

基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器的传输特性研究

李 娟 王冰艳 薛文瑞

(山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘要 采用二维时域有限差分(FDTD)法,分析并对比了弯曲分叉部分的形状分别为正弦形和圆弧形的基于金属-绝缘体-金属(MIM)型表面等离子体光波导的 Y 形分束器的反射率、传输率以及能量分束比随几何结构参数的变化关系。数值计算表明,波导宽度对这两种 Y 形分束器传输特性的影响较为明显,两个输出分支的偏移量和弯曲分叉部分的长度对这两种 Y 形分束器传输特性的影响比较微弱。在 600~1500 nm 波长范围内,弯曲分叉部分为圆弧形的 Y 形分束器的传输特性比弯曲分叉部分为正弦形的好。对于非对称型 Y 形分束器,当弯曲分叉部分为正弦形时,偏移量对反射率、传输率和能量分束比的调节作用较为明显,能量分束比最大可达到 2:1。当弯曲分叉部分为圆弧形时,偏移量对反射率、传输率和能量分束比的调节作用较为微弱。

关键词 集成光学;光波导;表面等离子体光波导;Y 型分束器

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0124002

Propagation Properties of Y-Splitters Based on MIM Surface Plasmonic Waveguides

Li Juan Wang Bingyan Xue Wenrui

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract Using the two-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) method, the dependence of the reflectivity, the transmission rate and the energy splitting ratio, on the geometrical parameters of two kinds of Y-splitter with sine shaped arc and circular shaped arc, based on metal-insulator-metal (MIM) surface plasmonic waveguides, are analysed. Results show that the transmission characteristics of the two Y-splitters depend obviously on the parameter of the width of the waveguides and weakly on the two parameters of the offsets of the two output branches and the lengths of the curves. The transmission characteristics of the Y-splitter whose curves are circular arc-shaped are better than the Y-splitter whose curves are sine arc-shaped within 600~1500 nm. For asymmetrical Y-splitter, the reflectivity, the transmission rate and the power splitting ratio are affected obviously by the parameter of offset when the curves are sine arc-shaped and the energy splitting ratio can be up to 2:1. The reflectivity, the transmission rate and the power splitting ratio are affected faintly by the parameter of offset when the curves are circular arc-shaped.

Key words integrated optics; optical waveguides; surface plasmonic waveguides; Y-splitter

OCIS codes 240.6680; 230.7370; 350.5500

1 引言

近年来,基于表面等离子体激元(SPP)的表面

等离子体波导(SPW)在国内外掀起了研究的热潮^[1-5]。这种波导提供了一种新的导波机制,可以

收稿日期: 2011-06-22; 收到修改稿日期: 2011-07-21

基金项目: 国家基础科学人才培养基金(J0730317)、山西省自然科学基金(2010011003-1)和量子光学与光量子器件国家实验室开放课题(KF201006)资助课题。

作者简介: 李娟(1987—),女,硕士研究生,主要从事表面等离子体光波导方面的研究。E-mail: lijuan9462@126.com

导师简介: 薛文瑞(1967—),男,博士,教授,主要从事导波光学、纳米光子学和表面等离子体学等方面的研究。

E-mail: wxue@sxu.edu.cn(通信联系人)

在金属与绝缘体的界面上以 SPP 的形式导引光的传播。由于 SPP 的横向尺度为亚波长量级,所以它克服了传统光波导或光子晶体光波导中存在的衍射极限问题,正好满足光子器件小型化和光集成芯片高密度化的要求。

金属-绝缘体-金属(MIM)表面等离子体波导是由两层金属和中间的绝缘体夹层组成的一种波导^[6]。这种波导在绝缘体层中可以支持表面等离子体模式传输并将模式束缚在绝缘体层中^[7]。对于亚波长光子集成回路,这种波导被认为是一种理想的基本的结构^[8]。目前,基于 MIM 型表面等离子体光波导的新型纳米光子学元器件备受人们的关注,比如分束器^[9~13]、马赫-曾德尔干涉仪^[14~16]、波导环形共振器^[17]、上下复用器^[18,19]、反射器^[20,21]和滤波器^[22~26]等。

2005 年,Veronis 等^[9]提出了一种基于 MIM 型表面等离子体光波导的 T 字形分束器。这种 T 字形分束器的输出分支与输入分支是相互垂直的,通过调节输入分支和输出分支的宽度,可以在较宽的频带内获得较小的损耗。2007 年,Han 等^[10]提出了另外一种基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器。这种分束器由一个单模输入波导、多模部分和两个单模输出波导构成,利用多模干涉(MMI)原理,获得了亚波长尺寸的分束器。同年,赵华伟等^[11]提出了一种由一个直输入分支和两个直输出分支组成的输出分支与输入分支非平行的 Y 字形分束器,实现了任意角度的分光功能。2010 年,Han 等^[12]设计并实验制作了一种基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器。这种 Y 形分束器是在覆盖在二氧化硅衬底上的金属银膜上制作出一个 Y 字形结构,并覆盖聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料而构成的。在 1510~1630 nm 波长范围内,这种 Y 形分束器的传输效率可以达到 50% 左右。从这些研究工作可以看出:Y 形分束器的传输性能与其弯曲分叉部分的形状有很大的关系,不同的弯曲分叉方法,会导致其具有不同的传输性能。目前,基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器中弯曲分叉部分采用的结构还比较简单,关于几何结构参数对其传输性能的分析也不够详细。因此,很有必要进一步分析对比具有不同弯曲分叉部分的这种类型的分束器的传输性能。

本文拟采用二维时域有限差分(FDTD)法对弯曲分叉部分的形状分别为正弦形和圆弧形的基于 MIM 型表面等离子体光波导的输出分支与输入分

支平行的 Y 形分束器的传输特性进行研究,分析并对比两种弯曲分叉条件下反射率、传输率以及能量分束比随几何结构参数的变化关系。本文的工作将对基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器的设计、制作和应用提供一定的参考。

2 结构模型与计算方法

基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器的结构如图 1 所示,它是在金属中挖出一个 Y 形结构的绝缘体夹层构成的,包括一个输入分支、两个弯曲分叉部分和两个输出分支。弯曲分叉部分可以由一个完整的正弦形或者两个半径相同的 1/4 圆弧形构成。为了简单起见,将绝缘体选为空气,金属选为银,其相对介电常数遵循修正的 Drude 模型,
$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\gamma\omega}$$
。在 600~1600 nm 波长范围内,通过拟合实验数据^[27],取 $\epsilon_\infty = 5.0$, $\omega_p = 1.4421 \times 10^{16}$, $\gamma = -1.4983 \times 10^{14}$ 。图 2 给出了金属银的相对介电常数。图 2 中,“方块”点和“圆形”点为实验测量得到的复介电常数的实部与虚部。实线和虚线分别对应修正的 Drude 模型给出的复介电常数的实部与虚部。从图 2 中可以看出,在可见光和红外波段,修正的 Drude 模型和实验数据吻合的很好,波长大于 1200 nm 后误差稍有增大。

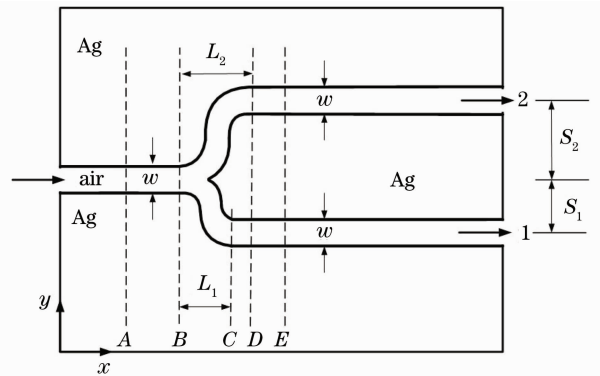
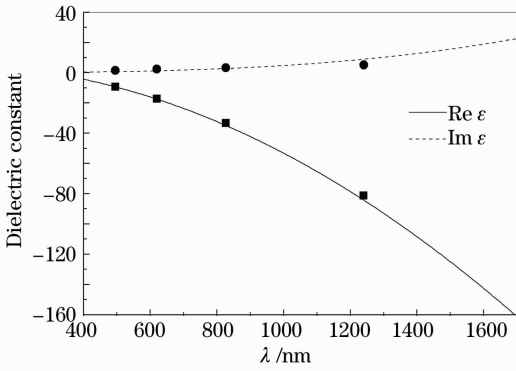


图 1 表面等离子体波导 Y 形分束器结构图

Fig. 1 Schematic of the Y-splitter based on surface plasmonic waveguides

Y 型分束器的几何结构参数有 w, S_1, S_2, L_1 以及 L_2 。这里, w 表示波导宽度, S_1, S_2 分别为沿 y 轴方向 Y 型分束器的两个输出分支的中心线相对于输入分支的中心线的偏移量, A, B, C, D 和 E 分别为垂直于 x 轴方向的五条直线, L_1, L_2 分别为两个分支的弯曲分叉部分的长度(即从直线 B 到直线 C 、直线 B 到直线 D 的垂直距离)。当 $S_1 = S_2, L_1 = L_2$ 时,

图 2 金属银的介电常数 ϵ 曲线Fig. 2 Curves of the dielectric constant ϵ of the metal silver

两个输出分支呈对称型,反之,当 $S_1 \neq S_2, L_1 \neq L_2$ 时,呈非对称型。直线 A, E 为探测点所在的水平位置。

采用二维 FDTD 法^[28]对 Y 形分束器的传输特性进行研究。FDTD 法采用 Yee 氏网格的空间离散方式,并把带时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为差分格式,在这种差分格式中每个网格点上的电场(或磁场)分量仅与它相邻磁场(或电场)分量及上一时间步该点的场值有关。在每一时间步计算网格空间各点的电场和磁场分量,随着时间步的推进,即能直接模拟电磁波的传播及其与物体的相互作用过程。FDTD 法把各类问题都作为初值问题来处理,使它直接给出非常丰富的电磁场问题的时域信息,给复杂的物理过程描绘出清晰的物理图像。计算中,采用了 2601×701 层的网格点来离散整个计算区域,空间离散步长为 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ nm}$ 。其中沿 x 轴方向最外面的 260 层和沿 y 轴方向最外面的 50 层是用来截断网格的各向异性良匹配层(APML)。计算中采用了总场/散射场(TF/SF)技术和并行计算技术。

在输入分支的左端口,采用沿 y 轴方向进行了高斯调制的 TM 波入射。当场的演化达到稳定后,分别在 A 和 E 两条曲线在波导宽度内把沿 x 轴方向的能流密度 S_x 在一定数量的时间周期内积分并取平均,即可得到输入分支和两个输出分支中沿 x 方向单位时间周期内流动的能量。假设 Y 形分束器的输入分支中的反射率为 R ,两个输出分支中的传输率分别为 T_1 和 T_2 ,且实际计算得到的两个输出分支中沿 x 方向单位时间周期内流动的能量与输入分支中沿 x 方向单位时间周期内流动的能量比值为 γ_1 和 γ_2 ,则有 $\gamma_1 = \frac{T_1}{1+R}, \gamma_2 = \frac{T_2}{1+R}$,考虑到 $R +$

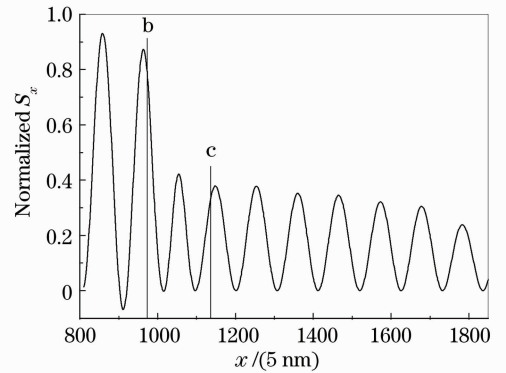
$$T_1 + T_2 = 1, \text{ 就可以得到 } R = \frac{1 - (\gamma_1 + \gamma_2)}{1 + \gamma_1 + \gamma_2}, T_1 = \frac{2\gamma_1}{1 + \gamma_1 + \gamma_2} \text{ 和 } T_2 = \frac{2\gamma_2}{1 + \gamma_1 + \gamma_2}.$$

3 结果与讨论

3.1 弯曲分叉部分为正弦形时几何尺寸对传输特性的影响

如果如图 1 所示的 Y 型分束器的弯曲分叉部分为正弦形,则几何结构参数有:波导宽度 w 、弯曲分叉部分的长度 L_1 和 L_2 ,以及两个输出分支的中心线相对于输入分支的中心线的偏移量 S_1 和 S_2 。

图 3 为在 $\lambda = 1200 \text{ nm}, w = 150 \text{ nm}, L_1 = L_2 = 750 \text{ nm}, S_1 = S_2 = 400 \text{ nm}$ 条件下,达到稳定时,沿 Y 型分束器输入分支、弯曲分叉 2 和输出分支 2 的中心线的归一化的能流密度 S_x 随传播距离的变化曲线。图 3 中的位置 b 和 c 对应于图 1 中的位置 B 和 D。由于场分量在两个分支中呈对称分布,两个输出分支中心线上的能流密度 S_x 基本相同,为方便观察,只画出分支 2 的曲线图。从图 3 可以看出,能流密度 S_x 随着传播距离的增加而逐渐减小。这是因为金属固有损耗的存在,导致场沿传播方向逐步衰减。

图 3 在 $\lambda = 1200 \text{ nm}, w = 150 \text{ nm}, L_1 = L_2 = 750 \text{ nm}, S_1 = S_2 = 400 \text{ nm}$ 条件下,沿 Y 型分束器中心线的归一化的能流密度 S_x 随传播距离的变化曲线图线Fig. 3 Relation between normalized S_x along the center of the Y-splitter and the change of the propagation distance when $\lambda = 1200 \text{ nm}, w = 150 \text{ nm}, L_1 = L_2 = 750 \text{ nm}, S_1 = S_2 = 400 \text{ nm}$

3.1.1 波导宽度 w 的影响

图 4 给出了在 λ 在 $600 \sim 1600 \text{ nm}$ 波长范围内,当 $L_1 = L_2 = 750 \text{ nm}, S_1 = S_2 = 400 \text{ nm}$ 的条件下, w 分别为 $50, 150$ 和 250 nm 时,反射率 R 、输出分支 1 的传输率 T_1 随着波长 λ 变化的关系图。由于两个

输出分支的传输率 T_1 和 T_2 基本相同,为了方便观察,只画出了反射率 R 和输出分支 1 的传输率 T_1 的曲线。本文均采用这种画法,后面不再赘述。

从图 4 中可以看出,当波长逐渐增大时,反射率 R 呈下降趋势,传输率 T_1 呈上升趋势,波导宽度 w 对传输特性影响较大。 $w = 50$ nm 所对应的曲线具有较大的反射率和较小的传输率。 $w = 250$ nm 所对应的曲线具有较小的反射率和较大的传输率。这些现象,可以从不同 w 条件下,弯曲分叉部分对场的反射程度得到解释:当 w 的取值小时,弯曲分叉部分相对较窄,对场的传输阻力较大,反射效应增大,反射率 R 变大,传输率 T_1 变小。当 w 的取值大时,情况正好相反,反射率 R 变小,传输率 T_1 变大。计算表明,在这种对称情况下,Y 型分束器的两个输出分支的能量分束比基本可以达到 1:1。

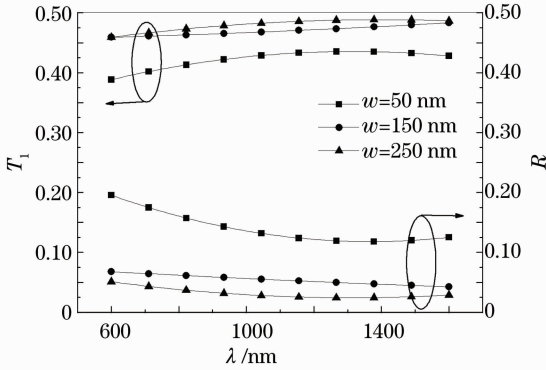


图 4 在 $L_1 = L_2 = L = 750$ nm, $S_1 = S_2 = S = 400$ nm, $w = 50, 150$ 和 250 nm 条件下,反射率 R 和传输率 T_1 随 λ 的变化关系图

Fig. 4 Dependence of R and T_1 on λ when $w = 50, 150$ and 250 nm at $L_1 = L_2 = L = 750$ nm, $S_1 = S_2 = S = 400$ nm

3.1.2 偏移量 S_1 和 S_2 的影响

图 5 给出了在 λ 在 $600 \sim 1600$ nm 波长范围内,当 $L_1 = L_2 = 750$ nm, $w = 150$ nm 的条件下, $S_1 = S_2 = S$ 分别为 $300, 400$ 和 500 nm 时,反射率 R 、输出分支 1 的传输率 T_1 随着波长 λ 变化的关系图。

从图 5 中可以看出,当波长逐渐增大时, R 呈微弱下降趋势,传输率 T_1 呈微弱上升趋势。在所选的参数范围内,偏移量 S 对曲线的位置有微调作用。 $S = 500$ nm 所对应的曲线具有较大的反射率和较小的传输率, $S = 300$ nm 所对应的曲线具有较小的反射率和较大的传输率。这些现象,可以这样解释:当 S 的取值较大时,弯曲分叉部分在垂直方向的跨度变大,即分支角变大,对场的传输阻力较大,反射效应增大,反射率 R 变大,传输率 T_1 变小。当

S 的取值较小时,情况正好相反,反射率 R 变小,传输率 T_1 变大。计算表明,在这种对称情况下,Y 型分束器的两个输出分支的能量分束比基本可以达到 1:1。

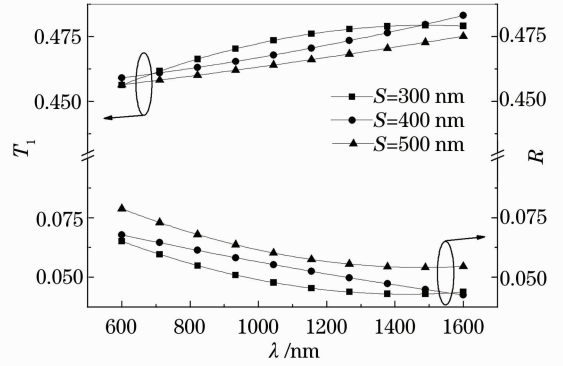


图 5 在 $w = 150$ nm, $L_1 = L_2 = L = 750$ nm, $S_1 = S_2 = S = 300, 400$ 和 500 nm 条件下,反射率 R 和传输率 T_1 随 λ 的变化关系图

Fig. 5 Dependence of R and T_1 on λ when $S_1 = S_2 = S = 300, 400$ and 500 nm at $w = 150$ nm, $L_1 = L_2 = L = 750$ nm

3.1.3 弯曲分叉部分的长度 L_1 和 L_2 的影响

图 6 给出了在 λ 在 $600 \sim 1600$ nm 波长范围内,当 $w = 150$ nm, $S_1 = S_2 = 400$ nm 的条件下, $L_1 = L_2 = L$ 分别为 $450, 600$ 和 750 nm 时,反射率 R 、输出分支 1 的传输率 T_1 随着波长 λ 变化的关系图。

从图 6 中可以看出,当波长逐渐增大时, R 呈微弱下降趋势,传输率 T_1 呈先微弱上升后微弱下降趋势。在所选的参数范围内,弯曲分叉部分的长度 L 对曲线的位置有微调作用。当 $\lambda < 1000$ nm 时, $L = 450$ nm 所对应的曲线具有较大的反射率和较小的传输率, $L = 600$ nm 所对应的曲线具有较小的反射率和较大的传输率。当 $\lambda > 1000$ nm 时, $L = 450$ nm 所对应的曲线具有较大的反射率和较小的传输率, $L = 750$ nm 所对应的曲线具有较小的反射率和较大的传输率。这些现象可以解释为:当 L 的取值较小时,弯曲分叉部分在水平方向的跨度变小,即分支角变大,对场的传输阻力较大,反射效应增大,反射率 R 变大,传输率 T_1 变小。当 L 的取值较大时,情况正好相反,反射率 R 变小,传输率 T_1 变大。计算表明,在这种对称情况下,Y 型分束器的两个输出分支的能量分束比基本可以达到 1:1。

3.1.4 非对称型 Y 形分束器的传输特性

当两个输出分支的中心线相对于输入分支的中心线的偏移量 $S_1 \neq S_2$ 时,图 1 所示的结构就变成了非对称型 Y 形分束器。图 7 给出了在 $\lambda = 1200$ nm, $w = 150$ nm, $L_1 = L_2 = L = 600$ nm 条件下,固定偏

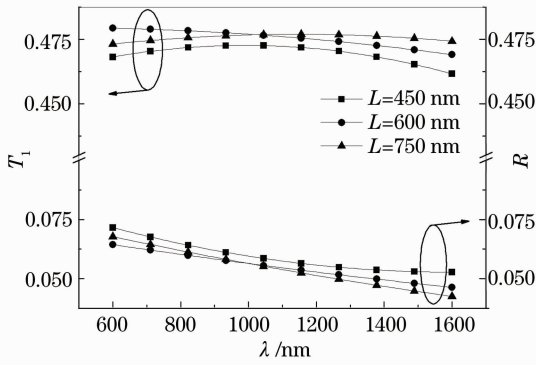


图 6 在 $w=150 \text{ nm}$, $S_1=S_2=S=400 \text{ nm}$, $L_1=L_2=L=450, 600, 750 \text{ nm}$ 条件下, 反射率 R 和传输率 T_1 随 λ 的变化关系图

Fig. 6 Dependence of R and T_1 on λ when $L_1=L_2=L=450, 600$ and 750 nm at $w=150 \text{ nm}$, $S_1=S_2=S=400 \text{ nm}$

移量 $S_1=400 \text{ nm}$, 调节偏移量 S_2 的大小, 使 S_2 从 400 nm 增加到 700 nm 情况下, 非对称型 Y 形分束器的反射率 R 、输出分支 1 的传输率 T_1 和输出分支 2 的传输率 T_2 随着波长 λ 变化的关系图。

从图 7 中可以看出, 随着 S_2 的增大, 反射率 R 总体呈微弱上升趋势。当 $S_2=S_1$ 时, $T_1=T_2$, 此时 Y 形分束器为对称型。当 $S_2>S_1$ 时, $T_1 \neq T_2$, 差值 $|T_1-T_2|$ 较大, 且随着 S_2 的增大, S_2 逐渐偏离 S_1 , 差值 $|T_1-T_2|$ 逐渐增大。这些现象可以解释为: 当偏移量 $S_2=S_1$ 时, Y 形分束器呈对称型, 传输率 $T_1=T_2$ 。当偏移量 $S_2>S_1$ 时, 输出分支 2 的弯曲分叉部分在垂直方向的跨度大于输出分支 1 的弯曲分叉部分在垂直方向的跨度, 输出分支 2 对场的传输阻力大于输出分支 1 对场的传输阻力, 输出分支 2 的反射效应大于输出分支 1 的反射效应, 导致输出

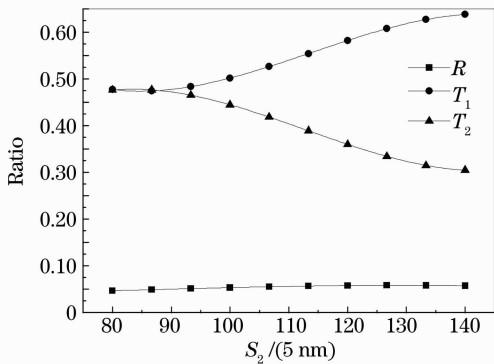


图 7 在 $\lambda=1200 \text{ nm}$, $w=150 \text{ nm}$, $L=600 \text{ nm}$, $S_1=400 \text{ nm}$ 条件下, 反射率 R 、传输率 T_1 和 T_2 随 S_2 的变化关系图

Fig. 7 Dependence of R , T_1 and T_2 on S_2 when $\lambda=1200 \text{ nm}$, $w=150 \text{ nm}$, $L=600 \text{ nm}$, $S_1=400 \text{ nm}$

分支 2 的反射率大于输出分支 1 的反射率, 传输率 T_2 小于传输率 T_1 。计算表明, 在这种非对称情况下, Y 型分束器的两个输出分支的能量分束比最大可以达到 2:1。

3.2 弯曲分叉部分为圆弧形时几何尺寸对传输特性的影响

3.2.1 波导宽度 w 的影响

图 8 给出了在 λ 为 $600 \sim 1600 \text{ nm}$ 波长范围内, 在 $L_1=L_2=600 \text{ nm}$, $S_1=S_2=600 \text{ nm}$ 的条件下, w 分别为 $50, 150$ 和 250 nm 时, 反射率 R 、输出分支 1 的传输率 T_1 随着波长 λ 变化的关系情况。

从图 8 中可以看出, 当波长逐渐增大时, 反射率 R 呈下降趋势, 传输率 T_1 呈上升趋势, 波导宽度 w 对传输特性影响较大。当 $\lambda < 800 \text{ nm}$ 时, $w=50 \text{ nm}$ 所对应的曲线具有较大的反射率和较小的传输率, $w=150 \text{ nm}$ 所对应的曲线具有较小的反射率和较大的传输率。当 $\lambda > 800 \text{ nm}$ 时, $w=50 \text{ nm}$ 所对应的曲线具有较大的反射率和较小的传输率, $w=250 \text{ nm}$ 所对应的曲线具有较小的反射率和较大的传输率。这些现象, 可以从不同 w 条件下, 弯曲分叉部分对场的反射程度得到解释: 当 w 的取值小时, 弯曲分叉部分相对较窄, 对场的传输阻力较大, 反射效应增大, 反射率 R 变大, 传输率 T_1 变小。当 w 的取值大时, 情况正好相反, 反射率 R 变小, 传输率 T_1 变大。计算表明, 在这种对称情况下, Y 型分束器的两个输出分支的能量分束比基本可以达到 1:1。

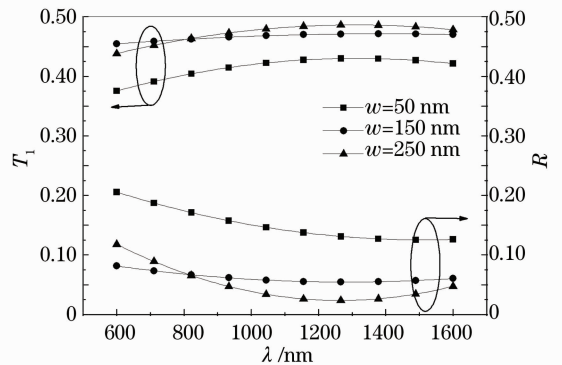


图 8 在 $L_1=L_2=600 \text{ nm}$, $S_1=S_2=600 \text{ nm}$, $w=50, 150, 250 \text{ nm}$ 条件下, 反射率 R 和传输率 T_1 随 λ 的变化关系图

Fig. 8 Dependence of R and T_1 on λ when $w=50, 150$ and 250 nm at $L_1=L_2=600 \text{ nm}$, $S_1=S_2=600 \text{ nm}$

3.2.2 偏移量 S_1 和 S_2 以及弯曲分叉部分长度 L_1 和 L_2 的影响

对于对称型 Y 形分束器, 由于弯曲分叉部分由两个半径相同的 $1/4$ 圆弧拼接而成, 所以 $S_1=$

$S_2 = S = L_1 = L_2 = L$ 。图 9 给出了在 λ 为 600 ~ 1600 nm 波长范围内,在 $\omega = 150$ nm 的条件下, S 和 L 分别为 400,500 和 600 nm 时,反射率 R 、输出分支 1 的传输率 T_1 随着波长 λ 变化的关系情况。

从图 9 中可以看出,当波长逐渐增大时, R 呈微弱下降趋势,传输率 T_1 呈微弱上升趋势。在所选的参数范围内,偏移量 S 和弯曲分叉部分长度 L 对曲线的位置有微调作用。 $S = L = 400$ nm 所对应的曲线具有较小的反射率和较大的传输率, $S = L = 600$ nm 所对应的曲线具有较大的反射率和较小的传输率。这些现象,可以解释为:当 $S = L$ 的取值较小时,弯曲分叉部分在垂直方向和水平方向的跨度均变小,垂直方向的跨度对传输特性影响较大,因此,对场的传输阻力较小,反射效应减小,反射率 R 变小,传输率 T_1 变大。当 $S = L$ 的取值较大时,情况正好相反,反射率 R 变大,传输率 T_1 变小。计算表明,在这种对称情况下,Y 型分束器的两个输出分支的能量分束比基本可以达到 1:1。

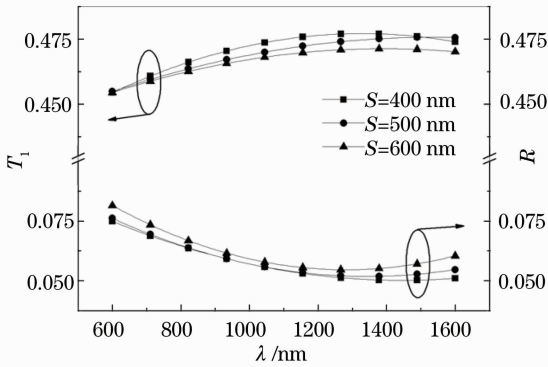


图 9 在 $\omega = 150$ nm, $S = L = 400, 500, 600$ nm 条件下,反射率 R 和传输率 T_1 随 λ 的变化关系图

Fig. 9 Dependence of R and T_1 on λ when $S = L = 400, 500$ and 600 nm at $\omega = 150$ nm

3.2.4 非对称型 Y 形分束器的传输特性

当两个输出分支的中心线相对于输入分支的中心线的偏移量 $S_1 \neq S_2$ 且 $S_1 = L_1, S_2 = L_2$ 时,图 1 所示的结构就变成了非对称型 Y 形分束器。图 10 给出了在 $\lambda = 1200$ nm, $\omega = 150$ nm 的条件下,固定 $S_1 = L_1 = 400$ nm,调节 S_2 的大小,使 S_2 从 400 nm 变化到 700 nm 情况下,非对称型 Y 形分束器的反射率 R 、输出分支 1 的传输率 T_1 和输出分支 2 的传输率 T_2 随着波长 λ 变化的关系图。

从图 10 中可以看出,随着 S_2 的增大,反射率 R 总体呈微弱上升趋势。当 $S_2 = S_1$ 时,Y 形分束器呈对称型,由于两个输出分支的能量分束比没有严

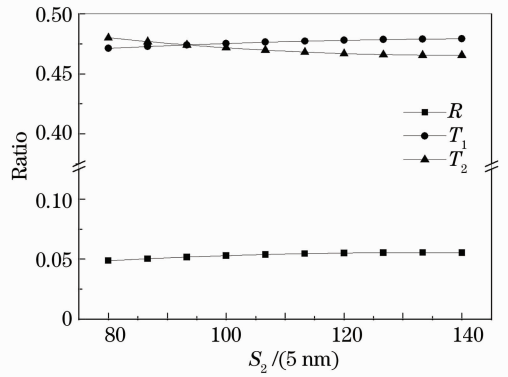


图 10 在 $\lambda = 1200$ nm, $\omega = 150$ nm, $S_1 = L_1 = 400$ nm 条件下,反射率 R 、传输率 T_1 和 T_2 随 S_2 的变化关系图

Fig. 10 Dependence of R, T_1 and T_2 on S_2 when $\lambda = 1200$ nm, $\omega = 150$ nm, $S_1 = L_1 = 400$ nm

格达到 1:1,导致 T_1 与 T_2 有所偏差,取值不严格相等。当 $S_2 > S_1$ 时, $T_1 \neq T_2$,差值 $|T_1 - T_2|$ 较小,随着 S_2 的增大,差值 $|T_1 - T_2|$ 逐渐增大。总体上,传输率 T_1 和 T_2 的取值相差不大。这些现象,可以解释为:当偏移量 $S_2 = S_1$ 时,Y 形分束器为对称型,传输率 T_1 基本等于 T_2 。当偏移量 $S_2 > S_1$ 时,输出分支 2 的弯曲分叉部分在垂直方向和水平方向的跨度均大于输出分支 1 的,垂直方向的跨度对传输特性影响较大,因此,输出分支 2 对场的传输阻力较大,反射效应增大,反射率 R 变大,传输率 T_2 变小。由于输出分支 2 的弯曲分叉部分长度 L_2 与偏移量 S_2 是同时变化的,输出分支 2 的弯曲分叉部分长度 L_2 减小使传输率 T_2 变小,偏移量 S_2 减小使传输率 T_2 变大,反之,输出分支 2 的弯曲分叉部分长度 L_2 增大使传输率 T_2 变大,偏移量 S_2 增大使传输率 T_2 变小,这两方面影响相互抵消。因此,在这种非对称情况下,Y 型分束器的两个输出分支的能量差值较小。

3.3 弯曲分叉部分分别为正弦形和圆弧形时的传输特性比较

在其他几何结构参数相同的条件下,计算了弯曲分叉部分分别为正弦形和圆弧形时 Y 形分束器传输特性。图 11 给出了在 λ 在 600 ~ 1600 nm 波长范围内, $\omega = 150$ nm, $S_1 = S_2 = L_1 = L_2 = 600$ nm 条件下,这两种 Y 形分束器的反射率 R 、输出分支 1 的传输率 T_1 和输出分支 2 的传输率 T_2 随着波长 λ 变化的关系图。

从图 11 中可以看出,在 600 ~ 1500 nm 波长范围内,弯曲分叉部分为正弦形的反射率 R 比圆弧形的大,传输率 T_1, T_2 比圆弧形的小,说明圆弧形

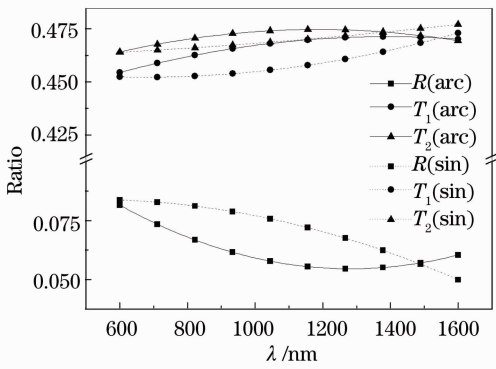


图 11 在 $w=150\text{ nm}$, $S_1=S_2=L_1=L_2=600\text{ nm}$ 条件下, 弯曲分叉部分分别为正弦形(实线)和圆弧形(虚线)Y形分束器的反射率 R 、传输率 T_1 、 T_2 随 λ 的变化关系图

Fig. 11 Dependence of R , T_1 and T_2 on λ when Y-splitters are respectively with sine shaped arc (solid line) and circular shaped arc (dotted line) at $w=150\text{ nm}$, $S_1=S_2=L_1=L_2=600\text{ nm}$

Y形分束器的传输特性较好。当波长大于 1500 nm 以后, 情况正好相反。

4 结 论

采用数值方法讨论了两种基于MIM型表面等离子体光波导的Y形分束器, 它们的弯曲分叉部分分别为正弦形和圆弧形。数值计算表明, 这两种Y形分束器的传输特性可以通过调整其波导宽度, 输出分支的偏移量以及弯曲分叉部分的长度得到调整。波导宽度对这两种Y形分束器传输特性的影响较为明显, 两个输出分支的偏移量和弯曲分叉部分长度对这两种Y形分束器传输特性的影响比较微弱。在 $600\sim 1500\text{ nm}$ 波长范围内, 弯曲分叉部分为圆弧形的Y形分束器的传输特性比弯曲分叉部分为正弦形的好。对于非对称型Y形分束器, 当弯曲分叉部分为正弦形时, 偏移量对反射率、传输率和能量分束比的调节作用较为明显, 能量分束比最大可达到 $2:1$ 。当弯曲分叉部分为圆弧形时, 偏移量对反射率、传输率和能量分束比的调节作用较为微弱。这种基于MIM型表面等离子体光波导的Y形分束器可以用于光子器件集成领域和传感器领域。

参 考 文 献

- 1 W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen *et al.*. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6905): 824~830
- 2 E. Ozbay. Plasmonics: merging photonics and electronics at

- nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189~193
- 3 S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov, E. Devaux *et al.*. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. *Nature*, 2006, **440**(7083): 508~511
- 4 S. A. Maier. Plasmonics: The promise of highly integrated optical devices [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2006, **12**(6): 1671~1677
- 5 Qin Xiaojuan, Guo Yanan, Xue Wenrui. Propagation properties of a surface plasmonic waveguide with a double-square-shaped air core[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3537~3541
- 秦小娟, 郭亚楠, 薛文瑞. 双正方形中空表面等离子体光波导的传输特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3537~3541
- 6 R. Zia, M. D. Selker, P. B. Catrysse *et al.*. Geometries and materials for subwavelength surface plasmon modes[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(12): 2442~2446
- 7 S. E. Kocabas, G. Veronis, D. A. B. Miller *et al.*. Modal analysis and coupling in metal-insulator-metal waveguides [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(3): 035120
- 8 J. A. Dionne, L. A. Sweatlock, H. A. Atwater. Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(3): 035407
- 9 G. Veronis, S. Fan. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(13): 131102
- 10 Z. Han, S. He. Multimode interference effect in plasmonic subwavelength waveguides and an ultra-compact power splitter [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **278**(1): 199~203
- 11 Zhao Huawei, Huang Xuguang, Su Hui. A novel Y-branch waveguide based on surface plasmon polaritons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1649~1652
- 赵华伟, 黄旭光, 苏辉. 基于表面等离子体波的新型Y分支波导[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1649~1652
- 12 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
- 13 Liu Yexin, Chen Xiaowen, Xing Xiaobo *et al.*. Multimode interference 1×3 splitter incorporated with functions of electroabsorption modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1406~1410
- 刘叶新, 陈晓文, 邢晓波. 具有调制功能的多模干涉型 1×3 分束器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1406~1410
- 14 B. Wang, G. P. Wang. Surface plasmon polariton propagation in nanoscale metal gap waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(17): 1992~1994
- 15 Z. Han, L. Liu, E. Forsberg. Ultra-compact directional couplers and Mach-Zehnder interferometers employing surface plasmon polaritons[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 690~695
- 16 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
- 17 T. Wang, X. Wen, C. Yin *et al.*. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 24096~24101
- 18 S. Xiao, L. Liu, M. Qiu. Resonator channel drop filters in a plasmon-polaritons metal [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2932~2937
- 19 A. Hosseini, Y. Massoud. Nanoscale surface plasmon based resonator using rectangular geometry[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(18): 181102
- 20 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

- 21 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
- 22 J. Tao, X. G. Huang, X. S. Lin *et al.*. Systematical research on characteristics of double-sided teeth-shaped nanoplasmonic waveguide filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(2): 323~327
- 23 J. Tao, X. G. Huang, X. S. Lin *et al.*. A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multipleteeth-shaped structure[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 13989~13994
- 24 X. S. Lin, X. G. Huang. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(23): 2874~2876
- 25 Y. Qi, D. Gan, J. Ma *et al.*. Spectrally selective splitters with metal-dielectric-metal surface plasmon waveguides [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **95**(4): 807~812
- 26 Zhong Xiaolan. A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with metal-insulator-metal Bragg reflector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 537~541
钟晓岚. 金属-绝缘体-金属布喇格反射腔的窄带滤波研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 537~541
- 27 M. J. Weber. Handbook of Optical Materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003
- 28 A. Taflove, S. C. Hagness. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method (2nd ed) [M]. Boston: Artech House, 2000. 67~107

栏目编辑:韩 峰