

用于光束整形的环带相位型光瞳滤波器

王伟

(安徽工业大学数理学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要 高数值孔径物镜下, 必须采用矢量衍射方法研究焦点区域的光强分布。根据矢量衍射理论, 研究了利用三环相位光瞳滤波器实现光束整形的技术。通过对数值孔径为 0.85 的物镜焦点区域光强分布的数值模拟, 利用优化搜索算法得到了可以实现光束整形的三环相位结构。模拟结果表明, 利用三环相位光瞳滤波器, 不仅可以在焦面上实现光强的平顶分布, 而且还可以得到单环衍射光束。分析了归一化半径和相位变化对光束整形质量的影响, 发现通过改变归一化半径, 不仅能够控制单环衍射光束的半径大小, 还可以改变焦点光强的强弱。

关键词 衍射; 矢量衍射理论; 光束整形; 相位型光瞳滤波器

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.070501

Spatial Beam Shaping Realized by Annular Phase Pupil Filter

Wang Wei

(College of Mathematic and Physics, Anhui University of Technology, Ma'anshang, Anhui 243032, China)

Abstract At the condition of high numerical aperture, optical intensity distribution near the focus must be analyzed by vector diffraction theory. According to vector diffraction method, three-zone annular phase pupil filters are simulated to realize beam shaping. Through the numerical simulation of objective focus area light intensity distribution with 0.85 numerical aperture, three-zone annular phase structure can be realized by using optimal search algorithm. The results indicate that flat-top beam shaping and single-circle beam shaping at the focal plane can all be realized by using three-zone annular phase pupil filters. The influence of normalized radius and changing phase on beam shaping quality is analyzed. Further more, changing the radii of three rings can control the radius of diffraction single-circle and the strength of focus intensity.

Key words diffraction; vector diffraction theory; beam shaping; phase pupil filter

OCIS codes 050.1940; 050.1960; 050.1380; 070.6110

1 引言

光束整形技术是指改变入射光束的强度分布, 使其变为所需要的强度分布。光束整形技术在光存储、激光材料处理、激光直写技术、光刻技术和医学领域有广泛的应用。近年来, 光束整形技术已经成为研究的热点。常用的光束整形技术包括微透镜阵列整形、双折射透镜组整形、液晶空间光调制器整形和衍射光学元件整形等^[1~5]。衍射光学元件由于具有体积小、重量轻的特点, 可以使光学系统微型化和集成化, 而且衍射光学元件能量利用率高, 在实现光波变换上具有许多传统光学难以具备的功能, 利用衍射光学元件进行光束整形具有广泛的研究前景^[6~8]。

近年来, 环带型光瞳滤波器被广泛地研究并应用于光学系统中, 其中研究目的主要是提高光学系统的分辨率^[9,10]。环带型光瞳滤波器的远场光强分布一般采用标量近似方法计算^[11,12], 但在使用高数值孔径聚焦时, 透光孔径外周附近的折射光会有径向场分量, 标量近似方法没有精确地表示出高数值孔径情况下的聚焦和环带滤波器的性能。Richards 等^[13]建立了可以计算任意数值孔径(NA)光学系统焦点附近光强分布的矢量衍射方法, 利用该方法已经计算了具有不同光瞳滤波器的焦点光强分布^[14~16]。

本文利用矢量衍射方法模拟计算了具有三环相位型光瞳滤波器的高数值孔径物镜聚焦时的远场光强分

收稿日期: 2011-01-20; **收到修改稿日期**: 2011-02-24; **网络出版日期**: 2011-05-05

基金项目: 安徽工业大学青年教师科研基金(QZ201017)资助课题。

作者简介: 王伟(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事衍射光学和微纳光学等方面的研究。E-mail: weiw978@ahut.edu.cn

布,将光瞳滤波器应用于不同的光束整形技术中。利用优化搜索算法,得到一系列可以实现远场不同光强分布的三环相位结构。

2 理论分析与模拟

如图 1 所示,根据文献[13]的矢量衍射理论,当一个沿 X 方向线偏振的单体均匀平面波入射到无像差的高数值孔径透镜上时,焦点附近 $P(x, y, z)$ 点的电场分布可以表示为

$$\begin{aligned} E_x(u, v, \varphi) &= -iA(I_0 + I_2 \cos 2\varphi) \\ E_y(u, v, \varphi) &= -iAI_2 \sin 2\varphi \\ E_z(u, v, \varphi) &= -2AI_1 \cos \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

式中

$$I_0(u, v) = \int_0^\alpha t(\theta) \sqrt{\cos \theta} \sin \theta (1 + \cos \theta) J_0\left(\frac{v \sin \theta}{\sin \alpha}\right) \exp\left(\frac{i u \cos \theta}{\sin^2 \alpha}\right) d\theta, \quad (2)$$

$$I_1(u, v) = \int_0^\alpha t(\theta) \sqrt{\cos \theta} \sin^2 \theta J_1\left(\frac{v \sin \theta}{\sin \alpha}\right) \exp\left(\frac{i u \cos \theta}{\sin^2 \alpha}\right) d\theta, \quad (3)$$

$$I_2(u, v) = \int_0^\alpha t(\theta) \sqrt{\cos \theta} \sin \theta (1 - \cos \theta) J_2\left(\frac{v \sin \theta}{\sin \alpha}\right) \exp\left(\frac{i u \cos \theta}{\sin^2 \alpha}\right) d\theta, \quad (4)$$

$$u = kz \sin^2 \alpha, \quad (5)$$

$$v = kr \sin \alpha, \quad (6)$$

u 和 v 分别是轴向和径向光学坐标。 $A = \pi l_0 f / \lambda$, f 为焦距长度, λ 为介质中的波长, 当入射场均匀分布时, l_0 可设为单位振幅。最大孔径角 $\alpha = \arcsin(d_{NA}/n)$, n 为折射率, 波数 $k = 2\pi/\lambda$ 。 φ 表示入射光的偏振方向和要计算的子午平面的夹角, $t(\theta)$ 是空间相位传递函数。

三环相位型光瞳滤波器的结构如图 2 所示, 设归一化半径分别为 $r_1, r_2, r_3 = 1$ ($0 < r_1 < r_2 < 1$), 相位调制深度为 $0, \phi, 0$ 。透镜满足正弦条件, 则:

$$\alpha_i = \arcsin(r_i \sin \alpha), \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

利用(1)~(7)式可求出焦点附近的光强分布, 计算时焦面上所有的长度单位归一化为波长(λ)单位, 最大光强度归一化为 1。利用优化搜索算法, 寻找可对焦点附近光场进行整形的三环相位结构。计算过程如下: 先根据(1)~(7)式数值计算出焦点附近的光强分布, 计算时取 $\phi = \pi, r_1, r_2$ 的步长间隔为 0.01, 然后根据焦点附近的光强分布, 搜索实现不同光束整形的三环相位结构。

3 平顶光束的实现

平顶光束在一定范围内具有均匀的光强分布, 在光学加工、激光核聚变等领域有重要的应用。本文采用全局搜索算法, 寻找在焦平面上能够实现光强均匀分布的三环相位结构。在搜索时需要同时考虑光强平坦范围和光强最大值的变化, 光强平坦度 U 可以定义为

$$U = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (8)$$

式中 I_{\max} , I_{\min} 分别是焦点附近的最大光强和最小光强。搜索时设定光强平坦范围大于 0.5λ , 光强平坦度小

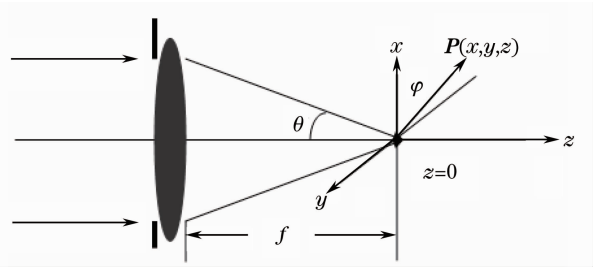


图 1 线偏振入射光聚焦示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the focusing of a linear polarized incident light

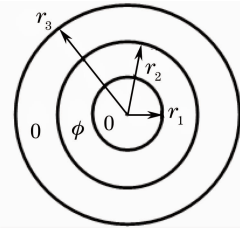


图 2 三环相位型光瞳滤波器结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of three-zone annular phase pupil filters

于1.2%，同时将焦点处的光强设为最大值。对于数值孔径为0.85的物镜进行了模拟计算。数值模拟结果表明，当 $r_1=0.79, r_2=0.97$ 时，可以实现焦面上焦点附近光强的平坦化，焦平面上光强分布如图3所示。这时可以求出在焦点附近 0.5λ 范围内光强的平坦度为1.1%。

同时，通过计算模拟发现，光强平坦度受到 r_1, r_2 的变化和相位调制深度 ϕ 的影响。对光强平坦度的影响如表1所示。

表1 不同 r_1, r_2 和 ϕ 时，平坦度的变化

Table 1 Uniformity with different r_1, r_2 and ϕ

r_1	r_2	ϕ	Uniformity / %
0.79	0.97	π	1.1
0.78	0.97	π	1.4
0.80	0.97	π	3.1
0.79	0.98	π	3.7
0.79	0.96	π	4.8
0.79	0.97	0.9π	3.7
0.79	0.97	0.95π	1.8

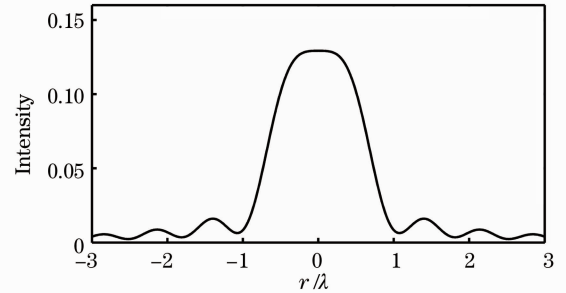


图3 $r_1=0.79, r_2=0.97$ 时，焦平面上光强分布
Fig. 3 Optical intensity distribution of focal plane
when $r_1=0.79, r_2=0.97$

从表1可以看出， r_1, r_2 和 ϕ 的微小变化会对光强平坦度产生较大的影响，这就需要在制作这种滤波器时有较高的加工精度。并且，通过数值模拟发现，光强平坦范围和焦点处的最大光强成反比关系，增大平坦范围会引起焦点处光强的降低。

4 单环衍射场的实现

单环衍射场在激光加工、激光耦合和光学操纵等领域有广泛的应用，利用三环相位光瞳滤波器可以在焦面上实现单环衍射场的分布。优化搜索时需要同时考虑焦点光强分布、衍射环的峰值中心与焦点的距离（衍射环半径）以及最大旁瓣的大小。首先把焦平面上光强归一化，设定焦点光强小于0.01，衍射环半径大于 0.50λ ，最大旁瓣小于0.30。当 $r_1=0.68, r_2=0.98$ 时，焦平面上光强分布如图4所示，此时焦平面的中心强度为0，衍射环的强度为最大，衍射环的峰值中心与焦点的距离（衍射环半径）为 0.70λ 。

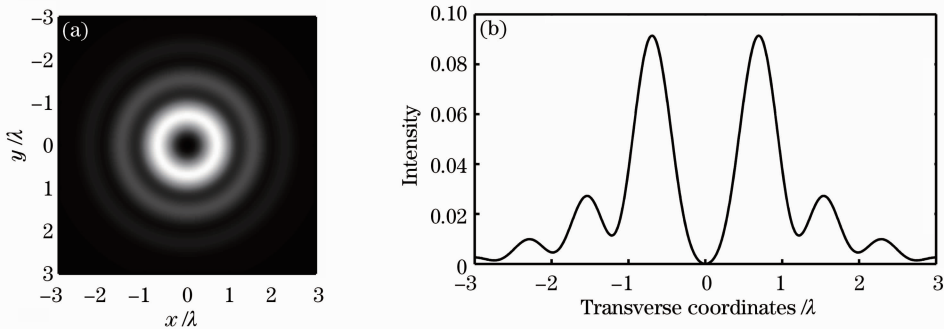


图4 $r_1=0.46, r_2=0.98$ 时焦平面上的二维衍射光图像(a)和焦面上过焦点一维光强分布(b)

Fig. 4 Two dimensional diffraction pattern of focal plane (a) and one dimensional optical intensity distribution of focal plane passing through focal point (b) with $r_1=0.46, r_2=0.98$

通过改变归一化半径 r_1 和 r_2 ，可以改变衍射环的半径，当 $r_1=0.36, r_2=0.79$ 时，焦平面上光强分布如图5所示，衍射环半径为 1.32λ 。同时，通过数值计算发现，当归一化半径 r_1 和 r_2 改变0.01时，该结构的焦点光强、衍射环半径和光强分布几乎不发生变化；相位调制深度 ϕ 的微小变化对焦点光强的影响非常大，但对衍射环的半径几乎没有影响。例如当 $r_1=0.36, r_2=0.79, \phi=0.9\pi$ 时，焦点的归一光强由0急剧增加到0.25，但衍射环半径仍为 1.32λ 。

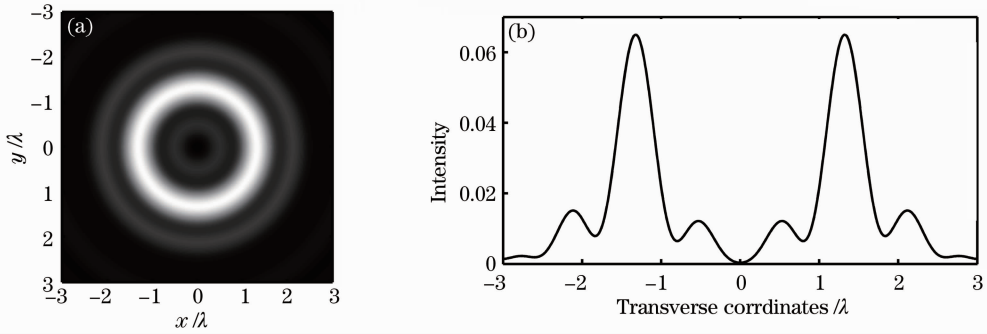


图5 $r_1=0.36, r_2=0.79$ 时焦平面上的二维衍射光图像(a)和焦面上过焦点一维光强分布(b)

Fig. 5 Two dimensional diffraction pattern of focal plane (a) and one dimensional optical intensity distribution of focal plane passing through focal point (b) with $r_1=0.36, r_2=0.79$

通过采用不同的归一化半径 r_1 和 r_2 , 可以对焦点上光强的强弱进行控制。当 $r_1=0.38, r_2=0.88$, 可以使焦点上的中心峰值强度和衍射环的峰值强度相等, 焦平面的光强分布如图 6 所示。此时, 衍射环的半径为 1.15λ 。通过数值计算发现, 当归一化半径 r_1 和 r_2 改变 $0.01, \phi$ 改变 0.1π 时, 该结构的衍射环半径几乎不发生变化, 仍为 1.32λ , 但是对焦点光强的影响较大, 即使微小的改变, 都会使焦点上的中心峰值强度和衍射环的峰值强度不再相等。

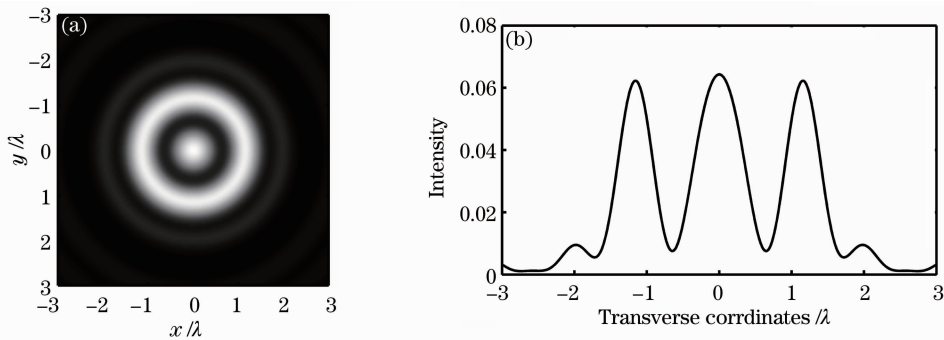


图6 $r_1=0.38, r_2=0.88$ 时焦平面上的二维衍射光图像(a)和焦面上过焦点一维光强分布(b)

Fig. 6 Two dimensional diffraction pattern of focal plane (a) and one dimensional optical intensity distribution of focal plane passing through focal point (b) with $r_1=0.38, r_2=0.88$

5 结 论

利用矢量衍射方法模拟了三环相位光瞳滤波器实现光束整形的技术。数值模拟了数值孔径为 0.85 时的焦点附近的光强分布, 利用优化搜索算法求解了能够实现光束整形的三环相位结构。结果表明, 利用三环相位光瞳滤波器, 不仅可以实现光强在焦面上一定范围内的平顶分布, 还可以实现光场在焦平面上的单环衍射分布, 而且通过改变三环的半径, 可以控制衍射环的半径大小, 以及焦点强度的强弱, 并分别分析了影响光强分布的影响因素。该类型的三环衍射器件具有结构简单、体积小和重量轻的优点, 在光束整形技术中有很重要实用的价值。

参 考 文 献

- Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi *et al.*. Improving of the irradiation uniformity on targets with a diffraction-weakened lens array and spectral dispersion smoothing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5824~5828
江秀娟, 周申蕾, 林尊琪 等. 利用消衍射透镜阵列及光谱色散平滑实现焦斑均匀辐照[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5824~5828
- Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1704
杨向通, 范 薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1704

- 3 Xie Jie, Fan Wei, Li Xuechun *et al.*. Spatial laser beam shaping using binary panels[J]. *Acta Optical Sinica*, 2008, **28**(10): 1959~1966
谢杰, 范薇, 李学春等. 二元振幅型面板用于光束空间整形[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1959~1966
- 4 Li Ke, Shi Peng, Zhang Xiaobo *et al.*. Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1972~1977
李珂, 石鹏, 张晓波等. 双透镜系统光束整形元件的设计制作[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1972~1977
- 5 Jia Jia, Changhe Zhou, Xiaohui Sun *et al.*. Superresolution laser beam shaping [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(10): 2112~2117
- 6 G. J. Toufic, M. K. Stephen. Axial field shaping under high-numerical aperture focusing[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5): 527~529
- 7 G. J. Toufic, M. K. Stephen. Vectorial beam shaping [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10): 7203~7213
- 8 I. J. Korné, B. Nándor. Intensity control of the focal spot by vectorial beam shaping [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**: 4859~4865
- 9 R. M. S. Tasso, G. M. Morris. Diffractive superresolution elements[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(7): 1637~1646
- 10 Hongxin Luo, Changhe Zhou. Comparison of superresolution effects with annular phase and amplitude filters [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(34): 6242~6247
- 11 Haitao Liu, Yingbai Yan, Guofan Jin. Design and experimental test of diffractive superresolution elements [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(1): 95~99
- 12 Haitao Liu, Guoguang Mu, Lie Lin. Optical superresolution of focused partially spatially coherent laser beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(6): 1301~1310
- 13 B. Richards, E. Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems II structure of the image field in an aplanatic system [J]. *Proc. Royal Soc. A*, 1959, **253**: 358~379
- 14 M. Martinez C, R. Martinez C, I. Escobar *et al.*. Reduction of focus size in tightly focused linearly polarized beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(19): 4319~4321
- 15 G. J. Toufic, M. K. Stephen. Vector diffraction analysis of high numerical aperture focused beams modified by two- and three-zone annular multi-phase plates [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1033~1043
- 16 G. J. Toufic, M. K. Stephen. Axial field shaping under high-numerical aperture focusing [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5): 527~529