

УДК 541(64+15)

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОЛЕКУЛЯРНУЮ СТРУКТУРУ ТЕЛОМЕРОВ ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ФТОРТЕЛОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ СТЕКЛОТКАНИ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

© 2024 г. Г. А. Кичигина^{1,*}, П. П. Куш¹, М. В. Жидков¹,
Ю. М. Шульга¹, Д. П. Кирюхин¹, Е. В. Голосов¹

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
РАН, Черноголовка, Россия

*E-mail: kga@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 27.02.2024 г.

После доработки 02.04.2024 г.

Принята к публикации 03.04.2024 г.

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света впервые проведено спектральное исследование радиационно-синтезированных теломеров тетрафторэтилена с различными концевыми группами. Изучено влияние гамма-излучения на молекулярную структуру теломеров и гидрофобных покрытий алюмоборосиликатной стеклоткани на их основе. Под действием гамма-излучения наблюдаются изменения молекулярной и морфологической структуры теломеров.

Ключевые слова: теломеры тетрафторэтилена, спектроскопия комбинационного рассеяния света, гамма-излучение

DOI: 10.31857/S0023119324040084 EDN: TQAVEF

Одним из перспективных материалов для создания гидрофобных, антифрикционных, антиобледенительных покрытий на различные материалы и композитов является политетрафторэтилен (ПТФЭ) и его сополимеры. Изучению как уникальных свойств ПТФЭ, так и его недостатков, в частности низкой радиационной стойкости, посвящено большое количество работ [1–3]. Вопрос о влиянии излучения на свойства и структуру ПТФЭ и его аналогов актуален. Под действием различных видов излучения (гамма, электронное, протонное, лазерное и др.) и разных условий облучения наблюдается деструкция ПТФЭ, приводящая к изменениям молекулярного строения, морфологии и, соответственно, изменению свойств полимера и образованию его модифицированных форм [4–8].

В работе [9] проведены ИК-спектроскопические исследования влияния гамма-излучения на молекулярную структуру гидрофобных покрытий алюмоборосиликатной стеклоткани, полученных из растворов радиационно-синтезированных теломеров тетрафторэтилена (ТФЭ) в ряде растворителей, имеющих различную длину цепи и концевые группы с общей формулой $R_1(C_2F_4)_nR_2$ (R_1 и R_2 – фрагменты молекул растворителя, n – длина цепи) [10, 11]. Об-

лучение образцов теломерных покрытий в воздушной среде приводит к ухудшению их гидрофобных свойств, облучение же в вакууме не оказывает влияния на их гидрофобность. Анализ спектральных данных показал, что под действием излучения изменяется молекулярная структура теломеров, уменьшается относительная интенсивность колебаний концевых групп, регистрируется новая полоса поглощения, обусловленная появлением концевых карбоксильных групп, приводящих к ухудшению гидрофобности покрытий. Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света позволяет получить дополнительную информацию о молекулярной структуре образцов и, соответственно, о влиянии на нее гамма-излучения, поскольку во многих случаях оба спектра (ИК и КР) являются взаимно дополняющими по содержащейся в них спектральной информации [12].

Данная работа является продолжением этих исследований. Цель данной работы – изучение влияния гамма-излучения на молекулярную структуру теломерных покрытий стеклоткани и радиационно-синтезированных теломеров тетрафторэтилена с различными концевыми группами методом спектроскопии комбинационного рассеяния.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для нанесения покрытий применялись растворы радиационно-синтезированных теломеров тетрафторэтилена в ацетоне, пentaфторхлорбензоле и смеси растворителей трифтортрихлорэтан + аммиак, трифтортрихлорэтан + этанол. Для их синтеза использованы тетрафторэтилен (C_2F_4 , ТФЭ), трифтортрихлорэтан ($C_2F_3Cl_3$, фреон 113) производства ООО “Завод полимеров Кирово-Чепецкого химического комбината”, ацетон (C_3H_6O), пentaфторхлорбензол (C_6F_5Cl , ПФХБ), этанол (C_2H_5OH) и газообразный аммиак (NH_3). Газообразный ТФЭ, содержащий 0.02% примесей, и растворители (марка ХЧ) специальной очистке не подвергались. Радиационная теломеризация проводилась в запаянных стеклянных ампулах. Образцы готовились по стандартной методике: в стеклянную ампулу (объем ~50 мл) помещали определенное количество растворителя, освобождали от растворенного воздуха и при 77 К намораживали необходимое количество ТФЭ, ампулу запаивали. В опытах с добавлением аммиака намораживался аммиак и ТФЭ. Систему перемешивали при комнатной температуре и подвергали облучению γ -лучами ^{60}Co на УНУ “Гамматок-100” [13], мощность дозы облучения 2.5 Гр/с. Исходная концентрация ТФЭ в растворе ацетона составляла ~1.0 моль/л, ПФХБ — 0.6 моль/л, в смесях фреона 113 с этанолом и аммиаком — 0.45 моль/л. Концентрация этанола в смеси — 0.08 моль/л, аммиака — 0.17 моль/л. Концентрацию полученных растворов теломеров определяли гравиметрически после удаления растворителя из реакционной смеси. Ошибка измерений не превышала $\pm 0.5\%$.

В качестве образцов стеклоткани использовали стандартную алюмоборосиликатную стеклоткань с простейшим тканым переплетением (размер волокон и межволоконных полостей стеклоткани составляет ~10–12 мкм), размером 5 × 5 см. Стеклоткань была подвергнута стандартной обработке:

прогрета при 450–470°C для удаления технического замазливателя, отмыта водным раствором аммиака и высушена при 120°C. Нанесение растворов теломеров на образцы стеклоткани проводилось методом окунания. Обработка образцов включала следующие операции: погружение образца в раствор теломера (30–40 с), сушка при 40°C (20–40 мин) и прогрев при 150°C (20 мин). Образцы с покрытием из теломеров ТФЭ/ПФХБ прогревались 20 мин при 200°C. Концентрация пропиточных растворов ~2.0–4.0 мас.%. Количество теломера, нанесенного на образец, контролировали гравиметрически. Порошки сухих теломеров для регистрации спектров получали из растворов, удаляя остатки растворителя.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) регистрировали на конфокальном Рамановском микроскопе Confotec NR500 (SOLinstuments). Использовалась длина волны лазерного излучения 532 нм с мощностью ~1 мВт.

Топографию поверхности покрытий и теломеров исследовали с использованием конфокального лазерного микроскопа Optelics Hybrid (Lasertec).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.
ТЕЛОМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ СТЕКЛОТКАНИ

На рис. 1 представлены изображения поверхностей теломерных покрытий, сформированных на алюмоборосиликатной стеклоткане. По данным оптической микроскопии наиболее равномерное покрытие наблюдается для образцов, обработанных растворами теломеров ТФЭ/ПФХБ и ТФЭ/фреон113+ C_2H_5OH (2 и 4, рис. 1). Толщина и равномерность покрытия зависят от длины цепи теломеров, количества нанесенного теломера. Средняя длина цепи использованных теломеров составляет 15–20 звеньев ТФЭ для ТФЭ/фреон+ C_2H_5OH , 40–60 звеньев для ТФЭ/фреон113+ NH_3 и ТФЭ/ПФХБ. Количество нанесенного теломера ~4.5–5.0% для образцов ТФЭ/фреон113+ C_2H_5OH и ТФЭ/ПФХБ

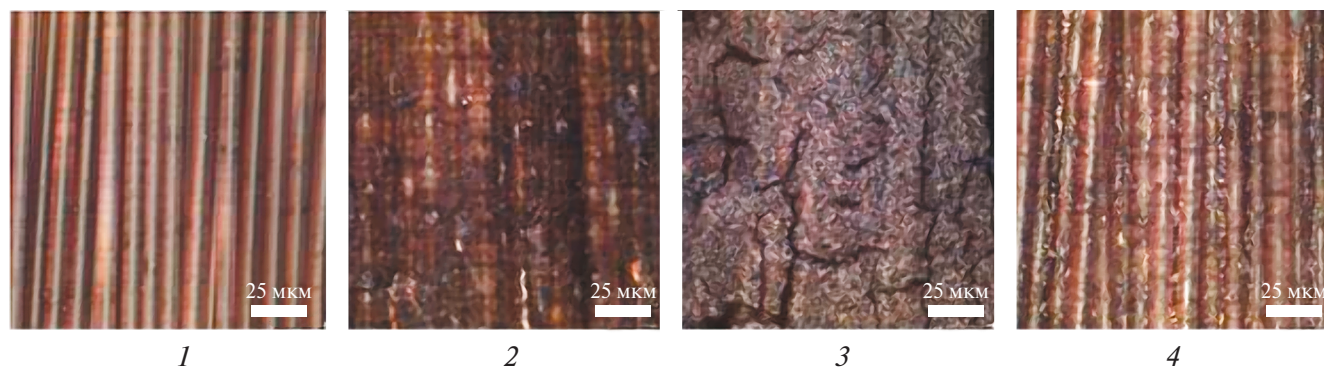


Рис. 1. Конфокальные изображения необлученных образцов стеклоткани с покрытием из теломеров: 1 – исходный образец стеклоткани, 2 – ТФЭ/ПФХБ, 3 – ТФЭ/фреон113+ NH_3 , 4 – ТФЭ/фреон113+ C_2H_5OH .

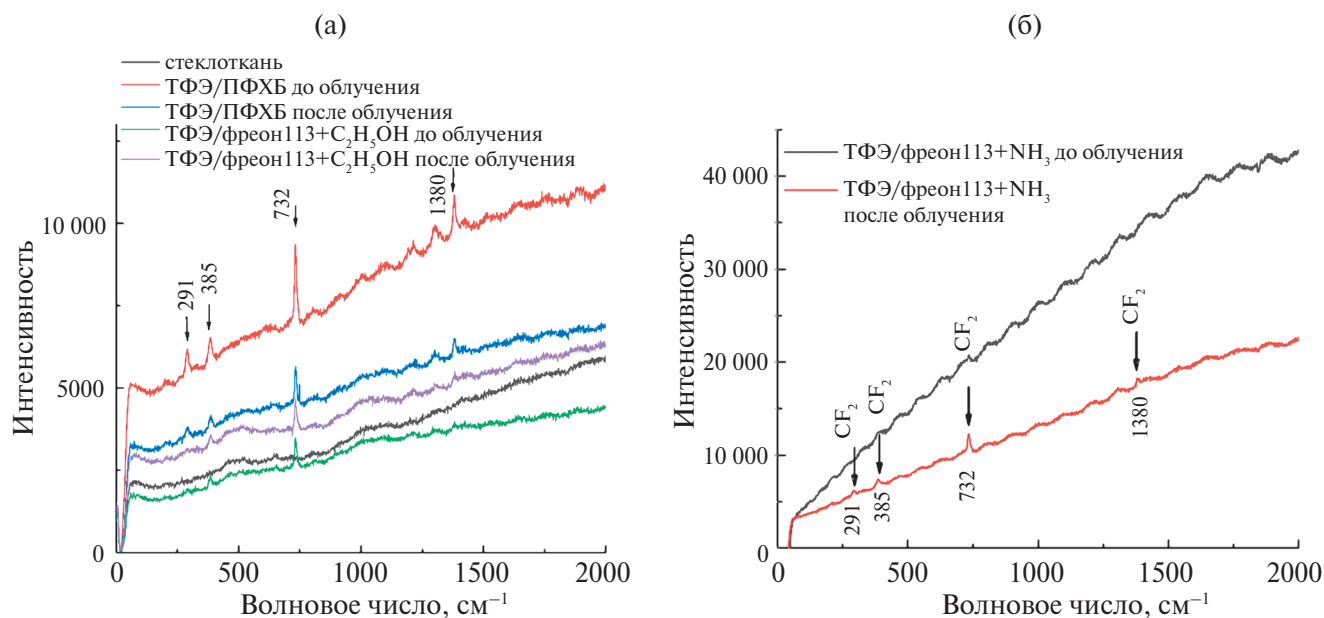


Рис. 2. Спектры КР стеклоткани и теломерных покрытий до и после облучения дозой 600 кГр.

и 8.5% для ТФЭ/фреон113+NH₃. Образец с теломерами ТФЭ/фреон113+NH₃ характеризуется неравномерным покрытием с толщиной отдельных участков до 50 мкм. Это связано с нанесением избыточного количества теломера. На поверхности покрытия имеются трещины, и, весьма вероятно, что они могут обладать низкой адгезией. Исходная стеклоткань гидрофильна. Измеренные контактные углы смачивания стеклоткани после нанесения теломерных покрытий достигают 140°.

Ранее в работе [9] при анализе ИК-спектров поглощения теломерных покрытий этих образцов было установлено, что под действием гамма-излучения в присутствии кислорода воздуха наблюдаются изменения их молекулярной структуры, происходит отрыв концевых групп теломеров, состоящих из фрагментов молекул растворителей, и образуются гидроксилсодержащие (–COОН) концевые группы. Спектроскопия комбинационного рассеяния света позволяет получить дополнительную информацию о молекулярной структуре образцов и влиянии на нее гамма-излучения. На рис. 2 приведены спектры КР исходной стеклоткани и теломерных покрытий стеклоткани до и после облучения. В спектре исходной стеклоткани, необработанной теломерами, не наблюдается полос КР. Для исходных образцов ТФЭ/ПФХБ и ТФЭ/фреон113+С₂Н₅ОН отчетливо наблюдаются малоинтенсивные пики вблизи 289, 382, 731 и 1380 см⁻¹, соответствующие различным модам С–F колебаний тетрафторэтиленовой цепи теломеров [14, 15]. Их частоты незначительно отличаются от частот в ПТФЭ, что связано с длиной цепи теломеров

и наличием концевых групп. В отличие от ИК-спектров, колебаний, обусловленных наличием концевых групп в теломерах, не регистрируется, вероятно, из-за их малой интенсивности по сравнению с колебаниями цепи. В спектре покрытия из раствора теломера ТФЭ/фреон113+аммиак наблюдается только высокий флуоресцентный фон, который может быть обусловлен либо морфологией покрытия (наличием аморфных и кристаллических фаз), либо свойствами самого теломера. Наличие высокого фона отчасти может быть связано с условиями проведения экспериментов (использованием коротковолнового возбуждающего лазерного излучения).

Облучение стеклоткани с теломерными покрытиями дозой 600 кГр на воздухе и в вакууме и последующий анализ спектров КР показали, что никаких существенных изменений в спектрах не наблюдается. Воздействие облучения приводит к уменьшению фона и частичному разрешению пиков С–F в спектре покрытия из раствора теломера ТФЭ/фреон113 + аммиак (рис. 2б). Это не удивительно, поскольку все основные изменения в ИК-спектрах наблюдались для полос, связанных с колебаниями концевых групп теломеров, которые, к сожалению, не удалось зарегистрировать в спектрах КР из-за их малой интенсивности.

СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ТЕЛОМЕРОВ ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Учитывая результаты, полученные для теломерных покрытий, и тот факт, что покрытия состоят из

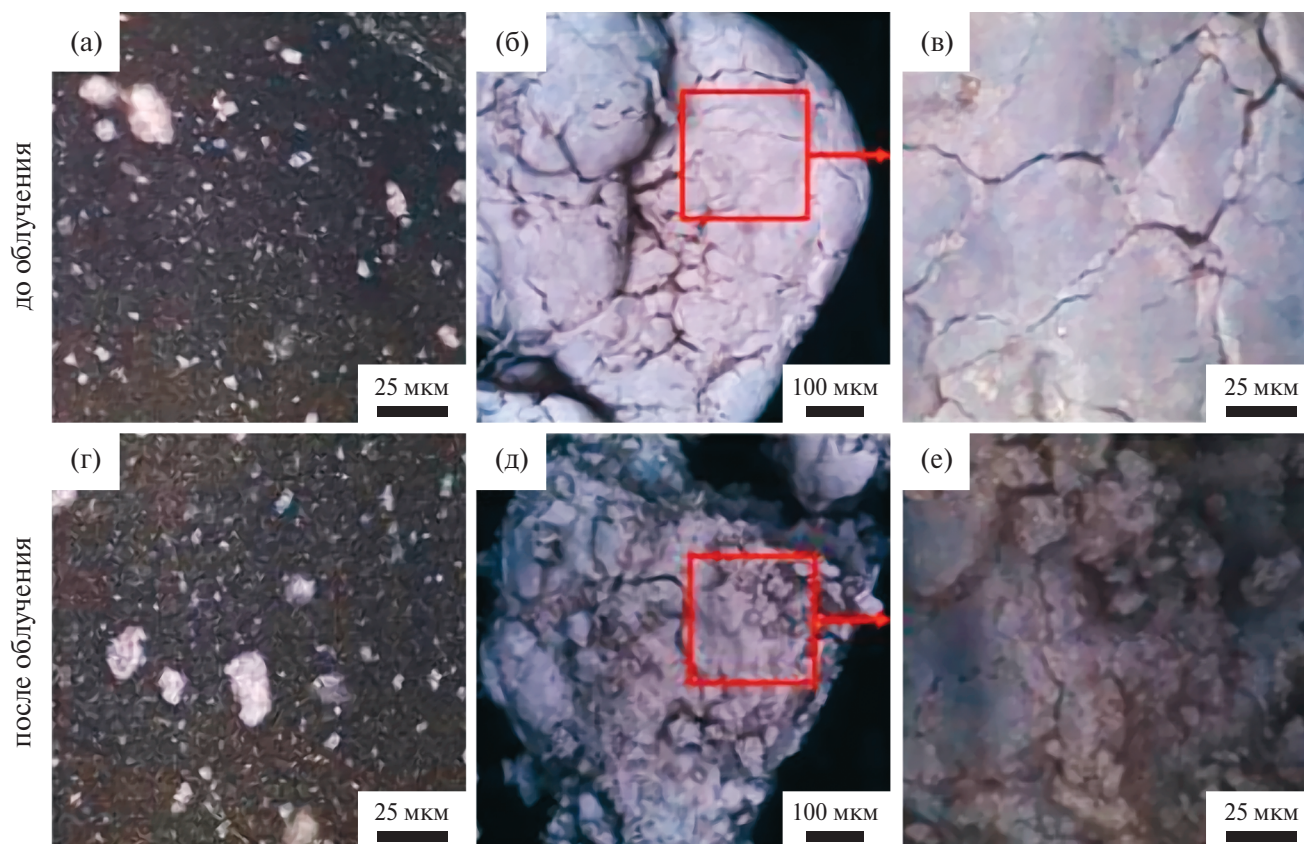


Рис. 3. Поверхность образцов теломеров ТФЭ/ацетон (а, г) и ПТФЭ (б, в, д, е) до и после облучения дозой 600 кГр.

теломеров, а спектры КР теломеров не изучались никогда ранее, для получения дополнительной информации было проведено исследование порошков теломеров до и после облучения на воздухе. Для более корректного отнесения полос были дополнительно зарегистрированы спектры ПТФЭ, а также растворителей (фреона 113, этанола), в смеси которых проводился синтез теломеров и фрагменты молекул входят в состав теломеров.

Методом оптической микроскопии не удалось зафиксировать каких-либо структурных изменений в результате облучения в порошках теломеров ТФЭ/ПФХБ и ТФЭ/ацетон. Поверхность частиц ПТФЭ в результате облучения становится более “рыхлой” (рис. 3б, в, д, е).

Наиболее информативные спектры, в которых четко регистрируются полосы КР тетрафторэтиленовой цепи и концевых групп, получены для теломеров ТФЭ/фреон 113 + этанол. Результаты, полученные при изучении спектров необлученных и облученных теломеров ТФЭ/ПФХБ и ТФЭ/ацетон, менее информативны (рис. 4), в них регистрируются только колебания С–F цепи, наблюдающиеся и в спектре ПТФЭ. Частоты колебаний приведены на рис. 4. Интенсивность колебаний концевых групп

мала. Это связано с тем, что длина цепи теломеров, полученных в ацетоне и ПФХБ (30 и 60 звеньев ТФЭ), больше, чем для ТФЭ/фреон113+этанол и, соответственно, относительное количество концевых групп в них меньше. Следует отметить, что в спектрах облученных образцов как ПТФЭ, так и теломеров ТФЭ/ацетон отсутствует флуоресцентный фон. В спектрах ТФЭ/ПФХБ он уменьшается.

Был проведен подробный анализ спектра теломера ТФЭ/фреон 113+этанол (рис. 5). Эти теломеры имеют существенно меньшую среднюю длину цепи (~20 звеньев ТФЭ) и, соответственно, большее количество концевых групп, что позволяет регистрировать полосы, связанные с этими группами. На рис. 5 приведены спектры КР необлученного теломера ТФЭ/фреон113+этанол и растворителей, в смеси которых проводился синтез. Сравнение спектров показывает, что в необлученном теломере наблюдаются полосы КР, обусловленные колебаниями связей С–F тетрафторэтиленовой цепи в областях 280–400, 730 и 1200–1300 см^{-1} [14–16], они же регистрируются в спектре теломера ТФЭ/ацетон и ПТФЭ (рис. 4).

Но помимо этих полос, наблюдаются полосы КР концевых групп, состоящих из фрагментов молекулы

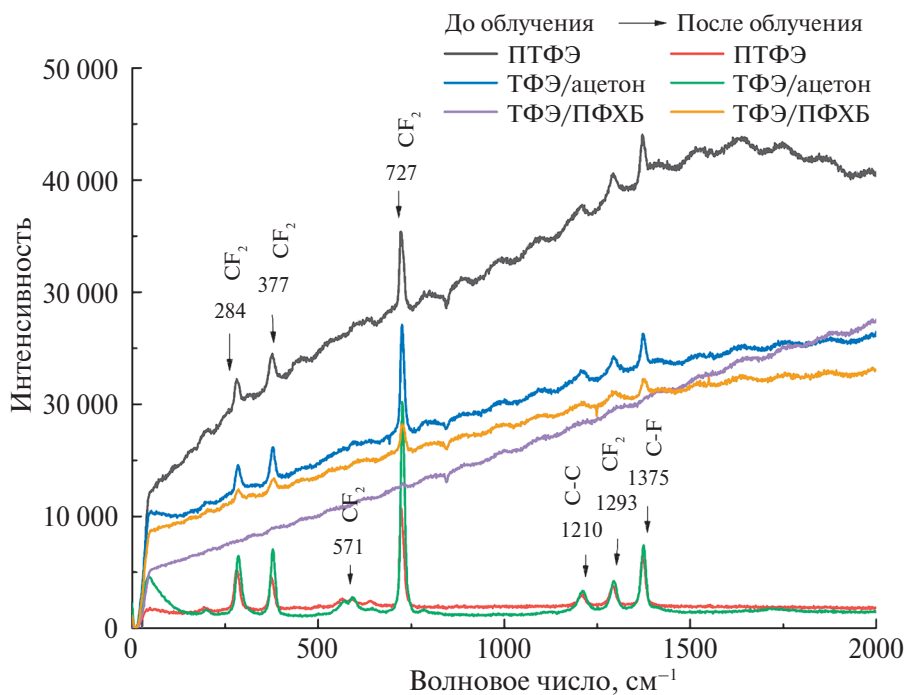


Рис. 4. Спектры КР порошков теломеров ТФЭ и ПТФЭ до и после облучения.

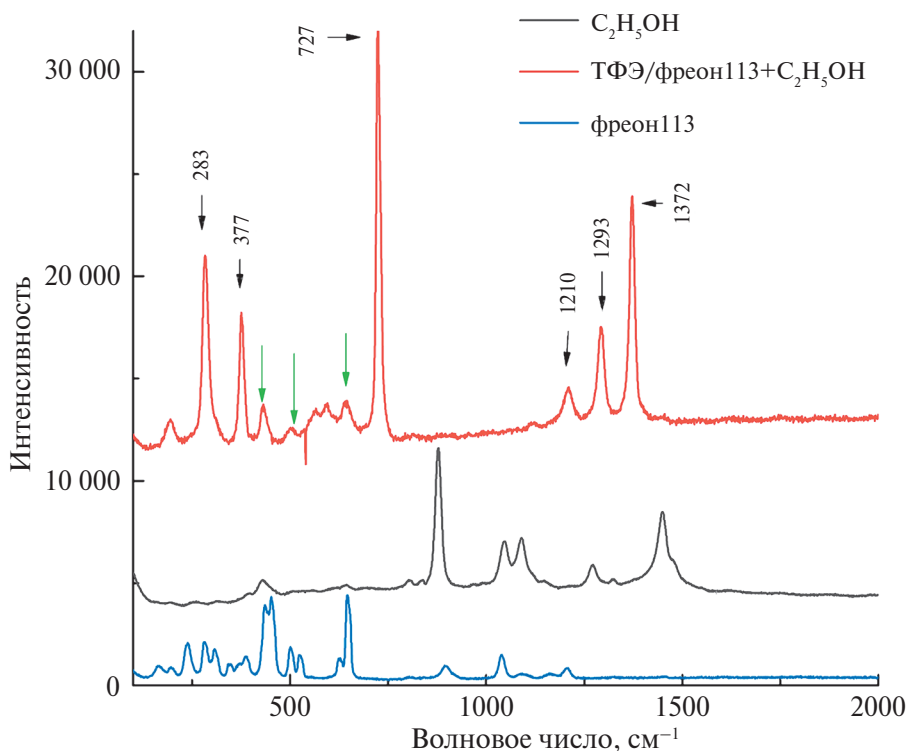


Рис. 5. Спектры КР необлученного теломера ТФЭ/фреон113+этанол, фреона 113 и этанола.

фреона 113 (отмечены зелеными стрелками) с частотами 431, 503 и 642 см^{-1} . Все полосы фреона в теломере незначительно смещены по частоте, по сравнению с растворителем, поскольку фрагменты молекул фреона входят в состав теломера в качестве концевых групп. Отметим, что в ИК-спектрах этих

теломеров нам не удалось зарегистрировать полос поглощения фреоновых концевых групп. Это связано с тем, что частоты их колебаний близки к частотам С—F цепи, интенсивность их мала, они регистрируется вместе с полосами поглощения цепи. Напротив, в КР-спектрах не регистрируется полос,

связанных со спиртовыми концевыми группами, вероятно, из-за их малой интенсивности по сравнению с полосами С–F цепи, и диапазона регистрации спектра ($0\text{--}2500\text{ см}^{-1}$).

Таким образом, использование двух методов (ИК и КР спектроскопии) позволило подтвердить, что в состав теломеров ТФЭ/ фреон113+этанол в качестве концевых групп входят как фрагменты молекул фреона, так и этанола, в смеси которых проводился синтез. Выводы о вхождении фрагментов молекул фреона 113 ($\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$) в состав теломеров в исследованиях, проведенных ранее, были сделаны на основании результатов элементного анализа теломеров, подтверждающих наличие хлора в составе теломеров.

Согласно данным оптической конфокальной микроскопии морфологическая структура образцов облученных теломеров ТФЭ/ фреон113+этанол визуально неоднородна, на поверхности есть области с более выраженной кристаллической структурой (рис. 6а, б). Анализ спектров КР в разных точках образца показал, что и спектры в них различны.

Спектр КР облученного теломера в точке 1 (рис. 6а, в), где морфология поверхности облученного и необлученного образца идентична, визуально практически не отличается от спектра необлученного теломера, приведенного на рис. 5. В нем сохраняются все полосы тетрафторэтиленовой цепи и концевых групп. Измерение относительных интенсивностей полос, связанных с концевыми фреоновыми группами ($431, 503, 642\text{ см}^{-1}$), по отношению к полосе валентных колебаний С–F цепи (727 см^{-1}) показывает, что они уменьшаются в среднем на 20–30% в облученном образце. Такой же эффект (уменьшение интенсивности полос концевых ОН-групп) наблюдался при анализе ИК-спектров облученных теломерных покрытий [9]. Он обусловлен уменьшением (отрывом) количества концевых групп под действием гамма-излучения. Помимо этого, в ИК-спектрах было также отмечено появление новой полосы в области 1780 см^{-1} , отнесенной к образующейся СООН-группе. В спектрах КР облученного теломера ТФЭ/фреон113+этанол не регистрируется новой полосы. Возможно, это связано с ее малой интенсивностью в спектрах КР.

Спектральный анализ областей, в которых визуально начинают формироваться кристаллы (точка 4, рис. 6а, б), а также самих кристаллов (точки 3 и 2), свидетельствует об изменениях относительных интенсивностей полос С–F, CF_2 , С–С теломерной цепи и концевых фреоновых групп (указаны стрелками на рис. 6в).

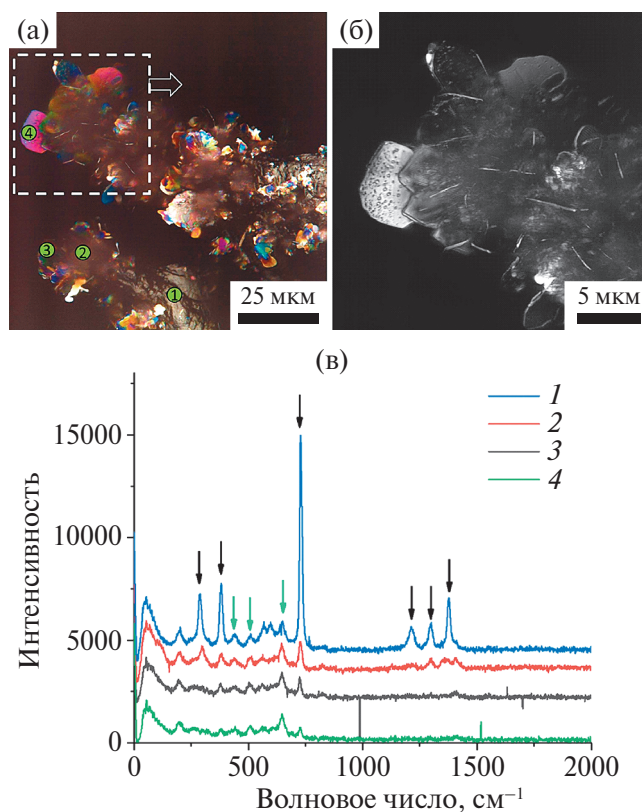


Рис. 6. Спектры КР облученного теломера ТФЭ/ фреон113 + этанол в разных точках образца и изображения этих точек. Доза облучения 600 кГр.

Очевидно, что спектры существенно различаются по относительной интенсивности полос С–F цепи и концевых групп в точках 1 и 2, 3, 4. В спектрах, полученных в точках 2, 3 и 4, все полосы имеют сравнимую малую интенсивность, причем, что удивительно, интенсивность колебаний С–F теломерной цепи (отмечены черными стрелками) сравнима с интенсивностью полос концевых групп (зеленые стрелки). Такие спектры могут соответствовать теломерам с малой длиной цепи, когда относительная концентрация концевых групп велика. В качестве возможного объяснения такого эффекта можно сказать, что он связан с неоднородной структурой образца теломера после облучения и наличием в нем областей с различным составом теломеров, оказывающим влияние на спектры КР. Можно полагать, что под действием облучения происходит не только отрыв концевых групп, но и разрыв С–С связей теломерной цепи, приводящий к появлению теломеров с короткой длиной цепи и большим количеством концевых групп. Этот вопрос требует проведения дополнительных исследований.

В подтверждение заключений о том, что под действием гамма-излучения происходят изменения образцов не только теломеров, но и ПТФЭ, можно

привести также тот факт, что и спектры КР необлученного ПТФЭ, как уже отмечалось, имеют довольно высокий флуоресцентный фон, в спектрах же облученного образца он отсутствует.

В заключение следует отметить, что изучение спектров комбинационного рассеяния света подтверждает вывод, сделанный ранее, что гамма-излучение влияет на молекулярную структуру теломеров, происходит отрыв их концевых групп. Весьма вероятно, что происходит разрыв теломерной цепи, приводящий к образованию теломеров с более короткой длиной. Этот эффект наблюдается, по крайней мере, для образцов ТФЭ/фреон113+этанол. Анализ спектров КР подтвердил, что в состав теломеров ТФЭ/фреон113+этанол в качестве концевых групп входят как фрагменты молекул этанола, так и фреона 113. Помимо этого показано, что под действием излучения морфологическая структура теломеров становится более неоднородной, появляются области с более выраженной кристаллической структурой.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по госзаданию Российской Федерации (номера госрегистрации 124013000722-8, 124013000757-0, 124013100858-3) с использованием УНУ “Гамматок-100” и оборудования АЦКП ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Истомин Н.П., Семенов А.П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. М.: Наука, 1981. 460 с.
2. Радиационная стойкость органических материалов. Справочник. Под ред. В.К. Милинчука, В.И. Тупикова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 171 с.
3. Фторполимеры. Под ред. Л. Уолла. Пер. с англ. Под ред. И.Л. Кнунянца, В.А. Пономаренко. М.: Мир, 1975. 448 с.
4. Ignatieva L., Kuryaviy V., Tsvetnikov A., Polyshchuk S., Bouznik V. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2007. V. 68. P. 1106.
5. Игнатьева Л.Н., Бузник В.М. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 3. С. 139.
6. Хатилов С.А., Конова Е.М., Артамонов Н.А. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 5. С. 64.
7. Ольхов Ю.А., Аллаяров С.Р., Диксон Д.А. // Химия высоких энергий. 2014. Т. 48. № 3. С. 175.
8. Иванов Л.Ф., Ольхов Ю.А., Аллаяров С.Р., Толстомятов Е.М., Гракович П.Н., Калинин Л.А. // Химия высоких энергий. 2014. Т. 48. № 2. С. 148.
9. Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П., Кабачков Е.Н., Шульга Ю.М. // Химия высоких энергий. 2023. Т. 57. № 5. С.378.
10. Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П., Барелко В.В., Дорохов В.Г., Быков Л.А., Кузнецов М.В. // Химическая технология. 2015. № 6. С. 326.
11. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П., Бузник В.М. Низкомолекулярные фторполимерные материалы. Монография “Фторполимерные материалы” (гл. 4). Томск: Изд-во НТЛ, 2017. 600 с.
12. Куццов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. Москва: Техносфера, 2013, 696 с.
13. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Аллаяров С.Р., Бадамшина Э.Р. // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. № 3. С. 224.
14. Allyarov S.R., Frolov I.A., Tolstopyatov E.M., Dixon D.A., Vasiliu M., Ivanov L.F., Grakovich P.N., Demidov S.V. // Journal of Russian Laser Research. 2019. V. 40. № 6. P.571.
15. Schaffer H.E., Chance R.R., Silbey R.J., et al. // J. Chem. Phys. 1991. V. 94. P. 4161.
16. Kuzmany H. // Phys. Status Solidi. 1980. V. 97(B). P. 521.

STUDY OF THE GAMMA RADIATION EFFECT ON THE MOLECULAR STRUCTURE OF TETRAFLUOROETHYLENE TELOMERS AND FLUOROTELOMERIC GLASS FABRIC COATINGS BY RAMAN SPECTROSCOPY

G. A. Kichigina*, P. P. Kusch, M. V. Zhidkov, Yu. M. Shulga, D. P. Kiryukhin, E. V. Golosov

*Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS,
142432 Moscow region, Chernogolovka, Russia*

**E-mail: kga@icp.ac.ru*

A spectral study of radiation-synthesized telomers of tetrafluoroethylene with different end groups has been carried out by Raman spectroscopy for the first time. The effect of gamma radiation on the molecular structure of telomers and hydrophobic coatings of aluminoborosilicate glass fabric based on them was studied. Changes in the molecular and morphological structure of telomers are observed under the action of gamma radiation.

Keywords: tetrafluoroethylene telomers, Raman spectroscopy, gamma-ray emission

REFERENCES

1. Istomin N.P., Semyonov A.P. Antifriction properties of composite materials based on fluoropolymers. Moscow: Nauka, 1981. 460 p.
2. Radiation resistance of organic materials. Reference book. Edited by V.K. Milinchuk, V.I. Tupikov. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 171 p.
3. Fluoropolymers. Edited by L. Wall. Edited by I.L. Knunyants and V.A. Ponomarenko. Moscow: Mir, 1975. 448 p. (In Russian)
4. Ignatieva L., Kuryaviy V., Tsvetnikov A., Polyshchuk S., Bouznic V. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2007. V. 68. P. 1106.
5. Ignatyeva L.N., Buznik V.M. // Ros. khim. zh. (Zh. Ros. Khim. Obs. named after D.I. Mendeleev). 2008. Vol. LII. № 3. P. 139.
6. Khatipov S.A., Konova E.M., Artamonov N.A. // Ros. khim. zh. (Zh. Ros. Khim. Obs. named after D.I. Mendeleev). 2008. Vol. LII. № 5. P. 64.
7. Olkhov Yu.A., Allayarov S.R., Dixon D.A. // High Energy Chemistry. 2014. V.48. № 3. P. 175.
8. Ivanov L.F., Olkhov Yu.A., Allayarov S.R., Tolstopiatov E.M., Grakovich P.N., Kalinin L.A. // High Energy Chemistry. 2014. V. 48. № 2. P. 148.
9. Kichigina G.A., Kusch P.P., Kiryukhin D.P., Kabachkov E.N., Shulga Y.M. // High Energy Chemistry. 2023. V. 57. № 5. P. 378.
10. Kichigina G.A., Kusch P.P., Kiryukhin D.P., Barelko V.V., Dorokhov V.G., Bykov L.A., Kuznetsov M.V. // Chemical Technology. 2015. № 6. P. 326.
11. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kusch P.P., Buznik V.M. Low-molecular fluoropolymer materials. Monograph "Fluoropolymer Materials" (Ch. 4). Tomsk: NTL publishing house, 2017. 600 p.
12. Kuptsov A.H., Zhizhin G.N. Fourier-Raman and Fourier-IR spectra of polymers. Moscow: Technosphere, 2013. 696 p.
13. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Allayarov S.R., Badamshina E.R. // High Energy Chemistry. 2019. V. 53. № 3. P. 224.
14. Allayarov S.R., Frolov I.A., Tolstopyatov E.M., Dixon D.A., Vasiliu M., Ivanov L.F., Grakovich P.N., Demidov S.V. // Journal of Russian Laser Research. 2019. V. 40. № 6. P.571.
15. Schaffer H.E., Chance R.R., Silbey R.J. et al. // J. Chem. Phys. 1991. V. 94. P. 4161.
16. Kuzmany H. // Phys. Status Solidi. 1980. V. 97(B). P. 521.