

# 电控径向滤波器的横向超分辨与轴向焦移\*

王吉明<sup>1,2</sup> 刘立人<sup>1</sup> 云茂金<sup>3</sup> 赵 栋<sup>1</sup> 刘锡民<sup>1</sup> 郎海涛<sup>1</sup>

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2 南京航空航天大学理学院, 南京 266017)

(3 青岛大学理工学院物理系, 山东青岛 266071)

**摘 要** 提出一种光瞳滤波器来同时实现横向超分辨和轴向焦移效应的电控制. 该光瞳滤波器由两偏光镜及包含有径向双折射元件的任意偏振态的电控旋光器组成. 利用径向双折射元件对光偏振态的空间调制作用, 结合旋光器对任意偏振态光的旋光作用, 与两个偏光镜结合, 实现了空间偏振态的重新分布. 利用庞加莱球及琼斯理论进行了分析, 结果表明, 借助这种电致位相延迟来实现的偏振态调制效应, 可同时实现横向超分辨与轴向焦移效应. 对能够同时获得横向超分辨与轴向焦移的情况进行了分析, 得到了系统各组成参量及电光调制范围.

**关键词** 物理光学; 径向滤波器; 横向超分辨; 焦移; 电光调制

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

## 0 引言

光学超分辨和光焦移两种效应都被各自独立地进行了广泛深入的研究. 光学超分辨技术主要应用在天文学、图像处理 共焦扫描成像、光存储等技术中. 应用超分辨的光瞳滤波器是目前实现光学超分辨主要方法<sup>[1~6]</sup>. 超分辨光瞳滤波器主要有振幅型光瞳滤波器和位相型光瞳滤波器. 近年来, 借助偏振效应来实现超分辨的方法得到关注<sup>[1,3~6]</sup>, Whiting 等提出借助偏振效应, 利用共轴离焦的左右旋圆偏振的高斯光相互叠加, 获得了横向与轴向的超分辨. 同样, 利用偏振干涉效应, 把由两个偏振器与一个圆对称的径向双折射元件组成的径向双折射滤波器引入超分辨技术<sup>[1]</sup>, 实现了系统的横向超分辨或轴向超分辨. 但以上研究对于超分辨性能的动态控制较少涉及并且主要控制方法是机械或手动调节. 另一方面, 焦移效应(Focal Shift Effect)已在自动聚焦、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<sup>[7~16]</sup>. Qiwen Zhan 研究了偏振方向径向对称分布的柱状矢量光束(Cylindrical Vector Beams)的焦点处光强分布特性与调节特性<sup>[9]</sup>. R. Chowdhury 首次提出偏振掩模法(Polarization Masks)实现焦移控制<sup>[13,14]</sup>. 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位相或振幅的控制, 得出了可实现焦移的光瞳函数, 实现了轴向焦移效应. 以上焦点处光强分布特性的调

节需要延迟片的组合使用且手动调整其方位角.

本文提出了电控的径向超分辨与轴向焦移. 在径向双折射滤波系统中引入了适用于任意偏振态的电控旋光器<sup>[17]</sup>, 组成电控径向双折射滤波器, 通过分析电光调制下光瞳函数变化及系统偏振态演变, 得到横向超分辨性能参量与轴向焦点位置的变化, 得出通过电控方位角光旋转器的调制可同时实现横向超分辨与轴向焦移.

## 1 结构与分析

电控径向双折射滤波器的结构如图 1. 沿光传播方向, 依次是起偏器 P、λ/4 波片 Q<sub>1</sub>、电光元件 B、径向双折射元件 L、λ/4 波片 Q<sub>2</sub> 和检偏器 A. 其中起偏镜与检偏镜的透光轴方向均沿 x 轴方向, 琼斯

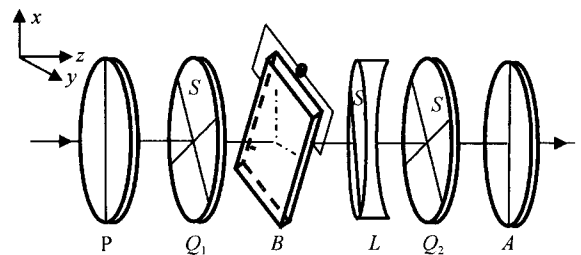


图 1 电控径向双折射滤波器结构图

Fig. 1 Structure of electrically controllable radial birefringent filter

矩阵为  $P=A=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ . 两个 λ/4 波片 Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, 电

光元件 B 和径向双折射晶体 L 组成一电控光旋转器, 两 λ/4 波片的光轴分别与 x 轴成 45° 与 -45° 角, 电光元件为单轴晶体, 采用横向调制, 原光轴沿光线传播方向, 电感应主轴的快慢轴在横向平面内, 且慢轴与 x 轴平行. 电致位相差为

\* 国家自然科学基金(60177016)和国家科技部重大基础研究专项基金(2002CCA03500)资助

Tel: 021-69918761 Email: jimingw@eyou.com

收稿日期: 2005-07-01

$$\Gamma = kV \tag{1}$$

$k$  是电光调制系数,  $V$  为外加电场. 琼斯矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{\Gamma}{2} - i \sin \frac{\Gamma}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\Gamma}{2} + i \sin \frac{\Gamma}{2} \end{bmatrix} \tag{2}$$

径向双折射元件  $L$  为单轴晶体, 光轴在横向平面内, 采取文献[1]中的中心处半波延迟结构, 此时边

$$L = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\delta(\rho)}{2}) - i \sin(\frac{\delta(\rho)}{2}) \cos 2\theta & -i \sin(\frac{\delta(\rho)}{2}) \sin 2\theta \\ -i \sin(\frac{\delta(\rho)}{2}) \sin 2\theta & \cos(\frac{\delta(\rho)}{2}) + i \sin(\frac{\delta(\rho)}{2}) \cos 2\theta \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中  $\delta(\rho) = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_0 + \frac{\rho^2}{2R})$ . 包含径向双折射元件  $L$  的旋光器可对任意偏振光(包括线偏振光和椭圆偏振光)的偏振态产生旋转, 其琼斯矩阵为

$$R = Q(-\frac{\pi}{4})L(\theta)B(0)Q(\frac{\pi}{4}) \tag{4}$$

入射光偏振态不影响透射后光强的分布, 为简化分析设入射平行光的光矢量  $E_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ Ae^{i\varphi} \end{bmatrix}$ . 经整个系统后, 透射光的琼斯矢量变为

$$E_o = ARPE_{in} \tag{5}$$

经计算得

$$E_{out} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [\cos(\frac{\delta(\rho)}{2})\cos(\frac{\Gamma}{2}) - \sin(\frac{\delta(\rho)}{2})\cos(2\theta)] \cdot \sin(\frac{\Gamma}{2}) \\ + i \sin(\frac{\delta(\rho)}{2})\sin(2\theta)\sin(\frac{\Gamma}{2}) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

因此光瞳函数为

$$P(\rho, \theta, \Gamma) = \frac{1}{2} [\cos(\frac{\delta(\rho)}{2})\cos(\frac{\Gamma}{2}) - \sin(\frac{\delta(\rho)}{2})\cos(2\theta)] \cdot \cos(2\theta)\sin(\frac{\Gamma}{2}) + i \sin(\frac{\delta(\rho)}{2})\sin(2\theta)\sin(\frac{\Gamma}{2}) \tag{7}$$

定义接收面上横向坐标  $v$  和纵向坐标  $u$  为

$$\begin{aligned} v &= \frac{2\pi}{\lambda} \sin \alpha \sqrt{x^2 + y^2} \\ u &= \frac{2\pi}{\lambda} z \sin^2 \alpha \end{aligned} \tag{8}$$

式中  $\sin \alpha$  为透镜成像系统的数值孔径. 横向( $u=0$ )和轴向( $v=0$ )振幅分布表达式为

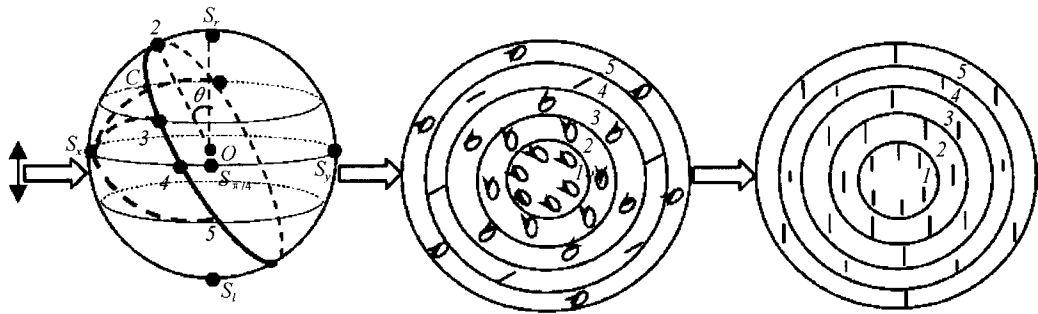
$$\begin{aligned} U_v(v, \theta, \Gamma) &= 2 \int_0^{\rho_0} P(\rho, \theta, \Gamma) J_0(v\rho) \rho d\rho \\ U_u(u, \theta, \Gamma) &= 2 \int_0^{\rho_0} P(\rho, \theta, \Gamma) \exp(-\frac{i u \rho^2}{2}) \rho d\rho \end{aligned} \tag{9}$$

从而可得到焦点附近横向与纵向的光强分布

缘  $\rho_0$  处为全波延迟. 若采用石英晶体, 入射波长  $\lambda = 10^{-3}$  mm 时双折射率为  $\Delta n = 0.00873$ . 依据参量关系, 曲率半径  $R = \frac{\Delta n \rho_0^2}{\lambda} + \frac{\lambda}{4\Delta n}$ , 得到中心厚度  $d_0 = 5.673$  mm, 边缘厚度  $d_{\rho_0} = 5.788$  mm 和  $R = 218.15$  mm. 该径向元件慢轴与  $x$  轴之间的夹角为  $\theta$  时, 其琼斯矩阵为

$$I_v = U_v U_v^*, I_u = U_u U_u^* \tag{10}$$

空间偏振态演变分析如下: 如图 2, 入射光经过起偏器起偏后变为  $x$  轴方向上的线偏振光, 再入射到  $Q_1$  变为圆偏振光, 经电光元件  $B$  后变为一般形式的椭圆偏振光, 再入射到径向双折射元件  $L$ , 变为径向平面内的偏振态分布, 再经另一  $\lambda/4$  波片  $Q_2$  后从检偏器出射. 位于两偏振器之间的该电控旋光系统将对偏振态进行旋转, 其旋转角度由电光元件的电致位相延迟量  $\Gamma$  决定. 图 2(II) 给出了旋光器在庞加莱球上的偏振态旋转过程, 其中  $s_x, s_y, s_{\pi/4}$  分别代表  $x, y$ , 与  $x$  轴成  $\pi/4$  夹角的方向上的线偏振态,  $\Gamma$  一定时, 偏振态由  $s_x$  线偏振态变化到大圆  $C$  上的相应偏振态分布, 其中大圆  $C$  的方位由径向双折射元件的方位角  $\theta$  确定, 为便于分析沿径向将偏振态分布如下: 从中心沿径向依次为斜椭圆偏振光 1、正椭圆偏振光 2、斜椭圆偏振光 3(其长轴与前斜椭圆偏振光 1 长轴正交)、斜线偏振光 4 再到边缘  $\rho_0$  处斜椭圆偏振光 5(与中心处斜椭圆偏振光长短轴重合但旋向反向). 实际上这些偏振态是沿径向连续变化的, 从中心处偏振态到边缘  $\rho_0$  处的偏振态经过了半个周期的偏振态演变. 图 2(III) 给出了径向的偏振态演化. 电光位相延迟  $\Gamma$  在旋光中影响的是大圆  $C$  上偏振态 1, 2, 3, 4, 5 的分布, 随  $\Gamma$  变化这些偏振态分布将沿  $C$  发生旋转, 径向元件的方位角影响的是大圆  $C$  的方位, 随  $\theta$  变化大圆  $C$  将以  $s_r, s_{\pi/4}, s_l$  为对称面旋转, 与  $s_r, s_{\pi/4}, s_l$  面所成方位角为  $\theta$ . 这种径向对称分布的偏振光经检偏器后, 将变为同一方向上偏振、位相延迟量径向对称的线偏振态光场分布, 经成像透镜后在焦点处会发生偏振干涉, 使得焦点附近光强重新分布. 由于旋光器件的加入, 使得径向对称的偏振态的变化可以通过电压控制, 因而使得径向超分辨与纵向焦移的电控制成为可能.



I. Polarization states after the first polarizer II. Polarization states control by E-O crystal and radial birefringent crystal III. radial symmetric polarization states IV. Polarization states after the second polarizer

图2 电控双折射滤波器的偏振态演变

Fig.2 Evolution of polarization states for electrically controllable radial birefringent filter

## 2 横向超分辨与轴向焦移

径向双折射元件  $L$  的方位角  $\theta$  决定了系统能否实现横向超分辨. 根据文献[1]可实现超分辨的方位角范围,可取  $\theta = \pi/4$  与  $\theta = 3\pi/4$ . 以  $\theta = \pi/4$  为例,将式(7),(9)代入到式(10),得到横向与轴向的强度点扩散函数分别为

$$I_v(v, \pi/4, \Gamma) = \left| \int_0^{\rho_0} \left[ \cos\left(\frac{\delta(\rho)}{2}\right) \cos\left(\frac{\Gamma}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\delta(\rho)}{2}\right) \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \right] J_0(v\rho) \rho d\rho \right|^2 \quad (11)$$

$$I_u(u, \pi/4, \Gamma) = \left| \int_0^{\rho_0} \left[ \cos\left(\frac{\delta(\rho)}{2}\right) \cos\left(\frac{\Gamma}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\delta(\rho)}{2}\right) \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{i u \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \right|^2$$

在离焦点  $\Delta u$  处的离焦面上的强度点扩散函数为

$$I_{\Delta u}(v, \pi/4, \Gamma) = \left| \int_0^{\rho_0} \left[ \cos\left(\frac{\delta(\rho)}{2}\right) \cos\left(\frac{\Gamma}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\delta(\rho)}{2}\right) \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \right] J_0(v\rho) \exp\left(-\frac{i \Delta u \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \right|^2 \quad (12)$$

从式(11),(12)可以看出,当电光位相延迟  $\Gamma$  变化时,将引起光瞳函数变化,因此将导致光强重新分布.

图3给出了不同  $\Gamma$  时相应的轴向光强分布特性,图4给出了焦移量与  $\Gamma$  的关系. 从图3中可以看出,  $\Gamma$  变化时轴向上焦点位置发生变化,当  $\Gamma$  从零变化到  $\pi/4$  时,焦点位置会发生右侧移动,对应系统焦距变长,并且延迟量越大偏移距离也越大,但相同的延迟变化间隔对应的焦移量会越来越小,与之对应,  $\Gamma$  从  $\pi/2$  变化到  $\pi$  时,焦移量变化与延迟量增大的情况相反,将会逐渐变小,直到焦点回到初始焦点位置. 当  $\Gamma$  从  $\pi$  变化到  $3\pi/2$  时,焦点位置发生左侧移动,焦距变短,直到最大焦点偏移处,当  $\Gamma$  从  $3\pi/2$  变化到  $\pi/2$  时,焦移量会从最大逐渐变小,直到回到初始焦点位置. 整个过程最大焦移  $\Delta u_{mx} = 0.65$ , 如图4中以类正弦函数的规律变化.

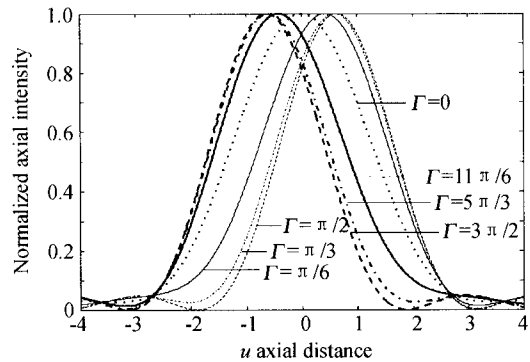


图3 电控旋光效应引起的轴向焦移特性 ( $\theta = \pi/4$ )

Fig.3 Axial focal shift induced by electrically controllable azimuth optical rotator ( $\theta = \pi/4$ )

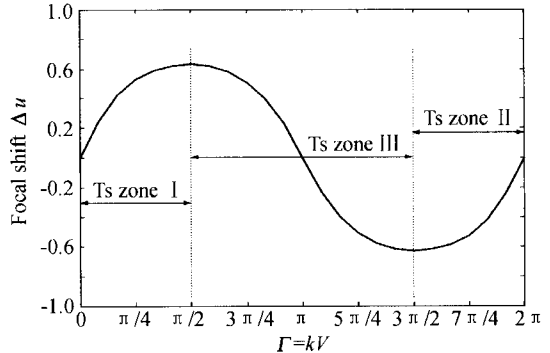


图4 焦移量与电光位相延迟的关系

Fig.4 Focal shift  $\Delta u$  varies with electrical inductive  $\Gamma$

定义斯特尔比  $S$  为有光瞳滤波器与无光瞳滤波器时系统的主瓣强度之比;超分辨性能参量第一零点比  $G$  为光瞳滤波器滤波后与未滤波的爱里斑衍射方式时系统的光强第一零点位置比. 根据式(12),得到图5中离焦面上横向光强随  $\Gamma$  变化的分布特性. 其中图5(a),(b),(c)分别给出了  $\Gamma_1 \in [0, \pi/2]$ ,  $\Gamma_2 \in [3\pi/2, 2\pi]$  与  $\Gamma_3 \in [\pi/2, 3\pi/2]$  时离焦面上的光强分布,从图中可看出,在  $\Gamma_1 \in [0, \pi/2]$  与  $\Gamma_2 \in [3\pi/2, 2\pi]$  范围内离焦面上可以实现横向超分辨,但  $\Gamma_3 \in [\pi/2, 3\pi/2]$  内不能实现横向超分辨. 图6给出了参量  $S$  和  $G$  随电光位相延迟  $\Gamma$  变化的关系. 可看出  $\Gamma$  在延迟区域 TS zone I 内  $\Gamma_1 \in [0, \pi/2]$  与

区域 TS zone II 内  $\Gamma_2 \in [3\pi/2, 2\pi]$  时, 超分辨因子  $0.81 \leq G \leq 1$ , 斯特尔比  $S$  在  $0.41 \sim 0.51$  内变化, 即在这两个电光延迟范围内均可实现横向超分辨.

因此, 通过控制电光位相延迟  $\Gamma$ , 可同时实现横向超分辨与轴向焦移特性. 为实现电光调制的连续性, 根据透射光强随  $\Gamma$  变化的周期性, 可将调制区

域限定  $\Gamma \in [-\pi/2, \pi/2]$  内, 这样仅仅通过外加电场变化即可实现焦点位置与横向超分辨的控制, 整个系统相当于一个可实现横向超分辨且焦点位置可调的电光透镜. 对  $\theta = 3\pi/4$  时横向与轴向的光强分布进行相同的分析, 可以得到与之类似的横向超分辨与轴向焦移.

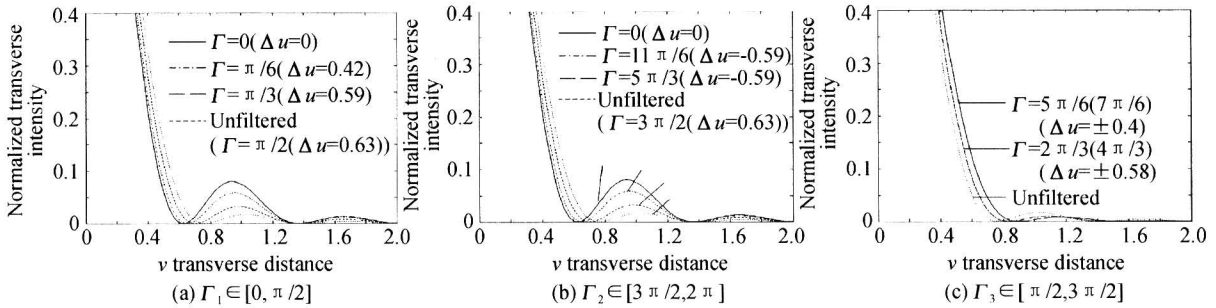


图 5 不同电光位相延迟时的横向光强分布特性 ( $\theta = \pi/4$ )

Fig. 5 Characteristic of transverse intensity distribution when the azimuth angle of radial birefringent element is  $\theta = \pi/4$  and inductive phase difference

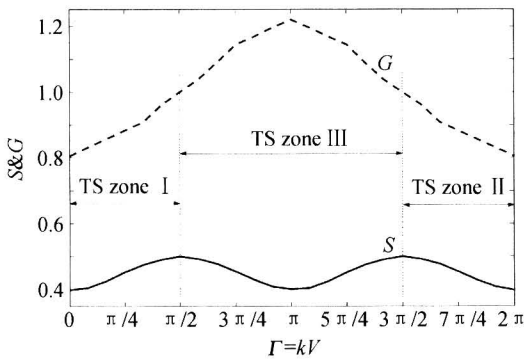


图 6  $S$  和  $G$  与电光位相延迟  $\Gamma$  的关系

Fig. 6  $S$  and  $G$  vary with electrical inductive  $\Gamma$

以上是对径向双折射晶体中心与边缘延迟差为  $\pi$  的情况进行的分析. 若延迟差变化, 焦点附近光强分布特性也会变化. 随延迟差从  $\pi$  到  $2\pi$  变化, 最大焦移量不发生变化, 但焦斑发生压缩, 同时斯特尔比  $S$  会从  $0.41 \sim 0.51$  增大到  $0.52 \sim 0.53$ , 再减小至  $0.41 \sim 0.51$ , 超分辨因子  $G$  的最小值随延迟差增大从  $0.81$  增大到  $0.96$ , 超分辨性能降低; 若延迟差从  $\pi$  减小至  $0$ , 最大焦移量会增大, 但同时将会引起焦斑弥散,  $S$  随之减小, 导致光学性能参量的降低.

### 3 结论

利用空间偏振态调制及偏振干涉效应, 实现了电控的横向超分辨与轴向焦移. 与原超分辨技术相比, 横向超分辨特性第一零点比  $G$  与斯特尔比  $S$  可以通过电压来调谐. 与偏振掩模用于光焦移的方法相比, 本文提出了焦移可通过电压控制旋光角度来控制焦移量, 这样不改变系统组成结构, 也避免了使用机械或手动调节的误差及不便, 仅通过电压控制系统偏振态空间变化, 即可实现光学系统的超分辨

与焦点位置的调节. 研究结果可应用于自动调焦系统, 某些光学读写驱动系统有时也需要动态调整焦平面, 由于同时实现了横向超分辨, 因而也可应用到共焦扫描成像及微印刷等领域.

致谢 作者感谢与 Qiwen Zhan 教授的有益讨论

### 参考文献

- 1 Yun Maojin, Liu Liren, Sun Jianfeng, *et al.* Transverse or axial superresolution with radial birefringent filter. *J Opt Soc Am A*, 2004, **21**(10): 1869~1874
- 2 Yun Maojin, Liu Liren, Sun Jianfeng, *et al.* Three-dimensional superresolution by three-zone complex pupil filters. *J Opt Soc Am A*, 2005, **22**(2): 272~277
- 3 Sanyal S, Ghosh A. Imaging characteristics of birefringence lenses under focused and defocused condition. *Optik*, 1999, **110**(11): 513~510
- 4 Colin J R. Sheppard and amarjyoti choudhury. annular pupils, radial polarization, and superresolution. *Appl Opt*, 2004, **43**(22): 4322~4327
- 5 Whiting A I, Abouraddy A F, Saleh B E A, *et al.* Polarization-assisted transverse and axial optical superresolution. *Opt Express*, 2003, **11**(15): 1714~1723
- 6 Stewart J B, Saleh B E A, Teich M C. Experimental demonstration of polarization-assisted transverse and axial optical superresolution. *Opt Commun*, 2004, **241**(4-6): 315~319
- 7 Asheesh Divetiaa, Tsung-Hsi Hsieh, *et al.* Dynamically focused optical coherence tomography for endoscopic applications. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(3): 103902
- 8 Silvia Ledesma, Juan C Escalera, Juan Campos, *et al.* Evolution of the transverse response of an optical system with complex filters. *Opt Commun*, 2005, **249**(1-3): 183~192

- 9 Qiwen Zhan, James R. Leger Focus shaping using cylindrical vector beams. *Opt Express*, 2002, **10**(7): 324~331
- 10 Sanyal S, Ghosh A. High focal depth with a quasi-bifocus birefringent lens. *App Opt*, 2000, **39**(14): 2321~2325
- 11 Liu Xiping, Cai Xianyang, Chang Shoude, *et al.* Cemented doublet lens with an extended focal depth. *Opt Express*, 2005, **13**(2): 552~557
- 12 Pu Jixiong, Lu Baida. Focal shifts in focused nonuniformly polarized beams. *J Opt Soc Am A*, 2001, **18**(11): 2760~2766
- 13 Chowdhury D R, Bhattacharya K, Chakroborty A K, *et al.* Possibility of an optical focal shift with polarization masks. *Appl Opt*, 2003, **42**(19): 3819~3826
- 14 Chowdhury D R, Bhattacharya K, Sanyal S, *et al.* Performance of a polarization-masked lens aperture in the presence of spherical aberration. *J Opt A*, 2002, **4**(1): 98~104
- 15 惠彬, 刘新平, 汶德胜, 等. 扩大光学系统焦深范围的光学成像新技术研究. *光子学报*, 2001, **30**(5): 594~597  
Hui B, Liu X P, Wen D S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5): 594~597
- 16 汶德胜, 车双良, 乔卫东, 等. 大焦深成像系统仿真实验研究. *光子学报*, 2003, **32**(5): 619~621  
Wen D S, Che S L, Qiao W D, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 619~621
- 17 Zhuang Zhizhong, Y Jin Kim, Patel J S. Electrically controllable azimuth optical rotator. *Appl Phys Lett*, 2000, **76**(17): 2334~2336

## Electrically Control of Transverse Superresolution and Axial Focal Shift with Radial Birefringent Filter

Wang Jiming<sup>1,2</sup>, Liu Liren<sup>1</sup>, Yun Maojin<sup>3</sup>, Zhao Dong<sup>1</sup>, Liu Ximin<sup>1</sup>, Lang Haitao<sup>1</sup>

1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 800-211, Shanghai 20180

2 Science College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

3 The college of Science and Technology, Department of Physics, Qingdao University, Qingdao, Shandong, 266071

Received date: 2005-07-01

**Abstract** The electrically control of polarization-assisted transverse superresolution and axial focal shift utilizing electrically control radial birefringent pupil filter has been proposed in this paper. The structure of the filter consists of two parallel polarizers, an electrically controllable azimuth optical rotator including two quarter-wave plates and one liquid crystal or electro-optical variable wave plate and a symmetric birefringent element. Variation of light polarization caused by electro-optical effect provides the feasibility controlling the superresolution and focal capability. Polarization states transformation on the Poincaré Sphere and Jones calculus for transmitted intensity are involved in this system. The most interesting and useful advantage of such a structure is that its transverse superresolution and axial focal shift quality can be changed merely controlling the applied-voltage on the electro-optical element. So no mechanic rotation is involved such as applied in the former design, and the vibration noise can also be avoided. Different structure parameters for obtained double effect such as azimuth angles of radial birefringent element and electro-optical modulation range are also given.

**Keywords** Physical optics; Radial birefringent filter; Transverse superresolution; Focal shift; Electro-optical modulation

**Wang Jiming** was born in 1977. Now he is studying for his Ph. D. degree in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interest focuses on polarization optics and information optics.

