

14,15

Электрические и оптические свойства светоизлучающих полевых транзисторов на основе композитных пленок полимера МЕН-PPV с наночастицами ZnO

© А.Н. Алешин, И.П. Щербаков, Ф.С. Федичкин, П.Е. Гусаков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: aleshin@transport.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 14 мая 2012 г.)

Исследованы оптические и электрические свойства светоизлучающих полевых транзисторных структур с активным слоем на основе нанокompозитных пленок, содержащих наночастицы окиси цинка (ZnO) диспергированные в матрице растворимого сопряженного полимера МЕН-PPV. Установлено, что вольт-амперные характеристики полевого транзистора на основе пленок МЕН-PPV:ZnO с соотношением компонентов композита 2:1 имеют амбиполярный характер, а значения подвижности при 300 К в таких структурах достигают $\sim 1.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ и $\sim 1.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ для электронов и дырок соответственно, что близко к подвижности в полевых транзисторах на основе пленок ZnO. Показано, что амбиполярный полевой транзистор на основе пленок МЕН-PPV:ZnO излучает свет как при положительном, так и при отрицательном смещении на затворе. Обсуждаются механизмы инжекции, транспорта носителей заряда и излучательной рекомбинации в исследованных структурах.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН П-8 направление „Полифункциональные материалы для молекулярной электроники“, грантов РФФИ № 11-02-00451-а и НШ-3008.2012.2.

1. Введение

Нанокompозитные материалы на основе проводящих полимеров и неорганических наночастиц представляют большой интерес в связи с их практическим применением в устройствах органической электроники, таких как органические светодиоды (ОС), солнечные батареи, ячейки памяти и др. [1–4]. Использование нанокompозитных материалов для создания органических полевых транзисторов (ОПТ, англ. — OFET) является перспективным, но пока недостаточно исследованным направлением в органической электронике. Новым направлением в этой области являются впервые полученные в 2003 году светоизлучающие органические полевые транзисторы (СИ-ОПТ, англ. — LE-OFETs), которые совмещают в себе эмиссионные свойства ОС с переключающими свойствами ОПТ [5]. СИ-ОПТ могут работать как в униполярном [5,6], так и в амбиполярном [7–9] режимах. В последние годы были продемонстрированы СИ-ОПТ с активным слоем, состоящим из монополимеров [5–9], полимерных смесей [10], двух [11] или трех [12] полимерных слоев. При этом эффективность излучения трехслойного СИ-ОПТ оказалась сравнимой и даже выше, чем эффективность эквивалентных ОС [12]. Стоит отметить, что до начала наших исследований в литературе не было информации относительно СИ-ОПТ на основе нанокompозитных материалов, включающих полупроводниковые полимеры и неорганические наночастицы. Недавно нами были продемонстрированы такие СИ-ОПТ с активным слоем на основе растворимого полимера–полифлуорена (PFO) и наночастиц окиси цинка (ZnO), которые могут работать как в униполярном,

так и в амбиполярном режимах при высоких и средних концентрациях наночастиц ZnO соответственно. При этом было обнаружено, что СИ-ОПТ на основе пленок PFO:ZnO обладают аномально высокими значениями подвижности [13,14]. ОПТ на основе матрицы другого широко используемого в полимерной оптоэлектронике полимера — poly[2-methoxy,5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (МЕН-PPV) с внедренными в нее наночастицами ZnO также были продемонстрированы недавно в работе [15]. С одной стороны, в ОПТ на основе пленок МЕН-PPV:ZnO были достигнуты достаточно высокие значения подвижности дырок, вплоть до $\sim 0.15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [16], с другой стороны СИ-ОПТ были реализованы только на основе чистых пленок МЕН-PPV [17]. Свойства СИ-ОПТ на основе композитных пленок МЕН-PPV:ZnO подробно не изучены до настоящего времени. Важность таких исследований заключается в том, что СИ-ОПТ структуры являются важным этапом в создании новых светоизлучающих приборов, таких как полимерные и композитные инжекционные лазеры.

Целью настоящей работы являлось исследование оптических и электрических свойств СИ-ОПТ структур с активным слоем на основе нанокompозитных пленок, содержащих наночастицы ZnO диспергированные в матрице растворимого сопряженного полимера МЕН-PPV. Установлено, что вольт-амперные характеристики ОПТ на основе пленок МЕН-PPV:ZnO с соотношением компонентов композита 2:1 имеют амбиполярный характер с высокими значениями подвижности при 300 К достигающими до $\sim 1.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ и $\sim 1.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ для электронов и дырок соответственно. Это близко к подвижности в полевых транзисторах на основе пленок ZnO.

Показано, что амбиполярные ОПТ на основе пленок МЕН-PPV:ZnO излучают свет как при положительном так и при отрицательном смещении на затворе. Обсуждаются механизмы инжекции носителей заряда и излучения света в СИ-ОПТ структурах на основе пленок МЕН-PPV:ZnO.

2. Объекты и методы исследования

Нами исследовались оптические и электрические свойства пленок композитов на основе растворимого сопряженного полимера — poly[2-methoxy,5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (МЕН-PPV), $(C_{18}H_{28}O_2)_n$, средняя молекулярная масса, $M_w \sim 4-7 \cdot 10^4$, ширина запрещенной зоны, $E_g \sim 2.24$ eV, и наночастиц ZnO диаметром $\sim 50-70$ nm, $E_g \sim 3.3$ eV плотность — 5.6 g/cm³. Структура молекулы полимера МЕН-PPV приведена на вставке к рис. 1. Полимер МЕН-PPV и наночастицы ZnO, используемые в наших экспериментах, были приобретены в Sigma-Aldrich и использовались без дополнительной обработки. В процессе изготовления ОПТ структур МЕН-PPV растворялся в хлороформе, в котором также готовился коллоидный раствор наночастиц ZnO. Полученные растворы смешивались и после обработки ультразвуком в течение 8–10 min ($f \sim 22$ kHz) наносились на кремниевые подложки (*n*-Si со слоем SiO₂ толщиной ~ 200 nm) с термически напыленными Au- и Al-электродами. В полученных *n*-Si/SiO₂/Au/МЕН-PPV:ZnO/Al ОПТ структурах *n*-Si является затвором, а Au- и Al-электроды — истоком и стоком соответственно; расстояние между Au- и Al-электродами и ширина электродов составляли ~ 7 μm и ~ 1 mm соответственно. Слои наносились из 20% раствора полимера МЕН-PPV и наночастиц ZnO в хлороформе, а затем высушивались при 80°С

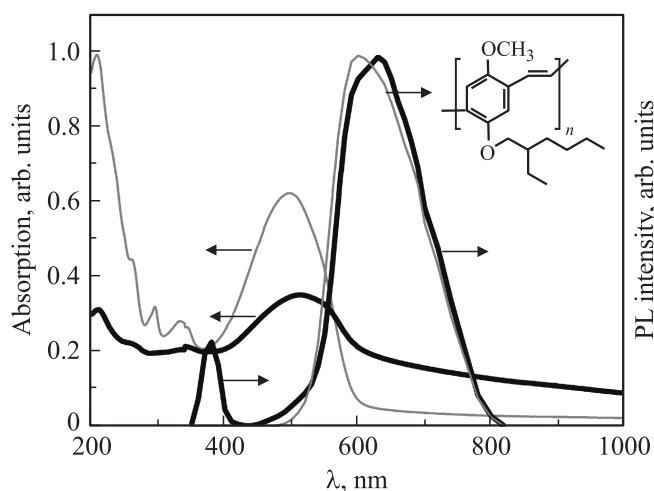


Рис. 1. Спектры поглощения и ФЛ пленок МЕН-PPV (тонкие сплошные линии) и МЕН-PPV:ZnO (2:1) (жирные сплошные линии). Толщина пленок ~ 0.6 μm. Вставка: химическая структура МЕН-PPV.

в течение 20–30 min в атмосфере азота. Толщина слоев оценивалась по результатам исследований пленок на атомно-силовом микроскопе и составляла ~ 0.6 μm. Содержание частиц ZnO в композитах составляло $\sim 10-33$ wt.%. Исследования спектров поглощения композитных пленок проводились с использованием спектрометра Cary-50 (Varian), при этом пленки наносились на кварцевые подложки (толщина пленок ~ 1 μm). Исследования спектров фотолюминесценции (ФЛ) пленок композитов МЕН-PPV:ZnO проводилось с использованием установки на основе зеркального монохроматора SPM-2, работающего в диапазоне $\sim 300-830$ nm и имеющего спектральное разрешение от 0.5 до 5 nm. Для возбуждения ФЛ использовался импульсный ультрафиолетовый азотный лазер ЛГИ-21 с длиной волны излучения 337.1 nm, плотностью энергии в импульсе более 10^{-4} J/cm² и длительностью импульса $\sim 10^{-8}$ s. На выходе SPM-2 спектры ФЛ регистрировались в спектральном диапазоне $\lambda \sim 300-830$ nm фотоэлектронным умножителем ФЭУ-136, с помощью которого регистрировался и сигнал интегральной интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) при 300° K. При измерении ФЛ- и ЭЛ-образцов для увеличения интенсивности использовалось специальное зеркало. Разрешающая способность всей установки составляла ~ 2 nm. Для исследования кинетики ФЛ пленок МЕН-PPV:ZnO использовались запоминающие двухканальные широкополосные осциллографы ТЕКТРОНИХ TDS 2002В и АСК-3106.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) ОПТ-структур на основе композитов МЕН-PPV:ZnO, помещенных на держателе азотного криостата, проводились на постоянном токе при 300° K в вакууме ($3 \cdot 10^{-3}$ Torr), в диапазоне напряжений от -30 V до $+30$ V с использованием автоматизированной установки для измерения ВАХ на основе пикоамперметра Keithley 6487 и программируемого источника питания АКПП-1124. Электрические контакты к образцам выполнялись серебряной проволокой с использованием углеродной или серебряной проводящих паст (SPI conductive carbon silver paint). Подвижность носителей заряда композитного активного слоя, μ_{FET} , оценивалась из ВАХ ОПТ в режимах насыщения и слабых полей соответственно из соотношений [18]

$$I_{DS} = (W/2L) \mu_{FET} C_1 (V_G - V_{th})^2, \quad (1)$$

$$I_{DS} = (W/L) \mu_{FET} C_1 (V_G - V_{th}) V_{DS}, \quad (2)$$

где I_{DS} и V_{DS} — ток и напряжение между стоком и истоком, W — ширина канала, L — длина канала, C_1 — емкость на квадрат площади SiO₂ (для толщины ~ 200 nm, $C_1 \sim 7-10$ nF/cm²), V_G — напряжение на затворе, и V_{th} — пороговое напряжение, которое соответствует началу режима накопления.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры поглощения и ФЛ пленок МЕН-PPV и МЕН-PPV:ZnO (концентрация на-

наночастиц ZnO ~ 33 wt.%, весовое соотношение полимера и наночастиц — 2:1). Как видно из рис. 1, спектры поглощения, как пленки МЕН-PPV так и композитной пленки МЕН-PPV:ZnO имеют максимумы в области $\lambda \sim 500$ nm, при этом введение наночастиц ZnO в матрицу полимера МЕН-PPV приводит к уменьшению интенсивности поглощения в композитной пленке по отношению к пленке МЕН-PPV, что подтверждает наличие взаимодействия между молекулами полимера и наночастиц ZnO. Спектры ФЛ пленок МЕН-PPV и МЕН-PPV:ZnO (рис. 1) показывают, что введение в полимерную матрицу наночастиц ZnO приводит к смещению положения максимума ФЛ от $\lambda \sim 600$ nm (МЕН-PPV) к $\lambda \sim 640$ nm (МЕН-PPV:ZnO). Рост концентрации наночастиц ZnO приводит к появлению пика ФЛ ~ 380 nm, связанного с ФЛ-наночастиц ZnO [19]. Исследования кинетики ФЛ пленок МЕН-PPV и МЕН-PPV:ZnO (ZnO ~ 33 wt.%) позволили оценить характерные времена релаксации возбужденных состояний, используя соотношение: $I_{PL} \sim e^{-\tau/t}$, где τ — время жизни возбужденных состояний. Полученные значения τ показывают, что время жизни τ возбужденных состояний МЕН-PPV в максимуме спектра ФЛ ($\lambda \sim 650$ nm) составляет ~ 2.5 ms, что в 1.4 больше τ носителей в максимуме спектра ФЛ композитной пленки МЕН-PPV:ZnO ($\tau \sim 1.8$ ms при $\lambda \sim 650$ nm). Таким образом, время жизни возбужденных состояний в пленке чистого МЕН-PPV снижается при введении в полимерную матрицу наночастиц ZnO, что указывает на рост концентрации дефектов в полимерной цепи МЕН-PPV [20].

На рис. 2, *a, b* показаны типичные ВАХ ОПТ на основе композитной пленки МЕН-PPV:ZnO (2:1), полученные в вакууме при различных напряжениях на затворе. Структура ОПТ с композитным активным слоем на основе МЕН-PPV:ZnO показана на вставке к рис. 2, *b*. Как видно из рис. 2, *a*, вид ВАХ ОПТ на основе МЕН-PPV:ZnO при отрицательных значениях V_G характерен для дырочного транспорта в режиме, близком к режиму насыщения. При этом зависимости I_{DS} от V_{DS} не являются полностью плоскими, что, вероятно, является следствием влияния токов утечки между электродами — истоком и затвором. При достаточно больших значениях $V_{DS} > 25$ V наблюдалось резкое увеличение I_{DS} для ОПТ на основе пленок МЕН-PPV:ZnO (вставка на рис. 2, *a*), что коррелирует с видом ВАХ, наблюдавшимся ранее в ОПТ на основе других органических материалов [6,14]. Такое поведение ВАХ указывает на возникновение канала, связанного с электронным транспортом при отрицательных значениях V_G . При положительных значениях V_G поведение ВАХ было аналогичным, однако в этом случае увеличение I_{DS} (связанное с началом дырочного транспорта) было более ярко выраженным, как показано на рис. 2, *b*. Наблюдаемое поведение ВАХ при отрицательных и положительных значениях V_G коррелирует с результатами численного моделирования, проведенного в работе [21], которое предсказывает суперлинейное увеличение тока насыщения в амбиполярном режиме ОПТ. Переходные характеристики для ОПТ в режиме насыщения при положительных и отрицательных значениях

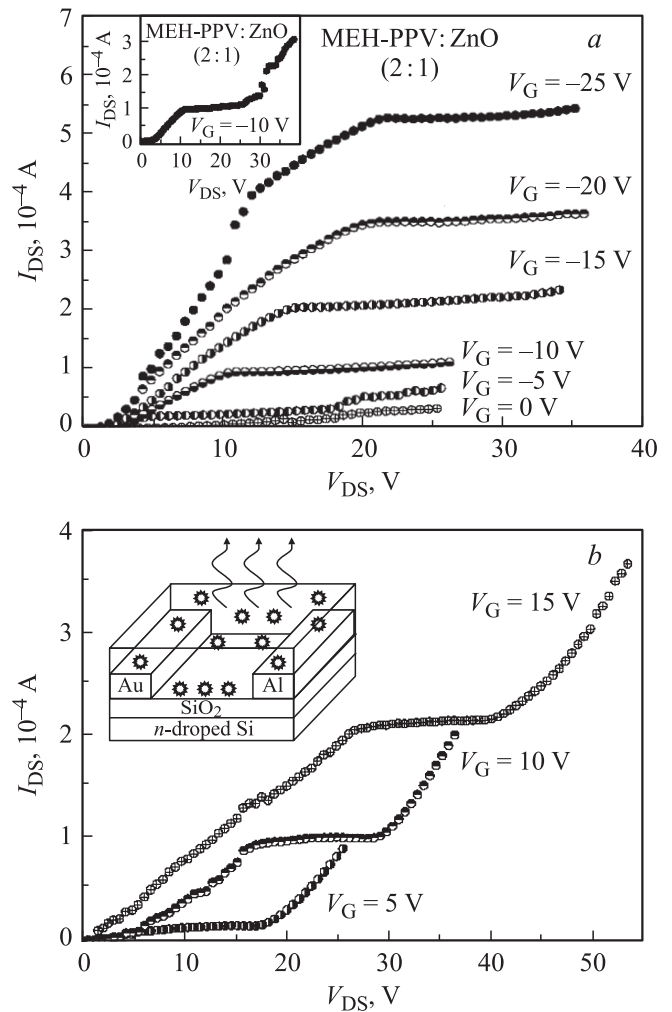


Рис. 2. *a* — ВАХ ОПТ на основе МЕН-PPV:ZnO (2:1) при 300° K для различных отрицательных значений V_G . На вставке показан рост I_{DS} при $V_{DS} > 25$ V и $V_G = -10$ V. *b* — ВАХ того же образца при 300° K для различных положительных значений V_G . Вставка: структура СИ-ОПТ на основе пленки МЕН-PPV:ZnO.

V_G , показаны на рис. 3. Значения V_G изменялись от +30 до -30 V с шагом 0.5 V при постоянном напряжении $V_{DS} = -10$ V. Как видно из рис. 3, при относительно небольшой концентрации наночастиц ZnO (2:1) ОПТ на основе пленки МЕН-PPV:ZnO работает в режиме накопления как для электронов, так и для дырок. При этом МЕН-PPV:ZnO ОПТ демонстрирует переходные характеристики с небольшим обратимым гистерезисом, амплитуда которого значительно меньше гистерезиса, наблюдавшегося ранее в ОПТ на основе чистого МЕН-PPV [16]. Такой вид ВАХ означает, что плотность ловушек в ОПТ на основе МЕН-PPV:ZnO меньше, чем в ОПТ на основе чистого МЕН-PPV, что должно приводить к улучшению электрических характеристик композитного ОПТ. Электронная и дырочная подвижности, μ_{FEET} , для МЕН-PPV:ZnO ОПТ были рассчитаны для режимов насыщения и слабых полей согласно выражени-

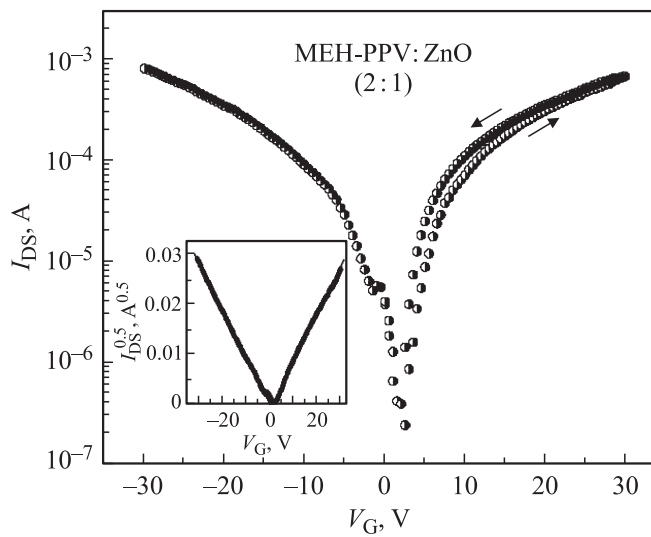


Рис. 3. Переходные характеристики ОПТ на основе MEH-PPV:ZnO (2:1) при 300 K для $V_{DS} = -10$ V. Вставка: зависимость $I_{DS}^{0.5}$ от V_G для того же образца.

ям (1) и (2). Для ОПТ на основе пленки MEH-PPV:ZnO (2:1), показанного на рис. 3, величины порогового напряжения V_{th} , оцененные из зависимостей $I_{DS}^{0.5}$ от V_G при $V_{DS} = -10$ V, составили $\sim +0.5$ V и $\sim +2$ V для отрицательных и положительных значений V_G соответственно (вставка на рис. 3). Значения электронной и дырочной подвижности при 300° K для ОПТ на основе пленки MEH-PPV:ZnO (2:1), рассчитанные по формуле (1), составили ~ 1.2 cm²/Vs и ~ 1.4 cm²/Vs соответственно. Значения μ_{FET} при 300° K, оцененные для того же образца с использованием формулы (2), составили ~ 0.32 cm²/Vs и ~ 0.63 cm²/Vs для электронов дырок соответственно, были ниже значений, полученных для режима насыщения, что, возможно, связано с влиянием на ВАХ ОПТ токов утечки в режиме насыщения. Отношение ON/OFF, характеризующее отношение токов через ОПТ без смещения на затворе и при подаче смещения на затвор, определенное из переходных характеристик, составило $\sim 10^4$ для $V_G \sim -30$ V, что выше значений ON/OFF, полученных ранее для PFO:ZnO ОПТ [13,14]. Подобное поведение ВАХ и переходных характеристик наблюдалось и для других исследованных ОПТ на основе композитных пленок MEH-PPV:ZnO с концентрацией наночастиц ZnO ~ 10 wt.% и ~ 25 wt.%. Наблюдаемые относительно низкие значения V_{th} и отношений ON/OFF указывают на низкую концентрацию состояний, связанных с ловушками, а также на небольшую величину инжекционных барьеров в контактах. Значения μ_{FET} (300° K), полученные в наших экспериментах для MEH-PPV:ZnO ОПТ с промежуточной концентрацией наночастиц ZnO, гораздо выше, чем те, которые обычно наблюдаются для ОПТ на основе пленок чистого MEH-PPV ($\sim 4 \cdot 10^{-4}$ cm²/Vs [22]), что может быть связано с вкладом как *p*-, так и *n*-компонент композита MEH-PPV:ZnO в процесс переноса заряда.

Полученные высокие значения μ_{FET} (300° K) в ОПТ на основе композитных пленок MEH-PPV:ZnO, на наш взгляд, могут быть связаны с вкладом в суммарную подвижность от подвижности в наночастицах ZnO, введение которых может приводить к снижению плотности ловушек в полимере, а также к образованию комплексов ZnO-MEH-PPV и агломератов между Al-Au-электродами. Это объяснение коррелирует с высокими значениями μ_{FET} (300° K), полученными для поликристаллического ZnO (~ 20 cm²/Vs) [23] и для ОПТ на основе ZnO (~ 7.2 cm²/Vs) [24]. Механизм транспорта, обусловленный комплексами с переносом заряда, образующимися на границе полимер-неорганические наночастицы, требует дальнейших исследований.

Оптические выходные характеристики (зависимость интенсивности ЭЛ от V_{DS}) при отрицательных и положительных значениях V_G амбиполярного СИ-ОПТ на основе MEH-PPV:ZnO (2:1) показаны на рис. 4. Как видно, интенсивность интегральной ЭЛ при 300° K растет с увеличением напряжения V_{DS} как при отрицательном, так и при положительном V_G . В СИ-ОПТ-структурах на основе композитных пленок MEH-PPV:ZnO наблюдается асимметричный вид зависимости интегральной интенсивности ЭЛ от V_{DS} с большей интенсивностью интегральной ЭЛ при положительных значениях V_{DS} относительно отрицательных V_{DS} , что, возможно, связано с формированием комплексов полимер-наночастицы. Существует фиксированное напряжение начала ЭЛ при $V_{DS} \sim 10$ V, которое не зависит от концентрации наночастиц ZnO и полярности V_G . Это напряжение отсечки можно наблюдать при значениях V_G вплоть до -30 V (рис. 4). Такая зависимость интенсивности интегральной ЭЛ от V_{DS} коррелирует с наблюдавшимся ранее поведением интенсивности интегральной ЭЛ в СИ-ОПТ на основе тетрацена, полифлуорена и PFO:ZnO [5,13,14]. Однако

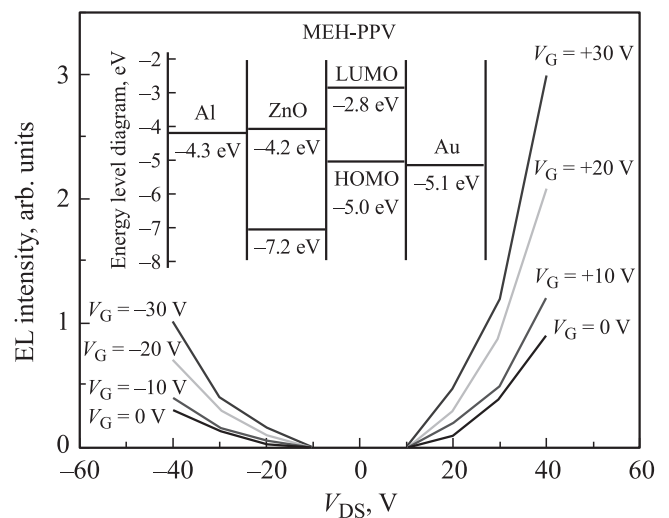


Рис. 4. Оптические выходные характеристики СИ-ОПТ на основе MEH-PPV:ZnO (2:1): интенсивность интегральной ЭЛ в зависимости от V_{DS} при различных значениях V_G при 300° K. Вставка: зонная диаграмма Au-MEH-PPV:ZnO-Al структуры.

в случае СИ-ОПТ на основе пленок МЕН-PPV:ZnO величина напряжения отсечки V_{DS} в 2 раза выше по сравнению с СИ-ОПТ на основе пленок PFO:ZnO. Была также измерена зависимость интегральной интенсивности ЭЛ от величины напряженности электрического поля (до полей $\sim 2.5 \cdot 10^3$ V/cm) для СИ-ОПТ на основе МЕН-PPV:ZnO в различных спектральных диапазонах: 1) весь диапазон — интеграл; 2) $\lambda \sim 600\text{--}830$ nm; 3) $\lambda \sim 450\text{--}620$ nm; 4) $\lambda \sim 300\text{--}400$ nm [19]. Как следует из полученных результатов, спектральное распределение ЭЛ в СИ-ОПТ на основе МЕН-PPV:ZnO лежит в основном в красной области спектра, что соответствует излучению из полимерной матрицы МЕН-PPV. Так, для МЕН-PPV:ZnO СИ-ОПТ (2:1) доля излучения в красной и синей областях спектра составляет ~ 60 и $\sim 10\%$ от интегральной интенсивности ЭЛ соответственно, что коррелирует со спектром ФЛ таких композитных пленок (рис. 1). Механизм образования возбужденных состояний в композитных пленках МЕН-PPV:ZnO включает в себя возбуждение носителей с высшей занятой молекулярной орбитали (HOMO) на низшую свободную молекулярную орбиталь (LUMO) в полимере МЕН-PPV, вклад в излучательную рекомбинацию от излучения наночастиц ZnO (при $\lambda \sim 380$ nm), а также вклад излучения от комплексов полимер-наночастицы. Как было показано в [19], некоторые каналы рекомбинации в таких системах могут быть подавлены с помощью изменения концентрации наночастиц ZnO.

Для выяснения деталей механизма инжекции носителей заряда рассмотрим зонную диаграмму структуры Au-МЕН-PPV:ZnO-Al, показанную на вставке к рис. 4. Как следует из этой зонной диаграммы, работа выхода для Au и Al электродов составляет ~ 5.1 eV и ~ 4.3 eV соответственно, в то время как энергии уровней HOMO и LUMO в МЕН-PPV равны ~ 5.0 eV и ~ 2.8 eV соответственно. Таким образом, барьер для дырок на контакте Au-МЕН-PPV составляет ~ 0.1 eV, а для электронов на контакте Al-МЕН-PPV ~ 1.5 eV. Это делает Au контакт предпочтительным для инжекции дырок в полимер МЕН-PPV. С другой стороны, энергии, соответствующие краям валентной зоны (~ 7.2 eV) и зоны проводимости (~ 4.2 eV) в ZnO ясно указывают на наличие значительного энергетического барьера для дырок который, однако, может быть преодолен при транспорте носителей из ZnO в МЕН-PPV, при этом энергия инжекционного барьера для электронов на контакте Al-ZnO составляет ~ 0.1 eV. Из этих данных видно, что структура Au-МЕН-PPV:ZnO-Al должна работать как амбиполярный СИ-ОПТ, что хорошо согласуется с нашими экспериментальными результатами для СИ-ОПТ на основе пленок МЕН-PPV:ZnO с относительно небольшой концентрацией наночастиц ZnO. Можно предположить, что введение наночастиц ZnO снижает плотность ловушек в полимере МЕН-PPV, что, вероятно, является причиной повышения подвижности в таких ОПТ-структурах.

Согласно механизму электролюминесценции СИ-ОПТ-структур, предложенному в работах [25,26], излучение в униполярном режиме обусловлено наличием

стабильного резервуара электронов, находящихся в полимере в непосредственной близости от Al контакта. Транспорт носителей заряда в структуре Al/МЕН-PPV происходит после формирования контакта и возникновения на нем постоянного электрохимического потенциала. Диффузия электронов из металла в МЕН-PPV прекращается после возникновения самоиндуцированного накопленным зарядом электрического поля, при этом масса избыточных электронов располагается рядом с контактом Al. В режиме накопления дырки движутся от истока — Au-электрода к стоку — Al-электроду, где они могут либо поглощаться металлом, либо рекомбинировать с электронами резервуара (объемного заряда). Как было недавно показано в [9,25,26], переход от униполярного к амбиполярному транспортному режиму приводит к изменению положения зоны рекомбинации носителей заряда при движении носителей с одного контакта к другому. В амбиполярном режиме рекомбинация носителей заряда с большей вероятностью осуществляется на границах полимер/диэлектрик и полимер/наночастицы ZnO, чем на контактах. Положение зоны рекомбинации может перемещаться от интерфейса металл/полимер к интерфейсам полимер/диэлектрик и полимер/наночастицы ZnO, что приводит к изменению режима транспорта от униполярного к амбиполярному. При этом пространственные неоднородности канала в СИ-ОПТ на основе МЕН-PPV:ZnO могут влиять на ЭЛ и инжекцию электронов и дырок из электродов Al и Au. Полученные результаты свидетельствуют о том, что СИ-ОПТ на основе растворимых сопряженных полимеров, таких как МЕН-PPV, и полупроводниковых наночастиц ZnO представляют собой пример многофункциональных устройств, технология получения которых совместима с современными печатными органическими электронными технологиями.

4. Заключение

Нами были получены и исследованы оптические и электрические характеристики СИ-ОПТ с активным слоем на основе композитных пленок МЕН-PPV:ZnO с промежуточным содержанием наночастиц ZnO (10–33 wt.%). Было установлено, что СИ-ОПТ на основе пленок МЕН-PPV:ZnO демонстрируют амбиполярное поведение ВАХ и работает в режиме насыщения тока при аккумуляции как дырок, так и электронов. Показано, что включение наночастиц ZnO в полимерную матрицу значительно повышает дырочную и электронную подвижности носителей заряда в таких структурах, при этом для амбиполярного СИ-ОПТ на основе МЕН-PPV:ZnO (ZnO ~ 33 wt.%), значения электронной и дырочной подвижности при 300° K составляют ~ 1.2 cm²/Vs и ~ 1.4 cm²/Vs соответственно, что близко к подвижности в полевых транзисторах на основе ZnO. СИ-ОПТ на основе композитных пленок МЕН-PPV:ZnO демонстрируют ВАХ с незначительным гистерезисом. Амбиполярный СИ-ОПТ на основе пленок

МЕН-PPV:ZnO излучает свет как при положительном, так и при отрицательном смещении на затворе. Реализация амбиполярного режима в СИ-ОПТ на основе МЕН-PPV:ZnO делает эти структуры перспективными для применения в логических схемах, элементах памяти, а также для создания на их основе полимерных инжекционных лазеров.

Список литературы

- [1] C. Sanchez, B. Julian, P. Belleville, M. Popall. *J. Mater. Chem.* **15**, 3559 (2005).
- [2] W.J.E. Beek, M.M. Wienk, R.A. Janssen. *J. Adv. Mater.* **16**, 1009 (2004).
- [3] H. Sirringhaus, N. Tesler, R.H. Friend. *Science* **280**, 1741 (1998).
- [4] B. Comiskey, J.D. Albert, H. Yoshizawa, J. Jacobson. *Nature* **394**, 253 (1998).
- [5] A. Hepp, H. Heil, W. Weise, M. Ahles, R. Schmechel, H. von Seggern. *Phys. Rev. Lett.* **91**, 157406 (2003).
- [6] F. Cicoira, C. Santato, M. Melucci, L. Favaretto, M. Gazzano, M. Muccini, G. Barbarella. *Adv. Mater.* **18**, 169 (2006).
- [7] J. Reynaert, D. Cheyons, D. Janssen, R. Muller, V.I. Arkhipov, J. Genoe, G. Borghs, P. Heremans. *J. Appl. Phys.* **97**, 114501 (2005).
- [8] J.S. Swensen, C. Soci, A.J. Heeger. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 253511 (2005).
- [9] J. Zaumseil, C.L. Donley, J.-S. Kim, R.H. Friend, H. Sirringhaus. *Adv. Mater.* **18**, 2708 (2006).
- [10] M.A. Loi, K. Rost-Bietsch, M. Murgia, S. Karg, W. Riess, M. Muccini. *Adv. Func. Mater.* **16**, 41 (2006).
- [11] F. Dinelli, R. Capelli, M.A. Loi, M. Murgia, M. Muccini, A. Facchetti, T.J. Marks. *Adv. Mater.* **18**, 1416 (2006).
- [12] R. Capelli, S. Toffanin, G. Generali, H. Usta, A. Facchetti, M. Muccini. *Nature Mater.* **9**, 496 (2010).
- [13] A.N. Aleshin, I.P. Shcherbakov. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 315104 (2010).
- [14] A.N. Aleshin, I.P. Shcherbakov, V.N. Petrov, A.N. Titkov. *Organ. Electron.* **12**, 1285 (2011).
- [15] E.J. Meijer, D.M. De Leeuw, S. Setayesh, E. Vanveenendaal, B.H. Huisman, P.W.M. Blom, J.C. Hummelen, U. Scherf, T.M. Klapwijk. *Nature Mater.* **2**, 678 (2003).
- [16] Z.-X. Xu, V.A.L. Roy, P. Stallinga, M. Muccini, S. Toffanin, H.-F. Xiang, C.-M. Che. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 223509 (2007).
- [17] T. Sakanoue, E. Fujiwara, R. Yamada, H. Tada. *Appl. Phys. Lett.* **84**, 3037 (2004).
- [18] C.D. Dimitrakopoulos, P.R.L. Malenfant. *Adv. Mater.* **14**, 99 (2002).
- [19] A.N. Aleshin, E.L. Alexandrova, I.P. Shcherbakov. *J. Phys. D* **42**, 105108 (2009).
- [20] J.M. Lupton. *Adv. Mater.* **12**, 1689 (2010).
- [21] S. Verlaak, D. Cheyons, M. Debucquoy, V. Arkhipov, P. Heremans. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 2405 (2004).
- [22] K. Asadi, F. Gholamrezaie, E.C.P. Smits, P.W.M. Blom, B. de Boer. *J. Mater. Chem.* **17**, 1947 (2007).
- [23] R. Wang, L.L.H. King, A.W. Sleight. *J. Mater. Res.* **11**, 1659 (1996).
- [24] B.N. Pal, P. Trottman, J. Sun, H.E. Katz. *Adv. Func. Mater.* **18**, 1832 (2008).
- [25] E.J. Felmeier, M. Schidleja, C. Melzer, H. von Seggern. *Adv. Mater.* **22**, 3568 (2010).
- [26] M. Schidleja, C. Melzer, M. Roth, T. Schwalm, C. Gawrisch, M. Rehahn, H. von Seggern. *Appl. Phys. Lett.* **95**, 113303 (2009).