

Структурные дефекты в карбазолилсодержащих полимерах с примесями полиметиновых красителей

© Ю.А. Скрышевский, А.К. Кадашук, Н.И. Остапенко

Институт физики Академии наук Украины,
03650 Киев, Украина

E-mail: Kadash@iop.kiev.ua

(Поступила в Редакцию 10 ноября 1999 г.)

В интервале температур 5–300 К исследованы спектры фотолюминесценции и кривые термовысвечивания чистых и примесных карбазолилсодержащих полимеров — поливинилкарбазола (PVC) и поли-*N*-эпоксипропилкарбазола (PEPC). В качестве примесей использовались катионные индокарбоцианины с различной длиной (n) полиметиновой цепи: НИС ($n = 1$), НИД ($n = 2$), НИТ ($n = 3$) и скварилиевый краситель НИСq с такой же длиной полиметиновой цепи и строением концевых гетероциклических групп, как и у красителя НИД. Установлено, что сольватация молекул красителей полярными группами полимера сопровождается конформационными изменениями в полимере, которые значительно усиливаются с ростом n , а также при переходе от жесткоцепной макромолекулы PVC к более гибкой PEPC. В результате в примесных пленках PEPC значительно увеличивается концентрация структурных дефектов — эксимерообразующих мест, которые служат ловушками для синглетных экситонов и носителей заряда. Это приводит к появлению в спектрах люминесценции пленок PEPC с НИД и НИТ полосы с максимумом при 460 nm, а с примесью НИСq — при 480 nm, а на кривой термовысвечивания PEPC с НИСq наблюдается дополнительная полоса с максимумом при 275 К.

Работа частично поддержана грантом CRDF#UE1-326.

Широкое использование аморфных органических фотополупроводников в качестве электрофотографических фоторецепторов, оптоэлектронных устройств и сред для оптической записи информации стимулирует исследования процессов транспорта носителей заряда и спектров электронных возбуждений в этих системах [1–4]. В аморфных системах спектры возбужденных состояний молекул и энергетических состояний носителей заряда неоднородно уширены вследствие эффектов энергетического разупорядочения и описываются функцией плотности состояний (DOS). Поэтому многие свойства аморфных фотополупроводников объясняются на основе процессов энергетической релаксации электронных возбуждений или фотогенерированных носителей заряда в системе разупорядоченных энергетических состояний [5,6]. Как было показано нами ранее [7–10], информацию о форме DOS и энергетическом спектре ловушек носителей заряда можно получить при исследованиях термостимулированной люминесценции органического фотополупроводника.

Поскольку карбазолилсодержащие полимеры на основе поливинилкарбазола (PVC) и поли-*N*-эпоксипропилкарбазола (PEPC) поглощают в ближнем УФ-диапазоне, то для их сенсibilизации к видимому и ИК-свету и повышения квантового выхода фотогенерации носителей заряда вводят специальные добавки, которые обычно служат центрами как поглощения, так и фотогенерации. В качестве сенсibilизаторов обычно используют либо акцепторы, образующие с электродонорными карбазолилными группами межмолекулярные комплексы с переносом заряда, либо красители, которые во многих случаях образуют эксиплексы с указанными группами [1,2].

Недавно нами показано [11], что введение в PEPC некоторых красителей приводит к появлению глубоких ловушек носителей заряда, происхождение которых связано с конформационными изменениями в полимере. Данная работа является продолжением исследований процессов структурной реорганизации карбазолилсодержащих полимеров при введении полиметиновых красителей различного строения, а также природы возникающих структурных дефектов и их роли в процессах миграции энергии электронного возбуждения и транспорта носителей заряда. С этой же целью в интервале температур $T = 5–300$ К исследованы спектры фотолюминесценции и кривые термовысвечивания (ТВ) пленок PVC и PEPC с примесями катионных и скварилиевого индокарбоцианинов НИС, НИД, НИТ и НИСq в интервале концентраций $10^{-3} \leq C \leq 2\%$. Структурные формулы исследованных красителей приведены на рис. 1.

1. Методика эксперимента

Полимеры PVC, PEPC и красители очищались пересаживанием их растворов в хлористом метиле или толуоле. Молекулярные веса PVC и PEPC составляли соответственно $M = 10^6$ и 10^3 . Чистые и примесные пленки полимеров толщиной 1–100 μm готовились путем полива их растворов в хлористом метиле или толуоле на подложки из нержавеющей стали (при измерениях кривых ТВ) или кварца (при оптических измерениях).

Для низкотемпературных исследований ($T = 5–300$ К) использовался оптический регулируемый гелиевый криостат с кварцевыми окнами и системой автоматической регулировки температуры. Температура

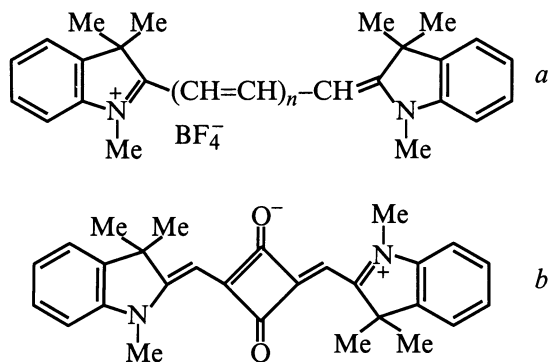


Рис. 1. Структурные формулы: *a* — ионных красителей НИС ($n = 1$), НИСд ($n = 2$), НИСт ($n = 3$) и *b* — скварилиевого красителя НИСк.

образцов измерялась дифференциальной термопарой медь–константан.

Спектры люминесценции ($T = 5\text{--}300\text{ К}$) записывались на спектрометре СДЛ-1. Источником возбуждения служила ртутная лампа ДРШ-250-2 с набором абсорбционных стеклянных светофильтров. Спектры поглощения ($T = 300\text{ К}$) измерялись на спектрально-вычислительном комплексе КСВУ-23.

Для получения кривых ТВ образцы облучались в гелиевом криостате светом ртутной лампы ДРШ-500М в области $\lambda_{\text{exc}} = 365\text{ нм}$ в течение $t = 60\text{ с}$ при $T = 5\text{ К}$, выдерживались в темноте до затухания фосфоресценции и изотермической рекомбинационной люминесценции, а затем нагревались с постоянной скоростью 0.15 К/с . Интегральный сигнал термостимулированной люминесценции измерялся на автоматизированной установке с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-106, работающего в режиме счета фотонов. Для определения энергетического спектра ловушек носителей заряда использовался метод частичного термовысвечивания, который представляет собой температурную модуляцию линейного нагрева образца [12].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Спектры люминесценции чистых полимерных пленок PVC и PEPC. В макромолекуле PVC карбазолильные группы присоединены к каждому второму атому углерода в полимерной цепи, а их последовательное расположение способствует образованию большой концентрации структурных дефектов — эксимерообразующих мест ($C = 0.1\%$ [13]), которые представляют собой преддимерные конфигурации двух карбазолильных групп с частичным перекрытием их π -электронных систем. Спектр люминесценции PVC при $T = 5\text{ К}$ представляет собой широкую бесструктурную полосу с максимумом при $\lambda_{\text{max}} = 378\text{ нм}$ (кривая 1 на рис. 2), которую связывают с флуоресценцией эксимеров с частичным перекрытием двух карбазолиль-

ных хромофоров [14–16]. На длинноволновом краю этой полосы имеется слабое плечо при $\lambda = 400\text{ нм}$. С увеличением температуры относительная интенсивность этого плеча возрастает, и при $T > 100\text{ К}$ на его месте появляется полоса с $\lambda_{\text{max}} = 415\text{ нм}$, принадлежащая флуоресценции эксимеров с полным перекрытием карбазолильных групп [14–16].

В отличие от жесткоцепного PVC PEPC является полностью аморфным веществом, в рентгенограммах которого не обнаружены какие-либо признаки упорядоченности [17], а его полиэфирные цепи отличаются большой гибкостью и состоят всего из трех–четырех мономерных звеньев [17]. Вопрос о существовании эксимеров в полимере до сих пор остается дискуссионным.

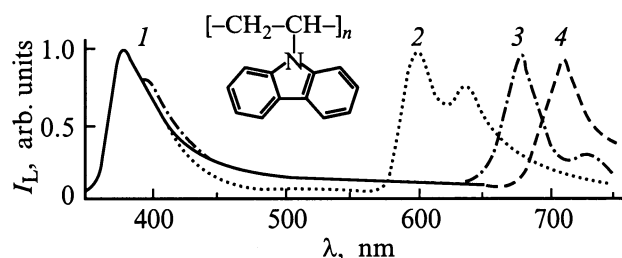


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции чистого PVC (1) и с красителями ($C = 2\%$) НИС (2), НИСк (3) и НИСд (4), измеренные при $T = 5\text{ К}$ и $\lambda_{\text{exc}} = 313\text{ нм}$. На вставке — структурная формула PVC.

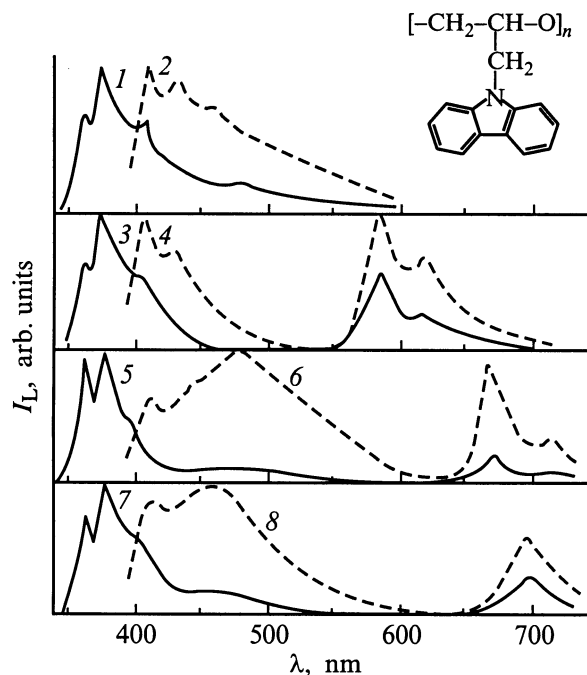


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции чистого PEPC (1, 2) и с красителями ($C = 0.1\%$) НИС (3, 4), НИСк (5, 6) и НИСд (7, 8), измеренные при $T = 5\text{ К}$, $\lambda_{\text{exc}} = 313\text{ нм}$ (1, 3, 5, 7) и $\lambda_{\text{exc}} = 365\text{ нм}$ (2, 4, 6, 8). На вставке — структурная формула PEPC.

В спектре люминесценции чистого PEPC ($T = 5$ К) при $\lambda_{\text{exc}} = 313$ nm наблюдаются полосы при $\lambda_{\text{max}} = 358$ и 374 nm, которые однозначно связываются с электронным и электронно-колебательным переходами в мономерных карбазолильных хромофорах [18], и слабо выраженные полосы при 408, 433, 460 и 485 nm (кривые 1 и 2 на рис. 3). Структура спектра в интервале $\lambda = 400\text{--}500$ nm лучше проявляется при возбуждении в области слабого поглощения полимера ($\lambda_{\text{exc}} = 365$ nm), когда глубина проникновения возбуждающего света значительно больше, чем при $\lambda_{\text{exc}} = 313$ nm. Следовательно, концентрация центров, ответственных за структурное излучение в интервале $\lambda = 400\text{--}500$ nm, незначительна.

Природа этих центров наиболее детально исследована в работе [18], в которой изучены спектры люминесценции растворов и пленок PEPC и *N*-винилкарбазола (NVC) в интервале $T = 5\text{--}300$ К методом временного разрешения. Показано, что в спектре люминесценции PEPC можно выделить четыре компонента: флуоресценцию мономерных звеньев (358, 374 и 389 nm), флуоресценцию примеси антрацена (392, 412 и 434 nm), эксимерно-эксиплексную флуоресценцию (450–460, 485 и 525 nm), а также фосфоресценцию при $\lambda > 400$ nm. Эти компоненты отличаются между собой кинетикой нарастания и спада интенсивности излучения, энергетическим положением и интервалом температур, в котором они существуют. В частности, интенсивность фосфоресценции уменьшается с ростом температуры выше $T = 5$ К, а эксимерного излучения — при охлаждении образцов ниже $T = 300$ К. Следует отметить, что полоса флуоресценции при $\lambda_{\text{max}} = 460\text{--}465$ nm наблюдалась также в спектрах пленок [8] и кристаллов NVC [19].

Спектр фосфоресценции PVC расположен в области $\lambda > 400$ nm. При $T = 5$ К в нем наблюдается структура с $\lambda_{\text{max}} = 425$ и 460 nm. С повышением температуры указанная структура исчезает, и при $T = 77$ К спектр состоит из широкой бесструктурной полосы с $\lambda_{\text{max}} = 500$ nm. Спектр фосфоресценции PEPC при $T = 5\text{--}77$ К подобен спектру PVC при $T = 77$ К.

2.2. Спектры люминесценции пленок PVC и PEPC с красителями HIC, HID, HIT и HISq. Полосы флуоресценции красителей HIC, HID и HISq обнаруживаются в спектрах примесных пленок при $C \geq (10^{-3}\text{--}10^{-2})\%$, и с увеличением концентрации до $C = 2\%$ положения их максимумов bathochromно смещаются (рис. 2 и 3). В частности, для красителя HIC в PVC и PEPC при $C = 0.1\%$ положение $\lambda_{\text{max}} = 590$ nm, а при $C = 2\%$ — $\lambda_{\text{max}} = 600$ nm. Для красителя HID в PVC и PEPC при $C = 0.1\%$ положение $\lambda_{\text{max}} = 695$ nm, а при $C = 2\%$ — соответственно 700 и 715 nm. Для красителя HISq при $C = 0.1\%$ в матрице PEPC положение $\lambda_{\text{max}} = 670$ nm, а в PVC — $\lambda_{\text{max}} = 676$ nm. При $C = 2\%$ во всех полимерных матрицах $\lambda_{\text{max}} = 676$ nm (рис. 2).

Рост концентрации красителей в полимере в интервале $0.1 \leq C \leq 2\%$ одновременно с увеличением интенсивности их сенсibilизированной люминесценции приводит к уменьшению интенсивности излучения матрицы, что

наиболее выражено для красителя HIC. Это свидетельствует об эффективной передаче энергии электронного возбуждения от полимерной матрицы к примеси. Рассмотрим изменения в спектрах люминесценции полимерных матриц, возникающие при введении красителей HIC, HID, HIT и HISq. Установлено, что указанные красители при $C = (10^{-2}\text{--}2)\%$ не влияют на структуру спектров фосфоресценции PVC и PEPC.

Рост концентрации HIC в PVC и PEPC в интервале $C = (10^{-2}\text{--}2)\%$ не вызывает заметных изменений структуры спектра ($T = 5$ К) в области излучения эксимеров и мономеров (кривая 2 на рис. 2 и кривые 3 и 4 на рис. 3) и приводит к сильному тушению интенсивности фосфоресценции PVC и PEPC.

В отличие от HIC введение красителей HISq и HID ($C = 10^{-2}\text{--}2\%$) практически не влияет на интенсивность фосфоресценции PVC при $T = 5$ К и приводит к небольшому увеличению относительной интенсивности полосы флуоресценции эксимеров с $\lambda_{\text{max}} = 415$ nm по сравнению с полосой $\lambda_{\text{max}} = 378$ nm (кривые 3 и 4 на рис. 2).

В спектрах флуоресценции PEPC с красителями HISq и HID при $0.01 \leq C \leq 0.5\%$ появляются новые интенсивные широкие полосы с $\lambda_{\text{max}} = 480$ и 460 nm соответственно (кривые 5–8 на рис. 3). При дальнейшем увеличении концентрации красителей интенсивности указанных полос уменьшаются, и при $C \geq 1\%$ они не наблюдаются. Полоса с $\lambda_{\text{max}} = 460$ nm присутствует и в спектрах флуоресценции PEPC с красителем HIT ($10^{-2} \leq C \leq 1\%$).

Полосы при $\lambda_{\text{max}} = 480$ и 460 nm не принадлежат неконтролируемым примесям в красителях, поскольку в спектрах люминесценции пленок поливинилбутирала с красителями HISq и HID излучение неконтролируемых примесей не обнаружено. Отметим, что поливинилбутираль не содержит ароматических групп, и чистый полимер не люминесцирует в указанной области спектра.

Полосы при $\lambda_{\text{max}} = 480$ и 460 nm также не связаны с излучением комплексов, образованных между электродонорными карбазолильными группами и электроакцепторными молекулами красителей или неконтролируемыми примесями в них, так как при этом их интенсивность должна расти с увеличением концентрации красителей, что не наблюдается на эксперименте. Кроме того, указанные полосы отсутствуют в спектрах примесных пленок PVC (кривые 3 и 4 на рис. 2), молекулы которого, как и PEPC, содержат карбазолильные группы. Следовательно, появление указанных полос в спектрах примесных пленок PEPC связано с возникновением в полимере структурных дефектов конформационной природы.

2.3. Ассоциация красителей HISq и HID в полимерных матрицах. Для установления причин, приводящих к конформационным изменениям в PEPC при введении красителей HISq и HID, нами изучены процессы ассоциации указанных красителей в различных полимерах [20]. С этой целью измерены спектры поглощения и люминесценции красителей HISq и HID в полистироле (PS), PEPC и PVC при $C = 10^{-3}\text{--}2\%$.

Катионный краситель НID является солеобразным соединением (рис. 1). Поэтому в полярных растворителях при небольших концентрациях он может диссоциировать на анион и катион и существовать в форме сольватированных ионов. С увеличением концентрации вначале должны образоваться контактные (или сольваторазделенные) ионные пары, а затем их ассоциаты [21].

Молекула скварилиевого красителя HISq имеет такую же длину полиметиновой цепи и строение концевых гетероциклических групп, как и катион НID, но в отличие от него представляет собой химически связанную недиссоциирующую ионную пару (рис. 1). Ассоциат HISq состоит из двух мономерных молекул и образуется в результате электростатического взаимодействия между разноименными зарядами, локализованными на азотистом гетероцикле и скварилиевой группе каждой молекулы.

Установлено, что процессы ассоциации красителей НID и HISq в различных полимерных матрицах существенно отличаются. В частности, в полярном PEPC краситель НID существует в форме сольватированных ионов, а в малополярном PS — контактных ионных пар (показатели преломления PEPC и PS соответственно равны 1.80 и 1.59). Этот вывод основан на различном характере зависимостей спектров поглощения и люминесценции от концентрации примеси в PEPC и PS. В PEPC с ростом концентрации НID максимумы примесных полос поглощения и люминесценции батохромно смещаются. В PS, наоборот, они испытывают гипсохромный сдвиг и растет интенсивность коротковолнового края полосы поглощения.

Краситель HISq в обоих полимерах при $C \geq 10^{-3}\%$ существует только в ассоциированной форме. Однако при небольших концентрациях ($C < 1\%$), когда происходит формирование структуры ассоциатов, в PEPC обнаружены их промежуточные формы, которые проявляются в виде дополнительных полос поглощения и люминесценции. Эти дополнительные полосы исчезают при $C \geq 1\%$, когда структура ассоциатов уже полностью сформировалась (в этом случае положения максимумов как полос поглощения, так и люминесценции в PEPC и PS совпадают, поскольку определяются только взаимодействием мономерных молекул HISq между собой). В отличие от PEPC в PS промежуточные формы ассоциатов молекул HISq не обнаружены.

Приведенные результаты приводят к заключению, что ослабление ассоциации красителей HISq и НID в PEPC по сравнению с PS связано с электростатическим взаимодействием его полярных групп с заряженными центрами молекул HISq и НID, т. е. вследствие их сольватации [20]. При переходе от матрицы PEPC к PVC происходит усиление ассоциации красителей HISq и НID. Это следует из сравнения концентрационных зависимостей положения полос поглощения и люминесценции красителей в этих полимерах. Как отмечено в предыдущем разделе, сдвиги полос люминесценции красителей при изменении их

концентрации $C = 0.1\text{--}2\%$ уменьшаются при переходе от PEPC к PVC. При этом в отличие от PEPC в PVC структура ассоциатов молекул HISq полностью формируется уже при $C = 0.1\%$, и дальнейший рост концентрации до $C = 2\%$ не приводит к изменению положения полосы излучения ассоциатов (в матрице PVC полоса флуоресценции красителя HISq расположена при $\lambda_{\max} = 676\text{ nm}$ при $C = 0.1\text{--}2\%$).

2.4. Природа структурных дефектов в пленках PEPC с красителями HISq и НID. Приведенные результаты позволяют предположить, что появление в спектрах люминесценции примесных пленок PEPC новых широких полос с $\lambda_{\max} = 480$ и 460 nm происходит вследствие сольватации молекул красителей полярными группами полимера и связано с конформационными изменениями в полимере.

Из рис. 3 видно, что полоса с $\lambda_{\max} = 460\text{ nm}$ отсутствует в спектре люминесценции PEPC с НС и появляется в спектре PEPC с НID. Эта полоса обнаружена и в спектре PEPC с НИТ. Как известно [21], сольватация этих красителей осуществляется за счет электростатического взаимодействия распределенного заряда катионов с диполями молекул растворителя и усиливается с увеличением длины (n) полиметиновой цепи катиона. При этом наибольшее изменение энергии взаимодействия происходит при переходе от $n = 1$ (НС) к $n = 2$ (НID) и в меньшей мере при переходе от $n = 2$ к $n = 3$ (НИТ) [21], что коррелирует с появлением полосы $\lambda_{\max} = 460\text{ nm}$ в спектрах флуоресценции PEPC с красителями НID и НИТ. Учитывая, что PEPC является низкомолекулярным полимером [17], а его цепи достаточно гибкие, можно предположить, что дальнедействующее электростатическое взаимодействие распределенного заряда молекул HISq и НID с полярными группами полимера приводит к упорядочению ориентации карбазолильных хромофоров, их сближению и усилению взаимодействия между их электронными системами. В результате в окрестности молекулы красителя карбазолильные хромофоры PEPC образуют набор преддимерных конфигураций, что приводит к увеличению концентрации эксимерообразующих мест в примесных пленках и появлению в спектрах их люминесценции полос при $\lambda_{\max} = 480$ и 460 nm (рис. 3). Отметим, что указанные полосы значительно меньшей интенсивности присутствуют и в спектрах люминесценции чистого PEPC [18].

В отличие от PEPC с гибкими полимерными цепями PVC является структурно жестким полимером с упорядоченным расположением карбазолильных хромофоров. Поэтому в высокомолекулярном PVC молекулы HISq и НID агрегируют значительно сильнее, чем в PEPC, и в спектрах люминесценции примесных пленок PVC новые полосы, связанные с конформационными изменениями в полимере, не появляются. Введение указанных примесей приводит только к незначительному увеличению относительной интенсивности флуоресценции эксимеров с $\lambda_{\max} = 415\text{ nm}$ по сравнению с эксимерами при $\lambda_{\max} = 378\text{ nm}$ (рис. 2).

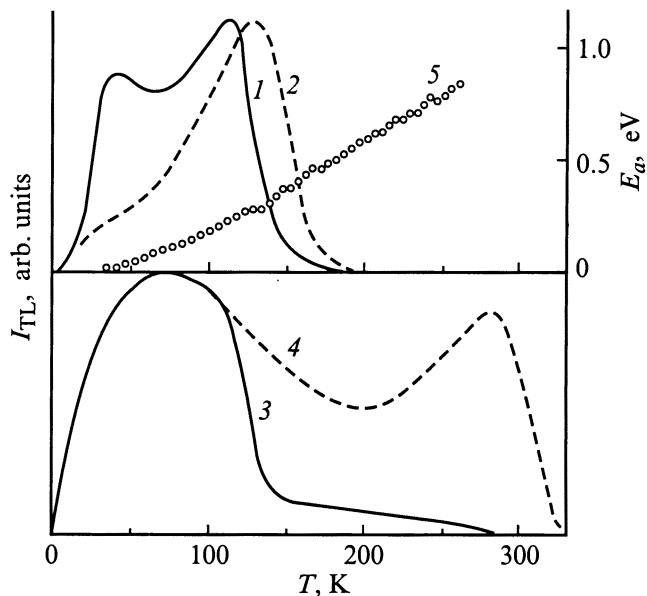


Рис. 4. Кривые ТВ пленок PVC (1, 3) и PEPC (2, 4): чистых (1, 2) и с красителем HISq (3, 4); зависимость $E_a(T)$ (5).

2.5. Термостимулированная люминесценция чистых и примесных пленок PVC и PEPC. Исследования спектров люминесценции карбазолилсодержащих полимеров показали, что введение красителей HISq и HID приводит к их сольватации полярными группами полимера и сопровождается усилением взаимодействия между карбазолильными хромофорами, которое значительно возрастает при переходе от PVC к PEPC. Согласно [22], это должно привести к локальному увеличению энергии электронной поляризации матрицы в окрестности молекулы красителя и появлению ловушек носителей заряда структурного происхождения, глубина которых будет возрастать при переходе от PVC к PEPC. Ловушки носителей заряда в чистых и примесных полимерах изучены методом термостимулированной люминесценции.

Кривые ТВ PVC и PEPC качественно подобны и состоят из широкой асимметричной полосы в области $T = 5\text{--}200$ К с максимумами при $T_{\max} = 110$ и 130 К в PVC и PEPC соответственно (кривые 1 и 2 на рис. 4) и резким высокотемпературным краем. На низкотемпературном крыле кривых ТВ имеется дополнительный максимум при $T_{\max} = 30\text{--}40$ К, относительная интенсивность которого изменяется от образца к образцу. Ранее нами было показано [23], что этот максимум связан с термоактивированной туннельной рекомбинацией близкорасположенных геминальных электрон-дырочных пар.

Методом фракционного термовысвечивания измерены зависимости энергии активации E_a термического высвобождения носителей заряда от температуры вдоль кривых ТВ PVC и PEPC. Для обоих полимеров эти зависимости совпадают и представляют собой монотон-

но возрастающую непрерывную функцию (кривая 5 на рис. 4). Введение в полимер красителей HISq и HID ($C = 2\%$) не влияет на зависимость $E_a(T)$.

Ранее нами было показано [7–10], что ловушками для носителей заряда в беспримесных аморфных полимерах выступают нижайшие по энергиям состояния в DOS. При этом температура T_{\max} на кривой ТВ соответствует глубине ловушек E_{\max} , для которых плотность заполненных состояний в DOS максимальна. Таким образом, для PVC величина $E_{\max} = 0.24$ eV, а для PEPC — $E_{\max} = 0.33$ eV (рис. 4).

Рассмотрим кривые ТВ пленок PVC и PEPC с красителем HISq ($C = 2\%$). Введение красителя в PVC приводит лишь к незначительному затягиванию высокотемпературного края кривой TD и появлению слабо выраженного плато в области $T = 150\text{--}250$ К (кривая 3 на рис. 4), что соответствует появлению новых ловушек носителей заряда глубиной $E = 0.41\text{--}0.80$ eV. Этот эффект значительно усиливается при переходе от PVC к PEPC. При этом на кривой ТВ PEPC с HISq появляется новая интенсивная полоса в области $T = 200\text{--}300$ К ($E = 0.51\text{--}1.12$ eV) с максимумом при $T_{\max} = 275$ К ($E_{\max} = 0.91$ eV) (кривая 4 на рис. 4).

Можно предположить, что новые ловушки в примесных полимерах образуются вследствие захвата носителей заряда (дырок) либо непосредственно на молекулы красителя, либо на структурные дефекты конформационного происхождения. Согласно [13,22], глубина примесной ловушки для дырок определяется разностью потенциалов ионизации молекул матрицы I_H и примеси I_G . Поскольку величины I_H молекул PVC и PEPC практически совпадают (7.32 и 7.34 eV соответственно [24]), то глубины примесных ловушек в указанных матрицах тоже должны совпадать.

Из рис. 4 видно, что глубины ловушек, которые появляются при введении красителя HISq, увеличиваются при переходе от PVC к PEPC. Поэтому их происхождение можно связать со структурными дефектами, образующимися в результате усиления межхромофорного взаимодействия в примесных полимерах.

Таким образом, в работе установлено, что введение катионных и скварилиевого индокарбоцианинов в карбазолилсодержащие полимеры сопровождается их сольватацией, что приводит к конформационным изменениям и усилению межхромофорного взаимодействия в примесном полимере. Конформационные изменения значительно усиливаются с увеличением длины полиметиновой цепи катиона красителя, а также при переходе от жесткоцепного PVC с упорядоченной структурой полимерной цепи к полностью аморфному атактическому PEPC. В результате в примесных полимерах возникают глубокие ловушки для синглетных экситонов и носителей заряда конформационной природы, которые проявляются в спектрах фото- и термостимулированной люминесценции.

Список литературы

- [1] А.В. Ванников, А.Д. Гришина. Фотохимия полимерных донорно-акцепторных комплексов. Наука, М. (1984). 261 с.
- [2] P.M. Borsenberger, D.S. Weiss. Organic photoreceptors for xerography. Dekker, N. Y. (1998). 768 p.
- [3] C. Adachi, K. Nagai, N. Tamoto. Appl. Phys. Lett. **66**, 2679 (1995).
- [4] W.E. Moemer, S.M. Silence. Chem. Rev. **94**, 127 (1994).
- [5] H. Bassler. Phys. Stat. Sol. (B) **175**, 1, 15 (1993).
- [6] H. Bassler. In: Disordered effect on relaxational processes. Springer-Verlag, Berlin (1994). P. 585.
- [7] A. Kadashchuk, N. Ostapenko, V. Zaika, S. Nespurek. Chem. Phys. **234**, 285 (1998).
- [8] S. Nespurek, A. Kadashchuk, N. Ostapenko, V. Zaika. Mol. Cryst. Liq. Cryst. **324**, 95 (1998).
- [9] A. Kadashchuk, N. Ostapenko, V. Zaika, P.M. Borsenberger. J. Imaging Sci. Technol. **43**, 3, 213 (1999).
- [10] A. Kadashchuk, D.S. Weiss, P.M. Borsenberger, S. Nespurek, N. Ostapenko, V. Zaika. Chem. Phys. **247**, 307 (1999).
- [11] Н.А. Давиденко, А.А. Ищенко, А.К. Кадашук, Н.Г. Кувшинский, Н.И. Остапенко, Ю.А. Скрышевский. ФТТ **41**, 2, 203 (1999).
- [12] I.A. Tale. Phys. Stat. Sol. (A) **66**, 1, 65 (1981).
- [13] M. Pope, S.E. Swenberg. Electronic processes in organic crystals. Clarendon Press, Oxford–N.Y. (1982). 821 p.
- [14] S. Tagawa, M. Washio, Y. Tabata. Chem. Phys. Lett. **68**, 276 (1979).
- [15] G. Peter, H. Bassler, W. Schrof, H. Port. Chem. Phys. **94**, 445 (1985).
- [16] G. Giro, P.G.Di Marco, M. Pizzoli, G. Ceccorulli. Chem. Phys. Lett. **150**, 1–2, 159 (1988).
- [17] А.И. Ундзенас, Е.В. Герт. Высокомолекуляр. соединения (A) **25**, 5, 984 (1983).
- [18] Ю.П. Пирятинский, В.Н. Ящук, Ю.А. Черкасов, Ю.Н. Кирпач, Е.Л. Александрова. ЖПС **53**, 1, 41 (1990).
- [19] R. Sano, S. Matsuda. J. Chem. Phys. **64**, 11, 4523 (1976).
- [20] Ю.А. Скрышевский, Н.А. Давиденко, А.А. Ищенко, А.К. Кадашук, Н.И. Остапенко. Оптика и спектроскопия **88** (2000).
- [21] А.А. Ищенко. Строение и спектрально-люминесцентные свойства полиметиновых красителей. Наук. думка, Киев (1994). 232 с.
- [22] В.А. Андреев, М.В. Курик, С. Нешпурек, Э.А. Силиныч, В.И. Сугаков, Л.Ф. Тауре, Е.Л. Франкевич, В. Чапек. Электронные процессы в органических молекулярных кристаллах. Перенос, захват, спиновые эффекты. Зинатне, Рига (1992). 363 с.
- [23] А.К. Кадашук, Н.И. Остапенко, Ю.А. Скрышевский, Е.Н. Великая, М.Т. Шпак. ФТТ **31**, 7, 203 (1989).
- [24] Р.И. Блумбергас, А.И. Ундзенас. ЖНПФик **29**, 3, 219 (1084).