

# 三环非均匀混合偏振同轴矢量光束的聚焦特性

常 强 杨艳芳 何 英 冷 梅 刘海港

(上海大学理学院物理系, 上海 200444)

**摘要** 基于 Richards-Wolf 矢量衍射积分公式, 数值分析了同轴三环非均匀混合偏振矢量光束经过高数值孔径透镜的聚焦特性。该矢量光束由同轴三环局域线偏振矢量光束通过一个相位延迟角为  $\delta$  的液晶相位延迟器产生, 光束偏振变为包含线偏振、圆偏振和椭圆偏振的混合态。同轴三环局域线偏振矢量光束的偏振分布是由径向向内偏振的外环光束、径向向外偏振的内环光束和线偏振方向与径向方向夹角为  $\varphi_2$  的中环光束构成。数值模拟结果显示该混合偏振矢量光束的聚焦强度分布与参数  $\varphi_2$  和相位延迟角  $\delta$  密切相关, 当选取适当的  $\varphi_2$  和  $\delta$  时, 在焦平面附近产生沿光轴方向的三维多点光俘获结构——暗光链, 这在光学微操纵领域具有潜在的应用价值。

**关键词** 物理光学; 光链; 强聚焦; 偏振; 衍射

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0626001

## Focusing Features of Concentric Three-Ring Non-Uniform Mixing Polarization Vector Beams

Chang Qiang Yang Yanfang He Ying Leng Mei Liu Haigang

(Department of Physics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract** The focusing property of concentric three-ring non-uniform mixing polarization vector beams through a high numerical aperture is theoretically investigated near the focal plane by using Richards-Wolf vectorial diffraction method. This kind of vector beams can be obtained by letting a concentric three-ring local linearly polarized cylindrical vector beam passes through a phase retarder with a phase angle  $\delta$ . The three ring local linearly polarized cylindrical vector beam consists of the outer circle whose polarization is along the radially inward, the inner circle portion whose polarization is along the radially outward and the centray circle whose polarization direction has an angle  $\varphi_2$  with radial direction. The results of the numerical simulation show that the focusing intensity distribution of the non-uniform mixing polarization vector beams is closely related with parameters  $\varphi_2$  and  $\delta$ . It is shown that the 3D dark optical chain along optical axis can be obtained near the focus by modulating the value of  $\varphi_2$  and  $\delta$ , which has potential application in the optical micro-manipulation.

**Key words** physical optics; optical chain; tight focusing; polarization; diffraction

**OCIS codes** 260.5430; 350.4855; 050.1940

## 1 引 言

由纯激光模式经过附加的空间偏振调制光学元件生成的矢量光束由于其独特的性质和潜在的应用价值在许多研究领域受到人们的关注。矢量光束在横截面上的偏振或相位分布是不均匀的, 这导致了它在理论描述、传输及与物质相互作用等方面具有

全新的特性<sup>[1,2]</sup>。目前对矢量光束的研究主要集中在柱对称矢量光束方面。柱对称矢量光束可分为径向矢量光束、角向矢量光束和混合偏振矢量光束, 其中混合偏振矢量光束可由径向矢量光束和角向矢量光束叠加形成。对于矢量光束的研究不仅有系统的理论基础<sup>[3,4]</sup>, 也有大量产生矢量光束的实验研

**收稿日期:** 2011-12-06; **收到修改稿日期:** 2012-01-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(61108010, 60877055)、上海市自然科学基金(11ZR1412300)、上海市重点学科建设项目(S30105)和上海大学科技创新基金资助课题。

**作者简介:** 常 强(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事矢量光束及光信息传输等方面的研究。E-mail: cxq@shu.edu.cn

**导师简介:** 杨艳芳(1973—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光信息传输和导波光学等方面的研究。

E-mail: yyfzhaoyb@yahoo.com.cn(通信联系人)

究<sup>[5~15]</sup>。

目前,国内外的很多学者用 Richards-Wolf 矢量衍射积分理论对矢量光束的聚焦特性进行了大量的研究<sup>[16~18]</sup>。研究表明,当矢量光束经高数值孔径透镜聚焦后,会产生很强的纵向光强分量和比标量光束聚焦更小的光斑,这些特性可以广泛应用于粒子加速<sup>[19~22]</sup>和激光扫描显微镜<sup>[23]</sup>,可以提高光学分辨率,用于平版印刷术、光数据存储和纳米颗粒探测<sup>[24]</sup>等方面。对矢量光束的产生主要分为激光腔内<sup>[5,6]</sup>产生和激光腔外产生,腔外通过光的干涉<sup>[12]</sup>,利用液晶器件等各种不同的方法产生。比如,Dorn 等<sup>[13]</sup>利用液晶器件产生了径向矢量线偏振光并研究了其聚焦特性,2007年,Wang 等<sup>[14]</sup>采用 4f 系统和空间光调制器产生了非均匀线偏振,2009年朱健强课题组<sup>[15]</sup>用石英晶体的旋光效应产生了径向矢量线偏振光。

近年来,许多学者对于多环矢量光束的聚焦特性进行了大量研究,但是这些研究多局限于径向光、角向光和非均匀线偏振矢量光束,而对非均匀混合偏振矢量光束还没有系统的研究。非均匀混合偏振矢量光束在光束横截面上的偏振状态是随空间位置的不同在线偏振与椭圆偏振之间变化的,它可以通过在局域线偏振矢量光束后加入一个相位因子为  $\delta$  的相位延迟器来产生。本文采用的局域线偏振矢量光束为三环局域线偏振矢量光束<sup>[17]</sup>,三环局域线偏振矢量光束偏振分布为内环光束偏振方向沿径向向外,外环光束偏振方向沿径向向内,中环光束线偏振方向与径向夹角为  $\varphi_2$ 。文中采用 Richards-Wolf 矢量衍射积分公式数值分析了非均匀混合偏振矢量光束经过强聚焦系统后的聚焦特性,详细分析了参量

$\delta$  和  $\varphi_2$  变化时对光束聚焦特性的影响。发现非均匀混合偏振矢量光束经过强聚焦后,在焦点附近产生了可以实现多点光捕获的结构——暗光链,这些结果对于矢量光束在粒子微操控等方面的应用有着重要的意义。

## 2 三环非均匀混合偏振矢量光束的模型

一般情况下,线偏振入射光束可以表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = E_0 \begin{bmatrix} \cos(\phi + \varphi) \\ \sin(\phi + \varphi) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $E_0$  为电场的相对振幅,其大小依赖于光束的位置, $\phi$  为极角, $\varphi$  表示该光束偏振方向与径向方向的夹角, $\varphi = 0$  时表示该光束的是径向矢量光束, $\varphi = \pi/2$  时,表示该光束是角向矢量光束。

为了得到非均匀混合偏振矢量光束,在三环局域线偏振矢量光束后在  $y$  方向加一个相位延迟角为  $\delta$  的液晶可调相位延迟器,该相位延迟器相当于实时可调的波片,可以通过调节驱动电压来改变其相位延迟角,使其在  $0 \sim \pi$  之间连续取值。这时电场可以表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = E_0 \begin{bmatrix} \cos(\phi + \varphi) \\ \sin(\phi + \varphi) \exp(-i\delta) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

从(2)式中可以看出改变  $\delta$  就可以改变入射光的偏振状态,通过分析其斯托克斯参数能给出矢量光束偏振态的分布<sup>[25]</sup>。

图 1 给出了入射光束经过液晶延迟器后的光束横截面偏振分布的示意图。图 1(a) 为入射的同轴三环线偏振矢量光束,其偏振是内环沿径向向外( $\varphi_1 = 0$ ),外环沿径向向内( $\varphi_3 = \pi$ ),中环线偏振方向与径向

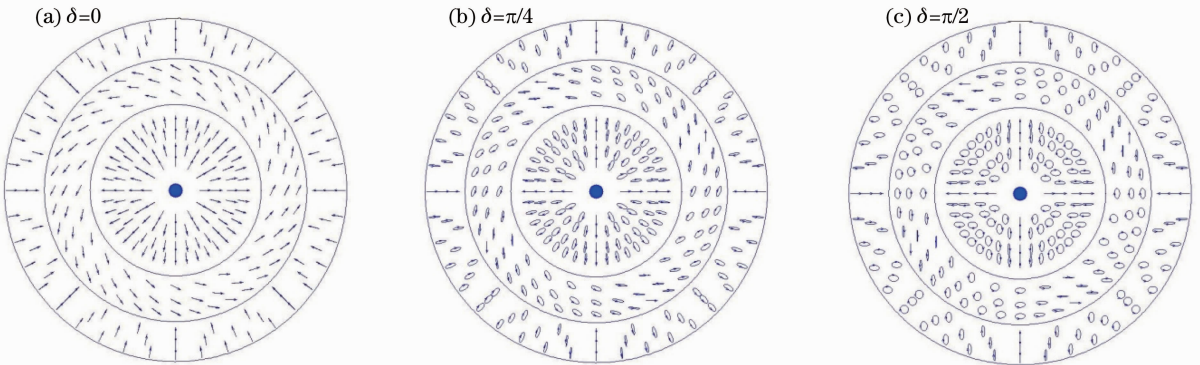


图 1 三环局域线偏振矢量光束经过相位角为  $\delta$  的延迟器后光束横截面上的混合偏振状态分布图

Fig. 1 Distribution of mixing polarization when the three-portion local linearly polarized cylindrical vector beam passing through a phase retarder with phase angle  $\delta$

夹角  $\varphi_2 = 7\pi/20$ ; 图 1(b), (c) 分别对应于入射光束经过  $\delta$  为  $\pi/4$  和  $\pi/2$  的液晶相位延迟器时的截面偏振分布图, 箭头描述了其偏振旋转方向。当  $\delta$  改变时椭圆率与椭圆方向都会发生改变, 从图中可以看出当  $\delta = \pi/4$ , 三环中既有局域线偏振态, 还有局域椭圆偏振态, 当  $\delta = \pi/2$ , 除过线偏振、椭圆偏振, 在与  $x$  轴成  $\pm 45^\circ$  角的轴线上的偏振态是圆偏振态。

三环非均匀混合偏振矢量光束被高数值孔径透镜聚焦后在焦点附近的电场分布表示为<sup>[17]</sup>

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{e}_x + E_y \mathbf{e}_y + E_z \mathbf{e}_z, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$  分别为直角坐标系  $x, y, z$  方向的单位矢量。  $E_x, E_y, E_z$  可由 Richards-Wolf 矢量衍射积分公式给出<sup>[4]</sup>, 其表达式分别为

$$E_x = \sum_{i=1}^3 A \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \int_0^{2\pi} \cos^{1/2} \theta \sin \theta \exp\{ik[z_s \cos \theta + r_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)]\} \{E_{xi}^0 [\cos \theta - (\cos \theta - 1) \sin^2 \phi] + E_{yi}^0 (\cos \theta - 1) \cos \phi \sin \phi\} d\phi d\theta, \quad (4a)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^3 A \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \int_0^{2\pi} \cos^{1/2} \theta \sin \theta \exp\{ik[z_s \cos \theta + r_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)]\} \{E_{xi}^0 (\cos \theta - 1) \cos \phi \sin \phi + E_{yi}^0 [1 + (\cos \theta - 1) \sin^2 \phi]\} d\phi d\theta, \quad (4b)$$

$$E_z = \sum_{i=1}^3 A \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \int_0^{2\pi} \cos^{1/2} \theta \sin \theta \exp\{ik[z_s \cos \theta + r_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)]\} (E_{xi}^0 \sin \theta \cos \phi + E_{yi}^0 \sin \theta \sin \phi) d\phi d\theta, \quad (4c)$$

式中  $\theta_i$  为入射光束第  $i$  环(从内向外依次  $i = 1, 2, 3$ ) 与传播轴之间的夹角;  $r_s, \phi_s, z_s$  为聚焦后像空间的柱坐标系, 坐标原点在焦点处,  $z_s$  为正方向沿光束传输方向,  $\phi_s$  是相对于  $x$  轴的方位角;  $E_{xi}^0, E_{yi}^0$  是第  $i$  环入射光束在  $x, y$  方向电场分量, 大小为

$$\begin{cases} E_{xi}^0 = l(\theta) \cos(\phi + \varphi_i) \\ E_{yi}^0 = l(\theta) \sin(\phi + \varphi_i) \exp(-j\delta) \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\varphi_i$  为第  $i$  环入射光束线偏振方向与径向方向夹角,  $l(\theta)$  为入射光束的振幅, 模拟中选取的光束为贝塞尔-高斯光束:

$$l(\theta) = \exp\left[-\beta_0^2 \left(\frac{\sin \theta}{\sin \alpha}\right)^2\right] J_1\left(2\beta_0 \frac{\sin \theta}{\sin \alpha}\right), \quad (6)$$

式中  $\beta_0$  表示光瞳半径与光束宽度之比, 取值为一常数,  $J_1$  是第一阶贝塞尔函数,  $\alpha = \arcsin(NA/n)$ ,  $NA$  为数值孔径,  $n$  为像空间的折射率。

### 3 模拟结果与讨论

在(4)式中  $A$  只表示相对振幅, 不会影响数值模拟结果, 所以在数值模拟时可以取  $A = 1$ 。其他参数取值为  $\beta_0 = 1.5, \theta_0 = 0, \theta_1 = \pi/6, \theta_2 = \pi/3, \theta_3 = \alpha = 4\pi/9$ ,  $\varphi_2$  取值分别为  $3\pi/20, 7\pi/20, 13\pi/20$  和  $16\pi/20$ , 相位延迟因子  $\delta$  可在  $0 \sim \pi$  之间连续

取值。下面依据选取的模拟参数我们具体分析了三环非均匀混合偏振矢量光束强聚焦后场强分布随参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  的变化, 图 2 给出了光束聚焦后横向场强度随  $\delta$  和  $\varphi_2$  变化的分布图。

从图 2 中可以明显看出, 当  $\delta$  一定时, 横向电场强度分布随  $\varphi_2$  的增大向左右两侧扩展, 并沿中心轴向上下两侧有小的发散。 $\varphi_2$  较小时, 横向电场强度分布区域较集中, 只在中心区域分裂为上下对称两部分, 随着  $\varphi_2$  的增大, 横向电场强度分布区域不仅向左右两侧扩展, 而且在上下两侧各自又分裂出一部分, 这种现象在  $\varphi_2 = 16\pi/20$  时比较明显。图 2 中还可以看出,  $\varphi_2$  一定时, 场分布随相位  $\delta$  改变基本无变化, 但横向电场最大强度值随相位  $\delta$  的增加有微小变化。以  $\delta = 0$  为例,  $\varphi_2 = 7\pi/20$ , 聚焦光强最大值为 0.05,  $\varphi_2 = 13\pi/20$  时, 光强最大值减小为 0.025, 是  $\varphi_2 = 7\pi/20$  时的一半。若  $\varphi_2$  继续增大, 光强最大值会进一步减小。为了进一步说明聚焦横向电场随参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  的变化, 给出了横向电场能量最大值在不同  $\varphi_2$  时随  $\delta$  的变化曲线, 如图 3 所示, 图中很明显看出随着  $\varphi_2$  的增大, 横向电场能量最大值是减小的, 联系图 2 可知, 这是由于横向电场能量分布随  $\varphi_2$  的增大而扩展引起的。

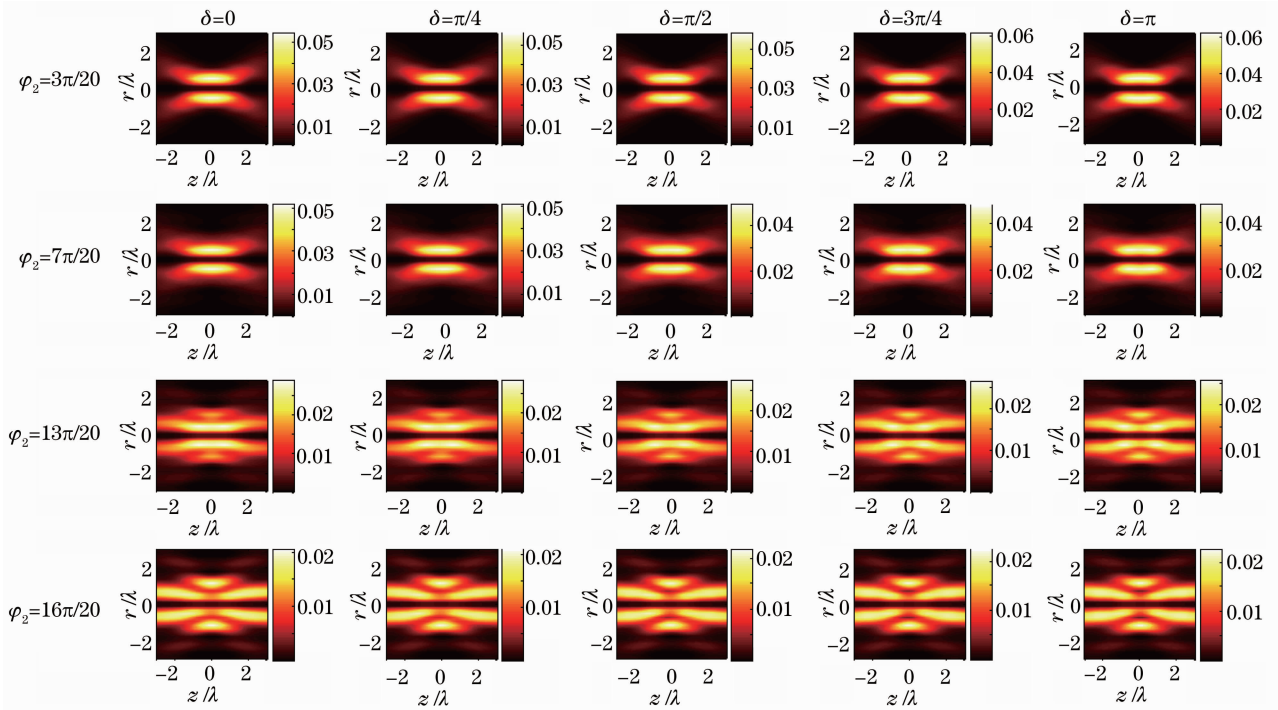


图 2 三环非均匀混合偏振矢量光束强聚焦时焦平面上的横向电场随参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  变化时的能量分布  
 Fig. 2 Energy distribution of transversal electric-field of focal concentric three-ring non-uniform mixing polarization vector beams with variant  $\delta$  and  $\varphi_2$  on the focal plane

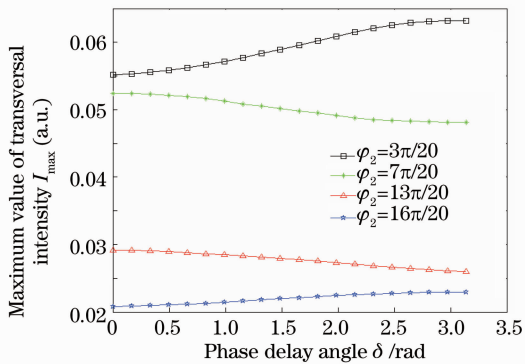


图 3 三环非均匀混合偏振矢量光束强聚焦时横向电场强度最大值随  $\delta$  的变化曲线

Fig. 3 Curve of transversal intensity's maximum value of electric-field intensity with variant  $\delta$  when the concentric three-ring non-uniform mixing polarization vector beams focusing

图 4 给出了三环非均匀混合偏振矢量光束强聚焦后纵向电场随参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  变化的强度分布图。从图中可以看出，光束聚焦后的强度分布与参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  的取值密切相关，也就是与入射光束的偏振状态密切相关。 $\varphi_2$  一定时，纵向电场强度随着  $\delta$  的增大向上下两侧分离，并伴随有小的焦斑漂移的出现。以图中第一行来看， $\delta = 0$  时，强度分布是轴对称的，中心是一个分布大致均匀的亮斑； $\delta$  继续增大，强度分布向右侧有微小偏移，并向右侧发散； $\delta$  继续增大达到

$\pi$  时，偏移现象消失，变成一个上下关于轴对称的分布图，中心光场强度为 0 且向周围发散。当参量  $\delta$  一定时，纵向电场能量分布随着  $\varphi_2$  的增大向左右两侧扩展，并向上下两侧发散，并且  $\varphi_2$  越大，这种扩展和发散越明显。参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  的增大所引起的光束聚焦光斑的扩展和发散将会引起场中暗斑的形成，比如  $\delta = 3\pi/4$ ， $\varphi_2 = 3\pi/20$  和  $13\pi/20$  时就分别在场中形成了 2 个和 5 个暗斑。多点暗斑的形成在总场中有可能形成连续的光学囚笼，称其为暗光链，这在光学微操纵领域具有潜在的应用价值。

为了进一步说明暗光链的问题，给出了光束聚焦后总场的分布，如图 5 所示。从图中可以看出，虽然总场强度分布图与横向场强度分布图大致相同，但是在总场中有光学囚笼和周期性的链状分布的形成。 $\varphi_2 = 7\pi/20$  时，在聚焦场的中心形成了一个周围被光强围绕的暗斑，相当于“势阱”，将其称之为光学囚笼。随着  $\varphi_2$  的增大，光学囚笼的个数有所增加而形成了链状结构。 $\varphi_2 = 13\pi/20$  时形成了很明显的暗光链，但是暗光链会随着  $\delta$  的增大而消失。 $\delta = 0$  时，形成了三个近似相同的光笼并且光笼之间的光强近似相同，随着  $\delta$  的增大，光笼之间的强度逐渐减弱，到  $\delta = \pi$  时光链完全消失。因此通过调节参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  的取值可以改变光笼间光强的大小，从而



改变暗光链的形状。图 5 中可以看出暗光链实质上是连续的光学囚笼,它可以实现对微小粒子的捕获和移动。 $\varphi_2 = 13\pi/20, \delta = 0$  时所形成的暗光链可以

同时捕获三个折射率低于周围介质折射率的粒子,这对于混合偏振矢量光束应用于粒子的多点捕获有着重要的意义。

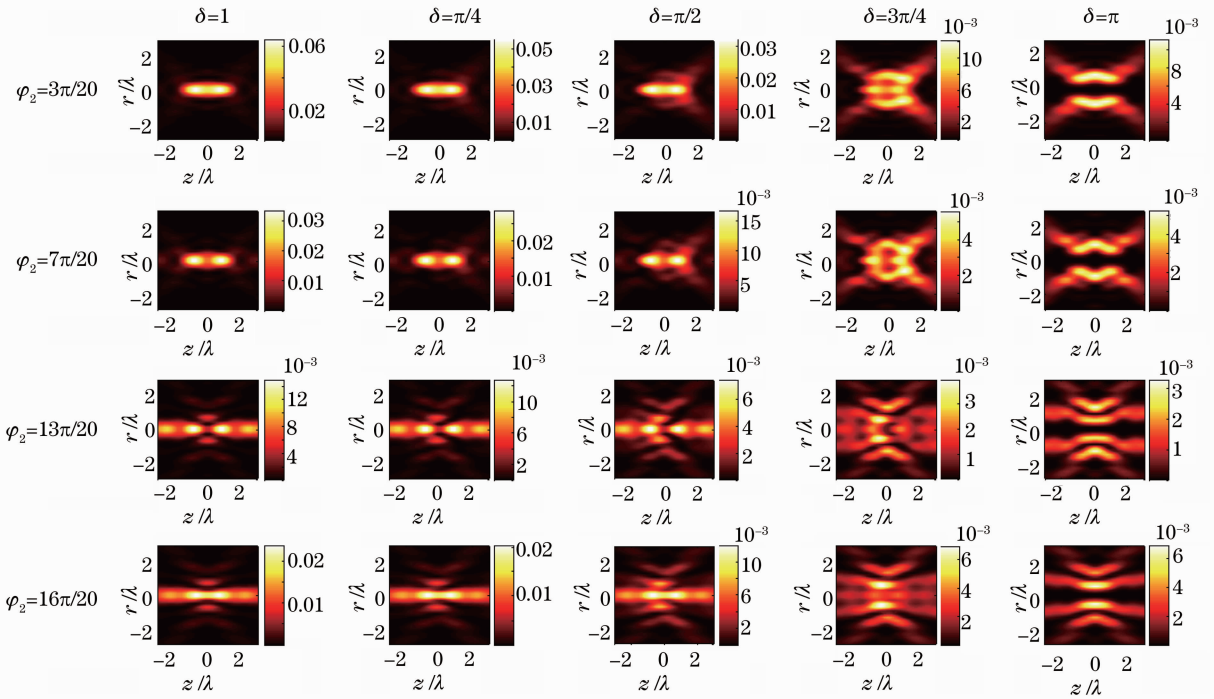


图 4 三环非均匀混合偏振矢量光束强聚焦时焦平面上的纵向场强度随参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  变化分布图

Fig. 4 Longitudinal electric-field intensity distribution of focal concentric three-ring non-uniform mixing polarization vector beams with variant  $\delta$  and  $\varphi_2$  on the focal plane

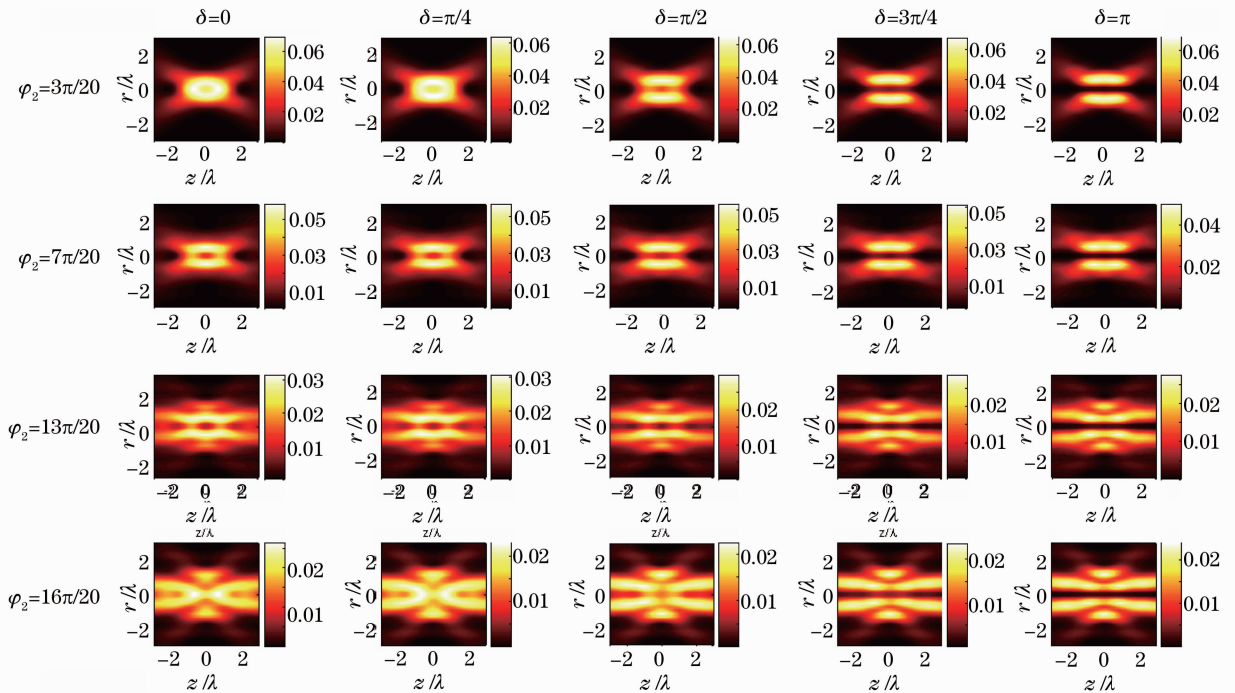


图 5 三环非均匀混合偏振矢量光束强聚焦时焦平面上的总场强度随参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  变化的分布图

Fig. 5 Total electric-field intensity distribution of focal concentric three-ring non-uniform mixing polarization vector beams with variant  $\delta$  and  $\varphi_2$  on the focal plane

由上面分析可知,三环非均匀混合偏振矢量光束强聚焦后电场强度与参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  的取值密切相关,这是由于两个参量的改变会改变光束的偏振态的分布,进而会引起光束的聚焦特性发生大的变化。 $\varphi_2$  一定时,总场强度随  $\delta$  的增大逐渐向上下两侧分裂,当  $\delta$  增大到  $\pi$  时总场强度分布与横向电场强度能量基本分布一致。由于纵向电场强度相对于横向电场强度约小一个数量级,因此横向电场对总场的分布起决定作用,而纵向电场强度的改变对总场中心强度的分布影响明显,因此控制纵向电场强度的分布可以使总场中心形成光学囚笼或暗光链,可以实现多点粒子的俘获。光学囚笼或暗光链的形成是由于参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  的变化,而相位延迟角度  $\delta$  是由液晶相位延迟器实时调控来变化,从而就可以实现暗光链的实时调控。研究成果对于应用矢量光束实现粒子捕获等光学微操纵领域具有潜在的应用价值。

## 4 结 论

通过数值模拟详细研究了同轴三环非均匀混合偏振矢量光束经过高数值孔径聚焦系统后在焦平面附近的聚焦特性。由于该矢量光束的形成是依靠改变入射光束的中环线偏振方向与径向方向的夹角  $\varphi_2$  和附加的相位延迟  $\delta$ ,所以数值模拟结果显示光束的聚焦特性与参量  $\delta$  和  $\varphi_2$  的取值密切相关。结果显示, $\varphi_2$  增大时,横向电场和纵向电场都发生明显变化。改变  $\delta$  时,横向电场强度分布变化不大,但纵向电场有大的变化,会发生焦斑漂移而形成暗斑,从而使总场强度分布中产生三维多点光捕获的结构—暗光链,可以同时捕获多个折射率低于周围介质的粒子,这在粒子捕获等光学微操纵领域具重要的意义。

## 参 考 文 献

- Xilin Wang, Jing Chen, Yongnan Li *et al.*. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**(25): 253602
- Yao Xincheng, Li Zhaolin, Cheng Bingying *et al.*. Analysis and calculation of the optical force on a double-layer dielectric sphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1305~1310  
姚新程, 李兆霖, 程丙英等. 双层介质球体所受光作用力的分析与计算[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1305~1310
- E. Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems. I. an integral representation of the image field [J]. *Proc. R. Soc. London A*, 1959, **253**(1274): 349~357
- B. Richards, E. Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. structure of the image field in an aplanatic system [J]. *Proc. R. Soc. London A*, 1959, **253**(1274): 358~379
- R. Oron, S. Blit, N. Davidson *et al.*. The formation of laser beams with pure azimuthal or radial polarization [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(21): 3322~3324
- Jianlang Li, Ken-ichi Ueda, Mitsuru Musha *et al.*. Generation of radially polarized mode in Yb fiber laser by using a dual conical prism [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 2969~2971
- René L. Eriksen, Paul C. Mogensén, Jesper Glückstad. Multiple-beam optical tweezers generated by the generalized phase-contrast method [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(4): 267~269
- J. E. Curtis, B. A. Koss, D. G. Grier. Dynamic holographic optical tweezers [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**: 169~175
- V. Garcés-Chávez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 145~147
- L. Paterson, M. P. MacDonald, J. Arlt *et al.*. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles [J]. *Science*, 2001, **292**(5518): 912~914
- Yiqiong Zhao, Qiwen Zhan, Yanli Zhang *et al.*. Creation of a three-dimensional optical chain for controllable particle delivery [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(8): 848~850
- N. Passilly, R. S. Denis, K. Ait-Ameur. Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(5): 984~991
- R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(23): 233901
- Xilin Wang, Jianping Ding, Weijiang Ni *et al.*. Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(24): 3549~3551
- Zhang Yanli, Li Xiaoyan, Zhu Jianqiang. Generation and focusing property with high-numerical aperture lens of vectorial polarized beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 129~133  
张艳丽, 李小燕, 朱健强. 矢量偏振光束的产生及其高数值孔径聚焦性质[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 129~133
- K. S. Youngworth, T. G. Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams [J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(2): 77~87
- Xiumin Gao, Jian Wang, Haitao Gu *et al.*. Focusing properties of concentric piecewise cylindrical vector beam [J]. *Optik*, 2007, **118**(6): 257~265
- Qiwen Zhan, James R. Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 324~331
- H. Liang, W. H. Wright, C. L. Rieder *et al.*. Micromanipulation of chromosomes in PTK2 cells using laser microsurgery in combination with laser induced optical forces [J]. *Experimental Cell Research*, 1993, **204**(1): 110~120
- A. Ashkin, J. M. Dziedzic, T. Yamane. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams [J]. *Nature*, 1987, **330**(6150): 769~771
- G. J. Brouhard, H. T. Schek, A. J. Hunt. Advanced optical tweezers for the study of cellular and molecular biomechanics [J]. *IEEE Trans. Biomed. Engng.*, 2003, **50**(1): 121~125
- Li Lei, Liu Ying, Yang Chengfang *et al.*. Research on the activity decay of red blood cells in vitro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2361~2365  
李 雷, 刘 莹, 杨成方等. 离体血红细胞的活性衰变规律研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2361~2365
- Satoshi Kawata, Yasushi Inouye, Tadao Sugiura. Near-field scanning optical microscope with a laser trapped probe [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, **33**(12A): 1725~1727
- Filipp V. Ignatovich, Achim Hartschuh, Lukas Novotny. Detection of nanoparticles using optical gradient forces [J]. *J. Mod. Opt.*, 2003, **50**(10): 1509~1520
- Kai Xu, Yanfang Yang, Ying He *et al.*. Liquid crystal retarder modulation for generating real time non-uniformly polarized beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(3): 572~577