Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i4.477

Разработки и ключевые проблемы в области полимерных солнечных элементов

Э.А. Захидов[1], А.А. Сапарбаев[*,1,2]

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Дурмон йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан
[2]Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Университет 4, 100174,Ташкент, Узбекистан

Получена 26.09.2023, revised 24.12.2023

* Corresponding author: e-mail saparbaevaziz83@gmail.com, Phone +998 88 78014 41

Быстрое развитие технологий полимерных солнечных элементов (ПСЭ) в последние годы позволили достичь впечатляющих успехов в повышении эффективности преобразования энергии (ЭПЭ), достигнув значения последней более 19%, что демонстрирует большие перспективы их практического применения в будущем. Достижения в области новых материалов для указанных целей, в том числе: донорных из сопряженных полимеров, олигомеро-подобных органических молекул, а также полимерных акцепторов на основе фуллеренов и нефуллереновых молекул, однокомпонентных ПСЭ и водно/спирто-растворимых интерфейсных материалов в качестве буферного слоя, стали основой для исследований новых перспективных ПСЭ. Исходя из этого, в настоящей статье проанализированы различные типы материалов, используемых для ПСЭ, их преимущества и недостатки для практического применения в солнечной энергетике.

Ключевые слова: донор, акцептор, фуллерен, P3HT, ITIC, $PC_{61}BM$, $PC_{71}BM$

The paper discusses the noteworthy progress in polymer solar cell (PSC) technologies, achieving an impressive power conversion efficiency (PCE) of over 19%. This advancement is attributed to novel materials such as conjugated polymers, oligomer-organic molecules, and polymer acceptors using both fullerenes and non-fullerene molecules. Additionally, the exploration of single-component PSCs and water/alcohol-soluble interface materials as buffer layers enhances the potential for practical applications in solar energy. The analysis of the advantages and disadvantages of these materials provides insights for future research and development in the field.

Keywords: donor, acceptor, fullerene, P3HT, ITIC, $PC_{61}BM$, $PC_{71}BM$

I. Введение

С момента публикации первых статей по органическим/полимерным солнечным элементам в 1995 году [1] в области ПСЭ проведено большое количество научных исследований и получены впечатляющие практические результаты [2-4]. В первоначальных исследованиях P3HT (regioregular poly(3-hexylthiophene), PTB7 (Poly [[4,8-bis[(2-ethylhexyl)oxy]benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene-2,6-diyl][3-fluoro-2-[(2-ethylhexyl)carbonyl]thieno[3,4-b] thiophenediyl), PTB7-Th (Poly([2,6′-4,8-di(5-ethylhexylthienyl)benzo[1,2-b;3,3-b]dithiophene]{3-fluoro-2[(2-ethylhexyl)carbonyl]thieno[3,4-b]thiophenediyl}) и подобные им полимерные доноры изучались в основном в ПСЭ, изготовленных с применением растворов с фуллеренами и их производными (такими как [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester ($PC_{61}BM$) и [6,6]-Phenyl-C71-butyric acid methyl ester ($PC_{71}BM$)). В этих исследованиях были развиты основные закономерности процессов разработки ПСЭ. Среди донорных материалов полимер P3HT был оценен как один из наиболее подходящих для широкого использования донорных материалов благодаря возможности его крупноразмерного изготовления и легкой настройке его оптоэлектронных свойств [5]. Однако,

несмотря на многочисленные исследовательские усилия, рекордные значения ЭПЭ в ПСЭ на основе P3HT:$PC_{61}BM$ [5, 6] были достигнуты едва ли выше 5%.

Фуллерены в качестве акцепторного материала, хотя и привлекают повышенное внимание для разработки новых типов ПСЭ, имеют ряд важных ограничений, в том числе, связанных с:

– ограниченностью возможности настройки химической структуры и ширины запрещенной зоны;

– слабостью светопоглощения в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах;

– морфологической нестабильностью;

– высокой стоимостью синтеза, особенно акцепторов, подобных $PC_{71}BM$, который является более эффективным акцептором, чем $PC_{61}BM$ [7, 8].

Эти недостатки стимулировали изучение нефуллереновых акцепторов, включая небольшие молекулы и полимеры, для дальнейшего улучшения характеристик ПСЭ. В 2015 г. Chjan и его коллеги [9] объявили о новом акцепторе ITIC. ITIC обладает интенсивным поглощением в диапазоне 500–800 нм, а также низким уровнем LUMO. ПСЭ, полученные с использованием PTB7-Th в качестве донора и ITIC в качестве акцептора, дали многообещающую ЭПЭ на уровне 6.8% [9]. Использование ITIC в ПСЭ дало возможность получить молекулярные соединения типа A-D-A (акцептор-донор-акцептор) в качестве альтернативы фуллерен содержащим акцепторам, и с тех пор нефуллереновые акцепторы стали горячей темой.

II. Сопряженные полимеры

Первые сведения о сопряженных полимерах относятся к середине XIX века, когда в отчете Letheby о продуктах химического и электрохимического окисления анилинового полимера были описаны сопряженные полимеры [10]. Первые высоко-проводящие органические сопряженные полимеры, передающие заряд, были обнаружены спустя столетие, после того как исследователи начали понимать, что органические соединения могут проводить заряд.

Сопряженные полимеры представляют собой органические макромолекулы, для которых характерна основная или разветвленная цепь с чередующимися двойными и одинарными связями. Их перекрывающиеся *p*-орбитали создают систему делокализованных *p*-электронов, что приводит к интересным и полезным оптическим и электрическим свойствам. Чтобы максимально использовать солнечный свет, спектральная граница поглощения сопряженного полимера должна находиться в ближнем инфракрасном диапазоне. Поэтому разработка методов молекулярного синтеза очень важна для расширения диапазона поглощения сопряженного полимера.

III. Политиофен и его производные

Поли(3-алкилтиофены) (P3AT) активно используются в качестве материалов для элементов оптоэлектроники, особенно для ПСЭ. Из них P3HT является лучшим среди полимеров на основе P3AT в качестве фотоэлектрического материала. Как правило, полимеры на основе P3AT можно легко синтезировать различными методами. Поэтому такие полимерные материалы занимали ключевые места в разработке ПСЭ, пока не были синтезированы и открыты новые донорные и акцепторные полимерные материалы. Повторяющиеся единицы P3AT несимметричны и имеют три относительные ориентации, когда два тиофеновых кольца присоединены между второй и пятой позициями (обычно 2-позиция называется головкой (head), а позиция 5 называется хвостом (tail). Итак, первый из них называется HT-Head-Tail, второй HH-Head-Head, а третий TT-Tail-Tail.

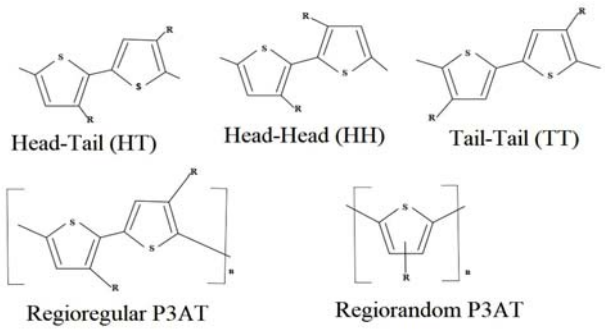


Рисунок 1. Химические структуры трех региоизомеров в димерах 3-алкилтиофена, а также региорегулярном и региослучайном поли(3-алкилтиофене).

Как показано на рис. 1, при использовании 3-х замещенных тиофеновых мономеров получается смесь четырех химически различных тройных региоизомеров [11]. Структура HT-HT политиофенов является региорегулярной, остальные три структуры региорегулярными или региослучайными, а соотношение изомеров HT-HT в полимерах называется региорегулярностью. По-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

лимеры на основе региорегулярного поли(3-замещенного тиофена) легко могут входить в низкоэнергетическую конформацию (конформация характеризует физическое изменение конфигурации макромолекулы), что приводит к образованию высоко-сопряженных полимеров. Увеличение углов закручивания между тиофеновыми кольцами приводит к увеличению энергии запрещенной зоны, что приводит к высокой проводимости и другим желаемым свойствам, и является важным фактором в расположении тиофеновых кольцевых цепей и региорегулярности таких полимеров как P3HT (рис. 7). Потому что сначала необходимо синтезировать полимерные материалы с высокими фотоэлектрическими параметрами. В настоящее время влияние регулирования на фотоэлектрические свойства других полимерных систем недостаточно изучено, но эти параметры будут одним из решений для дальнейшего улучшения молекулярных структур.

III.1. Полимеры на основе 2,1,3-бензотиадиазола

Полимеры на основе 2,1,3-бензотиадиазола (BT) широко используются в качестве активных слоев с донорно-акцепторной структурой в сопряженных полимерах в ПСЭ. Эта группа полимерных доноров была тщательно изучена и позволила добиться отличных результатов в фотовольтаике. Среди полимеров на основе BT полимера PCPDTBT был первым, который был успешно синтезирован и использован в ПСЭ [12].

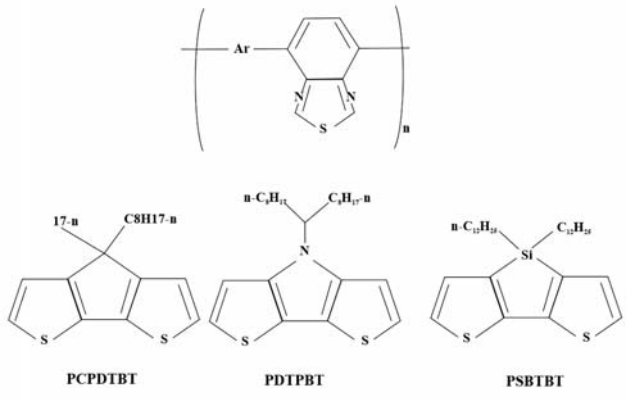


Рисунок 2. Несколько типов полимеров на основе BT.

Помимо полимера PCPDTBT, синтезировано множество других полимеров на основе BT (рис. 2). Путем синтеза полимеров на основе BT и изменения их структуры такие соединения позволяют регулировать ширину спектра поглощения, коэффициент поглощения, а также ширину запрещенной зоны, тем самым оптимизировать параметры ПСЭ.

Спектр поглощения полимера PCPDTBT имеет пики поглощения в двух диапазонах длин волн, как показано на рис. 3.

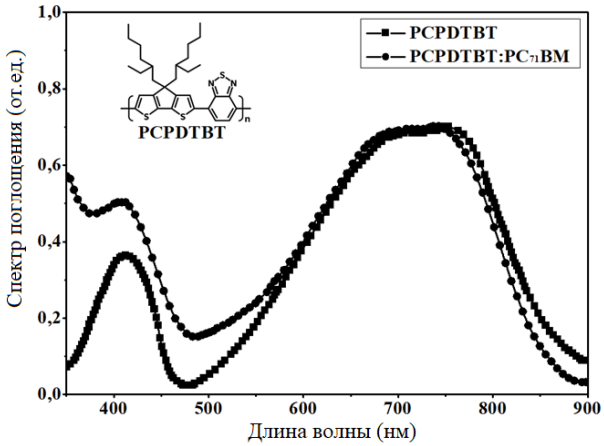


Рисунок 3. Структура и спектр поглощения полимера PCPDTBT.

Первый спектральный диапазон находится в области длин волн около 400 нм, тогда как второй имеет высокие значения коэффициента поглощения в широкой спектральной области, простирающейся до ближней инфракрасной области, что соответствует запрещенному энергетическому уровню 1.50 эВ в PCPDTBT. Причем этот полимер также показал хорошую подвижность (1×10^{-3} см^2/В·с) (рис. 3).

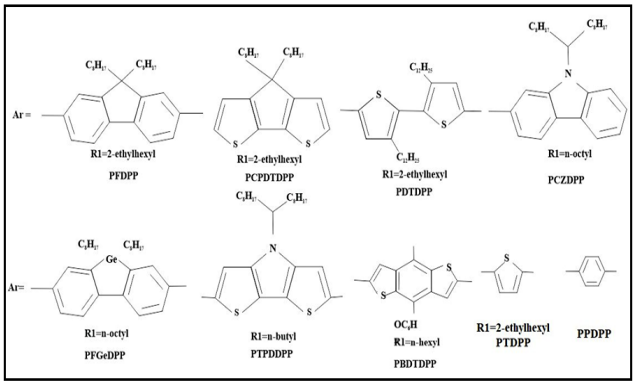


Рисунок 4. Структура полимеров на основе DPP.

Полимеры на основе пирроло[3,4-c]пирролл-1.4-диона (DPP). Полимеры на основе DPP обладают высоким коэффициентом поглощения в видимой области длин волн. Полимеры DPP на основе тиофена имеют хорошо сформированную сопря-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

женную структуру и обладают хорошей подвижностью носителей заряда для дырок и электронов (рис. 4).

Полимер на основе DPP был впервые изучен C. Winnewisser и др. с применением его в органических полевых транзисторах [13]. Полимеры DPP или на основе DPP сополимеризуются с другими обычными сопряженными компонентами с образованием других типов сопряженных полимеров. В настоящее время начали синтезировать и использовать для ПСЭ новые типы полимеров на основе DPP [14, 15].

III.2. Полимеры на основе бензо[1,2-b;4,5-b'] дитиофена (BDT)

Производительность солнечных элементов тесно связана со структурой полимерных материалов, доноров. Благодаря быстрому развитию полимерных донорных материалов, многие параметры ПСЭ были значительно улучшены. В настоящее время лучшим и наиболее изученным донорным материалом является D-A-конъюгированный полимерный донорный материал на основе электронно-донорной группы бензодитиофена (BDT). Блок BDT имеет большую плоскую сопряженную структуру, которая полезна для улучшения подвижности носителей заряда. Кроме того, полимеры на основе BDT могут быть изготовлены с большим количеством свободных связей для реакции, поэтому можно легко регулировать уровень молекулярной энергии и спектр поглощения, изменяя химическую структуру, чтобы получить высокоэффективный полимерный донорный материал. Полимерные донорные материалы на основе BTD и их фотоэлектрические свойства выделяются следующим образом: в зависимости от типа боковых цепей. В 2008 г. бензодитиофеновая электронно-донорная единица (BDT) была впервые использована в ПСЭ J. Hou и др. [16]. Недавно, исследователями был синтезирован донорный блок BDT (M1) на основе замещенной боковой цепи алкоксимономера, как показано на рис. 5, и получено множество полимерных донорных материалов на его основе.

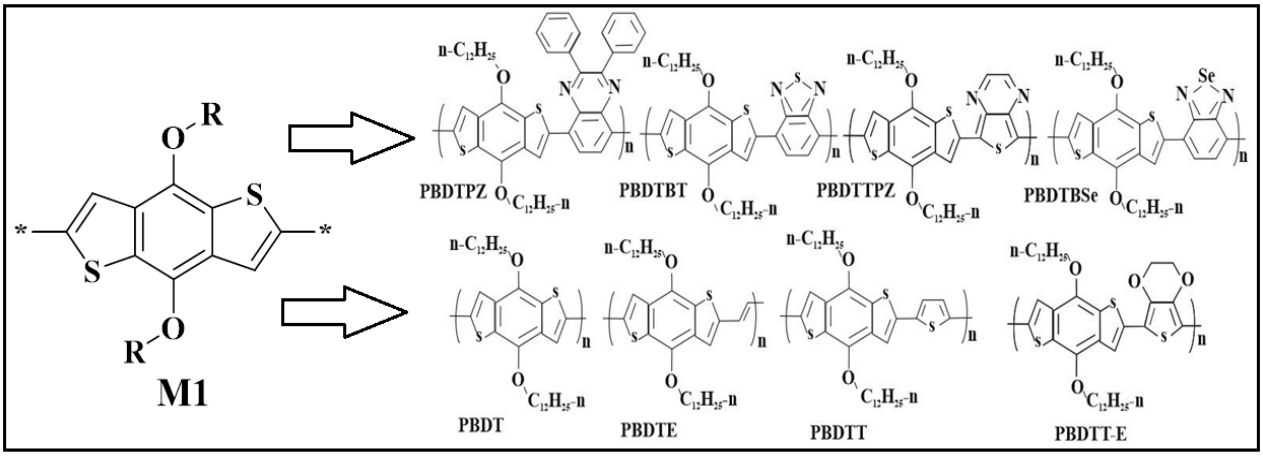


Рисунок 5. BDT (M1) и виды полимерных материалов на основе BDT.

Хотя ЭПЭ в ПСЭ из таких полимерных материалов невысокая, но простой метод синтеза и структурные преимущества BDT позволили исследователям предположить, что донорное звено BDT, замещенное алкоксильной боковой цепью, имеет широкие перспективы для развития таких полимерных материалов [17].

III.3. Материалы на основе фуллеренов для ПСЭ

Фуллерен C_{60} имеет хорошую симметричную структуру и обладает хорошей подвижностью электронов. Одна молекула C_{60} может принять четыре электрона, поэтому в качестве акцепторного материала широко используются C_{60} и его производные. В 1992 г. S. Sariciftci и др. [18] впервые обнаружили фотоиндуцированный сверхбыстрый перенос электронов между донором и акцептором, используя C_{60} в качестве акцептора. Хотя C_{60} растворим в хлорбензоле и дихлорбензоле, он проявляет очень ограниченную растворимость и спектр поглощения в наиболее часто используемых органических растворителях (рис. 6) [19].

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Поэтому метиловый эфир [6,6]-фенил-C_{61}-масляной кислоты ($PC_{61}BM$) используется для активных слоев ПСЭ для улучшения его растворимости и увеличения растворимости донорно-акцепторной смеси. $PC_{61}BM$ и $PC_{71}BM$ производные фуллерена C_{60} и C_{70} соответственно в течение последних двух десятилетий использовались в оновном в качестве акцепторов в ПСЭ. Из рис. 7 видно, что коэффициент поглощения $PC_{61}BM$ в диапазоне от 400 до 700 нм намного ниже, чем коэффициент поглощения $PC_{71}BM$.

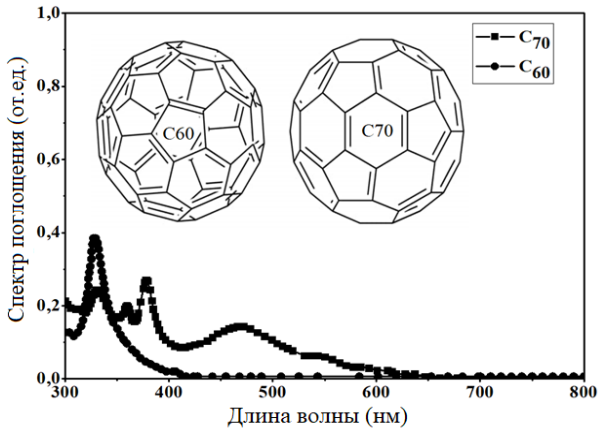


Рисунок 6. Структура фуллеренов C_{60} и C_{70} и их спектры поглощения.

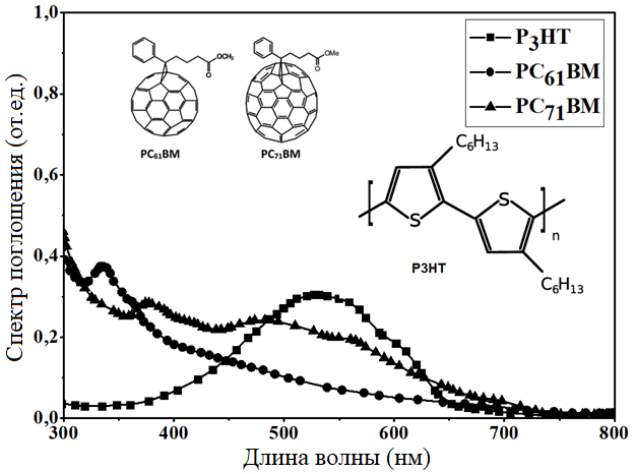


Рисунок 7. Структуры и спектры поглощения $PC_{61}BM$, $PC_{71}BM$ и P3HT

Судя по коэффициентам оптического поглощения ЭПЭ можно подобрать оптимальной при правильном выборе донорных материалов для акцептора $PC_{71}BM$ в ПСЭ. По сравнению с $PC_{61}BM$, $PC_{71}BM$ имеет больший спектр поглощения в видимом диапазоне, поэтому в последнее время вызывает большой интерес у учёных. Но, так как C_{70} намного дороже, чем C_{60}, из-за длительного процесса его переработки, такой фуллерен ограничен в применении. Вместе с тем в настоящее время синтезированы многие другие типы фуллерен-содержащих материалов, такие как $IC_{60}MA$, $IC_{60}BA$, $IC_{70}MA$ и $IC_{70}BA$.

III.4. Нефуллереновые (бесфуллереновые) акцепторные материалы

В разработке новых ПСЭ в последние годы широко используются бесфуллереновые акцепторы, в том числе ПСЭ с объемной гетероструктурой и послойной структурой [19-21]. В отличие от широко используемых фуллерен-содержащих акцепторов (таких как $PC_{61}BM$ и $PC_{71}BM$), бесфуллереновые акцепторы легко настраиваются по их оптическим свойствам и по энергии запрещенной зоны. В 1998 г. R. Friend и его группа [22] первыми сообщили о научных результатах по изучению двухслойных ПСЭ на основе полимерных акцепторов с использованием полимерного акцептора MEH-CN-PPV (рис. 8) и донора POPT на основе политиофена. В 2007 г X. Zhan и др. [23] сообщили об акцепторном полимере на основе PDI 1. Полимер 1 (рис. 8) имеет высокую подвижность электронов и широкий спектр светопоглощения и, используя такой полимер, быола достигнута ЭПЭ 1.5% в ПСЭ с объёмной гетеропереходной структурой из полимера 1 и донора на основе политиофена. В 2008 г. R. McNeill и др. [24] сообщили о полимерном акцепторе F8TBT на основе бензотиадиазола. Спектр поглощения акцептора F8TBT находится в диапазоне 200–640 нм. Используя структуру P3HT:F8TBT, была достигнута ЭПЭ 1.2%. [25]. В 2009 г. H. Yan и др. [26] разработали акцепторный полимер N2200 на основе диимида нафталина (NDI). N2200 продемонстрировал высокую подвижность электронов 0.85 $см^2В^{-1}с^{-1}$ и широкий спектр поглощения, охватывающий 300–900 нм в полимерных полевых транзисторах.

В свое время N2200 считался наиболее широко используемым полимерным акцептором, поскольку он обеспечивал высокую эффективность ПСЭ и совместимость с несколькими донорными материалами. Например, в 2019 г. L. Zhu и др. [27] удалось увеличить ЭПЭ ПСЭ на базе N2200 до 11.76%. В то время этот результат считался одним из лучших результатов для ПСЭ. Таким образом, с 1998 по 2022 г.г. в ПСЭ с полимерами, не содержащими фуллерены, ЭПЭ была увеличена с 1.9% до 19,2% [28].

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

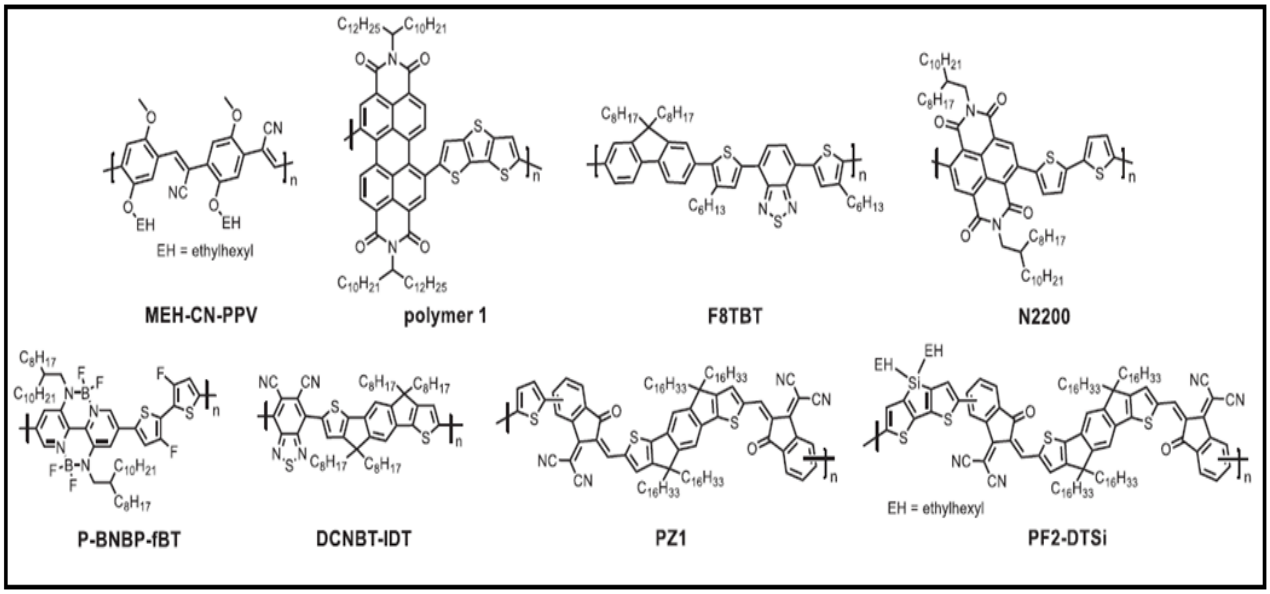


Рисунок 8. Типы бесфуллереновых акцепторов.

В настоящее время существует так много типов бесфуллереновых акцепторов, что даже большинству из них присвоен номер без названия [2]. Поэтому мы подробно рассмотрим свойства акцепторного полимера ITIC на примере бесфуллереновых акцепторов. ITIC (химическое название: 3,9-бис(2-метилен-(3-(1,1-дицианометилен) инданон))-5,5,11,11-тетракис(4-гексилфенил)-дитиено[2,3-d: 2',3'-d']-s-индацено[1,2-b:5,6-b']дитиофен) является первым представителем нового поколения низкомолекулярных акцепторов нефуллереновых акцепторов для ПСЭ. Небольшая ширина запрещенной зоны ITIC обеспечивает ее хорошую совместимость с донорными полимерами, что повышает эффективность разделения зарядов и снижает потери энергии. Молекула ITIC обладает сильным поглощением в широком диапазоне в видимой области спектра, вплоть до ближней инфракрасной области [29, 30] (рис. 9). Это обстоятельство дает таким молекулам обеспечить высокое поглощение ПСЭ и тем самым повысить ее ЭПЭ, что сделало ITIC первым низкомолекулярным акцептором, который позволил повысить эффективность выше, чем в ПСЭ с акцептором из фуллерена $PC_{71}BM$. Формируя активный слой с акцептором ITIC и донором PBDB, удалось достичь ЭПЭ более 11%. Для сравнения, ЭПЭ составляла менее 8%, когда использовался в качестве акцептора $PC_{71}BM$ [31]. В настоящее время существует множество акцепторов, которые считаются членами семейства акцепторных полимеров ITIC: ITIC-2F, IT-4F, ITIC-DCl, ITIC-M, ITIC-Th и ITIC-DM.

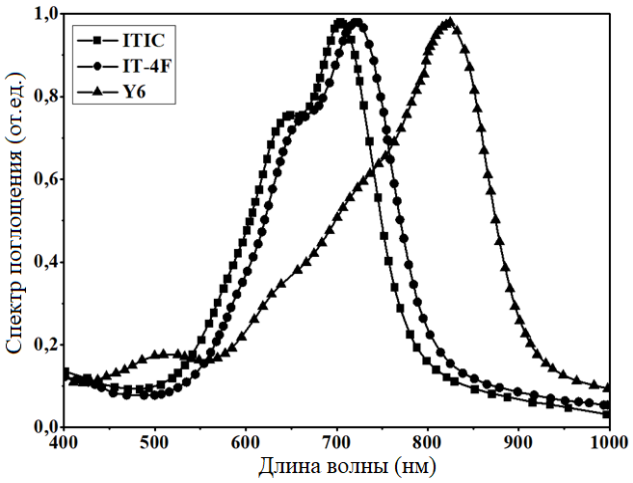


Рисунок 9. Спектры поглощения полимерных бесфуллереновых акцепторов ITIC, IT-4F и Y6.

IV. Заключение

В заключение следует отметить, что успех в повышении фотоэлектрической эффективности в основном достигнут с помощью низкомолекулярных нефуллереновых акцепторов (таких, как ITIC, IT-4F и Y6). Синтезировано множество новых нефуллереновых акцепторных полимеров с низкомолекулярными структурами (рис. 9). Преимущество низкомолекулярных акцепторных полимеров состоит в том, что они хорошо смешиваются с до-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

норными полимерами на молекулярном уровне и образуют эффективные активные слои, за исключением ширины их спектра поглощения (300–1000 нм). Хотя полимерные акцепторы до сих пор показывают более низкую эффективность в ПСЭ, чем акцепторы из малых молекул, они обладают уникальными преимуществами в практическом применении ПСЭ. Например, полимер активного слоя ПСЭ, состоящая из из полимерного донора, акцептора и буфера, обеспечивает улучшенную прочность и стабильность благодаря стабильной морфологии ПСЭ на основе полимерных слоев. При разработке цельно-полимерных ПСЭ, благодаря более удобному покрытию и механическим свойствам полимеров, может быть получена технология рулонной печати и гибкие полупрозрачные типы ПСЭ.

Благодарность. Авторы выражают благодарность Институту ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан за финансовую поддержку.

Метаданные

Developments and key problems of polymer solar cells

E.A. Zakhidov[1], A.A. Saparbaev[1,2]

[1]Institute of Ion plasma and laser technologies, Academy of sciences of the Republic of Uzbekistan. 33, Durmon yuli, 100125, Tashkent, Uzbekistan.
[2]National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, University, 4, 100174, Tashkent, Uzbekistan.

The paper discusses the noteworthy progress in polymer solar cell (PSC) technologies, achieving an impressive power conversion efficiency (PCE) of over 19%. This advancement is attributed to novel materials such as conjugated polymers, oligomer-organic molecules, and polymer acceptors using both fullerenes and non-fullerene molecules. Additionally, the exploration of single-component PSCs and water/alcohol-soluble interface materials as buffer layers enhances the potential for practical applications in solar energy. The analysis of the advantages and disadvantages of these materials provides insights for future research and development in the field.

Keywords: donor, acceptor, fullerene, , P3HT, ITIC, $PC_{61}BM$, $PC_{71}BM$

Литература (References)

[1] Guihua Yu, Jing Gao, Jan C. Hummelen, Fred Wudl, Alan J Heeger. Science **270**, No.5243, 1789-1791 (1995).
[2] Yahui Liu, Bowen Liu, Chang-Qi Ma, Fei Huang, Guitao Feng, Hongzheng Chen, Jianhui Hou, Lingpeng Yan, Qingya Wei, Qun Luo, Qinye Bao, Wei Ma, Wei Liu, Weiwei Li, Xiangjian Wan, Xiaotian Hu, Yanchun Han, Yaowen Li, Yinhua Zhou, Yingping Zou, Yiwang Chen, Yuqiang Liu, Lei Meng, Yongfang Li6, Yongsheng Chen, Zheng Tang, Zhicheng Hu, Zhi-Guo Zhang & Zhishan Bo. Science China Chemistry **65**, No.8, 1457-1497 (2022).
[3] Yahui Liu, Bowen Liu , Chang-Qi Ma , Fei Huang, Guitao Feng, Hongzheng Chen, Jianhui Hou, Lingpeng Yan, Qingya Wei, Qun Luo, Qinye Bao, Wei Ma, Wei Liu, Weiwei Li, Xiangjian Wan, Xiaotian Hu, Yanchun Han, Yaowen Li, Yinhua Zhou, Yingping Zou, Yiwang Chen, Yongfang Li, Yongsheng Chen, Zheng Tang, Zhicheng Hu, Zhi-Guo Zhang & Zhishan Bo. Science China Chemistry **65**, No.2, 224-268 (2022).
[4] Yang Li, Wei Huang, Dejiang Zhao, Lu Wang, Zhiqiang Jiao, Qingyu Huang, Peng Wang, Mengna Sun and Guangcai Yuan. Molecules **27**, No.6, 1800 (2022).
[5] Minh Trung Dang, Lionel Hirsch, Guillaume Wantz. .Adanced Materials **23**, No.31, 35973602 (2011).
[6] Erkin Zakhidov, Mukhib Imomov, Vakhob Quvondikov, Sherzod Nematov, Ilkhom Tajibaev, Aziz Saparbaev, Irfan Ismail, Bilal Shahid, Renqiang Yang. Applied Physics A 125, 1-7 (2019).
[7] Jianhui Hou, Mi-Hyae Park, Shaoqing Zhang, Yan Yao, Li-Min Chen, Juo-Hao Li, and Yang Yang. Macromolecules **41**, No.16, 6012-6018 (2008).
[8] Ann Florini. Global Policy **2**, 40-50 (2011).
[9] Yuze Lin, Jiayu Vang, Chji-Guo Chjan, Huitao Bai, Yongfang Li, Daoben Chju, Syaowey Chjan. Advanced Materials **27**, No.7, 1170-1174 (2015).
[10] Jayashree Anand, Srinivasan Palaniappan, Dixit Narayanarao Sathyanarayana. Progress in Polymer Science **23**, No.6, 993-1018 (1998).
[11] C.W. Tang and A.C. Albrecht. The Journal of Chemical Physics **62**, No.6, 2139-2149 (1975).
[12] R.C. Coffin, J. Peet, J. Rogers, and G.C. Bazan. Nature Chemistry **1**, No.8, 657-661 (2009).
[13] L. Dou, J. You, J. Yang, C.C. Chen, Y. He, S. Murase, T. Moriarty, K. Emery, G. Li, Y. Yang, Nat. Photonics **6**, 180. 2012..
[14] W. Li, K.H. Hendriks, M.M. Wienk, and R.A. Janssen. Accounts of Chemical Research **49**, No.1, 78-85 (2016).
[15] M. Privado, H. Dahiya, P. de la Cruz, M.L. Keshtov, F. Langa, and G.D. Sharma. Journal of Materials Chemistry C **9**, No.45, 16272-16281 (2021).
[16] Jianhui Hou, Mi-Hyae Park, Shaoqing Zhang, Yan Yao, Li-Min Chen, Juo-Hao Li, and Yang Yang. Macromolecules 41, No.16, 6012-6018 (2008).
[17] Cheng-Yu Kuo, Wanyi Nie, Hsinhan Tsai, Hung-Ju Yen, Adytia D. Mohite, Gautam Gupta, Andrew M. Dattelbaum, Darrick J. William, Kitty C. Cha, Yang Yang, Leeyih Wang, and Hsing-Lin Wang. Macromolecules **47**, No.3, 1008-1020 (2014).
[18] N.S. Sariciftci, L. Smilowitz, A.J. Heeger, and F. Wudl. Science **258**, No.5087, 1474-1476 (1992).
[19] Ibrohim Oladayo Raji, Shuguang Ven, Yongxay Li, Da Huang, Xiaoyan Shi, Aziz Saparboev, Chuantao Gu, Chunming Yang, and Xichang Bao. ACS Applied Materials & Interfaces **13**, 36071-36079 (2021).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

[20] Dong Han, Shuguang Wen, Fuzhen Bi, Chenyu Shang, Xiqiang Ding, Aziz Saparbaev, Erkin Zakhidov, Vakhobjon Kuvondikov, Chunming Yang, Mingliang Sun. Chemical Engineering Journal **463**, 142400 (2023).
[21] Yixuan Luo, Xunchang Wang, Manxue Zhang, Xiaokang Sun, Aziz Saparbaev, Shiyun Lei, Jiayi Zhang, Biao Xiao, Chunming Yang, Zhitian Liu, Renqiang Yang. Solar RRL **6**, No.12, 2200679 (2022).
[22] M. Granström, K. Petritsch, A. Arias, A. Lux, M.R. Andersson, and R. Friend. Nature **395**, No.6699, 257-260 (1998).
[23] Xiaowei Zhan, Zhan'ao Tan, Benoit Domercq, Zesheng An, Xuan Zhang, Stephen Barlow, Yongfang Li, Daoben Zhu, Bernard Kippelen and Seth R. Marder. Journal of the American Chemical Society **129**, No.23, 7246-7247 (2007).
[24] R.A. Marsh, C.R. McNeill, A. Abrusci, A.R. Campbell, R.H. Friend. Nano Letters **8**, No.5, 1393-1398 (2008).
[25] Kristofer R. MakNeill, Jonatan JM Halls, Richard Uilson, Gregori L. Uayting, Stiven Berkebile, Maykl G. Ramsi, Richard H. Do'st, Neil C. Greenham. Advanced Functional Materials **18**, No.16, 2309-2321 (2008).
[26] He Yan, Zhihua Chen, Yan Zheng, Christopher Newman, Jordan R. Quinn, Florian Dötz, Marcel Kastler & Antonio Facchett. Nature **457**, No.7230, 679-686 (2009).
[27] Lei Zhu, Wenkai Zhong, Chaoqun Qiu, Bosai Lyu, Zichun Zhou, Ming Zhang, Jingnan Song, Jinqiu Xu, Jing Wang, Jazib Ali, Wei Feng, Zhiwen Shi, Xiaodan Gu, Lei Ying, Yongming Zhang, Feng Liu. Advanced Materials **31**, No.41, 1902899 (2019).
[28] F. Aldabbagh. Comprehensive heterocyclic chemistry IV. Ed: Elsevier (2022).
[29] E. Zakhidov, A. Kokhkharov, V. Kuvondikov, S. Nematov, R. Nusretov. Journal of the Korean Physical Society **67**, 1262-1267 (2015).
[30] C. Yan, R, Ma, G, Cai, T. Liu, J. Zhu, J. Wang, G. Li. EcoMat, **2**(4), (2020).
[31] Lingchen Kong, Zesheng Zhang, Ningjiu Chjao, Zekai Cai, Jianqi Zhang, Mei Luo, Xinkang Vang, Mingqing Chen, Vey Chjan, Lianjie Zhang, Zhixiang Vey, Junvu Chen. Advanced Energy Materials **13**, No.25, 2300763 (2023).

Полимер қуёш элементларини ясаш ва унинг асосий муаммолари

Э.А. Захидов[1], А.А. Сапарбаев[1,2]

[1]Ион плазма ва лазер тенологиялари институти, ЎзФА, Дўрмон йўли 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон
[2]Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон миллий университети, Университет 4, 100174, Тошкент, Ўзбекистон

Сўнгги бир неча йил ичида полимер қуёш элемент (ПҚЭ)ларнинг фотоволтаик кўрсаткичлари 19% дан ортиқ энергия ўзгартириш самарадорлиги (ЭЎС) билан тез ривожланишга эришди ва бу натижалар келажакда ПҚЭларни амалий қўллаш истиқболларини намойиш этади. Материал шуносликнинг ривожланиши, шу жумладан конжугатсияланган полимер донорлари, олигомерга ўхшаш органик молекулалар донорлари, фуллерен асосли ва фуллеренсиз полимер акцепторлар, бир компонентли ПҚЭлар ва сувда/спиртда эрувчан интерфейс (буфер қатлам) материаллари ПҚЭлар соҳасидаги асосий тадқиқот мавзуларидир. Шу сабабли бу мақолада ПҚЭлар учун ишлатилаётган материал турлари ҳақида маълумот бериб, уларнинг камчилиги ва ютуғи ҳақида таҳлил қиламиз.

Калит сўзлар: донор, акцептор, фуллерен, P3HT, ITIC, $PC_{61}BM$, $PC_{71}BM$.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.