ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ХИМИЯ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, 2020, том 495, с. 77–82

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 541.64.535.3

НОВЫЕ НЕРЕГУЛЯРНЫЕ ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫЕ ТЕРПОЛИМЕРЫ С ШИРОКИМИ СПЕКТРАМИ ПОГЛОЩЕНИЯ 300–1000 нм ДЛЯ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

© 2020 г. М. Л. Кештов[1,*], С. А. Куклин[1], Ю. Зоу (Y. Zou)[3], Академик РАН А. Р. Хохлов[1,2], И. О. Константинов[1], И. Е. Остапов[1,2], Е. Е. Махаева[2], Г. Д. Шарма (G. D. Sharma)[4]

Поступило 04.03.2020 г.
После доработки 15.10.2020 г.
Принято к публикации 17.11.2020 г.

Разработка сопряженных полимеров с широким спектром поглощения настоятельно необходима для достижения высокой эффективности в полимерных солнечных фотоэлементах (ПСФ), поскольку большинство из этих полимеров обычно абсорбируют только ограниченный диапазон солнечного спектра. Нерегулярные терполимеры, состоящие из трех блоков (одного электронно-донорного и двух электронно-акцепторных), являются многообещающими полимерами *p*-типа для ПСФ, поскольку включение третьего блока в полимерную основу обеспечивает синергетический эффект физических свойств, таких как абсорбционная способность, энергетические уровни, перенос заряда и фотовольтаические характеристики. С учетом этого нами разработаны и синтезированы нерегулярные терполимеры на основе двух разных хромофоров, характеризующихся комплементарными спектрами поглощения, в качестве со-акцепторных блоков в сопряженных сополимерах донорно-акцепторного типа (Д–А). Нерегулярные сополимеры демонстрируют как широкое поглощение, так и низкие уровни ВЗМО, благоприятствующие току короткого замыкания и напряжению холостого хода в ПСФ. Ожидается, что новые тройные сополимеры, состоящие из одного электронно-донорного звена и двух электронно-акцепторных фрагментов, внесут значительный вклад в разработку высокоэффективных ПСФ.

Ключевые слова: нерегулярный терполимер, спектр поглощения, солнечный фотоэлемент

DOI: 10.31857/S2686953520060175

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время эффективность фуллереновых полимерных солнечных фотоэлементов (ПСФ) с объемным гетеропереходом превышает 11% [1], демонстрируя их привлекательность для практического использования в недорогих фотовольтаических устройствах. Этот успех в эффективности в основном был достигнут за счет разработки Д–А узкозонных полимеров для расширения поглощения, и, как следствие, более эффективного использования солнечного света [3]. К сожалению, главная проблема по-прежнему заключается в недостаточном поглощении света донорно-акцепторными (Д–А) полимерами [4]. Для увеличения светопоглощения бинарных Д–А полимеров были предложены различные стратегии. В частности, были разработаны тандемные солнечные фотоэлементы с увеличенной шириной спектрального поглощения, обладающие высокой эффективностью порядка 17% [5]. Однако, по сравнению с однокаскадным устройством, изготовление тандемного устройства – чрезвычайно сложный процесс, что ограничивает его практическое применение. В качестве альтернативы сравнительно недавно предложены солнечные фотоэлементы с тройным активным слоем (состоящим из двух доноров и одного акцептора, или одного донора и двух акцепторов); их эффективность превышает более чем 15% и близка к эффективности аналогичных тандемных фотоэлементов, и в то же время по простоте технологии изготовления они близки к однокаскадным ПСФ [6]. С другой стороны, плохая воспроизводимость результатов, возникающая из-за слож-

[1] *Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
[3] *Колледж химии и химического машиностроения, Центральный Южный университет, Чанша, Китай*
[4] *Институт информационных технологий LNM, Физический факультет, Джамдоли, Джайпур, Индия*
**E-mail: keshtov@ineos.ac.ru*

Таблица 1. Выход, молекулярные веса и термические свойства полимеров **P1**–**P5**

Полимер (m : n)	Выход, %	M_n[а], кДа	M_w[б], кДа	M_w/M_n[в], (PDI)	$T_{5\%}$[г], °C
P1 (1 : 0)	82	17.1	27.0	1.58	410
P2 (3 : 1)	76	27.5	36.1	1.31	422
P2 (1 : 1)	71	19.4	28.3	1.46	428
P4 (1 : 3)	77	22.3	27.7	1.24	401
P5 (0 : 1)	84	22.7	31.0	1.37	341

[а] Среднечисловой молекулярный вес. [б] Средневесовой молекулярный вес. [в] M_w/M_n – полидисперсность полимеров. [г] Температура 5%-ной потери массы.

ности контроля морфологии, является узким местом для дальнейшей коммерциализации. Принимая во внимание вышеупомянутые факторы, многообещающим подходом является разработка нового терполимера путем сополимеризации более двух разных хромофоров с комплементарными диапазонами поглощения для расширения поглощения солнечного спектра [7]. Тройная сополимеризация – это простой и эффективный метод направленного влияния на оптические и электронные свойства сопряженных сополимеров. При соответствующем подборе структурных блоков, количества третьего компонента в основной цепи терполимера можно добиться желаемых абсорбционных свойств, энергии электронных уровней, хорошей молекулярной упаковки и растворимости, для терполимерных ПСФ; была достигнута эффективность в диапазоне 9–11% [8].

Нами разработана и синтезирована серия ранее не описанных нерегулярных тройных сополимеров BDT–DPP–BFCTP типа Д–А1–Д–А2 на основе одного электронно-донорного бензодитиофенового (BDT) блока и двух электронно-акцепторных единиц – дикетопирролопиррола (DPP) и бис-[6-фтор-9-(2-октилдодецил)9*H*-карбазол-3-ил]-3,3'-[5,7-ди(5-бромотиенил-2)-тиено[3,4-*b*]пиразина (BFCTP) (схема 1). В настоящее время BDT широко используется в качестве эффективного электронно-донорного структурного блока, поскольку имеет плоскую симметричную сопряженную структуру [9]. Кроме того, DPP также успешно применяется в качестве акцептора для высокоэффективных ПСФ большинство Д–А-сополимеров на основе DPP обладают сильным светопоглощением далее 900 нм благодаря внутримолекулярному переносу заряда от донорных фрагментов к акцепторным, а также более слабым поглощением в области 300–600 нм [9]. Фторсодержащий структурный блок BFCTP интересен благодаря возможности контроля уровней энергии сопряженных Д–А-сополимеров. Ожидается, что при введении BFCTP сегмента в бинарный полимер BDT–DPP подвижность заряда, а также фотовольтаические характеристики ПСФ, будут улучшены. Основные полосы поглощения сополимеров BDT–DPP часто располагаются в области 600–900 нм [9], тогда как бинарный сополимер (BDT–BFCTP) поглощает в области 350–550 и 600–1000 нм [10]. Таким образом, меняя соотношение DPP : BFCTP в терполимере, можно направленно влиять на абсорбционные свойства и энергетические уровни макромолекул для обеспечения широкого поглощения и подходящих ВЗМО/НСМО уровней. Для улучшения оптоэлектронных свойств бинарных полимеров **P1** и **P5** нами синтезированы три новых тройных сополимера на основе одного электронно-донорного блока BDT и двух электронно-акцепторных единиц – DPP и BFCTP, – имеющих широкие спектры поглощения в области 300–1000 нм. Улучшение способности тройных сополимеров поглощать свет демонстрирует большие возможности для увеличения фототока, а сами терполимеры могут быть использованы в качестве активного слоя в фуллереновых и нефуллереновых ПСФ. Для выявления композиционной зависимости КПД были систематически исследованы оптические, электрохимические и структурные свойства таких нерегулярных терполимеров с различным соотношением DPP : BFCTP.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мономеры 5,8-бис(триметилстаннил)-2-додецилбензо[1,2-*b*:3,4-*b*':6,5-*b*''] тритиофен **M1** [9], 3,6-бис(5-бромтиофен-2-ил)-2,5-бис(2-этилгексил)-пирроло[3,4-*c*]пиррол-1,4(2*H*,5*H*)-дион **M2** [10] и 2,3-бис[6-фтор-9-(2-октилдодецил)-9*H*-карбазол-3-ил]-3,3'-[5,7-ди(5-бромтиенил-2)тиено[3,4-*b*]- пиразин **M3** [11] синтезированы в соответствии с опубликованными методиками. Сополимеризацией двух акцепторных **M2** (DPP), **M3** (BFCTP) и одного донорного **M1** (BDT) мономеров реакцией кросс-сочетания Стилле в присутствии $Pd(PPh_3)_4$ в качестве катализатора синтезировали ряд тройных сополимеров **P1**–**P5** по схеме 1 с высокими выходами в пределах 71–84% (табл. 1).

Два исходных биполимера **P1**, **P5** и три нерегулярных терполимера **P2**, **P3**, **P4** были получены с использованием различных мольных соотношений **M1** : **M2** : **M3** (1 : 1 : 0; 1 : 0.75 : 0.25; 1 : 0.50 : : 0.50; 1 : 0.25 : 0.75; 1 : 0 : 1). Полимеры очищали в аппарате Сокслета, подвергая последовательно экстрагированию метанолом, гексаном и хлороформом. Все полимеры умеренно растворимы в обычных органических растворителях, таких как хлороформ, хлорбензол и *o*-дихлорбензол. Состав и строение полимеров доказаны с помощью элементного анализа и спектроскопии ^{1}H ЯМР. Результаты элементного анализа полимеров хорошо согласуются с теоретическими значениями, под-

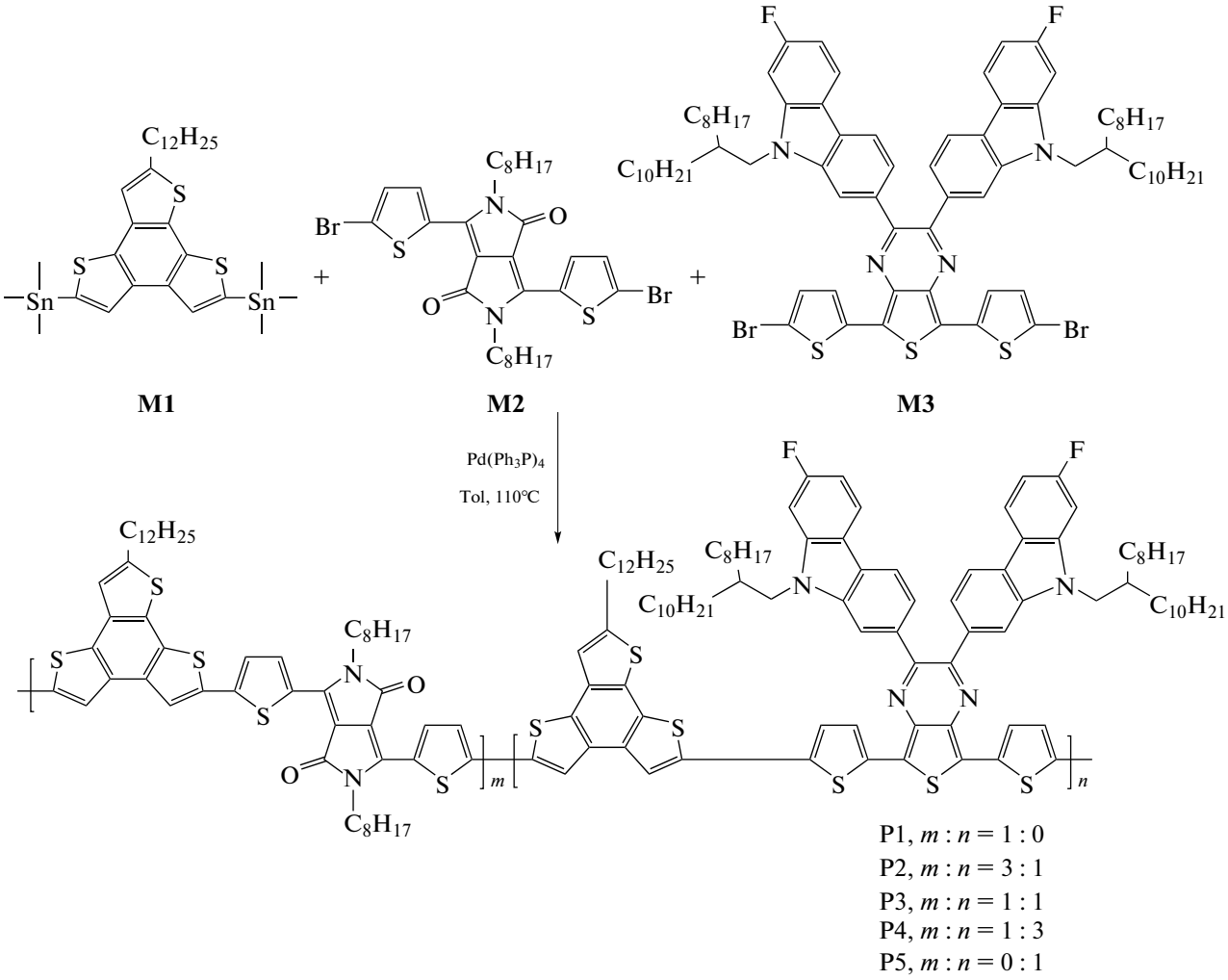

Схема 1. Схема получения полимеров **P1**–**P5**.

тверждая, что сополимеризация прошла успешно и синтезированные полимеры соответствуют предложенным молекулярным структурам.

Средневесовые (M_w) и среднечисловые (M_n) молекулярные массы сополимеров были определены с помощью гельпроникающей хроматографии (ГПХ) с использованием полистирольных стандартов и *о*-дихлобензола в качестве элюента при 50°C. Величины M_w и M_n варьировались в диапазоне 27.0–36.1 и 17.1–27.5 кДа соответственно с относительно низким индексом полидисперсности (PDI), равным 1.24–1.58. Все пять полимеров имеют близкие молекулярные массы, которые гарантируют сопоставимость их характеристик (табл. 1).

Термические свойства полимеров **P1**–**P5** были исследованы с помощью термогравиметрического анализа (ТГА). Как видно из рис. 1, все полимеры демонстрируют высокую термическую стабильность с температурой начала разложения на воздухе (5%-ная потеря веса), превышающей 340°C, что важно для применения в ПСФ и других оптоэлектронных устройствах.

Оптические свойства полимеров в растворе хлороформа и пленках показаны на рис. 2, а соответствующие данные приведены в табл. 2. На спектре поглощения раствора бинарного сополимера **P1** присутствует интенсивная полоса поглощения при 600–900 нм. На спектре другого бинарного сополимера **P5** присутствуют полосы поглощения в области 300–600 и 600–1000 нм. Что касается нерегулярных терполимеров **P2**–**P4**, то относительное положение и интенсивности полос поглощения меняются в зависимости от соотношения акцепторов DPP : BFCTP.

Увеличение количества BFCTP приводит к появлению новой полосы поглощения в области 300–600 нм, характерной для π-π*-перехода внутри ароматических гетероциклов. В то же время интенсивность полосы поглощения в области 600–900 нм, соответствующей переносу заряда между фрагментами BDT к DPP, постепенно уменьшается с увеличением содержания BFCTP.

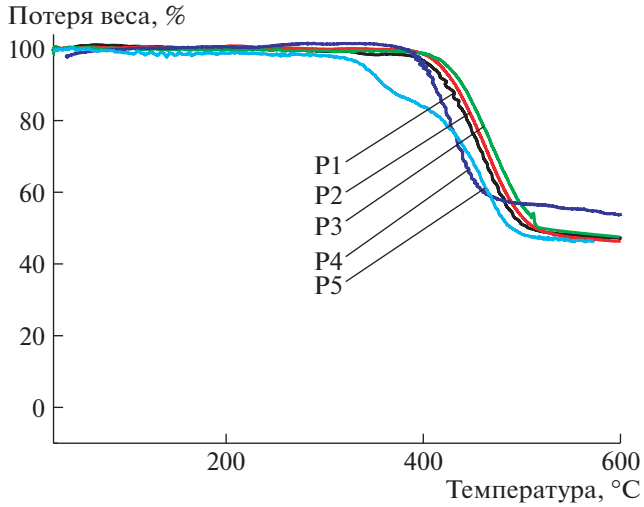

Рис. 1. Кривые ТГА полимеров **P1**–**P5** при скорости нагревания 20°C мин$^{-1}$.

В твердом состоянии максимумы поглощения всех полимерных пленок сдвинуты в красную область по сравнению с раствором, что объясняется агрегацией полимерных цепей. Значения оптической ширины запрещенной зоны $E_g^{опт}$ полимеров **P1**–**P5**, определенные по краю спектров поглощения $\lambda_{кр}$ согласно уравнению $E_g^{опт} = 1240/\lambda_{кр}$, равны 1.32, 1.29, 1.27, 1.28 и 1.24 эВ соответственно. Более широкое и интенсивное поглощение нерегулярных терполимеров **P2**–**P4**, по сравнению с исходными бинарными полимерами **P1** и **P5**, указывает на то, что включение двух различных акцепторных единиц с различной электронно-акцепторной способностью в основную цепь является эффективным подходом расширения полосы поглощения и контроля ширины запрещенной зоны полимеров.

Электрохимические свойства полимеров были исследованы с помощью циклической вольтамметрии (ЦВА). Все ЦВА измерения были проведены в 0.1 М безводном ацетонитрильном растворе Bu_4NPF_6 при сканировании со скоростью 100 мВ с$^{-1}$. В качестве электрода сравнения использовался Ag/AgCl, в роли внутреннего стандарта – ферроцен, окислительно-восстановительный потенциал которого F_c/F_c^+ составлял 0.36 В. Уровни энергии HOMO полимеров оценивали по потенциалам начала окисления, найденным из вольтамперограмм (рис. 3).

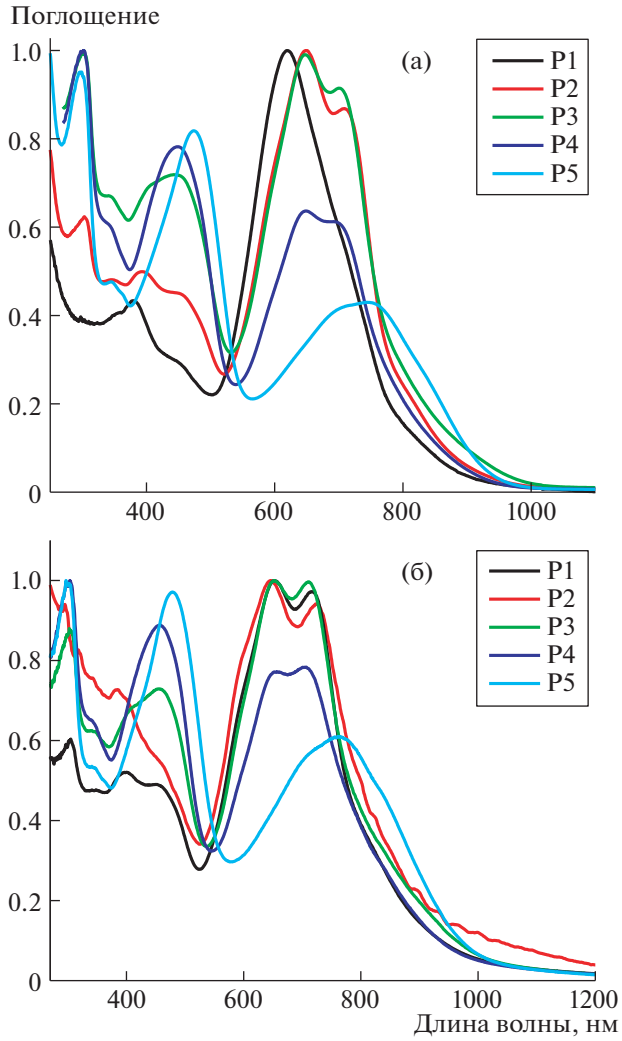

Рис. 2. Нормализованные спектры поглощения полимеров **P1**–**P5** в хлороформе (1 × 10^{-5} М) (а) и в тонких пленках (б).

Таблица 2. Оптические и электрохимические свойства полимеров **P1**–**P5**

Полимер	$\lambda_{мак}$ (р-р)[а], нм	$\lambda_{мак}$ (пленки)[б], нм	E_{HOMO}, эВ	E_{LUMO}[в], эВ	$E_g^{опт}$ [г], эВ
P1	303, 379, 621	304, 397, 652,714	5.21	3.89	1.32
P2	301, 390, 647, 708	301, 386, 648,723	5.16	3.86	1.29
P3	300, 445, 650, 701	304, 458, 650,712	5.14	3.87	1.27
P4	300, 452, 646, 693	301, 456, 853, 712	5.13	3.85	1.28
P5	298, 475, 746	303, 477, 462	5.11	3.87	1.24

[а] В растворе хлороформа (1 × 10^{-5} М). [б] Пленки, полученные методом спин-коутинга из хлороформа. [в] $E_{LUMO} = E_{HOMO} - E_g^{опт}$. [г] $E_g^{опт} = 1240/\lambda_{кр}$.

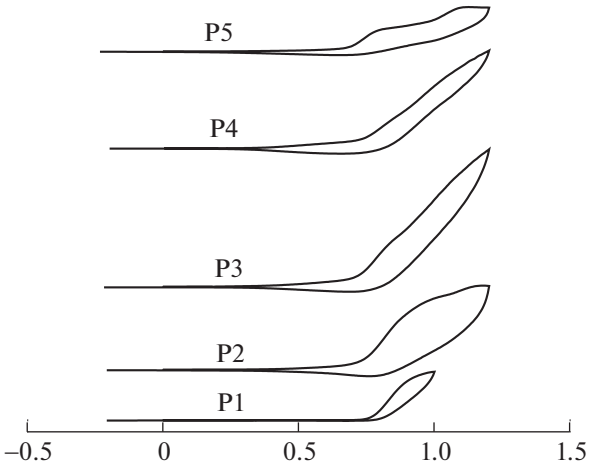

Рис. 3. Циклические вольтаммограмы полимеров **P1**–**P5** при скорости сканирования 100 мВ $с^{-1}$.

Энергии ВЗМО/НСМО полимеров определяли согласно уравнениям: $E_{ВЗМО} = -(E_{ок}^{нач} + 4.4)$ (эВ) и $E_{НСМО} = E_{ВЗМО} + E_g^{опт}$ соответственно, где $E_g^{опт}$ – оптическая ширина запрещенной зоны полимеров (табл. 2). Величины $E_{ВЗМО}$ полимеров **P1**–**P5** состава **M1** : **M2** : **M3** = 1 : 1 : 0; 1 : 0.75 : 0.25; 1 : : 0.5 : 0.5; 1 : 0.25 : 0.75 и 1 : 0 : 1 соответственно, вычисленные в соответствии с вышеприведенным уравнением в зависимости от соотношения DPP : BFCTP, составляют –5.21, –5.16, –5.14, –5.13 и –5.11 эВ соответственно, а величины $E_{НСМО}$ для всех полимеров близки к –3.87 эВ (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что энергия ВЗМО полимеров варьируются в зависимости от соотношения фрагментов DPP : BFCTP с различными электронно-акцепторными способностями в макромолекулах, что влияет на эффективность внутримолекулярного переноса заряда. Замечено, что с увеличением содержания BFCTP акцептора, энергии НСМО остаются неизменными, в то время как энергии ВЗМО монотонно увеличиваются, тем самым уменьшая ширину запрещенной зоны полимеров. Эти результаты дополнительно демонстрируют, что тройная сополимеризация является эффективным подходом для получения сопряженных полимеров с точно заданными величинами энергии ВЗМО, НСМО и ширины запрещенной зоны. Как видно из табл. 2, энергии НСМО сополимеров **P1**–**P5** расположены в пределах от –3.85 до –3.87 эВ и значительно выше, чем для производного фуллерена – [6,6]-фенил-C_{71}-метилового эфира масляной кислоты ($PC_{71}BM$), – энергия НСМО которого равна –4.2 эВ [12]; это благоприятствует эффективной диссоциации экситонов, образующихся при поглощении света полимерами в соответствующих устройствах.

ВЫВОДЫ

В условиях реакции кросс-сочетания Стилле разработана и синтезирована серия новых нерегулярных терполимеров типа Д–А1–Д–А2 (**P2**–**P4**) на основе одного донорного (BDT) и двух электронно-акцепторных фрагментов (DPP и BFCTP), взятых в различных молярных соотношениях DPP : BFCTP. Для сравнения также синтезированы два бинарных родительских Д–А полимера **P1** P(BTT–DPP) и **P5** P(BTT–BFCTP). Все пять полимеров имеют высокие и достаточно близкие молекулярные массы (M_n) в пределах 17.1–27.5 кДа с узкой полидисперсностью, равной 1.24–1.58 (PDI), что гарантирует сопоставимость их характеристик. Все сополимеры обладают высокой термической стабильностью с 5%-ной потерей массы в интервале 341–410°C, что позволит успешно использовать их в фотовольтаических исследованиях. Фотофизические и электрохимические свойства терполимеров оптимизированы путем регулирования и контроля мольных соотношений акцепторных блоков DPP и BFCTP, поскольку последние обладают совершенно разными абсорбционными и энергетическими характеристиками. По сравнению с контрольными бинарными сополимерами **P1** и **P5**, нерегулярные терполимеры **P2**–**P4** показывают повышенную интенсивность поглощения в широком диапазоне от 400 до 650 нм как в растворе, так и в пленке, а также в смесях полимер–$PC_{71}BM$. При увеличении мольного содержания BFCTP диапазон поглощения расширяется в длинноволновую область с более узкой запрещенной зоной. С ростом содержания DPP фрагментов в цепи терполимеры демонстрируют более низколежащие уровни ВЗМО, что благоприятствует напряжению холостого хода, и, как следствие, эффективности в ПСФ. Полученные результаты демонстрируют, что тройная сополимеризация является эффективным подходом для дизайна и синтеза сопряженных полимеров с заданными оптическими и энергетическими свойствами, а синтезированные нами терполимеры могут быть использованы в качестве эффективных донорных материалов в фуллереновых и нефуллереновых ПСФ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Регистрация спектров ЯМР, элементный анализ проведены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием научного оборудования Центра исследования строения молекул ИНЭОС РАН.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-53-80066, № 18-29-23004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *He Z., Xiao B., Liu F., Wu H., Yang Y., Xiao S., Wang C., Russell T.P., Cao Y.* Single junction polymer solar cells with high efficiency and photovoltiage // Nat. Photonics. 2015 V. 9. P. 174–179. https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.6
2. *Yuan J., Zhang Y., Zhou L., Zhang G., Yip H.-L., Lau T.-K., Lu X., Zhu C., Peng H., Johnson P.A., Leclerc M., Cao Y., Ulanski J., Li Y., Zou Y.* Single-junction organic solar cell with over 15% efficiency using fused-ring acceptor with electron-deficient core // Joule. 2019. V. 3. № 4. P. 1140–1151. https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.01.004
3. *Liu D., Yang B., Jang B., Xu B., Zhang S., He C., Woo H.Y., Hou J.* Molecular design of a wide-band-gap conjugated polymer for efficient fullerene-free polymer solar cells // Energy Environ. Sci. 2017. V. 10. P. 546–551. https://doi.org/10.1039/C6EE03489F
4. *Dang D., Chen W., Himmelberger S., Tao Q., Lundin A., Yang R., Zhu W., Salleo A., Müller C., Wang E.* Enhanced photovoltaic performance of indacenodithiophene-quinoxaline copolymers by side chain modulation // Adv. Energy Mater. 2014. V. 4. 1400680. https://doi.org/10.1002/aenm.201400680
5. *Meng L., Zhang Y., Wan X., Li C., Zhang X., Wang Y., Ke X., Xiao Z., Ding L., Xia R., Yip H., Cao Y., Chen Y.* Organic and solution-processed tandem solar cells with17.3% efficiency // Science. 2018. V. 361. P. 1094–1098. https://doi.org/10.1126/science.aat2612
6. *Liu T., Luo Z., Chen Y., Yang T., Xiao Y., Zhang G., Ma R., Lu X., Zhan C., Zhang M., Yang C., Li Y., Yao J., Yan H.* A nonfullerene acceptor with 1000 nm absorption edge enables ternary organic solar cells with improved optical and morphological properties and efficiencies over 15% // Energy Environ. Sci. 2019. V. 12. P. 2529–2536. https://doi.org/10.1039/c9ee01030k
7. *Luo H., Liu Z., Zhang D.* Conjugated D-A terpoymers for organic field-effect transistors and solar cells // Polym. J. 2018. V. 50. P. 21–31. https://doi.org/10.1038/pj.2017.53
8. *Huo L., Xue X., Liu T., Xiong W., Qi F., Fan B., Xie D., Liu F., Yang C., Sun Y.* Subtle side chain engineering of random terpolymers for high-performance organic solar cells // Chem. Mater. 2018. V. 30. P. 3294–3300. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00510
9. *Nielson C.B., Fraser J.M., Schroeder B.C., Du J., White A.J., Zhang W., McCulloch I.* Benzotriphiophene – planar electron rich building block for organic semiconductors // Org. Lett. 201. V. 13. P. 2414–2417. https://doi.org/10.1021/ol200643z
10. *Yi Z., Wang S., Liu Y.* Design of high-mobility diketopyrrolopyrrole-based π-conjugated copolymers for organic thin-film transistors // Adv. Mater. 2015. V. 27. P. 3589–3606. https://doi.org/10.1002/adma.201500401
11. *Kuklin C.A., Konstantinov I.O., Peregudov A.S., Ostapov I.E., Makhaeva E.E., Khokhlov A.R., Keshtov M.L.* Bis[1,3]thiazolo[4,5-*f*:5',4'-*h*]thieno[3,4-*b*] quinoxaline derivatives as new building blocks of polymers for organic electronics, Dokl. Chem. 2018. V. 482. P. 207–211. https://doi.org/10.1134/S0012500818090070
12. *Kini G.P., Hoang Q.V., Song Ch.E., Lee S.K., Shin W.S., So W.-W., Uddin M.A., Woo H.Y., Lee J.-Ch.* Thiophene-benzothiadiazole based D–A_1–D–A_2 type alternating copolymers for polymer solar cells // Polym. Chem. 2017. V. 8. P. 3622–3631. https://doi.org/10.1039/C7PY00696A

NEW DONOR-ACCEPTOR RANDOM TERPOLYMERS WITH WIDE ABSORPTION SPECTRA OF 300–1000 nm FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

M. L. Keshtov[a,#], S. A. Kuklin[a], Y. Zou[c], Academician of the RAS A. R. Khokhlov[a,b], I. O. Konstantinov[a], I. E. Ostapov[a,b], E. E. Makhaeva[b], and G. D. Sharma[d]

[a] *A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Physics of Polymers and Crystals, Moscow, Russian Federation*

[c] *College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha, P.R. China*

[d] *Department of Physics, The LNM Institute for Information Technology, Jamdoli, Jaipur, India*

[#] *E-mail: keshtov@ineos.ac.ru*

The development of conjugated polymers with broad absorption spectra is imperative to achieve high efficiency in polymer solar cells (PSCs), since most of these polymers usually absorb only a limited range of the solar spectrum. Irregular terpolymers consisting of three blocks (one electron-donor and two electron-acceptor) are promising *p*-type polymers for PSCs, since the inclusion of a third block in the polymer macromolecules provides a good effect of physical properties such as absorption capacity, charge transfer, HOMO/LUMO energy levels and photovoltaic characteristics. In this regard, we have developed and synthesized irregular terpolymers consisting of two different chromophores (DPP and BFCTP) with complementary absorption spectra as co-acceptor blocks. Irregular copolymers exhibit both broad absorption and low HOMO levels. It is expected that new ternary copolymers consisting of one electron-donor unit and two electron-acceptor fragments will make a significant contribution to the development of highly efficient PSCs.

Keywords: random terpolymer, absorption spectrum, solar cell