

文章编号: 0253-2239(2009)09-2524-05

# 基于表面等离子体激元耦合相位板超聚焦透镜结构的优化设计

张志友 杜惊雷 李 敏 牛晓云

(四川大学物理科学与技术学院纳光子技术研究所, 四川 成都 610064)

**摘要** 基于银板超透镜和多带相位二元光学衍射理论, 提出一种超聚焦透镜结构。利用时域有限差分法和标量衍射理论数值分析显示, 这种超透镜在可见光范围, 具有单一焦点, 焦距尺寸约  $0.36\lambda$ , 聚焦位置和焦深可达  $10\lambda$  以上, 在近场光学扫描显微镜和超分辨成像及光刻等系统中有潜在应用前景。

**关键词** 光学设计; 表面等离子体激元; 纳米聚焦; 超分辨; 长焦深

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2524

## Optimal Design of Superfocusing Lens Configuration Based on Surface Plasmon Polariton Coupling Plate

Zhang Zhiyou Du Jinglei Li Min Niu Xiaoyun

(*Institute of nano-photons technology, School of Physical Science and Technology,*  
*Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*)

**Abstract** A superfocusing system is presented based on the theory of silver superlens and multi-phase binary optical elements. We get a single focal light spot with diameter of  $0.36\lambda$  and focal depth reached over  $10\lambda$  which calculated by finite-difference time-domain method (FDTD) and scalar diffraction theory. This feature makes it a promising to replace the probe of NSOM and to realize the super-resolution imaging and lithography and other applications.

**Key words** optical design; surface plasmon polaritons (SPPs); nano-focus; super-resolution; long depth of focus

### 1 引 言

由于衍射效应的影响, 传统的聚焦光斑大小或者传播光束直径一般只能限制在波长量级。虽然通过传统的小孔光阑, 可以得到亚波长的聚焦光斑, 但这种小孔的光通量与  $(r/\lambda)^4$  成正比 ( $r$  为小孔的半径,  $\lambda$  为照明光波长), 光能损耗巨大<sup>[1]</sup>。借助于金属薄膜表面的周期性结构所产生的表面等离子体激元 (Surface plasmon polaritons, SPPs)<sup>[2]</sup>, 可以将纳米小孔的光能透过率提高 2 个数量级以上, 这一奇异增强效应, 并逐渐应用于高灵敏生物化学传感器、

新型光源及某些高效光学元器件中<sup>[3~6]</sup>, 受到人们的广泛关注。

目前, 基于 SPPs 的亚波长光学聚焦在理论和实验上已有不少相关报道<sup>[7~13]</sup>。Wang 等<sup>[9]</sup>提出一种由金属银和铝构成的三维矩形金属异质波导, 可以将一束入射光聚焦到约  $0.002\lambda^2$  的光斑, 聚焦效率为 15%。通过同时改变这种异质波导结构的几何参数, 能使聚焦效率进一步提高<sup>[10]</sup>。利用这种方法虽然可以获得较小的光斑, 但光束的聚焦深度往往很短, 一般在纳米量级以下。Haofei shi 等<sup>[11]</sup>提出利用金属

收稿日期: 2008-10-08; 收到修改稿日期: 2008-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60878031, 60376021)和高等教育博士点专项基金(20060610006)资助项目。

作者简介: 张志友(1978—), 男, 博士, 主要从事亚波长衍射光学及纳米光子器件等方面的研究。

E-mail: zhi-youzhang@163.com

导师简介: 杜惊雷(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事微纳光学及信息光子学等方面的研究。

E-mail: dujl@scu.edu.cn

沟槽调制的亚波长金属狭缝进行聚焦,理论上可以获得焦深长度为  $3\lambda$  以上的聚焦光斑,但焦斑直径却在波长量级。之后,Liang Feng 等<sup>[12]</sup>试图用金属构成的 SPPs 菲涅耳波带片实现对 SPPs 波的聚焦;Yongqi Fu 等<sup>[13]</sup>提出一种等离子体激元微区波带板(PMZP)以得到超分辨的聚焦光斑,并且工作距离可以拓展到从近场区域( $\lambda/10$ )到准远场区域( $5\lambda$ );Zhiyou Zhang 等<sup>[14]</sup>利用二元光学制作的多带  $\pi$  相位片和消球差透镜组成的光学系统获得了  $0.42\lambda$  超分辨无衍射光束,并使聚焦光能量显著提高。在上述文献研究的基础上,本文设计一种在消球差透镜系统中置入由银板超透镜和连续多带相位光学元件集成的 SPPs 耦合相位波片(耦合波片),以便获得更小的聚焦光斑、

更长的聚焦深度和较高的聚焦效率。

## 2 超聚焦系统结构设计理论

图 1 是我们设计的一个由 SPPs 耦合波片和聚焦透镜构成的超聚焦透镜系统,其中图 1(a)为剖面简图,图 1(b)为耦合波片的三维图。它是由带环形狭缝的薄金属银膜和环形直角三角形棱镜相位板两部分构成。该结构拟利用镀膜的方法在透明衬底上面镀一层合适厚度的银膜,然后在镀好的银膜上面再覆盖合适厚度的光学介质,再用电子束直写或者聚焦离子束按照设计好的参数进行刻蚀,制作出如图 1(b)所示的耦合相位板。然后,把消球差透镜和耦合元件及连接支架,集成为一个超聚焦系统。

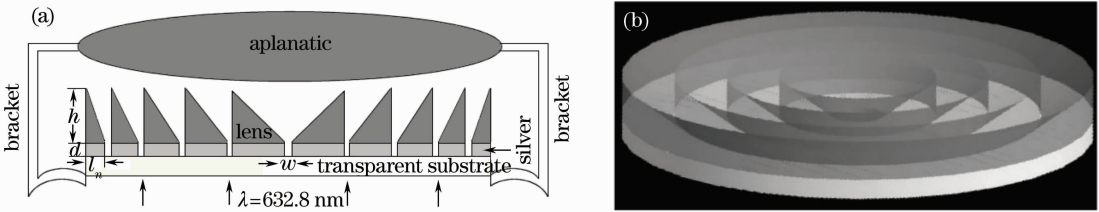


图 1 超聚焦透镜集成系统结构简图。(a)系统结构的剖面图;(b)SPPs 耦合波片的三维结构示意图

Fig. 1 The schematic of superfocusing lens system. (a) Cross-section of the structure;

(b) 3-D structure of SPPs-coupling wave plate

上述设计的聚焦系统,当平行光从银板下方照射到耦合器件上,首先会通过银板的缝隙激发 SPPs 耦合模,并沿着银的表面传播,在银板与环形三角形棱镜的界面处,如果满足波矢匹配条件,SPPs 就会被高效的耦合为光波,被耦合出来的光波经过环形三角形相位板进行相位调制后投射到消球差透镜上,再由透镜进行聚焦。经耦合相位板调制的光场分布,直接影响到系统的聚焦特性。下面将详细讨论这一聚焦过程,给出相位板的优化设计方法。

首先,讨论 SPPs 激发与耦合问题。如图 2(a)所示,为耦合波片的一个微单元,最上面为环形直角三角形棱镜相位板,介电系数为  $\epsilon_a$ ;中间为金属银层,根据 Drude 模型,其介电系数可表示为  $\epsilon_m = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$ ,  $\omega_p$  为银的等离子体频率, $\omega$  为入射光频率, $\gamma$  为碰撞频率;最下层是空气层。一束平行光从空气中入射到耦合波片上会通过银层激发 SPPs,当满足匹配条件时,SPPs 会被三角形环形棱镜相位板耦合为光波。图 2(b)是微单元中光波和 SPPs 的色散关系,可说明上述 SPPs 耦合过程。图中  $\Delta k_x$  为真空中的波矢与 SPPs 波矢之差,表示了光波与 SPPs 之间转换的方向和量化条件<sup>[15]</sup>。当用光波激

发 SPPs 时,由于一般所用光波的动量(波矢  $k$ )要比表面等离子体激元的动量( $k_{SPP}$ )小,需要增加光波的动量, $\Delta k_x$  的方向向右,为此,本系统中 SPPs 的激发是通过金属狭缝产生的高频分量来提供这一动量差;如果要实现把 SPPs 耦合为光波则需要减少 SPPs 动量,此时  $\Delta k_x$  的方向向左,本系统设计一种高折射率三角形棱镜来匹配这一动量差。这样使得 SPPs 激发和耦合都得以在一个器件上方便地实现。

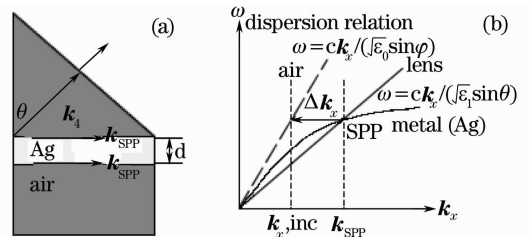


图 2 (a)耦合相位板一微单元剖面图;

(b)光在真空、棱镜、和金属界面 SPPs 的色散曲线

Fig. 2 (a) Cross-section of an element of the coupling phase plate; (b) Dispersion curve of the waves in the vacuum, prism and metal

在优化设计相位结构参数时模拟计算发现(入射光波为  $632.8\text{ nm}$  时),银板的厚度会影响 SPPs 模式的激发与传播,当狭缝宽度一定时,狭缝内

更长的聚焦深度和较高的聚焦效率。

SPPs 耦合传播模的增强因子会随银板厚度的增加而很快的增加,但当银板的厚度超过 50 nm 时,增强因子就会随着厚度的增加而减小。同时,我们知道,光波透过银板狭缝激发的 SPPs,在狭缝中耦合传播常数与狭缝的宽度有关,狭缝越窄传播常数也就越大;反之,狭缝越宽,传播常数就越小,当狭缝宽度增大到波长以上时,SPPs 的耦合效应就基本消逝了,只相当于普通的光波导。因此,设计时可以通过优化狭缝的大小来控制 SPPs 的耦合传播常数,从而控制 SPPs 的相位延迟,即不同宽度的金属狭缝实际上与 SPPs 耦合进入棱镜的相位延迟相对应。为使金属银板激发的 SPPs 重新耦合为光波输出,需满足在银板与棱镜的界面处波矢匹配条件  $k_{3d} \sin\theta = k_{spp}$ ,此时, SPPs 就可以转化为光波进入棱镜中,通过设置棱镜的高度或者宽度可以控制从每

一个环形直角三角形棱镜耦合输出光波的角度。因此,对狭缝宽度和三角形棱镜的优化,可以实现对消球差透镜前表面光波场的优化,为获得高质量聚焦光斑提供有利条件。另外,优化每个狭缝的位置也很重要,它可由  $S_m = \sqrt{m\lambda_{spp} f_{Ag} + m^2 \lambda_{spp}^2 / 4}$  给出<sup>[12]</sup>,其中,  $m$  为整数 ( $m = 1, 2, 3 \dots$ ),  $\lambda_{spp} = 2\pi/k_{spp}$  为 SPPs 波长,  $f_{Ag}$  为金属银板波带片的焦距。如图 1 所示,将耦合相位板放在数值孔径为  $NA=0.83$  的消球差聚焦透镜孔径前表面。用 P 偏振的平面波从银板入射,假设光波通过耦合相位板传播到消球差透镜的前表面的电场分布为  $F_1(\theta)$ ,透镜的透过率函数为  $T(\theta)$ ,则在光轴上距透镜焦点距离为  $z$  的位置处的电场强度可以表示为<sup>[14]</sup>

$$F(z) = \int_0^{\alpha} (1 + \cos\theta) \sqrt{\cos\theta} F_1(\theta) T(\theta) \exp(ikz \cos\theta) \sin\theta d\theta, \quad (1)$$

其中  $\alpha = \arcsin(NA)$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $F_1(\theta)$  可利用时域有限差分 (FDTD) 或严格耦合波 (Rigorous coupled-wave, RCW) 等电磁场矢量计算方法得到。我们采用 FDTD 计算方法得到  $F_1(\theta)$ ,如图 3 所示。其中图 3(a)为振幅分布,图 3(b)为相位分布,3(c)为 FDTD 计算的光场分布的剖面图 ( $x-z$  平面)。

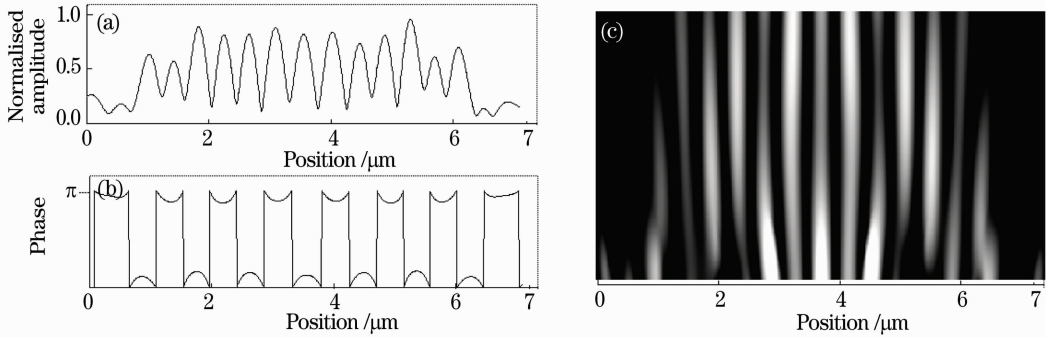


图 3 利用 FDTD 计算的消球差透镜前表面的光场分布。(a)为振幅分布;(b)相位分布;(c) $x-z$  平面上的光场分布  
Fig. 3 The field distribution at the front surface of aplanatic lens by using FDTD method. (a) Amplitude distribution; (b) phase distribution; (c) electric fields in the  $x-y$  plane

由图 3(b)知,透镜前表面光场的相位分布呈现出多带  $\pi$  相位变化,因此在计算聚焦系统光轴上的场强分布时,可以考虑把透镜分成  $n$  个相应的波带,每个波带半径为  $r_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),相应的聚焦角度为  $\alpha_i = \arcsin(r_i/NA)$ 。为了使每一个带的传输系数相同,  $T(\theta)$  可以表示成带级次的函数  $T(\theta) = T(i) = (-1)^{i+1}$ ,于是,(1)式可以写成

$$\begin{aligned} F(z) &= \sum_{i=1}^n T(i) \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} (1 + \cos\theta) \sqrt{\cos\theta} F_1(\theta) \exp(ikz \cos\theta) \sin\theta d\theta \\ &= \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} (1 + \cos\theta) \sqrt{\cos\theta} F_1(\theta) \exp(ikz \cos\theta) \sin\theta d\theta. \end{aligned} \quad (2)$$

要实现较长范围的聚焦,只需使光轴上的光强在某一个较长范围保持相同,由(2)式和  $\alpha_i = \arcsin(r_i/NA)$  可知,就是要优化  $r_i$ ,而  $r_i$  是由透过耦合相位板的光场分布来决定,也就是由金属狭缝位置( $S_m$ ),狭缝宽度( $w$ ),棱镜的高度( $h$ )等共同决定的,因此,实际上是优化耦合相位板的设计。在优化过程中还有一个需要考虑的问题是光束的聚焦半径,需要使光斑半径聚焦到亚波长范围以内。

### 3 系统的参数优化及模拟结果

耦合相位板中环形三角形棱镜高度由  $h = \lambda/[2(n-1)]$  决定,其中  $n$  为棱镜的折射率;每一级次三角形棱镜的宽度与相应级次银板环带相同,由上文中的  $r_m$  确定;金属狭缝的宽度则由  $\lambda_{spp}$  或者  $k_{spp}$  确定。计算中,入射波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,金属银板的厚度为  $d = 200 \text{ nm}$ ,并不是选择使增强因子最大时的  $50 \text{ nm}$ ,主要因为在  $50 \text{ nm}$  时系统的聚焦深度较小,狭缝宽度为  $w = 200 \text{ nm}$ ,棱镜的折射率  $n = 1.57$ ,高度  $h = 555 \text{ nm}$ 。由于利用 FDTD 计算的数据量非常大,计算过程中,所选择聚焦透镜的孔

径设为直径  $15 \mu\text{m}$ 。

综合考虑使焦斑大小和聚焦深度都达到一个比较理想的尺寸,将耦合相位板设计了 7 个环带,优化后的环带半径分别为  $r_0 = 0, r_1 = 1.372 \mu\text{m}, r_2 = 2.439 \mu\text{m}, r_3 = 3.352 \mu\text{m}, r_4 = 4.162 \mu\text{m}, r_5 = 5.061 \mu\text{m}, r_6 = 5.866 \mu\text{m}, r_7 = 6.307 \mu\text{m}$ ,计算结果如图 4(a)所示,得到了峰值半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为  $230.6 \text{ nm}$  的聚焦光斑。作为对比,图 4(b)是去掉耦合相位板,只利用单个透镜进行聚焦的情况,其 FWHM 为  $1.23 \mu\text{m}$ 。由此可以看出,在聚焦透镜前面加一优化设计的耦合相位板,可以得到亚波长尺寸的聚焦光斑,焦斑直径约为  $0.36 \lambda$ 。图 4(c)是焦斑中心沿光轴方向的场强分布,由图可以看出,利用耦合相位板的聚焦长度达到  $12 \lambda$  以上,远大于通常透镜的聚焦长度,其聚焦效率达到  $51\%$ ,而且在很大范围内的强度分布为一相同值。这一聚焦特性可以使其在超分辨成像、光刻、激光亚波长直写以及替代扫描探针等众多领域达到实用化的程度。

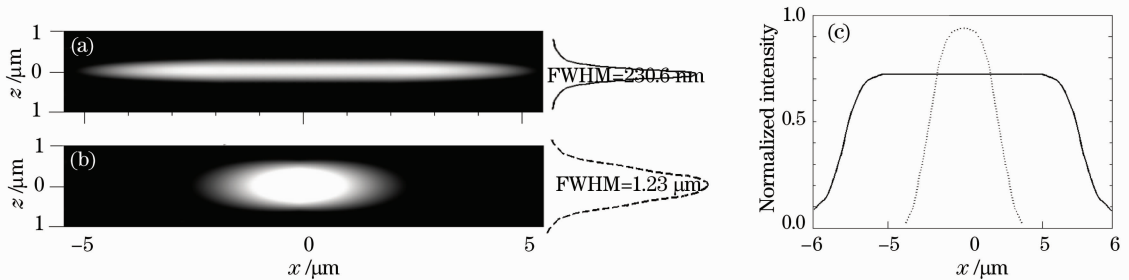


图 4 聚焦光斑在  $x-z$  平面的光场分布。(a)加入耦合相位板的聚焦情况;(b)去掉耦合相位板后的透镜聚焦情况;  
(c)两种系统的焦斑中心沿光轴方向上在焦点附近的强度分布

Fig. 4 The focus spot in  $x-z$  plane. (a) the case of using coupling phase plate; (b) the case of none coupling phase plate;  
(c) the intensity distribution along the optical axis around the focus

## 4 结 论

设计并讨论了一种长焦深亚波长聚焦系统,利用矢量电磁波分析方法和标量衍射理论相结合,通过对 SPPs 超分辨透镜结构参数的优化,得到了焦深长度超过  $12 \lambda$ ,焦斑直径小于  $0.36 \lambda$  的聚焦光斑,并且大大提高了聚焦效率。

### 参 考 文 献

- 1 Raether H. Surface plasmon on smooth and rough surfaces and on gratings[M]. Berlin: Springer, 1988
- 2 Bethe H. A. Theory of diffraction by small holes[J]. *Phys Rev.*, 1944, **66**: 163~182
- 3 Barnes W. L. Dereux A, Ebbesen T. W. Surface plasmon

- subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**: 824~830
- 4 Maier S. A, Atwater H. A. Plasmonics: localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**: 011101
- 5 Okamoto K, Niki I, Shvartser *et al.*. Surface plasmon enhanced light emitters based on InGaN quantum wells[J]. *Nat Mater*, 2004, **3**: 601~605
- 6 Xiaowei Guo, Jinglei Du, Yongkang Guo *et al.*. Large-area surface-plasmon polariton interference Lithography [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 2613~2615
- 7 Fu Min Huang, Nikolay Zheludev, Yifang Chen *et al.*. Focusing of light by a nanohole array[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 091119
- 8 Changtao Wang, Chunlei Du, Xiangang Luo. Refining the model of light diffraction from a subwavelength slit surrounded by grooves on a metallic film [J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **74**: 245403
- 9 Wang B, Wang G. P. Metal heterowaveguides for nanometric

- focusing of light[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2004, **85**: 3599
- 10 Wang G. P., Wang B. Metal heterostructure-based nanophotonic devices: finite-difference time-domain numerical simulations[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**: 1660~1665
- 11 Haofei Shi, Chunlei Du, Xiangang Luo. Focal length modulation based on a metallic slit surrounded with grooves in curved depths [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**: 093111
- 12 Liang Feng, Kevin A. Tetz, Boris Slutsky *et al.*. Fourier plasmonics: Diffractive focusing of in-plane surface plasmon polariton waves[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2007, **91**: 081101
- 13 Yongqi Fu, W. Zhou, L. E. N. Lim. Plasmonic microzone plate: Superfocusing at visible regime[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2007, **91**: 061124
- 14 Haifeng Wang, Luping Shi, Gaoqiang Yuan *et al.*. Subwavelength and super-resolution nondiffraction beam [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2006, **89**: 171102
- 15 Zhiyou Zhang, Jinglei Du, Xiaowei Guo *et al.*. High-efficiency transmission of nanoscale information by surface plasmon polaritons from near field to far field[J]. *J. Appl. Phys.* 2007, **102**: 074301