

大数值孔径光子筛偏振特性研究

唐 燕 胡 松 赵立新 朱江平 何 渝

(中国科学院光电技术研究所 微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 根据角谱理论建立不同偏振照明条件下的光子筛矢量衍射模型。在此基础上,对入射光分别为线偏振光、径向偏振光、切向偏振光三种特殊偏振状态下的光子筛聚焦光强分布进行了模拟分析。研究表明,对于大数值孔径光子筛,入射光的偏振特性将对光子筛聚焦光强分布产生巨大影响。线偏振光将使聚焦光斑沿偏振方向拉伸,切向偏振光产生的聚焦光斑具有“中空”结构,而径向偏振光所产生的聚焦光斑呈较为规则的圆形,且其焦深优于线偏照明情况。在激光直写及高分辨成像等光子筛典型应用中采用径向偏振照明将进一步提高系统分辨力。

关键词 衍射;偏振;光子筛;聚焦特性

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1205002

Polarization Property of Photon Sieves with High Numerical Aperture

Tang Yan Hu Song Zhao Lixin Zhu Jiangping He Yu

(State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Vector diffraction model of photon sieves with different polarized illumination is built based on angular spectrum representation. Simulations are carried out to analyze the intensity of photon sieves, focal spot when polarizations of incident planar beams are linear, radial and tangent, respectively. Result shows that the polarization property of incident beams makes huge influence on the focal spot of photon sieves with high numerical aperture. With linearly polarized beams, the focal spot extends in the polarized direction. By using tangent polarization, there is a dark hole in the center of the focal spot. The focal spot of radially polarized beam has a form of a circle and the focus is deeper. In laser lithography systems and imaging systems, resolution power can be improved by using radially polarized beam as the incident beam of photon sieves.

Key words diffraction; polarization; photon sieve; focus property

OCIS codes 050.1940; 050.1970; 050.5080

1 引 言

光子筛作为一种新型衍射光学元件,以大量环带状随机分布的小孔代替传统波带片中的透光亮环。与传统波带片相比,光子筛具有高信噪比、高分辨力等优点,可应用于纳米光刻、超大天文望远镜、高分辨力显微测量和 X 射线光谱学等多个领域。在最新的研究报道中,美国国家航空航天局(NASA)空间飞行中心与美国空军军官学校(USAF)合作,利用光子筛完成了小型太阳观察台的搭建,并进行了相关地面试验,展现了光子筛在太空探测领域的巨大应用前景^[1]。因此光子筛自

2001年由 Kipp 等^[2]提出以来,凭借优秀的性能以及广阔的应用前景,引起了各国研究人员的广泛关注,对其成像理论^[3~5]、设计制作以及应用进行了大量的研究^[6~14]。

目前针对光子筛的研究大多基于标量衍射理论,以单个小孔的标量衍射光场分布为基础,通过相干叠加获得整个光子筛的标量衍射光场分布。然而,随着光子筛应用领域的扩展,为了获得更高的分辨力,光子筛的数值孔径逐步提高,标量衍射理论已无法对光子筛光场分布进行正确描述。尤其是在大数值孔径情况下,入射光的偏振特性将对光子筛的

收稿日期: 2012-06-11; 收到修改稿日期: 2012-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(61076099,60906049)资助课题。

作者简介: 唐 燕(1982—),女,博士,助理研究员,主要从事微电子专用设备关键技术方面的研究。

E-mail: ty0513@163.com

衍射光场分布产生巨大的影响,必须采用矢量衍射理论对不同偏振状态下的光子筛成像特性进行分析。但目前尚未见基于矢量衍射理论的光子筛偏振特性研究的相关报道。

本文从角谱理论出发,建立不同偏振状态下的光子筛矢量衍射模型,并通过计算机模拟对不同偏振照明情况下的光子筛聚焦特性进行分析,为大数值孔径光子筛的偏振优化设计及应用提供理论依据。

2 理论分析

光子筛衍射模型如图 1 所示,入射光为单色平面波,在 $z=0$ 的平面上可以表示为

$$\mathbf{E}(x, y, 0) = E_x(x, y, 0)\mathbf{e}_x + E_y(x, y, 0)\mathbf{e}_y, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ 分别是 x 轴和 y 轴方向上的单位矢量, $E_x(x, y, 0), E_y(x, y, 0)$ 取不同值代表了不同的偏

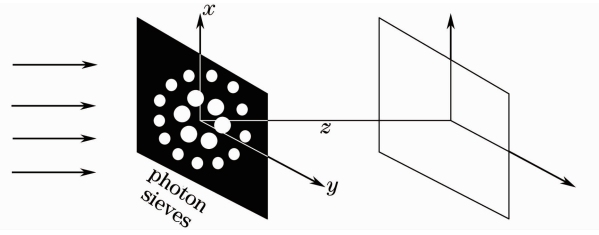


图 1 光子筛衍射模型

Fig. 1 Diffraction model of photon sieves
振状态。

在对光子筛矢量衍射光场分布进行分析的过程中,首先求得单个小孔在不同偏振状态下的矢量衍射光场分布,再对光子筛上每个小孔的光场分布进行相干叠加获得整个光子筛的矢量衍射光场分布。对于单个小孔,由于其直径极小,可以认为在小孔范围内的偏振状态保持不变,且与小孔中心处相同。因此,在 $z=0$ 的平面内,中心为 (x_n, y_n) , 半径为 r_n 的小孔光场分布可以表示为

$$\begin{cases} E_{nx}(x, y, 0) = \begin{cases} E_x(x_n, y_n) & (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 \leq r_n^2 \\ 0 & (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 > r_n^2 \end{cases} \\ E_{ny}(x, y, 0) = \begin{cases} E_y(x_n, y_n) & (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 \leq r_n^2 \\ 0 & (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 > r_n^2 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

根据角谱理论,在 $z>0$ 的空间内,矢量光场分布可以表示为^[15]

$$\begin{cases} E_{nx}(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} A_x(p, q) \exp[ik(px + qy + mz)] dp dq \\ E_{ny}(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} A_y(p, q) \exp[ik(px + qy + mz)] dp dq \\ E_{nz}(x, y, z) = - \iint_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{p}{m} A_x(p, q) + \frac{q}{m} A_y(p, q) \right] \exp[ik(px + qy + mz)] dp dq \end{cases}, \quad (3)$$

$$\text{式中 } m = \begin{cases} \sqrt{1 - p^2 - q^2}, & p^2 + q^2 \leq 1 \\ i\sqrt{p^2 + q^2 - 1} & p^2 + q^2 > 1 \end{cases},$$

$$\begin{cases} A_x(p, q) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint_{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 \leq r_n^2} E_x(x_n, y_n) \exp[-ik(px + qy)] dx dy \\ A_y(p, q) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint_{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 \leq r_n^2} E_y(x_n, y_n) \exp[-ik(px + qy)] dx dy \end{cases}.$$

令 $\begin{cases} x - x_n = x' \\ y - y_n = y' \end{cases}, \begin{cases} x' = r' \cos \alpha \\ y' = r' \sin \alpha \end{cases}, \begin{cases} kp = k_r \cos \beta \\ kq = k_r \sin \beta \end{cases}$, 通过推导可以得到

$$\begin{cases} A_x(p, q) = \frac{1}{2\pi} E_x(x_n, y_n) \exp[-ik(px_n + qy_n)] \frac{r_n}{k_r} J_1(r_n k_r) \\ A_y(p, q) = \frac{1}{2\pi} E_y(x_n, y_n) \exp[-ik(px_n + qy_n)] \frac{r_n}{k_r} J_1(r_n k_r) \end{cases} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式,可以得到小孔矢量衍射光场分布为

$$\begin{cases} E_{nx}(x, y, z) = r_n E_x(x_n, y_n) \int_0^{\infty} \exp(ikmz) J_1(r_n k_r) J_0(r' k_r) dk_r \\ E_{ny}(x, y, z) = r_n E_y(x_n, y_n) \int_0^{\infty} \exp(ikmz) J_1(r_n k_r) J_0(r' k_r) dk_r \\ E_{nz}(x, y, z) = -ir_n [E_x(x_n, y_n) \cos \alpha + E_y(x_n, y_n) \sin \alpha] \int_0^{\infty} \frac{k_r J_1(k_r r') J_1(r_n k_r) \exp(ikmz)}{km} dk_r \end{cases} \quad (5)$$

由(5)式获得单个小孔在不同偏振状态下的矢量衍射光场分布后,通过对光子筛上的所有小孔对应的光场分布进行相干叠加,最终得到光子筛在不同偏振状态下的矢量衍射光场分布

$$\begin{cases} E_x(x, y, z) = \sum_{n=1}^m E_{nx}(x, y, z) \\ E_y(x, y, z) = \sum_{n=1}^m E_{ny}(x, y, z) \\ E_z(x, y, z) = \sum_{n=1}^m E_{nz}(x, y, z) \end{cases} \quad (6)$$

式中 m 为光子筛上小孔数量。

由于焦平面与光子筛距离远大于波长^[16],将光子筛总光强分布近似为不同方向矢量上的振幅平方之和:

$$I = |E_x(x, y, z)|^2 + |E_y(x, y, z)|^2 + |E_z(x, y, z)|^2. \quad (7)$$

3 模拟分析

由(5)~(7)式可以获得任意偏振照明下的光子

筛光强分布,下面分别就线偏振光、径向偏振光、切向偏振光三种特殊偏振照明状态下的大数值孔径光子筛聚焦光强分布情况进行模拟分析。模拟过程中,光子筛入射波长 365 nm,焦距 $f=0.1$ mm,数值孔径 0.935,第 n 个环带上的小孔中心位置为 $\omega_n^2 = 2nf\lambda + n^2\lambda^2$,小孔直径为 $d_n = 1.5f\lambda/2\omega_n$,小孔数量为 $0.5 \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\alpha \frac{n}{N/2}\right)^2\right] + 1 \right\} \times \frac{2\pi\tau\omega_1 d_1}{d_n^2}$,其中 $\alpha = 2.5$, N 为光子筛总环带数, ω_1 、 d_1 分别为第一环小孔中心位置以及直径,每个环带上的小孔均随机分布。

x 方向线偏振照明时, $z=0$ 的平面上,入射光场分布表示为

$$\mathbf{E}(x, y, 0) = 1\mathbf{e}_x + 0\mathbf{e}_y. \quad (8)$$

光子筛在焦平面处 x 方向上的归一化光强分布如图 2(a) 所示, y 方向上的归一化光强分布如图 2(b) 所示。可以看到由于轴向分量 $|E_z|^2$ 的存在,聚焦光斑将沿偏振方向展宽,而在与偏振方向垂直的方向,仅存在 $|E_x|^2$ 分量,光斑尺寸小于偏振方向对应光斑尺寸。

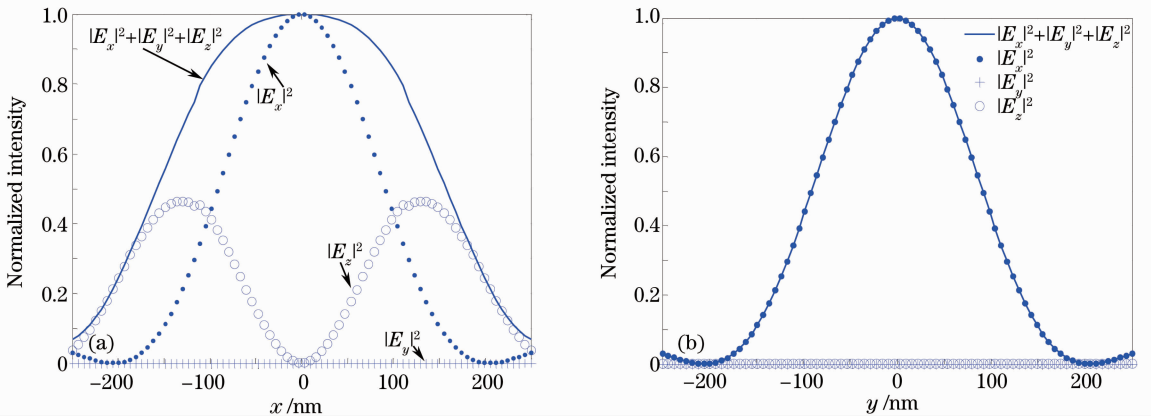


图 2 x 方向偏振情况下光子筛聚焦光斑光强分布。(a) x 方向光强; (b) y 方向光强

Fig. 2 Normalized intensity at the focal plane for linearly polarized beam. (a) x direction; (b) y direction

径向偏振照明时,在 $z=0$ 的平面内,入射光场分布为^[17]

$$\mathbf{E}(x,y,0) = \cos \varphi \mathbf{e}_x + \sin \varphi \mathbf{e}_y. \quad (9)$$

径向偏振光场分布如图 3(a) 所示,由于该偏振状态具有轴对称性,光子筛聚焦光强分布将成轴对称分布。因此,在对其聚焦特性进行分析的过程中,

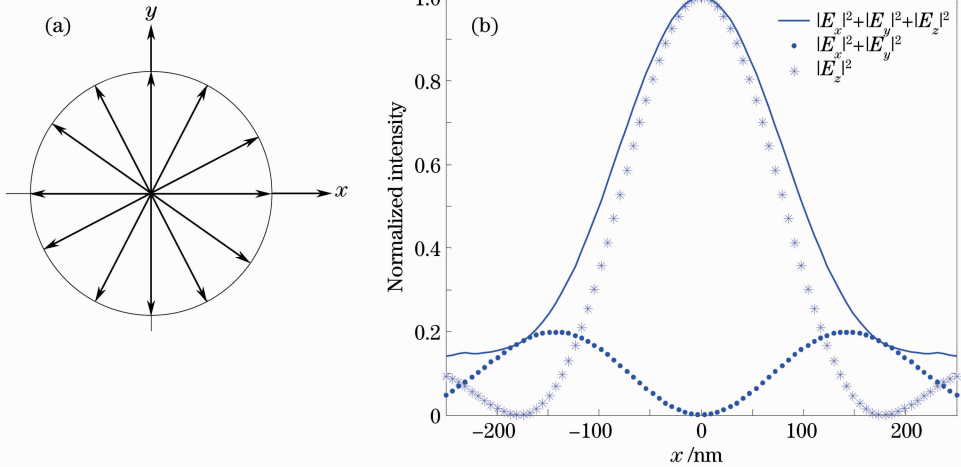


图 3 径向偏振分布及对应的光子筛聚焦光强分布。(a) 径向偏振光场分布; (b) 径向偏振情况下光子筛聚焦光强

Fig. 3 Normalized intensity at the focal plane for radially polarized beam. (a) Radially polarized beam; (b) normalized intensity in radial direction

在切向偏振照明条件下, $z=0$ 平面内入射光场分布为

$$\mathbf{E}(x,y,0) = \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \mathbf{e}_x + \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \mathbf{e}_y. \quad (10)$$

切向偏振光场分布如图 4(a) 所示,该偏振状态同样具有轴对称特性。因此,仅需以某一径向上的光强分布为代表对其聚焦光强分布进行分析。光子筛在焦平面处 x 方向上的光强分布如图 4(b) 所示。可以看到,切向偏振情况下聚焦光场轴向分布

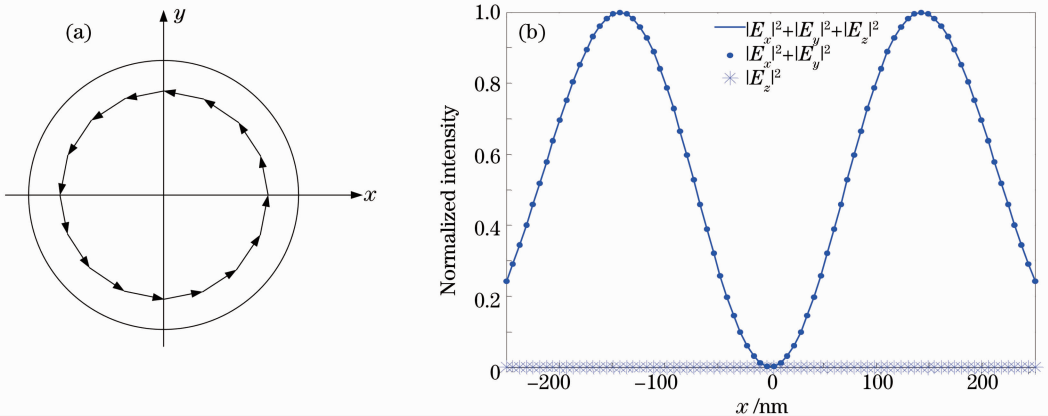


图 4 切向偏振分布及对应的光子筛聚焦光强分布。(a) 切向偏振光场; (b) x 方向上光子筛聚焦光强分布

Fig. 4 Normalized intensity at the focal plane for tangentially polarized beam. (a) Tangentially polarized beam; (b) normalized intensity in x direction

仅需考虑某一径向上的光强分布情况。由(5)、(7)、(9)式获得径向偏振情况下光子筛焦平面处的聚焦光斑在 x 方向上的光强分布,如图 3(b) 所示。可以看到,在径向偏振情况下,轴向分量 $|E_z|^2$ 在大数值孔径光子筛聚焦光强分布中占主要地位,决定了最终的聚焦光强分布。

$|E_z|^2$ 几乎为 0,仅存在径向分量 ($|E_x|^2 + |E_y|^2$)。整个光强分布呈现“中空”状态,在中心处光强为极小值。

为进一步研究不同偏振照明对光子筛聚焦光斑焦深的影响,对光子筛焦面附近轴向上的光强分布进行了模拟分析,如图 5 所示。可以看到,采用径向偏振照明获得的聚焦光斑在轴向上的分布范围大于线偏振光,即径向偏振照明具有较长的焦深,而采用切向照明,由于其光斑为“中空”结构,在轴向上没

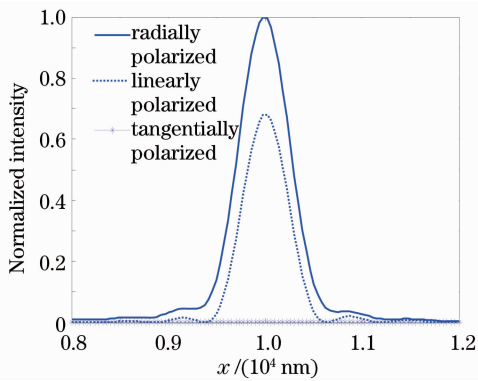


图 5 不同偏振照明下光子筛轴向归一化光强分布
Fig. 5 Normalized intensity at the optical axis with different polarized illuminations

有光强分布。

由分析可知,在大数值孔径情况下,光子筛聚焦光强分布由三个方向矢量上的光强分布 $|E_x|^2$ 、 $|E_y|^2$ 、 $|E_z|^2$ 共同决定,入射光的偏振状态将对光子筛聚焦光强分布产生巨大的影响。通过对比线偏振、径向偏振、切向偏振三种典型偏振照明情况下的光子筛聚焦光斑光强分布可以发现,切向偏振照明产生的聚焦光斑分布为特殊的“中空”结构,而径向偏振照明产生的光斑尺寸介于线偏振照明下不同方向光斑尺寸之间。由于径向偏振照明获得的聚焦光斑呈较为规则的圆形,且焦深较深,相比线偏振照明产生的椭圆聚焦光斑以及切向偏振照明产生的“中空”光斑,更适于在激光直写以及成像系统中使用,以进一步提高系统分辨力。而由切向偏振光所产生的独特的“中空”光强分布,有望在光学捕获等领域取得应用。

4 结 论

从角谱理论出发,建立了光子筛矢量衍射模型,获得了矢量衍射情况下,光子筛光场分布的表达式。在此基础上,对高数值孔径光子筛的偏振特性进行了研究,得到了入射光分别为线偏振、径向偏振和切向偏振情况下的高数值孔径光子筛的聚焦光斑分布。理论计算和模拟分析都表明,对于大数值孔径光子筛,标量衍射理论已无法对其光场分布进行正确的描述,必须采用矢量衍射理论对其光场分布进行分析。而本文获得的基于矢量衍射理论的光子筛光场分布表达式,进一步完善了光子筛理论体系,将为大数值孔径光子筛的优化设计及分析提供依据。

参 考 文 献

- 1 L. Keeseey. Emerging Optics Technology to Fly on Microsatellite [OL]. <http://www.nasa.gov/topics/technology/features/kitchen-optics.html>, June 4, 2012
- 2 L. Kipp, M. Skibowski, R. L. Johnson *et al.*. Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves[J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 184~188
- 3 Qing Cao, Jurgen Jahns. Nonparaxial model for the focusing of high numerical aperture photon sievers[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(6): 1005~1012
- 4 Qing Cao, Jurgen Jahns. Focusing analysis of the pinhole photon sieve; individual far field mode[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(12): 2387~2393
- 5 Jiang Wenbo, Hu Song, Zhao Lixin *et al.*. Design and analysis of amplitude photon sieves based on vector diffraction theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 428~432
蒋文波, 胡松, 赵立新等. 基于矢量衍射理论的振幅型光子筛设计和分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 428~432
- 6 Zhifen Chen, Chinhua Wang, Donglin Pu *et al.*. Ultra large multi region photon sieves[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 16279~16288
- 7 Changqing Xie, Xiaoli Zhu, Hailiang Li *et al.*. Feasibility study of hard-X-ray nanofocusing above 20 keV using compound photon sieves [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(23): 4048~4050
- 8 Geoff Andersen. Large optical photon sieve[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 2976~2978
- 9 Yuchao Zhang, Nan Gao, Changqing Xie. Using circular Damman gratings to produce impulse optic vortex rings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(4): 041107
- 10 Changqing Xie, Xiaoli Zhu, Hailiang Li. Toward two dimensional nanometer resolution hard X-ray differential interference contrast imaging using modified photon sieves[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(5): 749~751
- 11 Hou Changlun, Xu Jianfeng, Bai Jian *et al.*. Binary photon sieve [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 484~486
侯昌伦, 徐建锋, 白剑等. 二元光子筛[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(3): 484~486
- 12 Wenbo Jiang, Song Hu, Lixin Zhao *et al.*. Phase photon sieve [J]. *J. Computational and Theoretical Nanoscience*, 2010, **7**(1): 228~231
- 13 Matthias Kallane, Jens Buck, Sonke Harm *et al.*. Focusing light with a reflection photon sieve[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(13): 2405~2407
- 14 Cheng Guanxiao, Hu Chao. X-ray Zernike apodized photon sieves for phase contrast microscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(8): 080703
程冠晓, 胡超. X射线相衬成像光子筛[J]. *物理学报*, 2011, **60**(8): 080703
- 15 Deng Xiaojie, Zhang Shijie, Hu Jigang *et al.*. Equivalent formula and approximate formulas of the angular spectrum representation [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(1): 7~11
邓小杰, 张士杰, 胡继刚等. 角谱法的等价形式与近似公式[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(1): 7~11
- 16 Kang Xiaoping, Lü Baida. Intensity representation of nonparaxial vectorial Gaussian beams [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(7): 1057~1061
康小平, 吕百达. 非旁轴矢量高斯光束的光强表示[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(7): 1057~1061
- 17 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): 129~134
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特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 129~134