

**ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ,
ЛЕГИРОВАННЫХ БИЯДЕРНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ ЛАНТАНОИДОВ
НА ОСНОВЕ КАРБАЦИЛАМИДОФOSFATНЫХ ЛИГАНДОВ
И 3,6-ДИПИРИДИН-2-ИЛ-1,2,4,5-ТЕТРАЗИНА**

**В. М. Амирханов¹, Д. Г. Вишнеvский¹, В. Н. Овденко¹, Н. Г. Чуприна¹,
Е. В. Мокринская¹, В. А. Зозуля¹, Ю. О. Шатрава¹, В. А. Овчинников¹,
Т. Ю. Слива¹, А. К. Мельник², И. И. Давиденко^{1*}, **Н. А. Давиденко¹****

УДК 541.14;541.49;541.64;535.5

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
01601, Киев, Украина; e-mail: ndav@univ.kiev.ua

² Институт сорбции и проблем эндоэкологии НАН Украины,
03164, Киев, Украина

(Поступила 20 апреля 2020)

Исследованы фотовольтаические и фотопроводящие свойства пленочных композитов сополимера стирола с нонилметакрилатом — поли-*N*-эпохипропилкарбазола, легированных комплексами лантаноидов состава $Ln_2L_6 \cdot PS$ ($Ln = Nd, Eu, Gd, Yb$; *HL* — лиганд карбациламинодифосфатного типа, $CCl_3C(O)N(H)P(O)(NEt_2)_2$, *N*-[бис(диэтиламино) фосфорил]-2,2,2-трихлорацетамид; *PS* — 3,6-дипиридин-2-ил-1,2,4,5-тетразин, $C_5H_4N-C_2N_4-C_5H_4N$). Установлено, что в видимой области спектра эти композиты имеют дырочный тип фотопроводимости, а внутренний фотоэффект определяется фотогенерацией носителей заряда из молекул металлокомплекса и сенситизатора. Методом ЭПР исследована кинетика образования и релаксации фотогенерированных носителей заряда. Сделан вывод о том, что молекулы металлокомплекса в составе полимерного композита способствуют увеличению эффективности фотогенерации неравновесных носителей заряда и тем самым влияют на фотовольтаические свойства композитов.

Ключевые слова: полимерные композиты, фотопроводимость, фотовольтаика, спиновая конверсия, комплексы лантаноидов, лиганды, дипиридилтетразин.

The photovoltaic and photoconductive properties of film composites of styrene copolymer with nonylmethacrylate, poly-*N*-epoxypropylcarbazole doped with lanthanide complexes of the composition $Ln_2L_6 \cdot PS$ ($Ln = Nd, Eu, Gd, Yb$; *HL* is a ligand of the carbacylamidophosphate type, $CCl_3C(O)N(H)P(O)(NEt_2)_2$, *N*-[bis(diethylamino) phosphoryl]-2,2,2-trichloroacetamide; *PS* = 3,6-dipyridin-2-yl-1,2,4,5-tetrazine, $C_5H_4N-C_2N_4-C_5H_4N$) have been studied. It is found that in the visible range of the spectrum these composites have a hole type of photoconductivity, and the internal photoelectric effect is determined by the photogeneration of charge carriers from the molecules of the metal complex and the sensitizer. The kinetics of the formation and relaxation of photogenerated charge carriers has been studied by the EPR method. It is concluded that the molecules of the metal complex in the composition of the polymer composite enhance the efficiency of photogeneration of non-equilibrium charge carriers and thereby affect the photovoltaic properties of the composites.

Keywords: polymer composites, photoconductivity, photovoltaics, spin conversion, complexes of lanthanides, ligands, dipyridyltetrazine.

**PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES DOPED WITH BINUCLEAR
COMPLEXES OF LANTHANIDS BASED ON CARBACYLAMIDOPHOSPHATE LIGANDS
AND 3,6-DIPYRIDIN-2-IL-1,2,4,5-TETRAZINE**

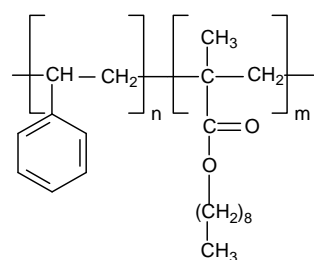
**V. M. Amirkhanov¹, D. G. Vishnevsky¹, V. N. Ovdenko¹, N. G. Chuprina¹, E. V. Mokrinskaya¹,
V. A. Zozulya¹, Yu. O. Shatrava¹, V. A. Ovchinnikov¹, T. Yu. Sliva¹, A. K. Mel'nik², I. I. Davidenko^{1*},
N. A. Davidenko¹** (¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 01601, Ukraine; e-mail: ndav@univ.kiev.ua; ² Institute of Sorption and Endoecology Problems of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 03164, Ukraine)

Введение. Создание новых материалов, обладающих фотопроводимостью в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, актуально для фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. Наряду с неорганическими полупроводниками перспективно использование органических полимеров и композитов, легированных добавками различной природы, включая металлокомплексы [1—7]. Вещества для этих целей подбирают таким образом, чтобы fotocувствительная среда обладала высокими коэффициентами поглощения в спектральной области солнечного излучения, эффективностью фотогенерации и малой эффективностью рекомбинации носителей заряда, большой подвижностью неравновесных носителей заряда. Высокая фотопроводимость обеспечивается введением в состав материала соединений с большими коэффициентами экстинкции и способностью в возбужденном состоянии отдавать или принимать электроны на π -сопряженные фрагменты полимера с образованием зарядовых пар, эффективным разделением зарядовых пар и переносом неравновесных носителей заряда по π -сопряженным фрагментам полимера и примесного соединения (допанта). Эффективность разделения зарядов в электронно-дырочных зарядовых парах определяется их спиновым состоянием, а именно временем жизни в связанном состоянии до рекомбинации. Спиновое состояние зарядовых пар зависит от структуры и состава как молекул допантов, так и полимерной матрицы. В последнем случае полимерная матрица может оказывать более сильное влияние на рассматриваемые фотофизические процессы из-за ее количественного преобладания в полупроводящем полимерном композите (ППК). В последнее время синтезировано множество металлокомплексов, которые имеют различное применение, в частности для фотовольтаического преобразования солнечной энергии.

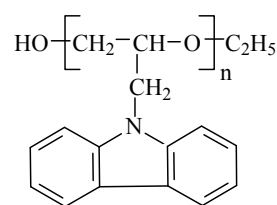
Комплексы на основе карбациламидофосфатных лигандных систем (КАФ-лигандов) получены для представителей металлов 3*d*-ряда и лантаноидов [8—10], многие из них характеризуются интересными оптическими свойствами [11]. Фотовольтаические свойства тетраядерного комплекса меди на основе КАФ-лиганда состава $\text{Cu}_4\text{L}_4(\text{OCH}_3)_4$, где L^- — $\text{N,N}'$ -дибензил- N'' -трихлороацетилтриамидофосфат, исследованы в составе полимерного композита [8].

Цель настоящей работы — исследование фотопроводящих и фотовольтаических свойств ППК с новыми комплексами лантаноидов на основе КАФ-лиганда и определение природы взаимодействия между молекулами полимера и металлокомплекса с использованием методики фотовозбуждения центров фотогенерации и поиска заряженных частиц методом ЭПР.

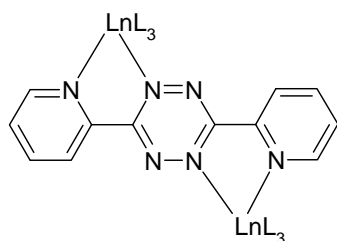
Образцы и методика экспериментов. Использованы ППК на основе сополимера стирола с нилметакрилатом (СНМ) олигомера поли-*N*-эпоксипропилкарбазола (ПЭПК), легированных металлокомплексами $\text{Nd}_2\text{L}_6\cdot\text{PS}$ (К1), $\text{Gd}_2\text{L}_6\cdot\text{PS}$ (К2), $\text{Eu}_2\text{L}_6\cdot\text{PS}$ (К3), $\text{Yb}_2\text{L}_6\cdot\text{PS}$ (К4):



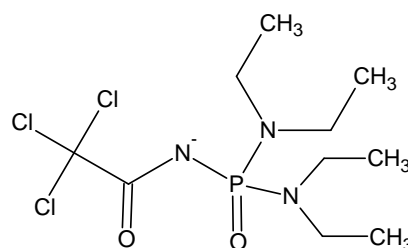
СНМ



ПЭПК



Комплексы К1—К4



Ацидоформа КАФ-лиганда (L^-)

Образцы готовили со свободной поверхностью ППК: стеклянная подложка/электропроводящий слой ИТО/ППК, где ИТО — электропроводящий слой $\text{SnO}_2\cdot\text{In}_2\text{O}_3$, а также тефлоновая подложка/ППК. Содержание К1—К4 в СНМ и ПЭПК 30 мас.%. Увеличение концентрации добавок К1—К4 >30 мас.%

в СНМ и ПЭПК приводит к неоднородности морфологии пленок, что недопустимо для их использования в фотоэлектрических преобразователях. Толщина ППК в образцах со слоем ИТО 1—1.5 мкм, в образцах на тефлоновых подложках значительно больше, так как они предназначены для исследований методом ЭПР и для повышения точности измерений необходимо использовать достаточно большую массу ППК. Для приготовленных образцов измерены спектры поглощения (оптической плотности D), электрический потенциал V_{PH} свободной поверхности ППК относительно электрода ИТО до облучения светом со стороны прозрачного электропроводящего слоя ИТО, его изменение во время t облучения и после выключения света. Фотовольтаические свойства разных образцов сравнивали по электрическому потенциалу V_{PH}^{max} поверхности на квазистационарном участке зависимости $V_{PH}(t)$. Применена методика измерения потенциала поверхности с помощью динамического зонда (метод Кельвина [9]). В качестве зонда использована Al-пластина диаметром 4 мм. Частота колебаний зонда 4 кГц. В тех же образцах измерен электрический потенциал V_p поверхности ППК после зарядки в коронном разряде без облучения и при облучении светом. Коронный разряд создавали при положительном и отрицательном потенциалах коронирующего электрода относительно слоя ИТО. Сразу после зарядки в коронном разряде потенциал поверхности пленок относительно слоя ИТО составляет $V_p^{max} = \pm(180—200)$ 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 ~ 10 кВ между слоем ИТО и металлической нитью над поверхностью ППК. Для измерения V_p , как и V_{PH} , применен метод Кельвина. Скорость спада потенциала поверхности пленки оценена по отрезку времени $t_{1/2}$, за который V_p^{max} уменьшается в 2 раза. Эту скорость сравнивали для положительной $t_{1/2}(+)$ и отрицательной $t_{1/2}(-)$ зарядки поверхности ППК. Кинетика $V_{PH}(t)$ и $V_p(t)$ зарегистрирована с помощью запоминающего осциллографа. Для облучения образцов использован лазер на основе светодиода с максимумом излучения на $\lambda_{lit} = 650$ нм и мощностью 5 мВт. Интенсивность света, падающего на образец в активную область зонда со стороны стеклянной подложки $I \sim 10$ Вт/м². В соответствии с поставленной целью с использованием спектрометра X-диапазона (9 ГГц) Bruker Elexsys E580 FT/CW измерена кинетика изменения сигналов ЭПР в образцах ППК при их облучении излучением с $\lambda = 650$ нм и $I \sim 10$ Вт/м². Образцы ППК на тефлоновых подложках находились внутри резонатора спектрометра, а облучение осуществлялось через оптическое окно в резонаторе. Исследования проведены при комнатной температуре ~ 20 °С.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены спектры поглощения ППК различного состава. Пленки СНМ и ПЭПК прозрачны в видимой области спектра и без специально введенных добавок не поглощают свет в области $\lambda > 400$ нм. Полосы поглощения ППК в видимой области определяются поглощением соответствующих добавок в СНМ или ПЭПК. Широкая полоса поглощения K1—K4 в видимой области (рис. 1) обусловлена переходами окрашенного тетразинового лиганда.

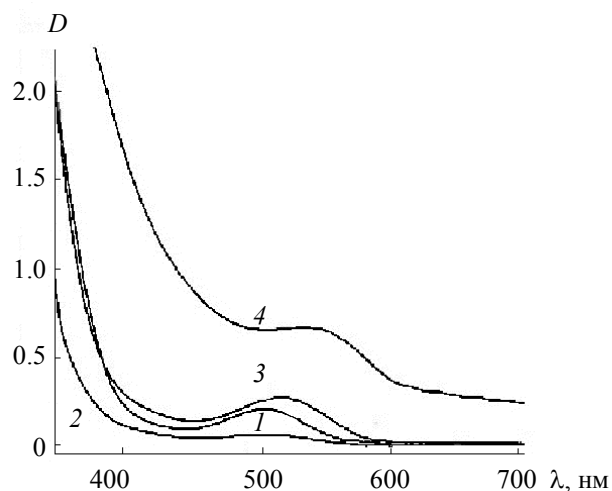


Рис. 1. Спектры поглощения пленок с K1 (1), K2 (2), K3 (3), K4 (4)

В образцах ППК с допантами обнаружен фотовольтаический эффект (табл. 1). После начала облучения величина V_{PH} нарастает и имеет положительный знак. После выключения света релаксация V_{PH} происходит медленнее, чем нарастание, характерное время этой релаксации нельзя описать простой экспоненциальной функцией. В образцах со свободной поверхностью ППК отсутствует внутреннее электрическое поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно к поверхности пленки. Поэтому можно считать, что появление положительных электрических зарядов на свободной поверхности пленок при их облучении светом с $\lambda_{ит}$ связано с фотогенерацией зарядовых пар (дырок и электронов) из центров фотогенерации (K1—K4) в результате внутреннего фотоэффекта, диффузией фотогенерированных дырок в направлении от облучаемого контакта ИТО к свободной поверхности ППК. Диффузия вызвана возникновением градиента концентрации подвижных носителей заряда, которая больше вблизи облучаемого электрода ИТО, возле которого происходят основное поглощение падающего света и фотогенерация зарядовых пар. 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 [12]. Следовательно, в этих образцах ППК фотовольтаический эффект определяется фотогенерацией зарядовых пар из центров фотогенерации K1—K4, переносом положительных носителей заряда (дырок) к свободной поверхности ППК, а менее подвижные отрицательные носители заряда вместе с захваченными дырками создают объемный заряд. О дырочном типе фотопроводимости исследуемых ППК свидетельствуют результаты измерений зависимости $V_p(t)$ для разной полярности зарядки свободной поверхности в коронном разряде (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Результаты измерений фотопроводящих и фотовольтаических свойств в образцах с пленками ППК с K1, K2, K3, K4

ППК	$t_{1/2}(+)$, с	$t_{1/2}(-)$, с	V_{PH}^{max} , мВ
СНМ + 30 мас.% K1	0.5	2.0	125
ПЭПК + 30 мас.% K1	0.1	1.0	125
СНМ + 30 мас.% K2	6.0	9.0	85
СНМ + 30 мас.% K3	8.0	20.0	88
ПЭПК + 30 мас.% K3	30.0	45.0	20
СНМ + 30 мас.% K4	45.0	80.0	20
ПЭПК + 30 мас.% K4	50.0	80.0	15

Для всех образцов $t_{1/2}(-) < t_{1/2}(+)$ их соотношение составляет 2—8. 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 зарядовых пар является причиной разрядки заряженной свободной поверхности ППК. Чем больше концентрация зарядовых пар, тем больше свободных носителей заряда и быстрее происходит эта разрядка. С разной концентрацией фотогенерированных и диссоциирующих зарядовых пар можно также связать различие $t_{1/2}(-)$ и $t_{1/2}(+)$ в ряду исследуемых ППК. Последнее может быть обусловлено ростом концентрации зарядовых пар, которые диссоциируют во внешнем электрическом поле, для рассматриваемого ряда ППК.

Известно [13—17], что в неупорядоченных органических полупроводниках, к которым можно отнести исследуемые ППК, механизм фотогенерации носителей заряда состоит из двух стадий: образование зарядовых пар и диссоциация зарядовых пар на свободные носители заряда. Отметим, что такой механизм описывает и фотопроводящие свойства ППК с частицами металлокомплексов при их возбуждении светом в области $d-d$ -переходов металлических центров [15]). Причем в отличие от кристаллических полупроводников время жизни зарядовых пар до их диссоциации может быть достаточно большим ($>10^{-7}$ с [16, 17]). Эффективность фотогенерации носителей заряда существенно зависит от спинового состояния (мультиплетности) зарядовых пар на первой стадии фотогенерации. В диссоциации принимают участие в основном те носители заряда, которые “выжили” и не рекомбинировали в центрах фотогенерации, из которых они образованы. Известно [16—19], что такие носители образуются в основном из триплетных зарядовых пар. Кроме того [19—21], на мультиплетность

зарядовых пар при их образовании или за время их жизни до диссоциации оказывают влияние высокоспиновые центры или магнитные ионы подобно тому, как на спиновую конверсию влияют специально введенные спиновые катализаторы. Такое влияние третьей частицы на мультиплетность электрона и дырки в зарядовой паре связывается или с механизмом из-за сверхтонкого взаимодействия (СТВ-механизм), или с Δg -механизмом изменения мультиплетности [19—21]. Как правило, результатом влияния рассматриваемой третьей частицы является изменение мультиплетности зарядовых пар в сторону увеличения отношения триплетных и синглетных зарядовых пар и, как следствие, увеличение эффективности фотогенерации свободных носителей заряда.

Если зарядовая пара содержит хотя бы одну парамагнитную частицу (в нашем случае это дырка — катион-радикал карбазола) и время жизни зарядовых пар достаточно большое (большое время геминальной рекомбинации), то кинетику образования и релаксации таких зарядовых пар можно проследить методом ЭПР. Такие исследования ранее [16] были проведены в ППК на основе карбазолсодержащих олигомеров с сенсибилизатором СВПЗ1 и родственными соединениями и установлена корреляция с результатами, полученными с использованием других методик. Следует ожидать, что по изменению интенсивности фотосигнала ЭПР в различных ППК можно оценить эффективность образования зарядовых пар в них. Поэтому проведены исследования кинетики образования и релаксации зарядовых пар без влияния внешнего электрического поля на эти процессы в ППК с использованием метода ЭПР (рис. 2 и 3).

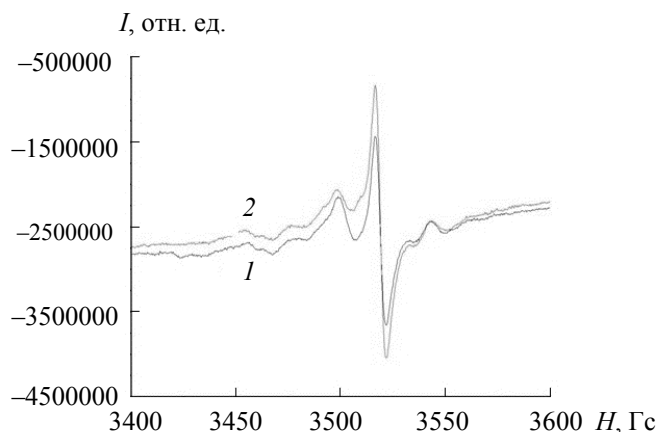


Рис. 2. Спектр ЭПР в образце ПЭПК + 30 мас.% К1, результаты измерения сигнала спектрометром X-диапазона (9 ГГц) Bruker Elexsys E580 FT/CW до облучения (1) и после облучения (2)

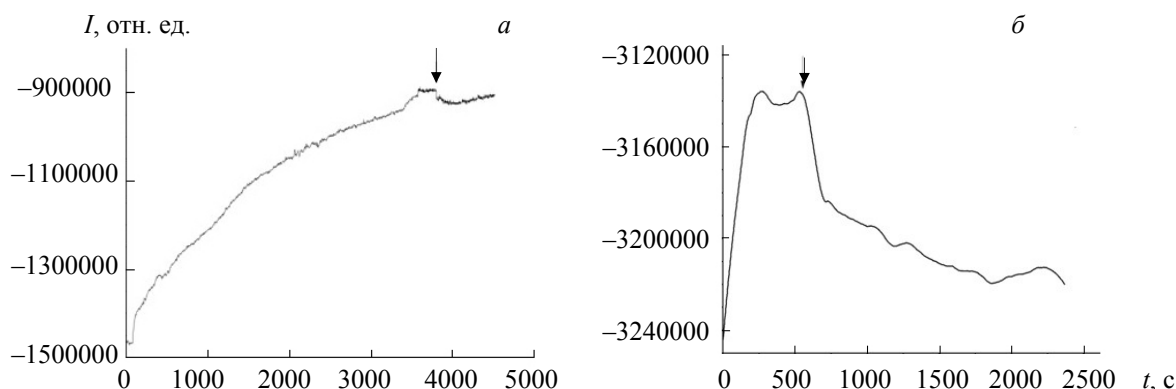


Рис. 3. Кинетика нарастания сигнала ЭПР в процессе облучения и спада сигнала после завершения (вертикальная стрелка) облучения в образцах ПЭПК+30 мас.% К1 (а) и ПЭПК+30 мас.% К3 (б); результаты измерения спектрометром X-диапазона (9 ГГц) Bruker Elexsys E580 FT/CW

В образцах с пленками ПЭПК без специально введенных добавок, нанесенными на тефлоновые подложки, обнаружен сигнал ЭПР, спектр которого подобен спектру ЭПР на рис. 2. Это согласуется с представлениями [14, 16] о том, что при комнатной температуре возможна термогенерация дырок (катион-радикалов карбазола) в пленках ПЭПК и широко известного аналога поли-N-винилкарбазола. Поэтому эти полимеры обладают дырочным типом проводимости. Следовательно, спектр ЭПР на рис. 2 можно отнести к катион-радикалам карбазола.

Для исследуемых образцов при облучении обнаружены изменения спектра ЭПР (рис. 2). До облучения наблюдается широкий структурированный спектр в диапазоне магнитного поля $H = 3350$ — 3550 Гс, но при облучении интенсивность сигнала ЭПР уменьшается в диапазоне 3350 — 3475 Гс и увеличивается в диапазоне 3475 — 3550 Гс. Поэтому можно считать, что спектр ЭПР образцов является суперпозицией спектра ЭПР радикалов K1—K4 и карбазола. При облучении в образцах уменьшается количество парамагнитных частиц одного типа с большим g -фактором ($H \sim 3350$ — 3550 Гс) и одновременно увеличивается количество парамагнитных частиц другого типа с меньшим g -фактором ($H \sim 3350$ — 3475 Гс).

Заключение. Фотовольтаический эффект в исследуемых полупроводящих полимерных композитах определяется фотогенерацией зарядовых пар, диссоциацией этих зарядовых пар и переносом свободных носителей заряда по молекулам K1—K4 и/или карбазольным фрагментам поли-N-эпоксипропилкарбазола. Такой же эффект обнаружен в полупроводящем полимерном композите с добавками дитиолената никеля [22]. Можно считать, что центрами фотогенерации и транспортными центрами являются комплексы K1—K4. При наличии металлокомплексов K1—K4 в составе полупроводящего полимерного композита на основе поли-N-эпоксипропилкарбазола увеличивается эффективность фотогенерации зарядовых пар и свободных носителей заряда, что является причиной возрастания фотовольтаического отклика. Полученные результаты указывают на возможность расширения множества органических материалов для фотовольтаики за счет создания многофункциональных композитов, в которые входят комплексы на основе карбациламинофосфатных лигандных систем.

- [1] **M. Konrad.** Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice, Wiley (2014)
- [2] **O. Malinkiewicz, T. Grancha, A. A. Molina-Ontoria, A. Soriano, H. Brine, H.J. Bolink.** Adv. Energy Mater., **3** (2013) 472—477
- [3] **F. A. Castro, H. Benmansour, J.-E. Moser, C. F. O. Graeff, F. Nüesch, R. Hany.** Phys. Chem. Chem. Phys., **11** (2009) 8886—8894
- [4] **A. W. Hains, Z. Liang, M. A. Woodhouse, B. A. Gregg.** J. Chem. Rev., **110**, N 11 (2010) 6689—6735
- [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. 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.** 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.** Chem Rev., **86**, N 2 (2017) 99—112]
- [8] **E. A. Trush, V. A. Ovchynnikov, K. V. Domasevitch.** Z. Naturforsch., **57b** (2002) 746—750
- [9] **K. E. Gubina, O. A. Maslov, E. A. Trush, V. A. Trush, V. A. Ovchynnikov, S. V. Shishkina, V. M. Amirkhanov.** Polyhedron., **28** (2009) 2661—2666
- [10] **K. E. Gubina, V. A. Ovchynnikov, V. M. Amirkhanov, H. Fischerb, R. Stumpf, V. V. Skopenko.** Z. Naturforsch., **55b** (2000) 576—582
- [11] **V. Amirkhanov, V. Ovchynnikov, V. Trush, P. Gawryszewska, L. B. Jerzykiewicz.** In: Ligands synthethis, Characterisation and Role in Biotechnology, Eds. P. Gawryszewska, P. Smolenski, Nova Science Publishers, New York (2014) 199—248
- [12] **С. М. Рыбкин.** Фотоэлектрические явления в полупроводниках, Москва, Физматгиз (1963)
- [13] **W. Brutting.** Physics of Organic Semiconductors. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2012)
- [14] **M. Pope, C. E. Swenberg.** Electronic Processes in Organic Crystals, Clarendon Press, Oxford (1982)
- [15] **Н. А. Давиденко, В. Н. Козозей.** Теор. и exper. химия, **53**, № 2 (2017) 69—87 [**N. A. Davidenko, V. N. Kozozay.** Theor. Exp. Chem., **53**, N 2 (2017) 1—24]

-
- [16] **Н. Г. Кувшинский, Н. А. Давиденко, В. М. Комко.** Физика аморфных молекулярных полупроводников, Киев, Лыбидь (1994)
- [17] **Н. А. Давиденко, А. А. Ищенко.** Теор. и exper. химия, **38**, № 2 (2002) 84—102 [**N. A. Davidenko, A. A. Ishchenko.** Theor. Exp. Chem., **38**, N 2 (2002) 88—108]
- [18] **Н. А. Давиденко, Н. Г. Кувшинский.** ФТТ, **39**, № 6 (1997) 1020—1023 [**N. A. Davidenko, N. G. Kuvshinskii.** Phys. Solid State, **39**, N 6 (1997) 916—919]
- [19] **N. A. Davidenko, A. A. Ishchenko.** Chem. Phys., **247** (1999) 237—243
- [20] **A. L. Buchachenko, V. L. Berdinsky.** J. Phys. Chem., **100**, N 47 (1996) 18292—18299
- [21] **Я. Б. Зельдович, А. Л. Бучаченко, Е. Л. Франкевич.** УФН, **155**, № 1 (1988) 3—45 [**Ya. B. Zel'dovich, A. L. Buchachenko, E. L. Frankevich.** Sov. Phys. Usp., **31** (1988) 385—408]
- [22] **A. Kukhta, N. Davidenko, I. Davidenko, E. Mokrinskaya, N. Chuprina, L. Tonkopieva.** Int. J. Nanoscience (World Scientific Publishing Company), **18**, N 3-4 (2019) 1940086