

Влияние одноосного сжатия на ловушки экситонов и носителей заряда в пленках поли(9-винилкарбазола)

© Ю.А. Скрышевский

Институт физики НАН Украины,
Киев, Украина

E-mail: skrysh@iop.kiev.ua

(Поступила в Редакцию 8 июля 2013 г.)

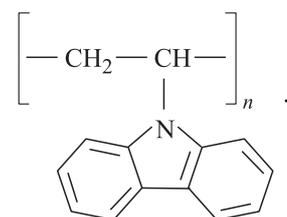
В интервале температур 5–295 К исследовано влияние одноосного давления $1 \cdot 10^8$ Па на спектры фотолюминесценции и кривые термостимулированной люминесценции пленок поли(9-винилкарбазола). Для сравнения измерена кривая термостимулированной люминесценции кристаллического карбазола. Высокотемпературные крылья кривых термостимулированной люминесценции аппроксимированы функцией Гаусса, полуширина которой характеризует величину разупорядочения энергетических состояний глубоких структурных ловушек. Сделан вывод, что давление ингибирует конформационные изменения полимерных цепей поли(9-винилкарбазола), приводящие к формированию сэндвич-экимеров, и упорядочивает пространственное расположение боковых карбазолильных групп, в результате чего увеличивается концентрация „экимерообразующих“ центров, а величина разупорядочения энергетических состояний глубоких структурных ловушек носителей заряда уменьшается почти вдвое и не изменяется после сброса давления.

1. Введение

Фотопроводящие растворимые пленкообразующие полимеры представляют значительный интерес для практического применения в качестве основы активных слоев светоизлучающих диодов [1–4], цветных дисплеев [5,6], фотовольтаических элементов [7], полевых транзисторов [8,9], фоторецепторов для ксерографии [10] и т.д. Это связано с возможностью нанесения слоев непосредственно из растворов — путем полива, а также высокотехнологическими методами струйной [11] и трафаретной [5] печати, что значительно снижает стоимость изделий по сравнению с использованием органических соединений низкой молекулярной массы, которые наносят вакуумным напылением.

Активный слой светоизлучающих диодов, дисплеев и фотовольтаических элементов расположен между двумя электродами, которые его сдавливают. В работе [12] показано, что небольшое одноосное давление, возникающее при накрывании пленки поли(9,9-ди(этилгексил)флуорена) сразу после нанесения из раствора второй подложкой из плавленого кварца, ведет к почти двукратному увеличению квантовых выходов быстрой и замедленной флуоресценции. Слои полимеров на гибких подложках также могут испытывать механические деформации, и возникающие при этом напряжения могут существенно изменить их физические характеристики. Например, гидростатическое давление $P = 1 \cdot 10^8$ Па уменьшает до 1.5 раз величину подвижности дырок в пленках поликарбоната, допированного пиразолинами [13], а при давлении $P \geq 4 \cdot 10^8$ Па изменяется конформация основной цепи σ -сопряженных молекул симметричных поли(ди-*n*-алкилсиланов) [14]. Еще более высокие давления приводят к планаризации π -сопряженных молекул, таких как олигофенилы [15] и полифлуорены [16,17], вследствие чего спектры их флуоресценции батохромно смещаются и уширяются.

В качестве основы полимерных светоизлучающих диодов и полевых транзисторов часто используют пленки поли(9-винилкарбазола) (PVK), в которые введены люминесцирующие примеси [1–4] и наночастицы металла [9]. При этом люминесценция примеси возбуждается либо в результате переноса энергии экситона, сформированного в основе, либо при рекомбинации захваченных дырок с электронами, которые инжектировались с электродов, а введение наночастиц металла вызывает резкое увеличение подвижности носителей заряда. Установлено [18], что в PVK с переносом энергии на примесь конкурирует процесс автолокализации синглетных экситонов на глубоких структурных ловушках — так называемых „экимерообразующих“ центрах — и образования сэндвич-экимеров. Кроме того, ловушки существенно влияют на величину подвижности носителей заряда [19]. В связи с этим представляет интерес изучить влияние давления на формирование ловушек экситонов и носителей заряда структурного происхождения в пленках PVK. С этой целью в настоящей работе в интервале температур $T = 5–295$ К исследованы спектры фотолюминесценции и кривые термостимулированной люминесценции (TSL) пленок PVK под одноосным давлением $1 \cdot 10^8$ Па, величина которого близка к разрушающему напряжению при сжатии технических пластмасс. Для сравнения измерена кривая TSL кристаллического карбазола. Структурная формула PVK имеет следующий вид:



2. Методика эксперимента

Препараты PVK и карбазола предоставлены компанией Sigma-Aldrich (США). Карбазол дополнительно очищали зонной плавкой, кристаллы выращивали из расплава методом Бриджмена. Полимер PVK растворяли в тетрагидрофуране (концентрация в растворе 10–20 wt.%). Пленки толщиной 10–20 μm были нанесены поливом на подложки из нержавеющей стали и высушены при комнатной температуре. Для создания высокого давления была изготовлена специальная ячейка, которая состояла из двух стальных пластин толщиной 2.5 mm, стянутых двумя винтами. Верхняя пластина имела отверстие диаметром 5 mm, за которым находилось окно из кристаллического сапфира толщиной 6 mm. Образец помещался между нижней пластиной и сапфировым окном. Ячейка с образцом, датчиком температуры и нагревателем закреплялась на манипуляторе и опускалась в рабочую камеру оптического жидкостно-проточного гелиевого криостата. Температура измерялась дифференциальной термопарой медь–константан. Перед измерениями образцы выдерживались 20–30 min в парах гелия при нормальном давлении и комнатной температуре. За это время абсорбированный кислород, который сильно тушит люминесценцию органических соединений [20], вытеснялся гелием.

Фотолюминесценция возбуждалась излучением ртутной лампы высокого давления ДРШ-250-3 через фильтр, составленный из стандартных стекол для выделения группы линий в области длин волн $\lambda_{\text{exc}} = 313 \text{ nm}$. Спектры регистрировались на спектрометре СДЛ-1. Абсолютная величина приложенного давления определялась при комнатной температуре по сдвигу линии люминесценции кристалла рубина $R_1 = 694.2 \text{ nm}$ [21].

Для возбуждения TSL образцы облучались при $T = 5 \text{ K}$ светом ртутной лампы в области $\lambda_{\text{exc}} = 270\text{--}380 \text{ nm}$ через фильтр УФС2 в течение 30 s, выдерживались в темноте при этой же температуре до затухания изотермической рекомбинационной люминесценции, а затем нагревались с постоянной скоростью $0.1 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$. Интегральный сигнал TSL регистрировался на автоматизированной установке с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-106, работавшего в режиме счета фотонов. Для определения энергии активации ловушек носителей заряда непрерывный нагрев образца модулировался небольшими осцилляциями температуры. Значение энергии активации E_a в каждом цикле нагрева определялось по формуле

$$E_a(T) = -d[\ln I_{\text{TSL}}(T)]/d(1/kT), \quad (1)$$

где $I_{\text{TSL}}(T)$ — интенсивность TSL, k — постоянная Больцмана.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Спектры фотолюминесценции пленок PVK. На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции исходной свежеприготовленной пленки PVK и пленки под одноосным давлением $1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$, измеренные

в интервале $T = 5\text{--}270 \text{ K}$. При $T = 5 \text{ K}$ спектр исходной пленки состоит из широкой полосы флуоресценции с $\lambda_{\text{max}} \approx 375 \text{ nm}$ и узких полос фосфоресценции с началом при $\lambda_{\text{max}} = 424 \text{ nm}$ (кривая 1 на рис. 1, a). Полоса флуоресценции принадлежит излучению ловушек структурного происхождения, образованных двумя параллельными карбазолильными группами, в которых перекрывается только пара фенильных колец. Это так называемый второй эксимер. Спектр фосфоресценции связан с высвечиванием мономерных карбазолильных групп. При нагревании в интервале 5–270 K структура в спектре фосфоресценции исчезает, интенсивность полосы второго эксимера падает, ее максимум смещается приблизительно к 390 nm и разгорается полоса флуоресценции сэндвич-эксимеров с $\lambda_{\text{max}} \approx 410 \text{ nm}$ (кривые 2–4 на рис. 1, a). Нами установлено, что после приложения одноосного давления $1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ спектры фотолюминесценции практически совпадают со спектрами исходной пленки, измеренными при $T = 5\text{--}100 \text{ K}$ (кривые 1 и 2 на рис. 1, a, b). Однако при $T \geq 200 \text{ K}$, когда разгорается полоса сэндвич-эксимеров, ее интенсивность относительно полосы второго эксимера становится заметно меньшей,

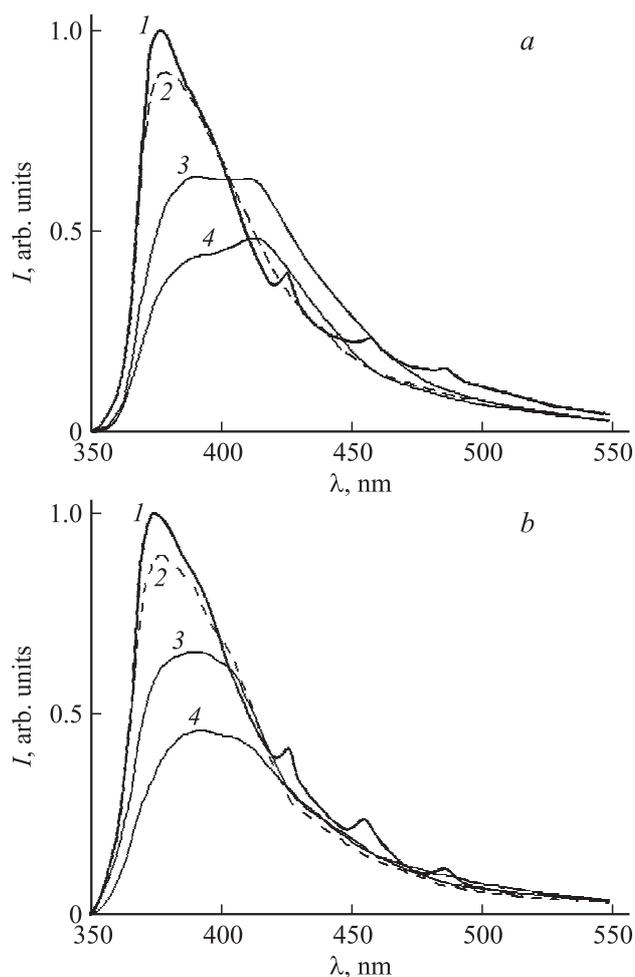


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции ($\lambda_{\text{exc}} = 313 \text{ nm}$) исходной пленки PVK (a) и пленки под одноосным давлением $1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ (b) при $T = 5$ (1), 100 (2), 200 (3) и 270 K (4).

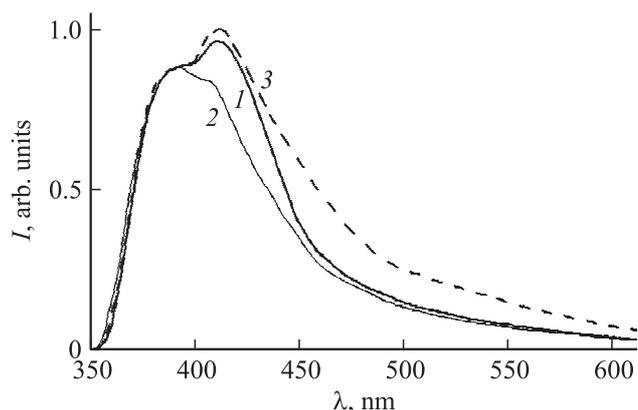


Рис. 2. Нормированные спектры фотолуминесценции ($\lambda_{\text{exc}} = 313 \text{ nm}$, $T = 295 \text{ K}$) исходной пленки PVK (1), при приложении одноосного давления $1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ (2) и после сброса давления (3).

чем в исходной пленке PVK при той же температуре (кривые 3 и 4 на рис. 1, *a, b*).

На рис. 2 приведены спектры фотолуминесценции пленки PVK, измеренные при комнатной температуре до приложения давления, при приложении давления и после его сброса, нормированные на интенсивность полосы второго эксимера. Видно, что при приложении одноосного давления $1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ относительная интенсивность полосы сэндвич-эксимеров уменьшается (кривые 1 и 2). Тем не менее после сброса давления относительная интенсивность этой полосы становится больше, чем в исходной пленке (кривая 3).

Приведенные результаты можно объяснить следующим образом. Известно, что в полимерах с неупорядоченным строением основной цепи и хаотическим расположением боковых карбазолильных групп, например в поли(9-эпоксипропилкарбазоле), эксимерная флуоресценция отсутствует [22]. В макромолекуле PVK карбазолильные группы присоединены к каждому второму атому углерода полимерной цепи, и их последовательное расположение способствует образованию большой концентрации структурных дефектов, выступающих в качестве ловушек экситонов. В работе [23] при использовании пикосекундного импульсного радиолитического с разрешением 10 ps установлено, что после возбуждения пленки PVK импульсом электронов длительностью 10 ps происходит быстрая миграция экситонов вдоль полимерной цепи или с одной цепи на другую и сразу появляется полоса второго эксимера. В свою очередь полоса сэндвич-эксимеров разгорается в течение нескольких наносекунд. Сначала экситоны захватываются в так называемые „эксимерообразующие“ центры, концентрация которых составляет примерно один на тысячу карбазолильных групп [20]. Затем экситоны автолокализуются путем изменений во взаимном расположении возбужденной и соседней (находящейся в основном состоянии) карбазолильных групп, которые приводят к перекрытию их π -электронных систем. Таким образом, поскольку

ловушечные центры с необходимым для образования второго эксимера расположением карбазолильных групп существуют в полимере заранее, соответствующая им полоса наблюдается в спектре фотолуминесценции даже при $T = 5 \text{ K}$ (кривая 1 на рис. 1, *a*). В то же время для конформационных изменений полимерных цепей, приводящих к формированию сэндвич-эксимеров, необходима энергия активации [24]. Поэтому полоса сэндвич-эксимеров появляется при значительно более высоких температурах и ее интенсивность растет при нагревании (кривые 3 и 4 на рис. 1, *a*).

При комнатной температуре PVK находится в стеклообразном состоянии, и сильное межмолекулярное взаимодействие затрудняет конформационные изменения полимерных цепей при фотовозбуждении. Однако эти изменения облегчает наличие в твердой фазе полимера микрополостей свободного объема, которые в данном случае являются аналогом пористости в кристаллических твердых телах. По таким микрополостям, в частности, происходит диффузия газов в полимерах [25]. При приложении давления микрополости частично залечиваются, а межмолекулярное взаимодействие усиливается и ингибирует конформационные изменения цепей подобно тому как это происходит при понижении температуры. Поэтому в пленке под давлением интенсивность полосы сэндвич-эксимеров ниже, чем в исходной пленке при той же температуре (кривые 1 и 2 на рис. 2). После сброса давления в пленке остаются многочисленные трещины, на границах которых межмолекулярное взаимодействие ослабевает, конформационные изменения облегчаются, и интенсивность полосы сэндвич-эксимеров возрастает (кривые 2 и 3 на рис. 2). Поскольку интенсивность этой полосы становится больше, чем в исходной пленке, можно предположить, что под действием давления пространственное расположение боковых карбазолильных групп на отдельных участках полимерной цепи стало более упорядоченным и сохранилось после сброса давления, в результате чего возросла концентрация „эксимерообразующих“ центров. В пользу этого предположения свидетельствует тот факт, что в жидком растворе PVK сэндвич-эксимеры образуются главным образом на тех участках макромолекулы, которые имеют изотактическую конформацию [26].

3.2. Термостимулированная люминесценция пленок PVK. После прекращения фотовозбуждения в полосе первого электронного перехода при $T = 5 \text{ K}$ в пленке PVK и кристалле карбазола появляется изотермическая люминесценция, интенсивность которой затухает по гиперболическому закону. При последующем нагреве образцов наблюдается TSL, сигнал которой состоит из двух широких полос. Максимум низкотемпературной полосы расположен вблизи 30–35 K, а максимум высокотемпературной — при 110 и 95 K для PVK и карбазола соответственно (рис. 3). Подобные кривые приводились в предыдущих работах [27–29]. При приложении к пленке PVK одноосного давления $1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ заметного сдвига положения максимумов полос TSL не происходит, однако форма кривой TSL существенно изменяется: ее высокотемпературное крыло

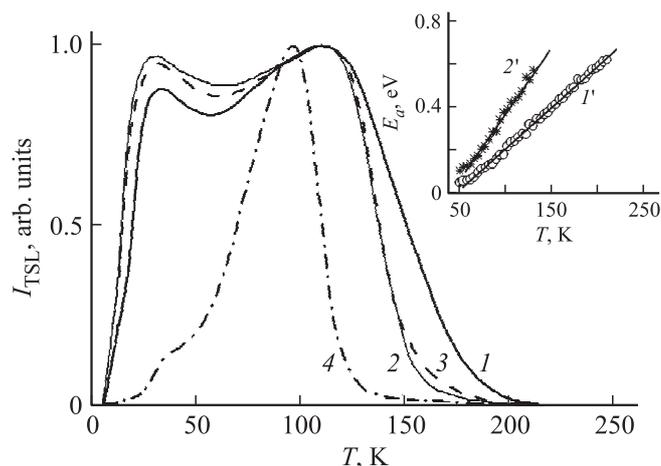


Рис. 3. Нормированные кривые TSL исходной пленки PVK (1), при приложении одноосного давления $1 \cdot 10^8$ Па (2), после сброса давления (3) и кристалла карбазола (4). На вставке — зависимости $E_a(T)$ для пленки PVK (1') и кристалла карбазола (2').

с повышением температуры спадает более круто, чем в исходной пленке, а интенсивность низкотемпературной полосы увеличивается. После сброса давления форма кривой TSL практически не изменяется (кривые 1–3 на рис. 3).

На вставке к рис. 3 приведены зависимости энергии активации ловушек от температуры. Видно, что при нагревании в интервале 65–210 К для PVK и 65–130 К для карбазола энергии активации увеличиваются по линейному закону и могут быть описаны эмпирическими формулами (в электрон-вольтах)

$$E_a(T) = 0.0040T - 0.20, \quad (2)$$

$$E_a(T) = 0.0062T - 0.25 \quad (3)$$

для пленки и кристалла соответственно.

Известно [20], что при поглощении света в полосе первого электронного перехода в пленке PVK происходит генерация геминальных электронно-дырочных пар. Предполагается, что она протекает через формирование эксиплексов при взаимодействии экситонов с продуктами окисления карбазолильных групп, которые всегда присутствуют в полимере и обладают акцепторными свойствами. Можно предположить, что подобный процесс имеет место и в кристалле карбазола. При приложении электрического поля геминальные электронно-дырочные пары могут частично диссоциировать, причем подвижными являются только дырки. В отсутствие внешнего электрического поля возникшие геминальные электронно-дырочные пары рекомбинируют, однако при низких температурах часть дырок может захватываться на ловушки. Излучательная рекомбинация пар носителей заряда после прекращения фотовозбуждения приводит к появлению изотермической и термостимулированной люминесценции. Изотермическая люминесценция возникает при рекомбинации близких пар.

Пары, характеризующиеся относительно большим расстоянием между электроном и дыркой и избежавшие рекомбинации при низкой температуре, рекомбинируют при нагреве образца после термического высвобождения захваченных дырок, что приводит к появлению TSL.

Поскольку полимеры имеют неупорядоченную структуру, расстояния между хромофорными группами и их взаимные ориентации флуктуируют. Это вызывает флуктуации энергии электронной поляризации и приводит к тому, что состояния носителей заряда имеют распределение по энергиям [30]. В результате в чистых полимерах, которые не содержат примесей с низкими потенциалами ионизации, ловушками для дырок служат те хромофорные группы, на которых локализованы „хвостовые“ энергетические состояния, т.е. хромофорные группы с более низкими потенциалами ионизации.

В молекулярных кристаллах, образованных нецентрално-симметричными молекулами, могут существовать ориентационные дефекты структуры. Например, в кристалле дибензофурана около 9% молекул переориентированы на 180° по сравнению с нормальным положением в решетке. При концентрациях, превышающих 1%, переориентированные молекулы образуют агрегаты типа „димеров“, „тримеров“ и т.д. [31,32]. Можно предположить, что в кристалле карбазола также присутствуют ориентационные дефекты структуры, поскольку молекулы дибензофурана и карбазола имеют подобное строение. В результате электростатического взаимодействия дырки с постоянными дипольными моментами переориентированных молекул в окрестности ориентационных дефектов структуры возникают ловушки, существование которых предсказано теоретически и обнаружено экспериментально в кристаллах карбазола [27,28]. Было показано, что глубина ловушки увеличивается при переходе от ориентационного дефекта, образованного одиночной молекулой, к агрегатам и зависит от структуры агрегатов, т.е. ловушки имеют распределение по энергиям.

Поскольку флуктуации являются случайной величиной, в аналитической модели TSL в неупорядоченных средах, разработанной в [33], предполагается, что распределение плотности энергетических состояний для носителей заряда в неупорядоченных органических материалах описывается функцией Гаусса. Наличие двух полос на кривых TSL характерно для многих неупорядоченных материалов, в частности полимеров, и высокотемпературная полоса связана с существованием глубоких ловушек. В этом случае форма кривой TSL может быть аппроксимирована суперпозицией двух функций Гаусса.

Поскольку форма высокотемпературной полосы TSL пленки PVK изменяется при механическом воздействии, можно заключить, что глубокие ловушки носителей заряда связаны с дефектами структуры. С использованием эмпирических зависимостей (2) и (3) высокотемпературные крылья кривых TSL, приведенных на рис. 3, были перестроены в координатах зависимости интенсивности от энергии активации ловушек, а их форма аппроксими-

рована функцией Гаусса

$$I_{\text{TSL}}(E_a) \sim \exp[-(E_{\text{max}} - E_a)^2 / (2\sigma^2)] + C. \quad (4)$$

Здесь E_{max} — энергия активации в максимуме высоко-температурной полосы TSL, σ — полуширина функции Гаусса, C — константа. Результаты такой аппроксимации: $\sigma = 0.29, 0.16$ и 0.15 eV для исходной пленки PVK, для пленки при приложении (после сброса) одноосного давления $1 \cdot 10^8$ Pa и для кристалла карбазола соответственно. Из приведенных данных видно, что параметр σ , который характеризует величину разупорядочения энергетических состояний глубоких структурных ловушек носителей заряда, при приложении к пленке PVK одноосного давления $1 \cdot 10^8$ Pa уменьшается почти в 2 раза и не изменяется после сброса давления. При этом значения σ для пленки PVK и кристалла карбазола почти совпадают. Это свидетельствует о том, что в результате одноосного сжатия полимера пространственное расположение боковых карбазолильных групп становится более упорядоченным. Следует отметить, что величина σ для пленки PVK после приложения одноосного давления $1 \cdot 10^8$ Pa близка к значению $\sigma = 0.14$ eV, полученному из анализа данных по подвижности носителей заряда в тонких пленках PVK, допированных тринитрофлуореном [10] (стр. 467).

4. Заключение

Обнаружено, что при приложении одноосного давления $1 \cdot 10^8$ Pa интенсивность полосы флуоресценции сандвич-эксимеров PVK меньше, а после сброса давления больше, чем в исходной пленке. Анализ результатов по термостимулированной люминесценции показал, что при приложении к пленке PVK одноосного давления $1 \cdot 10^8$ Pa величина разупорядочения энергетических состояний глубоких структурных ловушек носителей заряда уменьшается почти вдвое, не изменяется после того, как давление сброшено, и практически совпадает с величиной разупорядочения энергетических состояний ловушек в окрестности ориентационных дефектов структуры кристалла карбазола. Сделан вывод, что давление затрудняет конформационные изменения полимерных цепей, которые ведут к формированию сандвич-эксимеров, подобно тому как это происходит при понижении температуры. Вместе с тем под давлением пространственное расположение боковых карбазолильных групп PVK становится более упорядоченным и сохраняется после того, как давление сброшено, в результате чего увеличивается концентрация „эксимерообразующих“ центров.

Список литературы

- [1] Y.-Y. Noh, C.-L. Lee, J.-J. Kim, K. Yase. *J. Chem. Phys.* **118**, 6, 2853 (2003).
- [2] B.C. Krummacher, V.-E. Choong, M.K. Mathai, S.A. Choulis, F. So, F. Jermann, T. Fiedler, M. Zachau. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 11, 113 506 (2006).
- [3] A. Tang, F. Teng, S. Xiong, Y. Hou. *Appl. Surf. Sci.* **254**, 7, 2043 (2008).
- [4] А.Н. Алешин, А.Д. Соколовская, И.П. Щербаков, П.Н. Брунков, В.П. Улин. *ФТТ* **55**, 3, 617 (2013).
- [5] J. Birnstock, J. Blassing, A. Hunze, M. Scheffel, M. Stossel, K. Heuser, G. Wittmann, J. Worle, A. Winnacker. *Appl. Phys. Lett.* **78**, 24, 3905 (2001).
- [6] P.L. Burn, S.-C. Lo, I.D.W. Samuel. *Adv. Mater.* **19**, 13, 1675 (2007).
- [7] C. Brabec, V. Dyakonov, U. Scherf. *Organic photovoltaics — materials, device physics, and manufacturing technologies*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2008). 597 p.
- [8] H. Sirringhaus. *Adv. Mater.* **17**, 20, 2411 (2005).
- [9] А.Н. Алешин, И.П. Щербаков, Ф.С. Федичкин. *ФТТ* **54**, 8, 1586 (2012).
- [10] P.M. Borsenberger, D.S. Weiss. *Organic photoreceptors for xerography*. Marcel Dekker Inc., N.Y. (1998). 768 p.
- [11] M. Singh, H.M. Haverinen, P. Dhagat, G.E. Jabbour. *Adv. Mater.* **22**, 6, 673 (2010).
- [12] C. Rothe, S.I. Hintschich, L.-O. Palsson, A.P. Monkman, R. Guentner, U. Scherf. *Chem. Phys. Lett.* **360**, 1–2, 111 (2002).
- [13] S. Tsubakihara, S. Shichijyo, S. Taki, K. Matsushige, T. Takemura. *Jpn. J. Appl. Phys.* **25**, 10, 1614 (1986).
- [14] K. Song, R.D. Miller, G.M. Wallraff, J.F. Rabolt. *Macromolecules* **24**, 14, 4084 (1991).
- [15] S. Guha, W. Graupner, R. Resel, M. Chandrasekhar, H.R. Chandrasekhar, R. Glaser, G. Leising. *Phys. Rev. Lett.* **82**, 18, 3625 (1999).
- [16] J.P. Schmidtke, J.-S. Kim, J. Gierschner, C. Silva, R.H. Friend. *Phys. Rev. Lett.* **99**, 16, 167 401 (2007).
- [17] S. Guha, M. Chandrasekhar, U. Scherf. *Phys. Status Solidi B* **248**, 5, 1083 (2011).
- [18] Ю.А. Скрышевский. *ЖПС* **80**, 2, 171 (2013).
- [19] I.I. Fishchuk, A.K. Kadashchuk, H. Bassler, D.S. Weiss. *Phys. Rev. B* **66**, 20, 205 208 (2002).
- [20] М. Поуп, Ч. Свенберг. *Электронные процессы в органических кристаллах*. Мир, М. (1985). Т. 2. 464 с.
- [21] G.J. Piermarini. In: *Static compression of energetic materials / Eds S.M. Peiris, G.J. Piermarini*. Springer-Verlag, Berlin (2008). P. 24.
- [22] Ю.П. Пирятинский, В.Н. Ящук, Ю.А. Черкасов, Ю.Н. Кирпач, Е.Л. Александрова. *ЖПС* **53**, 1, 41 (1990).
- [23] S. Tagawa, M. Washio, J. Tabata. *Chem. Phys. Lett.*, **68**, 2–3, 276 (1979).
- [24] G. Giro, P.G. Di Marco, M. Pizzoli, G. Ceccorulli. *Chem. Phys. Lett.*, **150**, 1, 159 (1988).
- [25] С.А. Рейтлингер. *Проницаемость полимерных материалов*. Химия, М. (1974). 272 с.
- [26] C.F. Chen, Q. Su, Y.M. Chen, F. Xi. *Chin. Chem. Lett.* **10**, 1, 59 (1999).
- [27] A.K. Kadashchuk, N.I. Ostapenko, Yu.A. Skryshevski, V.I. Sugakov, M.T. Shpak. *УФЖ* **44**, 1–2, 230 (1999).
- [28] A. Kadashchuk, N. Ostapenko, S. Izvekov, Yu. Skryshevski, V. Sugakov. *J. Luminescence* **85**, 1–3, 113 (1999).
- [29] Ю.А. Скрышевский, А.Ю. Вахнин. *ФТТ* **49**, 5, 842 (2007).
- [30] H. Bassler. In: *Disorder effects on relaxational processes / Eds R. Richert, A. Blumen*. Springer-Verlag, Berlin (1994). P. 485–507.
- [31] W.G. Reppart, J.C. Galucci, A.P. Lundstedt, R.E. Gerkin. *Acta Cryst. C* **40**, 9, 1572 (1984).
- [32] U. Fischer, C. von Borczkowski, N. Schwentner. *Phys. Rev. B* **41**, 13, 9126 (1990).
- [33] A. Kadashchuk, Yu. Skryshevskii, A. Vakhnin, N. Ostapenko, E.V. Emelianova, V.I. Arkhipov, H. Bassler. *Phys. Rev. B* **63**, 11, 115 205 (2001).