

УДК 535.8/54

*В. Ф. Разумов<sup>1,3</sup>, М. В. Алфимов<sup>2,3</sup>*<sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН<sup>2</sup>Центр фотохимии РАН<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

## Прогресс в области исследования и разработок органических и гибридных материалов для нанофотоники

В настоящем обзоре подробно рассмотрены главные направления нанофотоники — исследования и разработки солнечных батарей и электролюминесцентных устройств. В основе разработок лежат новые электропроводящие полимеры, производные фуллеренов, углеродные нанотрубки, графены. Наночастицы полупроводников и металлов, получаемые методами коллоидного синтеза, в сочетании с вышеперечисленными органическими материалами придают им новые уникальные свойства.

**Ключевые слова:** нанофотоника, электропроводящие полимеры, наночастицы, метаматериалы.

### 1. Введение

Нанофотоника — одно из направлений в области нанотехнологий, связанное с созданием новых оптических материалов и функциональных устройств, построенных на основе наноразмерных структур (тонких плёнок, молекулярных агрегатов, кластеров, наночастиц и т. д.). Главная прикладная задача нанофотоники — разработка фотонных устройств и материалов для эффективного управления фотонами (так же, как электронные устройства управляют электронами), преобразования световой энергии в другие формы энергии и обратно, обработки и хранения информации.

Далее речь пойдёт об исследованиях и разработках новых наноструктурированных органических и гибридных материалов для нанофотоники. Основу их составляют новые электропроводящие полимеры, производные фуллеренов, углеродные нанотрубки, графены. Наночастицы полупроводников и металлов, получаемые методами коллоидного синтеза, в сочетании с вышеперечисленными органическими материалами придают им новые уникальные свойства. Таким образом, мы не будем касаться тех направлений, которые связаны с традиционными кремниевыми технологиями.

В настоящем обзоре мы более подробно остановимся только на двух направлениях нанофотоники — исследованиях и разработках солнечных батарей и электролюминесцентных устройств.

### 2. Солнечные батареи

Среди различных альтернативных источников энергии наиболее привлекательным представляется использование солнечной энергии. Если суммарная мощность источников энергии, которую в настоящее время потребляет всё человечество, оценивается примерно в 20 ТВт, то мощность солнечного излучения, падающего на Землю, составляет величину порядка  $10^5$  ТВт.

Стоимость производства солнечных батарей является сейчас критической для развития всей солнечной энергетики. Кремниевые солнечные батареи известны уже более чем полвека. Эффективности преобразования света в кремниевых батареях достигают 20%, а срок службы — более 25 лет. Стоимость самого кремния не высока. Но технология производства кремниевых солнечных батарей чрезвычайно сложна, что и обуславливает их высокую цену. В США и Европе стоимость электроэнергии, полученной от солнечных батарей, сейчас

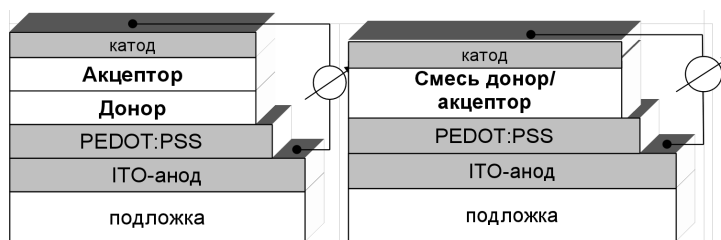


Рис. 1. Структура типичной планарной фотовольтаической ячейки (слева) и батареи типа «объёмный гетеропереход»

в 2–5 раз больше поставляемой от обычных источников (ТЭС или АЭС) [1]. Лишь самые лучшие прогнозы позволяют рассчитывать на то, что цена получаемой от солнечных батарей энергии опустится до 10 центов за 1 кВт/ч в 2014 году [2]. Учитывая, что энергия сейчас становится стратегическим ресурсом, многие страны вкладывают капитал в создание собственных больших парков солнечных батарей. К ним в первую очередь относятся Япония, Германия и США, занимающие передовые позиции в мире по степени использования альтернативных источников энергии. Реально использование солнечных батарей окупается лишь в тех немногих случаях, когда потребитель удалён от других источников энергии. Есть небезосновательные надежды, что органическая электроника может обеспечить дешёвую альтернативу кремниевым батареям. Согласно расчётам, стоимость 1 кВт/ч, производимого органическими батареями, должна составить 1–2 цента [3].

Наиболее перспективными являются пластиковые солнечные батареи, в которых в качестве рабочих материалов используются смеси органических полупроводников *p*- и *n*-типов, хорошо растворимые в органических растворителях. Благодаря этому они могут наноситься методом печати на гибкие полимерные подложки. Эта технология уже досконально разработана и используется многими западными компаниями [4].

Есть две основные конфигурации органических фотовольтаических ячеек: это батареи планарного типа, в которых фотоактивные компоненты наносятся отдельными слоями и батареи с «объёмным гетеропереходом», в которых есть только один фотоактивный слой, представляющий смесь донора и акцептора (рис. 1).

В батареях обоих типов под действием света происходит фотоиндуцированный перенос электрона от донорного соединения к акцепторному. В слоистых ячейках этот процесс протекает на границе раздела слоев донора и акцептора. В батареях типа «объёмный гетеропереход» разделение зарядов происходит по всему объёму активного слоя батареи на чрезвычайно сильно развитой поверхности, разделяющей фазы донора и акцептора. Структуру «объёмного гетероперехода» можно представить себе в виде двух взаимопроникающих трёхмерных сетей из донорных и акцепторных материалов в активном слое. После разделения зарядов электроны будут перемещаться к электроду в слое акцепторного материала (материала *n*-типа), а положительные заряды — «дырки» — в слое донорного материала (*p*-типа).

На рис. 2 приведён пример типичной вольт-амперной характеристики солнечной батареи, получаемой путём измерения величин тока и напряжения на её электродах в стандартизованных условиях при облучении светом со спектром близким к спектру Солнца. Для этой цели используется симулятор спектра солнечного света AM1.5 (Air Mass 1.5), стандартная мощность светового потока которого составляет 100 мВт/см<sup>2</sup>. Вольт-амперная кривая позволяет определить три основных характеристики фотовольтаического элемента: напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ), ток короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) и фактор заполнения ( $FF$ ). При нулевой величине приложенного напряжения определяется плотность тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ). Напряжение, которое нужно приложить, чтобы скомпенсировать ЭДС. ячейки (т.е. привести ток к нулю), называется напряжением холостого хода ( $V_{oc}$ ). Если в каждой точке кривой перемножить координаты (ток на напряжение), то найдётся некая точка, в которой это произведение максимально по абсолютной величине. Эта точ-

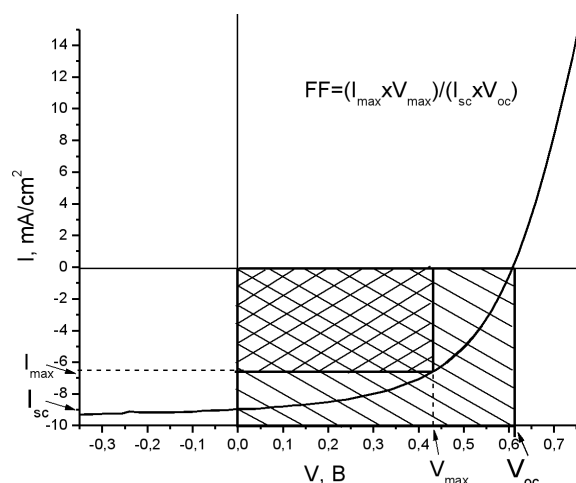


Рис. 2. Типичная вольт-амперная кривая фотовольтаического элемента

ка называется *точкой максимальной энергии*, и она определяет реальную эффективность фотовольтаического элемента. В этой точке принято обозначать  $I = I_{\max}$ , а  $V = V_{\max}$ . Эффективность преобразования света в фотовольтаическом элементе ( $\eta$ ) рассчитывается по формулам:

$$\eta(\%) = (P_{in}/P_{out}) \cdot 100 = [(I_{\max}V_{\max})/P_{out}] \cdot 100 = [(I_{sc}V_{oc}FF)] \cdot 100,$$

где  $P_{out}$  — мощность падающего света от внешнего источника,  $P_{in}$  — «внутренняя» мощность, обеспечиваемая работой фотовольтаического элемента, а  $FF$  — коэффициент пропорциональности, называемый фактором заполнения. Нетрудно увидеть, что фактор заполнения — это отношение площади прямоугольника со сторонами  $I_{\max}$  и  $V_{\max}$  (меньший) к площади прямоугольника со сторонами  $I_{sc}$  и  $V_{oc}$  (большой).

Батареи «планарного типа» исторически были первыми фотовольтаическими ячейками, показавшими приемлемую эффективность преобразования света — около 1% [5]. С тех пор вышло большое число работ по фотовольтаическим свойствам систем типа «фталоцианин/производное перилена», однако существенно увеличить эффективность батарей на основе комбинации этих материалов не удалось [6–10].

Существенный прогресс был достигнут при использовании фуллерена  $C_{60}$  в качестве акцепторного материала в солнечных батареях в комбинации с фталоцианинами металлов. Некоторые авторы заявили о достижении эффективности преобразования света около 3,6% для системы  $C_{60}$ /фталоцианин меди (CuPc) [11], однако эти результаты впоследствии не удалось воспроизвести. Наиболее достоверными являются работы, в которых сообщается об эффективностях преобразования света 2,0–2,5% для систем  $C_{60}$ /MPc ( $M = Cu, Zn$ ) [12].

Органические фотовольтаические ячейки на основе объёмного гетероперехода, в которых активный слой представляет собой смесь донорного и акцепторного материалов, сейчас исследуются наиболее активно. При реализации объёмного гетероперехода площадь контакта между фазами донора и акцептора, как правило, на много порядков больше, чем в батареях «слоистого типа». Это приводит к тому, что квантовая эффективность фотоиндуцированного разделения зарядов в слоях с объёмным гетеропереходом близка к 100%.

На сегодняшний день лучшими материалами для органических солнечных батарей типа «объёмный гетеропереход» являются соединения фуллеренов ( $n$ -тип) и полисопряженные полимеры ( $p$ -тип).

В течение многих лет во всех модельных органических солнечных батареях использовалась система [60]PCBM/MDMO-PPV, где [60]PCBM — это циклопропановое производное  $C_{60}$ , а MDMO-PPV — замещённый пара-фениленвинилен (рис. 3) [13]. Максимальная эффективность преобразования света для этой системы составляет 2,5–2,6%, что было достигнуто тщательной оптимизацией всех параметров при изготовлении ячеек этого типа

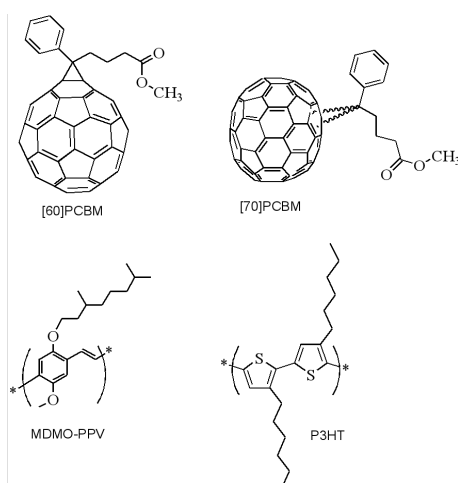


Рис. 3. Молекулярные формулы материалов, наиболее часто используемых для батарей с «объёмным гетеропереходом»

[14]. Повысить эту величину практически невозможно, так как она близка к теоретическому максимуму для системы [60]PCBM/MDMO-PPV. Ограничениями являются электронные уровни материалов, которые не позволяют увеличить напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ) в ячейках более чем до 900 мВ. Узкий спектральный диапазон, в котором поглощает данная комбинация материалов ( $<600$  нм), не позволяет получить большую плотность фототока, чем 5–6 мА/см<sup>2</sup>. Некоторого прогресса удалось добиться путём замены акцепторного материала на основе фуллерена C<sub>60</sub> на аналогичное соединение C<sub>70</sub> — [70]PCBM. Соединения фуллерена C<sub>70</sub> обладают более широким спектром поглощения в видимой области, чем аналогичные производные C<sub>60</sub>. Поэтому использование [70]PCBM позволило улучшить светопоглощение в активном слое батареи, что привело к увеличению эффективности преобразования света до 3,0% [15].

Следующим шагом на пути развития органической фотовольтаики стало использование региорегулярных поли(3-алкилтиофенов) в качестве донорных материалов, в частности, поли(3-гексилтиофена) [16]. Важным преимуществом поли(3-гексилтиофена) (далее — P3HT) является самоорганизация в плёнках при повышенных температурах с образованием так называемых ламинарных структур. Эти структуры представляют собой некие стопки, образующиеся при наложении цепей полимера друг на друга. В таких стопках реализуется очень высокая дырочная подвижность (до 10<sup>-2</sup> см<sup>2</sup>/В·с). Улучшенные транспортные свойства P3HT в сравнении с MDMO-PPV имеют существенное значение для достижения высоких плотностей тока в фотовольтаических ячейках. Основным же преимуществом P3HT перед MDMO-PPV является более широкий спектр поглощения (почти до 700 нм) в плёнках, что позволяет достигать плотностей тока в ячейках вплоть до 11–12 мА/см<sup>2</sup>. Максимальная эффективность оптимизированных устройств на основе системы P3HT/PCBM немного превышает 4,0%, а величина около 4,5% является теоретическим максимумом. Несколько ранее появились работы, в которых авторы утверждали о достижении эффективности 5,0% и даже более, используя систему P3HT-PCBM [17–18]. Однако последующие более детальные исследования показали [19–21], что эти величины явно являются завышенными.

В последние годы большое внимание уделяется разработке солнечных батарей с использованием гибридных материалов на основе полупроводниковых нанокристаллов или коллоидных квантовых точек (ККТ), которые являются перспективными компонентами таких систем, поскольку обладают уникальными оптическими и электронными свойствами. В частности, благодаря квантовому размерному эффекту изменяя размер ККТ, можно изменять ширину запрещённой зоны, что позволит оптимизировать поглощения солнечного излучения. Изменение размера также позволяет контролировать расположение энергетических уровней ККТ по отношению к другим компонентам солнечных батарей и таким

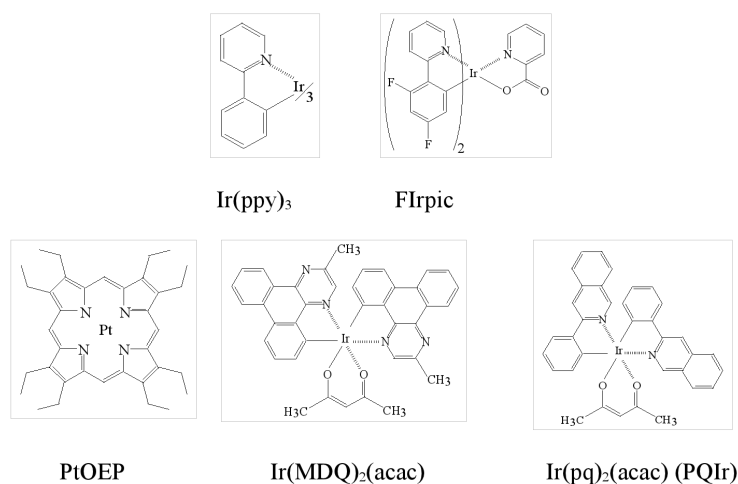


Рис. 4. Примеры фосфоресцентных молекулярных комплексов

образом контролировать перенос заряда через границу раздела. Кроме того, ККТ обладают высоким коэффициентом поглощения, высокой подвижностью носителей заряда, высокой фотостабильностью по сравнению с органическими хромофорами, а также могут быть приготовлены в больших количествах. Одним из преимуществ использования ККТ является то, что такие батареи могут быть изготовлены с помощью рулонных технологий (roll-to-roll).

В настоящее время в литературе рассматривают несколько разных конструкций солнечных батарей с использованием ККТ. Среди них можно выделить следующие типы конструкций: солнечные батареи Шоттки на контакте «металл–полупроводник» [22–26], гибридные солнечные батареи на основе объёмного гетероперехода «сопряжённый полимер–ККТ» [27–33], солнечные батареи на гетеропереходе «полупроводник–полупроводник», когда в активном слое смешиваются два типа ККТ [34–38], и солнечные батареи Гретцеля, в которых ККТ выполняют роль спектрального сенсibilизатора [39–43].

### 3. Электролюминесцентные устройства

Научные разработки как электролюминесцентных материалов, так и устройств на их основе, которые принято называть органическими светоизлучающими диодами (ОСИД), продвинуты уже достаточно далеко, так что они практически в полной мере отвечают всем требованиям, предъявляемым со стороны промышленных партнёров, и в настоящее время широким фронтом идёт освоение технологии их производства. Так, например, отработана технология промышленного производства минидисплеев, которые используются в сотовых телефонах, видео- и фотокамерах. Уже представлены первые широкоформатные дисплеи на основе ОСИДов. Ожидается, что телевизоры с такими экранами будут доступны в ближайшее время. Считается, что продукт будет пользоваться большим успехом на рынке, так как он обладает рядом принципиальных преимуществ в сравнении с жидкокристаллическими и плазменными аналогами.

ОСИДы чрезвычайно интересны в плане возможности их использования в осветительных панелях, генерирующих мягкий белый свет с очень высоким КПД. Это направление активно разрабатывается компаниями Universal Display Co., Philips и многими другими. Детальная информация о состоянии рынка органических светоизлучающих диодов представлена на сайте [44].

ОСИД белого цвета может быть получен смешиванием цветов различных источников, объединяемых в один ОСИД. Этот подход остаётся основным методом создания белых ОСИД. Такой ОСИД содержит как минимум три люминесцентных слоя, содержащих соответственно синий, зелёный и красный люминофоры. Для создания эффективных белых

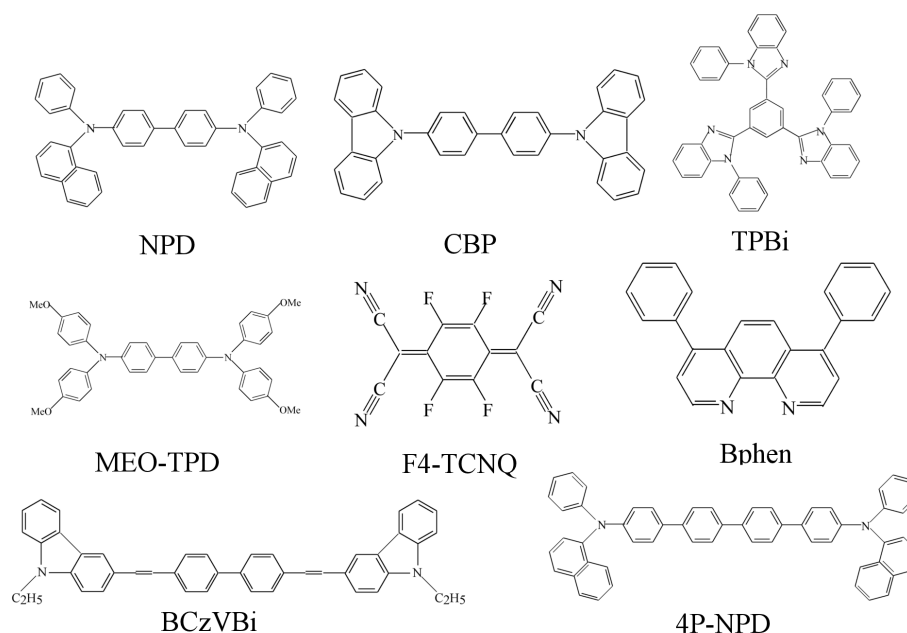


Рис. 5. Примеры органических материалов для белых ОСИДов

ОСИД, предназначенных для освещения, в последнее время, как правило, применяются люминофоры, характеризующиеся триплетной люминесценцией (фосфоресценцией) [45–56]. Это связано с их более высокой эффективностью при электролюминесценции по сравнению с флуоресцентными люминофорами, так как в электролюминесцентных системах первоначально образуется в три раза больше триплетных возбуждений, чем синглетных. В качестве триплетных люминофоров обычно применяются комплексы металлов (в основном, иридия). Известны комплексы иридия с синей [46, 51], зелёной [46, 50, 55] и красной [46, 51, 56] фосфоресценцией (примеры приведены на рис. 4). Для получения зелёного излучения чаще всего используется комплекс иридия с фенилпиридином  $\text{Ir}(\text{ppy})_3$  [46, 50, 55]. Для получения красного цвета используются комплексы иридия  $\text{Ir}(\text{MDQ})_2(\text{acac})$  [55] и  $\text{Ir}(\text{pq})_2(\text{acac})$  (другая аббревиатура  $\text{PQIr}$ ) [46, 51, 56], а также порфириновый комплекс платины  $\text{PtOEP}$ . Для синего цвета применяется комплекс иридия  $\text{FIrpic}$  [51].

В отличие от флуоресцентных люминофоров, триплетные эмиттеры в электролюминесцентных структурах не образуют самостоятельных слоев, а применяются в виде малых добавок в матрице дырочно-транспортных материалов, в качестве которых используются различные производные трифениламинов и карбазолов [45–56], например NPD и CBP, а также производное диазола TPBi (рис. 5).

Один из наиболее перспективных подходов к созданию трёхкомпонентного ОСИД предложен в работе [45], где используется флуоресцентный эмиттер синего цвета и фосфоресцентные эмиттеры зелёного и красного цветов в виде малых добавок в матрице зарядово-транспортных слоев. Это даёт возможность более полного использования как триплетных, так и синглетных возбуждений, образующихся в электролюминесцентных системах. Подобная схема с использованием флуоресцентного синего и фосфоресцентных красного и зелёного люминофоров применялась и в ряде последующих работ [46–57].

Альтернативный подход к созданию белого ОСИД — применение однокомпонентной электролюминесцентной структуры, в которой одно люминесцентное вещество обладает широким спектром излучения, содержащим синий, зелёный и красный компоненты. Такой подход можно осуществить, если использовать излучение, возникающее при образовании эксиплексов — возбуждённых комплексов [58–59].

Ещё один подход к созданию белого ОСИД — применение гибридной схемы, включающей добавки неорганических полупроводниковых наночастиц в матрицу органического ве-

щества в электролюминесцентной структуре [60–61]. В этой системе энергия электронного возбуждения может передаваться с органической части на неорганическую. Неорганическая часть в таких системах представлена наночастицами полупроводников II–VI, построенными по схеме ядро-оболочка, например ядро CdSe и оболочка ZnS. Размеры ядра составляют обычно 4–5 нм. Варьирование полупроводниковых материалов и размеров наночастиц позволяет добиться излучения в нужной спектральной области. Наночастицы стабилизированы покрытием из поверхностно-активного вещества (например, триоктилфосфин оксид), что делает их устойчивыми в растворах и пригодными для приготовления электролюминесцентных структур методами полива из растворов. Такой подход позволяет получить ОСИД различных цветов свечения, в том числе белого. Так, в работе [62] ОСИД белого цвета свечения был получен путём смешивания органического сине-зелёного люминофора и наночастиц с жёлтым спектром излучения. В работах [61, 62] наночастицы добавлялись в полимерную матрицу, в работе [60] наночастицы добавляли к веществу дырочно-транспортного слоя с последующим напылением электронно-транспортных материалов.

#### 4. Метаматериалы и фотонные кристаллы

Ещё одно чрезвычайно интересное и бурно развивающееся направление связано с разработкой метаматериалов и фотонных кристаллов. Оптические характеристики метаматериалов нехарактерны для объектов, встречающихся в природе. Одним из наиболее впечатляющих типов метаматериалов являются объекты с отрицательным показателем преломления. Как правило, это композитные материалы, свойства которых обусловлены не столько индивидуальными физическими свойствами их компонентов, сколько микроструктурой. Принципиальная возможность существования таких объектов теоретически была обоснована в [63], а экспериментально продемонстрирована более чем через 30 лет спустя для микроволновой области электромагнитного излучения [64]. Недавно появились публикации для метаматериалов в оптической области спектра [65]. Такие метаматериалы могут позволить создать устройства для передачи изображений с разрешением много меньше, чем длина волны, то есть увидеть детали размером в несколько нанометров. Таким образом, снимаются фундаментальные ограничения, которые всегда считались непреодолимыми.

Фотонные кристаллы представляют собой наноматериалы, структура которых характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях [66]. Благодаря этому, фотонные кристаллы позволяют получить разрешённые и запрещённые зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешённые и запрещённые зоны для энергий носителей заряда.

С фотонными кристаллами связывают различные приложения в области нанофотоники. Например, это низкопороговые и беспороговые лазеры, компактные волноводы с рекордно малыми потерями, среды с отрицательным показателем преломления, о которых говорилось выше. Уникальные дисперсионные свойства фотонных кристаллов дадут возможность создать суперпризмы. Явление удержания фотонов в фотонном кристалле открывает возможность построения оптических запоминающих и логических устройств [67–68].

#### 5. Оптические хемосенсоры

Отдельную самостоятельную область органической и гибридной нанофотоники представляют сенсорные системы. Центральное место занимает сенсорика химических и биологических веществ, направленная на контроль состояния человека и окружающей среды и осуществляемая автономными органическими наноэлектронными устройствами, имеющими малый вес и малый размер, состоящими из тонкоплёночных систем, включая газовый

оптический хемосенсор (хемочип), термо- или фотоэлектрический источник питания, системы запасаения и преобразования энергии, обработки, отображения и передачи информации. Например, в настоящее время разрабатываются различные биометрические сенсоры, представляющие собой комбинацию матриц светоизлучающих диодов и фотодетекторов.

## 6. Заключение

Подводя итог данного обзора, следует отметить, что сегодняшнее состояние развития нанофотоники можно сравнить с состоянием микроэлектроники до изобретения транзистора. Грядущий качественно новый уровень нанофотоники связан с созданием оптических логических устройств, оптоэлектронных процессоров и компьютеров с архитектурой, подобной мозгу человека, стереоскопической системой визуализации информации, подобной зрительному процессу и т. д.

На сегодняшний день значительные успехи достигнуты в области создания солнечных батарей на основе различных комбинаций сопряжённых полимеров и производных фуллеренов путём создания так называемого объёмного  $p-n$ -гетероперехода. В самых последних публикациях сообщается о достижении рекордных значений эффективности преобразования света достигающих 8–10% [69]. В гибридных солнечных батареях с использованием квантовых точек достигнута эффективность преобразования света около 5%.

Органические электролюминесцентные устройства по ряду своих функциональных характеристик приближаются к неорганическим полупроводниковым светодиодам. Наиболее высокие показатели достигнуты с использованием люминесцирующих металлоорганических комплексов и молекулярных органических флуорофоров. Полимерные электролюминесцентные системы имеют более низкие характеристики, но благодаря более доступной и простой технологии производства могут быть конкурентоспособными в определённых областях применения. Использование квантовых точек в качестве люминесцентного компонента позволяет надеяться на значительное увеличение срока службы таких устройств.

## Литература

1. Asian Technology Information Program (ATIP). Report: ATIP97.030: The Solar Cell Industry in Japan. — <http://www.atip.org/ATIP/public/atip.reports.97/atip97.030r.html>
2. <http://www.solarbuzz.com/StatsCosts.htm>
3. Shaheen S.E., Ginley D.S., Jabbour G.E. // MRS Bullet. — 2005. — V. 30. — P. 102.
4. Konarka Technologies, <http://www.konarkatech.com/>
5. Tang C.W. // Appl. Phys. Lett. — 1986. — V. 48. — P. 183.
6. Rand B.P., Xue J., Yang F., Forrest S.R. // Appl. Phys. Lett. — 2005. — V. 87. — 233508.
7. Mutolo K.L., Mayo E.I., Rand B.P., Forrest S.R., Thompson M.E. // Am J. Chem. Soc. — 2006. — V. 128. — P. 8108.
8. Troshin P.A., Troyanov S.I., Boiko G.N., Lyubovskaya R.N., Lapshin A.N., Goldshleger N.F. // Fuller. Nanot. Carb. Nanostruct. — 2004. — V. 12. — P. 435–441.
9. Koeppe R., Troshin P.A., Lyubovskaya R.N., Sariciftci N.S. // Appl. Phys. Lett. — 2005. — V. 87. — 244102.
10. Troshin P.A., Koeppe R., Peregudov A.S., Peregudova S.M., Egginger M., Lyubovskaya R.N., Sariciftci N.S. // Chem. Mater. — 2007. — V. 19. — P. 5363–5372.
11. Peumans P., Forrest S.R. // Appl. Phys. Lett. — 2001. — V. 79. — P. 126–128.
12. Drechsel J., Mannig B., Kozlovski F., Gebeyehu D., A. Werner, Koch M., Leo K., Pfeiffer M. // Thin Solid Films — 2004. — V. 451. — P. 515–517.
13. Hoppe H., Sariciftci N.S. // Mater J. Res. — 2004. — V. 19. — P. 1924–1945.



14. Shaheen S.E., Brabec C.J., Sariciftci N.S., F. Padinger, Fromherz T., Hummelen J.C. // Appl. Phys. Lett., — 2001. — V. 78. — P. 841–843.
15. Wienk M.M., Kroon J.M., W.J.Verhees H., Knol J., Hummelen J.C., van P.Hall A. and R.Janssen A.J. // Angew. Chem., Int. Ed. — 2003. — V. 42. — P. 3371–3375.
16. Padinger F., Rittberger R.S., Sariciftci N.S. // Adv. Funct. Mater. — 2003. — V. 13. — P. 85–88.
17. Ma W., Yang C., Gong X., Lee K., Heeger A.J. // Adv. Funct. Mater. — 2005. — V. 15. — P. 1617–1622.
18. Reyes M.-Reyes, Kim K., Dewald J., Lopez R.-Sandoval, A. Avadhanula, Curran S., Carroll D.L. // Org. Lett. — 2005. — V. 7. — P. 5749–5752.
19. Scharber M.C., Muhlbacher D., Koppe M., Denk P., C. Waldauf, Heeger A.J., Brabec C.J. Adv. Mater. — 2006. — V. 18. — P. 789–794.
20. Schilinsky P., Waldauf C., Brabec C. // Adv. Funct. Mater. — 2006. — V. 16. — P. 1669.
21. Shrotriya V., Li G., Yao Y., Moriarty T., Emery K., Y. Yang // Adv. Funct. Mater. — 2006. — V. 16. — P. 2016–2023.
22. Debnath R., Tang J., Barkhouse D.A., Wang X., Pattantyus A.G.-Abraham, Brzozowski L., Levina L., Sargent E.H. // Am J. Chem. Soc. — 2010. — V. 132. — P. 5952–5953.
23. Koleilat G.I., Levina L., Shukla H., Myrskog S.H., S. Hinds, Pattantyus A.G.-Abraham, Sargent E.H. // ACSNano. — 2008. — V. 2, N 5. — P. 833–840.
24. Fu H., Tsang S.W., Zhang Y., Ouyang J., Lu J., Yu K. // Chem J. Mater. — 2011. — V. 23. — P. 1805–1810.
25. Ma W., Luther J.M., Zheng H., Wu Y., Alivisatos A.P. // Nano Lett. — 2009. — V. 9, N 4. — P. 1699–1703.
26. Olson J.D., Rodriguez Y.W., Yang L.D., Alers G.B., and Carter S.A. // Appl. Phys. Lett. — 2010. — V. 96. — P. 242103.
27. Zhou Y., Eck M., Veit C., Zimmermann B., Rauscher F., P. Niyamakom, Yilmaz S., Dumsch I., Allard S., Scherf U., Krüger M. // Sol. En. Mat. Sol. Cells — 2011. — V. 95. — P. 1232–1237.
28. Jiang X., Schaller R.D., Lee S.B., Pietryga J.M., Klimov V.I., Zakhidov A.A. // Mater J. Res. — 2007. — V. 22. — P. 8.
29. Noone K.M., Strein E., Anderson N.C., Wu P.T., Jenekhe S.A., Ginger D.S. // Nano Lett. — 2010. — V. 10. — P. 2635–2639.
30. Wu Y., Zhang G. // Nano Lett. — 2010. — V. 10. — P. 1628–1631.
31. Dayal S., Kopidakis N., Olson D.C., Ginley D.S., G. Rumbles // Nano Lett. — 2010. — V. 10. — P. 239–242.
32. Gur I., Fromer N.A., Ping C., C.A.Kanaras G., Alivisatos A.P. // Nano Lett. — 2007. — V. 7, N 2. — P. 409–414.
33. Sun B., Snaith H.J., Dhoot A.S., Westenhoff S., Greenham N.C. // Appl J. Phys. — 2005. — V. 97. — P. 014914. — doi:10.1063/1.1804613.
34. Pattantyus A.G.-Abraham, Kramer I.J., Barkhouse A.R., Wang X., Konstantatos G., Debnath R. et. al. // ANano CS. — 2010. — V. 6. — P. 3374–338.
35. Luther J.M., Gao J. Lloyd M.T., Semonin O.E., Beard M.C., Nozik A.J. // Adv. Mater. — 2010. — V. 22. — P. 3704–3707.
36. Choi J.J., Lim Y.F., Mitk'El Santiago B.-Berrios, M. Oh et. al. // Nano Lett. — 2009. — V. 9, 11. — P. 3749–3755.

37. *D.A.Barkhouse R., Debnath R., Kramer I.J., D. Zhitomirsky, Pattantyus A.G.-Abraham, et. al.* // *Adv. Mat.* — 2011. — V. 23, 28. — P. 3134–3138.
38. *Gur I., Fromer N.A., Geier M.L., Alivisatos A.P.* // *Science.* — 2005. — V. 310, N 5747. — P. 462–465.
39. *Zhang Q., Guo X., Huang X., Huang S., Li D., Luo Y., et. al.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* — 2011. — V. 13. — P. 4659–4667.
40. *Yu X.Y., Lei B.X., Kuang D.B. and Su C.Y.* // *Chem. Sci.* — 2011. — V. 2. — P. 1396–1400.
41. *Huang X., Huang S., Zhang Q., Guo X., Li D., Luo Y., Q. Shen et. al.* // *Chem. Commun.* — 2011. — V. 47. — P. 2664–2666.
42. *Lee H.J., Chang D.W., Park S.M., Zakeeruddin S.M., Graetzel M. and Nazeeruddin M.K.* // *Chem. Commun.* — 2010. — V. 46. — P. 8788–8790.
43. *Fan S.Q., Fang B., Kim J.H., Kim J.J., Yu J.S. and Ko J.* // *Appl. Phys. Lett.* — 2010. — V. 96. — 063501.
44. [www.oled-info.com](http://www.oled-info.com)
45. *Sun Y., Giebink M., Kanno H., Ma B., Thompson M., Forrest S.R.* // *Nature.* — 2006. — V. 440. — P. 908–912.
46. *Kanno H., Holmes R.J., Sun Y., Kena S.-Cohen, Forrest S.R.* // *Adv. Mater.* — 2006. — V. 18. — P. 339–342.
47. *Schwartz G., Reineke S., Rosenow T.C., Walzer K., Leo K. Adv.* // *Funct. Mater.* — 2009. — V. 19. — P. 1–15.
48. *Yook K.S., Jeon S.O., Joo C.W., Lee J.Y.* // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — V. 93. — 073302.
49. *Jeon S.O., Yook K.S., Joo C.W., Lee J.Y., Ko K.Y., Park J.Y., Baek Y.G.* // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — V. 93. — 063306.
50. *Meerheim R., Nitsche R., Leo K.* // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — V. 93. — 043310.
51. *Yook K.S., Lee J.K.* // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — V. 92. — 193308
52. *Kim S.H., Jang J., Yook K.S., Lee J.K.* // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — V. 92. — 023513.
53. *Huang Q., Walzer K., Pfeiffer M., Leo K., Hofmann M., T. Stubinger* // *Appl. J. Phys.* — 2006. — V. 100. — 064507.
54. *Riel H., Karg S., Neyts K., Beierlein T., Rieb W.* // *J. Appl. Phys.* — 2003. — V. 94, N 8. — P. 5290–5296.
55. *Schwartz G., Fehse K., Pfeiffer M., Walzer K., Leo K.* // *Appl. Phys. Lett.* — 2006. — V. 89. — 083509.
56. *B.W.D'Andrade, Holmes R.J., Forrest S.L.* // *Adv.Mater.* — 2004. — V. 16. — P. 624–628.
57. *Schwartz G., Pfeiffer M., Reineke S., Walzer K., Leo K.* // *Adv. Mater.* — 2007. — V. 19. — P. 3672–3676.
58. *Horvath A., Stevenson K.L.* // *Coord. Chem. Rev.* — 1996. — V. 153. — P. 57.
59. *Thompson J., R.I.Blyth R., Mazzeo M., Anni M., Gigli G., Cingolani R.* // *Appl. Phys. Lett.* — 2001. — V. 79, N 5. — P. 560.
60. *Coe S., Woo W.K., Bawendi M., Bulovic V.* // *Nature.* — 2002. — V. 420. — P. 800–803.
61. *Tessler N., Medvedev V., Kazes M., Kan S., Banin U.* // *Science.* — 2002. — V. 295. — P. 1506–1508.
62. *Ahn J.H., Bertoni C., Dunn S., Wang C., Talapin D.V., Gaponik N., Eychmuller A., Hua Y., Bryce M.R., Petty M.C.* // *Nanotechnology.* — 2007. — V. 18. — 335202.
63. *Веселазо В.Г.* // *УФН.* — 1967. — Т. 92, № 3. — С. 517–526.

64. *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat S.C.-Nasser, Schultz S.* // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — V. 84. — 4184.
65. *Valentine J., Zhang S., Zentgraf T., Ulin-Avila E., Genov D.A., Bartal G., Zhang X.* // *Nature.* — V. 455. — P. 376–379. — doi:10.1038/nature07247
66. *Benisty H., Berger V., J.-Gerard M., Maystre D., A. Tchebnokov* // *Photonic Crystals*, Springer, 2005.
67. *Asakawa K., Sugimoto Y., Watanabe Y., Ozaki N., A. Mizutani, Takata Y., Kitagawa Y., et. al.* // *New Phys. J.* — 2006. — V. 8. — P. 208.
68. *Lodahl P., van Driel A.F., Nikolaev I.S., Irman A., K. Overgaag, Vanmaekelbergh D., Vos W.L.* // *Nature.* — 2004. — V. 430, N 7000. — P. 654.
69. *Service R.F.* // *Science.* — 2011. — V. 332. — P. 293.

Поступила в редакцию 22.09.2011