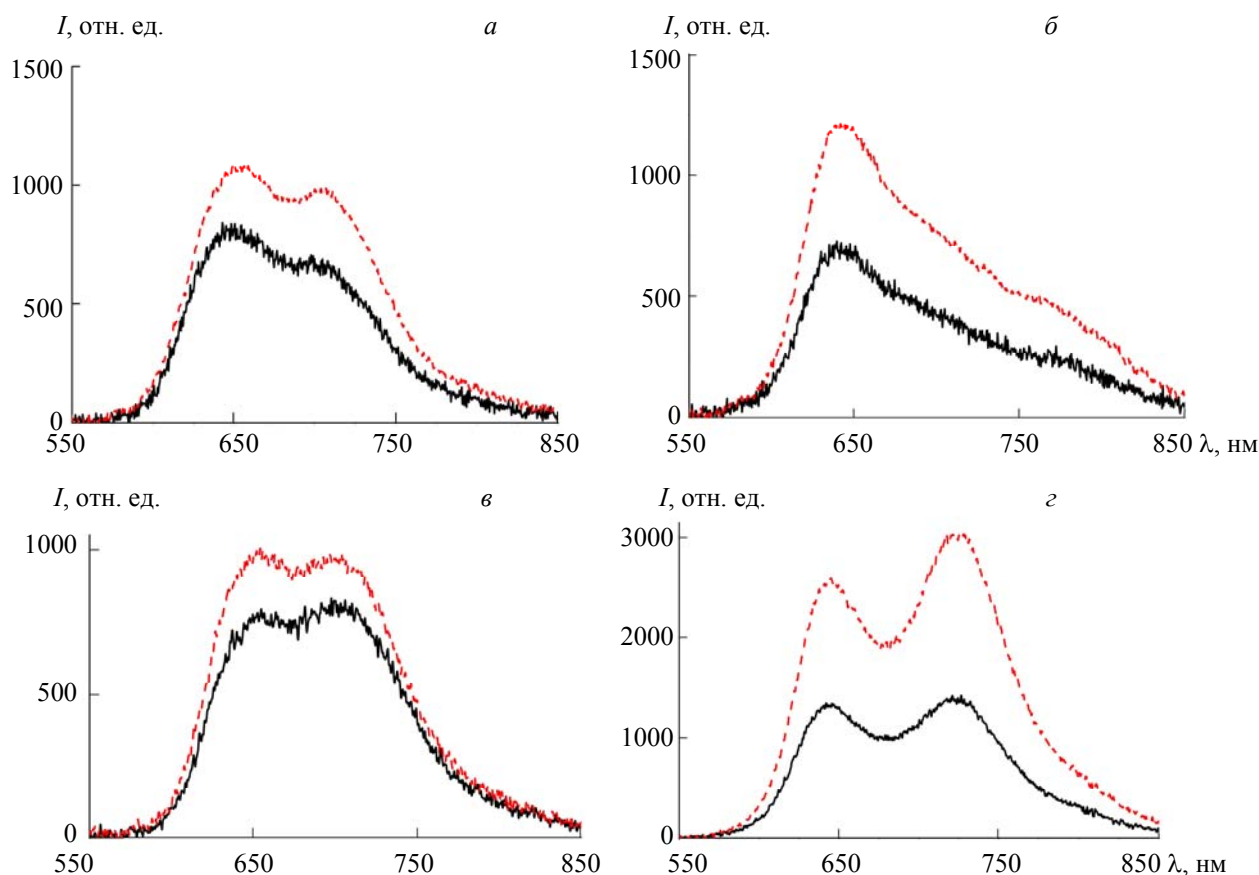


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции свежеприготовленных (сплошные кривые) и выдержанных 720 ч на воздухе (пунктир) образцов неотожженных структур (а, б) и отожженных (160 °С, 20 мин) (в, з) структур РЗНТ:PCBM (а, в) и РЗНТ:ITIC (б, з); $\lambda_{\text{возб}} = 532$ нм

Заключение. Изучение деградации с течением времени и спада эффективности органических солнечных фотоэлементов с активным слоем из полимера РЗНТ в смеси с молекулами PCBM и ITIC показывает, что в присутствии кислорода (в обычной атмосфере) органические солнечные фотоэлементы быстро деградируют. Характерное время деградации в несколько часов, ранее выявленное и объясненное окислением тонкого слоя электрода из Al и его диффузией в фотоактивный слой, в случае органических солнечных фотоэлементов на основе РЗНТ:PCBM совпадает с результатами настоящей работы, тогда как в органических солнечных фотоэлементах на основе РЗНТ:ITIC период такой деградации многократно меньше (<1 ч). Такое различие в скорости деградации в двух органических солнечных фотоэлементах с одинаковым донорным полимером-матрицей, но различающимися ак-

цепторными молекулами связано со спецификой структуры их фотоактивного слоя: если тонкая пленка P3HT:PCBM в таком органическом солнечном фотоэлементе, особенно после термического отжига, характеризуется высокой структурной упорядоченностью, то такая же пленка P3HT:ITIC имеет структуру, близкую к аморфной. В отсутствие кислорода (в атмосфере азота) спад эффективности этих органических солнечных фотоэлементов происходит за период >720 ч, причем скорость деградации в органических солнечных фотоэлементах на основе ITIC также заметно выше, чем в фотоэлементах на основе PCBM. Физическим механизмом медленного спада эффективности обоих органических солнечных фотоэлементов в отсутствие кислорода могут быть структурные изменения и распад составных материалов их фотоактивного слоя.

Изучение оптических характеристик структур P3HT:PCBM и P3HT:ITIC — тех же органических солнечных фотоэлементов, но без катодного слоя Al, продемонстрировало наличие в кинетике их деградации только медленной компоненты с характерным периодом ~720 ч. Изменения в поглощении таких структур наблюдаются по всему спектру поглощения P3HT/PCBM и P3HT/ITIC, что свидетельствует о структурных измерениях и распаде составных материалов этих смесей. Время спада поглощения в изученных структурах ~720 ч. Фотолюминесценция органических солнечных фотоэлементов показала медленный, но заметный рост после их выдержки в воздушной атмосфере в течение 720 ч, что связано с разделением за этот период донорной и акцепторной фаз фотоактивного слоя, причем в структуре P3HT:ITIC, подверженной термическому отжигу, рост значительно больше, чем в структуре P3HT:PCBM. Такое различие свидетельствует о том, что в отличие от органических солнечных фотоэлементов на основе второй структуры, характеризующихся высокой стабильностью и эффективностью работы, органические солнечные фотоэлементы на основе первой структуры не являются оптимизированными по структуре, и для достижения высокой энергетической эффективности преобразования необходима дополнительная обработка для упорядочивания их структуры.

На примере сравнительного изучения фотовольтаических и оптических свойств органических солнечных фотоэлементов с одинаковым донорным полимером P3HT, но с разными акцепторными молекулами PCBM и ITIC показано, что спектры поглощения и фотолюминесценции таких устройств могут быть информативным инструментом для оценки степени деградации и спада эффективности преобразования солнечной энергии, а также для определения работоспособности такого устройства преобразования солнечной энергии.

Работа выполнена в рамках реализации проекта OT-Ф2-05 программы фундаментальных исследований Академии наук Республики Узбекистан.

Авторы благодарят проф. Р. Янг (Институт биоэнергии и технологии биопроцессов АН КНР, г. Циндао, КНР) за предоставленные органические материалы для структур и ценное обсуждение результатов экспериментов.

- [1] L. Meng, Y. Zhang, X. Wan, C. Li, X. Zhang, Y. Wang, X. Ke, Z. Xiao, L. Ding, R. Xia, H. L. Yip, Y. Cao, Y. Chen. *Science*, **361** (2018) 1094—1098
- [2] W. Zhao, S. Li, H. Yao, S. Zhang, Y. Zhang, B. Yang, J. Hou. *J. Am. Chem. Soc.*, **139**, N 21 (2017) 7148—7151
- [3] A. M. Bagher. *Int. J. Renew. Sus. Energ.*, **3** (2014) 53—58
- [4] P. Cheng, X. Zhan. *Chem. Soc. Rev.*, **45** (2016) 2544—2582
- [5] X. Du, T. Heumueller, W. Gruber, A. Classen, T. Unruh, N. Li, C. J. Brabec. *Joule*, **3** (2019) 215—226
- [6] K. Kawano, R. Pacios, D. Poplavskyy, J. Nelson, D. D. Bradley, J. R. Durrant. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, **90** (2006) 3520—3530
- [7] M. Jorgensen, K. Norrman, F. C. Krebs. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, **92** (2008) 686—714
- [8] H. Z. Yu. *Adv. Mater. Res.*, **924** (2014) 193—199
- [9] M. Manceau, S. Chambon, A. Rivaton, J. L. Gardette, S. Guillerez, N. Lemaître. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, **94** (2010) 1572—1577
- [10] J. W. Kiel, A. P. Eberle, M. E. Mackay. *Phys. Rev. Lett.*, **105** (2010) 168701
- [11] G. Dennler, M. C. Scharber, C. J. Brabec. *Adv. Mater.*, **21** (2009) 1323—1338
- [12] I. Anefnaf, N. Benhaddou, S. Aazou, M. Abd-Lefdil, Z. Sekkat. *IEEE Int. Renewable and Sustainable Energy Conf. (IRSEC)* (2016) 801—804

- [13] **A. J. Moule, D. Neher, S. T. Turner.** In: P3HT Revisited-From Molecular Scale to Solar Cell Devices, Ed. S. Ludwig, Berlin, Springer (2014) 181—231
- [14] **E. A. Zakhidov, A. M. Kokhkharov, V. O. Kuvondikov, S. Q. Nematov, R. A. Nusretov.** *J. Korean Phys. Soc.*, **67** (2015) 1262—1267
- [15] **H. Cao, W. He, Y. Mao, X. Lin, K. Ishikawa, J. H. Dickerson, W. P. Hess.** *J. Power Sourc.*, **264** (2014) 168—183
- [16] **J. Hou, O. Inganäs, R. H. Friend, F. Gao.** *Nature Mater.*, **17** (2018) 119—128
- [17] **W. Zhao, D. Qian, S. Zhang, S. Li, O. Inganäs, F. Gao, J. Hou.** *Adv. Mater.*, **28** (2016) 4734—4739
- [18] **Э. А. Захидов, М. Х. Имомов, В. О. Кувондиков, Ш. К. Нематов, А. А. Сапарбаев, И. И. Тажибаев.** *Узбек. физ. журн.*, **21** (2019) 184—195
- [19] **S. Holliday, R. S. Ashraf, A. Wadsworth, D. Baran, S. A. Yousaf, C. B. Nielsen, C. H. Tang, S. D. Dimitrov, Z. Shang, N. Gasparini, M. Alamoudi, F. Laquai, C. J. Brabec, A. Salleo, J. R. Durrant, I. McCulloch, M. Alamoudi.** *Nature Commun.*, **7** (2016) 11585—11596
- [20] **H. Fu, Z. Wang, Y. Sun.** *Angew. Chem.* (2018) 10.1002/anie.201806291
- [21] **J. Lee, S. J. Ko, M. Seifrid, H. Lee, C. McDowell, B. R. Luginbuhl, A. Karki, K. Cho, T. Q. Nguyen, G. C. Bazan.** *Adv. Energy Mater.*, **8** (2018) 1801209 (1-9).
- [22] **F. Yang, D. Qian, A. H. Balawi, Y. Wu, W. Ma, F. Laquai, Z. Tang, F. Zhang, W. Li.** *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19** (2017) 23990—23998
- [23] **Y. Qin, M. A. Uddin, Y. Chen, B. Jang, K. Zhao, Z. Zheng, R. Yu, T. J. Shin, H. Y. Woo, J. Hou.** *Adv. Mater.*, **28** (2016) 9416—9422
- [24] **E. Zakhidov, M. Imomov, V. Quvondikov, Sh. Nematov, I. Tajibaev, A. Saparbaev, I. Ismail, B. Shahid, R. Yang.** *Appl. Phys. A*, **125** (2019) 803—810
- [25] **F. Deschler, A. De Sio, E. Von Hauff, P. Kutka, T. Sauer mann, H. J. Egelhaaf, J. Hauch, E. Da Como.** *Adv. Funct. Mater.*, **22** (2012) 1461—1469
- [26] **P. J. Brown, D. S. Thomas, A. Kohler, J. S. Wilson, J. S. Kim, C. M. Ramsdale, H. Sirringhaus, R. H. Friend.** *Phys. Rev.*, **67** (2003) 1—16
- [27] **G. Dennler, M. C. Scharber, C. J. Brabec.** *Adv. Mater.*, **21** (2009) 1323—1338
- [28] **P. T. Huang, P. F. Huang, Y. J. Horng, C. P. Yang.** *J. Chin. Chem. Soc.*, **60** (2013) 467—472
- [29] **J. H. Lee, S. Yoshikawa, T. Sagawa.** *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, **127** (2014) 111—121
- [30] **F. Otieno, B. K. Mutuma, M. Airo, K. Ranganathan, R. Erasmus, N. Coville, D. Wamwangi.** *Thin Sol. Films*, **625** (2017) 62—69
- [31] **X. Yang, A. Uddin.** *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **30** (2014) 324—336
- [32] **Э. А. Захидов, М. А. Захидова, А. М. Коххаров, Ш. К. Нематов, Р. А. Нусретов, В. О. Кувондиков.** *Журн. прикл. спектр.*, **85** (2018) 82—88 [E. A. Zakhidov, M. A. Zakhidova, A. M. Kokhkharov, S. Q. Nematov, R. A. Nusretov, V. O. Kuvondikov. *J. Appl. Spectr.*, **85** (2018) 73—78]
- [33] **Q. Liang, J. Han, C. Song, X. Yu, D. M. Smilgies, K. Zhao, J. Liu, Y. Han.** *J. Mater. Chem. A*, **6** (2018) 15610—15620