

УДК 538.958

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-3-57-69

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕИВАЮЩЕЙ И ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Шампаров Е. Ю., Бугримов А. Л., Родэ С. В., Жагрина И. Н.

Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии.

Дизайн. Искусство)

117997, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, Российская Федерация

Аннотация

Цель работы: определение взаимосвязи между параметрами структуры материала и показателями оптических свойств составляющих его веществ, с одной стороны, и характеристиками его рассеяния и поглощения – с другой.

Процедура и методы. Терагерцовые спектрально-избирательные измерения пропускания пакетов тонких диэлектрических мембран с периодически модулированной толщиной в зависимости от числа слоёв в пакете.

Результаты. Разработана методика измерения глубины рассеяния и глубины проникновения излучения в вещество рассеивающе-поглощающей диэлектрической структуры.

Теоретическая и/или практическая значимость. При описании рассеяния электромагнитного излучения в диэлектрической структуре справедливо макроскопическое волновое приближение.

Ключевые слова: терагерцовое рассеяние и поглощение, периодическая диэлектрическая структура

TERAHERTZ MEASUREMENTS OF SCATTERING AND ABSORBING STRUCTURE CHARACTERISTICS

E. Shamparov, A. Bugrimov, S. Rode, I. Zhagrina

Kosygin State University of Russia

ul. Sadovnicheskaya 33, Moscow 117997, Russian Federation

Abstract

Aim. The purpose is to determine the relationship between the material structure parameters and the optical properties of its constituent substances on the one hand and its scattering and absorption characteristics on the other hand.

Methodology. Use is made of terahertz spectral-selective transmission measurements of packets of thin dielectric webs with periodically modulated thickness (fabrics) depending on the number of layers in the packet.

Results. A method for measuring the scattering depth and the penetration depth of radiation into the substance of the scattering and absorbing dielectric structure is developed.

Research implications. When describing the scattering of electromagnetic radiation in a dielectric structure, the macroscopic wave approximation is valid.

Keywords: terahertz scattering and absorption, periodic dielectric structure.

Введение

Измерения свойств рассеивающих и поглощающих электромагнитное излучение структур обычно сложны для реализации. Для рассеяния характерный размер элементов структуры должен быть сравним с длиной волны излучения или превышать её. В видимом и ближнем инфракрасном диапазонах из-за малых размеров элементов структуры имеются большие сложности, связанные с приготовлением опытных образцов и измерением их характеристик. В сверхвысокочастотном диапазоне, наоборот, размеры образцов очень велики, вследствие чего возникают сложности с работой в оптическом приближении. Наиболее удобен терагерцовый диапазон, в котором и выполнены обсуждаемые в настоящей работе измерения. Но и в этом диапазоне имеются определённые сложности, обусловленные некоторым ограничением возможностей измерительной техники. Поэтому измерения выполнены с учётом указанных особенностей оборудования и с подбором оптимальных образцов.

По логике, для измерений стоило бы взять некоторую квазислучайную структуру. Однако тогда дополнительные сложности возникли бы с измерением характеристик структуры и меры её хаотичности. На первом этапе в работе исследуется регулярная структура, параметры которой легко измеримы, а способности рассеивать излучение – известны. Согласно второму началу термодинамики любые отклонения от идеальности структуры увеличивают случайную составляющую рассеяния. Поэтому для исследований были выбраны достаточно неидеальные структуры и схема измерений построена так, чтобы вклад случайной составляющей умножался.

Исследованию рассеяния и поглощения (прежде всего, в видимом диапазоне излучения) посвящено достаточно большое количество работ. Однако в малом числе из них рассмотрена роль структуры. Значительное внимание уделено математическим моделям. Исследованию природы рассеяния посвящены редкие работы [1; 2]. В большинстве случаев используют ультраквантовое или однофотонное приближение. Стоит отметить, что согласно основополагающему принципу корпускулярно-волнового дуализма в процессе распространения электромагнитное излучение ведёт себя как волна и только в процессах испускания и поглощения как элементарная порция. В общем случае применение к процессам рассеяния однофотонного приближения представляется недостаточно обоснованным. Оно работает, когда речь идёт о поглощении и последующем испускании. В настоящей работе речь идёт о диэлектрическом рассеянии, то есть о макроскопических свойствах составляющей структуру среды, характеризуемой показателями преломления и поглощения. Эту область исследования знаний принято называть спектроскопией конденсированного состояния. Рассеяние в рассматриваемом случае обусловлено не вероятностью взаимодействия излучения со средой, а наличием и формой границы двух сред с различной оптической плотностью.

Для измерений использовался охлаждаемый детектор-спектрометр [3], работающий на циклотронном резонансном поглощении в InSb [4]. Разработанный прибор выполнен в виде вставки в стандартный сосуд Дьюара [5], предназначенный для транспортировки жидкого гелия. На окунаемом в гелий конце вставки собран сверхпроводящий электромагнит броневго типа, в зазоре которого на оптической оси внутри интегрирующей поступающее излучение камеры расположен приёмный кристалл InSb. Помещённый в магнитное поле с индукцией B кристалл как фоторезистор [6] регистрирует излучение избирательно вблизи резонансной частоты вращения электронов [4]:

$$f = eB / (2\pi m^*),$$

где m^* – эффективная масса электронов в InSb (в 70 раз меньшая массы электрона) на переходе между нулевым и первым уровнями Ландау.

Управляющий ток позволяет создавать в электромагните поле до 2,5 Тл и избирательно регистрировать излучение в полосе от 1 до 5 ТГц (с длиной волны от 300 до 60 мкм). Излучение направляется на входное окно прибора диаметром 14 мм, откуда по сверхразмерному круглому волноводу подаётся в охлаждаемую часть, где с помощью двухступенчатой рупорной антенны собирается внутрь камеры с приёмным кристаллом. Для максимального быстродействия и чувствительной регистрации выполнена автономная схема предусилителя сигнала с приёмного кристалла, включающая охлаждаемый в гелии согласующий каскад. Общим недостатком подобного типа спектрометров является невысокая спектральная избирательность. Независимо от резонансной частоты поглощение происходит в полосе шириной около 1,0 ТГц.

Широкополосным источником излучения служило нагретое до 600 °С тело. На базе детектора собрана установка для автоматического измерения терагерцевых спектров пропускания [7; 8]. Программа через управляющее устройство задаёт сканирующий диапазон спектрометра ток электромагнита и по градуировочной характеристике вычисляет частоту поглощения. В установке подаваемое излучение модулируем с помощью прерывателя. Усиленный сигнал с приёмного кристалла и опорный сигнал с прерывателя подаются на соответствующие входы синхронного детектора. Измеренное значение сигнала с кристалла вместе с заданной частотой приёма записывается в компьютерный файл. Измерения зависимости отклика детектора от частоты излучения выполняются дважды: один раз – без образца и второй раз – с образцом, расположенным перпендикулярно оптической оси непосредственно перед входным окном детектора. Разделив по точечно результаты второго измерения на результаты первого, получаем терагерцевый спектр пропускания образца.

Характеристики образцов

В качестве испытуемых структур были выбраны ткани. Ткань – это продукт глубокой технологической обработки. Из исходного сырья – волокон, либо природных, либо полученных искусственно, формируют полуфабрикат – нить. Из нитей ткнут структуры более высокого уровня – ткани различных переплетений.

Все подобранные образцы имеют простейшее полотняное переплетение, состоят из волокон только одного типа (имеют свой собственный химический состав). Параметры структуры образцов собраны в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики структуры исследуемых тканей / Characteristics of the structure of the investigated tissues

Характеристика структуры, размерность		Волокнистый состав						
		хлопок	полиамид	лён	полиэфир	шёлк	вискоза	шерсть
Поверхностная плотность M , г/м ²		79	67	200	50	53	72	112
Плотность вещества γ , г/см ³		1,54	1,14	1,50	1,38	1,37	1,53	1,31
Толщина ткани d , мм		0,28	0,13	0,44	0,08	0,23	0,13	0,34
Число нитей на 100 мм	по основе	335	280	200	300	380	420	180
	по утку	220	445	150	240	290	260	115
Средний период структуры $\langle b \rangle$, мкм		360	275	570	370	300	295	680

Источник: по данным авторов.

В первой серии измерений (рис. 1) получены спектры пропускания образцов этих тканей. Образцы были измерены в равновесном воздушно-сухом состоянии при температуре 20 °С и влажности 40%.

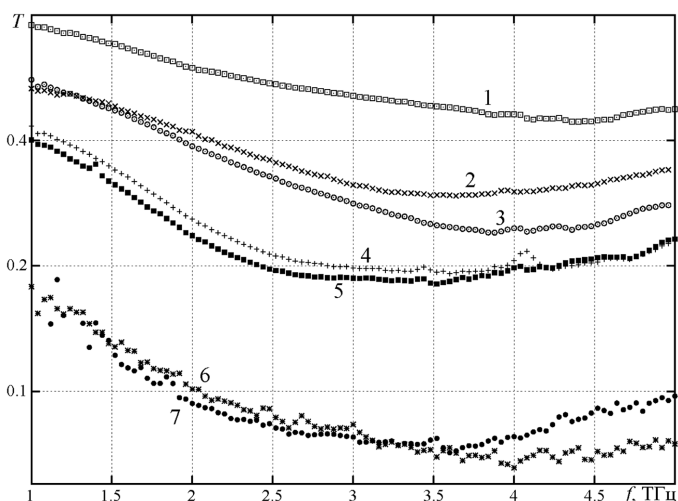


Рис. 1 / Fig. 1. Спектры пропускания тканей: 1 – полиэфирной, 2 – полиамидной, 3 – вискозной, 4 – хлопчатобумажной, 5 – шёлковой, 6 – шерстяной, 7 – льняной / Tissue transmission spectra: 1 – polyester, 2 – polyamide, 3 – viscose, 4 – cotton, 5 – silk, 6 – wool, 7 – linen.

Источник: по данным авторов.

В направлениях перпендикулярно нитям основы и нитям утка чередуются то нить, то промежутки между нитями. В этих направлениях толщина слоя вещества (оптическая толщина), через который проходит излучение, меняется периодически. Из-за преломления вещества на выходе из структуры периодически модулированной оказывается фаза, а из-за поглощения вещества – амплитуда электромагнитной волны. Структура служит для излучения двумерной амплитудно-фазовой дифракционной решёткой. Свойства таких решёток подробно описаны [9; 10]. В нашем случае при малой частоте (большой длине волны) в угол зрения детектора попадает только центральный (нулевой, нерассеянный) дифракционный максимум. С ростом частоты доля рассеянной решёткой мощности увеличивается. Однако при некоторой частоте угол первого дифракционного максимума

$$\theta \approx \arcsin(\lambda/l)$$

оказывается меньше угла зрения детектора, и рассеянное решёткой излучение тоже начинает попадать на приёмный элемент и им регистрироваться. Коэффициент пропускания, как мы видим на всех спектрах, достигает минимума и затем начинает увеличиваться вплоть до границы диапазона измерений. Положение минимума пропускания численно соответствует приведённым рассуждениям. Например, для полиамидной ткани минимум соответствует $f = 3,65$ ТГц или $\lambda = 82$ мкм. Угол между нулевым и первым дифракционными максимумами $\theta \approx 17^\circ$ с хорошей точностью равен углу зрения детектора-спектрометра (20°).

Измерения рассеяния и поглощения

Далее были выполнены измерения коэффициентов пропускания в зависимости от толщины рассеивающей среды (числа образцов N ткани в пакете). Для качественных измерений с сильно поглощающими образцами из шёлка, льна и шерсти чувствительность прибора оказалась недостаточной. Результаты измерений для пакетов образцов остальных тканей при частотах 1,5; 2,5; 3,5 и 4,5 ТГц показаны на рис. 2–5.

Углы рассеяния излучения в каждом слое достаточно велики, а доля нерассеянного излучения с каждым слоем быстро (экспоненциально) убывает. Поэтому для насыщения рассеяния достаточно лишь нескольких слоёв ткани. При большем числе слоёв характер распространения излучения становится практически полностью диффузным. Рассеяние перестаёт влиять на изменение коэффициента пропускания.

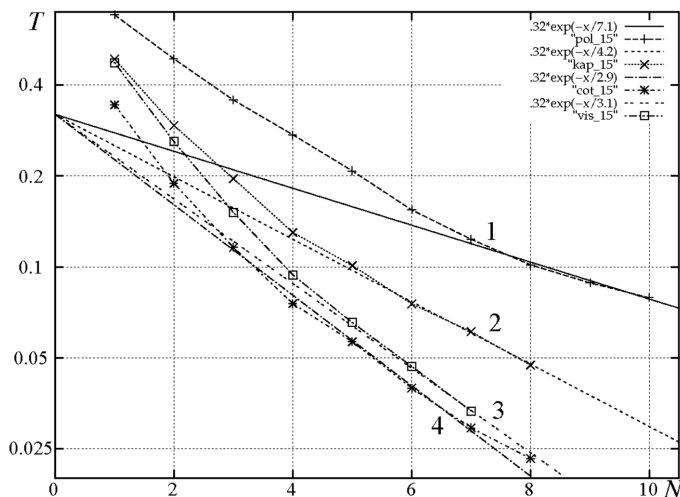


Рис. 2 / Fig. 2. При $f = 1,5$ ТГц пропускание пакетов в зависимости от числа слоёв тканей: 1 – полиэфирной, 2 – полиамидной, 3 – вискозной, 4 – хлопчатобумажной / At $f = 1,5$ THz, packet transmission depending on the number of fabric layers: 1 – polyester, 2 – polyamide, 3 – viscose, 4 – cotton

Источник: по данным авторов.

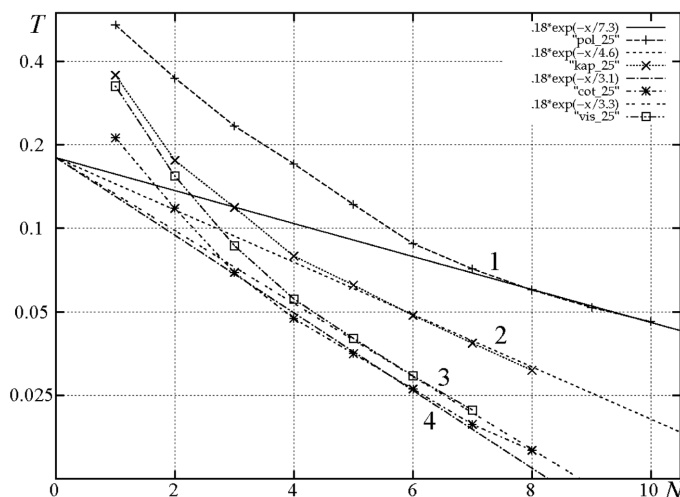


Рис. 3 / Fig. 3. При $f = 2,5$ ТГц пропускание пакетов в зависимости от числа слоёв тканей: 1 – полиэфирной, 2 – полиамидной, 3 – вискозной, 4 – хлопчатобумажной / At $f = 2,5$ THz, packet transmission depending on the number of fabric layers: 1 – polyester, 2 – polyamide, 3 – viscose, 4 – cotton

Источник: по данным авторов.

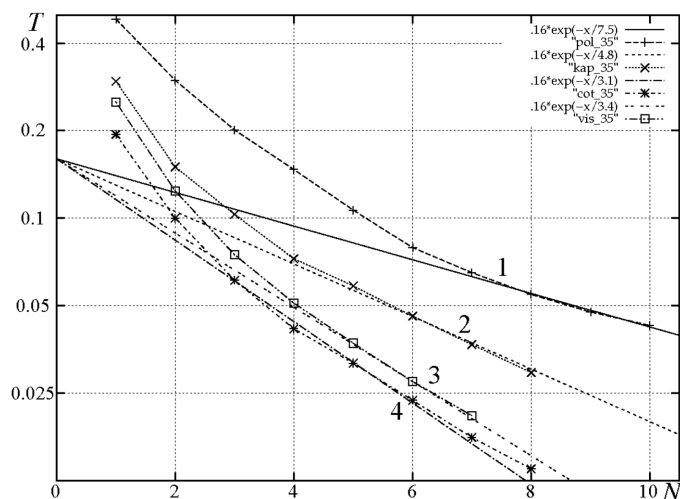


Рис. 4 / Fig. 4. При $f = 3,5$ ТГц пропускание пакетов в зависимости от числа слоёв тканей: 1 – полиэфирной, 2 – полиамидной, 3 – вискозной, 4 – хлопчатобумажной /
At $f = 3,5$ THz, packet transmission depending on the number of fabric layers: 1 – polyester, 2 – polyamide, 3 – viscose, 4 – cotton

Источник: по данным авторов.

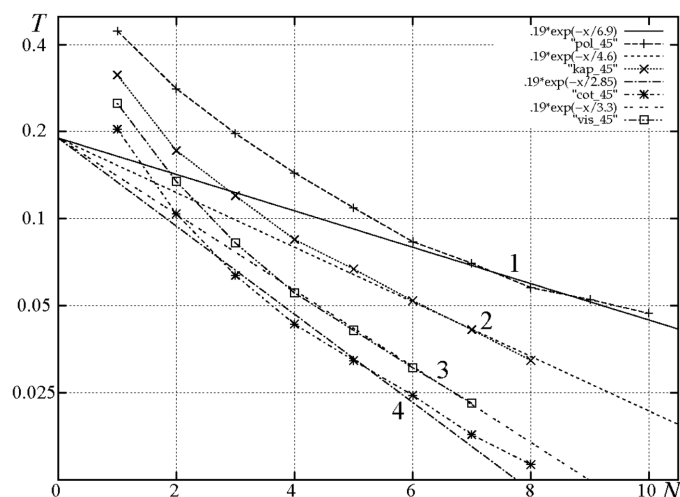


Рис. 5 / Fig. 5. При $f = 4,5$ ТГц пропускание пакетов в зависимости от числа слоев тканей: 1 – полиэфирной, 2 – полиамидной, 3 – вискозной, 4 – хлопчатобумажной /
At $f = 4,5$ THz, packet transmission depending on the number of fabric layers: 1 – polyester, 2 – polyamide, 3 – viscose, 4 – cotton.

Источник: по данным авторов.

Обсуждение результатов измерений

Начиная с некоторого числа слоёв тканей, результаты измерений коэффициентов пропускания (в логарифмическом масштабе) легли с хорошей точностью

на одну прямую. Коэффициент пропускания при добавлении следующего слоя уменьшается в одинаковое количество раз. Наблюдается типичное при измерениях прозрачности экспоненциальное уменьшение пропускания в зависимости от толщины материала (закон Бугера).

Надо отметить, что диффузный характер распространения излучения не усложняет картину происходящего. Для любой пространственной компоненты J (пространственной угловой плотности потока энергии) излучения согласно закону Бугера доля поглощаемой мощности dJ/J пропорциональна толщине среды dl , в которой происходит поглощение:

$$dJ / J = -dl / a.$$

Если x – направление распространения мощности, то в перпендикулярных ему направлениях y и z изменения плотности потока излучения не происходит. При этом изменение любой пространственной компоненты в направлении x прямо пропорционально косинусу угла ее отклонения:

$$dJ_x = dJ \cos \alpha,$$

и толщина слоя среды, перпендикулярного направлению распространения, тоже пропорциональна косинусу угла отклонения:

$$dx = dl \cos \alpha,$$

поэтому

$$dJ_x = -J dx / a.$$

Так как все пространственные компоненты плотности потока излучения одинаковы, то и изменения пространственных компонент одинаковы. В направлении распространения затухание одинаково для всех пространственных компонент излучения. Соответственно, для плотности потока излучения в направлении x справедлив закон Бугера:

$$d\Phi_x = -\Phi_x dx / a; \quad \Phi_x = \Phi_{x0} \exp(-x / a),$$

причём при диффузном распространении глубина проникновения излучения a такая же, как при направленном.

Наклон, прямой, экстраполирующей результаты измерений при больших N , равен отношению толщины ткани d к глубине проникновения в неё излучения a :

$$-d(\ln T) / dN = 1 / N_p = d / a,$$

где N_p – число слоёв ткани, на котором мощность излучения уменьшается в e раз.

Однако, фактическая толщина поглощающего слоя вещества зависит от структуры ткани и является её индивидуальной характеристикой. Соответствующую одному слою ткани эффективную толщину поглощающего излучение слоя вещества адекватно можно найти (табл. 1) по соотношению:

$$d_m = M / \gamma,$$

тогда глубина проникновения излучения в вещество:

$$a_m = ad_m / d.$$

Результаты измерений a и a_m тканей приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Глубина проникновения излучения / Radiation penetration depth

Тип волокна	d , мм	d_m , мкм	Глубина проникновения в образец a , мм при f , ТГц				Глубина проникновения в вещество a_m , мкм при f , ТГц			
			1,5	2,5	3,5	4,5	1,5	2,5	3,5	4,5
Хлопок	0,8	51	0,82	0,86	0,86	0,80	148	158	158	145
Полиамид	0,13	53	0,55	0,60	0,62	0,60	223	244	254	244
Полиэфир	0,08	36	0,57	0,58	0,60	0,55	256	263	270	248
Вискоза	0,13	47	0,40	0,43	0,44	0,43	146	155	160	155

Источник: по данным авторов.

Отметим, что у образцов из хлопка (представляющего собой природную целлюлозу) и вискозы (являющейся химически очищенной целлюлозой) поглощение (глубина проникновения в вещество) оказалось практически одинаковым. Влияния рассеяния излучения в структуре на её поглощение практически не наблюдается. Между тем, как показано ниже, глубина рассеяния структур из хлопка и вискозы отличается почти в 1,5 раза.

Когда число слоёв достаточно велико, со стороны приёмника каждый элемент площади исследуемого образца виден с одинаковой яркостью I . Доля рассеянного образцом излучения, попадающего в угол зрения рупорной антенны, определяется только геометрическими параметрами детектора. Мощность P_u , излучаемая образцом под всеми углами φ внутрь детектора-спектрометра, равна:

$$P_u = IS_0 \int_0^{\pi/2} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi = IS_0 / 2,$$

где S_0 – площадь входного окна детектора.

Тогда внутрь угла зрения рупорной антенны φ_w попадает мощность:

$$P_w = IS_0 \int_0^{\varphi_w} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi = IS_0 \sin^2 \varphi_w / 2 \approx \varphi_w^2 / 2.$$

Доля мощности, собираемая антенной, составляет:

$$T_w \approx \varphi_w^2$$

и, отражаемая от антенны, $R_w \approx 1 - \varphi_w^2$.

При диффузном рассеянии и малом внутреннем поглощении A сквозь образец и обратно от образца идёт по половине направляемого на него излучения. Пусть P_1 – направляемая на образец извне мощность; P_2 – мощность, идущая

от образца к антенне; P_3 – мощность, отражённая от антенны назад к образцу. Тогда:

$$P_2 = (1 - A)P_1 / 2 + P_3 / 2; \quad P_3 = R_w P_2.$$

После исключения P_3 можно получить:

$$P_2 = (1 - A)P_1 / (1 + \varphi_w^2).$$

Принимаемая антенной доля падающей рассеянной мощности составляет:

$$T_s = T_w P_2 / P_1 = (1 - A)\varphi_w^2 / (1 + \varphi_w^2).$$

В пределе малого числа слоёв поглощение становится равным нулю. Это значит, что все экстраполирующие прямые при $N = 0$ должны выходить из одной точки с

$$T_{s0} = \varphi_w^2 / (1 + \varphi_w^2).$$

Согласие этого факта с результатами измерений хорошо видно на рис. 2–5.

Дополнительно по полученным результатам независимым образом можно оценить угол зрения детектора:

$$\varphi_w = \sqrt{T_{s0} / (1 - T_{s0})}.$$

При 3,5 ТГц $\varphi_w \approx 22^\circ$ это вполне соответствует предыдущим оценкам.

С учётом представления о том, как происходит насыщение рассеяния, можно оценить необходимое для этого число слоёв ткани N_s и соответственно глубину рассеяния s . Полученные при разных частотах для образцов тканей значения s и N_s собраны в табл. 3. Там же приведены параметры структуры: толщина ткани d , доля заполненного твёрдым веществом пространства $\delta = d_m/d$ и средний период повторения структуры ткани $\langle b \rangle$.

Таблица 3 / Table 3

Рассеяние структуры / Scattering structure

Тип волокна	d , мм	δ	$\langle b \rangle$, мкм	Число слоёв насыщения рассеяния N_s при f , ТГц				Глубина рассеяния s , мм при f , ТГц			
				1,5	2,5	3,5	4,5	1,5	2,5	3,5	4,5
Хлопок	0,28	0,18	360	1,9	1,6	1,4	1,4	0,53	0,45	0,39	0,39
Полиамид	0,13	0,41	275	2,8	2,4	2,0	2,0	0,36	0,31	0,26	0,26
Полиэфир	0,08	0,45	370	5,6	4,7	4,4	4,3	0,45	0,38	0,35	0,34
Вискоза	0,13	0,36	295	3,0	2,6	2,0	1,9	0,39	0,34	0,26	0,25

Источник: по данным авторов.

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что способность рассеивать излучение определяют именно параметры структуры. Для очень близких по параметрам структуры образцов из вискозы и полиамида (капрона) получились при-

мерно равные глубины рассеяния. Рассеяние обусловлено практически только преломлением составляющей структуру среды. Поглощения вискозы и полиамида отличаются в 1,5 раза, а соответствующих различий рассеяния не видно. Слабее всего рассеивает излучение самая менее плотная ($\delta = 0,18$) структура из хлопка. Однако на втором месте самая плотная ($\delta = 0,45$) структура из полиэфира (лавсана). Надо отметить, что соответствующая ткань имеет наименьшую толщину (80 мкм) по сравнению с периодом повторения (370 мкм). Ткань сделана из редких трощёных (не скрученных) нитей. Нити практически распластаны в плоскости полотна. Этой ткани соответствует минимальная переменная составляющая толщины. Поэтому и рассеяние, несмотря на большую плотность, невелико.

Статья поступила в редакцию 19.07.2021 г.

Заключение

Разработана методика измерения характеристик рассеяния и поглощения терагерцового излучения в диэлектрической структуре с контролируемыми параметрами. Установлено, что природа исследованного диэлектрического рассеяния соответствует волновому приближению и принципиально отлична от квантового рассеяния, наблюдаемого обычно в видимом диапазоне. Выявлена практически полная независимость процессов рассеяния и поглощения излучения в структуре, согласующаяся с полагаемой в волновом приближении независимостью показателей преломления и поглощения среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочубей В. И., Башкатов А. Н. Спектроскопия рассеивающих сред. Саратов: Новый ветер, 2014. 87 с.
2. Kokhanovsky A. A. Physical interpretation and accuracy of the Kubelka-Munk theory // Journal of Applied Physics. D: Applied Physics. 2007. Vol. 40. No. 7. P. 2210–2216. DOI: 10.1088/0022-3727/40/7/053.
3. Быстродействующий перестраиваемый детектор терагерцового излучения на циклотронном резонансе в InSb / Богомолов Г. Д., Шампаров Е. Ю., Завьялов В. В., Зотова Е. А. // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 1. С. 87–94.
4. Патли Е. Длинноволновая инфракрасная спектроскопия. М.: Мир, 1966. С. 177–191.
5. Роуз-Инс А. Техника низкотемпературного эксперимента. М.: Мир, 1966. 216 с.
6. Aronzon B. A. Tsidilkovskii I. M. Magnetic-Field-Induced Localization of Electrons in Fluctuation Potential Wells of Impurities // Physica Status Solidi. 1990. Vol. 157. No. 1. P. 17–59. DOI: 10.1002/pssb.2221570102.
7. Родэ С. В., Шампаров Е. Ю. Установка для быстрой терагерцовой спектрометрии тонких диэлектрических материалов // Дизайн и технологии. 2010. № 18 (60). С. 47–53.
8. Родэ С. В., Шампаров Е. Ю., Жагина И. Н. Терагерцовые спектры пропускания и отражения тканей // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2010. Т. 10. № 4. С. 22–24.
9. Родэ С. В., Шампаров Е. Ю. Дифракция терагерцового электромагнитного излучения в структуре ткани // Дизайн и технологии. 2014. № 39 (81). С. 48–53.
10. Родэ С. В., Шампаров Е. Ю. Исследования свойств тканей в терагерцовом диапазоне электромагнитного излучения М.: РИО МГУДТ, 2015. 114 с.

REFERENCES

1. Kochubei V. I., Bashkatov A. N. *Spektroskopiya rasseivayushchikh sred* [Scattering media spectroscopy]. Saratov, Novyi veter Publ., 2014. 87 p.
2. Kokhanovsky A. A. Physical interpretation and accuracy of the Kubelka-Munk theory. In: *Journal of Applied Physics. D: Applied Physics*, 2007, vol. 40, no. 7, pp. 2210–2216. DOI: 10.1088/0022-3727/40/7/053.
3. Bogomolov G. D., Shamparov E. Yu., Zav'yalov V. V., Zotova E. A. [A fast tunable detector of submillimeter waves on cyclotron resonance in an INSB crystal]. In: *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2002, no. 1, pp. 87–94.
4. Patli E. *Dlinnovolnovaya infrakrasnaya spektroskopiya* [Long wave infrared spectroscopy] Moscow, Mir Publ., 1966, pp. 177–191.
5. Rouz-Ins A. *Tekhnika nizkotemperaturnogo eksperimenta* [Low-temperature experiment technique]. Moscow, Mir Publ., 1966. 216 p.
6. Aronzon B. A., Tsidilkovskii I. M. Magnetic-Field-Induced Localization of Electrons in Fluctuation Potential Wells of Impurities. In: *Physica Status Solidi*, 1990, vol. 157, no. 1, pp. 17–59. DOI: 10.1002/pssb.2221570102.
7. Rode S. V., Shamparov E. Yu. [The equipment for fast terahertz spectrometry of thin dielectric samples]. In: *Dizain i tekhnologii* [Design and Technology], 2010, no. 18 (60), pp. 47–53.
8. Rode S. V., Shamparov E. Yu., Zhagrina I. N. [Terahertz transmission and reflection spectra of fabrics]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya legkoi promyshlennosti* [The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry], 2010, vol. 10, no. 4, pp. 22–24.
9. Rode S. V., Shamparov E. Yu. [Diffraction of terahertz electromagnetic radiation in the tissue structure]. In: *Dizain i tekhnologii* [Design and Technology], 2014, no. 39 (81), pp. 48–53.
10. Rode S. V., Shamparov E. Yu. *Issledovaniya svoystv tkanei v teragertsovom diapazone elektromagnitnogo izlucheniya* [Research of the properties of tissues in the terahertz range of electromagnetic radiation]. Moscow, The Kosygin State University of Russia Publ., 2015. 114 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шампаров Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: shamparov-eu@rguk.ru;

Бугримов Анатолий Львович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: bugrimov-al@rguk.ru;

Родэ Сергей Витальевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: rode-s-v@mail.ru;

Жагрина Инна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: zhagrina-in@rguk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Eugene Yu. Shamparov – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Department of Physics, Kosygin State University of Russia;
e-mail: shamparov-eu@rguk.ru;

Anatoly L. Bugrimov – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Departmental Head, Department of Physics, Kosygin State University of Russia;
e-mail: bugrimov-al@rguk.ru;

Sergey V. Rode – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Department of Physics, Kosygin State University of Russia;
e-mail: rode-s-v@mail.ru;

Inna N. Zhagrina – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Department of Material Science, Kosygin State University of Russia;
e-mail: zhagrina-in@rguk.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Шампаров Е. Ю., Бугримов А. Л., Родэ С. В., Жагрина И. Н. Терагерцовые измерения характеристик рассеивающей и поглощающей структуры // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2021. № 3. С. 57–69.
DOI: 10.18384/2310-7251-2021-3-57-69

FOR CITATION

Shamparov E. Ju., Bugrimov A. L., Rode S. V., Zhagrina I. N. Terahertz measurements of scattering and absorbing structure characteristics. In: Bulletin of the Moscow state regional University. Series: Physics-Mathematics, 2021, no. 3, pp. 57–69.
DOI: 10.18384/2310-7251-2021-3-57-69