

文章编号:1001-9014(2006)03-0217-04

太赫兹成像技术的实验研究

张振伟, 崔伟丽, 张岩, 张存林
(首都师范大学 物理系, 北京 100037)

摘要:建立了一套透射式逐点扫描太赫兹 (THz) 辐射成像装置, 它采用 $<100>$ -InAs 晶体作为高功率、宽频带的 THz 辐射源和高灵敏度、低噪声的电光取样差分探测方法, 具有对隐蔽在非透明电介质材料内物体成像的能力。并且, 系统能够获得成像物体上每一点的光谱数据, 可以对物体进行光谱成像。利用多种基于傅立叶变换的数据处理方法给出了葵花籽样品的透射图像, 并对其中的几种进行分析和对比。全面介绍透射式逐点扫描 THz 成像的关键技术, 包括成像装置、光束测量、数据处理和分析等几个方面, 对有效利用 THz 成像技术和开展 THz 成像领域的相关研究具有指导意义。

关键词:红外物理; 太赫兹; 太赫兹成像; 数据处理; 时域光谱

中图分类号:047 **文献标识码:**A

TERAHERTZ TIME-DOMAIN SPECTROSCOPY IMAGING

ZHANG Zhen-Wei, CUI Wei-Li, ZHANG Yang, ZHANG Cun-Lin
(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: A transmitted scanning terahertz imaging system, which has the $<100>$ -InAs emitter of high power, wide frequency spectrum and the detector of high sensitivity and low noise, is presented. It owns the capacity of detecting something that has been shielded by some opaque dielectric materials. Moreover, spectroscopy data at each point of the sample can be acquired by using this system. Using these data the spectroscopy images can be rebuilt. Lots of THz images of sunflower seed sample by using various data processing methods based on the Fourier transform spectroscopy are given and compared. In addition, the several important factors of the system, including setup, measure to the beam, data processing described in detail, which are very essential to further research and application.

Key words: infrared physics; THz; THz imaging; data processing; time-domain spectroscopy

引言

太赫兹 (THz) 辐射是从 0.1 到 10 THz 电磁辐射 (1THz 所对应的波长为 0.3 毫米), 位于电磁波谱中微波与红外波段之间。太赫兹成像技术是太赫兹科学与技术中最具应用前景的发展方向之一。自从 1995 年 Hu 和 Nuss 首次提出逐点扫描式 THz 时域光谱成像技术^[1]以来, 一系列新的 THz 成像技术相继被提出, 如 THz 实时成像^[2, 3]、THz 层析成像^[4]等等。逐点扫描系统通常存在数据获取时间较长的问题, 可以通过采用 CCD 器件作为探测器^[2]实现同时对整个物体的时域波形进行扫描 (数据格式: $S_{x,y} \times t$), 提高采集速度。更进一步, 采用啁啾脉冲探测的方法, 在理论上可以实现单脉冲成像^[3]。但是, 这两

种方法相对于扫描成像来说信噪比要低的多, 成像质量无法与后者相比。THz 成像技术的进一步发展需求高功率、便携式、可调谐的 THz 辐射源^[5-7]、宽频谱、高灵敏度、低噪声的探测器^[8]和快速、高效的数据处理方法, 已经有越来越多的研究小组致力于这些方面的探索和尝试。目前, THz 成像还是一项新兴的技术, 在国内更是刚刚起步, 因此对典型的 THz 逐点扫描成像系统的关键技术进行全面研究, 对深入探索和有效利用这一前沿技术具有指导意义。

下面介绍一套具有较高应用价值的透射式 THz 逐点扫描成像装置, 采用 $<100>$ -InAs 晶体作为高功率、宽频带的 THz 辐射源 (同等条件下比选用 GaAs 材料产生的 THz 射线功率高很多, 比传统的大孔径光导天线发射源产生的 THz 信号的频谱范围

收稿日期: 2005-11-01, 修回日期: 2006-02-18

Received date: 2005-11-01, revised date: 2006-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10390160), 北京市科技新星计划资助课题

作者简介: 张振伟 (1977-), 男, 北京人, 首都师范大学物理系 2003 级硕士研究生, 研究方向: 脉冲 THz 时域光谱成像和 CWTHz 成像应用研究。

扩展了将近一倍,达到 2.6THz 以上),应用高灵敏度、低噪声、宽频谱响应的电光取样探测方法,获取样品的透射时域光谱.同时归纳总结了透射式 THz 逐点扫描透射成像的常用数据处理方法,利用其中的一些方法构建出葵花籽的透射图像,并对其进行分析和对比.接下来从成像装置、光束测量、数据处理和分析等几个方面对 THz 成像技术进行详细的讨论.

1 实验装置

图 1 是成像系统的实验装置图.激光光源是一台自锁模钛:蓝宝石飞秒激光器,脉冲宽度为 100 飞秒,中心波长选择在 810 纳米,重复频率为 80MHz.飞秒脉冲被分光棱镜(CBS)分为激发光和探测光两部分.激发光通过一时间延迟台后被聚焦,并以 45° 角照射在 $\langle 100 \rangle$ 取向的 InAs 晶体上,产生光生载流子,由于光激发的电子和空穴在浓度梯度下扩散速度不同,在晶体表面引发超快光致倍增(Dember)电场,从而加速载流子运动并产生 THz 辐射.窄带半导体晶体 InAs 中由于 Dember 电场产生的 THz 辐射强度比相同条件下 GaAs 晶体产生的 THz 辐射强很多,为 THz 成像提供了较高功率的辐射源.产生的 THz 辐射经两对离轴抛物面镜(PM)准直和聚焦,最后透过一个 1mm 厚的高阻硅薄片,汇聚在 $\langle 110 \rangle$ -ZnTe 电光探测晶体上. THz 电场调制电光晶体的折射率椭球,也就是发生了电光效应.另一方面,对于同时到达探测晶体的探测光,由于探测晶体的折射率椭球随着 THz 电场的变化而变化,使得透射的探测光的偏振特性随之变化.被调制的探测光经过四分之一波片(QWP)和渥拉斯顿棱镜(PBS)后,被一对光电二极管探测,得到的差分信号经过锁相放大器放大和计算机同步采集,得到 THz 辐射信号.实验中样品被安放在一个二维平移台上(扫描范围 25 毫米 \times 25 毫米),置于第 2 个抛物面镜的焦点处.

通过对不同时间延迟的扫描,能够在 x-y 平面上每一空间点上获得带有样品信息的透射时域波(数据格式为三维格式: $x \times y \times t$).对时域波进行傅里叶变换可得到每一点的 THz 频率响应谱.只要从每一点的光谱中提取出选定振幅或位相信息,就可以获得一个二维($x \times y$)点阵,进行成像.数据扫描时间由锁相放大器的积分时间、扫描的空间点数和时间点数决定.对于一组积分时间设为 30 毫秒的 $23 \times 23 \times 256$ 点的数据,所需时间大约为 10 个小时.系统产生信号的动态范围在 3000 以上,信号时域峰值处的信噪比超过 600,频谱宽度为 0.1 到

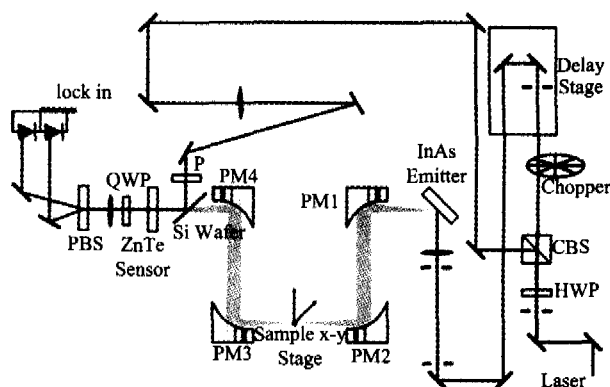


图 1 THz 成像装置光路图

Fig. 1 Schematic of a THz-TDS transmission imaging setup

2.5THz,具有 10GHz 以上的频谱分辨能力.

本系统所成像的空间分辨率由聚焦在样品上的 THz 光斑的大小决定.将 THz 波近似视为高斯光束,则焦斑的尺寸由下式表示:

$$R = \sqrt{2} \frac{4\lambda}{\pi} \left(\frac{f}{d} \right), \quad (1)$$

其中 d 为被第一个抛物面镜准直后的光束直径, f 为第 2 个离轴抛物面镜的焦距, λ 是 THz 信号频谱峰值波长.由于系统测量的是 THz 电场而不是强度,所以引入系数 $\sqrt{2}$.本系统中, $d = 2.8\text{mm}$, $f = 50.8\text{mm}$, $\lambda \sim 0.31\text{mm}$,得出 $R \sim 1.1\text{mm}$.

为了确保得到尽可能高的空间分辨率,首先要找到 THz 电磁波焦斑的准确位置.测量中,将金属刀片安装在一可以沿 THz 光束方向(z 方向)调节的手动平移台上,并将平移台安放在图 1 中的二维电控平移台上.在不同的 z 轴位置,沿 x 轴和 y 轴分别切割 THz 光束得到一系列电场强度变化曲线.对其进行求微分运算,得到 THz 光束在 x - y 平面上的电场强度分布,所得曲线的半宽度被认为是太赫兹光斑的直径,它决定了所成像的空间分辨率.图 2 给出的是在 x 方向上 THz 光斑最小位置处 THz 光束的电场强度随横向位置的变化曲线(a)和它的场强分布曲线(b).由图(b)可以得出曲线的半宽度近似等于 1.1mm,与前面计算得到的焦斑大小相一致.

2 数据处理方法

THz 波时域光谱成像技术与一般的强度成像不同,它的一个显著特点是信息量大.每一个成像点对应一个时域波形,我们可以从时域信号或它的傅立叶变换谱中选择任意一个数据点的振幅或位相进行成像,从而重构样品的空间密度分布、折射率和厚度分布.图 3 是透过成像样品某一点后的 THz 时域信

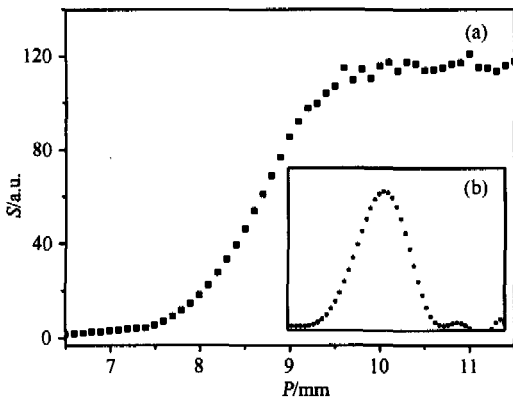


图2 在焦点处沿 x 轴切割时 THz 电场强度变化曲线 (a) 和电场强度空间分布 (b)

Fig.2 (a) When a razor blade scans the THz beam focal point (waist) along x-axis, the different THz electric fields are recorded. (b) through calculating differential coefficient to (a), the spatial distribution of THz electric field at the x-axis are presented

号波形(a)和它的傅立叶变换频谱(b). 根据对时域或频域中不同物理量的选取, THz 成像可以表达成多种形式, 不同表达方式可以解释不同特征, 以便提供更多、更精确的样品信息. 因此, 处理数据的方法在 THz 成像中就显得尤为重要. 下面列举一些可行的数据处理方法, 在下一节给出利用其中的几种方法得到的葵花籽样品的 THz 透射图像(见图4).

2.1 时域模式

这种模式都是在 THz 电场的时域波形(如图3(a))中提取出反映样品信息的数据进行成像的, 如: a) 时域信号的最大值成像; b) 时域信号的最小值成像; c) 信号的振幅成像(最大值与最小值之差); d) 能量成像(THz 波形的脉冲能量 $D =$

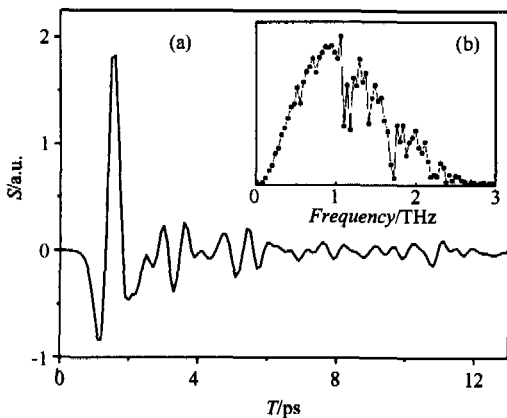


图3 透射样品的 THz 时域波形 S (a) 和对应的 THz 傅立叶变换光谱 (b)

Fig.3 THz time-domain signal (a) of transmitted the sample and its Fourier transform spectrum (b)

$\int_{t_1}^{t_2} E^2(t) dt$, t_1 和 t_2 界定一段时间, 通常可取峰值前零点时刻和峰值后零点时刻); e) 信号最大值对应的时间位置成像; f) 信号最小值对应的时间位置成像; g) 最大值和最小值之间的零信号对应的时间位置成像等等.

以上分类大体可以分为两类: 前4种是振幅成像, 主要反映了样品的厚度和吸收特性; 后3种是位相成像, 主要反映了样品厚度及其折射率信息. 不同的成像模式, 反映的样品信息不同, 从而重构的 THz 图像对比度也不同. 但是任一时域信息的变化, 都是样品对频域中所有频率成分影响的综合反映, 是一个平均的效果. 这一特点决定了采用时域信息进行成像通常都有较好的成像效果, 不同成像方法之间像质差别也比较小.

2.2 频域模式

这种模式都是在 THz 电场的频域波谱(如图3(b))中提取出反映样品信息的数据进行成像的. 如: a) 频域谱的最大值成像; b) 频域谱的任意频率对应的振幅成像; c) 频域谱的任意频率对应的功率成像($\text{power} = \frac{|r(\omega)|^2}{N}$, 其中 r 为傅里叶变换后任意频率对应的振幅, N 为采集数据的点数); d) 频域谱的任意频率对应的位相成像; e) 样品的吸收率成像(样品谱与参考谱功率的比值); f) 样品的折射率成像; g) 频谱的能量成像(能量 $D = \int_{\omega_1}^{\omega_2} E^2(\omega) d\omega$, ω_1 和 ω_2 在频谱中界定某一频率范围)等等.

以上的方法提取的信息都是针对频谱中某一或某些特定频率所对应的振幅、功率、位相、吸收系数或折射率的值, 反映的是样品的吸收系数和折射率在不同电磁波的频率间存在的差异, 所得图像的对比度变化明显. 并且由于 THz 光谱宽度在 2THz 以上, 在高频分量具有更短的波长, 从而可实现更高的空间分辨率.

3 成像结果分析

我们利用葵花籽作为样品获取了一组数据, 并利用上一节提到的部分方法获得了 THz 透射像. 图4给出了葵花籽样品的实物照片和相应方法重构的 THz 透射图像. 图 a) 给出了样品的白光照片, 为了显示葵花籽的内部信息, 在拍摄白光照片时将其剖开. 在所有的 THz 图像中都能清晰地分辨果壳的轮廓和隐藏在果壳中果仁的形状, 这是我们最感兴趣的. 同时, 由于所用方法的不同, 各个图像所表征的

信息也不尽相同,下面将对它们进行对比和分析.图 b) ~ e) 对应不同的时域信息(最大峰值、最小峰值、峰峰值和最大值位置),它们反映的是样品对 THz 光谱所有成份的响应.图 b) ~ d) 反映的是样品对 THz 辐射的吸收特性,呈现出样品的空间密度和厚度分布特征,图 e) 反映的是样品的折射率和厚度分布信息.这四张图成像效果相近,对比度也比较明显.图 f) ~ k) 对应不同的频域信息(频谱振幅最大值、频谱中对应 0.2、0.5、0.9 和 1.28THz 的振幅值和频谱中对应 0.9THz 的位相值),它们反映的是样品对不同频谱成份的响应,其本质表现为样品的吸收系数和折射率随电磁波的频率的不同而有所差异,当然还包括样品的厚度对光谱成份的影响.与时域信息成像相似的是,对于提取振幅数据的 f) ~ j) 图,反应的是空间密度和厚度分布,而对于提取位相

数据的 k) 图,反映的是样品的折射率和厚度分布,只不过所针对的是某一个特定频率.从图中可以看到,选择频谱中不同的频率成份的振幅值所成的图像的对比度存在较大的差异.在频率较低时,成像的对比度较差,这是由于空间衍射极限造成的,而且还有非常明显的边缘散射现象,如图 g) 所示.随着频率的提高,在较高的频率,图像的清晰度和对比度提高,如图 h) 、i) 所示.对于图 j),反映果壳与果仁对 1.28THz 的电磁波的透射效果差别很小,因此无法进行区分.图 e) 和图 k) 都是位相信息成像,只不过图 e) 反映的是样品对 THz 脉冲包络位相变化的影响,而图 k) 描述单个频率 0.9THz 的位相变化.

4 结论

本文全面介绍了透射式 THz 逐点扫描成像系统的关键技术.建立了一种高功率、宽频谱范围的 THz 逐点扫描成像系统,能够探测隐藏在某些非透明的电介质材料后面或内部的样品信息.应用针对透射式扫描成像的数据处理方法,给出了一些方法的 THz 图像,并分析了这些方法的物理内涵,对开展 THz 成像技术研究具有指导意义.

REFERENCES

- [1] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. *Opt. Lett.* 1995, **20**(16):1716—1718.
- [2] Wu Q, Hewitt T D, Zhang X-C. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams [J]. *Appl. Phys. Lett.* 1996, **69**(8):1026—1028.
- [3] Jiang Z, Zhang X-C. Single-shot spatiotemporal terahertz field imaging [J]. *Opt. Lett.* 1998, **23**(14):1114—1116.
- [4] Wang S H, Zhang C L, Zhang X C, et al. Terahertz computer tomography [J]. *Acta. Phys. Sin.* (王少宏, 张存林, 张希成, 等. Terahertz 波计算机辅助三维层析成像技术. *物理学报*), 2003, **52**(1):120—124.
- [5] Cao J C. Interband impact ionization and nonlinear absorption of terahertz radiation in semiconductor heterostructures [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2003, **91**(23):237401(4).
- [6] Cao J C, Lei X L. Multiphoton-assisted absorption of terahertz radiation in InAs/AlSb heterojunctions [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2003, **67**(8):085309(5).
- [7] Cao J C, Liu H C, Lei X L. Simulation of negative-effective-mass terahertz oscillators [J]. *J. Appl. Phys.* 2000, **87**(6):2867—2873.
- [8] GU Chun-Ming, LIU Rui, HE Li-Rong, et al. Effects of probe beam polarization direction on THz detection in ZnTe [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (顾春明, 刘锐, 贺莉蓉等. 偏振方向对 ZnTe 电光 THz 辐射探测的影响. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(5):333—336.

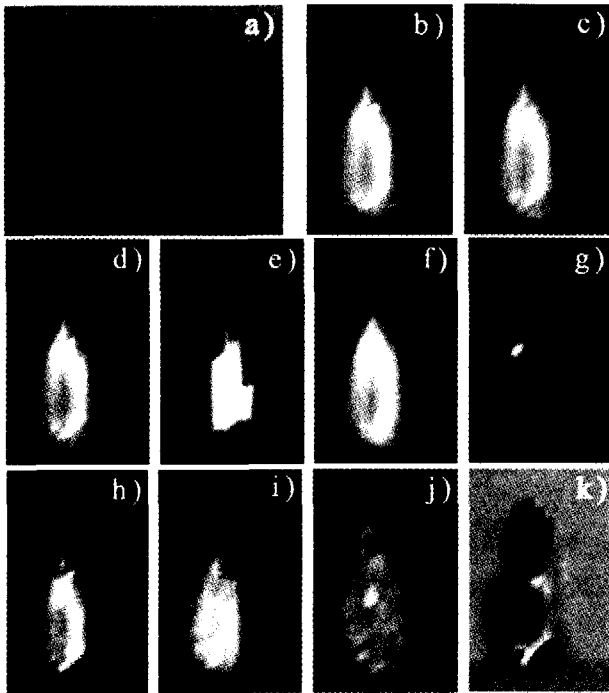


图4 葵花籽的 THz 图像 a)实物 b)时域最大峰值 c)时域最小峰值 d)时域峰峰值 e)时域峰值位置 f)频谱最大 g)频谱 0.2THz 振幅 h)频谱 0.5THz 振幅 i)频谱 0.9THz 振幅 j)频谱 1.28THz 振幅 k)频谱 0.9THz 位相

Fig. 4 a) The photograph of samples b) The time-domain maximum amplitude imaging c) The time-domain minimum amplitude imaging d) The time-domain peak-to-peak value imaging e) The time-domain time delay imaging f) The frequency-domain maximum amplitude imaging g) ~ j) The amplitude of the fixed frequency at 0.2THz, 0.5THz, 0.9THz, 1.28THz k) The phase of the fixed frequency at 0.9THz.