

# 亚波长金属单狭缝填充金属条的聚焦特性研究

丁功名<sup>1,2</sup> 齐月静<sup>2</sup> 卢增雄<sup>2</sup> 卢荣胜<sup>1</sup> 周培松<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

<sup>2</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094

**摘要** 在亚波长金属单狭缝聚焦结构的基础上,提出了一种易于集成加工的亚波长金属单狭缝填充金属条的超分辨率聚焦结构。采用时域有限差分法(FDTD)对该结构的聚焦特性进行了仿真分析。通过分析研究聚焦结构参数对聚焦效果的影响,获得了超衍射极限的聚焦光斑,该聚焦光斑的归一化光强 $I$ 为4.5、焦半径(FWHM)为300 nm(小于 $\lambda/2$ ,  $\lambda=632.8$  nm)。对于 $\pm 10$  nm的尺寸与定位误差对结构的聚焦特性影响甚微。该模型聚焦结构的横向尺寸仅为2.0  $\mu\text{m}$ ,适用于纳米光子学、集成光子电路等领域,具有较高的应用价值。

**关键词** 光学器件;超分辨率聚焦;时域有限差分法;金属狭缝结构

中图分类号 O472 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.062302

## Research on Focusing Properties of Sub-Wavelength Metal Single-Slit Containing Metal Strip

Ding Gongming<sup>1,2</sup> Qi Yuejing<sup>2</sup> Lu Zengxiong<sup>2</sup> Lu Rongsheng<sup>1</sup> Zhou Peisong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

<sup>2</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract** A super-resolution focusing and easy integrated sub-wavelength metal single-slits containing metal strip structure is proposed based on sub-wavelength metal slit focusing structure. The focusing properties of the structure are simulated and analyzed by using electromagnetic field simulation software finite difference time domain (FDTD). Through the analysis of structural parameters of focusing structure influence on the focusing effect, a high focusing intensity of  $I=4.5$  and a small spot size with full width half maximum (FWHM) of 300 nm (less than  $\lambda/2$ ,  $\lambda=632.8$  nm) is achieved. Meanwhile, the structure's deviation and positioning accuracy of  $\pm 10$  nm have little effect on the focusing property. Such a focusing structure with the predicted focusing efficiency has potential practical applications in nanophotonics and integrated photonics due to the small lateral dimension size of only about 2.0  $\mu\text{m}$ .

**Key words** optical devices; super-resolution focusing; finite difference time domain method; metal slit structure

**OCIS codes** 230.3120; 260.3910; 350.5400

## 1 引言

超分辨率聚焦在纳米信息存储、超分辨显微成像和光刻等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。材料非线性响应<sup>[2-3]</sup>和表面等离子体极化激元(SPPs)<sup>[4-6]</sup>是目前实现超分辨率聚焦的主要技术途径。由于SPPs的局域特性<sup>[1]</sup>,使小型化和高集成性的光学超分辨率聚焦器件成为了可能。

目前,众多研究者提出不同类型结构的亚波长金属结构来操控表面等离子体<sup>[7-12]</sup>以实现超分辨聚焦。Shi等<sup>[8]</sup>提出的多级沟槽围绕单狭缝的狭缝光栅结构, Kim等<sup>[9]</sup>提出的多级介质条围绕单狭缝的狭缝光栅结构,上述结构得到了较好的焦半径(FWHM),但不足之处在于其输出的聚焦光能量较低。为此,Chen等<sup>[10]</sup>提

收稿日期: 2013-11-25; 收到修改稿日期: 2014-01-08; 网络出版日期: 2014-05-14

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02206)

作者简介: 丁功名(1988—),男,硕士研究生,主要从事微纳光学及检测技术等方面的研究。E-mail: dgm@aoe.ac.cn

导师简介: 齐月静(1977—),女,博士,副研究员,主要从事微纳光学及检测技术待方面的研究。

E-mail: qiyejing@aoe.ac.cn

出了多级狭缝围绕的T型狭缝聚焦结构,该结构利用光在狭缝之间的多模干涉和T型狭缝之间的相长干涉实现了比较理想的聚焦效果;但该结构需要加工不同厚度和宽度的狭缝,加工工艺复杂,且由于多级狭缝的横向排列,要实现比较好的聚焦效果其横向尺寸至少要达到 $10\ \mu\text{m}$ ,从而限制了其在纳米光子学、集成光子电路方面的应用。为了弥补该聚焦结构尺寸大的不足,Wu等<sup>[11]</sup>提出了多台阶型单狭缝的聚焦结构,台阶型单狭缝利用了中心狭缝的多模干涉、沟槽的相长干涉和高介电常数基底的法布里振荡效应<sup>[12]</sup>等原理来实现高效聚焦,然而,该结构引入的三级台阶型沟槽结构,由于需要较大的深宽比,所以加工困难<sup>[13]</sup>。

实现具有尺寸小、加工工艺简单、易于集成等特点的亚波长金属聚焦结构成为小型化和高集成性光学超分辨率聚焦器件亟待解决的问题。本文提出了一种聚焦效果好、易于集成加工的新型亚波长金属单狭缝聚焦结构,采用电磁计算软件FDTD Solutions对该结构的聚焦特性进行了仿真分析,分析了金属狭缝和金属条的结构参数对聚焦效果的影响,并分析了该结构的加工误差与金属条的定位精度对聚焦效果的影响,获得了理想的聚焦效果。同时,该结构的横向尺寸只有 $2.0\ \mu\text{m}$ ,因此适用于纳米光子学、集成光子电路等领域,具有较高的应用价值。

## 2 聚焦结构与仿真模型

为了达到聚焦效果好、加工工艺简单、总体尺寸小的目的,提出了一种如图1所示的亚波长金属单狭缝填充金属条的新型聚焦结构。掩膜板由石英基底与金膜组成,在金属狭缝中填充金属条,使原来的单狭缝变为双狭缝。当TM波传播到基底与金属的分界面时产生SPPs,SPPs分别在两个小狭缝内部发生多模干涉<sup>[10-12]</sup>,产生谐振增强。随后,两路SPPs进入中心大狭缝进行第二次多模干涉,进一步产生谐振增强,从而使该结构的聚焦性能大大提高。该结构图中金属单狭缝的宽度和厚度分别为 $W$ 和 $T$ ,金属条的宽度和厚度分别为 $W_c$ 和 $T_c$ 。根据Drude模型,金膜的介电常数表示为

$$\varepsilon_{\text{Au}}(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\varepsilon_p^2}{\omega(\omega + i\nu_c)}, \quad (1)$$

式中 $\omega = 4.73755 \times 10^{14}\ \text{Hz}$ 为入射光频率, $\varepsilon_{\infty} = 9.5$ 为束缚电子对极化率的贡献, $\varepsilon_p = 1.36 \times 10^{16}\ \text{rad/s}^{-1}$ 为金属等离子体频率, $\nu_c = 1.0 \times 10^{14}\ \text{rad/s}^{-1}$ 为碰撞频率。

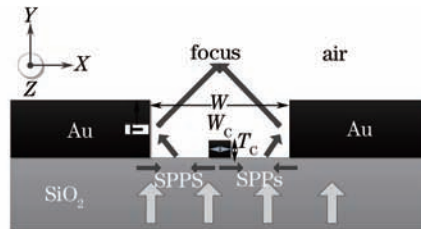


图1 亚波长金属单狭缝填充金属条聚焦结构

Fig.1 Schematic diagram of sub-wavelength metal single-slits containing metal strip

由于上述聚焦结构的特征尺寸小于波长量级,因此采用时域有限差分法(FDTD)方法对该聚焦结构进行严格矢量仿真计算。考虑到该结构在 $Z$ 方向上无变化,利用二维FDTD方法计算 $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ 的 $X$ - $Y$ 平面区域。选取空间步长 $\Delta s = 2\ \text{nm}$ ,时间步长 $\Delta t = \Delta s / 2c$ ( $c$ 为真空中光速),满足数值稳定性条件,设置完全匹配层吸收边界条件<sup>[14]</sup>,入射光波为波长 $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ 的P偏振光(磁矢量平行于狭缝,TM模式)。

## 3 结果分析与讨论

当聚焦结构的尺寸为 $W = 1300\ \text{nm}$ 、 $T = 1000\ \text{nm}$ 、 $W_c = 200\ \text{nm}$ 、 $T_c = 200\ \text{nm}$ 时,FDTD计算得到的亚波长金属单狭缝填充金属条聚焦结构的光强分布如图2所示。图2(a)为整个仿真区域的光强分布,图中白色虚线的位置即为焦点位置,距离狭缝上表面 $200\ \text{nm}$ ;图2(b)为焦点处光强的截面分布,从图中可以看出焦点处的归一化光强 $I = 4.1$ ,焦半径(FWHM)为 $300\ \text{nm}$ (小于 $\lambda/2$ , $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ ),因此突破了衍射极限。

为了进一步研究亚波长金属单狭缝填充金属条聚焦结构的聚焦特性,分析了金属条结构参数和狭缝结构参数对聚焦特性的影响。分析步骤为:1)选定狭缝尺寸 $W$ 和 $T$ ,分析金属条结构尺寸 $W_c$ 和 $T_c$ 的变化对聚

焦特性的影响。2) 根据第一步所得到的比较理想聚焦效果, 选取所对应的金属条结构尺寸  $W_c$  和  $T_c$ , 分析狭缝结构参数  $W$  和  $T$  的变化对聚焦特性的影响。3) 分析该结构的加工误差与金属条的定位精度对聚焦特性的影响。

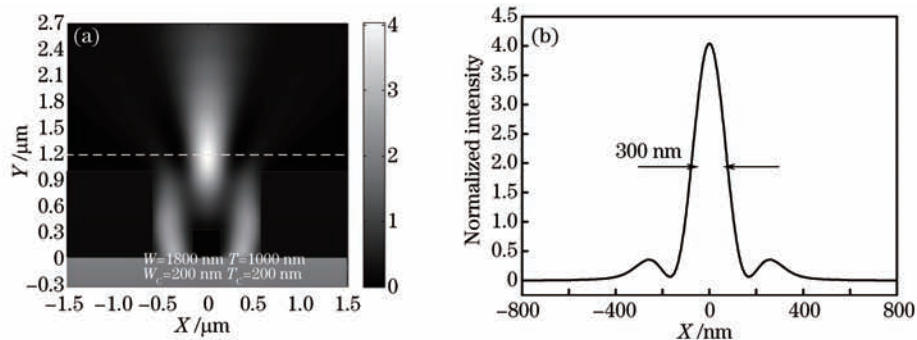


图2 亚波长金属单狭缝填充金属条聚焦结构光强分布图。(a) 仿真区域的光强分布图;(b) 焦点处光强的截面分布图  
Fig.2 Normalized intensity of sub-wavelength metal single-slits containing metal strip. (a) Intensity of the simulation region; (b) intensity distribution along the white-dashed line in panel

### 3.1 金属条结构参数对聚焦特性的影响分析

选定狭缝尺寸  $W=1400$  nm,  $T=1000$  nm, 分析金属条结构尺寸  $W_c$  和  $T_c$  变化对聚焦特性的影响。

图3为亚波长金属单狭缝的聚焦特性与金属条结构参数的关系图, 其中图3(a)为归一化光强与金属条结构参数的关系图, 由图可知, 当金属条宽度  $W_c$  不变时, 归一化强度随着金属条厚度  $T_c$  的增大逐渐减小; 当金属条厚度  $T_c$  不变时, 焦点归一化光强随着金属条宽度  $W_c$  的增大逐渐减小。因为在狭缝宽度一定的情况下, 金属条越宽透光部分越小, 焦点的光强越小, 与实际相符。图3(b)为焦半径与金属条结构参数的关系图, 在金属条宽度一定的情况下, 焦半径随金属条厚度的增大先减小后维持在一个稳定的值。因为金属条的厚度影响第一次多模干涉, 当金属条厚度增加到一定值时, 形成稳定的多模干涉, 此时焦半径不再随金属条厚度增加而减小。

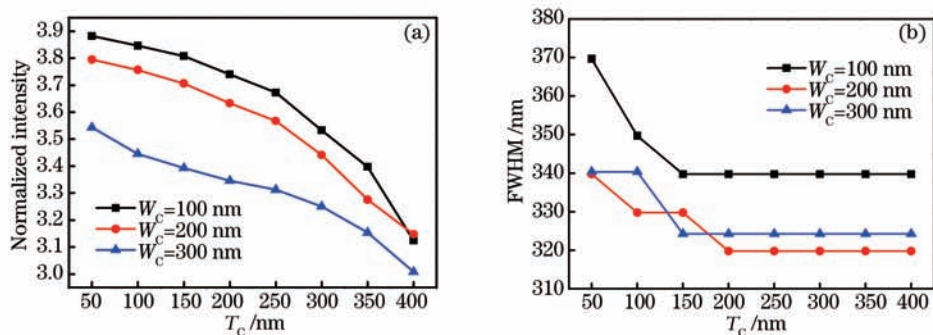


图3 (a) 归一化光强和(b) 焦半径与金属条结构参数的关系

Fig.3 Relationship between (a) normalized intensity and (b) FWHM and the structure of metal strip

### 3.2 狭缝结构参数对聚焦特性的影响分析

综合考虑归一化光强、焦半径等因素, 结合3.1节分析内容选定金属条结构参数  $W_c=200$  nm,  $T_c=200$  nm, 建立如图1所示的仿真模型, 分析狭缝结构参数  $W$  和  $T$  的变化对聚焦特性的影响。

图4为亚波长金属单狭缝的聚焦特性与狭缝结构参数的关系图。图4(a)是焦点的归一化光强与狭缝结构参数的关系图, 由图可知, 当狭缝宽度  $W$  一定时, 焦点的归一化光强随狭缝厚度  $T$  的增大呈先增大后减小的趋势; 图4(b)是焦半径与狭缝结构参数的关系图, 当狭缝宽度  $W$  一定的情况下, 焦半径(FWHM)随狭缝厚度  $T$  的增大呈先减小后增大的趋势。在狭缝厚度增加过程中, 狭缝上表面产生的SPPs离焦点越来越近, 对焦点光强的贡献越来越大, 焦点归一化光强逐渐增大; 但随着狭缝厚度的继续增加, 能量被耦合在狭缝里面, 狭缝上表面将不会形成明显的聚焦光斑。因此, 为同时获得较大的归一化光强和较小的焦半径, 综合图4(a)和4(b)选定狭缝的厚度为1200 nm、宽度为1300 nm。在此结构参数下, 焦点的归一化光强  $I=4.5$ , 焦半径为301 nm, 实现了较好的聚焦效果。



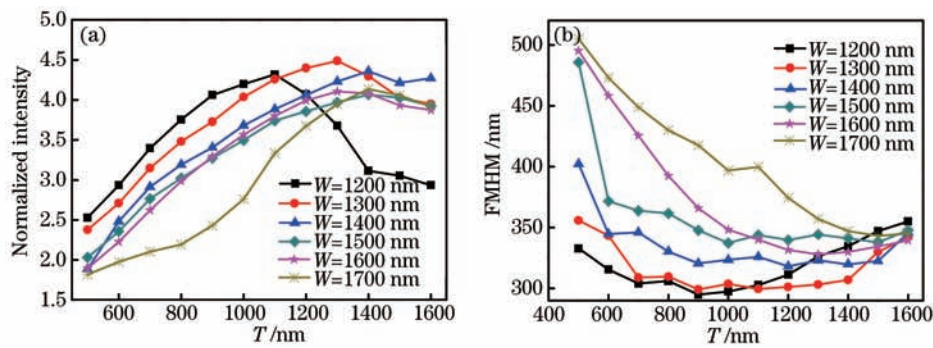


图4 (a) 归一化光强和(b) 焦半径与狭缝结构参数的关系

Fig.4 Relationship between (a) normalized intensity and (b) FWHM and the structure of mental slit

### 3.3 加工误差对聚焦特性的影响分析

由于实际加工存在一定的误差,本节就 $W$ 、 $T$ 、 $W_c$ 和 $T_c$ 的尺寸误差、金属条的定位误差(即金属条的位置偏离狭缝的中心位置)对聚焦特性的影响进行了仿真分析。由于电子束光刻的实际加工精度小于 $10\text{ nm}$ <sup>[15-16]</sup>,故取各个参数的加工误差为 $\pm 10\text{ nm}$ ,仿真结果如图5、图6所示。图5中,结构尺寸偏差在 $\pm 10\text{ nm}$ 范围内时,焦点的归一化光强最大相对变化量为 $1.1\%$ ,FWHM最大变化量为 $0.7\%$ ;图6中,金属条偏离狭缝中心 $\pm 10\text{ nm}$ 范围内时,焦点归一化光强最大相对变化量为 $0.7\%$ ,FWHM最大相对变化量为 $0.4\%$ 。由此可以看出, $\pm 10\text{ nm}$ 加工误差与定位精度对于该结构的聚焦特性影响甚微。同时,该结构为常规的沟槽结构,因此,加工工艺简单。

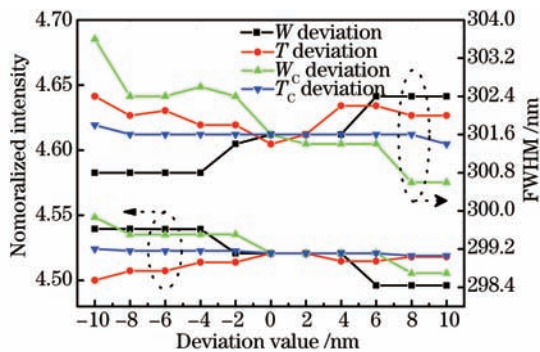


图5 聚焦特性与结构尺寸偏差的关系

Fig.5 Relationship between focus feature and structure dimension deviation

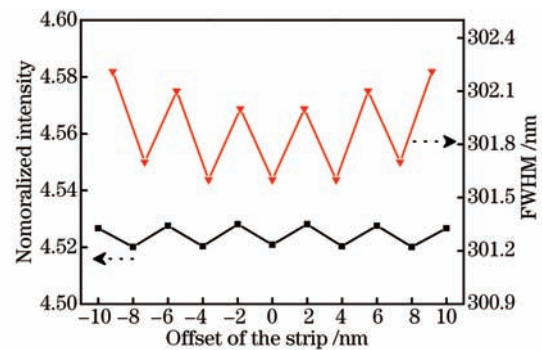


图6 聚焦特性与金属条定位误差的关系

Fig.6 Relationship between focus feature and positional accuracy of the strip

## 4 结 论

提出了一种易于集成加工的新型亚波长金属单狭缝填充金属条的聚焦结构。采用电磁仿真软件对该结构的聚焦特性进行了数值仿真分析。当金属条厚度 $T_c=200\text{ nm}$ 、宽度 $W_c=200\text{ nm}$ ,狭缝厚度 $T=1200\text{ nm}$ 、宽度 $W=1300\text{ nm}$ 时,获得了超衍射极限的聚焦光斑,其归一化光强 $I=4.5$ ,焦半径为 $300\text{ nm}$ (小于 $\lambda/2$ )。对于 $\pm 10\text{ nm}$ 的尺寸与定位误差对该结构的聚焦特性影响甚微,易于加工。同时,该聚焦结构的横向尺寸仅为 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ ,总体尺寸小,适用于纳米光子学、集成光子电路等领域,具有较高的应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- 2 G Bouwhuis, J H M Spruit. Optical storage read-out of nonlinear disks[J]. Appl Opt, 1990, 29(26): 3766-3768.
- 3 K Yasuda, M Ono, K Aratani, et al.. Premastered optical disk by superresolution[J]. Jpn J Appl Phys, 1993, 32(11B): 5210-5213.
- 4 Werayut Srituravanich, Nicholas Fang, Cheng Sun, et al.. Plasmonic nanolithography[J]. Nano Letters, 2004, 4(6): 1085-1088.
- 5 Lina Shi, Hailiang Li, Yuchan Du, et al.. Enhanced optical transmission through asymmetric nanostructured gold films

- [J]. *J Opt Soc Am B*, 2012, 29(12): 3377–3385.
- 6 Zhang Zhiyou, Du Jinglei, Li Min, *et al.*. Optimal design of super focusing lens configuration based on surface plasmon polariton coupling plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2524–2528.  
张志友, 杜惊雷, 李敏, 等. 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[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2524–2528.
- 7 Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 189–193.
- 8 Haofei Shi, Changtao Wang, Chunlei Du, *et al.*. Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths[J]. *Opt Express*, 2005, 13(15): 6815–6820.
- 9 Kim Seyoon, Lim Yongjun, Kim Hwi, *et al.*. Optical beam focusing by a single subwavelength metal slit surrounded by chirped dielectric surface gratings[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(1): 013103.
- 10 Jianjun Chen, Chen Wang, Guowei Lu, *et al.*. Highly efficient nanofocusing based on a T-shape micro-slit surrounded with multi-slits[J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 17734–17740.
- 11 Wu G, Chen J, Zhang R, *et al.*. Highly efficient nanofocusing in a single step-like microslit[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(19): 3776–3779.
- 12 Liu Y, Yu W. Strong intensity modulation of surface plasmon polaritons by a dielectric layer[J]. *IEEE Photonic Tech Lett*, 2012, 24(24): 2214–2217.
- 13 Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebin, *et al.*. Micro-and nano-metal structures fabrication technology and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900128.  
谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900128.
- 14 Wang H, Groen F H, Pereira S F, *et al.*. Optical waveguide focusing system with short free-working distance[J]. *Appl phys lett*, 2003, 83(22): 4486–4487.
- 15 Kobayashi N, Goto K, Wakatsuki T, *et al.*. Improvement of position accuracy in mask-writing electron beam lithography with a multi-pass writing strategy for reducing position errors due to resist charging[C]. *SPIE*, 2008, 7028: 70281Y.
- 16 Duan H, Manfrinato V R, Yang J K W, *et al.*. Metrology for electron-beam lithography and resist contrast at the sub-10 nm scale [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2010, 28(6): C6H11–C6H17.