

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Шершнёва Данила Витальевича

КУРСОВАЯ РАБОТА

Органические фотовольтаические ячейки: изготовление и измерение
характеристик

Практикум по электричеству и магнетизму, 2 курс, группа №18307

Научный руководитель:
старший научный сотрудник,
ИХКГ СО РАН
Уваров М.Н.

«___»_____2019 г.
оценка научного руководителя

Преподаватель практикума

«___»_____2019 г.
Оценка за курсовую работу

Аннотация

Были изготовлены органические фотовольтаические ячейки (ФВЯ), в которых в качестве активного слоя были использованы композиты (смеси) органических соединений. В качестве электрон–донорного компонента композита использовали как полупроводящий полимер поли–3–гексилтиофен, РЗНТ, так и недавно синтезированные полупроводящие малые молекулы ВТR и DRCN5T. В качестве электрон–акцепторной компоненты был использован модифицированный фуллерен C60, РСВМ. Архитектура ФВЯ — ИТО/PEDOT:PSS/активный слой/сплав Филда, где ИТО – прозрачный электрод на основе допированного индием оксида олова, PEDOT:PSS – органический дырочно–проводящий слой толщиной несколько десятков нанометров. Используя свет светодиодного источника видимого излучения, который имел мощность излучения, соответствующую мощности солнечного света (1 кВт/м^2), каждая ячейка была охарактеризована вольтамперными характеристиками, величинами токов короткого замыкания, напряжения холостого хода и фактора заполнения. Были также определены величины коэффициентов фотоэлектрического преобразования (КФП), которые лежат в диапазоне 1 – 4 % для различных образцов ячеек. Величины КФП оказались несколько ниже ячеек с такими же активными слоями, которые представлены в литературных данных.

Научная новизна работы заключается в следующем: впервые созданы органические ФВЯ на основе объёмного гетероперехода в данной архитектуре с композитами на основе малых органических молекул.

Оглавление

Оглавление

Введение.....	5
Теоретическая часть	6
1.1 Принцип работы органического полупроводникового фотоэлемента	6
1.2 Модель органического фотоэлемента с планарным и объёмным гетеропереходом.	7
1.3 Вольтамперные характеристики солнечных фотоэлементов и их связь с коэффициентом полезного действия.	10
Экспериментальная часть	12
1.1 Материалы электродов	12
1.4 Изготовление органических фотовольтаических ячеек.	12
1.4.1 Приготовление растворов активного слоя.....	12
1.4.2 Очистка подложек	13
1.4.3 Нанесение органического слоя на подложку	13
1.4.4 Нанесение электродов.	14
1.5 Измерение фотоэлектрических характеристик.....	14
1.6 Метод обработки результатов.....	15
1.7 Результаты	16
1.8 Оценка погрешностей	17
1.9 Анализ результатов.....	18
Выводы.....	20
Список используемой литературы.....	21
Приложение №1	22

Введение

В связи с уменьшением доли ископаемого топлива на планете с каждым годом возрастает актуальность неисчерпаемых источников энергии. Одно из главных мест в данной области занимает солнечная электроэнергетика. В настоящее время в этой отрасли энергетики лидируют неорганические полупроводниковые фотоэлементы на основе кремния. Однако данный вид солнечных батарей имеет ряд существенных недостатков, из-за которых большая часть солнечной энергетики не может полноценно конкурировать с традиционными источниками энергии. Главным таким недостатком является их относительно сложное производство и, соответственно, большая цена на рынке. Из-за этого во многих районах планеты данный вид солнечных батарей не может окупить свою себестоимость.

Поэтому ведутся активные исследования в области фотовольтаики, направленные на создание более конкурентоспособных фотоэлементов. Одним из самых популярных направлений исследования является органические фотоэлементы, которые состоят из двух полупроводников с разными типами проводимости. Этот вид солнечных батарей обладает рядом полезных свойств, которые могут повысить их эффективность использования. Например, так как они гибкие и имеют малый вес их можно наносить на стёкла больших зданий, у которых большая площадь поверхности окон. Но главное их преимущество в сравнении с кремневыми батареями — это простая технология производства.

Данная работа посвящена исследованию органических солнечных фотоэлементов с активным слоем на основе объёмного гетероперехода, состоящего из новых материалов, структуры которых приведены на рис. П2 (см. приложение).

Цель работы состоит в том, чтобы изготовить и определить основные характеристики образцов ФВЯ с помощью наиболее простой методики — на воздухе и без использования технологии вакуумного нанесения металла — электрода.

Основными задачами работы являются:

1) Создать образцы органических солнечных фотоэлементов (ОСФ) на воздухе с использованием, как полимера, так и малых молекул в качестве полупроводящего материала активного слоя, а также использовать сплав Филда в качестве электрода, наносимого без технологии вакуумного напыления.;

2) Определить параметры изготовленных ОСФ: величины токов короткого замыкания, напряжения холостого хода, факторов заполнения коэффициентов фотоэлектрического преобразования (КФП) для образцов ОСФ.

Теоретическая часть

1.1 Принцип работы органического полупроводникового фотоэлемента

В основе работы полупроводникового фотоэлемента (ФЭ) лежит фотоэлектрический эффект, который состоит в том, что в соответствующем веществе при облучении светом на границе двух полупроводников с разными типами проводимости происходит разделение зарядов на электроны и дырки, а те в свою очередь собираются на соответствующих электродах ФЭ. Полупроводник, в котором основными носителями заряда являются электроны называется донорным, если же являются дырки – акцепторным.

Отличительной особенностью органических полупроводников (ОП) является то, что при поглощении кванта света в ОП появляется квазичастица, которая называется экситон, представляющая собой связанное состояние электрона и дырки. Энергия данной связи находится в диапазоне 0,5 – 1 эВ [1], которая существенно меньше тепловой энергии молекул полупроводника kT , где $k \approx 1.38 \cdot 10^{-23}$. Это означает, что диссоциация экситона, то есть разделение квазичастицы на электрон и дырку, осуществляется большей частью за счёт электрического поля, которое возникает между электродами из-за различных работ выхода и способствует транспорту носителей зарядов во внешний контур.

1.2 Модель органического фотоэлемента с планарным и объёмным гетеропереходом.

Классический ПФЭ состоит из двух электродов с различными работами выхода, между которыми находится активный слой (см. Рис.1(а, б)). Один из электродов должен быть прозрачным, чтобы свет мог достигнуть активного слоя.

Рассмотрим ПФЭ с двухслойной структурой активного слоя, или иначе говоря, солнечный фотоэлемент с планарным гетеропереходом. Его активный слой состоит из двух параллельно расположенных донорного и акцепторного материалов (Рис.1(а)).

Преобразование света в электричество в органических солнечных фотоэлементах с планарным гетеропереходом можно представить, как следующий процесс. Фотоны, которые поглощаются в активном слое, возбуждают молекулы донора, что приводит к возникновению экситонов. После поглощения света происходит диффузия экситонов, то есть движение экситона к границе раздела фаз.

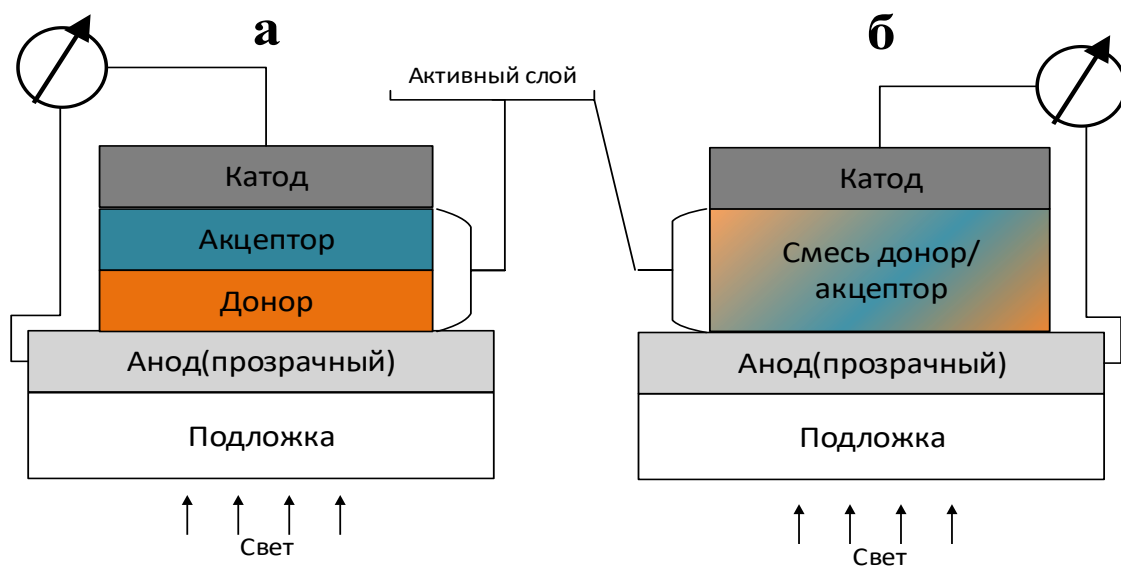


Рис.1. Схематическая структура классической фотовольтаической ячейки с планарным гетеропереходом (а) и ячейки с объёмным гетеропереходом (б). Если они достигают границы донора и акцептора, то происходит перенос электрона с донора на акцептор, а на доноре остаётся дырка. Но электрон и дырка по-прежнему остаются связанными кулоновским взаимодействием [1]. Эта

связанная электронно–дырочная пара расщепляется на свободные электрон и дырку под действием электрического поля, созданного за счёт использования электродов с различными значениями работы выхода. Свободные электроны и дырки направляются электрическим полем к катоду или аноду, далее уходят во внешний контур и дают вклад в фототок. Однако если экситоны возникают далеко от гетероперехода, то они рекомбинируют. Поэтому те экситоны, которые дают вклад в генерацию свободных зарядов, формируются в области, расположенной в пределах длины диффузии (определяемой временем жизни экситона) $L_{\text{диф}}$ от гетероперехода. То есть этот процесс протекает на границе раздела слоев донора и акцептора. Длины диффузии $L_{\text{диф}}$ экситонов во многих органических материалах порядка 10 нм [2], что намного меньше, чем длина поглощения плёнки (около 100 нм), следовательно, это ограничивает толщину полезного слоя, то есть тот объём активного слоя солнечного фотоэлемента, в котором происходит разделение зарядов. Данная проблема была решена с помощью создания ячеек с объёмным гетеропереходом.

Чтобы увеличить КФП органических ПФЭ путём увеличения полезного слоя, нужно продлить границу двух полупроводников по всему объёму активного слоя – в этом и состоит суть работы ячеек с объёмным гетеропереходом. То есть в отличие от планарного гетероперехода, в объёмном гетеропереходе донор и акцептор находятся в виде особой смеси. В этой смеси молекулы донора (акцептора) собираются в агрегаты, которые окружают молекулы акцептора (донора). Если размеры агрегатов, или говоря иначе – характерный размер разделения фаз донора и акцептора меньше длины диффузии экситона, то вероятность рекомбинации экситонов значительно снижается, так как большинство экситонов смогут достигнуть границу раздела фаз. Поэтому процесс разделения зарядов протекает во всём объёме активного слоя. Также стоит сказать о проблеме, связанной с транспортом носителей заряда к соответствующим электродам. Электроны должны иметь возможность двигаться по молекулам акцептора до катода, а дырки – по молекулам донора до анода. Если фазы донора и акцептора имеют строго упорядоченный вид

(Рис.2(б)), то все генерируемые заряды будут достигать соответствующих электродов, иначе заметная доля зарядов останется изолированной от электродов и не будет давать вклад в фототок (Рис.2(а)) [3].

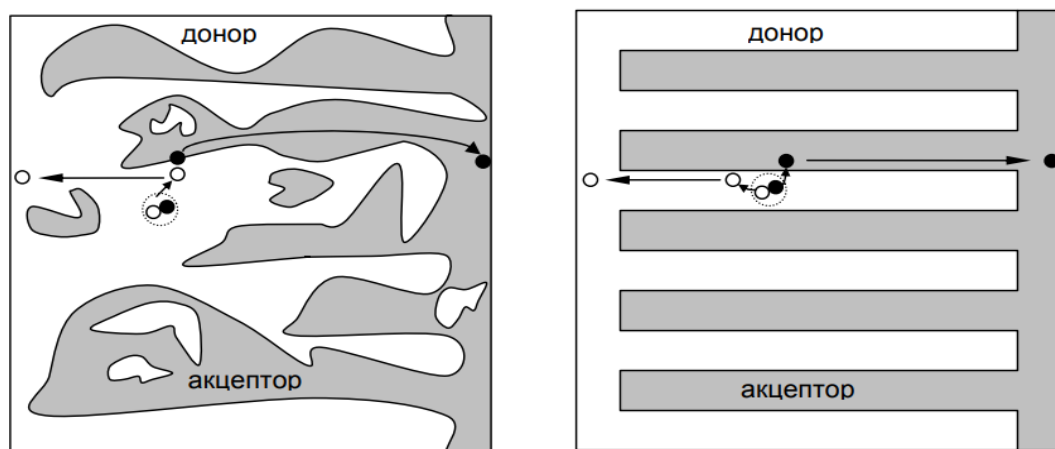


Рис. 2. Объемный гетеропереход (а) и упорядоченный объемный гетеропереход (б).

Однако на практике объёмный гетеропереход получают путём смешивания материалов донора и акцептора. Поскольку толщина активного слоя ФВЯ около 100 нм, а характерный размер фаз – 1 нм, что соответствует длине диффузии экситона, объёмный гетеропереход оказывается оптимальной и легко изготавливаемой структурой для генерации большой концентрации электронов и дырок в активном слое ФВЯ.

Поэтому, в настоящее время, концепция объёмного гетероперехода является наиболее исследуемой в области фотоэлементов на основе сопряженных полимеров и низкомолекулярных органических полупроводников [3]. Недавние исследования органических фотовольтаических ячеек (2019 года) на основе объёмного гетероперехода установили новый рекорд коэффициента полезного действия – 16.6% [4].

1.3 Вольтамперные характеристики солнечных фотоэлементов и их связь с коэффициентом полезного действия.

Основной характеристикой солнечных органических фотоэлементов является вольтамперная кривая – зависимость плотности тока I от напряжения V на электродах фотоэлемента в темноте и при освещении. Вольтамперная характеристика (ВАХ) фотоэлемента должна быть измерена при облучении светом от симулятора солнечного света со спектром, близким к AM1.5 (Air Mass 1.5). Стандартная мощность светового потока составляет 100 мВт/см^2 . Типичная для органических фотоэлементов ВАХ в темноте (штриховая линия) и при освещении (сплошная линия) изображена на рис.3. При измерении ВАХ в темноте кривая имеет классический вид для диода: проходит через начало координат, в первом квадранте начиная с некоторого значения V наблюдается экспоненциальный рост кривой. При освещении наблюдается похожая вольтамперная кривая, что и в темноте, но смещённая на некоторое значение I_{sc} по оси плотности тока I .

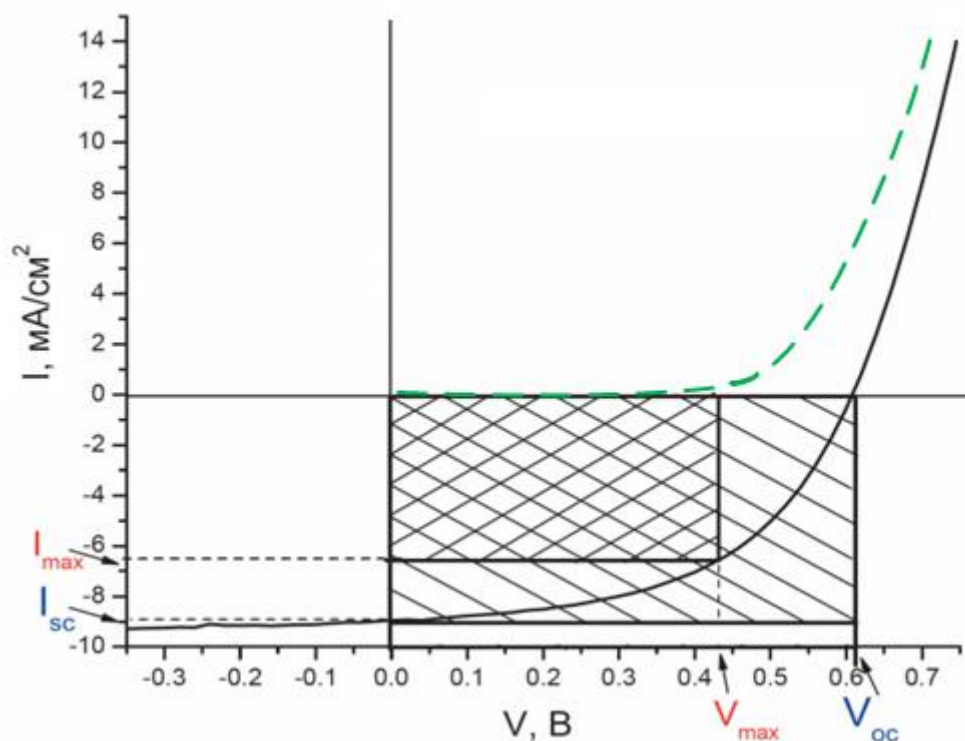


Рис.3. Типичная ВАХ солнечного фотоэлемента в темноте (штриховая линия) и при освещении (сплошная линия). Показаны плотность тока короткого

замыкания I_{sc} и напряжение холостого хода V_{oc} , максимальный ток I_{max} и максимальное напряжение V_{max} .

Смещение происходит, так как при освещении на границе полупроводников происходит разделение зарядов из-за чего у фотоэлемента появляется собственная ЭДС, которая при замыкании электродов ФЭ накоротко выдаёт значение фототока, направление которого противоположно внешнему току от ЭДС измерительного прибора. Таким образом, I_{sc} это плотность тока короткого замыкания или максимальное по модулю значение фототока. Напряжение, которое нужно приложить, чтобы скомпенсировать ЭДС фотоэлемента (т.е. привести ток к нулю), называется напряжением холостого хода V_{oc} . Произведение максимальных тока I_{max} и напряжения V_{max} определяют максимальную энергию, которую может выдать ФЭ в единицу времени. Отношение между $I_{max} * V_{max}$ и $I_{sc} * V_{oc}$ называется фактором заполнения FF:

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}}, \quad (1)$$

Геометрически это выглядит как отношение площади прямоугольника со сторонами I_{max} и V_{max} (меньший прямоугольник на Рис.3) к площади прямоугольника со сторонами I_{sc} и V_{oc} (большой прямоугольник на Рис.3).

Эффективность преобразования мощности фотоэлемента (КФП) есть отношение между максимальной мощностью ФЭ $P_{фэ}$ и мощностью падающего света на площадь фотовольтаической ячейки $P_{света}$:

$$\eta(\%) = \frac{P_{фэ}}{P_{света}} * 100, \quad (2)$$

где $P_{фэ} = I_{max} * V_{max}$ – максимальная мощность фотоэлемента.

Или по-другому:

$$\eta(\%) = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{P_{ист} * S_{яч}}, \quad (3)$$

где $S_{яч}$ – площадь освещаемой области ячейки, которая даёт вклад в фототок.

Экспериментальная часть

Для измерения ВАХ трёх типов ячеек было создано 6 образцов: по 2 образца для каждого типа. Строение готовых стеклянных подложек позволяет получить 6 органических фотовольтаических ячеек площадью около 4 мм^2 . Таким образом, для каждого типа ячеек было получено 12 вольтамперных кривых. Из этих двенадцати ВАХ выбиралась одна, характеристики, которой лучше всего соответствуют типичной вольтамперной характеристике фотодиода (Рис.3).

1.1 Материалы электродов

Материалы электродов для создания верхнего металлического катода использовался сплав Филда (состав – висмут 58 %, индий 17 %, олово 25 %). В качестве первого слоя прозрачного электрода применялась смесь оксидов олова и индия (indium–tin oxide, ITO). Использовались готовые стеклянные подложки размером 20мм x 15 мм с нанесённым паттернированным ITO толщиной 100 нм от производителя Ossila. Для нанесения второго слоя прозрачного электрода, находящегося в контакте с активным слоем, использовался полимер поли–3,4 этилен–диокситиофен (PEDOT: PSS) в виде водной суспензии с концентрацией 1,5 % от производителя Ossila.

1.4 Изготовление органических фотовольтаических ячеек.

В изготовлении образцов можно выделить четыре этапа: приготовление растворов активного слоя, очистка подложек, нанесение органического слоя на подложку, нанесение электродов. Рассмотрим каждый этап более подробно.

1.4.1 Приготовление растворов активного слоя

Для создания трёх растворов донор–акцептор были использованы 4 разных вещества (3 вещества в качестве донора и одно в качестве акцептора). Массовое соотношение донор–акцептор было выбрано 1:08 и концентрация конечного раствора 40 мг/мл, так как эти параметры являются оптимальными для данных типов ФЭЯ [5]. Для того, чтобы раствора хватило на покрытие двух подложек, массы донорного и акцепторного веществ были взяты 6,25 мг и 5 мг соответственно для получения 281 мкл раствора. Массы веществ измерялись с

помощью аналитических весов ViBRA AF 225DRCE первого класса точности с ценой деления 0,01 мг. Далее вещества поочерёдно помещались в вials с септами объёмом 2 мл и заполнялись растворителем. В качестве растворителя использовался перегнанный хлорбензол. Полученный раствор размешивался в ультразвуковой ванне 20 минут при температуре 50°C.

1.4.2 Очистка подложек

Подложки были приобретены в компании Ossila (Великобритания) с нанесённым ИТО. Перед нанесением органических слоёв подвергались очистке. Сначала подложки отмывались руками в резиновых перчатках концентрированным мыльным раствором. В процессе отмывания подложек мыльный раствор наносился и смывался 7 раз для каждой подложки. Далее подложки помещались в ёмкость с этанолом и обрабатывались в ультразвуковой ванне ПСБ–2835–05 (Россия) при 50 в течение 20 минут. Далее подложки обмывались от ацетона под струёй дистиллированной воды, высушивались в потоке воздуха. Затем подложки обрабатывались под ультрафиолетовой лампой в течение 30 минут. После этого подложки обдувались от пыли потоком воздуха из баллона, и на них наносились органические слои.

1.4.3 Нанесение органического слоя на подложку

Перед нанесением раствора подложки обдувались потоком воздуха от пыли и каждый из растворов был нагрет до 100 °C и размешан путём активного встряхивания с помощью специальной установки для того, чтобы он стал более однородным. Органические слои – PEDOT:PSS и активный слой – наносились методом центрифугирования (spin-coating) на воздухе с помощью специальной центрифуги (spincoater T-100, Китай): очищенная подложка приклеивалась с помощью скотча (той стороной, где нет ячеек) на специальную подложку, которая в свою очередь клалась на горизонтальный вращающийся столик с вакуумной присоской, расположенный в центре центрифуги. Таким образом, создавалась плёнка определённой толщины (в зависимости от частоты вращения центрифуги), которая равномерно покрывала всю площадь подложки. Сначала

наносился слой PEDOT:PSS на подложки с ITO, который продавливался в виде водной суспензии на подложку через фильтр с диаметром пор 0.45 мкм и наносилась центрифугированием. Время ускорения 4 с, скорость вращения 6000 об/мин, время вращения на данной скорости 120 с. Данные параметры позволили получить полимерную плёнку PEDOT:PSS толщиной около десяти нанометров. Затем подложки отжигали на воздухе при температуре 140 °С в течении 10 минут. Затем таким же методом наносился активный слой. Параметры центрифугирования были такие: время ускорения 1,5 с, скорость вращения 2000 об/мин, время вращения на данной скорости 120 с.

1.4.4 Нанесение электродов.

Сначала сплав Филда помещался в специальную ёмкость и нагревался до 140°С, так как при этой температуре сплав становится достаточно жидким для нанесения на поверхность. Затем, с помощью стеклянной пипетки жидкий сплав наносился на предварительно нагретые до 140 °С подложки непосредственно на активный слой (см. рис.4. анод).

Таким образом, получился образец, схематично изображённый на рис.4.

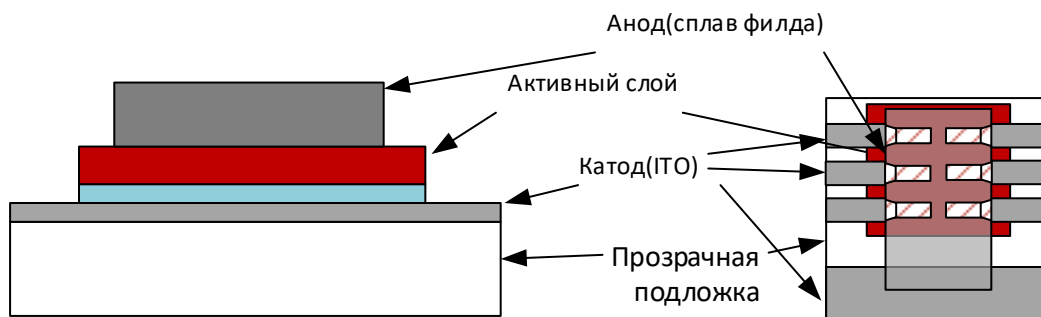


Рис.4.Схематичное изображение образца, который использовался в эксперименте. Вид сбоку(слева) и вид сверху(справа). Фотовольтаические ячейки обозначены заштрихованными областями.

1.5 Измерение фотоэлектрических характеристик

Для измерения вольтамперных характеристик использовалась экспериментальная установка, схематически изображённая на рис.5. Для измерения вольтамперной характеристики образец освещался со стороны

стеклянной подложки. К контактной площадке электрода из сплава Филда и контакту прозрачного электрода прикладывались щупы прибора потенциостата Р20–Х (Россия), который является источником и измерителем тока и напряжения. Данный прибор управлялся с помощью компьютера специальной программой, позволяющей снимать ВАХ в различных диапазонах напряжения с различным шагом. Во время измерения образец освещался светодиодом с мощностью 1кВт/м^2 , соответствующей AM1.5G. Спектр излучения светодиода (график 4, см. приложение) лежит в области видимого света.

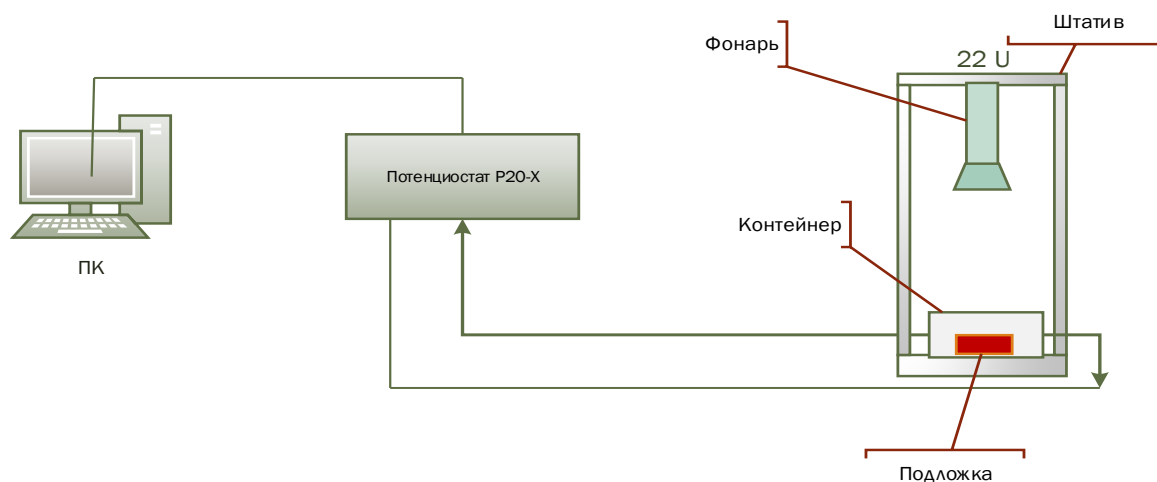


Рис.5. Экспериментальная установка

1.6 Метод обработки результатов

С помощью вольтамперных характеристик, полученных в эксперименте можно определить следующие характеристики: ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, максимальные напряжение и ток в четвёртом квадранте. Из этих данных был получен максимальный фактор заполнения по формуле (5). Обработка производилась с помощью программы написанной в среде GNU Octave. Используя площадь фотофольтаической ячейки $S_{\text{яч}}$ (заштрихованные области рис.4), можно было получить мощность света падающего на ячейку по формуле $P_{\text{ист}} * S_{\text{яч}}$. Таким образом, было получено КФП ячейки по формуле (2).

1.7 Результаты

В качестве результатов имеется 3 вольтамперные характеристики, измеренные при освещении и соответствующие им параметры, полученные из данных графиков. Также представлены результаты измерения ВАХ ячеек без освещения, чтобы убедиться в том, что это диод. Все результаты, полученные из эксперимента, находятся в таблице 1.

Обозначение экспериментальных образцов:

- 1) Образец 11 содержит смесь веществ: P3HT и PCBM в активном слое;
- 2) Образец 22 содержит смесь веществ: BTR и PCBM в активном слое;
- 3) Образец 31 содержит смесь веществ: DRCN5T и PCBM в активном слое.

Таблица 1. Экспериментальные данные учёт погрешностей.

Образец	$S, \text{см}^2$	$I_{sc}, \text{мА/см}^2$	$V_{oc}, \text{мВ}$	FF	$\eta, \%$
11	0.027	15.9	504.5	0.34	2.7
22	0.04	15.5	815.3	0.29	3.6
31	0.019	7.3	805.1	0.31	1.8

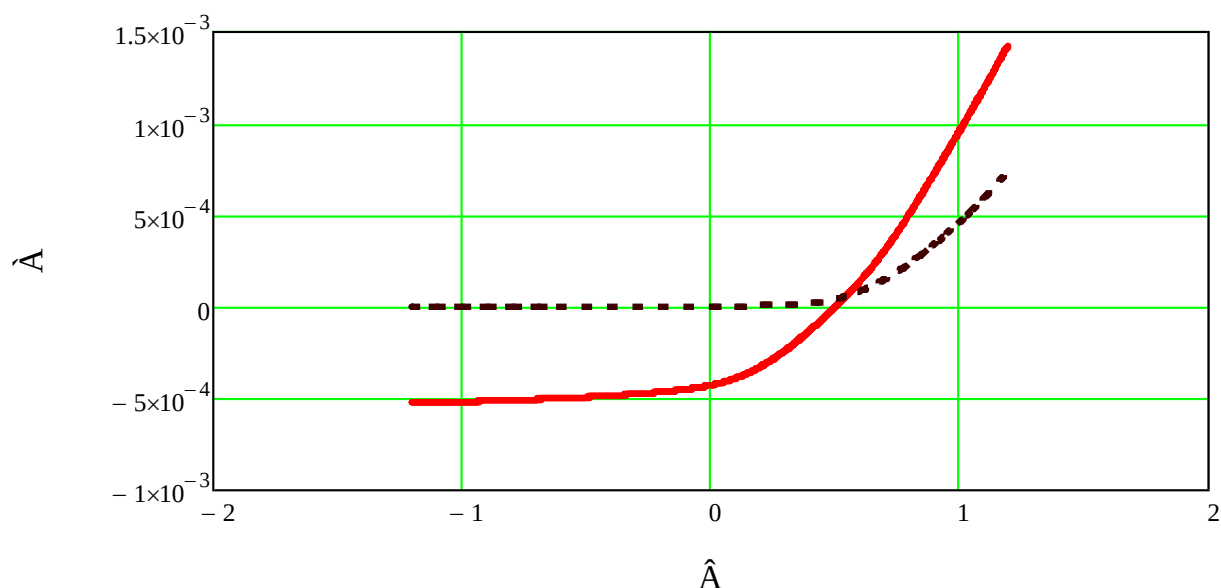


График1. Вольтамперная характеристика образца 11 при освещении (красная сплошная линия) и без освещения (чёрная пунктирная линия).

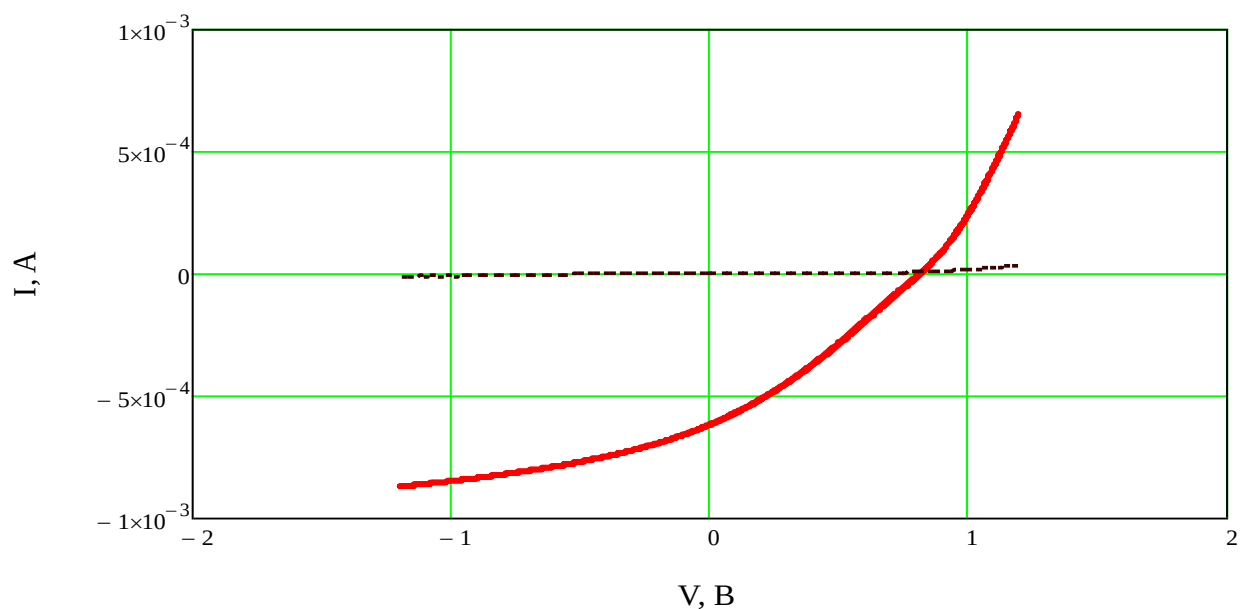


График 2. Вольтамперная характеристика образца 22 при освещении (красная сплошная линия) и без освещения (чёрная пунктирная линия).

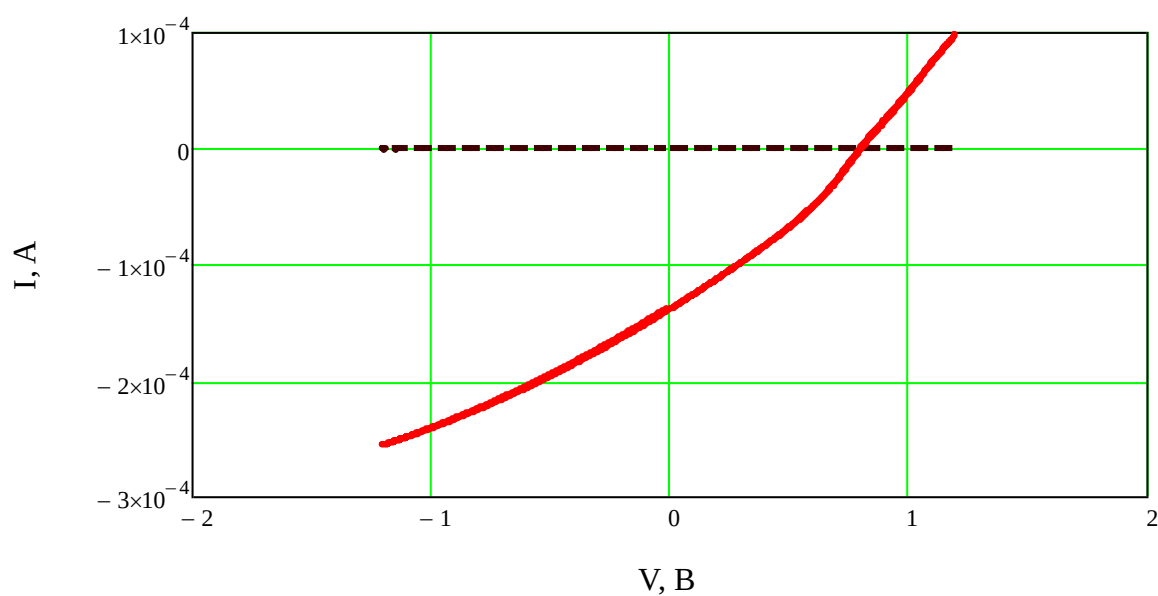


График 3. Вольтамперная характеристика образца 31 при освещении (красная сплошная линия) и без освещения (чёрная пунктирная линия).

1.8 Оценка погрешностей

Для того чтобы оценить погрешность измерения коэффициента полезного действия были оценены погрешности измерения каждой величины, входящей в формулу (2). Таким образом, погрешность измерения тока короткого замыкания составляет: $\Delta I_{sc} = 10^{-6} \text{ A}$, погрешность напряжения холостого хода: $\Delta V_{oc} =$

10^{-4} В, погрешность площади: $\Delta S_{\text{яч}} = 10^{-7}$ (для образцов 11 и 31), $\Delta S_{\text{яч}} = 5 * 10^{-7}$ (образец 22), и погрешность мощности падающего света: $\Delta P_{\text{ист}} = 50$.

Найдём абсолютную погрешность КФП по формуле:

$$\Delta \eta_{\text{абс}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial I_{\text{sc}}} * \Delta I_{\text{sc}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial V_{\text{oc}}} * \Delta V_{\text{oc}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial S_{\text{яч}}} * \Delta S_{\text{яч}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{\text{ист}}} * \Delta P_{\text{ист}}\right)^2} \quad (4)$$

Относительная погрешность определяется формулой:

$$\Delta \eta_{\text{отн}} = \frac{\Delta \eta_{\text{абс}} * 100\%}{\eta}, \quad (5)$$

где η полученное значение КФП для конкретной ячейки.

Полученные погрешности представлены в таблице 2.

Таблица 2. Погрешности измерения КФП трёх образцов.

Образец	$\Delta \eta_{\text{абс}}, \%$	$\Delta \eta_{\text{отн}}, \%$
11	0.17	6.2
22	0.49	13.4
31	0.13	7.3

1.9 Анализ результатов

Образец 11 имеет вид типичной вольтамперной кривой (график 1), как на рис.3. То есть без освещения фотовольтаическая ячейка является диодом, а при освещении – фотодиодом.

Максимальная эффективность оптимизированных фотовольтаических ячеек на основе системы РЗНТ/РСВМ было продемонстрировано в работах [7, 8], и составила около 4–4.5% , плотность тока короткого замыкания около 11–12 мА/см², напряжение холостого хода около 660 мВ, фактор заполнения 0.65. Полученное значение КФП образца 11 (2.7%) вполне согласуется с максимальным результатом для данной архитектуры ячеек, так как в эксперименте была не большая выборка образцов, и технология изготовления ячеек была не оптимальна. Плотность тока короткого замыкания (15.9мА/см²) получилась завышенной вероятней всего потому что электрод из сплава Филда был присоединён не качественно, поэтому на самом деле активная площадь ячейки имеет меньшее значение.

На графике 2 для образца 22 зависимость силы тока от напряжения при освещении имеет похожую зависимость, что и на графике 1 и 3, но вот вольтамперная кривая без освещения (сплошная пунктирная линия) имеет примерно в 10 раз меньший рост силы тока. Можно предположить, что так произошло потому что в отсутствие света носители заряда в активном слое образуются лишь вследствие приложенного напряжения. А при облучении светом образуется большое количество электронов и дырок, которые увеличивают проводимость активного слоя ФВЯ.

Значения тока короткого замыкания I_{sc} и фактора заполнения FF для образца 22 оказались схожими с образцом 11, но напряжение холостого хода V_{oc} получилось значительно больше. Это означает, что разность энергий высшей заполненной молекулярной орбитали (ВЗМО) и низшей свободной молекулярной орбитали (НСМО) больше у ячейки на основе BTR/PCBM, чем у ячейки на основе P3HT/PCBM. Поэтому КФП у образца 22 (3.6%) больше чем у образца 11 в пределах погрешности, но существенно ниже, чем представлено в литературе [5] (около 10%).

Образец 31 имеет вольтамперные зависимости такого же характера, что и образец 22, а также схожие характеристики кроме тока короткого замыкания I_{sc} , который получился существенно ниже чем у образца 22, поэтому КФП – больше. Для образца 31 КФП (1.8%) оказалось также ниже, чем описано в литературе [6](3.6%).

Тот факт, что полученные в работе величины КФП оказались несколько меньше, чем представлены в литературе, может быть объяснён двумя причинами. Во-первых, образцы ФВЯ были изготовлены в условиях атмосферного воздуха и все слои были в некоторой степени подвержены окислению. Во-вторых, ввиду недостатка опыта могло иметь место некачественное присоединение электрода-сплава Филда, в результате чего эффективная площадь ФВЯ оказывалась значительно меньше измеренной в работе.

Выводы

В условиях атмосферного воздуха и без использования технологии вакуумного напыления электродов были изготовлены несколько образцов ФВЯ на основе объёмного гетероперехода. Измеренные вольтамперные характеристики имели зависимости, характерные для полупроводниковых элементов электрической цепи как в условиях темноты, так и под светом. Более того, при включении света наблюдалось явление генерации фототока.

Наилучшая ФВЯ имела архитектуру активного слоя ВТР/ РСНВМ (образец 22). Её характеристики – плотность тока короткого замыкания: $I_{sc} = 15.5$ мА/см²; напряжение холостого хода $V_{oc} = 815.3$ мВ; фактор заполнения $FF = 0.29$; КФП (или КФП) $-\eta = 3.6\%$. Это несколько ниже, чем было представлено в литературе.

Список используемой литературы

1. Knupfer, M. Exciton binding energies in organic semiconductors. // Appl. Phys. A 2003, 77, 623–626.
2. Shaw, P. E.; Ruseckas, A.; Samuel, I. D. W. Exciton Diffusion Measurements in Poly(3–hexylthiophene). // Adv. Mater. 2008, 20, 3516–3520.
3. П.А. Торшин, Р.Н. Любовская, В.Ф. Разумов. Органические солнечные баареи: структура, материалы, критичекские параметры и перспективы развития.// Нано обзоры. – М.,2006 – № 5. – С. 56–78.
4. Z. Zhou, W. Liu, G. Zhou, M. Zhang, D. Qian, J. Zhang, S. Chen, S. Xu, C. Yang, F. Gao, H. Zhu, F. Liu, X. Zhu // Adv. Mater. 2019, 1906324 DOI: 10.1002/adma.201906324
5. M. Zhang, F. Zhang, Q. An, Q. Sun, W. Wang, X. Ma, J. Zhang and W. Tang // J. Mater. Chem. A, 2017, DOI: 10.1039/C7TA00211D.
6. Schilinsky P., Waldauf C., Brabec C. // Performance Analysis of Printed Bulk Heterojunction Solar Cells. Adv. Funct. Mater. 2006. V. 16. P. 1669.
7. Shrotriya V., Li G., Yao Y., Moriarty T., Emery K., Yang Y. // Accurate Measurement and Characterization of Organic Solar Cells. Adv. Funct. Mater. 2006. V. 16. P. 2016–2023.

Приложение

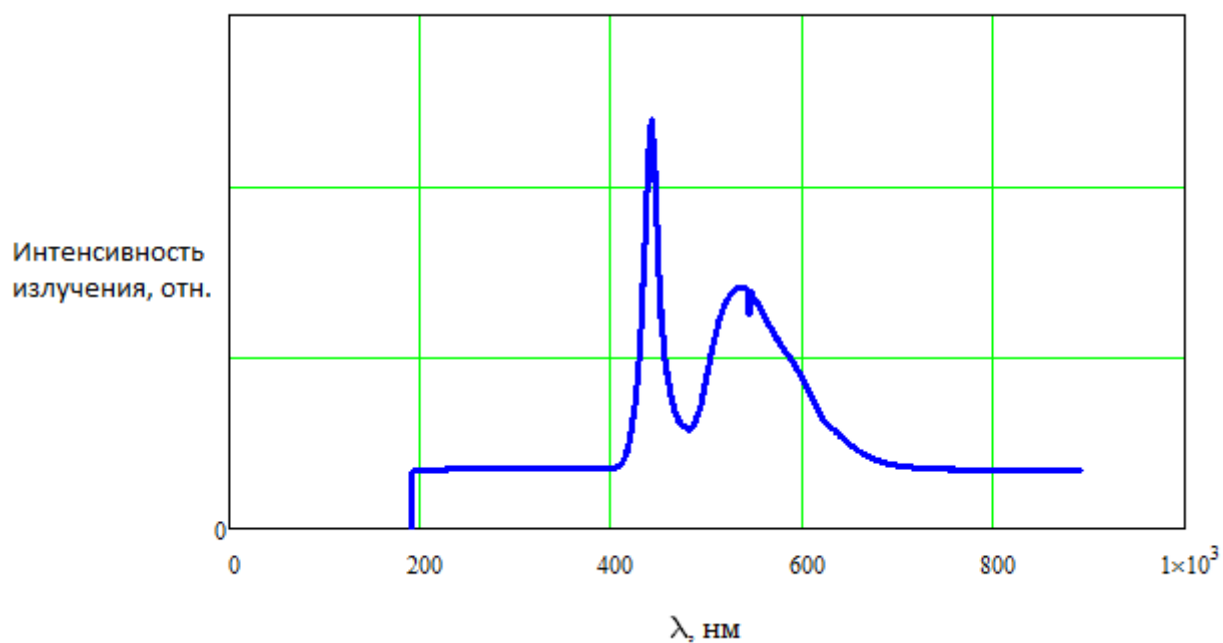
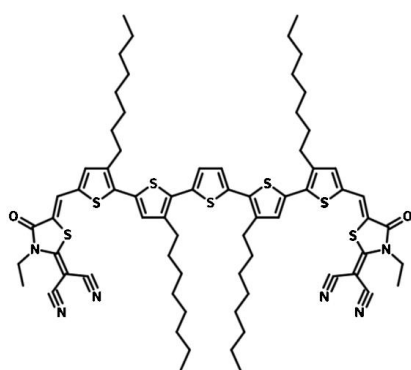
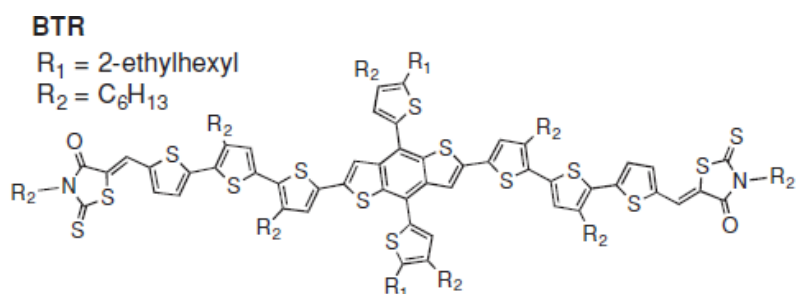


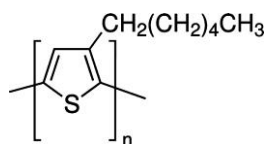
График 4. Спектр излучения светодиода, используемый в эксперименте.



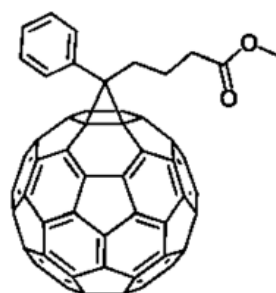
DRCN5T



BTR



P3HT



PCBM

Рисунок П2. Структуры соединений.