

一种多边形相位波带片的矢量聚焦特性研究

薛振法¹, 朱林伟¹, 史强^{1,2}

(1.鲁东大学 物理与光电工程学院, 山东 烟台 264039; 2.北京魔技纳米科技有限公司, 北京 102208)

摘要: 本文基于矢量瑞利-索末菲衍射理论,对一种多边形相位波带片的聚焦特性进行了研究。提出了一种在4Pi聚焦系统中使用不同的多边形相位波带片和不同的偏振光产生特殊聚焦光斑的方法,设计了由不同多边形同心环带组成的相位波带片(圆形、六边形、八边形的相位波带片),对不同偏振的光(线偏振光、径向偏振光、角向偏振光)入射到所设计的不同形状的多边形相位波带片产生的聚焦光斑进行了数值模拟。通过数值模拟发现这种多边形相位波带片可以改变入射光聚焦光斑的形状,并且聚焦光斑的周围还存在多个焦点旁瓣的情况。进一步研究发现,在4Pi聚焦系统中可以产生“甜甜圈”状、六边空心“螺母”状、“葫芦”状等特殊形状的三维聚焦光斑。本研究结果有助于加强对矢量聚焦光斑的理解,在光学微操控、激光加工、超分辨成像、数据的高密度存储等领域具有潜在的应用价值。

关键词: 矢量光场; 矢量瑞利-索末菲衍射理论; 4Pi 聚焦; 波带片

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2022)01-0062-07

偏振是光的一种重要特性,利用这种特性可以设计出很多光学元件以及光学系统。矢量光场^[1-2]是空间偏振态非均匀分布,且在同一时刻空间各点的电场方向不同的光场。与普通偏振(线偏振、圆偏振)光场相比,矢量光场在聚焦场中具有十分特殊的偏振态分布特征,其空间偏振分布可以自由调控,因而具有极为优越的聚焦特性。径向偏振光场^[3]与角向偏振光场^[4]都属于常见的圆柱对称矢量光场。对径向及角向矢量光场在生成、调控、传输及聚焦等方面的深入研究,可以有效地提高光学系统的性能并拓展其功能。这种具有圆柱偏振对称性的矢量光束,在使用高数值孔径物镜进行聚焦时,会产生很多特殊的聚焦光斑,这些特殊的聚焦光斑在光学成像^[5]、光学微操控^[6]、激光加工^[7]领域都有重要的应用价值。

同时,利用矢量光场结合4Pi聚焦系统^[8-10]和高数值孔径的物镜,还可以得到更小的超分辨聚焦光斑^[11-12]。这种超分辨聚焦光斑可以应用到生命科学领域,解决显微镜分辨率的衍射受限^[13]问题,突破传统白光和激光共聚焦显微镜的光斑尺寸所无法达到的分辨率,并且可以为活细

胞的亚细胞结构、细菌和病毒等样品的观察提供清晰的3D成像效果。但是,近年来人们对矢量光场紧聚焦所产生较小光斑的研究只限定在高数值孔径物镜聚焦的情况下,对平面衍射光学元件的研究较少,比如菲涅耳波带片^[14]也可以产生聚焦光斑。相位型菲涅耳波带片^[15]是衍射光学中的重要元件,其衍射效率高于振幅型菲涅耳波带片,而且在共焦显微镜和高分辨率光刻领域具有很大的优势。然而大多数人们研究的是圆环形对称的波带片,对其它形状的波带片研究较少。本文提出了一种非圆对称的波带片,可以用来操控聚焦光斑的形状,并基于矢量瑞利-索末菲衍射理论^[16-18]在不同偏振光入射条件下对多边形相位波带片的聚焦特性进行研究。

1 多边形相位波带片的设计

作为一种常见的光学元件,波带片可以用于聚焦与成像,根据作用机制可以分为振幅型、相位型以及复振幅型^[19-20]。常见的波带片都是圆环对称分布的,圆形相位波带片的设计公式为

收稿日期: 2021-03-26; 修回日期: 2021-06-08

基金项目: 烟台市科技创新发展计划项目(2020XDRH095)

第一作者简介: 薛振法(1995—),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为光学。E-mail: 1577844403@qq.com

通信作者简介: 朱林伟(1983—),男,山东淄博人,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为光学。E-mail: lwzhu@ldu.edu.cn

$$l_m = \sqrt{(2m + 1) \lambda f + \frac{[(2m + 1) \lambda]^2}{4}}, \quad (1)$$

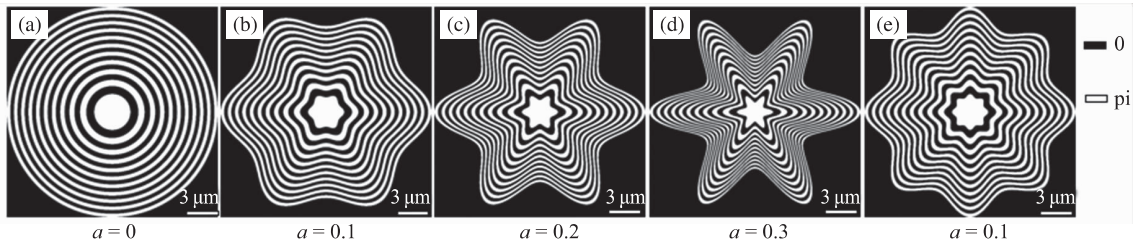
式中: l_m 为圆形相位波带片的半径 m 表示环带个数; λ 表示入射光波长; f 表示波带片的焦距。

本文研究设计了由多个多边形环带组成的多边形相位波带片, 其设计公式为

$$l = l_m [1 - a \cos(N_p \theta)], \quad (2)$$

式中: l 为波带片的半径; a 表示多边形波带片的深度, 且 $0 \leq a < 1$ $a=0$ 时为圆形相位波带片; N_p

为多边形波带片边数; θ 表示方位角。图 1 为根据式 (1)、(2) 设计的各种相位波带片, 环带个数为 10, 焦距为 $5 \mu\text{m}$ 。图 1(a) 为 $a=0$ 时的圆形相位波带片, 即常规的非涅耳波带片, 光束经过时可以产生聚焦光斑; 图 1(b) ~ (e) 为不同参数下的多边形相位波带片。通过图 1 可以看出 $a \neq 0$ 时波带片为多边形相位波带片, 随着 a 的增大多边形波带片的深度会越来越大, 随着 N_p 的增大波带片的边数会越来越多。



(a) 圆形相位波带片; (b) ~ (d) a 取不同值时的六边形相位波带片; (e) 八边形相位波带片。

图 1 相位波带片

Fig.1 Phase zone plate

2 理论计算

2.1 矢量瑞利-索末菲衍射理论

由于本文中所涉及的多边形相位波带片具有多个环带数目, 衍射距离较小, 波带片的环带之间的间距小于入射波波长, 因此为了对高数值孔径多边形波带片的聚焦特性进行研究, 在数值模拟过程中使用了矢量瑞利-索末菲理论 (VRS) 计算其衍射场^[21-22] 的分布。瑞利-索末菲矢量计算方法可以显著减少计算量, 可以为具有完全偏振

控制的平面结构的聚集特性进行计算分析。

这种多边形相位波带片的透射率^[23] 可以表示为

$$T(r, \varphi) = \exp\left\{-i\pi \frac{[r - a \cos(N_p \varphi)]^2}{\lambda f}\right\}. \quad (3)$$

式中: (r, φ) 为波带片平面上的极坐标, r 为 $z=0$ 平面上的位置矢量, φ 表示极坐标系中的方位角。在近场条件下, 基于相位波带片的透过率函数的聚焦光场分布由矢量瑞利-索末菲积分公式计算得出。在圆柱坐标系下, 矢量瑞利-索末菲积分的衍射场可表示为

$$E_r(\rho, \theta, z) = -\frac{1}{2\pi} \iint_{R^2} T(r, \varphi) [E_r(r, \varphi, 0) \cos(\varphi - \theta)] \times \left(ikn - \frac{1}{R}\right) \left[\frac{z}{R^2} \exp(iknR)\right] r dr d\varphi, \quad (4)$$

$$E_\varphi(\rho, \theta, z) = -\frac{1}{2\pi} \iint_{R^2} T(r, \varphi) [E_\varphi(r, \varphi, 0) \cos(\varphi - \theta)] \times \left(ikn - \frac{1}{R}\right) \left[\frac{z}{R^2} \exp(iknR)\right] r dr d\varphi, \quad (5)$$

$$E_z(\rho, \theta, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_{R^2} T(r, \varphi) E_r(r, \varphi, 0) [r - \rho \cos(\varphi - \theta)] \times \left(ikn - \frac{1}{R}\right) \left[\frac{z}{R^2} \exp(iknR)\right] r dr d\varphi, \quad (6)$$

式中: ρ, θ, z 分别为聚焦场的柱坐标系中的位置矢量、方位角、 z 分量; $R^2 = z^2 + (x - \mu)^2 + (y - v)^2$; $(x, y, 0)$ 和 (μ, v, z) 分别表示入射面和观察面; n 是介质的折射率; $k = 2\pi/\lambda$ 表示真空中波数; $E_r(r, \varphi, 0)$ 和 $E_\varphi(r, \varphi, 0)$ 分别表示极坐标系中径向和角向的电场分量, x 线偏振光入射时,

$E_r(r, \varphi, 0) = \cos \varphi$, $E_\varphi(r, \varphi, 0) = -\sin \varphi$; 角向偏振光入射时 $E_r(r, \varphi, 0) = 0$, $E_\varphi(r, \varphi, 0) = 1$; 径向偏振光入射时 $E_r(r, \varphi, 0) = 1$, $E_\varphi(r, \varphi, 0) = 0$ 。

2.2 4Pi 聚焦系统

如图 2 所示, 4Pi 聚焦系统是由两个完全相

同的在焦点两侧呈对称分布的透镜或者平面波带片组成,光束从两个透镜侧面相向入射且焦点重合。这两束光会产生相干作用,并且入射光的偏振状态及其相位振幅的变化会对焦斑的结构产生影响。这种聚焦方式可以显著提高聚焦光斑的分辨率,同时大大增加 x 方向与 y 方向的梯度力,可以在光镊系统中增强对微粒、生物细胞等微结构捕获以及操控的稳定性^[24]。通过调整选择不同的光学参量,可以使得焦斑形状呈现三维球形结

构,因此 4Pi 聚焦系统比传统的单透镜聚焦系统产生的光斑具有更大的优越性。在 4Pi 聚焦系统中,光束在其焦点位置处的电场表达式为

$$\mathbf{E}(\boldsymbol{\rho}, \theta, z) = \mathbf{E}_1(\boldsymbol{\rho}, \theta, z) + \mathbf{E}_2(\boldsymbol{\rho}, \theta, -z), \quad (7)$$

式中: $\mathbf{E}_1(\boldsymbol{\rho}, \theta, z) = E_{1r}\mathbf{e}_r + E_{1\varphi}\mathbf{e}_\varphi + E_{1z}\mathbf{e}_z$, $\mathbf{E}_2(\boldsymbol{\rho}, \theta, -z) = E_{2r}\mathbf{e}_r + E_{2\varphi}\mathbf{e}_\varphi + E_{2(-z)}\mathbf{e}_{-z}$ 分别表示左右两束光经相位波带片聚焦后在焦点位置处产生的电场。

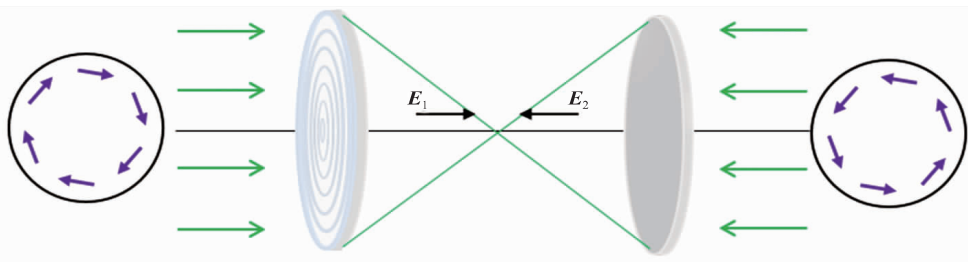


图 2 4Pi 聚焦系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of 4Pi focusing system

3 数值模拟结果与讨论

3.1 多边形相位波带片的聚焦特性

图 3 为利用图 1(a) 中所设计的圆形相位波带片进行仿真模拟的结果,模拟的聚焦面就是设计的波带片的聚焦位置($f = 5 \mu\text{m}$)。图 3(a) 入射

光源为 x 线偏振光,生成了椭圆形聚焦光斑,表明这种波带片具有紧聚焦特性, x 方向的偏振分量占优势。图 3(b) 入射光源为径向偏振光,聚焦光斑为圆形聚焦光斑,原因在于径向偏振具有径向柱对称分布特性,每个方向上的偏振分布是均匀的。图 3(c) 入射光源为角向偏振光,聚焦光斑为空心的圆环聚焦光斑,可以用于双光束超分辨显微成像(STED)^[25]。

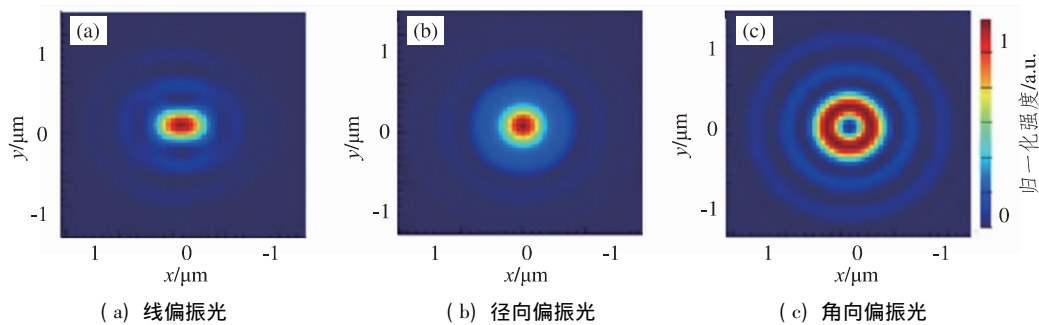


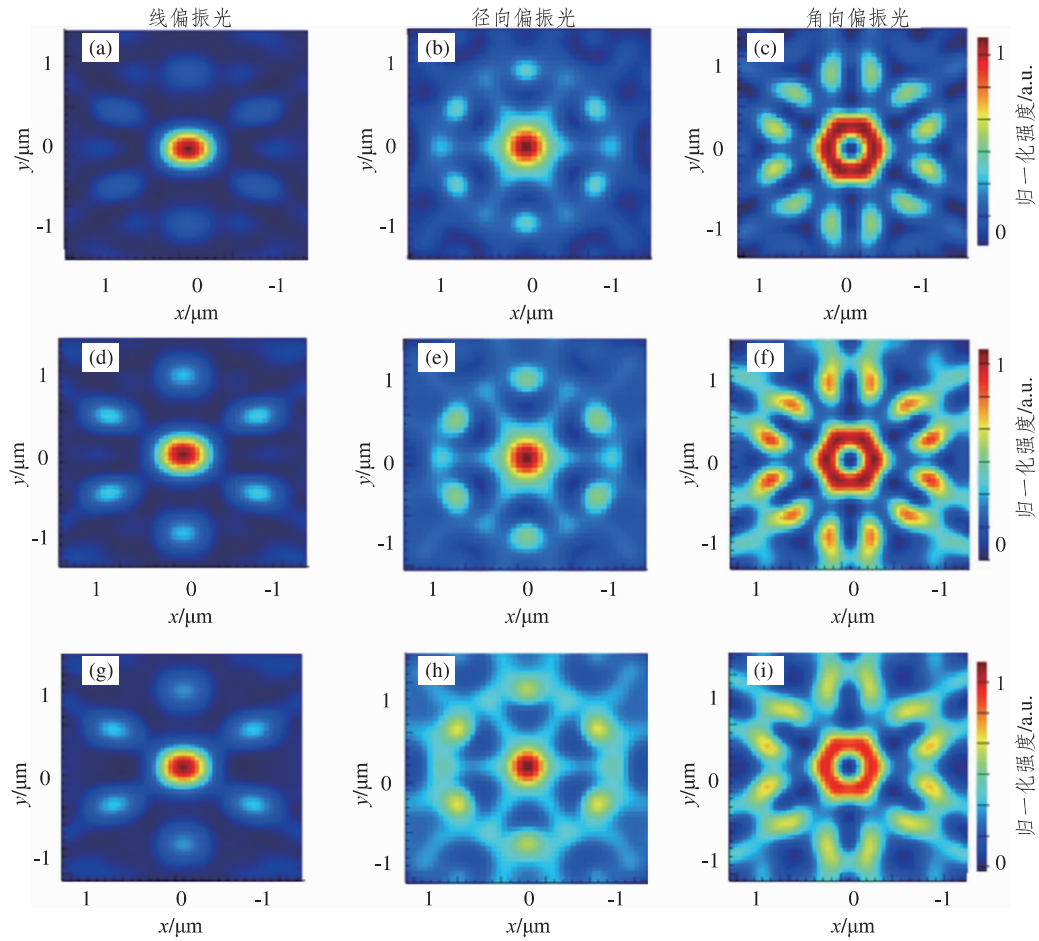
图 3 圆形相位波带片在使用不同光源入射情况下的数值模拟结果

Fig.3 Numerical simulation results of circular phasezone plate with different polarization light

图 4 是利用图 1(b) ~ (d) 中所设计的六边形相位波带片的仿真模拟结果。其中图 4(a)、4(d) 和 4(g) 入射光源为 x 线偏振光,光束聚焦产生了中心 x 方向偏振分量占优势的椭圆形聚焦光斑;图 4(d) 和 4(g) 中还产生了 6 个旁瓣,这种多焦点有望应用于光学捕获及激光加工等领域。图

4(b)、4(e) 和 4(h) 入射光源为径向偏振光,聚焦光斑为六边形,并且光斑周围产生了 6 个旁瓣,旁瓣的个数与多边形相位波带片的边数 N_p 相等;随着多边形波带片深度(a 变大)的增加,中心光斑的光强越来越弱,而旁瓣的光强越来越强。图 4(c)、4(f) 和 4(i) 入射光源为角向偏振光,聚焦光

斑为空心的六边形环状, 产生了 12 个旁瓣, 比径向偏振光入射时产生的旁瓣数目多了 1 倍。



注: (a) ~ (c) $a=0.1$; (d) ~ (f) $a=0.2$; (g) ~ (i) $a=0.3$ 。

图 4 六边形相位波带片在不同 a 值及使用不同偏振光源入射情况下的数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulation results of hexagonal phasezone plates ($N_p=6$) with different a and different polarization light

图 5 是利用图 1 (e) 中所设计的八边形相位波带片的仿真模拟结果。图 5 (a) 入射光源为 x 线偏振光, 聚焦光斑为椭圆形, 表明八边形相位波带片也具有紧聚焦特性, x 方向的偏振分量仍然占优势。图 5 (b) 入射光源为径向偏振光, 聚焦光

斑为八边形, 产生了 8 个旁瓣, 同样也与八边形相位波带片的边数 N_p 相等。图 5 (c) 入射光源为角向偏振光, 聚焦光斑趋近于空心圆环状, 产生了 16 个旁瓣, 比使用径向偏振光入射时产生的旁瓣数多了 1 倍。

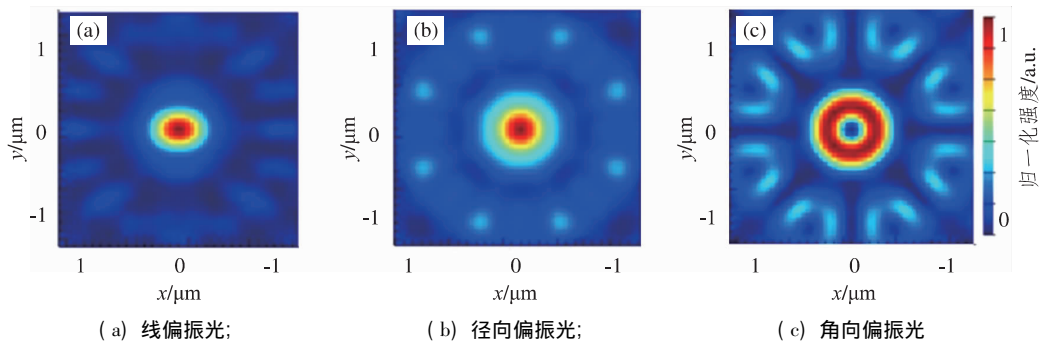


图 5 八边形相位波带片 ($a=0.1, N_p=8$) 在使用不同偏振光源入射情况下的数值模拟结果

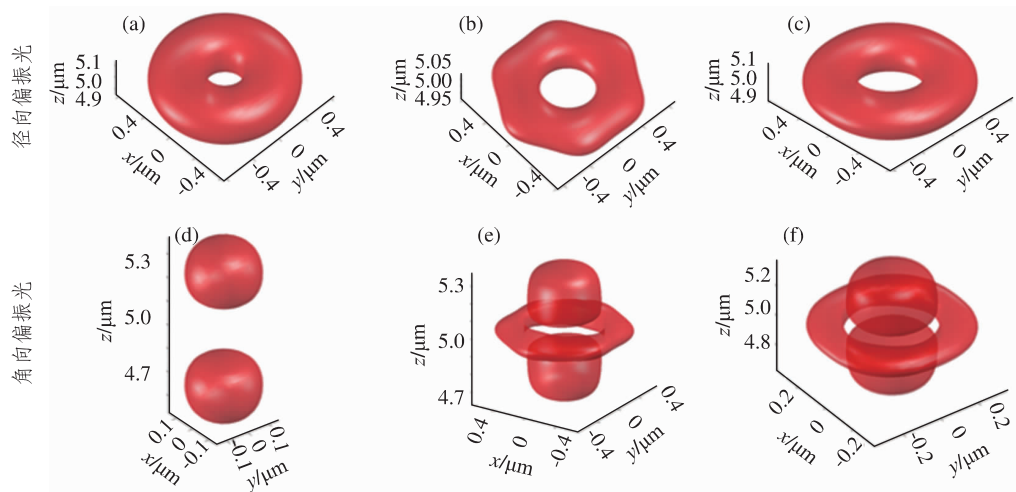
Fig.5 Numerical simulation results of octagonal phasezone plate ($a=0.1, N_p=8$) with different polarization light

图 3~5 的数值模拟过程中都选用了 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 的光源。波带片选用的材料折射率为 $n = 1.4$ 。从模拟结果可以看出: x 线偏振光入射到圆形或多边形相位波带片中, 聚焦光斑为椭圆形; 当径向偏振光入射到多边形相位波带片时, 可以产生多边形的聚焦光斑, 旁瓣的个数与多边形相位波带片的边数相等; 当角向偏振光入射到多边形相位波带片时, 可以产生空心的多边形的聚焦光斑, 波带片边数 $N_p > 8$ 时聚焦光斑会更加趋近于空心圆环状, 旁瓣的个数为多边形相位波带片边数的两倍。通过对不同的偏振光和多边形相位波带片进行调制, 可以调控光斑的形状, 本研究结果可以应用于光学捕获、激光加工、超分辨率成像等领域。

3.2 多边形相位波带片在 4Pi 共聚焦系统的模拟结果

在单光束入射到多边形相位波带片的模拟基础上, 进一步研究了多边形相位波带片在 4Pi 聚焦系统中的聚焦特性, 并得出了一些特殊的三维

聚焦光斑。图 6 是相同偏振光入射情况下的数值模拟结果, 采用聚焦光斑的三维等强度面表示。图 6(a) 为两束角向偏振光入射到两个圆形相位波带片的模拟结果, 得到了“甜甜圈”状的聚焦光斑; 图 6(b) 为两束径向偏振光入射到两个圆形相位波带片的模拟结果, 产生了上下两个点光斑; 图 6(c) 为两束角向偏振光入射到两个六边形多边形相位波带片 ($a = 0.1$) 的模拟结果, 得到的是“螺母”状的聚焦光斑; 图 6(d) 为两束径向偏振光入射到两个六边形相位波带片 ($a = 0.1$) 的模拟结果, 为两个点光斑与“螺母”状光斑的组合; 图 6(e) 为两束角向偏振光入射到两个八边形相位波带片 ($a = 0.1$) 的模拟结果, 也是“甜甜圈”状的聚焦光斑; 图 6(f) 为两束径向偏振光入射到两个八边形相位波带片 ($a = 0.1$) 的模拟结果, 为两个点光斑与“甜甜圈”状光斑的组合。从这些模拟结果可以看出, 径向偏振光入射到多边形相位波带片中会产生空心的不同形状的聚焦光斑, 角向偏振光入射情况下会产生两个纵向的聚焦光斑。



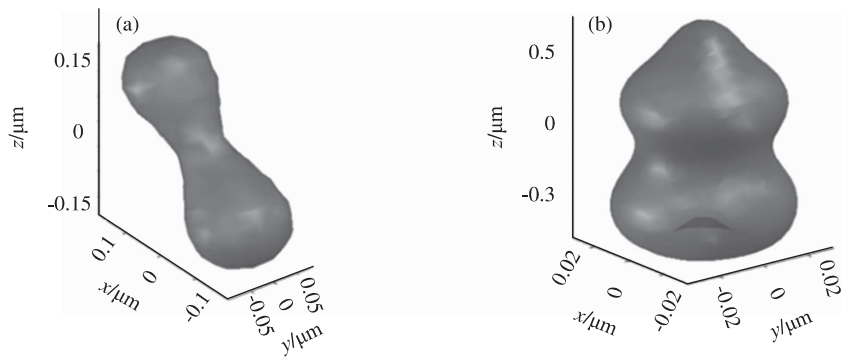
注: (a)、(d) 圆形相位波带片; (b)、(e) 六边形相位波带片 ($a = 0.1, N_p = 6$); (c)、(f) 八边形相位波带片 ($a = 0.1, N_p = 8$)。

图 6 4Pi 聚焦系统中使用相同光源的模拟结果

Fig.6 Simulation results using the same polarization light in the 4Pi focusing system

在对 4Pi 聚焦系统中相同偏振光入射情况下进行研究之后, 进一步对 4Pi 聚焦系统中不同偏振光入射的情况进行了模拟, 结果见图 7。图 7(a) 为两个圆形相位波带片在分别为径向偏振光和线偏振光入射的 4Pi 聚焦系统中的模拟结果, 得到的是“哑铃”状的聚焦光斑; 图 7(b) 为两个圆形相位波带片在分别为径向偏振光和角向偏振

光入射的 4Pi 聚焦系统中的模拟结果, 得到的是“葫芦”状的聚焦光斑。通过对 4Pi 聚焦系统所得到的这些特殊聚焦光斑的研究, 本文给出了一种三维聚焦光斑操控的方法, 拓展了人们对三维聚焦光斑形状的认知范围, 此研究发现有望应用于光学微操控、激光加工、数据存储、超分辨率成像等领域。



(a) 径向和线偏振光入射到圆形相位波带片的结果 (b) 径向和角向偏振光入射到圆形相位波带片的结果

图 7 4Pi 聚焦系统中使用不同偏振光源的模拟结果

Fig.7 Simulation results of a 4Pi focusing system using different polarization light

4 结论

本文设计了一种多边形相位波带片,基于矢量瑞利-索末菲衍射理论,通过不同的偏振光对多边形相位波带片的聚焦特性进行了研究与讨论。 x 线偏振光入射到多边形相位波带片产生了椭圆形聚焦光斑,表明这种波带片具有紧聚焦特性。 x 方向的偏振分量占优势。径向偏振光入射的条件下,产生了多边形的聚焦光斑以及与多边形边数相等的旁瓣。角向偏振光入射的条件下,产生了空心的多边形的聚焦光斑以及两倍于多边形边数的旁瓣。在 4Pi 聚焦系统中模拟了这种多边形相位波带片的聚焦特性,通过数值模拟得出了“甜甜圈”状、六边空心“螺母”状、“哑铃”状、“葫芦”状等一些特殊的焦斑形状。本研究给出了一种三维聚焦光斑操控的方法,研究结果在光学微操控、激光微纳加工、光学数据存储、超分辨率显微成像等领域具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] MUSHIAKE Y, MATSUMURA K, NAKAJIMA N. Generation of radially polarized optical beam mode by laser oscillation [J]. Proceedings of the IEEE, 1972, 60(9): 1107-1109.
- [2] TIDWELL S C, FORD D H, KIMURA W D. Generating radially polarized beams interferometrically [J]. Applied Optics, 1990, 29(15): 2234-2239.
- [3] 孙文超, 衣文军, 张远达, 等. 飞秒径向偏振光紧聚焦实验 [J]. 光子学报, 2015, 44(4): 48-53.
- [4] 刘绩林, 陈子阳, 张磊, 等. 角向偏振无衍射光束的传输特性及其偏振态研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(6): 64201.
- [5] 王思聪, 李向平. 紧聚焦轴对称矢量光场波前调控及应用 [J]. 中国光学, 2016, 9(2): 185-202.
- [6] LIN H, JIA B H, GU M. Generation of an axially super-resolved quasi-spherical focal spot using an amplitude-modulated radially polarized beam [J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2471-2473.
- [7] CHEN R P, CHEN Z, GAO Y, et al. Flexible manipulation of the polarization conversions in a structured vector field in free space [J]. Laser & Photonics Review, 2017, 11(6): 1700165.
- [8] VENKATAKRISHNAN K, TAN B. Interconnect microvia drilling with a radially polarized laser beam [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2006, 16(12): 2603-2607.
- [9] LAN T H, TIEN C H. Servo study of radially polarized beam in high numerical aperture optical data storage system [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(6B): 3758-3760.
- [10] 李宝军, 辛洪宝, 张堯, 等. 光捕获和光操控研究进展 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 232-241.
- [11] HELL S, STELZER E. Properties of a 4Pi confocal fluorescence microscope [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(12): 2159-2166.
- [12] BAHLMANN K, HELL S W. Polarization effects in 4Pi confocal microscopy studied with water-immersion lenses [J]. Applied Optics, 2000, 39(10): 1652-1658.
- [13] CHEN G, WEN Z Q, QIU C W. Superoscillation: from physics to optical applications [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 56-61.
- [14] YE H, QIU C W, HUANG K, et al. Creation of a longitudinally polarized subwavelength hotspot with an ultra-thin planar lens: Vectorial Rayleigh-Sommerfeld method [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(6): 065004.
- [15] MOTE R G, YU S F, ZHOU W, et al. Subwavelength fo-

- cusing behavior of high numerical-aperture phase Fresnel zone plates under various polarization states [J]. *Applied Physics Letters* ,2009 ,95(19) : 2657.
- [16] 李晶, 吴鹏, 杨正, 等. 基于瑞利-索末菲衍射理论的近场大衍射角衍射光学元件的设计 [J]. *光子学报* , 2017(11) : 188-194.
- [17] PANG H ,YIN S Y ,DENG Q L ,et al. A novel method for the design of diffractive optical elements based on the Rayleigh - Sommerfeld integral [J]. *Optics & Lasers in Engineering* ,2015 ,70(7) : 38-44.
- [18] ARASH S ,MARIAN G. Petal-like zone plate: long depth bifocal diffractive lens and star-like beam generator [J]. *Journal of the Optical Society of America A* , 2018 ,35(7) : 1243-1251.
- [19] ZHANG Y J ,AN H C ,ZHANG D ,et al. Diffraction theory of high numerical aperture subwavelength circular binary phase Fresnel zone plate [J]. *Optics Express* , 2014 ,22(22) : 27425-27436.
- [20] FU Y Q ,ZHOU W ,NG LIM L E. Near-field behavior of zone-plate-like plasmonic nanostructures [J]. *Journal of the Optical Society of America A* ,2008 ,25(1) : 238-249.
- [21] ZHAN Q W. Trapping metallic rayleigh particles with radial polarization [J]. *Optics Express* ,2004 ,12(15) : 3377-3382.
- [22] TIDWELL S C ,FORD D H ,KIMURA W D. Generating radially polarized beams interferometrically [J]. *Applied Optics* ,1990 ,29(15) : 2234-2239.
- [23] GEDNEY S D. An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation* , 1996 ,44(12) : 1630-1963
- [24] BERENGER J P. Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation* ,1996 , 44(1) : 110-117.
- [25] WILLIG K I ,HARKE B ,MEDDA R ,et al. STED microscopy with continuous wave beams [J]. *Nature Methods* ,2007 ,4(11) : 915-918.

Focusing Characteristics of a Polygonal Phase Zone Plate

XUE Zhenfa¹ , ZHU Linwei¹ , SHI Qiang^{1,2}

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering ,Ludong University ,Yantai 264039 ,China;

2. Beijing Magie Nano-Technology Co., Ltd., Beijing 102208 ,China)

Abstract: Based on Vector Rayleigh-Sommerfeld diffraction theory ,the focusing properties of polygon phase zone plates was studied. A method to generate special focusing spot by using different polygonal phase zone plates and different polarized light in a 4Pi focusing system was proposed. The phase zone plates (circular ,hexagonal ,octagonal) composed of different polygonal concentric annulus were designed ,and the focal spots generated by different polarized light (linearly polarized beam ,radial polarized beam ,azimuthally polarized beam) were simulated in the different phase zone plates. The simulation results show that the polygonal phase zone plate can control the shape of the focal spot ,and multiple focal side lobes were also found around the focal spot. In addition ,special three-dimensional focal spots ,such as donut shape ,hexagonal hollow shape and gourd shape ,can also be generated in the 4pi focusing system. These results are helpful for the clearer and deeper understanding of vector focal spot and potential application in the filed of optical micromanipulation ,laser processing ,super-resolution imaging and high-density data storage.

Keywords: vector light field; Vector Rayleigh-Sommerfeld diffraction theory; 4Pi focusing system; zone plate

(责任编辑 李秀芳)