

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-N-ЭПОКСИПРОПИЛКАРБАЗОЛА И МЕРОЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ**

Н. А. Давиденко<sup>1\*</sup>, И. И. Давиденко<sup>1</sup>, А. А. Ищенко<sup>2</sup>, И. В. Курдюкова<sup>2</sup>,  
Е. В. Мокринская<sup>1</sup>, Л. С. Тонкопиева<sup>1</sup>, Н. Г. Чуприна<sup>1</sup>

УДК 541.14;541.49;541.64;535.5

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,  
01601, Киев, ул. Владимирская, 64/13, Украина; e-mail: ndav@univ.kiev.ua

<sup>2</sup> Институт органической химии НАН Украины, Киев, 02660, Украина

(Поступила 4 марта 2019)

*Исследованы фотопроводящие и фотовольтаические свойства пленочных композитов на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола с добавками новых мероцианиновых красителей — производных флуорена. Установлено, что композиты имеют дырочный тип фотопроводимости, а внутренний фотоэффект определяется фотогенерацией носителей заряда из молекул красителя и переносом дырок по донорным фрагментам полимерной матрицы в соответствии с прыжковым типом проводимости. Сделан вывод, что фотовольтаический отклик возрастает при использовании мероцианиновых красителей, электронное строение которых приближается к структуре идеального полиимина.*

**Ключевые слова:** полимерные композиты, мероцианины, фотопроводимость, фотогенерация, электронный транспорт, фотовольтаика.

*We investigate the photoconductive and photovoltaic properties of film composites based on poly-N-epoxypropyl-carbazole with additives of new merocyanine dyes – derivatives of fluorene. It is established that these composites have the hole type of photoconductivity, and their internal photoeffect is determined by the photogeneration of charge carriers from the dye molecules and the transfer of the holes to the donor fragments of the polymer matrix in accordance with the jump conduction type. We conclude that the photovoltaic response increases upon application of new dyes the electronic structure of which is close to the structure of an ideal polymenine.*

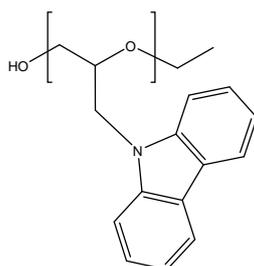
**Keywords:** polymer composites, merocyanines, photoconductivity, photogeneration, electronic transport, photovoltaics.

**Введение.** Для оптических сред используются светочувствительные пленочные полимерные композиты (ППК) на основе карбазолсодержащих полимеров и олигомеров [1—8] с добавками сенсibilизатора фотопроводимости [9—12]. Наличие карбазольных фрагментов в полимерной цепи обеспечивает перенос неравновесных носителей заряда (ННЗ) в фотопроводящем слое этих сред. ННЗ (дырки) возникают при облучении слоя видимым светом. Поскольку карбазолсодержащие полимеры не поглощают видимый свет, в состав ППК вводят сенсibilизаторы, например красители. В возбужденном состоянии молекулы красителя могут захватывать электроны с карбазольных фрагментов и образовывать ННЗ. Известны фотополупроводниковые ППК на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола (ПЭПК) [9—13]:

---

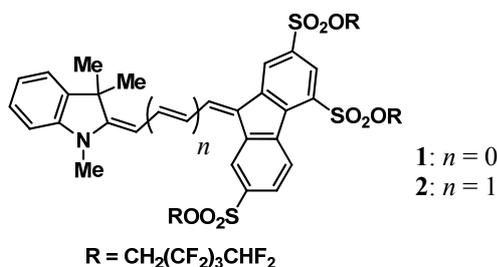
**PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF FILM COMPOSITES BASED ON POLY-N-EPOXYPROPYLCARBAZOLE AND MEROCYANINE DYES**

N. A. Davidenko<sup>1\*</sup>, I. I. Davidenko<sup>1</sup>, A. A. Ishchenko<sup>2</sup>, I. V. Kurdyukova<sup>2</sup>, E. V. Mokrinskaya<sup>1</sup>,  
L. S. Tonkopiieva<sup>1</sup>, N. G. Chuprina<sup>1</sup> (<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13 Volodymyrs'ka  
Str., Kyiv, 01601, Ukraine; e-mail: ndav@univ.kiev.ua; <sup>2</sup>Institute of Organic Chemistry, National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, 02660, Ukraine)



ПЭПК

Во внешнем электрическом поле ННЗ, а именно электронные вакансии (дырки), дрейфуют между соседними карбазольными фрагментами ПЭПК и образуют ток фотопроводимости. Условием успешного использования фотополупроводниковых ППК для оптоэлектроники и фотовольтаики является высокая подвижность ННЗ, что обеспечивает малое время отклика фотопроводимости на облучение светом, а также широкий спектральный диапазон fotocувствительности, включая ближнюю ИК область. Для этой цели широко используются катионные красители [14]. Однако из-за дрейфа противоионов у них возникают темновые токи, которые снижают эффективность фотовольтаического отклика [15]. Этому недостатка лишены нейтральные внутриионные красители мероцианинового типа с внутримолекулярным переносом заряда, но они, как правило, обладают меньшими экстинкциями, чем соответствующие ионные красители [16]. Поэтому для фотовольтаики необходимо создать мероцианины с интенсивным поглощением света. Для достижения такого эффекта электронное строение мероцианина должно приближаться к структуре идеального полиметина [17]. Это может быть достигнуто подбором донорно-акцепторных свойств концевых групп. Нами созданы такие мероцианины на основе среднеэлектронодонорного ядра индолина и сильного электроноакцептора тризамещенного флуорена [18], сопряженных между собой электронной системой полиметиновой цепи, по которой осуществляется внутримолекулярный перенос заряда: трис((2,2,3,3,4,4,5,5-октафторпентил)9-((E)-2-(1,3,3-триметилиндолин-2-илиден)этилиден)-9Н-флуорен-2,4,7-трисульфонат (1) и трис(2,2,3,3,4,4,5,5-октафторпентил)9-((2E,4E)-4-(1,3,3-триметилиндолин-2-илиден)бут-2-ен-1-илиден)-9Н-флуорен-2,4,7-трисульфонат (2)



При удлинении полиметиновой цепи вклад структуры идеального полиметина возрастает, что приводит к значительному росту экстинкции (рис. 1).

Цель настоящей работы — исследование фотоэлектрических свойств ППК с мероцианиновыми красителями **1** и **2**. Флуорен с октафторпентилсульфонатными заместителями обладает большей электроноакцепторностью, чем известный его аналог с нитрогруппами в тех же положениях [18], производные которого широко используются в информационных средах на основе органических аморфных полупроводников [13]. Кроме того, у красителей на основе первого интенсивность поглощения света концентрируется преимущественно в длинноволновой полосе, тогда как у красителей-производных последнего она распределяется по разным электронным переходам молекулы за счет участия уровней  $\text{NO}_2$ -группы [19]. Отметим, что октафторпентилсульфонатные заместители значительно улучшают растворимость красителей в органических средах, что повышает качество изготовленных полимерных пленок.

**Эксперимент.** В качестве сенсibilизаторов фотопроводимости использованы красители **1** и **2**. Эти красители обладают положительной сольватохромией, т. е. дипольный момент при возбуждении возрастает. При удлинении полиметиновой цепи вклад структуры идеального полиметина увеличи-

вается, о чем свидетельствует батохромный сдвиг полосы поглощения  $\sim 100$  нм (как у симметричных ионных красителей [20]) и значительный рост экстинкции (рис. 1). Такие спектральные эффекты привлекательны для использования в фотовольтаических преобразователях.

Образцы готовили со свободной поверхностью ППК (стеклянная подложка)/ITO/ППК и сэндвич-структур (стеклянная подложка)/ITO/ППК/Ag, где ITO — электропроводящий слой  $\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3$ . Для этого растворы красителей **1**, **2** и ПЭПК в хлористом метиле наносили на стеклянную подложку со слоем ITO, высушивали в течение 24 ч при комнатной температуре, а затем 48 ч в сушильном шкафу при  $80^\circ\text{C}$ . Содержание **1**, **2** в ПЭПК 10 мас.%. Концентрация 10 мас.% **1**, **2** в ПЭПК обеспечивает высокую эффективность фотогенерации ННЗ, и при ней еще не образуются агрегаты сенсбилизатора [21]. Толщина ППК  $L \sim 1.5$  мкм измерена с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. Электрод Ag готовили путем нанесения серебряной пасты на поверхность ППК.

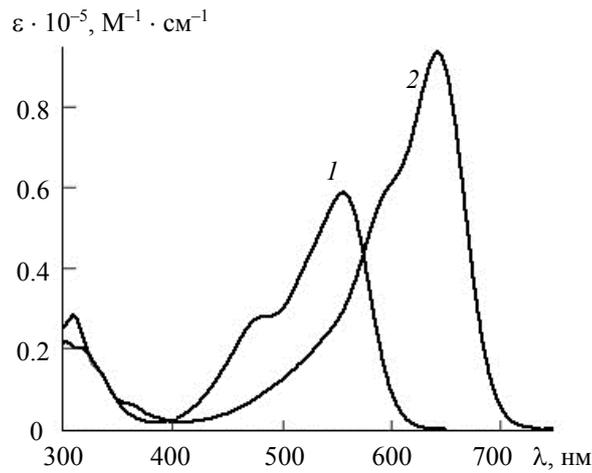


Рис. 1. Спектры электронного поглощения **1** (1), **2** (2) в  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$

Для образцов со свободной поверхностью ППК измерялся потенциал ( $V_{\text{PH}}$ ) свободной поверхности ППК относительно электрода ITO до облучения светом со стороны прозрачного электропроводящего слоя ITO, его изменение во время ( $t$ ) облучения и после выключения света. Фотовольтаические свойства образцов оценивались по электрическому потенциалу ( $V_{\text{PH}}^{\text{max}}$ ) поверхности на квазистационарном участке зависимости  $V_{\text{PH}}(t)$ . Для измерений  $V_{\text{PH}}(t)$  применялась методика измерения потенциала поверхности с помощью динамического зонда (метод Кельвина [22]). Выбор этой методики обоснован тем, что в этом случае отсутствует влияние на фотопроцессы в ППК контактной разности потенциалов, которая возникает в образцах сэндвич-структуры с электродами из разных материалов. В качестве зонда использована Ag-пластина диаметром 4 мм. Частота колебаний зонда 4 кГц. Для этих же образцов измерен электрический потенциал ( $V_{\text{p}}$ ) поверхности ППК после зарядки в коронном разряде без облучения и при облучении светом. Коронный разряд создавался при положительном и отрицательном потенциале коронирующего электрода относительно слоя ITO. Сразу после зарядки в коронном разряде максимальный потенциал поверхности пленок относительно слоя ITO  $V_{\text{p}}^{\text{max}} = \pm(180\text{—}200)$  В, что соответствует напряженности электрического поля внутри пленки  $\sim 10^8$  В/м. Для создания коронного разряда использовано специально разработанное устройство, в котором коронный разряд образуется благодаря приложению постоянного электрического напряжения  $\sim 10$  кВ между слоем ITO и металлической нитью над поверхностью ППК. Для измерения  $V_{\text{p}}$ , так же как и  $V_{\text{PH}}$ , применялся метод Кельвина. Скорость спада потенциала поверхности ППК оценивалась по отрезку времени  $t_{1/2}$ , за который  $V_{\text{p}}^{\text{max}}$  уменьшается в два раза. Эту скорость сравнивали по значениям  $t_{1/2}$  для положительной ( $t_{1/2}(+)$ ) и отрицательной ( $t_{1/2}(-)$ ) зарядки поверхности ППК. В образцах сэндвич-структуры измерялась плотность фототока ( $j_{\text{ph}}$ ) в зависимости от величины и полярности электрического напряжения ( $U$ ), прикладываемого к электрическим контактам, интенсивности ( $I$ ) света, которым облучались образцы со стороны прозрачного электрода ITO. Ток  $j_{\text{ph}}$  и его квазистационарное значение ( $j_{\text{ph}}^{\text{max}}$ ) определялись как добавка к току проводимости после установления переходных процессов в результате включения электрического напряжения и в процессе облучения

образцов светом. Величина  $U$  изменялась в диапазоне 0—300 В. Для образцов сэндвич-структуры также измерены диэлектрические характеристики ППК, а именно тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) и электрическая емкость ( $C$ ), в зависимости от частоты ( $f$ ) синусоидального переменного электрического напряжения с амплитудой 5 В без облучения и при облучении светом из области поглощения красителей. Из этих измерений рассчитаны  $\Delta\text{tg}\delta_{\text{PH}} = (\text{tg}\delta_{\text{PH}} - \text{tg}\delta_0)/\text{tg}\delta_0$  и  $\Delta C_{\text{PH}} = (C_{\text{PH}} - C_0)/C_0$ , где  $\text{tg}\delta_0$ ,  $C_0$  и  $\text{tg}\delta_{\text{PH}}$ ,  $C_{\text{PH}}$  — тангенс угла диэлектрических потерь и электрическая емкость до и после включения света облучения (а также после его выключения). Для облучения образцов использованы светодиоды с одинаковой силой света  $\sim 3$  кд и максимумом излучения на  $\lambda_{\text{ит}} \sim 532$  и 650 нм, которые близки к длине волны длинноволнового максимума поглощения **1** и **2** в ПЭПК. Интенсивность света, падающего на образец в активную область зонда со стороны стеклянной подложки,  $\sim 10$  Вт/м<sup>2</sup>. Все измерения проведены при комнатной температуре 20 °С.

Пленка ПЭПК не поглощает свет в видимой области спектра. При введении в нее красителей появляются полосы поглощения, соответствующие длинноволновым электронным  $\pi\pi^*$ -переходам красителей **1** и **2** (рис. 1). В исследуемых образцах обнаружены фотовольтаические свойства ППК и эффект фотопроводимости (рис. 2 и 3) при их облучении светом из области поглощения красителей. После начала облучения образцов с **1** и **2** со свободной поверхностью ППК величина  $V_{\text{PH}}$  нарастает и имеет положительный знак (рис. 2, а). После выключения света релаксация  $V_{\text{PH}}$  происходит медленнее, чем нарастание, а характерное время этой релаксации нельзя описать простой экспоненциальной функцией.

В образцах со свободной поверхностью ППК отсутствует внутреннее электрическое поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно поверхности пленки. Поэтому можно считать, что появление положительных электрических зарядов на свободной поверхности этих пленок при их облучении светом связано с диффузией фотогенерированных дырок в направлении от облучаемого контакта ИТО к свободной поверхности. Диффузия НЗ вызвана возникновением градиента концентрации подвижных НЗ, который больше вблизи облучаемого электрода ИТО. Такой диффузионный механизм фотовольтаического эффекта (эффект Дембера) характерен для фотополупроводниковых материалов, в которых при облучении образуются разноименные НЗ (электроны и дырки) с различающимися подвижностями [23]. Следовательно, в образцах с исследуемыми ППК фотовольтаический эффект определяется фотогенерацией электронно-дырочных пар (ЭДП), транспортом положительных НЗ (дырок) к свободной поверхности ППК, а менее подвижные отрицательные НЗ вместе с захва-

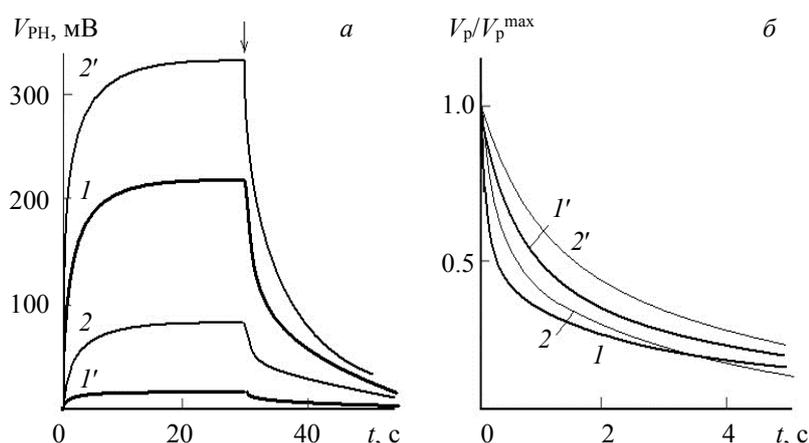


Рис. 2. Зависимости  $V_{\text{PH}}(t)$  для образцов со свободной поверхностью пленок ПЭПК с **1** ( $I$ ,  $I'$ ) и **2** ( $2$ ,  $2'$ ) при их облучении светом с  $\lambda_{\text{ит}} = 532$  ( $I$ ,  $2$ ) и 650 нм ( $I'$ ,  $2'$ ); стрелкой отмечено время выключения света (а); зависимости  $V_p/V_p^{\text{max}}(t)$  после начала облучения светом для образцов со свободной поверхностью пленок ПЭПК с **1** ( $I$ ,  $I'$ ) и **2** ( $2$ ,  $2'$ ) для отрицательной ( $I$ ,  $2$ ) и положительной ( $I'$ ,  $2'$ ) зарядки поверхности ППК при их облучении светом с  $\lambda_{\text{ит}} = 532$  ( $I$ ,  $I'$ ) и 650 нм ( $2$ ,  $2'$ ) (б)

ченными дырками создают объемный заряд. Наличие объемного заряда может быть причиной медленного спада  $V_{PH}^{max}$  после выключения света (рис. 2, б). О дырочном типе фотопроводимости исследуемых ППК свидетельствуют измерения зависимости  $V_p(t)$  для разной полярности зарядки свободной поверхности в коронном разряде. На рис. 2, б представлены зависимости  $V_p/V_p^{max}$  от времени  $t$  после начала облучения образцов. Для всех образцов величина  $t_{1/2}(-)$  немного меньше, чем  $t_{1/2}(+)$ . Это означает, что во внешнем электрическом поле дырки, которые появляются в объеме ППК в результате фотогенерации, с большей скоростью нивелируют отрицательный заряд ионов на поверхности ППК, заряженной в коронном разряде, чем электроны нивелируют положительный заряд такой же природы. Следовательно, подвижность дырок больше, чем электронов. Во внешнем электрическом поле, созданном коронным разрядом, именно диссоциация ЭДП является причиной разрядки заряженной свободной поверхности ППК (рис. 2, б).

О наличии внутреннего фотоэффекта в исследуемых ППК и влиянии подвижности фотогенерированных НЗ и процессов захвата НЗ на фотоэлектрические свойства ППК позволяют судить также данные фотодиэлектрических исследований, в частности характер изменения  $tg\delta$  при облучении соответствующих ППК (рис. 3, а). Величина  $\Delta tg\delta_{ph} > 0$  отвечает фотогенерации подвижных НЗ, поскольку  $tg\delta$  особенно чувствителен к наличию именно подвижных НЗ [24]. После прекращения облучения релаксация фотодиэлектрического эффекта происходит симметрично его нарастанию и время этого изменения составляет несколько секунд. Поскольку приращение емкости ППК  $\Delta C_{ph}$  заметно меньше соответствующих значений  $\Delta tg\delta_{ph}$  при облучении исследуемых ППК, то общий замедленный характер кинетики нарастания и релаксации фотодиэлектрического эффекта в исследуемых ППК в значительной степени обусловлен низкой подвижностью фотогенерированных НЗ в ППК. Несколько более быструю релаксацию фотодиэлектрического эффекта по сравнению с релаксацией соответствующего фотовольтаического отклика в исследуемых ППК (рис. 2, а), а также близкую к симметричной кинетику можно объяснить более высокой подвижностью фотогенерированных НЗ в ППК и, соответственно, меньшим вкладом процессов их захвата в переменных электрических полях при измерениях  $tg\delta_{ph}$  (достаточно высокая напряженность электрического поля  $\sim 10^7$  В/м). Последнее связано с тем, что для большинства аморфных молекулярных полупроводников подвижность НЗ характеризуется достаточно сильной электрополевой зависимостью [13, 23]. Кроме того, установлено, что в образцах сэндвич-структуры кинетики нарастания и релаксации фототока симметричны, а характерное время этих процессов, определяемое по уровню  $0.7j_{ph}^{max}$ , составляет  $\sim 0.1$  с. Кинетика  $j_{ph}(t)$  не зависит от полярности напряжения, прикладываемого к электрическим контактам. Последнее означает, что в  $j_{ph}$  отсутствует добавка инжекционных токов НЗ из электрических контактов, а фототок определяется фотогенерацией НЗ из молекул **1**, **2** и их переносом по карбазолильным фрагментам ППК. Однако  $|j_{ph}|$  нелинейно зависит от  $U$ . На рис. 3, б представлены зависимости  $lg j_{ph}$  от  $E^{1/2}$ , где  $E = U/L$  — напряженность электрического поля в ППК. В используемых координатах зависи-

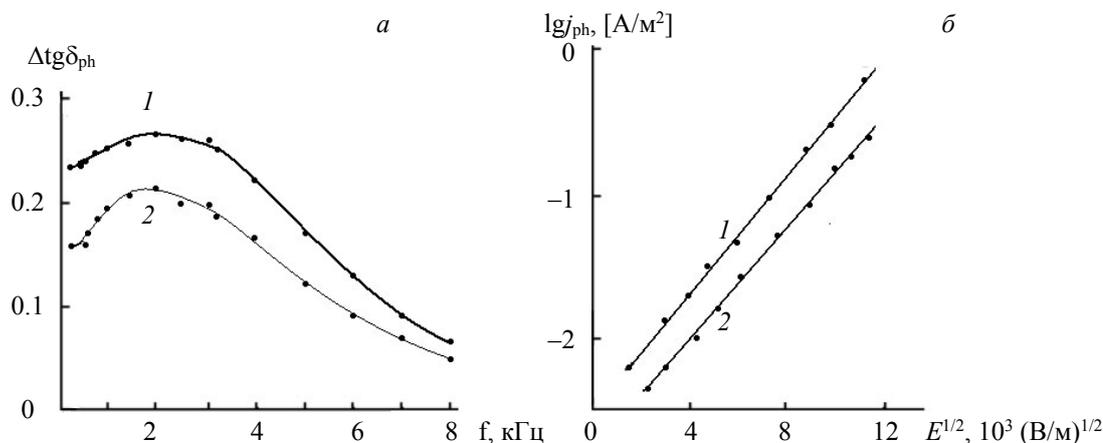


Рис. 3. Зависимости  $\Delta tg\delta_{ph}(f)$  (а) и  $lg j_{ph}(E^{1/2})$  (б) для образцов сэндвич-структуры с пленками ПЭК с **1** (1) и **2** (2): а — после облучения в течение 1 мин светом с  $\lambda_{irr} = 532$  (1) и 650 нм (2) и б — при их облучении светом с  $\lambda_{irr} = 532$  (1) и 650 нм (2)

мости  $\lg j_{\text{ph}}(E^{1/2})$  линейны, что позволяет для анализа результатов использовать разработанные модельные представления [13, 23] о фотогенерации и переносе ННЗ в ППК. Ранее [13] установлено, что зависимость  $j_{\text{ph}}$  от  $E$  можно представить в аналитическом виде:

$$j_{\text{ph}}(E, T) \sim \exp(-(W_{0\text{ph}} - \beta E^{1/2})/k_{\text{B}}T_{\text{eff}}), \quad (1)$$

где  $W_{0\text{ph}}$  — энергия активации фототока, которая в карбазолсодержащих ППК может изменяться в зависимости от используемых центров фотогенерации;  $\beta = (q^3/\pi\epsilon\epsilon_0)^{1/2}$  — коэффициент, равный постоянной Пула—Френкеля [13, 23];  $k_{\text{B}}$  — постоянная Больцмана;  $T_{\text{eff}}^{-1} = T^{-1} - T_0^{-1}$  — эффективная температура, рассчитываемая с учетом температуры  $T_0$ , которая обычно определяется экспериментально как температура, при которой пересекаются зависимости  $\lg j_{\text{ph}} - T^{-1}$  в области больших  $T$ , измеренные для различных  $E$ . Для карбазолсодержащих ППК  $T_0 \approx 490$  К. Рассчитанное из тангенса угла наклона прямых на рис. 3, б значение  $\beta$  в (1) составляет  $(4.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$  эВ (В/м) $^{-1}$  и близко к постоянной Пула—Френкеля. Поэтому для анализа результатов можно использовать ранее разработанные модельные представления о фотогенерации и транспорте ННЗ в ППК. Можно считать, что в исследуемых ППК центрами фотогенерации являются мономерные молекулы **1**, **2**. После возбуждения светом они могут образовывать ЭДП, при диссоциации которых появляются свободные ННЗ. Перенос ННЗ (дырок) осуществляется в основном по карбазольным фрагментам ПЭПК.

**Заключение.** На основании полученных результатов можно считать, что пленочные полимерные композиты на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола с красителями **1**, **2** обладают фотопроводящими и фотовольтаическими свойствами из-за способности молекул **1**, **2** к фотогенерации дырок в поли-N-эпоксипропилкарбазоле. Большие значения  $V_{\text{PH}}$  в пленочных полимерных композитах с **2** по сравнению с **1** могут быть связаны с более высокой экстинкцией у красителя **2** вследствие большего приближения его электронного строения к структуре идеального полиметина. Мероцианиновые красители могут быть использованы для создания новых фотопроводящих материалов, в частности, в фотовольтаических преобразователях солнечной энергии.

- [1] Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications, Ed. T. Yoshizawa, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press (2017)
- [2] P. Kumar. Organic Solar Cells: Device Physics, Processing, Degradation, and Prevention, CRC Press (2016)
- [3] Elementary Processes in Organic Photovoltaics, Ed. K. Leo, Springer (2016)
- [4] P. Deng, C.H.Y. Ho, Y. Lu, H.-W. Li, S.-W. Tsang, S. K. Soc, B. S. Ong. Chem. Commun., **53** (2017) 3249—3252
- [5] В. А. Миличко, А. С. Шалин, И. С. Мухин, А. Э. Ковров, А. А. Красилин, А. В. Виноградов, П. А. Белов, К. Р. Симовский. УФН, **186**, № 8 (2016) 801—852 [V. A. Milichko, A. S. Shalin, I. S. Mukhin, A. E. Kovrov, A. A. Krasilin, A. V. Vinogradov, P. A. Belov, C. R. Simovskii. Sov. Phys. Usp., **59**, N 8 (2016) 727—772]
- [6] Е. А. Князева, О. А. Ракитин. Успехи химии, **85**, № 10 (2016) 1146—1183 [E. A. Knyazeva, O. A. Rakitin. Russ. Chem. Rev., **85**, N 10 (2016) 1146—1183]
- [7] В. В. Ракитин, Г. Ф. Новиков. Успехи химии, **86**, № 2 (2017) 99—112 [V. V. Rakitin, G. F. Novikov. Russ. Chem. Rev., **86**, N 2 (2017) 99—112]
- [8] G. Ding, J. Yuan, F. Jin, Y. Zhang, L. Han, X. Ling, H. Zhao, W. Ma. Nano Energy, **36** (2017) 356—365
- [9] Е. В. Мокринская, С. Л. Студзинский, В. А. Павлов, Н. Г. Чуприна, В. В. Кравченко, А. И. Маринин, Л. С. Тонкопиева, И. И. Давиденко, Н. А. Давиденко. Химия высоких энергий, **51**, № 4 (2017) 278—283 [E. V. Mokrinskaya, S. L. Studzinsky, V. A. Pavlov, N. G. Chuprina, V. V. Kravchenko, A. I. Marinin, L. S. Tonkopieva, I. I. Davidenko, N. A. Davidenko. High Energy Chem., **51**, N 4 (2017) 263—268]
- [10] Н. А. Давиденко, И. И. Давиденко, С. Л. Студзинский, Л. И. Костенко, А. А. Ищенко, Е. В. Мокринская, Л. С. Тонкопиева. Химия высоких энергий, **49**, № 6 (2015) 463—468. [N. A. Davidenko, I. I. Davidenko, S. L. Studzinsky, L. I. Kostenko, A. A. Ishchenko, E. V. Mokrinskaya, L. S. Tonkopieva. High Energy Chem., **49**, N 6 (2015) 420—425]
- [11] N. A. Davidenko, Yu. P. Getmanchuk, E. V. Mokrinskaya, L. R. Kunitskaya, I. I. Davidenko, V. A. Pavlov, S. L. Studzinsky, N. G. Chuprina. Appl. Opt., **53**, N 10 (2014) B242—B247

- [12] N. A. Davidenko, I. I. Davidenko, V. A. Pavlov, N. G. Chuprina, V. V. Kravchenko, N. N. Kuranda, E. V. Mokrinskaya, S. L. Studzinsky. *Appl. Opt.*, **57**, N 8 (2018) 1832—1837
- [13] Н. А. Давиденко, А. А. Ищенко. *Теор. и эксперим. химия*, **38**, № 2 (2002) 84—102 [N. A. Davidenko, A. A. Ishchenko. *Theor. Exp. Chem.*, **38**, N 2 (2002) 88—108]
- [14] Г. В. Булавко, А. А. Ищенко. *Успехи химии*, **83**, № 7 (2014) 575—599 [G. V. Bulavko, A. A. Ishchenko. *Russ. Chem. Rev.*, **83**, N 7 (2014) 575—599]
- [15] Г. В. Булавко, Н. А. Давиденко, Н. А. Деревянко, А. А. Ищенко, А. В. Кулинич. *Теор. и эксперим. химия*, **51**, № 1 (2015) 34—40 [G. V. Bulavko, N. A. Davidenko, N. A. Derevyanko, A. A. Ishchenko, A. V. Kulinich. *Theor. Exp. Chem.*, **51**, N 1 (2015) 37—44]
- [16] V. N. Bliznyuk, J. Gasiorowski, A. A. Ishchenko, G. V. Bulavko, N. A. Derevyanko, N. S. Sariciftci. *Org. Electron.*, **15**, N 6 (2014) 1105—1112
- [17] А. В. Кулинич, А. А. Ищенко. *Успехи химии*, **78**, № 2 (2009) 151—175 [A. V. Kulinich, A. A. Ishchenko. *Russ. Chem. Rev.*, **78**, N 2 (2009) 141—164]
- [18] I. V. Kurdyukova, A. A. Ishchenko, D. D. Mysyk. *Dyes Pigm.*, **142** (2017) 201—211
- [19] И. В. Курдюкова, А. А. Ищенко. *Успехи химии*, **81**, № 3 (2012) 258—290 [I. V. Kurdyukova, A. A. Ishchenko. *Russ. Chem. Rev.*, **81**, N 3 (2012) 258—290]
- [20] А. А. Ищенко. *Теор. и эксперим. химия*, **34**, № 4 (1998) 214—232 [A. A. Ishchenko. *Theor. Exp. Chem.*, **34**, N 4 (1998) 191—210]
- [21] Н. А. Давиденко, А. А. Ищенко. *ФТТ*, **42**, № 8 (2000) 1365—1371 [N. A. Davidenko, A. A. Ishchenko. *Phys. Solid State*, **42**, N 8 (2000) 1403—1409]
- [22] M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle, H. K. Wickramasinghe. *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 2921—2923
- [23] M. Pope, C. E. Swenberg. *Electronic Processes in Organic Crystals*. Clarendon Press, Oxford (1982)
- [24] В. Т. Аванесян, М. Ю. Пучков. *ФТТ*, **51**, № 10 (2009) 2052—2054 [V. T. Avanesyan, M. Yu. Puchkov. *Phys. Solid State*, **51**, N 10 (2009) 2178—2181]