https://doi.org/10.15350/17270529.2023.1.6

УДК 535.37+537.31

Мобильность зарядов в донорно-акцепторных соединениях на основе дифениламинов и дибензтиофендиоксидов в OLED структурах

Н. В. Измайлова, К. М. Дегтяренко, Л. Г. Самсонова

Томский государственный университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36

Аннотация. Методом переходной электролюминесценции выполнена оценка подвижности зарядов в трех замещенных донорно-акцепторных соединениях на основе дифениламинов и дибензтиофендиоксидов. Исследование выполнено в многослойной структуре, содержащей кроме эмиссионного слоя (в тексте L1, L2, L3) дырочно-транспортный и дырочно-блокирующий слои: ITO/PEDOT:PSS/NPD/L/DCP/LiF/Al. На электроды OLED структуры подавался прямоугольный импульс напряжением 5 – 9 В и длительностью 400 мкс. Проанализирован передний и задний фронт свечения образца. Для оценки подвижности зарядов (дырок) использовано время, за которое интенсивность свечения достигает половины максимального значения. Величина подвижности зарядов составила ~10^{-6} см^2/(В·с). Зависимость подвижности зарядов от корня квадратного напряженности приложенного электрического поля носит линейный характер и удовлетворяет соотношению Пула-Френкеля. Длительное послесвечение одного из соединений после снятия напряжения с электродов обсуждено в предположении высвобождения экситонов из триплетных ловушек за счет реализации механизма термически активированной замедленной флуоресценции.

Ключевые слова: органические светоизлучающие диоды, подвижность зарядов, метод переходной электролюминесценции.

✉ *Наталья Измайлова, e-mail: nataliagoleinova@mail.ru*

Charge Mobility of Substituted Donor-Acceptor Compounds Based on Diphenylamines and Dibenzothiophene Dioxides in OLED Structures

Natalya V. Izmailova, Konstantin M. Degtyarenko, Lubov G. Samsonova

Tomsk State University (36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation)

Summary. The charge mobility of three donor-acceptor-substituted compounds based on diphenylamines and dibenzothiophene dioxides was estimated using the transient electroluminescence method. The study was carried out for a multilayer structure containing, in addition to the emission layer (L1, L2, L3), a hole-transport layer and a hole-blocking layer: ITO/PEDOT:PSS/NPD/L/DCP/LiF/Al. A rectangular pulse with a voltage of 5 – 9 V and a duration of 400 μs was applied to the electrodes of the OLED structure. The electroluminescence dynamics of organic light-emitting diodes under the turn-on and turn-off of an applied voltage pulse was analyzed. The values of the times of the beginning of electroluminescence (td) reaching the intensity level of 0.5 and 0.95 when voltage was applied to the contacts of 5, 7 and 9 volts are given. To estimate the mobility of charges (holes), we used the time during which the electroluminescence intensity reached half of the maximum value. The value of charge mobility was ~10^{-6} cm^2/(V·s). The dependence of the charges mobility on the on the square root of the applied electric field is linear and satisfies the Poole-Frenkel relation. The long afterglow of one of the compounds after removing the voltage from the electrodes is discussed under the assumption that excitons are released from triplet traps due to the effect of thermally activated delayed fluorescence.

Keywords: organic light emitting diodes, charge mobility, transient electroluminescence method.

✉ *Natalia Izmailova, e-mail: nataliagoleinova@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Работа органических светоизлучающих устройств (Organic Light Emitting Diode (OLED)) напрямую связана с перемещением зарядов в органических слоях, поэтому подвижность зарядов в дырочно-проводящих, электронопроводящих и эмиссионных материалах во многом влияет на эффективность светодиода. Нужно учитывать, что высокая подвижность носителей зарядов имеет низкий выход люминесценции. В результате для достижения высоких показателей яркости следует применять комбинацию материалов,

состоящую из транспортных слоев с высокой подвижностью дырок (Hole Transport Layer (HTL)) и электронов (Electron Transport Layer (ETL)), и слой с высокой эффективностью излучения (Emission Layer (EML)). Качественный и разумный подбор материалов является основной задачей исследователей при изучении и создании OLED устройств [1].

Существуют следующие методы для определения подвижности носителей заряда: времяпролетный метод (Time-of-Flight (TOF)) [2 – 4], метод переходной электролюминесценции (transient EL method) [5, 6], ток, ограниченный пространственным зарядом (Space-Charge Limited Current (SCLC)) [7 – 9], метод органических полевых транзисторов (Organic Field-Effect Transistor (OFET) method) [10 – 12], экстракция заряда методом линейно возрастающего напряжения (Charge Extraction by Linearly Increasing Voltage (CELIV) method) [13 – 15].

Наиболее распространенными методами являются два первых. Однако времяпролетный метод требует использования толстого, в несколько микрометров, слоя исследуемого вещества и пригоден скорее для полимерных материалов [4].

В настоящей работе для изучения электролюминесцентных свойств ячеек использован метод переходной электролюминесценции, часто применяемый для количественной оценки подвижности зарядов в органических полупроводниках [16 – 18]. Метод заключается в регистрации и анализе "разгорания" и "затухания" излучения OLED ячейки при наложении на ее электродов прямоугольного импульса напряжения. Под "разгоранием" мы понимаем динамику величины тока, регистрируемого ФЭУ, при подаче прямоугольного импульса напряжения (передний фронт), а под "затуханием" – при снятии напряжения (задний фронт).

Помимо оценки величины подвижности зарядов представляет интерес чувствительность данного метода к соединениям с термически активированной замедленной флуоресценцией и без оной. В последние пару десятилетий интерес к соединениям, излучающим свет с высокой эффективностью через механизм замедленной флуоресценции очень высок (укажем здесь только обзорные работы [19, 20]). Это связано с тем, что, согласно квантовой статистике, при электровозбуждении 75 % экситонов оказываются в триплетном, как правило, неизлучающем состоянии и только 25 % – в синглетном, излучающем состоянии. В молекулах с малым энергетическим зазором между синглетным S1 и триплетным T1 состояниями возможен термически активированный переход из триплетного в синглетное состояние, повышающий эффективность OLED структуры. Так, в работах [21, 22] мы представили результаты исследования фото- и электролюминесцентных свойств новых органических соединений, излучающих в зеленой области спектра (490 – 530 нм) и имеющих в своем составе электрон-донорные фрагменты (дифениламины с различными периферическими заместителями) и электрон-акцепторный фрагмент (дибензтиофенсульфон). Показано, что, несмотря на незначительную разницу в структурах соединений (рис. 1), только одно из них обладает термически активированной замедленной флуоресценцией, а именно, L2. В настоящей работе мы продолжили исследование этих соединений с целью оценки подвижности зарядов в излучающих слоях OLED на основе соединений L1, L2 и L3.

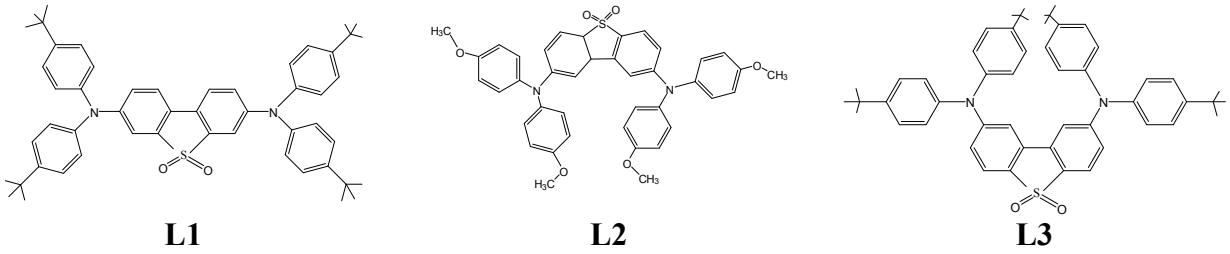

Рис. 1. Структурные формулы исследованных соединений

Fig. 1. Structural formulas of the studied compounds

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Принципиальная схема установки для регистрации переходной электролюминесценции показана на рис. 2. В качестве источника прямоугольного импульса использовался генератор Aktakom AWG-4105. Он подавал на образец прямоугольный импульс длительностью 400 мкс и амплитудой от 5 до 9 В. Электролюминесценция регистрировалась ФЭУ-140, сигнал с которого подавался на осциллограф Tektronix TDS-224, затем на компьютер. Характерное время RC в измерительной цепи при этом не превышает 1 мкс. При подаче напряжения на образец количество заряженных частиц, пришедших на контакты, будет изменяться от времени и зависеть от свойств органических полупроводников, входящих в состав OLED.

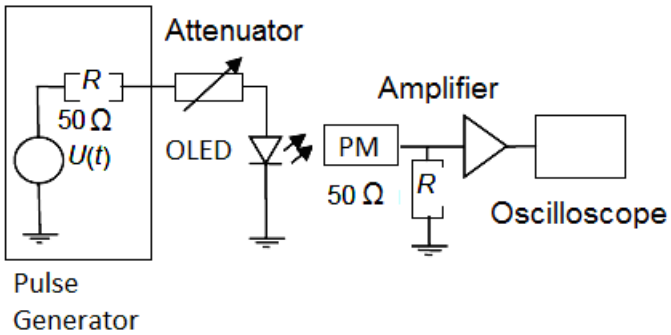

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для регистрации переходной электролюминесценции в образцах OLED

Fig. 2. Scheme of the experimental setup for recording transient electroluminescence in OLED samples, where PM is a photomultiplier

Для исследования были изготовлены OLED ячейки состава ITO/PEDOT:PSS/NPD/L/BCP/LiF/Al с эмиссионными слоями L1 (50 нм), L2 (73 нм), L3 (65 нм).

ITO – оксид индия-олова, служит анодом OLED ячейки;

PEDOT:PSS – поли (3,4-этилендиокситиофен) полистирол сульфонат – дырочно-инжекционный слой, 30 нм;

NPD – N,N′-ди(1-нафтил)-N,N′-дифенил-(1,1′-бифенил)-4,4′-диамин, дырочный транспортный слой, 20 нм;

BCP – 4,7-дифенил-1,10-фенантролин, электронтранспортный и дырочно-блокирующий слой, 18 нм;

LiF (1 нм) Al (100 нм) – катод.

Соединения PEDOT:PSS, NPD, BCP, LiF приобретены в Aldrich и использованы без дополнительной очистки. Соединения L1 – L3 синтезированы в Институте проблем химической физики РАН (г. Черноголовка).

OLED структуры формировались на стеклянных подложках, покрытых прозрачным слоем ITO с сопротивлением 12 Ом/□ (Aldrich). Подложки предварительно очищены по стандартной методике: ультразвуковая обработка в изопропиловом спирте, промывание бидистиллированной водой и заключительная обработка в кислородной плазме. Водный раствор PEDOT:PSS нанесен методом центрифугирования в атмосфере азота, остальные слои нанесены методом термовакуумного осаждения на установке "AUTO 306" производства "BOC EDWARDS" с использованием теневых масок при остаточном давлении ~10^{-5} мбар. Скорость напыления органических слоев составляла 0.02 нм/с, металлов – 2 нм/с. Контроль скорости и толщины напыляемого слоя осуществлялся кварцевым детектором "SQM 160". Органические вещества и металлы катода формировались без разгерметизации камеры. Размер активной зоны составлял 4×4 мм^2. Суммарная толщина образцов определялась быстродействующим лазерным эллипсометром ЛЭФ-757 (Новосибирск) с погрешностью измерения 0.2 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения точных значений о подвижности носителей заряда в активном (эмиссионном) слое светодиода (L1, L2, L3) 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 из-за шумов измерительной схемы и фона. Это сопряжено с возрастанием погрешности измерения подвижности носителей заряда при низких значениях напряженности электрического поля, приложенного к электродам структуры. Введение транспортных слоёв позволяет увеличить световой поток OLED и уменьшить его рабочее напряжение [23]. Для органических светодиодов характерно, что мобильность дырок значительно выше, чем электронов и ток в цепи с OLED, по крайней мере сразу после наложения импульса электрического поля, обусловлен прежде всего дырочной проводимостью.

Определим необходимые условия, при которых введение транспортного слоя в состав OLED не скажется на точности определения подвижности носителей заряда в эмиссионном слое. Для исключения влияния процессов запаздывания/пролета носителей заряда в транспортном слое (t2) на результаты измерений времени запаздывания/пролета носителей заряда в эмиссионном слое (t1) следует выбирать материалы транспортных слоев с подвижностью носителей заряда в них много большей, чем в эмиссионном слое. Тогда временами запаздывания/пролета носителей заряда через транспортные слои можно пренебречь, т.е. $t1+t2 \approx t1 = t^*$ [23].

Наша многослойная структура OLED построена из предположения, что подвижность носителей заряда (дырок) транспортного слоя намного больше, чем подвижность носителей заряда эмиссионного слоя, и наличие данного слоя не дает большого вклада в общую картину. Величина подвижности дырок транспортных слоев приведена в табл. 1.

Таблица 1. Подвижность дырок в транспортных слоях

Table 1. Mobility of holes in transport layers

Соединение Compound	**Дрейфовая подвижность дырок, см^2/(с·В)** Drift mobility of holes, cm^2/(c·V)	**Ссылка на источник литературы** Link to literature source
NPD	$6.0 \cdot 10^{-4}$	[24]
PEDOT:PSS	0.77	[25]
BCP	$9 \cdot 10^{-8}$	[24]

В табл. 2 приведены значения HOMO и LUMO уровней используемых материалов, а на рис. 3 приведена схема их относительного расположения.

Таблица 2. Энергии HOMO и LUMO материалов структуры OLED

Table 2. HOMO and LUMO energies of OLEDs materials

Вещество Substance	**HOMO,** eV	**LUMO,** eV	**Ссылка на источник литературы** Link to literature source
ITO	-	-4.7	[24]
PEDOT:PSS	-5.1	-3.1	[24]
NPD	-5.5	-2.4	[25]
L1	-4.8	-1.36	[22]
L2	-4.9	-1.33	[22]
L3	-5.2	-1.5	[22]
BCP	-6.2	-2.7	[24]
LiF:Al	-	- 3.1	[24]

Из рис. 3 видно, что между HOMO уровнями светоизлучающих слоев L и слоем BCP имеется большой энергетический зазор, ~2 эВ, препятствующий дальнейшему продвижению дырки в сторону катода. Встречное движение электронов идет по LUMO уровням и в слое L происходит образование экситонов и их рекомбинация, начиная с поверхности ближайшей к слою BCP и продвигаясь со временем по всей толщине L.

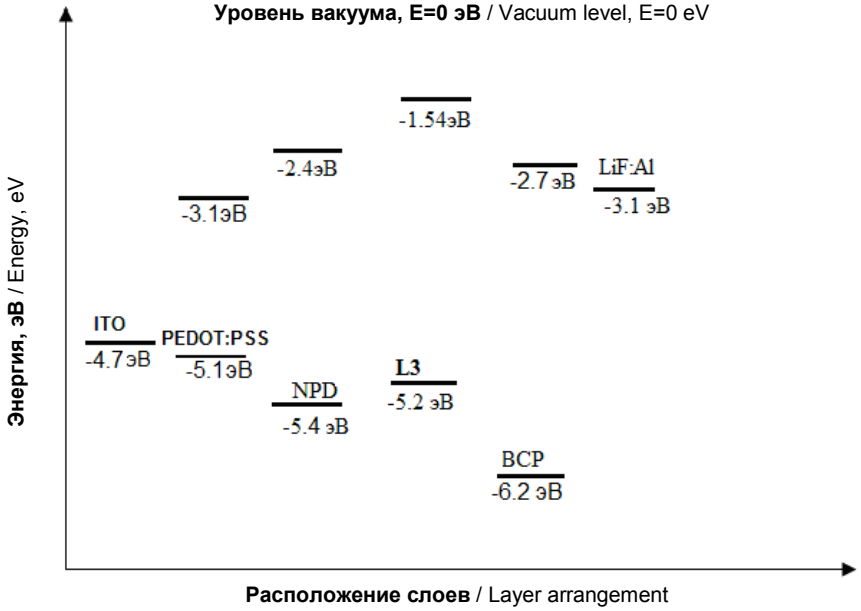

Рис. 3. Схема расположения HOMO и LUMO уровней OLED структуры с L3

Fig. 3. The layout of the HOMO and LUMO levels of the OLED structure with L3

На рис. 4 приведены кривые "разгорания" и "затухания" электролюминесценции OLED структур, отличающихся излучающими слоями, после того как на электроды подавался прямоугольный импульс напряжения длительностью 400 мкс. Скорость роста интенсивности на переднем фронте определяется, прежде всего, мобильностью зарядов (дырок) в излучающем слое.

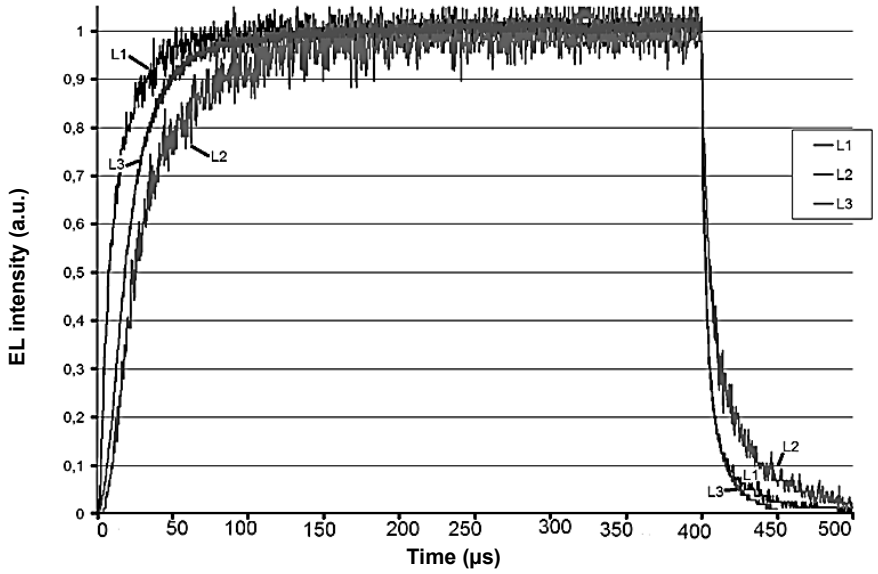

Рис. 4. Нормированные кривые роста интенсивности и спада электролюминесценции при подаче и снятии напряжения с образцов OLED (U=7 В, 1 кГц, 400 мкс)

Fig. 4. Normalized electroluminescence intensity during the applied and removed voltage to the OLED samples (U=7 V, 1 kHz, 400 μs)

Подвижность носителей заряда определяется из анализа переднего фронта электролюминесценции по формуле [23].

$$\mu = d/E \cdot t_T, \quad (1)$$

где μ – подвижность носителей заряда (дырок или электронов), d – толщина слоя полупроводника, E – напряжённость электрического поля в слое полупроводника, t_T – время пролёта носителей заряда в слое полупроводника.

Напряженность электрического поля в слое полупроводника рассчитывается по формуле

$$E=(U-U_{\text{built-in}})/d, \quad (2)$$

где U – полное падение напряжения на контактах анод-катод OLED, $U_{\text{built-in}}$ – встроенное напряжение OLED. В нашем случае $U_{\text{built-in}} \sim 1.6$ эВ, определяемое как разность работ выхода анода ITO (4.7 эВ) и катода LiF/Al (3.1 эВ) для OLED структуры ITO/PEDOT:PSS/NPD/L/BCP/LiF/Al.

При расчете подвижности по формуле (1) наиболее критичным и обсуждаемым в литературе является время [26 – 28], которое мы должны взять из рис. 4. Время начала электролюминесценции (t_d, время запаздывания) необходимо 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 и не является характерным для основного потока частиц (дырок). Время, соответствующее приходу на контакты OLED основной части носителей заряда, называется временем пролёта t_{tr}. Этому времени соответствует ситуация, когда люминесценция начинает разгораться в приповерхностном слое эмиссионного слоя, ближайшего к катоду. То есть время, когда еще не установился стационарный режим движения встречных зарядов по всей толщине образца, и можно говорить о подвижности пока одного типа заряженных частиц, дырок. Часто для вычисления значения μ берется время, которому соответствует уровень люминесценции равный 0.5 (рис. 4). В настоящей работе мы поступили таким же образом.

В табл. 3 приведены значения времен начала электролюминесценции t_d, достижения уровня 0.5 и 0.95, а также значения подвижности зарядов для слоев с L1 и L2 при подаче напряжения на контакты 5, 7 и 9 вольт.

Таблица 3. Подвижность носителей заряда в ячейках OLED при U = 5 – 9 В

Table 3. The charge mobility in OLED cells at U = 5 – 9 V

Ячейка / Cell	***U*, В** (V)	**t_d, мкс** (ms)	**$t_{0.5}$, мкс** (ms)	**$t_{0.95}$, мкс** (ms)	***d*, нм** (nm)	**Подвижность $\mu_{0.5}$, см^2/(с·В)** Mobility $\mu_{0.5}$, cm^2/(c·V)
ITO/PEDOT:PSS/NPD/**L1**/ BCP/LiF/Al	5 7 9	1.6 2 1.6	20 8.4 5.2	797 77 28	110 110 110	$(1.6 \pm 0.15)\cdot10^{-6}$ $(2.5 \pm 0.25)\cdot10^{-6}$ $(3.0 \pm 0.3)\cdot10^{-6}$
ITO/PEDOT:PSS/NPD/**L2**/ BCP/LiF/Al	5 7	2 3.6	91 26	262 321	133 133	$(5.3 \pm 0.5)\cdot10^{-7}$ $(1.2 \pm 0.11)\cdot10^{-6}$
ITO/PEDOT:PSS/NPD/**L3**/ BCP/LiF/Al	5 7 9	2.4 2.2 1.6	82 19 7	307 75 32	125 125 125	$(5.2 \pm 0.5)\cdot10^{-7}$ $(1.4 \pm 0.14)\cdot10^{-6}$ $(2.9 \pm 0.29)\cdot10^{-6}$

Из табл. 3 видно, что значения подвижности зарядов малы на два порядка ниже, чем в транспортном слое NPD (табл. 1), следовательно, время движения зарядов в транспортном слое практически не вносит погрешности в определение μ. Рассчитанная подвижность, таким образом, характеризует скорость перемещения дырок именно в эмиссионных слоях L1,

L2 и L3. Поскольку структура соединений достаточно близка, полученные значения подвижности отличаются не разительно. Значения подвижности зарядов растут с увеличением напряжения на электродах ячейки и имеют линейный характер от квадратного корня напряженности электрического поля (рис. 5), что соответствует модели Пула-Френкеля и описывается формулой

$$\mu(\mathrm{E}) = \mu_0 \cdot \exp\left\{\frac{\beta_{P-F}\sqrt{E}}{\kappa \mathrm{T}}\right\}, \tag{3}$$

где μ_0 – подвижность носителей заряда при отсутствии приложенного электрического поля, β – постоянный коэффициент.

Из рис. 5 видно, что подвижность дырок несколько отличается у соединений при более низких значениях напряженности электрического поля и сближается при его возрастании. В слабом поле подвижность дырок в L1 примерно в два раза выше, чем в соединениях L2 и L3.

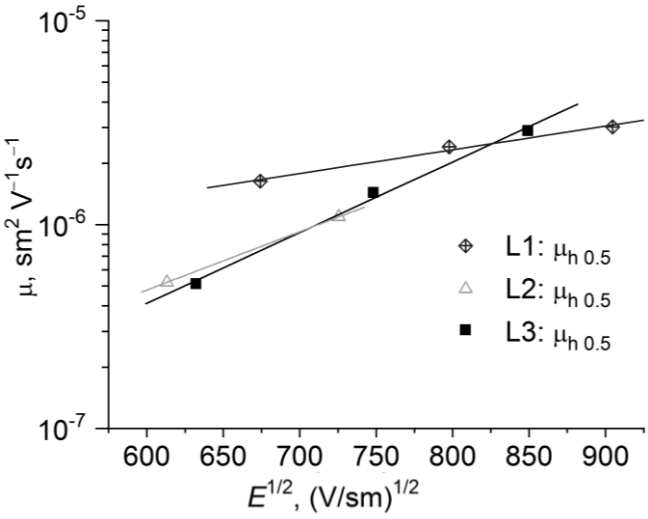

Рис. 5. Зависимость подвижности зарядов от корня квадратного напряженности электрического поля

Fig. 5. The dependence of the charge mobility on the root of the square electric field strength

Анализируя задний фронт импульса (рис. 4), видно, что излучение OLED структур с соединениями L1 и L3 достаточно быстро спадает после отключения внешнего электрического поля, тогда как структура с L2 продолжает излучать в течение ~100 – 150 мкс. Послесвечение обязано, с одной стороны, образованию экситонов "по инерции" в течение некоторого времени за счет внутренних электростатических сил, с другой стороны, высвобождению зарядов из ловушек. В органических светоизлучающих устройствах таковыми, прежде всего, являются триплетные состояния и в большинстве случаев они релаксируют безызлучательно. В работах [21, 22] нами показано, что из трех исследуемых соединений L2 обладает наименьшей энергетической щелью между S1 и T1 состояниями, $\Delta E_{ST} = 0.15$ эВ, и для него была обнаружена термически активированная замедленная флуоресценция. Если время жизни обычной флуоресценции органических соединений лежит в наносекундном диапазоне, то термически активированная замедленная флуоресценция может излучать в широком временном диапазоне, от сотен наносекунд, до миллисекунд. Это зависит от ряда факторов, таких как величина энергетической щели между S1 и T1 состояниями, молекулярно-орбитальная природа этих состояний и др. Затягивание послесвечения OLED структуры обязано, таким образом, дополнительному времени жизни экситона в триплетном состоянии с последующей рекомбинацией через синглетное состояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе использован метод переходной электролюминесценции для определения подвижности зарядов в эмиссионных слоях OLED структур с наличием дополнительных дырочно-транспортного и дырочно-блокирующего слоев. Поскольку в органических полупроводниках дырочная подвижность больше подвижности электронов, нами были приведены данные по расчету именно дырочной подвижности носителей заряда. Величина подвижности зарядов исследованных соединений составляет ~10^{-6} см^2/(с·В) и характер ее изменения от напряженности приложенного электрического поля подчиняется модели Пула-Френкеля.

Наблюдаемое заметное отличие процесса "затухания" OLED структуры с L2 от структур с L1 и L3 после отключения внешнего электрического поля, наиболее вероятно, связано с высвобождением экситонов из триплетных ловушек у соединения, в котором реализуется механизм термически активированной замедленной флуоресценции.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030, Проект №2.0.7.22 МЛ).

The study was supported by the Development Program of Tomsk State University (Priority-2030, Project No. 2.0.7.22 ML).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарев М. Н., Витухновский А. Г., Каткова М. А. Органические светоизлучающие диоды (OLED). Нижний Новгород: Деком, 2011. 360 с.

2. Scher H., Montroll E. W. Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids // Physical Review B, 1975, vol. 12(6), pp. 2455-2477. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.12.2455

3. Lebedev E., Dittrich Th., Petrova-Koch V., Karg S., Brütting W. Charge carrier mobility in poly(p-phenylenevinylene) studied by the time-of-flight technique // Applied Physics Letters, 1977, vol. 71, pp. 2686-2688. https://doi.org/10.1063/1.120179

4. Dost R., Das A., Grell M. Time-of-flight mobility measurements in organic field-effect transistors // Journal of Applied Physics, 2008, vol. 104, 084519. https://doi.org/10.1063/1.3006443

5. Tse S. C., Fong H. H., So S. K. Electron transit time and reliable mobility measurements from thick film hydroxyquinoline-based organic light-emitting diode // Journal of Applied Physics, 2003, vol. 94(3), pp. 2033-2037. https://doi.org/10.1063/1.1589175

6. Hosokawa C., Tokailin H., Higashi H., Kusumoto T. Transient behavior of organic thin film electroluminescence // Applied Physics Letters, 1992, vol. 60(10), pp. 1220-1222. https://doi.org/10.1063/1.107411

7. Van Slyke S. A., Chen C. H., Tang C. W. Organic electroluminescent devices with improved stability // Applied Physics Letters, 1996, vol. 69(15), pp. 2160-2162. https://doi.org/10.1063/1.117151

8. Tse S. C., Tsang S. W., So S. K., Polymeric conducting anode for small organic transporting molecules in dark injection experiments // Journal of Applied Physics, 2006, vol. 100(6), 063708. https://doi.org/10.1063/1.2348640

REFERENCES

1. Bochkarev M. N., Vitukhnovskiy A. G., Katkova M. A. *Organicheskie svetoizluchayushchie diody (OLED)* [Organic Light Emitting Diodes (OLED)]. Nizhniy Novgorod: Dekom Publ., 2011. 360 p.

2. Scher H., Montroll E. W. Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids. *Physical Review B*, 1975, vol. 12(6), pp. 2455-2477. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.12.2455

3. Lebedev E., Dittrich Th., Petrova-Koch V., Karg S., Brütting W. Charge carrier mobility in poly(p-phenylenevinylene) studied by the time-of-flight technique. *Applied Physics Letters*, 1977, vol. 71, pp. 2686-2688. https://doi.org/10.1063/1.120179

4. Dost R., Das A., Grell M. Time-of-flight mobility measurements in organic field-effect transistors. *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 104, 084519. https://doi.org/10.1063/1.3006443

5. Tse S. C., Fong H. H., So S. K. Electron transit time and reliable mobility measurements from thick film hydroxyquinoline-based organic light-emitting diode. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94(3), pp. 2033-2037. https://doi.org/10.1063/1.1589175

6. Hosokawa C., Tokailin H., Higashi H., Kusumoto T. Transient behavior of organic thin film electroluminescence. *Applied Physics Letters*, 1992, vol. 60(10), pp. 1220-1222. https://doi.org/10.1063/1.107411

7. Van Slyke S. A., Chen C. H., Tang C. W. Organic electroluminescent devices with improved stability. *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 69(15), pp. 2160-2162. https://doi.org/10.1063/1.117151

8. Tse S. C., Tsang S. W., So S. K., Polymeric conducting anode for small organic transporting molecules in dark injection experiments. *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100(6), 063708. https://doi.org/10.1063/1.2348640

9. Weiß O. J., Krause R. K., Hunze A. Hole mobility of 1-NaphDATA // Journal of Applied Physics, 2008, vol. 103, 043709. https://doi.org/10.1063/1.2841362

10. Dimitrakopoulos C. D., Purushothaman S., Kymissis J., Callegari A., Shaw J. M. Low-Voltage Organic transistors on plastic comprising high-dielectric constant gate insulators // Science, 1999, vol. 283, is. 5403, pp. 822-824. https://doi.org/10.1126/science.283.5403.822

11. Pesavento P. V., Chesterfield R. J., Newman C. R., Frisbie C. D. Gated four-probe measurements on pentacene thin-film transistors: Contact resistance as a function of gate voltage and temperature // Journal of Applied Physics, 2004, vol. 96(12), pp. 7312-7324. https://doi.org/10.1063/1.1806533

12. Goldmann C., Haas S., Krellner C., Pernstich K. P., Gundlach D. J., Batlogg B. Hole mobility in organic single crystals measured by a "flip-crystal" field-effect technique // Journal of Applied Physics, 2004, vol. 96(4), pp. 2080-2086. https://doi.org/10.1063/1.1767292

13. Juška G., Arlauskas K., Viliūnas M., Kočka J. Extraction current transients: New method of study of charge transport in microcrystalline silicon // Physical Review Letters, 2000, vol. 84(21), pp. 4946-4949. https://doi.org/10.1103/PhysRevLet8t.84.4946

14. Mozer A. J., Sariciftci N. S., Pivrikas A., Österbacka R., Juška G., Brassat L., Bässler H. Charge carrier mobility in regioregular poly(3-hexylthiophene) probed by transient conductivity techniques: A comparative study // Physical Review B, 2005, vol. 71, 035214. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.035214

15. Juška G., Nekraša N., Valentinavičius V., Meredith P., Pivrikas A. Extraction of photogenerated charge carriers by linearly increasing voltage in the case of Langevin recombination // Physical Review B, 2011. vol. 84, 155202. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.155202

16. Lee H. Investigation of charge-transport properties in polymer/fullerene blends using transient electroluminescence technique // Japanese Journal of Applied Physics, 2020, vol. 59(8), 081004. http://dx.doi.org/10.35848/1347-4065/aba5df

17. Nabha-Barnea S., Gotleyb D., Yonish A., Shikler R. Relating transient electroluminescence lifetime and bulk transit time in OLED during switch-off // Journal of Materials Chemistry C, 2021, vol. 9(2), pp. 719-726. https://doi.org/10.1039/D0TC04143B

18. Shen Q., Hao Y., Ma L., Wang X. Comparative study of red/ green/blue quantum-dot light-emitting diodes by time-resolved transient electroluminescence // Journal of Physical Chemistry Letters, 2021, vol. 12(29), pp. 7019-7025. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.1c01560

19. Liu Y., Li C., Ren Z., Yan S., Bryce M. R. All-organic thermally activated delayed fluorescence materials for organic light-emitting diodes // Nature Reviews Materials, 2018, vol. 3, 18020. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2018.20

20. Teng J.-M., Wang Y.-F., Chen C.-F. Recent progress of narrowband TADF emitters and their applications in OLEDs // Journal of Materials Chemistry C, 2020, vol. 8, pp. 11340-11353 https://doi.org/10.1039/D0TC02682D

21. Gadirov R. M., Samsonova L. G., Degtyarenko K.M., Kurtsevich A. E., Yakushchenko I. K., Kopylova T. N. Spectral-luminescent and electroluminescent properties of charge-transfer systems based on electron-donating diphenylamine derivatives and acceptors of dibenzothiophene sulfone and

9. Weiß O. J., Krause R. K., Hunze A. Hole mobility of 1-NaphDATA. *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 103, 043709. https://doi.org/10.1063/1.2841362

10. Dimitrakopoulos C. D., Purushothaman S., Kymissis J., Callegari A., Shaw J. M. Low-Voltage Organic transistors on plastic comprising high-dielectric constant gate insulators. *Science*, 1999, vol. 283, is. 5403, pp. 822-824. https://doi.org/10.1126/science.283.5403.822

11. Pesavento P. V., Chesterfield R. J., Newman C. R., Frisbie C. D. Gated four-probe measurements on pentacene thin-film transistors: Contact resistance as a function of gate voltage and temperature. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 96(12), pp. 7312-7324. https://doi.org/10.1063/1.1806533

12. Goldmann C., Haas S., Krellner C., Pernstich K. P., Gundlach D. J., Batlogg B. Hole mobility in organic single crystals measured by a "flip-crystal" field-effect technique. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 96(4), pp. 2080-2086. https://doi.org/10.1063/1.1767292

13. Juška G., Arlauskas K., Viliūnas M., Kočka J. Extraction current transients: New method of study of charge transport in microcrystalline silicon. *Physical Review Letters*, 2000, vol. 84(21), pp. 4946-4949. https://doi.org/10.1103/PhysRevLet8t.84.4946

14. Mozer A. J., Sariciftci N. S., Pivrikas A., Österbacka R., Juška G., Brassat L., Bässler H. Charge carrier mobility in regioregular poly(3-hexylthiophene) probed by transient conductivity techniques: A comparative study. *Physical Review B*, 2005, vol. 71, 035214. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.035214

15. Juška G., Nekraša N., Valentinavičius V., Meredith P., Pivrikas A. Extraction of photogenerated charge carriers by linearly increasing voltage in the case of Langevin recombination. *Physical Review B*, 2011. vol. 84, 155202. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.155202

16. Lee H. Investigation of charge-transport properties in polymer/fullerene blends using transient electroluminescence technique. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 59(8), 081004. http://dx.doi.org/10.35848/1347-4065/aba5df

17. Nabha-Barnea S., Gotleyb D., Yonish A., Shikler R. Relating transient electroluminescence lifetime and bulk transit time in OLED during switch-off. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, vol. 9(2), pp. 719-726. https://doi.org/10.1039/D0TC04143B

18. Shen Q., Hao Y., Ma L., Wang X. Comparative study of red/ green/blue quantum-dot light-emitting diodes by time-resolved transient electroluminescence. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2021, vol. 12(29), pp. 7019-7025. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.1c01560

19. Liu Y., Li C., Ren Z., Yan S., Bryce M. R. All-organic thermally activated delayed fluorescence materials for organic light-emitting diodes. *Nature Reviews Materials*, 2018, vol. 3, 18020. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2018.20

20. Teng J.-M., Wang Y.-F., Chen C.-F. Recent progress of narrowband TADF emitters and their applications in OLEDs. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, vol. 8, pp. 11340-11353. https://doi.org/10.1039/D0TC02682D

21. Gadirov R. M., Samsonova L. G., Degtyarenko K.M., Kurtsevich A. E., Yakushchenko I. K., Kopylova T. N. Spectral-luminescent and electroluminescent properties of charge-transfer systems based on electron-donating diphenylamine derivatives and acceptors of dibenzothiophene sulfone and

phenanthridine // Journal of Fluorescence, 2021, vol. 31, pp. 1333-1342. https://doi.org/10.1007/s10895-021-02758-5

22. Gadirov R. M., Valiev R. R., Samsonova L. G., Degtyarenko K. M., Izmailova N. V., Odod A. V., Krasnikova S. S., Yakushchenko I. K., Kopylova T. N. Thermally activated delayed fluorescence in dibenzothiophene sulfone derivatives: Theory and experiment // Chemical Physics Letters, 2019, vol. 717, pp. 53-58. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.01.014

23. Pinner D. J., Friend R. H., Tessler N. Transient electroluminescence of polymer light emitting diodes using electrical pulses // Journal of Applied Physics, 1999, vol. 86, pp. 5116-5130. https://doi.org/10.1063/1.371488

24. You Y., An C.-G., Lee D.-S., Kima J.-J., Young S. Park Silicon-containing dendritic tris-cyclometalated Ir(III) complex and its electrophosphorescence in a polymer host // Journal of Material Chemistry, 2006, vol. 16, pp. 4706-4713. https://doi.org/10.1039/B611288A

25. Martin S. J., Verschoor G. L. B., Webster M. A., Walkera A. B. The internal electric field distribution in bilayer organic light emitting diodes // Organic Electronics, 2002, vol. 3, pp. 129-141. https://doi.org/10.1016/S1566-1199(02)00050-2

26. Тамеев А. Р., Никитенко В. Р., Лыпенко Д. А., Ванников А. В. Переходная электролюминесценция и аномальная дисперсия носителей заряда в тонких полимерных пленках // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, вып. 9. С. 1840-1845.

27. Yamashita M., Otani C., Okuzaki H., Shimizu M. Nondestructive measurement of carrier mobility in conductive polymer PEDOT:PSS using terahertz and infrared spectroscopy // IEEE Xplore. Conference: General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI. https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6050616

28. Романов И. В., Войцеховский А. В., Дегтяренко К. М., Копылова Т. Н., Коханенко А. П., Никонова Е. Н. Определение подвижности носителей заряда в плёнках органических полупроводников MEH-PPV и MEH-PPV-POSS // Известия вузов. Физика. 2014. Т, 57, № 11. С. 116-123.

phenanthridine. *Journal of Fluorescence*, 2021, vol. 31, pp. 1333-1342. https://doi.org/10.1007/s10895-021-02758-5

22. Gadirov R. M., Valiev R. R., Samsonova L. G., Degtyarenko K. M., Izmailova N. V., Odod A. V., Krasnikova S. S., Yakushchenko I. K., Kopylova T. N. Thermally activated delayed fluorescence in dibenzothiophene sulfone derivatives: Theory and experiment. *Chemical Physics Letters*, 2019, vol. 717, pp. 53-58. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.01.014

23. Pinner D. J., Friend R. H., Tessler N. Transient electroluminescence of polymer light emitting diodes using electrical pulses. *Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 86, pp. 5116-5130. https://doi.org/10.1063/1.371488

24. You Y., An C.-G., Lee D.-S., Kima J.-J., Young S. Park Silicon-containing dendritic tris-cyclometalated Ir(III) complex and its electrophosphorescence in a polymer host. *Journal of Material Chemistry*, 2006, vol. 16, pp. 4706-4713. https://doi.org/10.1039/B611288A

25. Martin S. J., Verschoor G. L. B., Webster M. A., Walkera A. B. The internal electric field distribution in bilayer organic light emitting diodes. *Organic Electronics*, 2002, vol. 3, pp. 129-141. https://doi.org/10.1016/S1566-1199(02)00050-2

26. Tameev A. R., Lypenko D. A., Vannikov A. V., Nikitenko V. R. Transient Electroluminescence and Anomalous Dispersion of Charge Carriers in Thin Polymer Films. *Physics of the Solid State,* 2009, vol. 51, no. 9, pp. 1954-1960. https://doi.org/10.1134/S1063783409090315

27. Yamashita M., Otani C., Okuzaki H., Shimizu M. Nondestructive measurement of carrier mobility in conductive polymer PEDOT:PSS using terahertz and infrared spectroscopy. *IEEE Xplore. Conference: General Assembly and Scientific Symposium*, 2011 XXXth URSI. https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6050616

28. Romanov I. V., Voitsekhovsii A. V., Dyagterenko K. M., Kopylova T. N., Kokhanenko A. P., Nikonova E. N. Mesurement of charge carries mobility in MEH-PPV-POOS organic semiconductor films. *Russian Physics Journal,* 2015, vol. 57, no. 11, pp. 1584-1592. https://doi.org/10.1007/s11182-015-0422-z

Поступила 26.01.2023; после доработки 16.02.2023; принята к опубликованию 20.02.2023
Received January 26, 2023; received in revised form February 16, 2023; accepted February 20, 2023

Информация об авторах

***Измайлова Наталья Викторовна**, аспирант Томского государственного университета, Томск, Россия, e-mail: nataliagoleinova@mail.ru*

***Дегтяренко Константин Михайлович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета, Томск, Россия*

***Самсонова Любовь Гавриловна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета, Томск, Россия*

Information about the authors

***Natalia V. Izmailova,** Post Graduate Student, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: nataliagoleinova@mail.ru*

***Konstsntin M. Degtyarenko,** Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

***Lubov G. Samsonova,** Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*