

doi: 10.3788/gzxb20144302.0213002

一种硅基金属狭缝表面等离子体波导的设计

李志全, 冯思远, 孙宇超, 牛力勇, 王志斌, 张波

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:设计了一种适用于光电子集成电路的表面等离子体波导结构, 利用三维全矢量时域有限差分法对该波导结构进行了数值模拟, 并分析了其在基模传输时的模式场分布与金属结构顶角的关系以及其能量限制性, 研究了该波导结构在不同金属材料下的有效折射率和传播长度对芯层宽度的依赖关系, 讨论了两个该波导结构之间的耦合长度、最大转移功率和彼此间的串扰。结果表明: 光场被高度限制在芯层区域, 在金属结构顶角为 135° 时, 其能量限制因子更高; 在金属材料确定的情况下, 有效折射率随芯层宽度增大而减小, 而传播长度增大; 在芯层宽度一定的条件下, 两个波导结构间的耦合长度随波导间距增大而增大, 最大转移功率和串扰随波导间距增大而减小。

关键词:集成光学; 光波导; 表面等离子体波导; 时域有限元差分法; 光电子集成电路

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0213002-4

Design of a Silicon-based Slot Surface Plasmonic Waveguide

LI Zhi-quan, FENG Si-yuan, SUN Yu-chao, NIU Li-yong, WANG Zhi-bin, ZHANG Bo

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

Abstract: A type of surface plasmonic waveguide applied in the optoelectronic integrated circuit was designed. It was simulated by using three dimensional full-vectorial finite-difference time-domain method. The dependence of distributions of electromagnetic field, effective index and propagation length of the fundamental mode supported by this waveguide on geometrical parameters were presented. The coupling length, maximum transfer power and crosstalk between two waveguide structures were studied. The simulation results showed: the light field is highly confined to the core layer area, and the energy restriction factor of light field is higher when the metal structure apex angle is 135 degrees; at a given metal, the effective index will decrease as the core width of ridge increases, meanwhile the propagation length of the fundamental mode will increase as radius of ridge increases; as the waveguide distance increases under given core width, the coupling length between two waveguide structures will increase and the maximum transfer power and crosstalk will decrease.

Key words: Integrated optics; Optics waveguide; Surface plasmonic waveguide; Finite-Difference Time-Domain; Optoelectronic integrated circuit

OCIS Codes: 130.0130; 230.7380; 240.6680; 250.3140

0 引言

近 10 年来, 基于表面等离子体激元 (Surface Plasmon Polariton, SPP) 的表面等离子体波导 (Surface Plasmonic Waveguides, SPWs) 得到了快速的发展。这种波导提供了一种新的导波机制, 可以在金属和绝缘体的界面以 SPP 的形式导引光的传播^[1]。它克服了传

统光波导和光子晶体波导中存在的衍射极限问题, 被普遍认为在未来纳米光电集成中具有潜在的应用价值, 有望成为突破光子器件尺寸限制和电子器件传输速度限制的桥梁。文献 [2] 提出凹槽型 (Channel Plasmon Polariton, CPP) 表面等离子体波导, 文献 [3-4] 提出介质加载型表面等离子体波导 (Dielectric-Loaded Surface Plasmon Polariton, DLSP), 文献 [5-7] 提出金

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61107039) 和河北省自然科学基金 (No. F2012203204) 资助

第一作者: 李志全 (1954-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为集成光学、光纤传感及非线性光电检测。Email: lzq54@ysu.edu.cn

收稿日期: 2013-06-21; 录用日期: 2013-09-09

<http://www.photon.ac.cn>

属狭缝型表面等离子波导结构等,其中金属狭缝表面等离子波导结构有更高的限制性和更简单的制作工艺,但由于高限制性带来的高损耗,使得该波导结构的传输长度偏低.2008年,陈献等人提出了一种在芯区尺寸为 $200 \times 800 \text{ nm}^2$ 时,能量限制因子达到98.5%的高限制性金属狭缝表面等离子波导结构^[7].

基于绝缘衬底上的硅(Silicon-On-insulator, SOI)结构的表面等离子波导^[8-14]也受到广泛关注,P. D. Flammer^[11]等人设计了传输长度达到34 cm的基于该结构的脊状混合表面等离子波导.2011年,Kwon M S^[10]提出一种硅基 MISIM 结构,加强了脊状混合表面等离子波导的横向限制性.

本文设计了一种适用于光电子集成电路的表面等离子体波导结构,该结构在横向上采用金属缝表面等离子波导结构来产生和限制表面等离子波,使其能够在更小的芯层区域内限制更强的能量;在纵向上采用 SOI 结构来限制电磁场和降低传输损耗,并运用三维全矢量时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法对该结构进行了数值模拟.

1 结构模型和理论计算

所设计的表面等离子波导结构如图1,在横向上采用金属-介质-金属结构,两边为金属,芯层为高折射率介质;在纵向上采用三层介质平板波导,两边为低折射率介质;梯形金属顶角为 θ ,芯层介质厚度为 w ,宽度为 d .

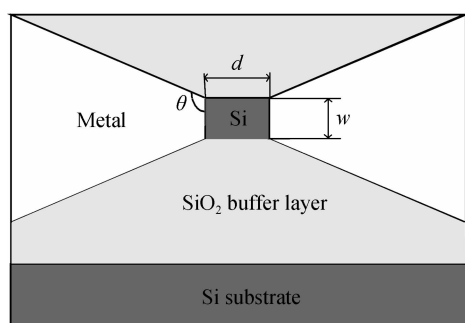


图1 硅基金属缝表面等离子波导结构横截面

Fig. 1 Silicon-based slot surface plasmonic waveguide cross section view

利用 FDTD 法模拟分析了图1所示波导结构的模式场分布和传输特性.考虑到该波导在光电子集成电路中的应用,参考硅基光电子器件在光电子集成方面的优势,选取硅作为芯层高折射率介质和基底,二氧化硅作为缓冲层,使其构成标准的 SOI 结构.

根据麦克斯韦方程以及合适的边界条件,在只考虑 TM_0 模的情况下,该对称结构波导的色散关系方程^[15]为

$$\tanh(k_d d/2) = -(\epsilon_m k_m) / (\epsilon_d k_d) \quad (1)$$

在只考虑反对称模式的 TM_1 模的情况下,该波导

结构色散关系方程^[15]为

$$\tanh(k_d d/2) = -(\epsilon_m k_d) / (\epsilon_d k_m) \quad (2)$$

式中 $k_d = \sqrt{\gamma_{s,a}^2 - \epsilon_d k^2}$, $k_m = \sqrt{\gamma_{s,a}^2 - \epsilon_m k^2}$. $\gamma_s = \alpha_s + i\beta_s$ 是该波导模的 TM_0 复传播常量, $\gamma_a = \alpha_a + i\beta_a$ 是 TM_1 模的复传播常量,下标 a, s 分别代表反对称模式和对称模式; k 是自由空间传播常量, $k = 2\pi/\lambda$; $\epsilon_d, \epsilon_m, \epsilon_{rm}$ 分别为介质(下标 d)、金属(下标 m)介电常量和金属介电常量的实部(下标 rm); λ 为入射光波长; d 为芯层介质宽度.

对于方程(1),当芯层介质宽度足够小($d \rightarrow 0$)时,可以近似认为 $\tanh(k_d d/2) \approx k_d d/2$.代入方程(1),得到

$$\gamma_s = k \{ \epsilon_d + 0.5(\gamma_0/k)^2 + [(\gamma_0/k)^2 [\epsilon_d - \epsilon_m + 0.25(\gamma_0/k)^2]^{1/2}] \}^{1/2} \quad (3)$$

γ_0 是表面等离子波极限接近0时的传播常量,其值为 $\gamma_0 = -2\epsilon_d/d\epsilon_m$.在高度集成的结构中必须考虑抑制两个波导间的串扰.当两波导间距足够大时,串扰为 $e^2 P_{\max}$, P_{\max} 是最大转移功率^[16-19].

$$P_{\max} \approx \frac{\exp(-2x \arctan(x^{-1}))}{1+x^2}, x = \frac{2Lc}{\pi Lp} \quad (4)$$

$Lc \equiv \pi/|\beta_s - \beta_a|$ 是耦合长度, $Lp \equiv 2/(\alpha_s + \alpha_a)$ 是平均衰减长度, α_s, β_s 和 α_a, β_a 分别是对称模式和反对称模式的传播常量 γ_s, γ_a 的实部和虚部.

2 结果与讨论

对于图1所示的槽型表面等离子体波导,首先分析了该结构的基模场分布,并对比说明了本文所设计波导结构的高限制性,然后对其有效折射率 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 、传播长度 L_{prop} 与波导几何参量及不同金属之间的关系进行了研究,最后讨论了这种波导结构的耦合特性. $\text{Re}(n_{\text{eff}}) = \text{Re}(\beta) \lambda / 2\pi$, $L_{\text{prop}} = 1/2\text{Im}(\beta)$,在工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,金属金、银、铝的相对介电常量分别为 $-95.53 + 11.07i$ 、 $-129.1 + 3.28i$ 和 $-242.6 + 49.42i$ ^[10].

2.1 基模场分布

图2为表面等离子体波导的基模场分布与角度 θ 的关系.以前的波导设计多是考虑 $\theta = 90^\circ$ 的情况,本文研究 $\theta = 135^\circ$ 时该波导结构的基模场分布.从图2中可以看出,基模的 E_x, E_z 场主要集中在靠近边角的芯层区域, E_y 场主要集中在四个边角处.在其他结构参量相同的情况下,金属顶角 $\theta = 135^\circ$ 时的 E_x, E_z 场的强度更集中于芯层.定义限制因子为结构芯层横截面内模式所带的复功率与整个横截面模式所带的复功率的比值,其表达式为 $cf = \left| \frac{\iint_{A_c} S_z ds \right| / \left| \frac{\iint_{A_\infty} S_z ds \right|$ (A_c 代表结构芯层区域面积, A_∞ 表示整个结构横截面面积, $S_z = (E_x H_y^* - E_y H_x^*)/2$ 代表玻印亭矢量的 z 分量, $H_{x,y}^*$ 表示 $H_{x,y}$ 的共轭复数).通过仿真计算可以得到对于同样的芯区尺寸 $160 \times 300 \text{ nm}^2$, $\theta = 90^\circ$ 和 $\theta = 135^\circ$ 的限制因

子分别为 90.2% 和 93.9%;而当芯区尺寸增大到 $200 \times 400 \text{ nm}^2$ 时, $\theta = 135^\circ$ 的限制因子达到 96.5%,因此增大芯层尺寸可以将更多的能量限制在芯层. 该结

构相对于其他已知结构^[7]的限制性有明显增强,在达到同样的限制因子时有更小的结构尺寸.

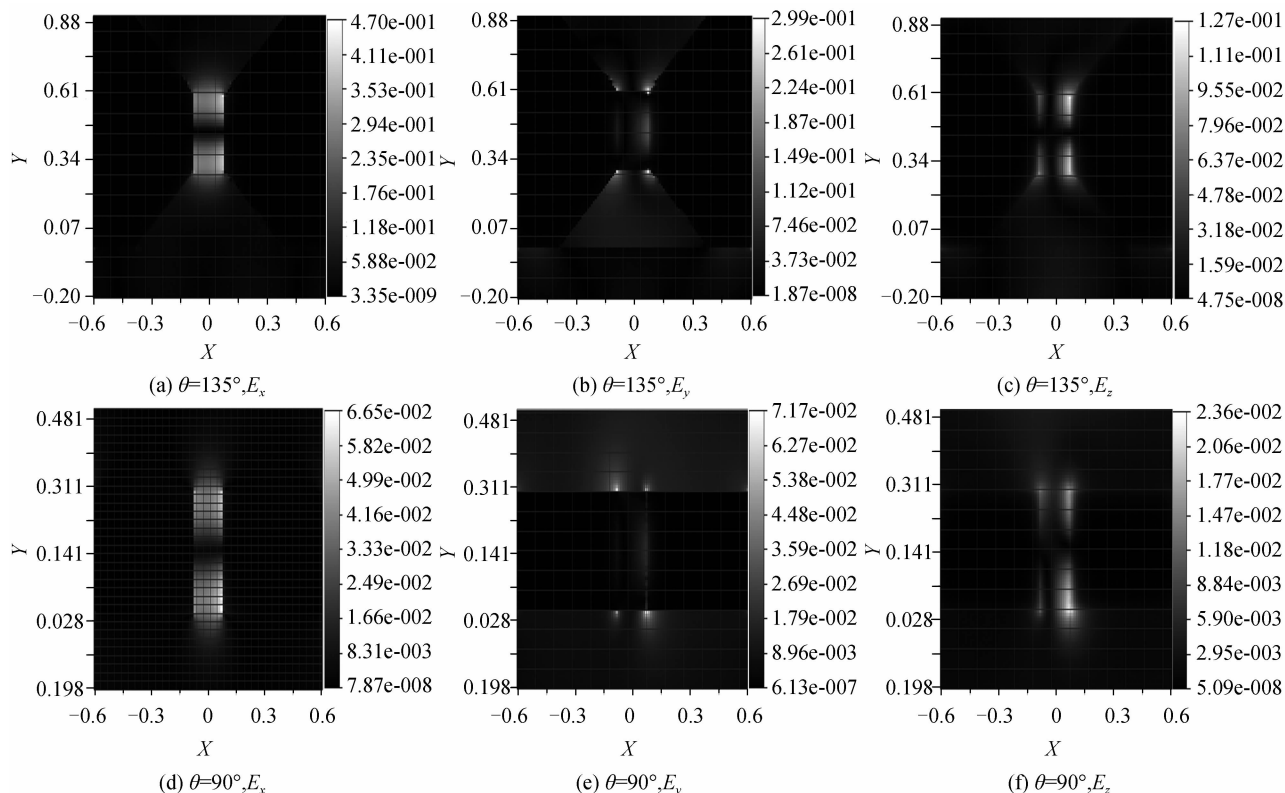


图 2 表面等离子体波导的基模场分布与角度 θ 的关系

Fig. 2 Relations of the distribution of fundamental mode of surface plasmonic waveguides with θ

2.2 传输特性

因为有效折射率、传播长度 L_{prop} 是衡量表面等离子体光波导传播特性的两个重要的物理量,所以分析了图 1 所示波导结构在金属选择金、银、铝时的有效折射率 $\text{Re}(n_{eff})$ 、传播长度 L_{prop} 随波导几何参量的变化关系.

在工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,分别给出了金属材料为金、银、铝时,有效折射率 ($\text{Re}(n_{eff})$) 和传播长度 (L_{prop}) 随芯层宽度 d 的变化关系图. 从图 3 中可以看出,对于不同的金属,都存在有效折射率随芯层宽度的增大呈指数衰减趋势,传播长度和模式面积则随着芯

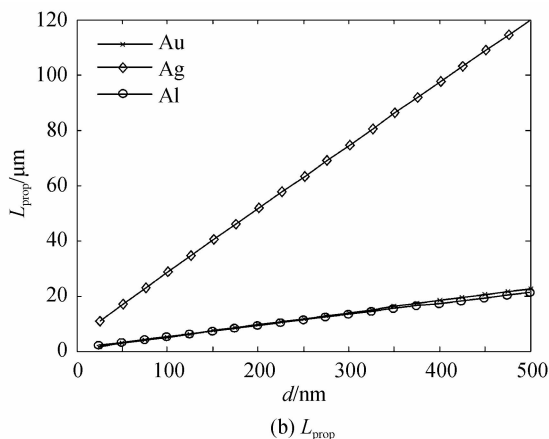


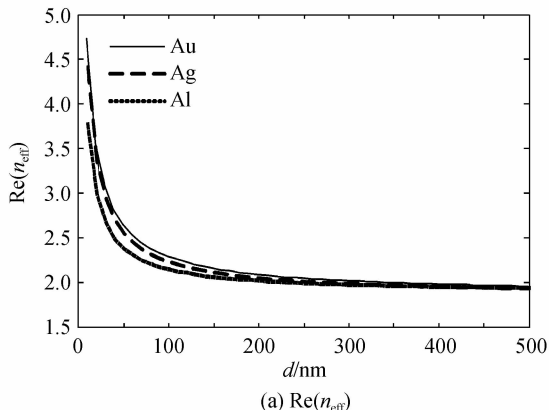
图 3 在金属分别为金、银、铝的情况下, $\text{Re}(n_{eff})$ 和 L_{prop} 随芯层宽度 d 的变化曲线

Fig. 3 Relation between $\text{Re}(n_{eff})$, L_{prop} and the change of d when $\epsilon_m = \epsilon_{Au}, \epsilon_{Ag}, \epsilon_{Al}$

层宽度的增大呈增大趋势;而在同一宽度的情况下,三种金属的有效折射率变化区别不大,金属铝的有效折射率最小,金属银所能达到的传播长度明显优于金和铝. 在芯层宽度为 500 nm 时,三种金属的有效折射率都近似为 2,金属银所能达到的传播长度为 $120 \mu\text{m}$.

2.3 耦合特性分析

对于高密度的光电子集成来说,需要分析两个该



波导结构的耦合长度和最大转移功率,从而选择合适的距离来避免两波导间的串扰。

图4给出了该波导结构在金属材料为银、芯层宽度 d 为 40 nm 时,耦合长度和转移功率与间距的关系。由图可知,波导间距增大时,耦合长度增大,最大转移功率减小。如果在传输过程中要将串扰降低到 0.01 以下,则转移功率需要在 0.001 35 以下,对应的波导间距 s 则应该大于 910 nm。该结构有效地降低了避免串扰的波导间距,更加有利于其高密度集成的应用。

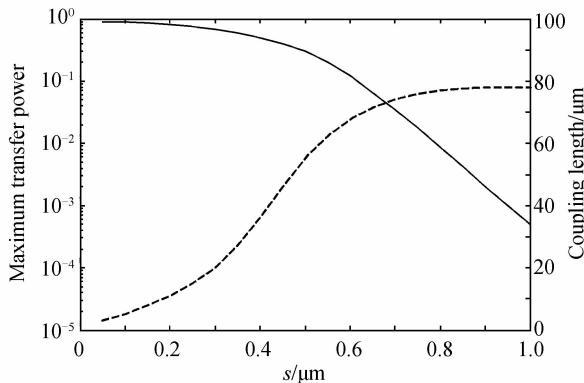


图4 耦合长度和转移功率与间距 s 的关系

Fig. 4 Relations of the coupling length and Maximum transfer power with s

3 结论

本文设计了一种金属缝型表面等离子体波导。该结构在横向上由两个对称的等腰梯形金属夹杂中间介质组成的 MIM 波导结构,在纵向上是三层平板结构,达到对光场的高度限制性;并在整体上采用 SOI 结构,实现对光电子集成的兼容。采用时域有限差分法对所设计的结构进行了数值模拟,并分析了该结构在基模传输时的模式场分布和传输特性,数值模拟结果表明:金属顶角角度 $\theta=135^\circ$ 、芯层尺寸为 $200 \times 400 \text{ nm}^2$ 时,限制性因子达到 96.5%,相对其他结构具有更加优异的限制性;并且在此芯层宽度下其传播长度也达到 100 多微米,不亚于其他波导结构;在芯层宽度为 40 nm,两波导间距大于 910 nm 时,其串扰低于 0.01。该结构可以有效地将能量限制在芯层,并降低耦合波导之间的串扰,为表面等离子体波导在光电子集成电路的应用提供理论依据。

参考文献

- [1] JIA Zhi-xin, DUAN Xin, LV Ting-ting, *et al.* Propagation properties of a surface plasmonic waveguide with a bowtie air cores [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(5): 57301-057301-7. 贾智鑫, 段欣, 吕婷婷, 等. 领结形中空表面等离子体波导的传输特性[J]. *物理学报*, 2011, **60**(5): 57301-057301-7.
- [2] BOZHEVOLNYI S I, VOLKOV V S, DEVAUX E, *et al.* Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. *Nature*, 2006, **440**(7083): 508-511.
- [3] CHEN Z, HOLMGAARD T, BOZHEVOLNYI S I, *et al.*

- Wavelength-selective directional coupling with dielectric-loaded plasmonic waveguides [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(3): 310-312.
- [4] HOLMGAARD T, CHEN Z, BOZHEVOLNYI S I, *et al.* Wavelength selection by dielectric-loaded plasmonic components [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(5): 051111-051111-3.
- [5] TIAN J, YU S, YAN W, *et al.* Broadband high-efficiency surface-plasmon-polariton coupler with silicon-metal interface [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(1): 013504-013504-3.
- [6] HAN Z, ELEZZABI A Y, VAN V. Experimental realization of subwavelength plasmonic slot waveguides on a silicon platform [J]. *Optics letters*, 2010, **35**(4): 502-504.
- [7] CHEN Xian, HAO Yan-lei, WANG Ming-hua, *et al.* Highly confined channel structure of the surface plasmon [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 1986-1990. 陈献, 郝寅雷, 王明华, 等. 高限制等离子体表面波槽形结构 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 1986-1990.
- [8] ZHANG Jiang-tao, GU Zheng-xian, DENG Chuan-lu. Traditional approximate theory and thin film optical theory in SPR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1216. 张江涛, 顾铮先, 邓传鲁. 表面等离子共振效应中传统近似理论与薄膜光学理论 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1216.
- [9] ZHANG Yang-yang, ZHU Fang-ming, SHEN Lin-fang, *et al.* Terahertz surface plasmon polaritons on metal surfaces corrugated by shallowly dielectric-filled grooves [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 389. 张羊羊, 朱方明, 沈林放, 等. 介质填充浅槽周期结构表面上的太赫兹表面等离子体激元 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 389.
- [10] KWON M S. Metal-insulator-silicon-insulator-metal waveguides compatible with standard CMOS technology [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(9): 8379-8393.
- [11] FLAMMER P D, BANKS J M, FURTAK T E, *et al.* Hybrid plasmon/dielectric waveguide for integrated silicon-on-insulator optical elements [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(20): 21013-21023.
- [12] SELVARAJA S K, JAENEN P, BOGAERTS W, *et al.* Fabrication of photonic wire and crystal circuits in silicon-on-insulator using 193-nm optical lithography [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(18): 4076-4083.
- [13] BIAN Y, ZHENG Z, ZHAO X, *et al.* Hybrid plasmonic waveguide incorporating an additional semiconductor stripe for enhanced optical confinement in the gap region [J]. *Journal of Optics*, 2013, **15**(3): 035503.
- [14] YANG R, WAHSHEH R A, LU Z, *et al.* Efficient light coupling between dielectric slot waveguide and plasmonic slot waveguide [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(5): 649-651.
- [15] 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.
- [16] ALAM M Z, AITCHISON J S, MOJAHEDI M. Compact and silicon-on-insulator-compatible hybrid plasmonic TE-pass polarizer [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(1): 55-57.
- [17] VERONIS G, FAN S. Crosstalk between three-dimensional plasmonic slot waveguides [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(3): 2129-2140.
- [18] SONG Y, YAN M, YANG Q, *et al.* Reducing crosstalk between nanowire-based hybrid plasmonic waveguides [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(1): 480-484.
- [19] LOU F, DAI D, WOSINSKI L. Ultracompact polarization beam splitter based on a dielectric-hybrid plasmonic - dielectric coupler [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(16): 3372-3374.