

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.315.592

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ^{1,2}, С.Н. НЕСМЕЛОВ¹, С.М. ДЗЯДУХ¹, Т.Н. КОПЫЛОВА²,
К.М. ДЕГТЯРЕНКО², А.П. КОХАНЕНКО¹

АДМИТТАНС ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУР
С ЭМИССИОННЫМ СЛОЕМ ЯК-203 *

В широком диапазоне условий измерения экспериментально исследованы вольт-амперные характеристики и адмиттанс многослойных структур для органических светодиодов на основе системы PEDOT:PSS/NPD/ЯК-203/BCP. Показано, что при напряжениях, соответствующих эффективной излучательной рекомбинации носителей заряда, наблюдается значительное уменьшение дифференциальной емкости структур. Частотные зависимости приведенной проводимости светодиодных структур хорошо согласуются с результатами численного моделирования в рамках метода эквивалентных схем. Изменения частотных зависимостей адмиттанса при изменении температуры наиболее выражены в диапазоне 200–300 К и менее заметны в области температур 8–200 К. Из частотных зависимостей мнимой части импеданса найдены подвижности носителей заряда при различных смещениях и температурах. Значения подвижности, полученные по использованной методике, несколько меньше значений, определенных методом переходной электролюминесценции. Зависимость подвижности от электрического поля хорошо аппроксимируется линейной функцией, при снижении температуры от 300 до 220 К подвижность уменьшается в несколько раз.

Ключевые слова: органический полупроводник, светодиодная структура, вольт-амперная характеристика, адмиттанс, метод эквивалентных схем, частотная зависимость мнимой части импеданса, подвижность носителей заряда, переходная электролюминесценция.

Введение

Электрические характеристики приборных структур для органических светоизлучающих диодов (ОСИД) интенсивно исследуются на протяжении последних пятнадцати лет [1, 2]. Такие структуры перспективны для разработок светодиодов, которые находят применение в дисплеях или системах освещения большой площади, а также транзисторов или фотоэлектрических приборов. Исследования электрических характеристик структур ОСИД необходимы для получения новой информации о транспортных явлениях в многослойных органических структурах, а также для оптимизации характеристик приборов органической оптоэлектроники.

Важнейшим параметром, определяющим рабочие характеристики ОСИД, является подвижность носителей заряда в органических пленках. Измерения подвижности носителей различными методами имеют ключевое значение для современного понимания переноса носителей заряда в органических и полимерных полупроводниках [3, 4]. Однако наиболее распространенные методы измерения подвижности – регистрации времени пролета (ВП, TOF) [5] и переходной электролюминесценции (ПЭЛ, ELT) [6, 7] – имеют ряд серьезных ограничений [8, 9]. Для использования ВП-метода толщина органических пленок должна составлять несколько микрометров, что не соответствует толщине пленок в реальных приборах, которая обычно не превышает десятков нанометров. Также для применения ВП-метода необходим слой, который эффективно инжектирует носители заряда. Область применения ПЭЛ-метода ограничена ОСИД, в которых подвижность носителей одного типа должна быть значительно больше подвижности носителей заряда другого типа. Кроме этого, интерпретация данных измерений ПЭЛ-методом может осложняться из-за влияния на результаты не только транспортных, но и рекомбинационных процессов.

По этим причинам в последние годы возрождается интерес к определению подвижности носителей заряда в органических пленках электрическими методами [10–15]. Измерения в различных условиях вольт-амперных (ВАХ), вольт-фарадных характеристик (ВФХ), зависимостей адмиттанса или импеданса могут дать важную информацию о процессах в многослойных органических структурах [16–20].

Одной из перспективных для применения в органической оптоэлектронике систем является структура ОСИД ITO/PEDOT:PSS/ α -NPD/ЯК-203/BCP/LiF/Al, в которой смесь диоксидов индия и

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

олова выполняет роль анода, для инжекции дырок используется полимерный слой PEDOT:PSS, в качестве транспортного слоя – слой α -NPD, а эмиссионного (излучающего) – ЯК-203, слой ВСП предназначен для транспорта электронов из катода, который образован слоями LiF и Al. Целью работы является экспериментальное исследование процессов в многослойной структуре ОСИД ITO/PEDOT:PSS/ α -NPD/ЯК-203/ВСП/LiF/Al при помощи измерений ВАХ и адмиттанса (или импеданса) в широком диапазоне частот и температур.

Образцы и методики измерений

Образец для исследований представлял собой многослойную систему ITO/PEDOT:PSS/ α -NPD/ЯК-203/ВСП/LiF/Al, предназначенную для использования в органических светоизлучающих диодах. На ячейки с профилированным ITO (Indium Tin Oxide) в качестве инжектирующего дырки слоя наносился полимер PEDOT:PSS толщиной 30 нм. Слой PEDOT:PSS создавался путем центрифугирования (с частотой 4000 об/мин) и последующей сушки в условиях вакуума при температуре 120 °С. Слой толщиной 20 нм для транспорта дырок создавался из распространенного материала α -NPD. Излучающий слой толщиной 50 нм был создан из органического вещества ЯК-203 (2-N,2-N,8-N-тетракис(4-метоксифенил)-(добензотиофен-5,5-диоксид)-2,8-диамин). В этом соединении наблюдается эффект термоактивированной люминесценции. Энергетическая щель между нижним синглетным уровнем и триплетным уровнем не превышает 0.3 эВ, что способствует увеличению эффективности электролюминесценции за счет вовлечения триплетных состояний, поскольку возможен достаточно быстрый переход из триплетного в синглетное состояние с последующим актом излучения. Для вещества ЯК-203 при скоростях интерконверсии, близких к скорости излучательных процессов, должно наблюдаться замедление выхода сигнала электролюминесценции на насыщение и замедление спада сигнала на заднем фронте (после прекращения подачи напряжения) за счет подкачки из триплетных состояний. Для создания электрон-транспортного и холл-блокирующего слоя использовался материал ВСП (2,9-диметил(4,7-дифенил)-1,10-фенантролин) толщиной 15 нм. Для формирования слоев (кроме PEDOT:PSS) применялся метод термовакуумного напыления при давлении 10^{-5} мбар. Слои вещества наносились из кварцевых тиглей при скорости напыления 0.2 А/с. Алюминий толщиной 100 нм напылялся при помощи вольфрамового испарителя со скоростью 2 А/с. После напыления ячейки капсулировались стеклянной крышкой с помощью эпоксидного компаунда E131 (OSSILA).

На рис. 1, а показано расположение слоев в исследованной структуре, а на рис. 1, б – топология изготовленной структуры ОСИД (более темным оттенком показана область защитного стекла, под которым расположены части анодов и катод). Площади активных областей структур ОСИД составляли около 20 мм².

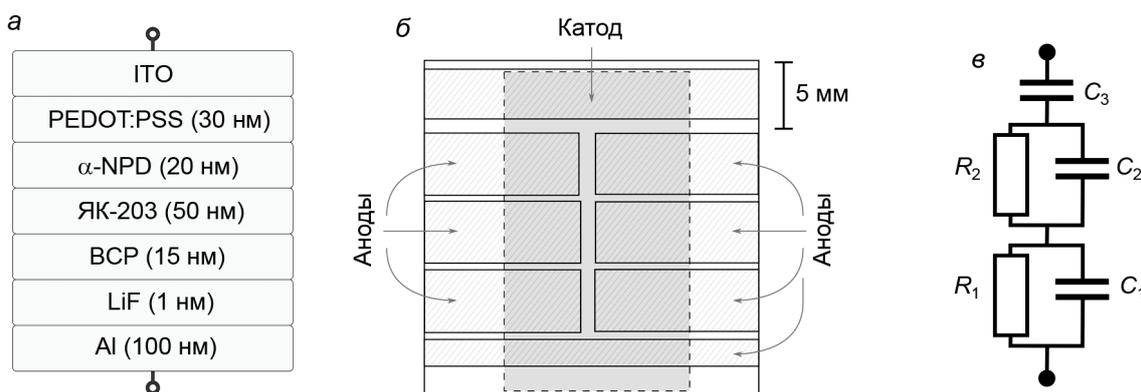


Рис. 1. Схематическое изображение расположения слоев в структуре ОСИД (а) и топология изготовленного образца (б), а также эквивалентная схема структуры ОСИД при нулевом напряжении смещения (в)

Измерения проводились при помощи автоматизированной установки для спектроскопии адмиттанса наногетероструктур, в состав которой входили измеритель иммитанса Agilent E4980A и неоптический криостат Janis. Установка позволяла измерять зависимости адмиттанса от температуры (8–300 К), частоты (1–2000 кГц), напряжения смещения. Для анализа частотных зависимо-

стей адмиттанса использовался метод эквивалентных схем [18, 21–24]. На рис. 1, в приведена эквивалентная схема структуры ОСИД при нулевом напряжении [18].

На рис. 1, в использованы следующие обозначения: C_1 и R_1 – емкость и сопротивление слоя обеднения у катода; C_2 и R_2 – емкость и сопротивление слоя ЯК-203, в который не проникает электрическое поле при нулевом напряжении; C_3 – емкость обедненного слоя у анода [18].

При экспериментальных исследованиях использовалась параллельная схема замещения, то есть определялись параллельно соединенные емкость (C) и проводимость (G) МДП-структуры. Для характеристики процессов часто используют нормированную на циклическую частоту ω проводимость структуры ОСИД $L = G/\omega$.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены ВАХ структуры ОСИД, измеренные при температуре 300 К. Из рис. 2 видно, что заметное увеличение прямого тока наблюдается при смещениях, превышающих 3 В. В диапазоне напряжений от 4 до 6 В прямой ток изменяется от 10 до 50 мкА, что соответствует увеличению плотности тока от $5 \cdot 10^{-5}$ до $2.5 \cdot 10^{-4}$ А/см². При снижении температуры структуры ОСИД от 300 до 260 К прямой ток уменьшается приблизительно в 2 раза (рис. 2). На рис. 3 приведены зависимости интенсивности излучения структуры ОСИД от напряжения, измеренные при различных температурах в диапазоне от 260 до 300 К. Из рис. 3 видно, что заметное увеличение интенсивности излучения начинается при прямых смещениях, превышающих 4 В. Охлаждение структуры до 260 К приводит к уменьшению интенсивности излучения примерно в 10 раз (при одинаковом напряжении смещения). При обратном включении структуры ОСИД излучение не наблюдается.

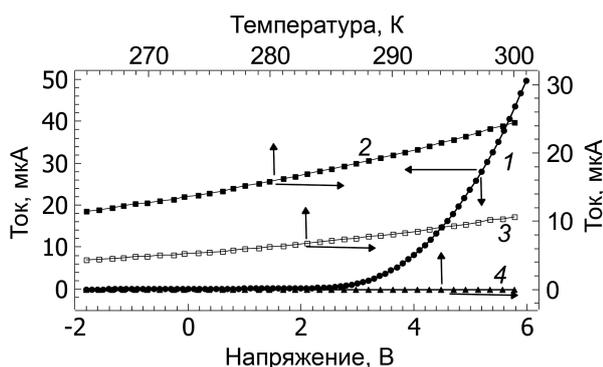


Рис. 2. ВАХ структуры ОСИД, измеренная при температуре 300 К (кр. 1), а также зависимости тока от температуры при различных напряжениях, В: кр. 2 – 5; кр. 3 – 4.2; кр. 4 – 0

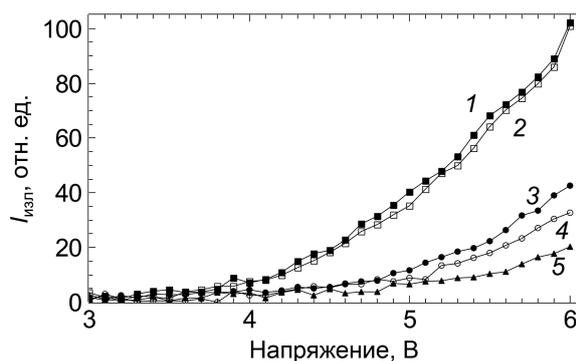


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения структуры ОСИД от напряжения при различных температурах, К: кр. 1 – 300; кр. 2 – 290; кр. 3 – 280; кр. 4 – 270; кр. 5 – 260

На рис. 4 и 5 показаны ВФХ и зависимости приведенной проводимости от напряжения структуры ОСИД, измеренные при температуре 300 К на частотах 1 и 5 кГц соответственно.

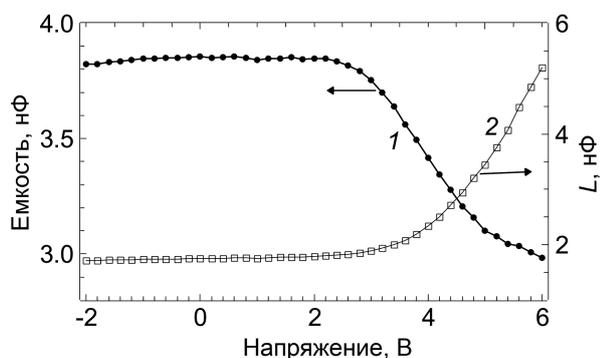


Рис. 4. ВФХ (кр. 1) и зависимость приведенной проводимости (кр. 2) структуры ОСИД, измеренные при температуре 300 К на частоте 1 кГц

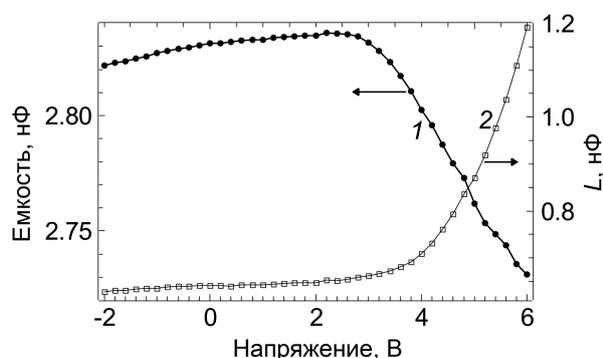


Рис. 5. ВФХ (кр. 1) и зависимость приведенной проводимости (кр. 2) структуры ОСИД, измеренные при температуре 300 К на частоте 5 кГц

Области напряжений, при которых максимален ток и интенсивность излучения, соответствует участок спада емкости и увеличения приведенной проводимости, что согласуется с результатами работ других авторов [16]. Емкость снижается в режиме инжекции носителей заряда двух знаков и рекомбинации этих носителей. Участок увеличения емкости, соответствующий режиму инжекции основных носителей заряда, для исследованной структуры ОСИД не выражен. Это может быть связано с тем, что в структуре ОСИД одновременно происходит инжекция в излучательную область носителей заряда обоих типов и отсутствует область напряжения, в которой доминируют носители заряда одного типа [16]. При увеличении частоты тестового сигнала от 1 до 5 кГц значительно уменьшается диапазон изменения значений емкости на ВФХ, а также становится заметным увеличение емкости при изменении смещения от -2 В до 2.8 В.

На рис. 6 приведены частотные зависимости емкости и приведенной проводимости структуры ОСИД, измеренные при температуре 300 К при различных напряжениях (0 и 6 В). Измеренные зависимости при нулевом напряжении смещения хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов, проведенных в работе [18]. Толстыми линиями на рис. 6 показаны частотные зависимости, построенные путем расчета адмиттанса эквивалентной схемы рис. 1, в при следующих значениях элементов: $C_1 = 4.14$ нФ, $R_1 = 25$ кОм, $C_2 = 173$ пФ, $R_2 = 63$ Ом, $C_3 = 6.85$ нФ. Из рис. 6 видно, что расчет при помощи метода эквивалентных схем позволяет качественно описать экспериментальные частотные зависимости емкости и приведенной проводимости структуры ОСИД. Можно отметить, что удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных зависимостей наблюдается при неожиданно малых значениях емкостей C_1 и C_2 , что требует проведения дополнительных исследований для установления физических процессов, определяющих значения элементов эквивалентной схемы.

На рис. 7 показаны частотные зависимости емкости и приведенной проводимости структуры ОСИД, измеренные при напряжении 5 В при различных температурах в диапазоне от 10 до 300 К. Из рис. 7 видно, что наибольшие изменения зависимостей наблюдаются при изменении температуры от 300 до 200 К, причем эти изменения выражены только на достаточно низких частотах. При охлаждении структуры ОСИД от 200 до 10 К изменения частотных зависимостей емкости практически отсутствуют, а изменения зависимостей приведенной проводимости от частоты слабо выражены.

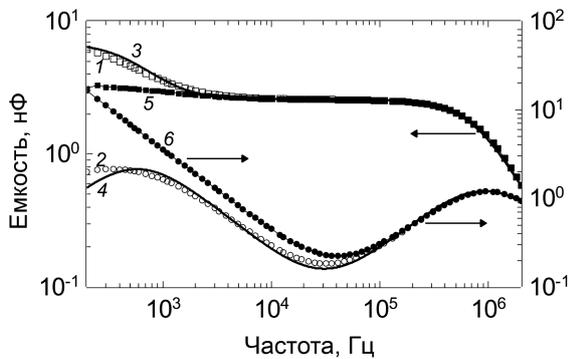


Рис. 6. Экспериментальные (кр. 1, 2, 5, 6) и расчетные (кр. 3, 4) зависимости емкости (кр. 1, 3, 5) и приведенной проводимости (кр. 2, 4, 6) от частоты при напряжениях 0 В (кр. 1–4) и 6 В (кр. 5, 6) и температуре 300 К

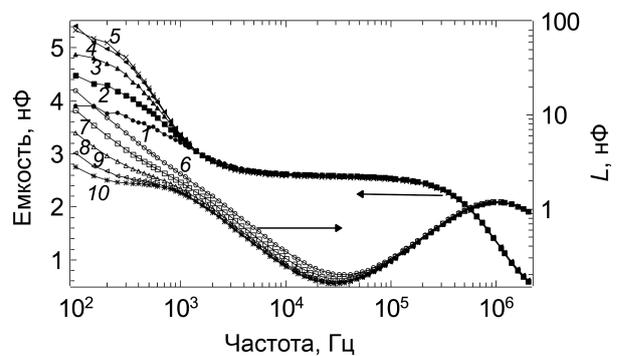


Рис. 7. Экспериментальные зависимости емкости (кр. 1–5) и приведенной проводимости (кр. 6–10) от частоты, измеренные при напряжении 5 В при различных температурах, К: кр. 1, 6 – 300; кр. 2, 7 – 278; кр. 3, 8 – 250; кр. 4, 9 – 200; кр. 5, 10 – 10

Из частотных зависимостей емкости структуры ОСИД видно, что при высоких частотах не наблюдается насыщения значения емкости, которое соответствует достижению геометрической емкости структуры ОСИД. Распространено определение подвижности носителей заряда из измерений адмиттанса из частотной зависимости отрицательной разности реактивных проводимостей $-\Delta B(\omega) = -\omega(C(\omega) - C_0)$, где $C(\omega)$ – измеряемая емкость структуры ОСИД, а C_0 – геометрическая емкость структуры ОСИД [25–27]. Измерения частотных зависимостей емкости структуры ОСИД в диапазоне 100 Гц – 2 МГц не показали участков частот с положительными значениями

$-\Delta V$ (измеряемая емкость меньше геометрической), что возможно при больших значениях дисперсионных параметров, описывающих транспорт в органических пленках [28].

Подвижность носителей заряда определялась из частотных зависимостей мнимой части импеданса структуры ОСИД. Этот метод является простым, эффективным и удобным [28] и часто используется в последние годы [29, 30].

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости мнимой части импеданса структуры ОСИД, измеренные при напряжении 6 В и различных температурах в диапазоне от 220 до 300 К. Из рис. 8 видно, что зависимости $\text{Im } Z$ от частоты имеют максимумы, которым соответствуют постоянные времена $\tau_p = 1/2\pi \cdot f_p$, где f_p – частота в Гц, на которой наблюдается максимум. При снижении температуры структуры ОСИД максимум смещается в область более низких частот. Также измерялись $\text{Im } Z(f)$ зависимости при температуре 300 К и различных прямых смещениях в диапазоне от 3.6 до 6 В. При увеличении смещения на структуры ОСИД максимум смещается в область более высоких частот.

Для определения времени пролета при постоянном токе τ_{dc} используют формулу $\tau_{dc} = k \cdot \tau_p$, где k – численный коэффициент, который может изменяться от 0.29 до 0.75 [28] в зависимости, например, от дисперсионных параметров. Подвижность носителей заряда можно рассчитать по формуле $\mu = d^2 / ((V - V_{bi})\tau_{dc})$, где V – приложенное напряжение; V_{bi} – встроенное напряжение ОСИД [7]; d – толщина слоя, на котором падает приложенное напряжение. При расчете подвижностей предполагалось, что $k = 0.44$ (средние значения дисперсионных параметров [28]), $d = 50$ нм (толщина слоя ЯК-203).

На рис. 9 показаны зависимости подвижности, определенной из измерений импеданса, от напряженности электрического поля E и температуры. Наблюдается хорошее спрямление зависимости подвижности от квадратного корня из напряженности электрического поля. Можно отметить, что при построении графика Пула – Френкеля (при логарифмической шкале на оси ординат) [25] зависимость подвижности несколько отклоняется от линейной функции. При охлаждении структуры ОСИД при напряжении 6 В подвижность уменьшается, что согласуется, например, с результатами работы [25].

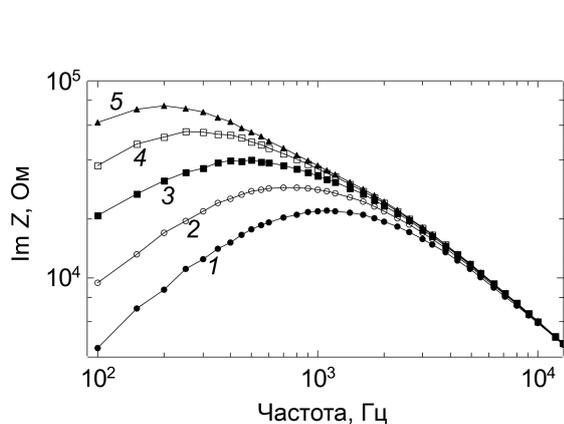


Рис. 8. Экспериментальные зависимости мнимой части импеданса структуры ОСИД, измеренные при напряжении 6 В при различных температурах, К: кр. 1 – 300; кр. 2 – 280; кр. 3 – 260; кр. 4 – 240; кр. 5 – 220

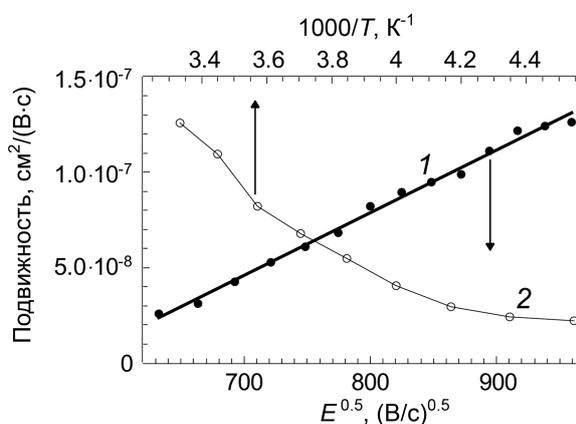


Рис. 9. Зависимости подвижности носителей заряда от квадратного корня из напряженности электрического поля при температуре 300 К (кр. 1) и температуры при напряжении 6 В (кр. 2), построенные по результатам измерения частотных зависимостей мнимой части импеданса

В работе [31] значения подвижности в структурах ОСИД сходного типа (с эмиссионным слоем ЯК-203) определялись при помощи метода переходной электролюминесценции. При квадратном корне из напряженности электрического поля, равном $1150 \text{ (В/см)}^{0.5}$, значение подвижности, найденное по времени задержки начала электролюминесценции при температуре 300 К, составило около $10^{-6} \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Зависимость подвижности от квадратного корня от напряженности хорошо спрямляется при линейном масштабе по оси ординат. Значения подвижности, определенные методом ПЭЛ, превышают значения подвижности, найденные из измерений адмиттанса, примерно

в 10 раз. Это хорошо согласуется с данными работы [28], в которой показано, что начало электролюминесценции определяется самыми быстрыми носителями заряда, а отклик на переменный тестовый сигнал при измерениях адмиттанса зависит от носителей заряда с различными скоростями.

Выводы

Таким образом, экспериментально исследованы ВАХ и адмиттанс структур ОСИД на основе многослойной системы ITO/PEDOT:PSS/ α -NPD/ЯК-203/BCP/LiF/Al. Показано, что при напряжениях, соответствующих максимальной интенсивности излучения, наблюдается рост прямого тока и уменьшение емкости структуры ОСИД. Отсутствие на ВФХ участка возрастания емкости при увеличении прямого смещения может свидетельствовать о том, что в структуре эффективно происходит инжекция носителей заряда обоих типов.

При различных напряжениях смещения исследованы зависимости емкости и приведенной проводимости структуры ОСИД от частоты, которые хорошо согласуются с литературными данными. Экспериментальные частотные зависимости адмиттанса структуры ОСИД, измеренные при нулевом напряжении смещения и температуре 300 К, показывают удовлетворительное совпадение с результатами численного моделирования при использовании эквивалентной схемы, учитывающей наличие слоев обеднения вблизи катодного и анодного переходов, а также квазинейтрального объема эмиссионного слоя. Для уточнения физического смысла элементов эквивалентной схемы требуются дополнительные исследования, поскольку для совпадения экспериментальных и расчетных зависимостей необходимо предполагать слишком малые значения емкостей.

Исследованы частотные зависимости емкости и приведенной проводимости структуры ОСИД в широком диапазоне температур (от 10 до 300 К). Показано, что наиболее заметны изменения частотных зависимостей адмиттанса в диапазоне температур 200–300 К при частотах, не превышающих 1000 Гц. Охлаждение структуры ОСИД от 200 до 10 К не приводит к заметному изменению зависимости емкости от частоты, а частотная зависимость приведенной проводимости изменяется слабо.

В диапазоне частот до 2 МГц не наблюдается высокочастотного насыщения емкости структуры ОСИД, отсутствуют частотные диапазоны, в которых емкость возрастает при увеличении частоты, что может быть связано с большими значениями дисперсионных параметров. Определены значения подвижности носителей заряда из частотных зависимостей импеданса, измеренных при различных напряжениях и температурах. Полевая зависимость подвижности лучше спрямляется при линейном масштабе оси подвижностей, чем в координатах Пула – Френкеля. Подвижность уменьшается в несколько раз при охлаждении от 300 до 220 К. Значение подвижности, найденное из измерений импеданса, при 300 К и $E^{0.5} = 950$ (В/см)^{0.5} близко к $1.2 \cdot 10^{-7}$ см²/(В·с). Значение подвижности, определенное методом переходной электролюминесценции в сходных условиях, больше примерно в 10 раз, что отражает особенности методов, использованных для нахождения подвижности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stallinga P. *Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices*. – Chichester et al.: John Wiley & Sons, 2009. – 316 p.
2. Sun S.S. and Dalton L.R. *Introduction to Organic Electronic and Optoelectronic Materials and Devices*. – Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2016. – 963 p.
3. Tiwari S. and Greenham N.C. // *Opt. Quant. Electron.* – 2009. – V. 41. – No. 2. – P. 69–89.
4. Laquai F., Wegner G., and Bässler H. // *Phil. Trans. Royal Soc. London A: Math., Phys. Eng. Sci.* – 2007. – V. 365. – No. 1855. – P. 1473–1487.
5. Chen B., Lee C.S., Lee S.T., et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2000. – V. 39. – Part 1. – No. 3A. – P. 1190.
6. Tripathi A.K. and Mohapatra Y.N. // *Org. Electron.* – 2010. – V. 11. – No. 11. – P. 1753–1758.
7. Романов И.В., Войцеховский А.В., Дегтяренко К.М. и др. // *Изв. вузов. Физика.* – 2014. – Т. 57. – № 11. – С. 116–123.
8. Pinner D. J., Friend R. H., and Tessler N. // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V. 86. – No. 9. – P. 5116–5130.
9. Karl N. // *Synth. Met.* – 2003. – V. 133. – P. 649–657.
10. Cobb B., Jeong Y.T., and Dodabalapur A. // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – V. 92. – No. 10. – P. 82.
11. Martens H.C.F., Brom H.B., and Blom P.W.M. // *Phys. Rev. B.* – 1999. – V. 60. – No. 12. – P. R8489.
12. Tsang S.W., So S.K., and Xu J.B. // *J. Appl. Phys.* – 2006. – V. 99. – No. 1. – P. 013706.
13. Züfle S., Altazin S., Hofmann A., et al. // *J. Appl. Phys.* – 2017. – V. 121. – No. 17. – P. 175501.
14. Huang F., Peng Y., Xu K., et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2017. – V. 50. – No. 20. – P. 205106.

15. Xu H., Zhai W.J., Tang C., et al. // *J. Phys. Chem. C*. – 2016. – V. 120. – No. 31. – P. 17184–17189.
16. Shrotriya V. and Yang Y. // *J. Appl. Phys.* – 2005. – V. 97. – No. 5. – P. 054504.
17. Zou D., Yahiro M., and Tsutsui T. // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1998. – V. 37. – No. 11B. – P. L1406.
18. Nguyen N.D. and Schmeits M. // *Phys. Stat. Sol. (a)*. – 2006. – V. 203. – No. 8. – P. 1901.
19. Li M.C., Tsai C.T., Liu Y.H., et al. // *Solid-State Electron.* – 2018. – V. 148. – P. 1–6.
20. Wang Y., Duan Q., Liang Q., et al. // *Org. Electron.* – 2019. – V. 66. – P. 58–62.
21. Nicollian E.H. and Brews J.R. *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. – New York et al.: Wiley, 1982. – 906 p.
22. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядх С.М. // *Изв. вузов. Физика*. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 162–169.
23. Estrada M., Ulloa F., Ávila M., et al. // *IEEE Trans. Electron Dev.* – 2013. – V. 60. – No. 6. – P. 2057–2063.
24. Hirwa H., Pittner S., and Wagner V. // *Org. Electron.* – 2015. – V. 24. – P. 303–314.
25. Martens H.C.F., Huiberts J.N., and Blom P.W.M. // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – V. 77. – No. 12. – P. 1852–1854.
26. Schmeits M. // *J. Appl. Phys.* – 2007. – V. 101. – No. 8. – P. 084508.
27. Tanase C., Meijer E.J., Blom P.W.M., et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – V. 91. – No. 21. – P. 216601.
28. Tripathi D.C., Tripathi A.K., and Mohapatra Y.N. // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – V. 98. – No. 3. – P. 14.
29. Fernandes J.M., Kiran M.R., Ulla H., et al. // *Superlatt. Microstr.* – 2015. – V. 83. – P. 766–775.
30. Shinde D.B., Salunke J.K., Candeias N.R., et al. // *Sci. Rep.* – 2017. – V. 7. – P. 46268.
31. Шульга А.Ю., Зятиков И.А. // *Труды Четырнадцатой Всерос. конф. студенческих научно-исследовательских инкубаторов, Томск, 17–18 мая 2017 г.* – Томск, 2017. – С. 127–131.

Поступила в редакцию 23.10.18.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

² Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Томского госуниверситета, г. Томск, Россия

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой НИ ТГУ, зав. лабораторией СФТИ ТГУ, e-mail: vav43@mail.tsu.ru;

Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: nesm69@mail.ru;

Дзядх Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: bonespirit@mail2000.ru;

Копылова Татьяна Николаевна, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией, e-mail: kopylova@phys.tsu.ru;

Дегтяренко Константин Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: norma1954@yandex.ru;

Коханенко Андрей Павлович, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: kokh@mail.tsu.ru.