

УДК 541.64:535.37

ЭЛЕКТРОФОСФОРЕСЦЕНЦИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ ПОЛИИМИДОВ, ДОПИРОВАННЫХ Pt-ПОРФИРИНАМИ¹

© 2006 г. Е. И. Мальцев*, М. А. Брусенцева*, В. Д. Румянцева**, Д. А. Лышенко*,
В. И. Берендейев***, А. Ф. Миронов**, С. В. Новиков*, А. В. Ваников*

*Институт электрохимии им. А.Н. Фрумкина
Российской академии наук
119991 Москва, Ленинский пр., 31

**Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова
119571 Москва, пр. Вернадского, 86

***Государственный научный центр Российской Федерации
“Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова”
105064 Москва, Воронцовское поле, 10

Поступила в редакцию 16.02.2005 г.
Принята в печать 12.09.2005 г.

Исследован механизм электролюминесценции в полимерных тонкослойных структурах на основе ароматических полииimidов и различных молекулярных комплексов Pt-порфиринов как люминофоров, содержащих тяжелый атом. Исходя из спектральных и электронно-дырочных транспортных свойств ароматических ПИ и Pt-порфиринов, а также имеющихся представлений в фотонике полимеров, обсуждены процессы синглет-синглетного и триплет-триплетного переноса энергии в изученных однослойных системах ароматический ПИ–Pt-порфирины с высоким квантовым выходом электрофосфоресценции, превышающим 2%.

Полимерные материалы с электролюминесцентными свойствами вызывают большой интерес. Само явление электролюминесценции полимеров – испускание света высокомолекулярными тонкослойными структурами под действием электрического поля – подробно изучается с начала 90-х годов [1]. Достигнут важный прогресс не только в разработке новых эффективных высокомолекулярных светоизлучающих материалов, но и в создании прототипов сверхплоских полимерных цветных дисплеев большого формата на гибкой основе. Внимание к исследованиям в данной области особенно возросло, когда стала очевидной перспектива использования полимерных электролюминесцентных материалов в качестве ис-

точников света, способных в будущем заменить традиционные источники света: лампы накаливания и газоразрядные люминесцентные приборы. Принцип работы этого нового поколения высокоеэкономичных светоизлучающих источников основан на свойстве тонкослойных полимерных структур излучать свет приложении небольших (<10 В) потенциалов.

Механизм электролюминесценции включает ряд последовательно протекающих процессов, инициированных инжекцией электронов и дырок из соответствующих электродов в светоизлучающий полимерный слой под действием внешнего электрического поля. В объеме полимера указанные носители, представляющие собой поляроны обоих знаков, в процессе движения навстречу друг другу рекомбинируют вследствие кулоновского взаимодействия, создавая возбужденные квазичастицы – синглетные (S) и триплетные (T) экситоны. Согласно квантовой статистике, соотношение их концентраций в объеме $[S] : [T] = 1 : 3$. Первоначально исследовали материалы с флуоресцентной природой излучения, т.е. когда в процессе генерации света участвуют только синглет-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 03-03-33067 и 05-03-33052), а также Международного научно-технического центра (проекты 2207, 623-2, 2461). Работа частично поддержана Фондом содействия отечественной науке, Фондом гражданских исследований и развития США (грант RE2-2524-MO-03) и в рамках Федеральной целевой научно-технической программы по направлению “Индустрия наносистем и материалы” (проект ИН.13.2/001).

E-mail: eugenemail@rambler.ru (Мальцев Евгений Иванович).

ные экситоны. Однако последние составляют лишь 25% от общего числа образующихся электронно-возбужденных состояний. В работах [2, 3] на примере низкомолекулярных органических систем была экспериментально показана возможность участия в превращении электрической энергии в свет не только синглетных, но и триплетных экситонов.

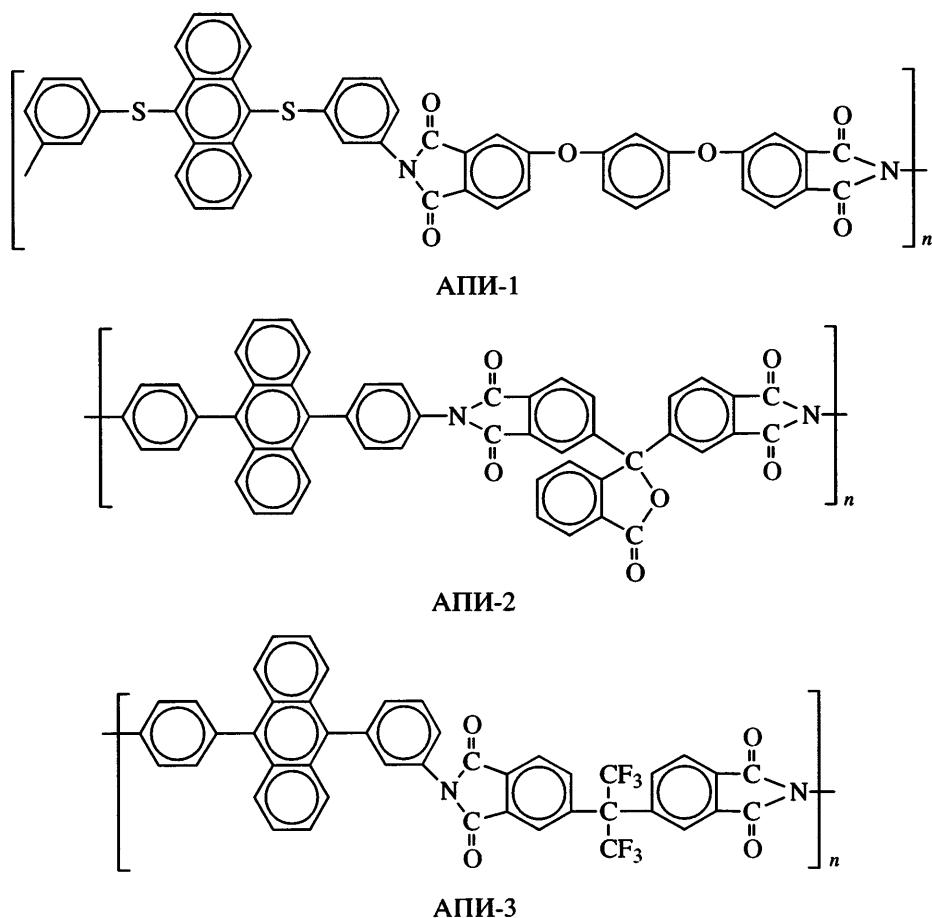
По аналогии с принятой в фотофизике терминологией, где процесс испускания из T_1 -состояний называют фосфоресценцией, в зарубежной литературе испускание света триплетными экситонами в органических светодиодных структурах принято обозначать терминами “электролюминесценция из T_1 -состояний”, либо “электрофосфоресценция”. Возникновению электрофосфоресценции благоприятствует наличие в молекулах – люминофорах тяжелого атома с большой константой спин-орбитальной связи (“эффект тяжелого атома”). В настоящее время ведется интенсивный поиск новых электрофосфоресцентных низкомолекулярных органических систем и высокомолекулярных

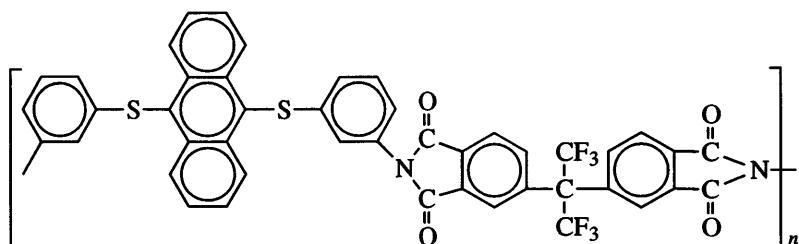
материалов для создания слоистых структур на их основе. Изучаются особенности механизмов электрофосфоресценции в новых светоизлучающих полимерных системах в зависимости от их спектральных и электрофизических свойств, а также строения молекулярных донаторов, содержащих атомы тяжелых металлов [4–8].

В настоящей работе впервые исследованы электрофосфоресцентные свойства светодиодных структур, использующих новый тип проводящих полимеров с эффективным электронно-дырочным транспортом, – ароматические ПИ (АПИ). На основании полученных спектральных и электрофизических данных обсужден механизм переноса электронного возбуждения в этих электроактивных полимерных средах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

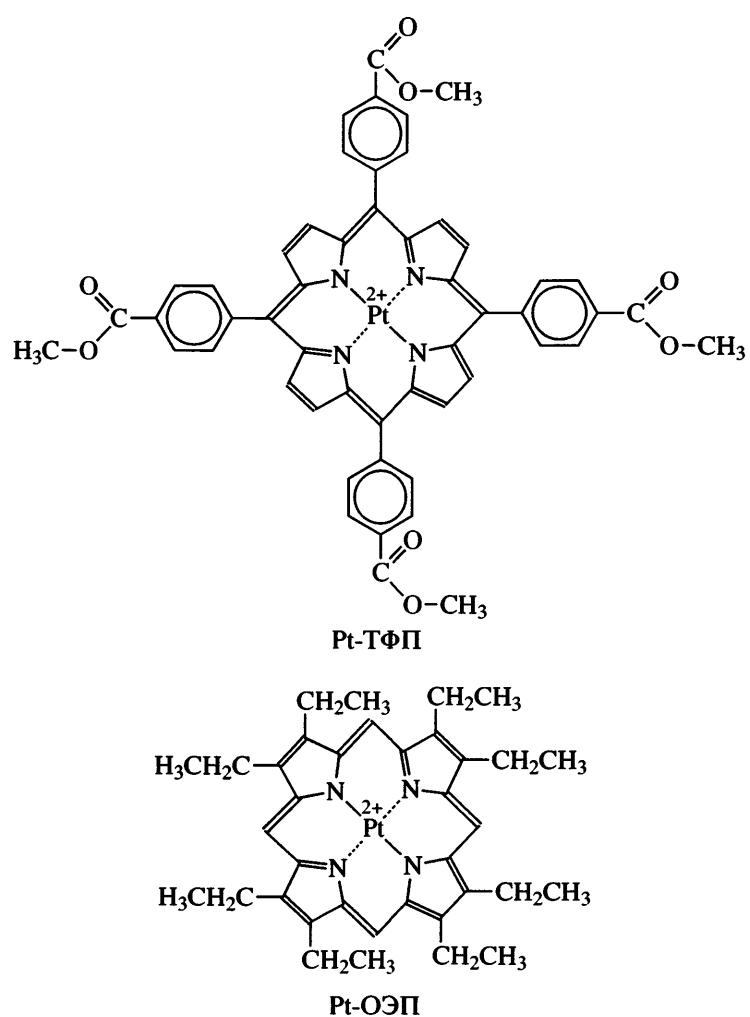
Изучены следующие ароматические ПИ с биполярным электронно-дырочным транспортом:





АПИ-4

В исследованных ранее электролюминесцентных структурах некоторые из этих термостойких полимеров служили одновременно в качестве токопроводящей и светоизлучающей среды [9–11]. В качестве низкомолекулярных допантов, содержащих атомы тяжелых металлов, использовали Pt-комpleksы: 5,10,15,20-тетракис(4-метоксикарбонилфенил)порфирины платины (II) (**Pt-ТФП**) и 2,3,7,8,12,13,17,18-октаэтилпорфирины платины (II) (**Pt-ОЭП**).



Гибкими прозрачными подложками служили пленки ПЭТФ, покрытые слоем токопроводящего электрода (анод) на основе смеси $In_2O_3-SnO_2$ (ITO) (рис. 1) с поверхностным сопротивлением 30 Ом.

Полимерные слои готовили из растворов ароматических ПИ в хлороформе из расчета 10.0 мг полимера на 1.0 мл растворителя при 40°C. В растворы вводили заданное количество Pt-ТФП. Формирование слоев определенной толщины

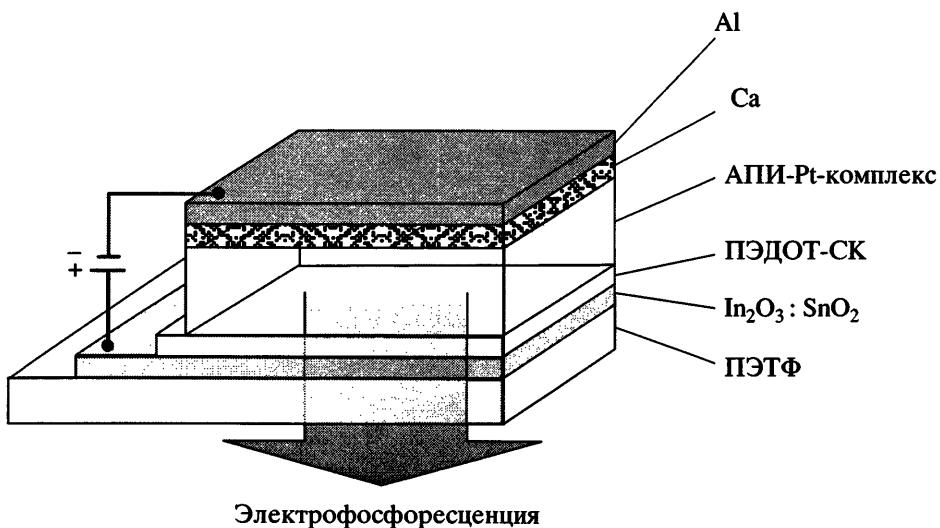


Рис. 1. Многослойная электролюминесцентная полимерная структура, содержащая светоизлучающий слой состава АПИ–Pt-комплекс.

($d \leq 100$ нм) осуществляли методом полива на центрифуге (3000 об/мин) в среде сухого аргона. Предварительно на смесь $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ наносили инжекционный слой состава полиэтилендиокси-тиофен (ПЭДОТ) – стирол-сульфокислота (СК) также методом полива на центрифуге. Перед нанесением ПЭДОТ-СК поверхность анода тщательно очищали последовательной обработкой на ультразвуковой установке в растворах изопропилового спирта, ацетона и хлороформа. На конечной стадии очистки поверхность анода облучали УФ-излучением ксеноновой лампы с длиной волны излучения 172 нм. Подготовку поверхности и нанесение слоев проводили при комнатной температуре. Конечная стадия изготовления многослойной структуры состояла в нанесении слоя непрозрачного металлического катода методом термического вакуумного испарения Са или Mg при давлении 10^{-6} мм рт. ст. Для этого использовали установку ВУП-5, оборудованную высоковакуумным турбомолекулярным насосом с целью избежания возможного контакта со следами вакуумного масла в зоне напыления. Для защиты металлического катода от окисления кислородом воздуха и воздействия воды сверху дополнительно наносили изолирующий слой серебра.

Многослойная светодиодная структура представлена на рис. 1. Толщину полимерных слоев измеряли с помощью профилографа-профилометра модели М-170, а также на интерференционном микроскопе модели МИИ-4М с визуализацией изо-

бражения (Программа “Видео ТесТ – Размер 5.0”). Спектры поглощения и электролюминесценции тонкослойных структур записывали на оптоволоконном спектрофотометре PC2000 и спектрофлюориметре SF2000 фирмы “Ocean Optics” как в боксе, наполненном аргоном, так и на воздухе. Спектры фотoluminesценции и фосфоресценции полимерных слоев регистрировали на спектрофлюориметре модели “Hitachi 850”. Яркость излучения образцов измеряли с помощью люксметра – яркомера модели ТКА-ПК. Кривые отклика сигнала электролюминесценции на подачу импульса напряжения, а также вольтамперные и диодные характеристики излучающих полимерных структур регистрировали с помощью автоматической установки на базе ЦЗО-01.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры оптического поглощения и фотoluminesценции индивидуальных компонентов, входящих в состав композиций Pt-TFP-АПИ и Pt-OЭП-АПИ, представлены на рис. 2 и 3. Поскольку главным условием в процессах переноса электронного возбуждения является перекрывание спектра излучения донора со спектром поглощения акцептора, при выборе компонентов особое внимание обращали на взаимное расположение соответствующих полос. Как было установлено, строение макромолекул АПИ хотя и оказывает определенное влияние на интенсивность полосы

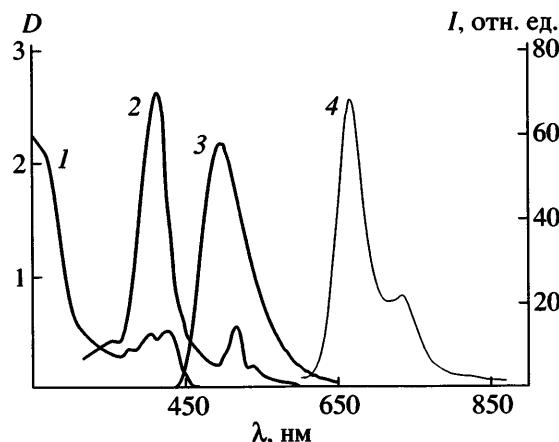


Рис. 2. Спектры оптического поглощения (1, 2) и фотолюминесценции (3, 4) слоев АПИ-1 (1), Pt-ТФП в ПК (2), АПИ-1 и Pt-ТФП в ПК при возбуждении светом с длиной волны 350 (3) и 450 нм (4) соответственно.

излучения электролюминесценции, расположенной в зеленой области спектра, ее ширину и положение максимума, оно, однако, несущественно. Поэтому наши основные результаты будут приведены для систем на основе АПИ-1. Спектры фотолюминесценции АПИ-1 (рис. 2, кривая 3; рис. 3, кривая 2) перекрываются с полосами поглощения Pt-ТФП (рис. 2, кривая 2) и Pt-ОЭП (рис. 3, кривая 1) в области длины волн 430–600 нм, что указывает на возможность эффективного переноса энергии в обеих системах.

На рис. 4 приведены данные по влиянию концентрации Pt-ТФП на форму спектров электролюминесценции полимерных композиций АПИ-1/Pt-ТФП в светодиодных структурах. У всех изученных АПИ спектр электролюминесценции представляет собой широкую одиночную полосу с максимумом в области 490–520 нм (рис. 4, кривая 1). Видно, что по мере роста концентрации Pt-ТФП в слое уменьшается амплитуда полосы излучения полимерной матрицы. Одновременно появляются новые интенсивные полосы с максимумами при 670 и 778 нм (рис. 4, кривые 4 и 5). Первая полоса связана с излучательной релаксацией синглетно-возбужденных молекул Pt-ТФП (рис. 2, кривая 4). Характерный сдвиг максимума у этой полосы в спектре электролюминесценции на 10 нм в длинноволновую сторону по сравнению со спектром фотолюминесценции ($\lambda_{\text{макс}} = 660$ нм) объясняется различием в механизме фото- и электролюминесценции. В первом

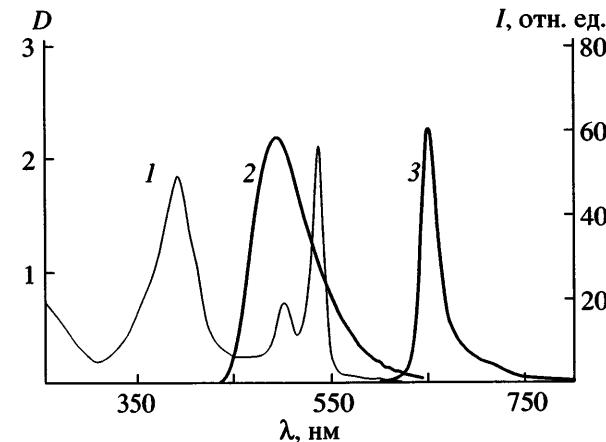


Рис. 3. Спектры оптического поглощения (1), флуоресценции (2) и электрофосфоресценции (3) слоев Pt-ОЭП в ПК (1), АПИ-1 при возбуждении светом с длиной волны 350 нм (2) и Pt-ОЭП (1 мас. %) в АПИ-1 (3).

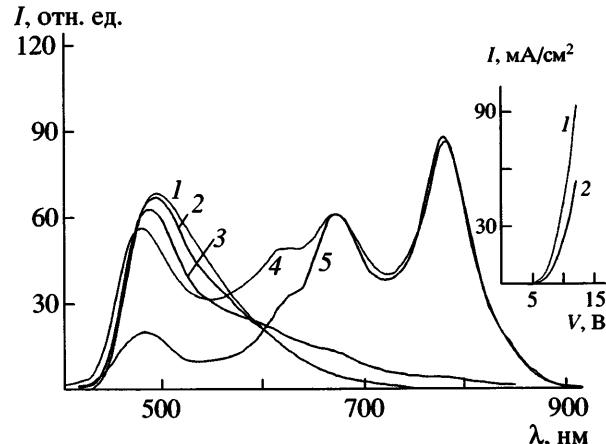
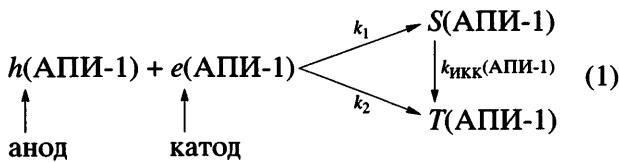


Рис. 4. Спектры электрофосфоресценции светоизлучающих слоев состава АПИ-Пт-ТФП при содержании Pt-ТФП = 0 (1), 5 (2), 10 (3), 20 (4) и 40% (5). На вставке приведены вольтамперные $I(V)$ характеристики АПИ-1 (1) и АПИ-1-Pt-ТФП (2).

случае имеет место прямое воздействие квантов света с $\lambda = 450$ нм на молекулы комплекса, тогда как в электролюминесценции основную роль играют транспорт носителей зарядов, их захват и объемная рекомбинация [10]. Длинноволновые полосы в спектрах электролюминесценции АПИ-Пт-ТФП при повышенном содержании донора (рис. 4, кривые 4 и 5) связаны с его электрофосфоресценцией (рис. 5, кривая 2), что прямо указывает на вклад триплетных состояний комплексов платины в электрофосфоресценцию.

Исходя из полученных данных и представлений фотофизики полимеров [12], можно предположить, что протекает ряд процессов с участием триплетных состояний комплексов платины $T(\text{Pt}-\text{TФП})$. Первичная стадия механизма электрофосфоресценции состоит в инжекции дырок $h(\text{АПИ-1})$ и электронов $e(\text{АПИ-1})$ из электродов в слой АПИ-1 по реакции:



Вероятности их бимолекулярной рекомбинации в объеме полимера, приводящей к образованию синглетных $S(\text{АПИ-1})$ и триплетных $T(\text{АПИ-1})$ экситонных состояний равны k_1 и k_2 (1), где $k_{\text{ИКК}}$ – вероятность интеркомбинационной конверсии. Далее перенос энергии экситонов на Pt-TФП может происходить как по дальнодействующему диполь-дипольному механизму Ферстера [13], так и контактному механизму туннелирования Декстера [14]. Диполь-дипольный механизм – это резонансный процесс, в котором для каждой конкретной системы, включающей донор и акцептор, перенос возможен только между синглетными состояниями. При этом спины донора и акцептора не изменяются. Эффективность такого процесса напрямую зависит от степени перекрытия спектра испускания донора и полосы поглощения акцептора и уменьшается обратно пропорционально шестой степени расстояния между центрами переноса. Она характеризуется величиной ферстеровского радиуса переноса, равного среднему расстоянию между донором и акцептором, на котором вероятность переноса энергии возбуждения равна вероятности релаксации возбужденного состояния донора.

Перенос энергии по короткодействующему механизму Декстера представляет собой процесс туннелирования электрона между донором и акцептором, расположенными на расстоянии менее 1 нм. В отличие от диполь-дипольного механизма в данном случае сохраняется лишь суммарный спин системы, а не отдельно спин донора и спин акцептора. Таким образом, становится разрешенным триплет-триплетный ($T-T$) перенос между партнерами. Необходимо, чтобы спектр фосфоресценции полимера хотя бы частично перекры-

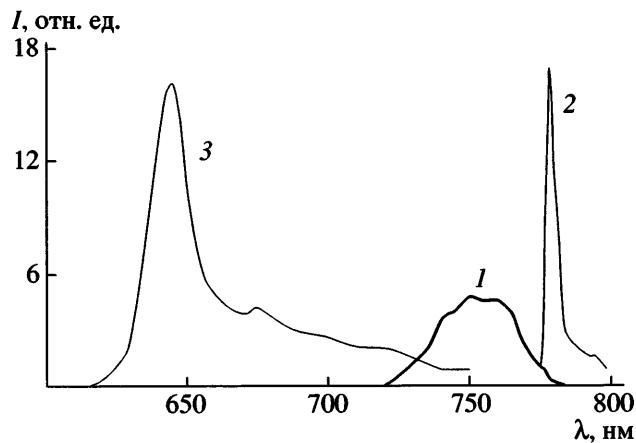
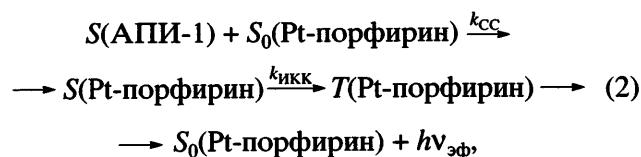
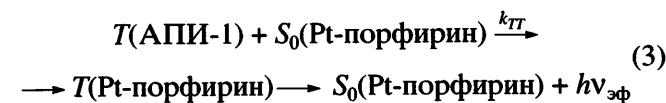


Рис. 5. Спектры фосфоресценции полимерных слоев: 1 – чистый АПИ-1, 2 – Pt-ТФП в ПК, 3 – Pt-ОЭП в ПК.

вался со спектром, связанным с электронным переходом из основного синглетного состояния на низший триплетный уровень у акцептора. Компоненты, входящие в транспортный светоэмиссионный слой АПИ–Pt-ТФП, удовлетворяют этим условиям. Рост концентрации триплетных состояний комплекса $T(\text{Pt-порфирин})$ в полимерном слое возможен по двум путям. Во-первых, по реакции, включающей две стадии:



синглет-синглетный перенос энергии и интеркомбинационную конверсию с соответствующими константами процессов k_{CC} и $k_{\text{ИКК}}$. Во-вторых, по туннельному механизму:



При этом не исключен обратный перенос энергии:



Как следует из данных по влиянию концентрации Pt-TФП на спектр электрофосфоресценции дипированных слоев АПИ-1 (рис. 4), излучение комплекса присутствует лишь при больших концентрациях донанта (кривые 4 и 5). Электрофос-

форесценцию не наблюдали даже в образцах, содержащих 10% Pt-ТФП. При гомогенном распределении допанта в слое полимера расстояние между соседними молекулами Pt-ТФП не превышает 25 Å, т.е. максимальное удаление молекулы комплекса от образующегося экситона $R = 12.5$ Å. Расстояние R_0 , на котором вероятность переноса энергии синглетного эксиплекса на акцептор равна вероятности внутренней дезактивации этого возбужденного состояния [13], определяли из выражения

$$R_0^6 = 1.25 \times 10^{17} \frac{\Phi_E}{n^4} \int_0^\infty F_D(\bar{v}) \epsilon_A(\bar{v}) \frac{d\bar{v}}{\bar{v}^4}, \quad (5)$$

где Φ_E – квантовый выход флуоресценции донора (АПИ-1), n – показатель преломления АПИ-1, $F_D(v)$ – спектр флуоресценции АПИ-1 в шкале волновых чисел, нормированный на единицу. Величина R_0 для системы АПИ-1–Pt-ТФП получена равной 60 Å. Это значительно больше, чем максимальное расстояние между экситоном и ближайшей молекулой Pt-ТФП при условии гомогенного распределения акцептора. Можно ожидать переноса синглетной энергии с макромолекулы S(АПИ-1) на S_0 (Pt-ТФП) по реакции (2) с большим значением константы процесса k_{CC} , определяемой из выражения

$$k_{CC} = 1.25 \times 10^{17} \left(\frac{\Phi_E}{n^4 \tau_D r^6} \right) \int_0^\infty F_D(\bar{v}) \epsilon_A(\bar{v}) \frac{d\bar{v}}{\bar{v}^4} \quad (6)$$

Вследствие этого возникает излучение электрофосфоресценции, принадлежащего триплетам Pt-ТФП, образующимся на второй стадии с константой $k_{икк}$. Однако экспериментально излучения триплетов Pt-ТФП при концентрации 10 мас. % не наблюдали (рис. 4, кривая 3). В спектре электролюминесценции присутствует полоса, связанная с излучением синглетных возбужденных состояний АПИ-1. Вклад излучения триплетов допанта в спектр электролюминесценции системы не становится преобладающим даже при очень большой концентрации Pt-ТФП (кривые 4 и 5). Одновременно в спектре присутствует полоса, принадле-

жающая излучению синглетно-возбужденных молекул комплекса. Низкая эффективность электрофосфоресценции в случае АПИ-1–Pt-ТФП может быть связана с присутствием в молекулах допанта карбоксильных групп, исполняющих роль тушителей синглетных экситонных состояний.

Электролюминесцентные свойства структур резко изменялись при введении в слой АПИ-1 комплекса Pt-ОЭП. Уже при концентрации Pt-ОЭП 1 мас. % наблюдали интенсивное излучение электрофосфоресценции малинового цвета в виде одиночной полосы с $\lambda_{\max} = 645$ нм, принадлежащей триплетам этих частиц (рис. 3, кривая 3). Значение R_0 для системы АПИ–Pt-ОЭП, полученное из выражения (5), равно 43 Å. При условии гомогенного распределения это существенно больше максимального расстояния между экситонами и молекулами Pt-ОЭП, равного 25 Å. Поэтому эффективно протекает синглет-синглетный перенос энергии.

Для обсуждения возможности прямого $T-T$ -переноса энергии необходима информация о положении триплетных уровней партнеров. Поскольку спектр фосфоресценции АПИ-1 с максимумом при $\lambda_{\max} = 750$ нм (рис. 5, кривая 1) значительно сдвинут в низкоэнергетическую область по отношению к полосе фосфоресценции комплекса Pt-ОЭП ($\lambda_{\max} = 645$ нм), $T-T$ -перенос для такой системы исключен. Наоборот, в случае АПИ-1–Pt-ТФП $T-T$ -перенос принципиально возможен, поскольку полоса фосфоресценции молекул Pt-ТФП (рис. 5, кривая 2) находится с низкоэнергетической стороны по отношению к полосе испускания макромолекул (кривая 1). Действительно, в системе АПИ-1–Pt-ТФП в присутствии большой концентрации Pt-ТФП в суммарном спектре электрофосфоресценции (рис. 4, кривая 5) наиболее интенсивная полоса принадлежит триплетам комплекса.

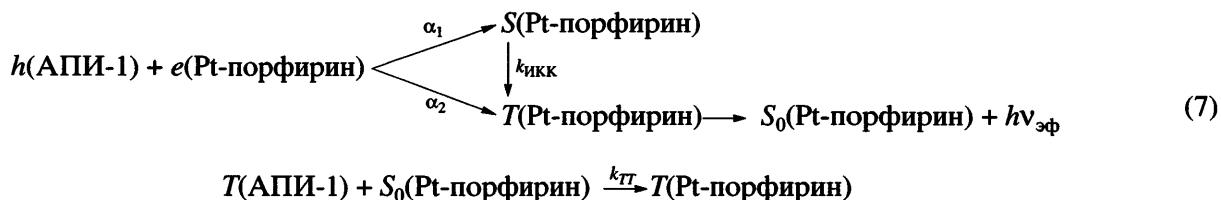
Важно иметь в виду, что механизм электрофосфоресценции в системах АПИ–Pt-порфирина может включать стадию непосредственного акцептирования носителей заряда комплексами платины в объеме полимера. Наиболее вероятно, что этими носителями будут электроны. На такое поведение Pt-комплексов указывают вольтамперные характеристики чистой полимерной матри-

цы и слоев АПИ-1-Pt-ОЭП (рис. 4, вставка). Как видно, величина тока в слоях АПИ-1-Pt-ОЭП уменьшается вдвое по сравнению с чистым АПИ-1. Таким образом, рекомбинация инжектированных в слой полимера дырок происходит не только со свободными электронами, но и с электронами, захваченными на молекулах Pt-комплексов как на

ловушках. При этом возбужденные состояния оказываются локализованными непосредственно на молекулах люминофора-акцептора:



Затем следует релаксация с испусканием кванта электрофосфоресценции по реакции



Квантовая эффективность электрофосфоресценции в образцах АПИ-1-Pt-ОЭП превышает 2% при концентрации комплексов 10 мас. %.

Из полученных данных следует, что полимерные слои на основе АПИ представляют собой эффективные электрофосфоресцентные среды в присутствии платиновых комплексов порфирина определенного строения и соответствующих спектрально-энергетических характеристик. При этом спектр электролюминесценции определяется только участием в излучении триплетных состояний донанта. Механизм электрофосфоресценции включает в качестве первичной стадии захват носителя заряда на молекуле Pt-ОЭП как на ловушке и последующую рекомбинацию со свободным зарядом противоположного знака из объема полимера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burroughes J.H., Bradley D.D.C., Brown A.R., Marks R.N., Mackay K., Friend R.H., Burns P.L., Holmes A.B. // Nature (London). 1990. V. 347. № 6293. P. 539.
2. Baldo M.A., O'Brien D.F., You Y., Shoustikov A., Sibley S., Thompson M.E., Forrest S.R. // Nature (London). 1998. V. 395. № 6698. P. 151.
3. Baldo M.A., O'Brien D.F., Thompson M.E., Forrest S.R. // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. P. 14422.
4. Tessler N., Ho P.K.H., Cleave V., Pinner D.J., Friend R.H., Yahioglu G., Le Barny P., Gray J., de Souza M., Rumbles G. // Thin Solid Films. 2000. V. 363. № 1–2. P. 64.
5. O'Brien D.F., Giebel C., Fletcher R.B., Cadby A.J., Palilis L.C., Lidzey D.G., Lane P.A., Bradley D.D.C., Blau W. // Synth. Met. 2001. V. 116. № 1–3. P. 379.
6. Chen F.C., He G., Yang Y. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. № 7. P. 1006.
7. Li F., Zhang M., Feng J., Cheng G., Wu Z., Ma Y., Liu S., Sheng J., Lee S.T. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 2. P. 365.
8. Tokito S., Suzuki M., Kamachi M., Shirane K., Sato F. // Proc. Conf. Electroluminescence 2002. Ghent, Belgium. P. 283.
9. Mal'tsev E.I., Brusentseva M.A., Kolesnikov V.A., Berendyaev V.I., Kotov B.V., Vannikov A.V. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. № 24. P. 3480.
10. Mal'tsev E.I., Brusentseva M.A., Lypenko D.A., Berendyaev V.I., Kolesnikov V.A., Kotov B.V., Vannikov A.V. // Polym. Adv. Technol. 2000. V. 11. № 7. P. 325.
11. Мальцев Е.И., Лыпенко Д.А., Шапиро Б.И., Milburn G.H.W., Wright J., Брусенцева М.А., Берендейев В.И., Котов Б.В., Ванников А.В. // Высокомолек. соед. А. 2000. Т. 42. № 2. С. 299.
12. Гиллем Дж. Фотофизика и фотохимия полимеров. М.: Мир, 1988. С. 32.
13. Förster T. // Ann. Phys. (Leipzig). 1948. V. 2. P. 55.
14. Dexter D.L. // J. Chem. Phys. 1953. V. 21. № 5. P. 836.

Electrophosphorescence of Aromatic Polyimides Doped with Platinum Porphyrins

E. I. Mal'tsev*, M. A. Brusentseva*, V. D. Rumyanthseva, D. A. Lypenko*,
V. I. Berendyaev***, A. F. Mironov**, S. V. Novikov*, and A. V. Vannikov***

**Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences,
Leninskii pr. 31, Moscow, 119991 Russia*

***Lomonosov State Academy for Fine Chemical Technology,
pr. Vernadskogo 86, Moscow, 119571 Russia*

****Karpov Institute of Physical Chemistry,
Vorontsovo pole 10, Moscow, 105064 Russia*

Abstract—The mechanism of electroluminescence in polymeric thin-layer devices based on aromatic polyimides and various molecular complexes of Pt porphyrins as heavy-atom-containing luminophores was studied. On the basis of spectral and electron–hole transport properties of aromatic polyimides and Pt porphyrins, as well as on the current concepts adopted in polymer photonics, the processes of singlet–singlet and triplet–triplet energy transfer in the examined single-layer systems aromatic PI–Pt porphyrin with a high electrophosphorescence quantum yield exceeding 2% are discussed.