



DOI: 10.12086/oe.2018.170534

## 太赫兹时域光谱技术的参数提取及其误差分析

侯春鹤, 朱运东, 李丽娟\*, 任姣姣

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130000

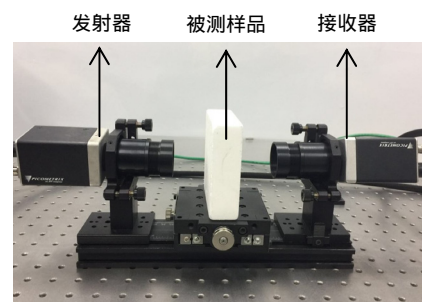
**摘要:** 太赫兹时域光谱技术 (THz-TDS) 是通过分析携带介质信息 (如振幅和相位等) 的宽频带太赫兹脉冲, 从而对材料内部信息进行提取的一种光谱检测方法。实验应用透射式的检测方式, 对陶瓷基复合材料和硅胶材料进行检测。建立材料光学参数模型, 提取了折射率和吸收系数的值, 并绘制了折射率和吸收系数随频率变化的曲线图。结果显示, 密度不同的陶瓷基复合材料的折射率各自稳定于常数 1.11、1.14、1.16, 厚度不同的硅胶的折射率为 2.10, 且折射率曲线不存在频率依赖性; 而吸收系数对频率依赖性较强, 但对于材料特性不同的样品的吸收明显不同。基于高斯误差理论, 对实验中出现的系统误差进行数学识别与建模, 分析了密度为  $2.8 \text{ g/cm}^3$  的陶瓷基复合材料光学参数的几种误差源的传播过程。折射率的标准差趋于平稳, 吸收系数的标准差随频率变化明显, 且标准差均在 0.001 量级, 这对折射率和吸收系数等物理量的精确提取具有较大的意义。

**关键词:** THz-TDS; 光学参数提取; 误差分析; 陶瓷基复合材料; 硅胶

**中图分类号:** TP207

**文献标志码:** A

**引用格式:** 侯春鹤, 朱运东, 李丽娟, 等. 太赫兹时域光谱技术的参数提取及其误差分析[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 170534



## Optical parameter extraction and error analysis of terahertz time domain spectrum detection

Hou Chunhe, Zhu Yundong, Li Lijuan\*, Ren Jiaojiao

Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130000, China

**Abstract:** Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) is a spectral detection method. The information of the material is measured through the broadband terahertz pulse carrying the medium information (such as amplitude and phase). The ceramic matrix composites and silica gel materials were tested with the detection method of transmission. The optical parametric models of the material were established, and the values of the refractive index and the absorption coefficient were extracted. The curves of the refractive index and the absorption coefficient with frequency were plotted. The refractive index of the ceramic matrix composites with different density are respectively convergent to a constant of 1.11, 1.14 and 1.16, and the refractive index of silica gel with different thickness is 2.1, which is not dependent to frequency. While the frequency dependence of the absorption coefficient is evident, and the absorption of samples with different material properties is significantly different. Based on the Gaussian error theory, the errors of the optical parameters are simulated and modeled. The experimental results show that there are several error sources in the optical parameters of the ceramic matrix composites with density of  $2.8 \text{ g/cm}^3$ . The

收稿日期: 2017-10-09; 收到修改稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家高科技研究发展计划项目(2015AA6036A); 国防技术基础科研项目(JSZL2015411C002)

作者简介: 侯春鹤(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事太赫兹无损检测的研究。E-mail: 347049475@qq.com

通信作者: 李丽娟(1972-), 女, 博士, 教授, 主要从事数字化装配、无损检测新技术的研究。E-mail: custjuan@126.com

standard deviation of the refractive index and the absorption coefficient are obviously related to the frequency, and the standard deviation is in the order of 0.001, which is of great significance to the precise extraction of the physical parameters such as the refractive index and the absorption coefficient.

**Keywords:** terahertz-time domain spectroscopy; material parameter measurements; error analysis; ceramic matrix composites materials; silica cel materials

**Citation:** Hou C H, Zhu Y D, Li L J, et al. Optical parameter extraction and error analysis of terahertz time domain spectrum detection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170534

## 1 引言

基于超短 THz 脉冲产生与探测技术发展起来的 THz 时域光谱技术(terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS), 在 20 世纪 80 年代首先由美国 IBM 公司的 Wastson 研究中心和 Af&T 公司的 Bell 实验室提出来。大多数光谱测量是记录被放置在太赫兹辐射的路径上的被测样品的 THz 时域脉冲信号, 和在没有样品的情况下记录的参考信号, 通过复傅里叶变换将时域的波形转换到频域, 以获得强度和相位的光谱<sup>[1]</sup>。因此, THz-TDS 可以同时直接探测被研究对象扰动的 THz 波的电场振幅和相位。这些光谱被进一步处理以计算透射率和相位差, 用于导出与频率相关的介电特性, 如复折射率、复介电常数和吸收系数。THz-TDS 已广泛用于研究各种材料的光谱特性<sup>[2-4]</sup>, 如电介质、半导体、生物分子、液体、药品等, 频谱范围从 0.1 THz 到 3 THz。

2009 年, Naito 等人利用太赫兹时域光谱技术对两种不同成分的玻璃纤维复合材料进行了检测, 发现这两种样本的太赫兹信号均在 1 THz 处衰减到较低值。此外, 介电常数的实部基本不随着频率的变化而变化, 而虚部却随着频率的增大而增大<sup>[5]</sup>。2013 年, 中国石油大学油气光学探测技术北京市重点实验室的 Tian 等人使用透射模式太赫兹时域光谱(THz-TDS)测量来研究二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)的光学性质, 通过使用最佳厚度公式, 吸收常数显示最小方差的选定频率被用于具有不同烷基取代基的 ZDDP 的定量分析<sup>[6]</sup>。2015 年, Razanoelina 等人研究了一种用于测量超薄金膜的介电性能的新型平行板波导技术, 讨论了基于波导理论的 THz 介电参数提取模型, 并分析了横磁(TM)和横电(TE)波导模式的薄膜响应, 证明了 TE 模式对薄膜的性能有更好的敏感性<sup>[7]</sup>。

在高技术领域内, 要求材料具有轻质高强、抗氧化、耐腐蚀和耐高温等特点。陶瓷基复合材料是一种特殊的陶瓷, 由于其特有的隔热功能, 被广泛应用在

航空、航天等领域的热防护系统中。而硅胶在陶瓷基复合材料的粘接过程中起到了衔接的作用, 硅胶材料粘接的好坏也十分重要。本文首先利用 THz 时域光谱技术对两种材料进行检测, 并推导了材料折射率与吸收系数的数学表达式, 对两种材料的物理参数进行了对比分析。然后对参数提取过程中引入的误差进行了数学建模与分析, 着重分析了振幅误差(延迟线误差和噪声误差), 其次分析了在样品厚度测量过程中产生的误差。这几种误差源对总体误差影响巨大, 所以对研究这两种材料标准件的光学参数特性意义重大。

## 2 光学参数提取

考虑透射式 THz-TDS 建立材料光学常数提取模型, 图 1 为透射式 THz 时域光谱测量系统图, 飞秒激光发射源发出的光经发射器发出 THz 波入射到被测样品, 经样品透射的 THz 波被接收器所接收。信号传输给上位机并显示其时域光谱图。

将入射的 THz 信号记为  $\tilde{E}_{\text{THz}}(\omega)$ , 当没有样品时, 在线性介质中传播距离  $L$  后, 作为参考信号, 记作  $\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega)$ :

$$\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega) = \tilde{E}_{\text{THz}}(\omega) \exp\left(-j \frac{\tilde{n}(\omega)L}{c}\right), \quad (1)$$

透射过样品后, 便成为携带有样品信息的样品信号, 记作  $\tilde{E}_{\text{sam}}(\omega)$ 。在样品足够厚时, 即经过样品后的信号与经过等厚空气层的参考信号可以分离开时, 由于二次甚至多次反射与直接透射产生的光程比较大, 振幅损失也十分明显, 此时如果选用合适的取样窗口, 可以只包含一个 THz 主脉冲波形, 而忽略多次反射效应, 这时  $k=0$ ,  $FP(\omega)=1$ , 有:

$$\tilde{E}_{\text{sam}}(\omega) = \tilde{E}_{\text{THz}}(\omega) \tau_{ab} \cdot \exp\left(-j \frac{\tilde{n}_b(\omega)\omega d}{c}\right) \tau_{ba}, \quad (2)$$

其中  $\tau_{ab}$  和  $\tau_{ba}$  是透射系数。

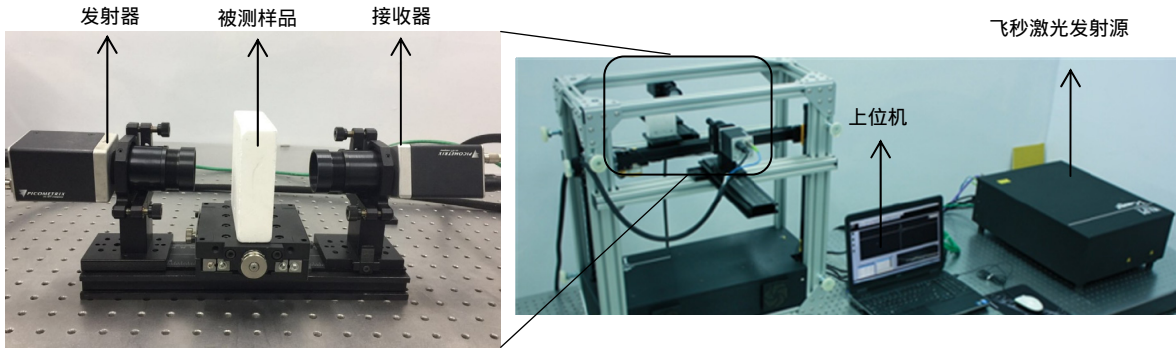


图 1 透射式 THz 时域光谱测量系统  
Fig. 1 Transmission THz time-domain spectrum detection system

将上述结果带入复透射系数中

$$\tilde{H}(\omega) = \frac{\tilde{E}_{\text{sam}}(\omega)}{\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega)}$$

在真空,  $\tilde{n} = \tilde{n}_a = 1$ , 经化简可得:

$$\tilde{H}(\omega) = \frac{\tilde{E}_{\text{sam}}(\omega)}{\tilde{E}_{\text{THz}}(\omega)} = \frac{4\tilde{n}_b}{(1+\tilde{n}_b)^2} \cdot \exp\left(-j\frac{\omega d}{c}(\tilde{n}_b - 1)\right) \quad (3)$$

将  $\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - jK(\omega)$  代入上式, 并将  $\tilde{H}(\omega)$  化为模和辐角的形式:

$$\tilde{H}(\omega) = \rho(\omega) \exp(-j\phi(\omega)),$$

则有:

$$\rho(\omega) = \frac{4(n(\omega) + K(\omega))}{(1 + n(\omega))^2}, \quad (4)$$

$$\phi(\omega) = \frac{(n(\omega) - 1)\omega d}{c} + \arctan\left[\frac{K(\omega)}{n(\omega)(1 + n(\omega)) + K(\omega)}\right] \quad (5)$$

由此得到样品的折射率消光系数和吸收系数的计算公式<sup>[8]</sup>:

$$n(\omega) = \phi(\omega) \frac{c}{\omega d} + 1, \quad (6)$$

$$K(\omega) = \ln\left[\frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)(1 + n(\omega))}\right] \cdot \frac{c}{\omega d}, \quad (7)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2K(\omega)\omega}{c} = \frac{2}{d} \ln\left[\frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)(1 + n(\omega))}\right] \quad (8)$$

### 3 误差分析

THz-TDS 测量和参数提取过程中, 都会被不同的误差源影响。当测量的 T-ray 信号(包括参考信号和采样信号)被预处理以提取光学常数时, 振幅误差通过傅里叶变换和反卷积传播。

#### 3.1 离散傅里叶变换

首先考虑傅里叶变换过程中的误差传播。信号长度为  $N$  的离散傅里叶变换为

$$\tilde{E}(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} E(k) \exp(-j\omega k \tau) \quad (9)$$

如果  $\tilde{E}(\omega) = E_{\text{Re}}(\omega) + jE_{\text{Im}}(\omega)$ , 其中  $E_{\text{Re}}(\omega)$  和  $E_{\text{Im}}(\omega)$  是实数, 则:

$$E_{\text{Re}}(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} E(k) \cos(\omega k \tau), \quad (10)$$

$$E_{\text{Im}}(\omega) = -\sum_{k=0}^{N-1} E(k) \sin(\omega k \tau) \quad (11)$$

假设每个时间样本的振幅与其他时间样本的振幅统计学无关, 则光谱的实部和虚部的方差分别为

$$\sigma_{E_{\text{Re}}(\omega)}^2 = \sum_{k=0}^{N-1} \cos^2(\omega k \tau) \sigma_{E(k)}^2, \quad (12)$$

$$\sigma_{E_{\text{Im}}(\omega)}^2 = \sum_{k=0}^{N-1} \sin^2(\omega k \tau) \sigma_{E(k)}^2 \quad (13)$$

由于频谱的实部和虚部使用相同的输入集合, 所以它们的协方差为

$$\begin{aligned} \sigma_{E_{\text{Re}}E_{\text{Im}}}^2 &= -\sum_{k=0}^{N-1} \sin(\omega k \tau) \cos(\omega k \tau) \sigma_{E(k)}^2 \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \sin(2\omega k \tau) \sigma_{E(k)}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

基于误差理论, 由傅里叶变换而引起的振幅和相位的方差是<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} \sigma_{|E_u|^2}^2 &= \frac{1}{|\tilde{E}_u|^2} (E_{u\text{Re}}^2 \sigma_{u\text{Re}}^2 + E_{u\text{Im}}^2 \sigma_{u\text{Im}}^2 \\ &\quad + 2E_{u\text{Im}}E_{u\text{Re}} \sigma_{u\text{ReIm}}^2), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\phi_u}^2 &= \frac{1}{|\tilde{E}_u|^4} (E_{u\text{Re}}^2 \sigma_{u\text{Re}}^2 + E_{u\text{Im}}^2 \sigma_{u\text{Im}}^2 \\ &\quad - 2E_{u\text{Im}}E_{u\text{Re}} \sigma_{u\text{ReIm}}^2), \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $u = \text{ref, sam}$ , ref 和 sam 分别表示参考和样品。

### 3.2 反卷积

通过在时域中使用参考信号对样本信号进行去卷积来计算系统的传递函数。等效地，频域中的这种操作由幅度分割和相位减法给出：

$$|\tilde{H}| = |\tilde{H}(\omega)| = \frac{|\tilde{E}_{\text{sam}}(\omega)|}{|\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega)|}, \quad (17)$$

$$\phi\tilde{H} = \phi\tilde{H}(\omega) = \phi E_{\text{sam}}(\omega) - \phi E_{\text{ref}}(\omega). \quad (18)$$

这里认为信号的大小和相位是独立的输入参数，从而传递函数在计算方差的过程中并不存在振幅与相位的协方差。它们的方差分别为<sup>[10]</sup>

$$\sigma_{|H|}^2(\omega) = \frac{1}{|E_{\text{ref}}(\omega)|^2} \sigma_{|E_{\text{sam}}|}^2(\omega) + \frac{|E_{\text{sam}}(\omega)|^2}{|E_{\text{ref}}(\omega)|^4} \sigma_{|E_{\text{ref}}|}^2(\omega), \quad (19)$$

$$\sigma_{\phi H}^2(\omega) = \sigma_{\phi E_{\text{sam}}}^2(\omega) + \sigma_{\phi E_{\text{ref}}}^2(\omega). \quad (20)$$

对于薄且高吸收的样品，必须考虑样品厚度的不确定性，需要非常精确的厚度测量以避免误差值过大。最终的折射率与吸收系数的方差为

$$\sigma_n^2(\omega) = \left[ \frac{c}{\omega d^2} \phi_H(\omega) \right]^2 \sigma_d^2 + \left[ \frac{c}{\omega d} \right]^2 \sigma_{\phi_H}^2(\omega),$$

$$\sigma_\alpha^2 = \left( \frac{2 \sigma_{|\tilde{H}|}}{d |\tilde{H}|} \right)^2 + \left( \frac{2 \sigma_d}{d^2} \ln |\tilde{H}| \right)^2. \quad (21)$$

### 3.3 误差来源分析

上述离散傅里叶和反卷积都属于运算过程中的误差传播途径，都是基于实际检测信号来完成的，实际检测信号的误差是振幅误差，分为延迟线误差和受光电子噪声影响的误差。

#### 3.3.1 受延迟线影响的误差

延迟线位置与正确位置的偏差  $\Delta x$  导致光电或光电的采样时间  $\Delta t$  的偏差。由于光探头光束在自由空间中进行，所以延迟线位置的偏差和采样时间的变化之间有简单的关系<sup>[11]</sup>，并且正常延迟阶段可以建立为

$$\Delta t = \frac{2\Delta x}{c}. \quad (22)$$

采样时间的方差  $\sigma_t^2$  为

$$\sigma_t^2 = \frac{4\sigma_x^2}{c^2}. \quad (23)$$

其中  $\sigma_x$  是延迟线的误差，则振幅误差为

$$\sigma_{E_u}^2(k) = \left[ \frac{2}{c} \cdot \frac{\partial E_u(k\tau)}{\partial k} \right]^2 \sigma_x^2. \quad (24)$$

#### 3.3.2 受噪声影响的误差

由光门控采样系统测量的时间波形的振幅受采样时间的影响。通过泰勒级数的一阶扩展，测量幅度到

时间索引  $k$  是在正确时间  $t_k$  加幅度导数乘以采样时间偏差的振幅的函数：

$$E(k) = E(t_k) + \Delta t \frac{dE(t_k)}{dt}, \quad (25)$$

其中： $t_k = k\tau$ ， $\tau$  是采样间隔。 $E(t_k)$  和  $\Delta t$  的方差产生测量的方差幅度：

$$\sigma_E^2(k) = \sigma_E^2(t_k) + \sigma_t^2 \left[ \frac{\partial E(t_k)}{\partial t} \right]^2, \quad (26)$$

即：

$$\sigma_{E_u}^2(k) = \left[ \frac{2}{c} \cdot \frac{\partial E_u(k\tau)}{\partial k} \right]^2 \sigma_x^2, \quad (27)$$

其中：振幅方差  $\sigma_{E_u}^2(k)$  由噪声引起，并且可以由多项式系数表示<sup>[12]</sup>：

$$\sigma_{E_u}^2(t_k) = A E_u^2(k\tau) + B |E_u(k\tau)| + C. \quad (28)$$

而延迟线误差和噪声引起的误差通过傅里叶变换传播到折射率和吸收系数的误差中。

## 4 实验

### 4.1 参数提取

考虑到太赫兹波在 0.6 THz 和 1.1 THz 等处存在较为明显的水蒸气吸收峰，在此选择温度约 26 °C、相对湿度约 35% 的条件下进行所有的检测实验。所选择样品为陶瓷基复合材料和硅胶，样品的实物图如图 2 所示，物理参数值如表 1 所示。

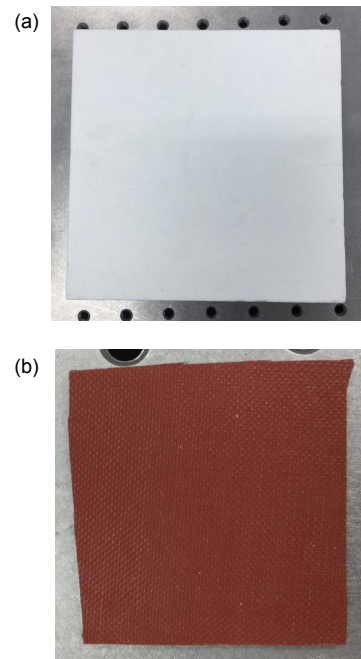


图 2 陶瓷基复合材料(a)和硅胶(b)

Fig. 2 Ceramic matrix composites materials (a) and silica gel materials (b)

表 1 物理参数

Table 1 Physical parameter

材料类型	厚度/mm	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	样品名称
硅胶	0.8		sample1
	2		sample2
	30	2.5	sample3
陶瓷基复合材料	30	2.8	sample4
	30	3.3	sample5

每个样品重复测量 10 次,振幅和相位作为频率的函数,使用标准的快速傅里叶变换从测量的 THz 辐射电场的时域数据中获得。材料的折射率与吸收系数通过式(6)、式(8)计算得出。实验结果如图 3 所示,图 3(a)为陶瓷基复合材料的折射率随频率变化的曲线,图 3(b)为相对应的吸收系数随频率变化曲线。从图 3(a)可以看出密度分别为 2.5 g/cm<sup>3</sup>、2.8 g/cm<sup>3</sup>和 3.3 g/cm<sup>3</sup>的陶瓷基复合材料的折射率在 0.2 THz~1.4 THz 范围内各自趋于保持恒定常数 1.11、1.14 和 1.16,且折射率随密度的增加而变大。图 3(b)中吸收系数随频率而增加,而后随着频率的增加而降低,峰值在 1.2 THz 约 1.9 cm<sup>-1</sup>。Jepsen 和 Fischer 建立了可检测吸收系数的动态范围与系统特性之间的关系用于传输反射 THz-TDS,发现对于传输模式 THz-TDS,吸收系数的最大可测量范围受到动态范围制约<sup>[13]</sup>。而图 3(b)中根据动态范围的粗计算,显示吸收测量仅在 0.55 THz 之前是准确的。在这个频率下,样本频谱的动态范围不足以测量吸收系数,而其余图形噪声占主导地位<sup>[14]</sup>。实验表明,陶瓷基复合材料对于太赫兹波具有良好的

透过性,同时存在着较为明显的吸收现象。

图 4 为不同厚度的硅胶的折射率与吸收系数曲线图。从图 4(a)可以看出,折射率在 0.2 THz~1.4 THz 范围内,厚度为 0.8 mm 和 2 mm 的硅胶的折射率均为 2.1,图 4(b)吸收系数也是随着频率的增加而升高,并在 1.2 THz 处达到峰值<sup>[15]</sup>。但对比硅胶与陶瓷基复合材料的吸收系数,结果表明两种材料均存在频率依赖性,但吸收系数的量级明显不同。

#### 4.2 误差分析

这里考虑的 THz-TDS 测量的假设是:(i) 被测样品具有平行的平坦表面的电介质板;(ii) 表面上的散射和反射可忽略;(iii) 入射光垂直于样品表面;(iv) 参考信号的测量条件除了不使用样品外,与样品信号条件相同,即忽略入射角对总误差的影响。

误差分析选用的材料是密度为 2.8 g/cm<sup>3</sup>的陶瓷基复合材料。根据式(15)计算参考信号的振幅误差,结果如图 5(a)所示。图 5(a)中振幅的误差值在讨论的有效区域内的标准差在 0.2×10<sup>-3</sup>附近波动,并保持平稳。图 5(b)为折射率标准差随频率的变化图,标准差的值

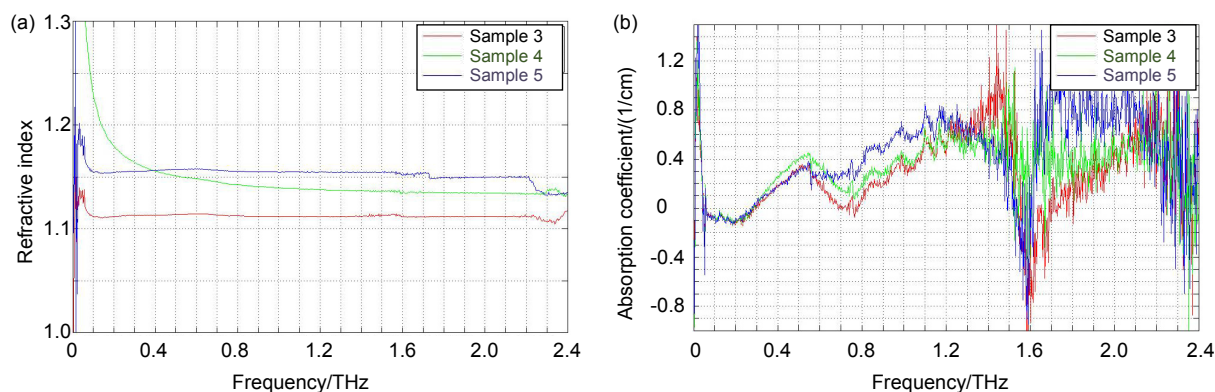


图 3 陶瓷基复合材料。(a) 折射率; (b) 吸收系数

Fig. 3 Ceramic matrix composites materials. (a) Refractive index; (b) Absorption coefficient

在很小的范围内波动，整体稳定于 0.001 附近波动。图 5(c)为陶瓷基复合材料的吸收系数的标准差，其值随频率的变化而呈现上升的趋势。这表明振幅误差引起的折射率标准差频率依赖性低，而吸收系数标准差的频率依赖性高。

在对误差的来源进行分析时，光学常数的变化受延迟线和噪声影响的方差展开如下：

$$\sigma_n^2(\omega) = \left[ \frac{c}{\omega d} \right]^2 \left\{ \frac{1}{|E_{\text{sam}}(\omega)|^4} \sum_{k=0}^{N-1} [E_{\text{sam,Im}}(\omega) \cos(\omega k \tau) + E_{\text{sam,Re}}(\omega) \sin(\omega k \tau)]^2 \sigma_{E_{\text{sam}}}^2(k) + \frac{1}{|E_{\text{ref}}(\omega)|^4} \sum_{k=0}^{N-1} [E_{\text{ref,Im}}(\omega) \cos(\omega k \tau) + E_{\text{ref,Re}}(\omega) \sin(\omega k \tau)]^2 \sigma_{E_{\text{ref}}}^2(k) \right\}, \quad (29)$$

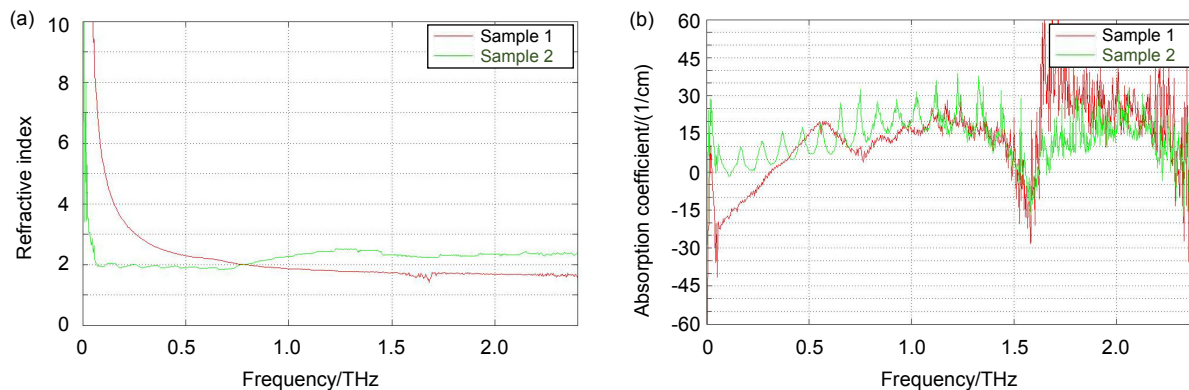


图 4 硅胶材料。(a) 折射率；(b) 吸收系数

Fig. 4 Silica gel materials. (a) Refractive index; (b) Absorption coefficient

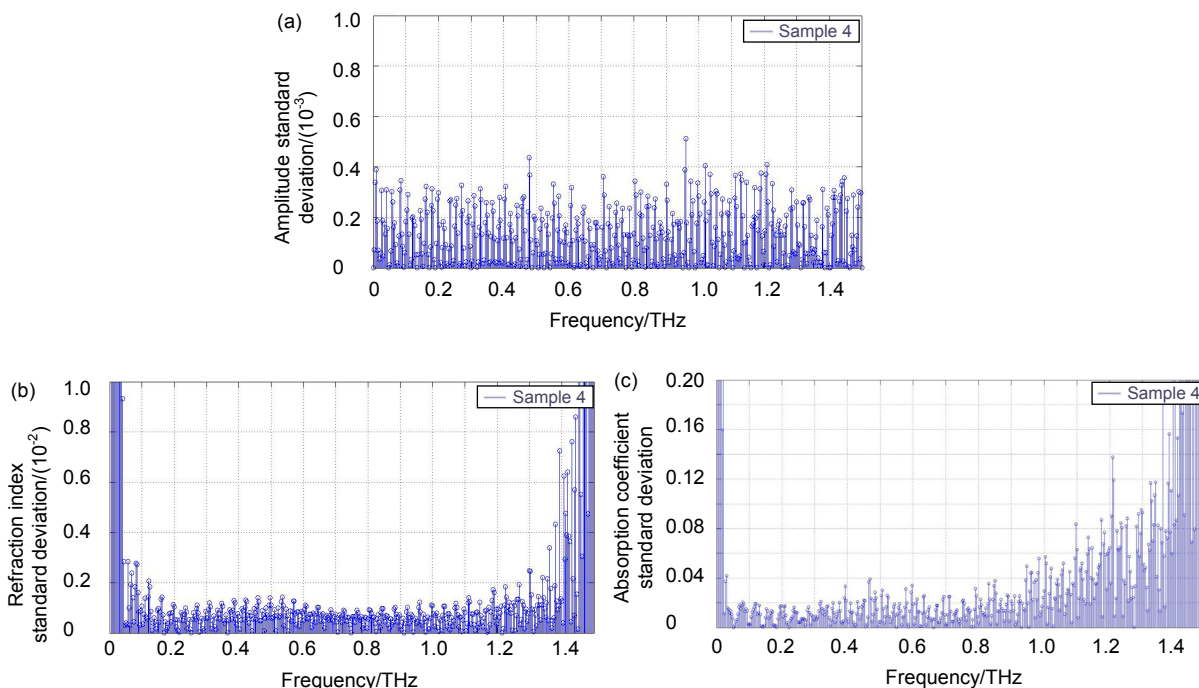


图 5 陶瓷基复合材料。(a) 振幅误差；(b) 折射率标准差；(c) 吸收系数的标准差

Fig. 5 Ceramic matrix composites materials. (a) Amplitude error; (b) The standard deviation of the refractive index; (c) The standard deviation of the absorption coefficient

$$\sigma_a^2(\omega) = \frac{4}{d^2} \left\{ \frac{1}{|E_{\text{sam}}(\omega)|^4} \sum_{k=0}^{N-1} [E_{\text{sam,Re}}(\omega) \cos(\omega k \tau) - E_{\text{sam,Im}}(\omega) \sin(\omega k \tau)]^2 \sigma_{E_{\text{sam}}}^2(k) + \frac{1}{|E_{\text{ref}}(\omega)|^4} \sum_{k=0}^{N-1} [E_{\text{ref,Re}}(\omega) \cos(\omega k \tau) - E_{\text{ref,Im}}(\omega) \sin(\omega k \tau)]^2 \sigma_{E_{\text{ref}}}^2(k) + \left( \frac{n(\omega)-1}{n(\omega)+1} \right)^2 \frac{\sigma_n^2(\omega)}{n^2(\omega)} \right\}. \quad (30)$$

不同的误差源引起的方差可以用式(24)和式(28)中的振幅方差对应到式(29)、式(30)中即可。图 6 为  $A=B=C=0.001$  和  $A=B=C=0.01$  的两种情况下电子和光学噪声对输出不确定性的影响，由于噪声的幅度依赖性， $AE^2(k\tau) + B|E_u(k\tau)| + C$  对高频的变化影响较小。

图 7 模拟的延迟线定位不确定性的影响。图 7(a)

为折射率标准化标准偏差，图 7(b)为  $\sigma_x = 1 \mu\text{m}$  和  $\sigma_x = 10 \mu\text{m}$  条件下吸收系数标准化标准偏差。结果显示，折射率的标准化偏差对延迟线定位不确定度敏感度很低，而吸收系数的标准化偏差对定位不确定度呈线性和成比例的变化，并且在峰值频率附近是较低的。

### 5 总结

本文首先基于 THz 时域光谱技术对陶瓷基复合材料和硅胶在频率范围内的光学特性进行了实验测试。结果显示密度不同的陶瓷基复合材料的折射率值分别为 1.11、1.14 和 1.16。而吸收系数对于频率存在依赖性，均随着频率的增加而增加，并存在一峰值点。不同厚度的硅胶的折射率为 2.10，吸收系数的变化趋势与陶瓷基复合材料的趋势相同，但峰值位置不同。其次，对密度为  $2.8 \text{ g/cm}^3$  陶瓷基复合材料在光学参数

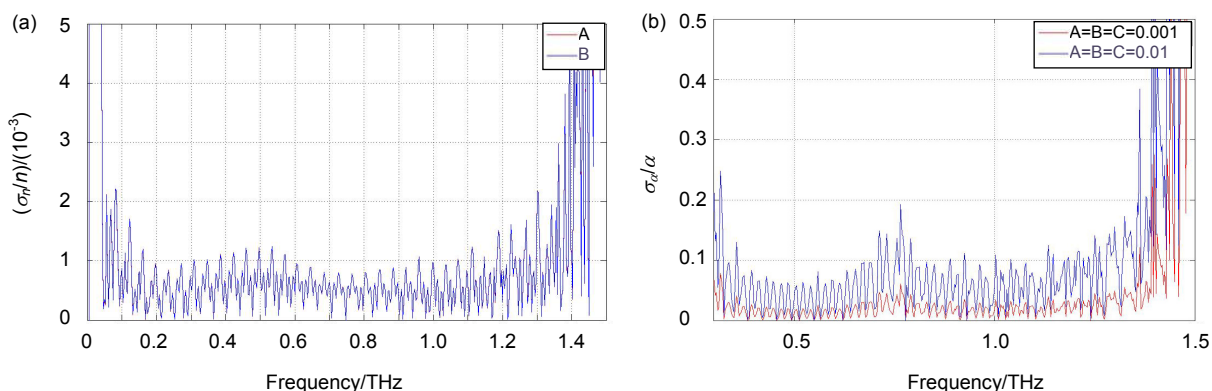


图 6 受噪声影响的光学常数的标准偏差。(a)  $n$  标准化标准偏差; (b)  $\alpha$  标准化标准偏差  
Fig. 6 The standard deviation of optical parameters from noise impact. (a) The standard deviation of  $n$ ; (b) The standard deviation of  $\alpha$

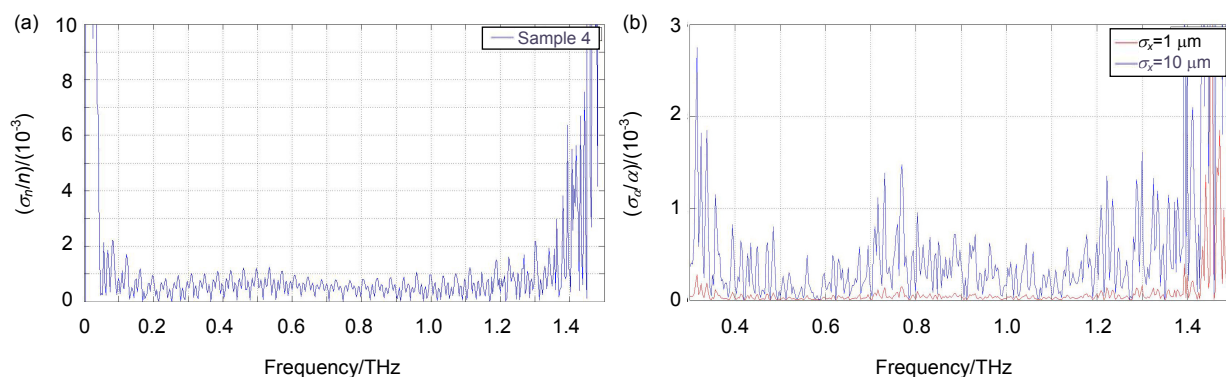


图 7 受延迟线影响的光学常数的标准偏差。(a)  $n$  标准化标准偏差; (b)  $\alpha$  标准化标准偏差  
Fig. 7 The standard deviation of optical parameters from delay line. (a) The standard deviation of  $n$ ; (b) The standard deviation of  $\alpha$

提取的噪声问题进行了分析。该系统的误差分为振幅误差、厚度误差等几个部分,每个部分的值都会对最后的误差造成影响。最终检测分析得出振幅标准差在  $0.2 \times 10^{-3}$  附近波动,折射率的标准差趋于平稳在 0.001 附近波动,而吸收系数的标准差在  $10^{-2}$  量级内随频率的增加而上升。经实验模拟,光电子噪声的幅度依赖性对高频的变化影响小。受延迟线影响的吸收系数的误差与定位不确定度成比例变化,并在峰值频率附近较低。在对材料标准件的折射率与吸收系统的提取与误差分析后,可以在此基础上分析材料的均匀性,或反之计算同一材料的厚度。总之对于材料光学参数的提取与分析为其它工作的开展起到了铺垫的作用。

## 参考文献

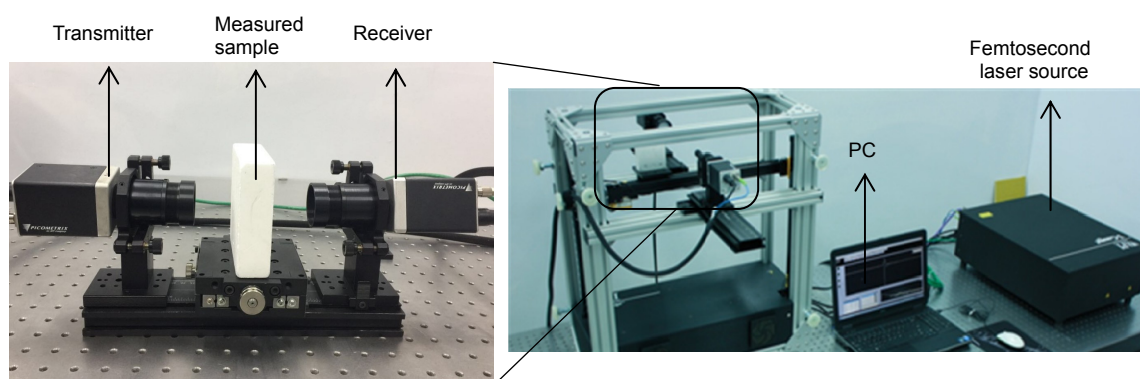
- [1] Tripathi S R, Aoki M, Mochizuki K, et al. Practical method to estimate the standard deviation in absorption coefficients measured with THz time-domain spectroscopy[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(12): 2488–2491.
- [2] Sakai K. *Terahertz Optoelectronics*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [3] Dexheimer S L. *Terahertz Spectroscopy: Principles and Applications*[M]. New York: Cambridge University Press, 2007: 198–209.
- [4] Woolard D L, Loerop W R, Shur M S. *Terahertz Sensing Technology: Volume 2: Emerging Scientific Applications and Novel Device Concepts*[M]. Singapore: World Scientific, 2004.
- [5] Naito K, Kagawa Y, Utsuno S, et al. Dielectric properties of woven fabric glass fiber reinforced polymer-matrix composites in the THz frequency range[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, **69**(11–12): 2027–2029.
- [6] Tian L, Zhao K, Zhou Q L, et al. Optical parameters of zinc dialkyldithiophosphate in terahertz regime[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(6): 554–556.
- [7] Razanoelina M, Kinjo R, Takayama K, et al. Parallel-plate waveguide terahertz time domain spectroscopy for ultrathin conductive films[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, **36**(12): 1182–1194.
- [8] Yang X J, Li X J, Liu J J. Error analysis of quartz glass terahertz optical parameter measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(6): 1827–1831.  
杨晓杰, 李向军, 刘建军. 石英玻璃太赫兹光学参数测量的误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(6): 1827–1831.
- [9] Fornies-Marquina J M, Letosa J, Garcia-Gracia M, et al. Error propagation for the transformation of time domain into frequency domain[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, **33**(2): 1456–1459.
- [10] Krüger M, Funkner S, Bründermann E, et al. Uncertainty and ambiguity in Terahertz parameter extraction and data analysis[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, **32**(5): 699–715.
- [11] Lin H, Mickan S P, Fischer B M, et al. Analysis of measurement uncertainty in THz-TDS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6593**: 659326.
- [12] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. Influence of noise on the characterization of materials by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, **17**(3): 452–461.
- [13] Unferdorben M, Szaller Z, Hajdara I, et al. Measurement of refractive index and absorption coefficient of congruent and stoichiometric lithium niobate in the Terahertz range[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, **36**(12): 1203–1209.
- [14] Jepsen P U, Fischer B M. Dynamic range in terahertz time-domain transmission and reflection spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(1): 29–31.
- [15] Wilke I, Ramanathan V, Lachance J, et al. Characterization of the terahertz frequency optical constants of montmorillonite[J]. *Applied Clay Science*, 2014, **87**: 61–65.



# Optical parameter extraction and error analysis of terahertz time domain spectrum detection

Hou Chunhe, Zhu Yundong, Li Lijuan\*, Ren Jiaojiao

Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130000, China



Transmission THz time-domain spectrum detection system

**Overview:** Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) is a spectral detection method. The information of the material is measured through the broadband terahertz pulse carrying the medium information (such as amplitude and phase). Terahertz waves have the characteristics of strong penetrating power, safety and spectral resolving power, and have been rapidly developed and applied in recent years. They have become the new forces of material property analysis and non-destructive testing technology and have been applied to national defense, industry and telecommunications, biomedicine, pharmaceuticals, agricultural products and foodstuffs. In this paper, the transmission test method is used to test and analyze the tested materials. The main tested materials used in the experiment include ceramic matrix composites and silica gel materials, which are commonly used in thermal protection systems in aerospace and aerospace fields. In this paper, the optical parametric model of material was established based on terahertz time-domain spectroscopy detection system. The refractive index and absorption coefficient of the material were extracted. The curves of refractive index and absorption coefficient with frequency were plotted based on the obtained optical parameters. The results show that the refractive index of ceramic matrix composites with different densities are respectively stable at a constant of 1.11, 1.14 and 1.16. The refractive index of silica gel with different thickness is 2.10. This is in line with the principle of basic physics. By observing the refractive index of the material and absorption coefficient of the curves, the same density material refractive index does not exist frequency dependence, and the absorption coefficient of the frequency dependence is strong, it increases with increasing frequency, and there is a peak point. Secondly, in order to extract the optical parameters of the extracted material accurately, and understand the error existing in the extraction process, the systematic errors occurred in the experiments were identified and modeled based on the theory of Gaussian error. The characteristic errors of the optical parameters of the ceramic matrix composites with a density of  $2.8 \text{ g/cm}^3$  were analyzed. The errors including the amplitude error and the thickness error, each part of the error source will contribute to the final error. The results show that the standard deviation of refractive index is steady, and the standard deviation of absorption coefficient changes obviously with the frequency, and the standard deviations are in the order of 0.001. This is of great significance for accurate extraction of optical parameters and other physical quantities.

**Citation:** Hou C H, Zhu Y D, Li L J, *et al.* Optical parameter extraction and error analysis of terahertz time domain spectrum detection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170534

Supported by National High Technology Research and Development Program(2015AA6036A) and Defense Technology Basic Research(JSZL2015411C002)

\* E-mail: custjuan@126.com