

УДК 53:51+535.1+535.333+53.047+535.243

О ФРАКТАЛЬНЫХ СПЕКТРАХ ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЧАСТИ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

М. С. Кутай^{1*}, *М. М. Назаров*²

¹ Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН;

² НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

В низкочастотной части терагерцевого диапазона, который примерно соответствует частотам ν от 0,1 до $2\div 3$ ТГц, для аморфных полимеров с малым коэффициентом поглощения α наблюдается степенная зависимость $\alpha(\nu) \propto \nu^\mu$, где $\mu > 0$ — показатель степени, в общем случае нецелый. Эта зависимость оказывается фрактальной, что обусловлено фрактальным строением макромолекул полимеров. В данной работе для коэффициента поглощения ряда аморфных полимеров найден показатель степенной зависимости при комнатной температуре. Его определение основано на анализе временной динамики пропускания широкополосного пикосекундного терагерцевого импульса через полимерный образец, т. е. выполнено с помощью метода импульсной терагерцевой спектроскопией во временном представлении.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 90-х годов прошлого века существенно вырос интерес к терагерцевой спектроскопии органических материалов, в частности полимеров [1]. Ранее, в 1960–1980-х годах, этот диапазон терминологически относился к дальнему инфракрасному диапазону [1, рис. 1]. Обычно границами терагерцевого диапазона считаются частоты $\nu = 0,3\div 30$ ТГц, впрочем иногда этими границами считают $\nu = 0,1\div 10$ ТГц.

Растущий интерес к свойствам полимеров в терагерцевом диапазоне частот обусловлен как непосредственным технологическим использованием этих материалов, так и возможностью создания на их основе новых конструкционных и функциональных материалов с требуемыми свойствами. Так, например, введение наночастиц кремния в полиэтилен [2] позволяет резко увеличить его коэффициент рефракции в терагерцевом диапазоне частот. При этом самыми востребованными оказываются полимеры, обладающие малым собственным поглощением в терагерцевой области. В высокочастотной оптомикроэлектронике используются такие полимеры с введенными в них электрооптическими хромофорами [3–5]. Прозрачные гибкие полимеры нужны для создания полимерных устройств доставки терагерцевого излучения (волокон, волноводов) [5]. В частности, такие материалы используются при создании медицинских эндоскопов.

Со стороны высоких частот ($30 \text{ ТГц} > \nu > 10 \text{ ТГц}$) терагерцевый диапазон частично совпадает с дальним инфракрасным диапазоном. В этой области у полимеров лежат частоты составных внутримолекулярных колебаний, а также некоторых межмолекулярных колебаний со сравнительно большой энергией. В среднем инфракрасном диапазоне ($\nu > 30 \text{ ТГц}$) линии поглощения в полимерах обусловлены возбуждением в них межатомных внутримолекулярных колебаний. Такие возбуждения полностью описываются с помощью квантовой механики. Методы расчёта характерных колебательных частот полимеров изложены в монографии [6]. Большое количество данных по резонансным частотам инфракрасных спектров и спектров комбинационного рассеяния конкретных полимеров приведено в монографии [7].

* mkitai@mail.ru

В сантиметровом диапазоне длин волн ($\nu < 0,03$ ТГц), граничащем с низкочастотной частью терагерцевого диапазона, используется макроскопическое (феноменологическое) описание различных материалов как сплошных сред. В частности, предполагается, что поглощение связано с вращательной релаксацией молекулярных групп, составляющих основу полимерной матрицы. Иногда это поглощение интерпретируется как гамма-релаксация. В этом случае спектр $\varepsilon''(\omega)$ мнимой части диэлектрической проницаемости аппроксимируется моделью Дебая $\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_S - \varepsilon_\infty) \omega \tau / (1 + \omega^2 \tau^2)$, где ω — угловая частота, ε_S — диэлектрическая проницаемость при $\omega \tau \rightarrow 0$, ε_∞ — диэлектрическая проницаемость на частоте много больше $1/\tau$, τ — характерный период релаксационных колебаний. Для полимеров такое приближение заведомо работает для частот $\nu < 0,1$ ТГц [1].

В данной работе анализируются результаты измерения коэффициента поглощения полимеров в низкочастотной части терагерцевого диапазона (0,1–3,0 ТГц), где ни один из вышеперечисленных подходов — ни макроскопический (гамма-релаксация), ни основанный на квантовомеханическом рассмотрении внутримолекулярных колебаний (отдельные резонансы) — непосредственно не применим, а другого (промежуточного) подхода нет. Поэтому актуальна разработка приближённого метода, позволяющего аппроксимировать спектр поглощения полимеров, хотя бы в определённой части низких частот терагерцевого диапазона. Мы предлагаем описывать спектры поглощения полимеров в низкочастотной части терагерцевого диапазона степенной функцией с некоторым (вообще говоря, нецелым) показателем степени, связав это с фрактальной структурой полимеров.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Известно два разных механизма, ответственных за поглощение полимеров в низкочастотной части терагерцевого диапазона. Согласно 1-му механизму поглощение связано с возбуждением групповых колебаний в макромолекулах. Это могут быть различные по характеру, сложные (в том числе составные) колебания. Они могут быть как локализованными в пределах одной макромолекулы, так и межмолекулярными. Естественно, групповые колебания макромолекул связаны с их геометрической структурой [8]. Второй механизм поглощения обусловлен с взаимодействием электромагнитных волн терагерцевого диапазона с протонами в составе водородных связей в полимере. Особенно ярко эти связи проявляются в случае биополимеров [9]. Для ряда синтетических органических полимеров поглощение за счёт водородных связей оказывается существенным [10, 11]. Следует отметить, что такое поглощение имеет место и в поликристаллических, и в аморфных полимерах [12]. Оба механизма поглощения отличаются чувствительностью к ориентации и структуре окружения [13].

Аморфные полимеры относятся к неупорядоченным средам. Полное согласованное микроскопическое описание таких материалов методами статистической физики возможно лишь в случае абсолютного (полного) хаоса в их структуре. Однако в действительности даже аморфные полимеры представляют собой разрыхлённую пористую среду. В ней отсутствует полная кристаллическая упорядоченность, характерная для твёрдых тел, но нет и абсолютного хаоса.

Каждая макромолекула состоит из большого числа частей, причём каждая из этих частей в чём-то подобна целой макромолекуле. Иными словами, структура полимеров (в определённом диапазоне геометрических размеров) обладает свойством масштабной инвариантности (скейлинга). Такие структуры относятся к фрактальным, а локализованные колебательные возбуждения в полимерных макромолекулах называются фрактальными колебаниями. Эти колебания относятся к фрактальным только в определённом диапазоне геометрических размеров (или в определённом

ном диапазоне частот) [14]. В этом интервале плотность распределения фрактальных колебаний по частоте описывается степенной функцией с некоторым, вообще говоря необязательно целым, показателем степени.

Целью данной работы является попытка применить фрактальное описание поглощения в низкочастотной части терагерцевого диапазона к некоторым аморфным органическим синтетическим полимерам. В определённых случаях фрактальное представление спектра может быть применимо как для 1-го механизма поглощения, связанного с составными колебаниями, так и при наличии водородных связей в аморфных полимерах, т. е. для 2-го механизма поглощения.

По величине коэффициента поглощения $\alpha(\omega)$ в низкочастотной части терагерцевого диапазона полимеры также делятся на две практически не пересекающиеся группы: сильно- и малопоглощающие полимеры [10]. Для определённости в качестве порогового значения α^* берётся коэффициент поглощения на частоте 1 ТГц.

У сильнопоглощающих полимеров коэффициент поглощения больше (иногда много больше) величины $\alpha^* = 10 \text{ см}^{-1}$. Сильное поглощение в полимерах почти всегда обусловлено наличием в них межмолекулярных водородных связей (см., например, [10] и приведённые там ссылки), для которых реализуется 2-й механизм поглощения. В частности, ниже будет рассмотрен полиметилметакрилат (ПММА), относящийся к этой группе.

У малопоглощающих полимеров $\alpha^* = (0,5 \div 1,0) \text{ см}^{-1}$. Такие полимеры не содержат межмолекулярных водородных связей; в них доминирует 1-й механизм поглощения.

Известно несколько полимеров, находящихся между этими группами, имеющих $\alpha^* = 0,5 \div 10 \text{ см}^{-1}$. К таким полимерам, в частности, относится полистирол (PS), который также рассмотрен ниже.

В данной работе исследуются только аморфные полимеры, находящиеся при комнатной температуре в стеклообразном состоянии. Вообще говоря, изменение температуры может приводить к определённым фазовым переходам в полимерах [15]. В общем случае для стеклообразного состояния малопоглощающих аморфных полимеров спектр поглощения в низкочастотной части терагерцевого диапазона представляет собой плавную монотонную функцию. Коэффициент их поглощения становится достаточно большим, начиная с некоторой начальной частоты $\nu_B = \omega_B/(2\pi)$.

Характерные наноразмеры в структуре полимеров можно охарактеризовать определёнными величинами L , имеющими размерность длины. Этим размерам соответствуют максимумы в терагерцевых спектрах поглощения. Характерная частота максимума ν связана с L и скоростью поперечного звука $C_\perp$ соотношением [10, 16]

$$L \approx C_\perp/\nu. \quad (1)$$

Возникновение подобных структур описано в монографии [17, с. 12]. Там же отображены основные типы надмолекулярной структуры полимеров [17, с. 21–22]. Важно, что величина L обратно пропорциональна частоте ν .

2. О ФРАКТАЛЬНОМ ХАРАКТЕРЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРОВ

Согласно [1] терагерцевое поглощение, обусловленное различными сложными (составными) колебаниями, связано с мезоскопической (промежуточной между микроскопической и макроскопической) структурой вещества. В пределах мезоскопической структуры, для масштабов порядка L , проявляются свойства подобия и самоподобия. На этих масштабах реализуется фрактальный характер структуры полимеров [18]. Современные методы исследования подтверждают наличие локального (ближнего) порядка в стеклообразных аморфных полимерах [19], который характеризуется определённым распределением величины L .

Минимум и максимум в распределении величины L соответствуют границам, в которых наблюдается фрактальный характер поглощения. Частота фрактальных колебаний ω обратно пропорциональна L . О распределении нанонеоднородности L , как о некотором универсальном свойстве, характеризующем неупорядоченное твёрдое тело, говорится в работе [20]. Минимум величины L заведомо больше (по крайней мере в 3 раза) характерной длины связи С-С (равной 0,14 нм). Для полимеров минимум масштаба L обычно соответствует нескольким нанометрам [21]. Так, в работе [19] утверждается, что $L \approx 1 \div 2$ нм. Для полимеров, исследовавшихся в статье [10], $L \approx 0,47$ нм. Минимум L соответствует максимально возможной частоте фрактальных колебаний ω_M . В работе [10] показано, что особенности в распределении линейной величины L проявляются как максимумы в терагерцевом спектре поглощения. Скорость поперечного звука в полимерах оказывается порядка 1000 м/с, максимум в распределении L составляет несколько нанометров. Таким образом, согласно формуле (1), минимальная частота фрактальных колебаний ω_B попадает на низкочастотную границу терагерцевого диапазона. Отсюда следует, что фрактальный характер структуры полимеров в терагерцевом диапазоне проявляется в интервале $\omega_B < \omega < \omega_M$. Практический интерес представляет случай $\gamma = (\omega_M/\omega_B) \gg 1$, т. е. когда фрактальная часть спектра относительно широкая.

Известны различные методы определения параметров фрактальных колебаний полимеров. В частности, их можно найти методом неупругого рассеяния нейтронов и комбинационного рассеяния света [22]. Ещё одним из методов, применимых для определения фрактальной размерности полимера, является анализ определённой части спектра малоуглового рентгеновского рассеяния [23, рис. 20]. Данные, полученные при анализе спектра поглощения полимеров в низкочастотной части терагерцевого диапазона и изложенные в данной работе, также позволяют выделить фрактальные колебания.

Согласно общему квантово-механическому рассмотрению поглощения (см., например, [24, гл. 2.3; 25, гл. 5]) сечение поглощения фрактального колебания с угловой частотой ω равно

$$\sigma(\omega) = \pi |V_{kn}|^2 \omega \rho(\omega) / (3n\epsilon_0 c_0 h), \quad (2)$$

где $\rho(\omega)$ — спектральное распределение плотности фрактальных колебаний по частоте, $|V_{kn}|^2$ — квадрат матричного элемента соответствующего перехода (эта величина также зависит от ω), n — показатель преломления среды, ϵ_0 , c_0 и h — диэлектрическая проницаемость вакуума, скорость света в вакууме и постоянная Планка соответственно.

Сечение $\sigma(\omega)$ связано с коэффициентом поглощения $\alpha(\omega)$ соотношением

$$\alpha(\omega) = N\sigma(\omega), \quad (3)$$

где N — объёмная плотность участков макромолекул, в которых возбуждаются фрактальные колебания.

Для фрактальных структур плотность колебательных состояний

$$\rho(\omega) \propto \omega^{s-1}, \quad (4)$$

где s — спектральная размерность материала [16, 25]. Именно этот параметр характеризует фрактальную структуру макромолекул. Авторы статьи [16] приводят ряд значений показателя степени s для нескольких конкретных случаев. Согласно расчётам для идеальных линейных полимеров со «свободными» (невзаимодействующими) макромолекулами $s = 1$; для РММА $s = 1,8$ [22]. Наши экспериментальные данные по терагерцевому поглощению для РММА дают величину $s = 1,62 \pm 0,01$. Благодаря скейлинговым свойствам фракталов все спектры, связанные с фрактальными колебаниями, имеют степенную зависимость от частоты ω . Однако показатели степени

для плотности фрактальных колебаний $\rho(\omega)$ и спектра комбинационного рассеяния света отличаются [22].

Для полимеров квадрат матричного элемента $|V_{kn}|^2$ во фрактальном приближении также оказывается пропорционален степенной функции [20]:

$$|V_{kn}|^2 \propto \omega^\beta. \quad (5)$$

Если в спектре полимера отсутствуют фрактальные колебания, то нельзя говорить о степенной зависимости $|V_{kn}|^2$ от ω . При наличии таких колебаний спектр поглощения полимера

$$\alpha(\omega) \propto \omega^\mu, \quad (6)$$

где $\mu \equiv \beta + s + 1$ (см. формулы (2)–(6)).

Определить коэффициенты β и s по отдельности, используя только спектры поглощения, невозможно.

Пусть частота ω_0 находится в интервале $\omega_B < \omega < \omega_M$. Обозначим $\alpha_0 = \alpha(\omega_0)$. Частотная зависимость коэффициента поглощения в этом случае аппроксимируется степенной функцией

$$\alpha(\omega) = \alpha_0 (\omega/\omega_0)^\mu. \quad (7)$$

Логарифмированием получаем

$$\lg \alpha = \mu \lg \nu + \mu \lg(2\pi) + \lg(\alpha_0/\omega_0^\mu), \quad (8)$$

где $\nu = \omega/(2\pi)$. Из формулы (8) следует, что зависимость $\lg \alpha$ от $\lg \nu$ описывается прямой с угловым коэффициентом μ . Далее, на рис. 1–6, изображены спектры поглощения нескольких исследованных полимеров в двойном логарифмическом масштабе.

3. ФРАКТАЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ ОТДЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Спектры поглощения нескольких полимеров в терагерцевом диапазоне частот были измерены путём анализа спектра пропускания пикосекундного (широкополосного) терагерцевого импульса через полимерный образец, т. е. методом импульсной терагерцевой спектроскопии во временном представлении.

Измерения коэффициента поглощения на разных частотах проводились при комнатной температуре, причём все исследованные образцы при этой температуре находились в стеклообразном состоянии. Все данные на рис. 1–6 были получены специально для данной работы. Результаты измерений, аналогичные использованным, были ранее частично опубликованы в работах [5, 10, 15]. Все данные по коэффициенту поглощения полимеров, приводимые в [1, 5, 10, 15], хорошо согласуются с нашими измерениями (различие не более 5 %).

На рис. 7 иллюстрируется соотношение между спектрами поглощения различных малопоглощающих полимеров. Полные названия полимеров, приведённых на рис. 7, и их химические формулы даны в табл. 1. Единственное исключение составляет полипропилен (PP), его формула $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_m$. Для этого полимера фрактальная зависимость в спектре не наблюдается.

Для ряда полимеров использованы данные нескольких экспериментальных работ, полученные одним и тем же методом и относящиеся к одним и тем же материалам. Для малопоглощающих полимеров измерения проводились на сравнительно толстых образцах (с толщинами 10–20 мм). Это позволило достоверно выделить потери, связанные с малым собственным поглощением в полимере.

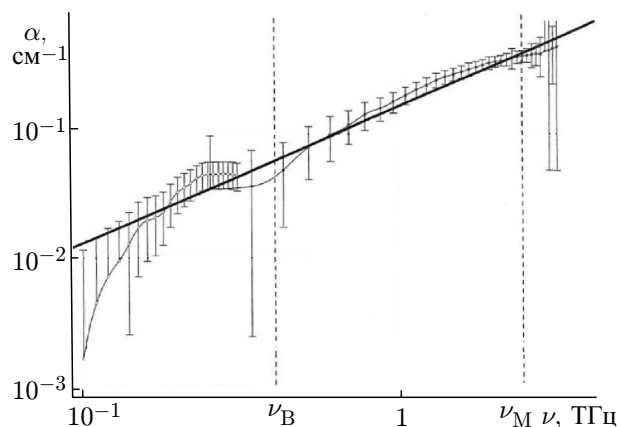


Рис. 1. Спектр поглощения полимера TPX

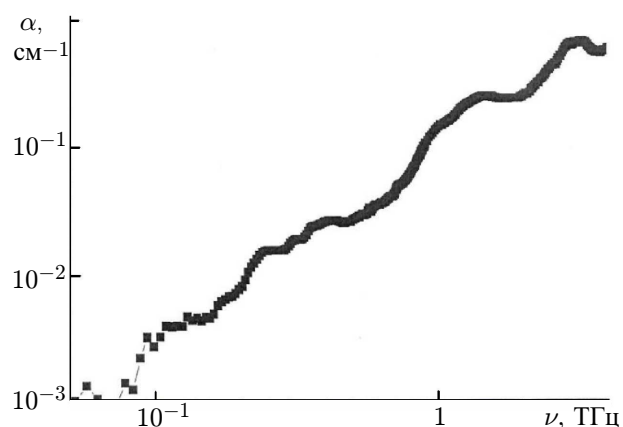


Рис. 2. Спектр поглощения полимера PP

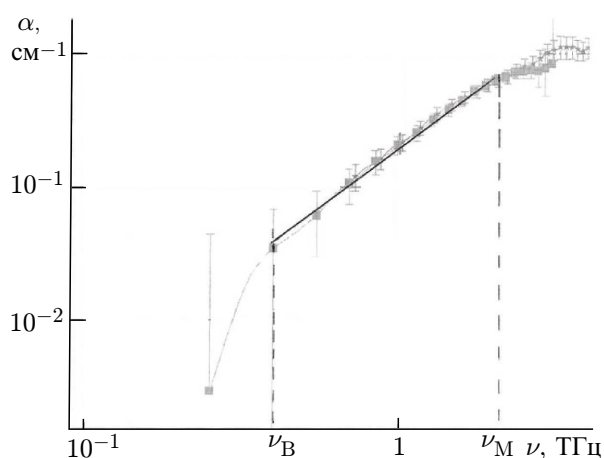


Рис. 3. Спектр поглощения полимера TOPAS-8007X-10

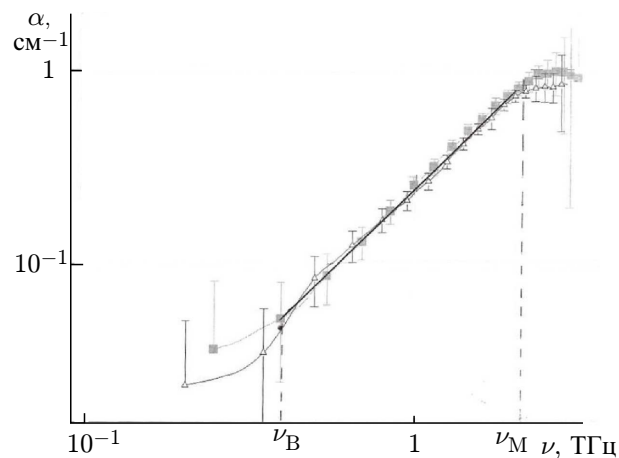


Рис. 4. Спектр поглощения полимера TOPAS-5013L-10

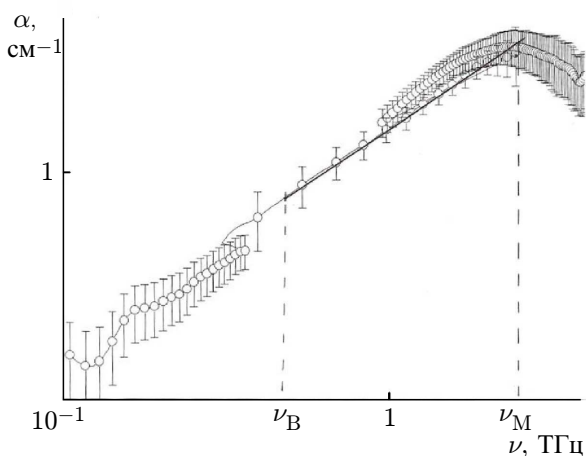


Рис. 5. Спектр поглощения полимера PS

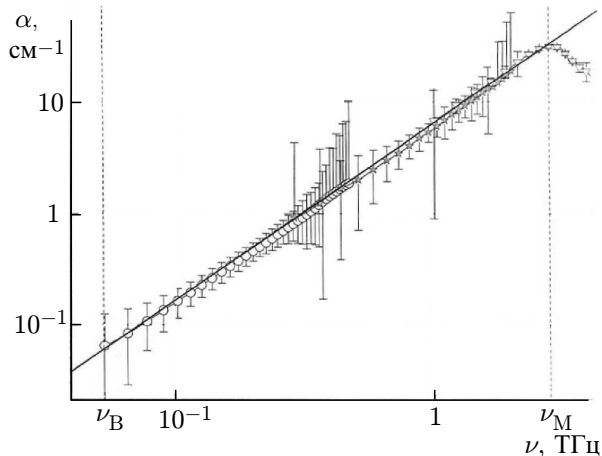


Рис. 6. Спектр поглощения полимера PMMA

Коэффициент рефракции n для всех малопоглощающих полимеров (в диапазоне измерений $0,1 \div 3,0$ ТГц) не зависит от частоты с точностью до 3-го знака после запятой. На некоторых спектрах (см. рис. 1–6) вертикальными отрезками указаны ошибки определения коэффициента

Таблица 1. Данные о фрактальной части спектра некоторых аморфных полимеров

	Полимер	Химическая формула полимера	α^* , см ⁻¹	n	μ	Фрактальный диапазон, ТГц	γ	Рисунок
1	PP (полипропилен)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_m$	0,25	1,497				2
2	Torap-8007X-10 (сополимер полиэтилена и норборнена)	$\left[\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right]_x \left[\begin{array}{c} \text{CH}-\text{CH} \\ \\ \text{Cyclopentane} \end{array} \right]_y$	0,29	1,525	$1,790 \pm 0,012$	$0,40 \div 2,10$	5,2	3
3	TPX (полиметилпентен)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH} \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]_m$	0,45	1,457	$1,089 \pm 0,015$	$0,40 \div 2,60$	6,5	1
4	Torap-5013L-10 (сополимер полиэтилена и норборнена)	$\left[\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right]_x \left[\begin{array}{c} \text{CH}-\text{CH} \\ \\ \text{Cyclopentane} \end{array} \right]_y$	0,45	1,538	$1,614 \pm 0,007$	$0,40 \div 2,10$	5,2	4
5	PS (полистирол)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{Benzene ring} \end{array} \right]_m$	0,95	1,517	$0,947 \pm 0,007$	$0,48 \div 2,50$	5,2	5
6	PMMA (полиметилметакрилат)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{CH}_2-\text{CH} \end{array} \right]_m$	10,0	1,590	$1,610 \pm 0,006$	$0,06 \div 2,15$	35	6

поглощения методом терагерцевой спектроскопии во временном представлении. Границы фрактальной части спектра (где она имеется) обозначены на оси абсцисс этих рисунков вертикальными штриховыми линиями. Из рис. 1–6 видно, что фрактальная часть спектра ($\nu_B < \nu < \nu_M$) полностью входит в диапазон, в котором проводились измерения. Для наглядности фрактальная часть спектра выделена прямой. Характеристики фрактальной части спектра в полимерах приведены в табл. 1, строки которой отсортированы по параметру α^* . Коэффициент γ , характеризующий отношение ω_M/ω_B , существенно больше 1, что говорит о значительном протяжении фрактального участка спектра для полимеров. Для полимеров, в которых отсутствуют водородные связи, величина α^* в среднем сравнительно мала (порядка $0,48 \text{ см}^{-1}$).

Полиэтилен, терагерцевый спектр поглощения которого приведён на рис. 7, при комнатной температуре не является аморфным материалом. Это мелкокристаллический материал. Все другие полимеры, исследуемые в данной работе, являются аморфными. В частности (см. рис. 7), на частоту $\nu \approx 2,4 \text{ ТГц}$ приходится пик поглощения, связанный с колебательными фононами в кристаллитах. Поэтому в полиэтилене отсутствует фрактальный спектр.

Полимеры TOPAS-5013L-10 и TOPAS-8007X-10 — это циклоолефиновые сополимеры полиэтилена и норборнена, отличающиеся соотношением между компонентами (x и y), производятся

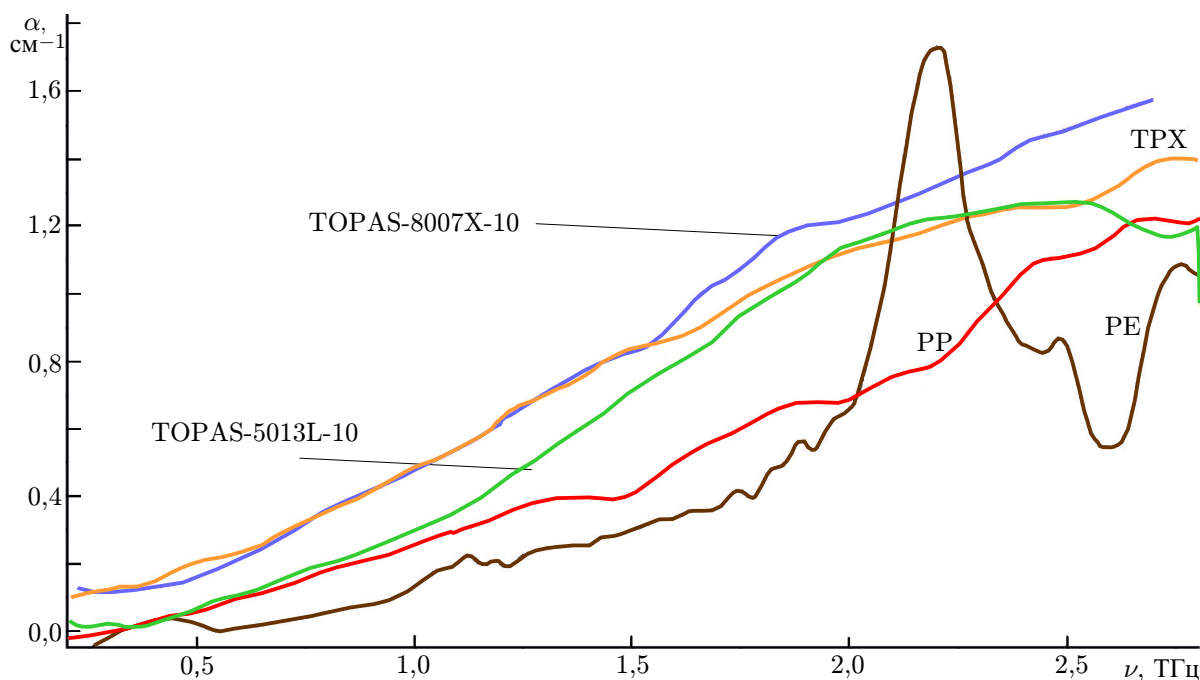


Рис. 7. Спектры поглощения малопоглощающих термопластичных полимеров [1]

компанией «Advanced Polymer GmbH» (Германия).

Атактический образец полипропилена относится к аморфным полимерам [10].

Полиметилметакрилат принадлежит к сильнопоглощающим аморфным полимерам, максимум в терагерцевом поглощении приходится на частоту $\nu = 2,8$ ТГц [10]. В этом полимере имеются межмолекулярные водородные связи между атомами ($\text{H} \cdots \text{O}$), за счёт которых $\alpha^* \gg 1 \text{ см}^{-1}$.

Полистирол относится к промежуточным (между малопоглощающими и сильнопоглощающими) полимерам. Максимум в терагерцевом спектре приходится на частоту $\nu = 3,2$ ТГц [10]. Фрактальная аппроксимация спектра имеет место для более низких частот.

Из табл. 1 видно, что фрактальная зависимость встречается для аморфных полимеров, в которых отсутствуют водородные связи, а также для тех полимеров, в которых такие связи имеются (РММА).

В заключение отметим, что в данной работе показана применимость фрактальной аппроксимации, когда для описания терагерцевого спектра поглощения полимеров верна формула $\alpha(\omega) \propto \omega^\mu$, оценены границы справедливости этой модели и характерная величина дробной степени μ .

Авторы благодарят А. П. Шкуринова (МГУ им. М. В. Ломоносова) за предоставленную возможность измерения характеристик полимеров THz-TDS, В. И. Соколова (ИФТ РАН) за предоставление образцов полимеров, Д. А. Сапожникова, А. А. Манькову и А. В. Бородину за участие в измерениях терагерцевых спектров. Работа была выполнена при поддержке министерства науки РФ в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение 007-ГЗ/Ч3353/26) в части получения образцов полимеров и гранта РФФИ 16-52-00222.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parrot E. P. J., Zeitler J. A. // Appl. Spectrosc. 2015. V. 69, No. 1. P. 1.
2. Назаров М. М., Хайдуков Е. В., Савельев А. Г. и др. // Российские нанотехнологии. 2015. Т. 10, № 3–4. С. 58.
3. Микерин С. Л., Плеханов А. И., Якиманский А. В. и др. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 7. С. 609.
4. Yakimansky A. V., Nosova G. I., Solovskaya N. A., et al. // Chem. Phys. Lett. 2011. V. 510, No. 4–6. P. 237.
5. Ахманов А. С., Антелуц А. А., Балакин А. В. и др. Современные лазерно-информационные технологии. М.: Наука, 2014. С. 758.
6. Грибов Л. А. Теория инфракрасных спектров полимеров. М.: Наука, 1977. 240 с.
7. Купцов А. Х., Жижин Г. Н. Фурье-КР и фурье-ИК спектры полимеров. М.: Физматлит, 2001. 656 с.
8. Bershtein V. A., Ryzhov V. A. // Adv. Polymer Science. 1994. V. 114. P. 43.
9. Walter M., Plochocka P., Fisher B., et al. // Biopolymers. 2002. V. 67. P. 310.
10. Китай М. С., Назаров М. М., Сапожников Д. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 12. С. 984.
11. Китай М. С., Назаров М. М., Соколов В. И. и др. // Сб. тезисов. Всероссийск. конф. «Актуальные проблемы физики полимеров и биополимеров». Москва, 15–17 октября 2012 г. С. 36.
12. Walther M., Fisher B., Uhd Jepsen P. // Chemical Physics. 2002. V. 288, No. 2–3. P. 261.
13. Globus T., Woolart D., Gelmont B., et al. // Thesis of American Physical Society Meeting on Application on THz Radiation, Los Angeles, 21–25 Marth, 2005. Art. no. N5.2.
14. Зосимов В. В., Лямшев Л. В. // Успехи физ. наук. 1995. Т. 165, № 4. С. 361.
15. Китай М. С., Назаров М. М., Недорезова П. М., Шкуринов А. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 5. С. 458.
16. Багрянский В. А., Малиновский В. К., Новиков В. Н. и др. // Физика твёрдого тела. 1988. Т. 30, № 8. С. 2360.
17. Поздняков В. А. Физическое материаловедение наноструктурных материалов: уч. пособие. М.: Московский гос. индустриальный ун-т, 2007. 423 с.
18. Шмидт Ф. К. Фрактальный анализ в физико-химии гетерогенных систем и полимеров. Иркутск: Иркутский госуниверситет, 2001. 181 с.
19. Козлов Г. В., Новиков В. У. // Успехи физ. наук. 2001. Т. 171, № 7. С. 717.
20. Малиновский В. К. // Физика твёрдого тела. 1999. Т. 41, № 5. С. 805.
21. Козлов Г. В., Новиков В. У. Синергетика и фрактальный анализ сетчатых полимеров. М.: Классика, 1998. 110 с.
22. Землянов М. Г., Малиновский В. К., Новиков В. Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51, № 6. С. 314.
23. Зубавичус Я. В., Словохотов Ю. Л. // Успехи химии. 2001. Т. 70, № 5. С. 429.
24. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 560 с.
25. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 896 с.

Поступила в редакцию 30 мая 2017 г.; принята в печать 30 мая 2018 г.

ON THE FRACTAL ABSORPTION SPECTRA OF POLYMERS IN THE LOW-FREQUENCY PART OF THE TERAHERTZ RANGE

M. S. Kitai and M. M. Nazarov

The power dependence $\alpha(\nu) \propto \nu^\mu$, where $\mu > 0$ is the power exponent that is noninteger in the general case, is observed for amorphous polymers with a small absorption coefficient α in the low-frequency part of the terahertz range, which approximately corresponds to the frequencies ν from 0.1 to 2–3 THz. This dependence is fractal, which is due to the fractal structure of the polymer macromolecules. In this work, we find the power-dependence index at room temperature for the absorption coefficient of some amorphous polymers. This index is determined on the basis of the time dynamics of transmission of a broadband picosecond terahertz pulse through the polymer sample, i.e., using the method of the pulse terahertz spectroscopy in the time representation.