

长焦深、高分辨激光加工聚焦透镜

王仲勋^{1,2} 潘一鸣¹ 尹韶云^{2*} 邓启凌¹ 史立芳¹ 杜春雷² 吴钦章¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
² 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

摘要 受限于传统激光加工透镜焦深与焦斑大小的矛盾关系, 分辨率与加工深度很难同时获得提升。提出一种通过对不同焦距的非涅耳透镜相位采样组合形成长焦深、高分辨激光加工聚焦透镜的设计方法。针对 10.6 μm 的激光加工波长, 采用自编的程序设计了一个通光口径为 11 mm、中心焦距为 47 mm 的激光纸张打孔透镜, 并开展了相应的实验加工与测试。结果表明, 该透镜与具有相同口径和焦距的传统透镜相比, 焦深增加了 2 倍, 并且在整个焦深范围内焦斑尺寸保持着与普通透镜相近的分辨率。该透镜实现简单, 为大深度、高分辨的激光加工提供了可行的途径, 在激光加工领域有较好的应用前景。

关键词 光学制造; 长焦深; 高分辨; 激光加工; 衍射元件

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0222004

Laser Processing Lens of Long Focal Depth and High Resolution

Wang Zhongxun^{1,2} Pan Yiming¹ Yin Shaoyun² Deng Qiling¹

Shi Lifang¹ Du Chunlei² Wu Qinzhong¹

(¹ *Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*
² *Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chongqing 401122, China*)

Abstract Limited by the contrary relationship of the focal depth and the focal size, it is hard to enlarge the fabrication depth while keeping high resolution for laser processing. To solve this problem, a design method for realizing Fresnel lens with long focal depth and small focal size by phase sampling and combination is proposed. A laser processing lens for drilling holes on paper with aperture of 11 mm and center focal length of 47 mm, working at the wavelength of 10.6 μm , is designed by using a homemade program. Then it is fabricated and tested. The experiment results show that, compared with traditional lens with the same aperture, this lens has a 2 times longer focal depth, and the focal size is similar to that of the traditional lens along the entire focal depth. This lens is simple to realize and it provides a feasible way to achieve long focal depth and high resolution synchronously. The advantages make it with great application potential in the field of laser processing.

Key words optical fabrication; long focal depth; high resolution; laser processing; diffractive optical elements

OCIS codes 220.4000; 140.3390; 050.1965; 050.1380

1 引 言

近年来,随着大功率激光器性能不断地提高,激光切割^[1~3]、钻孔^[4]与精密加工^[5]等应用迅速发展。然而,传统透镜焦深和焦斑存在制约关系,增加焦深必然引起焦斑尺寸的扩大^[6,7],在很多情况下无法满足激光加工的要求,故对于长焦深、高分辨的聚

焦透镜有着强烈的需求。

目前,已经有很多种方法用来增加聚焦透镜的焦深。1954年,McLeod^[8]提出了轴锥镜的概念,平面波入射到此类器件后变成锥面波,出射后可以在很大的范围内保持光斑尺寸基本不变。然而,形成的锥面波在轴上的光强随传播距离呈线性趋势增

收稿日期: 2012-08-27; **收到修改稿日期**: 2012-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(11174281)资助课题。

作者简介: 王仲勋(1972—),男,硕士,研究员,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: wzx@cigit.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail: ysy@cigit.ac.cn

长,并且伴有激烈振荡,不适用于激光加工。1987年,Durnin等^[9]提出了无衍射光束,可在较大范围内实现高分辨的光束传输,然而这类光束在焦深范围内光强振荡剧烈,给使用带来了很大的不便。为解决光强沿轴强度变化的问题,Sochachi等^[10]提出利用能量守恒法来设计对数光锥实现无衍射光束,并采用切趾法对强度的振荡进行消除^[11],这一方法有效改进了焦深范围内的能量分布,但能量利用率太低,对于激光加工非常不利。

采用轴锥镜与无衍射光束的方法可以将焦深增加几十上百倍,由于能量的分散使得光斑中心的强度大幅降低。在实际的激光加工应用中,往往只需要将焦深在普通透镜的基础上增加几倍即可满足要求。利用晶体的双折射效应,Sanyal等^[12]采用双透镜实现了焦深的扩展,但这一系统需要使用偏振片,可承受的功率受到限制,并且由于只有两个焦点,焦深的增加非常有限。近年来,利用二元光学元件或特殊设计的波带片来实现长焦深光学元件逐渐成为研究的热点^[13~18],这一方法将轴上光强分布作为目标函数,通过采用优化算法求解衍射面的相位分布函数或光强分布函数来获得长焦深。然而,这一方法求解过程复杂,很容易陷入局部最优。为解决以上问题,本文提出对不同焦距的等孔径菲涅耳透镜采样组合形成多焦点菲涅耳透镜的方法以实现长焦深激光加工透镜,该方法具有物理概念清晰、设计简单的特点。对其设计思想与方法进行详细阐述,并对设计结果开展了实验研究。

2 设计方法

假设要设计的长焦透镜中心焦距为 f ,口径为 D ,需要的焦深为 Δf 。首先设计 M 个焦距分别为 f_1, f_2, \dots, f_M 的菲涅耳透镜,这些透镜的口径与要设计的长焦透镜的相同。各透镜的焦距满足

$$f - \Delta f/2 \leq f_1 < f_2 < \dots < f_M \leq f + \Delta f/2, \quad (1)$$

式中焦距为 f_M 的菲涅耳透镜距离其光轴 r 处的相位表达式 $\varphi_M(r)$ 为

$$\varphi_M(r) = 2p\pi + \frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{r^2 + f_M^2} - f_M), \quad (2)$$

式中 p 为保源 $\varphi_M(r)$ 在 $(0, 2\pi)$ 变化的一合适的整数。

将长焦深透镜沿径向划分为 N 个环带(N 是 M 的整数倍),其中,第 $1, M+1, \dots, N-M+1$ 个环带的相位分布取焦距为 f_1 的菲涅耳透镜的对应区域的相位分布,第 $2, M+2, \dots, N-M+2$ 的环带相位分布取焦距为 f_2 的菲涅耳透镜相同区域相位,依此类推。长焦深元件的相位函数可表示为

$$\phi(r) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left[\frac{r}{r_n - r_{n-1}} - \frac{r_n + r_{n-1}}{2(r_n - r_{n-1})}\right] \varphi_{\text{mod}(n, M)}, \quad (3)$$

式中 $\text{rect}()$ 为矩形函数, $\text{mod}()$ 为求余函数。为了便于理解,图 1 给出了 $M=3$ 时的情况,实线-虚线所夹的区域(黄色区域)其相位调制取自焦距为 f_1 的菲涅耳透镜,虚线-点虚线之间的区域(蓝色区域)其相位调制函数来自焦距为 f_2 的菲涅耳透镜对应的区域,点虚线-实线之间的区域(棕色区域)来自焦距为 f_3 的菲涅耳透镜(彩色图请见网络电子版)。

传统的多焦点长焦深二元透镜从中心到边缘不同的环带对应不同的焦距,中心区域由于数值孔径 D/f 较小,形成的聚焦光斑尺寸较大;边缘区域的 D/f 较大,形成的衍射光斑尺寸较小,导致光斑尺寸在焦深范围内发生明显的变化。该方法设计的长焦深透镜由于每个环带的间距很小,每个焦点对应的通光孔径的尺寸大致相当, D/f 值几乎相同[如图 1(b)所示],因此,形成的聚焦光斑在焦深范围内保持相近的分辨率,有效克服了传统多焦点透镜的缺陷。

基于上述设计思想,针对 $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ 的波长,通光孔径 $D=11 \text{ mm}$, $f=47 \text{ mm}$ 的激光纸张打孔透镜进行了长焦深聚焦透镜设计,以替换现有的激光打孔透镜。由于激光打孔机的振动以及纸张的不平整,现有的聚焦透镜在实际的使用中无法满足要求,需要增加焦深一倍以上,且要求在焦深范围内沿轴方向的光强变化小于 20%。

采用上述方法设计长焦深加工透镜的难点在于如何使得轴上的光强在设计焦深范围内保持一致。由菲涅耳衍射积分可知,距离衍射元件 z 处,偏离光轴 r 的点的电场强度为^[10]

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{2\pi}{\lambda z} \right)^2 \left| \int_0^R \exp\{i2\pi[r^2/2\lambda z - \phi(r)]\} J_0(2\pi\rho r/\lambda z) r dr \right|^2. \quad (4)$$

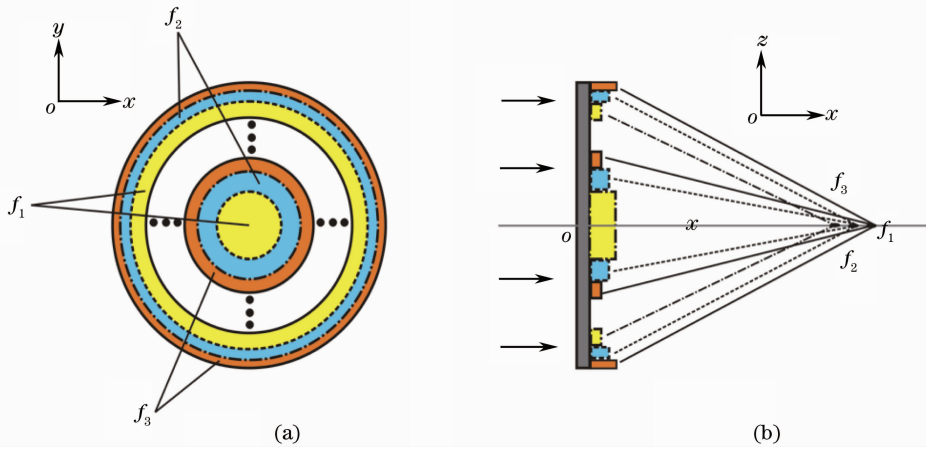


图 1 多焦点菲涅耳透镜实现长焦深、高分辨激光加工透镜的原理示意图。(a) xoy 截面；(b) xoz 截面

Fig.1 Schematic diagrams of multifocus Fresnel lens for realizing long focal depth. (a) xoy section; (b) xoz section

由于焦深只要求增加一倍,故取 $M=3, N=30$ 。为同时保证轴上的光强均匀分布,将组成长焦深元件的 3 个菲涅耳透镜焦距变量代入(3)式进行优化,获得的最优焦距分别为 $f_1=46.15\text{ mm}$, $f_2=47\text{ mm}$ 和 $f_3=47.85\text{ mm}$ 。

图 2 给出了采用该方法获得的长焦深光学元件焦点附近的电场强度分布模拟结果。作为对比,图 2 中还给出了传统理想聚焦透镜的模拟结果。可以看出,相对于传统透镜,长焦深元件在轴上很长的一段范围内具有相近的光强分布。图 2(c)中,红色虚

线为传统透镜,蓝色实线为上述设计的长焦深透镜,由轴上的归一化强度分布可以看出,长焦深元件沿轴方向有 3 个明显的峰值,分别对应组成该长焦深元件的 3 个菲涅耳透镜的焦点。图 2(d)中红色虚线为传统透镜的光斑大小,给出了该长焦深元件沿轴的光斑大小变化情况。对于传统的透镜(TL),获得的光斑半峰全宽为 $50\text{ }\mu\text{m}$,在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 处的光强已经下降超过 20%;而设计的长焦深透镜(FL)在 $z=46\text{ mm}$ (或 $z=48\text{ mm}$), 46.5 mm (或 $z=47.5\text{ mm}$) 以及 47 mm 时聚焦光斑的半峰全宽分别为 $65, 80, 75\text{ }\mu\text{m}$ 。

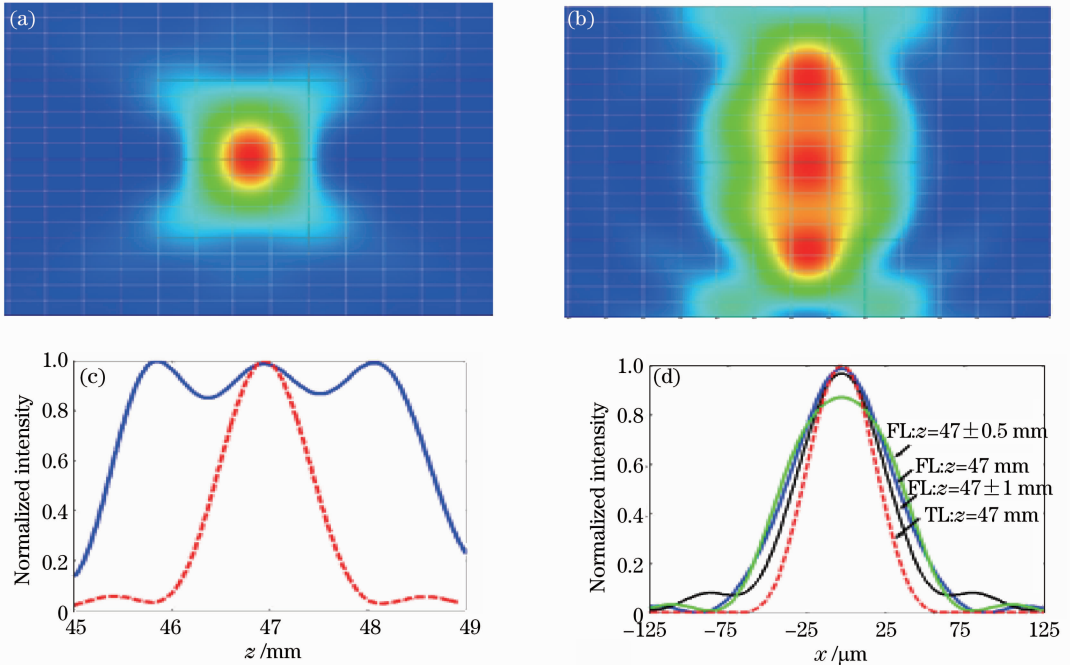


图 2 (a), (b)传统透镜与长焦深透镜在过光轴的 $y=0$ 面上的光强分布; (c), (d)二者在焦点附近轴上的光强分布与垂直光轴不同截面处光斑的光强分布对比

Fig.2 (a), (b) Intensity distributions of traditional lens and long focal depth lens in the $y=0$ plane; (c), (d) comparison of intensity distribution along the optical axis around the focus and that of the spots in the planes which are perpendicular to the optical axis

光强在±1.5 mm处才下降超过最大光强的 20%，对应的焦深与加工范围增加了两倍。

3 实验测试

根据该方法获得的长焦深元件相位是不连续的，在环带之间的交接处会出现相位的跳变，采用传统的光学加工方法很难实现。二元光学元件是随着微电子加工技术发展而来的一种纯相位光学元件，具有丰富的相位自由度，非常适合本器件的实现。对于二元光学元件，两台阶的衍射效率可达 41%，四台阶可达 81%，八台阶可达到 95%。为了进行原理验证，在口径为 18 mm 的 ZnSe 基片上采用两次套刻，分别刻蚀 2.2 μm 与 1.1 μm 深度，获得了四

台阶长焦深光学元件。器件最小线宽为 18.5 μm，加工条件比较宽松。

为了对加工的透镜的焦深(DOF)进行测量，搭建了相应的实验测试系统，如图 3 所示。首先采用望远镜系统对 CO₂ 激光器(美国大通公司生产的 Lasy-50)发出的波长为 10.6 μm 的高斯光束进行扩束准直，经光阑使光束直径限制在 11 mm，之后照射于被测器件(传统的聚焦透镜或长焦深元件 DOE)。在被测器件的焦点附近，采用红外焦平面阵列(武汉高德，IR210)对光强分布进行记录，并通过数据采集卡将结果保存至电脑。由于激光器发出的光能量较大，在测试前需要采用多个硅片对激光进行衰减，以避免红外焦平面阵列被烧坏。

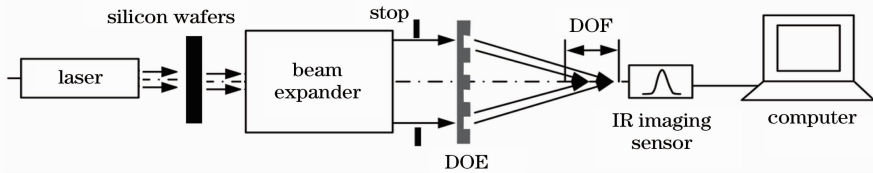
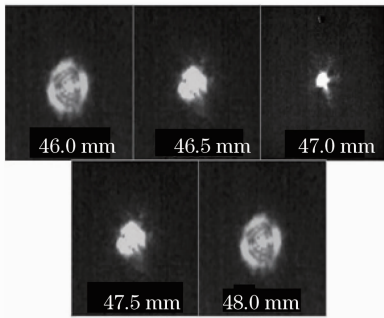


图 3 用于测试长焦深激光加工透镜的实验系统

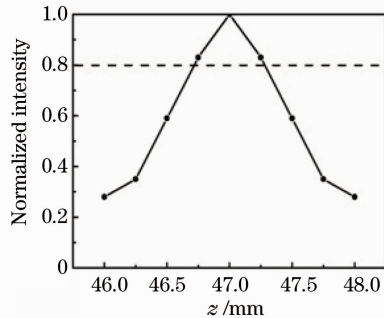
Fig. 3 Experimental system used to test the focal depth of the laser processing lens

图 4(a)给出了传统的聚焦透镜 46~48 mm 范围内的实验测试结果，可以看出，当红外焦平面阵列的位置偏离焦点时，焦斑大小迅速增加。偏离±0.5 mm

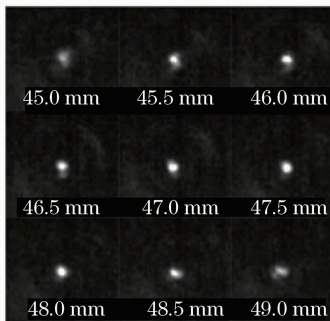
后，焦斑的大小已经扩大了近一倍。图 4(b)给出了在这一范围内的沿轴光强分布更多的测试结果，可以看出，该透镜焦点附近能够保持 80% 光强的范围只有约



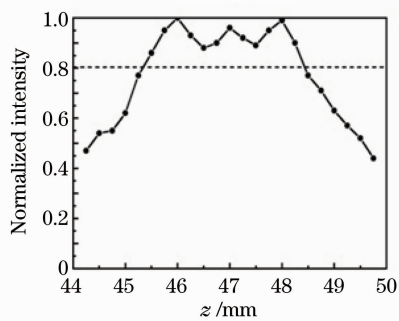
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4 (a),(b)传统激光加工透镜沿轴的焦斑变化与轴上的光强分布;(c),(d)长焦深透镜的沿轴焦斑变化与沿轴光强分布

Fig. 4 (a), (b) Measured focal spots and intensity distribution along the optical axis of the traditional lens;

(c), (d) corresponding results for the long focal depth lens

0.8 mm,与前面的模拟结果相近。图 4(c)给出了针对长焦深元件的测试结果,由图中可以看出,在 45.5~48.5 mm 范围内,光斑的大小几乎没有发生变化。图 4(d)给出了轴上的光强分布测试结果,在 46,47,48 mm处均能看到一个明显的峰值,在 45.5~48.5 mm 范围内均能够保持光强的 80%,与设计结果符合较好。

获得的聚焦光斑的半峰全宽大小约为(120±12) μm,略大于设计时的仿真结果,主要原因是四台阶相位量化过程中导致了聚焦效果变差。此外,用于焦斑测试时红外焦平面阵列强度容易饱和,导致获得的最大光强低于实际值,这些因素都可能是导致测量结果偏大的原因。

由于只采用 3 个焦点来实现长焦深元件,虽然满足了焦深范围内光强变化小于 80%的要求,但是还是可以看出在焦深范围内光强有明显的变化[如图 2(c)、图 4(c)所示]。对于更大焦深的需求或更为严格的轴上光强分布均匀度,可以通过增加焦点数 M 的方法实现。

总之,以上实验结果与第二部分的数值模拟结果符合较好,充分证明了本文所提方法在设计长焦深元件方面的可行性和正确性。采用本方法设计的长焦深元件可以在保持高分辨率的情况下获得较大的焦深,具有设计思想简单明了的优点。该方法不仅可以用于激光加工透镜的设计,还可以用于折衍射混合成像系统,用于增加焦深、降低装调难度、提高系统的可靠性。

4 结 论

提出了对不同焦距的非涅耳透镜相位采样组合形成多焦点菲涅耳透镜以实现长焦深、高分辨激光加工透镜的设计方法,针对 10.6 μm 的激光加工波长设计了口径为 11 mm,焦距为 47 mm 的激光加工透镜。采用微纳加工方法制作了四台阶衍射光学元件,并开展了实验测试,获得的焦深相对于传统的透镜增加 2 倍,验证了本方法的正确性和可行性。该方法设计的激光加工透镜可应用于激光加工领域,用于拓展高分辨激光加工透镜的纵向加工深度与范围。

参 考 文 献

- 1 Wang Xuhuang, Yao Jianhua, Zhou Guobin *et al.*. Numerical simulation and experiment of laser cutting liquid crystal display glass substrates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603003
- 汪旭煌,姚建华,周国斌等. 液晶玻璃基板激光切割数值模拟与实验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603003
- 2 Deng Qiansong, Zhao Chenfeng, Chen Liang *et al.*. Study on

- reducing apex angle burnt rate during laser cutting based on path transformation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0803006
- 邓前松,赵辰丰,陈亮等. 基于轨迹变换法降低激光切割尖角“烧蚀率”研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0803006
- 3 Wang Yanfei, Wang Xuyue, Kang Renke *et al.*. Experimental study on laser cutting based on removal forms for aluminum alloy sheet[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0803007
- 王彦飞,王续跃,康仁科等. 基于去除熔化物形态分析的铝合金薄板激光切割试验研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0803007
- 4 Chu Qingchen, Yu Gang, Lu Guoquan *et al.*. Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603001
- 褚庆臣,虞刚,卢国权等. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603001
- 5 Cheng Jie, Yang Minghong, Wang Min *et al.*. Mach-Zehnder interference hydrogen sensor based on femtosecond laser processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0706001
- 成洁,杨明红,王闵等. 基于飞秒激光加工的马赫-曾德尔干涉氢气传感器[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0706001
- 6 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 412~514
- 7 Wen Shenglin, Su Jingqin, Yang Chunlin *et al.*. Long focal depth lens for laser plasma diagnostic system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1260~1262
- 温圣林,粟敬钦,杨春林等. 用于激光等离子体诊断系统的长焦深透镜 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1260~1262
- 8 J. H. McLeod. The axicon: a new type of optical element[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(8): 592
- 9 J. Durnin, J. J. Miceli, J. H. Eberly. Diffraction-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(5): 1499
- 10 J. Sochachi, A. Kotodziejczyk, Z. Jaroszewicz *et al.*. Nonparaxial design of generalized axicons[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(25): 5326~5330
- 11 Z. Jaroszewicz, J. Sochachi, A. Kolodziejczyk *et al.*. Apodized annular aperture logarithmic axicon: smoothness and uniformity of intensity distribution[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22): 1893~1895
- 12 Sucharita Sanyal, Ajay Ghosh. High focal depth with a quasi-bifocus birefringent lens[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(14): 2321~2325
- 13 Michael A. Golub, Valery Shurman, Israel Grossinger. Extended focus diffractive optical element for Gaussian laser beams[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(1): 144~150
- 14 Bizhen Dong, Guozhen Yang, Benyuan Gu. Iterative optimization approach for designing an axicon with long focal depth and high transverse resolution[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(1): 97~103
- 15 N. Davidson, A. A. Friesem, E. Hasman. Holographic axicons: high resolution and long focal depth [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 523~525
- 16 Haifeng Wang, Fuxi Gan. High focal depth with a pure-phase apodizer[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31): 5658~5662
- 17 Chen Yansong, Zhang Jingjuan, Bao Naikeng. An adjacent sequence iteration method for designing a diffractive element with function of large depth of focus[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **32**(3): 267~271
- 陈岩松,张静娟,鲍乃铿. 用串行迭代算法设计具有长焦深功能的衍射光学元件[J]. *光子学报*, 2002, **32**(3): 267~271
- 18 Lin Yong, Hu Jiasheng. Method for design of diffractive optical elements with long focal depth [J]. *J. Dalian University of Technology*, 2010, **50**(1): 152~156
- 林勇,胡家升. 实现长焦深的衍射光学元件设计方法[J]. *大连理工大学学报*, 2010, **50**(1): 152~156