

一种表面等离子体激元定向耦合器的传输特性

李志全 高晓光 牛力勇 张鑫

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 利用三维全矢量时域有限差分法(FDTD)数值模拟了一种波导间隔金属条高度小于金属层厚度的表面等离子体激元(SPP)定向耦合器,并分析了其在基模传输时的模式场分布和能流密度分布,讨论了耦合长度、最大转移功率与间隔金属条高度的变化关系。结果表明,波导内沿纵向的能流密度在靠近间隔金属条部分的强度更大,有助于提高波导间耦合效率,并且当减小间隔金属条的高度时可以有效缩短定向耦合器耦合长度。这种亚波长定向耦合器结构可以应用在基于表面等离子体激元的集成光路中。

关键词 集成光学;表面等离子体激元;时域有限差分法;传输特性

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1010001

Propagation Properties of a Surface Plasmon Polariton Directional Coupler

Li Zhiquan Gao Xiaoguang Niu Liyong Zhang Xin

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A kind of surface plasmon polariton (SPP) directional coupler in which metal strip between the two adjacent waveguides is thinner than the metal film is simulated by using three dimensional full-vectorial finite difference time-domain (FDTD) method. The distributions of electromagnetic field and longitudinal energy flux density when only fundamental mode propagates in waveguides are analysed, and the dependences of coupling length and maximum transfer power on the height of metal strip are discussed. Results show that the energy flux density along the propagation direction distributions mainly in the part near the metal strip, which is beneficial to increase the coupling strength. Also, the efficient decrease of coupling length in directional coupler can be achieved by reducing the height of metal strip between waveguides. This sub-wavelength of directional coupler can be applicable for the optical integrated circuit based on surface plasmon polaritons.

Key words integrated optics; surface plasmon polariton; finite difference time-domain method; propagation properties

OCIS codes 130.3120; 240.6680; 250.5403

1 引言

基于表面等离子体激元(SPP)的光子器件能够突破传统光子器件存在衍射极限的限制,在实现光子器件的纳米集成方面拥有巨大的潜力。目前,基于表面等离子体激元新型纳米光子器件,如分束器^[1,2]、反射器^[3,4]、滤波器^[5]、马赫-曾德尔干涉仪^[6,7]和波导环形共振器^[8]等,引起了人们的广泛关注。

作为光学系统中的基础元件,光定向耦合器被

广泛应用于波导间耦合、滤波、偏振选择、调制、光开关以及激光器等许多方面^[9]。近年来,利用表面等离子体激元特性和优势来实现光定向耦合器的研究也逐渐展开^[2,6,7,10~14]。Zhao等^[11]用二维时域有限差分法(FDTD)验证了亚波长金属狭缝结构表面等离子体激元定向耦合器遵守传统介质型光定向耦合器的一般耦合规律。Veronis等^[13]指出三维结构中表面等离子体波导的耦合主要是通过衬底和覆盖层

收稿日期: 2012-05-23; 收到修改稿日期: 2012-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(61172044)和河北省自然科学基金(F2010002002)资助课题。

作者简介: 李志全(1954—),男,博士,教授,主要从事集成光学、光纤传感及非线性光电检测等方面的研究。

E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

的介质来进行的,而且与二维情形相比,耦合效率有明显的增强。因为二维结构是平板波导,不存在文中所讲的衬底和覆盖层,耦合只能通过金属来进行。Gramotnev 等^[14]对这种狭缝型表面等离子体波导定向耦合器的主要几个结构参数,如两波导间距、金属层厚度和波导宽度等与耦合长度之间的关系进行了深入的研究和分析。

由于表面等离子体波导传输损耗很大^[9,15,16],为满足纳米光子集成的要求,应该保证耦合长度尽量短,避免耦合长度过长而使得定向耦合器失去了实际应用的意义。本文对这种基于狭缝型表面等离子体波导的定向耦合器的传输特性做了进一步的研究,利用三维 FDTD 法数值模拟了一种波导间隔金属条高度小于金属层厚度的表面等离子体激元定向耦合器,分析了其在基模传输时的模式场分布和能流密度分布,并研究了耦合长度和最大转移功率等随间隔金属条高度改变而改变的规律。

2 基本原理

图 1 为表面等离子体激元定向耦合器的模型示意图,仅考虑了其中有效耦合的部分。在衬底上镀一层金属薄膜,再上为覆盖层。在金属薄膜上刻蚀两条相邻的狭缝,填充介质,这样,考虑 x 方向分布,可以将其看作是两条相邻的狭缝型表面等离子体波导或者是金属-介质-金属(MIM)表面等离子体波导。金属层厚度为 h ,两波导相互平行,宽度均为 w ,左右均匀对称,之间的金属层(间隔金属条)宽度为 s ,这样就形成了一个最简单的定向耦合器^[9]。

利用 FDTD 法模拟分析了图 1 所示的定向耦合器。其中,FDTD 空间离散网格步长 $\Delta x = \Delta y = 2 \text{ nm}$, $\Delta z = 5 \text{ nm}$,保证计算收敛性。计算中设置各

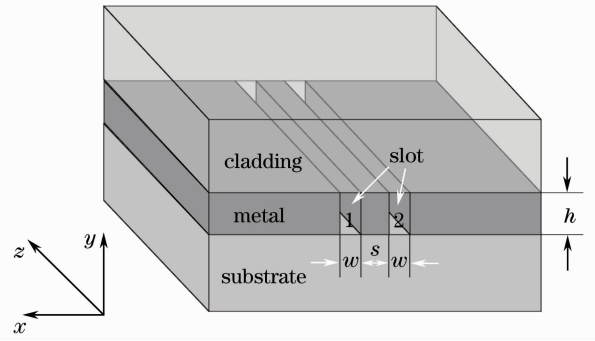


图 1 表面等离子体激元定向耦合器的示意图

Fig. 1 Schematic of SPP directional coupler

向异性完全匹配层作为吸收边界条件。用光波长 $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ 的平面波来激发表面等离子体激元。设置衬底、覆盖层和金属狭缝中介质折射率均为 1.44,金属选为银,其光学特性根据 Lorentz-Drude 模型获得^[17,18],在此波长下 $n_{\text{metal}} = 0.144 + 3.809i$ 。一般将此类波导中的表面等离子体激元模式按照电场 E_x 的分布归为四类^[19],分别为 $s_x^m s_y^n, s_x^m a_y^n, a_x^m s_y^n, a_x^m a_y^n$,其中 s 和 a 分别表示 E_x 沿着 x 或 y 方向是对称或反对称的(或者称作偶对称、奇对称),上标 m 和 n 表示模式的阶数。研究发现 w 和 h 在 $10 \sim 500 \text{ nm}$ 范围内, $s_x^0 s_y^0$ 模始终为导模,并且其传播常数的实部 β_r 比其他模式都要大,因此可以将其看成是该结构中的基模。实验中可以限制波导 x, y 方向上尺寸,使波导内只有基模 $s_x^0 s_y^0$ 传输。设置金属层厚度 $h = 100 \text{ nm}$,狭缝宽度 $w = 50 \text{ nm}$,两波导间隔金属条宽度 $s = 60 \text{ nm}$ 。图 2 为用 FDTD 法模拟得到的定向耦合器 xy 截面 E_x 和 E_y 场分布图。由图 2 可知,左侧的波导 1 中 $s_x^0 s_y^0$ 模的 E_x 场在 x, y 方向均呈对称分布,而 E_y 场在 x, y 方向均呈反对称分布。

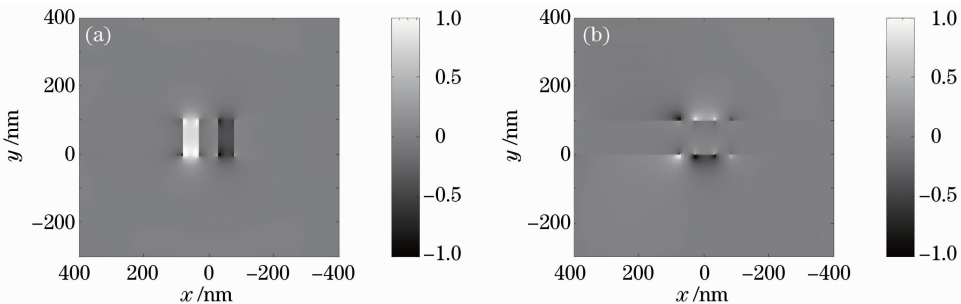


图 2 xy 面上场分布图($z=200 \text{ nm}$)。(a) E_x ; (b) E_y

Fig. 2 Distributions of the field in xy plane ($z=200 \text{ nm}$). (a) E_x ; (b) E_y

设某一时刻表面等离子体激元从波导 1 中输入,并沿 z 轴方向向前传播,波导 2 中没有波场。由

于光学隧道效应,波导 1 中表面等离子体激元在衬底、覆盖层介质和间隔金属条中的消逝场渗透到波

导 2 中(其中衬底和覆盖层介质中的消逝场占主要部分),在波导 2 中激励起表面等离子体激元,并沿着 z 轴方向传播。当耦合距离 $z=L_c$ 时,波导 1 中功率降为极小值,其中 L_c 即为耦合长度^[9]。然后,波导 2 中的表面等离子体激元又向波导 1 中渗透。这样,表面等离子体激元就周期性地波导 1、波导 2 之间传递。在图 3 中可以看出这种场强弱变化的过程(图 3 为数值模拟过程稳定后定向耦合器 xz 截面上的 E_x 场分布)。

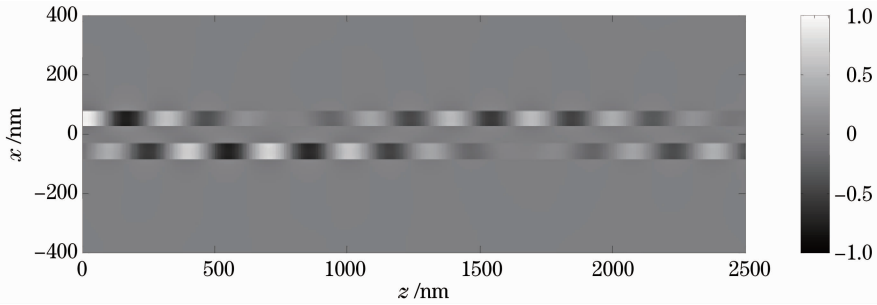


图 3 xz 面上 E_x 场分布图($y=50$ nm)

Fig. 3 Distributions of the field E_x in xz plane ($y=50$ nm)

3 结构模型与特性分析

3.1 结构模型

为研究表面等离子体激元定向耦合器的传输特性,实现其耦合长度的缩短,在 Gramotnev 等^[14]研究的表面等离子体激元定向耦合器,并参考一些文献中表面等离子体波导的制作工艺^[19~21]的基础上,提出了一种间隔金属条高度小于金属层厚度的表面等离子体激元定向耦合器,如图 4 所示。

因为耦合主要是通过衬底和覆盖层的介质来进行的,这里令其间隔金属条在 y 方向上更短,以便有更多的介质来实现表面等离子体激元的耦合,达到增强耦合效率、缩短耦合长度的目的。这里参照二氧化硅将衬底材料折射率 $n_{\text{substrate}}$ 设为 1.44,设置金属层狭缝填充介质折射率 $n_{\text{slot}}=1.49$,假定为聚

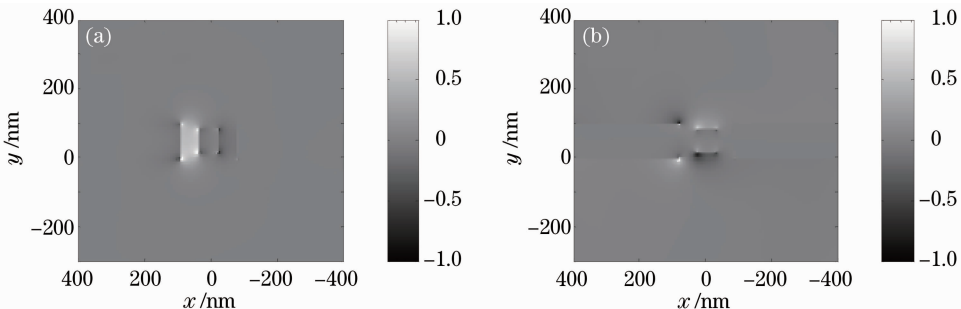


图 5 $H=70$ nm 时 xy 面上场分布图($z=200$ nm)。(a) E_x ; (b) E_y

Fig. 5 Distributions of the field in xy plane ($z=200$ nm) when $H=70$ nm. (a) E_x ; (b) E_y

由图 3 可知,随着传输距离的增大 E_x 场强度不断减弱(这里不考虑耦合作用影响,仅关注其中几个功率转移的极大值),仅传输几个微米后,变化就已经很明显。表明这种波导的传输损耗是非常大的。这就要求在制作表面等离子体激元定向耦合器时,应该保证耦合长度尽量短。因为传输距离越短,损耗越小,可供转移的能量就越大。在巨大的损耗下,过长的耦合长度必将使得定向耦合器无法满足大规模光子集成的要求。

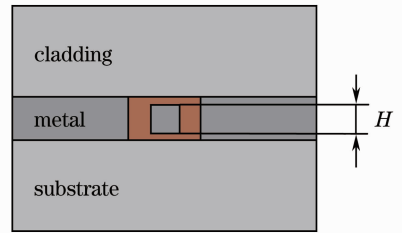


图 4 新型表面等离子体激元定向耦合器结构的截面示意图

Fig. 4 Cross section of new structure of SPP directional coupler

合物聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA),覆盖层折射率 n_{cladding} 也设为 1.44。这样通过全内反射来实现对导模在 y 轴方向的限制。

同样设置金属层厚度 $h=100$ nm,狭缝介质宽

度 $w=50\text{ nm}$, 间隔金属条宽度 $s=60\text{ nm}$, 其高度为 H , 并处于中心位置, 距离衬底和覆盖层是等距离的。金属仍为银, 入射波长 $\lambda_0=632.8\text{ nm}$ 。这里以间隔金属条高度 $H=70\text{ nm}$ 为例观察定向耦合器基模传输时的场分布图。由图 5 中 E_x, E_y 场分布图可以看出, 缩短的间隔金属条使模式场分布发生了变化。在这里 E_x 场大约呈梯形分布, 而在图 2 中接近于矩形。

3.2 间隔金属条高度对耦合长度的影响

图 6 为通过 FDTD 法数值模拟得到的耦合长度 L_c 随 H 变化的关系图。由图可知, 在这个数值范围内, 耦合长度 L_c 随间隔金属条高度 H 的增大几乎是呈线性增长。对于金属条高度小于 100 nm , 也就是小于金属膜的厚度时, 定向耦合器的耦合长度也更短了, 而且随 H 的减小持续缩短。这可以说明通过减小间隔金属条高度确实能够实现耦合效率的提高、耦合长度的缩短。

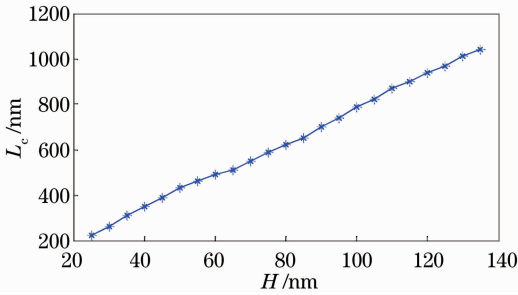


图 6 耦合长度 L_c 随间隔金属条高度 H 的变化关系

Fig. 6 Dependence of coupling length L_c on height of interval metal strip H

图 7 为在间隔金属条高度 $H=70\text{ nm}$ 时 xy 面上能流密度(坡印亭矢量) S_z 的分布图。这里 $S_z = \frac{1}{2}(E_x H_y^* - E_y H_x^*)$, 式中 H_x^*, H_y^* 分别为 H_x, H_y 的共轭复数。图 7 所示的为 S_z 实部的变化。观察 xy 面上 S_z 分布, 可以发现大部分场能量聚集在靠近间

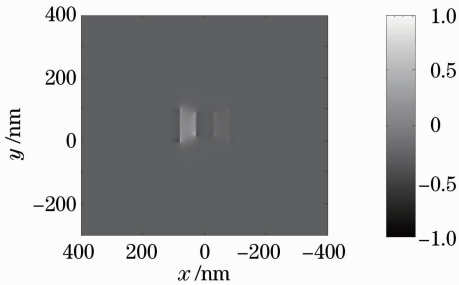


图 7 $H=70\text{ nm}$ 时 xy 面上 S_z 分布图 ($z=200\text{ nm}$)

Fig. 7 Distributions of S_z in xy plane ($z=200\text{ nm}$) at $H=70\text{ nm}$

隔金属条的区域。这有助于增大表面等离子体激元在间隔金属条和其周围介质中的消逝场, 进而提高耦合效率。

另外, 由图 6 可知, 当间隔金属条高度继续增大, 大于 100 nm 时, 即超出金属膜的厚度时, 耦合长度也随着变得更大。因为耦合主要是通过衬底和覆盖层介质进行的, 间隔金属条高度的增大使耦合可以利用的介质变少, 耦合效率变低, 耦合长度变长。因此, 在集成光路中可以通过这种增加间隔金属条高度的方法来降低相邻波导之间的耦合, 减少彼此信号之间干扰, 进而来提高光子回路的集成度。

3.3 间隔金属条高度对最大转移功率的影响

随着表面等离子体激元沿 z 轴方向向前传播, 能量在两波导间转移, 波导 1 中的功率逐渐减小, 波导 2 中的功率逐渐增大。这里应注意, 由于传输损耗的原因, 当波导 2 中功率达到极大值时, 波导 1 中功率并未减小到它的极小值。也就是说波导 2 中这个极大值并不是在 $z=L_c$ 处, 而是在 L_c 之前。

通过计算得出了在波导 2 中第一次出现的光功率极大值随间隔金属条高度 H 变化的关系图, 如图 8 所示。由图 8 可知, 归一化最大转移功率 P_{\max} 随间隔金属条高度 H 的减小呈增大趋势, 表明通过缩小间隔金属条的高度的确可以增强波导间的耦合效率。

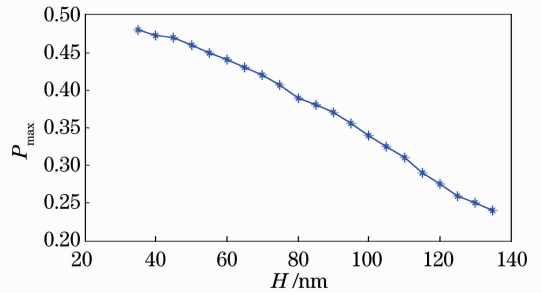


图 8 最大转移功率 P_{\max} 随间隔金属条高度 H 的变化关系

Fig. 8 Dependence of maximum transfer power P_{\max} on height of interval metal strip H

4 结 论

利用三维全矢量 FDTD 法数值模拟了一种波导间隔金属条高度小于金属层厚度的表面等离子体激元定向耦合器结构, 并分析了其在基模传输时的模式场分布和能流密度分布, 通过研究耦合长度、最大转移功率与间隔金属条高度的关系发现, 减小定向耦合器两相邻波导间隔金属条的高度可以提高耦

合效率并有效缩短耦合长度。模拟的结构为表面等离子体激元定向耦合器的设计和制作提供了一定参考。另外发现,通过增大相邻波导间隔金属条高度(使其超过金属层厚度)可以减弱耦合作用,进而提高表面等离子体激元集成光路的集成度。

参 考 文 献

- 1 G. Veronis, S. Fan. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(13): 131102
- 2 Z. Han, A. Y. Elezzabi, V. Van. Wideband Y-splitter and aperture-assisted coupler based on sub-diffraction confined plasmonic slot waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(13): 131106
- 3 J. Q. Liu, L. L. Wang, M. D. He *et al.*. A wide bandgap plasmonic Bragg reflector [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 4888~4894
- 4 Y. K. Gong, L. R. Wang, X. H. Hu *et al.*. Broad-bandgap and low-sidelobe surface plasmon polariton reflector with Bragg-grating-based MIM waveguide[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 13727~13736
- 5 J. Tao, X. G. Huang, X. S. Lin. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric size[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 13989~13994
- 6 Z. Han, L. Liu, E. Forsberg. Ultra-compact directional couplers and Mach-Zehnder interferometers employing surface plasmon polaritons[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**: 690~695
- 7 M. Pu, N. Yao, C. Hu *et al.*. Directional coupler and nonlinear Mach-Zehnder interferometer based on metal-insulator-metal plasmonic waveguide [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(20): 21030~21037
- 8 T. Tang, X. Wen, C. Yin *et al.*. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 24096~24101
- 9 She Shouxian. *Physical Basis of Guided Optics*[M]. Beijing: Northern Jiaotong University Press, 2002. 153~178
- 余守宪. *导波光学物理基础*[M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2002. 153~178
- 10 R. Charbonneau, N. Lahoud, G. Mattiussi *et al.*. Demonstration of integrated optics elements based on long-ranging surface plasmon polaritons[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(3): 977~984
- 11 H. W. Zhao, X. G. Guang, J. T. Huang. Novel optical directional coupler based on surface plasmon polaritons [J]. *Physica E*, 2008, **40**: 3025~3029
- 12 Q. F. Zhu, D. Y. Wang, J. S. Ye *et al.*. Coupled metallic ring gap waveguide[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**: 1542~1545
- 13 G. Veronis, S. H. Fan. Crosstalk between three-dimensional plasmonic slot waveguides [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2129~2140
- 14 D. K. Gramotnev, K. C. Vernon, D. F. P. Pile. Directional coupler using gap plasmon waveguides [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **93**: 99~106
- 15 H. Raether. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*[M]. Berlin: Springer, 1988
- 16 Qin Xiaojuan, Guo Ya'nan, Xue Wenrui. Numerical simulation of a surface plasmonic waveguide with double parallel columniform metallic nanorods coated with gain medium [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0310001
- 秦小娟, 郭亚楠, 薛文瑞. 带有增益介质包层的两个平行圆柱形纳米金属棒构成的表面等离子体光波导的数值模拟[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0310001
- 17 A. D. Rakic, A. B. Djuricic, J. M. Elazar *et al.*. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(22): 5271~5283
- 18 E. D. Palik. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. San Diego: Academic Press, 1985
- 19 L. Liu, Z. H. Han, S. L. He. Novel surface plasmon waveguide for high integration[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(17): 6645~6650
- 20 S. Y. Zhu, T. Y. Liow, G. Q. Lo *et al.*. Silion-based horizontal nanoplasmonic slot waveguides for on-chip integration [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(9): 8888~8902
- 21 D. X. Dai, Y. C. Shi, S. L. He *et al.*. Gain enhancement in a hybrid plasmonic nano-waveguide with a low-index or high-index gain medium[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(14): 12925~12936

栏目编辑: 韩 峰