

УДК 537.226, 621.372

Т.Д. КОЧЕТКОВА, В.И. СУСЛЯЕВ, К.В. ДОРОЖКИН

КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ¹

Представлены результаты измерения спектров комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от влажности и породы дерева. Отмечены анизотропные свойства древесины, заметно проявляющиеся в терагерцовом диапазоне.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, древесина, дистанционное зондирование лесных покровов, терагерцовый диапазон, анизотропия.

Спектры диэлектрической проницаемости (ДП) влажной древесины позволяют получить новые знания об электромагнитных характеристиках биологических молекул, а также связанной и свободной воды [1]. Информация о спектрах ДП необходима для достоверной интерпретации результатов дистанционного зондирования лесных покровов и неразрушающего контроля качества древесины при производстве изделий. В настоящее время наиболее интенсивно используется СВЧ диапазон, так как устройства этого диапазона активно применяются для сушки древесины.

Представляет интерес провести исследование спектров ДП древесных пород в терагерцовом диапазоне, который в настоящее время относительно слабо освоен. Интерес к этому диапазону вызван, прежде всего, с характерной для него спецификой взаимодействия с различными веществами, благодаря тому, что энергия кванта в терагерцовом диапазоне частот на порядок больше, чем в соседнем КВЧ диапазоне. Следовательно, можно ожидать, что в терагерцовом диапазоне реакционная способность молекул на воздействие излучения может быть существенно выше, чем в КВЧ диапазоне [2].

В настоящей работе было исследовано взаимодействие электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне с древесиной нескольких пород. Измерения проводились на спектрометре терагерцового диапазона СТД-21, работающем на наборе ламп обратной волны.

Спектрометр позволяет прямым (не прибегая к соотношениям Крамерса-Кронига) и бесконтактным методом в диапазоне частот от 30 ГГц до 2 ТГц произвести вычисление частотных зависимостей ДП по измеренным спектрам коэффициента прохождения Tr и фазового сдвига φ при прохождении излучения сквозь образец. Вычисления для плоскопараллельного слоя в каждой частотной точке производятся согласно известным выражениям Френеля:

$$Tr = \frac{(1-r)^2 + 4r \sin^2 \beta}{(1-rE)^2 + 4rE \sin^2(N + \beta)} = Tr^{изм},$$

$$\varphi = N + \arctg \frac{rE \sin[2(N + \beta)]}{1 - rE \cos[2(N + \beta)]} + \arctg \frac{b}{a^2 + b^2 + a} - \arctg \frac{b}{a + 1} = \varphi^{изм}.$$

Здесь $E = \exp(-4\pi kdf/c)$; $N = 2\pi ndf/c$; $r = [(a - 1)^2 + b^2]/[(a + 1)^2 + b^2]$; $\beta = \arctg [2b/(a + b^2 - 1)]$; $n + ik = \varepsilon^* \mu^*$; $a + ib = (\mu^*/\varepsilon^*)^{1/2}$; c – скорость света; f – частота, d – толщина образца, $\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon''$ – комплексная диэлектрическая постоянная; $\mu^* = \mu' + i\mu''$ – комплексная магнитная проницаемость. Для немагнитного материала по измеренным спектральным характеристикам $Tr(f)$ и $\varphi(f)$ на частоте f согласно приведенным выше соотношениям определяются ε' и ε'' .

Для измерения использовались образцы древесины в виде отшлифованных пластинок различной толщины: от 3 до 8 мм. Образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 85 °С до постоянства массы. Влажность в этом состоянии была принята за нулевую, а остальные значения влажности были рассчитаны относительно неё в весовых долях как $W = (m_{вл.обр} - m_{сух.обр}) / m_{сух.обр}$, где $m_{вл.обр}$ и $m_{сух.обр}$ – массы влажного и сухого образцов соответственно. В связи с тем, что процесс настройки и измерения требовал затрат времени до нескольких минут и образцы при этом находились на воздухе атмосферной влажности, проводилось взвешивание до и после измерений,

¹ Работа выполнена при поддержке Проекта Минобрнауки «Создание физических, методических и алгоритмических основ комплекса для измерений параметров композиционных наноматериалов, магнитных жидкостей и малоразмерных биологических объектов квазиоптическими и оптическими методами», шифр проекта 2.4305.2011.

для сравнения результатов принималось среднее этих двух значений. Измерения проводились при комнатной температуре, которая не выходила из интервала $21 \div 23$ °С.

Образцы древесины были изготовлены в двух ориентациях относительно волокон в стволе дерева – продольной и поперечной. На рис. 1 в качестве примера приведены фотографии внешнего вида образцов, а, б – сосна, в, г – кедр.

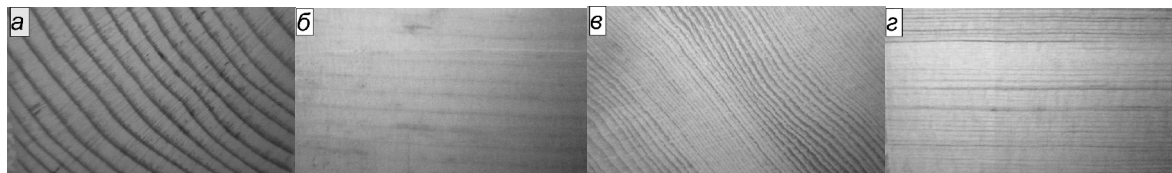


Рис. 1. Образцы сосны и кедра: поперечный срез (а, в) и продольный срез (б, г)

В ходе измерений пластинка из древесины закреплялась на специальном держателе и помещалась перпендикулярно направлению распространения излучения.

На рис. 2 и 3 показаны спектры ДП образцов из сосны для продольного и поперечного срезов. Влажность образцов примерно одинакова.

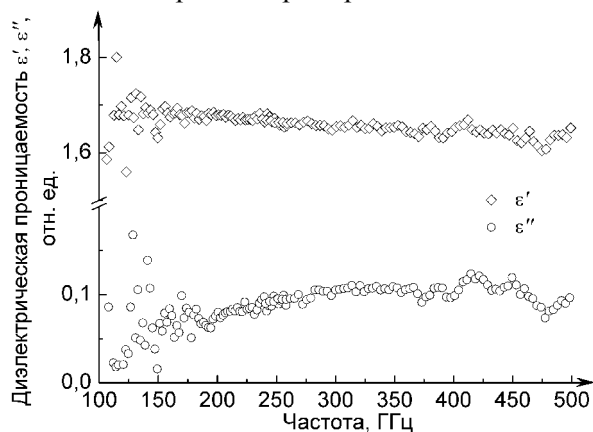


Рис. 2. Диэлектрическая проницаемость образца из сосны, продольный срез. Влажность 2,1 %

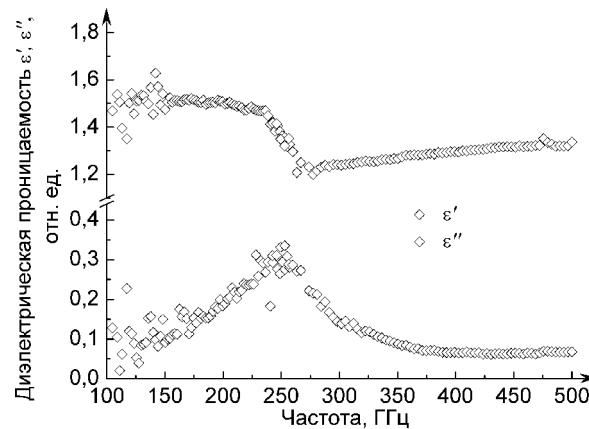


Рис. 3. Диэлектрическая проницаемость образца из сосны, поперечный срез. Влажность 2,4 %

Для продольного среза с ростом частоты заметны слабое убывание действительной составляющей и возрастание мнимой составляющей. Для образца в виде поперечного среза наблюдается область аномальной дисперсии с максимумом мнимой составляющей диэлектрической проницаемости на 250 ГГц. Сравнение результатов, представленных на рис. 2 и 3, дает основание предполагать, что селективное поглощение электромагнитной энергии на поперечном срезе вызвано резонансным эффектом за счет равенства длины волны электромагнитного излучения с размерами основных клеток древесины – трахеид – в этом направлении, поскольку поперечные размеры таких клеток от 0,01 до 0,1 мм [3]. В продольном направлении длина трахеид много больше длины волны – 0,5–10 мм.

Характер спектров диэлектрической проницаемости образцов из ели для поперечных срезов при различной влажности подобен предыдущему образцу. Отличие заключается в том, что максимум мнимой части диэлектрической проницаемости поперечного среза в данном случае располагается на уровне 170 ГГц. Сдвиг области аномальной дисперсии может быть вызван тем, что поперечные размеры трахеид у данного образца ели приблизительно в 1,5 раза больше, чем у исследованного образца сосны, что в определенной мере соответствует отличию в плотностях: сосна $\rho = 0,52$ г/см³, ель $\rho = 0,42$ г/см³ [3]. Слабое изменение частотной зависимости ДП при дополнительном увлажнении (до 4,1 %) (рис. 4) указывает, что основную роль в наблюдаемом селективном поглощении играет не наличие воды, а анизотропия формы клеток.

Для остальных образцов никаких особенностей в спектрах не наблюдалось. Можно отметить слабое монотонное убывание действительной и соответствующее возрастание мнимой составляющей диэлектрической проницаемости во всем диапазоне измерений от 100 до 500 ГГц.

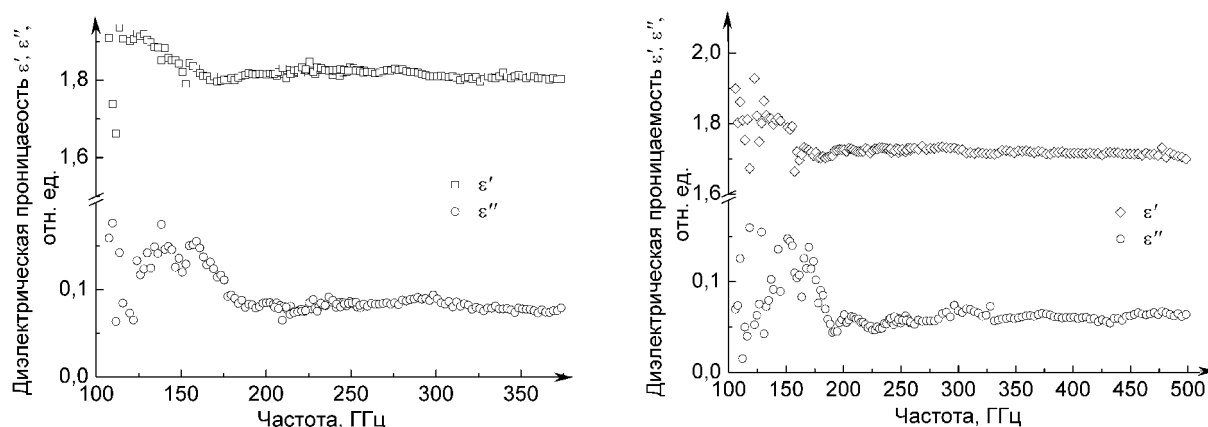


Рис. 4. Диэлектрическая проницаемость образца из ели, поперечный срез. Влажность: *a* – 4,1 %, *b* – 2,0 %

В таблице приведены усреднённые значения ϵ' и ϵ'' на частоте 100 ГГц. Здесь символом || обозначен продольный срез дерева, а символом # – поперечный.

Диэлектрическая проницаемость образцов древесины на частоте 100 ГГц

Образец	ϵ' (влажность, %)		ϵ'' (влажность, %)	
		#		#
Берёза	1,96 (1,8 %)	2,05 (3,8 %)	0,06 (1,8 %)	0,09 (3,8 %)
Берёза #	1,79 (2,2 %)	1,85 (3,6 %)	0,06 (2,2 %)	0,06 (3,6 %)
Ель	1,51 (1,9 %)	1,90 (4,2 %)	0,04 (1,9 %)	0,07 (4,2 %)
Ель #	1,81 (2,0 %)	1,55 (4,1 %)	0,03 (2,0 %)	0,04 (4,1 %)
Кедр	1,79 (1,5 %)	1,88 (4,1 %)	0,07 (1,5 %)	0,12 (4,1 %)
Кедр #	1,55 (2,3 %)	1,53 (3,9 %)	0,02 (2,3 %)	0,02 (3,9 %)
Пихта	1,75 (1,1 %)	1,81 (4,3 %)	0,05 (1,1 %)	0,09 (4,3 %)
Сосна	1,69 (2,1 %)	1,76 (4,2 %)	0,07 (2,1 %)	0,09 (4,2 %)
Сосна #	1,49 (2,4 %)	1,53 (4,1 %)	0,06 (2,4 %)	0,11 (4,1 %)

Сравнительный анализ показывает, что для продольных срезов значения диэлектрической проницаемости выше, чем для поперечных, на 10–15 % для действительной части. Для мнимой части ввиду её малых значений оценка затруднительна.

Полученные результаты показывают отчётливое проявление анизотропных свойств древесины в терагерцовом диапазоне частот и могут быть использованы при разработке систем неразрушающего контроля, а также при разработке моделей диэлектрической проницаемости лесных покровов в целях дистанционного зондирования Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suslyayev V. I. and Kochetkova T. D. Russ. Phys. J. – 2003. – V. 46. – No. 9. – P. 929–932.
2. Рытик А. П. Эффекты воздействия терагерцового излучения на биологические объекты: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Саратов, 2006. – 154 с.
3. Дикая И. В. Технология металлов и материалов. – Армавир: РИО АГПУ, 2012. – 46 с.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: tdk_tomsk@mail2000.ru

Поступила в редакцию 15.07.13.

Кочеткова Татьяна Дмитриевна, к.ф.-м.н., доцент;
Суляев Валентин Иванович, к.ф.-м.н., доцент;
Дорожкин Кирилл Валерьевич, магистрант.

T.D. KOTCHETKOVA, V.I. SUSLYAEV, K.V. DOROZHKIN

THE RESEARCH OF DIELECTRIC PROPERTIES OF WOOD ON TERAHERTZ WAVES

The results of measurements of the complex dielectric constant, depending on the humidity and the type of wood are presented. Anisotropic properties of wood, notably manifested in those terahertz range are marked.

Keywords: permittivity, wood, remote sensing of forest cover, terahertz range, the anisotropy.