

多层金属-介质镀膜光栅的聚焦特性

李慧¹ 闫连山¹ 潘炜¹ 罗斌¹ 温坤华² 郭振²

(¹ 西南交通大学信息科学与技术学院信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)
(² 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610029)

摘要 结合等离子金属光栅原理和多层膜理论, 提出一种金属-介质-金属多层光栅结构以增强透射光的聚焦效应。利用时域有限差分(FDTD)法对该多层结构的聚焦特性进行模拟仿真, 得到多层结构的聚焦特性随金属-介质膜层数和凹槽数目的变化特性。结果表明, 通过控制金属-介质层层数或者凹槽数目, 焦距明显改善, 焦距可达 $9.15 \mu\text{m}$, 最大焦深约为 $26.38 \mu\text{m}$, 相对于传统金属光栅, 聚焦效应得到了明显增强。

关键词 薄膜; 表面等离子; 亚波长结构; 多层膜设计

中图分类号 O484.4; TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.013102

Focusing Properties with a Single Subwavelength Slit Flanked by Metal-Dielectric Multilayer Grating

Li Hui¹ Yan Lianshan¹ Pan Wei¹ Luo Bin¹ Wen Kunhua² Guo Zhen²

¹ Center for Information Photonics and Communications, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China
² State Key Laboratory of Optical Technology for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610029, China

Abstract Based on plasmonic metal grating mechanism and multilayer theory, a subwavelength slit with metal-dielectric multilayer composite surface grating which can enhance focusing effect is proposed. According to the finite difference-time domain (FDTD) method, the numerical simulation results demonstrate that the focusing behaviors of the designed structure is related to the numbers of metal-dielectric layers and grooves. It is found that the focal length can be increased significantly by controlling the number of metal-dielectric layers. The maximum focal length and the maximum focus depth can reach 9.15 and $26.38 \mu\text{m}$, respectively. Therefore, the focusing performances are enhanced obviously compared with conventional mono-metal gratings.

Key words thin films; surface plasmons; subwavelength structure; multilayer design

OCIS codes 310.4165; 240.6680; 050.6624

1 引言

自1998年Ebbesen等^[1]发现了二维金属孔阵列的异常透射现象以来, 亚波长金属结构激发表面等离子成为研究热点之一, 为设计金属微纳器件开辟了一个新方向^[2,3]。多种基于表面等离子体的亚波长金属结构被用来实现光束的聚焦调制。三角形亚波长波导阵列利用不同长度波导产生的相位延迟不同而实现聚焦^[2]; 在金属亚波长狭缝周围刻上凹槽能够控制出射场的光束特性, 从而将其压缩成很窄的光束^[3]。近年

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-09-06; 网络出版日期: 2011-11-11

基金项目: 国家973计划(2011CB301800)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0821)和微细加工光学技术国家重点实验室基金资助课题。

作者简介: 李慧(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事亚波长多层膜方面的研究。E-mail: lihui1986226@163.com

导师简介: 闫连山(1971—), 教授, 博士生导师, 主要从事光电子器件和光纤通信系统、光信息处理、光纤传感、表面等离子体和微波光子学等方面的研究。E-mail: lsyan@home.swjtu.edu.cn

来,金属-介质多层结构开始被用来改善聚焦特性^[4,5]。Kim 等^[4]的研究表明,通过在圆环形多层膜结构刻蚀环形缝隙,可以明显改善透射谱,但是焦距与传统结构的焦距相似;Verslegers 等^[5]则发现控制输入波长和入射角能够调制非周期性波导阵列的聚焦效果,适用于较长波长的聚焦效应。

本文提出一种多层金属-介质薄膜,并在中间狭缝周围刻有周期性凹槽的光栅结构。与传统的金属光栅结构相比,由于金属-介质-金属(MDM)波导中表面等离子共振模的有效激发和耦合增强,传输光的聚焦特性(如焦距和焦深)可以得到改善。通过改变金属-介质层的层数和凹槽数目研究其聚焦特性。通过基于时域有限差分(FDTD)法的数值仿真,发现控制金属-介质的层数或凹槽数目可以实现焦距和焦深的改变,焦距可达 $9.15 \mu\text{m}$,焦深最大为 $26.38 \mu\text{m}$ 。这种结构在微纳制造、光刻、小型天线等方面具有一定的应用前景。

2 结构模型与理论

图 1 为多层金属-介质光栅结构,一束 TM 偏振的平面光从结构底面垂直入射,在入射端口激发表面等离子波并沿金属狭缝传输,部分光耦合到介质层中,另外一部分光则衍射到空气中和出射端面上。衍射到端面上的光波将沿着 MDM 波导传输,并在凹槽处耦合。

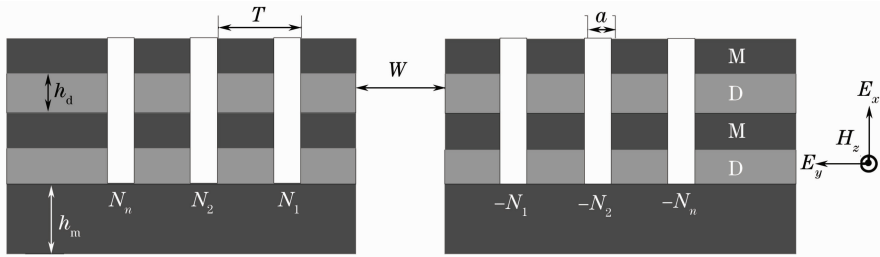


图 1 多层金属-介质光栅结构图。光栅周期为 T ,介质和金属的厚度分别为 h_d 和 h_m

Fig. 1 Schematic diagram of the metal-dielectric multilayer grating. The grating period is T ; the thickness of the dielectric and metal coatings are h_d and h_m , respectively

在结构的出射面,存在光栅衍射。金属薄膜之间的介质层可以增强表面波的激发和光在界面间的耦合,并在凹槽处产生共振,当各凹槽处的光满足相位匹配条件时,远场聚焦效应增强。随着金属-介质层数的增加,这种效应叠加增强。设第 N 个凹槽处的电场为 E_N ,磁场为 H_N ,根据光栅理论^[6],所有凹槽和中间狭缝激发的场强可以计算为

$$H_{yN}(r, \theta) = \frac{1}{\mu_0 c} \sum_{-N}^N E_\alpha \int \phi_\alpha(x) H_0^{(1)}(k|\mathbf{r} - x\mathbf{x}|) dx,$$

式中 $H_0^{(1)}$ 为零阶汉开尔函数, ϕ_α 是光栅表面第 α 个凹槽处的切向电场分量,主要受光栅层数变化的影响。光栅的聚焦效果来自 $2N$ 个凹槽和中央狭缝的出射光的连续叠加。由上式可知,两侧凹槽越多,出射场的总场强越大。

3 仿真结果与讨论

为了研究该结构的聚焦特性,使用二维 FDTD 法进行仿真分析,边界条件为完全匹配边界(PML)条件。入射光波长 $\lambda = 193 \text{ nm}$,金属铝厚度 $h_m = 20 \text{ nm}$,周期 $T = 100 \text{ nm}$,凹槽宽度 $a = 20 \text{ nm}$ 。仿真中所选用的金属材料 Al 和介质材料 MgO 在该波长处的介电常数分别为 $\epsilon_{\text{Al}} = -4.43 + 0.4985i$ 和 $\epsilon_{\text{MgO}} = 4.08$ 。文中主要研究金属-介质膜的层数、凹槽个数等结构参数对聚焦效应的影响。

金属-介质膜的层数对焦距的影响如图 2(a)所示(刻有凹槽的相邻金属-介质层看作一层),焦距随层数的增加明显变化。在层数一定的情况下,凹槽个数越多,焦距值和焦深值越大。凹槽个数较少时,焦深大小随层数的变化曲线较平坦。层数对焦距的影响是由于金属-介质层数增加,光在金属-介质界面的耦合相应增强,损耗大小也发生变化,从而改变焦距。凹槽个数越多,就有越多的表面光波发生耦合激发,增强对远场光的聚焦效应。焦深的变化趋势与焦距的类似,如图 2(b)所示,凹槽数或者金属-介质层数的增加都可以改变焦深。当层数 $1 < N < 5$,凹槽个数 $5 < M < 10$ 时,焦距在 $3.60 \sim 9.15 \mu\text{m}$ 之间变化,同时最大焦深值可达

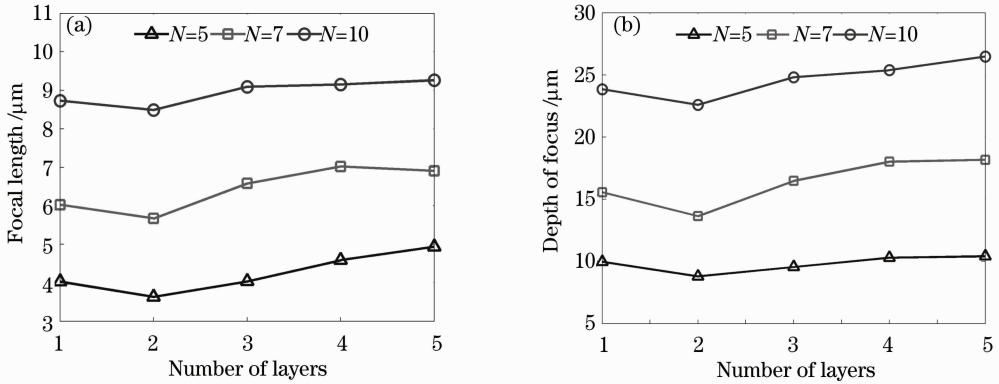


图2 金属-介质层数对焦距(a)和焦深(b)的影响

Fig. 2 (a) Focal length and (b) depth of focus as functions of the metal-dielectric layer number

26.38 μm 。

图3所示为金属-介质层数为5,狭缝两边各有10个凹槽时的远场聚焦图。从图3(a)可以观察到清晰的电场分布和聚焦现象。利用图3(a)中过焦点的水平切线和纵切线进一步分析聚焦性能参数,例如焦距、焦深和半峰全宽(FWHM),结果如图3(b)和(c)所示。焦点的半峰全宽和焦深定义为焦点光强分别沿纵切线和水平切线方向降到最大值的一半时的距离。由图3(b)和(c)可见,光在多层膜间的多次耦合及散射叠加使焦距和焦深都有一定改善。

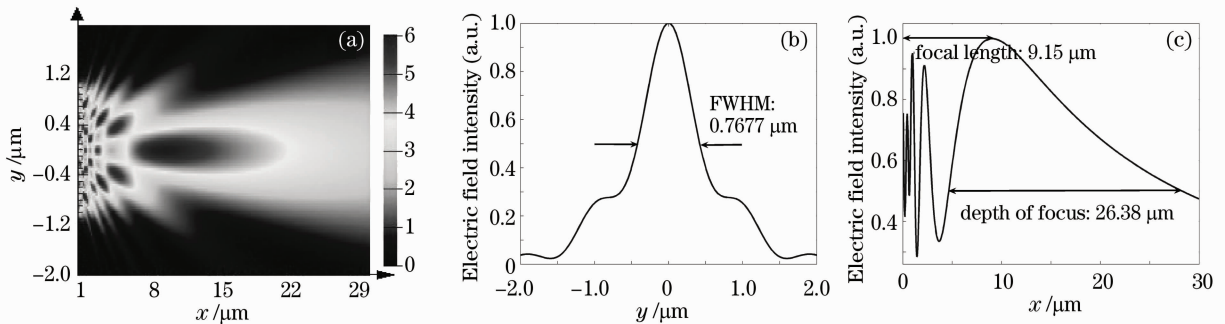


图3 (a)电场强度分布;(b)纵向和(c)水平切线电场

Fig. 3 (a) Intensity of electric field; (b) vertical and (c) horizontal cross-sections of (a)

4 结 论

提出一种可以改善焦距和焦深的亚波长狭缝多层膜光栅结构。基于光栅耦合理论和数值仿真,证明这种结构可以明显增强聚焦效应。聚焦效果的增强不仅来自沿入射光方向的表面等离子波衍射,还来自多个界面间的耦合和散射。数值模拟结果表明聚焦效应可以被结构参数如金属-介质层的层数和凹槽个数等调控。焦距可达 9.15 μm ,最大焦深约为 26.38 μm 。

参 考 文 献

- 1 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- 2 Fu Kangyin, Chen Yuegang. Focusing and beam splitting of metal sub-wavelength waveguide array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0523003
- 3 付康印, 陈跃刚. 金属亚波长波导阵列的聚焦和分束[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0523003
- 3 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**(9): 093111
- 4 H. C. Kim, H. Ko, M. Cheng. High efficient optical focusing of a zone plate composed of metal/dielectric multilayer[J].

- Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3078~3083
- 5 L. Verslegers, P. B. Catrysse, Z. Yu *et al.*. Deep-subwavelength focusing and steering of light in an aperiodic metallic waveguide array[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(3): 033902
- 6 Changtao Wang, Chunlei Du, Yueguang Lü *et al.*. Surface electromagnetic wave excitation and diffraction by subwavelength slit with periodically patterned metallic grooves[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5671~5681