

文章编号: 0258-7025(2009)01-0129-05

矢量偏振光束的产生及其高数值孔径聚焦性质

张艳丽 李小燕 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 利用石英晶体的旋光效应产生矢量偏振光束, 石英晶体被分成圆心角相同的 12 个扇区, 每个扇区设计有特定的厚度, 依据晶体的旋光性质可知, 在平面线偏振光入射的条件下, 不同扇区产生了不同的偏振旋转, 形成了空间上偏振方向不同的矢量偏振光束。进一步利用二维辛普森数值积分(ZDSC)方法计算了这种光束的高数值孔径聚焦场分布, 发现此光束的聚焦性质与轴对称偏振光的极其相似, 说明提出的方法可作为产生偏转角可调的轴对称偏振光的一种简单方法, 而满足实际的应用需要。

关键词 物理光学; 矢量偏振光束; 旋光效应; 高数值孔径; 径向偏振光

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093601.0129

Generation and Focusing Property with High-Numerical Aperture Lens of Vectorial Polarized Beam

Zhang Yanli Li Xiaoyan Zhu Jianqiang

(Joint Laboratory for High Power Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A method utilizing rotation effect of the quartz crystal to generate vectorial polarized beam is proposed. The quartz crystal is divided into twelve sectors with the same angle, and the thickness of the individual sector is designed with specific value. According the property of the crystal, the polarization direction of the incoming planar polarized beam is changed with different rotation angle in different sectors. So the beam with spatially different polarization is formed. Furthermore the irradiance distribution near the focus with a high-numerical aperture lens is also calculated with two-dimensional Simpson calculus(ZDSC) method. It is found that the focusing property of the vector beam is very similar to that of the cylindrically polarized beam. The method can be used to generate cylindrically polarized beam to meet the practical application needs.

Key words physical optics; vectorial polarized beam; rotation effect; high numerical aperture; radially polarized beam

1 引言

轴对称矢量偏振光的空间偏振分布引起的奇异性质, 激起了光学界广泛的研究兴趣^[1~8]。近年来, 高效的产生方法一直是许多学者致力研究的方向^[9~11], 一般分为主动方法和被动方法。在实际应用中, 最引人注目的是这种光束的高数值孔径聚焦特性, 径向偏振光束在焦点附近形成了很强的纵向光场分量, 且在一定的系统参数条件下, 能够形成超过衍射极限的聚焦光斑, 在高分辨率显微成

像^[12,13]、高分辨率偏振仪^[14]及光存储^[15]等方面具有潜在的应用价值。考虑到光束复振幅这个自由度, 特殊的复振幅分布能够使聚焦场的光场分布呈现有趣的结构, 如“光泡”, “光链”^[16,17], “平顶光场”^[18,19], 在光捕获、操纵^[20]和微印刷中具有诱人的应用前景。另外, 轴对称偏振光束还可以应用于频移、电子加速、材料处理、高分辨度量等方面。

本文提出利用石英晶体的旋光效应产生一种类似轴对称偏振光的矢量偏振光束, 把石英晶体分为

收稿日期: 2008-04-22; 收到修改稿日期: 2008-05-20

作者简介: 张艳丽(1981-), 女, 山东人, 博士研究生, 主要从事光束传输变换及微光学的研究工作。

E-mail: zhasdg@ustc.edu

导师简介: 朱健强(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光器件设计、光学精密机械设计与制造工艺、光学仪器等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

12 个扇区,每个扇区具有不同的厚度,在平面线偏振光入射条件下,形成了空间上偏振态不同的矢量偏振光束。并进一步利用二维辛普森数值积分(2DSC)方法研究了此光束在高数值孔径聚焦系统下聚焦场的性质。发现其焦平面上光场分布与理想轴对称偏振光的十分相似,可以代替理想的轴对称偏振光束进行实际应用。

2 矢量偏振光束的表述

在直角坐标系下,矢量偏振光束可以用数学公式表示为

$$\vec{E} = A_x(x, y, z)\hat{e}_x + A_y(x, y, z)\hat{e}_y + A_z(x, y, z)\hat{e}_z, \quad (1)$$

式中 $(\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z)$ 为直角坐标系单位矢量, $[A_x(x, y, z), A_y(x, y, z), A_z(x, y, z)]$ 分别对应光场各个方向的复振幅分布。从(1)式可以看出空间各点的偏振态不同,与复振幅的值紧密相关。光的传播方向设定为 z 轴,在 $z = 0$ 的光束传播横截面上,若 $A_z(x, y, 0) = 0$, 且 $A_x(x, y, 0), A_y(x, y, 0)$ 的相位分布相同,则光场横截面上每一点的偏振态为线性偏振的,其振动方向由分量振幅的比值决定,振动方向与 x 轴的夹角为 $\psi = \arctan(A_y/A_x)$ 。轴对称偏振光的偏振分布是中心对称的。光束横截面上各点的偏振态都是线性的,是麦克斯韦方程组在柱坐标系中的解,由于光束中心处偏振方向的不确定性,其在中心处的强度存在奇点。一般用数学公式表示为

$$\vec{E} = A_0(r, 0)[\cos(\varphi + \phi_0)\hat{e}_x + \sin(\varphi + \phi_0)\hat{e}_y], \quad (2)$$

在柱坐标系中又可写为

$$\vec{E} = A_0(r, 0)[\cos(\phi_0)\hat{e}_r + \sin(\phi_0)\hat{e}_\varphi], \quad (3)$$

其中 $A_0(r, 0)$ 为光场的复振幅分布,可以为 Laguerre-Gaussian 或 Bessel-Gaussian 函数。光束横截面上振动方向分布如图 1 所示。可以看出,空间每一点的振动方向仅与点的角位置有关,角位置为 φ 的点,其振动方向与 x 轴的夹角为 $\psi = \varphi + \phi_0$,

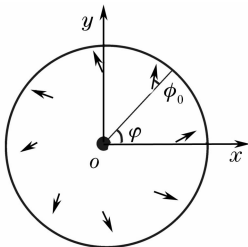


图 1 轴对称偏振光束截面图

Fig. 1 Beam cross-section of cylindrical vector beam

当 $\phi_0 = 0$ 时,光束转变成径向偏振光,在高数值孔径聚集条件下此种光束具有很强的纵向分量,能使其应用于高分辨显微成像、微全息等方面。当 $\phi_0 = \pi/2$ 时光束变成角向偏振光,高数值孔径聚集条件下此种光束保持中空的特性,能使其应用于微机械加工、材料处理等方面。

3 矢量偏振光束的产生

矢量偏振光束的生成有两种基本方法:主动方法和被动方法。主动方法在激光器内利用特殊的选模元件选出需要的模式^[21]。而被动方法是利用一般的高斯光束借助腔外的设计元件转化而成,具有很大的设计灵活性。文献[2]提出用 4 个快轴方向不同的半波片组合来产生近似径向偏振光束,但此种方法具有很大的频率依赖性^[22],而且半波片的厚度必须严格控制,才能在每一空间点形成线性的偏振态。利用石英晶体的旋光效应,设计了特殊的偏振转换器,其坐标及结构如图 2 所示。

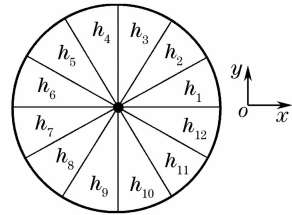


图 2 石英晶体剖面结构图

Fig. 2 Profile structure of quartz crystal

晶体被分割成 12 个扇形区域, N 为每个扇区的编号,且其光轴平行于晶体的厚度方向,扇区对应的圆心角为 $\pi/6$,每个扇区的厚度标定为 h_N ,其值设定为

$$h_N = \frac{\pi}{6\alpha}(N - 0.5), \quad (N = 1, 2, \dots, 12.) \quad (4)$$

其中, α 为旋光率,在一定的频率范围内可认为是常数^[23],具有很大的频率宽容性。厚度的微小差别不会改变偏振态的线性性质,只是旋转方向发生小量

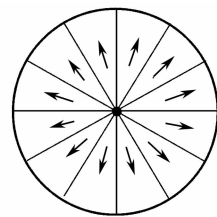


图 3 准径向偏振光

Fig. 3 Quasi-radially polarized beam

改变。如此入射的平面线偏振光在通过每个扇区时,旋转角度为

$$\varphi = \frac{\pi(N-0.5)}{6} \quad (N = 1, 2, \dots, 12) \quad (5)$$

若经过准直的平面线偏振光的振动方向沿着 x 轴,那么经过此晶体后光束横截面上的偏振态如图 3 所示。可以看出产生了类似径向偏振的光束,把它称为准径向偏振光,下文将会看到,它的高数值孔径聚焦性质与理想径向偏振光的极其相似。另外可以通过旋转石英晶体得到不同偏转角 ψ 的矢量偏振光。在石英晶体旋转 $\pi/2$ 角度时(入射偏振保持方向为 x 轴),光束转变为准角向偏振光。对于每个扇区由于厚度不同引入的相位可以通过相位元件进行补偿。

4 高数值孔径聚焦性质

在高数值孔径聚焦条件下,考虑到光的空间偏振特性,光在焦点处的场可由 J. Cooper 等^[24] 提出的二维辛普森数值积分方法得到。聚焦系统及坐标设定如图 4 所示,坐标原点 (o, o, o) 为圆形入射孔径的中心, P 为焦点附近的观察点,坐标为 $P(x_P, y_P, z_P)$ 。 Q 为入射面上的点,坐标为 $Q(\rho_Q, \theta_Q, 0)$ 。 S 为会聚系统的焦点。 P 点处的光场用第一类矢量瑞利-索末菲衍射积分得到,表示为

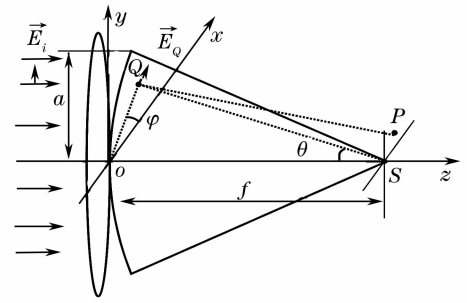


图 4 聚焦系统及坐标设定

Fig. 4 Highly focused system and coordinate system

$$\vec{E}_P = C \int_0^{2\pi} \int_0^a g T \vec{E}_Q \frac{\exp(ikr_{QP})}{r_{QP}^3} z_P (ikr_{QP} - 1) \rho_Q d\rho_Q d\theta_Q, \quad (6)$$

式中, $\vec{E}_Q(x_Q, y_Q, 0) = \frac{\exp(-ikr_{QS})}{r_{QS}} \vec{e}$

被积函数中 T 为入射面上的复振幅分布,采用等光程透镜,其切趾函数为 $g = \cos^{1/2} \theta$ 。 a 为圆形入射光束的孔半径, f 为透镜的焦距,则光线的最大会聚半角为 $\theta_{\max} = \arctan(a/f)$,透镜的数值孔径 $NA = n \sin \theta_{\max}$ (n 为系统所在介质的折射率,设 $n = 1$)。 (r_{QP}, r_{QS}) 分别为 Q 与 P, S 点的距离。 \vec{e} 为入射光场经过透镜后的矢量表示,假设入射光场振动方向为 $(p_x, p_y, 0)$,则偏振旋转可写为

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + (\cos \theta - 1) \cos^2 \varphi & (\cos \theta - 1) \cos \varphi \sin \varphi & -\sin \theta \cos \varphi \\ (\cos \theta - 1) \cos \varphi \sin \varphi & 1 + (\cos \theta - 1) \sin^2 \varphi & -\sin \theta \sin \varphi \\ \sin \theta \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

选定的计算参数为: $NA = 0.8, \lambda = 1, a = 4000 \lambda$,入射光束的复振幅均匀分布,即 $T = 1$,且其振动方向指向 x 轴。根据 2DSC 方法,在焦平面上各个方

向的光场强度如图 5 所示(场强度已归一化,参数和坐标一致)。可以看出, $|E_x|^2$ 的强度分布为两个沿着 x 轴且关于 y 轴对称分布的瓣状光斑。 $|E_y|^2$

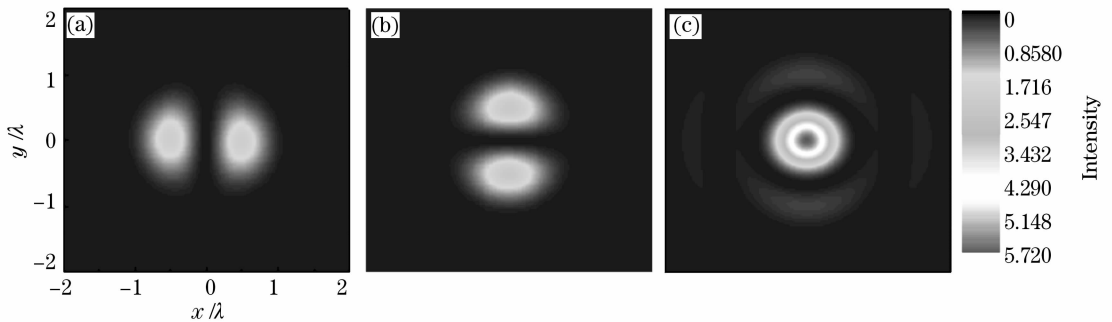


图 5 准径向偏振光焦平面上的聚焦场分布

(a) $|E_x|^2$ 的分布; (b) $|E_y|^2$ 的分布; (c) $|E_z|^2$ 的分布。

Fig. 5 Normalized intensity distribution at focal plane for a quasi-radially polarized beam

(a) $|E_x|^2$ distribution; (b) $|E_y|^2$ distribution; (c) $|E_z|^2$ distribution

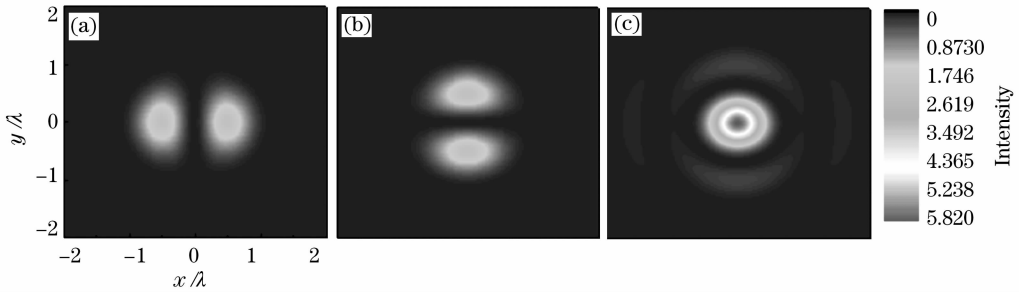


图 6 径向偏振光焦平面上的聚焦场分布

(a) $|E_x|^2$ 的分布; (b) $|E_y|^2$ 的分布; (c) $|E_z|^2$ 的分布

Fig. 6 Normalized intensity distribution at focal plane for a quasi-radially polarized beam

(a) $|E_x|^2$ distribution; (b) $|E_y|^2$ distribution; (c) $|E_z|^2$ distribution

的强度分布为两个沿着 y 轴且关于 x 轴对称分布的瓣状光斑。根据偏振方向及复振幅的分布,两个横向分量 $|E_x|^2$, $|E_y|^2$ 可以近似合成中空的径向分量 $|E_r|^2$ 。纵向分量 $|E_z|^2$ 比横向分量要强,而且它的光斑尺寸很小,若采用一定的相位调制,光斑尺寸可以进一步减小。图 6 为理想径向偏振光的聚焦光场分布。比较图 5 和图 6 可以发现,利用我们的方法产生的准径向偏振光和理想径向偏振光的聚焦场分布形态基本相同。很强的纵向分量是径向偏振光高数值孔径聚焦的奇异特性,它可以形成超过衍射极限的光斑。因而有必要更精细地研究准径向偏振光和理想径向偏振光的 $|E_z|^2$ 强度分布,如图 7 所示。可以看出,两纵向分量的尺寸基本相同,只是理想径向偏振光的纵向分量强度更大,这是因为理想径向偏振光的偏振对称性更强,向纵向的分解更大。从上文可以看出利用此方法产生的准径向偏振光束基本可以替代理想径向偏振光束,满足实际应用的需要。另外,若把晶体沿着中心轴旋转 $\pi/2$,那么可以形成准角向偏振光,其强度分布如图 8 所示。可以看出 $|E_z|^2$ 分量很小,基本可以忽略。而

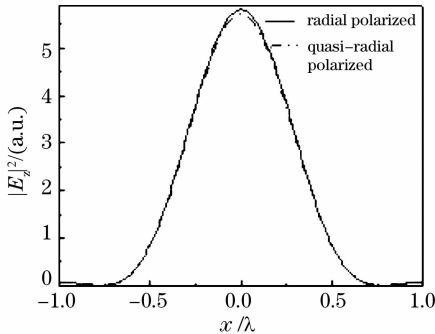
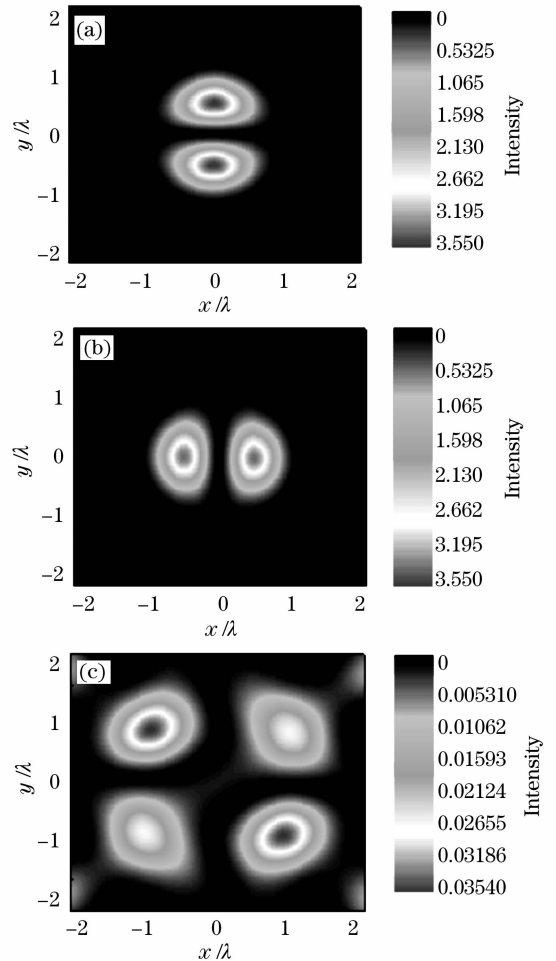
图 7 径向偏振光和准径向偏振光的 $|E_z|^2$ 分量沿着 x 轴强度分布Fig. 7 Intensity distribution of $|E_z|^2$ along the x axis for radially polarized and quasi-radially polarized beams

图 8 准角向偏振光焦平面上的聚焦场分布

(a) $|E_x|^2$ 的分布; (b) $|E_y|^2$ 的分布; (c) $|E_z|^2$ 的分布Fig. 8 Normalized intensity distribution at focal plane for a quasi-angulally polarized beam. (a) $|E_x|^2$ distribution; (b) $|E_y|^2$ distribution; (c) $|E_z|^2$ distribution

$|E_x|^2$, $|E_y|^2$ 分量的分布与准径向偏振光的 $|E_y|^2$, $|E_x|^2$ 分量相似,根据偏振方向及复振幅的分布,可以近似合成中空的角向分量 $|E_\phi|^2$ 。若晶

体旋转不同的角度,可以形成偏转角不同的准轴对称偏振光束。说明我们提出的方法可作为产生偏转角可调的轴对称偏振光的一种简单方法。

5 结论

提出了一种产生矢量偏振光束的方法,把石英晶体分割成具有相同圆心角的扇形区域,晶体的光轴平行于晶体的厚度方向,每个扇区的厚度梯度增加,根据旋光效应的性质可知,入射的准直平面线偏振光经过扇区后产生一定的偏振旋转,这样就形成了偏振空间分布不同的矢量偏振光。保持入射的偏振方向不变,沿着晶体的对称轴旋转到不同的位置,能够得到偏振方向各异的矢量偏振光。在此基础上又进一步研究了这种光束的高数值孔径聚焦性质,发现当入射平面线偏振光的振动方向调整到一定角度时,可以产生准径向偏振光,且其高数值孔径聚焦性质和理想径向偏振光的性质极其相似,基本可以满足实际的应用需要,另外旋转晶体 $\pi/2$,可以产生准角向偏振光,其在高数值孔径聚焦场焦点附近产生了中空的强度分布。当晶体旋转到其他位置时,可以产生偏转角不同的准轴对称偏振光,说明利用我们提出的方法产生的矢量偏振光束,可以替代目前具有应用前景的轴对称偏振光束,使实验装置简化。

参 考 文 献

- 1 K. S. Youngworth, T. G. Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical vector beams[J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(2):77~87
 - 2 R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(23):233901
 - 3 Hao Chen, Qiwen Zhan, Yanli Zhang *et al.*. The Gouy phase shift of the highly focused radially polarized beam[J]. *Phys. Lett. A*, 2007, **371**(3):259~261
 - 4 Wu Guohua, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Focal shift in focused radially polarized ultrashort pulsed laser beams[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(25):6251~6255
 - 5 Chen Weibin, Zhan Qiwen. Optimal plasmonic focusing with radial polarization[C]. *SPIE*, 2007, **6450**: 64500D
 - 6 Hikaru Kawachi, Yuichi Kozawa, Shunichi *et al.*. Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-waveplate[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4):399~401
 - 7 Hao Bing, James Leger. Numerical aperture invariant focus shaping using spirally polarized beams[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**:1924~1928
 - 8 Zhao Daomu, Zhu Jiugao, Wang Shaomin. Comparing of propagation characteristics between the linearly polarized Bessel-Gauss beam and the azimuthally polarized Bessel-Gauss beam[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(1):55~58
- 赵道木,朱九皋,王绍民. 线性偏振和方位偏振 Bessel-Gauss

- 光束的传输特性比较[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(1):55~58
- 9 S. Quabis, R. Dorn, G. Leuchs. Generation of a radially polarized doughnut mode of high quality[J]. *Appl. Phys. B.*, 2005, **81**:597~600
 - 10 Djenan Ganic, Xiaosong Gan, Min Gu. Generation of doughnut laser beams by use of a liquid-crystal cell with a conversion efficiency near 100%[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(15):1351~1353
 - 11 A. V. Nesterov, V. G. Niziev, V. P. Yakunin. Generation of high-power radially polarized beam[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1999, **32**:2871~2875
 - 12 Godai Miyaji, Noriaki Miyanaga, Koji Tsubakimoto *et al.*. Intense longitudinal electric fields generated from transverse electromagnetic waves[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(19):3855~3857
 - 13 Liu Cheng, Yan Changchun, Gao Shumei. Detection-angle and polarization dependences of the interferometric imaging with near-field scanning microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):425~429
 - 刘 诚, 阎长春, 高淑梅. 近场显微干涉成像中的探测角度和偏振问题研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):425~429
 - 14 Qiwen Zhan, James R. Leger. Microellipsometer with radial symmetry[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22):4630~4637
 - 15 D. P. Biss, T. G. Brown. Cylindrical vector beam focusing through a dielectric interface[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(10):490~497
 - 16 Yiqiong Zhao, Qiwen Zhan, Yanli Zhang. Creation of a three-dimensional optical chain for controllable particle delivery[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(8):848~850
 - 17 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):1253~1256
 - 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
 - 18 Yiqiong Zhao, Qiwen Zhan, Yongping Li. Design of DOE for beam shaping with highly NA focused cylindrical vector beam [C]. *SPIE*, 2005, **5636**:56~65
 - 19 Zhang Zhiming, Pu Jixiong, Wang Xiqing. Focusing of cylindrical polarized Bessel-Gaussian beams through a high numerical-aperture lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):401~405
 - 张志明, 蒲继雄, 王喜庆. 圆柱偏振贝塞尔-高斯光束经高数值孔径透镜的聚焦[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):401~405
 - 20 Qiwen Zhan. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15):3377~3382
 - 21 Wang Sha, Liu Chong, Chen Jun *et al.*. Influence of resonator structure of solid-state laser on thermal focal length measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1431~1435
 - 汪 莎, 刘 崇, 陈 军 等. 固体激光器腔型结构对热透镜焦距测量的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1431~1435
 - 22 Feng Weiwei, Lin Lihuang, Chen Ligang. Polarized-light interference spectrum of quartz wave plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1044~1048
 - 冯伟伟, 林礼煌, 陈立刚. 石英波片偏光干涉谱的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1044~1048
 - 23 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics [M]. Beijing: Beijing University Press, 2002, Volume2 :215~216
 - 赵凯华, 钟锡华. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002, 下册 215~216
 - 24 I. J. Cooper, C. J. R. Sheppard, M. Roy. The numerical integration of fundamental diffraction integrals for converging polarized spherical waves using a two-dimensional form of Simpon's 1/3 Rule[J]. *J. Mod. Opt.*, 2005, **52**(8):1123~1134