

Статья по полимерным солнечным ячейкам

Абстракт

Значительная часть стоимости солнечных панелей приходится на фотоактивные материалы и сложные, энергоемкие технологии обработки. Недавно было показано, что неорганические компоненты могут быть заменены полупроводниковыми полимерами, способными достигать достаточно высокой эффективности преобразования энергии. Эти полимеры недороги в синтезе и могут быть обработаны раствором методом от рулона к рулону с высокой производительностью. Изначально плохие свойства полимера, такие как низкая длина диффузии экситонов и низкая подвижность, могут быть преодолены с помощью наноразмерной морфологии. Мы обсуждаем солнечные элементы на основе полимеров, уделяя особое внимание дизайну устройства и потенциальным улучшениям.

Введение

Сопряженные полимеры являются отличными кандидатами для использования в недорогой электронике и фотовольтаике (PV)¹. Согласно последним отчетам, солнечные элементы на основе полимеров достигли эффективности преобразования энергии в 5%. Нанесение органических веществ с помощью трафаретной печати, лазерной резки, струйной печати и напыления возможно, поскольку эти материалы можно сделать растворимыми. Эти технологии необходимы для высокопроизводительной рулонной обработки, которая снизит стоимость фотоэлектрических систем на основе полимеров до такой степени, что они смогут конкурировать с текущим электроснабжением. Кроме того, все эти методы осаждения выполняются при низкой температуре, что позволяет изготавливать устройства на пластиковых подложках для гибких устройств. В дополнение к экономичности, присущей высокопроизводительному производству, малый вес и

гибкость - это качества, которые, как утверждается, обеспечивают снижение цены фотоэлектрических панелей за счет снижения затрат на монтаж. Гибкие фотоэлектрические системы также открывают новые ниши на рынках, таких как портативная генерация электроэнергии и эстетичные фотоэлектрические системы в дизайне зданий.

Мы рассматриваем современные технологии изготовления эффективных фотоэлектрических устройств на основе полимеров. Мы обсуждаем основные принципы работы устройства, требования к материалам и текущие технические проблемы при создании более эффективных солнечных элементов. Мы надеемся, что эта статья послужит руководством для новых исследователей в этой области, которые планируют разработать более совершенные системы материалов и оптимизировать устройства, чтобы повысить эффективность преобразования органической фотоэлектрической энергии выше 10%.

Проблемы с эксплуатацией устройства и материалами

На рис. 1 показаны примеры распространенных материалов, используемых в современных фотоэлементах на основе полимеров. Эти и другие сопряженные молекулы являются электронно активными из-за их сильно поляризуемых π -систем, которые представляют собой гибридизованные орбитали, основанные на составляющих р атомных орбиталях. $\pi-\pi^*$ оптические переходы являются сильными (коэффициенты поглощения больше $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$), обычно падают в видимой области и могут быть настроены синтетически с помощью молекулярного дизайна. Подвижность носителей заряда обычно находится в диапазоне 10^{-7} - $10^{-3} \text{ см}^2/\text{В.с}$ при измерении в условиях, имеющих отношение к работе солнечных элементов.

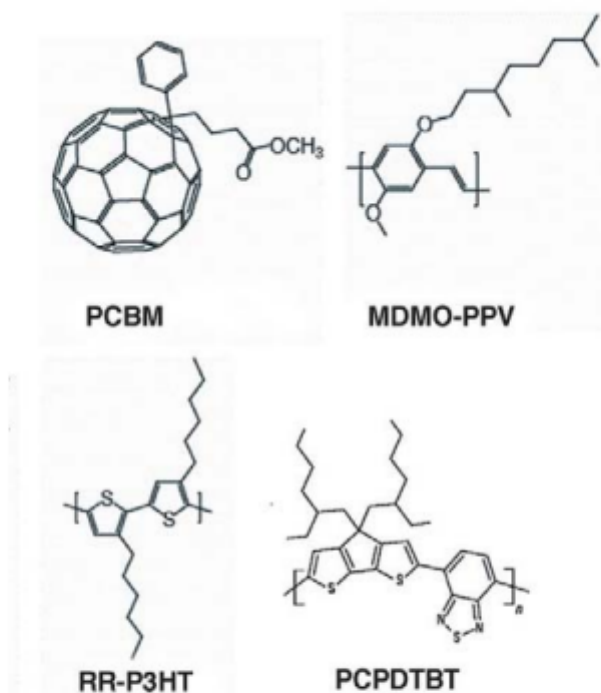


Fig. 1 Common materials used in polymer photovoltaics. From left to right, PCBM: (6,6)-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester; MDMO-PPV: poly(2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylene-vinylene); RR-P3HT: regioregular poly(3-hexylthiophene); PCPDTBT: poly[2,6-(4,4-bis-(2-ethylhexyl)-4H-cyclopenta[2,1-b;3,4-b']-dithiophene)-alt-4,7-(2,1,3-benzothiadiazole)].

Для достижения эффективности преобразования энергии в 5% исследователям пришлось разработать новые архитектуры устройств (рис. 2) для решения проблем, присущих использованию полимерных полупроводников. Во всех этих архитектурах между поглощением фотонов и выработкой электроэнергии проходит множество этапов, и все они должны быть эффективными, чтобы создать эффективное устройство.

При поглощении фотона электрон возбуждается с самой высокой занятой молекулярной орбитали (HOMO) на самую низкую незанятую молекулярную орбиталь (LUMO). Эта электронно-дырочная пара затем расслабляется с энергией связи между 0,1–1,4 эВ и известна как экситон^{7–9}. Это в отличие от неорганических материалов, где энергия связи экситонов составляет всего несколько миллиэлектронвольт. Энергия связи в органических полупроводниках больше, поскольку волновые функции электронов и дырок локализованы, а диэлектрические постоянные низкие ($\epsilon \sim 3-4$), что усиливает кулоновское притяжение

между электроном и дыркой. Связанные экситоны должны мигрировать к границе раздела, где имеется достаточное падение химической потенциальной энергии, чтобы вызвать диссоциацию в электронно-дырочную пару, которая охватывает границу раздела между донором (материал с низким сродством к электрону) и акцептором (материал с высоким сродством к электрону) (рис. 2a). Простейшим устройством, способствующим разделению экситонов, является планарный гетеропереход (рис. 2b), зажатый между прозрачным проводником, таким как оксид индия-олова (ITO), покрытый поли (3,4-этилендиокситиофен): поли (сульфанат стирола) (PEDOT:PSS) или фторированным оксидом олова (FTO), и отражающим металлом (обычно Al или Ag)¹⁰. Зарядовая пара, образовавшаяся после диссоциации экситона, геминатная пара, часто все еще кулоновски связана и должна быть диссоциирована внутренним полем ¹¹⁻¹⁵.

После диссоциации каждый носитель заряда должен быть транспортирован через устройство к соответствующему контакту, избегая при этом ловушек и рекомбинации. Эти заряды переносятся главным образом за счет дрейфа, вызванного встроенным полем, хотя диффузия может играть большую роль. Ток, который достигает контактов без приложенного поля, известен как ток короткого замыкания, J_{sc} , а максимальный потенциал, генерируемый устройством, известен как напряжение разомкнутой цепи, V_{oc} . Конечно, чтобы ток работал, он должен генерироваться с некоторым потенциалом. Соотношение между максимальной генерируемой мощностью и произведением J_{sc} и V_{oc} известно как коэффициент заполнения и связано с качеством устройства.

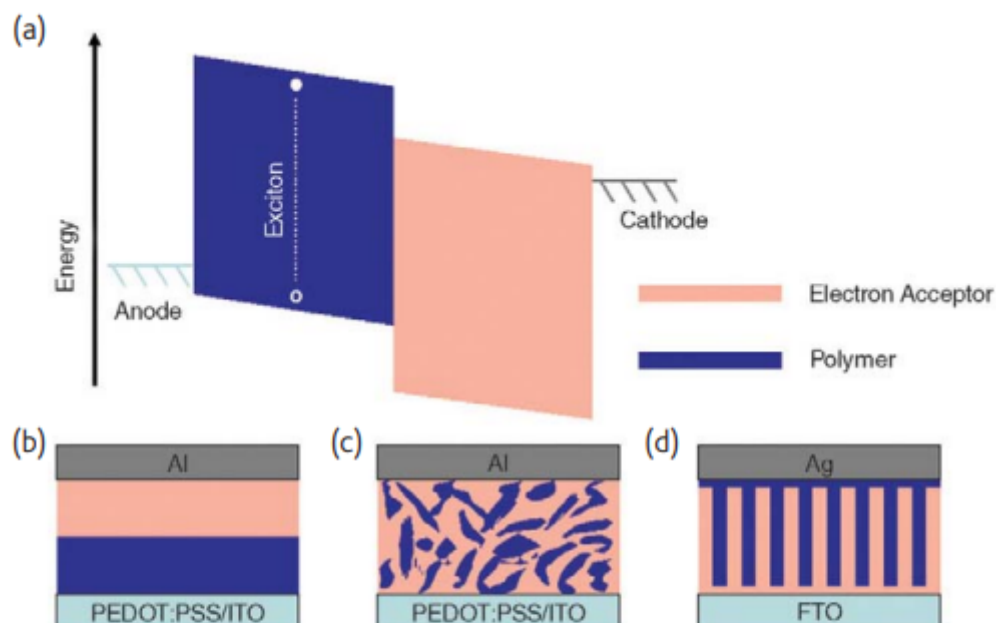


Fig. 2 Polymeric solar cell heterojunctions. (a) Energy diagram of a heterojunction with an exciton in the polymer phase. The first heterojunction was a bilayer (b), but this architecture is limited as the active layer must be thin in order to utilize all excitons. In order to have every exciton separated, a heterojunction must exist within an exciton diffusion length. This can be achieved in a bulk heterojunction (c) or in an ordered heterojunction (d).

Эффективность устройства планарного гетероперехода ограничена длиной диффузии экситонов. Это расстояние, которое преодолевают экситоны перед рекомбинацией, и составляет $\sim 3-10$ нм в большинстве органических полупроводников^{16–18}. Экситоны, образовавшиеся в месте, более удаленном от гетероперехода, чем длина диффузии экситонов, имеют меньшую вероятность быть собранными. Таким образом, активный объем солнечного элемента этого типа ограничен очень тонкой областью вблизи границы раздела, чего недостаточно для поглощения большей части потока солнечного излучения. Чтобы преодолеть это ограничение, исследователи перешли к наноструктурированию материалов таким образом, чтобы размер домена был порядка удвоенной длины диффузии.

Объемный гетеропереход (BHJ) (рис. 2c) является наиболее успешной архитектурой устройства для полимерной фотовольтаики, поскольку сбор экситонов достигается почти идеально за счет создания сильно свернутой архитектуры, так что все экситоны образуются вблизи гетероперехода. BHJ образуются путем спинового литья полимера и

акцептора электронов из обычного растворителя. Обычными акцепторами, используемыми в полимерных ВНЈ, являются фуллерены 2-6, 19-27, полимеры 28-31 и неорганические наночастицы n-типа 32-36. Основная часть литературы посвящена смесям rr-P3HT или MDMO-PPV и производного C60, PCBM, и эти системы будут подробно рассмотрены.

Другая важная полимерная фотоэлектрическая технология связана с заменой ПХБМ мезоструктурированным неорганическим полупроводником n-типа (рис. 2d). Наиболее успешные органические / неорганические гибридные элементы используют прозрачные оксиды металлов, такие как TiO₂ или ZnO, в качестве полупроводников n-типа из-за их высокой подвижности электронов, прозрачности и простоты обработки.

Все упомянутые выше механизмы предъявляют строгие требования к материалам и архитектуре эффективных полимерных фотоэлектрических систем:

1. Размеры доменов донора и акцептора должны быть малы по сравнению с расстоянием, на которое мигрируют экситоны, чтобы обеспечить эффективный сбор экситонов до естественного распада экситонов. Это часто составляет <10 нм и является причиной необходимости архитектуры ВНЈ;
2. Падение электрохимического потенциала на границе раздела донор-акцептор должно быть достаточным для диссоциации экситонов. Это все еще плохо изучено, но расщепление экситонов было замечено с падениями на границе раздела донор-акцептор до 0,3 эВ;
3. Поскольку геминатная пара должна быть расщеплена перед обратным переносом электрона от акцептора к донору, скорость переноса носителей должна быть высокой по сравнению со скоростью обратного переноса. Несмотря на то, что была проделана небольшая работа по изменению скорости межфазной обратной передачи, скорость скачкообразного перемещения пропорциональна подвижности носителей. Простые расчеты показывают, что для эффективного разделения гемината подвижность должна составлять 10⁻⁴ см²/В.с или выше³⁷. Этот процесс также накладывает геометрические ограничения. Сильно

свернутая, неупорядоченная геометрия должна приводить к снижению вероятности разделения геминатных пар. Следовательно, упорядоченные наноструктуры идеально подходят для расщепления геминатных пар;

4. Подвижность электронов и дырок должна быть достаточно высокой ($> 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В.с}$) и/или сбалансированной, чтобы предотвратить накопление пространственного заряда, который может препятствовать дальнейшему извлечению носителей заряда³⁷;
5. Подвижность должна быть высокой достаточный для извлечения носителей по мере их прохождения через устройство, прежде чем они подвергнутся рекомбинации, но не настолько высокий, чтобы диффузионный темновой ток ограничивал Лос. В то время как все еще изучается, подвижность 10^{-4} - $10^{-2} \text{ см}^2 / \text{В.с}$, вероятно, является оптимальной для устройств толщиной 200-500 нм. Более высокая мобильность потребует изменений в конструкции устройства для минимизации темнового тока.

Эти ограничения необходимы для обеспечения высокой эффективности преобразования фотонов в электроны при низкой зависимости от напряжения (что приводит к высоким коэффициентам заполнения). Высокие фототоки требуют поглощения света во всем солнечном спектре, и это привело к разработке некоторых полимеров с низкой запрещенной зоной, о чем будет рассказано ниже. Самые высокие фототоки, достигаемые при освещении одним солнцем в полимерных фотоэлектрических элементах, по-прежнему составляют всего $\sim 15 \text{ мА} / \text{см}^2$, по сравнению с более чем $40 \text{ мА} / \text{см}^2$ для однокристаллических элементов Si, что оставляет много возможностей для прогресса. Наконец, минимизация потерь химического потенциала в вышеуказанных процессах необходима для максимального увеличения содержания Лос. В солнечных элементах P3HT:PCBM поглощаются фотоны с энергией 1,9 эВ, но обычно измеряется Лос всего 0,6 В. Остальные 1,3 эВ теряются. Удвоение эффективности должно быть легко достижимо путем простого снижения этого энергопотребления до необходимого минимума.

Объемный гетеропереход

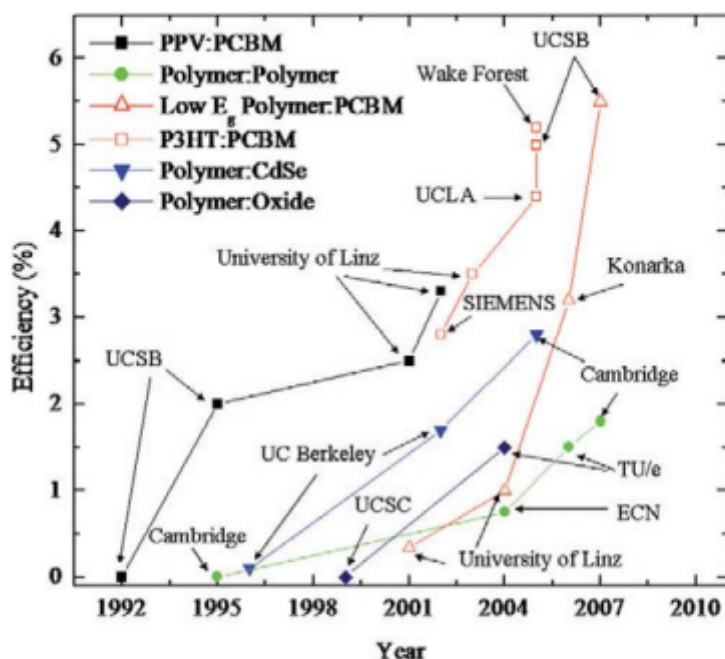


Fig. 3 Reported efficiencies of various BHJ technologies over time. The references in chronological order are: PPV:PCBM^{19–22}, polymer:polymer^{28–31}, polymer:CdSe^{32–34}, polymer:oxide^{35,36}, low E_g polymer:PCBM^{6,23,25}, and P3HT:PCBM^{2–5,26,27}. The abbreviations are: University of California, Santa Barbara (UCSB); University of California, Santa Cruz (UCSC); University of California, Berkeley (UC Berkeley); University of California, Los Angeles (UCLA); Technische Universiteit Eindhoven (TU/e).

На рис. 3 показано, как повысилась эффективность схем ВНН за последние 15 лет. Большинство из этих заявленных показателей эффективности остаются не подтвержденными Национальной лабораторией возобновляемых источников энергии (NREL), но некоторые из них были подтверждены несколькими группами. Ключом к созданию эффективных солнечных элементов из полимерной смеси является обеспечение того, чтобы два материала смешивались в масштабе длины, меньшем, чем длина диффузии экситонов. Это означает, что каждый экситон, образовавшийся в полимере, может достичь границы раздела с акцептором электронов, чтобы подвергнуться переносу заряда. Морфология пленки также должна обеспечивать перенос носителей заряда в двух разных фазах таким образом, чтобы заряды могли достигать контактов и извлекаться. Мы обсуждаем важные инновации, связанные с ВНН на основе ПХДМ. Хотя это относится только к фотоэлектрическим устройствам на основе ПХДМ, последствия являются общими для всех ВНН.

В оригинальных BHJS, содержащих ПХБМ, в качестве донора электронов использовались полифениленвинилены (PPV). В смесях PPV:PCBM выбор растворителя и соотношения компонентов сильно влияет на производительность солнечных элементов^{21,38,39}. Когда в качестве обычного растворителя используется толуол, ПХБМ образует домены размером более 100 нм. Это фактически мертвые зоны в солнечном элементе, поскольку они не вносят вклада в фототок^{38,39}. Разделение фаз становится более тонким за счет перехода на хлорбензол, хороший растворитель как для PPV, так и для PCBM²¹. Еще одна проблема с системой PPV заключается в том, что подвижность дырок в PPV в десять раз ниже, чем подвижность электронов в PCBM. Это приводит к накоплению дырок и поля, которое противостоит встроенному полю - явление, известное как фототок с ограниченным пространственным зарядом (SCLP)^{40,41}. Исследователи обнаружили, что подвижность отверстий увеличивается при загрузке ПХБМ, что объясняется повышенным упорядочением в фазе PPV⁴¹. Использование смеси, содержащей 80% ПХБМ, зажатой между прозрачным контактом и LiF/Al, дает КПД ~3,5%²². Для достижения более высокой эффективности необходимо дополнительно увеличить подвижность отверстия.

rr-P3HT обладает одной из самых высоких заявленных подвижностей полевых транзисторов для сопряженного полимера из-за полукристаллической природы его спиновых пленок⁴². Кроме того, морфология и, следовательно, подвижность чистых пленок rr-P3HT и смешанных пленок rr-P3HT:PCBM сильно зависят от условий литья. Например, подвижность дырок в смесях, полученных из хлорбензола, немного ниже подвижности электронов, но для пленок толщиной менее 200 нм SCLP не является проблемой. Однако попытки сделать активный слой толще, чтобы поглощать больше солнечного света, приводят к потере кожи головы ^{43,44}. Использование оптических полей и разделителей наряду с оптимизированным отжигом позволяет получить пленки длиной 100 нм с эффективностью около 5% ^{2,4,5}. Однако для обеспечения возможности использования более толстых пленок и увеличения поглощения требуется дальнейшее повышение подвижности.

Уменьшение скорости испарения растворителя путем перехода с хлорбензола на орто-дихлорбензол значительно повышает

эффективность преобразования энергии устройства. Это связано с тем, что подвижность дырок в фазе rr-P3HT увеличивается более чем в десять раз по сравнению с пленками, полученными из хлорбензола 3,44. Даже при таком увеличении толщина устройства по-прежнему ограничена примерно 300 или 400 нм. Большая ширина запрещенной зоны P3HT (1,9 эВ) ограничивает ток короткого замыкания до ~ 15 мА/см². Полимер с меньшей запрещенной зоной поглощал бы больше солнечного спектра и генерировал бы более высокий фототок.

Полимеры с малой запрещенной зоной для солнечных элементов синтезируются с 2001 года. Эти полимеры обладают более низкой оптической плотностью и подвижностью, чем PPV и P3HT, а также неоптимизированной наноструктурой. Несколько исследователей попытались преодолеть эти проблемы, заменив ПХБМ на PC71BM, который имеет оптическую плотность в два раза больше, чем ПХБМ, и хорошо дополняет спектры поглощения полимеров. Этот подход дает КПД $\sim 3,2\%$, что все еще ниже, чем у солнечных элементов на основе PPV или P3HT. Однако недавно Хигер и Базан с соавт.6 из UCSB улучшили эффективность смесей на основе PCDTBT и PC71BM, получив контроль над морфологией. Этот контроль достигается путем смешивания 1,8-октандитиола с раствором и дает КПД 5,5%. Дальнейший контроль наноморфологии должен увеличить эту эффективность до 7%, что делает солнечные элементы на основе полимеров на один шаг ближе к тому, чтобы конкурировать с неорганическими технологиями.

Конечная эффективность ВНИ в конечном итоге будет ограничена случайной сетью, которая образуется в результате быстрого высыхания раствора. Например, различия в длине боковой цепи полимера, весовом проценте материалов и выборе растворителя могут привести к совершенно разным морфологиям^{45,46}, что может серьезно повлиять на сбор экситонов. Кинетика фазовой сегрегации во время литья представляет собой сложный процесс, который может привести к образованию тупиков и изолированных доменов (рис. 2с), которые задерживают носители заряда и препятствуют их извлечению.

Структурирование одного из компонентов в вертикально выровненные стержни или поры с диаметром, меньшим, чем длина диффузии

экситонов, облегчило бы эту проблему. Упорядоченные органические солнечные элементы еще не создали эффективного устройства. Однако замена неупорядоченного акцептора электронов упорядоченным наноструктурированным оксидом является жизнеспособным путем.

Упорядоченные гетеропереходы

Наноструктура на фиг. 2d считается идеальным, потому что он имеет небольшие прямые поры и достаточно толстый, чтобы поглощать большую часть солнечного света. Радиус пор должен быть немного меньше длины диффузии экситонов, чтобы обеспечить максимальный сбор экситонов. Толщина наноструктуры должна составлять 300-500 нм, чтобы пропитанный полимер мог поглощать большую часть падающего света. Поры (или каналы) должны быть прямыми, чтобы обеспечить наиболее прямой путь к аноду и катоду.

Отверстия проходят по всей толщине конструкции через малоподвижный полимер. Следовательно, более толстые пленки могут привести к высокому последовательному сопротивлению, потерям на рекомбинацию и скалпированию, что приводит к низкой эффективности сбора заряда. Напомним, что морфология сильно влияет на подвижность. Фактически, возможно выравнивать полимеры в порах для увеличения подвижности ⁵⁵, и что вышеуказанные проблемы должны быть устранены путем дальнейшего контроля морфологии.

Идеальная наноструктура должна содержать как можно меньше титана, чтобы обеспечить максимальное поглощение. Поскольку сначала изготавливается оксидная наноструктура, поверхность раздела может быть модифицирована, чтобы максимизировать прямой перенос электронов и минимизировать рекомбинацию, а также способствовать смачиванию полимера. Прямые поры с гладкими боковыми стенками, вероятно, позволили бы полимерным цепям выравниваться в вертикальном направлении, тем самым способствуя диффузии экситонов и переносу заряда. Было бы выгодно, если бы пленки также изготавливались с низкой стоимостью на пластиковых подложках, что потребовало бы, чтобы нанесение и термическая обработка проводились при умеренных температурах (<500°C).

В настоящее время наиболее эффективное упорядоченное наноструктурированное оксидно-полимерное устройство (0,4%)⁵⁶ значительно хуже, чем BHJ PV. Существует много проблем, связанных с разработкой эффективных упорядоченных гетеропереходов. В прошлом изготовление наноструктур с малыми размерами пор (~10 нм) и высоким соотношением сторон (30) оказалось трудным делом. Однако в настоящее время существует много перспективных путей для разработки упорядоченных мезоструктур ⁵⁷, рельефных наноструктур ⁵⁰, нанотрубок⁴⁹ и нанопроволок ⁵¹, которые могли бы соответствовать требованиям. Некоторые возможные наноструктуры показаны на фиг. 4, но еще предстоит успешно внедрить в полимерный солнечный элемент ^{49,50}.

Существует множество методов (например, инфильтрация расплава, нанесение покрытия погружением и полимеризация), используемых для заполнения пор. Однако подвижность полимера, которая имеет решающее значение для определения коэффициента заполнения и АО в полукристаллических полимерах, может быть уменьшена внутри небольших пор (~10 нм). Не существует общего правила для понимания влияния размера пор на подвижность данного полимера, поскольку перенос пор зависит от конкретной микроструктуры полимерной пленки. Было показано, что только 68% экситонов расщепляются на границе раздела титан/полимер внутри мезопористых пленок ⁵⁸, возможно, из-за пониженной диффузии экситонов и несовершенного тушения экситонов. К счастью, наноструктурированная оксидная поверхность может быть модифицирована с использованием красителей, групп карбоновой и фосфорной кислот, которые потенциально могут улучшить смачивание полимера и динамику переноса заряда. Используя модификаторы интерфейса, можно полностью погасить экситоны на границе раздела TiO₂/полимер ^{52,59}.

Резонансная передача энергии Ферстера (СКОРОСТЬ) может увеличить эффективную длину диффузии возбуждения различных полимеров. RET можно рассматривать как передачу энергии от возбужденного хромофора (экситона) в доноре энергии к акцептору энергии. Сила RET и, следовательно, расстояние, на котором ОН эффективен, зависит от эффективности фотолюминесценции донора и перекрытия между

спектрами излучения донора и поглощения акцептора. RET был использован для увеличения длины диффузии экситонов с 3 нм до 27 нм в солнечных элементах, которые используют красный поглощающий слой поверх TiO_2 . Увеличенная длина диффузии имеет значительные последствия для требований к наноструктуре. Больших размеров доменов было бы достаточно для полного сбора экситонов, а более крупные наноструктуры предоставили бы больше места для выравнивания полимерных цепей внутри наноструктуры.

Наноструктурированный TiO_2 обеспечивает каркас с фиксированными размерами доменов и интерфейсами, которые можно легко модифицировать – это самая важная причина для разработки наноструктурированных шаблонов TiO_2 . Такая наноструктура обеспечивает большую гибкость для точной настройки упорядоченных наноструктур путем независимого изучения выбора полимеров и архитектуры устройств. Это позволило бы значительно улучшить поглощение света (например, за счет использования полимера с малой запрещенной зоной), улавливание экситонов, перенос заряда и Лос (например путем уменьшения разницы LUMO-LUMO между TiO_2 и полимером путем регулировки боковых цепей полимера или с помощью модификаторов интерфейса). Два пути для значительного прогресса лежат в создании идеальной наноструктуры, которая обеспечивает максимальную эффективность с учетом конкретной системы TiO_2 / полимер, и в разработке полимеров для улучшения внутренних свойств, таких как запрещенная зона, длины диффузии экситонов, уровни энергии и подвижность. В случае TiO_2 /P3HT сбор всех падающих фотонов, возможно, с использованием наноструктур, в сочетании с сообщаемыми значениями Лос и коэффициентами заполнения, обеспечивает эффективность более 5%. Подходящая полимерная технология может в будущем повысить эффективность более чем на 10% 55.

Мультифункции

Органические многопереходные солнечные элементы являются многообещающим способом повышения эффективности. Для соединений III-V и аморфных сплавов Si укладка различных поглотителей является в первую очередь средством уменьшения потерь на

термализацию фотонов высокой энергии, что значительно ограничивает теоретическую эффективность солнечного элемента с одним поглотителем. Это также верно для органических полупроводников, но укладка ячеек дополнительно преодолевает ограниченную полосу пропускания, которая обычно недостаточно широка для поглощения всего спектра. Укладка большого количества ячеек также является возможным решением для устройств, которые слишком тонкие, чтобы поглощать весь свет из-за коротких длин сбора носителей или коротких длин диффузии экситонов⁶¹.

Наиболее распространенным способом укладки ячеек является их последовательное соединение ⁶². Для этого метода основные требования заключаются в том, что элементы должны быть согласованы по току, а межсоединительный переход между элементами должен быть прозрачным и иметь низкое последовательное сопротивление при обеспечении надлежащего контакта в качестве анода для одного элемента и катода для другого.

Хирамото и соавт.⁶³ создали первый органический тандемный солнечный элемент в 1990 году, сложив два идентичных низкомолекулярных двухслойных устройства, соединенных последовательно тонким прерывистым слоем Au. Слой металлических кластеров поглощает мало света и действует как эффективные центры рекомбинации. Этот метод широко и с большим успехом использовался как для полимерных, так и для низкомолекулярных тандемных ячеек. Недавно несколько групп^{65–67} продемонстрировали использование прозрачных проводников с высокой и низкой рабочими функциями для формирования межсоединения⁶⁴ и использование двух разных поглотителей для покрытия большей части солнечного спектра.

Дополнительная сложность тандемной структуры влечет за собой значительный объем разработки устройств для достижения более высокой эффективности. Согласование токов при одновременном обеспечении того, чтобы фотоны не расходовались впустую и чтобы каждая подсеть работала с максимальной скоростью, является сложной задачей. Сюэ и соавт.⁶⁵ показали важность разработки эффектов оптической интерференции. Используя тот факт, что слои поглотителя

могут быть очень тонкими и что спектр поглощения каждого органического вещества очень узкий, они повысили эффективность, разместив ячейку с широким зазором в задней части устройства. Разработка оптических эффектов соединительных материалов с очень разным показателем преломления (например, металлов или оксидов) также может оказаться полезной.

Также необходимо учитывать дополнительные этапы изготовления многопереходной ячейки. Большая часть привлекательности полимерных фотоэлектрических систем заключается в возможности обработки раствора методом "от рулона к рулону". Одной из основных трудностей для полимерных многопереходных ячеек является последовательное нанесение нескольких слоев из раствора без растворения нижележащих пленок. Однако несколько групп недавно добились успеха, нанеся защитный прозрачный оксид в качестве первого межсоединительного слоя^{68,69}. Оксид служит верхним контактом для нижней ячейки и идеальной гидрофильной поверхностью для нанесения PEDOT:PSS, который служит нижним контактом для следующей ячейки. Gilot и соавт.⁶⁹ продемонстрировали устройство с тройным стеклом с высоким Voc 2,19 В, используя уровень межсоединения ZnO/PEDOT:PSS. Способность укладывать органические устройства таким образом является явным преимуществом по сравнению с их неорганическими аналогами, где эпитаксиально выращивать кристаллические слои из различных материалов сложно.

Самая высокая заявленная эффективность для органического солнечного элемента (за исключением солнечного элемента, сенсibilизированного красителем) - респектабельные 6,5% – это тандемное устройство, в котором используется обработка раствором для всех активных и соединительных слоев⁶⁸. Даже при наличии современных материалов и понимания эффективность, превышающая 10%, должна быть легко достижима. Однако для значительно более высоких КПД, не говоря уже об эффективности, превышающей предел Шокли-Квайссера с одним поглотителем,⁷⁰ разработка новых полимеров с дополнительными спектрами поглощения и достижение более высокого содержания Лос в слоях с широкой запрещенной зоной будет иметь важное значение.

Резюме и перспективы

Солнечные элементы на основе полимеров приближаются к эффективности преобразования энергии, что делает их конкурентоспособными по сравнению с технологиями производства CO_2 . Рекордная эффективность наблюдалась в неупорядоченных наноструктурированных гетеропереходах, но ожидается дальнейший выигрыш при оптимизации упорядоченных архитектур наноструктур. Текущие проблемы заключаются в следующем:

1. Создание упорядоченной наноструктуры с соответствующим размером домена (< 10 нм) и размерами (толщина 300-500 нм);
2. Разработка полимеров с малой запрещенной зоной с краями поглощения до 1 эВ, коэффициентами поглощения более 10^5 см^{-1} и подвижностью носителей заряда выше $10^{-4} \text{ см}^2/\text{В.с}$;
3. Минимизация потерь энергии на донорно-акцепторном интерфейсе путем настройки уровней энергии.

Прогресс в этих нескольких основных моментах необходим для повышения эффективности и продвижения отрасли вперед, в конечном счете для обеспечения дешевой, экологически чистой энергетической технологии, которая пользуется таким острым спросом. Как только будет достигнута высокая эффективность, потребуются усилия, чтобы сделать устройства стабильными при солнечном свете в течение как минимум десяти лет.