V. 88, N 2

JOURNAL OF APPLIED SPECTROSCOPY

MARCH — APRIL 2021

## ОСОБЕННОСТИ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФОТОПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КАРБАЗОЛИЛСОДЕРЖАЩЕГО ОЛИГОМЕРА С ДОБАВКАМИ АЗОКРАСИТЕЛЕЙ

## **Н. А. Давиденко**<sup>1</sup>, И. И. Давиденко<sup>1</sup>, Е. В. Мокринская <sup>1\*</sup>, С. Л. Студзинский <sup>1</sup>, В. В. Кравченко<sup>2</sup>

УДК 539.216.2

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, 01601, Киев, Украина; e-mail: mokrinskaya@ukr.net <sup>2</sup> Институт физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко НАН Украины, Киев, Украина

(Поступила 23 октября 2020)

Получены и исследованы новые фоточувствительные полимерные пленочные композиты на основе олигомера олиго-N-глицидилкарбазола с добавками азокрасителей — производных азобензола, в структуре которых имеется глицидильная группа. Показано, что созданные композиты проявляют фотовольтаические свойства при их облучении в области поглощения азокрасителя. Обсуждены механизм и особенности фотовольтаического эффекта в исследуемых пленочных композитах.

**Ключевые слова:** полимерные пленочные композиты, олиго-N-глицидилкарбазол, азокрасители, фотовольтаика, фотодиффузионный эффект, фотогенерация носителей заряда.

We have obtained and investigated new photosensitive polymeric film composites based on oligo-N-glycidylcarbazole oligomer with additives of azobenzene dyes, i.e. azobenzene derivatives with a glycidyl group in their structure. It was shown that the created composites exhibit photovoltaic properties when they are irradiated within the absorption range of the azobenzene dyes. The mechanism and features of the photovoltaic effect in the investigated film composites are discussed.

*Keywords:* polymeric film composites, oligo-*N*-glycidylcarbazole, azobenzene dyes, photovoltaics, photodiffusion effect, photogeneration of charge carriers.

**Введение.** В настоящее время при создании фотовольтаических сред используются одно- и многослойные, а также гибридные гетероструктуры на основе неорганических и органических материалов [1—5]. Центрами поглощения света и фотогенерации носителей электрического заряда в них могут служить органические красители, в частности азокрасители, которые обладают достаточно высоким коэффициентом экстинкции в широком спектральном диапазоне и способны при фотовозбуждении как акцептировать, так и отдавать электрон, взаимодействуя с соседними донорами или акцепторами [6, 7]. Полимерные пленочные композиты (ППК), содержащие в составе карбазолильные фрагменты, могут обладать фотополупроводниковыми и магнитными свойствами [7, 8], что представляет интерес при разработке новых фотовольтаических сред, а также материалов для различных приложений молекулярной электроники и фотоники.

В настоящей работе представлены результаты исследования фотовольтаических свойств новых ППК на основе карбазолилсодержащего олигомера с дырочным типом проводимости — олиго-N-глицидилкарбазола (ОГК), сенсибилизированных синтезированными эпоксидированными азокраси-

## FEATURES OF THE PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF PHOTOSEMICONDUCTIVE FILM COMPOSITES BASED ON THE CARBAZOLYL-CONTAINING OLIGOMER WITH ADDITIVES OF AZOBENZENE DYES

**N. A. Davidenko**<sup>1</sup>, **I. I. Davidenko**<sup>1</sup>, **E. V. Mokrinskaya**<sup>1\*</sup>, **S. L. Studzinskiy**<sup>1</sup>, **V. V. Kravchenko**<sup>2</sup> (<sup>1</sup> Taras Shevchenko Kiev National University, Kiev, 01601, Ukraine, e-mail: mokrinskaya@ukr.net; <sup>2</sup> Instutute of Physical and Organic Chemistry and Coal Chemistry of L. M. Litvinenko of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine) телями 4-(4-нитрофенилазо)фенилглицидиловым эфиром (Azo1) и 4-(4-бромфенилазо)фенилглицидиловым эфиром (Azo2).

**Образцы и методика эксперимента.** Для приготовления ППК использован карбазолилсодержащий олигомер (ОГК):



Для сенсибилизации фотопроводимости ППК синтезированы глицидилсодержащие азокрасители Azo1 и Azo2:



Образцы приготовлены либо со свободной поверхностью ППК: стеклянная подложка—ITO—пленка ППК (ITO — электропроводящий прозрачный слой SnO<sub>2</sub>:In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), либо в виде симметричных сандвичструктур: стеклянная подложка—ITO—пленка ППК—ITO—стеклянная подложка. Концентрация красителя в ППК 10 мас.%. Пленки ППК получены поливом на подложки (стеклянные подложки без слоя или со слоем ITO) из дихлорэтановых растворов олигомера ОГК с добавками красителей Azo1 или Azo2 с последующим высушиванием при 80 °C в термошкафу в течение трех дней. Толщина слоев ППК измерена с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. Толщина высушенных пленок ППК  $L \approx 1.5$  мкм.

Для образцов измерены спектры поглощения (оптическая плотность D) пленок ППК; электрический потенциал (*V*<sub>PH</sub>) свободной поверхности пленки ППК относительно электрода ITO до облучения светом и его изменение во время (t) облучения со стороны прозрачного электропроводящего слоя ITO, а также после выключения света. Для определения фотовольтаических характеристик в образцах со свободной поверхностью пленок ППК применен метод измерения потенциала поверхности с помощью динамического зонда (модифицированный метод Кельвина [9, 10]). Выбор методики обоснован тем, что в этом случае отсутствует влияние контактной разности потенциалов, которая возникает в образцах сандвич-структуры с электродами из разных материалов, на фотопроцессы в пленках ППК. В качестве зонда использована Al-пластина диаметром 4 мм. Частота колебаний зонда 4 кГц. Кинетика изменения V<sub>PH</sub> в образцах со свободной поверхностью пленок ППК зарегистрирована с помощью USB-осциллографа BM8020. Кинетика фотовольтаического отклика в образцах сандвич-структуры зарегистрирована электрометрически [10] с помощью запоминающего осциллографа Tektronix TDS1001B. Для облучения образцов использован белый полупроводниковый светодиод, интенсивность излучения которого варьирует в диапазоне  $I \sim 15-50$  Вт/м<sup>2</sup>. При исследовании характеристик фотовольтаического отклика V<sub>PH</sub> в образцах со свободной поверхностью пленок ППК методом Кельвина облучение ППК излучением соответствующих светодиодов осуществлялось в активную область зонда со стороны стеклянной подложки и прозрачного ІТО-электрода [10]. Все измерения проведены при комнатной температуре (20 °C).

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены спектры поглощения полученных ППК. Пленки ОГК без добавок красителей прозрачны и не проявляют фотопроводимости и фотовольтаических свойств в видимой области спектра. Поглощение окрашенных ППК с добавками красителей Azo1 или Azo2 в видимой области определяется длинноволновыми оптическими электронными переходами в молекулах азокрасителя [11]. Соответствующие нормированные спектры поглощения образцов созданных ППК на основе ОГК с добавками 10 мас.% красителей Azo1 или Azo2 приведены на рис. 1. Установлено, что все исследуемые ППК являются фотополупроводниками и проявляют фотовольтаические свойства при облучении их светом из области поглощения компонентов соответствующих фоточувствительных композитов, т. е. способны к внутреннему фотоэффекту [5—8].



Рис. 1. Нормированные спектры оптического поглощения пленок ППК на основе ОГК +10 мас.% Azo1 (*1*) и ОГК + 10 мас.% Azo2 (*2*)

На рис. 2 приведены кинетики фотоиндуцированного нарастания и темновой релаксации фотовольтаического отклика  $V_{\rm PH}(t)$  в образцах сенсибилизированных красителями ППК со свободной поверхностью на основе ОГК + 10 мас.% Azo1 и ОГК + 10 мас.% Azo2, а также в образцах пленок чистых красителей Azo1 и Azo2. Видно, что во всех случаях кинетика изменения фотовольтаического отклика V<sub>PH</sub>(t) характеризуется значительной асимметрией — темновая релаксация фотоотклика V<sub>PH</sub> значительно медленнее его роста при облучении. Кроме того, в случае ППК на основе ОГК + 10 мас.% Azo1 кинетика как нарастания фотоотклика  $V_{PH}(t)$ , так и его темновой релаксации характеризуется двумя составляющими — быстрой и медленной (кривая 1). Введение красителя Azo1 в олигомер приводит к значительному возрастанию амплитуды фотовольтаического отклика, при этом кинетика фотоиндуцированного роста сигнала  $V_{\rm PH}(t)$  становится значительно более быстрой по сравнению с пленкой чистого красителя Azol (кривая 3). В случае Azo2 величина и характер кинетики фотоотклика V<sub>PH</sub> для ППК на основе олигомера ОГК, сенсибилизированного красителем Azo2, и для пленок чистого Azo2 сопоставимы и близки между собой. Для ППК с добавками Azo1 достигнута максимальная (квазистационарная) величина V<sub>PH max</sub> ~ 300 мВ, для ППК с добавками Azo2 V<sub>PH max</sub>  $\sim 100$  мВ, а для образцов пленок чистых азокрасителей Azo1 и Azo2  $V_{\rm PH \ max} \sim 80$  мВ. Во всех исследуемых образцах пленочных структур фотоиндуцированный электрический потенциал (V<sub>PH</sub>) свободной поверхности пленки ППК относительно электрода ITO имеет положительный знак.



Рис. 2. Зависимости фотовольтаического отклика  $V_{PH}(t)$  в образцах со свободной поверхностью ППК на основе ОГК + 10 мас.% Azo1 (1), ОГК + 10 мас.% Azo2 (2), а также пленок чистых красителей Azo1 (3) и Azo2 (4) при их облучении светом белого светодиода (I = 50 BT/m<sup>2</sup>) со стороны прозрачного ITO-электрода; моменты выключения света облучения указаны вертикальными стрелками (начало световой экспозиции соответствует моменту времени  $t \approx 30$  с)

Для выяснения причин появления фотовольтаического эффекта и его особенностей в исследуемых ППК воспользуемся модельными представлениями о фотогенерации, транспорте и рекомбинации носителей заряда в неупорядоченных органических материалах [5—8, 12, 13].

Согласно модельным представлениям о фотогенерации и переносе носителей заряда (НЗ) в ППК с органическими красителями [6-8, 11, 14], внутренний фотоэффект в них связан с образованием после поглощения света молекулами красителя электронно-дырочных пар (ЭДП), в результате диссоциации которых появляются свободные неравновесные носители заряда (тока) (ННЗ), и переносом этих носителей в полимерной матрице. Перенос ННЗ осуществляется в результате диффузии или под воздействием внешнего электрического поля, например, за счет электронных переходов между соседними хромофорными фрагментами полимера или красителя, обеспечивая таким образом фотопроводимость ППК. С диссоциацией ЭДП могут конкурировать рекомбинация фотогенерированных НЗ и их захват на энергетические ловушки [5, 6, 11—13, 15]. В исследуемых ППК, сенсибилизированных азокрасителями, после фотовозбуждения молекул Azo1 или Azo2 (далее на схемах просто Az) могут осуществляться межмолекулярные электронные переходы между карбазолильными ядрами молекул ОГК и красителем. Эффективность последних определяется соотношением граничных орбиталей азокрасителя и карбазолильных фрагментов олигомера ОГК [5, 6, 14-16]. В соответствии с этим валентный электрон карбазолильного фрагмента ОГК может перейти на полузаполненную верхнюю заполненную молекулярную орбиталь (B3MO) возбужденной молекулы Azo1 или Azo2 [6, 11, 14] (далее Az\*) с образованием карбазолильного катион-радикала Cz<sup>•+</sup>, а также анион-радикала красителя Аz- (реакция (1) на упрощенной схеме ниже). При этом на карбазолильном фрагменте образуется электронная вакансия (дырка), которая во внешнем электрическом поле или за счет диффузии может перемещаться по соседним карбазолильным фрагментам олигомера ОГК, а на молекуле азокрасителя локализуется электрон, который в этих же условиях может перемещаться за счет переходов по нижним вакантным молекулярным орбиталям (НВМО) соседних молекул красителя [6, 11, 14]. Образованная таким образом геминальная ЭДП может далее либо рекомбинировать (реакция (2)) безызлучательно с выделением тепла или с излучением кванта света  $hv_{r}$ , либо диссоциировать в соответствии с (3) и (4) по схеме:

$$Az \xrightarrow{hv} Az^*$$
(1)

$$Cz + ... + Cz + Cz + Az^* \rightarrow Cz + ... + Cz + Cz^{\bullet^+} + Az^{\bullet^-} \rightarrow Cz + ... + Cz + Cz + Az + hv_r$$
 (или тепло) (2)

Δ

$$Cz + \dots + Cz + Cz^{\bullet^+} + Az^{\bullet^-} \rightarrow Cz + \dots + Cz^{\bullet^+} + Cz + Az^{\bullet^-} \rightarrow Cz^{\bullet^+} + \dots + Cz + Cz + Az^{\bullet^-}$$
(3)

В результате диссоциации фотогенерированных геминальных ЭДП (3) и (4) электростатическое взаимодействие между дыркой (Cz<sup>•+</sup>) и электроном, локализованным на анион-радикале Az<sup>•-</sup>, ослабевает и образуются свободные ННЗ. Вероятность диссоциации фотогенерированных ЭДП возрастает при приложении внешнего электрического поля *E* и повышении температуры T [5, 6, 14, 15].

Другой возможный механизм фотогенерации подвижных H3 в исследуемых ППК помимо описанного выше сенсибилизированного красителями внутреннего фотоэффекта в олигомере ОГК собственная фотогенерация заряда молекулами красителя [11, 14] или их ассоциатами в олигомерной матрице ППК. Такой механизм фотогенерации включает в себя стадии, в целом аналогичные описанным выше, и упрощенно описывается схемой:

$$Az \xrightarrow{hv} Az^*$$
 (5)

$$Az^* + Az \rightarrow Az^{\bullet-} + Az^{\bullet+} \rightarrow 2Az + hv_r (или тепло)$$

$$(6)$$

$$+ Az \rightarrow Az^{\bullet-} + Az + Az^{\bullet+} + Az \rightarrow Az^{\bullet-} + Az + Az^{\bullet+} + Az^{\bullet+}$$

$$(7)$$

или 
$$Az^{\bullet^-} + Az^{\bullet^+} + Az + \dots + Az \rightarrow Az^{\bullet^-} + Az + Az^{\bullet^+} + \dots + Az \rightarrow Az^{\bullet^-} + Az + Az + \dots + Az^{\bullet^+}$$
 (7)  
и  $Az^{\bullet^+} + Az^{\bullet^-} + Az + \dots + Az \rightarrow Az^{\bullet^+} + Az + Az^{\bullet^-} + \dots + Az \rightarrow Az^{\bullet^+} + Az + Az + \dots + Az^{\bullet^-}$  (8)

При этом в случае переноса фотогенерированных ННЗ по мономерным молекулам азокрасителя (уравнения (7) и (8)) зону транспорта дырок формируют ВЗМО, а электронов — НВМО молекул красителя. Возможность реализации последнего описанного механизма фотогенерации подвижных НЗ в исследуемых ППК косвенно подтверждается тем, что образцы со свободной поверхностью пленок чистых красителей Azo1 и Azo2 также обнаруживают фотовольтаический эффект при их облучении светом в области поглощения азокрасителя (рис. 2, кривые 3 и 4). Кроме того, ряд азокрасителей проявляют фотополупроводниковые свойства, т. е. являются фотополупроводниками [11, 14].

Для уточнения природы фотовольтаического эффекта в полученных композитах проведены дополнительные исследования ППК в симметричных образцах сандвичевого типа (стеклянная подлож-

и изменении направления об

ка-ПТО-ППК-ПО-стеклянная подложка). Установлено, что при изменении направления облучения на 180° в таких образцах со всеми исследуемыми ППК фотовольтаический отклик, оставаясь практически постоянным по величине, меняет знак на противоположный. Последнее позволяет предположить, что указанный эффект имеет преимущественно фотодиффузионную природу [17, 18]. Такой диффузионный механизм возникновения фотовольтаического эффекта характерен для фотополупроводниковых материалов, в которых образующиеся при облучении разноименные НЗ (электроны и дырки) имеют различающиеся подвижности [19, 20]. В этом случае фото-ЭДС возникает вследствие градиента концентрации избыточных НЗ, который появляется из-за неоднородного поглощения света в сильнопоглощающих полупроводниковых пленках. Согласно [19-21], определенный из эксперимента для всех исследуемых ППК положительный знак фотопотенциала VPH менее освещенной поверхности ППК по отношению к облучаемой в образцах со свободной поверхностью или в симметричных образцах сандвичевого типа соответствует положительному знаку наиболее подвижных НЗ, т. е. дыркам (на практике такая зависимость в большинстве случаев имеет место [19-21]). Последнее означает, что полученные ППК характеризуются дырочным типом проводимости, это хорошо согласуется с дырочным характером фотопроводимости карбазолилсодержащих полимеров, олигомеров и низкомолекулярных фотополупроводников [6-8, 12-15], а также ряда азосистем [11, 14].

Естественно предположить, что значительно более медленный характер кинетики темновой релаксации фотовольтаического отклика по сравнению с кинетикой его фотоиндуцированного нарастания в исследуемых пленочных системах обусловлен процессами захвата фотогенерированных при облучении подвижных ННЗ на ловушки той или иной природы [5-8, 15, 19, 22], присутствующие в олигомере (либо в случае пленок чистых красителей — в пленках азокрасителя). Так как исследуемые ППК характеризуются преимущественно дырочным типом проводимости, можно считать, что замедленная составляющая кинетики фотовольтаического отклика в образцах со свободной поверхностью ППК определяется в основном захватом неравновесных дырок. В качестве ловушек, осуществляющих захват фотогенерированных подвижных ННЗ, в исследуемых ППК могут выступать так называемые физические димеры [21], или преддимерные состояния, образованные преимущественно терминальными карбазолильными фрагментами молекул ОГК и способные к захвату фотогенерированных дырок [6, 21], а также отдельные молекулы красителя при их достаточном пространственном удалении друг от друга в объеме ППК. Это должно приводить к пространственной локализации фотогенерированного НЗ — электрона или дырки (последнее в случае, когда перенос дырок между азокрасителем и карбазолильными фрагментами олигомера затруднен) — на такой молекуле вследствие малой вероятности перехода последнего на соседнюю молекулу азокрасителя, а также ассоциаты азокрасителя.

Значительное увеличение фотоотклика V<sub>PH</sub>, а также изменение кинетики нарастания фотовольтаического эффекта (ее существенное ускорение по сравнению с пленками чистого Azol) в образцах со свободной поверхностью ППК при введении красителя Azo1 в олигомер ОГК можно объяснить улучшенными фотогенерационными и транспортными характеристиками соответствующих окрашенных пленочных олигомерных систем по сравнению с пленками чистого красителя Azo1. В то время как в пленках чистого Azol внутренний фотоэффект обусловлен лишь собственной фотогенерацией подвижных ННЗ и их переносом в азокрасителе, при введении молекул Azo1 в пленку олигомера ОГК первые способны к акцептированию при фотовозбуждении электронов с карбазолильных фрагментов [11], т. е. сенсибилизации внутреннего фотоэффекта в ОГК. При этом краситель Azo1 актуализирует отсутствовавшие в пленках чистого красителя фотогенерацию неравновесных дырок и дырочный транспорт (за счет появления дополнительных эффективных центров зоны транспорта дырок — карбазолильных групп) в подсистеме карбазолильных ядер олигомера ОГК [6, 11] (последние процессы, как видно, протекают в матрице ОГК с большей эффективностью, чем в пленках чистого красителя). Известно [6, 12-16], что ОГК является фотополупроводником и эффективным переносчиком дырок (способен к достаточно эффективному транспорту дырок) и характеризуется дырочным типом проводимости. На фоне общего возрастания эффективности фотогенерации НЗ при сенсибилизации ППК азокрасителем последнее приводит к возрастанию фотопроводимости системы в целом, улучшению транспортных характеристик ППК и некоторому уменьшению роли процессов захвата НЗ. Этим обусловлены более быстрые нарастание и релаксация фотовольтаического отклика. Соответственно, величина фотовольтаического отклика должна возрасти, а его кинетика при прочих равных условиях — ускориться, что и имеет место (рис. 2, кривая *1*). С этим согласуется и наличие в кинетике нарастания и темновой релаксации фотоотклика  $V_{\rm PH}(t)$  в ППК на основе ОГК с Azo1 быстрой и медленной составляющих, которые естественно ассоциировать с процессами фотогенерации, рекомбинации и транспорта, а также захвата подвижных ННЗ, связанными с сенсибилизированным красителем Azo1 в ОГК внутренним фотоэффектом и с собственной (как видно, менее эффективной) фотогенерацией НЗ в азокрасителе или его ассоциатах в олигомерных ППК.

Значительно меньший фотовольтаический отклик V<sub>PH</sub> в ППК на основе ОГК с добавками красителя Azo2 по сравнению с ППК, сенсибилизированными Azo1, по-видимому, может быть объяснен меньшей способностью к захвату электрона (меньшей электроноакцепторностью, или большей электронодонорностью) бромсодержащего красителя Azo2 по сравнению с содержащим в своей молекуле нитрогруппу и, следовательно, более электроноакцепторным красителем Azo1. Последнее означает меньшую способность или практически полное ее отсутствие у красителя Azo2 к сенсибилизации внутреннего фотоэффекта и фотогенерации дырок (захвату электронов) в ППК на основе характеризующегося дырочной проводимостью ОГК (многие карбазолилсодержащие полимеры имеют близкое к нулю сродство к электрону [15, 16], поэтому способны лишь к сенсибилизированной фотогенерации дырок) по сравнению с азокрасителем Azo1, способным выступать в качестве достаточно эффективного акцептора электронов и, следовательно, центра фотогенерации дырок в карбазолилсодержащих системах [11]. Приведенная аргументация согласуется с тем, что для ППК на основе ОГК, сенсибилизированного красителем Azo2 и для пленок чистого Azo2 характер фотоотклика V<sub>PH</sub> близок и в образцах ППК олигомера с Azo2 фотовольтаический эффект лишь незначительно превосходит V<sub>PH</sub> в пленках чистого Azo2 (рис. 2, кривые 2 и 4). В обоих случаях внутренний фотоэффект обусловлен в основном одними и теми же процессами "собственной" фотогенерации H3 в азокрасителе Azo2, характеризующимися сравнительно невысокой эффективностью. В случае ППК на основе ОГК процессы сенсибилизированной красителем в олигомере фотогенерации ННЗ протекают с малой эффективностью и вносят лишь небольшой вклад в фотовольтаический отклик (рис. 2). Видно, что сильно замедленная суммарная кинетика релаксации фотоотклика V<sub>PH</sub> проявляется в долговременной памяти на предварительное облучение у образцов исследуемых ППК — после световой экспозиции и относительно краткого периода темновой релаксации сигнал соответствующего фотоотклика смещается на некоторую "нерелаксировавшую" (долговременно релаксирующую) после исходной экспозиции величину в область больших V<sub>PH</sub>. Последнее обусловливает возможность использования таких ППК в качестве регистрирующих сред для оптической записи информации при создании оптических ячеек памяти.

Заключение. Созданы новые фоточувствительные полимерные пленочные композиты на основе карбазолилсодержащего олигомера олиго-N-глицидилкарбазол с добавками глицидилсодержащих азокрасителей — производных замещенного азобензола с различной акцепторностью азохромофоров - и исследованы их фотоэлектрические свойства. Установлено, что созданные ППК характеризуются фотовольтаическими свойствами при их облучении в области поглощения азокрасителя. Обнаруженный фотовольтаический эффект имеет фотодиффузионную природу. Значительно больший фотовольтаический отклик в образцах со свободной поверхностью ППК, сенсибилизированных красителем Azo1, по сравнению с ППК с добавками красителя Azo2 может быть объяснен улучшенными фотогенерационными и транспортными характеристиками первых вследствие большей электроноакцепторности содержащего нитрогруппу азокрасителя Azo1 по сравнению с бромсодержащим Azo2 и, следовательно, большей способности красителя Azo1 к захвату электрона с карбазолильных фрагментов ОГК при фотовозбуждении, а значит, и большей способности к сенсибилизации внутреннего фотоэффекта в ППК на основе исследованного олигомера, меньшим влиянием на их фотоэлектрические свойства процессов захвата неравновесных подвижных носителей заряда. Из-за значительных времен нарастания и особенно релаксации фотовольтаического отклика, связанных с существенной ролью процессов захвата фотогенерированных носителей заряда, созданные ППК мало пригодны для применения в фотовольтаике. Однако эта же особенность, проявляющаяся в долговременной памяти на предварительное облучение, позволяет использовать такие ППК, например сенсибилизированные красителем Azol, при разработке новых регистрирующих сред для оптической записи информации при создании оптических ячеек памяти.

[2] A. W. Hains, Z. Liang, M. A. Woodhouse, B. A. Gregg. J. Chem. Rev., 110 (2010) 6689-6735

<sup>[1]</sup> Photochemistry and Photophysics of Polymeric Materials, Ed. Norman S. Allen, Wiley (2010)

<sup>[3]</sup> Konrad Mertens. Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice, Wiley (2014)

[4] Н. А. Давиденко, А. А. Ищенко, О. А. Коротченков, Е. В. Мокринская, А. А. Подолян, С. Л. Студзинский, Л. С. Тонкопиева. Письма в ЖТФ, **38**, № 20 (2012) 30—37

[5] A. Kohler, H. Bassler. Electronic Processes in Organic Semiconductors: An Introduction, Wiley-VCH, Weinheim, Germany (2015)

[6] Н. А. Давиденко, А. А. Ищенко, Н. Г. Кувшинский. Фотоника молекулярных полупроводниковых композитов на основе органических красителей, Киев, Наукова думка (2005)

[7] Н. А. Давиденко, С. В. Дехтяренко, Ю. П. Гетманчук, А. А. Ищенко, А. В. Козинец, Л. И. Костенко, Е. В. Мокринская, С. Л. Студзинский, В. А. Скрышевский, Н. А. Скульский, О. В. Третяк, Н. Г. Чуприна. ФТП, 43, № 11 (2009) 1515—1520

[8] N. A. Davidenko, I. I. Davidenko, A. A. Ishchenko, V. V. Kravchenko, E. V. Mokrinskaya, S. L. Studzinsky, L. S. Tonkopieva. Mat.-wiss. u. Werkstofftech., 47, N 4 (2016) 360-366

[9] T. Blythe, D. Bloor. Electrical Properties of Polymers, CUP, Cambridge, UK (2005)

[10] S. L. Studzinsky. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 589 (2014) 183-194

[11] S. L. Studzinsky, V. M. Ovdenko. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 639, N 1 (2016) 115-125

[12] N. Davidenko, I. Davidenko, A. Ishchenko, A. Kulinich, V. Pavlov, S. Studzinsky, N. Chuprina. Appl. Opt., **51**, N 10 (2012) C48—C54

[13] 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

[14] Electron Transfer in Chemistry, Ed. V. Balzani, Wiley-VCH, FRG (2001)

[15] **M. Pope, C. E. Swenberg.** Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers, Oxford University Press, Oxford (1999)

[16] В. Д. Филимонов, Е. Е. Сироткина. Химия мономеров на основе карбазола, Новосибирск, Наука (1995)

[17] Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника, под ред. Э. И. Адировича, Ташкент, Фан (1972)

[18] Г. А. Набиев. Физ. инженерия поверхности, 6, № 1-2 (2008) 51—58

[19] С. М. Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках, Москва, Физматгиз (1963)

[20] Г. А. Набиев. ФТП, **43**, № 7 (2009) 924—925

[21] Элементарные фотопроцессы в молекулах, под ред. Б. С. Непорента, Москва, Наука (1966)

[22] **K. W. Boer.** Introduction to Space Charge Effects in Semiconductors, Springer, Dordrecht, London, New York, USA (2010)