

高数值孔径聚焦三维光链的研究*

张艳丽¹⁾ 赵逸琼¹⁾ 詹其文²⁾ 李永平^{1)†}

1) 中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

2) 美国戴顿大学电子光学系, 戴顿)

(2005 年 4 月 6 日收到, 2005 年 7 月 20 日收到修改稿)

通过设计衍射光学元件对入射矢量光进行调制, 在高数值孔径聚焦系统焦点附近产生沿光轴方向的三维多点光俘获结构——光链, 并针对不同的入射矢量偏振、聚焦透镜的数值孔径以及衍射光学元件结构, 对光链性能的影响分别进行了系统的分析, 实现对该独特光俘获结构的可控性研究.

关键词: 衍射光学元件, 矢量光, 光镊

PACC: 4280B, 4225J, 3380P

1. 引言

光镊或“光扳手”^[1,2]是利用光辐射与微粒之间的动量传递产生的作用力, 实现对微粒的三维操控, 具有非接触性作用的特点. 目前, 光镊技术已广泛应用于生物学、化学、物理学等基础科学的研究, 特别是在显微机械加工^[3,4]和 DNA 浓缩^[5]等方面, 展示了其诱人的应用前景.

近年来高数值孔径的特殊矢量聚焦性质^[6-9], 例如超过衍射极限的焦斑用于高密度数据存储以及超清晰光学成像, 多功能光学俘获以及微印刷, 引起了人们的极大兴趣. 其中, 具有轴对称偏振特性的偏振光更是因其在平板印刷术^[10]、光镊^[11-13]、高分辨率椭圆仪^[14]等方面的潜在应用, 成为人们研究的热点.

对微粒进行多点光俘获一直是微光学操纵领域备受关注的话题. 以往报道中, 利用不同阶数的 Bessel 光^[15]、LG 模^[16]的干涉和高斯驻波^[17]等多种方法均可产生多点光俘获结构, 但是它们对俘获结构中粒子不是三维稳定俘获, 或者不能三维俘获波长尺度的微小粒子, 而且均需要多束入射光的参与. 衍射光学元件(diffractive optical elements, DOE)可以对光波面进行整形, 并可产生一般传统光学元件所不能实现的光波面. 最近, 我们利用衍射光学元件

(DOE)调制单束径向称偏振光的入射波前, 在焦点附近产生了特殊的光学结构——沿光轴方向的三维“光链”^[18], 它能利用光的明亮部位对折射率比周围环境高的多个微粒进行俘获, 也能用中空的暗区对折射率比周围环境低的多个微粒进行俘获, 且每个粒子均能被准确的三维局限于各自的势阱当中. 此外, 由于光轴周围的纵向能流接近为零, 它还能用于稳定俘获金属 Rayleigh 粒子. 本文在我们以往工作的基础^[18]上进行了更深入地研究, 对影响“光链”特征的不同因素分别进行了系统的分析, 实现对该独特光俘获结构的高自由度控制, 作为微小粒子的操控手段, 其必在生物大分子特性、细胞生物学和遗传学等生命科学以及介观物理学研究中发挥更多潜在的作用.

2. 光链的形成

设计装置如图 1 所示, 入射的矢量光经 DOE 调制后, 由高数值孔径透镜聚焦. DOE 具有两个环形透光区域——I 和 II 带, 如图 2 所示, 透过率函数分别是 $-1, 1$, 设定环带边缘与光轴的夹角分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 = \arcsin(\text{NA})$. 光场在焦点附近的复振幅分布利用矢量 Debye 积分^[19,20]表示为

$$U(p) = -\frac{i}{\lambda} \iint_{\Omega} A_w \frac{\tilde{\alpha}(s_x, s_y)}{s_z}$$

* 国家自然科学基金(批准号:10274078)资助的课题.

† E-mail: liyp@ustc.edu.cn

$$\times \exp[ik(s_x p_x + s_y p_y + s_z p_z)] ds_x ds_y, \quad (1)$$

其中 $s = (s_x, s_y, s_z)$ 是向焦点会聚的几何光线的单位矢量, Ω 是所有光线形成的立体角, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, $\hat{a}(s_x, s_y)$ 与入射光的偏振有关, A_w 是透镜的切趾函数. 广义轴对称偏振光如图 3 所示, 可分解为径向偏振光 ($\Phi_0 = 0$) 和法向偏振光 ($\Phi_0 = \pi/2$) 的线

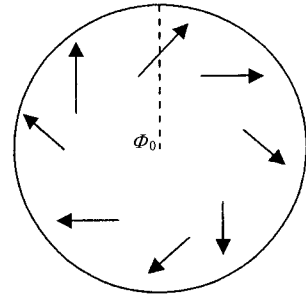


图 3 广义轴对称偏振光束截面图

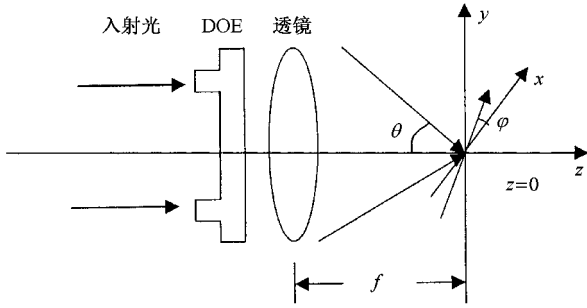


图 1 光路图

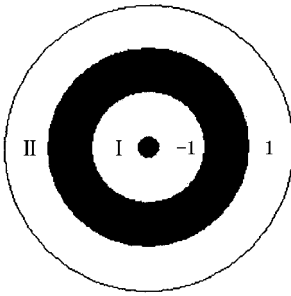


图 2 DOE 结构图(黑色表示不透光部分,白色表示透光部分 (I 和 II 带))

性叠加, Φ_0 是偏振方向与径向方向的夹角. 其中径向偏振光 ($\Phi_0 = 0$) 在高数值孔径 ($NA = 1.0$) 透镜焦点附近形成的光链, 如图 4(a) 所示, 可以看出沿光轴方向形成了准周期的三维光链, 焦点处的强度基

本为零, 其两边的强度呈对称分布, 轴上强度的极大值随与焦点距离的增大而变小. 表征光链形态的参数设定如下: 周期 S_z (纵向相邻极大值点之间的距离), 链宽 S_r (焦平面横向极大值点之间的距离), 纵向(横向)深度 D_z (D_r) (光强最大值), 如图 4(b)(c) 所示. 光链的形成原理是光束经 DOE 后分成的两部分, 沿光轴方向具有 Gouy 位相差^[21], 相互干涉产生了周期分布. 本文使用的 DOE 有两个透光带, 且部分是不透光的, 若增加透光带的个数, 不同带提供位相不同, 相干叠加的结果使光场在轴向和纵向变得复杂, 得到的“光泡”数目受到限制, 且光链的结构变得不规则, 其周期性受到破坏. 另外借助不透光部分的贡献能增大不同带形成的轴向位相差, 从而控制形成的“光泡”数目. 利用纯位相的 DOE 可以得到一个“光泡”, 不能得到类似光链的结构.

3. 偏振对光链的影响

广义轴对称偏振光由于原点处偏振方向的不确定性, 其在原点处的强度存在奇点. 柱坐标中光场在入射面上的分布写为 $E(r, \varphi, 0) = E_0[\cos\Phi_0 \cdot e_r + \sin\Phi_0 \cdot e_\varphi + 0 \cdot e_z]$, 其中 e_r, e_φ, e_z 分别是径向、法向

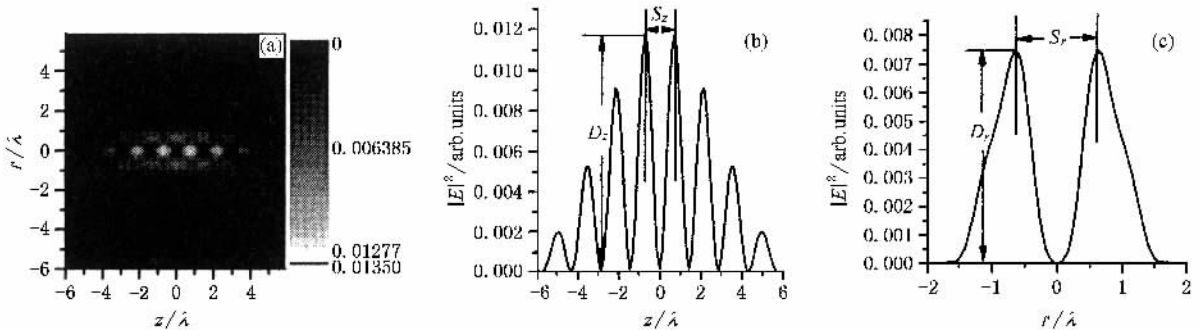


图 4 径向偏振光 ($\Phi_0 = 0$) 形成的光链 (a) rz 平面上的光强分布; (b) 光轴上光强分布; (c) 焦平面上光强分布 (DOE 结构参数: $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0.4\theta, \alpha_3 = 0.9\theta, NA = \sin\theta, NA = 1.0$)

和 z 方向的单位矢量, E_0 是常数,由(1)式可得经透镜聚焦后场的振幅为

$$E(r, \varphi, z) = \begin{pmatrix} E_r \\ E_\varphi \\ E_z \end{pmatrix} = A \int_0^\alpha \cos^{1/2}(\theta) l_0(\theta) \cdot e^{ikz \cdot \cos(\theta)} \times \begin{pmatrix} \cos\Phi_0 \sin\theta \cos\theta J_1(kr \sin\theta) \\ \sin\Phi_0 \sin\theta J_1(kr \sin\theta) \\ i \cos\Phi_0 \sin^2\theta J_0(kr \sin\theta) \end{pmatrix} d\theta \quad (2)$$

其中 $l_0(\theta)$ 是 DOE 的透过率函数, J_n 是第一类第 n 阶 Bessel 函数. 本文中引用等光程透镜, 其脚趾函数为 $A_w = \cos^{1/2}\theta$. $|E_z|^2$ 的分布集中于光轴附近且沿

光轴方向形成了明暗相间分布,如图 5(a)所示,从而决定 S_z, D_z 的大小. $|E_r|^2$ 和 $|E_\varphi|^2$ 分布基本相似,光轴上的场强分布为零,在对应 $|E_z|^2$ 暗区的位置形成了波浪状环形分布,如图 5(b)(c)所示,它们直接影响 S_r, D_r 的大小. 利用两个半波片改变 Φ_0 的大小^[22],即改变径向偏振和角向偏振光的比例,从而调整 D_z 与 D_r 的比例,以平衡粒子四周梯度力的分布实现三维稳定俘获. 与此同时,由于 $|E_\varphi|^2$ 形成的环形分布横向尺寸比 $|E_r|^2$ 形成的要大,因此增大 Φ_0 , 则 S_r 随之增大,如图 6 所示. 光链的横向尺寸增大,形成的“光泡”形状改变,可能为“椭球状”,用于俘获不规则形状的粒子.

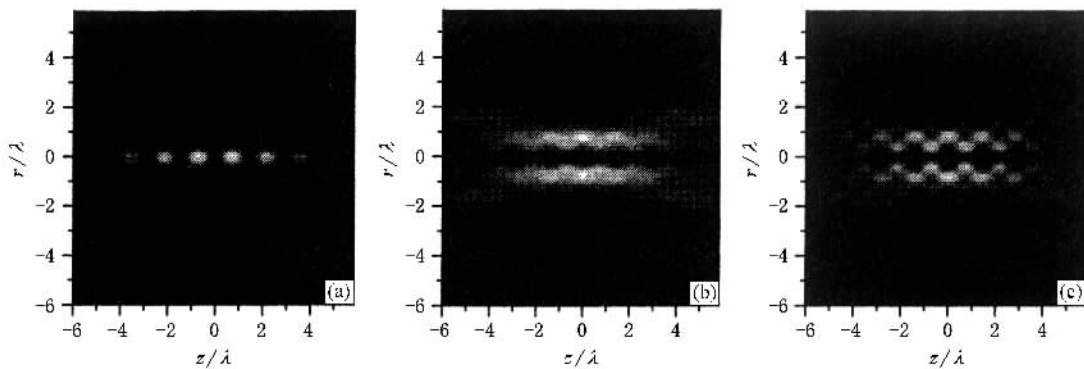


图 5 (a) $|E_z|^2$ 的分布, (b) $|E_r|^2$ 的分布 (c) $|E_\varphi|^2$ 的分布

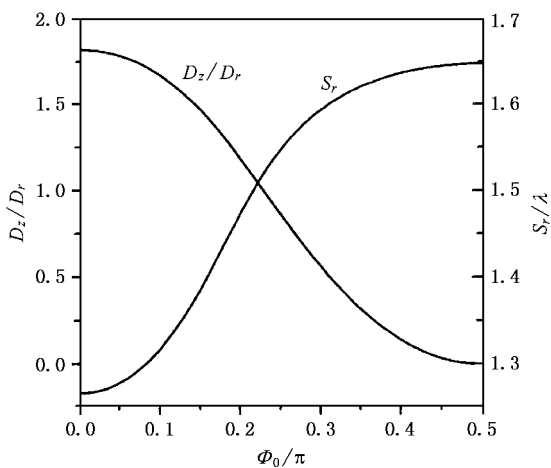


图 6 $D_z/D_r, S_r$ 与 Φ_0 的关系 (DOE 结构参数 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0.4\theta, \alpha_3 = 0.9\theta, NA = \sin\theta, NA = 1.0$)

若入射为线偏振光, 偏振方向为 x 方向, 表示为 $E(x, y, 0) = A e_x$, z 方向为光轴方向. 由于去偏振

效应在焦点附近出现了 y 和 z 方向偏振的光, 公式如下:

$$E(r, \varphi, z) = \frac{i\pi}{\lambda} \{ I_0 + \cos(2\varphi) I_2 \hat{x} + \sin(2\varphi) I_2 \hat{y} + 2i \cos\varphi I_1 \hat{z} \}, \quad (3)$$

其中 I_0, I_1, I_2 的表达式见附录. 当 DOE 的结构参数设定为 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0.37\theta, \alpha_3 = 0.6\theta, \theta = \arcsin(NA), NA = 0.8$ 时, 焦点附近 XZ, YZ 平面上的光场分布如图 7(a), (b) 所示, 也形成了周期性的链状分布. 焦平面上的光场分布不像径向偏振光那样具有轴对称性, 它在原偏振方向上得到了拉长, 如图 7(c) 所示 (已放大). 这种光可以对高折射率的微粒进行稳定俘获, 但对于低折射率的微粒俘获不是很稳定, 这是由于“光泡”横向光强比较弱导致梯度力小的缘故. 以上结果表明, 光链的形成与入射光的偏振模式没有必然的联系, 偏振态不同, 形成的“光链”形态会略微不同, 但不会影响链状结构的产生.

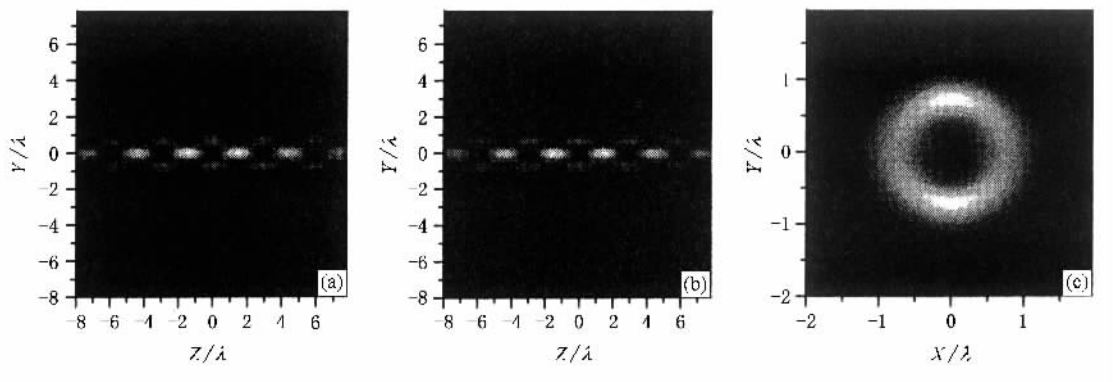


图 7 (a)XZ 平面 ,(b)YZ 平面 ,(c)焦平面 上的强度分布(NA=0.8. DOE 结构参数 θ $0.37\theta, 0.6\theta, NA = \sin\theta, NA=0.8$)

4. DOE 结构对光链的影响

“光链”干涉结构的周期是通过 DOE 结构来确定的,因此,改变位相片透光区域的相对大小可以改变所形成光链的节点(暗点和亮点)个数和尺寸,这就能俘获不同数目和大小的微粒.保持 DOE 两个透过率不为 0 的环带宽度不变,改变两个带之间的距离.随着两个带距离 $\gamma = \alpha_3 - \alpha_2$ 的增加, S_z 减小,用函数 $y = a + b/x$ 对曲线进行拟合,两条曲线基本重合,如图 8 所示.说明透光两环带的纵向干涉性质与杨式双缝干涉具有一定的相似性,即干涉条纹间距与缝(环带)间距成反比关系.在保证 S_z 最小的情况下,通过设计 DOE 得到不同节点数目(亮点)的光链,如表 1 所示.看出若增加节点个数,必须减小 I (II) 带的尺寸,即增加两带的间距.虽然 I (II) 带尺寸的减小相当于减小了光的透过范围,能量有一定的损失,不过若利用高功率激光器,就可以达到一定的实际要求.

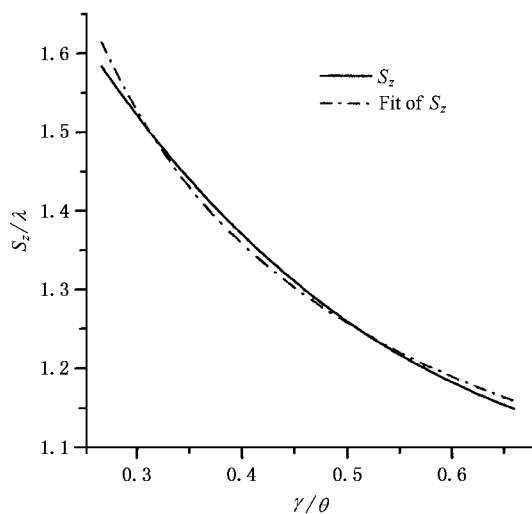


图 8 $S_z-\gamma$ 的关系 ($\gamma = \alpha_3 - \alpha_2$, 外环带宽度 $\alpha_4 - \alpha_3 = 0.1\theta$, 内环带宽度 $\alpha_2 - \alpha_1 = 0.24\theta$. 改变 $\alpha_2, \alpha_1, \theta = \arcsin(NA), NA = 1.0$)

表 1 设计条件:需要的场强极大值大于最大场强的 0.1 倍,且设定个数为 $N, \alpha_1 = 0, NA = 1, \theta = \arcsin(NA)$

N	$\alpha_2(\theta)$	$\alpha_3(\theta)$	$S_z(\lambda)$
2	0.59	0.694	2.3292
4	0.5	0.774	2.009
6	0.4	0.852	1.7288
8	0.31	0.904	1.5128
10	0.22	0.952	1.3366
12	0.15	0.976	1.2166

5. 数值孔径对光链的影响

不同的数值孔径可以影响光链的长度,即影响节点(亮点和暗点)的大小,从而俘获大小不同的微粒.锁定 DOE 结构参数,从 0.75 到 0.99 改变 NA, D_r, S_r 和 D_z, S_z 的变化,如图 9 所示,可以看出随着 NA 的增大 S_z, S_r 逐渐变小, D_z, D_r 逐渐变大(相同的入射振幅)因此增大数值孔径有利于俘获尺寸较小的粒子,这是由于 NA 的增大相当于增强了对光的会聚,使光的能量分布越向焦点处聚集,从而使光链的长度减小.

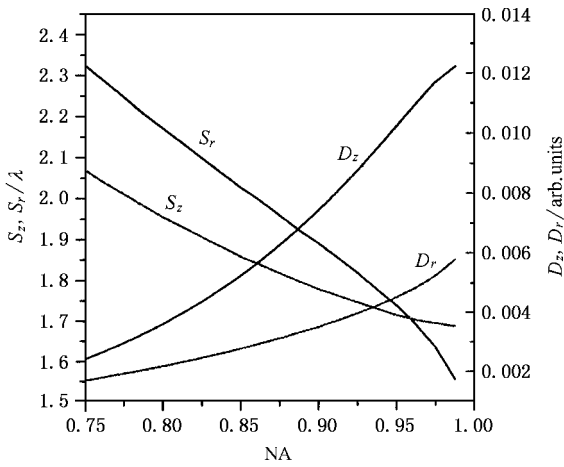


图9 S_r, D_r, S_z, D_z 与 NA 的关系 (DOE 结构参数: $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0.4\theta, \alpha_3 = 0.9\theta, NA = \sin\theta$)

6. 结 论

不同的入射矢量偏振——广义轴对称偏振光和线偏振光, 都可高聚焦系统下形成沿光轴方向的三维“光链”, 因此“光链”的形成与偏振模式无本质联系. 广义轴对称偏振光由于其特殊的矢量特性, 所形成“光链”暗点的纵向和横向强度值相近, 利于对低折射率的微粒进行三维多点稳定俘获, 而线偏振光则利于对高折射率的微粒进行俘获. DOE 决定

“光链”结构的产生, 改变 DOE 区域的透光范围可以改变所形成节点(暗点和亮点)的个数和尺寸. 透镜的数值孔径(NA)对“光链”的设计增加了又一可调自由度, 改变它的大小可以改变“光链”的尺寸. 对不同参数进行调节, 可达到不同的设计要求, 以实现对该独特光俘获结构的可控性操作. 利用光位相调制器连续改变两透过带的位相差, 能使光链的节点在光轴方向上移动, 作为“光栈”或“光传输带”, 实现对微粒的传输和控制, 这在细胞内的能量和物质的运输过程等研究中有更广泛的应用. 此外, 不同角度的多光束合成形成三维光阱阵列, 可用于一维或三维光子晶体的制作.

附 录

文中(3)式中 I_0, I_1, I_2 的表达如下:

$$I_0 = \int_0^\alpha \mathcal{T}(\theta) \sin(\theta) (1 + \cos\theta) J_0(kr \sin\theta) \times \exp(-ikz \cos\theta) \sqrt{\cos\theta} d\theta,$$

$$I_1 = \int_0^\alpha \mathcal{T}(\theta) \sin^2(\theta) J_1(kr \sin\theta) \exp(-ikz \cos\theta) \sqrt{\cos\theta} d\theta,$$

$$I_2 = \int_0^\alpha \mathcal{T}(\theta) \sin(\theta) (1 - \cos\theta) J_2(kr \sin\theta) \times \exp(-ikz \cos\theta) \sqrt{\cos\theta} d\theta,$$

其中 J_n 是第一类第 n 阶 Bessel 函数, $\mathcal{T}(\theta)$ 为光在入射面上的振幅分布.

[1] Ashkin A, Dziedzic J M, Yamane T 1987 *Nature* (London) **330** 769
 [2] Ji X M, Yin J P 2004 *Acta Phy. Sin.* **53** 4163 (in Chinese) [纪宪明、印建平 2004 *物理学报* **53** 4163]
 [3] Friese M E J, Nieminen T A, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H 1998 *Nature* **394** 348
 [4] Simpson N B, Dholakia K, Allen L, Padgett M J 1997 *Opt. Lett.* **22** 52
 [5] Case R B, Chang Y P, Smith S B, Gore J, Cozzarelli N R, Bustamante C 2004 *Science* **305** 222
 [6] Dorn R, Quabis S, Leuchs G 2003 *J. Mod. Optics* **50** 1917
 [7] Martínez-Corral M, Clibáñez-López, Tcaballero M, LMunoz-Escrivá 2003 *J. Phys D: Appl Phys.* **36** 1669
 [8] Youngworth K S, Brown T G 2000 *Opt. Express* **7** 77
 [9] Dorn R, Quabis S, Leuchs G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 233901

[10] Schuster K 2001 US patent # 6191880 B1
 [11] Zhan Q W 2004 *Opt. Express.* **12** 3377
 [12] Zhan Q W 2004 *Proc. SPIE* **5514** 275
 [13] Zhan Q W 2003 *J. Opt. A: Pure Appl Opt.* **5** 229
 [14] Zhan Q W, Leger J R 2002 *Appl. Optics.* **41** 4443
 [15] McGloin D, Spalding G C, Melville H, Sibbett W, Dholakia K 2003 *Opt. Commun.* **225** 215
 [16] Sahlulwalia B P, Yuan X C, Tao S H 2004 *Opt. Commun.* **238** 177
 [17] Jonas A, Zemanek P, Florin E L 2001 *Opt. Lett.* **26** 1466
 [18] Zhao Y Q, Zhan Q W, Zhang Y L, Li Y P 2005 *Opt. Lett.* **30** 848
 [19] Richards B, Wolf E 1959 *Proc. Roy. Soc. A* **253** 358
 [20] Boivin A, Wolf E 1965 *Phys. Rev.* **138** 1561
 [21] Zhan Q W 2004 *Opt. Commun.* **242** 351
 [22] Zhan Q W, Leger J R 2002 *Opt. Express* **10** 324

Study of 3D optical chain with highly focused vector beam^{*}

Zhang Yan-Li¹⁾ Zhao Yi-Qiong¹⁾ Zhan Qi-Wen²⁾ Li Yong-Ping^{1)†}

1) (*Department of Physics , University of Science and Technology of China , Hefei 230026 , China*)

2) (*Electro-Optics Graduate Program , University of Dayton , Dayton , USA*)

(Received 6 April 2005 ; revised manuscript received 20 July 2005)

Abstract

We present a design of diffractive optical element to produce 3D optical chain along optical axis near the focus of a high numerical aperture (NA) lens by spatially modulating the phase of incoming vector beam. This optical chain can trap multiple individual particles in three dimensions at different planes near the focus. For flexibly controlling this special optical trapping system , we systematically analyze the factors affecting the characteristics of the optical chain , such as different incoming vector polarization of light , the NA of the lens , and the structure of the DOE.

Keywords : diffractive optical element , vector beam , optical trapping

PACC : 4280B , 4225J , 3380P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10274078).

[†] E-mail : liyp@ustc.edu.cn