

基于光学设计软件的太赫兹面阵成像系统性能分析

李 琦 夏志伟 姚 睿 丁胜晖 王 骥

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

摘要 太赫兹成像是太赫兹技术的重要发展方向,其中具备实时成像能力的面阵成像系统引起了广泛的研究兴趣。在成像系统的设计中需要尽可能地减小能量损耗,由于离轴抛物面镜具有较小的能量损耗,且便于系统设计,因此在太赫兹成像系统的设计中常被用到。但离轴抛物面镜的引入会带来一定的畸变以及装调困难。利用光学设计软件 ZEMAX,对一种具有离轴抛物面镜的太赫兹面阵成像系统进行了成像性能分析,特别研究了接收部分中离轴抛物面镜装调误差对成像质量的影响。仿真结果表明,理想情况下,系统分辨率约为 0.5 mm 且网格畸变只有 0.069%;该系统容许光学接收部分的离轴抛物面镜最大倾斜角 1.1° ,最大偏心距 6.5 mm。

关键词 成像系统;太赫兹;面阵探测;离轴抛物面镜

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0411001

Analysis of a Terahertz Array Imaging System Using Optical Design Software

Li Qi Xia Zhiwei Yao Rui Ding Shenghui Wang Qi

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

Abstract Nowadays, terahertz (THz) imaging is an important research focus among the development of THz techniques. And imaging systems based on array detectors which have real time imaging capability have attracted lots of research interests. It is essential to reduce power losses during the system design. Owing to the low energy losses and design convenience it brings, off-axis parabolic mirrors have been frequently used in many THz imaging systems. A 2D THz array imaging system comprised of off-axis parabolic mirrors is analyzed using an optical design software ZEMAX. The deterioration of the image quality caused by the misalignment of off-axis parabolic mirror in the receiving part is investigated. The simulation results show that the image resolution can reach 0.5 mm for the ideal case, and the grid distortion is 0.069%. The system has a tolerance of 1.1° for the misalignment angle of the off-axis parabolic mirror. The tolerance for the decenter error is 6.5 mm.

Key words imaging systems; terahertz; array detection; off-axis parabolic mirror

OCIS codes 110.0110; 110.6795; 040.1240; 220.0220; 220.1250

1 引 言

近年来对太赫兹 (THz) 成像的研究报道较多^[1~6]。相比于利用单元探测器的点扫描成像,利用面阵探测器的面阵成像具有单幅图像像素多、成像速度快、可以实时成像等优点。美国麻省理工学院 Wei 等^[7,8]于 2005 年进行了 2.52 THz 波段的 160×120 面阵透射成像,获得了较为清晰的图像,系统的分辨率极限为 1.5 mm;并于 2006 年进行了

4.3 THz 的 320×240 面阵透射和反射成像。国内的深圳大学进行了 1.89 THz 面阵透射成像^[9];哈尔滨工业大学在 1.63, 2.45 和 2.52 THz 波段进行了面阵成像^[10~14],也进行了 2.52 THz 面阵扫描成像^[15],采用了多种不同光路;其中文献^[14]所搭建的 2.52 THz 成像系统由 3 个离轴抛物面镜和一个聚乙烯透镜构成,经实测分辨率在 0.4~0.6 mm 之间。

收稿日期: 2010-10-25; 收到修改稿日期: 2010-12-02

作者简介: 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

在目前已发表的研究工作中,聚乙烯等塑料材料制成的球面透镜以及非球面透镜都常被用于太赫兹光束的整形与变换。但由于这些材料对太赫兹辐射都具有一定的吸收损耗,而太赫兹成像的应用往往要求系统能提供较大的动态范围,这就要求系统具有较小的能量损耗。此外,由于这些材料往往对可见光不透明,从而对光路的设计以及搭建提高了要求。为了减小系统的能量损耗,且为了便于系统设计,离轴抛物面镜也被大量地运用于太赫兹成像系统的设计及搭建。采用 90° 离轴抛物面镜在理论上可以消除球差的影响^[16],得到高质量的光斑,但是调整难度大,对光轴失准的敏感度高,细微的偏差会引发像散。国外已有利用 ZEMAX 光学设计软件对 THz 逐点扫描成像系统性能的研究报道^[17,18]。由于面阵成像较逐点扫描成像光斑增大,光学系统特性对成像质量的影响更为重要,但至今尚未见到利用光学设计软件对 THz 面阵成像系统性能分析的报告。因此,本文对文献[14]中搭建的面阵成像系统中光学接收部分的光学特性进行了仿真研究,利用 ZEMAX 光学设计软件重点讨论了其中的离轴抛物面镜装调误差对成像质量的影响。

2 成像系统原理

实验装置如参考文献[14]中所介绍,采用 SIFIR-50 CO₂ 激光抽运连续太赫兹激光器作为成像光源,输出频率 2.52 THz。采用 Pyrocam III 热像仪作为面阵探测器,成像帧频为 48 Hz,图像尺寸 124 pixel×124 pixel,成像系统如图 1 所示。P1, P2, P3 均为离轴抛物面镜, L 为聚乙烯透镜,焦距如表 1 所示。P1 和 P2 构成 THz 光学发射部分, P3 与 L 构成光学接收部分。

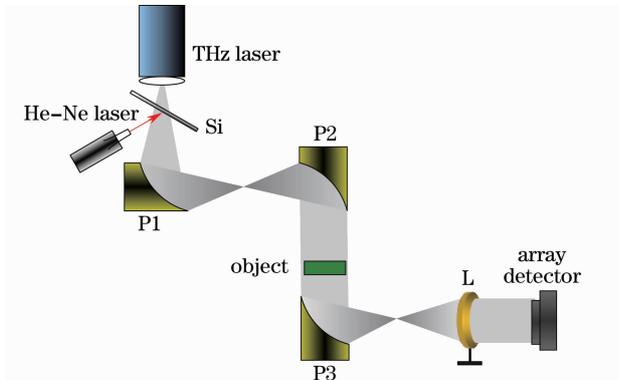


图 1 二维面阵透射成像装置

Fig. 1 Experimental setup for 2D imaging system

表 1 抛物面镜和透镜的焦距

Table 1 Focal length of parabolic mirrors and lenses

	Focal length /cm
P1	5.08
P2	10.16
P3	15.24
L	12

考虑 THz 激光光斑呈高斯分布,可通过公式

$$\begin{cases} \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} \\ f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \\ \theta_0 = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \end{cases} \quad (1)$$

进行理论计算。式中 $\omega(z)$ 代表与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径; ω_0 为高斯光束的腰斑半径; f 为共焦参数; θ_0 为远场发散角。得到的光束在 P2 和 P3 之间焦点附近(± 10 cm)的分布如图 2(a)所示,焦平面附近光束分布如图 2(b)所示。可见,近似为平行光。

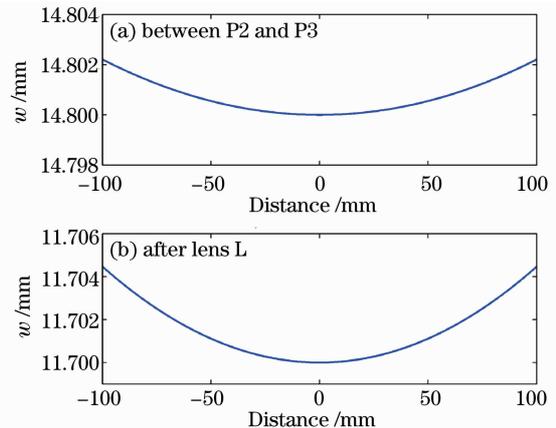


图 2 理论计算的光斑分布曲线

Fig. 2 Calculated result of beam radius distribution

3 基于 ZEMAX 软件的成像性能分析

3.1 理想设计分析

使用 ZEMAX 对目标到面阵探测器这段由离轴抛物面镜 P3 和聚乙烯透镜 L 组成的光学接收部分进行分析。

入射光为准平行光,视场 $\pm 0.15^\circ$,入瞳位置为目标的实际摆放位置,入瞳大小为入射光束直径 29.6 mm, L 厚度 7 mm,聚乙烯材料,折射率 1.52,由于产品说明书中没有此透镜两个球面的具体参

数,因此根据其折射率、焦距以及厚度进行优化,优化结果为两个球面的曲率半径为 123.6 mm,由此在 ZEMAX 中建立的模型如图 3 所示。P3 和 L 共焦,两者构成的系统本质上是一个无焦的望远系统,采用对望远系统进行分析的方法。

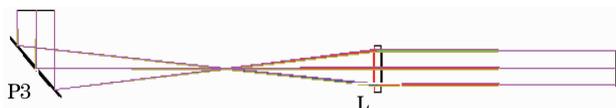


图 3 ZEMAX 建模图

Fig. 3 Illumination path in ZEMAX

无焦系统是否能够达到衍射极限可以通过与衍射极限的调制传递函数(MTF)曲线相比较来进行判断,如图 4 所示。

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

式中 M 为调制度, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为最大和最小光强。图 4 给出了此系统的方波调制传递函数曲线。从图中可以看到,各个视场的 MTF 曲线已经与衍射极限时系统的 MTF 曲线基本吻合,此系统已经非常接近衍射极限。利用此 MTF 曲线也可获得系统的分辨率。按最小可分辨对应的方波 MTF 等于 0.3 的关系准则,在理想情况下,此系统分辨率为 1.03 lp/mm(即 0.485 mm)。已有的成像实验结果与此计算相符合。

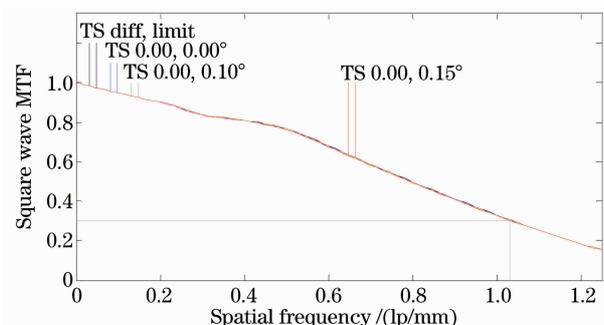


图 4 调制传递函数曲线

Fig. 4 Square wave MTF curve

另外,通过观察图 5 中不同视场处像方的弥散斑(圆圈中的点阵集合),其尺寸均小于艾里斑(圆圈)尺寸,也表明其可以达到衍射极限。

观察网格畸变(见图 6),只有 0.069%,因此,目标经过系统进行成像的变形较小。

3.2 光学接收部分的离轴抛物面镜装调误差分析

在实验中,由于物距、各元件之间的间距以及透镜的偏心或倾斜对系统的影响较小,且离轴抛物面镜摆放在水平工作台上,在子午方向的倾斜或偏心误差很小,因此,着重研究弧矢方向的离轴抛物面镜

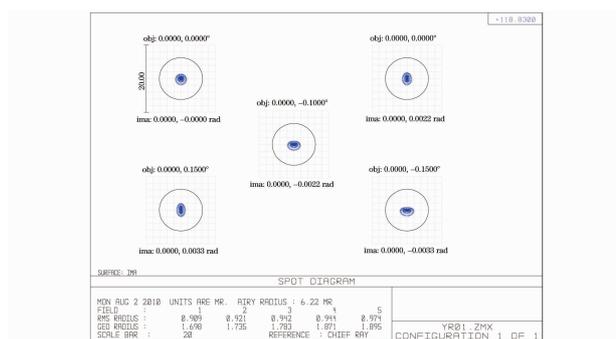


图 5 点阵图

Fig. 5 Light lattice

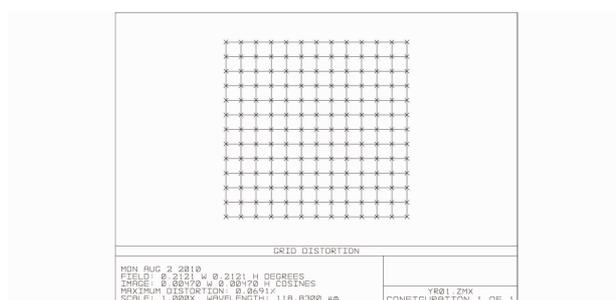


图 6 网格畸变

Fig. 6 Grid distortion

P3 的倾斜和偏心对系统的影响。

在本系统中,如果离轴抛物面镜 P3 倾斜角绝对值大于 1.1°,偏心距绝对值大于 6.5 mm 时,将导致光路偏折过大,使光线溢出而落在透镜的有效口径外,不能进入探测器。图 7 显示了接收部分离轴抛物面镜 P3 倾斜角为 1.1°的光路。



图 7 P3 倾斜角为 1.1°的光路图

Fig. 7 Illumination path with P3 misalignment angle of 1.1°

图 8 为系统轴上视场的点列图随离轴抛物面镜 P3 倾斜角的变化图,随着 P3 倾斜角偏差的增大,点列图的大小也急剧增大,如倾斜角达到 1.1°时,均方根(RMS)半径增大为无倾斜时的 4.95 倍。

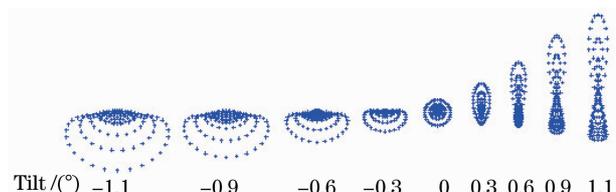


图 8 轴上视场的点列图随 P3 倾斜角的变化

Fig. 8 Spot diagram for various misalignment angle of P3

图 9 为轴上视场的点列图随离轴抛物面镜 P3 偏心距的变化图,其对系统的影响较倾斜角的影响要小,当偏心距达到 6.5 mm 时,RMS 半径增大为无偏心时的 3.01 倍。

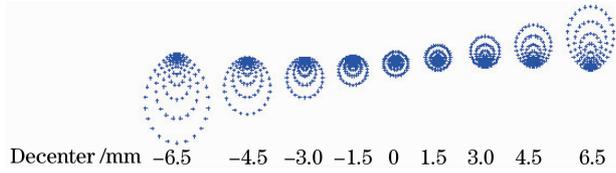


图 9 轴上视场的点列图随离轴抛物面镜偏心距的变化
Fig. 9 Spot diagram for various decenter error of off-axis parabolic mirror

图 10,11 分别为系统的分辨率随 P3 的倾斜角和偏心距的变化曲线,从图中可以看出,倾斜或偏心的存在,都将会导致最小分辨率的增大。P3 倾斜角为 1.1° 时,系统能达到的分辨率为 0.84 lp/mm (0.595 mm),见图 12。

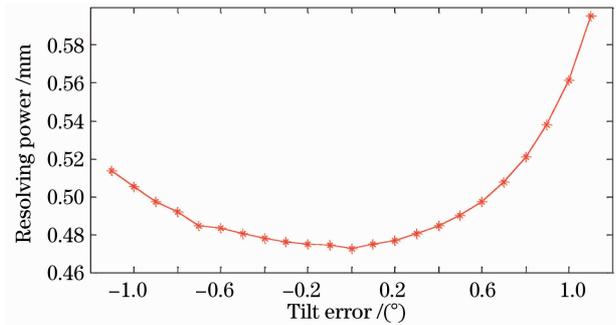


图 10 分辨率随 P3 倾斜角的变化
Fig. 10 Relationship of resolution and P3 misalignment angle

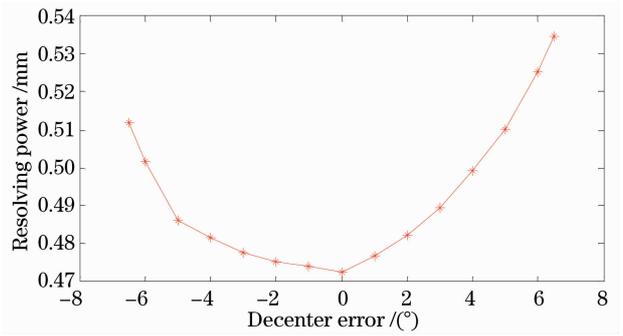


图 11 分辨率随 P3 偏心距的变化
Fig. 11 Relationship of resolution and P3 decenter error

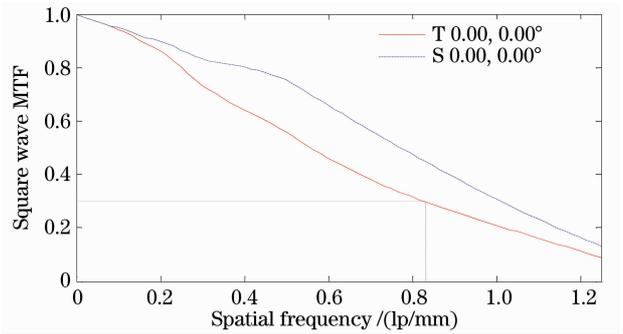


图 12 P3 倾斜角为 1.1° 时的轴上方波 MTF 曲线
Fig. 12 Square wave MTF curve for P3 misalignment angle of 1.1°

离轴抛物面镜 P3 的倾斜或偏心导致系统的放大率在子午方向和弧矢方向有所差异,这两个方向上的畸变量也明显不同(如图 13 所示)。如倾斜角为 1.1° 时,子午方向上的最大畸变量为 0.534%,而弧矢方向上的最大畸变量为 5.071%;偏心距为 6.5 mm 时,子午方向上的最大畸变量为 0.556%,而弧矢方向上的最大畸变量为 3.987%。

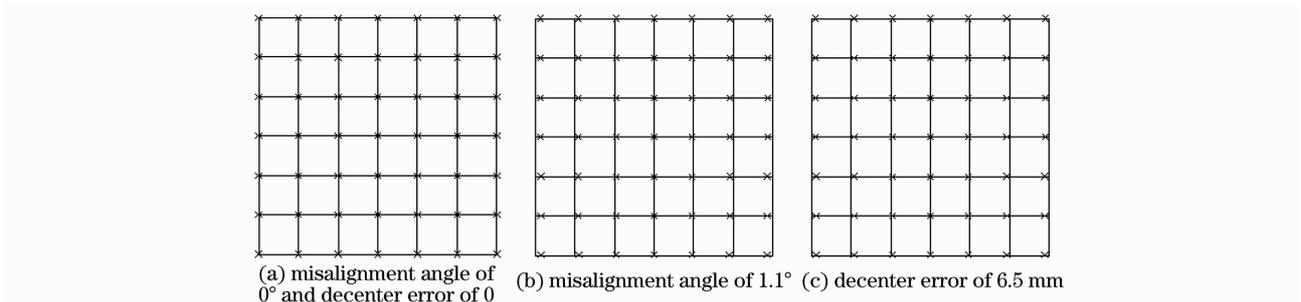


图 13 P3 倾斜或偏心对畸变的影响
Fig. 13 Distortion caused by P3 misalignment

4 结 论

对具有离轴抛物面镜的 THz 面阵成像系统中的光学接收部分进行了较详细的光学特性分析。离轴抛物面镜的引入,能够有效减小系统的能量损耗,

且便于复杂系统的设计及搭建。利用 ZEMAX 的仿真分析,对实际系统的设计搭建提供了指导,且对系统的性能做出了预期估计。

分析结果表明:1)已设计的成像系统,在理想情

况下网格畸变只有 0.069%, 分辨率约为 0.5 mm, 已有成像实验已证明系统分辨率介于 0.4 mm 和 0.6 mm 之间; 二者较一致。2) 光学接收部分中离轴抛物面镜 P3 的倾斜和偏心对系统成像质量有较大影响, 系统容许 P3 最大倾斜角 1.1°, 最大偏心距 6.5 mm; 在倾斜角为 1.1° 时, 系统能达到的分辨率约为 0.6 mm, 弧矢方向上的最大畸变量为 5.071%。

参 考 文 献

- 1 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858
杨昆, 赵国忠, 梁承森等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- 2 Deng Chao, Xing Chunfei, Lü Mo *et al.*. CW THz standoff imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 50~52
邓朝, 邢春飞, 吕默等. 连续太赫兹波远距离成像[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 50~52
- 3 P. C. M. Planken, H. J. Bakker. Towards time-resolved THz imaging[J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **78**(4): 465~469
- 4 Hua Zhong, Nick Karpowicz, Jason Partridge *et al.*. Terahertz wave imaging for landmine detection[C]. *SPIE*, 2004, **5411**: 33~44
- 5 Zhang Liangliang, Zhang Yan, Zhong Hua *et al.*. Terahertz focal-plane multiwavelength phase imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 276~279
张亮亮, 张岩, 钟华等. 太赫兹焦平面多波长相位成像[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 276~279
- 6 T. Kleine-Ostmann, P. Knobloch, M. Koch *et al.*. Continuous-wave THz imaging [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(24): 1461~1463
- 7 Alan Wei Min Lee, Qing Hu. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2563~2565
- 8 Alan W. M. Lee, Benjamin S. Williams, Sushil Kumar *et al.*. Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320×240 microbolometer focal-plane array[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2006, **18**(13): 1415~1417
- 9 Jun Yang, Shuangchen Ruan, Min Zhang. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by a pyroelectric camera[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 29~31
- 10 Rui Yao, Qi Li, Qi Wang. 1.63-THz transmission imaging experiment by use of a pyroelectric camera array[C]. *SPIE*, 2009, **7277**: 72770D
- 11 Rui Yao, Qi Li, Shenghui Ding *et al.*. Investigation on 2.45-THz array transmission imaging[C]. *SPIE*, 2009, **7385**: 73850P
- 12 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 275~277
李琦, 姚睿, 单纪鑫等. 基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 275~277
- 13 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**(s1): 84~88
李琦, 姚睿, 单纪鑫等. 2.5 THz 面阵实时成像及图像处理初步研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 84~88
- 14 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
姚睿, 丁胜晖, 李琦等. 2.52 THz 面阵透射成像系统的改进及分辨率分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0111001
- 15 Q. Li, S. H. Ding, R. Yao *et al.*. Real-time, THz scanning imaging by use of a pyroelectric array camera and image denoising [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(11): 2381~2386
- 16 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 682~687
罗曦, 陈培峰, 王英. 离轴 90° 抛物面镜焦斑特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 682~687
- 17 Claudia Brückner, Gunther Notni, Andreas Tünnermann. Optimal arrangement of 90° off-axis parabolic mirrors in THz setups [J]. *Optik*, 2010, **121**(1): 113~119
- 18 Claudia Brückner, Boris Pradarutti, Ralf Müller *et al.*. Design and evaluation of a THz time domain imaging system using standard optical design software [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4994~5006