

文章编号: 0253-2239(2001)05-0552-04

新型低损耗氧化硅 Y 分支光波导

陈抱雪¹⁾ 袁一方¹⁾ 刘守²⁾

(1), 上海理工大学光学和电子信息工程学院, 上海 200093
(2), 日本东京农工大学工学部应用化学系, 东京

摘要: 提出了一种新型的 Y 分支光波导结构。该 Y 分支波导由一个入射波导、一个过渡波导和一对出射波导组成。过渡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, 有效地提高了功率耦合效率, 降低了分支耦合损耗。波束传播法(BPM)数值模拟计算表明, 该结构在 1.31 μm 和 1.55 μm 波长下可分别达到 0.041 dB 和 0.052 dB 分支耦合损耗。实验中用等离子化学汽相沉积(CVD)技术制备了 SiO_2 分支波导样品, 在上述两波长下分别测得分支耦合损耗为 0.08 dB 和 0.09 dB, 基本达到了设计指标。

关键词: 光波导; Y 分支光波导; 场分布匹配; 分支耦合损耗; SiO_2 光波导; 化学汽相沉积(CVD)技术

中图分类号: TN256 文献标识码: A

1 引言

近年, 随着国际互联网的普及, 用户终端通信容量的需求迅猛增长。高速大容量通信系统的核心是用户网络的光学化, 即用光纤取代用户网络中的电缆^[1-3]。在这类系统中, 1×16 、 1×32 等多路分支耦合器件是必不可少的关键器件^[4]。光波导型分支耦合器由于其体积小、集成度高、采用平面工艺适合批量生产等特点, 正日益受到重视并期待能够早日得到实用^[5]。从网络成本、经济化程度来考虑, 减少分路器件的插入损耗一直是重要的课题。在插入损耗的组成中, 作为最基本构成元素的 Y 分支结构的分支耦合损耗是一个不能忽视的因素。理论上, 如果分叉波导能够从无间隙开始逐渐地分离开去, 那么可以获得最大的耦合效率, 分支损耗最小。实际上, 由于光刻模版的制造误差、光刻时的衍射效应以及蚀刻工艺误差等的影响, 这种理想的、具有尖锐分离角的 Y 分支结构还不能被实现。制造上能维持良好重复性的 Y 分支结构的最小分离间隔一般在 2 μm 左右, 这增大了入射基模与出射偶对称模在分支部位的不匹配, 由此产生的辐射模形成较大的耦合损耗。对于低折射率差光波导, 这种损耗的数量级约为 0.2 dB 左右。

为了避开工艺上的限制, 从结构上对 Y 分支进行优化设计变得很重要。有关这方面的工作有不少报道^[6-12]。其中, 在 Y 分叉部位设置一个低折射率

楔区, 通过调节光波速度实现导模缓慢过渡的方法取得了很好的结果, 理论和实验都得到了小于 0.1 dB 的分支损耗^[10]。但是, 这种结构几何形状复杂, 牵动的因素很多, 设计和制造上都有相当难度。

本文提出了一种新型的 Y 分支结构, 构造上比较简单, 利用了波面修正的机理, 设计和实验都取得了相当好的结果。

2 原理和设计结果

分支结构如图 1 所示, 由三个区域组成。区域 1 是一个单模入射波导, 区域 2 是一个带有突变分界面的单模过渡波导, 区域 3 是一对对称单模出射波导。三个区域的波导厚度相同。

在分界面 $z = 0$ 上靠近区域 1 一侧, 设入射基模 ϵ_1 为

$$\epsilon_1 = a_1 \psi_1(x, y). \quad (1)$$

由于在 $z = 0$ 界面上发生波导宽度的突变, 在区域 2 的单模过渡波导中将激励起本征基模和辐射模。于是在分界面 $z = 0$ 上靠近区域 2 一侧的光场 ϵ_2 可表示成

$$\epsilon_2 = a_2 \psi_2(x, y) + \int_{\mu} b_2(\mu) \psi_{\mu}(x, y) d\mu, \quad (2)$$

式中等号右边第一项代表区域 2 单模过渡波导的本征基模, 第二项代表连续谱辐射模的叠加。按照模耦合理论, 场 ϵ_1 和 ϵ_2 之间有如下振幅比关系

$$a_2/a_1 = \iint \psi_2^* \psi_1 dx dy / \iint |\psi_2|^2 dx dy. \quad (3a)$$

$$b_2(\mu)/a_1 = \iint \psi_\mu^* \psi_1 dx dy / \iint |\psi_\mu|^2 dx dy. \quad (3b)$$

它们的大小取决于波导宽度 w_1 和 w_2 的差异程度。如果 $w_1 = w_2$, 或者象通常的 Y 分支结构那样 w_1 缓慢地过渡到 w_2 , 那么辐射模被抑制, (3a) 式等于 1, (3b) 式等于 0。

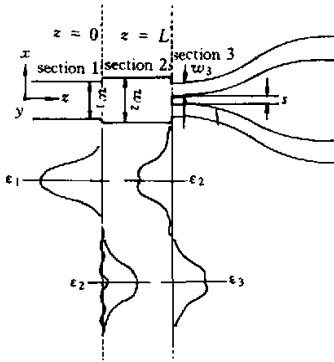


Fig.1 Geometry used in the analysis shows a new Y-branch waveguide, in which a transitional guide (section 2) is embedded between an incident channel (section 1) and an output branch (section 3). The mode fields at the boundaries of $z=0$ and $z=L$ are also given

场 ϵ_2 经过长度为 L 的区域 2 到达界面 $z=L$ 上时, 基模与辐射模的叠加场 ϵ'_2 可以写成

$$\epsilon'_2 = A_2(L)\phi_2(x, y) = a_2\psi_2(x, y)\exp(-j\beta_2 L) + \int b_2(\mu)\psi_\mu(x, y, L)\exp[-j(k_{\mu x}x + k_{\mu y}y + k_{\mu z}L)]d\mu, \quad (4)$$

式中 β_2 为过渡波导基模的传播常数, $k_{\mu x}$ 、 $k_{\mu y}$ 和 $k_{\mu z}$ 为连续谱辐射模的 x 、 y 和 z 方向波数分量。因为波导结构以 $y-z$ 面镜面对称, 所以场 ϵ'_2 的一部分在界面 $z=L$ 的区域 3 一侧转化为出射波导的偶对称本征模 ϵ_3 , 其余部分变为区域 3 中的辐射模。辐射模的大部分将散射掉成为分支耦合损耗。若将 ϵ_3 表示成

$$\epsilon_3 = a_3\psi_3(x, y), \quad (5)$$

那么, 根据模耦合理论可以得到功率耦合系数

$$\eta = \frac{\left| \iint \phi_2^* \psi_3 dx dy \right|^2}{\iint |\phi_2|^2 dx dy \cdot \iint |\psi_3|^2 dx dy}. \quad (6)$$

显然, 场分布 ϕ_2 与 ψ_3 的形似程度愈高, η 愈趋近于 1, 功率耦合愈充分, 分支耦合损耗愈小。

如图 1 所示, 偶对称模 ϵ_3 的场分布有两个对称峰, 与来自区域 1 的单模波导的基模在场形上不匹配。区域 2 过渡波导的作用是通过激发适量的辐射

模, 调节辐射模与基模的相位差, 使它们的叠加形成一个与 ϵ_3 比较匹配的场分布 ϵ'_2 , 从而获得高的耦合效率。这是本器件及其设计上的一个主要特点。

我们用波束传播法 (BPM)^[13] 进行了最优化设计。软件是日本富士综合研究所开发的、采用了等效折射率法的拟三维波束传播法程序 PROLOG。波导材料是 SiO_2 , 波导在 y 方向的厚度为 $8 \mu\text{m}$, 入射波导宽度 $w_1 = 8 \mu\text{m}$ 。相对折射率差定义为 $\Delta = (n_c^2 - n_s^2)/2n_c^2$, n_c 和 n_s 分别为波导芯和周围包层的折射率。波长是通信段的两个主要波长 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 。顾及运算时间和内存, 计算分三部分进行。一是局限于 Y 分支结构的部位, 目的是尽可能反映场分布匹配的效应, 计算区域: 横向 $80 \mu\text{m}$ 、纵向 $3950 \mu\text{m}$ 。另一个是与此区域对应的单根出射弯曲伸展波导的计算, 目的是反映在 Y 分支结构计算中包含的弯曲损耗。第三个是横向 $155 \mu\text{m}$ 、纵向 $12000 \mu\text{m}$ 区域内单根出射弯曲伸展波导的计算, 目的是反映弯曲波导总长上的弯曲损耗。三个计算均取横向细分宽度 $0.1 \mu\text{m}$ 、纵向步长 $0.2 \mu\text{m}$ 。

先对图 1 区域 3 的出射波导进行优化设计。其入射端宽度 w_3 为 $3 \mu\text{m}$, 随着波导路径的伸展, 逐步扩展到 $8 \mu\text{m}$ 。为了减小弯曲损耗, 波导路径的曲率半径按正弦函数变化, 入射端分支角为零度。按上述第二个内容做了波束传播法模拟运行, 结果表明, 当 $\Delta = 0.3\%$ 时, $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下, 单根弯曲伸展波导经约 4mm 的弯曲传输, 其损耗分别为 0.0044 dB 和 0.0047 dB 。因此推得两根弯曲伸展波导的总损耗在两波长下分别为 0.0088 dB 和 0.0094 dB , 均小于 0.01 dB 。

其次对分支结构在上述第一个波束传播法区域上进行优化设计。分支损耗 L_b 用过剩损耗来反映, 其中包含已知的小于 0.01 dB 的弯曲损耗, 即

$$L_b = -10 \lg \frac{P_{o1} + P_{o2}}{P_i}, \quad (7)$$

式中 P_i 为输入功率, P_{o1} 和 P_{o2} 分别为两支输出波导的输出功率。计算分析结果如图 2 所示。在图中给出了过渡波导宽度 w_2 、过渡波导长度 L 、相对折射率差 Δ 以及出射波导最小间隙 s 等因素对分支损耗的影响。在上述分析基础上, 考虑两个波长的平衡, 给出优化组合。当取 $w_2 = 9.5 \mu\text{m}$, $L = 150 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.3\%$, $s = 2 \mu\text{m}$ 时, 波束传播法模拟运行结果表明, $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 的波长的分支耦合损耗非常小, 分别为 0.041 dB 和 0.052 dB 。选取 $s = 2 \mu\text{m}$ 是

因为适合于批量生产的、包括包层掩埋在内的工艺技术还不能实现 $s < 2 \mu\text{m}$ 的结构。

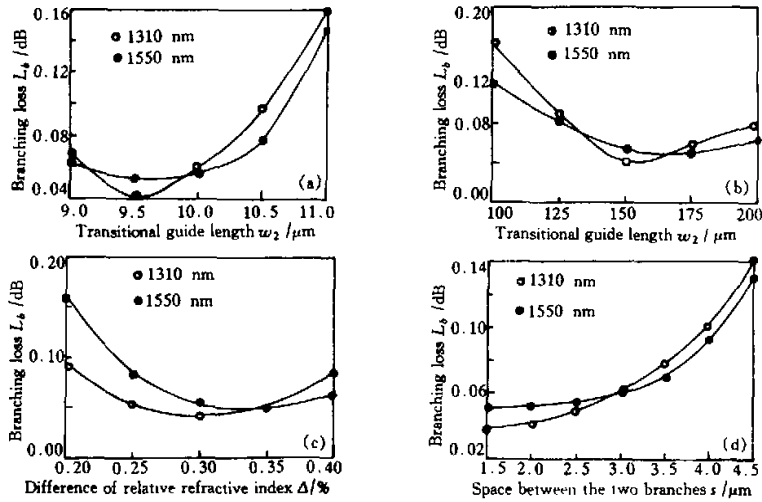


Fig.2 Calculation results show the branching loss L_b vs the transitional guide width w_2 for (a); the transitional guide length L for (b); the difference of relative refractive index Δ for (c) and the space between the two branches s for (d), respectively. These are solved from the BPM analysis at $\Delta=0.3\%$, $L=150 \mu\text{m}$, $s=2 \mu\text{m}$ for (a); $\Delta=0.3\%$, $w_2=9.5 \mu\text{m}$, $s=2 \mu\text{m}$ for (b); $L=150 \mu\text{m}$, $w_2=9.5 \mu\text{m}$, $s=2 \mu\text{m}$ for (c); and $\Delta=0.3\%$, $L=150 \mu\text{m}$, $W_2=9.5 \mu\text{m}$ for (d), respectively

最后,在纵向长 12 mm 的区域上计算了单根出射弯曲伸展波导全长的损耗。输入端和输出端在横向间距为 $122.5 \mu\text{m}$ 。1.31 μm 和 1.55 μm 波长下,单根波导的损耗分别为 0.0201 dB 和 0.0208 dB。据此推得两根弯曲伸展波导的总损耗在两波长下分别为 0.0402 dB 和 0.0416 dB。

3 实验和测量结果

采用等离子化学汽相沉积(CVD)工艺在石英基板上淀积 15 μm 厚 SiO_2 基底层以及 8 μm 厚掺 Ge 的 SiO_2 波导层。通过调节掺 Ge 浓度控制 Δ ,用棱镜耦合技术测得 Δ 为 0.29%。然后,经反应离子蚀刻制成 Y 分支波导,其上覆盖 20 μm 厚 SiO_2 包层。经高温退火处理、切割和端面研磨制备成长度为 2 cm 的两个 Y 分支波导样品。分支波导的一侧同时制备了直波导,用于测量传输损耗和端面耦合损耗。

测量时,输入和输出均采用单模石英光纤,端接处使用折射率为 1.4587 的匹配液。光源和探测器使用 HP 公司产品 Optical Loss Analyzer E5574A。由直波导测得 1.31 μm 和 1.55 μm 光的插入损耗分别为 0.38 dB 和 0.34 dB。然后在输出端改用多模石英光纤,测得两波长下的插入损耗分别为 0.25 dB 和 0.22 dB。近似地认为多模光纤几乎全部

地接收了波导的输出光,于是取单模光纤耦合和多模光纤耦合的差作为单端的端面耦合损耗,算得对应 1.31 μm 和 1.55 μm 光的值分别为 0.13 dB/端和 0.12 dB/端。又因为对波导两端面的切割、抛光的工艺条件完全一致,偏光显微镜下也看不出差异,故假定两端面的耦合状态一致。根据端面耦合的互易性,输入和输出端的端面耦合损耗取相同值。于是由插入损耗与两端的端面耦合损耗的差可以得到对应 1.31 μm 和 1.55 μm 光的传输损耗分别为 0.06 dB/cm 和 0.05 dB/cm。两个分支波导样品的插入损耗列于表 1,其中包含了 3 dB 原理损耗。

Table 1 The measured values of the insertion loss of the Y-branch waveguide samples

sample		insertion loss /dB	
		$\lambda = 1.31 \mu\text{m}$	$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$
1	output 1	3.512	3.517
	output 2	3.519	3.521
2	output 1	3.523	3.525
	output 2	3.521	3.518

根据前面波束传播法的计算结果,考虑到实际波导的弯曲损耗会大一点,把总的弯曲损耗估计为 0.05 dB。再扣除传输损耗和两端的端接损耗,那么按(7)式换算成分支耦合损耗,可得表 2 的结果。这一结果基本达到了设计要求。

Table 2 The indirect calculated values of the Y junction coupling loss of the samples

sample	junction coupling loss /dB	
	$\lambda = 1.31 \mu\text{m}$	$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$
1	0.075	0.089
2	0.082	0.091

总结 采用一种新的 Y 分支光波导结构, 利用辐射模的叠加修正光波的场分布, 改善了模匹配, 从而提高了分支部位的功率耦合效率, 降低了分支耦合损耗。波束传播法仿真模拟结果表明, 这种结构对于 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 光波, 其分支耦合损耗分别可小到 0.041 dB 和 0.052 dB。实验上采用等离子化学气相沉积技术制备了 SiO_2 分支波导样品, 实测结果显示, $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 光波的分支耦合损耗分别约为 0.08 dB 和 0.09 dB, 基本达到了设计指标。

参 考 文 献

- [1] Jinguji K. Planar lightwave circuits. *Nippon Telephone and Telecommunication Review*, 1995, 7(1):80~86
- [2] Kobayashi I, Tsuji H. Research and development of fiber-optic subscriber network systems. *Nippon Telephone Telecommunication Research & Development*, 1993, 42(7):849~856
- [3] Miki T. Toward the service-rich era. *IEEE Commun. Mag.*, 1994, 32(2):34~39
- [4] 北澤雅一, 長谷川淳, 佐藤榮裕. スターカップラを使った加入者系光傳送システム. 日立評論, 1995, 77(9):15~18
- [5] 高居範夫, 楠文明, 岡本勝就等. 石英系導波路カップラ技術. *Nippon Telephone Telecommunication Research & Development*, 1994, 43(11):1281~1288
- [6] Weissman Z, Marom E, Hardy A. Very low-loss Y-junction power divider. *Opt. Lett.*, 1989, 14(5):293~295
- [7] Hung W Y, Chan H P, Chung P S. A novel design of wide-angle single-mode symmetric Y-junctions. *Electron. Lett.*, 1988, 24(15):1185~1186
- [8] Chung P S, Chan H P, Pun E Y B. Novel design of integrated optical beam splitters using symmetric Y-branch structures. *IEEE Proc.*, 1990, 137(5):340~344
- [9] Chan H P, Chung P S, Pun E Y B. Design of 3-dB integrated optical couplers in asymmetric branching waveguides. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, 31(5B):1641~1642
- [10] 佐藤悦藏, 日原弘, 小沢章一等. PLC 型スターカップラモジュール. 古河電工時報, 1995, 97(12):11~17
- [11] 辻幹男, 那須竜太郎, 繁沢宏等. 低損失 Y 分岐誘電體導波路の合成と実験的検討. 電子情報通信學會論文誌, 1996, J79-C-1(8):310~319
- [12] Tsuji M, Tanaka O, Shigesawa H. Low-loss design method of planar dielectric waveguide Y-branch: Effect of serpentine-shaped taper. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1991, MTT-39(1):6~13
- [13] Chung Y, Dagli N. An assessment of finite different beam propagation method. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-26(8):1335~1339

New Type Low-Loss SiO_2 Y-Branch Waveguide

Chen Baoxue¹⁾ Yuan Yifang¹⁾ Mamoru Iso²⁾

(1), Institute of Optics and Electron Information engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

(2), Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, Japan

(Received 12 October 1999; revised 16 March 2000)

Abstract: A novel Y-branch waveguide structure is presented, in which a transitional guide is embedded between an incident channel and an output branch. The transitional guide is used to improve the mode field matching between both the waves supported by the incident and output waveguides. A numerical simulation shows that this geometry can minimize the branching loss to about 0.041 dB at $1.31 \mu\text{m}$ and 0.052 dB at $1.55 \mu\text{m}$ wavelength respectively. The samples of this type SiO_2 branch waveguide are fabricated by the chemical vapor deposition technology. The measurement on the samples gives the good results of about 0.08 dB and 0.09 dB branching loss at $1.31 \mu\text{m}$ and $1.55 \mu\text{m}$ wavelengths respectively.

Key words: waveguide; Y-branch waveguide; mode field matching; branching loss; SiO_2 waveguide; chemical vapor deposition technology