

文章编号: 0253-2239(2007)09-1649-4

基于表面等等离波子的新型 Y 分支波导*

赵华伟 黄旭光 苏 辉

(华南师范大学信息光电子科技学院光子信息技术广东省高校重点实验室, 广州 510006)

摘要: 新型高效的纳米光波导器件的研制是纳米集成光学的核心技术之一。Y 分支波导作为最基本的分光 and 光路连接元件是纳米光学器件设计与制备的基础。运用时域有限差分(FDTD)法, 模拟计算了基于表面等等离波子(SPP)的纳米 Y 分支波导的传输特性。结果表明, 该新型 Y 分支波导在光通信波段可以实现大角度的分光功能, 且在 180°分支情况下, 传输效率仍高达 92.8% 以上。另外, 该波导还具有导波性能良好、对分叉处间隙缺陷大小不敏感及制作容差较大和器件尺寸在纳米量级等特点。对该新型光波导器件的研究为未来纳米集成光学器件的研制和应用有一定的指导意义。

关键词: 纳米集成光学; Y 分支波导; 有限时域差分理论; 表面准等等离波子

中图分类号: TN011.4; TN136 文献标识码: A

A Novel Y-Branch Waveguide Based on Surface Plasmon Polaritons

Zhao Huawei Huang Xuguang Su Hui

(Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information and Optoelectronic Science and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006)

Abstract: A key technique of nano-integrated optics is the development of novel and highly efficient nano-scale waveguide devices. As a basic optical splitting and light-connecting device, nano-scale Y-branch waveguide is the basis of designing and developing nano-scale optical devices. A novel Y-branch waveguide based on surface plasmon polaritons (SPPs) is proposed for high integration, and the finite-difference time-domain (FDTD) method is used to study its propagation properties. The simulation results show that the proposed Y-branch waveguide realizes optical splitting with large splitting angle in the optical communication band, and the transmission efficiency is still over 92.8% for 180° splitting angle. Besides, it is characterized by its nano-scale size, guiding wave with good performance being insensitive to the defect at the joint of the splitter, and large tolerance. The study of the novel waveguide devices can offer some valuable guidances to the research and application of nano-integration devices.

Key words: nano-integrated optics; Y-branch waveguide; finite difference time domain theory; surface plasmon polaritons

1 引 言

受衍射效应的影响, 传统的介质波导对光波模式的限制被限制在 λ_0/n 量级 (λ_0 为自由空间的光波长, n 为介质折射率)。然而, 随着微细加工技术和集成光学的不断发展, 光学器件的不断小型化已逐渐接近光的衍射极限。如何获得突破衍射极限的各

种高效光波导、光耦合器及光调制器等器件, 已成为纳米光学领域的一大研究热点。

表面等等离波子 (Surface plasmon polaritons, SPP) 是局域在金属表面的一种自由电子与光子相互作用形成的混合激发态^[1]。表面等等离波子的突出特点之一就是具有将电磁场能量聚集在纳米空间

* 广东省自然科学基金重点项目(05200534)和国家教育部留学回国人员科研启动基金资助课题。

作者简介: 赵华伟(1982-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事纳米集成器件的设计和研发。

E-mail: zhw01981@163.com

导师简介: 黄旭光(1962-), 男, 广西人, 教授, 硕士生导师, 主要从事微纳集成光通信器件及光传感技术等方面的研究。

E-mail: huangxg@scnu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-20; 收到修改稿日期: 2007-04-24

范围的特性,在纳米光学集成方面显示出巨大的应用潜力,被喻为目前最有希望的纳米集成光学器件的信息载体。表面等离波子还具有巨大的局部场增强效应^[2],这种局部增强效应已经在高灵敏生物化学传感、新型光源、高效光学元器件等领域获得了广泛应用^[3~6]。

Y分支波导作为集成光学中的基础波导单元被广泛应用于光分路器、光调制器、光开关、复用/解复用器以及光纤陀螺多功能芯片等集成光学器件中^[7,8]。传统的Y分支器件受辐射损耗的限制,其分支角度一直受到限制,不利于实现光学的高度集成。Georgios Veronis等^[9]用特征阻抗法对基于表面等离波子的T型分支结构传输效率的计算表明,基于表面等离波子的T型分支结构在长波段其传输效率达到90%以上。Y型分支波导在构造分路器及光开关方面具有更为广泛的应用。对基于表面等离波子的新型Y分支波导结构进行了理论模拟研究。结果表明,该新型Y分支结构在光通信波段具有良好的导波性能,相对传统的Y分支波导,可实现任意角度的高效率分光功能,并且具有对分叉间隙处缺陷不敏感,制作容差较大等特点。

2 基本原理

在合适的边界条件下解麦克斯韦方程可以得到表面等离波子的色散关系^[1]:

$$k_{sp}^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} = k_0^2 \frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}, \quad (1)$$

ϵ_m, ϵ_d 分别为金属及其相邻电介质的介电常量。由上式可知道,表面等离波子的动量总是大于具有相同频率的光在自由空间传播的动量。例如银和空气的交界面在可见光的红光部分的表面等离波子波矢为 $k_{sp} \cong 1.03k_0$ ^[10]。

在与金属表面垂直的方向,表面等离波子的场强随着进入金属表面的深度而迅速衰减。如在 xz 平面内,在金属界面上沿 x 方向传输的表面等离波子,其电场方程表示为^[1]

$$E_{sp}(x, z) = E_0 \exp(ik_{sp}x - k_z|z|), \quad (2)$$

上式表明在垂直于金属表面的方向上表面等离波子的强度呈指数衰减。这种特性阻止了能量从金属表面脱离。因此,表面等离波子具有将光束束缚在纳米范围传输的能力,为实现光电子器件的纳米集成化提供了基础。

表面等离波子在沿金属表面传输时由于金属的吸收逐渐衰减。银在可见光谱区损耗很低,传输

距离一般也只有 $10 \sim 100 \mu\text{m}$,当移动到 $1.5 \mu\text{m}$ 的近红外波段时其传输距离接近 1 mm ^[5]。过去,表面等离波子的传输距离比光学元件的尺寸小的多,没有实际用途。现在,随着微加工技术的发展,使建立在表面等离波子基础上的光学器件的尺寸远比表面等离波子的传输距离要小,使基于表面等离波子的纳米集成器件的研制成为现实。

3 模拟及结果

运用时域有限差分的(FDTD)方法对实际金属银膜中空气狭缝结构的Y型分支波导结构的传输特性进行了模拟计算。因为波导结构中狭缝宽度 d 远小于光波长,因此只有TM基模被激发。计算中,在 $1.55 \mu\text{m}$ 处取银的折射率为 $\tilde{n} = 0.144 + i11.36$ ^[11]。 x, z 方向上的计算步长取 2.5 nm ,以保证计算结果的收敛性。边界采用完全匹配层(PML)的边界吸收条件,整个计算区间为 $1000 \text{ nm} \times 1000 \text{ nm}$ 。传输效率定义为: $T = (P_{out1} + P_{out2}) / P_{in}$ 。其中, $P_{out1}, P_{out2}, P_{in}$ 分别为图1中Y型分支结构中虚线标识处的出射光功率和入射光功率。各图中的结构参量为 $d = 100 \text{ nm}, L = 100 \text{ nm}, L_1 = 150 \text{ nm}, L_2 = 250 \text{ nm}$ 。

图1(a)为Y型分支结构示意图,图1(b)为入射波长为 1550 nm 时该新型Y分支结构在不同分支角度 θ 下总的传输效率,即两分支的传输效率之和。从图1(b)中可以看出,该新型Y分支结构在通信光波段的传输效率整体上随分支角度的增大缓慢减小,但随着分支角度的变化有较小的波动。在 180° 的大分支角度下其传输效率仍高达 93% ,其损耗仍在可以使用的范围内。并且这种分支器件的整体尺寸在纳米量级,对实现光学器件的纳米集成化具有重要的现实意义。

另外,考虑到制造过程中制作精度的限制,实际的Y型分支结构在其分叉处通常存在如图2(a)所示的非零间隙缺陷。因此本文模拟计算了Y分支结构在存在如图2(a)所示的非零间隙缺陷情况下的传输效率。其缺陷部分的宽度如图所示定义为 w ,图中 $\theta = 60^\circ$ 。

从图2(b)中可以看出,Y型分支结构的传输效率随着缺陷宽度的增大缓慢降低。在缺陷宽度小于 30 nm 时,其传输效率几乎没有变化,表明在此缺陷范围内,制作缺陷对传输效率的影响极小,几乎可以忽略不计。当缺陷宽度达到 100 nm 的情况下,其传输效率仍高达 94.8% 。这种优良的容差特性使基于表面等离波子的新型Y分支波导的制作难

度大大降低。计算表明在其它分支角度下,这种带有缺陷的 Y 分支波导的传输效率与 60° 分支时大致

相同,并且传输效率随着入射波长 λ 的增长整体有所提高。

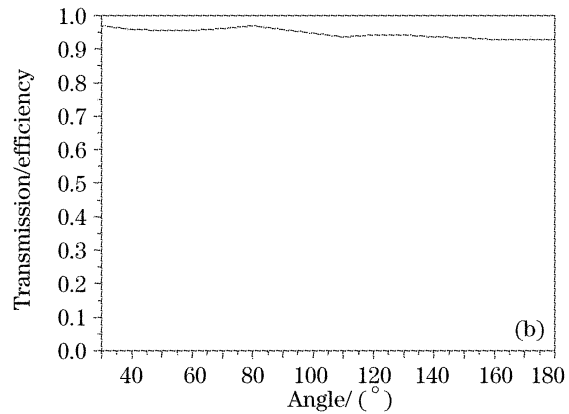
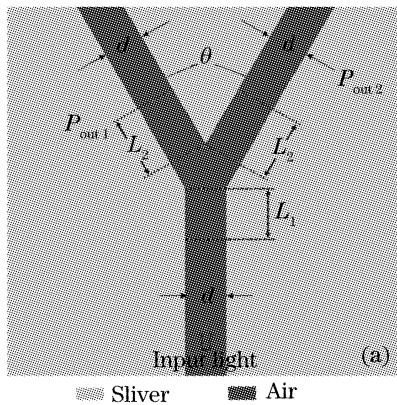


图 1 Y 型分支结构示意图(a),入射波长为 1550 nm 时不同分支角度下的传输效率(b)

Fig. 1 (a) Schematic of the Y-branch structure studied here, (b) the transmission of the Y-branch structure under different splitting angles at the wavelength of 1500 nm

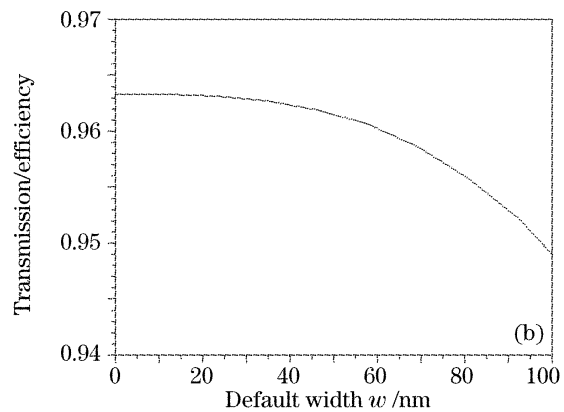
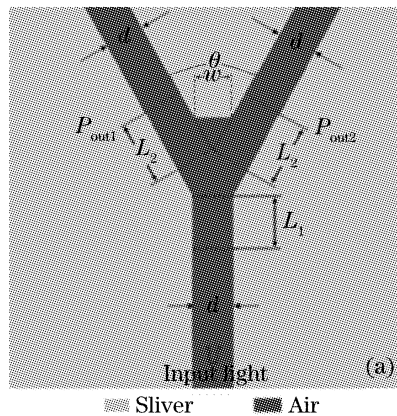


图 2 带有缺陷的 Y 分支结构示意图(a),不同缺陷宽度下的传输效率(b)

Fig. 2 Schematic of the Y-branch structure with defect (a), the transmissions of the structure under different defect width (b)

基于表面等离波子的波导在传输损耗上的限制,在分支前后不宜远距离传输。因为在小分支角度时两路分支在实际应用的传输距离内不能分开。所以这种 Y 分支结构不宜用来制作太小分支角度的分光器件。另外,考虑到金属吸收带来的损耗,在大角度分支情况下,如果缩短分支前后光波的传输距离,或者增大入射波长,其传输效率将进一步提高。

4 结 论

运用时域有限差分(FDTD)法,对基于表面等离波子的新型 Y 分支结构进行了模拟研究。结果表明,该结构在可以接受的损耗范围内可以实现任意角度的分光功能,且其器件尺寸在纳米量级。在分支部分存在非零间隙缺陷的情况下,当缺陷宽度小于 30nm 时,由缺陷引起的传输效率的改变几乎为 0。即使在存在相对较大缺陷的情况下,其传

输效率的减少仍低于 2%。这种优良的容差特性使其制作难度大大降低,为未来纳米集成光学的发展提供了方便。也验证了这类结构波导的可用波长范围包括通信光波段,而且其传输效率随入射光波长的增长而提高。

参 考 文 献

- 1 Zhao Yanrui, Wang Yongchang. The research on protective layer used in surface plasmon wave detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 505~508 (in Chinese)
赵延瑞,王永昌. 介质保护膜在表面等离子体波探测器中的应用研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(4): 505~508
- 2 Wang Guoping. Surface plasmon polaritons - based integrated nanophotonic devices[J]. *Physics*, 2006, **6**(35): 502~507 (in Chinese)
汪国平. 表面等离子体激元纳米光集成光子器件[J]. *物理*, 2006, **6**(35): 502~507
- 3 Guoping Wang, Tadao Sugiura, Satoshi Kawata. Holography with surface-plasmon-coupled waveguide modes[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(22): 3649~3653
- 4 Stefan A. Maier, Harry A. Atwater. Plasmonics: localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric

- structures[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(1): 011101-1~011101-10
- 5 Koji Matsubara, Satoshi Kawata, Shigeo Minami. Optical chemical sensor based on surface plasmon measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(6): 1160~1163
- 6 Zeng Jie, Liang Dakai, Cao Zhenxin. Study on a novel optical fiber temperature sensor on surface plasmon resonance[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 838~842
- 曾 捷, 梁大开, 曹振新. 光纤表面等离子体波共振温度传感器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 838~842
- 7 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghu *et al.*. Polymer thermo-optic switches with Y-branch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 736~738 (in Chinese)
- 杨建义, 江晓清, 杨方辉 等. Y分支有机聚合物热光开关的研制[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 736~738
- 8 Chih-Wei Hsu, Hsuen-Li Chen, Way-Seen Wang. Compact Y-branch power splitter based on simplified coherent coupling[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(8): 1103~1105
- 9 Georgios Veronis, Shanhui Fan. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(13): 131102-1~131102-3
- 10 William L. Barnes, Alain Dereux, Thomas W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824~830
- 11 P. B. Johnson, R. W. Christy. Optical constants of the noble metals[J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **6**: 4370~4379

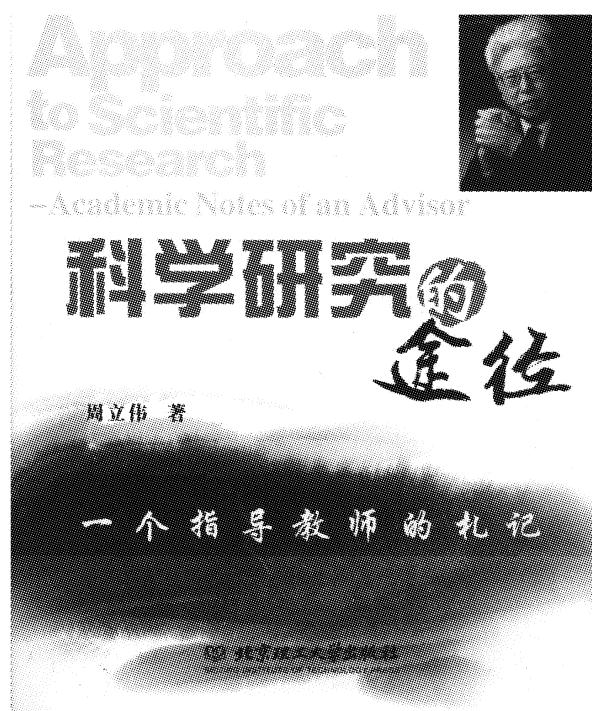
• 新书推荐

《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近 30 年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

作者简介 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16开,定价:25元。



联系人:郑京华

地址:北京理工大学出版社人文社科事业部

邮编:100081

手机:13810624594

办公电话:010-68945381

电子邮件:caizhengjinghua@126.com