

# 具有参考样品的太赫兹波双路透射测量系统

马无锡

(浙江工贸职业技术学院 教务处, 浙江 温州 325003)

**摘要:** 太赫兹波透射测量技术能够很好地应用于无损检测领域, 然而样品在进行透射测量时存在着F-P效应, 太赫兹波源功率的波动与频率的漂移都会极大地影响测量结果的精度。文中设计了一种具有参考样品的双路透射测量系统, 并模拟比较了传统单路透射测量系统与文中设计的双路透射测量系统两者的测量误差, 最后对如何选择参考样品进行了分析。结果证明该测量系统可以有效地克服太赫兹波源功率的波动与频率的漂移, 大大提高了测量的精度。

**关键词:** 太赫兹; 测量精度; F-P效应; 双路透射

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-0105(2016)02-0038-04

## A Double-path Transmission Measurement System with Referenced Sample

MA Wu-xi

(Educational Administration Department, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, WenZhou, 325003, China)

**Abstract:** The transmission measurement technology of terahertz has been effectively used in lossless testing field. However, the waves power fluctuation and frequency drift of THz source will greatly affect the precision of measurement results because of the existence of F-P interference effect of sample. In this paper, a double-path transmission measurement system with referenced sample is designed. Compared with traditional single-path transmission measurement system, the measurement system in this paper has been more effective. Moreover, method about how to choose the reference sample is analyzed. Finally, the results demonstrate that this measurement system can effectively overcome the volatility of THz source waves power and frequency drift, and greatly improve the measurement accuracy.

**Key words:** THz; measurement accuracy; F-P effect ; double-path transmission measurement

## 0 引言

太赫兹 (Terahertz) 波的频率位于远红外光与毫米波之间, 在这波段内的电磁波具有低能性、高穿透性、瞬态性、宽带性、相干性和指纹谱性等特性<sup>[1]</sup>, 这些特性可以使其在无损检测领域中得到很好地应用<sup>[2-3]</sup>。太赫兹波检测技术常用的光路搭建方法有透射型光路<sup>[2-4]</sup>和反射型光路<sup>[5-8]</sup>, 然而这些透射检测方法并没有很好地解决由于太赫兹波源功率波动与频率漂移所带来的测量误差。文中设计了一套双路透射测量系统, 并在参考光路上放置了参考样品, 可以有效地监测到由于测量样品的F-P效应所导致的测量误差, 然后通过实验仿真比较了单、双

路透射测量系统, 并对参考样品的参数进行了优化, 结果表明, 此系统可以有效地消除太赫兹波源功率波动与频率漂移所带来的测量误差。

## 1 双路透射式测量系统

双路透射式测量系统如图1所示, 先由波源产生太赫兹波, 经由分束片分为两路, 一路为样品测量光路, 一路为参考样品光路, 最终都由探测器来接收。参考光路中放置了参考样品, 其作用可以起到实时比较波源频率漂移与功率波动的情况。设定样品测量光路的探测器接收的光强为 $I$ , 参考样品光路探测器接收的光强为 $I_0$ , 波源产生太赫兹波的光强为 $I_0$ 。

收稿日期: 2016-03-10

作者简介: 马无锡, 硕士, 浙江工贸职业技术学院教师, 主要研究方向: 太赫兹检测技术、图像处理。

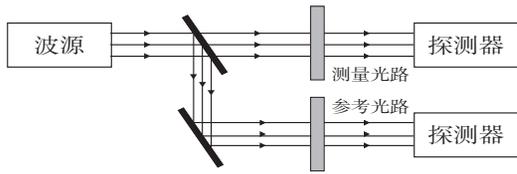


图1 具有参考样品的双路透射系统简意图

### 2 F-P干涉效应

大多数测量样品的形状为平行平面，太赫兹波进行平面透射测量时，前后表面会产生F-P效应，取图1测量光路中的测量样品进行F-P效应分析，如图2所示。测量样品组成了多光束干涉模型，该透射公式的推导具体过程如公式(1)所示，其中： $E_0$ 为入射电场强度，对应的光强为 $I_0$ ， $n_1$ 为传输介质的复折射率，此处的介质是空气。 $n_2$ 为样品中传输的复折射率， $n_2=n+ki$  ( $n$ 为折射率， $k$ 为吸收系数)。 $t_{12}$ 为样品上表面的透过系数， $t_{12}=2n_1/(n_1+n_2)$ 。 $t_{21}$ 为样品下表面的透过系数， $t_{21}=2n_2/(n_1+n_2)$ 。 $P(d)$ 为待测样品介质中的传递函数，公式为 $P(d)=e^{-2\pi i k d/c} e^{i\delta}$ 。 $C$ 为光速， $f$ 为波源产生太赫兹的频率， $K$ 为消光系数， $d$ 为样品前后表面之间的距离。相位延迟量 $\delta=2\pi n d/c$ ， $n$ 为样品折射率。测量光路的探测器最终接受的电场强度如公式(2)所示。

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 t_{12} P(d) t_{21} \\ E_2 &= E_0 t_{12} P(d) r_{21} P(d) t_{21} \\ &\vdots \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} E_i &= E_0 t_{12} P(d) t_{21} [P(d) r_{21}]^{2(i-1)} \\ \sum E_i &= \frac{E_0 t_{12} P(d) t_{21}}{1 - r_{21}^2 P(2d)} \end{aligned} \tag{2}$$

$$I = |\sum E_i|^2 = \frac{|E_0^2 t_{12}^2 a^2 t_{21}^2|}{|1 + r_{21}^4 a^4 - 2r_{21}^2 a^2 \cos 2\delta|} \tag{3}$$

$$I_r = |\sum E_i|^2 = \frac{|E_0^2 t_{12}'^2 a'^2 t_{21}'^2|}{|1 + r_{21}'^4 a'^4 - 2r_{21}'^2 a'^2 \cos 2\delta'|} \tag{4}$$

$$\frac{I}{I_r} = \frac{|1 + r_{21}'^4 a'^4 - 2r_{21}'^2 a'^2 \cos 2\delta'| |t_{12}^2 a^2 t_{21}^2|}{|1 + r_{21}^4 a^4 - 2r_{21}^2 a^2 \cos 2\delta| |t_{12}'^2 a'^2 t_{21}'^2|} \tag{5}$$

为了计算方便，设定  $a=e^{-2\pi i k d/c}=e^{-\alpha d/2}$ ，其中 $\alpha$ 为样品的吸收系数，测量光路中探测器接收的光强 $I$ 如公式(3)所示。参考光路中的参考样品的形状也为平行平面，所以探测器接收的光强为 $I_r$ 如公式(4)所示，式中的参数替换成参考样品的复折射率与吸收系数。结合公式(3)与公式(4)得到公式(5)。公式(5)中可知双路透射测量系统的测量结果与波源功率的波动无关 ( $I_0=E_0^2$ 已经消除)，分子分母能够同时实时响应波源频率的漂移，由此得知

双路透射测量系统可以完全消除波源功率波动造成的测量误差，并且一定程度上有效地消除了波源频率漂移带来的测量误差。

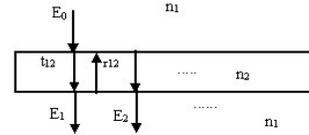


图2 平行平面样品透射产生的F-P效应模型

### 3 单、双路比较

选取测量频率范围为300GHz~340GHz，参考样品的厚度为3mm，折射率为3.4，吸收系数为0。测量样品为一组，其厚度为3mm，折射率为3.4，吸收系数从0到0.72 cm<sup>-1</sup>，以0.06 cm<sup>-1</sup>为间隔。假设太赫兹波源的功率完全稳定，只考虑波源频率存在着±100 MHz (近测量频率点的万分之三)的漂移。根据公式(3)与公式(5)所示进行模拟，仿真结果如图3与图4所示，由图可知单、双路透射测量系统在波长相长点时，测量的灵敏度为最大，但存在着频率漂移的情况下，相消点相对于其他测量点要稳定很多，所以相长点与相消点为透射测量的最佳测量频率点。而实际测量时，样品的相关参数是不可知的，测量的频率也是不加选择的，所以需要在整体测量范围内来考虑测量的

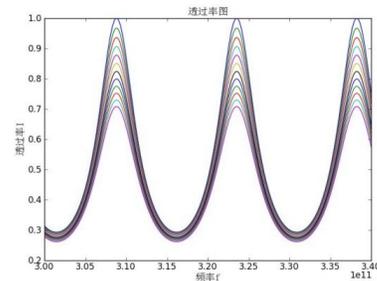


图3 吸收系数从0-0.72 cm<sup>-1</sup>的单路透射谱

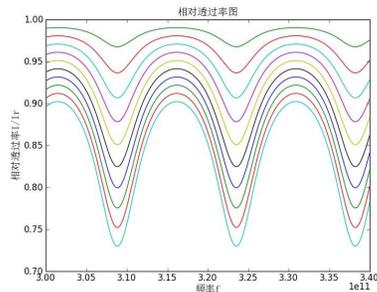
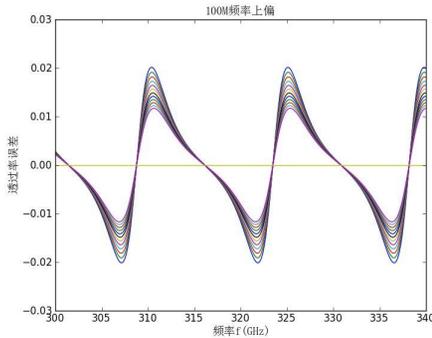


图4 吸收系数从0-0.72 cm<sup>-1</sup>的双路透射谱

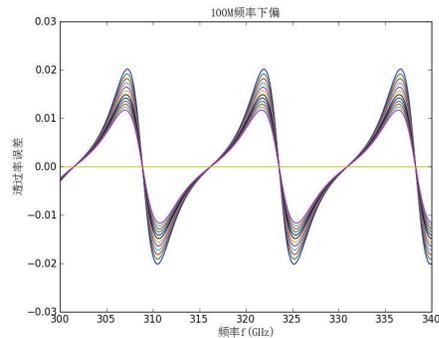
误差。

文中的测量误差定义为：真实的透射测量值减去频率漂移后的透射测量值。通过模拟仿真波源频率上(+)、下漂移(-)100 MHz时，从单路透射测量误差谱（如图5所示）与双路透射测量误差谱（如图6所示），可以看出不管是单路还是双路透射系统，它们的误差都是呈周期性出现的，引起这个周期性

的根本原因是公式（3）与公式（5）中包含了余弦函数。在300 MHz~340 MHz测量频率范围内，单路透射测量系统的最大测量误差高达近2%，而双路透射测量系统的测量误差能有效地控制在5‰以内。取最大测量误差作为透射测量系统的测量误差，可知双路透射测量系统比单路透射测量系统的测量精度提高了近4倍，大大地减少了由于测量频

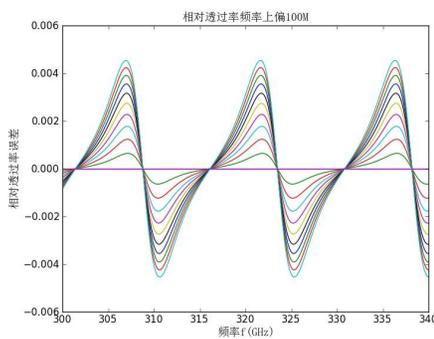


(a) 频率上偏100MHz的单路透射测量误差谱

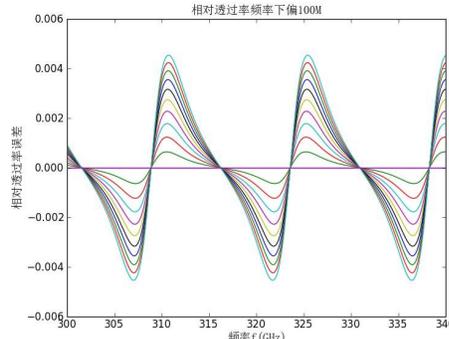


(b) 频率下偏100MHz的单路透射测量误差谱

图5 频率漂移±100MHz的单路透射测量误差谱



(a) 频率上偏100MHz的双路透射测量误差谱



(b) 频率下偏100MHz的双路透射测量误差谱

图6 频率漂移±100MHz的双路透射测量误差谱

率漂移所带来的测量误差。

在实际测量中，选取的参考样品具有一定的吸收系数，参考样品的选择会影响测量的精度。文中假设频率在漂移±100 MHz时，取吸收系数（0 cm<sup>-1</sup>到0.78 cm<sup>-1</sup>，间隔为1 cm<sup>-1</sup>）为横坐标，双路透射测量的最大绝对误差为纵坐标，它们之间的关系如图7所示。由图7可知双路透射测量的最大绝对误差最小时，对应的参考样品的吸收系数为0.27 cm<sup>-1</sup>时。文中选取参考样品的吸收系数为0.27 cm<sup>-1</sup>时，双路透射测量误差谱如图8所示，与图6相比较，可以看出测量的精度提高了2‰。在实际测量中需要高精度测量的话，需要建立参考样品的标准库，

然后合理地选取参考样品，这样可以有效地提高测

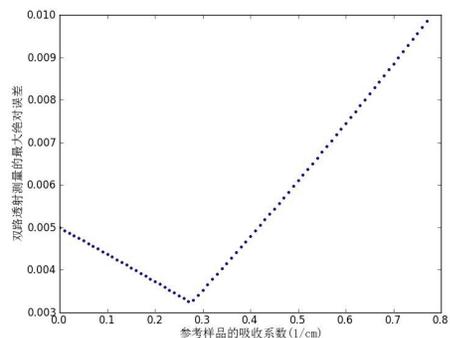
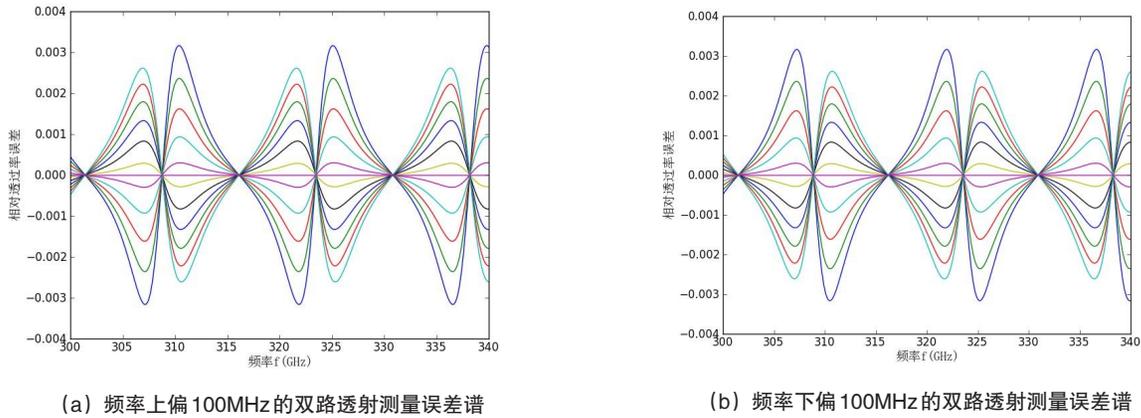


图7 参考样品的吸收系数与双路透射测量的绝对误差值的关系

图8 频率漂移  $\pm 100$  MHz 的双路透射测量误差谱

量的精度。

#### 4 结论

通过搭建具体参考样品的双路透射测量系统,用理论推导分析了F-P效应,从理论上证明了双路透射系统可以消除波源功率波动所导致的测量误差。模拟波源频率漂移 $\pm 100$  MHz时,单、双路透

射测量系统所带来的测量误差,实验结果证明了双路透射系统可以有效地减少波源频率漂移所带来的测量误差。文中还对参考样品的选取进行了分析,选择合适的参考样品,可以在一定程度上提高测量的精度,所以在实际应用中要合理地选择参考样品。此测量系统的搭建方法同样可以应用到其他光波段的透射测量中。

#### 参考文献:

- [1] 贾刚,汪力,张希成.太赫兹波 (TeraHertz) 科学技术[M].北京:中国科学基金, 2002:200-203.
- [2] 王鹤,赵国忠.几种塑料的太赫兹光谱检测[J].光子学报, 2010,39(7):1185-1188.
- [3] 许欣,吴勋,孟宪君,等.太赫兹技术在爆炸物检测中的应用[J].光学技术, 2008,34(S1):265-269.
- [4] 李九生.太赫兹波频域的GaAs材料特性[J].光谱学与光谱分析, 2009,29(3):577-579.
- [5] 刘建丰,周庆莉,张存林,等.基底对亚波长金属双环结构太赫兹透射性质的影响[J].物理学报, 2012,61(4):470-478.
- [6] 李雅卓,尚艳丽,陈海滨,等.基于返波振荡器的光学材料参数高精度测量[J].光子学报, 2009,38(11):2909-2912.
- [7] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007,1(2):97-105.
- [8] Ogawa Y, Cheng L, Hayashi S I, et al. Attenuated total reflection spectra of aqueous glycine in the terahertz region[J].IEICE Electronics Express, 2009,6(2):117-121.

(责任编辑:潘修强)