

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 535.37; 537.31

*И.В. РОМАНОВ, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, К.М. ДЕГТЯРЕНКО, Т.Н. КОПЫЛОВА, А.П. КОХАНЕНКО, Е.Н. НИКОНОВА***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПЛЁНКАХ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕН-PPV И МЕН-PPV-POSS¹**

Приведены результаты измерений подвижности носителей заряда в органических полупроводниковых материалах (МЕН-PPV, МЕН-PPV-POSS) на основе анализа релаксационных кривых переходной электролюминесценции органических светоизлучающих диодов (ОСИД). Полученные данные по подвижности носителей заряда проанализированы согласно модели Пула – Френкеля при использовании зависимостей подвижности носителей заряда от напряжённости электрического поля. Дана физическая интерпретация транспортных явлений в рассматриваемых конструкциях ОСИД на основе МЕН-PPV и МЕН-PPV-POSS.

Ключевые слова: органические полупроводники, тонкие полимерные плёнки, ОСИД, подвижность носителей заряда, методики измерения, электролюминесценция, МЕН-PPV, МЕН-PPV-POSS.

В настоящее время появились оптоэлектронные устройства, работа которых основана на использовании органических полупроводников. ОСИД и фотоприёмные устройства (ФПУ) активно внедряются в технологию передачи данных с использованием полимерных световодов. Так, например, в [1] приводятся результаты передачи данных по полимерным световодам, где в качестве источника и приёмника оптического сигнала использовались органические устройства. В [2] представлены данные по исследованиям органических светодиодов, способных работать в высокоскоростных оптических сетях связи. Низкая стоимость и относительная простота технологии изготовления таких электролюминесцентных устройств [3] позволили в короткие сроки создать эффективные органические светодиоды и плоские широкоформатные дисплеи. Однако низкая подвижность носителей заряда в органических полупроводниках ограничивает рабочие характеристики устройств на их основе [4]. Так, подвижность и излучательное время жизни носителей заряда наряду с квантовой эффективностью являются важными факторами, ответственными за яркость и быстродействие ОСИД и фотоприёмных устройств. Быстродействие органического светоизлучающего диода определяется конструкцией и электрофизическими и рекомбинационными параметрами органических материалов, входящих в его состав. Чем меньше время требуется для прохождения носителей заряда из электродов в эмиссионную область, тем большее быстродействие будет у светоизлучающего диода. Поэтому определение подвижности носителей заряда необходимо для разработки быстродействующих органических светоизлучающих диодов.

Для измерения подвижности носителей заряда в органических полупроводниках используются несколько методов: метод регистрации времени пролёта, радиационно-индуцированный вариант метода времени пролёта, метод вытягивания носителей зарядов линейно возрастающим полем, метод переходной электролюминесценции. Каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. Например, считается, что метод регистрации времени пролёта позволяет определять подвижность носителей заряда наиболее точно. Основная трудность применения этого метода заключается в необходимости иметь толщину слоя измеряемого вещества около 4–10 мкм. Толщина органических светодиодов, применяемых на практике, порядка 100 нм, что делает такой метод неприменимым для большинства ОСИД, толщина слоёв которых менее микрометра. Наиболее подходящим методом измерения подвижности таких слоёв является метод переходной электролюминесценции. Это также связано с наличием возможности измерять подвижность как основных, так и неосновных носителей заряда в слоях органических полупроводников субмикронной толщины.

Наши исследования направлены на апробацию метода поверхностной электролюминесценции для определения подвижности носителей заряда в тонких плёнках МЕН-PPV и МЕН-PPV-POSS, которые являются основными материалами для ОСИД [5]. Количество и состав слоёв опре-

¹ Работа выполнена в рамках базовой части госзадания при финансовой поддержке Минобрнауки России (код проекта 1975).

деляют энергетическую эффективность электролюминесценции. Для получения точных значений о подвижности носителей заряда в активном слое светодиода желательно использовать трёхслойную структуру (анод – эмиссионный слой – катод). На практике в такой структуре не всегда удаётся получить приемлемый для измерений уровень электролюминесценции, что приводит к трудности её регистрации в присутствии шумов измерительной схемы и фона. Это означает возрастание погрешности измерения подвижности носителей заряда при малых значениях электрического поля, приложенного к контактам структуры. Введение транспортных слоёв позволяет увеличить световой поток ОСИД и уменьшить рабочие напряжения. Объектами исследования являются органические светоизлучающие устройства, структура и энергетические уровни которых представлены на рис. 1.

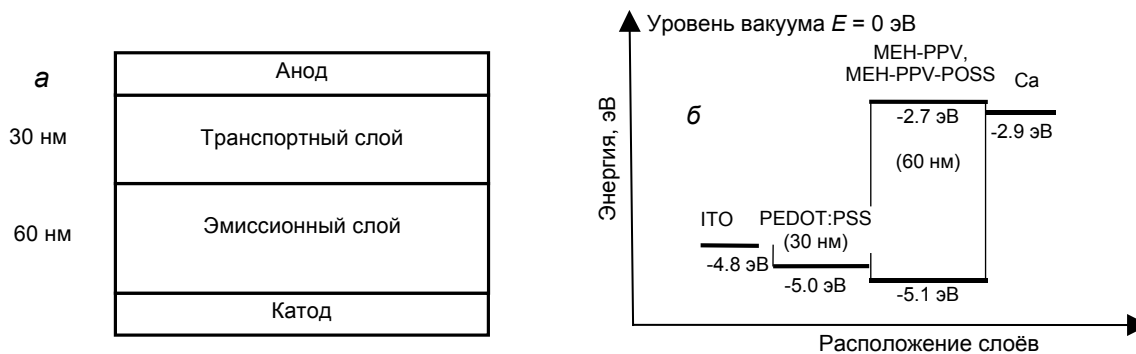


Рис. 1. Энергетическая диаграмма (а) и структура слоёв ОСИД (б)

Образцы ОСИД имели следующую структуру: стеклянная подложка – анод – транспортный слой с дырочной проводимостью – эмиссионный слой – катод – стеклянная подложка (рис. 1, б). Анодом является слой ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$). Транспортный и эмиссионный слои наносились методом центрифугирования из водного раствора и раствора толуола соответственно. Транспортный слой позволяет улучшить инжекцию дырок из анода, а также обеспечить баланс между электронным и дырочным токами за счёт предотвращения сквозного протекания носителей сквозь структуру ОСИД. Катод состоит из слоя кальция, покрытым защитным слоем алюминия. Металлические слои наносятся последовательно методом термического распыления металла в вакууме. Анод инжектирует дырки, а катод – электроны. Измерение подвижности дырок в эмиссионном слое проводилось с веществами: поли(2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилена (МЕH-PPV), поли(2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилена с присоединённым полиэдральным олигомерным силсескиоксаном (МЕH-PPV-POSS). В качестве транспортного слоя с дырочной проводимостью используется PEDOT:PSS (поли(3,4-этилен диокситиофен):поли(стирен сульфонат)). Обнаружено, что спектр электролюминесценции образца имеет максимум на длине волны 598 нм.

На рис. 2, а приведена схема экспериментальной установки, предназначенной для регистрации переходной электролюминесценции в образцах ОСИД, где ФЭУ – фотоэлектронный умножитель. На рис. 2, б представлен сигнал переходной электролюминесценции ОСИД при напряжении анод – катод 10 В и сглаживающая кривая этого сигнала.

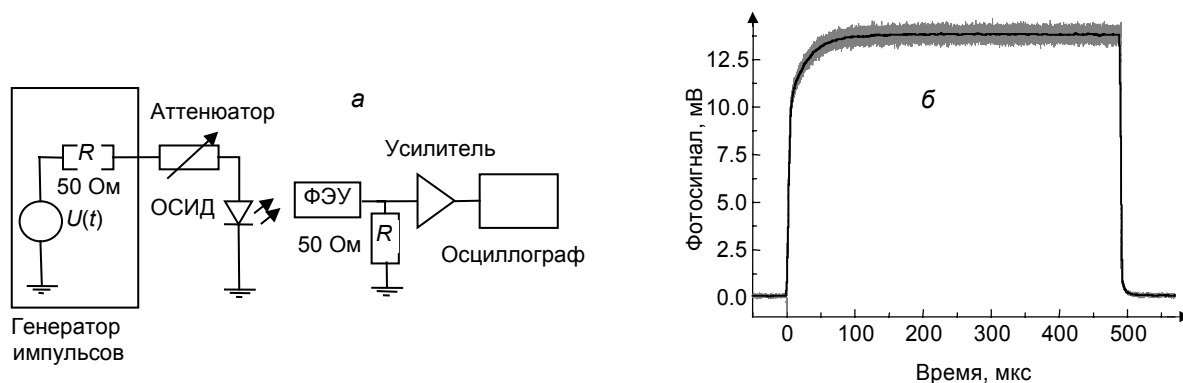


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения переходной электролюминесценции (а) и сигнал переходной электролюминесценции при напряжении анод – катод 10 В (б)

В качестве источника прямоугольных импульсов напряжения на образцах ОСИД используется генератор импульсов Г5-56. Время нарастания и спада импульсов такого генератора не более 10 нс. Амплитуда импульсов на выходе генератора может варьироваться в диапазоне величин от 0 до 11 В. Измерения переходной электролюминесценции ОСИД проводятся при комнатной температуре. Электролюминесценция ОСИД регистрируется с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-35 с диапазоном чувствительности 300–600 нм. На выходе фотоэлектронного умножителя фотосигнал имеет амплитуду от единиц до нескольких десятком милливольт (см. рис. 2, а), в зависимости от уровня электролюминесценции в ОСИД. Фотосигнал из фотоэлектронного умножителя поступает на вход усилителя с регулируемым коэффициентом усиления (10–20 дБ). С выхода усилителя фотосигнал поступает на вход цифрового осциллографа (LeCroy WS 62), где он регистрируется. Характерное время RC в измерительной цепи при этом не превышает 1 мкс.

При подаче напряжения на ОСИД количество заряженных частиц, пришедших на контакты, будет изменяться от времени и зависеть от свойств органических полупроводников, входящих в состав ОСИД. На рис. 3 представлена кривая нормированной интенсивности переходной электро-

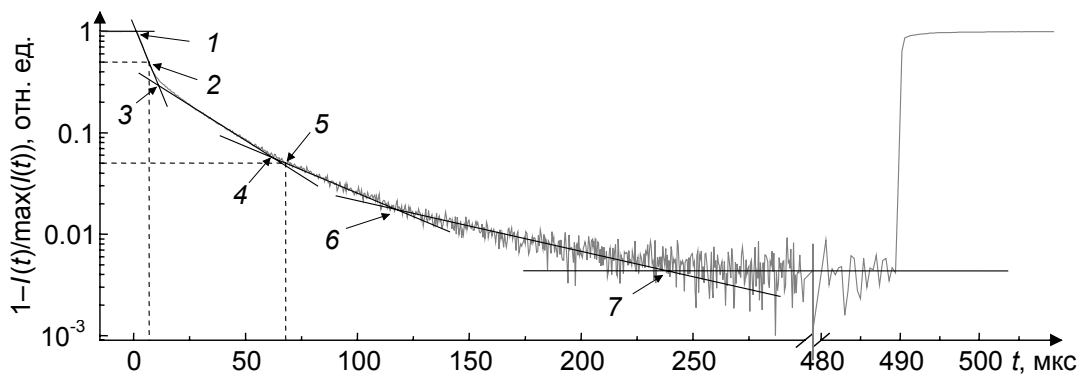


Рис. 3. Релаксационная кривая нормированной интенсивности переходной электролюминесценции на разных масштабах: 1 – время запаздывания дырок ($t_{d,h}$); 2 – время пролёта дырок по уровню 0.5 ($t_{0,5}$); 3 – время пролёта дырок ($t_{tr,h}$); 4 – время запаздывания электронов ($t_{d,e}$); 5 – время запаздывания электронов по уровню 0.95 ($t_{0,95}$); 6 – время пролёта электронов ($t_{tr,e}$); 7 – время установления стационарной интенсивности ОСИД

люминесценции $I(t)$. Точки пересечения асимптотических прямых на рис. 3 соответствуют временам запаздывания t_d и пролёта t_{tr} носителей заряда (дырок и электронов) в эмиссионном слое ОСИД (рис. 4). Под временем запаздывания понимается время, необходимое для преодоления заряженной частицей (дыркой или электроном) расстояния между анодом и катодом. При этом считается, что время запаздывания характеризует наиболее быструю часть пролёта заряженных частиц. Время, соответствующее приходу на контакты ОСИД основной части носителей заряда, называется временем пролёта.

Величина $t_{d,h}$ (1 на рис. 3) соответствует приходу «быстрых» дырок из анода в катод. При этом у границы эмиссионный слой – катод происходит встреча потоков (рекомбинация) дырок и электронов с образованием экситонов и его последующим распадом и излучением света. Будем называть область в эмиссионном слое, где происходит генерация света, – активной. Величина $t_{tr,h}$ (3 на рис. 3) соответствует приходу основной («медленной») части дырок из анода к катоду. В момент времени $t_{tr,h}$ величина d_3 меньше d_1 .

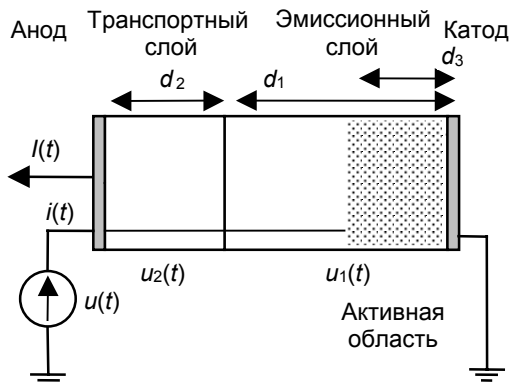


Рис. 4. Электрическая схема подключения и структура ОСИД

Здесь d_1 , d_2 , d_3 – толщина эмиссионного, транспортного слоёв и активной области. Величина $t_{d,e}$ (4 на рис. 3) характеризует приход «быстрых» электронов из катода к границе транспортный слой – эмиссионный слой. Таким образом, увеличивается активная область (область генерации света). Величина $t_{tr,e}$ (6 на рис. 3) характеризует приход основной («медленной») части электро-

нов от катода к границе транспортный слой – эмиссионный слой. В момент времени $t_{tr,e}$ толщина активной области (d_3 на рис. 4) становится близка к толщине эмиссионного слоя (d_1 на рис. 4).

Интерес представляет подвижность носителей заряда в эмиссионном слое. Как было указано выше, в органическом полупроводнике дырки и электроны двигаются с различной скоростью. Анализируя передний фронт электролюминесценции ОСИД, можно выделить «быстрые» μ_d и «медленные» μ_{tr} дырки и электроны. Выражение для подвижности таких носителей заряда в эмиссионном слое ОСИД можно определить следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \mu_{d,h} &= \frac{d_1}{E \cdot t_{d,h}}, & \mu_{0.5} &= \frac{d_1}{E \cdot t_{0.5}}, & \mu_{tr,h} &= \frac{d_1}{E \cdot t_{tr,h}}, \\ \mu_{d,e} &= \frac{d_1}{E \cdot t_{d,e}}, & \mu_{0.95} &= \frac{d_1}{E \cdot t_{0.95}}, & \mu_{tr,e} &= \frac{d_1}{E \cdot t_{tr,e}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь E – напряженность электрического поля в эмиссионном слое ОСИД. Характерные времена $t_{0.5}$ и $t_{0.95}$ позволяют приблизительно оценить подвижность дырок и электронов в случае, когда не удастся определить в эксперименте величины $t_{d,h}$, $t_{tr,h}$, $t_{d,e}$ и $t_{tr,e}$.

Для упрощения записи обозначим множества переменных $\{t_{d,h}, t_{0.5}, t_{tr,h}, t_{d,e}, t_{0.95}, t_{tr,e}\} = t_*$ и $\{\mu_{d,h}, \mu_{0.5}, \mu_{tr,h}, \mu_{d,e}, \mu_{0.95}, \mu_{tr,e}\} = \mu_*$, тогда (1) можно переписать в виде

$$\mu_* = \frac{d_1}{E \cdot t_*}, \quad (2)$$

где t_* – характерное время запаздывания/пролета носителей через эмиссионный слой; μ_* – характерная подвижность носителей заряда эмиссионного слоя.

Для того чтобы найти подвижность таких носителей, нам необходимо сделать несколько предположений о свойствах слоев ОСИД. Через ОСИД протекает ток i , при этом к контактам структуры прикладывается напряжение u . Падение напряжения в структуре распределяется между слоями. Закон Ома в стационарном приближении требует выполнения выражений

$$i = i_1 = i_2; \quad (3)$$

$$u = u_1 + u_2 = \frac{i_1 \cdot d_1}{S \cdot \sigma_1} + \frac{i_2 \cdot d_2}{S \cdot \sigma_2}, \quad (4)$$

где u , u_1 , u_2 – полное падение напряжения на контактах анод – катод ОСИД, в эмиссионном слое, в транспортном слое соответственно; i , i_1 , i_2 – электрический ток, протекающий через ОСИД, в эмиссионном слое, транспортном слое соответственно; σ_1 , σ_2 – удельная проводимость эмиссионного и транспортного слоев. Удельная проводимость транспортного слоя σ_2 (в нашем случае PEDOT:PSS) много больше удельной проводимости эмиссионного слоя σ_1 (МЕН-PPV), а значит, вторым слагаемым в (4) можно пренебречь и считать, что все прикладываемое к структуре напряжение падает в эмиссионном слое $u_1 \cong u$.

Тогда для напряженности электрического поля в эмиссионном слое ОСИД (в отсутствие пространственного заряда) можно определить следующим выражением:

$$E = \frac{u - u_{bi}}{d_1 + d_2}, \quad (5)$$

где u_{bi} – встроенное напряжение ОСИД [5].

Определим необходимые условия, при которых введение транспортного слоя в состав ОСИД не скажется на точности определения подвижности носителей заряда в эмиссионном слое на примере ОСИД со структурой, представленной на рис. 4. Для исключения влияния процессов запаздывания/пролета носителей заряда в транспортном слое (t_2) на результаты измерений времени запаздывания/пролета носителей заряда в эмиссионном слое (t_1) следует выбирать материалы транспортных слоев со значением подвижности носителей заряда в них много больше, чем подвижность носителей в эмиссионном слое. Тогда временами запаздывания/пролета носителей заряда через транспортные слои можно пренебречь, т.е. $t_1 + t_2 \approx t_1 = t_*$.

Под действием приложенного к контактам ОСИД электрического поля инжектированные из катода электроны двигаются в направлении анода (рис. 4). Так как подвижность электронов в эмиссионном слое много меньше подвижности дырок, поэтому время прихода электронов к гра-

нице раздела транспортный слой – эмиссионный слой много больше, чем пролет дырок между анодом и катодом. Электроны, которые преодолели границу раздела эмиссионный – транспортный слой, не участвуют в процессе излучательной рекомбинации. Это приводит к тому, что времена запаздывания $t_{d,e}$ и пролёта $t_{tr,e}$ характеризуют транспорт электронов в эмиссионном слое. Поэтому в формулах расчета подвижности электронов в многослойном ОСИД возможно не учитывать запаздывание электронов в транспортном слое.

Тогда с учетом (2) и (5) подвижность носителей заряда в эмиссионном слое

$$\mu_* = \frac{d_1 \cdot (d_1 + d_2)}{(u - u_{bi}) \cdot t_*}. \quad (6)$$

Времена запаздывания и пролета t_* определяются по методикам [5–7] пересечением асимптотических прямых (линии на рис. 3).

Существуют несколько экспериментальных способов определения величины встроенного напряжения u_{bi} : метод вольт-фарадных измерений [8]; фотовольтаические измерения [9]; вольт-амперные измерения [10]; метод электропоглощения [11, 12]. В наших исследованиях ограничимся методом анализа энергетической диаграммы ОСИД (см. рис. 1, а) [13]. Выражение для связи между встроенным напряжением u_{bi} , шириной запрещенной зоны полупроводника E_g , дырочного Φ_h и электронного Φ_e инжекционных барьеров для анода и катода соответственно может быть записано как $\Phi_h + \Phi_e = E_g - u_{bi}/q$. С учетом энергетической диаграммы ОСИД (рис. 1) u_{bi} приблизительно равно 1.9 В.

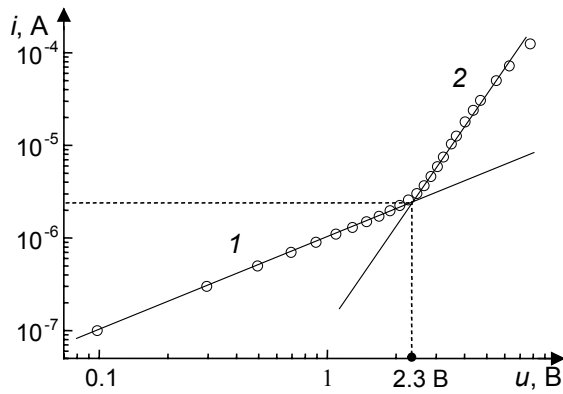


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика образца ОСИД

На рис. 5 показана зависимость протекающего через образец электрического тока i при приложении к контактам ОСИД (рис. 1) постоянного напряжения u . На рисунке, построенном в двойном логарифмическом масштабе при напряжениях u от 0.1 до 8 В, можно точно определить два характерных участка на токовой зависимости. Первый участок расположен в диапазоне напряжений $0 < u < 2.3$ В. Здесь ток ограничивается сопротивлением слоя полупроводника в отсутствие инжекции носителей заряда из контактов ОСИД. Второй

участок расположен при напряжениях $u > 2.3$.

Формулы для электрического тока, протекающего через образец, можно записать в следующем виде [5]:

$$i_{ohm} = n_0 q \mu S \frac{(u - u_{bi})}{d_1}; \quad (7)$$

$$i_{scl} = \frac{9}{8} \varepsilon \varepsilon_0 \mu S \frac{(u - u_{bi})^2}{d_1^3}. \quad (8)$$

Здесь n_0 – собственная концентрация заряда в слое полупроводника; q – элементарный электрический заряд; μ – эффективная подвижность полупроводника (если $\mu_h \gg \mu_e$, то $\mu \cong \mu_h$); d_1 – толщина слоя полупроводника; S – площадь; ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Эти выражения для тока соответствуют омической составляющей (7) и составляющей тока, ограниченной пространственным зарядом. То есть при больших напряжениях происходит переход вольт-амперной характеристики от закона Ома к инжекционному характеру зависимости $i(u)$. От того, при каких рабочих значениях напряжения работает ОСИД, будет зависеть режим его работы. Критическое значение напряжения (точка перегиба на зависимости $i(u)$ рис. 5)

$$u_{cr} = \frac{8}{9} \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} n_0 d_1^2. \quad (9)$$

Из выражения (9) можно найти концентрацию дырок носителей заряда, полагая, что диэлектрическая проницаемость ϵ МЕН-PPV равна 3, а значение u_{cr} , соответствующее точке перехода от омического ограничения к ограничению объёмным зарядом тока в ОСИД, равно $2.3 - u_{bi} = 0.4$ В. Тогда концентрация дырок в эмиссионном слое МЕН-PPV $n_0 \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Эффективную подвижность заряда на участках вольт-амперной характеристики можно получить из (8):

$$\mu = \frac{8}{9} \frac{i_{scl} d_1^3}{\epsilon \epsilon_0 S (u - u_{bi})^2} \quad (10)$$

Расчёт по формуле (10) при $u_{cr} = 0.4$ В даёт значение эффективной подвижности $\mu = 1.82 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

В экспериментах использовались образцы ОСИД на подложке с литографическим профилированием ИТО и сплошным катодом (рис. 6). Площадь активной зоны в образцах ОСИД равна 6 мм^2 . Измерение подвижности проводилось на шести пикселях в образцах ОСИД со структурами ИТО/PEDOT:PSS/МЕН-PPV/Ca/Al и ИТО/PEDOT:PSS/МЕН-PPV-POSS/Ca/Al (см. рис. 1 и 4).

На рис. 7 представлены результаты измерений полевой зависимости подвижности дырок и электронов в эмиссионном слое образцов ОСИД на основе двух материалов МЕН-PPV (а) и МЕН-PPV-POSS (б). Преимуществом исследования подвижности в образце ОСИД с шестью пикселями является возможность получения более точных значений подвижности за счёт их усреднения.

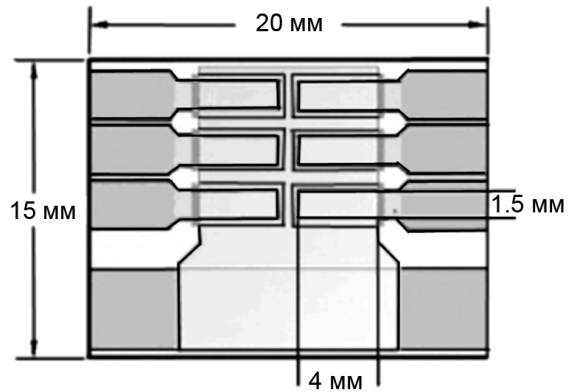


Рис. 6. Литографический профиль образцов ОСИД

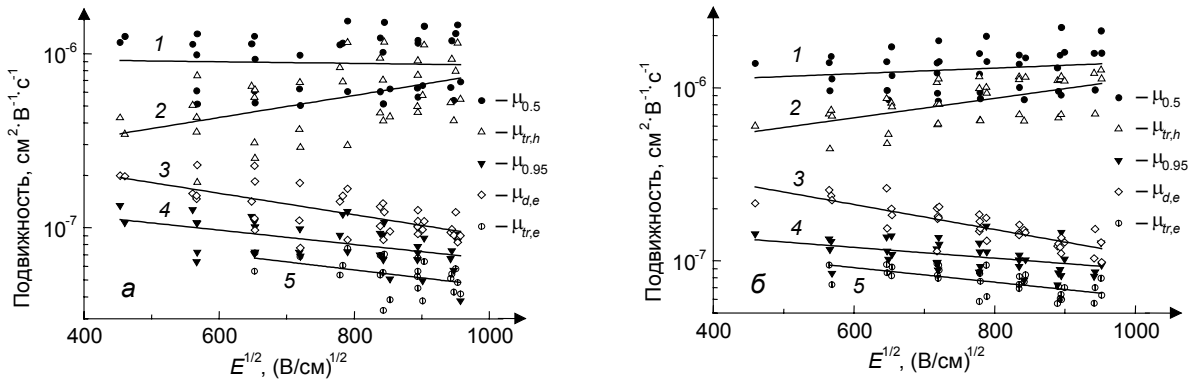


Рис. 7. Подвижность дырок и электронов в эмиссионном слое МЕН-PPV (а) и МЕН-PPV-POSS (б): кр. 1 – подвижность дырок $\mu_{0.5}$ (по уровню 0.5); кр. 2 – подвижность дырок $\mu_{tr,h}$; кр. 3 – подвижность электронов $\mu_{0.5}$ (по уровню 0.5); кр. 4 – подвижность электронов $\mu_{0.95}$ (по уровню 0.95); кр. 5 – подвижность электронов $\mu_{tr,e}$

Полученные в измерениях данные подвижности дырок в эмиссионном слое ОСИД согласуются с литературными данными, полученными другими исследователями для МЕН-PPV и МЕН-PPV-POSS [14, 15].

Значения подвижности на рис. 7 построены как функция от корня квадратного от напряженности приложенного к образцу электрического поля, так как, согласно модели Пула – Френкеля, зависимость подвижности от напряженности электрического поля для органических материалов при фиксированной температуре должна удовлетворять выражению [16]

$$\mu(E) = \mu_0 \cdot \exp\left(\frac{\beta_{P-F} E^{\frac{1}{2}}}{kT}\right),$$

где μ_0 – подвижность носителей при отсутствии приложенного электрического поля; β_{p-f} – постоянный коэффициент. Методом экстраполяции данных, представленных на рис. 7, были рассчитаны значения подвижности дырок в отсутствие приложенного поля (начальная подвижность) $\mu_*(0)$ для МЕН-PPV и МЕН-PPV-POSS. Коэффициент β_{p-f} определяется как тангенс угла наклона в координатах $\ln(\mu_*) - E^{1/2}$. Значения β_{p-f} определены из зависимостей, представленных на рис. 7.

В ходе экспериментальных измерений переходной электролюминесценции образцов ОСИД на основе МЕН-PPV и МЕН-PPV-POSS из-за наличия световой помехи не удалось измерить время запаздывания дырок $t_{d,h}$. Поэтому в таблице отсутствуют значения $\mu_{d,h}$.

Значения начальной подвижности носителей заряда и коэффициента Пула – Френкеля

Подвижность	МЕН-PPV		МЕН-PPV-POSS	
	$\mu_*(0)$, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	β_{p-f} , $\text{эВ}(\text{см}/\text{В})^{1/2}$	$\mu_*(0)$, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	β_{p-f} , $\text{эВ}(\text{см}/\text{В})^{1/2}$
$\mu_{d,h}$	–	–	–	–
$\mu_{0,5}$	$9.6 \cdot 10^{-7}$	$-2.7 \cdot 10^{-6}$	$9.6 \cdot 10^{-7}$	$9.4 \cdot 10^{-6}$
$\mu_{tr,h}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^{-5}$
$\mu_{d,e}$	$3.7 \cdot 10^{-7}$	$-3.6 \cdot 10^{-5}$	$5.7 \cdot 10^{-7}$	$-4.2 \cdot 10^{-5}$
$\mu_{0,95}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$	$-2.4 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$-1.8 \cdot 10^{-5}$
$\mu_{tr,e}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$-2.7 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$-2.4 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, экспериментально измерены полевые зависимости дрейфовой подвижности электронов и дырок в эмиссионном слое в органических светоизлучающих диодах на основе двух органических полупроводников МЕН-PPV и МЕН-PPV-POSS. Определены значения подвижности дырок и электронов в отсутствие приложенного поля для двух органических полупроводников МЕН-PPV и МЕН-PPV-POSS. Для них же определены коэффициенты β_{p-f} . Результаты измерений (таблица) показывают, что присоединение полиэдрального олигомерного силсескиоксана к поли(2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилена) существенно не сказывается на характере транспорта носителей заряда в эмиссионном слое ОСИД. А разницу в значениях подвижности носителей заряда (рис. 7, а, б и таблица) можно объяснить погрешностью в определении размеров образцов ОСИД. Отметим, что с ростом напряжённости электрического поля в ОСИД подвижность дырок увеличивается, а подвижность электрона уменьшается.

Теоретически рассчитаны значения концентрации n_0 и эффективной подвижности дырок при критическом значении напряжении u_{cr} на контактах ОСИД на основе органического полупроводника МЕН-PPV. Близость экспериментальных $\mu_{tr,h}(0) = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (см. таблицу) и теоретических $\mu = 1.82 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ значений подвижности подтверждает достоверность полученных результатов, а также применимость метода переходной электролюминесценции для исследования транспорта носителей заряда в ОСИД на основе МЕН-PPV. Полученные данные будут полезны для нахождения оптимальных толщин эмиссионного и буферных слоев в конструкциях ОСИД, а также для исследования транспортных механизмов носителей заряда в исследуемых органических полупроводниковых материалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Punke M., Valouch S., Kettlitz S.W., et al. // *Lightwave Technol.* – 2008. – V. 26. – No. 7. – P. 816.
2. Barlow I.A., Kreouzis T., and Lidzey D.G. // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – V. 94. – P. 243301.
3. Burroughes J.H., Bradley D.D.C., Brow A.R., et al. // *Nature.* – 1990. – V. 347. – P. 539.
4. Redecker M., Bradley D.D.C., Inbasekaran M., et al. // *Adv. Mater.* – 1999. – V. 11. – No. 3. – P. 241.
5. Pinner D.J., Friend R.H., and Tessler N. // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V. 86. – No. 9. – P. 5116.
6. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Романов И.В. // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 9/2. – С. 109–112.
7. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Романов И.В. и др. // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 9/2. – С. 122–124.
8. Mensfoort S.L.M. and Coehoorn R. // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – V. 100. – P. 086802.
9. Malliaras G.G., Salem J.R., Brock P.J., and Scott J.C. // *J. Appl. Phys.* – 1998. – V. 84. – P. 1583.
10. Mensfoort S.L.M., Vulto S.I.E., Janssen R.A.J., and Coehoorn R. // *Phys. Rev. B.* – 2008. – V. 78. – P. 085208.

11. Campbell I.H., Hagler T.W., Smith D.L., and Ferraris J.P. // Phys. Rev. Lett. – 1996. – V. 76. – P. 1900.
12. Hoven C.V., Peet J., Mikhailovsky A., and Nguyen T. // Appl. Phys. Lett. – 2009. – V. 94. – P. 033301.
13. Vries R.J., Mensfoort S.L.M., Janssen R.A.J., and Coehoorn R. // Phys. Rev. B. – 2010. – V. 81. – P. 125203.
14. Inigo A. R., Huang Y. F., White J. D., et al. // J. Chin. Chem. Soc. – 2010. – V. 57. – No. 3B. – P. 459.
15. Shi Q.M., Hou Y.B., Lu J., et al. // Chin. Phys. Lett. – 2006. – V. 23. – No. 4. – P. 950.
16. Bassler H. // Phys. Status Solidi B. – 1993. – V. 175. – P. 15.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: drsuvar@gmail.com

Поступила в редакцию 12.05.14.

Романов Илья Владимирович, к.ф.-м.н., мл. науч. сотр.;
Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор;
Дегтяренко Константин Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Копылова Татьяна Михайловна, д.ф.-м.н., профессор;
Коханенко Андрей Павлович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Никонова Елена Николаевна, мл. науч. сотр.