

# 双轴反射式 2.52 THz 共焦扫描 二维轴向成像特性实验

周毅 李琦

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** 太赫兹双轴反射式共焦扫描成像技术可穿透非极性非金属材料并实现高分辨三维成像,因此具有广泛的研究和应用价值;其二维成像质量与物体轴向位置有很大关系。利用 2.52 THz 双轴反射式共焦扫描成像系统进行了物体轴向位置对二维成像质量的影响实验。引入线对比度和区域对比度客观描述成像质量,主客观评价基本吻合。

**关键词** 成像系统; 太赫兹成像; 共焦显微术; 反射

**中图分类号** TN29      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.081101

## Experiment of 2.52 THz Confocal Scanning 2D Axial Imaging Properties of Dual-Axis Reflection

Zhou Yi Li Qi

*National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute  
of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China*

**Abstract** Terahertz dual-axis reflection confocal scanning imaging technique can penetrate nonpolar and non-metallic materials and then realizes high-resolution 3D imaging, thus it has wide research and application values. Its 2D imaging quality is greatly related to the axial position of the object. Experiments about the influence of the object axial position on the 2D imaging quality are carried out by utilizing 2.52 THz dual-axis reflection confocal scanning imaging system. Line contrast and area contrast are introduced to objectively evaluate the imaging quality. The subjective evaluation tallies with the objective evaluation basically.

**Key words** imaging systems; terahertz imaging; confocal microscopy; reflection

**OCIS codes** 110.6795; 180.1790; 120.5700

## 1 引言

太赫兹 (THz) 共焦扫描成像技术是将太赫兹技术和共焦扫描成像技术结合,从而提高太赫兹成像系统的分辨率,并实现三维成像,弥补传统可见光和红外成像技术不能穿透非极性非金属材料等的不足<sup>[1-7]</sup>。在已有的太赫兹共焦扫描成像研究中,几乎都采用透射成像体制<sup>[8-11]</sup>;本课题组也曾获得这一体制的成像结果<sup>[12]</sup>。

在共焦扫描成像技术中,反射成像较透射成像具有更广泛的应用价值,尤其在物体的三维几何成像方面。Lim 等<sup>[13]</sup>提出了太赫兹同轴反射式共焦扫描显微成像实验装置,所用的太赫兹源波长为 0.3 mm。另外,本课题组为了追求更高的轴向分辨率,从去年开始进行了 2.52 THz 双轴反射式共焦扫描成像实验<sup>[14]</sup>,获得了三维断层成像,横向分辨率优于 0.353 mm,轴向分辨率 0.67 mm。由于共焦扫描成像中物体轴向位置对成像结果影响较大,因此,进行物体轴向位置对太赫兹双轴反射式共焦扫描成像结果的影响的实验研究十分必要。

收稿日期: 2016-03-23; 收到修改稿日期: 2016-04-07; 网络出版日期: 2016-07-20

作者简介: 周毅 (1995—), 男, 本科生, 主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: zhouyi2016@foxmail.com

导师简介: 李琦 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: liqi2013@hit.edu.cn

本文利用文献[14]中本课题组搭建的 2.52 THz 双轴反射式共焦扫描成像装置进行了物体轴向位置对二维成像质量的影响的实验研究。

## 2 双轴反射式共焦成像原理及装置

共焦显微系统的点扩展函数(PSF)是照明透镜(IL)的 PSF 与收集透镜(CL)的 PSF 两者的乘积。在双轴反射式共焦扫描显微系统中,因为系统照明光轴和采集光轴有一定角度,使得物体受照射部分的面积明显减小,从而在横向分辨率有所下降的前提下得到比同轴反射式共焦系统更高的轴向分辨率。双轴反射式共焦扫描显微成像原理示意图,如图 1 所示。

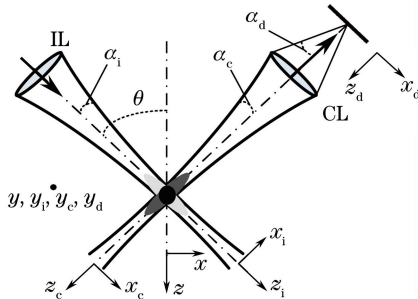


图 1 双轴反射式共焦扫描显微成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-axis reflection confocal scanning microscope imaging

图 1 中  $\alpha_i$  为照明光束在样品空间的发散角,  $\alpha_c$  和  $\alpha_d$  为采集光束在样品空间和探测空间的发散角,  $\theta$  为入射角。  $(x, y, z)$ 、 $(x_i, y_i, z_i)$  和  $(x_c, y_c, z_c)$  分别为双轴系统、照明物镜和采集透镜在样品空间的坐标,  $(x_d, y_d, z_d)$  为采集透镜在探测空间的坐标。坐标系之间的变换关系如下

$$\begin{aligned} x_i &= x \cos \theta - z \sin \theta, y_i = y, z_i = x \sin \theta + z \cos \theta, \\ x_c &= x \cos \theta + z \sin \theta, y_c = y, z_c = -x \sin \theta + z \cos \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

当单元探测器恰好处于 CL 焦点位置时,理想情况下 IL 和 CL 的 PSF 为<sup>[15-16]</sup>

$$h_i(x_i, y_i, z_i) = \iint_{-\infty}^{+\infty} P_i(x_{ip}, y_{ip}) \exp \left[ \frac{i u_i}{2} (x_{ip}^2 + y_{ip}^2) \right] \exp [i(v_{ix} x_{ip} + v_{iy} y_{ip})] dx_{ip} dy_{ip}, \quad (2)$$

$$h_c(x_c, y_c, z_c) = \iint_{-\infty}^{+\infty} P_c(x_{cp}, y_{cp}) \exp \left[ \frac{i u_c}{2} (x_{cp}^2 + y_{cp}^2) \right] \exp [i(v_{cx} x_{cp} + v_{cy} y_{cp})] dx_{cp} dy_{cp}, \quad (3)$$

式中,  $P_i(x_{ip}, y_{ip})$ 、 $P_c(x_{cp}, y_{cp})$  是 IL 和 CL 的光瞳函数;  $v_{ix}$ 、 $v_{iy}$ 、 $u_i$  是 IL 在样品空间的归一化光学坐标;  $v_{cx}$ 、 $v_{cy}$ 、 $u_c$  是 CL 在样品空间的归一化光学坐标。IL 的归一化光学坐标表示为

$$\begin{cases} v_{ix} = \frac{2\pi x_i \sin \alpha_i}{\lambda} \\ v_{iy} = \frac{2\pi y_i \sin \alpha_i}{\lambda} \\ u_i = \frac{8\pi z_i \sin^2(\alpha_i/2)}{\lambda} \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  是辐射源波长,  $\sin \alpha_i$  是 IL 在样品空间的数值孔径。CL 的归一化光学坐标同理可示。理想情况下系统的强度响应函数为<sup>[15-16]</sup>

$$I(x, y, z) = |h_i(x_i, y_i, z_i) \times h_c(x_c, y_c, z_c)|^2. \quad (5)$$

实验装置原理图如图 2 所示<sup>[14]</sup>。所用的  $90^\circ$  离轴抛物面镜通光孔径均为 38.1 mm。THz 激光经焦距为 50.8 mm 的离轴抛物面镜 P1 聚焦, 斩波器放在此焦点处。经斩波器调制的太赫兹激光入射照明镜组后以入射角  $\theta = 30^\circ$  聚焦到成像面上。反射光经收集镜组聚焦到针孔并被高莱探测器接收, 针孔固定在探测器上。照明镜组采用两个离轴抛物面镜 P2 和 P3 以及两个镀金平面镜 M1 和 M2 组成; P2 与 P1 型号相同, P3 焦距 101.6 mm, M1 与光轴夹角  $45^\circ$ , 其作用是使光路中的元件在有限的空间内更易放置, M2 与光轴夹角  $30^\circ$ 。

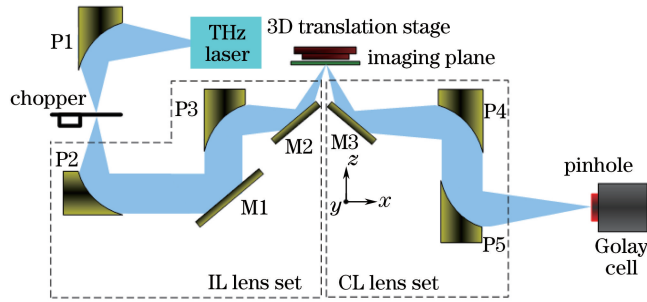


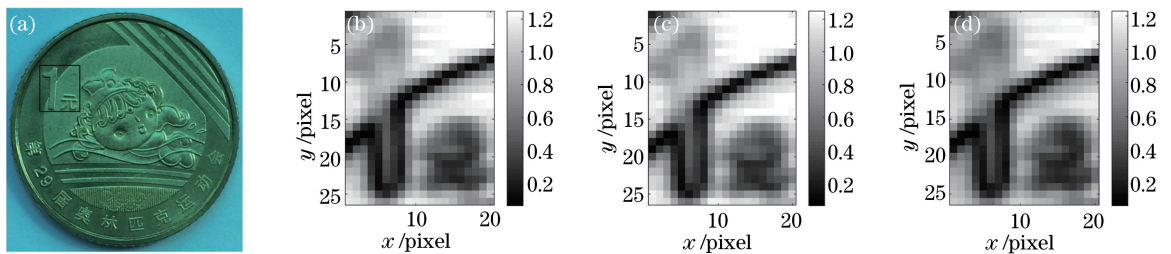
图2 共焦扫描成像装置

Fig. 2 Setup of confocal scanning imaging system

离轴抛物面镜收集镜组由两个离轴抛物面镜和一个镀金平面镜 M3 组成,探测器端离轴抛物面镜 P5 型号与 P3 相同;为了加大物体的可调空间,目标端离轴抛物面镜 P4 焦距略长为 152.4 mm, M3 与光轴夹角  $30^\circ$ 。物体置于三维平台上,  $x$  和  $y$  方向自动控制步进电机平移,  $z$  方向手动精密位移。实验通过微调物体轴向移动  $z$  来观察二维图像质量的变化。

### 3 实验结果及分析

对纪念币中包含数字“1”(分辨率约为 0.6 mm)和汉字“元”(分辨率约为 0.3 mm)的部分[图 3(a)黑色方框内]进行了成像实验。微调物体轴向移动  $z$ (单位 mm),研究物体处于不同轴向位置的成像结果。成像结果如图 3(b)~(d)所示,图像尺寸均为  $26 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$ ,扫描步长为 0.3 mm,图 3(d)较为清晰,此时物体所处位置被设为原点。从图 3(b)~(d)可知,物体轴向位置对成像质量有较大影响。

图3 纪念币在不同轴向位置  $z$  的成像结果。(a)照片;(b)  $z=0.12 \text{ mm}$ ;(c)  $z=0.07 \text{ mm}$ ;(d)  $z=0$ Fig. 3 Imaging results of commemorative coin at different axial positions  $z$ . (a) Photo;(b)  $z=0.12 \text{ mm}$ ; (c)  $z=0.07 \text{ mm}$ ; (d)  $z=0$ 

为了更细致地分析物体轴向位置对成像质量的影响,图 4 给出了图 3(b)~(d)中第 20 行像素及第 17 列像素的灰度值分布。行扫描线从左至右依次经过暗环形棱,亮背景,“1”的暗边缘、亮区和暗边缘,亮背景,“元”,亮背景。这与图 4(a)中各扫描线的变化趋势基本一致:上升(第 1 到第 2 像素),下降(第 2 到第 5 像素),上升(第 5 到第 6 像素),下降(第 6 到第 8 像素),上升(第 8 到第 10 像素),下降(第 10 到第 17 像素),上升(第 17 到第 20 像素)。列扫描线从上至下依次经过亮背景,暗环形棱,亮背景,“元”,亮背景。图 4(b)中各扫描线也有大致吻合的变化趋势:基本不变(第 1 到第 5 像素),下降(第 5 到第 9 像素),上升(第 9 到第 14 像素),下降(第 14 到第 23 像素),上升(第 23 到第 26 像素)。

引入线对比度  $R$  定量描述图 4 中各扫描线的变化幅度,它定义为各扫描线的最大值和最小值的差值除以最大值。表 1 给出了图 4 中各扫描线的线对比度,  $R_1$  表示行扫描线的线对比度,  $R_2$  表示列扫描线的线对比度。轴向位置为 0.07 mm 的  $R_1$  最大,轴向位置为 0 的  $R_2$  最大。轴向位置为 0.07 mm 的  $R_2$  明显偏离了另两个位置的值,这可能是噪声导致,所以之后分析中不考虑  $R_2$ 。以轴向位置为 0 的线对比度  $R_1$  为基准,计算相对误差,结果如括号中所示。可得对最小细节约为 0.6 mm(由于扫描步长为 0.3 mm,与“元”的分辨率相等,所以它的成像效果不太理想,因此选用“1”作为评判标准)的物体成像时,物体轴向位置在  $0 \sim 0.12 \text{ mm}$  时成像效果基本相近,线对比度相对误差小于 4%。

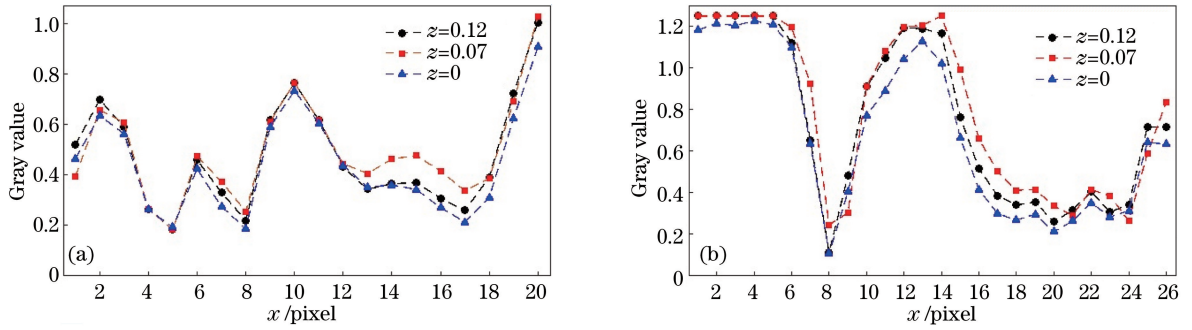


图4 图3中(b)~(d)的线扫描图。(a)第20行;(b)第17列

Fig. 4 Line scans of Fig. 3 (b)~(d). (a) 20th row; (b) 17th column

表1 图4中各扫描线的线对比度 $R_1$ (行)和 $R_2$ (列)Table 1 Line contrasts  $R_1$ (row) and  $R_2$ (column) of line scans in Fig. 4

Number	Z /mm	$R_1$	$R_2$
1	0.12	0.8161 (2.91%)	0.9097
2	0.07	0.8206 (3.48%)	0.8032
3	0	0.7930	0.9122

为了更细致地分析区域部分,引入区域对比度 $C$ 评价成像质量,表达式为

$$C = \frac{M_1 - M_2}{M_1}, \quad (6)$$

式中, $M_1$ 表示背景的均值, $M_2$ 表示前景的均值。

为评价图3(b)~(d)的成像质量,根据图3(b)~(d)选取4个区域(如图5所示)计算区域对比度。区域I和II分别作为背景和前景,计算得到均值 $M_1$ 、 $M_2$ 及区域对比度 $C_1$ ,用于评价“1”的成像质量;区域III和IV分别作为背景和前景,计算得到均值 $M_3$ 、 $M_4$ 及区域对比度 $C_2$ ,用于评价环形棱的成像质量。计算结果如表2所示,以物体轴向位置为0的结果为基准,计算另两个位置区域对比度的相对误差,结果如括号中所示。可知,物体轴向位置为0时区域对比度最高,图像质量最好。另得,对最小细节约为0.6 mm的物体成像时,物体轴向位置在0~0.12 mm时成像效果基本相近,区域对比度相对误差小于5%。

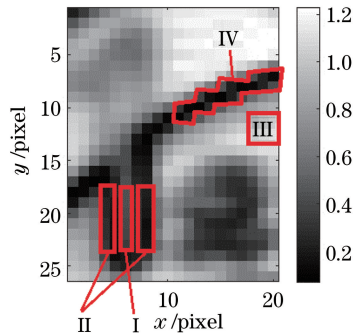


图5 图3(b)~(d)区域对比度评价选定的4个区域

Fig. 5 Four areas chosen for area contrast evaluations from Fig. 3 (b)~(d)

表2 图3(b)~(d)的区域对比度评价结果

Table 2 Area contrast evaluation results of Fig. 3 (b)~(d)

Number	Z /mm	$M_1$	$M_2$	$C_1$	$M_3$	$M_4$	$C_2$
1	0.12	0.4298	0.2489	0.4209 (-3.64%)	1.1959	0.1912	0.8401 (-0.77%)
2	0.07	0.4520	0.2637	0.4166 (-4.62%)	1.2093	0.2284	0.8111 (-4.19%)
3	0	0.4068	0.2291	0.4368	1.0926	0.1676	0.8466

综合考虑以上各评价结果可得:对最小细节约为0.6 mm的物体成像时,物体轴向位置在0~0.12 mm时成像效果基本相近,相对误差小于5%。

为深入研究物体轴向位置对成像效果的影响,进行了理论计算。利用(2)、(3)、(5)式,分别令 $z$ 的值为0、0.07和0.12, $y$ 的值为0,其他参数设定均与实验装置一致,可以得到物体处于不同轴向位置 $z$ 时成像系统的横向( $x$ )响应。同样地,分别令 $z$ 的值为0、0.07和0.12, $x$ 的值为0,其他参数设定均与实验装置一致,可以得到物体处于不同轴向位置 $z$ 时成像系统的纵向( $y$ )响应。图6给出了计算结果。可以看出,随着轴向位置的增大,响应曲线整体下降,但下降幅度不大,对成像质量影响较小。

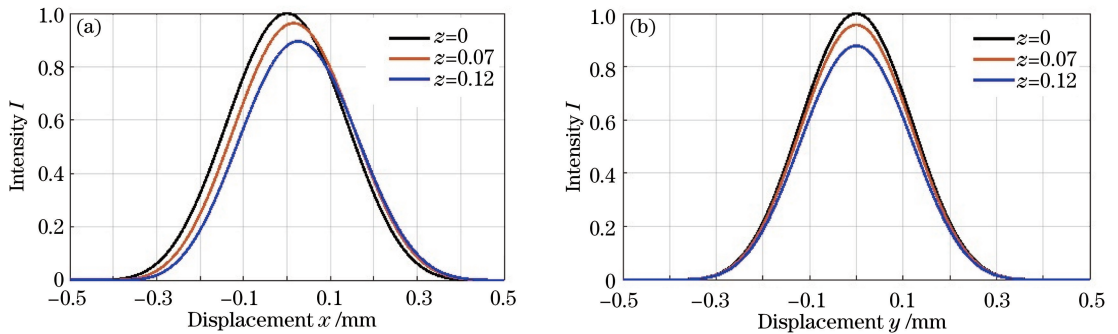


图6 物体处于不同轴向位置时的响应曲线。(a)横向;(b)纵向

Fig. 6 Response curves at different axial positions of the object. (a) Lateral; (b) longitudinal

图7给出了物体处于不同轴向位置时的归一化响应曲线。从图中可以看出,当物体有一定轴向偏移时,横向响应特性曲线相对无偏移( $z=0$ )时的特性曲线有微小移动,分别是0.014 mm( $z=0.07$ )、0.025 mm( $z=0.12$ ),曲线主瓣的形状基本不变,纵向响应特性曲线形状基本不变。这说明,轴向位置在0~0.12 mm时成像效果基本相近,与实验结果一致。

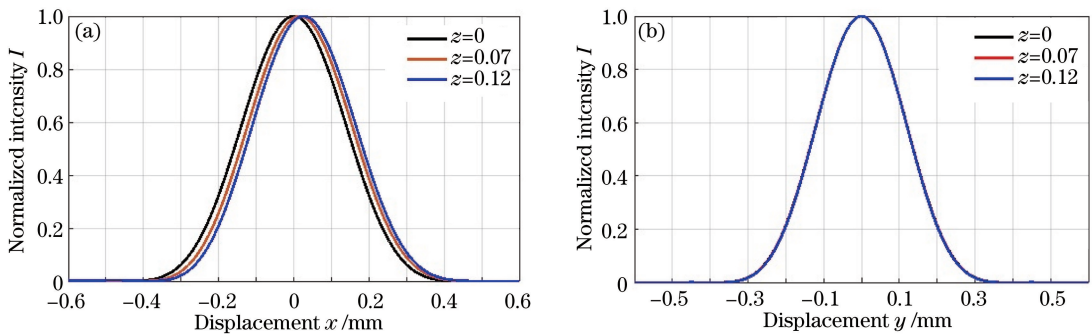


图7 物体处于不同轴向位置时的归一化响应曲线。(a)横向;(b)纵向

Fig. 7 Normalized response curves at different axial positions of the object. (a) Lateral; (b) longitudinal

## 4 结 论

利用双轴反射式2.52 THz共焦扫描成像实验装置进行了物体轴向位置对二维成像质量的影响实验。引入线对比度 $R$ 客观描述行扫描线及列扫描线的变化幅度,区域对比度 $C$ 评价数字“1”及环形棱的成像效果。线对比度和区域对比度评价结果基本一致,与主观评价大体吻合,实验结果与理论计算结果一致。综合考虑各评价结果,可得出以下结论:对最小细节约为0.6 mm的物体成像时,物体轴向位置在0~0.12 mm时成像效果基本相近,相对误差小于5%。

## 参 考 文 献

- Siciliani U, Xu J, Masini L, *et al.* Terahertz confocal microscopy with a quantum cascade laser source[J]. Opt Express, 2012, 20(20): 21924-21931.
- Wang Hanqi, Liu Xin, Deng Chao, *et al.* An antenna can be used for terahertz scanning imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0711004.
- 王汉奇, 刘鑫, 邓朝, 等. 一种可用于太赫兹扫描成像的天线[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0711004.

- 3 Li Xinghuo, Zhuo Hongbin, Zou Debin. Study of ultra-intense laser driven solid line emitting terahertz wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0314003.  
李星火, 卓红斌, 邹德滨. 超强激光驱动天线靶的太赫兹辐射物理特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0314003.
- 4 Wang Dayong, Huang Haochong, Zhou Xun, *et al.* Phase-contrast imaging by the continuous-wave terahertz in-line digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0809003.  
王大勇, 黄昊冲, 周 逊, 等. 连续太赫兹波同轴数字全息相衬成像[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0809003.
- 5 Li Wan, Zeng Shuguang, Liu Yan. Numerical simulation of terahertz wave propagating in turbulent atmosphere using the random phase screen method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080104.  
李 婉, 曾曙光, 刘 雁. 随机相位屏法数值模拟太赫兹波在湍流大气中的传输[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080104.
- 6 Liu Jing, Shen Jingling, Zhang Cuilin. Progress of terahertz polymer waveguides[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080003.  
刘 婧, 沈京玲, 张存林. 太赫兹聚合物波导研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080003.
- 7 Jiang Yuesong, Zhang Zhiguo, Hua Houqiang. RCS simulation of targets in THz band based on fast physical optics algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1211001.  
江月松, 张志国, 华厚强. 基于快速物理光学法的太赫兹目标 RCS 计算[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1211001.
- 8 Liu Y, Shen Y, Zhao G. Terahertz polarization imaging based on the continuous wave terahertz radiations[C]. *SPIE*, 2015, 9622: 962209.
- 9 Salhi M A, Pupeza I, Koch M. Confocal THz laser microscope[J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2010, 31(3): 358-366.
- 10 Zinovev N, Andrianov A. Confocal terahertz imaging[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 011114.
- 11 Hwang Y, Ahn J, Mun J, *et al.* In vivo analysis of THz wave irradiation induced acute inflammatory response in skin by laser-scanning confocal microscopy[J]. *Opt Express*, 2014, 10(22): 11465-11475.
- 12 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui, *et al.* Preliminary study on THz confocal imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(s1): s100402.  
丁胜晖, 李 琦, 姚 睿, 等. 太赫兹共焦成像的初步研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(s1): s100402.
- 13 Lim M, Kim J, Han Y, *et al.* Perturbation analysis of terahertz confocal microscopy[C]. *IEEE*, 2008, 4665805.
- 14 Li Q, Zhou Y, Yang Y F, *et al.* 2.52 Terahertz dual-axis reflection confocal scanning microscope[J]. *J Opt Soc Am A*, 2016, 33(4): 637-641.
- 15 Gu Min. Principles of three-dimensional imaging in confocal microscopes[M]. Beijing: New Times Press, 2000: 14-78.  
顾 敏. 共焦显微术的三维成像原理[M]. 北京: 新时代出版社, 2000: 14-78.
- 16 Jiang Qin, Qiu lirong, Zhao Weiqian, *et al.* Effect of point detector position in dual-axes confocal microscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(8): 081201.  
江 琴, 邱丽荣, 赵维谦, 等. 点探测器位置对双轴共焦显微技术的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(8): 081201.