

02

Фотолюминесценция политетрафторэтилена в ближней инфракрасной области спектра

© В.М. Киселев¹, И.В. Багров¹, А.М. Стародубцев¹, Н.Г. Гоголева²

¹ Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова,
199034 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ имени В.И. Ульянова (Ленина),
197376 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: kiselevvm21@gmail.com

Поступила в редакцию 16.08.2021 г.

В окончательной редакции 31.08.2021 г.

Принята к публикации 31.08.2021 г.

Исследована фотолюминесценция политетрафторэтилена (фторопласта-4, также известного под торговой маркой тефлон) в ближней инфракрасной области спектра при его возбуждении ультрафиолетовым и видимым излучением. Показано, что в спектре фотолюминесценции, наблюдаемой с поверхности фторопласта при его возбуждении, отчетливо присутствует характерный профиль люминесценции, совпадающий по своему положению со спектром фосфоресценции синглетного кислорода.

Ключевые слова: фотолюминесценция, фосфоресценция, политетрафторэтилен, тефлон, фторопласт, синглетный кислород, оптическое возбуждение, светодиодные матрицы.

DOI: 10.21883/OS.2021.12.51741.2648-21

Введение

В последние годы наблюдается активный рост интереса к перфторированным материалам. Благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам перфторированные материалы постоянно находят все новые области применения. Высокая растворимость кислорода, азота, углекислого газа и ряда других газов в перфторуглеродах и отличные токсикологические их свойства способствовали широким медицинским применениям перфторированных материалов в качестве кровезаменителей, при исцелении ран, в глазной хирургии, жидкостной вентиляции легких, кожной реабилитации, а также в качестве элемента для доставки сенсibiliзирующего лекарственного средства к пораженной ткани в фотодинамической терапии [1–4].

Большой интерес при этом наблюдается и к исследованиям фотолюминесценции политетрафторэтилена (ПТФЭ) [5–9] при возбуждении образцов излучением в ультрафиолетовом и видимом спектральных диапазонах. Исследуемые образцы при возбуждении, как правило, демонстрируют широкий спектр излучения фотолюминесценции, простирающийся от фиолетовой до красной области спектра. Было также показано, что концентрация молекулярного кислорода в образце ПТФЭ играет ключевую роль в формировании оптического излучения фотолюминесценции [6,7]. Содержание кислорода в образце ПТФЭ, как показано в работе [10], может достигать до 6 wt.%, многократно увеличиваясь при различных активных воздействиях на образец в виде γ -облучения [7] или потока электронов [10]. Параметры высокой сорбции и растворимости легких газов, в част-

ности O_2 , N_2 , CO_2 и др., в перфторуглеродах авторами работы [11], которые провели измерения сорбции для двух образцов тефлона AF1600 и AF2400, связываются с исключительно высоким свободным объемом этих материалов, определяющим высокую объемную сорбцию различных видов газов.

В то же время надо отметить, что при достаточно активном исследовании фотолюминесценции ПТФЭ в ряде работ [5–9] все эти исследования были проведены только для видимой области спектра. Фотолюминесценция в инфракрасном (ИК) диапазоне и, в частности, в ближнем ИК диапазоне оказалась вне интересов этих исследований. В данной работе авторы попытались частично восполнить этот пробел, выполнив измерения фотолюминесценции ПТФЭ в оптическом диапазоне от 0.9 до 1.7 μm .

Материалы и методика эксперимента

При проведении исследований фотолюминесценции ПТФЭ в качестве исследуемых образцов использовались пленки фторопласта-4 толщиной 0.05 и 0.2 mm и пластины толщиной от 1 до 6 mm производства России, образец ПТФЭ производства Japan, а также порошок образцы фторопласта с размерами частиц 1–3 μm (China).

В качестве источников оптического возбуждения ПТФЭ использовались светодиодные матрицы (26 × 26 mm) серии HPR40E с длинами волн излучения $\lambda_m = 370, 405, 465, 525$ и 625 nm и с $\Delta\lambda_{0.5} = 20$ nm. Подводимая электрическая мощность для светодиодных матриц равна 100 W. Параметры излучения светодиодных матриц представлены в таблице. Измерение мощности

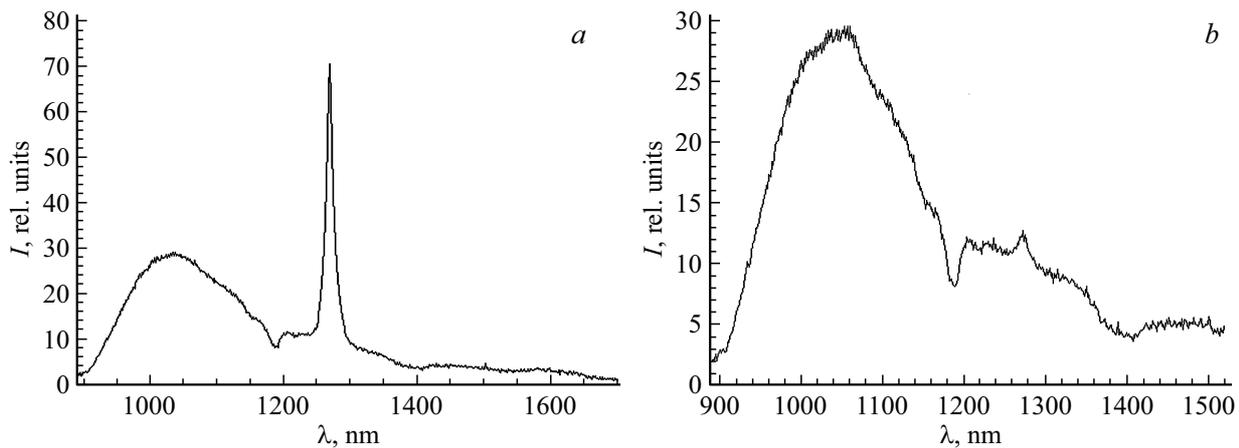


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции ПТФЭ в ближнем ИК диапазоне для образца в виде пластины (*a*) и для порошкообразного образца (*b*).

излучения светодиодных источников осуществлялось измерителем мощности излучения Coherent-Moletron PS-10.

Регистрация излучения фотолюминесценции с поверхности исследуемых образцов ПТФЭ выполнялась с применением ИК спектрометра SDH-IV с приемной InGaAs-линейкой фирмы Hamamatsu (Япония), выпускаемого фирмой „Солар Лазерные Системы“ (Беларусь). Спектральный диапазон прибора от 868 до 1700 nm. Применявшаяся схема эксперимента со светодиодной оптической накачкой для исследуемых образцов представлена в [12].

Результаты эксперимента и их обсуждение

Прежде чем переходить к анализу результатов исследования фотолюминесценции ПТФЭ, следует отметить спектральные свойства данного материала и прежде всего спектр поглощения оптического возбуждения. Характерные для образцов ПТФЭ спектры поглощения, пропускания и отражения довольно детально исследованы в работах [13–15], в которых показано, что ПТФЭ имеет низкие свойства поглощения в применяемом в настоящей работе диапазоне оптического возбуждения. Большая часть света диффузно отражается (от 90 до 95%), и лишь небольшая часть проходит через материал (от 7 до 2%). На поглощение приходится от 2 до 4% в зависимости от толщины образца. При этом данная величина поглощения несущественно меняется в пределах указанного диапазона длин волн от 300 до 500 nm.

Спектральные профили фотолюминесценции ПТФЭ для образца в виде пластины фторопласта-4 толщиной 3 mm (*a*) и для образца в виде порошка (*b*) при возбуждении излучением на длине волны 370 nm представлены на рис. 1. Время экспозиции 12 s. Как видно на представленном рисунке, наряду с широким

Параметры излучения светодиодных матриц

λ_m , nm	370	405	480	525	625
P , W/cm ²	0.35	1.0	1.8	0.60	1.0

спектром фотолюминесценции с максимумом в районе $1.035 \mu\text{m}$ на общем спектральном профиле присутствует и характерный максимум люминесценции, совпадающий по своему положению со спектром фосфоресценции синглетного кислорода на длине волны 1270 nm (переход ${}^1\Delta_g(v' = 0) \rightarrow {}^3\Sigma_g(v'' = 0)$). Этот максимум достаточно отчетливо представлен для пластины и весьма слабо для порошкообразного образца.

Надо заметить, что спектральный профиль люминесценции для порошкообразного образца ПТФЭ очень сильно напоминает аналогичные результаты, которые ранее наблюдались для порошкообразных образцов оксидов металлов [16–18]. Как известно [16], эти результаты были связаны с прямым возбуждением кислорода, сорбированного на поверхности порошкообразных образцов. Нарботка ${}^1\text{O}_2$ возрастала с уменьшением размеров частиц оксида металла вследствие увеличения их общей эффективной поверхности и соответствующего повышения за счет этого поверхностной сорбции газов. Таким образом, для порошкообразного образца ПТФЭ в данном случае, как и для оксидов металлов, наблюдается наработка синглетного кислорода в основном только за счет поверхностной сорбции газа. Тогда как для плотно упакованного образца ПТФЭ в виде пластины или пленки имеет место уже отмеченная ранее [11] высокая объемная сорбция газов с содержанием кислорода в объеме образца до 6 wet.% [10]. По-видимому, именно поэтому интенсивность максимума люминесценции синглетного кислорода для пластины, как видно на рис. 1, *a*, много выше.

Интенсивность этого максимума для пластины зависит как от длины волны возбуждающего излучения, так

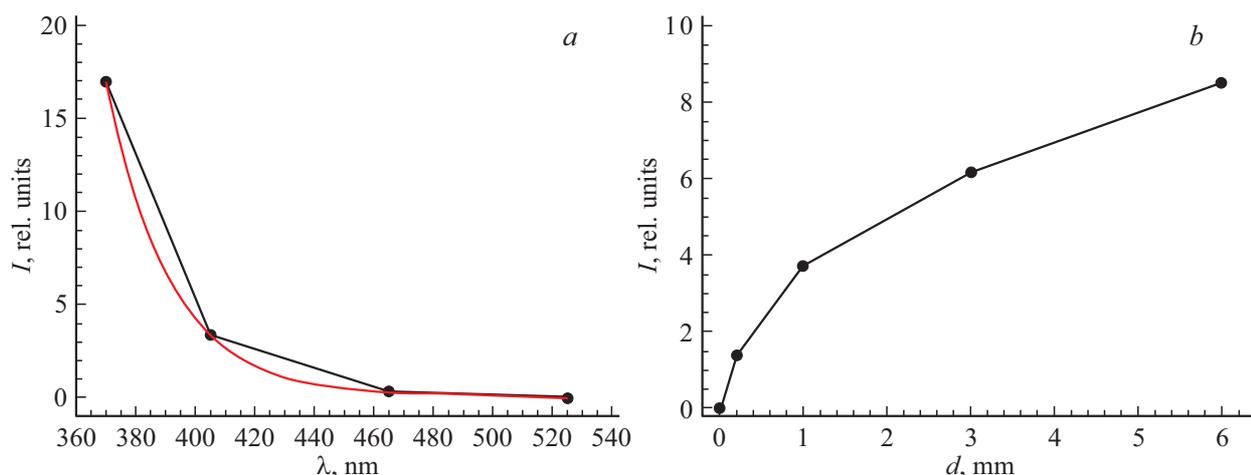


Рис. 2. Зависимость интенсивности фосфоресценции синглетного кислорода от длины волны излучения оптического возбуждения (а) и от толщины образца (b).

и от толщины облучаемого образца. Соответствующие зависимости представлены на рис. 2.

На рис. 2, а показаны значения интенсивностей в максимуме спектрального профиля люминесценции, отнесенные к плотности мощности светового потока на выходе конкретной светодиодной матрицы. Эти приведенные относительные интенсивности демонстрируют определенную закономерность зависимости эффективности генерации синглетного кислорода от длины волны возбуждающего излучения. На рис. 2, b показаны значения интенсивностей в максимуме спектрального профиля люминесценции синглетного кислорода в зависимости от толщины образца ПТФЭ.

Представленные на рис. 2 зависимости нуждаются в дополнительных пояснениях относительно механизма активной генерации синглетного кислорода при облучении образца ПТФЭ в виде пластины или пленки излучением оптического возбуждения. Экспоненциальный спад интенсивности наработки синглетного кислорода при увеличении длины волны оптического возбуждения, с одной стороны, совершенно не коррелирует с кривой поглощения ПТФЭ, отмеченной выше, а с другой стороны, неплохо совпадает со спектральной зависимостью эффективности наработки синглетного кислорода при его прямом возбуждении, например, в растворе тетрахлорметана, приведенной в работах [19,20]. А как утверждается в ряде работ [6,10], кислород может быть эффективно растворен в объеме ПТФЭ, и, следовательно, можно предположить, что в данном случае также возможно прямое возбуждение этого растворенного кислорода по аналогии с другими растворами, учитывая низкие свойства поглощения самого ПТФЭ в данном спектральном диапазоне излучения оптического возбуждения [15].

Зависимость интенсивности фосфоресценции синглетного кислорода от толщины образца, представленная на рис. 2, b, опять же свидетельствует об объемном

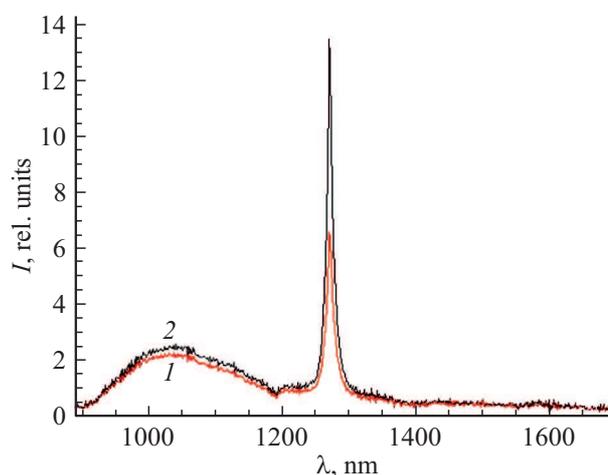


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции синглетного кислорода из объема образца ПТФЭ (пластина толщиной 3 mm) при комнатной температуре 25°C (1) и при охлаждении образца до -20°C (2).

механизме наработки синглетного кислорода, подтверждая в определенной степени предположение о прямом возбуждении кислорода, растворенного в объеме полимера. При этом надо отметить и очень низкие значения поглощения и диффузного рассеяния излучения в ИК диапазоне в районе 1200–1600 nm, измеренные нами с применением спектрофотометра Shimadzu-3600, которые позволяют излучению синглетного кислорода выходить из объема образца ПТФЭ без больших потерь в интенсивности.

Аналогичным подтверждением достоверности предположения относительно объемного механизма наработки синглетного кислорода при облучении образца ПТФЭ излучением оптического возбуждения может служить и температурная зависимость эффективности наработки синглетного кислорода, представленная на рис. 3.

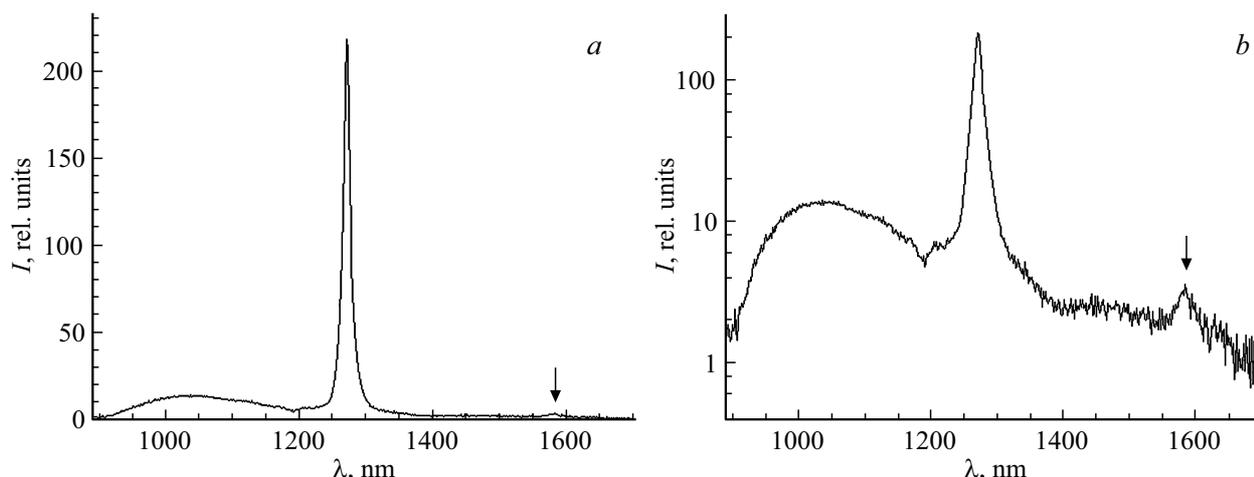


Рис. 4. Спектральный профиль фотолюминесценции синглетного кислорода из объема образца ПТФЭ в линейном (а) и логарифмическом (b) масштабах.

В соответствии с известной зависимостью растворимости газа в используемом растворителе от температуры, которая подчиняется закону Генри [21,22]

$$k_H/k_H^0 = \exp((-\Delta H_{\text{soln}}/R)(1/T - 1/T^0))$$

(где ΔH_{soln} — энтальпия раствора, R — универсальная газовая постоянная, $T^0 = 298$ К — комнатная температура, k_H^0 — концентрация растворенного газа при комнатной температуре, k_H — концентрация растворенного газа при температуре T), при понижении температуры растворителя растворимость газа (в том числе и кислорода) в данном случае в ПТФЭ повышается. Повышение содержания кислорода в объеме ПТФЭ должно приводить к росту эффективности наработки синглетного кислорода, что и наблюдается на рис. 3. Понижение температуры растворителя, как известно [23], приводит к увеличению времени жизни возбужденного состояния кислорода в растворе, что также должно способствовать росту сигнала фосфоресценции синглетного кислорода из объема ПТФЭ. Для широкого спектра фотолюминесценции ПТФЭ с максимумом в районе $1.035 \mu\text{m}$ влияние понижения температуры образца выражено очень слабо.

В условиях внешнего окружения молекул кислорода (с молекулами газа, растворителя или адсорбента) на интенсивность фосфоресценции синглетного кислорода преимущественное влияние оказывает спин-орбитальное взаимодействие молекулы кислорода с ее внешним окружением. При этом величина поглощения кислорода или, точнее, комплексов кислорода с внешним окружением заметно возрастает, как и интенсивность фотолюминесценции этих комплексов. Изучению влияния внешнего молекулярного окружения кислорода в газе или в конденсированной среде на параметры и свойства переходов из синглетных состояний кислорода в основном состоянии посвящено большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ [24–32]. При этом выполненные теоретические оценки [16–18]

о возможности повышения излучательной вероятности переходов из синглетных состояний молекулы кислорода в основное под воздействием внешнего окружения получили убедительное экспериментальное подтверждение [27–32]. Образование этих комплексов влияет и на формирование спектрального профиля поглощения, индуцированного столкновениями с внешним окружением [33]. По-видимому, и в данном случае на достаточно интенсивную генерацию синглетного кислорода в объеме ПТФЭ оказывает внешнее окружение молекулы кислорода молекулярной структурой этого полимера.

Интересно отметить отдельные детали наблюдаемого спектрального профиля фотолюминесценции синглетного кислорода из объема образца ПТФЭ, которые характерны и для других условий генерации синглетного кислорода в растворах [12,20,34] или, например, для жидкого кислорода [35]. Соответствующий профиль в линейном и логарифмическом масштабах для интенсивности излучения представлен на рис. 4 для образца ПТФЭ, изготовленного в Японии. Данный образец входит в качестве комплектующей детали в набор элементов ЭПР-спектрометра JES-ME-3X (Japan).

Наряду с основным максимумом фотолюминесценции на длине волны 1270.6 nm (переход $^1\Delta_g(v' = 0) \rightarrow ^3\Sigma_g(v'' = 0)$) в представленном спектре присутствует и максимум на длине волны 1583.6 nm (отмечен стрелкой), соответствующий переходу $^1\Delta_g(v' = 0) \rightarrow ^3\Sigma_g(v'' = 1)$, как это обычно наблюдалось при возбуждении кислорода в тетрахлорметане, или толуоле [12,20,34], или в условиях жидкого кислорода [35]. Более отчетливо второй максимум виден на рис. 4, b с логарифмическим масштабом интенсивности излучения. Данный максимум можно заметить и на рис. 3 только с меньшей интенсивностью. По сравнению с тетрахлорметаном оба максимума смещены в коротковолновую область. Максимум на длине волны 1490 nm , который наблюдался в

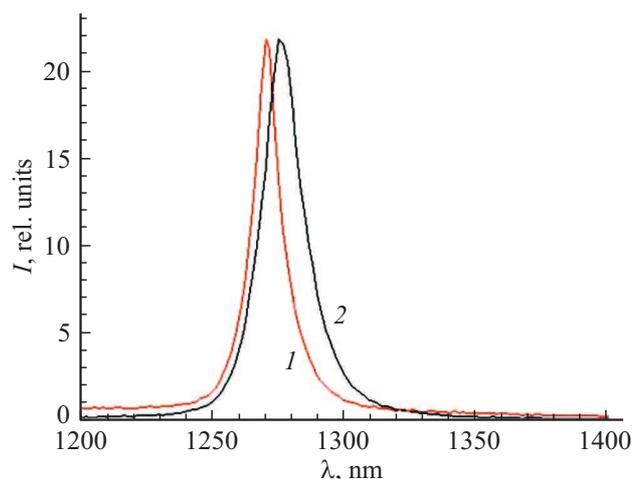


Рис. 5. Вид спектральных профилей фосфоресценции синглетного кислорода из объема ПТФЭ (1) и из объема тетрахлорметана (2) при возбуждении на $\lambda = 370$ nm.

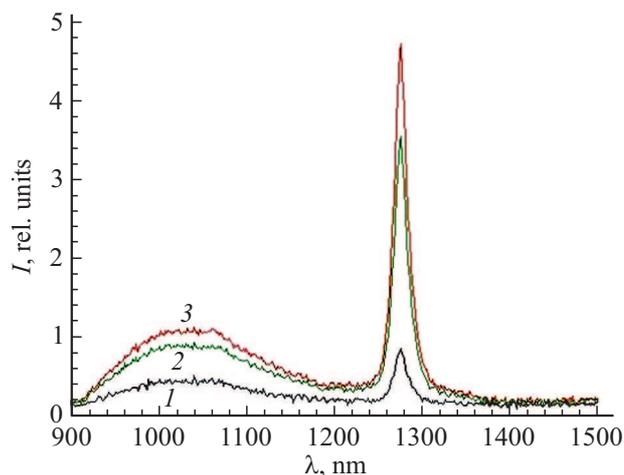


Рис. 6. Спектр фотолуминесценции синглетного кислорода из объема исходного растворителя CCl_4 (1) и из суспензии порошка ПТФЭ в CCl_4 после 7 (2) и после 8 дней (3).

работе [34] и был идентифицирован со стоксовой компонентой, индуцированной колебаниями C–F-связи растворителя $\text{C}_{10}\text{F}_{18}$ с частотой 1100 cm^{-1} , в данном случае достаточно отчетливо не виден.

Как видно на рис. 5, максимум спектрального профиля фосфоресценции синглетного кислорода, наблюдаемого из объема ПТФЭ, не только смещен в коротковолновую область по сравнению с фосфоресценцией из объема тетрахлорметана, но и имеет более узкий профиль. Для удобства сравнения максимумы приведены к одинаковой интенсивности. Отмеченные закономерности, кстати, характерны для фторированных растворителей [12,36,37], включая сдвиг максимума в коротковолновую область и более узкий профиль фосфоресценции синглетного кислорода, особенно заметный, например, для $\text{C}_{10}\text{F}_{18}$ [36].

В условиях ПТФЭ для кислорода, который находится в его объеме, по-видимому, образуются комплексы кислорода с внешним окружением, подобные тем, которые наблюдаются во фторированных растворителях. И этим могут объясняться наблюдающиеся аналогичные закономерности проявления фосфоресценции синглетного кислорода из объема ПТФЭ.

На рис. 6 на примере суспензии порошка ПТФЭ с размерами частиц $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ (China) в химически чистом (ХЧ) тетрахлорметане (CCl_4) в дополнение к спектральным свойствам ПТФЭ продемонстрирована высокая сорбционная способность ПТФЭ, которая приводит к весьма заметной очистке исходного растворителя от присутствующих в нем загрязнений, понижая, таким образом, эффективность процессов тушения возбужденного состояния кислорода, что проявляется в существенном увеличении интенсивности генерации синглетного кислорода. В этом качестве известный сорбент SiO_2 в аналогичных условиях показал заметно меньшую эффективность по очистке того же самого растворителя. Данное свойство высокой сорбционной способности суспензии наночастиц ПТФЭ (в том числе и в других средах, например в водной среде) может быть эффективно использовано в качестве элемента для доставки сенсбилизирующих лекарственных средств и синглетного кислорода к пораженной ткани в фотодинамической терапии, что уже активно исследуется [1–4].

Заключение

В работе проведено исследование фотолуминесценции в ближней ИК области спектра для нескольких произвольно выбранных образцов ПТФЭ (фторопласта) при их возбуждении ультрафиолетовым и видимым излучением. По своей конфигурации ПТФЭ представляет собой полукристаллический полимер, степень кристаллизации которого влияет на проницаемость и растворимость в нем газов. С увеличением степени кристаллизации (увеличение плотности с увеличением кристаллических доменов) проницаемость и растворимость газов уменьшаются [38], и, наоборот, с уменьшением степени кристаллизации увеличивается его пористость, а следовательно, растут проницаемость и растворимость газов. Поэтому проведенные исследования носят в определенной степени частный характер и не претендуют на широкое обобщение полученных результатов применительно ко всем конфигурациям структуры ПТФЭ.

В результате выполненного исследования фотолуминесценции образцов ПТФЭ в ближней ИК области спектра при его возбуждении ультрафиолетовым и видимым излучением показано, что в спектре фотолуминесценции, наблюдаемой с поверхности фторопласта при его возбуждении, наряду с широким спектром с максимумом в районе $1.035\text{ }\mu\text{m}$ на общем спектральном профиле отчетливо присутствует характер-

ный профиль люминесценции, совпадающий по своему положению со спектром фосфоресценции синглетного кислорода на длине волны 1270.6 nm (переход $^1\Delta_g(v' = 0) \rightarrow ^3\Sigma_g(v'' = 0)$). В спектре присутствует и более слабый максимум на длине 1583.6 nm, соответствующий переходу $^1\Delta_g(v' = 0) \rightarrow ^3\Sigma_g(v'' = 1)$, который обычно наблюдается при возбуждении кислорода в тетрахлорметане или толуоле, а также в жидком кислороде.

На основе полученных результатов в работе сделано предположение, что фосфоресценция синглетного кислорода наблюдается из объема ПТФЭ при прямом оптическом возбуждении кислорода, сорбированного или растворенного в структуре ПТФЭ, по аналогии с прямым оптическим возбуждением кислорода в объеме различных растворителей. Более низкая по сравнению с растворителями интенсивность сигнала фосфоресценции синглетного кислорода из объема ПТФЭ (примерно втрое) объясняется более высокой прозрачностью растворителей и, очевидно, более высоким временем жизни синглетного кислорода в растворителях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Wilson S.R., Yurchenko M.E., Schuster D.I., Yurchenko E.N., Sokolova O., Braslavsky S.E., Gudrun Klihm. // *J. Am. Chem. Soc.* 2002. V. 124. N 9. P. 1977.
- [2] Ghosh G., Minnis M., Ghogare A.A. // *J. Phys. Chem. B*. 2015. V. 119 (10). P. 4155.
- [3] Cardoso V.F., Correia D.M., Ribeiro C., Fernandes M.M., Lanceros-Méndez S. // *Polymers*. 2018. V. 10 (2). P. 161.
- [4] Jia Lv, Yiyun Cheng. // *Chem. Soc. Rev.* 2021. V. 50. P. 5435.
- [5] Scanni A., Valentini A., Perna G., Capozzi V., Convertino A. // *J. Lumin.* 2000. V. 91 (1–2). P. 87.
- [6] Хатунгов С.А., Нурмухаметов Р.Н., Селиверстов Д.И., Сергеев А.М. // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2006. Т. 48. № 2. С. 263.
- [7] Khatipov S.A., Nurmukhametov R.N., Sakhno Yu.E., Klimentov V.G., Seliverstov D.I., Sychkova S.T., Sakhno T.V. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2011. V. 269. Iss. 21. P. 2600.
- [8] Valenta J. // *AIP Advances*. 2018. V. 8. Iss. 10. P. 105123.
- [9] Araujo G.R., Pollmann T., Ulrich A. // *Eur. Phys. J. C*. 2019. V. 79 (8). P. 653.
- [10] Gao J., Ni Z., Liu Ya. // *e-Polymers*. 2016. V. 16 (2). P. 111.
- [11] Alentiev A.Yu., Shantarovich V.P., Merkel T.C., Bondar V.I., Freeman B.D., Yampolskii Yu.P. // *Macromolecules*. 2002. V. 35. P. 9513.
- [12] Киселев В.М., Багров И.В. // *Опт. и спектр.* 2017. Т. 123. № 4. С. 543; Kiselev V.M., Bagrov I.V. // *Opt. Spectrosc.* 2017. V. 123. N 4. P. 559.
- [13] Yang M.K., French R.H., Tokarsky E.W. // *J. Micro. Nanolith. MEMS MOEMS*. 2008. V. 7(3). P. 033010.
- [14] Tsai B.K., Allen D.W., Hanssen L.M., Wilthan B., Zeng Ji. // *Proc. SPIE*. 2008. V. 7065. P. 70650Y.
- [15] Quill T., Weiss S., Hirschler C., Pankadzh V., DiBattista G., Arthur M., Chen Ja. // <https://www.porex.com/wp-content/uploads/2020/04/Ultraviolet-Reflectance-of-Microporous-PTFE.pdf>
- [16] Киселев В.М., Кисляков И.М., Бурчинов А.Н. // *Опт. и спектр.* 2016. Т. 120. № 4. С. 545; Kiselev V.M., Kislyakov I.M., Burchinov A.N. // *Opt. Spectrosc.* 2016. V. 120. N 4. P. 520.
- [17] Evstropiev S.K., Karavaeva A.V., Dukel'skii K.V., Kiselev V.M., Evstropiev K.S., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V. // *Ceramics International*. 2017. V. 43. Iss. 16. P. 14504.
- [18] Evstropiev S.K., Karavaeva A.V., Petrova M.A., Nikonorov N.V., Vasilyev V.N., Lesnykh L.L., Dukel'skii K.V. // *Mater. Today Commun.* 2019. V. 21. P. 100628.
- [19] Киселев В.М., Кисляков И.М., Багров И.В. // *Опт. и спектр.* 2016. Т. 120. № 6. С. 916; Kiselev V.M., Kislyakov I.M., Bagrov I.V. // *Opt. Spectrosc.* 2016. V. 120. N 6. P. 859.
- [20] Киселев В.М., Багров И.В., Гренишин А.С. // *Опт. и спектр.* 2021. Т. 129. № 4. С. 468; Kiselev V.M., Bagrov I.V., Grenishin A.S. // *Opt. Spectrosc.* 2021. V. 129. N 4. P. 506.
- [21] Kretschmer C.B., Nowakowska J., Wiebe R. // *Ind. Eng. Chem.* 1946. V. 38 (5). P. 506.
- [22] Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7-th Ed. N.Y.: McGraw_Hill, 1997.
- [23] Багров И.В., Белоусова И.М., Данилов О.Б., Киселев В.М., Муравьева Т.Д., Соснов Е.Н. // *Опт. и спектр.* 2007. Т. 102. № 1. С. 58; Bagrov I.V., Belousova I.M., Danilov O.B., Kiselev V.M., Murav'eva T.D., Sosnov E.N. // *Opt. Spectrosc.* 2007. V. 102. N 1. P. 52.
- [24] Минаев Б.Ф. // *Изв. вузов. Сер. Физ.* 1978. № 9. С. 115; Minaev B.F. // *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fiz.* 1978. N 9. P. 115.
- [25] Минаев Б.Ф. // *Опт. и спектр.* 1985. Т. 58. № 6. С. 1238; Minaev B.F. // *Opt. Spectrosc.* 1985. V. 58. N 6. P. 1238.
- [26] Klotz R., Peyerimhoff S.D. // *Molecular Phys.* 1986. V. 57. N 3. P. 573.
- [27] Ogilby P.R., Foote Ch.S. // *J. Am. Chem. Soc.* 1983. V. 105. N 11. P. 3423.
- [28] Scurlock R.D., Ogilby P.R. // *J. Phys. Chem.* 1987. V. 91. P. 4599.
- [29] Schmidt R., Afshari E. // *J. Phys. Chem.* 1990. V. 94. P. 4377.
- [30] Schweitzer C., Schmidt R. // *Chem. Rev.* 2003. V. 103. P. 1685.
- [31] Jensen R.L., Holmegaard L., Ogilby P.R. // *Phys. Chem. B*. 2013. V. 117. N 50. P. 16227.
- [32] Bregnhøj M., Ogilby P.R. // *J. Phys. Chem. A*. 2015. V. 119. N 35. P. 923.
- [33] Bregnhøj M., Westberg M., Minaev B.F., Ogilby P.R. // *Acc. Chem. Res.* 2017. V. 50. N 8. P. 1920.
- [34] Chou Pi-Tai, Khan A.U. // *Chem. Phys. Lett.* 1984. V. 103. N 4. P. 281.
- [35] Багров И.В., Гоголева Н.Г., Гренишин А.С., Киселев В.М. // *Опт. и спектр.* 2020. Т. 128. № 1. С. 58; Bagrov I.V., Gogoleva N.G., Grenishin F.S., Kiselev V.M. // *Opt. Spectrosc.* 2020. V. 128. N 1. P. 57.
- [36] Macpherson A.N., Truscott T.G., Turner P.H. // *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 1994. V. 90 (8). P. 1065.
- [37] Багров И.В., Киселев В.М., Кисляков И.М., Соснов Е.Н. // *Опт. и спектр.* 2014. Т. 116. № 4. С. 609; Bagrov I.V., Kiselev V.M., Kislyakov I.M., Sosnov E.N. // *Opt. Spectrosc.* 2014. V. 116. N 4. P. 567.
- [38] Graunke T., Schmitt K., Raible S., Wöllenstein Jü. // *Sensors*. 2016. V. 16 (10). P. 1605.