

02

Особенности фото процессов в пленках поли(9,9-ди-н-октилфлуоренил-2,7-диил), допированных солью KI

© Д.А. Афанасьев^{1,2}, Н.Х. Ибраев¹, А.К. Нурмаханова¹, М.Г. Кучеренко³

¹ Институт молекулярной нанофотоники, Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, 100028 Караганда, Республика Казахстан

² Институт прикладной математики, 100028 Караганда, Республика Казахстан

³ Центр лазерной и информационной биофизики, Оренбургский государственный университет, 460018 Оренбург, Россия

e-mail: a_d_afanasyev@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2018 г.

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства пленок PFO, допированных примесью KI. Обнаружено, что добавление примеси KI в концентрациях от 0.1 до 1% приводит к падению степени упорядоченности пленок поли(9,9-ди-н-октилфлуоренил-2,7-диил) (PFO), уменьшению интенсивности и времени жизни флуоресценции полимера. Исследована кинетика фотолюминесценции пленок PFO-KI в нано-, микро- и миллисекундном временных диапазонах. Анализ экспериментальных данных длительной люминесценции на основе перколяционной модели показал, что добавление примеси KI в полимер приводит к росту неупорядоченности пленки. Исследования влияния внешнего магнитного поля на люминесценцию PFO в широком временном диапазоне свидетельствуют о сложном характере временной зависимости магнитного эффекта. Наблюдаются изменения как величины, так и знака магнитного эффекта $g(B)$ на всем измеренном временном диапазоне.

DOI: 10.21883/OS.2018.06.46077.19-18

1. Введение

С развитием органической электроники и фотовольтаики вырос интерес к композитным материалам на основе полупроводниковых полимеров, что связано с возможностью регулирования оптических и электрических свойств полимерных композитов (ПК) [1–3]. В качестве примесей часто используют наночастицы металлов [4,5], красители [3], органические соединения, выступающие по отношению к полимерному материалу в качестве донора или акцептора электронов [6]. Также часто в качестве внешней примеси применяются химические соединения, приводящие к эффекту внешнего тяжелого атома [7]. Данный эффект обусловлен усилением интеркомбинационных переходов между электронными состояниями различной спиновой мультиплетности под действием спин-орбитального взаимодействия [8,9].

Внимание к эффекту внешнего тяжелого атома связано с возможностью увеличения концентрации триплетных возбужденных состояний в полупроводниковых полимерах, что может быть использовано для увеличения КПД полимерных солнечных ячеек [10,11]. Также этот эффект может быть использован и в других прикладных задачах, например для получения электрофлуоресценции органических пленок [12–14]. Наряду с этим, как показывают исследования [15,16], добавление примеси KI может приводить к росту проводимости полимерных композитов.

Полупроводниковый полимер поли(9,9-ди-н-октилфлуоренил-2,7-диил) (PFO) является одним из основных материалов для получения электролюминесценции в синей области оптического спектра [13]. В ряде работ [17–19] исследованы свойства как быстрой флуоресценции, так и длительной люминесценции. Структура полимерных пленок в значительной степени зависит от технологии их изготовления и используемого растворителя [20–22].

Добавление внешнего тяжелого атома в полупроводниковый полимер может не только изменять скорость и эффективность протекания различных фотофизических реакций, но и изменять вероятность образования свободных носителей заряда в полимере [6,23,24]. Характер влияния внешнего тяжелого атома на фотофизические процессы в полупроводниковых полимерах остается малоизученным. В настоящей работе приведены результаты исследования влияния соли KI на динамику фото процессов в пленках поли(9,9-ди-н-октилфлуоренил-2,7-диил).

2. Методика эксперимента

В работе использованы пленки PFO, допированные неорганической примесью — солью KI. Был использован полимер фирмы Sigma-Aldrich с молекулярной массой $Mw \geq 20\,000$. Концентрация примеси в пленке варьировалась в диапазоне от 0.1 до 1% от массы полимера.

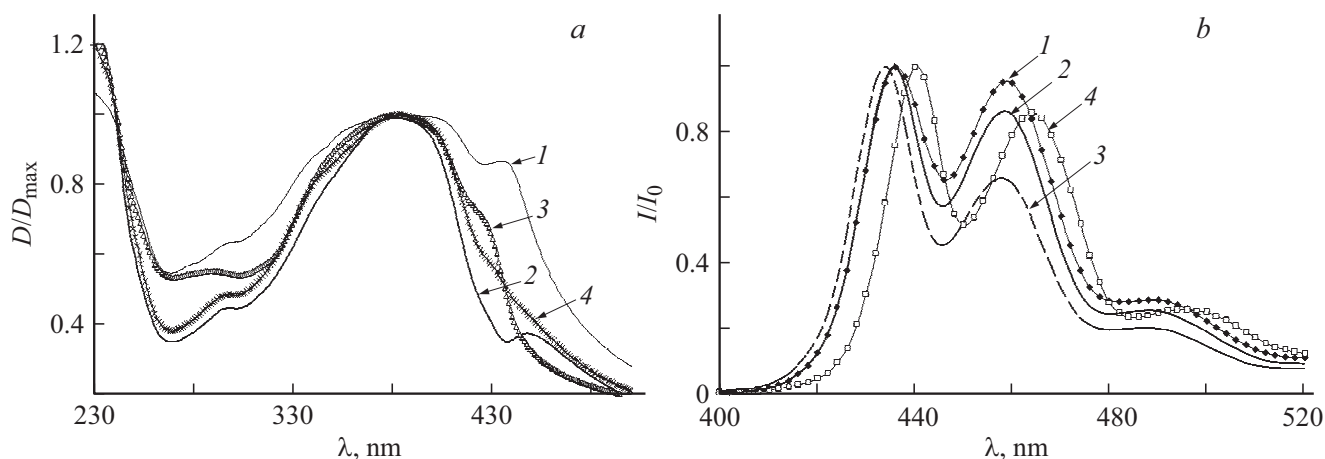


Рис. 1. Нормированные спектры поглощения (а) и флуоресценции (b) полимерных пленок PFO с добавкой примеси KI: 1 — PFO, 2 — PFO-KI 0.1%, 3 — PFO-KI 0.5%, 4 — PFO-KI 1%.

Пленки были изготовлены методом центрифугирования. Для увеличения степени упорядоченности пленок производился термический отжиг пленок в инертной атмосфере (Ar_2).

Регистрация спектров поглощения производилась на спектрофотометре Cary 300. Спектры люминесценции измерялись на спектрофлуориметре Cary Eclipse. Кинетика быстрой люминесценции полимерных пленок измерялась на импульсном спектрофлуориметре с пикосекундным разрешением и регистрацией в режиме время-коррелированного счета фотонов фирмы Becker & Hickl. Возбуждение свечения образцов проводилось импульсным полупроводниковым лазером с длиной волны $\lambda_{ген} = 375$ nm с длительностью импульса на полувысоте $\lambda_{ген} = 80$ ps.

Кинетика длительной люминесценции в микро- и миллисекундном временных диапазонах измерялась на установке с регистрацией в режиме счета фотонов [25,26]. Фотовозбуждение образцов производилось третьей гармоникой неодимового лазера LCS-DTL-374QT. Регистрирующая часть установки включает ФЭУ с электронным отпираем H7421, дискриминатор C8744 и электронную плату счета импульсов M8784 (Hamamatsu Photonics).

Исследование влияния внешнего магнитного поля на интенсивность люминесценции полимерных пленок в широком временном диапазоне производилось в оптическом криостате при использовании электромагнита с индукцией B магнитного поля до 0.55 T.

Методика определения магнитного эффекта подробно описана в работах [25,26]. Магнитный эффект оценивали по относительному изменению интенсивности свечения в магнитном поле и в отсутствие поля по формуле $g(B) = (I_B - I_0)/I_0$, где I_B и I_0 — интенсивности длительной флуоресценции в поле с индукцией B и без поля соответственно. Так как получаемая оценка магнитного эффекта имела малое значение, результаты измерения

магнитного эффекта многократно повторялись и проводилось усреднение полученных результатов.

3. Результаты и их обсуждение

Измерены спектры поглощения и флуоресценции ПК PFO с добавками KI. В спектре поглощения беспримесной пленки PFO наблюдается полоса с максимумом на 380 nm с дополнительным пиком на 440 nm (рис. 1, кривая 1). Согласно работам [20–22], полоса с максимумом на 440 nm обусловлена наличием кристаллической фазы полимера (β -фазы). Наличие интенсивной полосы поглощения с максимумом на 380 nm свидетельствует о доминировании неупорядоченной структуры в полимерной пленке. Добавление примеси KI в PFO приводит к уменьшению интенсивности поглощения кристаллической фазы ПК.

С использованием методики, приведенной в работе [21], была оценена доля кристаллической фазы в образцах. Полученные результаты приведены в табл. 1. Также на рост неупорядоченности пленок PFO с добавлением KI указывает увеличение интенсивности поглощения в области 285 nm [21].

Из спектров поглощения полимерных пленок была определена энергия запрещенной зоны (E_g) полимера PFO при добавлении неорганической примеси. Результаты приведены в табл. 1. Данные результаты показывают, что основные изменения в ширине запрещенной зоны для ПК на основе PFO происходят при добавлении 0.5% KI в пленку. Дальнейший рост концентрации примеси практически не влияет на ширину запрещенной зоны. Для ПК, не подвергшихся термическому отжигу в инертной атмосфере, характер влияния примеси на величину E_g аналогичный.

Для композитных пленок PFO в спектрах флуоресценции присутствуют три пика с максимумами на 440, 460 и 490 nm (рис. 1, b). Флуоресцентные данные

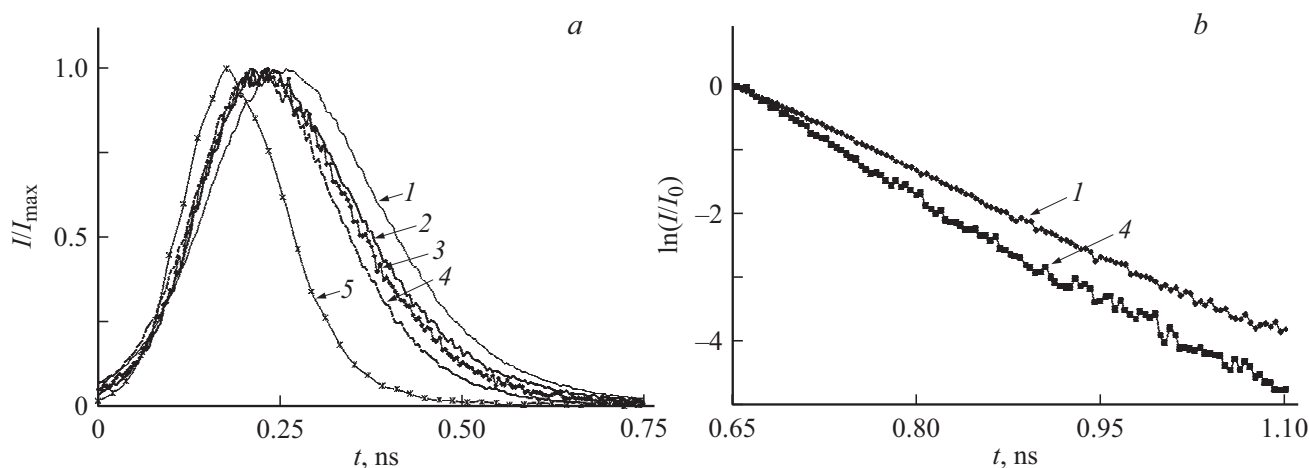


Рис. 2. Кинетики флуоресценции PFO (а) и логарифмические кривые свечения PFO (b) в зависимости от концентрации примеси KI: 1 — PFO, 2 — PFO-KI 0.1%, 3 — PFO-KI 0.5%, 4 — PFO-KI 1%, 5 — профиль лазерного луча 375 nm.

Таблица 1. Основные параметры, определенные из спектров поглощения и флуоресценции ПК PFO-KI

Образец	Доля кристаллической фазы в пленке, %	E_g , eV	Максимумы люминесценции и их относительная величина*	τ , ns
PFO	0.23	2.56	436 nm, 458 nm (0.95) 490 nm (0.29)	0.51
PFO-KI 0.1%	0.10	2.56	434 nm, 458 nm (0.86), 490 nm (0.26)	0.43
PFO-KI 0.5%	0.15	2.74	436 nm, 458 nm (0.66), 490 nm (0.20)	0.40
PFO-KI 1%	0.15	2.70	440 nm, 464 nm (0.86), 498 nm (0.26)	0.39

Примечание. * За 1 взята интенсивность люминесценции на 434–440 nm.

показывают, что свечение исследуемых образцов обусловлено излучением кристаллической фазы полимера PFO [20,21]. Как показано в работе [22], в полимерной пленке PFO в присутствии упорядоченной и неупорядоченной фаз наблюдается значительный синглет-синглетный перенос энергии с неупорядоченных цепей полимера на упорядоченные. Поэтому при превышении доли упорядоченной фазы более 7% наблюдается только флуоресценция с β -фазы полимера [21,22]. Таким образом, спектральные данные по флуоресценции образцов (рис. 1, b) соответствуют численным значениям доли β -фазы, определенных из спектров поглощения пленок (табл. 1).

Добавление неорганической примеси приводит к сдвигам спектров флуоресценции в полимере сначала в коротковолновую область спектра (рис. 1, b, кривая 3), а затем, с ростом концентрации примеси KI, в длинноволновую часть спектра (рис. 1, b, кривая 4). Коротковолновый сдвиг максимума свечения связан с уменьшением степени упорядоченности пленки (табл. 1). При этом длинноволновый сдвиг максимума свечения пленки PFO-KI 1% не связан со степенью упорядоченности пленок.

Также добавление соли KI в полимер приводит к относительному перераспределению в интенсивности пиков на 440 nm (переход 0–0) с вибранными пиками на 460 и 490 nm (табл. 1). Одной из возможных причин перераспределения в интенсивности пиков может быть изменение доли упорядоченной фазы в пленке. Для анализа влияния примеси на степень структурной неупорядоченности полимерных пленок рассчитывают значения вибронного расщепления $\Delta E = E_{0-0} - E_{0-1}$ и фактора Хуанга–Рисса [27,28]. Рост неупорядоченности ПК приводит к росту фактора Хуанга–Рисса (S) и к уменьшению величины ΔE [28]. Как показали наши исследования [29], рост концентрации KI не приводит к изменению вибронного расщепления ΔE и уменьшает величину S . При этом, как показано в табл. 1, рост концентрации KI приводит к снижению доли β -фазы в пленке. Таким образом, добавление примеси KI приводит к сложным изменениям флуоресцентных свойств ПК на основе полимера PFO с примесью KI, которые невозможно объяснить только структурными изменениями в ПК.

Помимо регистрации спектров в настоящей работе исследовалась кинетика флуоресценции ПК в наносекундном временном диапазоне (рис. 2). Измерение кинетики проводилось на длине волны 440 nm. Сравнение формы кинетической кривой флуоресценции ПК (рис. 2, a) с профилем излучения лазера (BDL-375-SMC,

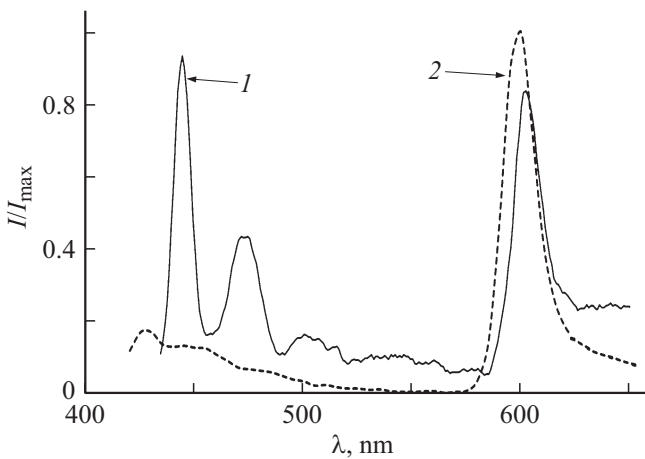


Рис. 3. Спектры длительной люминесценции пленок PFO (1) и PFO-KI 1% (2).

Becker and Nickle) показывает, что на стадии роста интенсивности и на временном интервале 0.2 ns от максимума интенсивности свечения эти кривые совпадают. Это говорит о том, что на данном временном интервале форма кривых флуоресценции PFO сформирована профилем возбуждающего лазерного импульса. При этом добавление примеси KI приводит к сдвигу регистрируемой кривой затухания флуоресценции в сторону коротких времен (рис. 2, *a*). Это может указывать на ускорение фотопроцессов, протекающих в полимерной пленке при добавлении KI во временном диапазоне, сравнимом с длительностью лазерного импульса. На более длительном временном диапазоне присутствует моноэкспоненциальное затухание флуоресценции PFO (рис. 2, *b*). Время жизни флуоресценции τ определялось при помощи программного обеспечения SPImage 3.9.4 [30], соответствующие результаты приведены в табл. 1. Значения τ находятся в диапазоне

0.4–0.5 ns и хорошо согласуются с данными, полученными в [17,18].

Рост концентрации KI в пленке приводит к небольшому уменьшению τ (табл. 1). Из полученных кинетических данных видно, что добавление соли KI приводит к ускорению фотопроцессов как на стадии роста интенсивности флуоресценции (рис. 2, *a*), так и на более длительных временах регистрации сигнала (рис. 2, *b*).

Добавление соли KI приводит к уменьшению интенсивности флуоресценции. Значительное тушение свечения наблюдается при низкой концентрации KI — 0.1%.

При охлаждении образцов до температуры кипения жидкого азота в спектре длительной фотолюминесценции наблюдаются две полосы с максимумами на 440 и 580 nm (рис. 3). Спектры длительного свечения ПК с максимумом на 440 nm совпадают со спектрами стационарной флуоресценции, приведенными на рис. 1, *b*. В работе [19] показано, что длительная фотолюминесценция на 440 nm является аннигиляционной замедленной флуоресценцией (АЗФ) полимера PFO, а длительная люминесценция на 580 nm может быть отнесена к фосфоресценции PFO [19]. Измерения температурной зависимости АЗФ и фосфоресценции PFO показали, что с ростом температуры интенсивности свечений на 440 и 580 nm уменьшаются. Сравнение интенсивностей АЗФ и фосфоресценции в пленках PFO и PFO-KI показывает, что интенсивность фосфоресценции в пленке PFO-KI значительно увеличивается по сравнению со свечением в пленке PFO.

Таким образом, добавление KI в полимер приводит к значительному росту концентрации возбужденных триплетных состояний в ПК. Из спектров поглощения пленок следует, что добавление KI в полимер приводит к росту неупорядоченности пленок. Спектры длительной люминесценции также указывают на рост неупорядоченности полимерных пленок, что видно по смещению в коротковолновую сторону как спектров АЗФ, так и спектров фосфоресценции образца PFO-KI.

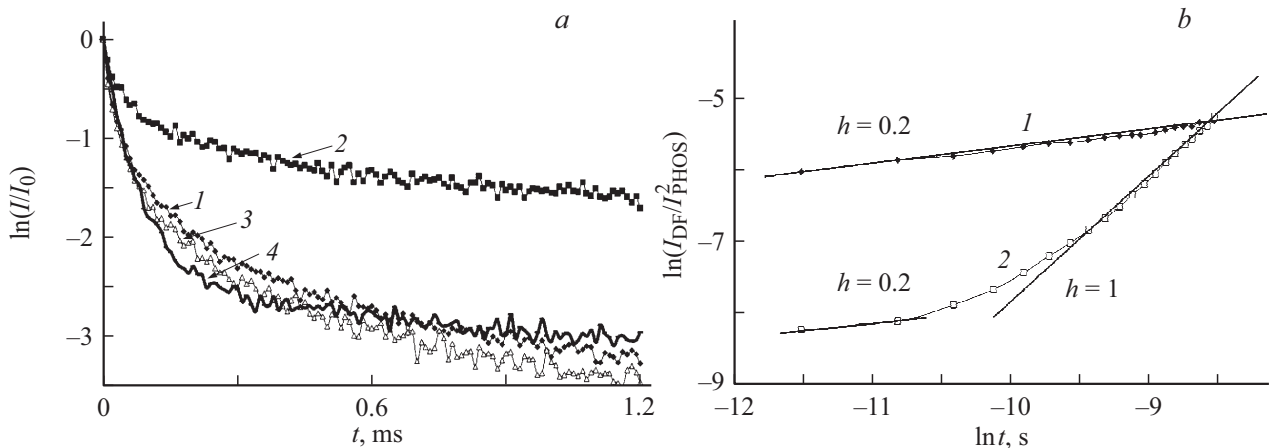


Рис. 4. (а) Кинетика замедленной флуоресценции (1, 3) и фосфоресценции (2, 4) пленок PFO (1, 2) и PFO-KI 1% (3, 4). (б) Описание кинетики затухания свечения в рамках перколяционной модели: 1 — PFO, 2 — PFO-KI 1% (размерность на оси абсцисс (рис. 4, *b*) относится к подлогарифмической величине).

Таблица 2. Время жизни АЗФ и фосфоресценции пленок PFO и PFO-KI 1%

Полимер	PFO	PFO-KI
$\tau_{\text{ЗФ}}$, ms	1.3	1.25
$\tau_{\text{Фос}}$, ms	2.6	2.4

Кинетика фотолюминесценции пленок PFO-KI была исследована как в микро-, так и в миллисекундном временных диапазонах. Характерные временные зависимости сигналов („кинетики“) приведены на рис. 4. Общий вид кинетической кривой имеет неэкспоненциальную форму затухания. По долговременной части кинетических кривых, имеющих форму, близкую к экспоненциальной, определялось время жизни свечения τ . Добавление примеси KI в полимерную пленку приводит к небольшому падению времени жизни как АЗФ, так и фосфоресценции PFO (табл. 2).

Как видно из спектральных данных, примесь KI приводит к росту неупорядоченности пленок PFO (рис. 1, табл. 1). Степень влияния неупорядоченности пленок на характер миграции триплетных возбуждений можно оценить, используя перколяционную модель, развитую в работах [31,32]. В перколяционной модели важным параметром является безразмерный показатель h , характеризующий степень локальной неоднородности среды. Нижний предел $h = 0$ соответствует движению электронного возбуждения (в том числе и экситонов) в квазиоднородной среде. Верхний предел $h = 1$ характеризует движение в локально неоднородных допороговых перколяционных кластерах. Для определения величины этого параметра строится график зависимости $\ln(I_{\text{ЗФ}}/I_{\text{Фос}}^2)$ от $\ln t$, где $I_{\text{ЗФ}}$ — интенсивность замедленной флуоресценции образца, а $I_{\text{Фос}}$ — интенсивность фосфоресценции. Угол наклона графика определяет значение параметра h . Ненулевой показатель h , связанный со спектральной размерностью фрактала, моделирующего структуру реальной среды, определяет временную зависимость удельной скорости бимолекулярной аннигиляции [32–34]. В работах [33,34] исследовалась асимптотическая стадия кинетики экситонных процессов в полимерных цепях с регулярной и нарушенной структурой и были получены временные зависимости удельной скорости биекситонной аннигиляции, наблюдаемой в сопряженных полимерах.

Анализ полученных данных в рамках перколяционной модели показал, что на временном интервале до $200 \mu\text{s}$ для пленки PFO наблюдается линейная зависимость с показателем $h = 0.2$, что свидетельствует о блуждании триплетного экситона в практически однородной среде. Для пленки PFO-KI поведение зависимости $\ln(I_{\text{ЗФ}}/I_{\text{Фос}}^2)$ от $\ln t$ можно описать при помощи двух линейных зависимостей с $h = 0.20$ и $h = 1$ (рис. 4). Это показывает, что в композитной пленке существуют две структурно неодинаковые фазы. В начальные моменты

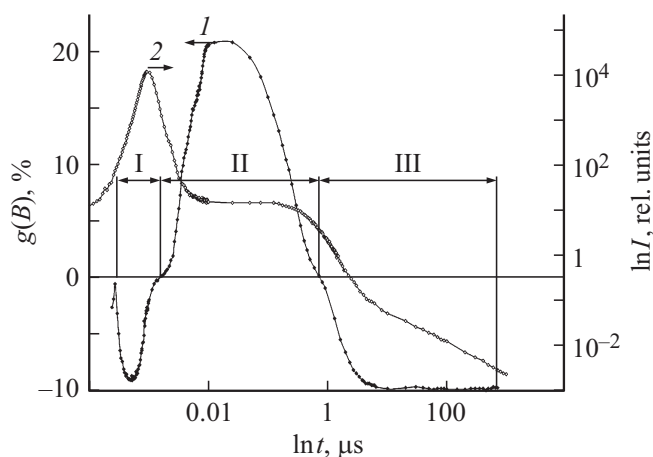


Рис. 5. Временная зависимость магнитного эффекта интенсивности свечения PFO (1) и кинетика затухания свечения (2) при $\lambda_{\text{рег}} = 440 \text{ nm}$, $B = 0.425 \text{ T}$ (размерности на оси абсцисс и на правой оси ординат относятся к подлогарифмическим величинам, для оцифровки упомянутых осей использованы значения именно подлогарифмических величин).

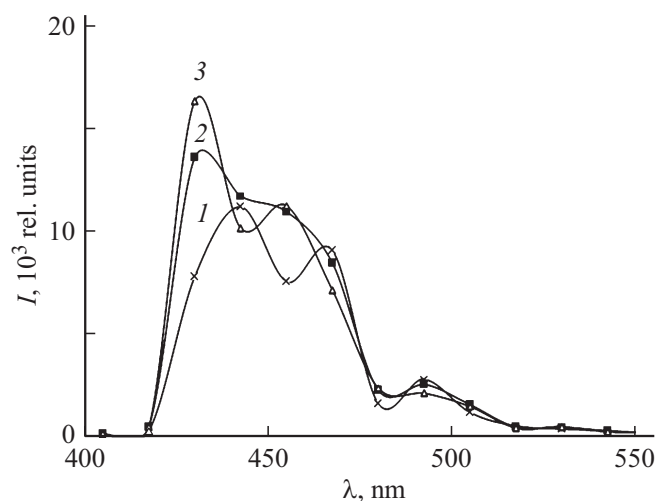


Рис. 6. Временноразрешенные спектры флуоресценции пленок PFO: время от начала регистрации сигнала 0.84 (1), 0.94 (2), 1.04 ns (3).

времени после фотовозбуждения доминирующий вклад в интенсивность АЗФ дают быстро мигрирующие экситоны в упорядоченной фазе. На временах более $30 \mu\text{s}$ кинетика АЗФ определяется аннигиляцией триплетов в неупорядоченной фазе.

Таким образом, анализ кинетики АЗФ и фосфоресценции показывает, что добавление примеси KI в PFO приводит к росту неупорядоченности полимерной пленки. Начальная кинетика АЗФ определяется парной аннигиляцией триплетных экситонов в упорядоченной фазе. На временах более $30 \mu\text{s}$ доминирующей становится аннигиляция электронных возбуждений в неупорядоченной фазе.

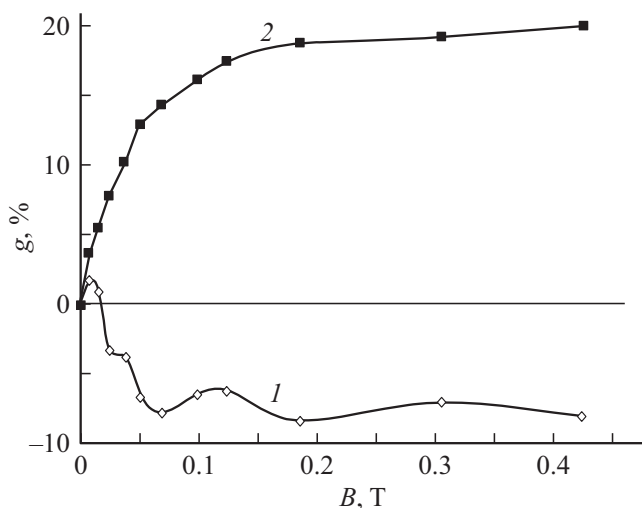


Рис. 7. Зависимость магнитного эффекта на стадии роста интенсивности флуоресценции в наносекундном (1) и микро-секундном (2) временных диапазонах.

Таблица 3. Время жизни АЗФ и фосфоресценции пленок PFO и PFO-KI 1%

Временной диапазон	g(B), %	
	PFO	PFO-KI
I	~ 8	~ 0
II	27.5	8
III	-10	-2

Анализ спектральных данных и кинетики фотолюминесценции ПК на основе PFO показал сложный характер влияния примеси KI на флуоресценцию. Дополнительным методом, позволяющим наблюдать сложные реакции с участием нескольких возбужденных электронных состояний различной мультиплетности, является использование внешнего магнитного поля в качестве зондирующего воздействия [17]. Чувствительность фотолюминесценции к воздействию внешнего магнитного поля позволяет получить дополнительную информацию о характере сложных фотопроцессов, протекающих в конденсированных средах [35].

Измерение величины $g(B)$ производилось в широком временном диапазоне от 0.1 ns до 1 ms. Результаты измерения временной зависимости $g(B)$ приведены на рис. 5. График временной зависимости $g(B)$ (рис. 5) можно условно разбить на три участка (I–III). На каждом из участков наблюдается магнитный эффект со своим значением $g(B)$. Во времени магнитный эффект меняется как по величине, так и по знаку.

Для сравнения на рис. 5 приведена кинетика флуоресценции пленки PFO. Сравнение данных кривых показывает, что магнитный эффект, наблюдаемый на участке I, формируется на стадии роста интенсивности флуоресценции полимера. На данной стадии про-

должает действовать лазерное возбуждение (рис. 2, а, кривая 5). Как показали измерения времяза разрешенных спектров флуоресценции, в данном временном диапазоне доминирует излучение от участков с кристаллической фазой полимера (рис. 6). Поэтому возникновение данного магнитного эффекта, видимо, связано с быстропротекающими спин-селективными процессами в кристалле PFO. О том, что данный процесс протекает в β -фазе полимера, говорит и форма кривой зависимости магнитного эффекта от индукции внешнего магнитного поля B (рис. 7, кривая 1). Данный вид зависимости характерен, например, для синглет-триплетных переходов, индуцированных сверхтонким взаимодействием (СТВ) неспаренных электронов с магнитными ядрами [35,36], или квинтет-синглетных переходов в триплет-триплетных парах, вызванных внутримолекулярным спин-спиновым взаимодействием [37]. Наблюдаемый ряд максимумов на кривой зависимости g от B также может свидетельствовать либо о СТВ-механизме магнитного эффекта, либо о внутртриплетном взаимодействии тонкой структуры на фоне относительно большого межтриплетного обменного взаимодействия. То есть данные максимумы могут быть связаны как с совместными переворотами электронного и ядерного спинов при сравнимых внутренних и внешних магнитных полях, так и с полевыми резонансами в „тесных“ $T-T$ -парах экситонов. Кроме того, наблюдаемые магнитные эффекты на участке I могут быть следствием синглет-триплетных переходов в связанных электронно-дырочных парах и в биполяронах [24].

Таким образом, полученные данные показывают, что в тех областях полимерной матрицы, где протекают реакции, приводящие к магнитному эффекту на участке I, присутствует упорядоченное строение полимерной структуры и внутреннее магнитное поле. Это говорит о протекании реакции в β -фазе полимера.

На участке III возникновение внешнего магнитного поля связано с АЗФ, которая возникает в результате аннигиляции свободно блуждающих триплетных экситонов, составляющих „рыхлые“ пары [19,37]. Для АЗФ такого типа характерны отрицательные значения $g(B)$, что и наблюдается на этом временном участке. Величина $g(B)$ мало изменяется на всем временном интервале участка III.

Добавление примеси KI приводит к исчезновению магнитного эффекта на участке I, что, видимо, связано с уменьшением доли β -фазы в объеме полимера либо с нарушением условий формирования „тесных“ $T-T$ -пар. Понижение $g(B)$ на временных участках II и III (табл. 3) может быть обусловлено конкурирующим влиянием спин-орбитального взаимодействия (СОВ) и внешнего магнитного поля на спин-селективные процессы, протекающие с участием как синглетных, так и триплетных возбуждений в полимере [38].

Заключение

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства пленок PFO, допированных примесью KI. По спектрам поглощения определена степень упорядоченности пленок ПК. Установлено, что добавление соли KI приводит к уменьшению степени упорядоченности пленок PFO и к уменьшению квантового выхода флуоресценции.

Исследована кинетика фотолюминесценции пленок PFO-KI в нано-, микро- и миллисекундном временных диапазонах. Анализ экспериментальных данных длительной люминесценции на основе перколяционной модели показал, что добавление примеси KI в полимер приводит к росту неупорядоченности пленки. Данная неупорядоченность оказывает большое влияние на временные характеристики АЗФ и фосфоресценции на временах регистрации свыше $50 \mu\text{s}$ после лазерного фотовозбуждения.

Исследования влияния внешнего магнитного поля на люминесценцию PFO в нано-, микро- и миллисекундном диапазонах показали сложный характер временной зависимости магнитного эффекта. Наблюдаются неоднократные изменения как величины, так и знака $g(B)$ на всем исследованном временном диапазоне. В чистой пленке PFO на временах менее 1 ns наблюдается магниточувствительный фотопроект, протекающий в упорядоченной фазе полимера. Добавление примеси KI изменяет величину $g(B)$, но не меняет временных характеристик магнитного эффекта.

Работа поддержана Министерством образования и науки Республики Казахстан.

Список литературы

- [1] Liedtke M., Sperlich A., Kraus H., Baumann A., Deibel C., Wirix M.J.M., Loos J., Cardona C.M., Dyakonov V. // J. Am. Chem. Soc. 2011. V. 133. N 23. P. 9088. doi 10.1021/ja2025432
- [2] Khetubol A., Van Snick S., Hassinen A., Fron E., Firdaus Y., Pandey L., David C.C., Duerinckx K., Dehaen W., Hens Z., Van der Auweraer M. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 083507. doi 10.1063/1.4793266
- [3] Davidenko N., Ishchenko A., Kuvshinskii N. Photonics of Molecular Semiconductor Composites Based on Organic Dyes. Kiev: Naukova Dumka, 2005. 295 p. [in Russian]
- [4] Park H.-J., Vak D., Noh Y.-Y., Lim B., Kim D.-Y. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 161107. doi 10.1063/1.2721134
- [5] Liu X., Wu B., Zhang Q., Yip J.N., Yu G., Xiong Q., Mathews N., Sum T.C. // ACS Nano. 2014. V. 8. N 10. P. 10101. doi 10.1021/nn505020e
- [6] Kuvshinsky N.G., Davidenko N.A., Comko V.M. Physics of Amorphous Molecular Semiconductors. Kiev: Lybid, 1994. 176 p. [in Russian]
- [7] Berberan-Santos M.N. // Phys.Chem.Comm. 2000. V. 3. P. 18. doi 10.1039/b002307h
- [8] McGlynn S.P., Azumi T., Kinoshita M. Molecular spectroscopy of the triplet state. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1969. 434 p.
- [9] Соловьев К.Н., Борисевич Е.А. // УФН. 2005. Т. 175. N 3. С. 247; Solovoyov K.N., Borisevich E.A. // Sov. Phys. Usp. 2005. V. 48. N 3. P. 231. doi 10.1070/PU2005v048n03ABEH001761
- [10] Tsoi W.C., James D.T., Buchaca E.D., Kim J.S., Al-Hashimi M., Murphy C.E., Stingelin N., Heeney M., Kim J.-S. // ACS Nano. 2012. V. 6. N 11. P. 9646. doi 10.1021/nn304024g
- [11] Yang K., Arif M., Förster M., Scherf U., Guha S. // Synth. Met. 2009. V. 159. P. 2338. doi 10.1016/j.synthmet.2009.07.041
- [12] Zhu W., Mo Y., Yuan M., Yang W., Cao Y. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 2045. doi 10.1063/1.1461418
- [13] Chen F.-C., He G., Yang Y. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 1006. doi 10.1063/1.1544658
- [14] Gong X., Ostrowski J.C. et al. // Adv. Mater. 2003. V. 15. P. 45.
- [15] Kalaigan G.P., Kang M.-S., Kang Yo.S. // Solid State Ionics. 2006. V. 177. P. 1091. doi 10.1016/j.ssi.2006.03.013
- [16] Nadimicherla R., Kalla R., Muchakayala R., Guo X. // Solid State Ionics. 2015. V. 278. P. 260. doi 10.1016/j.ssi.2015.07.002
- [17] Herz L.M., Phillips R.T. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. N 20. P. 13691. doi 10.1103/PhysRevB.61.13691
- [18] Ariu M., Sims M., Rahn M. D. et al. // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. P. 195333. doi 10.1103/PhysRevB.67.195333
- [19] Hertel D., Bassler H. et al. // J. Chem. Phys. 2001. V. 115. P. 10007. doi 10.1063/1.1415446
- [20] Grell M., Bradley D.D.C., Inbasekaran M. // Synth. Met. 2000. V. 111. P. 579. doi 10.1016/S0379-6779(99)00312-4
- [21] Perevedentsev A., Chander N., Kim J.-S., Bradley D.D.C. // J. Polymer Sci. Part b: Polymer Phys. 2016. V. 54. P. 1995. doi 10.1002/polb.24106
- [22] Khan A.L.T., Sreearunothai P. et al. // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. P. 085201. doi 10.1103/PhysRevB.69.085201
- [23] Zel'dovich Ya.B., Buchachenko A.L., Frankevich E.L. // Sov. Phys. Usp. 1988. V. 1. N 5. P. 385. doi 10.1070/PU1988v031n05ABEH003544
- [24] Janssen P., Cox M. et al. // Nature Commun. 2013. V. 4. P. 2286. doi 10.1038/ncomms3286
- [25] Ibrayev N.Kh., Afanasyev D.A. // Chem. Phys. Lett. 2012. V. 538. P. 39. doi 10.1016/j.cplett.2012.04.024
- [26] Afanasyev D.A., Gimazetdinov R.J. // Bull. Univ. Karaganda. Ser. Phys. N 2 (50). P. 1.
- [27] Quan Sh., Teng F., Xu Zh. et al. // Eur. Polymer J. 2006. V. 42. P. 228. doi 10.1016/j.eurpolymj.2005.06.025
- [28] Jumali M.H.H., Al-Asbahi B.A., Yap Ch.Ch. // Thin Solid Films. 2012. V. 524. P. 257. doi 10.1016/j.tsf.2012.09.067
- [29] Nurmakhanova A.K., Afanasyev D.A., Ibrayev N.Kh. // Eurasian Phys. Tech. J. 2017. V. 14. N 2 (28). P. 72.
- [30] SPCImage 3.9.4 Data Analysis Software for Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy. Becker & Hickl GmbH. September, 2012.
- [31] Багнич С.А. // ФТТ. 2000. Т. 42. № 10. С. 1729; Bagnich S.A. // Physics of the Solid State. 2000. V. 42. N 10. P. 1775. doi 10.1134/1.1318866.
- [32] Kopelman R. Energy transfer in mixed molecular crystals. Spectroscopy and dynamics of excitations in condensed molecular systems. Ed. Agranovich V.M., Hochstrasser R.M. M.: Nauka, 1987. P. 61. [in Russian]
- [33] Кучеренко М.Г., Степанов В.Н., Чмерева Т.М. // Вестник ОГУ. 2004. № 9. С. 127.

- [34] Кучеренко М.Г., Летуа С.Н., Степанов В.Н. // Вестник ОГУ. 2006. № 5. С. 10.
- [35] Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Новосибирск: Наука, 1978. 296 с.
- [36] Салихов К.М. 10 лекций по спиновой химии. Казань: УНИПРЕСС, 2000. 152 с.
- [37] Поуп М., Свенберг Ч. Электронные процессы в органических кристаллах. М.: Мир, 1985. Т. 1. 543 с.
- [38] Кеңде Г.А., Левшин Л.В., Мельников Г.В. // ЖПС. 1981. Т. 35. В. 3. С. 443.