

文章编号:1001-5078(2007)01-0069-03

余弦型 Y 分支结构参数的性能分析

王伟,潘炜,罗斌,王勇

(西南交通大学信息科学与技术学院,四川 成都 610031)

摘要:针对低损耗余弦型 Y 分支光波导的分析与设计,首先对其弯曲损耗进行理论推导,其次对光传播损耗特性起主要影响作用的三个结构参数(波导宽度、过渡区长度、分支高度),利用有限差分光束传播法(FD-BPM)进行了逐个性能优化分析。结果表明:传输损耗随波导宽度的增加而减小,随过渡区长度的增长而减小,随分支高度的增加而增大,此结果可为各种 Y 分支的选取提供参考。

关键词:弯曲损耗;Y 分支;有限差分光束传播法;损耗特性

中图分类号:TN256 **文献标识码:**A

Analysis of the Cosine Style of Y-branch Parameters Characteristic

WANG Wei, PAN Wei, LUO Bin, WANG Yong

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aimed at the Y-branch optical waveguide of low loss cosine style, the bending loss theory was calculated by the finite difference beam propagation method, systematic simulate the optical transmit situation of Y-branch structure and the three important structure parameters had carried on optimization analysis. The results show that the transmit loss decrease with the waveguide width increasing, and transition length decrease with the branch height increasing. The results provide a useful reference for selecting the Y-branch.

Key words: bending loss; Y-branch; FD-BPM; loss characteristic

1 引言

Y 分支光波导是集成光学中的重要器件,适用于光的分束和两相干光的干涉等,并广泛应用于光调制器和光开关的制作^[1-2],对其性能的优化均能应用于马赫曾德尔干涉仪性能的改善,因而 Y 分支的设计及优化备受关注,其优化一般有两个途径:改变分支折射率分布^[3-4]和改变分支形状。前者主要是通过改变 Y 分支不同区域的折射率分布来补偿分支处引起的相位失配,从而降低 Y 分支的辐射损耗,但这种方法在制作工艺上非常复杂,对光刻的要求较高,一般难以实现;后者将直接转向型分支变形为 S 形,可以有效解决直接转向型分支中分支角过小,分支波导过长及制作工艺重复性差^[5-6]等问题,

此法也是目前研究 Y 分支的主要方式,实际中常见的 S 形分支有余弦函数和上升反正弦函数。由文献[7]可知,上升反正弦函数的损耗明显高于余弦函数的损耗,故本文只讨论过渡区为余弦函数的 Y 分支的性能,又因结构参数对其传输损耗性能起主导作用,所以拟采用改变分支形状的分析方法。

基金项目:国家自然科学基金(NO. 10174057, 90201011);教育部科学技术研究重点(NO. 105148);四川省应用基础科学研究计划(03JY029-048-1);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目。

作者简介:王伟(1979-),男,现于西南交通大学信息科学与技术学院通信与信息系统专业攻读硕士学位,从事光通信与光器件的研究。

收稿日期:2006-04-19; **修订日期:**2006-05-22

首先利用弯曲损耗理论较为详细地推导了Y分支的弯曲损耗,其次借助FD-BPM法来对影响传输损耗起主要作用的三个结构参数(波导宽度、过渡区长度、分支高度)的性能进行了逐一优化分析,针对具体的折射率得到一组优化的结构参数。并将这组最佳参数应用到马赫曾德尔干涉仪(MZI)上,其损耗特性较直接转向型T分支的MZI有了明显改善。

2 余弦型Y分支的弯曲损耗分析

余弦型Y分支的数学表示式为^[8]:

$$y(x) = h \left[1 - \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) \right] \quad (1)$$

其示意图如图1所示。

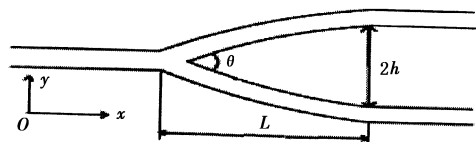


图1 Y分支光波导结构示意图

其中, L 为过渡区长度; h 为分支高度;坐标轴的零点为Y分支的分支起点。

对于一段单独的弯曲波导,损耗主要包括为弯曲损耗和直波导与弯曲波导的过渡损耗。过渡损耗是由于连接处的弯曲曲率不连续而造成的模式耦合损耗,对于S弧形波导在连接处的曲率半径接近于零,所以其过渡损耗在理论上趋于零,而只考虑弯曲损耗。

弯曲损耗系数表示为:

$$\alpha = \int \alpha(R) ds \quad (2)$$

式中: $\alpha(R) = C_1 e^{-C_2 R}$ 表示单位长度的弯曲损耗, C_1 和 C_2 是与波导结构参数有关的常数^[9], $R = l^2 \sec(\pi x/l) / \pi^2 h$ 为余弦型弯曲波导的曲率半径,下面即为弯曲损耗的具体推导过程:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{10}{\ln 10} \int_0^{s_1} \alpha(s) ds \\ &= \frac{10}{\ln 10} C_1 \int_0^l \exp\left(-C_2 \frac{l^2}{\pi^2 h} \sec\left(\frac{\pi x}{l}\right)\right) \cdot \\ &\quad \frac{\pi h}{l} \sqrt{\left(\frac{l}{\pi h}\right)^2 + \sin^2 \frac{\pi x}{l}} dx \end{aligned} \quad (3)$$

令 $\gamma = \frac{C_2 l^2}{\pi^2 h}$, $X = \frac{\pi x}{l}$,式(3)化简为 $\alpha = \frac{10}{\ln 10} \frac{C_1 l}{\pi} \int_0^{\pi} \exp(-\gamma \sec X) dX$,由于 $\sec X$ 在 $\pi/2$ 时无穷大,积分式必须分为两部分,且 $\exp(-\gamma \sec X)$ 是偶函数,故最终弯曲损耗化为:

$$\alpha(\text{dB}) = \frac{20}{\ln 10} \frac{C_1 l}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp(-\gamma \sec x) dx \quad (4)$$

结合图1及弯曲损耗分析,余弦型Y分支的结构参数主要有波导宽度、过渡区长度及分支高度。以上是一种忽略过渡损耗的纯弯曲分析,只能粗略地描述Y分支设计参数同弯曲损耗之间的关系。想进一步确切、直观地描述不同波导宽、分支间距和过渡区长度对波导传输损耗的影响,就需要运用有限差分光束传播法(FD-BPM)^[10]来分析,它是模拟和分析波导中光波传输的有力工具。基于下列参数构建余弦型Y分支:衬底长为25mm,宽为400 μm ,衬底折射率为1.510,波导折射率为1.5135,有效折射率为1.5111,输入 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 的高斯基模。图2是对应Y分支光场仿真,此时Y分支光波导具有良好的单模特性,导波峰值相对中心有少量周期偏移,这是因为两平行臂及斜臂之间的模场有能量耦合与交流,只要增大间距,就可以消除这种现象,图3给出了平行波导间距大小两种情况下,模场的能量耦合情况。

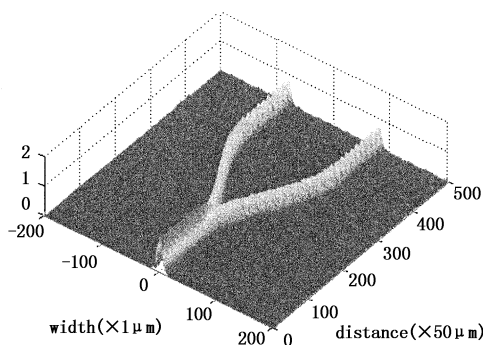


图2 光在Y分支光波导中的传播仿真

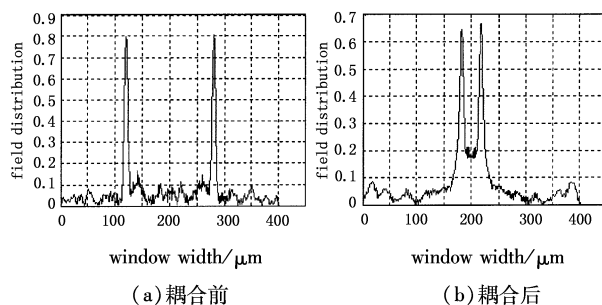


图3 不同平行波导间距的耦合

3 结构参数的分析及选取

3.1 波导宽度与输出特性的关系

图4所示为在波导宽度递增的情况下,各分支中损耗随传输距离变化的曲线。在直波导区域,功率衰减很缓慢,曲线较平滑,在不同波导宽度的S区域,功率衰减加快。损耗随着波导宽度的增加而减

小。当宽度大于 $16\mu\text{m}$ 后,功率变化基本趋于一致。考虑到在制作 Y 分支时,波导宽度不宜太大。其中宽度为 $10\mu\text{m}$ 时,其功率变化较其它波导平稳,损耗约为 0.34dB ,是十分理想的参数。

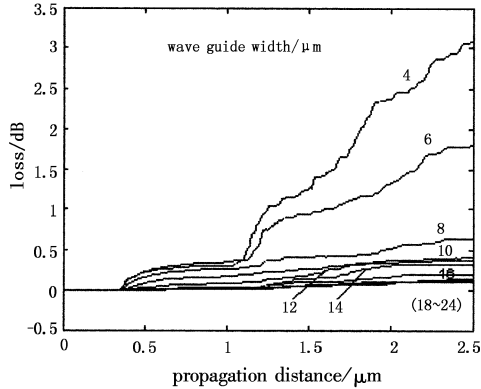


图4 不同波导宽度与波导传输损耗的关系

3.2 过渡区长度与输出特性的关系

过渡区长度因受器件尺寸及损耗等因数的限制,波导不能做的很长,因此必须选取恰当的长度。由上图分析得最佳波导宽度为 $10\mu\text{m}$ 及一般构图分支高度以 $100\mu\text{m}$ 为值,其它参数同上。图 5 为不同过渡区长度下, Y 分支中光功率损耗随传输距离变化的关系曲线。在直波导区,不同的过渡区长度对应的损耗变化趋势相同。而在分支区域损耗变化均剧烈加快同时也较复杂,但很明显过渡区长度为 6mm 时损耗最小且变化最平稳,损耗低于 0.3dB ,所以 6mm 是比较理想的长度,从物理分析来看,随着过渡区长度增加,波导的曲率半径增加了,损耗成减小趋势,在图 5 中可见,当过渡区长度大于 6mm 后,大体趋势也是如此。

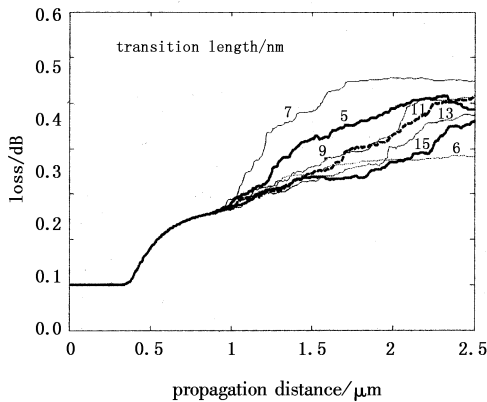


图5 不同过渡区长度与波导传输损耗的关系

3.3 分支高度对输出特性的影响

图 6 为波导宽度为 $10\mu\text{m}$ 和过渡区长度为 6mm 时,不同分支高度的损耗曲线。随着分支高度增加,输出端口损耗不断增大。当分支高度超过 $160\mu\text{m}$

(分支张角 $\theta = 2\text{tan}^{-1}(h/l) > 3.0^\circ$) 出现光损耗急剧加大的现象。物理机制上分析是:随着分支高度的增大,在 Y 分支处产生的辐射模使传输功率下降。需说明的是图 6 中有一处特例,分支高度为 $80\mu\text{m}$ 时的损耗小于 $60\mu\text{m}$ 的损耗,可理解为:由于 Y 分支两斜臂以及平行臂之间有能量交换,导致模场分布不对称所致,但从总趋势分析,损耗随分支高度(分支张角)增加而增大。考虑到平行臂之间的距离不宜取得太接近,所以选取分支高度为 $80\mu\text{m}$,分支角为 1.8° ,此时功率损耗仅为 0.23dB ,是较理想的。

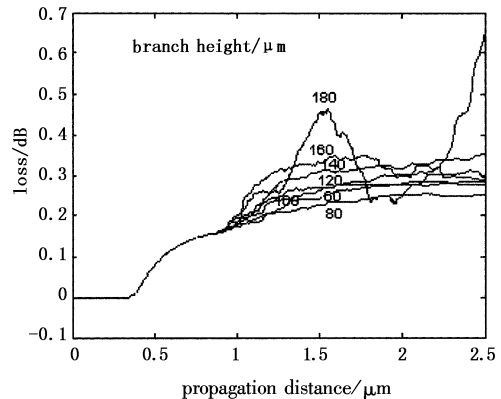


图6 不同分支高度与波导传输损耗的关系

对于任何给定基本参数的 Y 分支,此法均可获得最优的结构参数。将以上分析得到的最佳参数应用到 MZI 上,并与传统的 Y 分支处为直接转向型的马赫曾德尔进行了对比,结果如图 7 所示。Y 分支处采用余弦型的 MZI 功率损耗较分支处为直接转向型结构,在输出端口功耗明显的减小,归一化功率可达近 94% 。同时可以预见,若将其应用到 MZI 光开关或调制器上,其消光比也将得到改善。

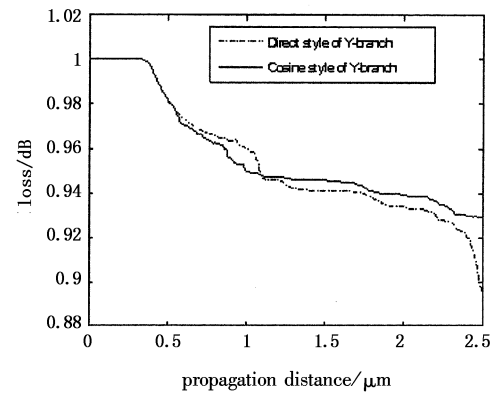


图7 两种不同 Y 分支的 MZI 波导归一化输出功率的比较

4 结论

文中先用弯曲损耗理论对余弦型 Y 分支的弯曲损耗进行了详细的推导,其次采用 FD - BPM 对

(下转第 75 页)

4 结论

我们应用矢量衍射理论,考虑了间隔薄膜层的效应,着重分析了成像特性随薄膜的厚度和折射率的变化。结果发现,有薄膜存在时,在内样品表面附近,光斑大小和边瓣强度基本不变,但是光斑的强度随深度的增加先增加而后减小;当深度较大时,光斑很大,成像质量严重下降。光斑的强度 I 、光斑大小 G 和边瓣强度 M 都随薄膜的厚度发生振荡。光强比较大时,光斑也比较大。光斑的大小和强度也与薄膜材料的折射率有关。薄膜材料的折射率与 SIL 的折射率相匹配时成像效果较好、分辨率较高,对于生物样品显微,可以通过改变盖玻片的折射率来实现。但是,对于光存储,很难使两者的折射率相匹配,因此,只有靠调整间隔薄膜的厚度来改变成像质量。

参考文献:

- [1] Mansfield S M, Kino G S. Solid immersion microscope [J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 57(24): 2615 - 2616.
- [2] Yoshita M, Koyama K, Baba M, et al. Fourier imaging study of efficient near-field optical coupling in solid immersion fluorescence microscopy [J]. J. Appl. Phys., 2002, 92(2): 862 - 865.

(上接第 71 页)

余弦型 Y 分支光波导的三个重要参数进行了逐一优化分析,得出传输损耗的变化趋势:随过渡区长度的增长而减小;分支高度的增加而增大;波导宽度的增加而减小。并针对具体的折射率参数,得到了一组优化参数,将其应用到 MZI 上,结果表明:Y 分支为余弦型的 MZI 归一化功率值在端口处明显高于直接转型。

参考文献:

- [1] P Granstrand, et al. Strictly nonblocking 8×8 integrated optical switch matrix [J]. Electron. Lett., 1986 22 (6): 816 - 818.
- [2] P S Chung, H P Chan, E Y B Pun. Novel design of integrated optical beam splitters using symmetric Y-branch structures [J]. IEEE J. Quant. Electron., 1990, 137 (5): 340 - 344.
- [3] L A White. Radiation from bends in optical waveguides: the volumn-current method [J]. Microwave Opt. Acoust., 1979, 8 (3): 186 - 188.
- [4] H P Chan, S Y Cheng, et al. Low loss wide-angle sym-

- [3] Terris B D, Mamin H J, Ruger D. Near-field optical data storage using a solid immersion lens [J]. Appl. Phys. Lett., 1994, 65(4): 388 - 390.
- [4] Ghislain L P, Elings V B, Crozier K B, et al. Near-field photolithography with a solid immersion lens [J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 74(4): 501 - 503.
- [5] Zhao H, Moehl S, Wachter S, et al. Hot exciton transport in ZnSe quantum wells [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80 (8): 1391 - 1393.
- [6] Helseth L E. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens [J]. Opt. Commun., 2001, 191: 161 - 172.
- [7] 谢建平,鲁拥华,王沛,等.用角谱方法分析固体浸没透镜的近场分布 [J].光学学报,2002,22(4):413 - 416.
- [8] Zhang Y, Zhang C, Zou Y. Focal-field distribution of the solid immersion lens system with an annular filter [J]. Optik, 2004, 115: 277 - 280.
- [9] Lu Y, Xie J, Ming H. Binary pure-phase filter optimized the optical distribution, of solid immersion lens [J]. Opt. Commun., 2003, 215: 251 - 255.
- [10] 母国光,战元令.光学 [M].北京:人民教育出版社,1978,438 - 440.

metric Y-branch waveguide [J]. Electron. Lett., 1996, 32 (7): 652 - 654.

- [5] H H Hamid, L C Park, J L Max. A new low-loss wide-angle y-branch configuration for optical dielectric slab waveguides [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1994, 6 (4): 528 - 530.
- [6] J M Hsu, C T Lee. Systematic design of novel wide-angle low-loss symmetric y-junction waveguides [J]. IEEE J. Quant. Electron., 1998, 34(4): 673 - 679.
- [7] Zheng H L, Chen F S. Bending Loss of Two Kinds of Y-Branch Optical Waveguides [J]. Semiconductor Optoelectronics. 2005, 26(1): 30 - 33. (in Chinese)
- [8] Koai K T, Liu P L. Modeling of Ti:LiNbO₃ waveguide devices: Part-II S-shaped channel waveguide bends [J]. IEEE J. Lightwave Technol., 1989, 7(7): 1016 - 1022.
- [9] A J MarcattiliE, S E Miller. Improved relations describing directional control in electromagnetic wave guidance [J]. Bell Syst. Tech. J., 1969, 48 (9): 2166 - 2188.
- [10] T M Benson, P Sewell, A Vokovic, et al. Advance in the finite difference beam propagation method [J]. ICTON, 2001, 9 (2): 36 - 41.