太赫兹无损检测的研究*

杨振刚[1]　赵毕强[1]　刘劲松[2,†]　王可嘉[2]
(1 华中科技大学光学与电子信息学院　武汉　430074)
(2 华中科技大学武汉光电国家实验室　武汉　430074)

2013－06－20收到
† email：jsliu4508@vip.sina.com
DOI：10.7693/wl20131004

Nondestructive inspection with terahertz waves

YANG Zhen-Gang[1]　ZHAO Bi-Qiang[1]　Liu Jin-Song[2,†]　WANG Ke-Jia[2]
(1 School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074, China)
(2 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074, China)

摘　要　无损检测技术是一种不破坏零件或材料，可直接在现场进行检测的技术，广泛应用于样件的质量评估。太赫兹波具有量子能量低，对大多数非极性物质透明，兼具频谱性和成像性等特点。作为一种新型技术，太赫兹无损检测已经成为现有无损检测技术的有力补充。文章介绍了太赫兹成像系统的工作原理，阐述了基于连续太赫兹成像的无损检测技术在实际样件测试中的应用。实验测试结果表明，一些样件利用太赫兹无损检测技术可测得其内部缺陷。

关键词　太赫兹波，无损检测，反射成像，内部缺陷

Abstract　Nondestructive inspection is a technique which can be conducted directly in the test field with no damage to the parts or materials, and is widely used in evaluating the quality of samples. Terahertz waves (THz) have the characteristics of low energy and, for most non-polar substances, good transmission. As a new technique, THz nondestructive inspection has become a powerful supplement for existing nondestructive inspection technology. In this paper, the basic principle of THz imaging systems is introduced, and the application of continuous THz nondestructive inspection in actual sample testing is reviewed. Experimental results show that the inner defects in various samples can be detected using THz techniques.

Keywords　terahertz wave , nondestructive inspection , reflection imaging , inner defect

1　引言

无损检测技术是一种不破坏零件或材料，可直接在现场进行检测的技术。目前最常用的无损检测方法主要有5种：超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测[1]。不同的方法有不同的特点，适用于不同的场合、材料和工件。太赫兹波是频率在0.1—10 THz的电磁波，是人类近十来年才开发利用的一个电磁波段[2, 3]。它能够透过泡沫、陶瓷、塑料、高分子复合材料、磁性材料等这些可见光与红外波、甚至超声波都无法透过的材料。传统的射线检测法中使用的X射线和γ射线，不仅对上述材料几乎是透明的，而且

* 湖北省自然科学基金(批准号：2012FFA074)、校自主创新研究基金(批准号：2012QN094，2012QN097)资助项目

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对其中的缺陷(如孔洞、夹渣、错位、裂缝等)也是几乎透明的，因此难以对孔洞和夹渣等缺陷进行清晰成像，无法实现无损检测。太赫兹波对这些材料是半透明的，可以实现无损检测[4, 5]。美国哥伦比亚航天飞机失事后，美国航天局成功开发了对航天飞机绝热泡沫的无损检测，能够发现其中的孔洞与夹渣。此外，用于航天等领域的新材料，如高分子复合材料，将其作为涂层时，它与衬底的涂覆质量，用以往的方法几乎无法进行无损检测。太赫兹波能够对这些材料实现无损检测，评估其涂覆质量、脱黏状况和涂层厚度。

2 连续太赫兹成像系统无损检测技术

实现太赫兹无损检测的技术途径主要分为连续波成像与脉冲成像[6—8]。前者是利用电子器件发射的波长在中心波长附近小范围可调的连续太赫兹波，通过在(x，y)二维平面上移动样件或发射/探测头，获得二维图像。通过发射器中的调频技术和探测器中的混频技术，可在一定范围内获得样件在不同纵深z处的(x，y)二维图像。后者利用光电子器件发射的宽频(典型的频谱范围为0.1—2.5 THz)脉冲太赫兹波，通过在(x，y)二维平面上移动样件，获得不同(x，y)点的太赫兹时域谱，经傅里叶变换后，可以获得相应点的频域谱。这样就可以获得0.1—2.5 THz范围内不同频率点上样件的(x，y)二维图像。但是，基于光电子学产生的脉冲太赫兹波，能量非常低，聚焦到样品内部的深度往往很小，而且需要逐点进行时域扫描，非常耗时。因此，在无需频谱信息的情况下，采用连续太赫兹波成像技术，可以提高成像速度并降低成像系统的复杂程度。

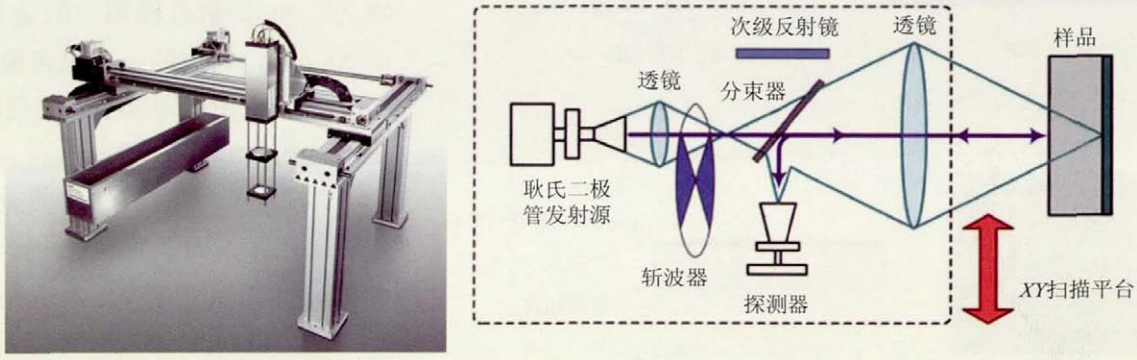
作者使用连续太赫兹成像系统(德国SynView公司，SynViewScan 300型)对一些样件进行了测试。实验装置如图1(a)所示，工作原理见图1(b)[9]：耿氏振荡器发出的太赫兹波被三角波调制，发射信号的瞬时频率随时间线性变换，经过聚乙烯透镜聚焦后入射到样件中，其聚焦点位于样件待测的纵深位置处，反射信号穿过样件后与发射信号进行混频，由肖特基探测器探测。样件进行太赫兹无损检测时，由于缺陷材料和样件材料的折射率、吸收率、反射率都不相同，因此其内部缺陷对太赫兹波的调制会改变太赫兹波的强度分布，反应到缺陷的太赫兹图像上显示为明暗的不同，据此可直接得到缺陷的二维图像。

3 太赫兹无损检测的应用

作者对不同种类的样件进行了测试，结果如下。

3.1 太赫兹波透过性测试

将日常生活用品作为样件(包括手表、U盘、硬币、纽扣、裁纸刀、钥匙、金属徽章、牛骨纪念品等)，对太赫兹波的透过性进行测试。将样件



(a) 系统装置图　　(b) 系统工作原理图

图1 连续太赫兹成像系统

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

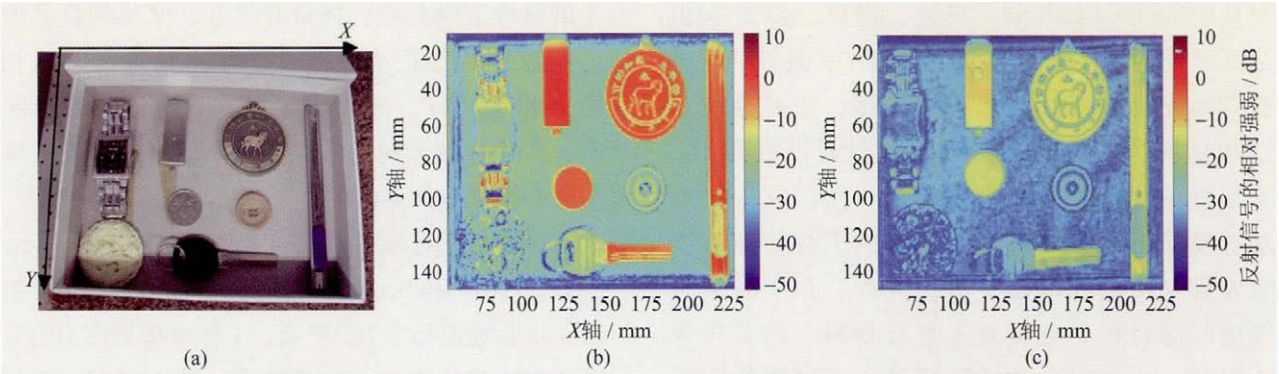


图2　日常用品太赫兹成像 (a)样件光学图片；(b)直接扫描太赫兹像；(c)盖上盒盖后的太赫兹像

放入一纸盒中，如图2(a)所示。图2(b)为直接扫描样件得到的太赫兹图像，图2(c)为盖上纸盒后进行扫描得到的太赫兹图像。图中横轴对应太赫兹二维图像中的X轴，纵轴对应Y轴，右边颜色条表示反射信号的相对强弱(dB)，深红色代表反射信号最强，深蓝色代表反射信号最弱。

由图2(c)可知，太赫兹波可透过纸盒盖，对内部物品成像。物品中金属部分对太赫兹波反射率高，非金属材料(如塑料、牛骨等)对太赫兹波反射率较低。根据(c)图和(b)图中样件反射率之比，可估算出太赫兹波透过纸盒盖的损耗。

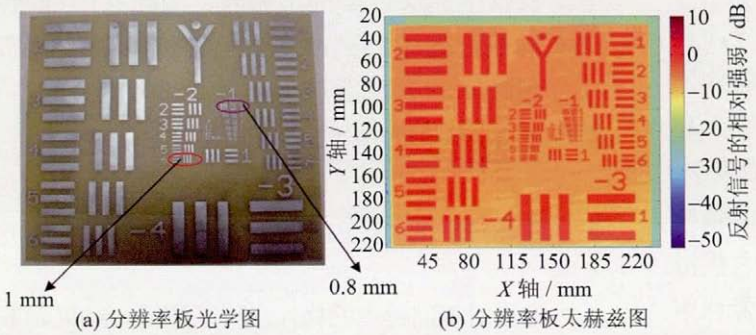


图3　分辨率测试

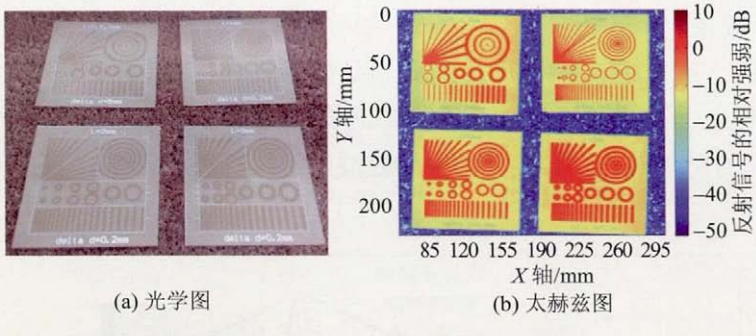


图4　不同金属线宽的测试

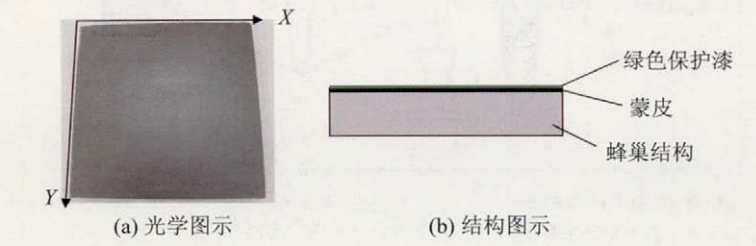


图5　样件图示

3.2　分辨率测试

利用分辨率板测试连续太赫兹成像系统成像的分辨率，分辨率板如图3(a)所示，图中红色椭圆中的金属线宽为1 mm，紫色椭圆中的金属线宽为0.8 mm，对应的太赫兹图像如图3(b)所示。由图可知该系统的成像分辨率可达到1 mm。

为了进一步验证系统的分辨率，作者加工了不同金属线宽的样品进行测试，如图4(a)所示。左上角样品，L =1，2，3 mm，表示该样品包含了分别为1，2，3 mm的3种金属线宽；右上角是线宽L =1 mm的样品；左下

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

角L =2 mm；右下角L =3 mm。4个不同样品对应的太赫兹图像如图4(b)所示，系统的分辨率可达到1 mm。

3.3 样件内部缺陷测试

制作人工缺陷样件，主体由蜂窝材料组成，上部覆盖一层蒙皮，蒙皮的外部涂上一层绿色保护漆，如图5所示。蒙皮上分布一些人工夹杂物，其中包括：胶带、石蜡、无孔膜、纸、防粘纸、纸胶带、铝箔、砂纸等。调整样件高度，使得蒙皮处于透镜的焦点位置，测得样件的太赫兹图像，如图6所示。图中有一个红色(表示高反射率)圆形图样，为金属异物(铝箔)；另有两排排列整齐的圆形异物，则与表1中的胶带、石蜡、防粘纸等杂物一一对应。由图6测得的蒙皮层太赫兹图像，可观测到了预埋的夹杂物，可判断出蒙皮中各个夹杂物所处的相对位置及其轮廓，并能够对异物属性做出基本判断。此例为多层蜂窝真实样件的内部缺陷无损检测打下了良好基础。

表1 蒙皮上的夹杂物分布状况

夹杂物名称	胶带	石蜡	无孔膜	纸	防粘纸	纸胶带
	铝箔	防粘纸	无孔膜	砂纸	胶带	防粘纸

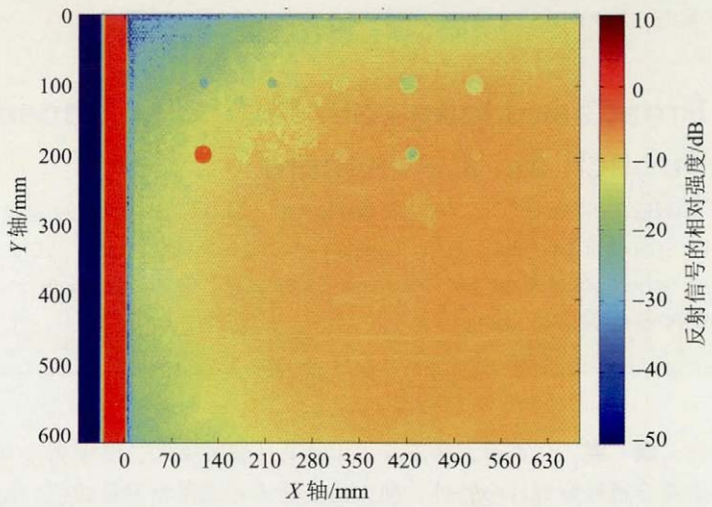


图6 蒙皮太赫兹图示

4 结束语

太赫兹科学技术以其重要的科学意义和广阔的应用领域，在国内外得到了广泛的重视和日益深入的研究，其为无损检测中大量的技术难题提供了一种可能的解决方案。现今太赫兹无损检测技术仍处于研究阶段，还不够成熟。例如，对缺陷和夹杂物，往往只能给出样件定性的检测结果，定量分析技术还有待发展；另外，由于尚不能对太赫兹波在样件中传播、衍射、干涉和吸收等物理过程进行准确的分析，有时会造成对缺陷属性的误判。尽管如此，太赫兹技术因为具有其他检测方法难以取代的特点，在无损检测领域有着广阔的应用前景。随着太赫兹成像系统的进一步发展和对太赫兹波与物质相互作用机理研究的不断完善，以及对图像处理、三维重构等算法研究的不断深入，太赫兹无损检测技术将进一步得到发展，在实际工程中将得到更广泛的应用。

参考文献

[1] 夏纪真. 无损检测导论. 广州：中山大学出版社，2010. 66—70
[2] 杨振刚，刘劲松，王可嘉. 光电子激光，2013，24(6)：1158
[3] Ferguson B. 物理，2003，32(5)：286
[4] Kawase K，Ogawa Y，Watanabe Y et al. Optics Express，2003，13 (11)：2549
[5] Jansen C，Wietzke S，Peters Ole et al. Applied Optics，2010，49 (19)：48
[6] Lee A W，Hu Q. Optics Letters，2005，30(19)：2563
[7] Zhang Z，Buma T. Optics Letters，2010，35(10)：1680
[8] Maruyama K，Itani N，Hasegawa S Y. Optics Express，2011，19 (18)：17738
[9] 许景周，张希成. 太赫兹科学技术和应用. 北京：北京大学出版社，2007，194—200

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net