

# 亚波长光栅负折射透镜的柱矢量光束聚焦特性

刘山峰, 袁沐娟, 孙钰淇, 杨茜, 刘扬眉, 刘宁, 陆云清, 许吉\*

南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 研究亚波长负折射光栅透镜的柱矢量光束聚焦效应, 探索并分析光栅的材料、几何参数等对聚焦效果的影响。亚波长光栅的 $-1$ 级衍射效应可实现等效负折射现象, 结合等光程原理可设计出聚焦平凹镜。利用柱对称坐标系下的有限元算法, 分析不同材料折射率、不同等效负折射率、不同预设焦距对实际聚焦效果的影响。结果表明: 材料折射率能影响聚焦场的能量效率; 等效负折射率为 $-1$ 时, 焦点尺寸最小; 预设焦距越小, 焦点尺寸越小。聚焦场中纵向电场的比例是影响聚焦场横向尺寸的决定性因素。因此, 合理设定光栅负折射率、材料折射率, 优化负折射光栅平凹镜设计, 能够获得优化的聚焦效果。本工作为柱矢量光束聚焦场调控及相关领域的微纳结构设计提供了参考。

**关键词** 光栅; 亚波长结构; 透镜; 柱矢量光束; 负折射; 聚焦

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1105001

## Focusing Properties of Cylindrical Vector Beams Through Subwavelength Grating Lenses with Negative Refractive Indices

Liu Shanfeng, Yuan Shujuan, Sun Yuqi, Yang Qian, Liu Yangmei,

Liu Ning, Lu Yunqing, Xu Ji\*

*College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,*

*Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China*

**Abstract** In this study, we analyze the focusing properties of the cylindrical vector beams through a subwavelength grating lens with a negative refractive index and the effects of grating material and geometric parameters on the focusing properties. Here, the equivalent negative refraction can be attributed to the subwavelength grating's diffraction order of  $-1$ , and the focusing plane-concave lens can be designed using the equivalent optical path method. Further, we use the finite element method in a cylindrical-symmetric coordinate system to simulate and analyze the effects of different material refractive indices, equivalent negative refractive indices, and predetermined focal lengths on the focusing properties. The results denote that the material refractive index significantly affects the energy efficiency of the focal field, the focus size is minimized by an equivalent negative refractive index of  $-1$ , and the short predetermined focal lengths yield small focus sizes. The proportion of longitudinal electric-field components in the focal field is the main factor that determines its lateral size. Therefore, the optimum focusing effect can be obtained by selecting an appropriate negative refractive index of the grating and a material refractive index and optimizing the design of the plane-concave lens of the negative refractive grating. This study provides a reference for modulating the focal field of cylindrical vector beams and designing micro/nanostructured devices in related fields.

**Key words** gratings; subwavelength structures; lenses; cylindrical vector beams; negative refraction; focus

**OCIS codes** 050.1950; 050.6624; 080.3630

## 1 引 言

柱矢量光束是一种振幅、相位在传播方向横截面上呈柱对称分布的光束, 按其在空间上的偏振分

布特点可将其分为径向偏振光、旋向偏振光和一般柱矢量光束。其中, 若对径向偏振光进行紧聚焦, 在焦点附近可得到较强的纵向偏振光场, 从而使得径向偏振光在高分辨率光学成像<sup>[1]</sup>、数据存储<sup>[2]</sup>、粒子

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-06-24; 录用日期: 2019-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(11404170, 61505083)

\* E-mail: xuji@njupt.edu.cn

捕获<sup>[3-4]</sup>、粒子加速<sup>[5-6]</sup>等方面有广泛的应用。目前实现柱矢量光束聚焦及焦场调控的方式和途径丰富多样,如:利用高数值孔径物镜,通过改变透镜孔径大小,并结合相位、振幅与偏振调制,可突破衍射极限产生亚波长的圆对称光斑<sup>[7-8]</sup>;利用抛物面反射镜聚焦系统,通过反射光线实现聚焦,并能够在近轴条件下获得较好的聚焦效果<sup>[9-10]</sup>;等离激元透镜能够产生突破衍射极限的高质量焦场<sup>[11]</sup>,并能进一步灵活调节焦深及抑制旁瓣<sup>[12]</sup>,有效实现对径向偏振光束的紧聚焦<sup>[13-14]</sup>。这些方法有各自的优势,但也存在不同的局限性。高数值孔径透镜聚焦效果受到孔径大小、相位、振幅的影响,并存在相差;从几何光学角度来讲,抛物面反射式透镜对光线的会聚能力取决于入射光线与主光轴的距离,只有在近轴条件下能够实现较好的聚焦;等离激元透镜因等离激元激发的偏振依赖性,对径向偏振光束有较好的聚焦效果,形成对聚焦光束的偏振态局限性<sup>[15]</sup>。

为使柱矢量光束的径向和旋向偏振光均能实现有亚波长聚焦,本研究组已研究了基于负折射效应的微结构透镜,光子晶体平凹透镜能够实现对径向、旋向和任意柱矢量光束的亚波长紧聚焦<sup>[16]</sup>。然而,光子晶体需要两种以上材料交替排列构成,并且在实现任意柱矢量光束聚焦时,结构设计需要满足横磁和横电偏振具有相同的负折射率。因此,在材料的选取、结构设计和实际制备上均存在一定难度。所幸的是,负折射全介质光栅具有负折射效应,并能够克服这些困难,通过合理选取光栅结构参数获得

负折射率,并灵活设计透镜结构,能够实现对柱矢量光束的聚焦<sup>[17]</sup>。

负折射光栅的介质材料选取、负折射率设定及材料结构参数均会影响柱矢量光束的聚焦效果。研究分析这些参数对焦场调控的影响,利于进一步优化透镜结构,获得更好的焦场调控效果。因此,本文将对影响负折射光栅透镜聚焦效果的因素进行深入探究,包括光栅材料折射率、等效负折射率、结构参数等,分析焦场的焦距、能量效率、焦点的尺寸等受到的影响。

## 2 负折射光栅及聚焦透镜

利用亚波长介质光栅的-1级衍射波,可实现负折射效应<sup>[18-20]</sup>。在光栅周期小于工作波长时,可以获得等效的负折射率,并进一步设计出平凹透镜结构来实现对光束的聚焦<sup>[21-22]</sup>。图1(a)为基于负折射光栅的柱对称聚焦平凹镜的 $r$ - $z$ 剖面结构示意图。波长为 $\lambda_0$ 的光从结构底面垂直入射,到达光栅界面处出射,图1(a)中标记为I的入射光线的入射角为 $\theta_1$ , $\sin \theta_1 = d_{\perp} / d$ ,其中 $d$ 为光栅周期, $d_{\perp}$ 为每个周期的垂直高度。标记为R的折射光线,即-1级衍射波的切向波矢为 $k_T = k \sin \theta_1 - 2\pi / d$ ,其中 $k = n \cdot k_0$ , $n$ 为介质材料折射率, $k_0$ 为真空中波矢大小。折射角为 $\theta_R$ , $\sin \theta_1 = k_T / k_0$ 。设外部材料为空气,空气折射率为 $n_0 = 1$ , $n_0 \cdot \sin \theta_R = \sin \theta_1 \cdot n_{\text{eff}}$ ,则得到<sup>[16]</sup>

$$n_{\text{eff}} = n - \lambda_0 / d_{\perp}, \quad (1)$$

由(1)式可知,当 $d_{\perp}$ 足够小时, $n_{\text{eff}}$ 可以实现负值。

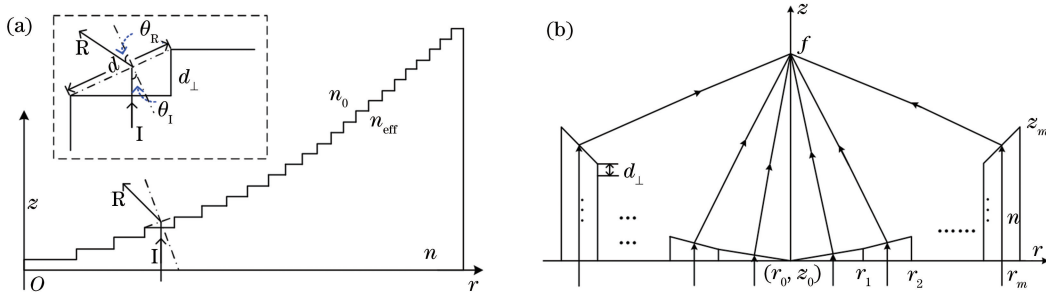


图1 平凹镜结构和聚焦示意图。(a)平凹镜 $r$ - $z$ 剖面图;(b)聚焦过程示意图

Fig. 1 Profile of plane-concave lens and schematic of focusing process. (a) Cross-section of plane-concave lens in  $r$ - $z$  plane; (b) schematic of focusing process

选取恰当的材料折射率和光栅几何参数 $d_{\perp}$ ,获得合适的负折射率,可进一步设计负折射平凹镜结构。图1(b)为聚焦过程示意图,利用费马等光程原理设计柱对称平凹镜的凹面,在 $r$ - $z$ 剖面内,其坐标关系满足

$$n_0^2 r^2 + (n_0^2 - n_{\text{eff}}^2) z^2 - 2n_0 f (1 - n_{\text{eff}}) z = 0, \quad (2)$$

式中: $f$ 为预设焦距,即凹面底部至焦点处的距离; $r$ 为径向坐标; $z$ 为纵向坐标,光栅轮廓构成凹面。因此满足(2)式的 $(r, z)$ 关系为 $r_1 = 0, z_0 = 0, r_1, r_2, r_3, \dots, r_m$ ,可依据 $z_1 = d_{\perp}, z_2 = 2d_{\perp}, z_3 = 3d_{\perp}, \dots, z_m = md_{\perp}$ 求出。其中, $m$ 为负折射光栅平凹镜的光栅台阶数。

利用基于有限元算法 (FEM) 的 COMSOL Multiphysics 软件进行光场聚焦的模拟计算。因透镜结构及入射光束的振幅和偏振均具有柱对称分布特性,所以选择 2D 轴对称坐标系进行建模,将 3D 模型降维到 2D,可降低计算机运算成本及计算时间。当  $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$  时,选取材料折射率  $n = 2.36$ , 设负折射率  $n_{\text{eff}} = -0.9$ , 此时光栅台阶垂直高度  $d_{\perp} = 163.2 \text{ nm}$ , 预设焦距  $f = 8 \mu\text{m}$ , 设计出  $m = 30$  的负折射光栅平凹镜。利用相同的结构设计,只改变入射光束的偏振态,得到了如图 2 所示的结构对径向和旋向偏振光的聚焦效果,表明该平凹镜结构能够同时实现对径向偏振光和旋向偏振光的聚焦,并且具有相同的聚焦效果。在图 2(a)中,径向偏振光束入射时,形成一个实心焦点;图 2(b)中,旋向偏振光入射时,从两侧入射的光束在焦点处沿光轴的纵向分量相互抵消,从而出现中空管状的聚焦效果。下文将进一步讨论介质材料、负折射率、预设焦距等参数对柱矢量光聚焦效果的影响,入射波长固定为

$\lambda_0 = 532 \text{ nm}$ , 入射光选定为径向偏振光。

### 3 材料及结构参数对聚焦特性的影响

介质材料的合理选取是构成负折射光栅的必要条件,也是进一步设计光栅平凹镜的前提。文中所研究的负折射光栅平凹透镜由单一介质材料制成,全介质光栅对选取材料的限制较小,选取 3 种材料折射率值作为数值分析的模型参数,如  $\text{Si}_3\text{N}_4$  为 2,  $\text{Ag}_2\text{S}$  为 2.20,  $\text{ZnS}$  为 2.36, 材料折射率的不同选取,会影响光栅负折射率及平凹镜结构参数之间的关系,进而影响聚焦效果。当设定光栅等效负折射率  $n_{\text{eff}} = -0.9$ , 选择介质材料折射率为  $n = 2, 2.20, 2.36$  时,计算出实现该负折射率的  $d_{\perp} = 183.4, 171.6, 163.2 \text{ nm}$ 。设定  $m = 30$ , 预设焦距为  $f = 8 \mu\text{m}$ , 根据 (2) 式设计出 3 个平凹镜结构。保持入射光一致,沿轴向和横向(径向)的场强分布如图 3(a)和(b)所示,  $n = 2$  时具有最小的峰值强度,因此将对强度峰值进行归一化。

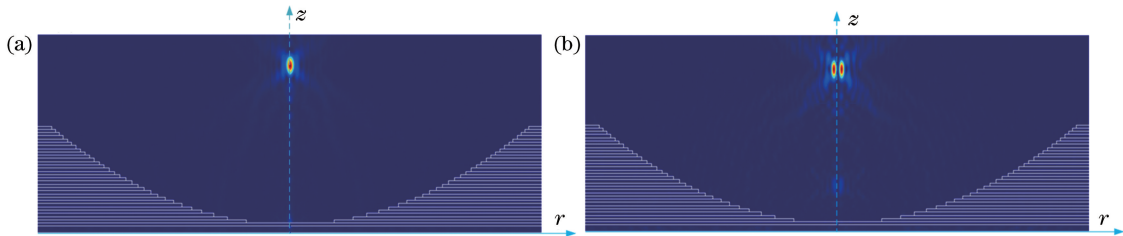


图 2 预设焦距为  $f = 8 \mu\text{m}$  的聚焦场分布。(a)径向偏振入射;(b)旋向偏振入射

Fig. 2 Intensity distributions of focal field with predetermined  $f = 8 \mu\text{m}$ . (a) Radial polarization incidence; (b) azimuthal polarization incidence

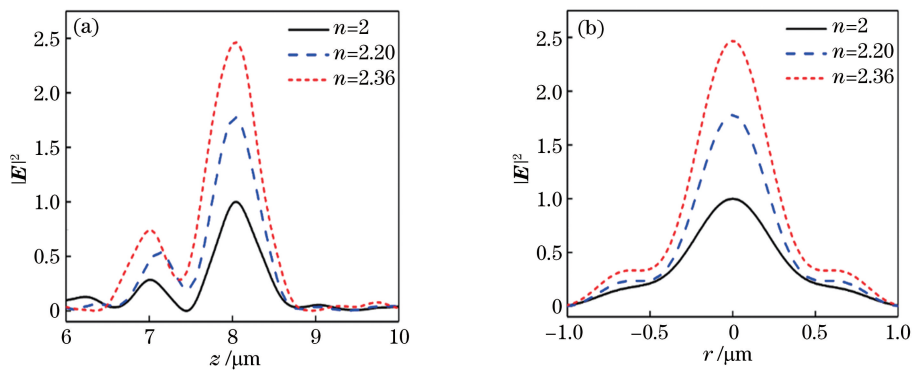


图 3 预设焦距  $f = 8 \mu\text{m}$ , 材料折射率  $n = 2, 2.20, 2.36$  的聚焦场。(a)沿轴向的场强分布;(b)沿横向(径向)的场强分布  
Fig. 3 Intensity distributions of focal field with predetermined  $f = 8 \mu\text{m}$  and different refractive indices of  $n = 2, 2.20$ , and  $2.36$ , respectively. (a) Intensity distribution of field along axial direction; (b) intensity distribution of field along lateral direction (radial direction)

图 3(a)为聚焦场沿轴向的分布,数据显示:材料折射率为  $n = 2, 2.20, 2.36$  时,模拟所得焦距为  $8.064, 8.041, 8.015 \mu\text{m}$ , 与预设焦距相差均小于

$1\%$ , 焦深为  $0.566, 0.599, 0.670 \mu\text{m}$ , 即  $1.064\lambda_0, 1.126\lambda_0, 1.260\lambda_0$ , 逐渐增大; 焦场具有不同的峰值强度, 分别为  $1, 1.776, 2.464$ 。图 3(b)为聚焦场沿横

向(径向)的分布,焦点的横向尺寸(半峰全宽)为 0.352、0.303、0.288  $\mu\text{m}$ , 即  $0.661\lambda_0$ 、 $0.569\lambda_0$ 、 $0.542\lambda_0$ 。随着材料折射率增大,透镜聚焦获得的焦距接近预设焦距,并且焦深逐渐增大,焦点的横向尺寸越小,焦场能量越大。

选取材料折射率  $n = 2.36$ , 预设焦距  $f = 8 \mu\text{m}$ , 对等效负折射率  $n_{\text{eff}}$  分别为  $-0.8$ 、 $-0.9$ 、 $-1.0$ 、 $-1.1$  和  $-1.2$  的聚焦效果进行比较, 对应的  $d_{\perp} =$

168.4、163.2、158.3、153.8、149.4 nm。图 4 为 5 种情况下聚焦场沿轴向和径向的场强分布。图 4(a) 读取的焦距为 7.909、8.015、7.995、8.135、8.149  $\mu\text{m}$ , 焦点的尺寸为 0.287、0.288、0.273、0.287、0.333  $\mu\text{m}$ , 即  $0.539\lambda_0$ 、 $0.541\lambda_0$ 、 $0.513\lambda_0$ 、 $0.539\lambda_0$ 、 $0.626\lambda_0$ 。计算结果表明, 当等效负折射率  $n_{\text{eff}} = -1.0$  时, 聚焦焦距最接近预设焦距, 并且聚焦场具有最小的横向尺寸。

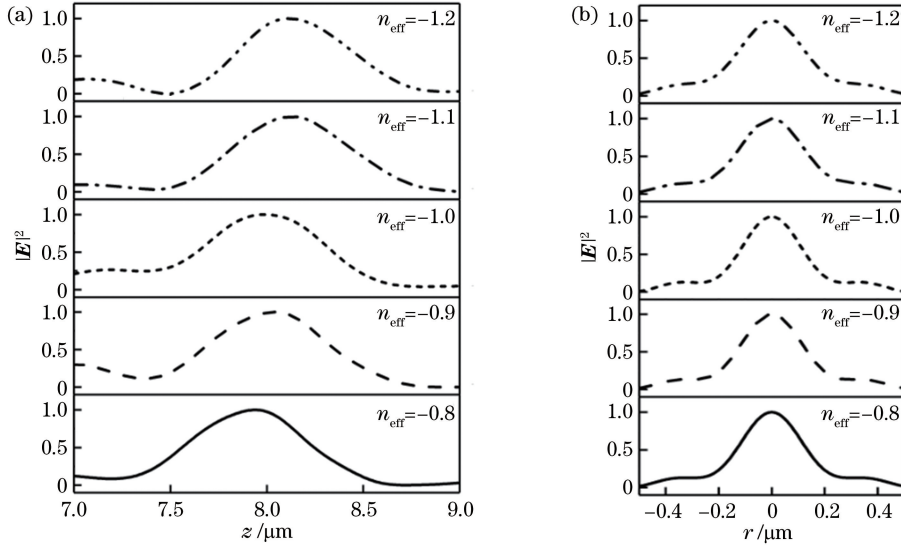


图 4 预设焦距为  $f = 8 \mu\text{m}$ , 等效负折射率为  $n_{\text{eff}} = -0.8, -0.9, -1.0, -1.1, -1.2$  的聚焦场。

(a) 沿轴向的场强分布; (b) 沿横向(径向)的场强分布

Fig. 4 Intensity distributions of focal field with predetermined  $f = 8 \mu\text{m}$  and different equivalent negative refractive indices of  $n_{\text{eff}} = -0.8, -0.9, -1.0, -1.1, \text{ and } -1.2$  respectively. (a) Intensity distribution of field along axial direction; (b) intensity distribution of field along lateral (radial) direction

选择材料折射率为  $n = 2.36$ , 等效负折射率  $n_{\text{eff}} = -1.0$ , 分析预设焦距  $f = 6, 7, 8, 9 \mu\text{m}$  时对聚焦效果的影响。此时  $d_{\perp}$  值固定, 为 158.3 nm, 焦距不同时, 由(2)式设计出的透镜的轮廓和大小不同。选用该范围内预设焦距的原因如下: 首先因为平凹镜的结构, 所以为了实际聚焦场的可利用性, 选择最小焦距为  $6 \mu\text{m}$ ; 其次焦点横向尺寸越来越大, 当焦距继续增大时, 出射光的偏折角度越来越小, 电场纵向分量所占的比例将越来越少, 因此焦点横向尺寸会越来越大, 不利于聚焦场能量的充分利用。由图 5(a) 读出的聚焦分别为 6.006、6.997、7.995、9.054  $\mu\text{m}$ , 与预设焦距十分接近。图 5(b) 中各焦点的横向尺寸分别为 0.255、0.261、0.273、0.308  $\mu\text{m}$ , 即  $0.479\lambda_0$ 、 $0.491\lambda_0$ 、 $0.513\lambda_0$ 、 $0.579\lambda_0$ 。当  $f = 6 \mu\text{m}$  和  $f = 9 \mu\text{m}$  时分别具有最小和最大的焦点尺寸。

径向偏振光从透镜出射面出射后, 电场横向振动分量将向纵向转化, 而聚焦场处纵向场分量越高,

焦点尺寸越小<sup>[23]</sup>。当  $f = 6 \mu\text{m}$  时, 焦距较小, 出射光线的偏折程度较大, 这将导致较高的转化比例; 当  $f = 9 \mu\text{m}$  时, 偏折程度较小, 转化程度最小。图 6(a) 和 (b) 为  $f = 6 \mu\text{m}$  和  $f = 9 \mu\text{m}$  情况下焦点处  $|\mathbf{E}|^2$  分布的等高线图(聚焦场  $|\mathbf{E}|^2$  峰值归一化), 取值范围为  $[0.5, 1.0]$ , 焦点横向尺寸用虚线标出, 即  $0.479\lambda_0$  和  $0.579\lambda_0$ 。图 6(c) 和 (d) 分别为归一化的  $|\mathbf{E}|^2$  分布, 取值范围为  $[0.5, 1.0]$ , 其半峰全宽横向尺寸为  $0.401\lambda_0$  和  $0.421\lambda_0$ 。图 6(e) 和 (f) 为归一化的  $|\mathbf{E}|^2$ 、 $|\mathbf{E}_z|^2$  和  $|\mathbf{E}_r|^2$  沿横向(径向)的分布曲线。图 6 证明聚焦场处纵向电场分量占比越大, 焦点尺寸越小, 并逐步接近理论极限值。

## 4 结 论

利用亚波长全介质光栅-1 级衍射的负折射效应, 设计等效负折射率聚焦透镜, 并以柱矢量光束为入射光, 以径向偏振光为例, 详细分析各参数对聚焦



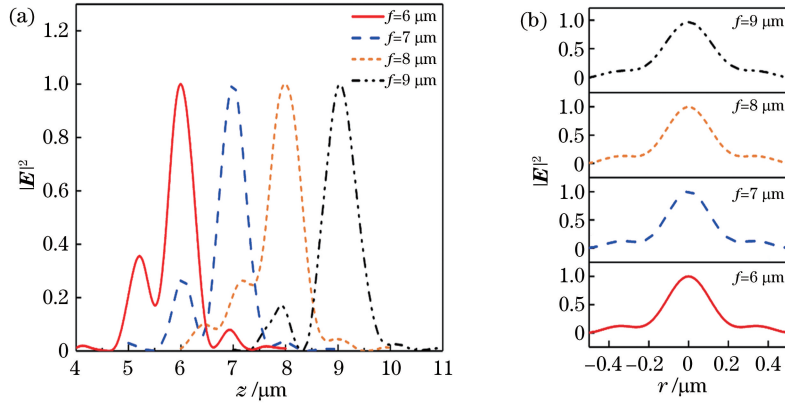


图 5 材料折射率  $n=2.36$ 、等效负折射率  $n_{\text{eff}}=-1.0$  时,预设焦距为  $f=6, 7, 8, 9 \mu\text{m}$  的聚焦场。

(a)沿轴向的场强分布;(b)沿横向(径向)的场分布

Fig. 5 Intensity distributions of focal field with predetermined  $f=6, 7, 8,$  and  $9 \mu\text{m}$ , as  $n=2.36$  and  $n_{\text{eff}}=-1.0$ .  
(a) Intensity distribution of field along axial direction; (b) intensity distribution of field along lateral (radial) direction

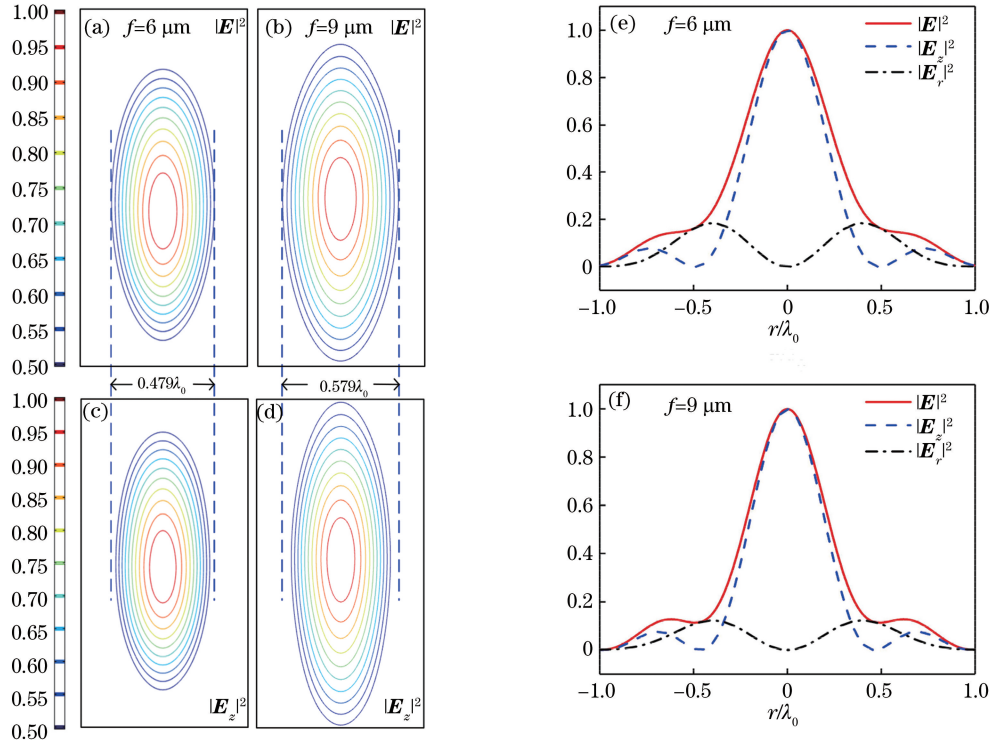


图 6  $f=6 \mu\text{m}$  和  $f=9 \mu\text{m}$  焦点处的聚焦场分析。(a)(b)  $|\mathbf{E}|^2$  分布的等高线图;(c)(d)  $|\mathbf{E}_z|^2$  分布的等高线图;  
(e)(f)  $|\mathbf{E}|^2$ 、 $|\mathbf{E}_z|^2$  和  $|\mathbf{E}_r|^2$  沿横向(径向)的分布曲线

Fig. 6 Analyses of focal field with  $f=6 \mu\text{m}$  and  $f=9 \mu\text{m}$ . (a)(b) Contour plots of  $|\mathbf{E}|^2$ ; (c)(d) contour plots of  $|\mathbf{E}_z|^2$ ;  
(e)(f) distributions of  $|\mathbf{E}|^2$ ,  $|\mathbf{E}_z|^2$ , and  $|\mathbf{E}_r|^2$  along lateral (radial) direction

效应的影响。结果表明,材料的折射率、等效负折射率、预设焦距的选取均对聚焦效果有一定程度的影响。具体表现为:大的材料折射率有较高的聚焦效率,并能获得较小的焦点横向尺寸;等效负折射率会影响聚焦效果, $n_{\text{eff}}=-1.0$  时焦点的横向尺寸最小;在材料及等效负折射率确定的情况下,预设焦距越小,焦点的横向尺寸越小。聚焦场的纵向电场分量

的比例决定焦点的横向尺寸,纵向分量比例越大,焦点越小。对于负折射介质光栅透镜,用等高阶梯来代替平滑曲面,可以降低制备上的困难,同时能够实现径向和旋向偏振光的紧聚焦,并且具有材料选取简单、结构设计灵活的优点,进一步调整和优化参数,能够获得较好的聚焦效果。本工作可为相关聚焦透镜的设计提供参考,并在柱矢量光束聚焦场调

控、光学微操纵、超分辨率成像等方面具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Li R F, Shi K B. High spatiotemporal imaging based on optical field engineering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126010.  
李润丰, 施可彬. 基于光场调控的高时空分辨率光学成像[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126010.
- [2] Kim W C, Park N C, Yoon Y J, *et al.* Investigation of near-field imaging characteristics of radial polarization for application to optical data storage[J]. *Optical Review*, 2007, 14(4): 236-242.
- [3] Daly M, Truong V G, Chormaic S N. Evanescent field trapping of nanoparticles using nanostructured ultrathin optical fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14470-14482.
- [4] Kozawa Y, Sato S. Optical trapping of micrometer-sized dielectric particles by cylindrical vector beams[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10828-10833.
- [5] Li J X, Zang W P, Tian J G. Electron acceleration in vacuum induced by a tightly focused chirped laser pulse[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(3): 031103.
- [6] Xu J, Yang Z J, Li J X, *et al.* Electron acceleration by a tightly focused cylindrical vector Gaussian beam[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(2): 025301.
- [7] Zheng X, Yang Y F, He Y, *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.
- [8] Li Y N, Ren Z C, Qian S X, *et al.* Analytical formulae of tightly focused Laguerre-Gaussian vector fields[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(10): 105702.
- [9] Wang Z X, Ren G B, Gao Y X, *et al.* Plasmonic in-plane total internal reflection: azimuthal polarized beam focusing and application[J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 23989-24000.
- [10] Labate L, Vantaggiato G, Gizzi L A. Intra-cycle depolarization of ultraintense laser pulses focused by off-axis parabolic mirrors[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e32.
- [11] Chen W B, Abeyasinghe D C, Nelson R L, *et al.* Plasmonic lens made of multiple concentric metallic rings under radially polarized illumination[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(12): 4320-4325.
- [12] Wu G, Chen J J, Zhang R, *et al.* Highly efficient nanofocusing in a single step-like microslit[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3776-3779.
- [13] Du L P, Yuan G H, Tang D Y, *et al.* Tightly focused radially polarized beam for propagating surface plasmon-assisted gap-mode Raman spectroscopy[J]. *Plasmonics*, 2011, 6(4): 651-657.
- [14] Du L P, Lei D Y, Yuan G H, *et al.* Mapping plasmonic near-field profiles and interferences by surface-enhanced Raman scattering[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3064.
- [15] Zhong Y, Xu J, Lu Y Q, *et al.* Subwavelength focusing of cylindrical vector beams by plano-concave lens based on one dimensional metallic photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(23): 237801.  
仲义, 许吉, 陆云清, 等. 基于一维金属光子晶体平凹镜的柱矢量光束亚波长聚焦[J]. *物理学报*, 2014, 63(23): 237801.
- [16] Wang S M, Xu J, Zhong Y, *et al.* Focus modulation of cylindrical vector beams through negative-index grating lenses[J]. *Optics Communications*, 2016, 372: 245-249.
- [17] Xu J, Zhong Y, Wang S M, *et al.* Focus modulation of cylindrical vector beams by using 1D photonic crystal lens with negative refraction effect[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 26978-26985.
- [18] Vodo P, Parimi P V, Lu W T, *et al.* Focusing by planoconcave lens using negative refraction[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(20): 201108.
- [19] Lu Z L, Chen C H, Schuetz C A, *et al.* Subwavelength imaging by a flat cylindrical lens using optimized negative refraction[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(9): 091907.
- [20] Shalaev V M, Kildishev A V, Klar T A, *et al.* Optical negative-index metamaterials: from low to no-loss and from linear to nonlinear optics[C]// LEOS 2006-19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, October 29-November 2, 2006, Montreal, Que., Canada. New York: IEEE, 2006: 246-247.
- [21] Lu W T, Huang Y J, Vodo P, *et al.* A new mechanism for negative refraction and focusing using selective diffraction from surface corrugation[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9166-9175.
- [22] Wang S C, Li X P, Zhou J Y, *et al.* Ultralong pure longitudinal magnetization needle induced by annular vortex binary optics[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5022-5025.
- [23] Grosjean T, Courjon D. Smallest focal spots[J]. *Optics Communications*, 2007, 272(2): 314-319.