

径向偏振光下的长焦、紧聚焦表面等离子体激元透镜

陆云清 呼斯楞 陆懿 许吉 王瑾

Plasmonic lens with long focal length and tight focusing under illumination of a radially polarized light

Lu Yun-Qing Hu Si-Leng Lu Yi Xu Ji Wang Jin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 097301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.097301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于含时密度泛函理论的表面等离激元研究进展

Progress of surface plasmon research based on time-dependent density functional theory

物理学报.2015, 64(7): 077303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.077303>

石墨烯基双曲色散特异材料的负折射与体等离激元性质

Negative refraction and bulk polariton properties of the graphene-based hyperbolic metamaterials

物理学报.2015, 64(6): 067301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.067301>

三角缺口正三角形纳米结构的共振模式

Resonance mode of an equilateral triangle with triangle notch

物理学报.2014, 63(12): 127301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.127301>

含有凹口的金属纳米环形共振器的本征模式分裂

Splitting of transmission modes in a nanoscale metal ring resonator with a notch

物理学报.2014, 63(1): 017301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.017301>

介观尺寸原子链中的等离激元: 紧束缚模型

Plasmonic excitations in mesoscopic-sized atomic chains: a tight-binding model

物理学报.2013, 62(17): 177301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.177301>

径向偏振光下的长焦、紧聚焦表面等离子体 激元透镜*

陆云清[†] 呼斯楞 陆懿 许吉 王瑾[‡]

(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210023)

(2014年8月3日收到; 2014年12月19日收到修改稿)

表面等离子体激元透镜 (plasmonic lens, PL) 是一种通过激发和操控表面等离子体激元 (SPPs), 突破衍射极限, 实现亚波长紧聚焦的纳米光子器件. 如何实现高效率的紧聚焦及调控, 一直是研究 PL 的重点. 如果选取电矢量沿径向振动的径向偏振光作为 PL 的入射光, 可从各个方向激发 SPPs, 提高紧聚焦的能量效率. 本文提出了一种在径向偏振光激发下的长焦深、长焦距、亚波长紧聚焦的表面等离子体激元透镜, 该透镜由中心 T 形微孔、阶梯形同心环和同心环结构组成. 本文首先利用有限元方法数值分析了中心微孔-同心环结构透镜的聚焦特性, 结果显示径向偏振光由底部入射可高效激发 SPPs, 并且中心微孔透射光与散射至自由空间的 SPPs 由于多光束干涉形成了紧聚焦. 为进一步压缩焦斑、增加焦距、加深焦深、改善透镜聚焦特性, 本文引入中心 T 形微孔-阶梯形同心环结构, 从而对阶梯表面的 SPPs 同时提供了相位调制和传播方向的控制. 经过参数优化, 该透镜结构实现了光斑焦深、半高宽、焦距分别是入射光波长的 2.5 倍、0.388 倍、3.22 倍的亚波长紧聚焦; 而且该透镜具有结构紧凑、尺寸小、易于集成的优点, 满足了纳米光子学对于器件微型化和高度集成化的要求. 该研究结果在纳米光子集成、近场光学成像与探测、纳米光刻等相关领域具有潜在的应用价值.

关键词: 表面等离子体激元透镜, 径向偏振光, 紧聚焦, 长焦距

PACS: 73.20.Mf, 42.25.Hz, 42.50.St, 42.82.Cr

DOI: 10.7498/aps.64.097301

1 引言

纳米光子器件设计及其集成是纳米光子学的一个研究热点, 要求单元器件的尺寸越来越小, 器件的空间距离也越来越小, 并且能够在纳米尺度实现超衍射极限的光学调控, 而基于表面等离子体激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 的各种纳米光子器件被认为是最有希望实现纳米全光集成回路的基础^[1]. SPPs 是局域在金属表面的一种电磁波模式^[2-5], 其本质是在金属-介质界面上光和金属表面的自由电子相互作用激发并耦合电荷密度起伏的电磁振荡, 具有近场增强、表面受限、短波长等特性, 能够突破衍射极限, 是目前实

现全光集成的方法之一. 表面等离子体激元透镜 (plasmonic lens, PL) 正是一种能够有效激发和操控 SPPs、突破衍射极限, 实现亚波长紧聚焦的纳米光子器件^[6-16], 在纳米光子集成、超分辨成像、纳米光刻、近场成像与探测、纳米粒子操纵等领域有着重要的应用^[17-24].

实现高能量效率、长焦深、长焦距、亚波长紧聚焦是 PL 透镜设计的主要方向. 近年来, 诸如狭缝-光栅型透镜^[6,7]、同心环型透镜^[8-14]、微孔阵列型透镜^[15-17]等各种 PL 透镜结构被提出. 这些工作通常采用亚波长孔或缝等结构激发 SPPs 实现亚波长紧聚焦^[21-23], 因此, PL 透镜聚焦效率与 SPPs 的激发效率紧密相关, 而 SPPs 的激发效率取决于入射光束的偏振态. 例如, 当激发光束为线/圆偏振

* 南京邮电大学基金 (批准号: NY211060, NY213028, NY212008) 和江苏省基础研究计划基金 (批准号: BK20131383) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: luyq@njupt.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: jinwang@njupt.edu.cn

光时, 光束只能在一个方向上激发 SPPs^[9], 激发效率较低. 如果入射光束是径向偏振光, 即在光束横截面内任意点的电矢量都沿径向振动, 可以从各个方向激发 SPPs, 从而提高 PL 透镜的能量效率; 而且, 由于径向偏振光电场分布的特殊性, 在合适的透镜结构下聚焦, 可以在焦点附近形成很强的纵向光场分量, 从而实现超衍射极限的紧聚焦光斑. 实际上, 采用高数值孔径光学透镜也可实现对径向偏振光的超衍射极限的紧聚焦^[25-27], 如 Wang 等将二元光学相位元件与高数值孔径物镜结合, 获得了半高宽为 $0.43\lambda_0$ 的紧聚焦光斑 (λ_0 为真空入射光波长)^[27], 但是高数值孔径光学透镜的尺寸较大, 不易于实现高度集成化的微型纳米光子器件.

目前, 通过优化透镜结构而引入新的工作机理, 以实现 PL 透镜高效率的紧聚焦及有效的特性调控, 是针对径向偏振光入射的 PL 透镜的研究重点. 例如文献^[10]中的 PL 透镜, 入射光在同心狭缝形成的金属-介质-金属 (M-I-M) 结构中激发 SPPs, 并在透镜表面传播, 以此提高 SPPs 激发效率. Peng 等在这一结构基础上增加环形狭缝和同心的沟槽^[12], 将激发的 SPPs 散射到自由空间, 通过干涉形成聚焦, 实现了一种超长焦深、高分辨率透镜, 其焦距为 $2.1\lambda_0$, 半高宽 (full width half maximum, FWHM) 为 $0.44\lambda_0$, 焦深 (depth of focus, DOF) 为 $2.65\lambda_0$. 这些研究给紧聚焦 PL 透镜结构设计提供了一定的思路.

本文设计了一种径向偏振光激发下的长焦深、长焦距、紧聚焦 PL 透镜, 该透镜由处于中心的 T 形微孔、阶梯形同心环和同心环结构组成. 径向偏振光由底部入射并从各个方向高效激发 SPPs, 处于中心的 T 形微孔在增加透射光强的同时, 可通过多模干涉, 提高聚焦效率^[7], 其透射光与散射至自由空间的 SPPs 由于多光束干涉形成紧聚焦. 本文进一步引入了阶梯形同心环沟槽结构, 在对阶梯表面的 SPPs 提供相位调制的同时, 可以控制 SPPs 的传播方向, 将同心环透射光反射至轴心, 进一步压缩焦斑, 增加焦距和焦深, 改善了透镜聚焦特性.

2 理论模型

本文提出的 PL 透镜由中心微孔和同心环结构构成, 通过设计中心微孔和同心环的形状、尺寸和位置实现长焦深、长焦距、亚波长紧聚焦. 如图 1 所

示为由中心圆孔和多级同心环构成的透镜结构示意图, 图 1 (a) 为 PL 透镜聚焦三维示意图, 径向偏振光背照式高效激发 SPPs, 中心微孔透射光与散射至自由空间的 SPPs 由于多光束干涉, 在自由空间中形成紧聚焦光斑; 图 1 (b) 为透镜结构二维横截面示意图, 其中, 衬底为 SiO_2 , 上面镀有 300 nm 厚金膜, D_C 表示中心微孔直径, w 为同心环宽度, R_M 表示 M 级同心环中心半径. 中心微孔的透射光与半径为 R_M 的同心环间透射光相位满足下式:

$$\Delta\varphi = 2M\pi + \frac{2\pi fn}{\lambda_0} - \frac{2\pi n\sqrt{f^2 + R_M^2}}{\lambda_0}, \quad (M = 1, 2, 3 \dots), \quad (1)$$

式中 n 为介质折射率, f 为焦距, λ_0 为真空光波长. 当 $\Delta\varphi$ 为 0 时, 将产生多光束干涉, 在自由空间中形成一个亚波长焦斑, 进而可确定给定焦距对应的同心环位置.

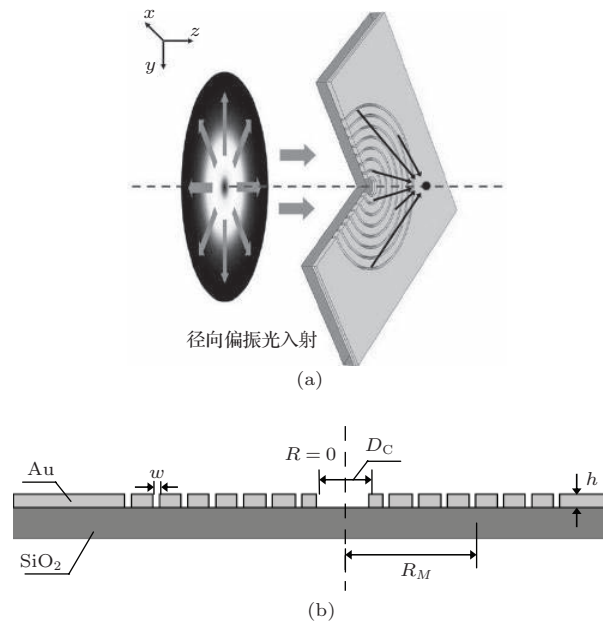


图 1 中心微孔-同心环透镜结构示意图 (a) 透镜聚焦三维示意图, 径向偏振光沿 z 轴正方向入射, 高效激发 SPPs, 在自由空间中形成紧聚焦光斑; (b) 透镜结构二维横截面示意图

Fig. 1. Structure layout of the PL consisting of a micro-hole and concentric rings. (a) 3D-view of the PL illuminated under a radially polarized light, where SPPs can be excited efficiently and a tightly focused spot in the free space is achieved; (b) The cross-section of the PL structure.

PL 透镜是通过操控由入射电磁波与金属表面自由电子的相互作用而产生的 SPPs 实现相干聚焦, 由此产生的 SPPs 的各项特性可以使用基于

宏观 Maxwell 方程组的经典电磁学来进行分析^[28]. SPPs 的波矢表示为 k_{sp} , 其色散关系表达式为

$$k_{sp}(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_m(\omega) \varepsilon_d / (\varepsilon_m(\omega) + \varepsilon_d)}, \quad (2)$$

其中 ω/c 为入射光在真空中的波矢, ε_d 为介质的介电常数. 对于 SiO_2 $\varepsilon_d = (1.45)^2$, $\varepsilon_m(\omega)$ 为金属的介电常数, 基于改进的 Drude-Lorentz 模型^[29,30], 入射光波长为 632.8 nm 时, 金膜的介电常数

$$\varepsilon_{Au}(\omega) = -9.811 + 1.9645i.$$

SPPs 波长为 $\lambda_{sp} = 2\pi/\text{Re}\{k_{sp}\}$.

本文所采用的径向偏振光是指电矢量振动方向在光束横截面上具有轴对称性并且始终沿径向的一种矢量偏振光束. 假定光束不沿 Z 轴发散, 这样的径向偏振光矢量光束电场可近似表达为

$$E(r, \varphi) = \sqrt{2}r/\omega_0 \exp(-r^2/\omega_0^2) \hat{e}_r, \quad (3)$$

其中 ω_0 为高斯光束束腰半径, 在本文的透镜设计中设定为 3 μm .

3 模拟结果与分析

3.1 中心微孔-同心环透镜

本文采用中心微孔结构, 在增加透射光强的同时, 通过多模干涉, 提高聚焦效率^[7], 其透射光与由同心环结构散射至自由空间的 SPPs 通过多光束干涉, 在自由空间中形成紧聚焦光斑. 如图 1 所示为中心微孔-同心环透镜结构示意图, 及其利用有限元算法模拟分析得到的透镜聚焦特性. 采用径向偏振光背照式激发 SPPs, 入射光波长为

$\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$, SiO_2 衬底折射率 $n_{\text{sub}} = 1.45$, $f = 460 \text{ nm}$, 由于聚焦离子束 (FIB) 可以容易实现 100 nm 至 300 nm 的蚀刻工作, 因此选择同心环宽度 $w = 150 \text{ nm}$.

径向偏振光下该透镜利用多级同心环结构高效激发 SPPs, 并将 SPPs 散射至自由空间, 散射光与中心微孔透射光通过多光束干涉形成紧聚焦光斑. 相对于单孔结构, 由于 SPPs 具有极强的表面束缚性, 进而能够突破衍射极限, 增强透射, 如图 2(a) 所示为中心微孔-同心环透镜透射率与单孔结构透射率的对比, T_1 为中心微孔同心环透镜透射率, T_2 为单孔结构透射率, 相对于单孔结构, 中心微孔同心环透镜透射率高 2—3 个数量级, 透射率显著增加. 同心环的空气沟槽与两侧金属形成了 M-I-M 结构, 由径向偏振光高效激发 SPPs, 当中心孔直径 $D_C = 720 \text{ nm}$ 时, 与中心微孔透射光波矢匹配, 形成透射峰. 如图 2(b) 所示为中心微孔-同心环透镜焦斑 FWHM 随孔直径 D_C 的变化关系, 当 $D_C = 720 \text{ nm}$ 时, 透镜焦斑 FWHM 为极小值, 约为入射光波长的 0.383 倍, 实现亚波长紧聚焦. 中心微孔同心环透镜聚焦特性如图 3 所示, 图 3(a) 为光场强度分布, 光场强度表达式为 $|E|^2 = |E_r|^2 + |E_z|^2$, 即光场强度由纵向分量和径向分量组成, 光场强度的分布总体与纵向分量的强度分布相同, 而横向分量强度几乎可以忽略不计. 图 3(b) 为 $R = 0$, 即孔中心沿 z 方向光强分布曲线, 可见该透镜 DOF 约为入射光波长的 0.99 倍, 插图为焦面上 ($z = 2.15\lambda_0$) 光强分布曲线, 焦斑 FWHM 约为入射光波长的 0.383 倍.

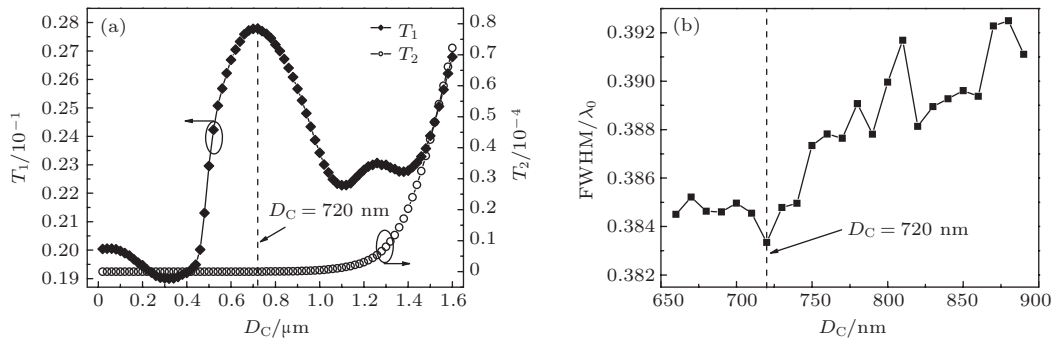


图 2 (a) 透射率随中心孔直径 D_C 的变化关系, T_1 为中心微孔同心环透镜透射率, T_2 单孔结构透射率; (b) 中心微孔-同心环透镜焦斑半高宽随中心孔直径 D_C 的变化关系
 Fig. 2. (a) The transmittances of the PL consisting of a micro-hole and concentric rings T_1 and of the PL consisting of a single micro-hole T_2 as functions of the diameter of the micro-hole D_C ; (b) FWHM as a function of D_C for the PL consisting of a micro-hole and concentric rings.

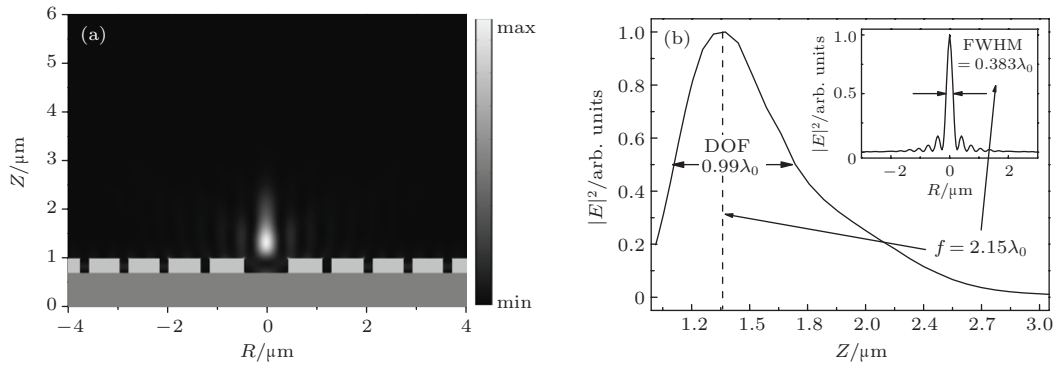


图3 $D_C = 720$ nm时, 中心微孔-同心环透镜聚焦特性 (a) 光场强度分布图; (b) $R = 0$, 即孔中心沿 z 方向光强分布曲线 (插图为焦面上 ($z = 2.15\lambda_0$) 光强分布曲线)

Fig. 3. Focusing properties of the PL consisting of a micro-hole and concentric rings for $D_C = 720$ nm. (a) Intensity distribution; (b) The intensity profile along the z direction for $R = 0$, and the inset is the intensity profile on the focal plane for $z = 2.15\lambda_0$.

3.2 中心T形微孔同心环透镜

尽管中心微孔同心环透镜具有一定的聚焦能力, 但其聚焦特性表现为焦深浅、焦距短、具有一定半高宽的亚波长聚焦, 使其应用受到一定的限制, 为进一步压缩焦斑, 增大焦距, 改善透镜的聚焦特性, 引入阶梯结构, 将中心圆孔改为T形微孔. 中心T形微孔-同心环透镜结构侧视图如图4(a)所示, 其中, D_{C1} 为小孔直径, 定为720 nm保持不变,

D_{C2} 为大孔直径, 二者差值为阶梯长度 w_{g1} , 阶梯深度固定为150 nm. 利用中心T形微孔的阶梯结构进行相位调制, 可将焦点进一步推离金属表面, 同时阶梯结构对于阶梯表面的SPPs具有明显的反射作用, 可进一步压缩焦斑, 如图4(b)所示为中心T形微孔-同心环透镜半高宽随阶梯长度 w_{g1} 的变化关系, 当 $w_{g1} = 0$ 时, 为前面所述的中心微孔-同心环透镜, 当 $w_{g1} = 145$ nm时, 焦斑得到进一步压缩, 其半高宽约为入射光波长的0.378倍, 进而将阶

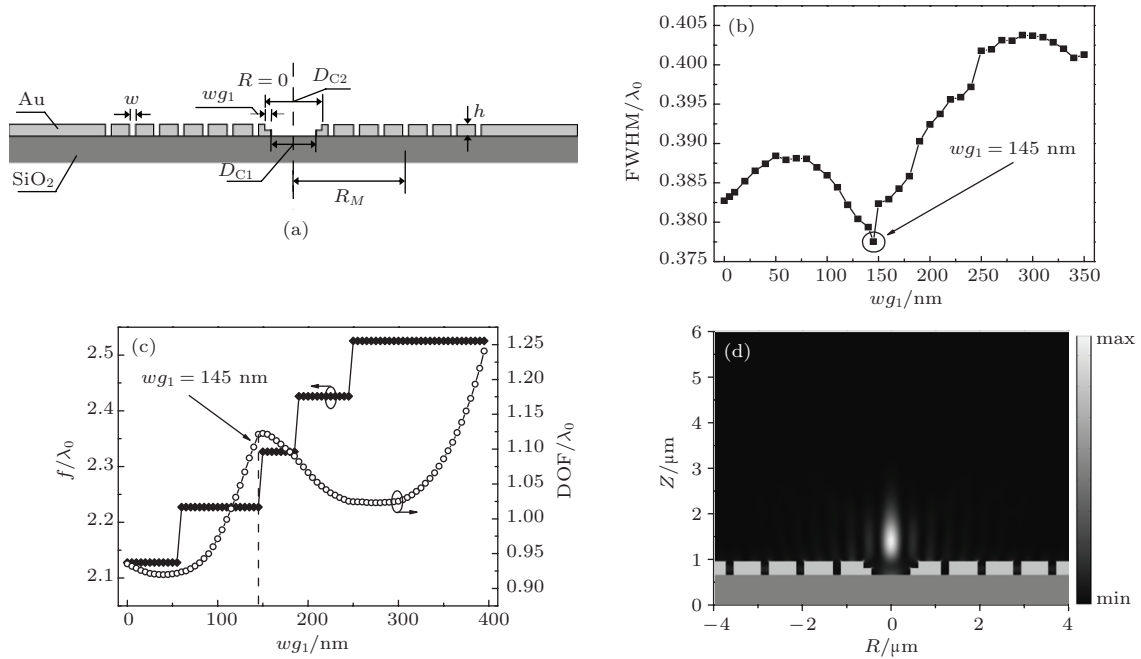


图4 (a) 中心T形微孔-同心环透镜结构侧视图; (b) 中心T形微孔-同心环透镜半高宽随阶梯长度 w_{g1} 的变化关系; (c) 中心T形微孔-同心环透镜焦深和焦距随阶梯长度 w_{g1} 的变化关系; (d) 阶梯长度 $w_{g1} = 145$ nm时, 中心T形微孔-同心环透镜光场强度分布图

Fig. 4. (a) The cross-section of the PL consisting of a T-shape micro-hole and concentric rings; (b) FWHM as a function of the width of the staircase w_{g1} ; (c) focal length and DOF as functions of the w_{g1} ; (d) intensity distribution for $w_{g1} = 145$ nm.

梯长度 w_{g1} 确定为 145 nm. 如图 4(c) 所示为中心 T 形微孔-同心环透镜焦深和焦距随阶梯长度 w_{g1} 的变化关系, 当 $w_{g1} = 145$ nm 时, 在保证亚波长紧聚焦的前提下, 焦深取为一峰值, 焦深与焦距均显著增加. 如图 4(d) 所示为阶梯长度 $w_{g1} = 145$ nm 时, 中心 T 形微孔-同心环透镜光场强度分布图, 其焦斑相对于中心微孔-同心环透镜焦斑焦距变长, 焦深加深, 半高宽进一步压缩, 聚焦特性得到了显著的改善.

3.3 中心 T 形微孔阶梯形同心环透镜

为进一步压缩焦斑, 增加焦距, 加深焦深, 在同心环上同样蚀刻周期性阶梯结构, 将同心环透射光反射至轴心可以同时实现阶梯表面 SPPs 相位的调制和传播方向的控制. 如图 5(a) 所示为中心 T 形微孔-阶梯形同心环透镜结构侧视图, 其中阶梯结构标记方法与同心环标记方式相同. 为确定

最优的阶梯长度, 首先将第一级同心环改为阶梯形同心环, 阶梯长度为 w_{g2} , 其他同心环结构不变, 如图 5(b) 所示为透镜焦距和焦深随 w_{g2} 的变化关系, 当 $w_{g2} = 0$ 时为中心 T 形微孔-同心环透镜, 由图可见, 将同心环改为阶梯形同心环后, 焦距和焦深都得到了一定幅度的增加, 当 $w_{g2} = 125$ nm 时最佳, 因此在其余同心环上依次添加长度为 125 nm 的阶梯结构. 如图 5(c) 所示为中心 T 形微孔-阶梯形同心环透镜焦距和焦深随阶梯形同心环数目的变化关系, 当阶梯数量为 4 时, 焦距和焦深达到最优值, 因此在中心 T 形微孔和同心环结构之间添加四级阶梯形同心环结构时, 能使更多光束反射至中心, 有效增加焦距和焦深. 如图 5(d) 所示为由中心 T 形微孔、四个阶梯形同心环和三个同心环构成的透镜光场分布, 实现了长焦深、长焦距、亚波长紧聚焦.

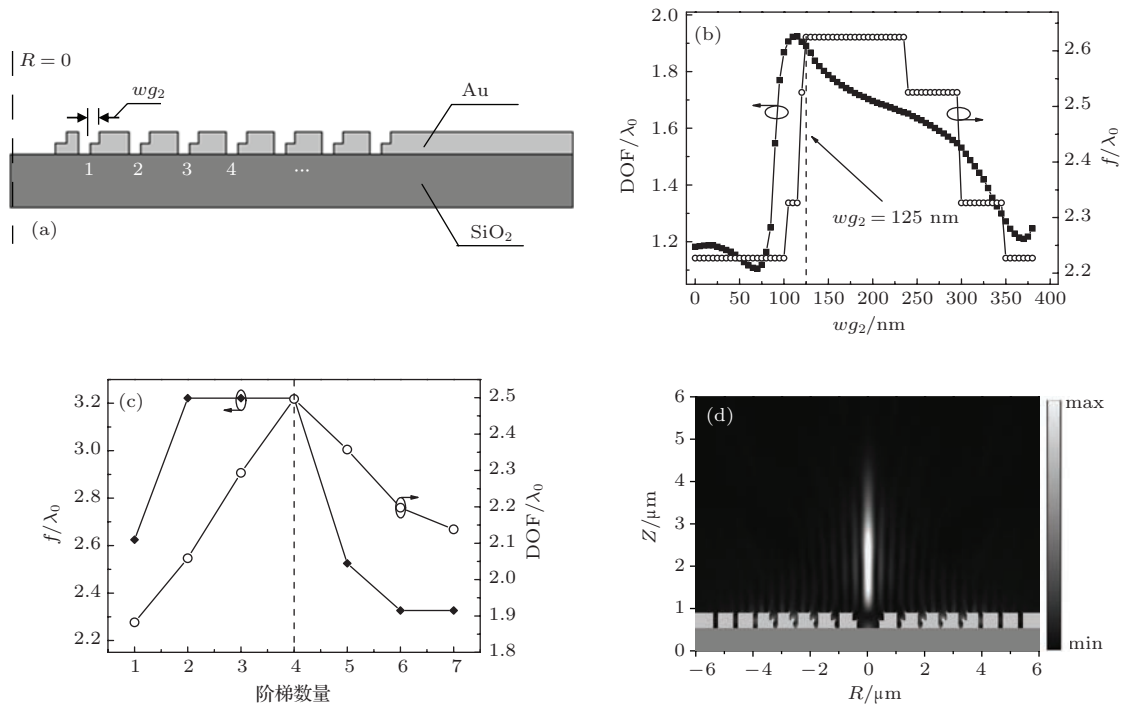


图 5 (a) 中心 T 形微孔-阶梯形同心环透镜结构侧视图, 除中心孔阶梯外, 阶梯形同心环结构依次标记为第 1, 2, 3, 4, ... 级 (为方便标注, 仅给出侧视图的一半); (b) 透镜焦距和焦深随第一级阶梯形同心环阶梯长度 w_{g2} 的变化关系, 当 $w_{g2} = 125$ nm 时最佳; (c) 中心 T 形微孔-阶梯形同心环透镜焦距和焦深随阶梯形同心环数目的变化关系; (d) 由中心 T 形微孔、四个阶梯形同心环和三个同心环构成的透镜的光场分布, 实现了长焦深、长焦距、亚波长紧聚焦

Fig. 5. (a) The cross-section of the PL consisting of a T-shape micro-hole, concentric rings and multi-level step-like structures; (b) focal length and DOF as functions of the w_{g2} , where the compromised optimum is at $w_{g2} = 125$ nm; (c) focal length and DOF as functions of the number of step-like concentric rings; (d) intensity distribution of the PL consisting of a T-shape micro-hole, three concentric rings and four multi-level step-like structures, where a subwavelength-scale tightly focusing with a long depth and a long focal length is achieved.

4 结 论

本文利用有限元方法模拟分析了径向偏振光激发下的中心微孔-同心环结构、中心T形微孔-同心环结构和中心T形微孔-阶梯形同心环结构等三种PL透镜的聚焦特性. 在本文提出的第三个结构中, 中心T形微孔透射光与由阶梯形同心环散射至自由空间的SPPs通过多光束干涉, 实现了亚波长尺度上的紧聚焦; 该结构在对阶梯表面的SPPs提供相位调制的同时, 控制SPPs的传播方向, 可进一步压缩焦斑, 增加焦距, 加深焦深, 改善透镜的聚焦特性. 基于理论基础, 本文构建了一种由中心T形微孔、四个阶梯形同心环和三个同心环构成的PL透镜, 在波长为632.8 nm的径向偏振光激发下, 获得了焦深 $2.5\lambda_0$ 、半高宽 $0.388\lambda_0$ 、焦距 $3.22\lambda_0$ 的亚波长紧聚焦, 相对于文献[12]中PL透镜的聚焦效果, 在确保长焦深的同时, 焦斑更小、焦距更长. 相对于高数值孔径光学透镜, 本文提出的PL透镜具有结构紧凑、尺寸小、易于集成的优点, 满足了纳米光子学对于器件微型化和高度集成化的要求, 并且, 利用该PL透镜所获得的紧聚焦光斑尺寸($0.388\lambda_0$)优于采用高数值孔径透镜紧聚焦结果($0.43\lambda_0$)^[27]. 这种长焦深、长焦距、亚波长紧聚焦PL透镜在纳米光子集成、近场光学成像与探测、纳米光刻等相关领域具有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Chen J, Li Z, Zhang X, Xiao J, Gong Q 2013 *Sci. Rep.* **3** 1451
- [2] Raether H 1988 *Surface plasmons on smooth surfaces* (Berlin Heidelberg: Springer)
- [3] Ghaemi H F, Thio T, Grupp D E, Ebbesen T W, Lezec H J 1998 *Phys. Rev. B* **58** 6779
- [4] Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F, Lezec H, Pellerin K, Thio T, Pendry J, Ebbesen T 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1114
- [5] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, Linke R, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F, Ebbesen T W 2002 *Science* **297** 820
- [6] Zheng G G, Xu L H, Pei S X, Chen Y Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034213
- [7] Chen J, Wang C, Lu G, Li W, Xiao J, Gong Q 2012 *Opt. Express.* **20** 17734
- [8] Wang J, Fu Y Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 090206
- [9] Zhang M, Wang J, Tian Q 2013 *Opt. Express.* **21** 9414
- [10] Chen W, Abeysinghe D C, Nelson R L, Zhan Q 2009 *Nano Lett.* **9** 4320
- [11] Yi J M, Cuche A, Devaux E, Genet C, Ebbesen T W 2014 *ACS Photonics* **1** 365
- [12] Peng R, Li X, Zhao Z, Wang C, Hong M, Luo X 2014 *Plasmonics* **9** 55
- [13] Chen J 2013 *Plasmonics* **8** 931
- [14] Song W T, Lin F, Fang Z Y, Zhu X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6921 (in Chinese) [宋文涛, 林峰, 方哲宇, 朱星 2010 物理学报 **59** 6921]
- [15] Ebbesen T W, Lezec H, Ghaemi H, Thio T, Wolff P 1998 *Nature* **391** 667
- [16] Genet C, Ebbesen T W 2007 *Nature* **445** 39
- [17] Goh X M, Lin L, Roberts A 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 547
- [18] Liu Z, Lee H, Xiong Y, Sun C, Zhang X 2007 *Science* **315** 1686
- [19] Smolyaninov I I, Hung Y J, Davis C C 2007 *Science* **315** 1699
- [20] Kim S, Jin J, Kim Y J, Park I Y, Kim Y, Kim S W 2008 *Nature* **453** 757
- [21] Lee B, Kim S, Kim H, Lim Y 2010 *Prog. Quantum Electron.* **34** 47
- [22] Li L, Li T, Wang S, Zhu S, Zhang X 2011 *Nano Lett.* **11** 4357
- [23] Jia B, Shi H, Li J, Fu Y, Du C, Gu M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 151912
- [24] Min C J, Shen Z, Shen J F, Zhang Y Q, Fang H, Yuan G H, Du L, Zhu S, Lei T, Yuan X C 2013 *Nat. Commun.* **4** 2891
- [25] Zhao W Q, Tang F, Qiu L R, Liu D L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 054201 (in Chinese) [赵维谦, 唐芳, 邱丽荣, 刘大礼 2013 物理学报 **62** 054201]
- [26] Wang Z, Gao C Q, Xin J T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124209 (in Chinese) [王铮, 高春清, 辛璟焘 2012 物理学报 **61** 124209]
- [27] Wang H F, Shi L P, Lukyanchuk B, Sheppard C, Chong C T 2008 *Nature Photonics* **2** 501
- [28] Jackson J D 1999 *Classical electrodynamics (3rd ed.)* (New York: Wiley)
- [29] Vial A, Grimault A S, Macías D, Barchiesi D, de La Chapelle M L 2005 *Phys. Rev. B* **71** 085416
- [30] Rakic A D, Djurišić A B, Elazar J M, Majewski M L 1998 *Appl. Opt.* **37** 5271

Plasmonic lens with long focal length and tight focusing under illumination of a radially polarized light*

Lu Yun-Qing[†] Hu Si-Leng Lu Yi Xu Ji Wang Jin[‡]

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 3 August 2014; revised manuscript received 19 December 2014)

Abstract

Plasmonic lens (PL) is a nano-optical device, with which a tight focusing spot in a subwavelength-scale can be achieved by exciting and controlling surface plasmon polaritons (SPPs), thus the diffraction limit can be broken for attaining the shorter effective wavelength of the SPPs. The key issue in studying the PL is to achieve a tight focusing point and focus-control effectively. Optimal plasmonic focusing can be achieved by utilizing the radially polarized light and the rotational symmetric structures of the PL. Radially polarized light is a cylindrical vector beam whose local polarization of electric field is always parallel to the radial direction. As a radially polarized light is used as the incident light in a PL, the SPPs can be excited in all directions, so as to increase the efficiency of focussing. The focussing efficiency can be further increased, and the characteristics of the focus, such as spot size, shape, and strength etc., can be manipulated through appropriate designs of the PL structures. In this work, under an illumination of a radially polarized light, a new type of plasmonic lens is proposed to achieve a long depth of focus (DOF), a long focal length, and a sub-wavelength-scale tight focussing spot. This kind of plasmonic lens consists of a T-shape micro-hole, concentric rings, and multi-level step-like structures. The focussing properties of such plasmonic lenses are analyzed in terms of the finite element method (FEM). Simulation results show that SPPs can be excited efficiently in such structures and the tight-focusing is realized via the multiple-beam interference between the light radiating from the concentric rings and the transmitted light from the center hole. The T-shape micro-hole and step-like concentric ring structures can provide control for the phase modulation and the propagation direction of the SPPs along the bottom of the groove, thus leading to a compressed focal spot, a longer focal length, an increased depth of focus, and to improving the focussing properties. In an optimized PL design, a focal spot of $\sim 2.5\lambda_0$ DOF, $\sim 0.388\lambda_0$ FWHM, and $\sim 3.22\lambda_0$ focal length is achieved under the illumination of a radially polarized light ($\lambda_0 = 632.8$ nm). The PL structure is compact, and can be easily integrated with other nano-devices. The PL proposed above has potential applications in nano-scale photonic integration, near-field imaging and sensing, nano-photolithography, and in other related areas.

Keywords: Plasmonic lens, radially polarized light, tight focusing, long focal length

PACS: 73.20.Mf, 42.25.Hz, 42.50.St, 42.82.Cr

DOI: 10.7498/aps.64.097301

* Project supported by the Nanjing University of Posts and Telecommunications Foundation, China (Grant Nos. NY211060, NY213028, NY212008), and the Jiangsu Provincial Research Foundation for Basic Research, China (Grant No. BK20131383).

[†] Corresponding author. E-mail: luyq@njupt.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: jinwang@njupt.edu.cn