

## ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИ-N-ЭПОКСИПРОПИЛКАРБАЗОЛА И ДИТИОЛЕНА НИКЕЛЯ

Н. А. Давиденко<sup>1\*</sup>, И. И. Давиденко<sup>1</sup>, А. В. Кухто<sup>2</sup>, И. Н. Кухто<sup>3</sup>,  
Е. В. Мокринская<sup>4</sup>, Л. С. Тонкопиева<sup>4</sup>, Н. Г. Чуприна<sup>4</sup>, G. A. Mousdis<sup>4</sup>

УДК 541.14;541.49;541.64;535.5

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

<sup>2</sup> Институт ядерных проблем, Белорусский государственный университет,  
220030, Минск, Беларусь; e-mail: kukhta@bsu.by

<sup>3</sup> Институт химии новых материалов НАН Беларуси,  
220141, Минск, Беларусь; e-mail: iryna.kukhta@tut.by

<sup>4</sup> Институт теоретической и физической химии, Национальный греческий исследовательский фонд,  
11635, Афины, Греция; e-mail: gmousdis@eie.gr

(Поступила 28 ноября 2018)

*Исследованы фотопроводящие и фотовольтаические свойства пленочных композитов на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола с добавками металлокомплекса — производного дитиолена никеля. Установлено, что эти композиты имеют дырочный тип фотопроводимости, а внутренний фотоэффект определяется фотогенерацией носителей заряда из молекул металлокомплекса и транспортом дырок по донорным фрагментам полимерной матрицы.*

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

*The photoconductive and photovoltaic properties of film composites based on poly-N-epoxypropyl-carbazole doped with the metal complex – a derivative of nickel dithiolene are studied. It has been found that these composites possess a hole type of photoconductivity and the internal photoeffect is determined by the photogeneration of charge carriers from the metal complex and the transport of holes through the donor fragments of the polymer matrix.*

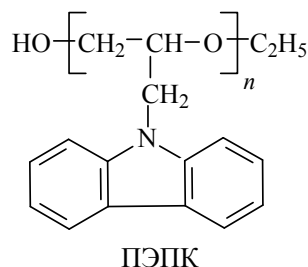
**Keywords:** polymer composites, nickel dithiolene, photoconductivity, photogeneration, electron transport, photovoltaics.

**Введение.** Оптические среды на основе пленочных полимерных композитов (ППК) с полупроводниковыми свойствами могут применяться в оптоэлектронной и энергетической промышленности в качестве активных элементов регистрации, хранения и обработки оптической информации, фотовольтаических преобразователей солнечной энергии и др. [1—8]. Для оптических сред часто используются светочувствительные ППК на основе карбазолсодержащих полимеров и олигомеров с добавками сенсibilизатора фотопроводимости [9—12]. Наличие карбазольных фрагментов в полимерной цепи обеспечивает транспорт неравновесных носителей заряда (ННЗ) в фотопроводящем слое этих сред. ННЗ (дырки) в фотопроводящем слое возникают при его облучении видимым светом. Посколь-

## PHOTOPHYSICAL PROPERTIES OF THE COMPOSITE BASED ON POLY-N-EPOXYPROPYL-CARBAZOLE AND NICKEL DITHIOLENE

N. A. Davidenko<sup>1\*</sup>, I. I. Davidenko<sup>1</sup>, A. V. Kukhta<sup>2</sup>, I. N. Kukhta<sup>3</sup>, E. V. Mokrinskaya<sup>4</sup>, L. S. Tonkopiieva<sup>4</sup>, N. G. Chuprina<sup>4</sup>, G. A. Mousdis<sup>4</sup> (<sup>1</sup> Kiev Taras Shevchenko National University, 64/13 Volodymyrs'ka Str., Kiev, 01601, Ukraine, e-mail: ndav@univ.kiev.ua; <sup>2</sup> Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk, 220030, Belarus; e-mail: kukhta@bsu.by; <sup>3</sup> Institute of Chemistry of New Materials, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220141, Belarus; e-mail: iryna.kukhta@tut.by; <sup>4</sup> Theoretical and Physical Chemistry Institute, National Hellenic Research Foundation, Athens, 11635, Greece; e-mail: gmousdis@eie.gr)

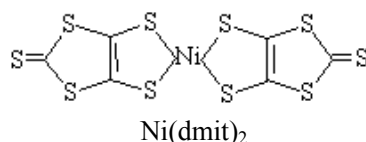
ку карбазолсодержащие полимеры не поглощают видимый свет, в состав ППК вводят сенсibilизаторы, например красители. В возбужденном состоянии молекулы красителя могут захватывать электроны с карбазольных фрагментов и образовывать ННЗ. Известны фотополупроводниковые ППК на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола (ПЭПК) [9—13]:



Во внешнем электрическом поле ННЗ, а именно электронные вакансии (дырки), дрейфуют между соседними карбазольными фрагментами ПЭПК и образуют ток фотопроводимости. Условие успешного использования фотополупроводниковых ППК для оптоэлектроники и фотовольтаики — высокая подвижность ННЗ, что обеспечивает малое время отклика фотопроводимости на облучение светом, а также широкий спектральный диапазон fotocувствительности, включая ближнюю ИК область. В последнем случае представляют интерес металлокомплексы — производные дитиоленя никеля. Эти соединения являются одним из типов однокомпонентных органических проводников в кристаллическом состоянии и характеризуются широкими полосами спектров поглощения именно в видимой и ближней ИК областях [14], подобно серосодержащим фталоцианинам [15], а также планарностью, высокой термо- и фотохимической стабильностью. Однако никелевые металлокомплексы имеют недостатки. Во-первых, они плохо обрабатываются вследствие хрупкости. Во-вторых, ведут себя как одномерные металлы и хорошо проводят электрический ток только в высокоупорядоченном состоянии. Формирование тонких пленок на их основе из растворов дает сильно неоднородные пленки, состоящие из независимых нано- и микрокристаллов. Поэтому представляет интерес их использование в полимерных композитах.

Цель настоящей работы — исследование фотофизических свойств ППК с производными дитиоленя никеля.

**Эксперимент.** В качестве сенсibilизаторов фотопроводимости использован металлокомплекс  $\text{Ni}(\text{dmit})_2$  (dmit — 4,5-димеркапто-1,3-дитиол-2-тион):



Синтез данной молекулы описан в [16]. Образцы для исследований готовили со свободной поверхностью ППК (стеклянная подложка)/ITO/ППК, а также в виде сэндвич-структур (стеклянная подложка)/ITO/ППК/Ag, где ITO — электропроводящий слой  $\text{SnO}_2 \cdot \text{In}_2\text{O}_3$ . Для изготовления образцов отфильтрованные растворы  $\text{Ni}(\text{dmit})_2$  и ПЭПК в хлористом метиле наносили на стеклянную подложку со слоем ITO, высушивали в течение 24 ч при комнатной температуре, а затем в течение 48 ч в сушильном шкафу при 80 °С. Концентрация  $\text{Ni}(\text{dmit})_2$  в ПЭПК 5 мас.% обеспечивает высокую эффективность фотогенерации ННЗ, и при ней еще не образуются агрегаты сенсibilизатора [17, 18]. Толщина ППК ~1.5 мкм измерена с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. Электрод Ag готовили путем нанесения серебряной пасты на поверхность ППК.

Для образцов со свободной поверхностью ППК измерены оптическая плотность ( $D$ ), 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 определения фотовольтаических характеристик применялась методика измерения потенциала поверхности с помощью динамического зонда (метод Кельвина [19]). Ее выбор обоснован тем, что в этом случае отсутствует влияние на фотопроцессы в ППК контактной разности потенциала, 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 ( $V_p$ ) 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 ИТО. Сразу после зарядки в коронном разряде максимальное значение потенциала поверхности пленок относительно слоя ИТО  $V_p^{\max} = \pm 180\text{—}200$  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 ИТО и металлической нитью над поверхностью ППК. Для измерения  $V_p$ , так же как и для  $V_{PH}$ , применялся динамический зонд (метод Кельвина). Скорость спада потенциала поверхности ППК оценивалась по отрезку времени ( $t_{1/2}$ ), за который  $V_p^{\max}$  уменьшается в два раза. Эту скорость оценивали по значениям  $t_{1/2}$  для положительной ( $t_{1/2}(+)$ ) и отрицательной ( $t_{1/2}(-)$ ) зарядки поверхности ППК.

Для образцов сэндвич-структуры измеряли плотность тока проводимости ( $j_d$ ) и фототока ( $j_{ph}$ ) в зависимости от величины и полярности электрического напряжения ( $U$ ), прикладываемого к электрическим контактам, интенсивности ( $I$ ) света, которым облучались образцы со стороны прозрачного электрода ИТО. Ток  $j_{ph}$  и его квазистационарное значение ( $j_{ph}^{\max}$ ) определяли как добавку к току проводимости ( $j_d^{\max}$ ) после установления переходных процессов в результате включения электрического напряжения и в процессе облучения образцов. Напряжение изменялось в диапазоне  $U = 0\text{—}300$  В. Для образцов сэндвич-структуры также измерялся тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) и емкость ( $C$ ) в зависимости от частоты ( $f$ ) синусоидального переменного электрического напряжения с амплитудой 5 В. Для облучения образцов использованы светодиоды с одинаковой силой света  $\sim 3$  кд и максимумом излучения на  $\lambda_{\text{итт}} \sim 440, 530, 580, 650, 850$  нм. 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.

Для более глубокого понимания оптических и электрофизических свойств изучаемых соединений, анализа электронного строения молекулярных орбиталей выполнены расчеты молекулярных характеристик с помощью пакета программ квантово-химических вычислений Gaussian 09 в рамках теории функционала плотности (DFT) [20], который дает теоретические данные, хорошо согласующиеся с экспериментом в случае больших сопряженных органических молекул. Поэтому он стал наиболее распространенным способом исследования энергий возбужденных состояний.

Геометрия исследуемых молекул в свободном состоянии полностью оптимизирована с использованием гибридного обменно-корреляционного функционала B3LYP со средним учетом вклада обменных взаимодействий и наборов базисных функций 6-31G(d), что достаточно для хорошего соотношения теория/эксперимент для молекул данного размера. Граничные условия и алгоритм стандартные.

**Результаты и их обсуждение.** Выполненные расчеты показали, что геометрия молекул Ni(dmit)<sub>2</sub> плоская. Результаты расчета основных молекулярных орбиталей представлены на рис. 1. Как видно, при возбуждении заряд перетекает с периферической части молекулы в центральную, что может оказать влияние на взаимодействие с полимерной матрицей. Присутствие атомов серы обеспечивает значительные электронно-донорные свойства. Эта система является неароматической и легко превращается в ароматическую при окислении. Молекулярная орбиталь НОМО имеет симметрию  $b_{1u}$  и

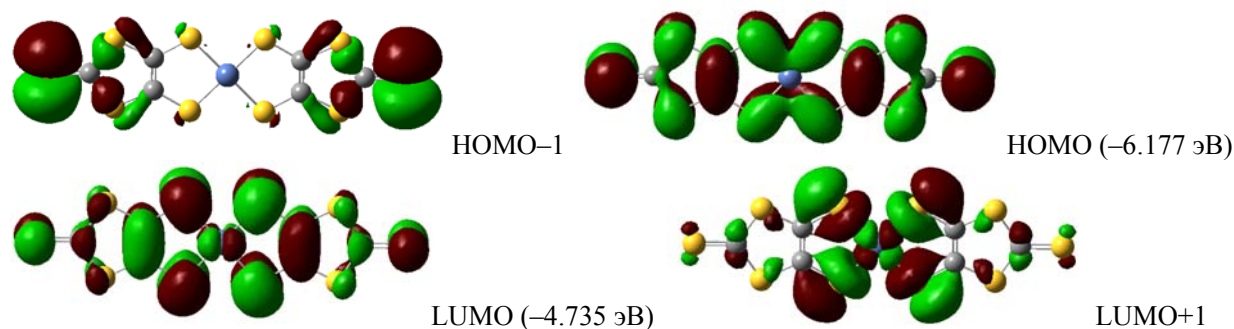


Рис. 1. Основные молекулярные орбитали Ni(dmit)<sub>2</sub>

состоит главным образом из атомных орбиталей  $pz$  донорных атомов серы и орбиталей  $pz$  углерода. Молекулярная орбиталь LUMO имеет симметрию  $b_{3g}$  и обнаруживает вклад атомных орбиталей  $dxz$  никеля.

Пленки ПЭПК без добавок прозрачны в видимой области спектра (рис. 2, кривая 1). Обычно [21] для спектральной сенсбилизации пленок ПЭПК в них вводятся специальные добавки (например, органические акцепторы, которые вступают в слабое взаимодействие с карбазольными фрагментами ПЭПК, при этом образуются межмолекулярные комплексы с переносом заряда (КПЗ)) или уже окрашенные добавки (например, органические красители, металлокомплексы и т. п.). В видимой области в спектрах поглощения ППК на основе ПЭПК с  $Ni(dmit)_2$  присутствуют полосы поглощения (кривая 2), характерные для  $Ni(dmit)_2$  и описанные в [21], где интенсивная длинноволновая полоса (плетчо) принадлежит  $\pi$ — $\pi$ -переходу, а полосы вблизи 300 нм принадлежат переходам с переносом заряда с атомов серы на никель. Заметных полос взаимодействия  $Ni(dmit)_2$  с молекулами ПЭПК в данном диапазоне не обнаружено. Поэтому можно считать, что в исследуемых ППК образование межмолекулярных КПЗ практически отсутствует, а значит, в этих ППК  $Ni(dmit)_2$  можно рассматривать как центры поглощения света и как центры фотогенерации носителей заряда. Последнее следует из обнаруженных фотопроводящих свойств ППК в видимой области.

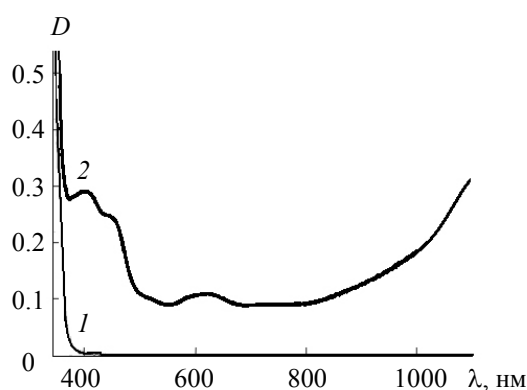


Рис. 2. Спектр поглощения пленок ПЭПК (1) и ПЭПК + 5 мас.%  $Ni(dmit)_2$  (2)

Для образцов ППК с  $Ni(dmit)_2$  обнаружены фотовольтаические свойства (рис. 3) и эффект фотопроводимости (рис. 4) при облучении образцов светом из области поглощения  $Ni(dmit)_2$ . После начала облучения образцов со свободной поверхностью ППК величина  $V_{PH}$  нарастает и имеет положительный знак. Величина  $V_{PH}^{max}$  зависит от  $\lambda_{irr}$ . На рис. 3 представлены зависимости  $V_{PH}(t)$  для различных  $\lambda_{irr}$ . Как видно,  $V_{PH}^{max}$  для  $\lambda_{irr} = 440$  нм больше, чем для  $\lambda_{irr} = 530$  нм, но при  $\lambda_{irr} > 530$  нм возрастает  $V_{PH}^{max}$  с увеличением  $\lambda_{irr}$ . Такая зависимость  $V_{PH}^{max}$  от  $\lambda_{irr}$  коррелирует со спектром поглощения на рис. 2. После выключения света релаксация  $V_{PH}$  происходит медленнее, чем нарастание, а характерное время этой релаксации не сильно отличается для всех исследуемых образцов и его 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 носителей заряда вызвана возникновением градиента концентрации подвижных носителей, которая больше вблизи облучаемого электрода ИТО. Такой диффузионный механизм фотовольтаического эффекта (эффект Дембера) характерен для фотополупроводниковых материалов, в которых при облучении образуются разноименные носители заряда (электроны и дырки) с различающимися подвижностями [22]. Следовательно, в образцах с исследуемыми ППК фотовольтаический эффект определяется фотогенерацией электронно-дырочных пар (ЭДП), транспортом положительных носителей заряда (дырок) к свободной поверхности ППК, а менее подвижные отрицательные носители заряда вместе с захваченными дырками создают объемный заряд. Наличие объемного заряда может быть причиной медленного спада  $V_{PH}^{max}$  после выключения света (рис. 3, б). О дырочном типе фотопроводимости исследуемых ППК свидетельствуют результаты измерений зависимости  $V_p(t)$  для разной полярности

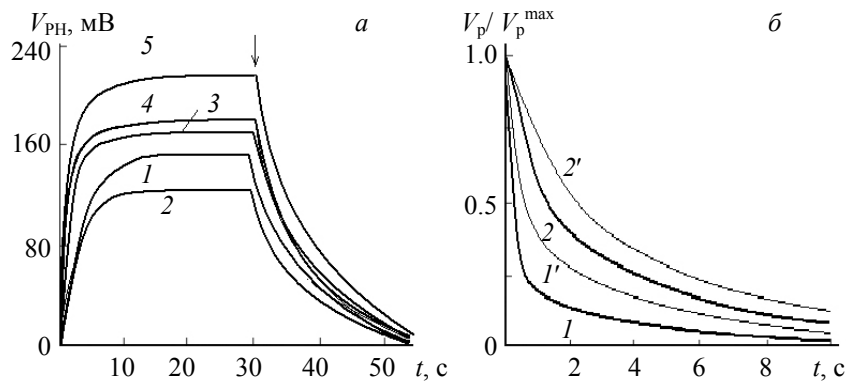


Рис. 3. Зависимости  $V_{ph}$  от  $t$  в образцах со свободной поверхностью пленок ПЭПК+5 мас.% Ni(dmit)<sub>2</sub> для  $\lambda_{irr} = 440$  (1), 530 (2), 580 (3), 650 (4) и 850 нм (5) (а), стрелкой отмечен момент выключения света; зависимости  $V_p/V_p^{max}$  от времени  $t$  после начала облучения светом с  $\lambda_{irr} = 440$  (1, 1') и 850 нм (2, 2') в этих же образцах после зарядки свободной поверхности ППК при отрицательном (1, 2) и положительном (1', 2') потенциалах коронирующего электрода (б)

зарядки свободной поверхности в коронном разряде. На рис. 3, б представлены зависимости  $V_p/V_p^{max}$  от времени  $t$  после начала облучения светом с  $\lambda_{irr} = 440$  нм и 850 нм. Для всех образцов при их облучении светом с используемыми  $\lambda_{irr}$   $t_{1/2}(-) < t_{1/2}(+)$ . 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, что вполне согласуется с ранее полученными результатами для подобных ППК при незначительной концентрации сенсibiliзирующих добавок в карбазолсодержащих полимерах [22]. Во внешнем электрическом поле, созданном коронным разрядом, именно диссоциация ЭДП является причиной разрядки заряженной свободной поверхности ППК (рис. 3, б).

О наличии фотогенерации и переноса носителей заряда в ППК свидетельствуют результаты исследований диэлектрических характеристик (рис. 4, а). С увеличением частоты  $f$  величина  $\text{tg}\delta$  уменьшается, а  $C$  изменяется незначительно. Эта же закономерность наблюдается и при облучении исследуемых образцов с  $\lambda_{irr}$  для используемых источников света, но при облучении  $\text{tg}\delta$  уменьшается по сравнению со значением до начала облучения (рис. 4, а). Изменение диэлектрических характеристик ППК под действием света указывает на проявление внутреннего фотоэффекта, а именно на наличие в ППК подвижных электрических зарядов, концентрация которых увеличивается при облучении. Отметим, что результаты измерений частотных зависимостей  $\text{tg}\delta$  и  $C$  для образцов с пленками ПЭПК без металлокомплексов не чувствительны к действию видимого света. Следовательно, причина внутреннего фотоэффекта и изменения диэлектрических характеристик — наличие Ni(dmit)<sub>2</sub> в ПЭПК. В образцах сэндвич-структуры кинетики нарастания и релаксации фототока симметричны, а характерное время этих процессов, определяемое по уровню  $0.7j_{ph}^{max}$ , составляет  $\sim 2$  с. Кинетика  $j_{ph}(t)$  не зависит от полярности электрического напряжения, прикладываемого к электрическим контактам. Последнее означает, что, во-первых, в  $j_{ph}$  отсутствует добавка инжекционных токов ННЗ из электрических контактов, во-вторых, для используемого диапазона электрического напряжения дрейф ННЗ преобладает над эффектом их диффузии (эффект Дембера). Поэтому следует считать, что фототок определяется фотогенерацией носителей заряда из молекул Ni(dmit)<sub>2</sub> и их транспортом по карбазолильным фрагментам ПЭПК. Однако  $|j_{ph}|$  нелинейно зависит от  $U$ . На рис. 4, б представлены зависимости  $\lg j_{ph}$  от  $E^{1/2}$  (прямые 1—3), где  $E = U/L$  — напряженность электрического поля в ППК. В используемых координатах эти зависимости линейны, что позволяет для анализа результатов применять ранее разработанные модельные представления [11, 12, 22] о фотогенерации и транспорте ННЗ в ППК. Ранее было установлено, что зависимость  $j_{ph}$  от  $E$  можно представить в аналитическом виде:

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

где  $W_{\text{ph}}$  — 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 [22];  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T_{\text{eff}}^{-1} = (T^{-1} - T_0^{-1})$  — эффективная температура, которая рассчитывается с учетом  $T_0$ . Величина  $T_0$  обычно определяется экспериментально как температура, при которой пересекаются зависимости  $\lg j_{\text{ph}}(T^{-1})$  [22] в области больших  $T$ , измеренные для различных  $E$ . Для карбазолсодержащих ППК  $T_0 \approx 490$  К. Рассчитанное из тангенса угла наклона прямых на рис. 4, б значение  $\beta$  в (1) составляет  $(4.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$  эВ · (В/м) $^{-1}$ , что 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 Ni(dmit) $_2$ . После возбуждения светом молекул Ni(dmit) $_2$  могут образовываться ЭДП, при диссоциации которых появляются свободные ННЗ. Вероятность такого механизма фотогенерации ЭДП согласуется с расчетами энергий молекулярных орбиталей Ni(dmit) $_2$  (рис. 1) и их сравнением с соответствующими энергиями карбазольных фрагментов ПЭПК. Известно [13, 23], что энергия НОМО карбазольных фрагментов  $E_{\text{НОМО}} < -7$  эВ и значительно меньше энергии НОМО Ni(dmit) $_2$ . Следовательно, при возбуждении Ni(dmit) $_2$  светом отсутствует энергетический запрет для перехода электрона из НОМО карбазольного фрагмента ПЭПК на незаполненную НОМО Ni(dmit) $_2$ . Именно по такому механизму образуются ЭДП в рассматриваемых ППК. Транспорт ННЗ (дырок) осуществляется в основном по карбазольным фрагментам ПЭПК по прыжковому механизму [22].

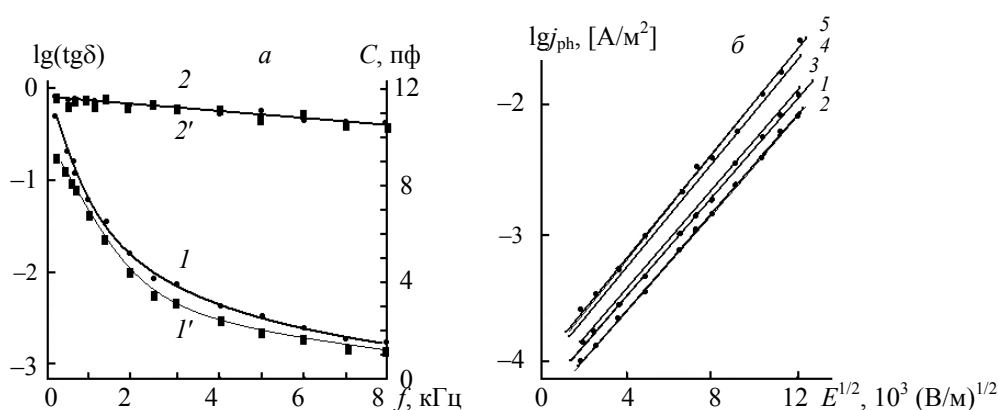


Рис. 4. Зависимости  $\text{tg}\delta$  ( $I, I'$ ) и  $C$  ( $2, 2'$ ) от  $f$  для образцов сэндвич-структуры с пленками ПЭПК+5 мас.% Ni(dmit) $_2$  до облучения ( $I, 2$ ) и после облучения ( $I', 2'$ ) светом с  $\lambda_{\text{irr}} = 440$  нм в течение 1 мин ( $a$ ); зависимости  $\lg j_{\text{ph}}$  от  $E^{1/2}$  для этих же образцов при  $\lambda_{\text{irr}} = 440$  ( $1$ ), 530 ( $2$ ), 580 ( $3$ ), 650 ( $4$ ) и 850 нм ( $5$ ) ( $b$ )

**Заключение.** На основании полученных результатов можно считать, что пленочные полимерные композиты на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола с добавками Ni(dmit) $_2$  обладают фотопроводящими и фотовольтаическими свойствами в широком спектральном диапазоне из-за способности молекул Ni(dmit) $_2$  к фотогенерации дырок в поли-N-эпоксипропилкарбазоле. Это означает, что металлокомплексы производных дитиолена 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] Elementary Processes in Organic Photovoltaics, Ed. K. Leo, Springer (2016)  
 [3] P. Kumar. Organic Solar Cells: Device Physics, Processing, Degradation, and Prevention, CRC Press (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 (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. Tonkopiyeva, 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. Tonkopiyeva. High Energy Chemistry, 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] N. A. Davidenko, A. A. Ishchenko. Theor. Exper. Chem., 38, N 2 (2002) 88—108
- [14] E. B. Yagubskii, L. A. Kushch, V. V. Gritsenko, O. A. Dyachenko, L. I. Buravov, A. G. Khomenko. Synth. Metals, 70, N 1–3 (1995) 1039—1041
- [15] A. V. Kukhta, E. E. Kolesnik, I. N. Kukhta, A. E. Pochtenny, V. K. Dolgiy, G. A. Mousdis, N. Psaroudakis. Synth. Met., 160 (2010) 2361—2365
- [16] L. Valade, J.-P. Legros, M. Bousseau, P. Cassoux, M. Garbaskas, L. V. Interrante. J. Chem. Soc., Dalton Transact., 4 (1985) 783—794
- [17] Н. А. Давиденко, А. А. Ищенко, В. А. Павлов. Журн. науч. и прикл. фотографии, 41, № 2 (1999) 52—56 [N. A. Davidenko, A. A. Ishchenko, V. A. Pavlov. Sci. Appl. Photo., 41, N 2 (1999) 169—174]
- [18] N. A. Davidenko, A. A. Ishchenko. Phys. Solid State, 42, N 8 (2000) 1403—1409
- [19] M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle, H. K. Wickramasinghe. Appl. Phys. Lett., 58 (1991) 2921—2923
- [20] Gaussian 09, revision A. 1, Gaussian, Inc, Wallingford (2009)
- [21] Jing-Lin Zuo, Tian-Ming Yao, Fei You, Xiao-Zeng You, Hoong-Kun Fun, Boon-Chuan Yip. J. Mater. Chem., 6 (1996) 1633—1637
- [22] M. Pope, C. E. Swenberg. Electronic Processes in Organic Crystals, Clarendon Press, Oxford (1982)
- [23] Н. А. Давиденко, Н. А. Деревянко, А. А. Ищенко, Н. Г. Кувшинский, А. В. Кулинич, О. Я. Нейланд, М. В. Плотнище. Изв. РАН. Сер. хим., 53, № 8 (2004) 1611—1617 [N. A. Davidenko, N. A. Derevyanko, A. A. Ishchenko, N. G. Kuvshinsky, A. V. Kulinich, O. Ya. Neilands, M. V. Plotniece. Russ. Chem. Bull., Int. Ed., 53, N 8 (2004) 1611—1617]