

可调光瞳滤波器的轴向焦移及扩展焦深

云茂金¹ 王 美¹ 孔伟金¹ 刘立人² 梁 健¹ 朱化凤³ 高秀敏⁴

¹青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071

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

³中国石油大学物理科学与技术学院, 山东 东营 257061

⁴杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018

摘要 光学超分辨、焦深扩展及焦移 3 种效应一直受到研究人员的关注,且在光学显微成像、光学校准、光学相干层析成像及光存储中有着重要的应用。提出一种可调谐光瞳滤波器来实现光学系统的轴向焦移及扩展焦深。该光瞳滤波器由两个完全相同且相互平行的 $\lambda/4$ 波片和置于其间的 $\lambda/2$ 波片组成,其中 $\lambda/2$ 波片分为两个可作相对旋转的区域,并且通过推导得出其光瞳函数。研究结果表明,通过旋转半波片的角度可以实现焦移量的实时控制。因此该系统可应用于自动调焦系统,比如某些光学读写驱动系统有时需要调整焦平面。另外,当半波片两部分相位差为 π 时,横向超分辨和轴向扩展焦深同时实现,可以应用于共焦扫描成像系统中。

关键词 信息光学;可调谐滤波器;焦移;扩展焦深;超分辨

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0311003

Axial Focal Shift and Extended Focal Depth with Tunable Filter

Yun Maojin¹ Wang Mei¹ Kong Weijin¹ Liu Liren² Liang Jian¹

Zhu Huafeng³ Gao Xiumin⁴

¹ College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China

³ College of Physics Science and Technology, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China

⁴ Electronics and Information College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract Optical superresolution, focal shift and high focal depth in optical imaging system have been the goal of many researchers and have widely application in the optical microscopy, optical alignment and optical coherent tomography systems. A tunable pupil filter for modulation of axial focal shift and extended focal depth is proposed. It consists of one half-wave plate located between two identical and parallel quarter wave-plates, the half-wave plate is made up of two zones that can rotate with respect to each other, and the pupil function is deduced. The research result shows that with the designed pupil filter the axial focal shift can be controlled by rotating the half-wave plate. So the designed tunable pupil filter can be utilized in automatic focusing applications that are similar to optical read-write drives for which is necessary to track the focal plane dynamically. Furthermore, when the phase difference is π , the transverse superresolution and axially extended focal depth can be realized at the same time. And it can be used in optical confocal scan imaging system.

Key words information optics; tunable pupil filter; focal shift; extended focal depth; superresolution

OCIS codes 110.0110; 230.6120; 100.5090

1 引 言

光学超分辨、焦深扩展及焦移三种效应都被

各自独立地进行了广泛深入的研究。同时具有横向光学超分辨和扩展焦深的光学系统在光学显微成

收稿日期: 2010-08-10; 收到修改稿日期: 2010-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(10904080, 60708002 和 10804060)和山东省自然科学基金(Y2008A34)资助课题。

作者简介: 云茂金(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学超分辨和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: maojinyun@hotmail.com

像、光学校准、光学相干层析成像及光存储中有着重要的应用,通过偏振效应来获得扩展焦深的研究也倍受关注^[1-6],最近相继报道利用柱状矢量光束^[7,8]、准双焦双折射透镜^[9]与胶合双透镜^[10]等来实现扩展焦深的研究。另一方面,焦移效应在自动聚焦、扩展焦深、离焦面图像构建及激光精密加工等方面进行了广泛深入的研究,且主要集中在对光瞳掩模的研究上。Zhan 等^[8]研究了偏振方向径向对称分布的柱状矢量光束焦点处光强分布特性与调节特性。Chowdhury 等^[11]提出偏振掩模法实现焦移控制,通过二元环形区域偏振掩模的引入来实现光瞳面上的偏振相位或振幅控制,得到了可以实现焦移的光瞳函数,实现了轴向焦移效应。在以前的工作中,借助于电控径向双折射滤波器实现了光学系统的光学超分辨、焦深扩展及焦移^[12,13]。

本文借助于复合式补偿器^[14]的概念,设计了由波片组合而成的相位型光瞳滤波器。通过分析加入该光瞳滤波器后系统的横向和轴向强度分布表明:借助于波片的旋转可以实现光学系统的轴向焦移和焦深扩展。

2 焦点区域的场分布

可调光瞳滤波器如图 1 所示,由两个完全相同的 $\lambda/4$ 波片和置于其间的 $\lambda/2$ 波片组成。其中:两 $\lambda/4$ 波片相互平行,并且其快轴方向 C_1, C_3 平行于 x 轴; $\lambda/2$ 波片有两个可作相对旋转运动的区域组成,每个区域的半径值由 $\rho_j (j = 0, 1, 2)$ 决定,外半径相对于光学系统的光瞳是归一化的,有 $\rho_0 = 0, \rho_1 = r, \rho_2 = 1 (0 < r < 1)$ 。 x 轴和 $\lambda/2$ 波片两区域快轴之间的夹角分别为 θ_{2i}, θ_{2o} 。由矩阵光学的原理可知该系统等价于相位延迟为 $\varphi = 2\pi - 4\theta_2 (\theta_2 = \theta_{2i}, \theta_{2o})$ 的延迟器,并且等效快轴与 x 轴之间的夹角为 $\pi/4$ 。因此,该系统相位延迟量的大小仅由半波片的角度决定,其光瞳函数为

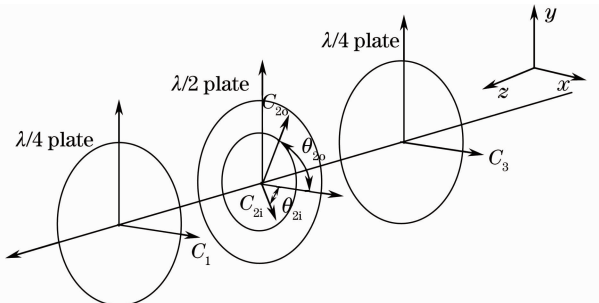


图 1 可调光瞳滤波器的结构图

Fig. 1 Schematic digram of the tunable pupil filter

$$P(\rho, \theta) = \begin{cases} \exp[i(2\pi - 4\theta_{2i})] & 0 < \rho < r_1 \\ \exp[i(2\pi - 4\theta_{2o})] & r_1 < \rho < 1 \end{cases}, \quad (1)$$

这样通过旋转半波片(θ_{2i}, θ_{2o})的任意区域,就可以改变该滤波器的光瞳函数,得到可调谐光瞳滤波器。根据德拜(Debye)理论,聚焦光学系统中的焦点区域复振幅分布为^[15]

$$U(v, u) = 2 \sum_{j=1}^2 \int_{\rho_{j-1}}^{\rho_j} P(\rho, \theta) J_0(v\rho) \exp\left(-\frac{i u \rho^2}{2}\right) \rho d\rho, \quad (2)$$

式中 ρ 为归一化半径, $P(\rho, \theta)$ 是(1)式所给出的光瞳函数。 $J_0(v\rho)$ 是零阶贝塞尔函数。 $v = \frac{2\pi}{\lambda}(NA)r, u = \frac{2\pi}{\lambda}(NA)^2 z$ 是焦点区域径向和轴向的归一化坐标, NA 是系统数值孔径。根据(2)式,焦点附近的轴向强度分布可以表示为

$$I(0, u) = 4 \left| \sum_{j=1}^2 \int_{\rho_{j-1}}^{\rho_j} P(\rho, \theta) \exp\left(-\frac{i u \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \right|^2, \quad (3)$$

焦平面上的径向强度为

$$I(v, u_f) = 4 \left| \sum_{j=1}^2 \int_{\rho_{j-1}}^{\rho_j} P(\rho, \theta) J_0(v\rho) \exp\left(-\frac{i u_f \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \right|^2, \quad (4)$$

式中 u_f 是焦点移动的距离。二阶近似的条件下(3)式可写为^[16]

$$I(0, u) = |I_0|^2 - \text{Im}(I_0^* I_1) u - \frac{1}{4} [\text{Re}(I_2^* I_0) - |I_1|^2] u^2, \quad (5)$$

式中 $*$ 表示复共轭, Im 和 Re 分别代表相对应部分的虚部和实部,其中 I_n 为

$$I_n = 2 \sum_{j=1}^2 \int_{\rho_{j-1}}^{\rho_j} P(\rho) \rho^{2n+1} d\rho, \quad (6)$$

轴向焦点的焦移为^[17]

$$u_f = -2 \frac{\text{Im}(I_0^* I_1)}{\text{Re}(I_2^* I_0) - |I_1|^2}, \quad (7)$$

从(5)和(7)式中可以分别得出系统的轴向强度分布和焦移。并且根据(4)式可以得出横向强度分布情况,从而可以得到系统的焦深。

3 轴向焦移和扩展焦深

根据上面的分析可知可调滤波器内区和外环的相位分别为 $\varphi_1 = 2\pi - 4\theta_{2i}$ 和 $\varphi_2 = 2\pi - 4\theta_{2o}$ 。由(6)

式可得 I_n ：

$$I_n = 2 \int_0^{r_1} \exp(i\varphi_1) \rho^{2n+1} d\rho + 2 \int_{r_1}^1 \exp(i\varphi_2) \rho^{2n+1} d\rho, \quad (8)$$

(7)式定义的焦移 u_f 可以改写为

$$u_f = \frac{(r_1^2 - r_1^4) \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\frac{1 - r_1^2 - r_1^6 + 2r_1^8}{3} - \frac{1 - 2r_1^4 + 2r_1^8}{4} + \left(\frac{r_1^2 + r_1^6 - 2r_1^8}{3} - \frac{r_1^4 - r_1^8}{2} \right) \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}. \quad (9)$$

由(9)式可以清楚地看出焦移 u_f 与内区的半径 r_1 和内外区相位差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 有关。当 $\varphi_1 - \varphi_2 = N\pi$ ($N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时,焦移量 u_f 为零。图 2(a) 给出了焦移量 u_f 与半径 r_1 和相位差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 的关系。从图中可以看出,当位相差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 在区间 $(-\pi, \pi)$ 时,焦移 u_f 是点对称的。当 $\varphi_1 - \varphi_2$ 在区间 $(-\pi, 0)$ 时,实际焦平面在几何焦平面的左边,同理,当 $\varphi_1 - \varphi_2$ 在区间 $(0, \pi)$ 时,实际焦平面在几何焦平面的右边。另外,可以看出随着位相差的增大焦移量的绝对值先增大后减小,所以焦移量存在一个最大值。

因为焦移量 u_f 与 r_1 和相位差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 有关,因此为了模拟加入所设计的可调谐滤波器后系统的焦移

和扩展焦深,假设波片外区的相位 $\varphi_2 = 0$,焦移量与相位差的关系转变为焦移量与内区相位之间的关系,这样就可以通过旋转 $\lambda/2$ 波片的相应部分调节内层的位相 φ_1 。对于第一区半径 r_1 的选择,根据图 2 虽然 r_1 在 $(0.6, 0.8)$ 区间时会有很大的焦移,但是根据我们前期的研究成果^[18] 可知,光学系统在这个区间的斯特雷尔比和横向分辨率很差。因此,为了综合考虑系统的斯特雷尔比,横向分辨率和焦移, r_1 应该在 $(0.3, 0.5)$ 区间内,在此区间不仅可以获得焦移,而且横向分辨率和斯特雷尔比都比较高。图 2(b) 给出了 $r_1 = 0.35$ 时,焦移与第一区相位之间的关系。

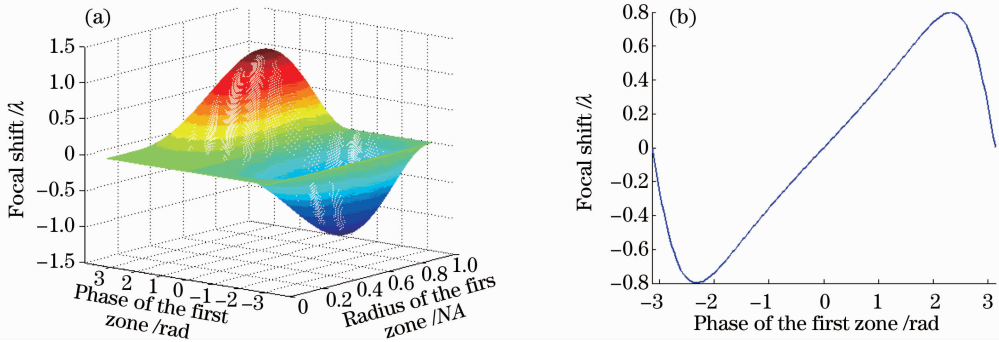


图 2 (a)内区相位 φ_1 ($\varphi_2 = 0$)与半径和焦移的关系,(b)当 $r_1 = 0.35$ 时,内区相位 φ_1 ($\varphi_2 = 0$)和焦移的关系

Fig. 2 (a) Focal shift as a function of the radius and the phase of the inner zone, (b) relation between focal shift and phase of the inner zone when $r_1 = 0.35$

图 3(a)给出了在 $r_1 = 0.35$ 时,对应不同相位时的轴向强度分布情况。可以得到当 $\varphi_1 = \pm 0.2\pi, \pm 0.4\pi, \pm 0.6\pi, \pm 0.8\pi, \pi$ 时的焦移量分别为 $u_f = \pm 0.07\lambda, \pm 0.42\lambda, \pm 0.57\lambda, \pm 0.76\lambda, 0$ 。根据前期的研究成果^[6] 可知焦移取决于光瞳函数的虚部。当 $\varphi_1 = \pi$ 时,光瞳函数不存在虚部,所以就不会有焦移。这也证明了关于引起焦移的原因的结论是正确的。根据(4)式得出 $r_1 = 0.35$, 对应不同相位时焦点区域横向强度分布如图 3(b)所示。由图 3(a)和 3(b)可以看出,在该区域可以在实现焦移的同时得到更好的横向分辨率和较高的斯特雷尔比。

图 4(a)和(b)分别给出了 $r_1 = 0.7$ 时焦点区域的轴向和横向强度分布,从图 4(a)中可以看到随着位相的增大,斯特雷尔比迅速减小而旁瓣能量迅速增大,这会使成像变得模糊不清,须采用共焦系统^[16]或牺牲一部分分辨能力^[19]来抑制旁瓣能量。当 $\varphi = \pi$ 时,在高斯像面上会同时出现两个焦点,使得该系统近似于一个双焦点透镜。这个现象被称作分裂焦点(focal split),在光镊技术中有很好的应用前景^[20]。与图 3 相比,可以看出当 $r_1 = 0.7$ 时,该系统的横向分辨率和斯特雷尔比都不理想。

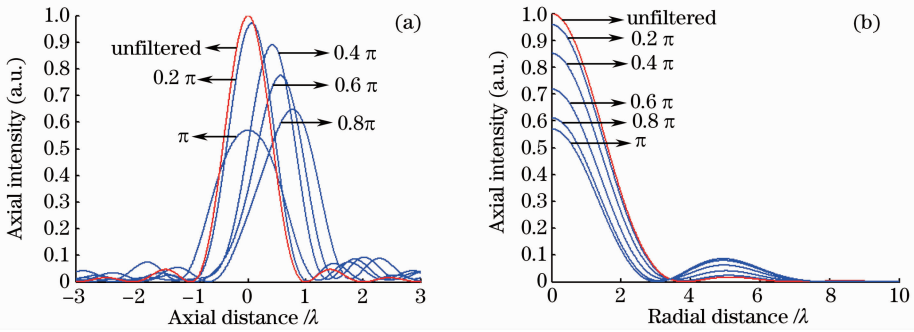


图 3 $r_1=0.35$ 时,第一区相位 $\varphi_1=0.2\pi, 0.4\pi, 0.6\pi, 0.8\pi, \pi$ 时的(a)轴向强度分布和(b)横向强度分布

Fig. 3 (a) Axial and (b) transverse intensity distribution for different phases of the first zone

$\varphi_1=0.2\pi, 0.4\pi, 0.6\pi, 0.8\pi, \pi$ when $r_1=0.35$

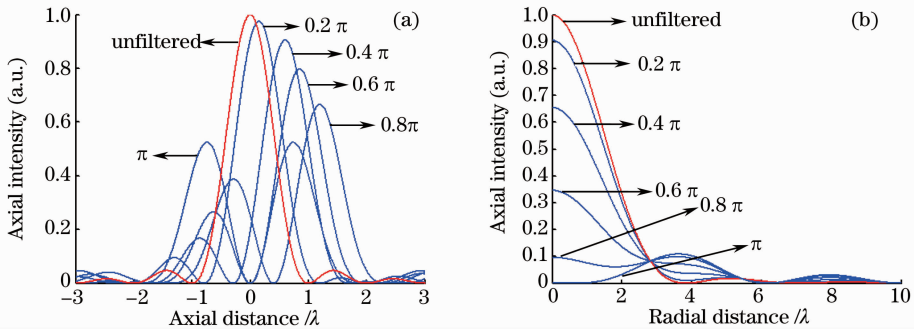


图 4 $r_1=0.7$ 时,第一区相位 $\varphi_1=0.2\pi, 0.4\pi, 0.6\pi, 0.8\pi, \pi$ 时的(a)轴向强度分布和(b)横向强度分布

Fig. 4 (a) Axial and (b) transverse intensity distribution for different phases of the first zone

$\varphi_1=0.2\pi, 0.4\pi, 0.6\pi, 0.8\pi, \pi$ when $r_1=0.7$

在文献[4]和[9]中提到如果双折射棱镜满足一定的条件,就会实现扩展焦深。在此,可以通过简单地控制第一区的相位来获得扩展焦深。若定义光强峰值变化量不超过 10% 的轴向距离为焦深。由图 5(a)中可以看到,当 $\varphi_1 = \pi$ 时,扩展焦深约为艾

里斑焦深的 1.8 倍。通过(4)式的运算,得出相同条件下归一化横向强度分布如图 5(b)所示,横向超分辨明显提高。因此,该系统在 $\varphi_1 = \pi$ 时同时实现了扩展轴向焦深与横向超分辨。

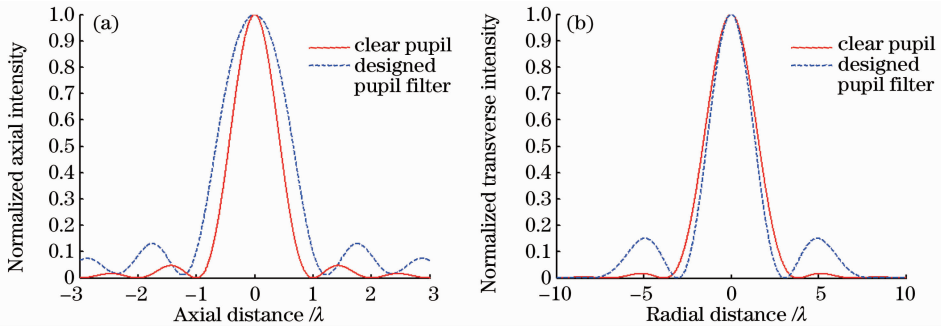


图 5 $r_1=0.35, \varphi_1=\pi$ 时(a)轴向和(b)横向的归一化强度分布

Fig. 5 (a) Axial and (b) transverse normalized intensity distribution with $r_1=0.35, \varphi_1=\pi$

图 6(a)给出了未加光瞳滤波器的系统的三维强度分布,6(b)给出了加入所设计的滤波器后系统的三维强度分布,可调光瞳滤波器的参数 $\varphi_1 = \pi, r_1=0.35$ 。可以清楚地发现该条件下,虽然没有轴向焦移,但可以得到很好的横向超分辨和轴向扩展

焦深,同时得到较高的施特雷尔比。艾里斑可以压缩到原来的 0.75,扩展焦深约为艾里斑焦深的 1.8 倍。所以光学系统中加入所设计的可调光瞳滤波器后,只需要通过旋转半波片就可以获得焦移和扩展焦深。

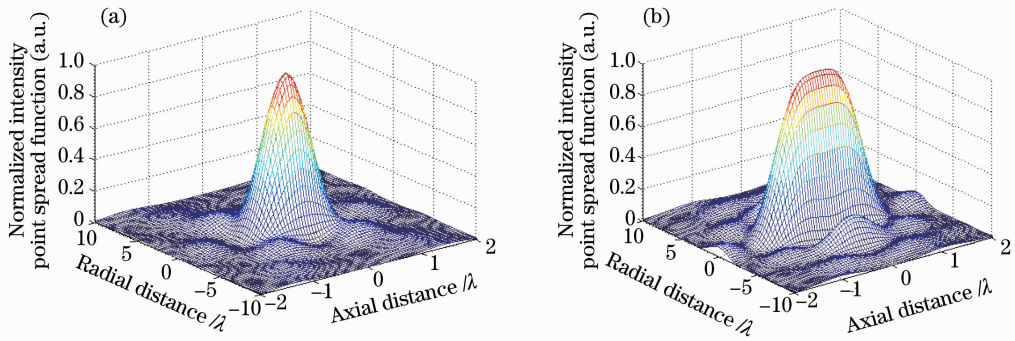


图 6 (a)无光瞳滤波器的光学系统三维强度分布,(b)含光瞳滤波器($r_1=0.35, \varphi_1=\pi$)的光学系统三维强度分布

Fig. 6 Three-dimensional intensity distribution of the optical system without pupil filter (a) and with the tunable pupil filter ($r_1=0.35, \varphi_1=\pi$)

4 结 论

借助于复合式补偿器的概念设计了由波片组合而成的可调光瞳滤波器,并对其光瞳函数及焦点附近的横向和轴向强度分布进行了分析。研究结果表明,与偏振掩模用于光焦移的方法相比,该系统可以通过旋转半波片的角度实现对焦移量的实时控制;另一方面,当半波片两部分相位差为 π 时,虽然没有轴向焦移,但可以同时得到横向超分辨和轴向扩展焦深。因此该系统可应用于自动调焦系统,比如某些光学读写驱动系统及光学相干层析系统有时需要调整焦平面。由于能同时实现横向超分辨和轴向扩展焦深,可以用于共焦扫描成像和微印刷等超分辨或大焦深技术领域。

参 考 文 献

- 1 C. J. R. Sheppard, A. Choudhury. Annular pupils, radial polarization, and superresolution [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(22): 4322~4327
- 2 J. B. Stewart, B. E. A. Saleh, M. C. Teich *et al.*. Experimental demonstration of polarization-assisted transverse and axial optical superresolution [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**(4-6): 315~319
- 3 A. I. Whiting, A. F. Abouraddy, B. E. A. Saleh *et al.*. Polarization-assisted transverse and axial optical superresolution [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 1714~1723
- 4 S. Sanyal, P. Bandyopadhyay, A. Ghosh. Vector wave imagery using a birefringent lens[J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(2): 592~599
- 5 Yun Maojin, Liu Liren, Sun Jianfeng *et al.*. Research on superresolution of radial birefringent filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 131~135
- 云茂金, 刘立人, 孙建锋等. 径向双折射滤波器的超分辨性能研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 131~135
- 6 J. M. Wang, L. R. Liu, M. J. Yun *et al.*. Superresolution, extended focal depth or focal shift with electrically controllable radial birefringent filter [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(12): 748~754

- 7 Q. Zhan, J. R. Leger. Microellipsometer with radial symmetry [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4630~4637
- 8 Q. Zhan, J. R. Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 324~331
- 9 S. Sanyal, A. Ghosh. High focal depth with a quasi-bifocus birefringent lens[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(14): 2321~2325
- 10 Xiping Liu, Xianyang Cai, Shoude Chang *et al.*. Cemented doublet lens with an extended focal depth [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(2): 552~557
- 11 D. R. Chowdhury, K. Bhattacharya, A. K. Chakraborty *et al.*. Possibility of an optical focal shift with polarization masks [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(19): 3819~3826
- 12 Wang Jiming, Liu Liren, Yun Maojin *et al.*. Transverse superresolution and axial extended focal depth with electrically controlled radial birefringent filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 903~908
- 王吉明, 刘立人, 云茂金等. 电控径向双折射滤波器的横向超分辨与轴向扩展焦深[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 903~908
- 13 Xie Yile, Wang Jiming, Liu Youwen. Tuning analysis of electrically controlled amplitude-based superresolution pupil filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1464~1468
- 谢翊乐, 王吉明, 刘友文. 电控振幅型超分辨光瞳滤波器的调谐特性分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1464~1468
- 14 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Mei. Design of three-in-one composite compensator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(9): 821~822
- 云茂金, 李国华, 王美. 三元复合式补偿器的设计与研制 [J]. *中国激光*, 2001, **28**(9): 821~822
- 15 M. Gu. *Advanced Optical Imaging Theory* [M]. Springer-Verlag, Berlin, 2000
- 16 M. Martinez-Corral, M. T. Caballero, P. Andres. Sidelobe decline in single-photon 4Pi microscopy by Toraldo rings [J]. *Micron*, 2003, **34**(6-7): 319~325
- 17 D. M. de Juan, J. E. Oti, V. F. Canales *et al.*. Design of superresolving continuous phase filters [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8): 607~609
- 18 M. J. Yun, M. Wang, Y. Wan *et al.*. Tunable transverse superresolution with phase-only pupil filters [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(12): 1027~1033
- 19 He Yi, Zhang Yudong, Li Guojun *et al.*. Axial super resolution effects of super Gaussian phase filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2568~2572
- 何毅, 张雨东, 李国俊等. 超高斯相位型光瞳滤波器轴向超分辨性能 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2568~2572
- 20 X. Gao, F. Zhou, W. Xu *et al.*. Focusing splitting induced by a pure phase-shifting apodizer [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**(1-3): 55~59