

连续太赫兹反射扫描成像分辨率测量实验研究

丁胜晖 李琦 李运达 王骥

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要 图像空间分辨率是太赫兹 (THz) 成像系统的重要技术参数。为了测量系统的分辨率特性, 仿照 ISO12233 标准制作了星形分辨率测试卡。通过对测试卡进行成像, 将成像结果进行简单的处理即可获得系统在不同方向上对不同空间频率方波的响应曲线, 从而测得系统的调制传递函数。利用自制的分辨率测试卡在已建立的 THz 点扫描反射成像系统上进行了实验研究, 对系统的分辨率特性进行了测量及分析。最终测得该系统的分辨率为 1.273 lp/mm, 对应的线宽为 0.393 mm, 测量结果与刀口法所得结果较为一致。分析表明, 利用星形分辨率测试卡能够方便地对系统的分辨率特性进行测量分析, 直观、准确地得出系统的分辨率上限。

关键词 成像系统; 太赫兹成像; 分辨率; 星形测试卡

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1011001

Experimental Research on Resolution Measurement of a Continuous-Wave Terahertz Reflection-Mode Scanning System

Ding Shenghui Li Qi Li Yunda Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract Spatial resolution is an important technical parameter for terahertz (THz) imaging system. To measure the resolution characteristic of the imaging system, a Siemens star for resolution measurement is prepared according to ISO 12233. By imaging the Siemens star, multidirectional square wave response for different spatial frequencies can be deduced from the imaging results, thus obtaining the system's modulation transfer function (MTF). Resolution measurement experiment based on the Siemens star is carried out on a THz reflection-mode scanning imaging system. The system's resolution capability is measured and analyzed. The measurement result shows that the system's resolution is 1.273 lp/mm, and the resolvable line width is 0.393 mm, which is consistent with the measurement result by knife edge method. The study demonstrates that the Siemens star offers a convenient approach to measure the system's imaging resolution capability. The system's resolution upper limit can be obtained precisely and directly.

Key words imaging systems; terahertz imaging; resolution; Siemens star

OCIS codes 110.6795; 220.4840; 110.2960

1 引言

太赫兹 (THz) 成像是当今成像技术的前沿课题之一, 备受关注, 其中大多数是关于 THz 透射成像的研究^[1~5]。在许多实际应用中, 例如需要对地下和空中目标进行成像时, 或者兴趣目标与其背景的透射性能很差时 (如金属、水), 无法进行透射成像, 只能借助于反射成像获得相关信息。因此, THz 反

射成像具有较为广泛的应用空间^[6~9], 对 THz 反射成像的研究十分必要。目前研究的 THz 反射成像大多采用飞秒激光器、自由电子激光器和 CO₂ 激光抽运气体激光器作为光源。前两种激光器设备复杂难于推广应用, 而 CO₂ 激光抽运气体激光器体积小、易于操作, 是目前应用性较强的 THz 辐射源。

THz 图像空间分辨率是成像系统的重要技术

收稿日期: 2011-04-01; **收到修改稿日期**: 2011-07-02

作者简介: 丁胜晖 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹成像技术方面的研究。E-mail: dingshenghui@gmail.com

导师简介: 李琦 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: hit_liqi@yahoo.com.cn (通信联系人)

参数,已有较多关于 THz 成像分辨率的测量报道^[10~12]。准确测量系统分辨率是评价不同成像系统成像性能的前提。目前,在 THz 波段还没有形成统一的评价标准,需借鉴已有的其他波段成像系统空间分辨率测量和评价方法。其中,调制传递函数(MTF)是客观评价成像系统性能的基本物理量,人们一直在研究其测量计算方法^[12,13]。目前对可见光等成像系统的 MTF 曲线的测试方法主要有倾斜刀刃法以及星卡法。前者只能测得系统在横向以及纵向的 MTF,而利用后者则能够同时测量成像系统在多个方向上的 MTF。目前尚未见有对连续 THz 成像系统进行基于星卡法计算 MTF 的研究报道。

本文在已经建立的 THz 反射成像系统中利用刀刃法求 MTF^[12]的研究基础上,为了对系统的分辨率特性进行更直观和更全面的测量,仿照 ISO12233 标准制作了星形分辨率测试卡,通过测量和计算求得不同方向上的方波 MTF 和分辨率,并与参考文献^[12]中的结果进行了比较。

2 成像装置和方波 MTF 的计算方法

采用相干公司 CO₂ 抽运连续 THz 激光器 SIFIR-50 作为成像光源,激光工作频率为 2.52 THz,输出功率 50 mW,激光器功率稳定性为 ±5%。图 1 给出 THz 反射扫描成像系统原理图,装置详细介绍参见文献^[12]。图中 P 代表离轴抛物面镜,M 代表平面反射镜。He-Ne 激光作为指示光源。THz 激光透过硅片经 P1 将光束聚焦,斩波器放在此焦点处,穿过斩波器的 THz 激光经过 P2,P3 和 M1 聚焦到物面上,M1,M2 和成像焦斑构成一个边长为 7 cm 的等边三角形,成像光束入射角为 30°,反射光经过 M2,P4 和 P5 聚焦到单元探测器——室温型 LiTaO₃ 热释电探测器(Molelectron Int., P4-42)上。由于 P3 和 P4 的焦距相对较长,因此可以有足够空间放入两片反射镜,同时

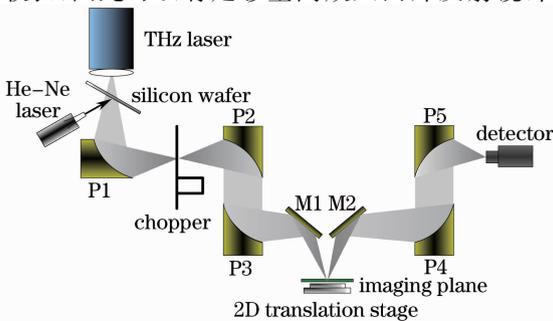


图 1 反射扫描成像原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of reflection-mode scanning imaging system

又可以获得较小的成像光斑。由于是倾斜照射目标,因此扫描光斑的水平 and 垂直方向宽度不同,采用刀口法的测量结果分别为 0.89 和 0.74 mm。

MTF 定义为像调制度与物调制度之比,其中调制度为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

式中 I_{\max} 表示强度最大值, I_{\min} 表示强度最小值。

传统的星形分辨率测试卡都为正弦调制,由于在 THz 波段较难实现,因此采取方波调制形式。自制的星形分辨率测试卡目标内部有 36 个镂空的扇形,如图 2 所示。材料为表面抛光的不锈钢,可近似认为反射率为 1,而镂空部分反射率则为 0,因此物调制度为 1,可较直观地根据测得的像调制度得出成像系统对某一特定空间频率的方波 MTF。

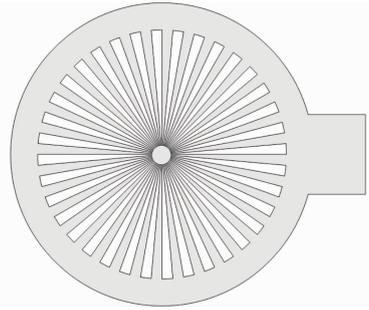


图 2 星形分辨率测试卡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Siemens star

为了测量系统在不同方向上的方波 MTF,将图像分为 12 块区域,每一区域由 3 组镂空扇形组成。对某一指定的空间频率(对应于某一固定半径上的圆周),提取该层圆周上的角度-强度分布。由于目标调制度为 1,因此像的调制度即为系统对该空间频率的方波响应。对每一区域所测得的像调制度取均值即获得系统在该方向上的方波 MTF。具体过程如下:

1) 首先确定图像的中心位置。利用 Matlab 提取出中心较亮区域的范围,利用 $x_R = \int xI(x)dx$ 计算出区域中心的位置,即为图像的中心位置。

2) 将 $x-I(x)$ 关系转化为 $r-I(r,\varphi)$ 关系。对每一指定半径 r 值,提取出该层圆周上的角度-强度分布,即 $[\varphi, I(\varphi)]$ 。

3) 将圆周分为 12 块区域,当 r 值固定时,计算每一区域上的调制度值的平均值,即为对应该空间频率($f = \frac{36}{2\pi r}$) 的系统的方波 MTF。

为了与参考文献^[12]中 MTF 计算结果相比

较,需将原正弦响应转化为方波响应。方波响应 $R'(f)$ 与正弦响应 $R(f)$ 的关系为

$$R'(f) = \frac{4}{\pi} \left[R(f) - \frac{R(3f)}{3} + \frac{R(5f)}{5} - \frac{R(7f)}{7} + \frac{R(9f)}{9} + \dots \right]. \quad (2)$$

3 分辨率测试结果及分析

由于图像分辨率与光斑大小及波长(本文为 0.118 mm)相关,根据实测光斑约 0.9 mm,即可分辨最小线宽约 0.3 mm,根据一般图像分辨率测量原则,实验中扫描步长应选择在 0.08 mm 附近。在不考虑激光抖动影响的情况下,步长越小,测量的不确定度就越低。为了尽可能缩短扫描时间,从而减少激光抖动的影响,分别采用 0.1 和 0.2 mm 扫描步长进行了测试。

放置分辨率板的精度是影响分辨率测量精度的重要因素,只有放置在焦点处,才能得到最高分辨率。为此,研究中通过沿光轴前后微移分辨率板,根据成像效果找到最佳位置。

首先以 0.5 mm 为步长对全区域进行了扫描,扫描结果如图 3(a)所示,图像大小为 75×76 (以扫描步长为单位)。由于图像尺寸较大,花费了较长的时间进行扫描,在扫描过程中激光器功率发生了抖动,从图 3(a)中可较明显地观察到该现象。为了消除激光器抖动的影响,采用了在共焦扫描成像实验中曾采用的提取背景并相除的方法^[14]进行图像处理,结果如图 3(b)所示,可见激光器抖动的影响被很好地抑制。由于扫描步长较大,此时的分辨率主要受扫描步长所限制,从 $r=5.5$ mm 位置向内,成像结果已模糊一片。

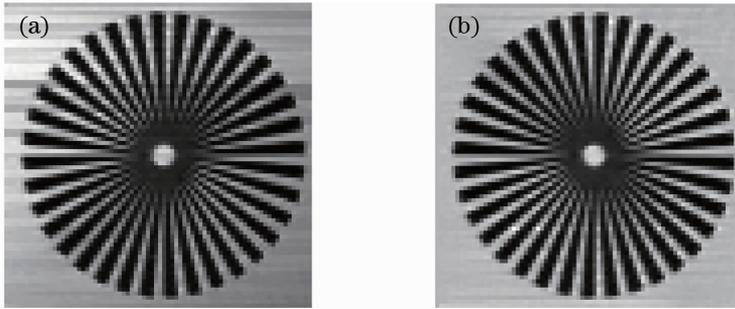


图 3 (a) 0.5 mm 步长扫描结果;(b)图像处理结果

Fig. 3 (a) Scanning result with 0.5 mm scanning step; (b) image processing result

为了观察到系统成像的分辨率上限,将扫描步长变为 0.2 mm,对靠近靶心的位置进行了扫描,扫描区域大小为 62×62 ,扫描结果如图 4(a)所示。从图中不同半径圆周上提取出的归一化反射强度即为

对应于不同空间频率的方波响应。图 4(b)给出了位于半径 5.6 mm 以及 4 mm 圆周上(图中圆线标记位置)的归一化反射强度结果。横线代表 0° 位置,逆时针旋转。

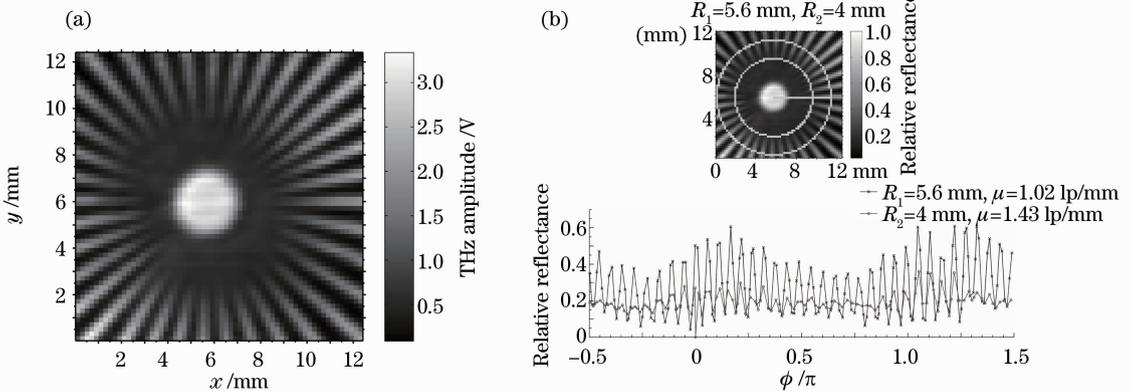


图 4 (a) 0.2 mm 步长扫描结果;(b)位于指定圆周上的归一化反射强度

Fig. 4 (a) Imaging result with 0.2 mm scanning step; (b) normalized reflection at specific circles

以 0.1 mm 为扫描步长,扫描区域大小为 100×100 ,延迟 500 ms,扫描结果如图 5(a)所示。

图 5(b)为半径 4.5 mm 圆周上(如图中外圆线标记位置)提取的归一化反射强度。

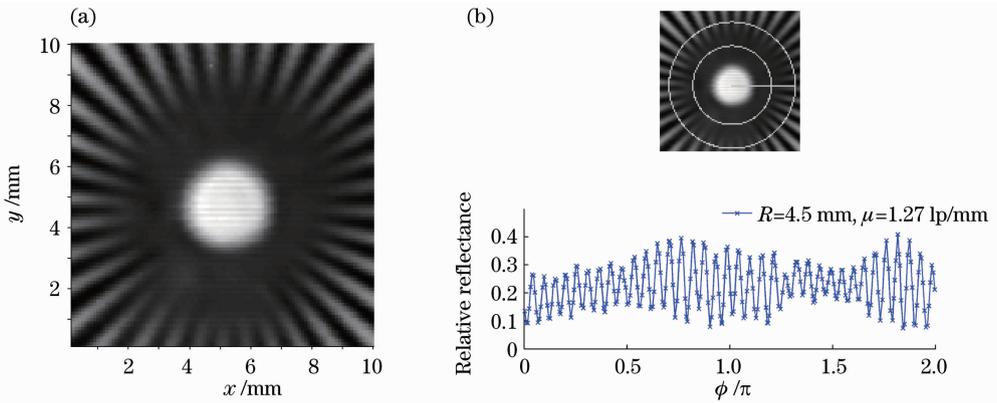


图 5 (a) 0.1 mm 步长扫描结果; (b) 位于指定圆周上的归一化反射强度

Fig. 5 (a) Imaging result with 0.1 mm scanning step; (b) normalized reflection at a specific circle

图 6 给出利用 0.1 mm 步长对星形测试卡扫描的结果计算得到的在 12 个区域上的方波 MTF 曲线。在各区域上获得的测量结果,即为成像系统在与该区域方向相垂直的方波 MTF。受实验系统装

调误差的限制,照射到目标上的扫描光斑并不是对称分布,使得系统对不同方向的方波响应也不可能相同,因此,实际系统在各方向上的方波 MTF 也并不相同。

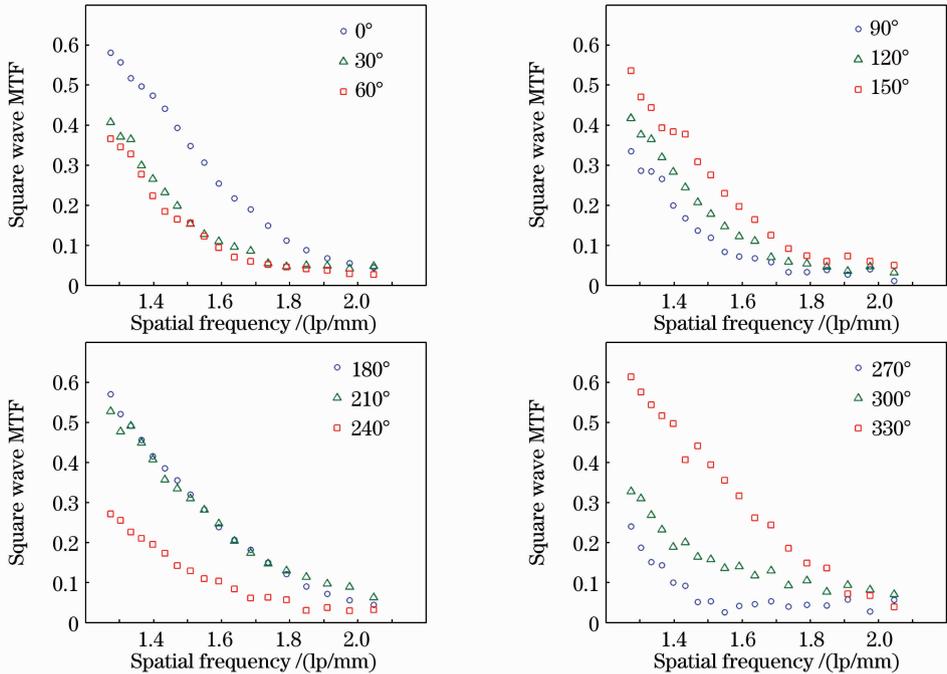


图 6 在 12 个方向上测得的方波 MTF

Fig. 6 Measured square wave MTFs in 12 directions

利用刀口法测得的横向及纵向光斑分布数据也可求出系统对应的方波 MTF,计算结果如图 7 中虚线所示。为了与刀口法测量结果进行比较,将星形测试卡的测量结果分为横向以及纵向两部分并进行平均,也在图 7 中示出。图中给出从 0.1 和 0.2 mm 步长扫描结果提取出的方波 MTF,可以看出 3 者及刀口法测量结果都较为接近,但由于扫描区域不足,因此未获得系统在低频部分的响应曲线。

为系统的分辨率,则依据 0.1 和 0.2 mm 步长扫描的星形测试卡测量结果,在几个方向上的分辨率如图 8 所示。可以看到,由于实际扫描光斑并不对称,因此,在不同方向测得的分辨率也并不相同,但仍基本服从中心对称分布。由 0.2 mm 扫描图中得出,从 0° 至 330° 方向测得的值分别为 1.799, 1.685, 1.579, 1.442, 1.357, 1.365, 1.794, 1.852, 1.451, 1.366, 1.332 和 1.465 lp/mm。由 0.1 mm 扫描图中得出的对应结果为 1.637, 1.469, 1.397, 1.397, 1.469, 1.592, 1.637,

以方波 MTF 下降至 20% 时对应的空间频率作

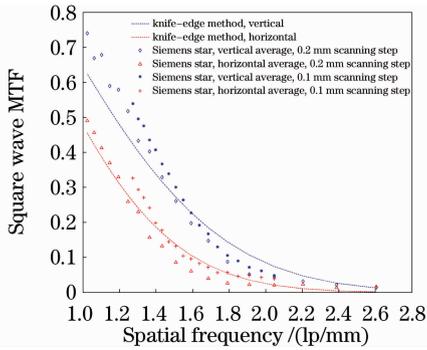


图7 由刀口法及星形测试卡测得的系统方波 MTF

Fig. 7 Square wave MTFs measured by knife edge method and Siemens star

1.637, 1.364, 1.273, 1.432 和 1.685 lp/mm。以其中最小值作为成像系统的分辨率,则 0.1 mm 扫描步长系统的分辨率为 1.273 lp/mm,对应的线宽为 0.393 mm;这恰好也是上述两种扫描步长测试中的最小可分辨线宽。

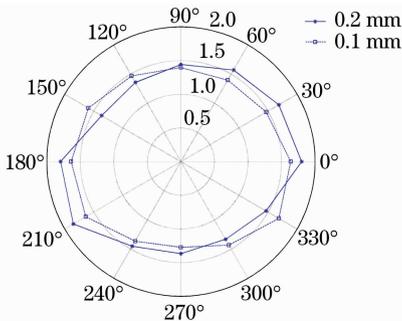


图8 在不同方向上测得的分辨率(lp/mm)

Fig. 8 Measured resolution (lp/mm) in different directions

由于测量结果是在扫描步长为 0.1 mm 的情况下获得的,测量的不确定度主要由此扫描步长决定。为了提高对 MTF 曲线的测量精度,可减小每一扇形区域对应的圆心角,采用具有 72, 144 甚至更多扇形镂空的星卡目标作为测试对象以增加对 MTF 曲线的采样。此外,在测量中影响测量不确定度的另一重要因素是激光器功率的不稳定性,为了消除此影响,今后可采用有效测量半径较小的星卡,获得带无条纹外圈背景的星卡图像[与图 3(a)类似],再通过图 3(b)所用的图像处理方法进行校正。

4 结 论

采用相干公司 CO₂ 抽运连续 THz 激光器 SIFIR-50 作为成像光源,在参考文献[12]的 2.52 THz 反射扫描成像分辨率研究基础上,利用自制的星形分辨率测试卡进行了分辨率测量实验研究。获得了不同方

向的方波 MTF 和分辨率,在垂直和水平方向上所得结果与文献[12]结果相近。利用本文方法,测得系统的分辨率为 1.273 lp/mm,对应 0.393 mm 的线宽。利用星形分辨率测试卡能够方便地对系统的分辨率特性进行测量分析,与刀口法相比,能够测得系统在多方向上的 MTF,且通过选择适当大小的扫描步长和星形分辨率测试卡,能够直观、准确地得出系统的分辨率上限。

参 考 文 献

- 1 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulse terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- 2 Li Qi, Yao Rui, Ding Shenghui *et al.*. Experiment on 2.52 THz transmission-mode imaging for concealed objects[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0711001
- 3 Li Qi, Yin Qiguo, Ding Shenghui *et al.*. Simulated continuous-wave THz image denoising based on Markov random field[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 229~233
- 4 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui *et al.*. Preliminary study on THz confocal imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100402
- 5 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. Preliminary study on 2.5 THz array real-time imaging and image processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s): 84~88
- 6 Mohammed Adnan Salhi, Ioachim Pupeza, Martin Koch. Confocal THz laser microscope [J]. *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves*, 2010, **31**(3): 358~366
- 7 N. N. Zinov'ev, A. V. Andrianov. Confocal terahertz imaging [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(1): 011114
- 8 Z. D. Taylor, R. S. Singh, M. O. Culjat *et al.*. Reflective terahertz imaging of porcine skin burns[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1258~1260
- 9 Qi Li, Rui Yao, Qiguo Yin *et al.*. 2.52-THz scanning reflection imaging and image preprocessing[C]. *SPIE*, 2009, **7277**: 72770J
- 10 Yao Rui, Ding Shenghui, Li Qi *et al.*. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0111001
- 11 Z. D. Taylor, R. S. Singh, E. R. Brown *et al.*. A reflection based, pulsed THz imaging system with 1 mm spatial resolution [C]. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium 2007*, 2007. 1161~1164
- 12 S. H. Ding, Q. Li, R. Yao *et al.*. High-resolution terahertz reflective imaging and image restoration[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(36): 6834~6839
- 13 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2891~2897

李铁成, 陶小平, 冯华君 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2891~2897

14 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui *et al.*. Preliminary study on image processing of THz confocal scanning image[J]. *Infrared*

and Laser Engineering, 2010, **39**(s): 656~660

丁胜晖, 李 琦, 姚 睿 等. THz 共焦扫描成像图像处理方法初步研究[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(s): 656~660