

一种带有锥形多模过渡区的 Y 分支光波导

武继江, 高金霞

(山东理工大学物理系, 山东 淄博 255049)

摘要:为减小 Y 分支波导的分支损耗, 提出在输入波导和两输出波导间引入锥形多模过渡波导。与已被用于减小 Y 分支波导分支损耗的矩形多模过渡波导相比, 所引入的锥形多模过渡波导, 不仅可以减小过渡波导的长度, 还可进一步减小分支损耗。利用三维有限差分光束传播法, 对具有锥形过渡波导的退火质子交换铌酸锂 Y 分支光波导进行了数值模拟。数值结果为该类 Y 分支光波导的设计和制备提供参考。

关键词:集成光学; Y 分支波导; 锥形过渡波导; 有限差分光束传播法

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A

A Y-branch Waveguide with a Tapered Multimode Transitional Section

WU Ji-jiang, GAO Jin-xia

(Department of Physics, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to reduce the branching loss, a Y-branch waveguide structure is presented, in which a multimode tapered transitional waveguide is embedded between an incident channel and an output branch. Compared with a rectangular transitional waveguide which has been introduced in Y-branch for the same purpose, the tapered transitional waveguide can not only reduce the length of the transitional waveguide, but also further reduce the branching loss. The annealed proton-exchanged LiNbO₃ Y-branch optical waveguide with a tapered transitional section is simulated by the three-dimensional finite difference beam propagation method. The numerical results are useful for the design and fabrication of this kind of Y-Branch waveguide.

Key words: integrated optics; Y-branch waveguide; tapered transitional waveguide; finite difference beam propagation method (FD-BPM)

1 引言

Y 分支光波导是集成光电子学中一种重要的器件单元, 有着广泛的应用。分支损耗是 Y 分支波导设计中必须考虑的参数。理论上, 若分支波导能够从无间隙开始逐渐地分离开去, 就可使分支损耗最小。但由于制作工艺上的限制, 具有尖锐分离角的 Y 分支结构还无法实现。为实现低损耗的分支波导, 人们曾提出许多方法^[1-2]。这些方法在一定程

度上降低了分支损耗, 但却增加了制作上的新要求。为了避免工艺上的限制, 从结构上对 Y 分支进行优化设计就变得非常重要。在这方面人们也做了大量工作^[3]。文献[4]提出如图 1(a) 所示的 Y 分支波导结构, 该 Y 分支波导在分支处引入一矩形多模波

作者简介:武继江(1973 -), 男, 讲师, 现主要从事光波导与光纤传输及传感方面的研究。E-mail: w9513110@163.com
收稿日期:2007-07-15; **修订日期:**2007-09-19

导,该多模波导用于改善入射基模与出射偶对称模之间的场分布匹配,能有效提高功率耦合效率,降低分支损耗。而与多模过渡波导相连的输出波导,则采用S形弯曲波导。文献[5]、[6]也提出了类似的结构,所不同的只是在输入波导与矩形多模波导间增加了一锥形过渡波导。本文提出利用抛物线型或指数型多模锥形多模波导代替该多模矩形波导来实现低损耗Y分支波导,如图1(b)所示。

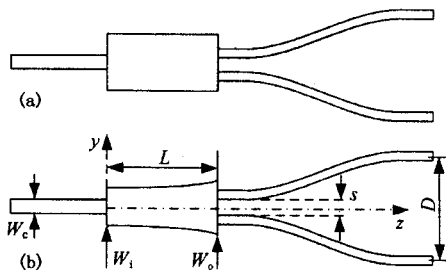


图1 Y分支波导结构示意图

Fig. 1 schematic diagram of Y-branch waveguide

(a) with a rectangular transitional section;

(b) with a tapered transitional section

2 Y分支多模波导过渡区分析

Y分支波导多模过渡区可以是矩形,也可以是线性变化锥形波导,或者是抛物线型和指数型锥形过渡波导。对抛物线型锥形波导,其沿光束传播方向(设为 z 向)的宽度变化满足:

$$W(z) = W_i + (W_o - W_i) \cdot \left(\frac{z}{L}\right) \quad (1)$$

对指数型锥形波导,则是:

$$W(z) = W_i + A \left[\exp\left(\frac{gz}{L}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$A = (W_o - W_i) / (\exp(g) - 1) \quad (3)$$

式中, W_o 和 W_i 分别为过渡波导的输出端和输入端的宽度; g 为指数型锥形波导的形状因子; L 为过渡波导长度。

引入的多模过渡波导比常规的多模干涉器件在宽度上窄,只允许传输少数高阶模,因此用于设计多模干涉耦合器的自成像理论无法适用^[7],但模式传输理论还是适用的。对确定的多模过渡波导结构,其长度可由下式近似确定^[5-6]:

$$L = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_2} \quad (4)$$

其中, β_0 和 β_2 是多模过渡波导的基模和二阶模的传播常数。

根据色散方程,在多模过渡波导中,高阶模与基模间传播常数存在如下关系:

$$\beta_0 - \beta_\nu = \frac{\nu(\nu+2)\pi\lambda\gamma}{4n_r W_o^2} \quad (5)$$

这里, ν 为模阶数; λ 为真空中波长; n_r 为多模过渡波导区的折射率。

对抛物线型锥形过渡波导,式(5)中 γ 为^[8]:

$$\gamma_p = \frac{W_o^2}{2(W_g + W_i)(W_g + W_o)} + \frac{W_o^2 \tan^{-1}[(W_o - W_i)/(W_g + W_i)]^{1/2}}{2(W_o - W_i)^{1/2}(W_g + W_i)^{3/2}} \quad (6)$$

对指数型锥形过渡波导, γ 为^[9]:

$$\gamma_e = \frac{W_o^2}{(W_g + W_i - A)^2} - \frac{W_o^2}{g(W_g + W_i - A)^2} \cdot \ln\left(\frac{W_g + W_o}{W_g + W_i}\right) - \frac{W_o^2(W_o - W_i)}{g(W_g + W_i - A)(W_g + W_o)(W_g + W_i)} \quad (7)$$

对其他各种过渡波导也有相应的 γ 值。而式(6)和(7)中 W_g 为Goos-Hänchen位移:

$$W_g = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) \left(\frac{n_c}{n_r}\right)^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{-1/2} \quad (8)$$

对TE模 $\sigma = 0$,对TM模 $\sigma = 1$; n_c 为波导包层区的折射率。

由式(4)、(5)可知,对以上各种多模过渡波导,其长度 L 与 γ 成反比, γ 越大, L 越小。图2给出了各种过渡波导所对应的 γ 值随输入端宽度 W_i 的变化曲线。图中水平直线的纵坐标对应矩形过渡波导的 γ 值。计算中取: $n_r = 1.474$, $n_c = 1.467$, $g = 5$, $W_o = 20\mu\text{m}$, $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 。由图可知,抛物线型和指数型过渡波导所对应的 γ 值均大于矩形波导所对应的 γ 值,也大于线性过渡波导的 γ 值。图3则是带有以上四种过渡波导的Y分支波导归一化传输功率情况。计算中与多模过渡波导相连的两输出分支波导为常用的余弦型S形弯曲波导。弯曲波导的长度为 $3000\mu\text{m}$,波导宽度 W_c 为 $5\mu\text{m}$,与多模过渡波导相连的输入直波导和与弯曲波导相连的两输出直波导长度均为 $100\mu\text{m}$;分支波导最小间隙 s 为0;两

输出波导间距 D 为 $200\mu\text{m}$; 过渡波导长度由式(4) 决定, W_0 和 W_1 分别为 $12\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$ 。波导其他参数同图 2。由图 3 可知, 具有抛物线型和指数型过渡波导的 Y 分支波导归一化传输功率要大于具有矩形过渡波导的 Y 分支波导。综合图 2 和图 3 可以看出, 与在 Y 分支波导中引入矩形波导相比, 引入的锥形过渡波导, 不仅可以减小过渡波导长度, 还可以减小 Y 分支波导的传输损耗。由图 2 和图 3 还可看出, 线性变化锥形过渡波导也是一种较好的过渡波导。

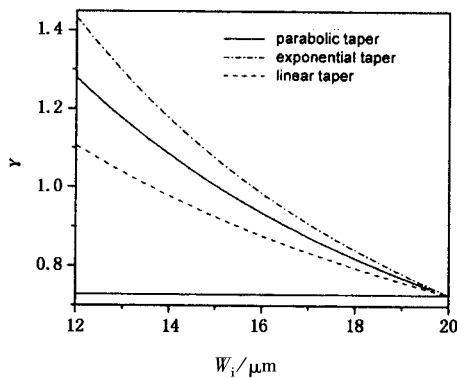


图 2 γ 随过渡波导输入端宽度 W_1 的变化
Fig. 2 γ as a function of the input channel width W_1 of the tapered transitional waveguide

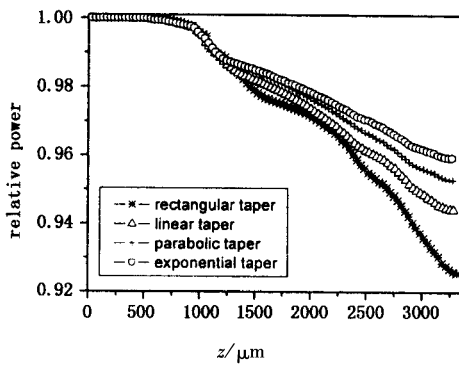
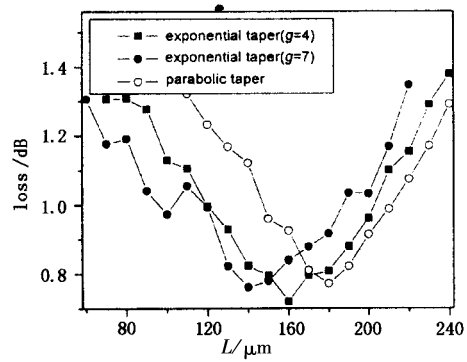


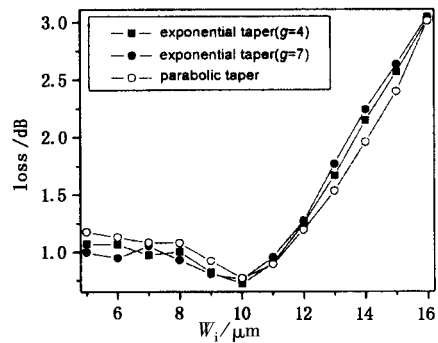
图 3 Y 分支波导中的归一化传输功率
Fig. 3 normalized transmitted power in the Y-branch

3 Y 分支波导数值分析

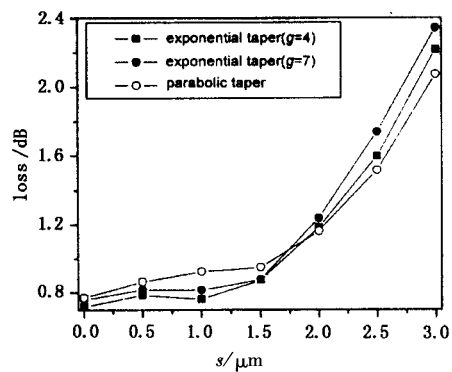
退火质子交换铌酸锂光波具有偏振选择特性, 在制备诸如光纤陀螺多功能芯片中的 Y 分支波导时有着重要的应用。该类波导的折射率分布是渐变的, 对 Y 分支波导中引入的多模过渡波导长度的确定不能应用前面的有关公式。在这里将利用常用的三维有限差分光束传播法, 对采用退火质子交换技术制备的具有锥形多模过渡波导的 Y 分支波导进



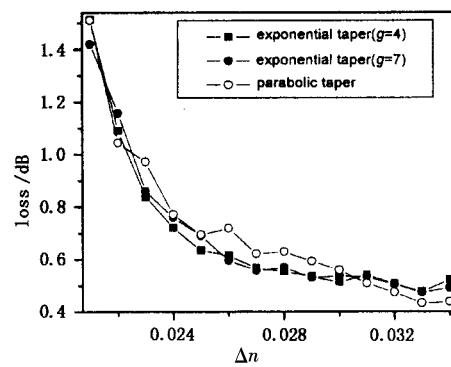
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4 弯曲损耗随波导结构参数的计算结果

Fig. 4 calculation results show the branching loss vs the transitional waveguide length L for (a); the transitional waveguide input channel width W_1 for (b); the space between the two branches s for (c) and the variation of the surface index Δn for (d)

行数值模拟。计算中所采用的退火质子交换铌酸锂光波导折射率分布模型同文献[10]。

分支损耗是分析设计 Y 分支波导必须考虑的性能参数。这里分支损耗用过剩损耗来反应:

$$L_b = -10 \lg \frac{P_{01} - P_{02}}{P_i} \quad (9)$$

式中, P_i 为输入功率; P_{01} 和 P_{02} 分别为两分支输出波导的输出功率。式(9)实际上还包含了两分支波导的弯曲损耗。图4给出过渡波导长度 L 、出射分支波导最小间隙 s 、过渡波导输入端宽度 W_i 和波导表面折射率增量 Δn 对具有锥形过渡区的 Y 分支波导的分支损耗的影响。

图4(a)为分支损耗随过渡波导长度 L 的变化曲线。计算中, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $W_i = 10 \mu\text{m}$, $W_o = 16 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.024$, $s = 0 \mu\text{m}$, 其他参数同图3。由图可以看出, 存在一个 L 值使得分支损耗最小, 并且相应的 L 值, 具有指数型过渡区的 Y 分支波导小于具有抛物线型过渡区的 Y 分支波导。这里的结果与图2的结果是一致的。

图4(b)为分支损耗随过渡波导输入端宽度的变化曲线。计算中保持 $W_o = 16 \mu\text{m}$ 不变, 过渡波导长度 L 为由图4(a)计算得到的分支损耗最小时所对应的长度, 其他参数同图4(a)。由图4(b)可以看出, 在 W_i 小于 $10 \mu\text{m}$ 时, 分支损耗变化不大, 但当 W_i 大于 $10 \mu\text{m}$ 时, 分支损耗增加迅速。分支损耗的这一特点为该波导在制作中的容差考虑提供一定的参考。

图4(c)和(d)分别为分支损耗随出射波导最小间隙 s 和波导表面折射率增量 Δn 的变化曲线。易见, 分支损耗随着 s 的增大而增大, 随着 Δn 的增大而减小。因此在波导制作时, 应使 s 尽可能地小, 而在保证输入和输出波导单模传输的条件下, 使 Δn 尽可能大。

5 结 论

传统的 Y 分支具有较大的分支损耗, 为减小分支损耗, 可以在输入波导和两输出波导间引入矩形过渡波导, 在此基础上, 本文提出利用抛物线型或指数型锥形过渡波导代替矩形过渡波导。所引入的锥形过渡波导, 不仅可以减小过渡波导的长度, 还可进

一步减小分支损耗。基于工程上的需要, 利用三维有限差分光束传播法, 对具有锥形过渡波导的退火质子交换铌酸锂 Y 分支波导进行了数值模拟。数值结果为该类波导的设计和制备提供参考。对这两种锥形波导的特性及他们的选择以及相应分支波导结构参数的优化还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] Lin Han-bin. A very low-loss wide-angle Y-branch with a composite diamond-like microprism [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2001, 37(2): 231 - 236.
- [2] Hung W Y, Chan H P, Chung P S. Novel design of wide-angle single-mode symmetric Y-junctions [J]. Electron. Lett., 1988, 24(18): 1184 - 1185.
- [3] Chan H P, Cheng S Y, Chung P S. Low loss wide-angle symmetric Y-branch [J]. Electron. Lett., 1996, 32(7): 652 - 654.
- [4] 陈抱雪, 袁一方, 矾守. 新型低损耗氧化硅 Y 分支光波导 [J]. 光学学报, 2001, 21(5): 552 - 555.
- [5] Wang Qian, He Sai-ling, Wang Li-rong. A low-loss Y-branch with a multimode waveguide transition section [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2002, 14(8): 1124 - 1126.
- [6] Wang Qian, Lu Jun, He Sai-ling. Optimal design method of a low-loss broadband Y-branch with a multimode waveguide section [J]. Appl. Opt., 2002, 41(36): 7644 - 7649.
- [7] Soldano L B, Pennings E C M. Optical multimode interference devices based on self-imaging: Principles and applications [J]. J. Lightwave Technol., 1995, 13(4): 615 - 627.
- [8] Wei Hong-zhen, Yu Jin-zhong, Zhang Xiao-feng, et al. Compact 3-dB tapered multimode interference coupler in silicon-on-insulator [J]. Opt. Lett., 2001, 26(12): 878 - 880.
- [9] Wu Ji-jiang, Shi Bang-ren, Kong Mei. Exponentially tapered multi-mode interference couplers [J]. Chin. Opt. Lett., 2006, 4(3): 167 - 169.
- [10] 武继江, 石邦任, 孔梅. 退火质子交换 LiNbO_3 光波导低损耗耦合分析 [J]. 激光与红外, 2005, 35(12): 947 - 950.