

# 二维透射式 Terahertz 波时域谱成像研究\*

席再军 肖体乔 张增艳 余笑寒 陈敏 徐洪杰

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

**摘要** 通过 THz(Terahertz)波的相位信息和振幅信息来解析出样品某些可用于成像的参量;并且对 THz 波相位信息成像和振幅信息成像进行了比较. 结果显示:当样品对 THz 波的吸收比较小时,利用 THz 波的相位信息进行成像比通过振幅信息进行成像质量要好一些;时域谱峰值位置的漂移会对相位信息成像产生较大的影响. 实验中发现输出光谱中出现了劈裂现象,即由输入的单峰变成了双峰. 分析表明,这一现象是由样品内部厚度或折射率突变导致的,该现象可用于 THz 波轮廓成像研究.

**关键词** Terahertz 波;透射成像;相位信息成像;振幅信息成像

**中图分类号** O443 **文献标识码** A

## 0 引言

自从 Hu 和 Nuss<sup>[1]</sup>于 1995 年首次在 200 GHz ~ 2 THz 频率范围内成功地实现成像以来,THz 波成像技术已经得到蓬勃的发展. 从一般的二维成像技术<sup>[2]</sup>到三维成像技术<sup>[3,4]</sup>(例如 THz CT 等),从透射式到反射式成像技术<sup>[5~7]</sup>,还有近场成像技术<sup>[8,9]</sup>,暗场成像技术<sup>[10]</sup>,连续 THz 波成像技术<sup>[11]</sup>等方面都有很大的进展. 在国内,关于 THz 产生机理已有报道<sup>[12,13]</sup>. THz 波成像技术的应用也非常广泛,在生物,医学,材料,化学等方面都有广阔的应用前景.

THz 波通过样品后,携带了样品一些参量(包括厚度,折射率等)信息;同时,THz 波通过样品前后的振幅和相位会发生很大的变化,THz 波成像技术就是通过 THz 波振幅和相位的变化来解析出样品相关参量进行成像. 对于一般的二维透射式成像技术,仅通过振幅或相位的信息就能够解析出样品的某一参量从而成像. THz 波时域谱同时包含了样品的位相和振幅信息,由此可以方便地解析出样品的参量.

本文首先对通过 THz 波的相位信息和振幅信息来解析出样品的某些成像参量进行了研究;然后比较了 THz 波的相位信息成像和振幅信息成像的结果;最后对光谱中出现的双峰值现象进行了分析.

## 1 原理和方法

一般用复折射率  $n'$  来描述介质的宏观光学性质

$$n' = n - jk \quad (1)$$

式中  $n$  为实折射率,描述介质的色散情况; $j$  表示虚部, $k$  为消光系数,描述介质的吸收特性. 一般情况下,它们都是光波频率的函数,而消光系数  $k$  和吸收系数  $a$  之间又有如下关系(其中  $\omega$  为频率, $c$  光速)

$$a = 2\omega k / c \quad (2)$$

一束 THz 光通过样品后相位和振幅的变化时,如图 1,  $E_{in}(\omega)$  为输入光束,  $E_{out}(\omega)$  为输出光束;由菲涅耳公式<sup>[14]</sup>可以得到电磁波与物质相互作用时振幅变化的透射系数,在复数域内透射系数与样品的复折射率有关. 设从空气到样品的透射系数为  $t_0$ ,从样品到空气的透射系数为  $t_1$ . 在实际二维透射式 THz 波成像处理中,一般是垂直入射,而且也不考虑光束在样品内的二次和多次反射.

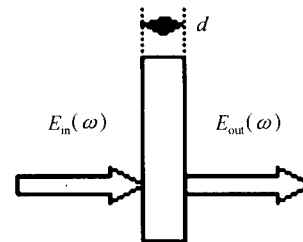


图 1 THz 波透过样品示意  
Fig. 1 The sketch map of THz wave traversing the sample

设样品的厚度为  $d$ ,则由于 THz 波在样品中传播产生的相位差可以表示为

$$\Phi(\omega, d) = n'(\omega)\omega d / c \quad (3)$$

因此可以得到

$$E_{out}(\omega) = t_0 t_1 \exp[-j\Phi(\omega, d)] \times E_{in}(\omega) \quad (4)$$

将式(1)~(3)代入式(4)可以得到

$$E_{out}(\omega) = t_0 t_1 \exp(-ad/2) \exp(-jn\omega d/c) E_{in}(\omega) \quad (5)$$

由于在 THz 波段频率对实折射率的影响较小,因此在数值计算的时候,一般不考虑色散,并假定样品的实折射率  $n$  与频率无关.

\* 中科院上海应用物理研究所创新前沿项目资助  
Tel: 021-59554351 Email: xizaijun@sinap.ac.cn  
收稿日期: 2005-06-01

实验中,探测到的是时域信号,而且信号中的相位信息体现在延迟时间上,图2为 THz 电磁辐射脉冲的时域波形。

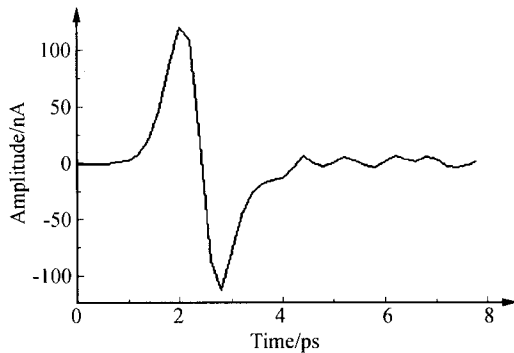


图2 THz 电磁辐射脉冲的时域波形  
Fig. 2 The time domain signal of THz electromagnetic radiation pulse

实验时,可以首先测出不放样品时的波形作为参考信号,然后再测出放样品时的波形.比较两次波形的峰值位置,发现样品波形相对参考波形有一个时间延迟,这个时间延迟就是样品的厚度和实折射率导致的位相延迟引起的.当不考虑样品的色散时,从式(5)可以发现波形延迟时间  $\Delta\tau$  与  $d, n$  近似有如下关系(空气的折射率取为 1.0)

$$\Delta\tau = \frac{(n-1)d}{c} \quad (6)$$

对样品进行二维扫描,可以得到样品每个部位的波形相对于参考波的时间延迟  $\Delta\tau$ ,实际处理时,一般比较样品波形峰值与参考波形峰值的位置.从式(6)可知,由  $\Delta\tau$  值可以得到样品各部位厚度或实折射率的关系.需要注意的是:放样品和不放样品时取样点的起始位置要相同.在一次二维扫描和数据处理完成后,可以得到样品某参量的空间分布,根据此参量就可以得到一个二维图像.如果当样品的实折射率和厚度都未知,可以直接由波形延迟时间  $\Delta\tau$  为参量成像。

从式(5)可以看出,从振幅信息  $t_0 t_1 \exp(-ad/2)$  中也能得到样品的参量,但由于透射系数  $t_0$  和  $t_1$  都与样品的复折射率有关,因此从振幅信息中提取样品的参量与从相位信息中提取样品的参量相比,要更复杂一些.为简单起见,一般振幅信息成像是以样品波形的峰值强度为参量成像的。

## 2 实验装置

实验装置如图3.用锁模钛蓝宝石激光器,产生的飞秒光束中心波长为 805 nm,脉宽小于 100 fs,重复频率为 80 MHz;BS 为分束镜;THz 光的发射是采用光导开关方式,探测采用电光探测技术,探测晶体是〈110〉取向的 ZnTe 晶体.信号由平衡二极管进

行平衡探测,然后通过锁相放大器放大后输入到计算机.实验得到的数据在 VC++ 平台上处理,最后在计算机上输出样品关于某参量成像的图形。

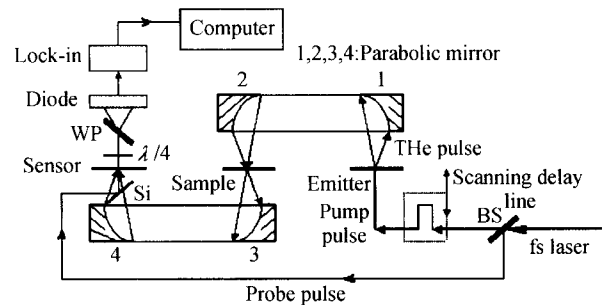


图3 实验装置  
Fig. 3 The figure of the experiment equipment

## 3 实验结果和分析

对图2中的时域波形进行快速傅里叶变换,可以得到波形的振幅谱,通过振幅谱可以比较样品对 THz 波吸收的大小。

图4是空气,0.8 mm 厚的聚乙烯材料(PE)和 0.3 mm 厚的云母片的振幅谱.实验条件为激光器的输出功率为 0.54 W,中心波长为 805 nm;探测光束强度(已转换为电信号)为 300  $\mu$ A,时间延迟参量为 150 ms,单位取样时间为 0.2 ps,环境温度为 21  $^{\circ}$ C,在实验过程中没有充氮气,空气湿度为 40%。

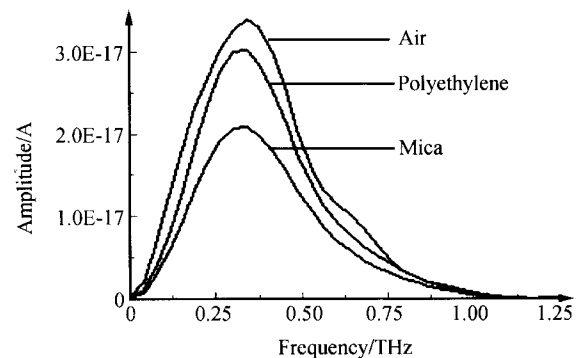


图4 空气、PE 和云母的振幅谱  
Fig. 4 The amplitude spectra of air, polyethylene and mica

从谱中可以发现:尽管实验中 PE 材料的厚度比云母片大,但 PE 材料对 THz 波的吸收比较小,而云母材料对 THz 波的吸收比 PE 材料要大很多,可见 PE 材料对 THz 波的吸收系数很小。

然后比较 PE 材料和云母材料分别根据相位信息成像和振幅信息成像的结果.其中相位信息成像是以材料厚度为参量成像,而振幅信息成像是以光谱的峰值强度为参量成像.图5为 PE 材料根据相位信息和振幅信息成像的结果,样品是在一块方形的 PE 材料上刻了“HT”两个字母,刻的笔画深度不均匀,笔画外部较宽,较浅,内部较细,较深.样品大

小为  $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ , 厚度为  $0.8\text{ mm}$ , 扫描步长为  $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ ; 其余实验参量同上. 从图中看出, (a) 图结果比 (b) 图更清晰一些, 字母的轮廓清晰可见, 而且字母边缘的灰度值还有一定的梯度, 这是由于笔画不均匀而形成的轮廓. 而 (b) 图中字母的轮廓不太清晰, 字母边缘的灰度值也没有梯度.

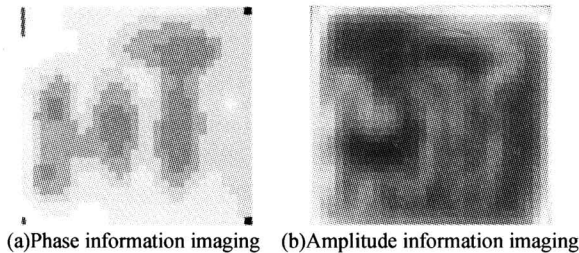


图 5 PE 材料成像结果

Fig. 5 The imaging results of polyethylene

图 6 为云母材料分别根据相位信息和振幅信息成像的结果, 样品同样是在一块方形的云母材料上刻了“HT”两个字母, 刻的方法和 PE 材料一样. 样品的大小为  $13.5\text{ mm} \times 13.5\text{ mm}$ , 厚度为  $0.3\text{ mm}$ , 扫描步长为  $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ ; 其余实验参量同上. 从图中可以发现用二种方法成像的结果都比较清晰, 轮廓都比较分明, 相对来说振幅信息成像结果的层次感更好一些. 在图中字母“T”左边轮廓不太清晰, 是样品本身的一点缺陷所致.

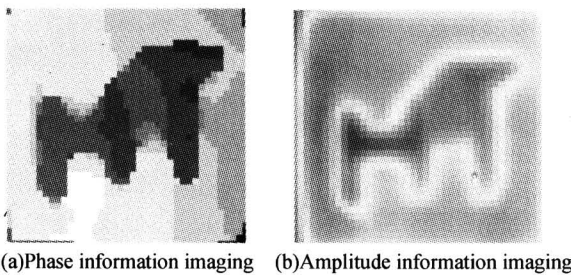


图 6 云母材料成像的结果

Fig. 6 The imaging results of mica

成像的空间分辨率受衍射极限的限制, 而 THz 波的波长比较大, 因此一般点扫描式 THz 波成像空间分辨率比较低. 此系统的空间分辨率大约为  $1.5\text{ mm}$ .

从这两种样品的实验结果可以发现, 对 THz 波吸收比较小的样品, 利用相位信息成像的结果要好一些; 而对 THz 波吸收比较强的样品, 利用两种方法成像的结果差不多; 但是实验误差的影响对相位信息成像结果的影响更大. 因为扫描完一个样品需要花的时间很长, 可能要十几个小时甚至更多. 因此在实验中由于激光器功率的略微不稳定会导致信号的稍微波动. 另外, 在扫描开始和结束时, 取样点的起始位置会漂移大约  $2 \sim 3$  个单位取样时间, 大约有  $0.4 \sim 0.6\text{ ps}$ , 即  $\Delta\tau$  的取值会有  $0.4 \sim 0.6\text{ ps}$  的误差, 这对振幅信息成像影响比较小, 但对相位信息成

像影响很大. 在图 6(a) 中, 理论背景的灰度值应该一致, 但是实际上图像背景从左到右由白逐渐变黑, 这就是在扫描过程中峰值位置不断漂移的结果.

在图 5 样品的扫描过程中, 在样品和空气交界处采集到比较特别的光谱, 如图 7. 在这个光谱里面有双峰值结构, 经具体分析应该是以下原因产生, 由于扫描的 THz 光束直径比较大 (大约  $1.4\text{ mm}$ ), 当光束扫描到样品的边缘时, THz 光斑一部分在样品上, 一部分在空气中, 这样光斑被分成了两部分. 由于样品和空气折射率的差异, 这两部分光斑不在同一时间到达探测器, 最后导致在这个扫描点上采集到的光谱在时域上有两个峰值. 在图 7 中, 两个峰值位置的时间差大约是  $1.4\text{ ps}$ , 而 PE 材料的实折射率大约是  $1.51$ , 样品最边缘的厚度为  $0.8\text{ mm}$ , 这些数据代入式 (6) 比较好地吻合. 推而广之, 当 THz 光扫描到厚度和折射率突变的地方时, 都有可能出现双峰值光谱的现象. 双峰值的现象对成像结果有一定影响, 因为在此扫描点上采集到的数据可能会有一些误差.

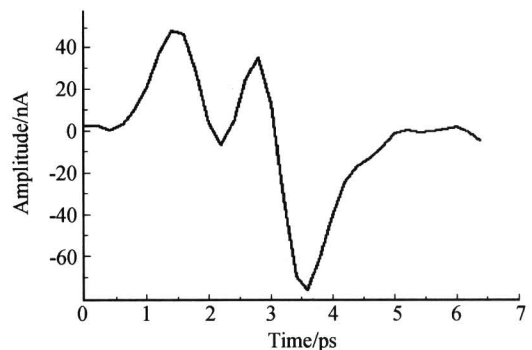


图 7 样品和空气交界处的光谱

Fig. 7 The spectrum of the the borderline of sample and air

## 4 结论

在二维透射式 THz 波时域谱成像方法中, 利用相位信息成像和振幅信息成像各有特点. 当样品对 THz 波的吸收比较小时, 利用相位信息进行成像比通过振幅信息进行成像质量要好一些. 由于时域谱峰值漂移的影响, 对于较强吸收的样品, 振幅信息成像的结果可能会更好一些. 在扫描到样品的边缘时, 光谱可能会产生双峰现象, 这对成像结果有一定影响, 但也可能利用这一特点发展 THz 波轮廓成像技术.

时域谱峰值漂移对成像结果的影响可以从两个方面来解决: 一是改进仪器的稳定性, 使扫描过程中所有时域谱的取样点初始位置都相同; 二是采用图像处理的办法, 使图像的背景一致. 由于采用点扫描的方式需要很长的时间 (大约几小时甚至  $20\text{ h}$ )

才能完成一个样品的扫描,因此会造成激光器长时间工作时输出的不稳定,而且会造成取样起始点的漂移,这些对最后的成像都会产生一定的影响.为了避免这些情况,就要求大大缩短扫描时间.下一个目标是改进装置,如采用渐开线轮廓反射镜的办法来提高扫描速度.

#### 参考文献

- Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves. *Optics Letters*, 1995, **20**(16): 1716~1768
- Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A. Progress towards two-dimensional biomedical imaging with THz spectroscopy. *Phys Med Biol*, 2002, **47**(21): 3841~3846
- Ferguson B, Wang S H, Gray D, et al. Towards functional 3D T-ray imaging. *Phys Med Biol*, 2002, **47**(21): 3735~3742
- Wang S, Zhang X C. Pulsed terahertz tomography. *J Phys D: Appl Phys*, 2004, **37**(4): R1~R36
- Woodward R M, Cole B E, Wallace V P. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer skin tissue. *Phys Med Biol*, 2002, **47**(21): 3853~3863
- Dorney T D, Johnson J L, Rudd J V, et al. Terahertz reflection imaging using kirchhoff migration. *Optics Letters*, 2001, **26**(9): 1513~1515
- Dorney T D, Symes W W, Baraniuk R G, et al. Terahertz multistatic reflection imaging. *J Opt Soc Am A*, 2002, **19**(7): 1432~1442
- Hunsche S, Moch M, Brener I. THz near-field imaging. *Optics Communications*, 1998, **150**(1): 22~26
- Chen Q, Jiang Z P, Xu G X. Near-field terahertz imaging with a dynamic aperture. *Optics Letters*, 2000, **25**(15): 1122~1124
- Löffler T, Bauer T, Siebert K J. Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue. *Optics Express*, 2001, **9**(12): 616~621
- Siebert K J, Löffler T, Quast H, et al. All-optoelectronic continuous wave THz imaging for biomedical applications. *Phys Med Biol*, 2002, **47**(21): 3743~3748
- 薛挺, 华勇, 杨德伟, 等. 周期极化铌酸锂 THz 波产生理论分析. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1180~1186  
Xue T, Hua Y, Yang D W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1180~1186
- 陈敏, 肖体乔, 徐洪杰. 超宽频带 THz 脉冲在随机散射介质中传播的理论研究. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1483~1486  
Chen M, Xiao T Q, Xu H J. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1483~1486
- M. 玻恩, E. 沃耳. 光学原理. 第五版. 北京: 科学出版社, 1978. 62~63  
Max Born and Emil Wolf. *Principles of optics*. The fifth edition. Beijing: Science Press, 1978. 62~63

## Investigation on Two-dimensional Transmission Imaging with Terahertz Wave by Time Domain Spectroscopy

Xi Zaijun, Xiao Tiqiao, Zhang Zengyan, Yu Xiaohan, Chen Min, Xu Hongjie  
Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2005-06-01

**Abstract** Terahertz (THz) time domain spectroscopy includes abundant information about the sample, so the image for the structure of the sample can be reconstructed. How to resolve some sample parameters and reconstruct image using phase information and amplitude information of THz wave is investigated. A comparison between phase imaging and amplitude imaging is carried out. The results show: the quality of phase imaging is better than the quality of amplitude imaging if the absorbing of the sample is small; the excursion of the peak brings some effect on phase imaging. The splitting phenomenon of output spectroscopy is found in the experiments, namely THz time domain spectroscopy changes from one peak to two peaks. The analysis shows that this phenomenon results from abrupt change of the thickness or refractive index. This phenomenon can be used to study outline imaging in THz field.

**Keywords** Terahertz wave; Transmission imaging; Phase imaging; Amplitude imaging

**Xi Zaijun** was born in 1979. He is a Ph. D. candidate in Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences. His present research interests include T-ray imaging and solid state laser technology.

