

Применения фуллеренов в органических фотодетекторах

Д. В. Кусайкин¹, В. Т. Куанышев¹, Н. М. Барбин^{1,2}

¹Уральский технический институт связи и информатики СибГУТИ

²Уральский институт ГПС МЧС России

Аннотация: Фуллерен в настоящее время привлекает значительное внимание исследователей, поскольку имеет множество применений в различных областях. Молекулы фуллерена обладают уникальными структурными, электронными и оптическими свойствами, которые могут быть использованы при создании оптоэлектронных устройств. В настоящее время в научной литературе активно обсуждаются вопросы использования фуллеренов в фотодетекторах. В связи с этим данный обзор посвящен органическим фотодетекторам, разработанным с использованием фуллереновых наноструктур. Рассмотрены последние достижения в области органических фотодетекторов на основе фуллеренов и их применение в системах беспроводной оптической связи в видимом диапазоне длин волн.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 071-03-2024-008 от 19.01.2024.

Ключевые слова: фуллерены, органические фотодетекторы, гетеропереход, оптоэлектронные устройства, фотоэлектрические системы, системы связи.

Для цитирования: Кусайкин Д. В., Куанышев В. Т., Барбин Н. М. Применения фуллеренов в органических фотодетекторах // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 2. С. 25–39. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-2-25-39>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Кусайкин Д. В., Куанышев В. Т.,
Барбин Н. М., 2025

Статья поступила в редакцию 20.08.2024;
принята к публикации 14.10.2024.

1. Введение

На современном коммерческом рынке фотодетекторов преобладают неорганические устройства. Традиционные широкополосные фотоприемники изготавливаются из неорганических полупроводниковых материалов, таких как Si, MoS₂ и InGaAs. Однако эти материалы дороги, а промышленный процесс их создания сложен [1] (технология производства требует высоких температур и глубокого вакуума). В то же время с быстрым развитием цифрового мира спрос на фотодетекторы постоянно растет – требуются легкие, биосовместимые и гибкие полупроводниковые приборы. Однако присущие неорганическим материалам свойства делают удовлетворение этих требований процессом дорогостоящим или не всегда возможным. Органические фотодетекторы (ОФД), с другой стороны, естественным образом отвечают этим требованиям и являются перспективным материалом для создания инновационных продуктов. Они привлекают значительное внимание по причине следующих факторов:

- экономичность и гибкость в производстве;
- возможность изготовления электронных компонентов на подложках большой площади;

- возможность изменять молекулярные структуры, изготавливать устройства под определённую длину волны;
- широкий рабочий диапазон частот.

Органические фотодиоды можно рассматривать как устройства будущего для различных сфер: солнечная энергетика, медицинская диагностика, оптическая визуализация, спектрометрия, системы беспроводной оптической связи [2].

Для создания передовых оптико-электронных систем нового поколения в настоящее время широко изучаются возможности использования углеродных наночастиц и нанокompозитов (фуллерен, углеродные нанотрубки, графен, и т. д.). При построении органических фотодетекторов широко используются материалы на основе фуллеренов. Фуллерен представляет собой замкнутую молекулу углерода сферической формы с чётным количеством атомов углерода (более 20). Является одним из наиболее широко изучаемых материалов для построения фотодетекторов благодаря своим превосходным оптоэлектронным свойствам, таким как высокий коэффициент поглощения света и высокая подвижность электронов до $6 \sim 11 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Фуллерены являются молекулами с дефицитом электронов, поэтому могут выступать в качестве акцепторов электронов. Материал на основе фуллеренов является органическим полупроводником n-типа.

Фуллереновые наноструктуры и нанокompозиты могут использоваться для создания высокоэффективных компонентов электроники: транзисторов [3], конденсаторов, резистивной памяти. В области оптоэлектроники фуллереновые материалы используются для создания оптических датчиков [4], светодиодов [5], фотоэлектрических систем [6]. Относительно новой областью, в которой органические полупроводники находят широкое применение, является беспроводная связь в диапазоне видимого света VLC (Visible Light Communication).

Сочетание сопряженных полимеров/молекул с фуллереном повышает эффективность работы оптоэлектронных устройств. Известно, что в нанокompозитной форме молекулы фуллерена взаимодействуют с проводящими полимерами для лучшего переноса заряда, дырок или электронов, что приводит к повышению производительности устройств. Фуллерен C_{60} и его растворимое производное $PC_{61}BM$ являются одними из наиболее часто используемых акцепторов в органических оптоэлектронных устройствах.

Целью данной работы является обзор применения и развития фуллереновых наноструктур при разработке органических фотодетекторов. Представлены последние достижения в области органических фотодетекторов на основе фуллеренов, включая гибридные системы кремний/органика. Проведен анализ публикаций в сфере применения органических фотодетекторов на основе фуллеренов в системах беспроводной оптической связи видимого диапазона длин волн.

2. Применение фуллеренов в области фотодетекторов

На сегодняшний день широко распространенными являются фотоэлементы с объемным гетеропереходом, который возникает между полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны. Гетеропереход в органических фотоэлементах необходим для разделения экситонов, которые образуются при поглощении фотонов в органических полупроводниках. Повышение эффективности разрабатываемых органических фотодетекторов во многом было связано с разработкой новых органических полупроводников. В качестве донорных материалов выступают различные низкомолекулярные соединения и полимеры, а в качестве акцепторов широко используются производные фуллеренов. Высокие требуемые показатели в органических фотоэлементах обеспечивают чередующиеся донорно-акцепторные сополимеры в смеси с фуллереновыми акцепторными компонентами ($PC_{61}BM$, $PC_{71}BM$).

Современные органические фотоэлементы с гетеропереходом состоят из нескольких слоев тонких пленок. Для изготовления ОФД на стеклянную подложку с нанесенным слоем

ITO (оксид индия олова – примерная толщина 200 нм) наносят слой PEDOT:PSS (поли (3,4-этилендиокситиофен) полистиролсульфонат – примерная толщина 45 нм), далее наносят активный слой донор/акцептор (толщина около 100 нм), поверх которого располагается катод (рис. 1а).

Органические фотодетекторы на основе полимеров при добавлении фуллерена могут обладать в некоторых диапазонах длин волн более высокой чувствительностью, чем традиционные кремниевые и InGaAs-фотодетекторы. Как видно из рис. 1б, ОФД имеют относительно высокое значение обнаружительной способности D в более широком спектральном диапазоне, чем фотоприемники на основе Si или InGaAs.

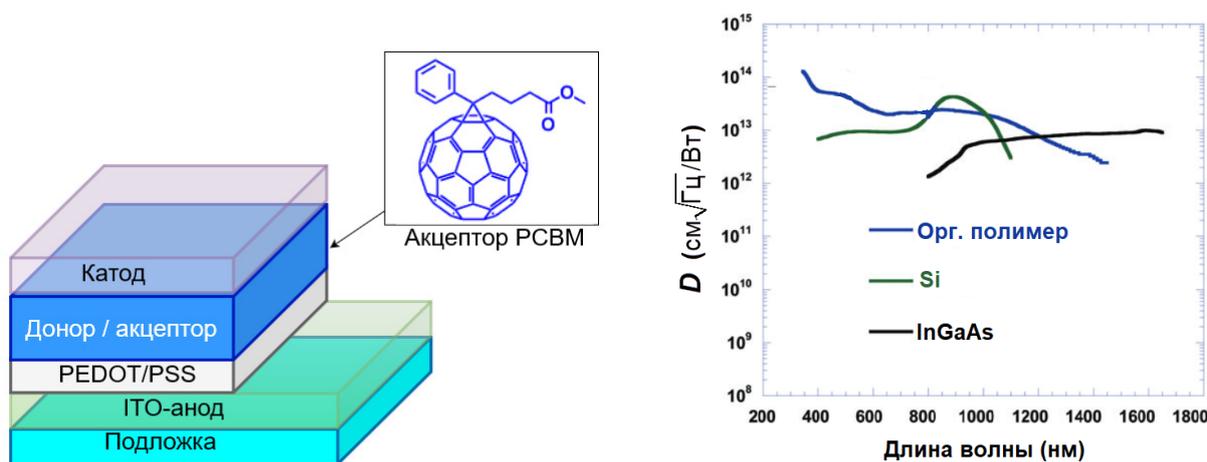


Рис. 1. Фотодетектор с гетеропереходом: а) структура; б) зависимость обнаружительной способности D от длины волны [7]

В дополнение к низкой стоимости материалов и процесса изготовления органических электронных устройств, ОФД обладают также низкой электропроводностью, что позволяет значительно снижать уровень шума. В [8] рассмотрены фуллереновые фотоприемники с линейным динамическим диапазоном 90 дБ.

Фуллерен имеет нуль-мерную 0D наноструктуру, поэтому имеет место задача создания из него упорядоченных супрамолекулярных наноструктур. На сегодняшний день разработано несколько подходов для выращивания кристаллов 1D C_{60} [9]. В [10] сообщается об эффективном подходе к выращиванию высококачественных кристаллов C_{60} с помощью супрамолекулярных гелей, полученных из гелеобразователей с низкой молекулярной массой. Используя этот метод, можно легко получить кристаллические волокна C_{60} с регулируемой длиной и диаметром. На основе таких волокон C_{60} был изготовлен фотодетектор с чувствительностью 2.59 А / Вт и удельной детекторной способностью $2.7 \cdot 10^{12}$ Джонс (1 Джонс = $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$) при длине волны 400 нм.

В [11] рассмотрены монокристаллические матрицы C_{60} большой площади, выращенные в растворе, в качестве органических фотодетекторов. Эти устройства показали хороший фотоотклик и высокую светочувствительность на длине волны 400 нм. Чувствительность, внешняя квантовая эффективность (External Quantum Efficiency, EQE) и удельная обнаружительная способность D^* этих устройств составили 8.01 мА / Вт, 2.5 % и $7.08 \cdot 10^8$ Джонс соответственно.

Как правило монокристаллические ОФД изготавливаются из одного вида органического материала, в котором доминирующим переносчиком является либо электрон, либо дырка. Такие ОФД демонстрируют однополярный перенос заряда. Кроме того, монокристаллические органические фотодетекторы обладают высокой производительностью только в отдельных областях из-за ограниченного поглощения однокомпонентными монокристаллами. Для создания широкополосного фотодетектора на основе фуллерена C_{60} необходимо использовать дополнительный материал с высоким уровнем поглощения в

диапазоне видимого или инфракрасного света. Этот материал образует гетеропереход с фуллереном, тем самым расширяя спектр поглощения устройства [11].

В [12] показана стратегия кристаллизации из раствора монокристаллического р-п гетероперехода, состоящего из фуллеренов C_{60} и 6,13-бис (триизопропилсилилэтинил) пентацена (TIPS-PEN). Как показали эксперименты, фотоприемники на основе материала TIPS-PEN/ C_{60} демонстрируют высокочувствительный фотоотклик в широком диапазоне длин волн 350 – 750 нм. В полученном устройстве на основе TIPS-PEN/ C_{60} подвижность как электронов, так и дырок достигла рекордного для монокристаллического ОФД значения более $2.5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Светочувствительность фотоприемника оказалась одной из самых высоких среди органических фотодетекторов.

В [13] успешно добились широкополосного оптического отклика ОФД в диапазонах от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного (450 – 800 нм) с помощью создания гетероперехода C_{60}/AlClP . Детектор показал высокую чувствительность 94.4 А/Вт и $\text{EQE} = 26066 \%$ на длине волны 450 нм.

В [14] синтезирована фуллереноникелевая тетрафенилпорфириновая диада ($\text{NiTPP} - C_{60}$). Если фуллерены могут выступать в качестве акцепторов электронов и демонстрируют сильное поглощение в ультрафиолетовой области, то молекулы порфирина могут действовать как доноры электронов и проявляют сильное поглощение в области видимого света. Модификация молекулы из фуллерена посредством ковалентных связей с образованием донорно-акцепторной диады со структурой порфириновой молекулы может обеспечить широкий спектр поглощения света. На рис. 2 показаны спектры поглощения C_{60} , NiTPP и $\text{NiTPP} - C_{60}$ в УФ- и видимом диапазонах.

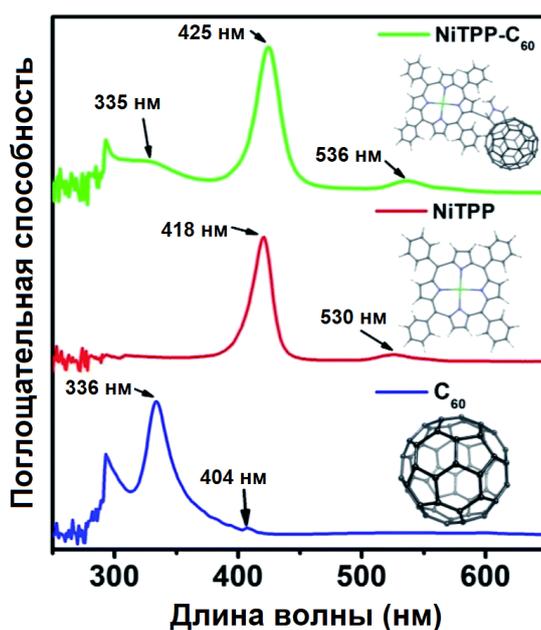


Рис. 2. Зависимости поглощающей способности от длины волны материалов $\text{NiTPP} - C_{60}$, NiTPP и C_{60} [14]

Характеристики фотоприемника $\text{NiTPP} - C_{60}$ превосходят характеристики детекторов C_{60} и NiTPP . Спектр поглощения $\text{NiTPP} - C_{60}$ можно рассматривать как комбинацию спектров поглощения C_{60} и NiTPP . Рабочий диапазон ОФД от 300 до 600 нм, что указывает на его потенциальное применение в широкополосных фотоприемниках.

После первоначального открытия сверхбыстрого фотоиндуцированного переноса электронов от полупроводниковых полимеров к фуллеренам начались исследования по созданию полимерных фотодетекторов с быстрым временным откликом и высокой чувствительностью для диапазона 400 – 900 нм. Позднее были разработаны фотодетекторы, охватывающие весь диапазон – от ультрафиолетового и видимого (400 – 800 нм) до БИК (800 – 2500 нм).

В [7] успешно продемонстрировали ОФД диапазона 300 – 1450 нм с материалом фуллерена PC₆₀BM. Разработанный фотоприемник с большим спектральным откликом, высокой чувствительностью ($10^{12} - 10^{13}$ см · Гц^{1/2} / Вт) и линейным динамическим диапазоном более 100 дБ может напрямую конкурировать с кремниевыми и InGaAs фотоприемниками. В этом органическом фотодетекторе используется объемная гетеропереходная структура PC₆₀BM с полимером PDDTT (*polybis(thienyl)thienodia-thiazolethiophene*) в качестве активного слоя (рис. 3а).

В [15] была получена объемная гетеропереходная структура на основе донорно-акцепторного сопряженного полимера PBVTPD и Tri-PC₆₁BM, которая обеспечивала детектирование света в диапазоне длин волн от 350 нм до 2500 нм. На длине волны 800 нм чувствительность составила $5 \cdot 10^{-2}$ мА/Вт. Конструкция ОФД приведена на рис. 3б.

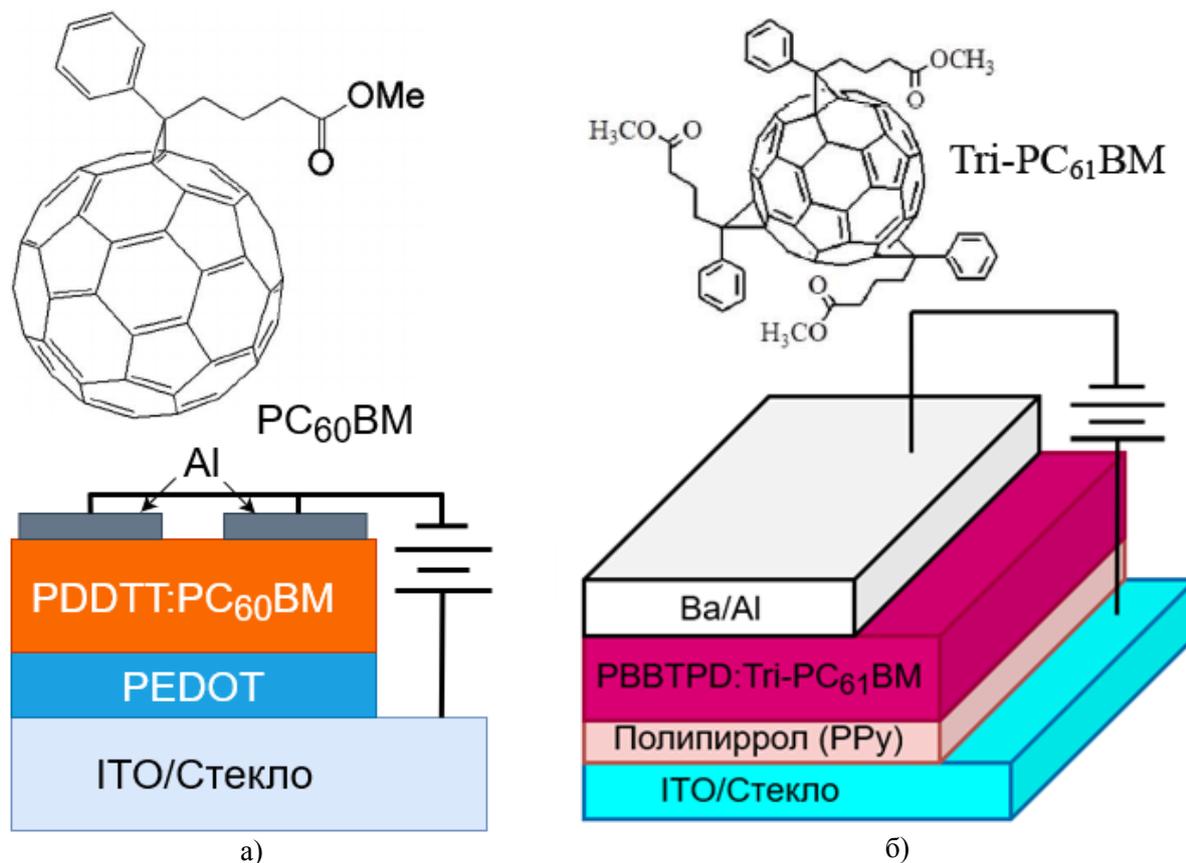


Рис. 3. Конструкции ОФД и структуры нанокompозитов фуллерена

В [16] рассматривается инновационный класс органических узкополосных БИК-фотоприемников на основе смесей C₆₀ и донорных материалов с высоким уровнем ВЗМО (высшая занятая молекулярная орбиталь). С использованием смеси ZnPc:C₆₀ значение EQE фотоприемника увеличено более чем на 20% в диапазоне 600-1000 нм. Для фотодетекторов на основе смесей TPDP:C₆₀ с более низким коэффициентом поглощения при переносе заряда продемонстрирована возможность настройки резонансной длины волны в поразительно широком диапазоне от 810 до 1550 нм путем простого изменения толщины резонатора. Стоит отметить, что фотодиоды для длин волн 850 – 1550 нм могут быть использованы в волоконно-оптической связи. Однако в работе [16] не рассматривается быстродействие этих органических фотодиодов и возможность их применения в системах передачи информации.

Одной из областей, в которой органические полупроводники находят широкое применение, являются системы беспроводной связи диапазона видимого света VLC (Visible Light Communication). Эти системы обладают многими преимуществами: имеют широкую полосу пропускания в сотни терагерц, не требуют лицензирования, не создают помех для

чувствительного электронного оборудования, интегрируются в существующую инфраструктуру освещения на светодиодных лампах.

Для систем VLC на основе органических полупроводников строятся светодиоды и фотоэлементы, включая как фотоэлектрические элементы, так и ОФД. Последние привлекательны для систем VLC благодаря более высокой чувствительности в видимом диапазоне в сравнении с кремниевыми фотодиодами.

Первые публикации о разработке систем VLC на основе РЗНТ:РСВМ появились в 2013 году. В [17] приведены результаты исследования эффективности ОФД с объемным гетеропереходом на основе поли [3–гексилтиофена] РЗНТ: РСВМ для систем VLC. Экспериментальная система связи с ОФД исследовалась при передаче аудиосигнала внутри помещения. Результаты разработки ОФД в качестве приемников в системах беспроводной оптической связи VLC также приведены в [18]. Организована передача данных со скоростью 3.75 Мбит/с, с использованием белого люминофорного светодиода как передатчика. Активный слой в ОФД был нанесен распылением смеси РЗНТ в качестве материала-донора и РС₆₁ВМ в качестве материала-акцептора. Авторы отметили возможность создания таких органических фотодиодов с чрезвычайно низкой стоимостью материалов. Рассмотренная относительно простая технология изготовления ОФД крайне важна для систем VLC.

В [19] для организации оптимальной схемы высокоскоростной оптической беспроводной связи сравниваются два различных типа слоев ОФД с фуллереновым акцептором: объемный гетеропереход (ВНЖ) и плоский гетеропереход (РНЖ). Выделяются наиболее важные свойства ОФД как приемника связи: быстродействие и квантовая эффективность EQE. При длине волны 550 нм EQE для ОФД с ВНЖ составило 45,6%, что удовлетворяет требованиям для ОФД в качестве приемника VLC для преобразования света в электрические сигналы. ОФД с РНЖ продемонстрировал более низкий EQE, равный 24,5%. Благодаря изготовлению объемных и плоских донорно-акцепторных гетеропереходов, повышающих светочувствительность ОФД, максимальное значение скорости передачи данных в реальном времени составило 150 Мбит/с при использовании сочетания предварительной настройки и цифровой обработки сигналов на основе машинного обучения.

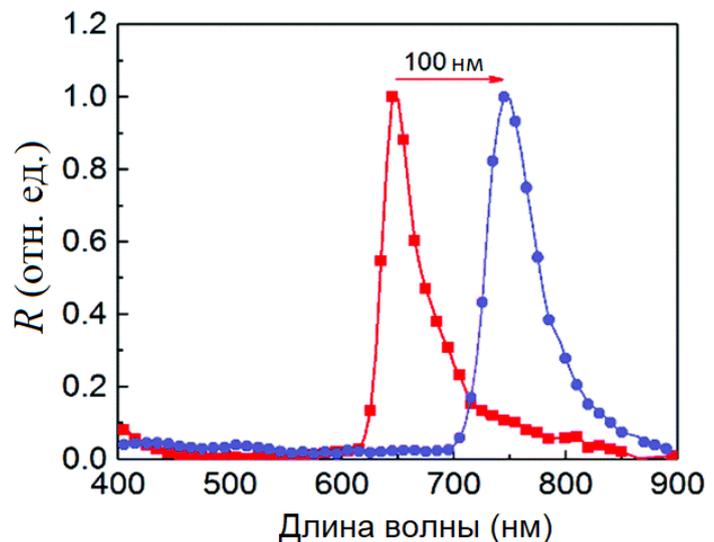
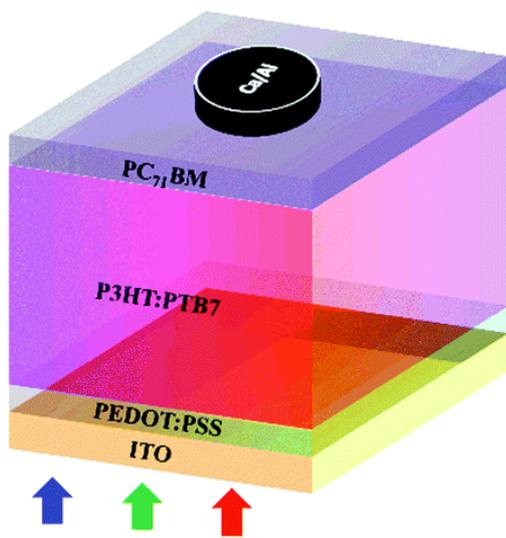
Быстродействие ОФД является также крайне важной характеристикой для систем оптической связи. В [20] рассматриваются быстродействующие органические фотодиоды, использующие производные поли (9,9–диоктилфлуорена) и фуллерена, полученные методом растворения. В [21] исследовано влияние вертикальной подвижности зарядов на частотную характеристику двухслойных органических фотодиодов с фуллереном С₆₀ в качестве акцепторного материала. Изменение вертикальной подвижности дырок с $2.3 \cdot 10^{-5}$ до $2.8 \cdot 10^{-4}$ см² / (В · с) увеличивает полосу пропускания ОФД с 10 до 80 МГц, что напрямую влияет на его быстродействие. Также при изготовлении высокоскоростных ОФД возникают проблемы, связанные с большим темновым током. В [22] повышается быстродействие ОФД на планарном гетеропереходе с полосой пропускания 107 МГц. Организована передача данных со скоростью 40 Мбит/с. Темновой ток ОФД эффективно подавляется с помощью управления инжекцией в системе электродов.

ОФД обеспечивают преимущества при изготовлении спектрально-селективных фотоприемников. Спектрально-селективное обнаружение сигнала сложнее достичь при использовании неорганических фотоприемников – требуется дополнительное подключение оптических фильтров [23]. В то время как ОФД способны обеспечить более простую реализацию спектрально-селективных фотоприемников и, следовательно, снизить затраты. Узкополосные селективные фотоприемники имеют важное значение в системах беспроводной и волоконной оптической связи.

Свойство селективности по длине волны делает ОФД более помехоустойчивыми при передаче данных. В [24] рассмотрено создание безфильтровых оптических устройств для декодирования сигнала в ближнем инфракрасном диапазоне в двухканальной системе связи. Гетеропереход РЗНТ / РТВ7–Th:СОi8DFIC:РС₇₁ВМ был использован для создания ОФД с рабочим диапазоном длин волн от 600 до 1050 нм. Отмечается, что разработанный ОФД

может быть перспективным в приложениях сенсорных сетей в рамках Интернета вещей внутри помещений, где видимый свет не должен мешать передаче данных в диапазоне инфракрасного излучения.

Детектирование сигнала в диапазонах красного и ближнего инфракрасного излучения имеет важное значение для многих применений, включая оптическую связь и машинное зрение. Однако этому развитию препятствует ограниченный выбор материалов с малой шириной полосы пропускания. В [25] описывается принцип работы устройства с простой архитектурой органического планарного гетероперехода, который позволяет избирательно активировать экситоны для настройки спектров фотоотклика для изготовления тонкопленочных органических фотодиодов диапазона красного света без дополнительных фильтров. Активный слой формируется нанесением PC₇₁BM на легированный слой из PЗНТ. Структура устройства показана на рис. 4а. При изменении соотношения полимера РТВ7 в PЗНТ одновременно демонстрируются улучшенная чувствительность и смещение пика фотоотклика с 645 нм на длину волны 745 нм (рис. 4б). Кроме того, чувствительность R на длине волны 745 нм увеличена более чем в 5 раз за счет узкополосного фотоотклика (примерно 50 нм) при оптимизированном коэффициенте легирования. В результате достигается высокая удельная обнаружительная способность, превышающая 10¹² Джонс.



а)

б)

Рис. 4. Структура ОФД и его узкополосный отклик [25]

Часто встречающийся сценарий VLC заключается в том, что приемник или передатчик являются автономным устройством, не имеющим прямого доступа к электросети. Примерами такого сценария могут служить датчики мониторинга, мобильные бытовые приборы и смартфоны. Одним из интересных подходов к решению проблемы питания этих устройств является использование фотоэлектрических элементов в качестве источника питания и приемников сигнала VLC. Идея заключается в том, что солнечный элемент будет обладать двойной функциональностью – детектировать свет для приема данных и для получения энергии.

Создание полностью органической и гибкой системы передачи данных на основе видимого света рассмотрено в [26]. На рис. 5 показана схема экспериментальной установки. В цепи приемника использовали фильтры низкой и высокой частоты для обеспечения одновременной двойной функциональности ОФД. Как показали испытания, такая конфигурация может одновременно обеспечивать электропитание приемника мощностью 0.43 мВт и принимать данные со скоростью 42.3 Мбит/с. Для создания такой системы использовались органические элементы на основе материалов РТВ7:PC₇₁BM. Цифровое сообщение с ПК передавалось на генератор сигналов произвольной формы для

формирования аналогового сигнала. Регулировка напряжения смещения осуществлялась источником постоянного напряжения (ИПН). Далее сигнал подавался на красный лазерный диод, излучение коллимировалось с помощью асферической линзы и направлялось на ОФД с акцептором РТВ7:РС₇₁ВМ.

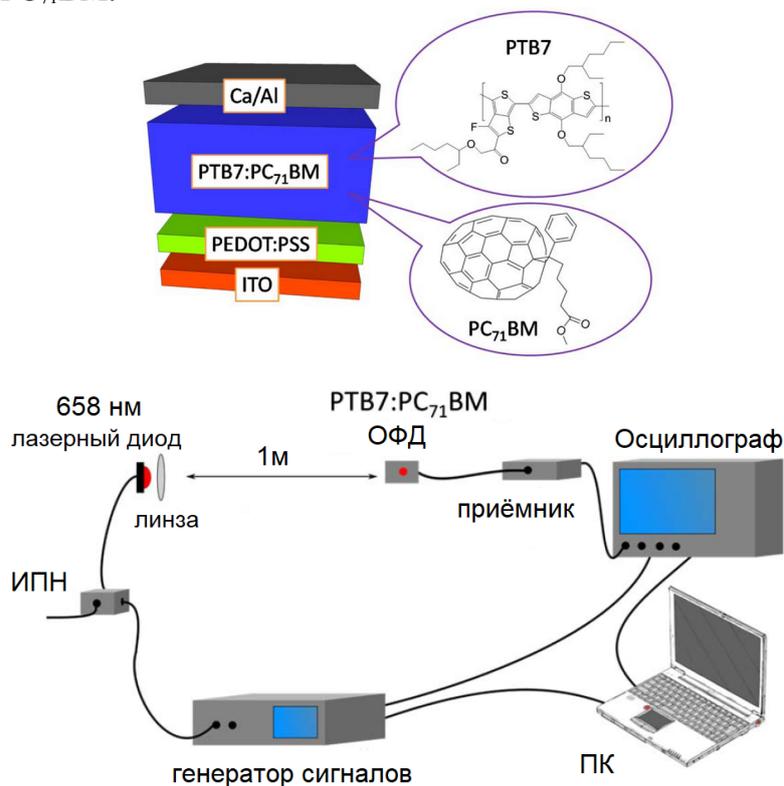


Рис. 5 Схема экспериментальной системы связи VLC

Фотодетектор для одновременного приема данных и генерации электроэнергии от падающего освещения рассмотрен также в [27]. Используя гибкие органические светодиоды и органический фотодиод на основе РЗНТ:РСВМ, осуществлена демонстрация передачи аудиосообщения. Используемый ОФД имеет гибкую конструкции фотоэлемента, изготовленного по технологии «roll-to-roll» на рулонах гибкого пластика. Основная функция используемого ОФД заключается в работе в качестве органического солнечного элемента, но в данной системе ОФД используется еще и в качестве фотоприемника системы связи. Фотоактивный слой РЗНТ:[60]РСВМ был напечатан в лаборатории. На длине волны 550 нм EQE составил 24.3 %, чувствительность составляет 0.144 А/Вт при 532 нм и 0.065 А/Вт при 635 нм.

В [28] исследуется гибридный органо–неорганический фотодиод на основе планарно–объемного гетероперехода Si / C₆₀ / (PTCDA:CuPc) / Au с пленками C₆₀ различной толщины. Показано, что использование пленок C₆₀ в качестве слоя, блокирующего дырки, может эффективно повысить производительность гибридного фотодиода в широком спектральном диапазоне от видимого света до ближнего инфракрасного. В частности с пленкой C₆₀ толщиной 10 нм достигнута высокая производительность при значительно меньшем темновом токе – 25.6 мкА, что в 63 раза меньше, чем без пленки C₆₀. Другие примеры использования ОФД в оптических системах связи можно найти в [29, 30].

В таблице 1 приведены параметры представленных в различных публикациях ОФД и указаны используемые для их создания полимерные наноконпозиционные материалы с фуллеренами. В таблице отражены значения основных параметров ОФД: внешняя квантовая эффективность EQE, чувствительность R и обнаружительная способность D .

Таблица 1. Параметры органических фотодетекторов с различными материалами активного слоя

Ссылка	Активный слой	Спектральный диапазон (нм)	EQE, %	R, А/Вт	D, Джонс
[12]	TIPS-PEN/C ₆₀	350 – 750	н/д*	149.6 (650 нм)	н/д
[13]	C ₆₀ /AICIP	450 – 800	26066 (450 нм)	94.4	1.5·10 ¹³
[14]	NiTPP-C ₆₀	300 – 600	н/д	11,6 (425 нм)	н/д
[7]	PDDTT: PC ₆₀ BM	300 – 1450	26.0 (800 нм)	н/д	2.3·10 ¹³
[15]	PVBTPD и Tri-PC ₆₁ BM	350 – 2500	13.4 (1500 нм)	7·10 ⁻⁶	2.2·10 ¹¹
[16]	ZnPc:C ₆₀ TPDP:C ₆₀	810 – 1550	23.0 (875 нм)	н/д	1.0·10 ¹¹
[31]	ТАРС:C ₇₀	370 – 700	56.0 (370 нм)	0.144	2.5·10 ¹³
[32]	PbPc:C ₇₀	300 – 1100	30.2 (890 нм)	н/д	4.2·10 ¹²
[33]	Poly-C ₆₀ :Cy7-T	400 – 900	23.0 (850 нм)	0.16	1.0·10 ¹²
[34]	ЕНТРРД-МТ:PC ₆₁ BM	400 – 800	20.0 (800 нм)	0.175	н/д
[35]	PC ₇₁ BM:CPDT- <i>alt</i> -BSe	400 – 1200	10.0 (400 нм)	н/д	1.0·10 ¹²
[36]	PTZBTТТ-BDT: PC ₆₁ BM	300 – 1100	16.0 (800 нм)	0.1	1.75·10 ¹³
[37]	P4:PC ₇₁ BM	600 – 1500	6.0 (1200 нм)	н/д	3.0·10 ¹¹
[38]	PC ₇₁ BM: AZO:PDIN, MoO ₃	300 – 1600	33.2 (800 нм)	127.6	~1.0·10 ¹³
[39]	PbPc / C ₆₀	300 – 1100	18.0 (900 нм)	н/д	2.34·10 ¹¹
[40]	PbPc:C ₆₀	400 – 1100	6.3 (970 нм)	0.05	9.0·10 ¹²
[41]	Pfused / C ₆₀	400–1600	10.5 (1400 нм)	н/д	8.2·10 ¹⁰
[42]	DHTBTEZP:PC ₆₁ BM	380-960	23.5 (800 нм)	н/д	4.56·10 ¹²

* н/д – нет данных

Относительно недавно новый класс нефуллереновых акцепторов продемонстрировал высокие коэффициенты поглощения. Данная тема вызвала широкий интерес среди исследователей. Например, в [43] продемонстрирован ОФД с комбинированными последовательно гетеропереходами на основе фуллереновых и нефуллереновых акцепторов PBDTBDD: PC₆₀BM:ITIC. Такой ОФД демонстрирует расширенную область светочувствительности и более высокую эффективность преобразования энергии в сравнении с традиционными двухкомпонентными гетеропереходами PBDTBDD:PC₆₀BM и PBDTBDD:ITIC. Кроме того, отличительной особенностью ITIC является более высокое поглощение в диапазоне 600-800 нм по сравнению с производными фуллерена, что позволяет расширить спектральный диапазон ОФД. Также в [44] отмечается увеличение эффективности фотоэлемента, если в качестве третьего компонента гетероперехода PD:Y6 использовать два акцептора фуллеренов PCBM и ET18.

Представляет также интерес исследование возможностей использования фуллерита в компонентах радиотехники, таких как электрические конденсаторы, микрополосковые линии, фильтры и др. Одним из наиболее важных параметров, существенно влияющих на работу этих устройств, является диэлектрическая проницаемость материала и ее температурная стабильность. В [45] исследовались диэлектрические свойства фуллеренов C₆₀–C₇₀ и возможности применения материалов в радиоэлектронных компонентах. Показано, что диэлектрический материал на основе твердого раствора 0.85C₆₀–0.15C₇₀ обладает эксплуатационными характеристиками, сопоставимыми со свойствами известных полимерных диэлектриков, таких, например, как полистирол, и даже несколько превосходит их, что делает его перспективным материалов для получения электрических конденсаторов, активных элементов гибкой органической электроники

В [46] приведены результаты исследования поликристаллических пленок фуллерита C₆₀, которые, в отличие от монокристаллов C₆₀, более дешевы и доступны, что открывает широкие возможности по созданию разнообразных полупроводниковых устройств – диодов, транзисторов, ячеек памяти и фотоячеек.

Литература

1. *Choi W., Cho M. Y., Konar A., Lee J. H., Cha G. B., Hong S. C., S.* Phototransistors: High-Detectivity Multilayer MoS₂ Phototransistors with Spectral Response from Ultraviolet to Infrared // *Advanced Materials*. 2012. V. 24, no. 43. P. 5902-5902.
2. *Martinez J., Osorio-Roman I., Gualdrón-Reyes A.F.* Progress of Organic/Inorganic Luminescent Materials for Optical Wireless Communication Systems. *Photonics*. 2023. V.10, no. 6. P. 659-676.
3. *Tuktarov A. R., Salikhov R. B., Khuzin A. A., Popodko N. R., Safargalin I. N., Mullagaliev I. N., Dzhemilev U. M.* Photocontrolled organic field effect transistors based on the fullerene C₆₀ and spiropyran hybrid molecule, *RSC Adv*. 2019. V. 9, no. 13, P. 7505-7508.
4. *Ollearo R., Ma, X., Akkerman H. B., Fattori M., Dyson M. J., van Breemen A. J.* Vitality surveillance at distance using thin-film tandem-like narrowband near-infrared photodiodes with light-enhanced responsivity // *Science Advances*. 2023. V. 9, no. 7, P.10.
5. *Clark, J., Lanzani, G.* Organic photonics for communications // *Nature Photonics*. 2010. Vol. 4, no. 7. P. 438–446.
6. *Sachdeva S., Singh D., Surya S. K.* Study of Electrical Properties of Fullerene Based All-Small-Molecule Organic Devices with and Without Cathode Buffer Layers for Photovoltaic Application // *Physica B: Condensed Matter*. 2024. V. 695. P. 416552.
7. *Gong X., Tong M., Xia Y., Cai W., Moon, J. S., Cao, Y. Heeger, A. J.* High-Detectivity Polymer Photodetectors with Spectral Response from 300 nm to 1450 nm // *Science*. 2009. V. 325, no. 5948. P. 1665–1667.
8. *Guo F., Xiao Z., Huang J.* Fullerene Photodetectors with a Linear Dynamic Range of 90 dB Enabled by a Cross-Linkable Buffer Layer // *Advanced Optical Materials*. 2013. V1, no. 4. P. 289–294.
9. *Yao, Y., Chen, Y., Wang, H., Samorì, P.* Organic photodetectors based on supramolecular nanostructures // *SmartMat*. 2020. V. 1, no. 1. P. 30.
10. *Liu K, Gao S, Zheng Z.* Spatially Confined Growth of Fullerene to Super Long Crystalline Fibers in Supramolecular Gels for High-Performance Photodetector // *Adv. Mater*. 2019. V.31, no. 18. P.1-10.
11. *Zheng S., Xiong X., Zheng Z., Xu T., Zhang L., Zhai T., Lu X.* Solution-grown large-area C₆₀ single-crystal arrays as organic photodetectors // *Carbon*. 2018. V.126. P. 299–304.
12. *Zhao X., Liu T., Liu H., Wang S., Li X., Zhang Y. Dennis T. J. S.* Organic Single-Crystalline p–n Heterojunctions for High-Performance Ambipolar Field-Effect Transistors and Broadband Photodetectors // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018. V.10, no. 49. P. 42715-42722.
13. *Du L., Luo X., Zhao F., Lv W., Zhang J., Peng Y., Wang Y.* Toward facile broadband high photoresponse of fullerene based phototransistor from the ultraviolet to the near-infrared region // *Carbon*. 2016. V. 96. P. 685–694.
14. *Su M., Hu Y., Yu A., Peng Z., Long W., Gao S., Peng P., Su B., Li F.-F.* Molecular engineering for high-performance fullerene broadband photodetectors // *Nanoscale Advances*. 2021. V. 3. P. 1096-1105.
15. *Zheng L., Zhu T., Xu W., Liu L., Zheng J., Gong X., Wudl F.* Solution-processed broadband polymer photodetectors with a spectral response of up to 2.5 μm by a low bandgap donor–acceptor conjugated copolymer // *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. V. 6. P. 3634–3641.
16. *Siegmund B., Mischok A., Benduhn J., Zeika, O., Ullbrich S., Nehm F. Vandewal K.* Organic narrowband near-infrared photodetectors based on intermolecular charge-transfer absorption // *Nat Commun*. 2017. V. 8. P.6.
17. *Arredondo B., Romero B., Pena J.M. S., Fernandez-Pacheco A., Alonso E., Vergaz R., De Dios C.* Visible light communication system using an organic bulk heterojunction photodetector // *Sensors*. 2013. V. 13, no. 9. P. 12266–12276.
18. *Ghassemlooy Z., Haigh P.A., Arca F., Tedde S.F., Hayden O., Papakonstantinou I., Rajbhandari S.* Visible light communications: 3.75 Mb/s data rate with a 160 kHz bandwidth

- organic photodetector and artificial neural network equalization // *Photon. Res.* 2013. V.1, no. 2. P.65-68.
19. *Cho S., Heo C.J., Lim Y., Oh S., Minami D., Yu M., Chun H., Yun S., Seo H., Fang F.* Small Molecule Based Organic Photo Signal Receiver for High-Speed Optical Wireless Communications // *Adv. Sci.* 2022. V. 9. P.1-10.
 20. *Ohmori Y., Hamasaki T., Kajii H., Morimune T.* Organic photo sensors operating at high speed utilizing poly(9,9-dioctylfluorene) derivative and fullerene derivative fabricated by solution process // *Optical Sensors.* 2009. V. 7356. P.8.
 21. *Tsai W.W., Chao Y.C., Chen E.C., Zan H.W.* Increasing organic vertical carrier mobility for the application of high speed bilayered organic photodetector // *Applied Physics Letters.* 2009. V.95, no.21. P. 3.
 22. *Zheng J., Yang D., Guo D., Yang L., Li J., Ma D.* An Ultrafast Organic Photodetector with Low Dark Current for Optical Communication Systems // *ACS Photonics.* 2023. V.10, no. 5. P. 1382–1388.
 23. *Wang Y., Kublitski J., Xing S.* Narrowband organic photodetectors –Towards miniaturized, spectroscopic sensing // *Mater Horiz.* 2022. V. P. 220–251.
 24. *Lan Z., Lau Y.S., Wang Y., Xiao Z., Ding L., Luo D., Zhu F.* Filter-free band-selective organic photodetectors // *Adv. Opt. Mater.* 2020. V. 8, no. 24. P. 12.
 25. *Xing S., Wang X., Guo E., Kleemann H., Leo K.* Organic thin-film red-light photodiodes with tunable spectral response via selective exciton activation // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2020. V. 12. P. 13061–13067.
 26. *Zhang S., Tsonev D., Videv S., Ghosh S., Turnbull G.A.* Organic solar cells as high-speed data detectors for visible light communication // *Optica.* 2015. V.2. P. 607–610.
 27. *Vega-Colado C., Arredondo B., Torres J., Lopez-Fraguas E., Vergaz R.* An All-Organic Flexible Visible Light Communication System // *Sensors.* 2018. V. 18, no. 9. P. 12.
 28. *Zhou Z., Liao G., Song X.* Significant Detectivity Enhancement of Broad Spectral Organic–Inorganic Hybrid Photodiodes by C₆₀ Film as Hole-Blocking Layer // *Nanoscale Res Lett.* 2022. V. 17, no. 19. P. 9.
 29. *Shan T., Hou X., Yin X.* Organic photodiodes: device engineering and applications // *Front. Optoelectron.* 2022. V. 15, no. 49. P.33.
 30. *Manousiadis P.P., Yoshida K., Turnbull G.A.* Organic semiconductors for visible light communications // *Phil. Trans. R. Soc.* 2020. V. 378. P. 18.
 31. *Yang, D., Ma, D.* 1,1-Bis [(di-4-tolylamino) phenyl] cyclohexane for fast response organic photodetectors with high external efficiency and low leakage current // *Journal of Materials Chemistry C.* 2013. V.1, no.10. P.2054-2060.
 32. *Su Z., Hou F., Wang X., Gao Y., Jin F., Zhang G., Li W.* High-Performance Organic Small-Molecule Panchromatic Photodetectors // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. V. 7. P. 2529-2534.
 33. *Zhang H., Jenatsch S., De Jonghe J., Nuesch F., Steim R., Veron A. C., Hany R.* Transparent Organic Photodetector using a Near-Infrared Absorbing Cyanine Dye // *Sci. Rep.* 2015. V.5, P.6.
 34. *Lee H., Nam S., Kwon H., Lee S.* Solution-processable all-small molecular bulk heterojunction films for stable organic photodetectors: near UV and visible light sensing // *Journal of Materials Chemistry C.* 2015. V. 3, no. 7. P.1513.
 35. *Wu Z., Yao W., London A. E., Azoulay J. D.* Temperature-dependent detectivity of near-infrared organic bulk heterojunction photodiodes // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. V.9. P.1654–1660.
 36. *Hu X., Dong Y., Huang F., Gong X., Cao Y.* Solution-processed high-detectivity near-infrared polymer photodetectors fabricated by a novel low-bandgap semiconducting polymer // *Journal of Phys Chem C.* 2013. V. 117. P. 6537-6543.
 37. *London A.E., Huang L., Zhang B.A.* Donor–acceptor polymers with tunable infrared photoresponse // *Polym Chem.* 2017. V. 8. P. 2922-2930.

38. Han J., Yang D., Ma D., Qiao W., Wang Z.Y. Low-bandgap polymers for high-performance photodiodes with maximal EQE near 1200 nm and broad spectral response from 300 to 1700 nm // *Adv Opt Mater.* 2018. V. 6. P. 7.
39. Wang X., Li H., Su Z. Efficient organic near-infrared photodetectors based on lead phthalocyanine/C₆₀ heterojunction // *Org Electron.* 2014. V.15. P. 2367-2371.
40. Choi M., Chae S., Kim H., Kim J. Control of crystallinity in PbPc:C₆₀ blend film and application for inverted near-infrared organic photodetector // *ACS Appl Mater Interfaces.* 2018. V.10. P. 25614-25620.
41. Zimmerman J.D., Yu E.K., Diev V.V. Use of additives in porphyrin-tape/C₆₀ near-infrared photodetectors // *Org Electron.* 2011. V. 12. P. 869-873.
42. Li L., Huang Y., Peng J., Cao Y., Peng X. Highly responsive organic near-infrared photodetectors based on a porphyrin small molecule // *J Mater Chem C.* 2014. V. 2. P. 4.
43. Liu H., Li J., Xia L., Bai Y., Hu S., Liu J. Perfect complementary in absorption spectra with fullerene, nonfullerene acceptors and medium band gap donor for high-performance ternary polymer solar cells // *ACS Appl Mater Interfaces.* 2018. V. 10. P. 29831–29839.
44. Trippodo E., Campisciano V., Feng L-W., Chen Y., Huang W. Air-stable ternary organic solar cells achieved by using fullerene additives in non-fullerene acceptor-polymer donor blends // *Journal of Materials Chemistry C.* 2023. V. 11, no. 24. P. 8074–8083.
45. Короткова Т. Н., Коротков Л. Н., Панкова М. А. Диэлектрические свойства фуллеритов C₆₀ – C₇₀ и возможности применения материалов в радиоэлектронных компонентах // *Вестник Воронежского института МВД России.* 2021. № 1. С.169-174.
46. Долженко Д. И., Бородзюля В. Ф., Захарова И. Б., Сударь Н. Т. Влияние тока, ограниченного объемным зарядом, на диэлектрические свойства поликристаллических пленок фуллерита C₆₀ // *Журнал технической физики.* – 2021. – Т. 91. – №. 1. – С. 58-63.

Кусайкин Дмитрий Вячеславович

к.т.н., доцент кафедры многоканальной электрической связи, Уральский технический институт связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (УрТИСИ СибГУТИ, 620109, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15), e-mail: kusaykin@mail.ru.

Куанышев Валерий Таукенович

к.ф.-м.н., заведующий кафедрой высшей математики и физики, Уральский технический институт связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (УрТИСИ СибГУТИ, 620109, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15), e-mail: kuan06@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9744-684X.

Барбин Николай Михайлович

д.т.н., профессор кафедры высшей математики и физики, Уральский технический институт связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (УрТИСИ СибГУТИ, 620109, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15), e-mail: nmbarbin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6709-4334.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Applications of fullerenes in organic photodetectors

Dmitry V. Kusakin¹, Valery T. Kuanyshhev¹, Nikolai M. Barbin^{1,2}

¹Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics in Yekaterinburg (UrTISI SibGUTI)

²Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia

Abstract: Fullerene is currently attracting considerable attention from researchers because it has many applications in various fields. Fullerene molecules have unique structural, electronic and optical properties that can be used to create optoelectronic devices. Currently, the use of fullerenes in photodetectors is actively discussed in the scientific literature. In this regard, this review is devoted to organic photodetectors developed using fullerene nanostructures. The latest achievements in the field of fullerene-based organic photodetectors and their application in wireless optical communication systems in the visible wavelength range are considered.

Keywords: fullerenes, organic photodetectors, heterojunction, optoelectronic devices, photovoltaic systems, communication systems.

For citation: Kusakin D. V., Kuanyshhev V. T. Barbin N.M. Applications of fullerenes in organic photodetectors [Paper Preparation Manual for Vestnik SibGUTI]. *Vestnik SibGUTI*, 2025, vol. 19, no. 2, pp. 25-39. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-2-25-39>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Kusakin D. V., Kuanyshhev V. T.
Barbin N. M. 2025

The article was submitted: 20.08.2024;
accepted for publication 14.10.2024.

References

1. Choi W., Cho M. Y., Konar A., Lee J. H., Cha G. B., Hong S. C., Kim S., Kim J, Jena D., Joo J., Kim S. Phototransistors: High-Detectivity Multilayer MoS₂ Phototransistors with Spectral Response from Ultraviolet to Infrared // *Advanced Materials*. 2012. V. 24, no. 43. P. 5902-5902.
2. Martinez J., Osorio-Roman I., Gualdron-Reyes A.F. Progress of Organic/Inorganic Luminescent Materials for Optical Wireless Communication Systems. *Photonics*. 2023. V.10, no. 6. P. 659-676.
3. Tuktarov A. R., Salikhov R. B., Khuzin A. A., Popodko N. R., Safargalin I. N., Mullagaliev I. N., Dzhemilev U. M. Photocontrolled organic field effect transistors based on the fullerene C₆₀ and spiropyran hybrid molecule, *RSC Adv*. 2019. V. 9, no. 13, P. 7505-7508.
4. Ollearo R., Ma, X., Akkerman H. B., Fattori M., Dyson M. J., van Breemen A. J. Vitality surveillance at distance using thin-film tandem-like narrowband near-infrared photodiodes with light-enhanced responsivity // *Science Advances*. 2023. V. 9, no. 7, P.10.
5. Clark, J., Lanzani, G. Organic photonics for communications // *Nature Photonics*. 2010. Vol. 4, no. 7. P. 438–446.
6. Sachdeva S., Singh D., Surya S. K. Study of Electrical Properties of Fullerene Based All-Small-Molecule Organic Devices with and Without Cathode Buffer Layers for Photovoltaic Application // *Physica B: Condensed Matter*. 2024. V. 695. P. 416552.
7. Gong X., Tong M., Xia Y., Cai W., Moon, J. S., Cao, Y. Heeger, A. J. High-Detectivity Polymer Photodetectors with Spectral Response from 300 nm to 1450 nm // *Science*. 2009. V. 325, no. 5948. P. 1665–1667.
8. Guo F., Xiao Z., Huang J. Fullerene Photodetectors with a Linear Dynamic Range of 90 dB Enabled by a Cross-Linkable Buffer Layer // *Advanced Optical Materials*. 2013. V1, no. 4. P. 289–294.
9. Yao, Y., Chen, Y., Wang, H., Samori, P. Organic photodetectors based on supramolecular nanostructures // *SmartMat*. 2020. V. 1, no. 1. P. 30.
10. Liu K, Gao S, Zheng Z. Spatially Confined Growth of Fullerene to Super Long Crystalline Fibers in Supramolecular Gels for High-Performance Photodetector // *Adv. Mater*. 2019. V.31, no. 18. P.1-10.

11. Zheng S., Xiong X., Zheng Z., Xu T., Zhang L., Zhai T., Lu X. Solution-grown large-area C₆₀ single-crystal arrays as organic photodetectors // *Carbon*. 2018. V.126. P. 299–304.
12. Zhao X., Liu T., Liu H., Wang S., Li X., Zhang Y. Dennis T. J. S. Organic Single-Crystalline p–n Heterojunctions for High-Performance Ambipolar Field-Effect Transistors and Broadband Photodetectors // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018. V.10, no. 49. P. 42715–42722.
13. Du L., Luo X., Zhao F., Lv W., Zhang J., Peng Y., Wang Y. Toward facile broadband high photoresponse of fullerene based phototransistor from the ultraviolet to the near-infrared region // *Carbon*. 2016. V. 96. P. 685–694.
14. Su M., Hu Y., Yu A., Peng Z., Long W., Gao S., Peng P., Su B., Li F.-F. Molecular engineering for high-performance fullerene broadband photodetectors // *Nanoscale Advances*. 2021. V. 3. P. 1096–1105.
15. Zheng L., Zhu T., Xu W., Liu L., Zheng J., Gong X., Wudl F. Solution-processed broadband polymer photodetectors with a spectral response of up to 2.5 μm by a low bandgap donor–acceptor conjugated copolymer // *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. V. 6. P. 3634–3641.
16. Siegmund B., Mischok A., Benduhn J., Zeika, O., Ullbrich S., Nehm F. Vandewal K. Organic narrowband near-infrared photodetectors based on intermolecular charge-transfer absorption // *Nat Commun*. 2017. V. 8. P.6.
17. Arredondo B., Romero B., Pena J.M. S., Fernandez-Pacheco A., Alonso E., Vergaz R., De Dios C. Visible light communication system using an organic bulk heterojunction photodetector // *Sensors*. 2013. V. 13, no. 9. P. 12266–12276.
18. Ghassemlooy Z., Haigh P.A., Arca F., Tedde S.F., Hayden O., Papakonstantinou I., Rajbhandari S. Visible light communications: 3.75 Mbits/s data rate with a 160 kHz bandwidth organic photodetector and artificial neural network equalization // *Photon. Res*. 2013. V.1, no. 2. P.65–68.
19. Cho S., Heo C.J., Lim Y., Oh S., Minami D., Yu M., Chun H., Yun S., Seo H., Fang F. Small Molecule Based Organic Photo Signal Receiver for High-Speed Optical Wireless Communications // *Adv. Sci*. 2022. V. 9. P.1–10.
20. Ohmori Y., Hamasaki T., Kajii H., Morimune T. Organic photo sensors operating at high speed utilizing poly(9,9-dioctylfluorene) derivative and fullerene derivative fabricated by solution process // *Optical Sensors*. 2009. V. 7356. P.8.
21. Tsai W.W., Chao Y.C., Chen E.C., Zan H.W. Increasing organic vertical carrier mobility for the application of high speed bilayered organic photodetector // *Applied Physics Letters*. 2009. V.95, no.21. P. 3.
22. Zheng J., Yang D., Guo D., Yang L., Li J., Ma D. An Ultrafast Organic Photodetector with Low Dark Current for Optical Communication Systems // *ACS Photonics*. 2023. V.10, no. 5. P. 1382–1388.
23. Wang Y., Kublitski J., Xing S. Narrowband organic photodetectors –Towards miniaturized, spectroscopic sensing // *Mater Horiz*. 2022. V. P. 220–251.
24. Lan Z., Lau Y.S., Wang Y., Xiao Z., Ding L., Luo D., Zhu F. Filter-free band-selective organic photodetectors // *Adv. Opt. Mater*. 2020. V. 8, no. 24. P. 12.
25. Xing S., Wang X., Guo E., Kleemann H., Leo K. Organic thin-film red-light photodiodes with tunable spectral response via selective exciton activation // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020. V. 12. P. 13061–13067.
26. Zhang S., Tsonev D., Videv S., Ghosh S., Turnbull G.A. Organic solar cells as high-speed data detectors for visible light communication // *Optica*. 2015. V.2. P. 607–610.
27. Vega-Colado C., Arredondo B., Torres J., Lopez-Fraguas E., Vergaz R. An All-Organic Flexible Visible Light Communication System // *Sensors*. 2018. V. 18, no. 9. P. 12.
28. Zhou Z., Liao G., Song X. Significant Detectivity Enhancement of Broad Spectral Organic–Inorganic Hybrid Photodiodes by C₆₀ Film as Hole-Blocking Layer // *Nanoscale Res Lett*. 2022. V. 17, no. 19. P. 9.
29. Shan T., Hou X., Yin X. Organic photodiodes: device engineering and applications // *Front. Optoelectron*. 2022. V. 15, no. 49. P.33.
30. Manousiadis P. P., Yoshida K., Turnbull G. A. Organic semiconductors for visible light communications // *Phil. Trans. R. Soc*. 2020. V. 378. P. 18.
31. Yang, D., Ma, D. 1,1-Bis [(di-4-tolylamino) phenyl] cyclohexane for fast response organic photodetectors with high external efficiency and low leakage current // *Journal of Materials Chemistry C*. 2013. V.1, no.10. P.2054–2060.

32. *Su Z., Hou F., Wang X., Gao Y., Jin F., Zhang G., Li W.* High-Performance Organic Small-Molecule Panchromatic Photodetectors // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2015. V. 7. P. 2529-2534.
33. *Zhang H., Jenatsch S., De Jonghe J., Nuesch F., Steim R., Veron A. C., Hany R.* Transparent Organic Photodetector using a Near-Infrared Absorbing Cyanine Dye // *Sci. Rep.* 2015. V.5, P.6.
34. *Lee H., Nam S., Kwon H., Lee S.* Solution-processable all-small molecular bulk heterojunction films for stable organic photodetectors: near UV and visible light sensing // *Journal of Materials Chemistry C*. 2015. V. 3, no. 7. P.1513.
35. *Wu Z., Yao W., London A. E., Azoulay J. D.* Temperature-dependent detectivity of near-infrared organic bulk heterojunction photodiodes // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. V.9. P.1654–1660.
36. *Hu X., Dong Y., Huang F., Gong X., Cao Y.* Solution-processed high-detectivity near-infrared polymer photodetectors fabricated by a novel low-bandgap semiconducting polymer // *Journal of Phys Chem C*. 2013. V. 117. P. 6537-6543.
37. *London A.E., Huang L., Zhang B.A.* Donor–acceptor polymers with tunable infrared photoresponse // *Polym Chem*. 2017. V. 8. P. 2922-2930.
38. *Han J., Yang D., Ma D., Qiao W., Wang Z.Y.* Low-bandgap polymers for high-performance photodiodes with maximal EQE near 1200 nm and broad spectral response from 300 to 1700 nm // *Adv Opt Mater*. 2018. V. 6. P. 7.
39. *Wang X., Li H., Su Z.* Efficient organic near-infrared photodetectors based on lead phthalocyanine/C₆₀ heterojunction // *Org Electron*. 2014. V.15. P. 2367-2371.
40. *Choi M., Chae S., Kim H., Kim J.* Control of crystallinity in PbPc:C₆₀ blend film and application for inverted near-infrared organic photodetector // *ACS Appl Mater Interfaces*. 2018. V.10. P. 25614-25620.
41. *Zimmerman J.D., Yu E.K., Diev V.V.* Use of additives in porphyrin-tape/C₆₀ near-infrared photodetectors // *Org Electron*. 2011. V. 12. P. 869-873.
42. *Li L., Huang Y., Peng J., Cao Y., Peng X.* Highly responsive organic near-infrared photodetectors based on a porphyrin small molecule // *J Mater Chem C*. 2014. V. 2. P. 4.
43. *Liu H., Li J., Xia L., Bai Y., Hu S., Liu J.* Perfect complementary in absorption spectra with fullerene, nonfullerene acceptors and medium band gap donor for high-performance ternary polymer solar cells // *ACS Appl Mater Interfaces*. 2018. V. 10. P. 29831–29839.
44. *Trippodo E., Campisciano V., Feng L-W., Chen Y., Huang W.* Air-stable ternary organic solar cells achieved by using fullerene additives in non-fullerene acceptor-polymer donor blends // *Journal of Materials Chemistry C*. 2023. V. 11, no. 24. P. 8074–8083.
45. *Korotkova T. N., Korotkov L. N., Pankova M. A.* Dielektricheskie svojstva fulleritov C₆₀ – C₇₀ i vozmozhnosti primeneniya materialov v radioelektronnyh komponentah // *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*. 2021. № 1. C.169-174.
46. *Dolzhenko D. I., Borodzyulya V. F., Zaharova I. B., Sudar' N. T.* Vliyanie toka, ogranichenogo ob"emnym zaryadom, na dielektricheskie svojstva polikristallicheskih plenok fullerita C₆₀ // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. – 2021. – T. 91. – №. 1. – S. 58-63.

Dmitry V. Kusaykin

Ph.D., Associate Professor of the Department of Multichannel Electrical Communication, Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) Siberian State University of Telecommunications and Informatics (UrTICI SibGUTI, 620109, Yekaterinburg, Repina str., 15), e-mail: kusaykin@mail.ru.

Valery T. Kuanyshev

Ph.D., Head of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) Siberian State University of Telecommunications and Informatics (UrTICI SibGUTI, 620109, Yekaterinburg, Repina str., 15), e-mail: kuan06@mail.ru.

Nikolai M. Barbin

Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) Siberian State University of Tele-Communications and Informatics (UrTICI SibGUTI, 620109, Yekaterinburg, Repina str., 15), e-mail: nmbarbin@mail.ru.