

基于晶体的“非三明治”结构可调横向超分辨光瞳滤波器设计

朱化凤 刘为森 衡科尹 陈 胜 戈立娜

(中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

摘要 研究了基于双折射晶体的非“三明治”结构的分区光瞳滤波器在低数值孔径聚焦系统中的光学特性。以内区为玻璃和外区为双折射晶体的两区光瞳滤波器为例,给出了此类光瞳滤波器光瞳函数的精确表达式。结合标量衍射理论,数值模拟了其光学特性。结果表明,通过旋转光瞳滤波器可以实现系统焦平面上横向光学超分辨的连续调节,同时可以扩展焦深。这种滤波器较现有的基于双折射晶体的光瞳滤波器具有更高的光能利用率,并且其可调性更方便于实际应用。

关键词 物理光学;可调光瞳滤波器;双折射晶体;横向超分辨;焦移

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.1016002

Non-Sandwich-Structured Tunable Transverse Superresolving Pupil Filters Based on Birefringent Crystals

Zhu Huafeng Liu Weisen Heng Keyin Chen Sheng Ge Lina

(College of Science, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract The optical properties of "non-sandwich-structured" zonal pupil filter based on birefringent crystal are studied in focusing optical systems with low numerical aperture. The exact pupil function of the new filter is presented by taking glass and birefringent crystal for the inner and outer zone respectively as an example. Numerical simulations of its optical properties are carried out with scalar diffraction theory, which shows that tunable transverse superresolution properties as well as extended axial focal depth can be obtained by rotating the pupil filter. This kind of filter has higher light utilization ratio than the existed pupil filters based on birefringent crystals, and its tunable ability can provide more flexibility in practical applications.

Key words physical optics; tunable pupil filter; birefringent crystal; transverse superresolution; focal shift

OCIS codes 100.6640; 100.5090; 230.6120

1 引 言

光学超分辨是一种在尽量少地改变光学系统结构的情况下,提高成像分辨率或提高光学系统存储密度的方法,近年来超分辨技术在理论和实际应用中都引起人们的极大关注,在天文学^[1]、图像处理^[2]、共焦扫描成像^[3~5]、光存储^[6]、激光打印^[7]等技术中有着广泛的应用。自 Francia^[8]提出超过经

典衍射极限的可能性后,人们提出了多种获得光学超分辨的方法。近年来借助空变偏振效应来实现可控超分辨的方法受到了广泛关注,主要包括:1)利用单块双折射晶体板^[9]、复合双折射延迟片^[10]、径向双折射透镜^[11]或各向异性-同性介质组合^[12],旋转双折射元件获得相位或透射振幅连续变化的相位型或振幅型光瞳滤波器,实现焦点附近分辨率的手

收稿日期: 2012-05-15; **收到修改稿日期:** 2012-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(10904080),山东省自然科学基金(Y2008A34,ZR2012DL12)、国家级大学生创新创业训练计划创新训练项目(1111042563),山东省优秀中青年奖励基金(BS2011DX007)和 2012 年青岛市科技发展计划——应用基础研究[12-1-4-7-(7)-jch]资助课题。

作者简介: 朱化凤(1977—),女,博士,副教授,主要从事光学超分辨和偏光工程技术等方面的研究。

E-mail: zhuhf@upc.edu.cn

动控制,而利用系统中电光晶体的动态相位延迟特性,可以获得横向光学超分辨与轴向焦深或焦移的实时控制^[13,14];2) 利用偏振掩模板的技术^[15~17],在透镜孔径的光瞳面上加上偏振掩模来修正系统的光瞳函数,通过偏振器改变掩模区域的出射光场以实现分辨率可调,实现焦点附近光强重新分布;3) 利用共轴离焦的正交线偏振高斯光相互叠加,获得横向与轴向超分辨,实现了超分辨性能参数的实时控制,特定结构之下可以分别获得轴向扩展焦深或轴向焦移的控制^[18,19]。其中超分辨光瞳滤波技术以其可以尽量少地改变光学成像系统结构的特点而备受青睐,常见的光瞳滤波器主要有:振幅型光瞳滤波器^[20]、相位型光瞳滤波器^[21~23]和复振幅型光瞳滤波器^[24]。绝大多数的光瞳滤波器,特别是相位型光瞳滤波器一旦制作完成,其光学超分辨特性就不能再被改变。但在诸如超大规模集成电路、粒子俘获和控制等应用中^[25],系统的分辨率需具有动态可调谐性。基于双折射晶体的光瞳滤波器为系统光学性能连续调节提供了有效手段,但目前基于双折射晶体的光瞳滤波器基本都是“偏振片-双折射滤波器-偏振片”的“三明治”结构形式,这种结构的最大特点就是能量损失较大。

本文研究了一种基于双折射波片的非“三明治”结构的光瞳滤波器,可以实现光学系统横向超分辨和轴向焦移的连续可调。采用两个量来描述超分辨效果。第一个参量光斑压缩比 G ,用来衡量超分辨的程度,定义为焦平面上超分辨光斑两个第一极小值之间的距离与艾里斑的第一极小值之间的距离之比。第二个参量为斯特雷尔比 S ,描述光斑相对于艾里斑的亮度,定义为超分辨模式中焦点处光强与艾里斑模式下光强的比值。 G 愈小, S 愈大,超分辨效果愈好。在考虑了 e 光和 o 光共同的影响以及光瞳滤波器内区和外区光束的相互影响的情况下,利用琼斯矩阵得到了可调谐两区光瞳滤波器的光瞳函数的精确表达式。并研究了厚度、相对半径等设计参量对该滤波器性能参量和光强分布的影响。

2 基本理论

根据 Born 等^[1]的理论,在单色光照明条件下,当聚焦光学系统的数值孔径较低时,光学系统焦点附近的振幅归一化分布可表示为

$$U(u, v) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(u\rho) \exp\left(-\frac{iv\rho^2}{2}\right) \rho d\rho, \quad (1)$$

式中 ρ 为归一化的半径, $P(\rho)$ 为系统的光瞳函数, $J_0(u\rho)$ 为零阶第一类贝塞尔函数。经典的衍射极限是在假设 $P(\rho) = 1$ 的条件下得到的。 u 和 v 分别对应接收面上的径向坐标 r 和轴向坐标 z , 其表达式为

$$u = 2\pi r \sin \alpha / \lambda, \quad (2)$$

$$v = 2\pi z \sin^2 \alpha / \lambda, \quad (3)$$

式中 $\sin \alpha$ 代表数值孔径。当 $v=0$ 时,根据(1)式可得焦平面上的横向振幅表达式:

$$U(u, 0) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(u\rho) \rho d\rho. \quad (4)$$

当 $u=0$ 时,对应轴向振幅表达式

$$U(0, v) = 2 \int_0^1 P(\rho) \exp\left(-\frac{iv\rho^2}{2}\right) \rho d\rho. \quad (5)$$

根据

$$I = U * U^*, \quad (6)$$

可以求得光束在焦平面附近的径向和轴向光强分布。

3 新型滤波器的结构及光瞳函数

图 1(a) 给出了新型光瞳滤波器结构示意图。新型光瞳滤波器由起偏器 P 和两区光瞳滤波器 L 组成。两区光瞳滤波器 L 是新型滤波器的核心部分如图 1(b) 所示。其内区由玻璃材料制作,外区由双折射材料制作,内外两部分具有相同的厚度。 oz 是系统光轴的方向, ϵ 是内区玻璃部分的归一化半径, \leftrightarrow 代表晶体快轴的方向, θ 为晶体快轴与 x 轴的夹角,这里称为旋转角。

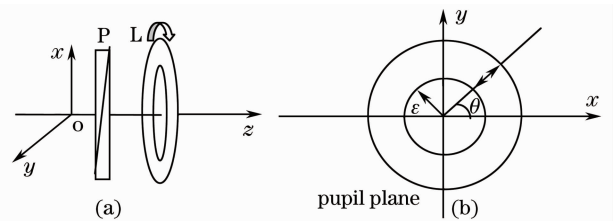


图 1 新型光瞳滤波器结构示意图

Fig. 1 Sketch of new pupil filter

当一束平行单色自然光垂直入射该光瞳滤波器,考虑到内外两区光波的影响,滤波器 L 的内区琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

外区琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{M} = e^{i\phi} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta e^{i\phi} & \sin \theta \cos \theta (1 - e^{i\phi}) \\ \sin \theta \cos \theta (1 - e^{i\phi}) & \sin^2 \theta + \cos^2 \theta e^{i\phi} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $\phi = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_e - n_o)$ 为 o 光和 e 光通过外区双折射晶体的相位差。 $\delta = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_o - n)$ 为 o 光通过外区双折射晶体和单色线偏振光通过内区玻璃的相位差。 n_e 和 n_o 分别为非寻常光(e 光)和寻常光(o 光)的主折射率, n 为玻璃的折射率, d 为双区滤波器厚度, λ 为入射波长。

设起偏器透振方向与 x 轴夹角为 φ , 单位振幅的单色自然光透过起偏器后产生单色线偏振光 $\mathbf{E}_o = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}$ 入射到滤波器 L 上, 内区出射光振幅为

$$\mathbf{E}_1 = P\mathbf{E}_o = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (9)$$

外区出射光振幅为

$$\mathbf{M} = e^{i\delta} \begin{bmatrix} (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta e^{i\phi}) \cos \varphi + \sin \theta \cos \theta (1 - e^{i\phi}) \sin \varphi \\ \sin \theta \cos \theta (1 - e^{i\phi}) \cos \varphi + (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta e^{i\phi}) \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

这样整个滤波器 L 的光瞳函数可在 x 轴和 y 轴上分解, 光瞳函数 x 轴分量可表示为

$$P_1(\rho) = \begin{cases} \cos \varphi & 0 \leq \rho \leq \epsilon \\ e^{i\delta} [(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta e^{i\phi}) \cos \varphi + \sin \theta \cos \theta (1 - e^{i\phi}) \sin \varphi] & \epsilon \leq \rho \leq 1 \end{cases}, \quad (11)$$

光瞳函数 y 轴分量可表示为

$$P_2(\rho) = \begin{cases} \sin \varphi & 0 \leq \rho \leq \epsilon \\ e^{i\delta} [\sin \theta \cos \theta (1 - e^{i\phi}) \cos \varphi + (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta e^{i\phi}) \sin \varphi] & \epsilon \leq \rho \leq 1 \end{cases}, \quad (12)$$

式中 ϵ 为内区的归一化半径。将(11)式和(12)式代入(4)~(6)式, 便可求得光瞳函数 x 轴、 y 轴分量在焦点附近横向和纵向的光强分布, 进而得到总的光强分布。

4 设计参量对新型滤波器性能参量的影响

4.1 厚度对光学超分辨性能参量的影响

设内区和外区分别由 BK7 玻璃和二氧化硅(石英)制作, 入射波长为 694 nm, BK7 玻璃的折射率为 $n = 1.51322$, 二氧化硅 o 光和 e 光的主折射率分别为 $n_o = 1.5408$, $n_e = 1.54981$ 。单色线偏振光垂直入射, 对于特定的材料和内区归一化半径, 光瞳函数仅

仅随材料的厚度发生变化。在 2.0~2.1 mm 的厚度范围内讨论该问题。对于实际应用和加工技术中具体要求的其他厚度, 可以通过相同的过程来确定。图 2 给出了 $\varphi = 0, \epsilon = 0.4, \theta = \pi/4$ 时, 光斑压缩比 G 和斯特雷尔比 S 随材料厚度 d 的变化关系。表 1 给出了性能参量随材料厚度的变化关系。其中 $G(x), G(y), G$ 分别为光瞳函数 x 轴、 y 轴分量和总的光斑压缩比, $S(x), S(y), S$ 分别为光瞳函数 x 轴、 y 轴分量和总的斯特雷尔比。由图 2 和表 1 可以看到, 在入射条件和滤波器的方位一定的条件下, 可实现的超分辨的范围对厚度依赖性很大, 当厚度取某些值时, 如 2000, 2021, 2054, 2078 μm 等时, 均能较好地实现光学超分辨。

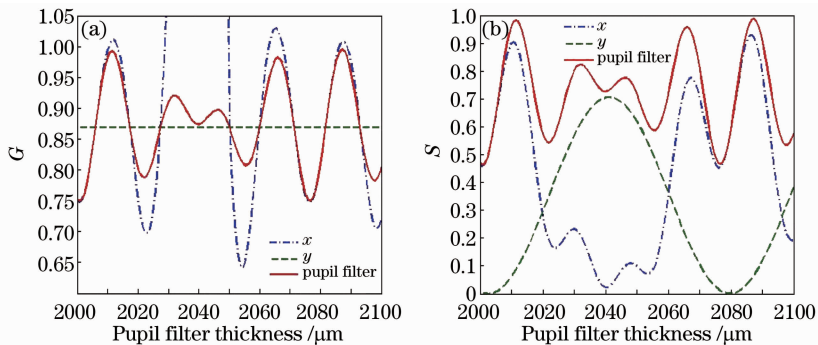


图 2 $\epsilon = 0.4, \theta = \pi/4$ 时, (a) G 和 (b) S 随材料厚度的变化关系

Fig. 2 Dependence of (a) G and (b) S on the thickness of the material when $\epsilon = 0.4, \theta = \pi/4$

表 1 $\varphi=0, \epsilon=0.4, \theta=\pi/4$ 时,性能参量随材料厚度变化关系

Table1 Dependence of parameters on the thickness of the material when $\varphi=0, \epsilon=0.4, \theta=\pi/4$

Thickness $d/\mu\text{m}$	G	$G(x)$	$G(y)$	S	$S(x)$	$S(y)$
2000	0.7518	0.8676	0.7508	0.4708	0.4625	0.0083
2021	0.7904	0.7205	0.8678	0.5504	0.2241	0.3263
2054	0.8144	0.6403	0.8676	0.6010	0.5296	0.0715
2078	0.7612	0.7602	0.8676	0.4886	0.4853	0.0033

4.2 内区归一化半径对光学超分辨性能参量的影响

以 $\varphi=0, \theta=\pi/4, d=2021\mu\text{m}$ 为例分析,内区归一化半径 ϵ 取不同值对应的 G 和 S 如表 2 所示。从表 2 可以看到,内区归一化半径 ϵ 在 $0.1\sim 0.7$ 范围内变化时,随半径增大,光斑压缩比 G ,斯特雷尔比

表 2 $\varphi=0, \theta=\pi/4, d=2021\mu\text{m}$ 时,内区归一化半径 ϵ 取不同值对应的 G 和 S

Table 2 G and S for different values of the normalized radius of the inner zone when $\varphi=0, \theta=\pi/4, d=2021\mu\text{m}$

Normalized radius of the inner zone	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
G	0.9804	0.9296	0.8631	0.7901	0.7158	0.6415	0.6155
S	0.9669	0.8715	0.7260	0.5504	0.3728	0.2293	0.1641

4.3 横向超分辨的调谐及光强分布

一束单色平行自然光垂直入射的情况下,在光瞳面内以系统光轴为轴线旋转起偏器,可以改变 φ 角;在光瞳面内以系统光轴为轴线旋转光瞳滤波器,如图 1(a) 中的空心箭头所示,可以改变 θ 角。取 $\epsilon=0.4, d=2021\mu\text{m}$, 得到 $\varphi=0, \varphi=\pi/6, \varphi=\pi/4$ 时光斑压缩比 G 和 $\varphi=0, \varphi=\pi/6, \varphi=\pi/4$ 时斯特雷

S 变小。当 ϵ 增大至 0.7 时,光斑压缩比 G 进一步变小,斯特雷尔比 S 将太低,以至于在实际应用中没有多大意义,因此并不是 ϵ 的取值越大越好,要根据实际情况来选择。

尔比 S 随旋转角 θ 的变化如图 3 所示。从图 3 可以看到,无论 $\varphi=0$ 还是 $\pi/6$ 或 $\pi/4$ 时,旋转角 θ 从 $0^\circ\sim 180^\circ$ 变化时,光斑压缩比 G 总在区间 $(0.7562, 0.8253)$,斯特雷尔比 S 在区间 $(0.4777, 0.6232)$ 变化,改变 φ 角时仅仅使 G 和 S 的最大值和最小值对应的 θ 角发生了变化,对光瞳滤波器的光斑压缩比和斯特雷尔比的调谐范围没有实质性的影响。 θ 在 0° 至

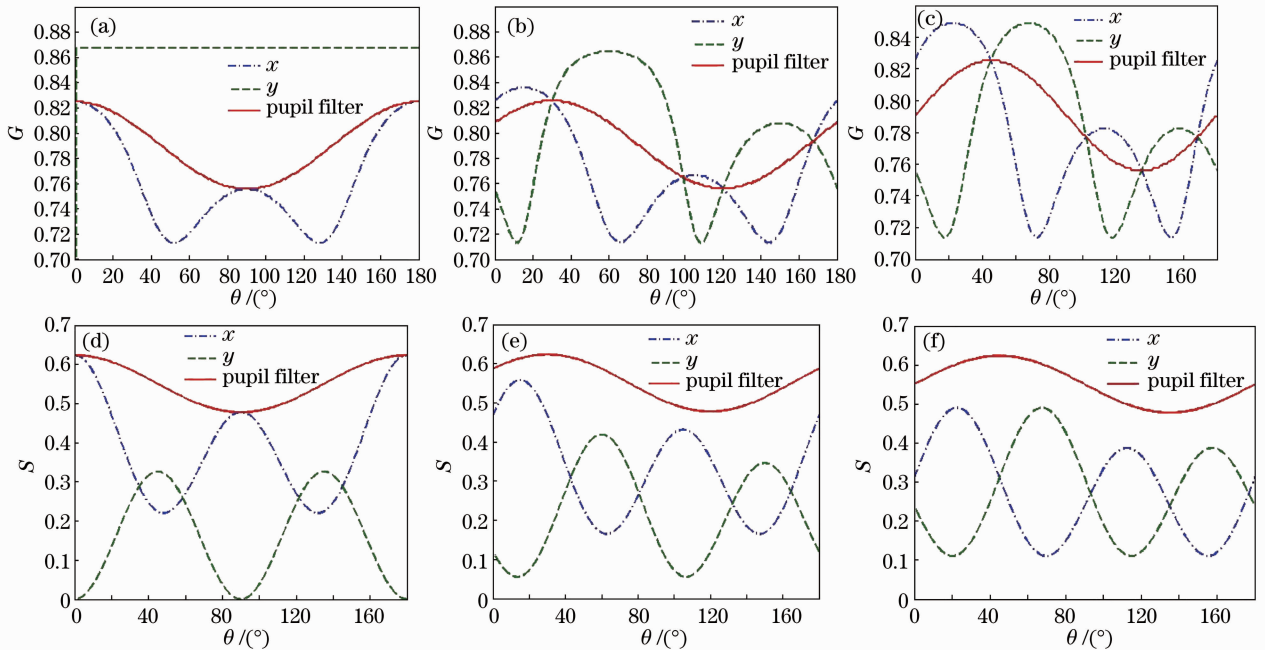


图 3 $\epsilon=0.4, d=2021\mu\text{m}$ 时, (a) $\varphi=0$, (b) $\varphi=\pi/6$, (c) $\varphi=\pi/4$ 光斑压缩比 G 和 (d) $\varphi=0$, (e) $\varphi=\pi/6$, (f) $\varphi=\pi/4$ 斯特雷尔比 S 随旋转角 θ 的变化关系

Fig. 3 Dependence of spot compression ratio G for (a) $\varphi=0$, (b) $\varphi=\pi/6$, (c) $\varphi=\pi/4$ and strehl ratio S for (d) $\varphi=0$, (e) $\varphi=\pi/6$, (f) $\varphi=\pi/4$ on the rotating angle θ when $d=2021\mu\text{m}, \epsilon=0.4$

180° 之间进行旋转时,可以选择一个光斑压缩比连续变化的区间作为调节范围,因此下文取 $\varphi = 0$ 为例讨论改变 θ 角时光瞳滤波器的调谐特性,此时最大光斑压缩比和最小光斑压缩比对应的角度比较特殊,超分辨性能连续单调调谐的范围对应的旋转角为 $[0, 90^\circ]$ 。在此调节范围之内,调节范围是单调递减的, $\theta = 0$ 时对应的是调节上限 $G = 0.8253, S = 0.6232, \theta$ 取 90° 时取得调节下限 $G = 0.7562, S =$

0.4777。也可以选取 $[90^\circ, 180^\circ]$ 作为调节范围,此时对应的调节范围不变,只不过超分辨性能参量是单调递增的。

图 4 以厚度 $2021 \mu\text{m}$ 为例,给出了该光瞳滤波器光强分布和归一化横向光强分布,旋转角分别取 $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 和 80° 。图 4 表明,可以在相当大的范围内实现超分辨的连续可调,但伴随着焦点强度的降低和旁瓣能量的增加。

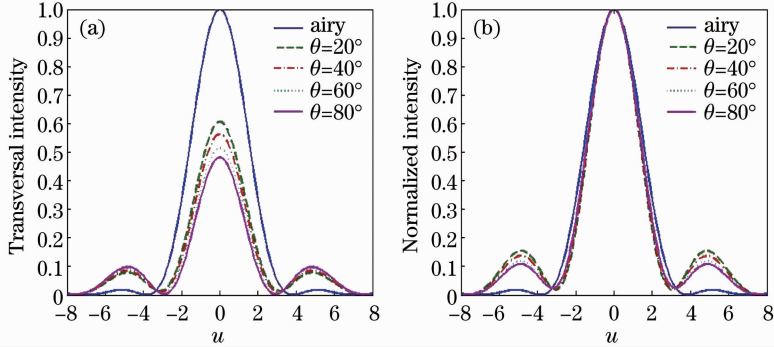


图 4 $\varphi=0, \epsilon=0.4, d=2021 \mu\text{m}$ 时(a)横向和(b)归一化的光强分布

Fig. 4 (a) Transversal intensity and (b) normalized transversal intensity when $\varphi=0, \epsilon=0.4, d=2021 \mu\text{m}$

进一步研究表明,对于特定的入射光波和相对半径,可以通过调整滤波器的厚度来改变超分辨性能的调节范围。

4.4 横向超分辨性能测试

根据设计参数,取 $\epsilon=0.4, d=2021 \mu\text{m}$,制作了两区超分辨光瞳滤波器,令 $\varphi=0$ 对器件的性能进行了测试,得到其光斑压缩比如图 5 所示。由图可见,该滤波器的超分辨性能与理论结果的变化趋势基本一致,即该滤波器可以在一定的波长范围内实现超分辨性能的连续调节。但从图中可以看到,实验得到的光斑压缩比基本上都高于理论值。究其产生误差的原因主要是由于器件可能存在制作误差,光束

的均匀性也不能得到很好的保证。

4.5 新型光瞳滤波器的轴向特性

对于圆对称的入射光场分布来说,横向强度点扩散函数的分布关于原点对称。但轴向强度点扩散函数的分布一般不具备对称性,聚焦光束在轴上光强的对称中心往往与几何焦点不在同一位置,称为焦移。图 6 以厚度取 $2021 \mu\text{m}$ 为例,给出了轴向焦移随旋转角的变化及旋转角分别取 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 和 80° 对应的轴向光强分布。由图 6(a)可以看出,在区间 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内,轴向焦移关于 $\theta=90^\circ$ 对称,轴向焦移先增大后减小,且在 $\theta=90^\circ$ 取得最大值。图 7 给出了 $\theta=60^\circ$ 时轴向和横向的归一化光强分布。图 7(a)表明,当 $\theta=60^\circ$ 时系统的轴向焦深得到了明显扩展。若定义光强峰值变化量不超过 10% 时的轴向距离为焦深,此时扩展焦深约是艾里斑焦深的 2 倍。同时,由图 7(b)还可以得出此时光斑压缩比 $G=0.7727$,系统的斯特尔比 $S=0.5140$ 。可见,利用所设计的光瞳滤波器,当 $\theta=60^\circ$ 时不仅轴向焦深得到有效的扩展,而且在斯特雷尔比较高的情况下实现了横向光学超分辨。该结果明显优于文献[21]设计的可调光瞳滤波器。由此可见,旋转角取 $0^\circ \sim 90^\circ$ 就可以实现轴向焦移在几何焦点附近连续调节,因此该滤波器也可以在某些光学系统如相干光学层析系统中实现焦移的连续调节。

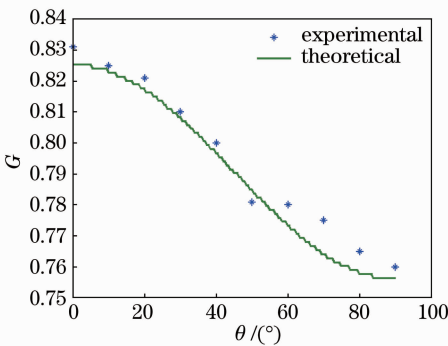


图 5 光斑压缩比的实验值与理论值的比较

Fig. 5 Comparison of experimental and theoretical values of spot compression ratio

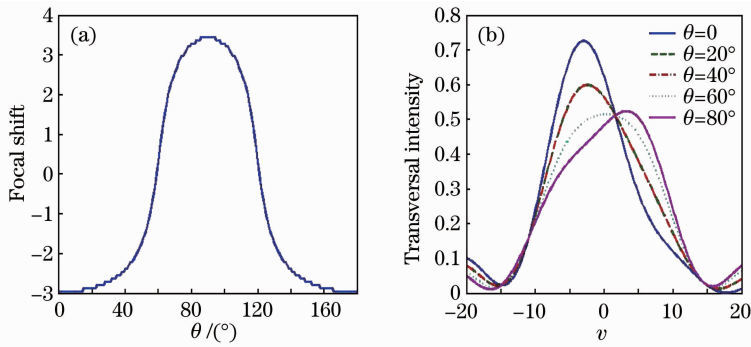


图 6 $\varphi=0, \epsilon=0.4, d=2021 \mu\text{m}$ 时, (a) 轴向焦移随旋转角的变化关系及 (b) 旋转角分别取 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 和 80° 对应的轴向光强分布

Fig. 6 (a) Dependence of axial focal shift on the rotating angle and (b) axial intensity for the rotating angles getting values of $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ and 80° respectively when $\varphi=0, \epsilon=0.4, d=2021 \mu\text{m}$

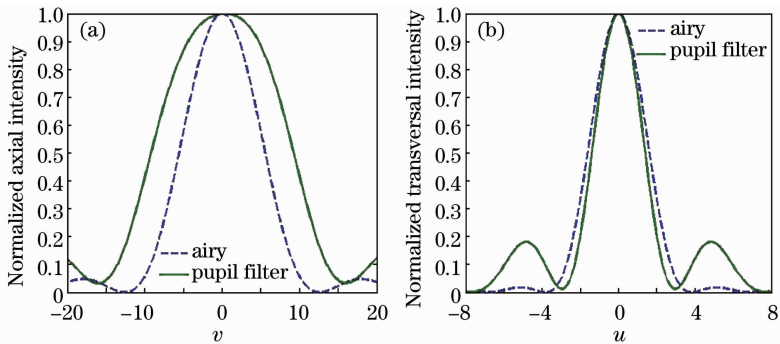


图 7 $\epsilon=0.4, d=2021 \mu\text{m}, \theta=60^\circ$ 时 (a) 轴向和 (b) 横向的归一化光强分布

Fig. 7 (a) Axial and (b) transversal normalized intensity for $\theta=60^\circ$ when $\epsilon=0.4, d=2021 \mu\text{m}$

5 结 论

设计了一种基于双折射波片的两区型可调光瞳滤波器,借助于琼斯矩阵得出了其光瞳函数的精确表达式,分析了设计参数取不同值时,系统焦点附近横向与轴向的光强分布特性。研究表明,该光瞳滤波器不仅可以实现光学系统横向分辨率的提高,而且可以通过旋转光瞳滤波器实现横向分辨率的连续调节。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。通过调节旋转角 θ ,此滤波器还可以用于实现对轴向焦移的连续调节,当旋转角 θ 为 60° 时,可以在实现横向超分辨的同时将轴向焦深扩展为艾里斑的 2 倍。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 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
 2 Z. S. Hegedus, V. Safaris. Superresolving filters in confocally scanned imaging systems [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986,

3(11): 1892~1896
 3 D. M. de Juana, J. E. Oti, V. F. Canales *et al.*. Transverse or axial superresolution in a 4Pi-confocal microscope by phase-only filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(11): 2172~2178
 4 G. Boyer. New class of axially apodizing filters for confocal scanning microscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(3): 584~589
 5 Xiao Fanrong, Wang Guiying, Xu Zhizhan. The design of tunable phase only pupil filter with uniaxial crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 378~382
 肖繁荣, 王桂英, 徐至展. 单轴晶体相位型光瞳滤波器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 378~382
 6 T. R. M. Sales, G. M. Morris. Superresolution elements for high-density optical storage[C]. in Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage. Optical Society America Technical Digest Series, 1996, **12**: 290~292
 7 H. Fukuda, T. Terasawa, S. Okazaki. Spatial filtering for depth of focus and resolution enhancement in optical lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1991, **9**(6): 3113~3116
 8 G. T. di Francia. Super-gain antennas and optical resolving power[J]. *Nuovo Cimento, Suppl.*, 1952, **9**(3): 426~435
 9 Xiao Fanrong, Wang Guiying, Xu Zhizhan. The design of tunable phase-only pupil filter with uniaxial crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 378~382
 肖繁荣, 王桂英, 徐至展. 单轴晶体相位型光瞳滤波器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 378~382
 10 Yun Maojin, Wang Yong, Kong Weijin *et al.*. Transverse superresolution and axial extended focal depth realized by the tunable phase pupil filter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1):

194~199

云茂金, 王勇, 孔伟金等. 可调谐位相型光瞳滤波器的横向超分辨和轴向扩展焦深[J]. 物理学报, 2008, **57**(1): 194~199

- 11 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
- 12 Zhu Huafeng, Li Dailin, Wang Ning *et al.*. Precise analysis of combination homogeneous-inhomogeneous-material superresolution filters with double-tunable modes[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(7): 2097~2101
- 13 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
- 14 Wang Jiming, Liu Liren, Yun Maojin *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
- 15 D. R. Chowdhury, K. Bhattacharya, A. K. Chakroborty. Focal shift in an imaging system with polarization-phase modulated aperture plane[J]. *J. Opt.*, 2002, **31**(3): 117~128
- 16 D. R. Chowdhury, K. Bhattacharya, A. K. Chakroborty *et al.*. Possibility of an optical focal shift with polarization masks [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(19): 3819~3826
- 17 V. F. Canales, P. J. Valle, J. E. Oti *et al.*. Variable resolution with pupil masks[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **257**(2): 247~254
- 18 Qiwen Zhan, J. Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 324~331
- 19 A. Whiting, A. Abouraddy, B. Saleh *et al.*. Polarization-

assisted transverse and axial optical superresolution [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(15): 1714~1723

- 20 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
- 21 Yun Maojin, Wang Mei, Kong Weijin *et al.*. Axial focal shift and extended focal depth with tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0311003
云茂金, 王美, 孔伟金等. 可调光瞳滤波器的轴向焦移及扩展焦深[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0311003
- 22 Zhu Huafeng, Xu Dan, Wang Xiumin *et al.*. Design and study of achromatic phase-only superresolving pupil filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0522001
朱化凤, 徐丹, 王秀民等. 消色差位相型超分辨光瞳滤波器的设计研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0522001
- 23 Zhou Guozun, Tian Weijian, Chen Huifang. Three-dimensional superresolving phase optical pupil filter with polynomial function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1211002
周国尊, 田维坚, 陈慧芳. 多项式型相位光瞳滤波器实现三维超分辨[J]. 光学学报, 2011, **31**(12): 1211002
- 24 Zhu Huafeng, Gao Hongyi, Gan Huijing *et al.*. Double mode high-precision adjustable superresolving pupil filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 1829~1834
朱化凤, 高鸿奕, 高慧菁等. 双模式高精度可调超分辨光瞳滤波器[J]. 光学学报, 2007, **27**(12): 1829~1834
- 25 Ding Hongping, Li Qinghui, Zhou Wenyi. Influence of Toraldo pupil-filter on imaging resolution of optical system[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(11): 1311~1314
丁洪萍, 李庆辉, 邹文艺. Toraldo 光瞳滤波器对光学系统成像分辨率的影响[J]. 光电子·激光, 2004, **15**(11): 1311~1314

栏目编辑: 韩峰