

УДК 541(14+64):535.37

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДИАДЫ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ ИМИДАЗОЛЬНЫЙ И КУМАРИНОВЫЙ ФРАГМЕНТЫ, В ФОТООТВЕРЖДЕННЫХ АКРИЛОВЫХ СЕТЧАТЫХ ПОЛИМЕРАХ

© 2023 г. И. А. Матвеева^а, В. Т. Шашкова^а, А. В. Любимов^а, Г. В. Любимова^а, Л. С. Кольцова^а, А. И. Шиенок^а, Н. Л. Зайченко^{а,*}

^аФедеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук
119991 Москва, ул. Косыгина, 4, Россия

*e-mail: zaina@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 07.02.2023 г.

После доработки 26.05.2023 г.

Принята к публикации 31.07.2023 г.

Оптимизированы условия получения методом фотоотверждения люминесцентных акриловых полимеров, содержащих органическую диаду, молекула которой объединяет два разных люминесцирующих фрагмента – гидроксизамещенный 2,4,5-триарилимидазольный и 8-азометин-7-гидроксикумариновый. Исследовано влияние природы фотоотвержденных акриловых сетчатых полимеров на люминесцентные свойства диады. Установлено, что в полученных алифатических сетчатых полимерах наблюдается независимая флуоресценция от обоих фрагментов молекулы, зависящая от длины волны возбуждения. В то же время в ароматических сетчатых полимерах и алифатических сетчатых полимерах, характеризующихся наличием в структуре простой эфирной связи, проявляется только флуоресценция имидазольного фрагмента. Характер люминесценции в большей степени определяется структурой полимерного звена и содержанием ароматических фрагментов в полимерной матрице, чем наличием гидроксильных групп в полимере. Показано, что эмиссия имидазольного фрагмента диады в алифатических сетчатых полимерах зависит от межузлового расстояния и условной полярности среды.

DOI: 10.31857/S2308113923700547, EDN: QLCORW

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время органические люминесцентные материалы используют повсеместно в связи с прогрессом искусственного освещения, дисплеев и разработкой флуоресцентных биомедицинских приборов [1, 2]. Кроме того, соединения с множественной люминесценцией, зависящей от длины волны возбуждения, могут быть использованы для создания нового поколения так называемых “умных” материалов для молекулярной электроники, т.е. молекулярных переключателей, логических устройств и т.д. [3–5]. Примером таких “умных” материалов могут стать композиты на основе отвержденных акриловых мономеров и олигомеров, содержащие специальные люминесцирующие добавки. В связи с этим разработка методов фотоотверждения акриловых композиций, содержащих сложные гибридные молекулы, характеризующиеся переключаемой люминесценцией, также очень важна и актуальна, поскольку полиакрилаты широко используются в различных областях техники [6–11], в том

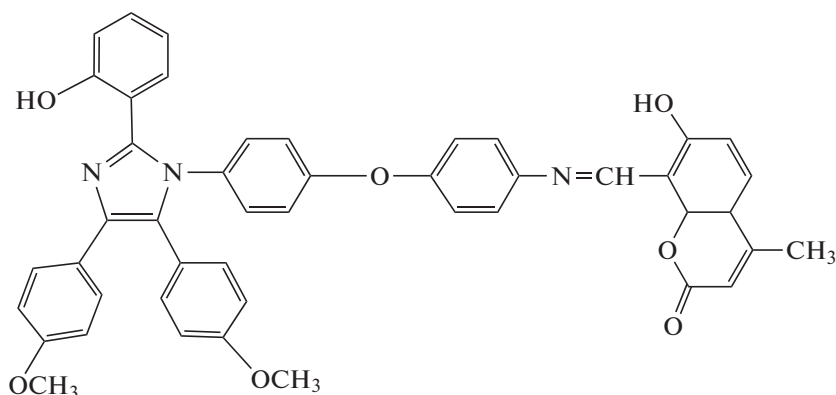
числе и для защиты ценных бумаг. Большое значение имеет определение взаимосвязи структуры полимеров и люминесцентных свойств материала.

Также фундаментальной научной проблемой является разработка подходов к направленному дизайну “умных” флуорофоров, обладающих специальными фотофизическими и фотохимическими свойствами, например чувствительностью эмиссии к внешним воздействиям, в том числе к длине волны возбуждающего света, к растворителям и особенностям полимерной матрицы. Примером соединений, демонстрирующих дуальную флуоресценцию, являются диады с двумя объединенными люминесцирующими фрагментами, в каждом из которых происходит внутримолекулярный перенос протона в возбужденном состоянии (ВППВС), при условии ограниченной передачи энергии между фрагментами [12–15].

Ранее нами была синтезирована новая диада, молекула которой включает два светочувствительных фрагмента – тетраарилимидазол и азометинокумарин, соединенные дифенилоксид-

ным мостиком, препятствующим передаче энергии между фрагментами, и были изучены ее спектрально-люминесцентные свойства в растворах [16] и в линейных акриловых полимерах [17]. Было показано, что для этого соединения характерна дуальная флуоресценция, которая про-

является как в растворах, так и в полученных фотоотверждением линейных полимерных матрицах, и зависит от свойств среды и длины волны возбуждения. Цель данного этапа работы – изучение особенностей проявления люминесцентных свойств диады

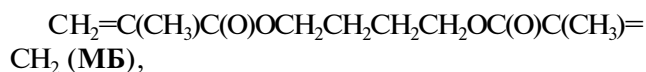


в матрицах сетчатых полимеров, полученных методом фотоотверждения олигоэфиракрилатов, широко используемых при производстве изделий различного назначения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез диады описан в работе [16].

Для получения полимерных матриц использовали мономеры, которые образуют при фотоотверждении линейные полимеры (2-гидроксиэтил 2-метилпроп-2-еноат $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CO}(\text{O})\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ – коммерческий продукт фирмы “Aldrich” (МЭГ) и метил [2-(2-метилпроп-2-еноил)оксиэтил] карбонат $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{C}(\text{O})\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{OC}(\text{O})\text{OCH}_3$ (МОК), синтезированный по методике [18]), алифатические сетчатые полимеры (1,4-бутандиол ди(2-метилпроп-2-еноат)



синтезированный по методике [18], коммерческие продукты фирмы “Leman” 3,6-диоксаоктан-1,8-диил ди(2-метилпроп-2-еноат)

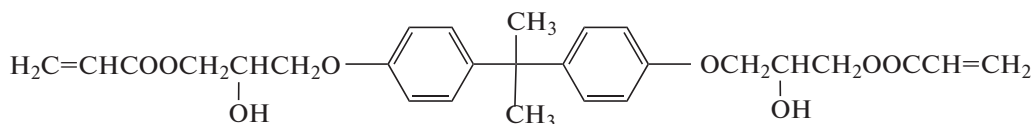
$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{C}(\text{O})\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{C}(\text{O})\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$ (ТГМ-3), (1,4-диметил-3-оксапентан-1,5-диил)ди(проп-2-еноат)

$\text{CH}_2=\text{CHC}(\text{O})\text{OCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{OCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{OC}(\text{O})\text{CH}=\text{CH}_2$ (ДАДПГ) и

(3,6,9,12,15,18,21,24,27,30,33,36-додекаоксатридекаоктан-1,38-диил)ди(проп-2-еноат)

$\text{CH}_2=\text{CHC}(\text{O})\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{C}(\text{O})\text{CH}=\text{CH}_2$ ($n \sim 13$) (ДАПЭ 600), а также ароматические сетчатые полимеры (ФГА, ФЭА). Такое разнообразие химических и структурных фрагментов молекулярных цепей отражается не только на механических и эксплуатационных свойствах полимерных материалов, но и на их люминесцирующей способности.

ФГА и ФЭА – коммерческие продукты фирмы “Aldrich” 2-гидрокси-3-[4-[2-[4-[2-гидрокси-3-(проп-2-еноилокси)пропокси]пропан-2-ил]фенокси]пропил]проп-2-еноат (ФГА)



и 2-[2-[4-[2-[4-[2-[2-(2-метилпроп-2-еноилокси)этоксид]этоксид]фенил]пропан-2-ил]фенокси]этоксид]этил 2-метилпроп-2-еноат (ФЭА)

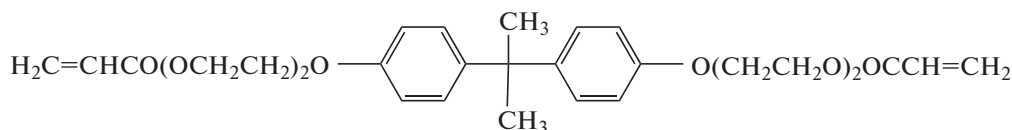


Таблица 1. Результаты анализа золь-фракции ФГА, отвержденного лампой ДРТ 1000 Вт

Состав композиции	Фильтр	Время облучения, мин	ФГА, %	Конверсия, %
ФГА+1.17% Д	ПС 13	1	36.1	63.9
ФГА+1.17% Д	ПС 13	2	28.4	71.6
ФГА+1.17% Д	ПС 13	3	22.3	77.7
ФГА+1.17% Д	ПС 13	5	17.8	82.2
ФГА+1.17% Д	СЗС 9	2	74.3	25.7
ФГА+1.17% Д	СЗС 9	5	37.7	62.3

Чистота указанных олигомеров $\approx 97\%$, все реактивы перед использованием проверяли хроматографически.

Полимерные пленки с добавкой исследуемого соединения получали введением в олигомер люминофора в хлористом метиле (с последующим его удалением) и фотоинициатора Дарокур 4265 фирмы "Aldrich" (далее "Д") с последующим фотоотверждением при облучении лампой ДРТ 1000 Вт через фильтр ПС 13. Фотоинициатор Дарокур 4265 состоит из двух компонентов (Дарокур ТРО – 50% и Дарокур 1173 – 50%) и характеризуется абсорбционными пиками в метаноле 240, 272 и 380 нм.

Конверсию двойных связей контролировали по золь-фракции на гель-хроматографе системы "Бриз". Выбор оптимального времени облучения и светофильтра был проведен с использованием ФГА в качестве олигомера и определен равным 3 мин, что обеспечивало глубину отверждения порядка 92–98% и сохранность спектров поглощения люминофора в мономере. Концентрация люминофора во всех экспериментах составляла 10^{-4} моль/л, концентрация фотоинициатора – 1 мас. %. Толщина полученной полимерной пленки 800–900 мкм. Спектры поглощения растворов и пленок регистрировали на спектрофотометре "Cary 50 Scan" фирмы "Varian", спектры люминесценции – на спектрофлуориметре "Cary Eclipse" фирмы "Varian". Спектральная ширина щелей монохроматоров эмиссии и возбуждения 5 нм. В приведенной ниже табл. 1 представлены

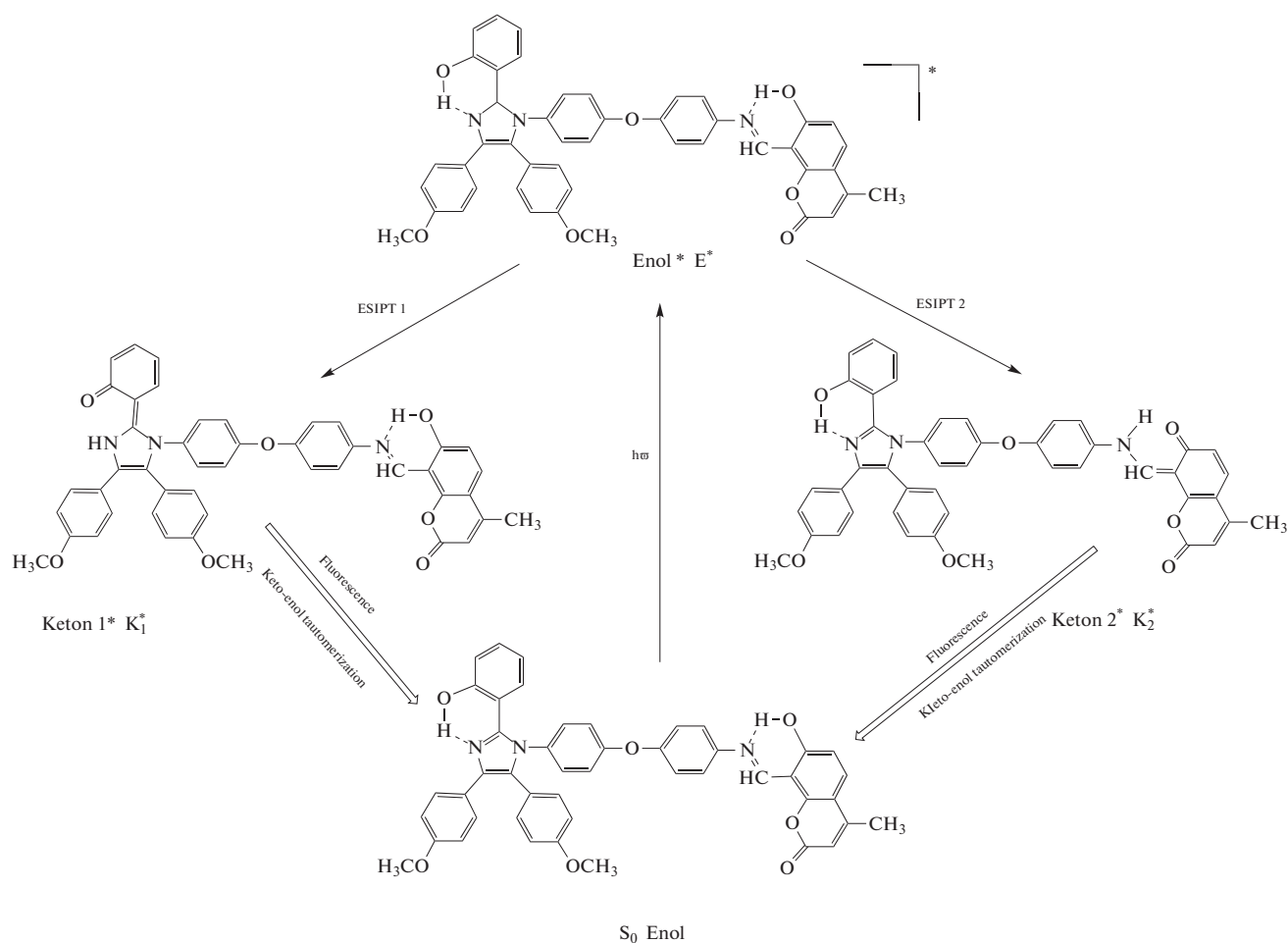
результаты анализа золь-фракции ФГА, отвержденного лампой ДРТ 1000 Вт.

Как видно, использование фильтра ПС 13 более эффективно, чем фильтра СЗС 9, для достижения большей глубины отверждения и сокращения времени получения полимерной пленки. Фотополимеризация нефилтрованным светом лампы ДРТ 1000 Вт приводит к быстрому отверждению, но разрушает введенный в композицию люминофор.

Очевидно, что в выбранных условиях фотополимеризации 2–3 мин облучения достаточно для достижения предельного значения конверсии при использовании фильтра ПС13.

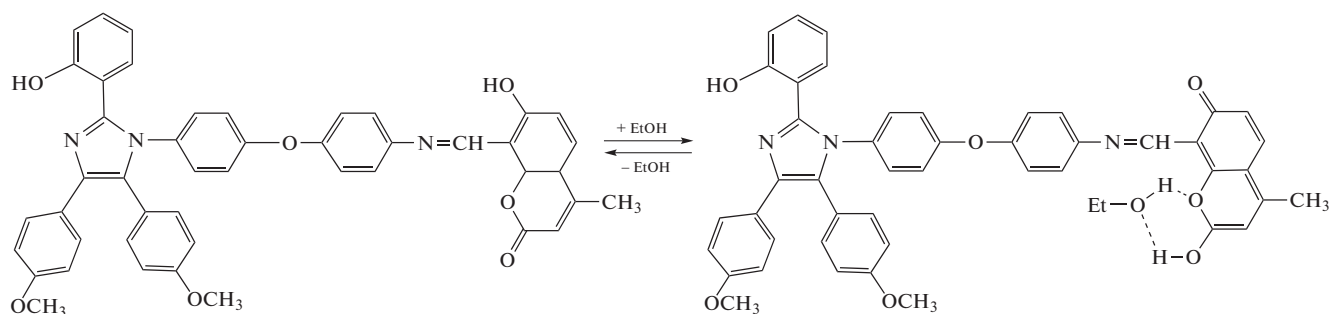
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изученная диада демонстрирует различные комбинации флуоресцентных откликов в зависимости от длины волны возбуждения и среды. Как было показано нами ранее [16], в растворе CH_2Cl_2 при возбуждении светом <370 нм в ее спектре флуоресценции наблюдается дуальная эмиссия с максимумами при 450 и 535 нм, что соответствует эмиссии от двух основных фрагментов молекулы, которые могут быть отнесены к структурам, образованным в результате внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в имидазольном и кумариновом фрагментах соответственно:



В полярном этаноле, который образует водородные связи с флуорофором, проявляются два сигнала флуоресценции — в областях 450 и 535 нм. Эмиссия в области 535 нм обусловлена протеканием внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в азометинокумариновом фрагменте, а флуоресценция с

максимумом 450 нм является наложением двух эмиссий — эмиссии, обусловленной протеканием внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в имидазольном фрагменте согласно приведенной выше схеме, и эмиссии от ассоциата кумаринового фрагмента со спиртом, [16].



Следует отметить, что образование ассоциата приводит к уменьшению доли эмиссии, обусловленной внутримолекулярным переносом протона в возбужденном состоянии в азометинокумариновом фрагменте. При этом сохраняется зависи-

мость спектра флуоресценции от длины волны возбуждения — при возбуждении светом с $\lambda \leq 400$ нм наблюдаются две эмиссии с максимумами при 445 и 535 нм, а при возбуждении светом с $\lambda \geq 400$ нм — одна эмиссия с максимумом 530 нм.

Как было показано нами ранее [17], в линейных полимерах, полученных фотоотверждением МЭГ и МОК, проявляются две полосы эмиссии с максимумами при 450 и 530 нм и также наблюдается зависимость люминесценции от длины волны возбуждения. При возбуждении светом 330 и 350 нм проявляются две полосы эмиссии, а при возбуждении светом 430 нм – только одна длинноволновая эмиссия от азометинокумаринового фрагмента. Также нами было изучено влияние присутствия гидроксильных групп в линейном полимере на интенсивность полос эмиссии диады. Было установлено, что соотношение интенсивностей двух полос эмиссии зависит от концентрации групп ОН в полимере – с ростом их концентрации интенсивность длинноволновой эмиссии уменьшается, поскольку происходит образование водородной связи между люминофором и матрицей, что препятствует протеканию внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в азометинокумариновом фрагменте. Коротковолновая полоса эмиссии демонстрирует более сложную зависимость, так как там налагаются эмиссия от имидазольного фрагмента и ассоциата азометинокумаринового фрагмента с группами ОН полимера.

В настоящей работе продолжены исследования по влиянию природы полимерной матрицы, полученной методом фотоотверждения, а именно сетчатых ароматических и сетчатых алифатических матриц, на люминесцентные свойства диады.

В отличие от линейных алифатических полимеров, в которых имелись две полосы флуоресценции диады, в сетчатых полимерах, содержащих ароматические фрагменты ФГА и ФЭА, наблюдается лишь одна высокоинтенсивная эмиссия с максимумом 450 нм, обусловленная протеканием внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в имидазольном фрагменте (рис. 1). При этом длинноволновая эмиссия с максимумом 530 нм, обусловленная протеканием внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в азометинокумариновом фрагменте исчезает.

Этот факт можно объяснить переходом от линейных полимеров к сетчатым (ФГА, ФЭА) в результате возникших стерических затруднений. Во-первых, уменьшается вклад безызлучательной релаксации, что должно приводить к росту интенсивности обеих этих флуоресценций; во-вторых, затрудняется цис-транс-изомеризация в азометинокумариновом фрагменте, которая включена в внутримолекулярный перенос протона в возбужденном состоянии. Это должно приводить к уменьшению интенсивности флуоресценции азометинокумаринового фрагмента и соответственно увеличению интенсивности флуоресценции имидазольного фрагмента.

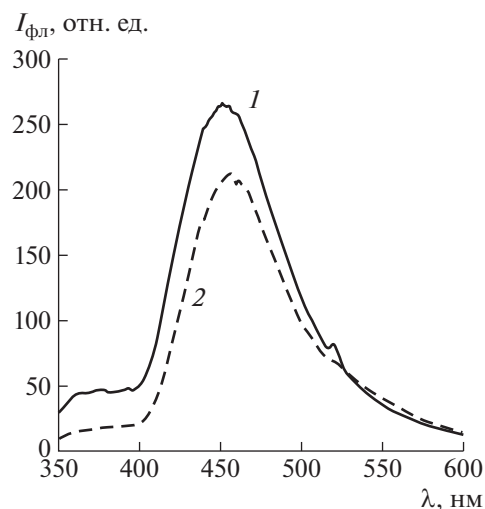


Рис. 1. Флуоресценция диады в полимерных пленках, полученных фотоотверждением ФГА (1) и ФЭА (2), при возбуждении светом 330 нм.

В то же время в алифатических сетчатых полимерах, как и в линейных, наблюдаются две полосы флуоресценции с максимумами при 450 и 530 нм (рис. 2, табл. 2).

В алифатических сетчатых полимерах также сохраняется зависимость интенсивности флуоресценции от длины волны возбуждения – при возбуждении светом 330 и 350 нм наиболее интенсивная эмиссия от имидазольного фрагмента, но при возбуждении 350 нм интенсивность более длинноволновой эмиссии увеличивается и обе эмиссии почти выравниваются в случае матрицы МБ.

В алифатических сетчатых полимерах, характеризующихся наличием в структуре простой эфирной связи (ТГМ-3 и ДАПЭ 600), как и в сетчатом полимере ФЭА, содержащем ароматиче-

Таблица 2. Взаимосвязь интенсивности флуоресценции и молекулярной массы полимерного звена в полимерных матрицах

Мономер	ММ	Интенсивность флуоресценции, отн. ед	
		$\lambda = 450$ нм	$\lambda = 530$ нм
МЭГ	130	555	339
МОК	188	593	459
МБ	226	612	337
ДАДПГ	252	970	398
ТГМ	286	914	–
ФГА	484	1200	–
ФЭА	512	950	–
ДАПЭ 600	726	1690	–

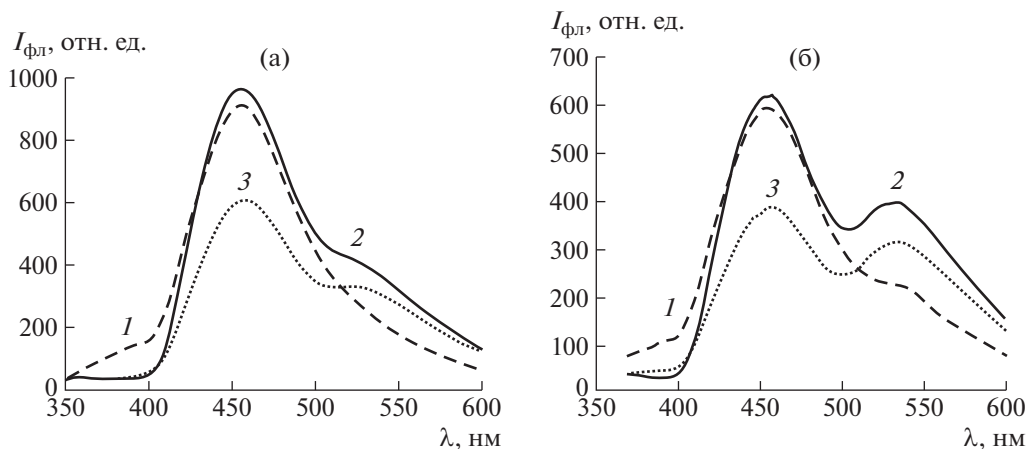


Рис. 2. Спектры флуоресценции диады в сетчатых полимерах ТГМ-3 (1), ДАДПГ (2) и МБ (3) при возбуждении светом 330 (а) и 350 нм (б).

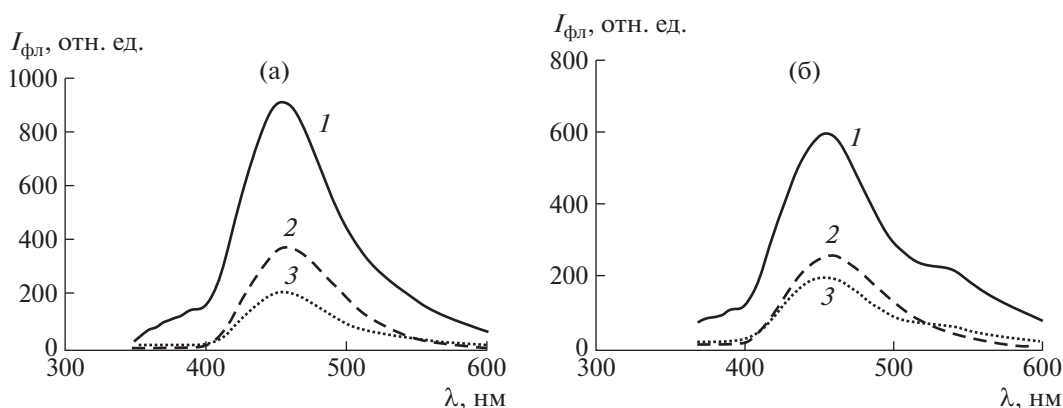


Рис. 3. Спектры флуоресценции диады в сетчатых полимерах ТГМ-3 (1), ДАПЭ 600 (2) и ФЭА (3) при возбуждении светом 330 (а) и 350 нм (б).

ские фрагменты и простые эфирные связи, при возбуждении светом 330 нм проявляется лишь одна достаточно интенсивная эмиссия с максимумом в области 450 нм, обусловленная протеканием внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в имидазольном фрагменте (рис. 3а). При возбуждении светом 350 нм наблюдается длинноволновое плечо второй эмиссии при 530 нм (рис. 3б).

Нами было исследовано влияние величины межузлового расстояния в изученных полимерах на основе линейных и сетчатых олигоэфиракрилатов на эффективность процессов внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в имидазольном и азометинокумариновом фрагментах диады. С увеличением межузлового расстояния, которое определяется молекулярной массой полимерного звена, в полимерах всех типов растет интенсивность эмиссии

лишь одной коротковолновой полосы введенного люминофора (табл. 2, рис. 4).

При изменении молекулярной массы мономерного звена от 130 (МЭГ) до 726 (ДАПЭ 600) повышается интенсивность люминесценции (при возбуждении светом длиной волны 330 нм) с 555 до 1690 отн. ед. в полосе 450 нм (внутримолекулярный перенос протона в возбужденном состоянии в имидазольном фрагменте). В то же время изменение межузлового расстояния не влияет на процесс внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в азометинокумариновом фрагменте (полоса 530 нм).

Ранее нами было установлено, что соотношение интенсивностей полос эмиссии диады зависит от числа гидроксильных групп в линейных полимерах [17]. Интенсивность полосы с максимумом при 530 нм неуклонно падала при переходе в ряду концентрации $[\text{ОН}]$ в полимере 4, 7 и 13%. Значит, происходило подавление внутримо-

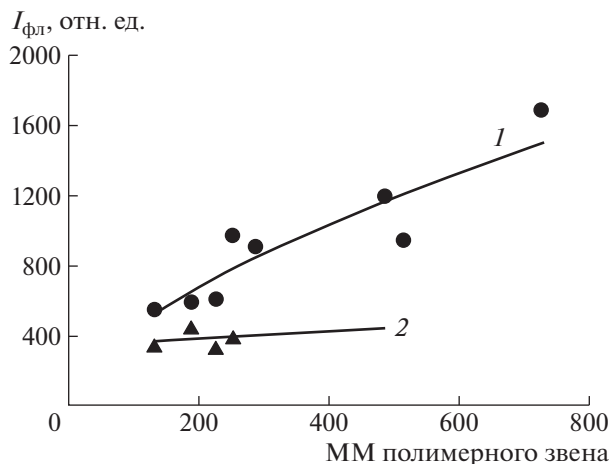


Рис. 4. Зависимость интенсивности люминесценции в полосах 450 (1) и 530 нм (2) для линейных, сетчатых алифатических и сетчатых ароматических полимеров.

лекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в азометинокумариновом фрагменте за счет образования водородных связей с полимером, которое наблюдалось при возбуждении светом 330 и 350 нм. При этом почти не менялась интенсивность флуоресценции с максимумом при 450 нм.

На данном этапе исследований было показано, что при одинаковом содержании гидроксильных групп, равном 7%, в молекуле линейного полимера, полученного фотоотверждением МЭГ/МОК, наблюдались обе эмиссии, а в случае ФГА – только одна коротковолновая (рис. 5). Таким образом, характер люминесценции в большей степени определяется структурой полимерного звена и содержанием ароматических фрагментов в полимерной матрице, чем наличием гидроксильных групп в полимере.

Также было рассмотрено влияние полярности полимерной матрицы на проявление люминесцентных свойств диады. В данном случае мы представляли полярность молекулы олигомера как векторную сумму полярностей отдельных связей. Это предполагает зависимость полярности молекулы не только от полярности отдельных связей, но также и от их направления, т.е. от геометрии молекулы. Учитывая сложное строение исходных молекул олигомера и соответственно полимера, применение справочных значений используемых параметров носит скорее оценочный характер. Такой подход к оценке полярности сложных молекул по аддитивной полярности отдельных связей подробно описан в работах Van Krevelen [19]. И хотя мы не учитываем геометрию самого полимера, проводимые нами исследования флуоресценции как для линейных, так и для сетчатых полимеров свидетельствуют о том, что эффективность процесса внутримолекулярного

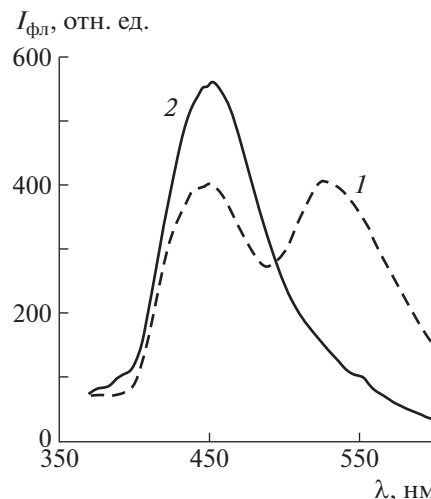


Рис. 5. Спектры люминесценции диады в линейной алифатической (МЭГ/МОК) (1) и сетчатой ароматической (ФГА) (2) полимерных матрицах, содержащих 7% групп ОН, при возбуждении светом длиной волны 350 нм. Интенсивность полосы 2 уменьшена в 2 раза.

переноса протона в возбужденном состоянии в разных фрагментах введенного в олигомер люминофора по-разному зависит именно от этой условной полярности матрицы.

В табл. 3 представлены значения интенсивности флуоресценции диады при возбуждении светом 330 нм в полимерных матрицах с разными значениями диэлектрической проницаемости. Условную полярность P полимерных матриц оценивали по формуле $P = \epsilon^{1/2}M$ с использованием справочных данных диэлектрической проницаемости ϵ [19]. Зависимость интенсивности флуоресценции от полярности матрицы [19] представлена на рис. 6.

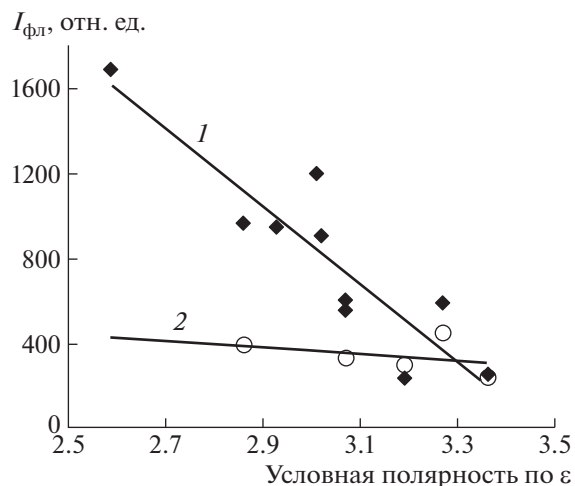


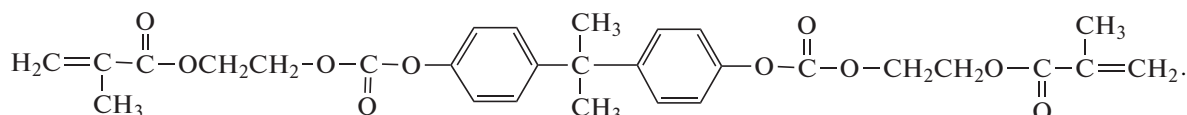
Рис. 6. Интенсивность люминесценции диады при возбуждении светом длиной волны 330 нм в зависимости от условной полярности (по относительной диэлектрической проницаемости) полимерных матриц: 1 – полоса 450 нм, 2 – полоса 530 нм.

Таблица 3. Интенсивность люминесценции диады при возбуждении светом длиной волны 330 нм для полимерных матриц с различной полярностью [19]

Мономер	$P = \epsilon^{1/2} M$	$\lambda_{\text{фл}}$	Интенсивность флуоресценции, отн. ед.
МБ	3.07	450	612
		530	337
ТГМ-3	3.02	450	914
		530	339
МЭГ	3.07	450	555
		530	339
МОК	3.27	450	593
		530	459
ФГА	3.01	450	1200
ФЭА	2.93	450	950
ОКМ-5	3.19	450	239
		530	303
ДАПГ	2.86	450	970
		530	398
ДАПЭ 600	2.59	450	1690
ОКМ-7	3.36	450	257
		530	246

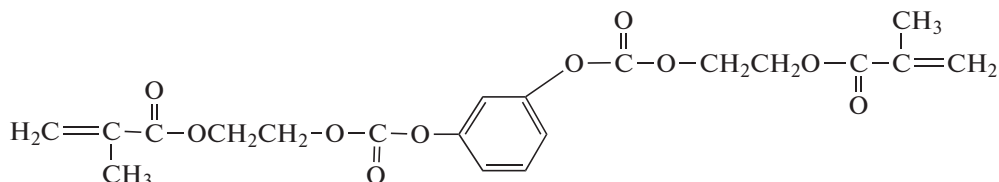
Примечание. ОКМ-5:

2-[4-[2-[4-[2-(2-метилпроп-2-еноилокси)этоксикарбонилокси]фенил]проп-2-ил]феноксикарбонилокси]этил-2-метилпроп-2-еноат



ОКМ-7:

2-[3-[2-(2-метилпроп-2-еноилокси)этоксикарбонилокси]феноксикар-бонилокси]этил 2-метилпроп-2-еноат



Из приведенных данных очевидно, что эффективность процесса внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии в разных фрагментах молекулы по-разному зависит от полярности матрицы [19] – в кумариновом фрагменте практически не зависит, а в имидазольном фрагменте уменьшается с увеличением полярности.

Примечательно, что обнаруженные закономерности сохраняются как для линейных, так и для сетчатых алифатических и ароматических полимеров. Данная тенденция открывает еще одно направление регулирования оптических свойств полимера – изменение полярности звена в пределах одного класса полимеров.

Таким образом, установлена зависимость люминесцентных свойств исследуемой диады от особенностей структуры (линейные или сетчатые полимеры, алифатические или ароматические), молекулярной массы и полярности полимерной матрицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые методом фотополимеризации олигоэфиракрилатов получены сетчатые полимерные пленки, содержащие органическую люминесцентную диаду. Показано, что эмиссия имидазольного фрагмента диады в алифатических сетчатых полимерах зависит от межузлового расстояния и от условной полярности полимерной

матрицы, а эмиссия азометинокумаринового фрагмента мало зависит от этих параметров полимерной матрицы.

Полученные результаты открывают новые возможности при создании полимерных материалов с заданными специальными свойствами и могут быть использованы для управления люминесцентными свойствами полимерных материалов различной природы и свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания FFZE-2022-0009 Федерального исследовательского центра Химической физики РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krasovitskii B.M., Bolotin B.M.* Organic Luminescent Materials. Weinheim: Wiley-VCH, 1988.
2. *Klaauk H.* Organic Electronics: Materials, Manufacturing, and Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
3. *Zhao S.Ji, Chen Y., Guo H., Yang P.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2012. V. 14. P. 8803.
4. *Park S.Y., Won M., Kang C., Kim J.S., Lee M.H.* // Dyes Pigments. 2019. V. 164. P. 341.
5. *Brancato G., Signore G., Neyroz Y., Polli D., Cerullo G., Abbandonato G., Nukara L., Barone V., Belytan F., Bizzari R.* // J. Phys. Chem. B. 2015. V. 119. P. 6144.
6. *Lui H., Lin F., Chen M., Hu K.* // Iranian Polym. J. 2010. V. 19. № 3. P. 219.
7. *Chakraborty R., Soucek M.D.* // Eur. Polym. J. 2008. V. 44. P. 3326.
8. *Bowling K., Adams J., Struck S.* // J. Coat. Technol. 1996. V. 68. P. 91.
9. *Rath S.K., Diby A., Seghier Z., Boey F.Y.C., Abadie M.J.M.* // Iran Polym J. 2006. V. 15. P. 855.
10. *Liu H., Yu L., Chen M., Huang Z.* // Mater Res Bull. 2003. V. 38. P. 1607.
11. *Bongiovanni R., Malucelli G., Messori M., Pilati F., Priola A., Tonelli C., Toselli M.* // J. Appl. Polym. Sci. 2000. V. 75. P. 651.
12. *Padalkar V.S., Seki S.* // Chem. Soc. Rev. 2016. V. 45. P. 169.
13. *Park S., Kwon J.E., Kim S.H., Seo J., Chung K., Jang D.J., Medina B.W., Giecher J., Park S.Y.* // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 14043.
14. *Heyer E., Nassue J., Ulrich G.* // Dyes and Pigments. 2017. V. 143. P. 18.
15. *Tasaki S., Momotake A., Kanna Y., Sato T., Nishimura Y., Arai T.* // Photochem. Photobiol. Sci. 2015. V. 14. P. 1864.
16. *Liubimov A.V., Venidiktova O.V., Valova T.M., Shienok A.I., Koltsova L.S., Liubimova G.V., Popov L.D., Zaichenko N.L., Barachevsky V.A.* // Photochem. Photobiol. Sci. 2018. V. 17. P. 1365.
17. *Matveeva I.A., Shashkova V.T., Liubimov A.V., Liubimova G.V., Koltsova L.S., Shienok A.I., Zaichenko N.L.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2019. V. 13. P. 803.
18. *Берлин А.А., Королев Г.В., Кефели Т.Я., Сивергин Ю.М.* Акриловые олигомеры и материалы на их основе. М.: Наука, 1983.
19. *Van Krevelen D.W., Hoftyzer P.J.* // Properties of Polymers: Correlations with Chemical Structure. London; New York: Elsevier, 1972.