

三环位相型光瞳滤波器的横向超分辨与轴向焦深扩展*

王伟^{1)†} 周常河²⁾ 余俊杰²⁾

1) (安徽工业大学数理学院, 马鞍山 243002)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

(2010年1月26日收到; 2010年4月19日收到修改稿)

用矢量衍射方法分析了线偏振光入射到带有三环位相型光瞳滤波器的高数值孔径物镜时, 焦点的轴向和横向光强分布. 数值模拟结果表明, 高数值孔径物镜聚焦时需同时考虑光强的轴向和横向分布. 通过加入三环位相光瞳滤波器, 在实现横向超分辨的同时实现了光学系统轴向焦深扩展和轴向光强分布平坦化, 并且位相调制深度变化时, 会出现轴向焦移现象. 对三环位相光瞳滤波器结构进行了优化, 得出了优化结果.

关键词: 光学超分辨, 扩展焦深, 位相型光瞳滤波器, 矢量衍射方法

PACS: 42.25.Fx, 42.30.Va, 42.40.Lx

1. 引言

光学超分辨技术与扩展焦深技术在光盘存储、显微成像、光学校准及高分辨率光刻等领域有广泛的应用, 是现代光学成像领域的一项前沿课题^[1-6]. Toraldo 等^[7]首次对超分辨方法进行了理论研究, 后来人们对于环带型光瞳滤波器进行了详细研究, 发现利用光瞳滤波器可以实现超分辨效应^[8-10], 另一方面, 扩展焦深技术的研究也受到关注, 出现了利用双折射滤波器^[11]、二元亚波长衍射透镜^[12]、柱状矢量光束^[13]等方法来实现扩展焦深的研究.

环带型光瞳滤波器焦点附近光强的分布主要采用了标量近似方法^[14]. 但在使用高数值孔径物镜时, 通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的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^[15]提出了一种可以直接计算带有位相滤波器的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^[16,17].

本文利用矢量衍射方法计算了具有三环位相

型光瞳滤波器的高数值孔径物镜成像时的焦点光强分布. 详细计算了不同归一化半径时, 横向的超分辨效应和轴向的光强分布, 得到不同归一化半径时横向超分辨的压缩比和旁瓣比. 数值模拟结果表明, 高数值孔径下光强的横向和轴向分布互相影响, 利用三环位相型光瞳滤波器可以同时实现扩展焦深和横向的光学超分辨, 并且能够使焦点附近轴向光强分布平坦化.

2. 矢量衍射理论和方法

根据 Richards 和 Wolf^[15]的矢量衍射理论, 如图 1 所示, 当一个沿 x 方向偏振的单色平面波入射到无球差的高数值孔径透镜上时, 焦点 $P(x, y, z)$ 点附近的电场分布可以表示为:

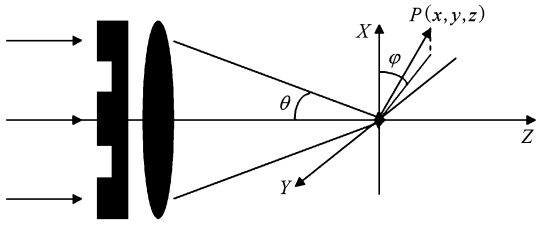
$$\begin{aligned} E_x(r, z, \varphi) &= -iA(I_0 + I_2 \cos 2\varphi), \\ E_y(r, z, \varphi) &= -iAI_2 \sin 2\varphi, \\ E_z(r, z, \varphi) &= -2AI_1 \cos \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} I_0(r, z) &= \int_0^\alpha t(\theta) \sqrt{\cos \theta} \sin \theta (1 + \cos \theta) \\ &\times J_0(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

* 安徽工业大学青年教师科研基金(批准号: QZ201017)资助的课题.

† E-mail: weiw978@ahut.edu.cn


 图1 x 偏振入射光聚焦时,焦点附近光强计算示意图

$$I_1(r, z) = \int_0^\alpha t(\theta) \sqrt{\cos\theta} \sin^2\theta J_1^2(kr\sin\theta) \times \exp(ikz\cos\theta) d\theta, \quad (3)$$

$$I_2(r, z) = \int_0^\alpha t(\theta) \sqrt{\cos\theta} \sin\theta (1 - \cos\theta) \times J_2^2(kr\sin\theta) \exp(ikz\cos\theta) d\theta, \quad (4)$$

$A = \pi l_0 f / \lambda$, f 为焦距长度, λ 为介质中的波长, l_0 描述入射光场的振幅分布, 当入射场均匀分布时, l_0 可设为单位振幅. z 和 r 分别是轴向和径向坐标. 最大孔径角 $\alpha = \arcsin(NA/n)$, 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, $t(\theta)$ 是空间位相传递函数.

当 $r = 0$ 时, 可得到焦点附近光轴上的光强分布公式

$$E(r = 0, z) = -iA \int_0^\alpha t(\theta) \sqrt{\cos\theta} \times \sin\theta (1 + \cos\theta) \times \exp(ikz\cos\theta) d\theta. \quad (5)$$

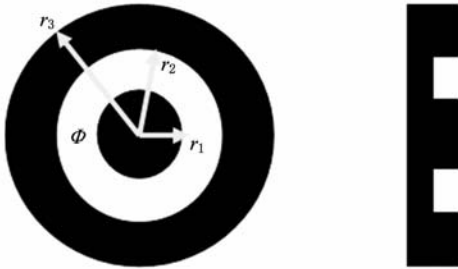


图2 三环位相型光瞳滤波器结构示意图

三环位相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 $0, \Phi, 0$. 对应不同的归一化半径和位相调制深度, 都会有对应的焦点强度分布. 利用(1)–(4)式可以求出焦点附近的光强分布, 分别用半高全宽比 G_{FWHM} 和最大旁瓣强度比 M 表示超分辨性能. G_{FWHM} 表示光强为中心主瓣光强峰值一半时的半径与艾里斑中心光强峰值一半时的半径之比;

M 表示旁瓣强度峰值与中心主瓣强度峰值的比值. 当物镜数值孔径(NA)为0.6, 位相调制深度为 $\Phi = \pi$ 时, 光强分布只与归一化半径 r_1, r_2 的值有关, 可得到不同 r_1, r_2 时 G_{FWHM} 和 M 的值.

3. 横向光学超分辨与轴向扩展焦深和焦移

如图1所示, 将三环位相光瞳滤波器放置在聚焦物镜的前面, 利用(1)–(4)式数值求解焦点附近的光强分布. 数值计算时, 物镜数值孔径 $NA = 0.6$, r_1, r_2 的步长间隔为0.01, $\Phi = \pi$, 经过计算得到不同 r_1, r_2 时 G_{FWHM} 和 M 的值, 如图3所示.

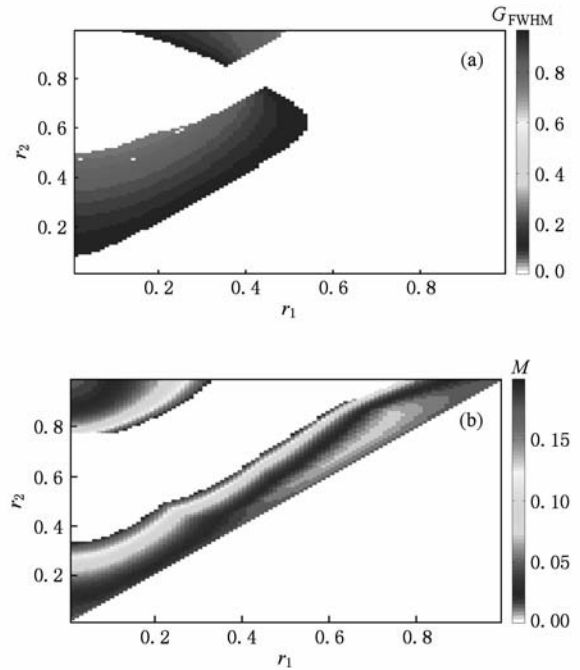

 图3 G_{FWHM} 和 M 与归一化半径 r_1, r_2 之间的关系 (a) G_{FWHM} , (b) M

图3(a)给出了光学焦平面上中心主瓣峰值强度最大且能够实现横向光学超分辨 ($G_{FWHM} < 1$) 时, 对应的 r_1, r_2 的值, 图3(b)给出了当光斑中心强度最大且 $M < 0.2$ 时, 对应的 r_1, r_2 的值. 利用图3, 可以找出能够实现横向超分辨和 $M < 0.2$ 的三环结构. 数值模拟表明, G_{FWHM} 的增大, 会引起旁瓣强度比 M 的增大, 而且横向光强的变化会引起轴向光强的变化. 利用(5)式, 可以计算出不同 r_1, r_2 值时对应的轴向光强分布, 我们同样对于 $NA = 0.6, \Phi = \pi$, 不同 r_1, r_2 值时的结构进行了数值模拟. 模拟结果表明, 通过改变归一化半径, 可以实现轴向焦深扩展

和焦点附近轴向光强平坦化,并且位相调制深度 Φ 改变时,有焦移现象. 当 $r_1 = 0.75, r_2 = 0.93, \Phi = \pi$ 时,轴向强度的分布如图 4 所示.

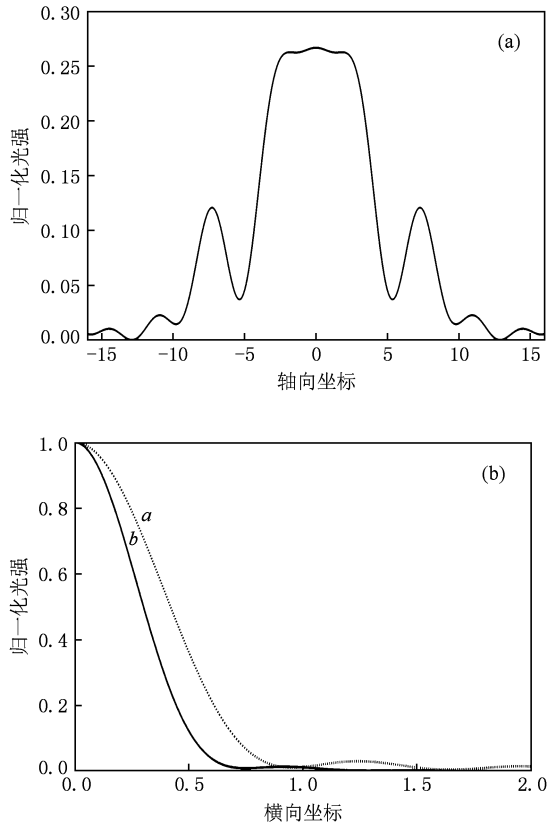


图 4 $r_1 = 0.75, r_2 = 0.93, \Phi = \pi$ 时,焦点附近光强分布 (a) 轴向, (b) 横向 (图中曲线 a, b 分别表示加入 $\Phi = \pi$ 光瞳滤波器和未加入光瞳滤波器)

图 4(a) 给出了加入光瞳滤波器后的轴向光强分布. 可以看出,轴向光强在焦点附近出现了光强平坦化现象,光强平坦度可以定义为

$$\text{光强平坦度} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (6)$$

其中 $I_{\max}, I_{\min}$ 分别是焦点附近的最大和最小光强. 可以求出在焦点附近 7.4λ 的范围内光强的平坦度为 1.2%, 物镜的焦深扩展到极大值. 图 4(b) 中给出了未加光瞳滤波器和加入光瞳滤波器后的横向光强分布,可以看出,光强的横向分布得到扩展,此时, $G_{\text{FWHM}} = 1.38, M = 0.03$. 分析不同归一化半径下的横向和轴向光强分布,可以得出结论:光强的横向分布和轴向分布互相影响,因此设计光瞳滤波器时需同时考虑光场的横向和轴向分布. 设定横向 $G_{\text{FWHM}} < 1, M < 0.2$, 搜索轴向的光强分布,可以求出实现横向超分辨且能够扩展焦深和轴向光强平

坦的三环位相结构. 经过搜索优化得出,当 $r_1 = 0.23, r_2 = 0.48$ 时, G_{FWHM} 和 M 有极小值,此时, $G_{\text{FWHM}} = 0.84, M = 0.15$, 焦点附近 4.8λ 的范围内光强的平坦度为 1.2%. 如图 5 所示,图 5(a) 示出了焦平面上横向光强分布,图 5(b) 示出了轴向光强分布. 图 6(a) 和 (b) 分别示出了未加光瞳滤波器和加光瞳滤波器时子午面内的焦点图像. 从图 5 和 6 中可以看出,用三环位相光瞳滤波器可以实现超分辨和轴向扩展焦深,并可同时实现焦点附近轴向光强平坦化. 这种结构在高密度数据存储、超分辨显微成像等领域有重要的应用价值.

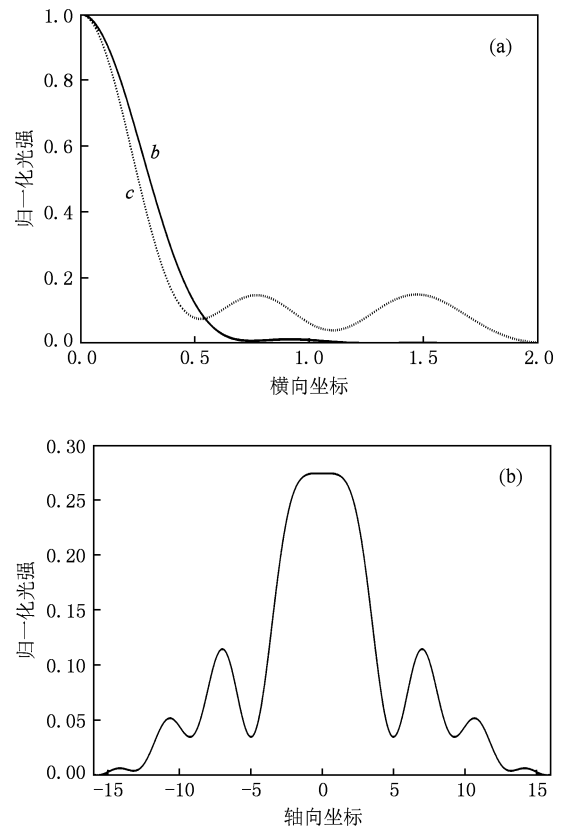


图 5 $r_1 = 0.23, r_2 = 0.48$ 时,光强分布 (a) 横向, (b) 轴向, ((a) 图中曲线 b, c 分别表示未加光瞳滤波器和加 $\Phi = \pi$ 的光瞳滤波器)

为了验证不同位相调制深度对焦点光强分布的影响,对 $r_1 = 0.23, r_2 = 0.48$ 的结构进行了数值运算. 当调制深度 Φ 改变时,轴向光强分布变化如图 7 所示,横向 G_{FWHM} 和 M 的变化如表 1 所示.

从图 7 和表 1 中可以看出,位相调制深度的变化对横向和轴向的光强都会产生影响,但位相的微小变化对轴向光强分布的影响要大于对横向超分辨性能的影响. 特别是在 π 位相调整附近时,位相

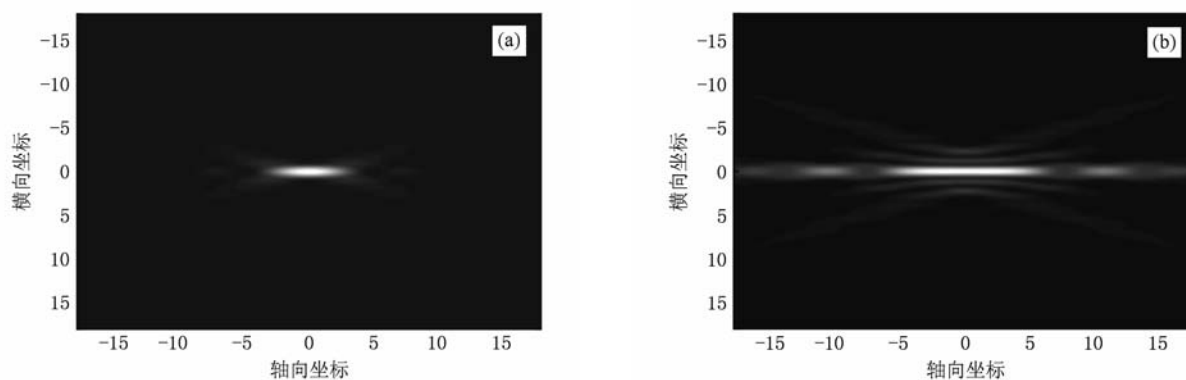


图6 $r_1 = 0.23, r_2 = 0.48$ 时,子午面内焦点附近光强分布 (a)未加光瞳滤波器,(b)加入光瞳滤波器

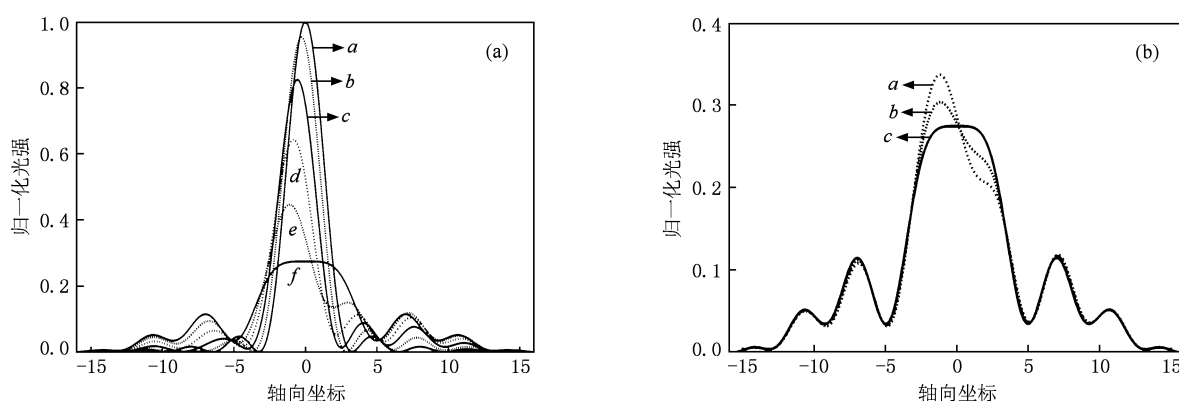


图7 轴向光强分布 (a)曲线 a, b, c, d, e, f 分别对应不加光瞳滤波器和加入位相调制深度 $\Phi = 0.2\pi, 0.4\pi, 0.6\pi, 0.8\pi, 1.0\pi$ 的光瞳滤波器; (b)曲线 a, b, c 分别对应加入位相调制深度 $\Phi = 0.92\pi, 0.96\pi, 1.0\pi$ 的光瞳滤波器

的变化对光强平坦度的影响非常大,当位相变化为 0.02π 时,光强平坦度由 1.2% 变为 6.6%. 同时,位相变化较大时(大于 0.1π),焦点附近光强不再平坦,会出现轴向焦移现象,其焦移变化规律与文献[18]报道的现象类似,如图 7(a)所示. 因此要实现焦深扩展和轴向光强平坦化,需要较高的加工精度.

表1 不同位相调制深度时,横向 G_{FWHM} 和 M 的值

Φ / π	G_{FWHM}	M
1	0.84	0.15
0.9	0.85	0.13
0.8	0.89	0.11
0.7	0.92	0.08
0.6	0.93	0.06
0.5	0.97	0.04
0.4	0.98	0.03
0.3	0.98	0.02

4. 结 论

用矢量衍射方法求解了三环位相型光瞳滤波器在高数值孔径物镜成像时的焦点光强分布,提出了用于数值孔径为 0.6、能够实现横向超分辨和轴向焦深扩展的三环位相结构. 数值模拟表明,该结构不仅能够实现横向超分辨和轴向扩展焦深,而且能够实现焦点附近的光强平坦化. 结果表明,位相调制深度的微小改变会对轴向的光强分布产生较大的影响,使得轴向光强平坦度增大并且出现焦移现象,因此对该型器件制作需要较高的加工精度. 该种器件具有体积小、重量轻的优点,有很好的实用性,可以用于 DVD 光学头中提高存储密度或显微成像等领域.

- [1] Rios S, López D 2009 *Opt. Exp.* **17** 9669
- [2] Mico V, Zalevsky Z, Garcia J 2008 *Opt. Comm.* **281** 4273
- [3] Zhao W Q, Chen S S, Feng Z D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3363 (in Chinese) [赵维谦、陈珊珊、冯政德 2006 物理学报 **55** 3363]
- [4] Shen Q H, Xu D Y, Qi G S, Hu H, Liu R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4718 (in Chinese) [沈全洪、徐端颐、齐国生、胡恒、刘嵘 2005 物理学报 **54** 4718]
- [5] Lopez C I, Saavedra G, Boyei G 2005 *Opt. Exp.* **13** 6168
- [6] Canales V F, de Juana D M, Cagigal M P 2004 *Opt. Lett.* **29** 935
- [7] di Francia G T 1952 *Naovo Cimento Suppl.* **9** 426
- [8] de Juana D M, Canales V F, Valle P J, Cagigal M P 2004 *Opt. Comm.* **229** 71
- [9] Luo X H, Zhou C H 2004 *Appl. Opt.* **43** 6242
- [10] Liu H T, Yan Y B, Jin G F 2006 *Appl. Opt.* **45** 95
- [11] Yun M J, Wan Y, Kong W J, Wang M, Liu J H, Liang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 194 (in Chinese) [云茂金、万勇、孔伟金、王美、刘俊海、梁伟 2008 物理学报 **57** 194]
- [12] Feng D, Ou P, Feng L S, Hu S L, Zhang C X 2008 *Opt. Express*. **16** 20968
- [13] Zhan Q W, Leger J R 2002 *Opt. Express* **10** 324
- [14] Sales T R M, Morris G M 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 1637
- [15] Richards B, Wolf E 1959 *Proc. Royal Soc. A* **253** 358
- [16] Martinez C M, Martinez C R, Escobar I, Saavedra G 2004 *Appl. Phys. Lett* **85** 4319
- [17] Jabhour T G, Kuebler S M 2006 *Opt. Express* **14** 1033
- [18] Yun M J, Lee E H 2008 *J. Mod. Opt.* **55** 2857

Transverse superresolution and extended axial focal depth realized by three-zone annular phase pupil filter^{*}

Wang Wei^{1)†} Zhou Chang-He²⁾ Yu Jun-Jie²⁾

1) (School of Mathematics and Physics, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

2) (Laboratory for Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 26 January 2010; revised manuscript received 19 April 2010)

Abstract

When linearly polarized light is focused using a high numerical aperture lens with three-zone annular phase pupil filter, vector diffraction method was applied to study the optical intensity distribution in transverse and axial directions. Numerical simulation results show that optical intensity distribution in transverse and axial directions need to be treated simultaneously. When three-zone annular phase pupil filter is added in front of a high numerical aperture lens, transverse super resolution, extended axial focal depth and flat-top focusing can be achieved at the same time. Furthermore, When phase modulation depth is changed, the phenomenon of axial focal shift can be found. The structure of three-zone annular phase pupil filter was optimized and the optimized results were given.

Keywords: optical superresolution, extension of focal depth, phase pupil filter, vector diffraction method

PACS: 42.25.Fx, 42.30.Va, 42.40.Lx

^{*} Project supported by the Research Fund for Young Teachers of Anhui University of Technology, China (Grant No. QZ201017).

[†] E-mail: weiw978@ahut.edu.cn