

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0239-05

利用太赫兹波进行快速无损检测

潘 锐 和 挺 熊 伟 沈京玲

(首都师范大学物理系北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要 提出了一种利用太赫兹时域光谱系统进行快速检测的方法。该方法在光路中引入一个楔形块,使宽光束的太赫兹平行光在一个维度上的延迟时间是连续变化的,不同延迟时间的太赫兹波经过物体不同位置,进而携带了该位置的信息。最终测量的太赫兹信号是物体不同位置信息的叠加。利用去卷积的方法,把物体不同位置的信息从叠加后的信号中提取出来,经处理后可实现无损检测的目的。实验中,贴在不同高度铝箔条的位置信息被成功分辨,一个 11 mm 的钉子被成功定位,从而在实验上验证了所提出的免去逐点扫描而实现快速检测的方法。

关键词 太赫兹;快速无损检测;去卷积;楔形延迟块

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201037s1.0239

Fast Nondestructive Testing by Terahertz Wave

Pan Rui He Ting Xiong Wei Shen Jingling

(Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract A fast nondestructive testing method using the normal terahertz time domain spectroscopy system (THz-TDSS) is presented and demonstrated in this paper. In the method a parallel THz wave with the beam size of 4 cm in diameter is used and an echelon is introduced in front of an object. The THz wave, passing through the echelon, is therefore delayed differently in one dimension. Then the THz wave takes the information in different positions of the object, which is corresponding to different delay times. Theoretical analysis indicates that the detected THz signal is sum of the information in different object positions and the information could be obtained from the compacted THz signal by deconvolution signal processing. In the experiment, top and bottom position of foil strip make signal having depression in the front and back respectively after deconvolution processing, and a number of foil strips corresponds to number of depressions. The different positions of foil strip with 4 mm width are detected successfully, and the number of foil strips is also distinguished clearly. A pushpin in diameter of 11 mm is tested twice and located by calculation. The experiments verify that the theoretical prediction is correct and the fast non-destructive testing method is feasible. Beside the time saving, the other advantage of this method is simplicity in experiment because no any changes on the THz-TDSS is required.

Key words terahertz wave; fast nondestructive test; deconvolution; delay echelon

1 引 言

由于太赫兹(THz)波特有的对非极性材料良好的穿透性和能与大分子物质相互作用的特性,它在

很多领域都有很重要的应用价值,例如毒品和爆炸物的检测^[1,2]、生物组织成像^[3]、检测药片糖衣^[4]等。在太赫兹波相关研究领域中,THz波成像无损检测

收稿日期: 2010-04-20; **收到修改稿日期:** 2010-06-04

基金项目: 国家 973 计划(2007CB310408 和 2006CB302901)、北京市自然科学基金(4102016)和北京市教育委员会科技发展计划(KM200910028005)资助课题。

作者简介: 潘 锐(1985—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹波谱与成像等方面的研究。

E-mail: peter_pan211@139.com

导师简介: 沈京玲(1957—),女,博士,教授,主要从事太赫兹波谱与成像等方面的研究。

E-mail: jinglingshen@gmail.com

技术占有重要地位并且一直都是热点^[5~7]。太赫兹成像的实现可以通过普通的太赫兹时域光谱系统 (THz-TDSS) 产生的脉冲太赫兹波进行逐点扫描^[8,9],也可以利用 CCD 进行实时成像^[10,11],还可以通过连续太赫兹波进行扫描成像^[12,13]。近年来,也有人提出过压缩快速成像方法^[14~16]。在脉冲太赫兹波成像方法中,CCD 实时成像速度快,但是系统成本高;而逐点扫描成像方法虽然在该系统可以得到样品的吸收谱,但成像时间很长,经常要花费几小时才能成一幅图像。因此,仍然需要寻找一种高速灵活的太赫兹波无损检测方法。

本文提出了一种快速无损检测方法,它既有高速的特性,也不用对太赫兹时域光谱系统的光路进行改动。这种方法利用时域光谱系统中太赫兹宽光束部分,让太赫兹宽光束通过一个楔形延迟块,楔形块在一个维度上厚度是连续变化的,这样对应于物体在该维度上不同位置的太赫兹波形会有不同延迟,不同的延迟波就会携带物体不同位置的信息。当太赫兹光束经过延迟块和样品后,光束被聚焦并探测,因此整个物体信息被压缩在一个时域谱中。最终,通过对得到的时域谱进行去卷积等处理后可以提取物体的信息。利用这种方法,对一个物体进行检测的时间不超过 6 min。如果高速延迟扫描技术,例如异步光学取样技术^[17]被应用在太赫兹时域光谱系统中的话,获取一个太赫兹时域谱的时间可以减小到小于 0.1 s,将可再大大减少检测时间。这种检测方法也扩展了 THz-TDSS 的应用范围。

2 检测原理

图 1 为一个普通的太赫兹时域光谱系统。系统的光源为中心波长 800 nm,脉宽 113 fs,重复频率 75 MHz 的光纤激光器。入射激光被偏振分束镜 (PBS) 分为抽运和探测两路光线。抽运路激光经过电动平移台入射到光导天线上并在其后产生 THz 波。THz 波经过抛物面镜 (PM) 的收集后被聚焦在探测晶体 ZnTe 上。探测路激光经过偏振片 (P) 后也入射到 ZnTe 晶体中,并携带上 THz 电场的信息,在经过四分之一波片 (QWP) 和沃拉斯顿棱镜 (WP) 后被双眼探头探测。通常情况下,对物质吸收谱的测量和对物体进行逐点扫描成像都把样品放在 PM₂ 和 PM₃ 之间的 THz 波焦点处。这里提出的检测方法是把被成像物放在太赫兹宽光束中,即放在 PM₃ 和 PM₄ 之间的准直光束中。图 1 中的延迟块是楔形的,用太赫兹透射材料制作,实验中的延

迟块用聚乙烯制作。由于在太赫兹传播路径的横截面上延迟块具有不同厚度,这使得太赫兹平行光束经过延迟块后具有不同且有序的延迟。延迟时间随着延迟块从上到下厚度的增加而增加。最终探测到的信号是不同延迟时间的太赫兹时域波形的叠加。每个延迟后的太赫兹波形的振幅大小与样品中该位置的信息,即透射率相对应。在对得到的叠加信号进行去卷积处理后,可以得到所有被延迟的 THz 波的振幅大小。重组这些振幅信息以实现对该维度上样品的无损检测。

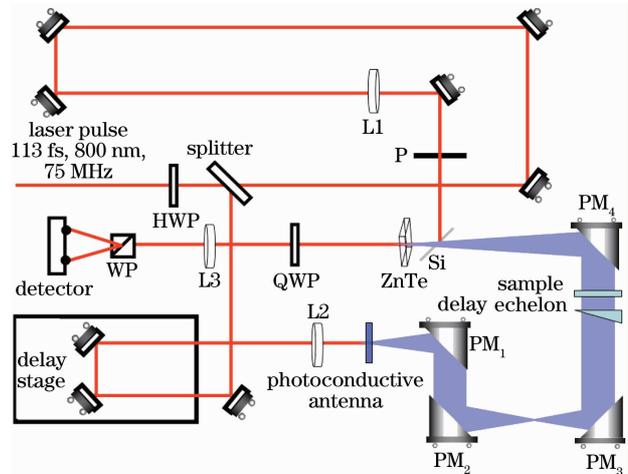


图 1 THz 时域光谱系统和一个延迟块的示意图

Fig. 1 Schematic setup of a THz-TDSS and a delay echelon

快速检测方法的原理如下:假设太赫兹波在 PM₃ 和 PM₄ 之间为平面波, $y(t)$ 是经过延迟块和样品后系统探测到的太赫兹信号。这个信号是 THz 时域谱经过样品不同位置 and 不同延迟的信号叠加。 $f(t)$ 是未经过样品的参考信号。 τ 表示经过延迟块不同位置的时间延迟,因此 $f(t - \tau)$ 表示经过延迟块上某一点后的 THz 波形。 $x(\tau)$ 是样品传递函数,即想要得到的样品的信息,不同的延迟时间 τ 的信息代表相应位置的样品信息。这样,经过样品后的任一位置的信号可以表示为 $x(\tau)f(t - \tau)$,图 1 中被聚焦后探测到的信号可以被表示成经样品后每一点贡献的总和

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)f(t - \tau)d\tau = x(t) \otimes f(t). \quad (1)$$

在理想情况下太赫兹光束与样品大小相同,时间延迟是连续变化的,如(1)式所示。(1)式表明,探测到的信号是样品的信息和太赫兹参考信号卷积的结果。在频域上,可以表示为

$$Y(\omega) = X(\omega)F(\omega), \quad (2)$$

式中 ω 为频率。像的信息可以通过去卷积处理得到

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[Y(\omega) \cdot \frac{1}{F(\omega)} \right]. \quad (3)$$

由于 $F(\omega)$ 通常在某些频率点上值很小,其倒数会很大,这样小噪声将会产生大影响。为了减少由此产生的影响,引入维纳滤波^[4],其定义为

$$W(\omega) = \frac{\bar{F}(\omega)}{|F(\omega)|^2 + 1/a}, \quad (4)$$

式中 a 为信噪比,是个常数。这样 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1} [Y(\omega) \cdot W(\omega)]. \quad (5)$$

3 实 验

如果能使太赫兹波宽光束部分在其横截面上每一点的延迟都不同且有序,这将可以对样品进行成像。但是由于制作二维延迟块难度较大,在初期实验时如果一开始就引入二维延迟块,实验数据处理一旦失败,很难界定失败原因是数据处理方法不对还是延迟块制作没有达到要求。因此,在初期实验时将延迟块制作成从上到下厚度逐渐增加的楔形块,放置时让楔形块薄端在上厚端在下。这种楔形块只对竖直方向上物体信息的变化敏感。这是最简单的一种情况,成功后可以扩展到二维。太赫兹波经过楔形块会受到色散的影响,由于楔形块很薄,且楔形块和探测晶体间距离很近,在实验和分析中忽略色散和传播产生的衍射影响。延迟块用聚乙烯材料制作,宽 5 cm,长 7 cm,最薄的地方为 1 mm,最厚的地方为 5 mm。

3.1 对铝箔条位置的分辨

该检测方法理论上可以实现对不同振幅衰减的判别,也就是说例如 THz 波透射 20% 和透射 80% 是可以被区分开的,能区分的程度与系统信噪比和分辨率有关,在实验中为了获得更明显的实验结果,选择应用对比度最大的情况。实验检测物样品被选为不同高度位置的铝箔条,这些铝箔条被贴在白纸上(如图 2 所示),宽度为 3 mm。THz 波无法穿透铝箔,也就是说贴有铝箔条的地方 THz 波透射率为 0,没有铝箔条的地方 THz 波透射率为 100%。这样配合具有竖向分辨能力的楔形延迟块,希望可以看到铝箔在不同位置引起的去卷积后信号的不同。

在实验中,楔形延迟块被竖放(上薄下厚)在如图 1 所示位置,被测样品紧贴在楔形块后,通过控制平移台的移动,扫描一个太赫兹时域谱。图 3 是太赫兹波通过楔形延迟块和不同样品后的时域信号去卷积后的波形。上、中、下 3 个波形分别对应只经过

楔形块(dw0)、经过的样品下方有铝箔(dw3)、经过的样品有两条铝箔(dw4)的情况。图中横坐标代表时间,纵坐标代表强度,都是相对坐标。与只经过楔形块的情况对比后,可以明显看到只经过延迟块的波形相对圆滑,经过下方有铝箔条样品的波形,去卷积后的信号后方有个凹陷。经过两条铝箔样品的波形,去卷积后的信号有两个凹陷。由于楔形块的厚度是越靠下越厚,也就是说越靠下方像的信息延迟会越多,其去卷积后的信息位置就越靠后。实验结果与设想完全吻合,而且效果明显。

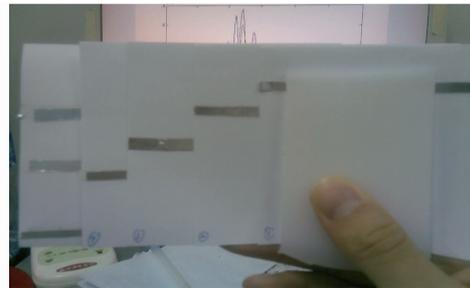


图 2 具有竖向分辨能力的延迟块和处于竖向不同位置的铝箔条

Fig. 2 Samples of foil strip(s) in different positions and delay echelons

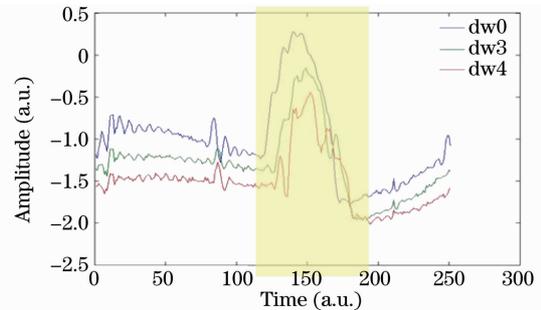


图 3 不同样品信号去卷积处理后的波形

Fig. 3 Data after deconvolution processing with different samples

图 4(a) 的波形为太赫兹波形经过延迟块后再经过物后去卷积过的信号,它们从上到下经过的物分别为空气,铝箔在上、中、下的位置,和贴有两铝箔条,分别用 dw, dw1, dw2, dw3, dw4 表示。为了更突出去卷积信号后波形的不同,用图 4(a) 中只经过楔形块的数据分别减去下面四个数据得到图 4(b)。图 4(b) 从上到下分别为经过铝箔在上、中、下位置,和贴有两铝箔条的波形,分别用 dw10, dw20, dw30, dw40 表示。除去第一个峰外,剩下的峰的位置对应了铝箔条所在位置,峰的宽度对应着铝箔条的宽度。图 4 的实验结果与图 2 所示实际情况十分吻合,实验充分验证了通过去卷积的方法对金属物体位置进

行检测是可行的。

图 4(b)中第一个峰值并不代表图像的信息。它的产生是由于纸对太赫兹信号有延迟效果,在信

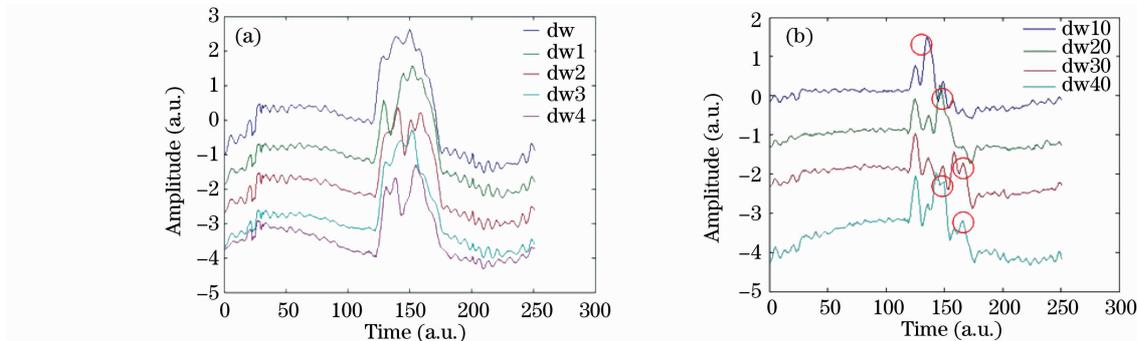


图 4 数据处理结果。(a)太赫兹波经过不同样品去卷积后的信号,(b)对图(a)中数据的处理结果

Fig. 4 Results of data processing. (a) data after deconvolution processing with sample of air,

(b) data processing results of (a)

3.2 对图钉的检测

对图钉的检测实验意在模拟对密封物体中异物的检测,例如对信封中异物的检测、公交卡中芯片位置的检测等情况。实验中楔形延迟块只能起到在一

号处理时用了没有延迟的波形(没经过样品)减去有延迟的波形(样品中的铝箔条是贴在纸上的),因而会产生一个峰。

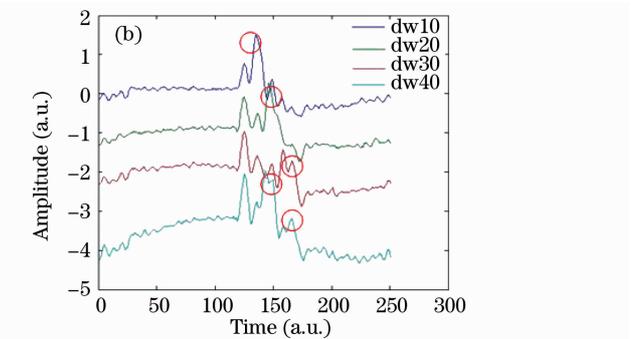


图 5 对图钉定位的实验结果和示意图。(a)样品在最初位置的检测结果,(b)样品旋转 90°后的测量结果,

(c)图钉最终位置的示意图

Fig. 5 Experimental result and schematic of locating pushpin. (a) measurement result of sample, (b) measurement result of sample rotated 90°, (c) schematic of pushpin's position

图 5 中从上到下 3 条曲线分别为只经过延迟块、经过图钉样品和数据处理后的波形,中间插图为实际位置照片,下方插图为结果示意。实验中所用样品为一块长、宽均为 5 cm(有效区域为 5 cm × 5 cm,实际样品要更大)的聚四氟乙烯板,板厚 3 mm,板上按有 11 mm 直径的金属图钉。通过去卷积等处理后的波形数据可以得到图 5 中最下方曲线峰值的延迟时间,通过该延迟时间和楔形延迟块厚度产生的延迟时间进行对比,可得到图钉在一个维度上的位置信息。旋转样品 90°,可得另一维度图钉的位置信息。这样图钉可以被成功定位。

3.3 误差分析

影响实验结果的因素主要有三个方面,分别是

维的方向上让太赫兹波形产生延迟,因此如果想对图钉的二维坐标进行定位,必须对图钉样品正常放置和 90°旋转后的样品分别进行检测,如图 5 所示。

太赫兹波平行光束质量、楔形块表面平整度质量、像的大小。如果太赫兹波面不是严格的平面波,将会影响其经过延迟块和像后的信号时序。通过刀边法可以测得实验中太赫兹波面在 20 μm 的范围内波动,相比 3 mm 和 11 mm 的样品,波面的变化不会对结果产生明显影响,可以忽略。楔形块表面的精度也在百微米量级,也同样不会对结果产生明显影响,而且在数据处理时通过数据与参考光的相减,尽量降低楔形块引入的误差。像的大小都在毫米量级,比太赫兹波大一个量级,像的衍射也不明显。

实验的难度在于对样品旋转后的精确复位,由于复位精度不好掌控,这也影响了该方法对物体定位的精确度。如果延迟块做成二维网格状,每一格

的厚度不同,将可以在二维上很好地产生太赫兹波不同延迟序列,这样可以用此方法对物体一次成像,避免了物体复位带来的误差。这种无损检测方法将会更方便快捷地应用于许多领域,比如对邮件的检测。这也是下一步工作的研究方向。

4 结 论

提出了一种基于普通 THz-TDSS 的快速无损检测方法。通过对压缩信号的去卷积,把物体不同位置的信息从叠加后的信号中提取出来,经处理后可实现无损检测的目的。实验中,成功分辨贴在不同高度处铝箔条的位置信息,并成功定位了一个 11 mm 尺度的图钉,从而在实验上验证了所提出的免去逐点扫描而实现快速检测的方法。接下来的工作将放在制作二维延迟块以实现物体成像方面。这将会使太赫兹波对物体进行无损检测更加快速和便捷。这种太赫兹波快速无损检测的方法能在安检、药物检验和生物化学检测等领域有实际应用。

参 考 文 献

- 1 N. Li, J. L. Shen, J. H. Sun *et al.*. Study on the THz spectrum of methamphetamine[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6750~6755
- 2 M. Lu, J. Shen, N. Li *et al.*. The detection and identification of illicit drugs using terahertz imaging[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(10): 103104
- 3 H. Hoshina, A. Hayashi, N. Miyoshi *et al.*. Terahertz pulsed imaging of frozen biological tissues[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(12): 123901
- 4 T. Jun, J. Hiroki, I. Shingo. High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 7549~7555
- 5 N. Karpowicz, H. Zhong, J. Xu *et al.*. Non-destructive sub-THz CW imaging[C]. *SPIE*, 2005, **5727**: 132~142
- 6 J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): S266~S280
- 7 M. Y. Liang, J. L. Shen, G. Q. Wang. Identification of illicit drugs by using SOM neural networks[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41**(13): 135306
- 8 K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(22): 2549~2554
- 9 K. Kawase, Y. Ogawa, H. Minamide *et al.*. Terahertz parametric sources and imaging applications[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): S258~S265
- 10 Q. Wu, T. D. Hewitt, X. C. Zhang. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(8): 1026~1028
- 11 M. Yamashita, M. Usami, K. Fukushima *et al.*. Component spatial pattern analysis of chemicals by use of two-dimensional electro-optic terahertz imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(25): 5198~5201
- 12 A. Redo, N. Karpowicz, X. C. Zhang. Sensing and imaging with continuous-wave terahertz systems[C]. *AIP Conf. Proc. Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2006, **820**: 508~514
- 13 T. Löffler, T. May, C. Weg *et al.*. Continuous-wave terahertz imaging with a hybrid system[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(9): 091111
- 14 W. L. Chan, M. L. Moravec, R. G. Baraniuk *et al.*. Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 974~976
- 15 D. Takhar, J. N. Laska, M. B. Wakin *et al.*. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression[C]. *SPIE*, 2006, **6065**: 606509
- 16 Q. Song, Y. Zhao, A. Redo-Sanchez *et al.*. Fast continuous terahertz wave imaging system for security[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(10): 2019~2022
- 17 T. Yasui, E. Saneyoshi, T. Araki. Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(6): 061101