

DOI: 10.17725/rensit.2020.12.361

Влияние масс активных слоев гетероструктур фуллерен C_{60} -4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина на их выпрямляющие характеристики

Мазинов А.С., Тютюник А.С., Гурченко В.С., Ильина В.Ю.

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, <https://cfuv.ru/>
Симферополь 295007, Российская Федерация

E-mail: mazinovas@cfuv.ru, real-warez@mail.ru, gurchenko_v@mail.ru, nika.ilyina@mail.ru

Поступила 21.06.2020, рецензирована 29.06.2020, принята 06.07.2020

Представлена действительным членом РАЕН С.П. Губиным

Аннотация: Методом полива из раствора получена органо-углеродная гетероструктура, состоящая из тонких пленок фуллерена и 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина. Описаны методика получения образцов, микроскопия и синтез исходного порошкового материала. Представлены результаты поочередного рентгенофазового анализа используемых веществ. Проведен анализ изменения электрических и оптических характеристик активных слоев в зависимости от массы твердотельной фазы. Показана взаимосвязь последовательного увеличения толщины пленки с увеличением коэффициента поглощения инфракрасного электромагнитного излучения. Определение оптимальных толщин активных слоев гетероструктуры на основе фуллерена C_{60} и 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина позволило получить увеличение фотопроводимости на два порядка. Полученные световые вольт-амперные характеристики таких тонкопленочных структур имеют выпрямляющий характер при прямых токах до единиц микроампер относительно обратных десятков наноампер при напряжениях до 10 В.

Ключевые слова: тонкопленочные структуры, фуллерен, изатин, фотоэлектрический эффект, рентгенофазовый анализ, вольт-амперные характеристики

УДК 537.9, 547, 548.75

Благодарности: Авторы выражают благодарность компании “МСТ-нано” за предоставление исходного материала C_{60} . Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90038.

Для цитирования: Мазинов А.С., Тютюник А.С., Гурченко В.С., Ильина В.Ю. Влияние масс активных слоев гетероструктур фуллерен C_{60} -4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина на их выпрямляющие характеристики. РЭНСИТ, 2020, 12(3)361-368. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.361.

Effect of masses of active layers of C_{60} -4-methylphenylhydrazone N-isoamyliatin fullerene heterostructures on their rectifying characteristics

Alim S.-A. Mazinov, Andrey S. Tyutyunik, Vladimir S. Gurchenko, Veronika Yu. Ilina
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, <https://cfuv.ru/>

295007 Simferopol, Russian Federation

E-mail: mazinovas@cfuv.ru, real-warez@mail.ru, gurchenko_v@mail.ru, nika.ilyina@mail.ru

Received June 21, 2020; peer reviewed June 29, 2020; accepted July 06, 2020

Abstract: An organocarbon heterostructure consisting of thin films of fullerene and 4-methylphenylhydrazone N-isoamyliatin was obtained from a solution by irrigation. The procedure for obtaining the samples, the microscopy, and synthesis of the initial powder material have been described. The results of an alternate X-ray phase analysis of the substances used has

been presented. The analysis of changes in the electrical and optical characteristics of the active layers, depending on the mass of the solid phase has been carried out. The relationship between a sequential increase in film thickness and an increase in the absorption coefficient of infrared electromagnetic radiation has been revealed. Having determined the optimal thicknesses of the active layers of the heterostructure, based on fullerene C_{60} and 4-methylphenylhydrazone N-isoamylisatin, we achieved an increase in photoconductivity by two orders of magnitude. The obtained light current – voltage characteristics of such thin-film structures are rectilinear in nature with a direct load of up to 10 V.

Keywords: thin-film structures, fullerene, isatin, photoelectric effect, x-ray phase analysis, current-voltage characteristics

PACS 61.48.+c, 61.66.Hq, 73.61.–r

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR, project number 19-32-90038. The authors are grateful to the company “MCT-nano” for providing the source material C_{60} .

For citation: Alim S.-A. Mazinov, Andrey S. Tyutyunik, Vladimir S. Gurchenko, Veronika Yu. Ilna. Effect of masses of active layers of C_{60} - 4-methylphenylhydrazone N-isoamylisatin fullerene heterostructures on their rectifying characteristics. *RENSIT*, 2020, 12(3)361-368. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.361.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (362)
2. СИНТЕЗ АКТИВНЫХ СЛОЕВ И РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ (363)
3. ОСАЖДЕНИЕ И МИКРОСКОПИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК (363)
4. СРЕДНЕВОЛНОВЫЕ ИК-СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ (365)
5. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК (366)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (367)

ЛИТЕРАТУРА (367)

1. ВВЕДЕНИЕ

Всемирная тенденция развития области оптоэлектронных молекулярных соединений привела к расширению функциональных характеристик новых фотоэлектрических материалов. Поскольку одним из важнейших факторов, определяющих низкую эффективность преобразования солнечных элементов на основе тонких пленок, является низкое поглощение, многие современные исследования направлены на выявление различных путей для улучшения данного параметра [1]. Одним из таких направлений является создание устройств с использованием органических материалов. Органическая электроника приобретает все большую популярность благодаря низкой стоимости изготовления, уменьшению веса материалов [2] и возможности создания устройств большей площади в сочетании

с использованием гибких подложек [3]. Последние разработки в области фотовольтаики позволили получить органические солнечные батареи с эффективностью $>11\%$ [4,5]. Солнечная энергетика – не единственная область применения органических материалов. Органические полевые транзисторы (OFET) за последние 5 лет получили широкое применение благодаря контролю исходного химического состава вещества [6,7]. В частности, OFET, использующие в качестве основы углеродные материалы (фуллерены), эффективно применяются благодаря высокой подвижности электронов ($11 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) [8]. Использование фуллерена в качестве переносного слоя для электронов позволяет улучшить электрические характеристики органических светодиодов (OLED) [9].

За последние десятилетия производные изатина зарекомендовали себя как доступные фотохромные материалы [10,11] с возможностью переизлучать ультрафиолетовый спектр в видимый диапазон [12]. Простота перестройки молекулярного состава изатинов позволяет управлять изменением его физических свойств. Применение производных изатина в фотоэнергетике позволило получить КПД свыше 9% [13]. В свою очередь фуллерен представляется как относительно сильный акцептор электронов, обладающий *n*-типом проводимости [14]. Использование различных модификаций производных гидразона и изатина,

в качестве эффективного донора, позволило улучшить характеристики фотопреобразующих элементов с объемным гетеропереходом.

Исходя из всего вышесказанного, целью данной работы является исследование воздействия электромагнитной волны оптического диапазона на выпрямляющие свойства органо-углеродных гетероструктур при изменении толщин активных слоев, а также, определение оптимальной массы вещества для получения максимального увеличения прямых токов исследуемых структур.

2. СИНТЕЗ АКТИВНЫХ СЛОЕВ И РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

Синтез органического прекурсора осуществлялся по аналогичной методике [15]. Исходный N-изоамилизатин массой 2.03 г (0.01 ммоль) растворили в метаноле, объем которого составлял 50 мл, в процессе перемешивания и нагрева. Далее к раствору добавили 4-метилфенилгидразин массой 1.35 г (0.011 ммоль). Процесс кипячения смеси производился в течение 1-2 ч до образования осадка при постоянном перемешивании. Целевые продукты выделяли фильтрованием и очищали перекристаллизацией из этанола. В результате проведенного синтеза было получено 2.4 г целевого продукта с выходом 73%. Чистота и строение соединений подтверждались по данным ¹H-ЯМР-спектроскопии и элементного анализа. Исходный фуллерен C₆₀ был предоставлен компанией “MST nano”, с чистотой 99.5%.

Определение фазовой чистоты исходного органического и углеродного материалов в твердой фазе выполнено с использованием метода рентгенофазового анализа. Запись дифрактограмм проводилась на дифрактометре общего назначения ДРОН-3 (схема фокусировки по Брэггу-Брентано с использованием

графитового монохроматора) в угловой области 2θ от 5° до 70° при использовании рентгеновской трубки с медным анодом λ(Kα) = 0.154184 нм. Скорость вращения детектора составила – 0.5°/мин при постоянном времени – 1·10³ импульсов в секунду. Первичный и вторичный пучок были ограничены щелями: горизонтальной – 0.25 мм, вертикальной – 6 мм и щелями Соллера – 0.5 мм. Скорость вращения образца – 120 оборотов в минуту (ось – в плоскости съемки).

По результатам рентгенофазового анализа 4-метилфенилгидразон N-изоамилизатина в твердой фазе был сделан вывод, что данный органический материал обладает тетрагональной сингонией со сторонами: a = 19.27 Å; b = 19.27 Å; c = 14.14 Å. Пространственная группа I -4 2 m с углами α = 90°; β = 90°; γ = 90°. Фуллерен C₆₀ в твердой фазе подтвердил свой молекулярный состав. Углеродный материал обладает кубической сингонией со сторонами: a = 14.17 Å; b = 14.17 Å; c = 14.17 Å. При этом пространственная группа Fm 3 выстраивается при углах: α = 90°; β = 90°; γ = 90°.

3. ОСАЖДЕНИЕ И МИКРОСКОПИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

После подтверждения исходного состава вещества методом рентгенофазового анализа, дальнейшие исследования проводились непосредственно с углеродными и органическими тонкими пленками. Формирование пленочных структур на основе порошкового фуллерена C₆₀ и 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина осуществлялось методом полива из раствора [16]. В качестве растворителей использовались неароматические соединения: дихлорметан – для фуллерена и хлороформ – для изатина. Фиксированная концентрация твердой фазы исходного материала в растворе составила 0.5

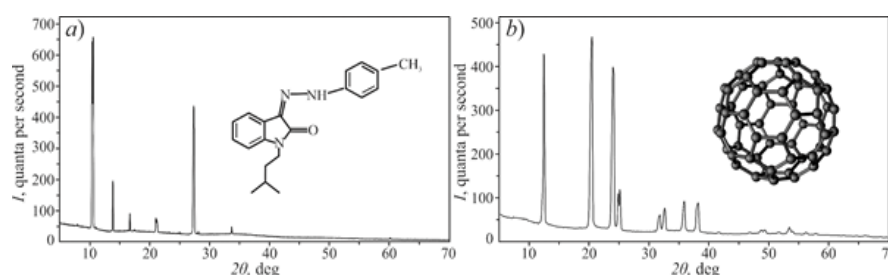


Рис. 1. Рентгенограммы органического изатина (a) и фуллерена (b) в твердой фазе.

мг/мл. Для оценки однородности поверхности пленок и выявления новообразований исходные вещества в растворе наносились на диэлектрические подложки с геометрическими размерами 18×18 мм. Анализ рельефа пленок осуществлялся посредством просвечивающей и отраженной микроскопии на базе микроинтерферометра ЛОМО МиИ-4М с дополнительным освещением полупроводниковым лазером и удлиненным оптическим путем на фотокамеру с 1/2FF 10MP матрицей (рис. 2). Для определения оптимальной массы исходного вещества были сформированы пять вариаций экспериментальных образцов. Поэтапное увеличение массы изатина (рис. 2а-е) и C₆₀ (рис. 2к-о) с 0.15 до 0.75 мг с шагом 0.15 мг позволило динамически оценить изменение геометрии пленки и распределение органических структур по поверхности.

В результате, анализ поверхности показал, что увеличение массы исходного материала наглядно сопровождается изменением морфологии поверхности. Пленки изатина, осажденные при помощи хлороформа (CHCl₃), можно охарактеризовать как относительно однородные. Первоначально при массе исходного материала 0.15 мг (рис. 2а) поверхность пленки имеет островковообразный (диспергированный) вид с толщиной 500-600 нм. При увеличении массы вещества до 0.3 мг (рис. 2б) наблюдается образование связей между “островками”. Толщина таких пленок составляет 600-700 нм. Дальнейшее увеличение

количества исходного материала приводит к полному (сплошному) покрытию всей поверхности подложки (рис. 2с-е). Данный факт сопровождается существенным увеличением толщин пленок, при массах 0.45, 0.6 и 0.75 мг толщина составляет 2.2-2.3 мкм 3-3.1 мкм и 3.6-3.7 мкм соответственно.

Пленки фуллерена, осажденные с помощью дихлорметана (CH₂Cl₂), отличаются относительной неоднородностью поверхности. При массе 0.15 мг исходного материала (рис. 2к) наблюдается появление отдельных “точечных” частиц с размерами 1-3 мкм. При этом толщина пленки составляет 300-400 нм. Последовательное увеличение вещества до 0.3 и 0.45 мг (рис. 2л,м) характеризуется увеличением различных агломераций, а также прослеживается начальное формирование “звездообразных” структур с размерами “лучей”, достигающими 30-40 мкм. Толщина таких пленок возрастает до 400-500 и 500-600 нм соответственно. При увеличении массы до 0.6 и 0.75 мг (рис. 2н,о), наблюдается полное объемное перекрытие поверхности углеродными “звездообразными” структурами, организованными путем самосборки, размеры которых достигают порядка 40-50 мкм. При этом толщина увеличивается до 600-700 нм для 0.6 мг и 700-800 нм – для 0.75 мг.

Переходной слой фуллерен-изатин имеет смешанную морфологию поверхности (рис. 2ф-й), где молекулы C₆₀ сформировались в отдельные остовы.

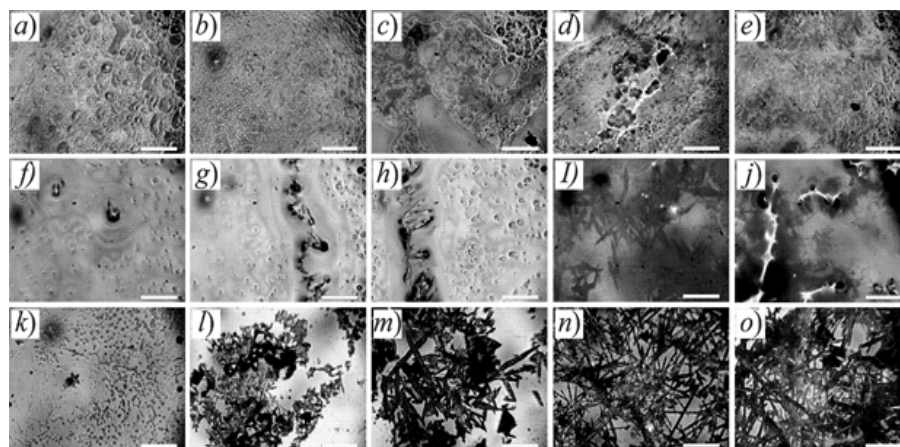


Рис. 2. Микрофотографии пленок изатина: (а – 0.15 мг; б – 0.3 мг; в – 0.45 мг; д – 0.6 мг; е – 0.75 мг), переходного слоя (ф – 0.15 мг; г – 0.3 мг; в – 0.45 мг; I – 0.6 мг; j – 0.75 мг) и фуллереновых пленок (к – 0.15 мг; л – 0.3 мг; т – 0.45 мг; н – 0.6 мг; о – 0.75 мг). Длина линии составляет 50 мкм.

4. СРЕДНЕВОЛНОВЫЕ ИК-СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Учитывая специфику формирования микрообъектов (в результате самосборки), следующим шагом стало проведение исследования методом ИК спектроскопии. Данный метод был использован с целью определения возможного изменения молекулярного состава полученных тонких пленок. Исследование взаимодействия средневолнового ИК излучения с углеродным и органическим материалом проводилось с использованием ИК-Фурье спектрометра Agilent Cary 630 FTIR с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО, ATR) в диапазоне пространственных частот 650-4000 см⁻¹ и разрешением 4 см⁻¹. Для удобства анализа взаимодействия инфракрасных электромагнитных волн с углеродными и органическими пленками отдельно были выделены интервалы: 650-1250 см⁻¹, 1250-1850 см⁻¹ и 2650-3250 см⁻¹.

При исследовании спектральных зависимостей средневолнового ИК диапазона необходимо отметить значительное количество пиков поглощения у органической пленки, что обусловлено сложностью строения молекулы 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина (рис. 3а). В области малых длин волн 2650-3250 см⁻¹ были обнаружены пики, связанные с колебаниями групп атомов C–H и N–H. На частотном отрезке 1250-1850 см⁻¹ обнаружены пики, обусловленные наличием C=O и C=N связей. Причем, валентные колебания C=O

связи, в диапазоне 1630-1740 см⁻¹, определяют отношение вещества к классу амид I. Пик при длине волны 1612 см⁻¹ связан с деформационным колебанием N–H и валентным колебанием N–C=O, что характерно для класса амид II. Основной вклад в поглощение ИК электромагнитной волны, на участке 1364-1610 см⁻¹, вносят валентные колебания C=C бензольных колец. Участок 650-1250 см⁻¹ отличился последовательностью максимумов поглощения, которые обусловлены действием деформационных и валентных колебаний групп атомов C–N, C–C, C–H. Стоит отметить весомый вклад деформационных колебаний групп C–H в бензольных кольцах и алкильном заместителе в диапазоне частот 744-1128 см⁻¹.

Анализ углеродных пленок в ИК диапазоне при разных массах вещества показал наличие значительно меньшего количества пиков поглощения, по сравнению с органическими пленками (рис. 3б). Это объясняется более однотипным строением фуллереновой молекулы. В диапазоне частот 2650-3250 см⁻¹ прослеживается наличие двойного пика малой интенсивности, который соответствует связи C_{sp3}–H в высших углеводородах. Также для данной связи характерно наличие полосы поглощения на частоте 1370 см⁻¹. Пики, которые характеризуют полученные углеродные пленки как фуллереновые, присутствуют на частотах 1182 и 1429 см⁻¹, причем полоса поглощения на частоте 1429 см⁻¹ сдвигается с полосой от алкильной группы 1456 см⁻¹. Слабо выраженные полосы поглощения в областях

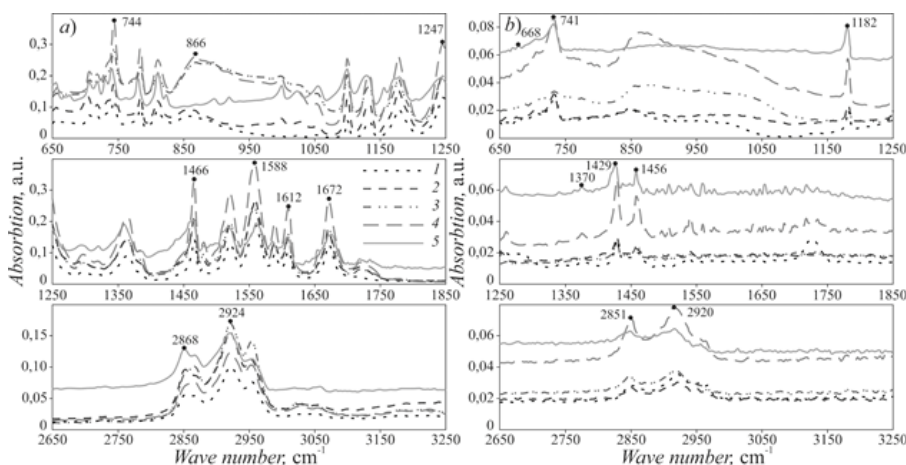


Рис. 3. ИК-спектры оптического поглощения образцов пленок Изатина (а) и Фуллерепа (б), при массах: 1) 0.15 мг; 2) 0.3 мг; 3) 0.45 мг; 4) 0.6 мг; 5) 0.75 мг.

1649-1659 см^{-1} характерны для колебаний C=O группы. Наличие хлорпроизводных метана при значениях волнового числа 668 см^{-1} и 741 см^{-1} обусловлено использованием дихлорметана (CH_2Cl_2) в качестве растворителя для фуллерена.

Обобщая все многообразие средневолнового ИК спектра взаимодействия, можно отметить, что увеличение массы функциональных слоев практически не влияет на форму и сдвиг пиков поглощения. Однако, четко прослеживается увеличение интенсивности пиков поглощения при увеличении количества вещества, что говорит об образовании большего числа межмолекулярных связей и формировании более однородного поглощающего слоя, характерного для исходного вещества.

5. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

С целью определения оптимальной массы активных слоев, для улучшения преобразующих свойств была исследована гетероструктура на основе фуллерена C_{60} и 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина. Электродинамические параметры исследовались при помощи анализатора полупроводников Keysight B1500A. Измерения проводились не менее 10 раз при комнатной температуре, с последующим усреднением. Для оценки фотоактивности применялась LED матрица с плотностью потока порядка 300 $\text{Вт}/\text{м}^2$ и приходящей мощностью 60 мВт. В качестве контактной группы использовался оксид индия-олова (ITO) с удельным сопротивлением 16-18 Ω/sq и алюминий, напыленный на ситалл с

сопротивлением 20 Ω/sq и толщиной 120 нм. Геометрические размеры подложек (Al и ITO) составляли 10×10 мм. Гетероструктура (ITO-изатин- C_{60} -Al) представляла собой «сэндвич», причем фуллерен наносился на алюминий, а изатин – на оксид индия-олова. Исследование кинетики заряда активных слоев осуществлялось посредством измерения вольт-амперных характеристик (рис. 4).

Для определения оптимальной массы исходного вещества были сформированы пять симметричных вариаций экспериментальных образцов с массами от 0.15 до 0.75 мг. Все образцы показали наличие светочувствительности. Так, для образца с массой 0.15 мг световой ток 50.9 мкА, что в 1.87 раз больше темнового – 27.2 мкА. Увеличение исходного вещества вдвое сопровождалось незначительным уменьшением светочувствительности до 1.35 раз. Гетероструктура с 0.45 мг исходного материала характеризовалась темновым током 18.9 мкА и световым 66.3 мкА, что соответствует увеличению по току в 3.5 раз. Дальнейшее увеличение количества исходного вещества сопровождалось значительным увеличением кинетики носителей заряда. Так, у образца с массой 0.6 мг ток при облучении гетероструктуры электромагнитной волной видимого диапазона – в 91 раз больше темновой ВАХ. Образец массой 0.75 мг характеризуется увеличением фототока в 70 раз.

Рост фототока при увеличении объемной массы активных слоев наиболее вероятным образом объясняется формированием протяженной псевдо-кристаллической

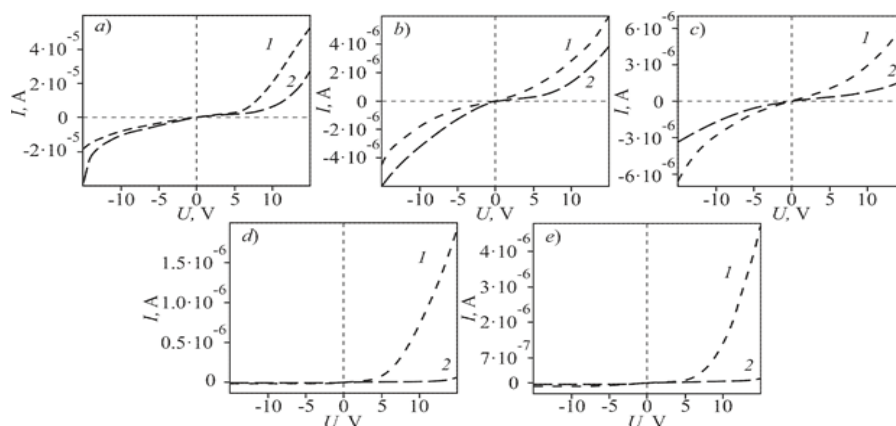


Рис. 4. Световые (1) и темновые (2) вольт-амперные характеристики гетероструктуры ITO-изатин- C_{60} -Al, при массовых долях: а – 0.15 мг; б – 0.3 мг; в – 0.45 мг; д – 0.6 мг; е – 0.75 мг.

атомарной структуры, которая обеспечивает приемлемую проводимость посредством увеличения подвижности носителей заряда непосредственно внутри отдельных образований – макрочастиц. Также, увеличение массы приводит к уменьшению энергии активации прыжкового механизма проводимости, увеличивая тем самым токособирание фотоактивных носителей заряда [17].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевым результатом проведения исследования можно считать определение экспериментальным путем оптимальной массы вещества для построения потенциального барьера на основе фуллерена и органического соединения 4-метилфенилгидразон N-изоамилизатина. Микроскопический анализ позволил наглядно продемонстрировать поэтапное образование микроструктурированных объектов. Взаимодействие электромагнитного излучения ИК диапазона с тонкопленочными структурами показало, что изменение массовой доли активных слоев практически не влияет на форму и сдвиг пиков поглощения, однако приводит к увеличению их интенсивности. Данную тенденцию можно объяснить формированием однородного поглощающего слоя и появлением все большего числа межмолекулярных связей. Анализ фотоэлектрических характеристик гетеропереходов, при массах 0.6 и 0.75 мг, показал увеличение прямых токов на два порядка, в сравнении токами образцов, обладающих массами: 0.15, 0.3 и 0.45 мг. Данный факт позволяет говорить об образовании потенциального барьера на границе раздела изатин-C₆₀, обусловленного различной морфологией базовых молекулярных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stanculescu A, Breazu C, Socol M, Rasoga O, Preda N, Petre G, Solonaru AM, Grigoras M, Stanculescu F, Socol G, Popescu-Pelin G, Girtan M. Effect of ITO electrode patterning on the properties of organic heterostructures based on non-fullerene acceptor prepared by MAPLE. *Applied Surface Science*, 2020, 145351, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.145351.
2. Huttner A, Breuer T, Witte G. Controlling Interface Morphology and Layer Crystallinity in Organic Heterostructures: Microscopic View on C₆₀ Island Formation on Pentacene Buffer Layers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11:35177–35184, doi: 10.1021/acsami.9b09369.
3. Mizukami M, Cho S-I, Watanabe K, Abiko M, Suzuri Y, Tokito S, Kido J. Flexible Organic Light-Emitting Diode Display Driven by Inkjet-Printed High-Mobility Organic Thin-Film Transistors. *IEEE Electron Device Lett*, 2018, 39:39-42.
4. Zhang Y-X, Fang J, Li W, Shen Y, Chen J-D, Li Y, Gu H, Pelivani S, Zhang M, Li Y, Tang J-X. Synergetic Transparent Electrode Architecture for Efficient Nonfullerene Flexible Organic Solar Cells with >12% Efficiency. *ACS Nano*, 2019, 13:4686-4694, doi: 10.1021/acsnano.9b00970.
5. Xie S, Wang J, Wang R, Zhang D, Zhou H, Zhang Y, Zhou D. Effects of processing additives in non-fullerene organic bulk heterojunction solar cells with efficiency >11%. *Chinese Chemical Letters*, 2019, 30(1):217-221, doi:10.1016/j.ccl.2018.04.001.
6. Li H, Shi W, Song J, Jang H-J, Dailey J, Yu J, Katz HE. Chemical and Biomolecule Sensing with Organic Field-Effect Transistors. *Chemical Reviews*, 2019, 119(1):3-35, doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00016.
7. Kerfoot J, Korolkov VV, Svatek SA, Alkhamisi M, Taniguchi T, Watanabe K, Parkinson PW, Beton PH. Two-Dimensional Diffusion of Excitons in a Perylene Diimide Monolayer Quenched by a Fullerene Heterojunction. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(19):12249-12254, doi: 10.1021/acs.jpcc.9b01413.
8. Novikov AV, Leshanskaya LI, Dremova NN, Parfenov A, Troshin P. Environment-friendly aqueous processing of [60]fullerene semiconducting films for truly green organic electronics. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8:495-499, doi: 10.1039/c9tc05007h.
9. Han S, Huang C, Lu Z-H. Color tunable metal-cavity organic light-emitting diodes with fullerene layer. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(9):093102, doi: 10.1063/1.1887830.
10. Zheng J, Huang F, Lia Y, Xua T, Xua H, Jia J, Ye Q, Gao J. The aggregation-induced emission enhancement properties of BF2

- complex isatin-phenylhydrazone: Synthesis and fluorescence characteristics. *Dyes Pigments*, 2015, 113:502-509, doi: 10.1016/j.dyepig.2014.09.025.
11. Zheng J, Li Y, Cui Y, Jia J, Ye Q, Han L, Gao J. Isatin-phenylhydrazone dyes and boron complexes with large Stokes shifts: synthesis and solid-state fluorescence characteristics. *Tetrahedron*, 2015, 71:3802-3809.
 12. Gusev AN, Shul'gun VF, Topilova ZM, Meshkov SB. Synthesis, structure, and photoluminescence of 5phenyl2pyridyl5,6dihydro[1,2,4]triazolo[1,5c]quinazolines. *Russian Chemical Bulletin, International Edition*, 2012, 61(1):95-98, doi: 10.1007/s11172-012-0014-9.
 13. Chocho CL, Spanos M, Katsouras A, Tatsi E, Drakopoulou S, Gregoriou VG, Avgeropoulos A. *Progr. Polym. Sci*, 2019, 91:51-79.
 14. Зиминов ВМ, Захарова ИБ. Выпрямляющие свойства структур на основе фуллерена C_{60} . *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2012, 146(2):18-21.
 15. Cigan M, Jakusova K, Gaplovsky M, Filo J, Donovalova J, Gaplovsky A. Isatin phenylhydrazones: anion enhanced photochromic behaviour. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2015, 14(11):2064-2073, doi: 10.1039/c5pp00275c.
 16. Старостенко ВВ, Мазинов АС, Тютюник АС, Фитаев ИШ, Гурченко ВС. Спектральные СВЧ- и оптические характеристики наноструктурированных углеродных и органических пленок. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2020, 1(13):106-117, doi: 10.18721/JRM.13109.
 17. Никитенко ВР, Тютнев АП. Переходный ток в тонких слоях неупорядоченных органических материалов в режиме неравновесного транспорта носителей заряда. *Физика и техника полупроводников*, 2007, 41(9):1118-1125.
- Мазинов Алим Сеит-Аметович**
к.т.н., доцент
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
4, просп. Вернадского, Симферополь 295007, Россия
mazinovas@cfuv.ru
- Тютюник Андрей Сергеевич**
аспирант
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
4, просп. Вернадского, Симферополь 295007, Россия
real-warez@mail.ru
- Гурченко Владимир Сергеевич**
аспирант
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
4, просп. Вернадского, Симферополь 295007, Россия
gurchenko_v@mail.ru
- Ильина Вероника Юрьевна**
к.пед.н., доцент
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
4, просп. Вернадского, Симферополь 295007, Россия
nika.ilyina@mail.ru.