

高数值孔径聚焦系统中的光学参量对 三维双光链的影响

罗祝裕, 杨艳芳, 何 英

上海大学理学院, 上海 200444

摘要 设计了衍射光学元件, 利用该元件对入射的角向偏振拉盖尔-高斯矢量光束进行调制, 在高数值孔径聚焦透镜的焦平面附近获得了沿光轴方向成对的三维多点光俘获结构——双光链。分析了入射光束的参数(缔合拉盖尔多项式的拓扑荷数和径向模数以及光束的拦截比)、衍射光学元件的内外环结构和聚焦透镜的数值孔径对双光链的影响。结果表明, 改变拓扑荷数和径向模数会破坏双光链结构, 通过调节拦截比和衍射光学元件的结构可重新获得双光链, 从而实现对双光链结构的高自由度控制。

关键词 物理光学; 衍射; 矢量光束; 衍射光学元件; 高数值孔径; 双光链

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0226001

Influence of Optical Parameters of High Numerical Aperture Focusing System on Three-Dimensional Twin-Optical Chain

Luo Zhuayu, Yang Yanfang, He Ying

College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract A diffractive optical element is designed, and the element can be used to modulate the incident azimuthally polarized Laguerre-Gaussian vector beam. A three-dimensional multipoint optical trapping structure (twin-optical chain) is obtained along optical axis near the focal plane of high numerical aperture focusing lens. The effects of the parameters of incident beam (the topological charge and the radial mode number of associated Laguerre polynomial and the interception ratio of incident beam), the structures of inner and outer rings of the diffractive optical element, and the numerical aperture of the focusing lens on the twin-optical chain are analyzed. Results show that the structure of twin-optical chain is destroyed when we change the topological charge and the radial mode number, the twin-optical chain can be obtained again when we adjust the interception ratio and the structure of the diffractive optical element, and the high degree of freedom control of the twin-optical chain can be achieved.

Key words physical optics; diffraction; vector beam; diffractive optical element; high numerical aperture; twin-optical chain

OCIS codes 260.5430; 050.1970; 140.3300; 220.2560

1 引 言

矢量光束是一种偏振态在空间按特定规律非均匀分布的光束, 由于其经过高数值孔径(NA)透镜聚焦会产生特殊结构的聚焦特性而受到学者们的广泛关注^[1-5]。径向偏振光束经高 NA 聚焦后会产生一个比线偏振光、圆偏振光等标量光束聚焦更小的光斑, 并产生很强的纵向光场分量; 角向偏振光束强聚焦会形成一个中心光强为零的中空光束^[6]; 更为复杂的振幅和偏振态分布的矢量光束强聚焦能形成光学球笼、光链^[7]、

收稿日期: 2016-08-30; **收到修改稿日期:** 2016-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61108010, 11204170)、上海市自然科学基金(16ZR1411600)

作者简介: 罗祝裕(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事矢量光束的生成、检测及其在光学微操纵中的应用等方面的研究。

E-mail: 477638903@qq.com

导师简介: 杨艳芳(1973—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光物理和光信息传输方面的研究。

E-mail: yanfangyang@shu.edu.cn(通信联系人)

暗通道^[8]、平顶光束^[9-11]和光针^[12]等特殊结构。矢量光束的这些特性使其被广泛应用于粒子加速、粒子囚禁^[13]、激光扫描显微镜、高密度数据存储和纳米颗粒探测等方面。其中,对微粒进行多点光俘获是光学微操纵领域的一个热点问题。近几年,越来越多的研究表明,通过不同阶数的贝塞尔光干涉或不同拉盖尔-高斯模干涉等方法可以实现对微粒的多点光俘获^[14-16],但是这种干涉方法需要多束光的参与,并且无法实现粒子的三维稳定俘获。这一问题可以用能对单光束光波面进行整形的衍射光学元件(DOE)来解决。2015年,田博等^[17]利用DOE调制入射的单光束角向偏振光的波前,在焦点附近产生沿光轴方向成对的三维多点光俘获结构——双光链,它能将每个粒子准确地囚禁在各自的势阱中,实现对每个粒子的三维稳定俘获。在这个结构的基础上,对双光链进行了更深入地研究,分析了影响双光链特性的光学参量,并重点分析了入射光束的缔合拉盖尔多项式的拓扑荷数、径向模数,光束的拦截比,衍射光学元件的内外环结构以及聚焦透镜的NA对双光链的影响,以实现双光链光俘获结构的可控性,从而实现了对微小粒子的操控。

2 双光链的形成

DOE调制角向偏振拉盖尔-高斯光束经过如图1(a)所示的大NA透镜、强聚焦的光学系统,所用的DOE结构如图1(b)所示,该DOE结构具有6个环形区域,设定I、II、III、IV、V、VI 6个环形区域边缘与光轴的夹角分别为 $\theta_1\alpha$ 、 $\theta_2\alpha$ 、 $\theta_3\alpha$ 、 $\theta_4\alpha$ 、 $\theta_5\alpha$ 和 $\theta_6\alpha$,其中 $\alpha = \arcsin(NA/n)$ 为高NA透镜的最大孔径角, θ_j 为第j个环占整个DOE的比例, n 为高数值孔径透镜所处介质的折射率。将DOE的传递函数 $T_j(\theta)$ 设定为

$$T_j(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta_j\alpha \leq \theta \leq \theta_{j+1}\alpha, j = 1, 5 \\ 0, & \theta_j\alpha \leq \theta \leq \theta_{j+1}\alpha, j = 0, 2, 4. \\ -1, & \theta_j\alpha \leq \theta \leq \theta_{j+1}\alpha, j = 3 \end{cases} \quad (1)$$

由德拜矢量积分理论可知,角向偏振矢量光束经过光学系统聚焦后,在聚焦场可表示为^[18-20]

$$\mathbf{E}(\rho, \varphi, z) = \begin{bmatrix} e_\rho \\ e_\varphi \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{j=0}^5 T_j(\theta) \cdot 2A \int_{\theta_j\alpha}^{\theta_{j+1}\alpha} (\cos\theta)^{\frac{1}{2}} \cdot \sin\theta \cdot l_0(\theta) \cdot J_1(k\rho \sin\theta) \cdot \exp(ikz \cos\theta) d\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 ρ 、 φ 和 z 为像空间坐标; e_ρ 、 e_φ 、 e_z 为 $\mathbf{E}(\rho, \varphi, z)$ 在像空间 (ρ, φ, z) 方向上的分量; A 为振幅参数; $k = nk_0$ 为光束经过高NA后的波矢, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波矢; J_1 为第一类贝塞尔函数; $l_0(\theta)$ 为光束在透镜光阑表面处的孔径函数。选取拉盖尔-高斯光束为研究模型,则 $l_0(\theta)$ 可表示为^[1]

$$l_0(\theta) = \beta^2 \frac{\sin\theta}{\sin^2\alpha} \exp\left[-\left(\beta \frac{\sin\theta}{\sin\alpha}\right)^2\right] L_p^m \left[2\left(\beta \frac{\sin\theta}{\sin\alpha}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中 β 为拦截比,是透镜光瞳半径与入射光束的束腰半径的比值; L_p^m 为缔合拉盖尔多项式; m 为拓扑荷数; p 为径向模数, p 的大小与入射光束的环数有关。

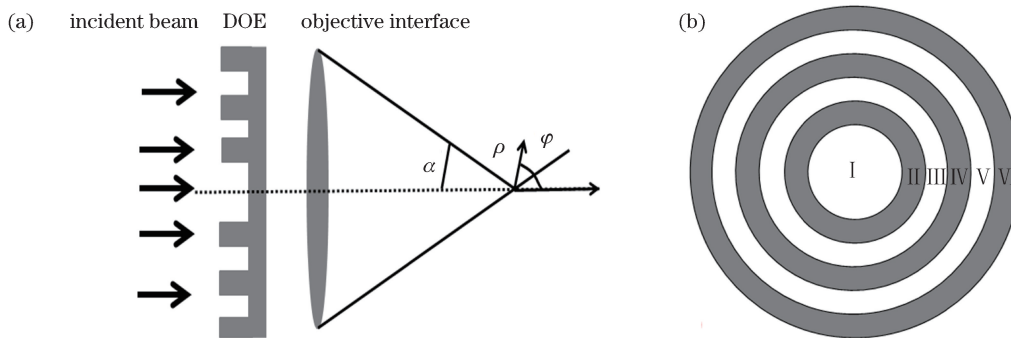


图1 (a)大NA、强聚焦光学系统示意图; (b) DOE结构示意图

Fig. 1 (a) Diagram of optical system with large NA and strong focusing; (b) structural diagram of DOE

为了在聚焦场得到双光链结构,需设计合适的 DOE 环参数。参数设定为: $A=1, \lambda=1, n=1, p=2, m=1, \beta=1.2, NA=0.9$ 。DOE 环参数设计为: $\theta_1=0.25, \theta_2=0.3, \theta_3=0.585, \theta_4=0.605, \theta_5=0.96, \theta_6=1$ 。图 2(a)为 $\rho-z$ 平面形成的双光链光强分布图,可见沿光轴方向形成了关于 $\rho=0$ 呈轴对称分布的两条周期性的链状结构,将其称为双光链。图 2(b)为 $\rho=\lambda$ 处的一条光链沿 z 轴光强的分布线图,可以明显看出,产生的每个三维光孔的链宽(纵向相邻极大值点之间的距离为 2.05λ)均相等。令 $a=z/\lambda, b=\rho/\lambda$ 。

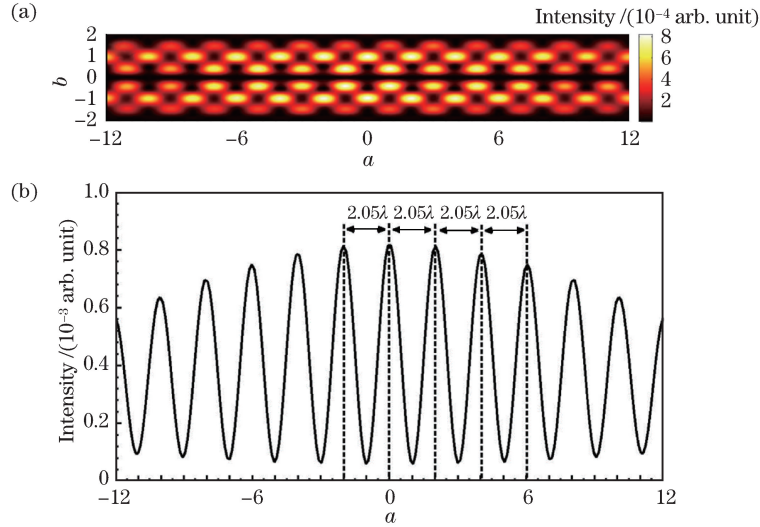


图 2 (a) $\rho-z$ 平面形成的双光链光强分布; (b) $\rho=\lambda$ 处光链沿 z 轴光强的分布线图

Fig. 2 (a) Intensity distribution of twin-optical chain on $\rho-z$ plane; (b) line diagram of light intensity distribution of optical chain along z direction ($\rho=\lambda$)

3 光学参量对双光链的影响

在聚焦场形成的双光链结构与选取的光学参数有密切关系,为了实现双光链的可调控性,必须了解聚焦系统中的各个参量对双光链的影响,即当其中一个参数发生改变而破坏双光链结构后,如何通过调制其他参量来重新获得双光链。下面分别分析 NA 、拦截比、DOE 结构和缔合拉盖尔多项式对双光链结构的影响。

图 3 为 $\rho=\lambda$ 处的总光强分布和链宽在不同 NA 下的变化。可以看出,在不改变 DOE 结构和其他参数的情况下,改变 NA 的值,光链的长度和链宽都发生了改变。随着 NA 的增大,光链的长度和链宽均减小,说明随着 NA 的增大,光束的聚焦能力不断增强,其能量分布向焦点处会聚,所以光链的长度和链宽均会减小,而链宽的减小更有利于俘获较小尺寸的粒子。

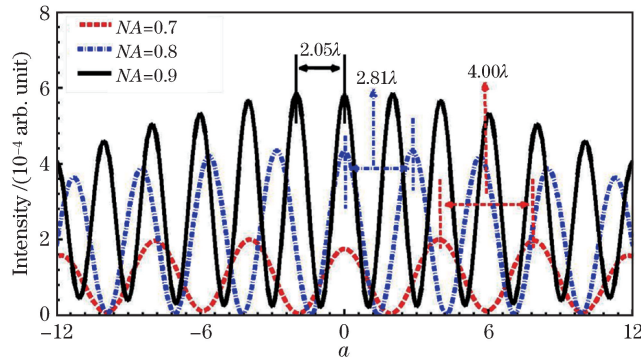


图 3 总光强在不同 NA 下沿 z 轴的线形图($\rho=\lambda$)

Fig. 3 Line diagram of total intensity along z direction with different NA ($\rho=\lambda$)

图 4 为不同拦截比 β 下 $\rho-z$ 平面的总光强分布,图 4(a)~(c)分别为 $\beta=1.0, 1.1, 1.2$ 的总光强分布图。由图可见, $\beta=1.0$ 时没有形成双光链结构, $\beta=1.1$ 时形成了双光链结构, $\beta=1.2$ 时形成了光强分布更均匀的

双光链结构,说明在其他参数不变的情况下,要得到双光链结构,需要增大光束的拦截比 β ,该结论为调节参量得到双光链结构提供了依据。为了更确切地得到拦截比变化对光强的影响,图 4(d)给出了不同拦截比下总光强沿 z 轴的分布曲线,由图可见,改变 β 时链宽和光强最小值不会发生变化,随着 β 的增大,光强的峰值会增大,则光链中一个周期的势阱增大,囚禁微小粒子更为稳定。

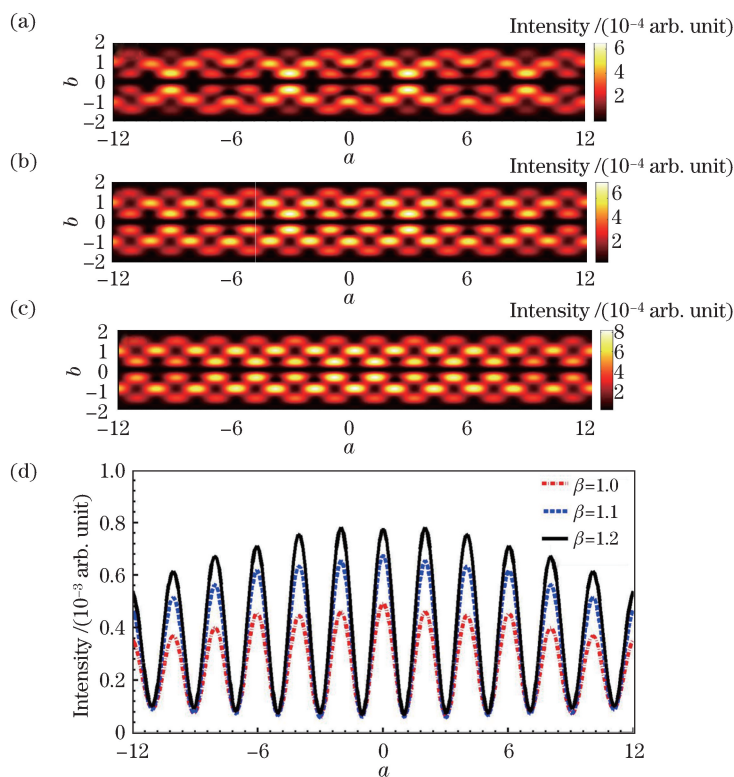


图 4 (a) $\beta=1.0$, (b) $\beta=1.1$ 和 (c) $\beta=1.2$ 时 $\rho-z$ 平面的总光强分布; (d) 总光强沿 z 轴的线形图
 Fig. 4 Total intensity distributions on $\rho-z$ plane when (a) $\beta=1.0$, (b) $\beta=1.1$ and (c) $\beta=1.2$;
 (d) line diagram of total intensity along z axis

模拟计算中,DOE 环参数的改变会影响光链的结构,并且内环和外环参数对光链的影响程度不同。为了简单说明 DOE 环对光链结构的影响,每次仅改变一个环的积分限进行研究,以 DOE 环中的第二环 θ_2 和第五环 θ_5 作为研究对象来分析环参数对光链结构的影响。

不同 θ_2 下焦平面的总光强沿 z 轴方向的分布曲线如图 5 所示,其他模拟参数与图 2 相同。可以看出,随着 DOE 内环参量 θ_2 的增大,光强也会增大,但链宽没有明显变化。在 $z=0$ 处,3 种情况对应的最大值峰值是重合的,而在右面第 5 个最大值峰值处对应的 z 值出现了微小变化,即最大值峰值随着 θ_2 的增大向右移动。

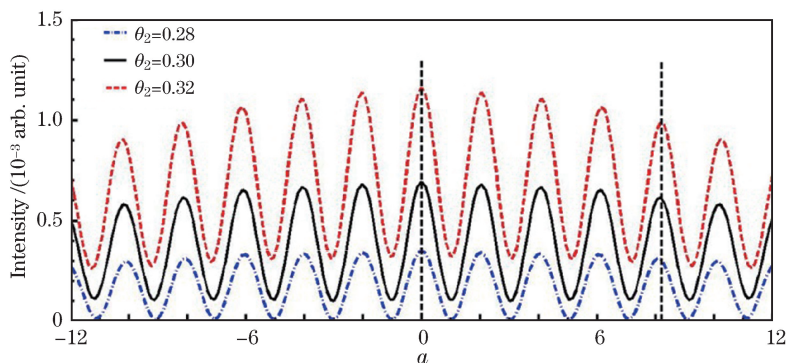


图 5 总光强在不同 θ_2 下沿 z 轴方向的分布曲线
 Fig. 5 Distribution curves of total intensity along z axis with different θ_2

不同 θ_5 下焦平面的总光强沿 z 轴方向的分布曲线如图 6 所示,其他模拟参数与图 2 相同。可以看出,随着 DOE 外环参量 θ_5 的增大,光强也会增大,但链宽出现明显的减小趋势。在 $z=0$ 处,3 种情况对应的最大值峰值是重合的,而在右面第 5 个最大值峰值处对应的 z 值有明显的变化,这个变化趋势与内环的变化趋势是相反的,最大值峰值随着 θ_5 的增大向左移动,说明此时链宽减小。

通过分析内环 θ_2 和外环 θ_5 的变化情况,发现 DOE 外环参数比内环参数对光链的影响更大,该结果也为设计 DOE 参数调控形成光链结构提供了依据。

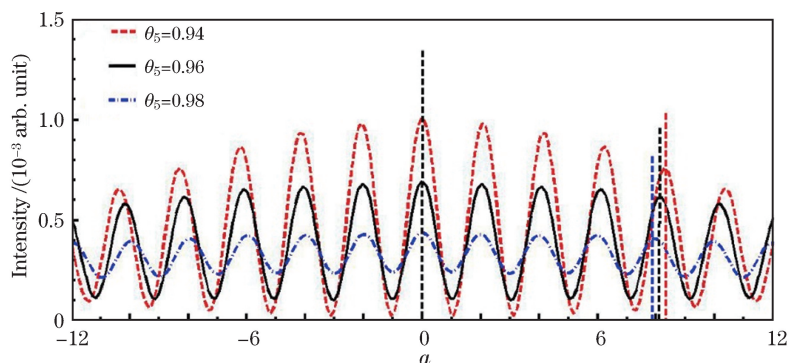


图 6 总光强在不同 θ_5 下沿 z 轴方向的分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of total intensity along z axis with different θ_5

当图 2 中形成双光链结构时,缔合拉盖尔多项式中拓扑荷数 $m=1$,径向模数 $p=2$ 。改变这两个参数,判断双光链结构是否存在。若光链结构被破坏,则需研究在调控尽可能少的参数下如何重新获得双光链结构。

仅改变入射光束的径向模数,得到轴平面的总光强分布如图 7 所示。由图 7(a)可见,在其他参数不变的情况下, $p=1$ 时双光链结构被破坏。由上述关于 β 的研究可知,可通过增大 β 重新获得双光链结构。取 $\beta=1.45$,并设 DOE 参数 $\theta_5=0.97$,保持其他参数不变,便可重新得到结构较好的双光链,其光强分布如图 7(b)所示。

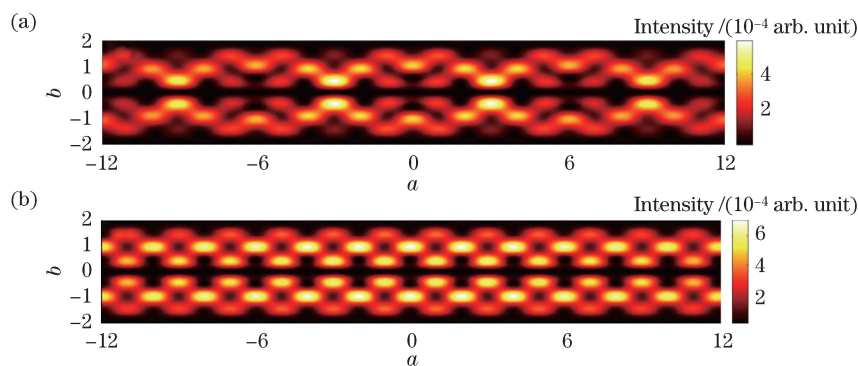


图 7 $p=1$ 时轴平面的总光强分布图。(a) 不改变其他参数; (b) $\beta=1.45$, $\theta_5=0.97$

Fig. 7 Total intensity distributions on axial plane when $p=1$. (a) Other parameters unchanged; (b) $\beta=1.45$, $\theta_5=0.97$

保持其他参数与图 2 相同,仅改变拓扑荷数 m ,双光链结构也会被破坏。图 8(a)为拓扑荷数 $m=2$ 的光强分布图,可见双光链结构已被破坏。同样,为重新获得双光链结构,需要增大拦截比,并适当调节 DOE 结构的参数。为了与图 7 保持一致,依然设定 $\beta=1.45$,再调节 DOE 参数,取 $\theta_2=0.27$,保持其他环的参数不变,可重新得到双光链结构,其光强分布如图 8(b)所示。

4 结 论

通过设计衍射光学元件,在高聚焦系统下形成沿光轴方向成对的三维双光链,并针对不同的入射光参数(如拦截比 β 、拓扑荷数 m 和径向模数 p)、聚焦透镜的 NA 以及衍射光学元件 DOE 结构的内外环参量 θ_2 和

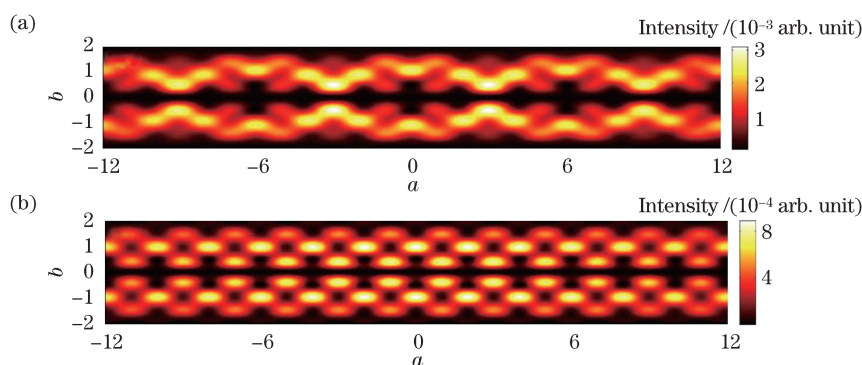


图 8 $m=2$ 时轴平面的总光强分布图。(a) 不改变其他参数; (b) $\beta=1.45, \theta_2=0.27$

Fig. 8 Total intensity distributions on axial plane when $m=2$. (a) Other parameters unchanged; (b) $\beta=1.45, \theta_2=0.27$

θ_5 对双光链性能的影响进行了系统的分析。研究表明, NA 增大可使链宽变小; DOE 结构和拦截比 β 决定了双光链结构能否产生, 并且 DOE 结构的外环参数比内环参数对双光链的影响更大, 表明当双光链结构遭到破坏后, 可以通过调节 DOE 结构和拦截比 β 来重新获得双光链结构; 入射光束的缩合拉盖尔多项式中的拓扑荷数 m 和径向模数 p 均会破坏双光链结构, 通过调节拦截比 β 和 DOE 结构可重新获得双光链结构。由此可见, 对不同参数进行调节可以达到不同的要求, 从而实现双光链结构的可控性。本文研究对于角向偏振拉盖尔-高斯光束在微操纵领域有着潜在的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Youngworth K S, Brown T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. Optics Express, 2000, 7(2): 77-87.
- [2] Yu Y, Zhan Q. Generation of uniform three-dimensional optical chain with controllable characteristics[J]. Journal of Optics, 2015, 17(10): 105606.
- [3] Pu H, Shu J, Chen Z, *et al.* Tight focusing of femtosecond radially polarized light pulses through a dielectric interface [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(9): 1717-1722.
- [4] Shu J, Chen Z, Pu J, *et al.* Tight focusing of a double-ring-shaped, azimuthally polarized beam through a dielectric interface[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(6): 1180-1185.
- [5] Zhang Yanli, Zhao Yiqiong, Zhan Qiwen, *et al.* Study of 3D optical chain with highly focused vector beam[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(3): 1253-1258.
张艳丽, 赵逸琼, 詹其文, 等. 高数值孔径聚焦三维光链的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1253-1258.
- [6] Zhan Q, Leger J. Focus shaping using cylindrical vector beams[J]. Optics Express, 2002, 10(7): 324-331.
- [7] Wang J, Chen W, Zhan Q. Creation of uniform three-dimensional optical chain through tight focusing of space-variant polarized beams[J]. Journal of Optics, 2012, 14(5): 055004.
- [8] Zheng Xiao, Yang Yanfang, He Ying, *et al.* Tight focusing of double-ring-shaped Bessel-Gaussian radially polarized beam through a dielectric interface[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0426001.
郑 晓, 杨艳芳, 何 英, 等. 双环贝塞尔-高斯径向偏振光束经介质分界面的强聚焦[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0426001.
- [9] Chen Xueqiong, Chen Ziyang, Pu Jixiong, *et al.* Intensity distribution of the flat-topped beam propagating through the thick nonlinear medium with defects[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 044213.
陈雪琼, 陈子阳, 蒲继雄, 等. 平顶光束经表面有缺陷的厚非线性介质后的光强分布[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 044213.
- [10] Liu D J, Wang Y C, Wang G Q, *et al.* Propagation properties of a partially coherent flat-topped vortex hollow beam in turbulent atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2016, 20(1): 1-7.
- [11] Liu Jian, Yang Yanfang, He Ying, *et al.* Flattop beam creation on strong focusing of circularly polarized vortex beams [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0526003.
刘 键, 杨艳芳, 何 英, 等. 基于圆偏振涡旋光束强聚焦的平顶光束的构成[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0526003.
- [12] Ji Shengzhe, Zhu Linwei, Sun Meiyu, *et al.* Axial two focus zone plate under tight focusing conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0305003.

- 冀胜哲, 朱林伟, 孙美玉, 等. 紧聚焦条件下的轴向双焦点波带片[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0305003.
- [13] Sun Chuan, He Yanlin, Wu Fengtie. Bottle beam generation with a double ring lens by focusing parallel light[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1208001.
孙 川, 何艳林, 吴逢铁. 双环透镜聚焦平行光产生局域空心光束[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1208001.
- [14] McGloin D, Spalding G C, Melville H, *et al.* Three-dimensional arrays of optical bottle beams[J]. Optics Communications, 2003, 225(4-6): 215-222.
- [15] Ahluwalia B S, Yuan X C, Tao S H. Generation of self-imaged optical bottle beams[J]. Optics Communications, 2004, 238(1-3): 177-184.
- [16] Jonáš A, Zemánek P, Florin E L. Single-beam trapping in front of reflective surfaces[J]. Optics Letters, 2001, 26(19): 1466-1468.
- [17] Tian Bo, Pu Jixiong. Twin-optical chain produced by tight focusing of azimuthally polarized higher-order Laguerre-Gaussian beams[J]. Laser Journal, 2015, 36(9): 10-12.
田 博, 蒲继雄. 角向偏振高阶拉盖尔高斯光束强聚焦产生双光链[J]. 激光杂志, 2015, 36(9): 10-12.
- [18] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system[C]. Proceedings of the Royal Society of London, 1959, 253(1274): 358-379.
- [19] Boivin A, Wolf E. Electromagnetic field in the neighborhood of the focus of a coherent beam[J]. Physical Review, 1965, 138(6B): B1561-B1565.
- [20] Helseth L E. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens systems[J]. Optics Communications, 2001, 191(3): 161-172.