

文章编号: 0258-7025(2006)09-1225-05

太赫兹波传播过程中横模分布的成像

孙红起, 赵国忠, 田艳, 贾新峰, 王洋, 石小溪, 梁卫华

(首都师范大学物理系, 北京 100037)

摘要 研究了焦点位置附近太赫兹波的横模分布, 目的在于了解系统中太赫兹波的横向分布情况, 为进行太赫兹光谱和成像实验提供依据。通过太赫兹波逐点扫描成像, 对经常被用来放置测试样品位置附近的太赫兹波横模分布情况进行了定性的分析。利用“狭缝法”测量了太赫兹光束的束宽。结果表明, 太赫兹波在焦点附近不同位置的横向分布有较大差异, 在焦点处对应于最长波长1.5 mm的最小光斑直径约为1.0 mm, 这说明太赫兹波的聚焦有一定的限度。实验确定了系统中放置样品的最佳位置, 对开展太赫兹光谱和成像研究有参考价值。

关键词 光谱学; 太赫兹波; 横模分布; 狭缝法; 太赫兹成像技术

中图分类号 O 431.1; O 433.2 **文献标识码** A

Transverse Mode Distribution of THz Wave by THz Imaging Technology

SUN Hong-qi, ZHAO Guo-zhong, TIAN Yan,

JIA Xin-feng, WANG Yang, SHI Xiao-xi, LIANG Wei-hua

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract The transverse mode distribution of THz wave near the position of focus point was studied in this paper. It is important to know the transverse distribution of THz wave, which can be referenced as an evidence of sample positioning in THz spectroscopy and THz imaging experiments. By using THz point-by-point imaging technology, THz transverse mode distribution in the positions, where samples are usually placed, is analyzed qualitatively. By applying “slit method”, the beam width of THz wave was measured. The results show that the shapes of the transverse modes of THz wave in different positions around the focus have much difference. To the maximum wavelength of about 1.5 mm of THz wave in the system, the minimum diameter of THz beam at the focus point is around 1.0 mm. The results provide a basic reference for further application of THz Spectroscopy and THz Imaging.

Key words spectroscopy; THz wave; transverse mode distribution; slit method; THz imaging technology

1 引言

太赫兹(THz)辐射已经越来越受关注, 由于其频率在0.1~10 THz(波长在0.03~3 mm)之间, 波长介于红外和微波之间, 光子能量只有几毫电子伏特, 使得太赫兹成像这种无损探测的新方法被寄予

厚望。利用太赫兹辐射得到的物质的太赫兹谱, 包含了丰富的物理和化学信息, 对于研究物质的结构和特性有很大的价值^[1,2]。同时太赫兹技术在生物学^[3,4]、医学、微电子学、农业^[5]、工业、航天^[6]及军事^[7]领域都体现出了巨大的应用价值。世界上许多研究机构都已展开了对太赫兹波的深入研究, 但对

收稿日期: 2006-01-24; 收到修改稿日期: 2006-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(10390160, 10474067)和北京市教委科技发展计划面上项目基金(KM200510028003)资助项目。

作者简介: 孙红起(1980—), 男, 河北衡水人, 首都师范大学硕士研究生, 主要从事太赫兹波的产生和探测及其在半导体方面应用的研究。E-mail: shqcnu@126.com

导师简介: 赵国忠(1964—), 男, 内蒙古人, 首都师范大学教授, 主要从事太赫兹光谱与成像、光电功能材料和光电子学等方面的研究。E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn

于太赫兹波在传播过程中横模分布情况的研究还很少。激光的横模分布情况,从实验中很容易观察到,通过调整谐振腔,就会在激光照射到的屏上出现 TEM_{00} , TEM_{10} , TEM_{01} , TEM_{11} , TEM_{20} , TEM_{02} 等模式。但因为太赫兹辐射无法用肉眼直接观察到,且目前还没有只对太赫兹波段感光的胶片,所以无法直接得到太赫兹波横模的具体分布情况。本文将利用太赫兹成像技术,对经常被用来放置测试样品位置附近的横模分布情况进行定性的分析,得到太赫兹波的横模分布图像。并同时利用“狭缝法”^[8],根据国际测量标准测得太赫兹波横模的大小。

2 实验装置

目前世界上比较流行的利用飞秒激光激发半导体产生太赫兹电磁波的光路有两种,一种是反射式的^[9],另一种是透射式的。前一种是靠飞秒激光激发半导体表面发射来产生太赫兹波^[10,11],后一种是利用光导激发机制或光整流方法来产生太赫兹波^[12]。本文测得的是首都师范大学物理系太赫兹实验室中反射式光路所产生的太赫兹波在 PM_3 , PM_2 两抛物镜的公共焦点附近的横模分布情况,反射式光谱系统光路如图1所示。

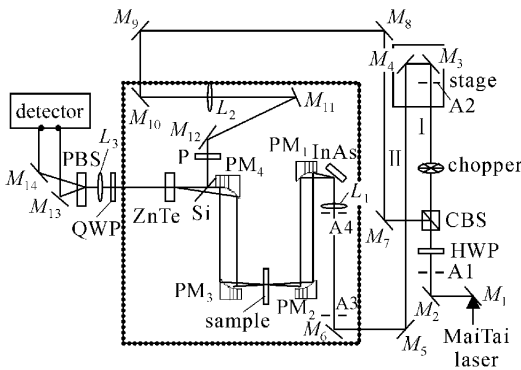


图1 反射式光谱系统实验装置图

$M_1 \sim M_{14}$: 平面反射镜; CBS: 分束镜; $PM_1 \sim PM_4$: 抛物面镜; PBS: 偏振分束镜; HWP: 半波片; QWP: 1/4 波片; L: 透镜; Si: 硅片; Stage: 电动平移

Fig. 1 Schematic diagram of reflection-type spectrum system

$M_1 \sim M_{14}$: reflective mirrors; CBS: beam split; $PM_1 \sim PM_4$: parabolic mirrors; PBS: polarized beam splitter; HWP: 1/2 plate; QWP: 1/4 plate; L: convex lens

本实验室所使用的飞秒激光器是由光谱物理公司生产的钛宝石飞秒脉冲激光器,其重复频率为82 MHz,中心波长为810 nm,脉宽为100 fs,平均功

率为980 mW。由钛宝石激光器(MaiTai Laser)发出的飞秒脉冲经分束镜(CBS)分为I和II两束,半波片(HWP)可以调节两束光的能量分配,光束I作为抽运光,经频率为1.1 kHz的斩波器(Chopper)斩波再通过时间延迟后,以 45° 角入射到p型<100>砷化镓(InAs)晶体上,激光脉冲激发InAs产生光生载流子,通过载流子在半导体表面耗尽层电场中的加速运动而辐射出频率范围约为0.2~3 THz(波长范围为0.1~1.5 mm)的脉冲。光束II为探测光束,它通过与抽运光同样的光程后,由电光晶体对太赫兹电场进行取样。InAs晶体上产生太赫兹辐射的位置正好处于抛物镜 PM_1 的焦点处,因此太赫兹电磁波经抛物镜 PM_1 准直后在 PM_1 与 PM_2 之间为平行光束,太赫兹波经 PM_2 会聚于焦点后又传至 PM_3 上,按图1光路直至照射到电光晶体(ZnTe)上。 PM_2 , PM_3 两抛物镜间距的中点,也即其公共焦点处是通常放置样品的位置,测物质的太赫兹谱或是对样品进行太赫兹成像,一般都将样品放在此位置,足见此位置附近的太赫兹波横模形状及其大小的重要性。本文将对此位置附近的太赫兹波横模分布情况进行研究。该实验是在室温(大约 20°C),湿度为30%左右的空气环境中进行的。

3 实验原理及结果

3.1 实验原理

将三维电动平移台固定于 PM_2 和 PM_3 两抛物镜的公共焦点附近,然后将自制的小孔固定在电动平移台上,利用电动平移台移动小孔,小孔的位置不同,通过小孔的太赫兹波的横模部分也就不同,这样就可以把太赫兹波横模不同部分的信息(包括振幅和相位)记录下来,然后进行数据处理,就能得到太赫兹波横模分布的图像。用不同边长的正方形小孔和不同直径的圆孔分别进行了成像实验,发现孔的形状对所成像的形状基本没有影响,但孔的大小对所成像的大小有较大影响,这是由太赫兹波的衍射效应所致,适当调整小孔的大小,可以消除衍射效应的影响。通过与“狭缝法”得到的横模大小的结果进行比较,选择了边长为1 mm的正方形小孔进行成像实验。图2是用剃须刀片做成的边长为1 mm的正方形小孔。

采用“狭缝法”^[8]来精确测量横模大小,将自制的狭缝固定在电动平移台上,利用电动平移台分别在x,y方向移动狭缝,缝的位置不同,就把太赫兹波

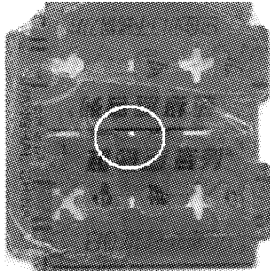


图 2 边长为 1 mm 的孔

Fig. 2 Aperture with the side length of 1 mm

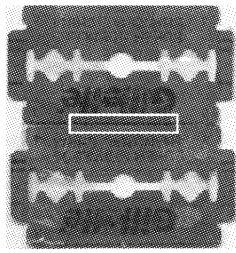


图 3 缝宽为 0.1 mm 的缝

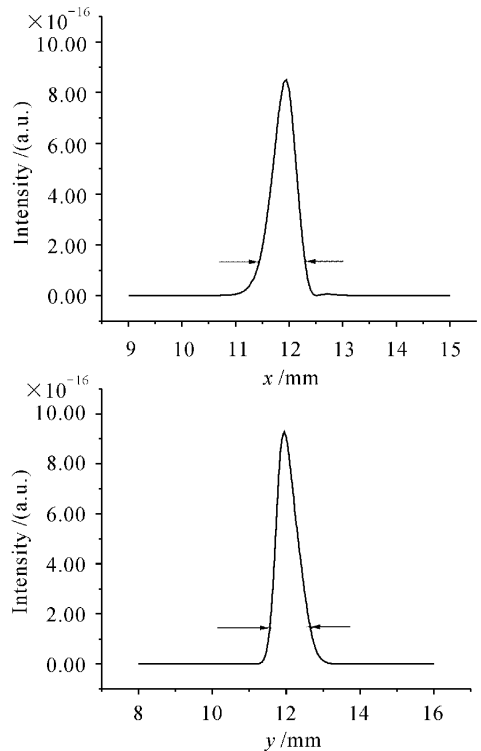
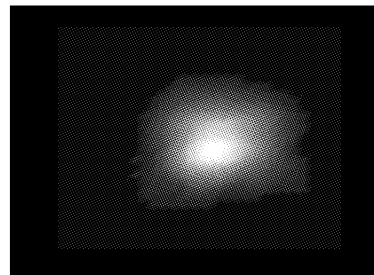
Fig. 3 Slit with the width of 0.1 mm

横模不同部分通过狭缝的信息(包括振幅和相位)记录了下来,然后进行数据处理,就得到太赫兹波在 x, y 方向分布的曲线了。根据国际测量标准规定,为了避免缝的卷积修正,缝的宽度应约为光束宽度的 $1/20$,光束宽度取强度为最大值 13.5% 的两点之间的距离^[8],从而测得太赫兹波的横模大小。考虑到成像所得的横模大小和缝的透过率,我们选择了缝宽为 0.1 mm 的狭缝,其中也用到了实验中的经验值,焦点附近太赫兹波的光斑直径在 $1\sim 3\text{ mm}$ 之间。图 3 为用剃须刀片做成的宽度为 0.1 mm 的缝。

3.2 实验结果

图 1 实验装置中,抛物镜 PM_3 的前沿与抛物镜 PM_2 的后沿间的距离为 13.6 cm ,一般认为在距 PM_2 为 6.8 cm 处也即 PM_2, PM_3 的公共焦点处太赫兹光束最小,但实验结果表明,在 6.8 cm 处所成的像并不是最小的,且通过成像得到的横模形状也可以看出此处不是进行实验的最好位置。为此在 PM_3, PM_2 两抛物镜公共焦点附近的多个位置进行了成像,得到了太赫兹波横模分布的图像。同样,在 PM_2, PM_3 两抛物镜的公共焦点附近的多个位置,利用“狭缝法”测得了太赫兹波在这些位置的横模大小。结果显示,在距 PM_3 抛物镜 5.8 cm 处,所得光斑最接近于圆,光斑半径也较小。图 4 是“狭缝法”所得到的太赫兹波横模分别在 x (水平)和 y (竖直)方向的分布曲线,图 5 是在距抛物镜 PM_3 5.8 cm

处,通过成像所得到的太赫兹波的横模图像。从图 5 可以看出,在此位置太赫兹波的横模形状已经非常接近于激光中的基模了,并且可直接看出光斑为高斯斑,“中间亮,两边暗”。图 4 的太赫兹波横向分布曲线也可以证明,太赫兹波的横向分布为高斯型。根据国际测量标准对光束宽度的定义,得到了横模大小为 $\Delta x = 0.90\text{ mm}, \Delta y = 1.12\text{ mm}$,在此位置进行实验比较理想。

图 4 距抛物镜 PM_3 5.8 cm 处太赫兹波的横向分布曲线Fig. 4 Transverse distribution curves of THz beam at 5.8 cm away from PM_3 图 5 距抛物镜 PM_3 5.8 cm 处的成像Fig. 5 Imaging at 5.8 cm away from PM_3

PM_3 和 PM_2 的公共焦点也即距抛物镜 PM_3 6.8 cm 处,是经常被用来进行实验的位置,其横模图像如图 6 所示,通过“狭缝法”测得其大小为 $\Delta x = 2.35\text{ mm}, \Delta y = 2.11\text{ mm}$,如图 7 所示。此处光

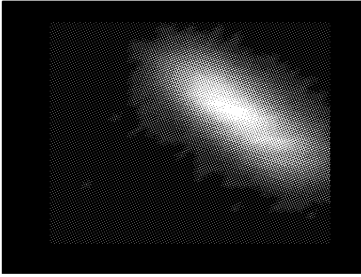


图 6 距抛物镜 PM_3 6.8 cm 处的成像
Fig. 6 Imaging at 6.8 cm away from PM_3

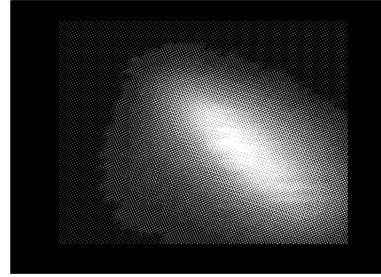


图 9 距抛物镜 PM_3 7.4 cm 处的成像
Fig. 9 Imaging at 7.4 cm away from PM_3

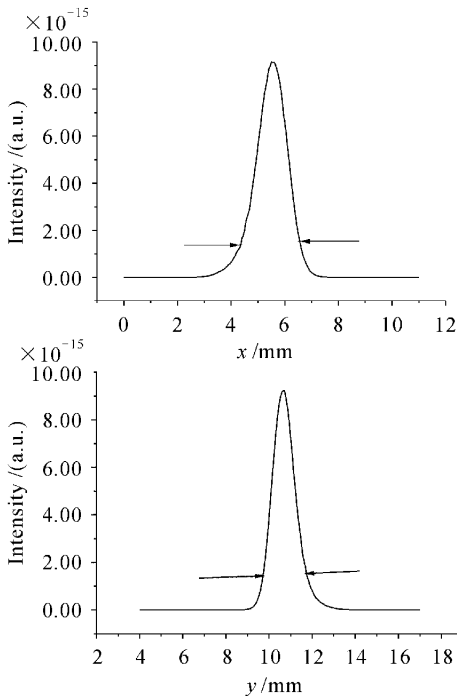


图 7 距抛物镜 PM_3 6.8 cm 处太赫兹波的横向分布曲线
Fig. 7 Transverse distribution curves of THz beam at 6.8 cm away from PM_3

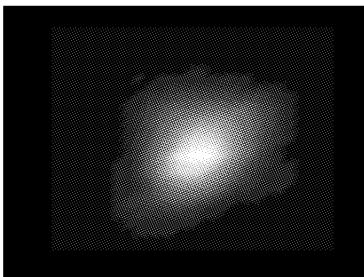


图 8 距抛物镜 PM_3 5.5 cm 处的成像
Fig. 8 Imaging at 5.5 cm away from PM_3

斑不是我们所希望的实验光斑。在其他位置所成的像或是接近于圆形光斑但半径较大,如图 8 所示;或是为扁长椭圆形,如图 9 所示,都不是进行实验的最好位置。

上述实验结果表明,在太赫兹波的焦点位置附近,太赫兹电场的横模分布有很大的变化。由于实验光路与理想光路之间的差别,加之有关光学元件的不完善性,导致太赫兹波的焦点位置附近太赫兹电场的横模分布扭曲和变形,这直接影响到太赫兹光谱和成像实验的准确性。本实验确定了我们的实验装置中最佳的太赫兹波焦点位置,为有关实验研究提供了可靠的参照。

4 结 论

本文对实验装置中经常被用来进行光谱测量和成像的两抛物镜 PM_3 和 PM_2 之间的太赫兹光束的横模分布进行了研究。在某些位置横向分布较接近于圆形,在某些位置其分布为扁长椭圆形。从实验中得到,最理想的放置样品的位置在距抛物镜 PM_3 5.8 cm 处,此位置太赫兹波横向分布是直径约为 1.0 mm 的圆,而不是 PM_3 和 PM_2 的中点。光路不同,太赫兹的光斑大小、形状及其横向分布的最理想状态可能不同,但可以通过上面的方法,对具体的太赫兹光路中太赫兹波的横模分布加以确定,有利于实验中选择放置样品的位置及样品的大小。本研究对进一步的太赫兹光谱和成像实验具有参考价值。

参 考 文 献

- 1 Li Ning, Sheng Jingling, Sun Jinhai *et al.*. Study on the THz spectrum of methamphetamine [J]. *Opt. Express*, 2005, **13** (18): 6750~6755
- 2 Wang Weining, Yue Weiwei, Yan Haitao *et al.*. THz time-domain spectroscopy of amino acids [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(15): 1561~1565
- 3 Yue Weiwei, Wang Weining, Zhao Guozhong *et al.*. THz spectrum of aromatic amino acid [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(7): 3094~3100
岳伟伟,王卫宁,赵国忠等. 芳香族氨基酸的太赫兹光谱研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3094~3100
- 4 Xu Hui, Li Wenxin. Interaction between terahertz radiation and bimolecular [J]. *Nuclear Techniques*, 2004, **27**(7): 534~

- 540
徐 慧,李文新. 太赫兹辐射和生物分子的相互作用[J]. 核技术, 2004, **27**(7):534~540
- 5 Meihong Lu, Yan Zhang, Jinhai Sun *et al.*. Identification of maize seeds by terahertz scanning imaging [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(Suppl.):S239~S241
- 6 Xie Xu, Zhong Hua, Yuan Tao *et al.*. Terahertz imaging of defects in space shuttle foam insulation [J]. *Foreland and Evolve*, 2003, **32**(9):583~584
谢 旭,钟 华,袁 韬 等. 使用太赫兹技术研究航天飞机失事的原因[J]. 前沿进展, 2003, **32**(9):583~584
- 7 Lantao Guo, Liangliang Zhang, Xiaohong Wang *et al.*. Time-resolved terahertz spectroscopy of explosive materials [J]. *Chin. Opt., Lett.*, 2005, **3**(Suppl.):S1~S3
- 8 D. Wright, P. Greve, J. Fleischer *et al.*. Laser beam width divergence and beam propagation factor-an international standardization approach [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, **24**:S993~S1000
- 9 Sun Jinhai, Zhao Guozhong, Zhang Liangliang *et al.*. Effect of applied electric and magnetic field on THz radiation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):192~195
孙金海,赵国忠,张亮亮 等. 外加电场和磁场对太赫兹辐射产生的影响[J]. 中国激光, 2005, **32**(2):192~195
- 10 X.-C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow *et al.*. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(11):1011~1013
- 11 Ping Gu, Masahiko Tani, Shunsuke Kono *et al.*. Study of terahertz radiation from InAs and InSb [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(9):5533~5537
- 12 L. Xu, X. C. Zhang, D. H. Auston. Terahertz beam generation by femtosecond optical pulses in electro-optics materials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(15):1784~1786