

## 太赫兹飞行时间测厚法在大气环境中的应用

龚五林 李占锋 刘泉澄 邓琥 武志翔

### Applications of thickness measurement method based on terahertz time-of-flight in atmospheric environment

GONG Wulin, LI Zhanfeng, LIU Quancheng, DENG Hu, WU Zhixiang

引用本文:

龚五林, 李占锋, 刘泉澄, 等. 太赫兹飞行时间测厚法在大气环境中的应用[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 809–815. DOI: 10.5768/JAO202344.0403001

GONG Wulin, LI Zhanfeng, LIU Quancheng, et al. Applications of thickness measurement method based on terahertz time-of-flight in atmospheric environment[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 809–815. DOI: 10.5768/JAO202344.0403001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 超快太赫兹时域光谱系统

Ultra-fast terahertz time domain spectroscopy system

应用光学. 2019, 40(2): 229–232 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201008>

#### 用太赫兹时域光谱法检测沙粒中的微量原油

Detection of trace crude oil in surface sands by THz time-domain spectroscopy

应用光学. 2020, 41(2): 361–365 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203004>

#### 基于高斯混合模型的液体电磁参数太赫兹测量方法

Terahertz measurement method of liquid electromagnetic parameters based on Gaussian mixture model

应用光学. 2021, 42(6): 982–988 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601006>

#### 太赫兹源发散角测量技术研究

Research on divergence angle measurement technique of terahertz sources

应用光学. 2021, 42(3): 499–503 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0303001>

#### 太赫兹波通信技术研究进展

Research progress on terahertz communication technology

应用光学. 2018, 39(1): 12–21 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101003>

#### 高精度太赫兹探测器响应度定标系统

High-precision responsivity calibration system for terahertz detector

应用光学. 2018, 39(5): 691–696 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0503003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0809-07

# 太赫兹飞行时间测厚法在大气环境中的应用

龚五林<sup>1,3</sup>, 李占锋<sup>1,3</sup>, 刘泉澄<sup>2,3</sup>, 邓 琥<sup>2,3</sup>, 武志翔<sup>2,3</sup>

(1. 西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010;  
3. 西南科技大学 四川天府新区创新研究院, 四川 成都 610299)

**摘 要:** 太赫兹飞行时间 (terahertz time-of-flight, THz-TOF) 法具有快速、无损、高精度等优点, 是厚度检测领域的新型发展方向。然而大气环境中水蒸气对太赫兹波存在较强的吸收, 限制了 THz-TOF 法在大气环境中的应用。分析了 THz-TOF 法中太赫兹波在大气环境中的传播机理; 提出了一种基于吸收模型的水蒸气消除方法; 以两种塑料板样品为对象开展了应用研究。通过和干燥环境中测量的结果进行对比, 结果表明: 该方法能够有效消除水蒸气的干扰, 实现大气环境中材料厚度和折射率的准确测量。

**关键词:** 太赫兹时域光谱; 飞行时间; 厚度测量; 大气环境

中图分类号: TN29; TB133

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0403001

## Applications of thickness measurement method based on terahertz time-of-flight in atmospheric environment

GONG Wulin<sup>1,3</sup>, LI Zhanfeng<sup>1,3</sup>, LIU Quancheng<sup>2,3</sup>, DENG Hu<sup>2,3</sup>, WU Zhixiang<sup>2,3</sup>

(1. School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 3. Tianfu Institute of Research and Innovation, Southwest University of Science and Technology, Chengdu 610299, China)

**Abstract:** Terahertz time-of-flight (THz-TOF) method is a new development direction in the field of thickness measurement, which has the advantages of fast, non-destructive and high precision. However, the water vapor in atmospheric environment has strong absorption of terahertz wave, which limits the application of THz-TOF method in atmospheric environment. The propagation mechanism of terahertz wave in atmospheric environment in THz-TOF method was firstly analyzed, and then a method of water vapor elimination based on absorption model was proposed. Finally, two kinds of plastic plate samples were used as the object of application research. By comparing with the measurement results in dry environment, the results show that the method can effectively eliminate the interference of water vapor and realize the accurate measurement of material thickness and refractive index in atmospheric environment.

**Key words:** terahertz time-domain spectroscopy; time of flight; thickness measurement; atmospheric environment

## 引言

厚度是众多工业产品质量评价的重要指标, 如: GB/T8806《塑料管道系统: 塑料部件尺寸的测

定》将塑料管材的厚度纳入必测指标等。为了满足现代工业高生产效率和高产品质量的要求, 在线、快速、准确的厚度测量方法<sup>[1]</sup>显得尤为重要。

收稿日期: 2022-11-09; 修回日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金 (65105271); 西南科技大学博士基金 (21ZX7143)

作者简介: 龚五林 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术研究。E-mail: 461518389@qq.com

通信作者: 刘泉澄 (1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电检测技术研究。E-mail: 23834143@qq.com

X 射线测厚技术<sup>[2-3]</sup>、超声测厚技术<sup>[4-5]</sup>、涡流测厚技术<sup>[6-7]</sup>、激光测厚技术<sup>[8-9]</sup>是现阶段应用较为广泛的行业测厚方法。但是,这些测厚方法在安全性、应用场景、测量对象等方面存在一定的局限性。如:X 射线测厚技术中 X 射线产生的辐射会对人体健康造成危害;超声测厚技术中超声波的传播需要介质,因此该方法通常应用于检测水下物质;涡流测厚技术属于接触性测量,多应用于检测金属材料;激光测厚技术测量精度较低,并且激光器的使用寿命较短。因此,新型厚度检测技术也一直是相关领域的发展方向。

近年来,由于太赫兹波具有安全性能高、穿透性好等优点,太赫兹<sup>[10-12]</sup>飞行时间(terahertz time-of-flight, THz-TOF)法受到了广泛的关注。如:林玉华等人<sup>[13]</sup>采用 THz-TOF 法实现了油漆涂层厚度测量和分布均匀性的评估,结果表明,THz-TOF 法可实现物质厚度的精确测量。程滨等<sup>[14]</sup>利用 THz-TOF 法实现了涂层厚度的高精度检测,结果显示,THz-TOF 法的测量精度能达到  $7.9\ \mu\text{m}$ 。上述研究表明,THz-TOF 法具有快速、无损、高精度的优点,是厚度检测领域的新型发展方向。

THz-TOF 法基于太赫兹波在物体内传播得到的二次回波来计算厚度。然而,在大气环境下,空气中水分子的旋转振动和弛豫效应处于皮秒时间尺度<sup>[15-16]</sup>,使得水分子在太赫兹频段产生显著的吸收,这会在太赫兹时域信号中产生一系列的振荡,从而掩盖掉太赫兹波在被测对象传输中的二次回波信号。因此 THz-TOF 法多是在氮气、干燥等实验环境中开展,这限制了 THz-TOF 法的实际应用。

为了解决上述问题,拓展 THz-TOF 法在大气环境中厚度测量的应用。本文通过分析太赫兹波在水蒸气环境中的传播过程,基于水蒸气在太赫兹频段的吸收模型消除了水蒸气吸收所导致的干扰,并以两种不同材质的塑料板为研究对象,验证了大气环境下厚度测量的可行性。

## 1 实验和原理

### 1.1 实验器材与测量原理

本实验采用的两种样品材质为东莞市昆盛塑胶材料有限公司生产的聚乙烯(PE)板和聚丙烯(PP)塑料板,其表面粗糙度为 Ra0.2,长宽为  $50\text{ mm} \times$

$50\text{ mm}$ ,采用数显千分尺重复测量 10 次并取平均值,精度为  $0.001\text{ mm}$ ,得到的厚度分别为  $3.128\text{ mm}$  和  $3.002\text{ mm}$ 。

本研究采用的太赫兹时域光谱仪系统为 Menlo system 公司的光纤太赫兹光谱仪,该仪器由光纤飞秒激光器、光纤耦合太赫兹辐射和探测天线、光纤光学延迟线等组成,原理简图如图 1(a)所示。光纤飞秒激光器产生中心波长为  $1500\text{ nm}$ 、重复频率为  $100\text{ MHz}$  的飞秒激光,分束器将其分为泵浦光( $40\text{ mW}$ )和探测光( $30\text{ mW}$ )。泵浦光入射至太赫兹辐射天线产生光生载流子,在偏置电压作用下辐射太赫兹波,经过收集、传输、聚焦至探测天线电极。探测光经光纤光学延迟线入射至太赫兹探测天线产生光生载流子,在太赫兹磁场的作用下产生对应的电信号。通过改变太赫兹波和探测光到达探测天线的相对时间,利用离散采样的方式即可获得完整的太赫兹波信号。该系统的时域分辨率为  $0.066\ 612\text{ ps}$ ,频域有效范围为  $0.2\text{ THz} \sim 4.0\text{ THz}$ ,收集准直的光束直径约为  $20\text{ mm}$ 。

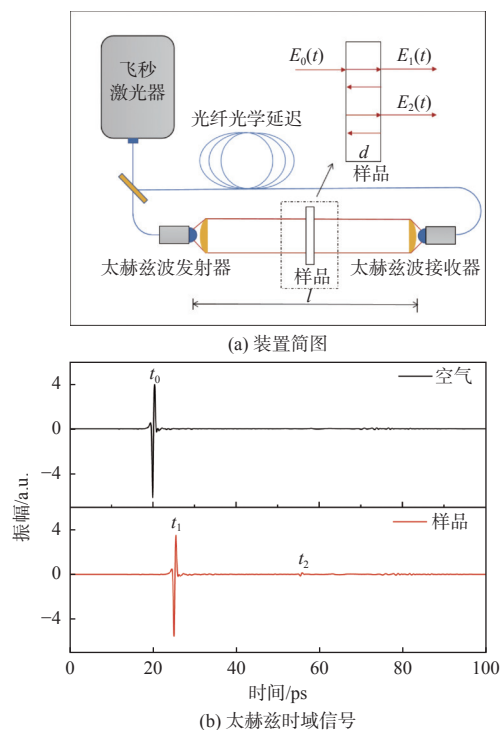


图 1 测量原理简图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement principle

THz-TOF 法的测厚原理<sup>[12,14]</sup>如图 1(b)所示。在无样品条件下,太赫兹波的主波峰值出现在

$t_0$  时刻。当放入样品进行测量时, 由于样品的折射率大于空气, 太赫兹波的主波峰值出现在  $t_1$  时刻, 波峰的位置由样品的折射率  $n_{\text{sam}}$  和厚度  $d$  决定。同时, 根据菲涅尔反射定律, 太赫兹波在样品前后表面发生反射, 产生二次回波, 其峰值点为  $t_2$ , 其位置也由样品的折射率  $n_{\text{sam}}$  和厚度  $d$  决定。

根据上述原理, 可以计算样品的折射率和厚度:

$$n_{\text{sam}} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_2 - 2\Delta t_1} \quad (1)$$

$$d = \frac{c \cdot (\Delta t_2 - 2\Delta t_1)}{2} \quad (2)$$

式中:  $\Delta t_2$  是与样品信号的主波峰值点  $t_1$  与二次回波峰值点  $t_2$  之间的时间差;  $\Delta t_1$  是空气信号的主波峰值点  $t_0$  与样品信号的主波峰值点  $t_1$  之间的时间差;  $c$  是空气中光的传播速度。

## 1.2 大气环境下太赫兹波传输过程分析

由 1.1 章节测量原理可知, 二次回波的采集是 THz-TOF 测量法的必要条件。然而, 在大气环境下, 空气中的水蒸气对太赫兹波的吸收, 使得时域信号产生杂散振荡, 掩盖了二次回波。为了消除水蒸气的影响, 本章节对大气环境下太赫兹波传输过程进行了分析。

在数字信号处理中, 通常将时域信号的卷积进行傅里叶变换转换为频域信号的相乘运算。如

$$p_{\text{wet-air}}(\omega, l-d) = p_{\text{dry-air}}(\omega, l-d) p_{\text{water-vap}}(\omega, l-d) = \exp\left[-j\frac{\omega(l-d)}{c}\right] \exp\left[-\frac{(l-d)\alpha_{\text{water-vap}}(\omega)}{2}\right] \exp\left\{-j\frac{[n_{\text{water-vap}}(\omega)]\omega(l-d)}{c}\right\} \quad (6)$$

式中:  $p_{\text{water-vap}}(\omega, l-d)$  是水蒸气的传播因子;  $\alpha_{\text{water-vap}}(\omega)$  是水蒸气的吸收系数;  $n_{\text{water-vap}}(\omega)$  是水蒸气的折射率。可以看出, 相比于干燥环境, 大气环境下水蒸气的存在对太赫兹波产生了额外的吸收和相位延迟, 在时域信号中将会产生振荡, 掩盖掉样品的二次回波信号。

由上述公式可知, 为了实现大气环境下 THz-TOF 法的应用, 可通过消除水蒸气的干扰, 重构得到干燥环境下的样品信号  $E_{\text{rec}}(\omega)$ :

$$E_{\text{rec}}(\omega) = E_0(\omega) p_{\text{dry-air}}(\omega, l-d) p_{\text{sam}}(\omega, d) = \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{p_{\text{water-vap}}(\omega, l-d)} \quad (7)$$

在实际测量中, 样品的厚度  $d$  通常远远小于于太赫兹波的传输距离  $l$ , 则结合公式(6)、公式(7)可

图 1(a), 在使用 THz-TOF 法测量样品时, 在太赫兹波接收器处采集到的频域信号  $E_{\text{sam}}(\omega)$  可以描述<sup>[17]</sup> 为

$$E_{\text{sam}}(\omega) = E_0(\omega) p_{\text{air}}(\omega, l-d) p_{\text{sam}}(\omega, d) \quad (3)$$

式中:  $E_0(\omega)$  是太赫兹辐射源发出的太赫兹波频域信号;  $p_{\text{air}}(\omega, l-d)$  是空气的传播因子,  $l$  是太赫兹波的传输距离;  $p_{\text{sam}}(\omega, d)$  是样品的传播因子;  $\omega$  是角频率。

其中, 空气的传播因子可以通过吸收系数和折射率来描述:

$$p_{\text{air}}(\omega, l-d) = \exp\left[-\frac{(l-d)\alpha_{\text{air}}(\omega)}{2}\right] \exp\left[-j\frac{n_{\text{air}}(\omega)\omega(l-d)}{c}\right] \quad (4)$$

式中:  $\alpha_{\text{air}}(\omega)$  是空气的吸收系数;  $n_{\text{air}}(\omega)$  是空气的折射率。

在干燥环境下, 空气的吸收系数近似为零, 折射率近似为 1, 则空气的传播因子为

$$p_{\text{dry-air}}(\omega, l-d) = \exp\left[-j\frac{\omega(l-d)}{c}\right] \quad (5)$$

式中:  $p_{\text{dry-air}}(\omega)$  是干燥环境下空气的传播因子。可以看出, 在干燥空气的条件下, 太赫兹波的传输只存在因空气介质而产生相位延迟, 无吸收效应。

在大气环境下, 由于存在水蒸气的吸收, 空气的传播因子为

简化为

$$E_{\text{rec}}(\omega) = \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{\exp\left[-\frac{l\alpha_{\text{water-vap}}(\omega)}{2}\right] \exp\left\{-j\frac{[n_{\text{wet-air}}(\omega)]\omega l}{c}\right\}} \quad (8)$$

由公式(8)可知, 通过太赫兹波的传输距离  $l$ 、水蒸气的吸收系数  $\alpha(\omega)$  和折射率  $n_{\text{wet-air}}(\omega)$ , 就能够对任意湿度环境的样品信号进行反演, 消除水蒸气吸收在时域引起的振荡。

## 1.3 水蒸气在太赫兹频段的吸收模型

国内外学者对水蒸气的吸收进行了大量的研究, 普遍认为水蒸气对太赫兹波的吸收主要分为线展宽吸收和连续吸收<sup>[18]</sup>, 即:

$$\alpha_{\text{water-vap}}(\omega) = \alpha_{\text{mo}}(\omega) + \alpha_{\text{c}}(\omega) \quad (9)$$

式中:  $\alpha_{\text{mo}}(\omega)$  是水蒸气的吸收系数;  $\alpha_{\text{c}}(\omega)$  为水蒸气



的连续吸收。

水蒸气线展宽吸收主要是由于自然展宽、多普勒展宽、碰撞展宽所导致,目前最常用于描述水

蒸气线展宽吸收的是 Van Vleck-Weisskopf 函数<sup>[18]</sup>,并且水蒸气的折射率和吸收系数满足 Kramers-Kronig<sup>[19]</sup> 关系,即:

$$\alpha_{\text{mo}}(\omega) = \sum_k \alpha_{k,\text{max}} \frac{\omega}{\omega_k} \left\{ \frac{1}{[(\omega - \omega_k)/\Delta\omega_k]^2 + 1} + \frac{1}{[(\omega + \omega_k)/\Delta\omega_k]^2 + 1} \right\} \quad (10)$$

$$n_{\text{water-vap}}(\omega) = 1 + \sum_k \alpha_{k,\text{max}} \frac{c}{2\pi^2(\omega_k^2 - \omega^2)} \left\{ 1 - \frac{\omega\Delta\omega_k^2}{8\omega_k^2} \left[ \frac{\omega_k + \omega}{(\omega_k - \omega)^2 + \frac{\Delta\omega_k^2}{4}} + \frac{\omega_k - \omega}{(\omega_k + \omega)^2 + \frac{\Delta\omega_k^2}{4}} \right] \right\} \quad (11)$$

式中:  $\alpha_{k,\text{max}}$  是第  $k$  次自展宽吸收线的振幅;  $\omega_k$  是第  $k$  个吸收谱线的特征频率;  $\Delta\omega_k$  是第  $k$  个吸收谱线的半宽高。

第  $k$  次自展宽吸收线的振幅通过计算可以得到:

$$\alpha_{k,\text{max}} = 10\,245.8 I_k / \gamma_{ks} \quad (12)$$

式中:  $\gamma_{ks}$  是自气体线展宽系数;  $I_k$  是从 HITRAN 数据库中<sup>[20]</sup> 提取的光谱线的强度。

第  $k$  个吸收谱线的半宽高可以表示为

$$\Delta\omega_k = \gamma_{ks} R_H P + \gamma_{kf} R_H (1 - P) \quad (13)$$

式中:  $\gamma_{kf}$  是外气体线展宽系数;  $R_H$  是环境湿度;  $P$  是标准大气压。

水蒸气对连续介质的吸收通常采用 Kuhn<sup>[21]</sup> 的经验公式:

$$\alpha_c(\omega) = \omega^2 P R_{\text{Hs}} \left( P R_{\text{Hs}} C_s \theta^{ns} + P (1 - R_{\text{Hs}}) C_f \theta^{nf} \right) \quad (14)$$

式中:  $C_s$  和  $C_f$  分别为连续体效应的自连续系数和外部连续系数;  $\theta$  为环境温度;  $ns$  和  $nf$  为温度指数。

## 2 分析与讨论

在 0~0.2 THz 频段内,低频噪声会对太赫兹波造成干扰,使其在该频段内产生尖峰,导致获取的信息不可靠,且此频段内水蒸气对太赫兹波的吸收很小,近似为零;在 2 THz~4 THz 频段内,样品信号为 0,此时不存在水蒸气对太赫兹波的吸收,因此本文仅对 0.2 THz~2 THz 频段进行分析。根据 1.3 章节所述吸收模型,计算了 3 个不同湿度条件下水蒸气的吸收系数和折射率,如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,随着湿度的增加,水蒸气对太赫兹波的吸收随之增强。同一湿度环境下,0.2 THz~1 THz 内,水蒸气的吸收较小,在 1 THz~2 THz 频段内,吸收先增强后减小,其中吸收最强处为 1.67 THz。由图 2(b)可得,湿空气的折射率接近 1,在吸收峰位置发生反常色散现象,与吸收特性对应。

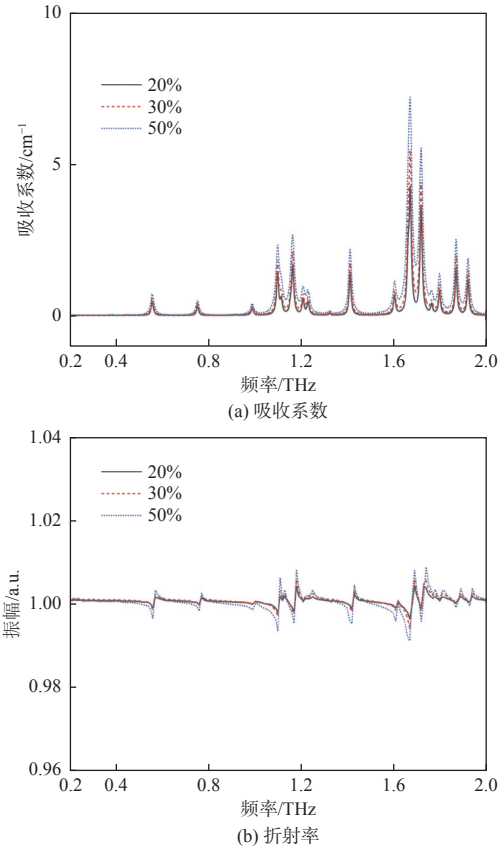


图2 不同湿度环境下水蒸气的吸收系数和折射率

Fig. 2 Absorption coefficient and refractive index of water vapor under different humidity

为验证吸收模型的可靠性,通过采用 1.1 章节所述系统,在室温与湿度为 30%、传输距离为 0.345 m 的条件下测量了潮湿空气的太赫兹时域信号,并通过吸收模型反演得到干燥空气的信号,如图 3 所示。从幅频图和相位图可以看出,信号的幅值和相位差在特征频率处的变化与水蒸气吸收模型的变化基本吻合,并且变化的大小基本一致。在时域光谱图上,干燥空气主波波峰位置与潮湿空气的位置基本一致,但强度比潮湿空气的略大,并且水蒸气产生的振荡是从主波波峰之后开始出现,

由此可以看出水蒸气在时域光谱上对太赫兹波的影响主要体现在主波波峰之后。结果证明, 通过测量潮湿空气的太赫兹时域信号, 借助水蒸气的吸收模型能够成功获得干燥环境下的空气信号, 因此该模型具有一定的可靠性。

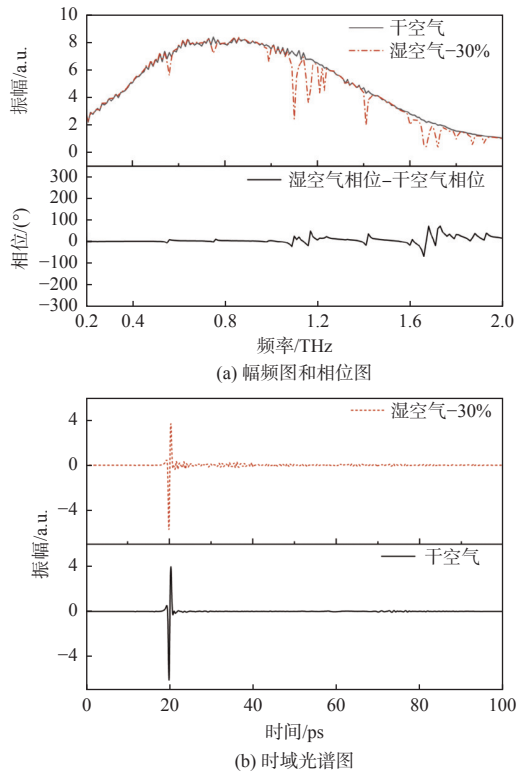


图3 干燥空气和湿空气对比图

Fig. 3 Comparison diagram of dry air and wet air

在室温与湿度为50%、传输距离为0.345 m的条件下测量了两种板材的太赫兹时域信号, 如图4所示。

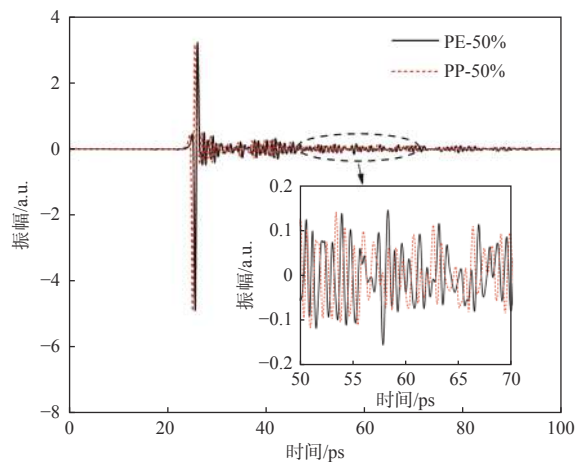


图4 样品在大气环境下的时域光谱图

Fig. 4 Time-domain spectrogram of samples in atmospheric environment

通常, 上述材料的折射率在1.5~2.0范围内, 根据菲涅尔原理可得, 样品的回波波峰位置比主波波峰延迟25 ps~45 ps左右。从图4中可以看出, 样品主波波峰在25 ps附近, 推出回波位置在50 ps~70 ps之间, 而在此范围内样品信号的回波已经被水蒸气产生的振荡掩盖, 无法找出波峰位置。

通过对两种板材的太赫兹时域信号进行傅里叶变换得到其频域信号。根据水蒸气的吸收模型得到对应湿度的吸收系数, 再通过反演得到了两种板材的重构信号, 结果如图5所示。样品幅值下降处与水蒸气的吸收模型的峰值位置基本吻合, 水蒸气在频域上的吸收基本消除, 但在吸收较强的位置处依然存在一些较小的吸收。原因可能是在测量过程环境的湿度存在轻微波动, 导致未能完全消除水蒸气的吸收。

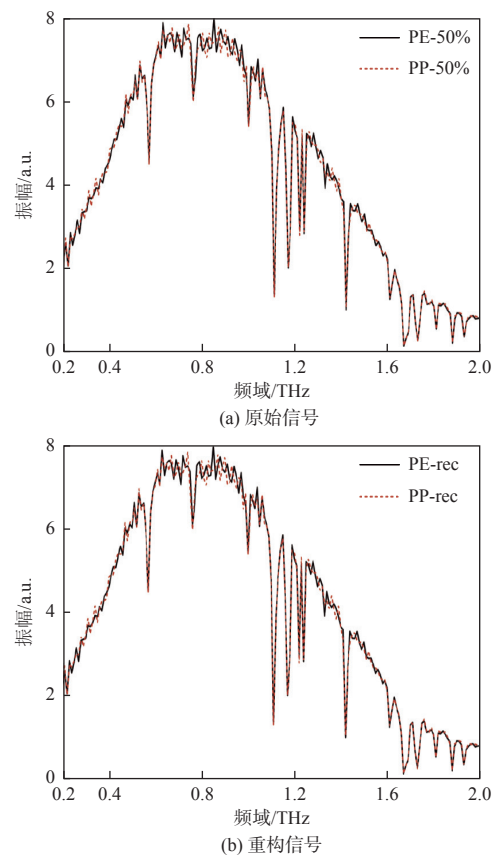


图5 样品幅频图

Fig. 5 Amplitude-frequency diagram of samples

将重构信号进行傅里叶逆变换后得到时域信号, 如图6所示。从图中可以看出, 水蒸气吸收所产生的振荡在时域光谱上基本消除, 重构信号的二次回波清晰可见。在干燥环境下获得样品的时域信号, 并通过太赫兹时域光谱图获得潮湿空气

信号的主波峰值点、干燥环境下样品信号和重构信号的主波峰值点的位置以及二次回波峰值点位置,结果如表 1 所示。重构信号与干燥环境下样品信号得出的二次回波峰值点的位置存在微小的偏差,重构信号的二次回波的波峰位置延后了 0.033 ps。其原因可能有两点:一是在测量过程中环境的湿度存在轻微波动,导致未能完全消除水蒸气的吸收,但吸收程度小,在时域上不足以产生大的振荡,只会使得时域信号二次回波的峰值点位置延后,且程度较小;二是系统平移台的回位误差导致,通过对信号进行分析可知,干燥环境下样品信号和重构信号的主波峰值位置相同,因此导致二次回波的波峰位置延后的主要原因是环境湿度的波动。

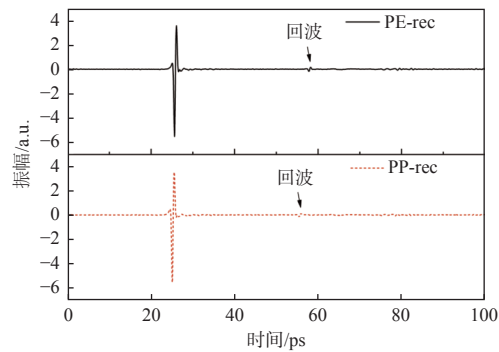


图 6 样品重构信号的时域光谱图

Fig. 6 Time-domain spectrogram of reconstructed signal from samples

表 1 重构信号的波峰位置对比					
Table 1 Comparison of wave peak position of reconstructed signal					
样品	潮湿空气主波峰位置/ps	样品信号	样品主波峰位置/ps	样品回波峰位置/ps	千分尺测量的厚度/mm
PE	20.381	干燥环境	26.048	58.248	3.128
		重构	26.048	58.281	
PP		干燥环境	25.548	55.915	3.002
		重构	25.548	55.915	

通过表 1 中湿度为 30% 的潮湿空气信号的主波峰值点、湿度为 50% 的样品信号和重构信号的主波峰值点及样品二次回波峰值点的位置计算得到飞行差  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ , 并通过 1.1 章节所述的折射率和厚度计算公式可以得到计算两种板材的折射率和厚度,结果如表 2 所示。通过重构信号得出的厚度与干燥环境下所测信号得出的厚度基本相同,

其绝对误差最大值均为 0.007 mm, 相对误差均在 1% 以下, 折射率精确到小数点后两位。在测量样品的过程中, 环境湿度波动引起的偏差使得 PE 样品重构信号的二次回波延后 0.033 ps, 根据重构信号得到的厚度值比干燥环境下所测信号得出的厚度值大 0.005 mm, 折射率值小 0.001。

表 2 样品在干燥环境下的信号和重构信号的厚度计算

Table 2 Thickness calculation of signal and reconstructed signal of samples in dry environment

样品	样品信号	$\Delta t_1/\text{ps}$	$\Delta t_2/\text{ps}$	折射率	厚度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
PE	干燥环境	5.667	32.200	1.543	3.130	0.002	0.064
	重构	5.667	32.233	1.542	3.135	0.007	0.224
PP	干燥环境	5.167	30.367	1.516	3.005	0.003	0.100
	重构	5.167	30.367	1.516	3.005	0.003	0.100

3 结论

在利用 THz-TOF 法测量厚度时, 通常是在充入氮气或者干燥空气的环境下完成, 这限制了太赫兹技术的应用。针对这一问题, 本文通过分析太赫兹波在大气环境下的传播过程, 利用水蒸气的吸收模型来消除水蒸气对样品回波信号的干扰, 最后以两种塑料板材样品为例来验证本文方法的可行性。通过测量湿度为 30% 时的空气信号和湿度为 50% 时的样品信号, 根据空气与样品信号之间的主波波峰位置差  $\Delta t_1$  和样品主波波峰与回波波峰位置差  $\Delta t_2$  得出了样品的厚度和折射率。结果表明, 该方法能够消除水蒸气吸收对样品信号产生的干扰, 获得的折射率和厚度与在干燥环境下得到的结果基本相同, 厚度相对误差在 1% 以下, 折射率精确到小数点后两位, 具有较高的准确性。

参考文献:

[1] 王奇书, 牟达, 周桐宇, 等. 玻纤复合材料分层缺陷太赫兹无损检测技术[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 90-8.  
WANG Qishu, MOU Da, ZHOU Tongyu, et al. Terahertz nondestructive detection of delamination defects in glass fiber composites[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 90-8.

[2] GIURLANI W, BERRETTI E, INNOCENTI M, et al. Coating thickness determination using x-ray fluorescence spectroscopy: monte carlo simulations as an alternative to

- the use of standards[J]. *Coatings*, 2019, 9(2): 167-6.
- [3] DE ALMEIDA E, MELQUIADES F L, MARQUES J P R, et al. Determination of the polymeric thin film thickness by energy dispersive x-ray fluorescence and multivariate analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 2020, 167(4): 27-8.
- [4] ZHANG K, DOU P, WU T H, et al. An ultrasonic measurement method for full range of oil film thickness[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*, 2019, 233(3): 481-9.
- [5] GENG T, MENG Q F, ZHANG K, et al. Ultrasonic measurement of lubricant film thickness in sliding bearings with thin liners[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(2): 135-2.
- [6] HUSSAIN B, NAWAZ M, AHMED M, et al. Measurement of thickness and refractive index using femtosecond and terahertz pulses[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 158-6.
- [7] MAO X F, LEI Y Z. Thickness measurement of metal pipe using swept-frequency eddy current testing[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation International*, 2016, 17(8): 10-19.
- [8] 肖长江, 张景超, 郑连军. 玻璃在线激光测厚误差的透反互补抑制[J]. *光子学报*, 2017, 46(2): 160-9.  
XIAO Changjiang, ZHANG Jingchao, ZHENG Lianjun. Suppression of glass thickness measurement error by complementation and reflection[J]. *Journal of photons*, 2017, 46(2): 160-9.
- [9] BASLER C, BRANDENBURG A, MICHALIK K, et al. Comparison of laser pulse duration for the spatially resolved measurement of coating thickness with laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 135-6.
- [10] 张洪桢, 何明霞, 石粒力, 等. 随机优化算法应用于太赫兹测厚方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(10): 3066-3070.  
ZHANG Hongzhen, HE Mingxia, SHI Lili, et al. Study on random optimization algorithm applied to terahertz thickness measurement[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(10): 3066-3070.
- [11] PARK D W, Oh G H, KIM D J, et al. In-situ thickness measurement of epoxy molding compound in semiconductor package products using a terahertz-time of flight system[J]. *Ndt & E International*, 2019, 105(2): 111-8.
- [12] 何普, 赵纪元. 采用太赫兹时域光谱技术的高精度热障涂层测厚方法[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(6): 112-9.
- HE Pu, ZHAO Jiyuan. High precision thermal barrier coating thickness measurement using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(6): 112-9.
- [13] 林玉华, 何明霞, 赖慧彬, 等. 太赫兹脉冲光谱法测量微米级多层油漆涂层厚度技术[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(11): 3332-7.  
LIN Yuhua, HE Mingxia, LAI Huibin, et al. Measurement of coating thickness of micron multilayer paint by terahertz pulse spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(11): 3332-7.
- [14] 程滨, 任姣姣, 顾健, 等. 基于太赫兹传播仿真模型的涂层高精度厚度检测[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 80-6.  
CHENG Bin, REN Jiaojiao, GU Jian, et al. High precision thickness detection of coating based on terahertz propagation simulation model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 80-6.
- [15] RASEKH P, SAFARI A, YILDIRIM M, et al. Terahertz nonlinear spectroscopy of water vapor[J]. *Acs Photonics*, 2021, 8(6): 1683-8.
- [16] 邓琥, 尚丽平, 张泽林, 等. 不同行程下水蒸汽太赫兹传输特性[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 979-84.  
DENG Hu, SHANG Liping, ZHANG Zelin, et al. Terahertz transmission characteristics of water vapor at different stroke[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 979-84.
- [17] KRIMI S, TOROSYAN G, BEIGANG R. Advanced GPU-Based terahertz approach for in-line multilayer thickness measurements[J]. *Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 538-52.
- [18] SLOCM D M, SLINGERLAND E J, GILES R H, et al. Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 127(2): 49-63.
- [19] SILFSTEN P, KONTTURI V, ERVASTI T, et al. Kramers-kronig analysis on the real refractive index of porous media in the terahertz spectral range[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 778-80.
- [20] ROTHMAN L S, GORDON I E, BARBE A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(9-10): 533-72.
- [21] KUHN T, BAUER A, BUEHLER S A. Water vapor continuum: absorption measurements at 350 GHz and model calculations[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2002, 109(9): 1743-4.