

ИМПЕДАНС МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДОВ

Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М., Копылова Т.Н.,
Дегтяренко К.М.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

Исследованы частотные, температурные и полевые зависимости импеданса многослойных органических система с эмиссионным слоем (2-N,2-N,8-N-тетракис(4-метоксифенил)-(добензотиофен-5,5-диоксид)-2,8-диамин), перспективных для применения в светоизлучающих приборах. Проведен анализ графиков Коула-Коула и частотных зависимостей импеданса при различных смещениях. Выбрана эквивалентная схема многослойной системы, найдены значения элементов схемы в широком диапазоне условий.

В последние годы возрос интерес к изучению процессов в многослойных системах на основе органических полупроводников, что связано с перспективами использования таких систем при создании ряда приборов оптоэлектроники (например, органических светодиодов – OLED). Существенно, что такие приборы будут иметь новые функциональные возможности и могут быть реализованы при использовании относительно недорогой технологии. Для полной реализации потенциальных достоинств органических приборов необходимы детальные исследования свойств многослойных систем на основе органических полупроводников, что требует развития методик характеризации таких систем. Новую информацию об электрофизических свойствах многослойных систем может предоставить исследование адмиттанса (или импеданса) приборных OLED-структур в широком диапазоне условий. Можно отметить, что метод импеданса часто используется при изучении процессов в структурах на основе неорганических полупроводников, но при исследованиях свойств органических и органо-неорганических систем этот метод используется не так широко [1–3]. В докладе приведены результаты экспериментальных исследований импеданса многослойных органических систем с термоактивированной замедленной флуоресценцией, которые перспективны для создания новых типов эффективных светоизлучающих приборов.

Для исследований были изготовлены многослойные органические системы с перспективным для создания OLED с эмиссионным слоем, в котором реализуется термоактивированная замедленная флуоресценция (ТЗФ). OLED-структуры представляли собой многослойные системы ITO/PEDOT:PSS (30 нм)/ α -NPD (20 нм)/ТЗФ-слой (50 нм)/BCP (15 нм)/LiF (1 нм)/Al. На профилированный ITO посредством центрифугирования и последующей сушки наносился полимер PEDOT:PSS, который выполнял роль слоя инжектирующей дырки. Слой из α -NPD служил для транспорта дырок. Излучательный (эмиссионный) слой создавался из материала с ТЗФ – (2-N,2-N,8-N-тетракис(4-метоксифенил)-(добензотиофен-5,5-диоксид)-2,8-диамин) [4]. Материал для эмиссионного слоя имел условное название Як-203. Для транспорта электронов использовался материал BCP – 2,9 -диметил(4,7-дифенил)-1,10 фенантролин. Многослойная органическая система создавалась при помощи термовакуумного напыления. В качестве катода использовались слои LiF и Al [5]. Слой алюминия имел толщину 100 нм и создавался с использованием вольфрамового испарителя. Схема расположения слоев в изготовленной OLED-структуре изображена на рис. 1. После изготовления многослойной органической системы проводилось капсулирование ячеек стеклянной крышкой. Топология изготовленного образца показана на рис. 2. Измерения вольт-амперных характеристик и импеданса OLED-структур проводились при помощи автоматизированной установки для спектроскопии адмиттанса гетероструктур, в состав которой входили измеритель иммитанса Agilent E4980A, неоптический криостат Janis, контроллер температуры Lake Shore. Действительная и мнимая части импеданса измерялись в диапазоне температур от 10 до 300 К при частотах от 100 Гц до 2 МГц.

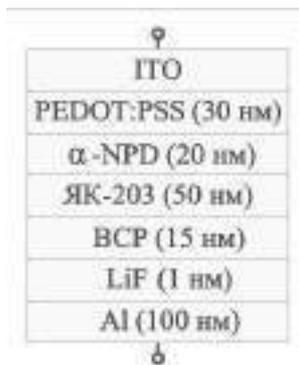


Рис. 1. Схематическое изображение расположения слоев в OLED- структуре



Рис. 2. Топология изготовленного образца

Проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) OLED-структур при различных температурах. Сравнение ВАХ и зависимостей яркости OLED-приборов от напряжения показали, что значительное увеличение яркости происходит при прямых напряжениях (превышающих 3 В). При этих смещениях также происходит резкое увеличение прямого тока через OLED-структуру. Исследованы зависимости модуля и фазы импеданса OLED-структуры при разных температурах. Включение многослойной органической системы сопровождается изменением модуля и фазы импеданса, что согласуется с результатами ранее проведенных исследований импеданса подобных OLED-систем. Для измеренных вольт-фарадных характеристик не наблюдается увеличения емкости при подаче прямого смещения, а уменьшение емкости происходит при напряжениях, соответствующих включению светоизлучающей структуры. Это свидетельствует о том, что изготовленные OLED-структуры являются приборами, действующими на носителях заряда обоих типов (электронах и дырках). В таких OLED-структурах со слоем Як-203 одновременно происходит инжекция в эмиссионный слой носителей заряда обоих типов и отсутствует область напряжения, в которой доминируют носители заряда одного типа.

Для исследованных структур со слоем Як-203 построены графики Коула-Коула при различных температурах и напряжениях смещения (рис. 3). Показано, что при больших прямых смещениях импеданс многослойной органической структуры определяется одним релаксационным процессом, поскольку графики Коула-Коула при этих условиях близки к правильной полуокружности. Это подтверждено тем, что при построении графиков Коула-Коула в логарифмических координатах экспериментальные данные можно аппроксимировать прямой с угловым коэффициентом, равным 0,513 (для правильной полуокружности угловой коэффициент равен 0,5). В этом случае для исследованной структуры можно использовать эквивалентную схему, которая состоит из параллельной цепочки R_p - C_p и последовательного сопротивления R_s .

При малых смещениях наблюдается более сложный вид графиков Коула-Коула, что свидетельствует о том, что импеданс при этих условиях определяется несколькими релаксационными процессами. При больших прямых смещениях графики Коула-Коула в диапазоне температур от 180 до 300 К сходны с правильной полуокружностью, радиус которой возрастает при охлаждении. Это свидетельствует об увеличении сопротивления R_p при снижении температуры. Из зависимости сопротивления R_p от напряжения, построенной в логарифмических координатах, следует, что при прямых смещениях через OLED-структуру протекает ток, ограниченный пространственным зарядом [6].

При различных условиях измерены частотные зависимости действительной и мнимой частей импеданса структуры (рис. 4). Экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными расчета при использовании эквивалентной схемы, состоящей из четырех последовательно соединенных CR цепочек (вставка рис. 4).

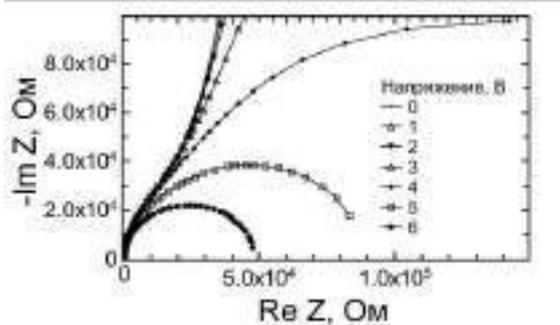


Рис. 3. Графики Коула-Коула для OLED-структуры, измеренные при температуре 300 К и различных смещениях

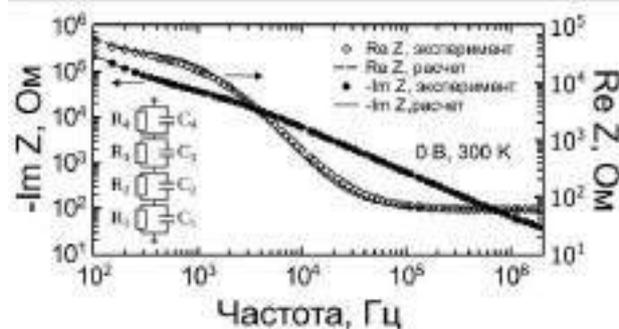


Рис. 4. Частотные зависимости действительной и мнимой частей импеданса структуры при нулевом напряжении. На вставке – эквивалентная схема OLED-структуры

Различные элементы эквивалентной схемы связаны с различными областями OLED-структуры, причем эти области различаются не материалами, а электрическими свойствами. В состав схемы входят элементы, характеризующие обедненные области и катода и анода, нейтральную область, а также свойства контакта. Найдены зависимости значений CR-элементов эквивалентной схемы от напряжения смещения и от температуры. Показано, что при увеличении прямого напряжения смещения на структуре сопротивления RC-цепочек уменьшаются, а соответствующие емкости могут уменьшаться или увеличиваться. Определены зависимости толщин соответствующих слоев от напряжения, причем суммарная толщина всех областей хорошо соответствует толщине всей органической многослойной системы. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными теоретической работы [7]. Для более полной электрической диагностики многослойных органических структур со слоем Як-203 исследованного типа необходимо проводить измерения импеданса при более высоких температурах и более низких частотах. Показано, что анализ частотных зависимостей импеданса многослойных органических систем очень информативен при изучении электронных процессов. Обсуждены возможности определения подвижности носителей заряда в OLED-структурах по частотным зависимостям импеданса [1].

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта р_а № 18–43–700005.

1. D.C. Tripathi, A.K. Tripathi, Y.N. Mohapatra, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, No.3, 14, (2011).
2. H. Hirwa, S. Pittner, V. Wagner, *Org. Electron.*, **24**, 303–314, (2015).
3. A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, V.A. Novikov, S.M. Dzyadukh, T.N. Kopylova, I.V. Ivonin, K.M. Degtyarenko, E.V. Tereshchenko, *Thin Solid Films*, **692**, 137622, (2019).
4. R.M. Gadirov, R.R. Valiev, L.G. Samsonova, K.M. Degtyarenko, N.V. Izmailova, A.V. Odod, S.S. Krasnikova, I.K. Yakushchenko, T.N. Kopylova, *Chem. Phys. Lett.*, **717**, 53-58, (2019).
5. A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.M. Dzyadukh, T.N. Kopylova, K.M. Degtyarenko, A.P. Kokhanenko, *Russ. Phys. J.*, **62**, 306-313, (2019).
6. A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, S.M. Dzyadukh, T.N. Kopylova, K.M. Degtyarenko, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **217**, 1900847, (2020).
7. N.D. Nguyen, M. Schmeits, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **203**, 1901-1914, (2006).