

文章编号: 0253-2239(2003)11-1330-5

一阶模的滤除及在 Y 分支和多模干涉结构中的应用*

王文敏 马卫东 陈 光 胡国华 杨 涛 许远忠
(武汉邮电科学研究院光迅科技有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: Y 分支和多模干涉结构广泛应用于平面光波导器件中,在这些器件中,Y 分支和多模干涉结构输出对称性具有重要意义。引入 Y 分支和多模干涉结构输出的不对称主要原因是这两种结构中产生了一阶导模,设计一种新的耦合器结构,在这个结构中,两根单模波导分别放置在一根多模波导两边,并且单模波导的传播常量与多模波导的一阶模的传播常量相同,这种结构可以将一阶导模滤除。在 Y 分支和多模干涉结构中使用了这种结构,模拟结果表明,采用这种耦合器的 Y 分支和多模干涉结构具有非常好的输出对称性。

关键词: 导波光学; 平面光波导; Y 分支; 多模干涉结构; 输出对称性

中图分类号: TN252 文献标识码: A

1 引 言

Y 分支和多模干涉结构(MMI)是组成各种平面光波导器件的基本结构,在马赫-曾德尔干涉仪^[1]、光功率分束器^[2~6]、调制器^[7~9]以及具有平坦光谱响应的波导阵列光栅波分复用器^[10,11]中具有重要的作用。在这些器件中,Y 分支或多模干涉结构的输出对称性具有重要的意义,比如在光功率分束器中,级连的 Y 分支的输出对称性直接影响着分束器的各个输出通道的插损均匀性^[12],在平坦光谱响应的波导阵列光栅波分复用器中,Y 分支或多模干涉结构的输出对称性对光谱响应的平坦性具有很大的影响^[13]。本文提出了一种新的设计方案,该方案通过滤除 Y 分支或多模干涉结构中的奇模(通常是一阶导模)来减小输出的不对称性,这种设计不必考虑引入 Y 分支或多模干涉结构输出不均匀的具体原因,因而具有较大的使用范围。

2 理论分析

Y 分支和多模干涉结构共同点是都含有多模结构,除基本模(这里指零阶模)外,还能支持高阶模,比如一阶模,平坦光谱响应波导阵列光栅波分复用器中的多模干涉结构还能支持二阶模。基本模和其它偶阶模的模场都具有对称性(一般的平面光波导

芯层两边的覆层折射率是相同的),在折射率对称分布的情况下,一阶模应是不对称的。场型对称的导模不会引起 Y 分支和多模干涉结构输出的不对称,引起不对称的原因是存在一阶模。如果输入的场相对 Y 分支或多模干涉结构是对称的,那么根据模式耦合理论可以知道,一阶模不会产生。但是在实际的波导器件中,输入的场相对 Y 分支或多模干涉结构是不对称的,比如 Y 分支的输入场是经过一个弯曲波导后的光场,沿着弯曲波导传播的光场中心会偏离波导中心,造成输入 Y 分支的场是不对称的,从而产生出一阶模^[12];同样在波导阵列光栅中,输入波导也是弯曲的,那么多模干涉结构中也会引入一阶模,导致光谱响应的不平坦^[13]。总之,Y 分支或多模干涉结构输出不对称的根本原因是存在不对称的一阶模。如果在设计中能将一阶模滤掉,那么就可以减小这种不对称。

图 1 所示的结构是我们设计的滤除一阶模的结构示意图。我们知道,对于两个相互耦合的波导而言,两个波导中传播常量相等的导模之间可以有 100% 的相互耦合^[14]。图 1 中多模波导的宽度为

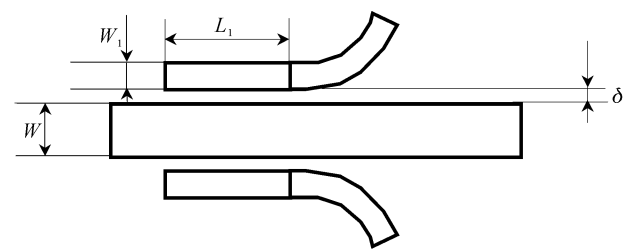


Fig. 1 The coupler which can filter out the first-order mode (odd mode) guided by the MMI structure

* 国家高技术研究发展计划(863)课题(2001AA312020)、武汉市科技计划(20021005130-06)资助课题。

E-mail: wmwang@wri.com.cn

收稿日期: 2002-10-14

W , 在两边对称分布的单模波导宽度为 W_1 , 耦合区长度为 L_1 , 波导间隙为 δ 。由于平面光波导器件在垂直于芯片方向结构相同, 所以可以用等效折射率法将三维波导结构等效为二维波导结构, 所以在以下

$$\begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda}(n_{\text{core}}^2 - N_{\text{eff}}^2)^{1/2}W = \pi + 2\arctan\left[\left(\frac{N_{\text{eff}}^2 - n_{\text{clad}}^2}{n_{\text{core}}^2 - N_{\text{eff}}^2}\right)^{1/2}\eta\right], \\ \frac{2\pi}{\lambda}(n_{\text{core}}^2 - N_{\text{eff}}^2)^{1/2}W_1 = 2\arctan\left[\left(\frac{N_{\text{eff}}^2 - n_{\text{clad}}^2}{n_{\text{core}}^2 - N_{\text{eff}}^2}\right)^{1/2}\eta\right], \end{cases} \quad (1)$$

其中 λ 为真空中光波长, n_{core} 与 n_{clad} 分别是使用等效折射率法将三维波导等效为二维波导后芯层与包层的折射率。输入 TE 模时 $\eta = 1$, 输入 TM 模时 $\eta = n_{\text{core}}^2/n_{\text{clad}}^2$ 。根据介质光波导耦合波理论, 只要 L_1 的长度适当, 多模波导中的一阶模和单模波导中的基本模之间可以完全耦合。图 1 中的弯波导是为了将耦合到单模波中的场传离多模波导, 以免该光场又耦合回多模波导。

另外, 在上述滤除一阶模耦合器中, 由于多模波导的基模与单模波导的基模的有效折射率相差很大, 所以这两个基本模场之间的耦合非常小。本文对如下参量的多模波导进行了模拟: $W = 12 \mu\text{m}$, $n_{\text{clad}} = 1.44400$, $n_{\text{core}} = 1.45223$, 与单模波导之间的空隙 δ 为 $2.8 \mu\text{m}$ 。以 TE 模为例, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 算得多模波导基模有效折射率为 1.45134 , 一阶模的有效折射率为 1.44877 。图 2 表示的是单模波导有效折射率随宽度 W_1 之间的变化关系, 从图 2 中可以看出 $W_1 = 4.3 \mu\text{m}$ 时满足公式(1)的要求。

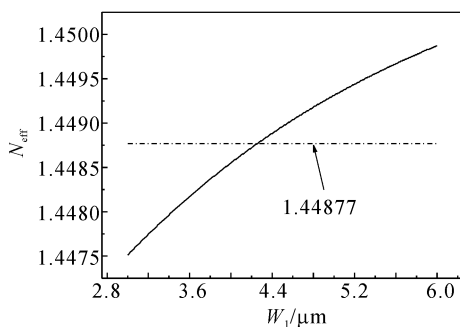


Fig. 2 Relation between effective index of the single mode waveguide and W_1

图 3(a) 表示的是经过耦合之后, 多模波导中的一阶模能量(与经过耦合结构前的一阶模能量之间的比值)与耦合长度 L_1 之间的关系, 图 3(b) 表示的是经过耦合之后, 多模波导中的基本模能量(与经过耦合结构前的基本模能量之间的比值)与耦合长度 L_1 之间的关系。从图 3 中可以看出, 多模波导中的一阶模可

分析中只讨论二维波导结构。在设计时令宽度为 W 的多模波导一阶模的有效折射率与宽度为 W_1 的单模波导基模有效折射率相等。令这两个有效折射率均为 N_{eff} , 那么 N_{eff} 应该满足

以有效地耦合到单模波导中去, 在 $L_1 = 570 \mu\text{m}$ 时, 经过耦合以后, 多模波导中的一阶模剩余的能量不到耦合前的 5%; 而基本模对于任意长度的 L_1 , 剩余的能量大于耦合前的 98%, 损耗非常小。

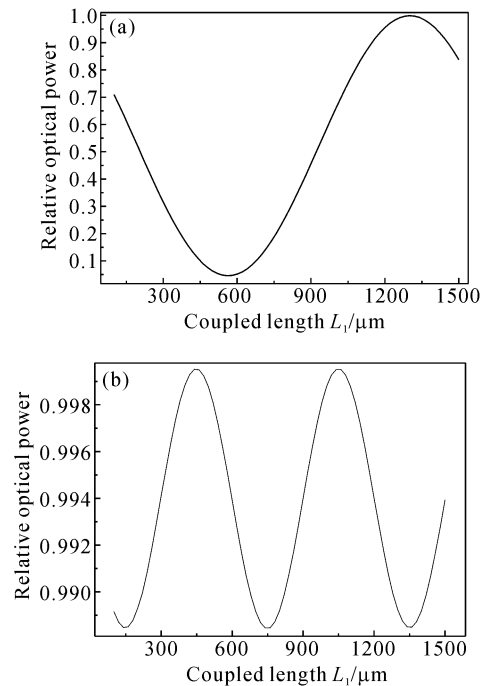


Fig. 3 (a) The relation between the power of the first-order mode guided by MMI and the coupled length L_1 , after the light passing the coupler; (b) The relation between the power of the fundamental mode guided by MMI and the coupled length L_1 , after the light passing the coupler

下面分析这种结构在 Y 分支和多模干涉结构中的应用。首先分析在 Y 分支中的应用, 如图 4 所示是我们设计的一种 Y 分支, 与传统的 Y 分支结构不同的是我们引入了如图 1 所示的耦合器。输入波导是具有 S 形的弯曲波导, 在我们设计中, 该输入波导宽度为 $6 \mu\text{m}$; 两个对称的输出波导也是 S 形的弯曲波导, 波导宽度 $6 \mu\text{m}$; 输入波导的输入与输出端

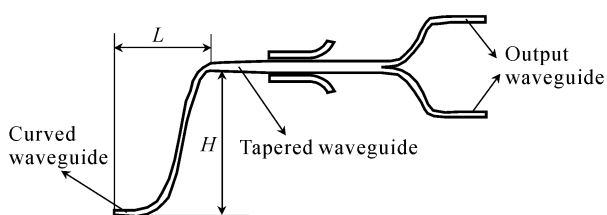


Fig. 4 Scheme of Y-branch with the coupler that can filter out the first-order mode

间的位移为 $(L, H) = (3000, 500) \mu\text{m}$ 。在输入波导与耦合器之间用长 $1500 \mu\text{m}$ 的锥形波导连接,其中

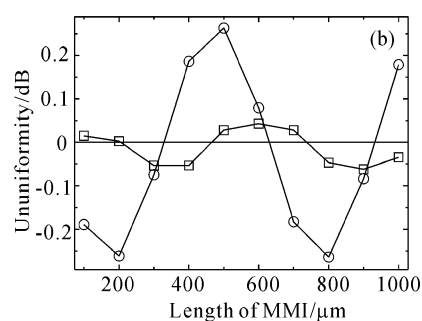
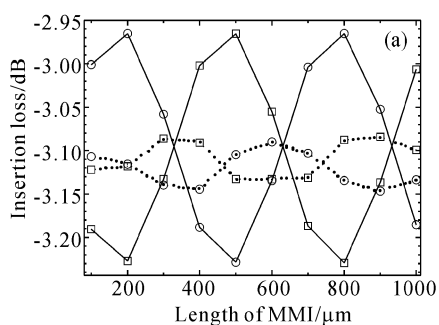


Fig. 5 (a) The relation between the output of Y-branch and the length of MMI. Solid lines and dash line indicate the results without and with the coupler which can filter out the first-order mode, respectively. A $1400 \mu\text{m}$ was reduced from the length of MMI; (b) The relation between the ununiformity of Y-branch and the length of MMI. Line with circles and that with rectangle indicate the results without and with the coupler which can filter out the first-order mode, respectively. A $1400 \mu\text{m}$ was reduced from the length of MMI

从图 5 可以看出使用了图 1 所示的耦合器结构后的输出不均匀性远远小于不使用这种一阶模滤除结构的输出不均匀性。如图 5(b) 所示,使用了一阶模滤除结构的最大输出不均匀性为 0.06 dB ,而不使用一阶模滤除结构的最大输出不均匀性为 0.26 dB ,后者为前者的 4 倍多。而且使用一阶模滤除结构并没有明显增大插入损耗,由图 5(a) 可以看出使用一阶模滤除结构的 Y 分支平均插损为 -3.12 dB ,而没有使用一阶模滤除结构的 Y 分支平均插损为 -3.10 dB ,两者仅相差 0.02 dB ,是非常小的。所以这种带有一阶模滤除结构的 Y 分支具有非常好的输出均匀性,如果使用在光功率分配器中就会有较小的输出不均匀性,如果使用在波导阵列光栅波分复用器中,可以获得十分平坦的光谱响应。

在平坦型光谱响应阵列波导光栅波分复用器设计中也常常使用多模干涉波导,此时多模干涉波导输出的平坦性直接影响了光谱响应的平坦性^[3]。与 Y 分支一样,采用图 1 所示的带有滤除一阶模结构的多模干涉结构可以大大减小多模干涉波导输出的不平坦性。我们设计了如图 6 所示的多模干涉结

锥形波导与输入波导连接端宽度为 $6 \mu\text{m}$,与耦合器多模波导连接端宽度为 $12 \mu\text{m}$ 。耦合器中单模波导的长度 L_1 为 $570 \mu\text{m}$ 。

图 5(a) 表示的是使用一阶模滤除结构和不使用一阶模滤除结构时,两个输出波导的插入损耗与 Y 分支中多模波导长度之间的关系,图 5(b) 表示的是此两种情况下两个输出波导插损的均匀性与 Y 分支中多模波导长度之间的关系。该结果是通过束传播法计算得到的,图中的横坐标表示的多模波导长度都减去了一个常量 $1400 \mu\text{m}$ 。

构,其中输入波导宽 $6 \mu\text{m}$,多模干涉波导宽 $15 \mu\text{m}$,折射率同前。该结构连接在阵列波导光栅波分复用器的输入波导与输入平板波导输入罗兰圆之间,就可能获得平坦的光谱响应^[3]。根据公式(1),可以算得此时滤除一阶模结构中单模波导宽为 $5.8 \mu\text{m}$,通过模拟得到,在耦合长度 L_1 为 $1050 \mu\text{m}$ 时滤除一阶模的效果最好,此时耦合效率可以达到 98% 以上。

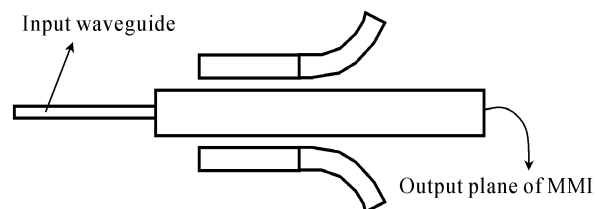


Fig. 6 Scheme of MMI structure using the couple which can filter out the first-order mode

设计的多模干涉长度 L_{MMI} 满足公式

$$L_{\text{MMI}} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2(n_{\text{eff}0} - n_{\text{eff}2})}, \quad (2)$$

其中 $n_{\text{eff}0}$ 和 $n_{\text{eff}2}$ 分别为多模干涉波导的零阶和二阶有效折射率, k 为正整数。在波长 λ 为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,有

$n_{\text{eff}0} = 1.45161, n_{\text{eff}2} = 1.44691$, 所以有 $L_{\text{MMI}} = 164.9(2k+1) \mu\text{m}$, 结合 L_1 的大小, 我们取 $L_{\text{MMI}} = 1814 \mu\text{m}$.

当输入波导为直波导, 而且与多模干涉波导连接位置在多模干涉输入面的对称中心时, 从多模干涉波导输出端输出的光场是对称的。但是在更多的情况下输入波导为弯曲波导, 尽管与多模干涉波导连接位置在多模干涉输入面的对称中心, 但是输入到多模干涉输入端的光场中心位置已经偏离了多模干涉输入面的对称中心, 这样就会在多模干涉波导中产生一阶模, 在多模干涉输出端的场就表现为不对称分布。为了简化问题, 我们将光场中心与多模干涉输入面的对称中心的偏离等效为直的输入波导与多模干涉输入面对称中心的偏离, 假设这个偏离为 $1 \mu\text{m}$, 在一般情况下会小于这个值。图 7 表示的是在存在 $1 \mu\text{m}$ 偏离时使用一阶模滤除结构和不使用一阶模滤除结构的多模干涉波导输出的场分布。从图 7 可以看出使用一阶模滤除结构时输出场的两个峰的差是不使用一阶模滤除结构输出场的两个峰的差的 $1/5$, 其输出对称性大大改善。

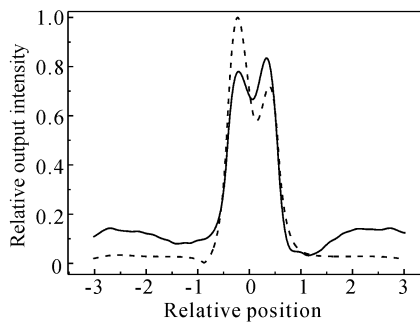


Fig. 7 Output field distribution of MMI. The dash line and solid line indicate the MMI without and with the coupler which can filter out the first-order mode. The relative position indicates the ratio between the position in the output plane of MMI and the width of MMI

结论 通过上面分析可以知道, 我们设计的这种通过滤除一阶模来达到优化 Y 分支或多模干涉结构输出光场的对称性的方案是非常有效的。通过这种设计可以有效地降低 Y 分支的输出不均匀以及多模干涉结构的输出不对称性。这种设计可以广泛地使用到含有 Y 分支和多模干涉结构的波导器件中, 在光功率分配器、马赫-曾德尔干涉仪、平坦型光谱响应波导阵列光栅复用器中有重要的应用。而且本设计的根本思想是滤除多模波导中的一阶模, 不必

考虑产生这种一阶模的原因, 所以设计的结构具有普遍性, 适用于任何要求 Y 分支或多模干涉结构输出对称的平面波导器件。

参 考 文 献

- 1 Wei Hongzhen, Yu Jinzhong, Zhang Xiaofeng *et al.*. Modeling of multimode interference Mach-Zehnder interferometer optical switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(3):367~370 (in Chinese)
- 2 Hibino Y, Hanawa F, Nakagome H *et al.*. High reliability optical splitters composed of silica-based planar lightwave circuits. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(8):1728~1735
- 3 Ma Huilian, Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing *et al.*. Study and fabrication of 1×16 MMI GaAs optical power splitter. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):878~881 (in Chinese)
- 4 Yang Jianyi, Sun Yilin, Zhou Qiang *et al.*. Study and fabrication of MMI GaAs optical power splitter. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(8):1123~1129 (in Chinese)
- 5 Takahashi H, Ohmori Y, Kawachi M. Design and fabrication of silica-based integrated-optic 1×128 power splitter. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(23):2131~2133
- 6 Hanafusa H, Takato N, Hanawa F *et al.*. Wavelength-insensitive 2×16 optical splitter developed using planar lightwave circuit technology. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(7):644~645
- 7 Chen Fushen, Li Qicong. Integrated electrooptic M-Z modulator with ridge structure in X-cut LiNbO₃. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(3):209~212 (in Chinese)
- 8 Zhang Xuping, Lu Xuejun, Shi Zan *et al.*. Polymer-based waveguide electro-optical modulator. *Optoelectronic Technology* (光电子技术), 2001, **22**(1):5~10 (in Chinese)
- 9 Wei Hongzhen, Yu Jinzhong, Xia Jinsong *et al.*. Mach-Zehnder interferometer thermal-optical modulator with fast response. *Chin. J. Semiconductors*(半导体学报), 2002, **23**(5):509~512 (in Chinese)
- 10 Amersfoort M R, Soole J B D, Leblanc H P *et al.*. Passband broadening of integrated arrayed waveguide filters using multimode interference couplers. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(5):449~451
- 11 Dragone C. Frequency routing device having a wide and substantially flat passband. USA Patent, Patent Number: US5412744
- 12 Uetsuka H, Hakuta T, Okano H *et al.*. $2 \times N$ optical splitters using silica-based planar lightwave circuits. *IEICE Trans. Electron.*, 1997, **E80-C**:134~138
- 13 Nara K, Nakajima T, Kashihara K. Array waveguide diffraction grating. European Patent, Patent Number: EP1128193
- 14 Haus H A, Huang W. Coupled-mode theory. *Proc. IEEE*, 1991, **79**(10):1505~1518

Filtering Out the First-Order Mode and Its Application in Y-Branch and Multimode Interferometric Structure

Wang Wenmin Ma Weidong Cheng Guang Hu Guohua Yang Tao Xu Yuanzhong
(Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan Research Institute of Posts
and Telecommunications, Wuhan 430074)
(Received 14 October 2002)

Abstract: The Y-branch and multimode interferometric (MMI) structure are used in many kinds of planar lightwave circuits, and the symmetrical output of Y-branch or MMI structure takes important role in these apparatuses. The main factor that introduces asymmetry into the output of Y-branch or MMI structure is the first-order mode guided by them. A coupler in which the waveguides which can only guide the fundamental modes are located on both sides of the multimode waveguide is designed, and this coupler can filter out the first order mode guided by it. This coupler is used in Y-branch and MMI structure, and the simulation results show that the output of Y-branch and MMI structure with this coupler has better symmetry in comparison with traditional structure.

Key words: guided wave optics; planar lightwave circuit; Y-branch; multimode interferometric structure; output symmetry

全国第 11 次光纤通信暨第 12 届集成光学学术大会在南京召开

2003 年 10 月 8~10 日在“六朝古都”南京胜利召开了全国第 11 次光纤通信暨第 12 届集成光学学术大会。

本次会议由中国通信学会光通信专业委员会,中国电子学会通信学分会,中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会主办。由南京邮电学院和南京富士通通信设备有限公司共同承办。并且得到江苏中天科技有限公司、江苏永鼎股份有限公司、长飞光纤光缆有限公司和康宁(中国)有限公司的赞助。

大会安排了如下特邀报告:“2002~2003 年光纤通信技术的进步”(赵梓森院士),“光传送网(OTN)的保护倒换技术”(毛谦高级工程师),“智能光电子——下一代光网络的技术平台”(黄德修教授),“光纤通信的发展趋势和市场机遇”(韦乐平高级工程师),“走向商用化的光孤子通信技术”(杨祥林教授),“光通信中的复用技术”(林金桐教授)。

特邀报告之后大会举行颁奖仪式,嘉奖长期从事光纤通信和集成光学研究开发工作并有杰出贡献的专家学者的代表人物(6 位)。

会议分五个分会场进行专题报告和讨论,它们分别是:“网络与系统技术(一)”、“网络与系统技术(二)”、“光纤与光缆”、“光有源器件与光电集成、光纤传感、光纤通信仪表、测量技术与其他”以及“光无源器件与集成光路”。

本次会议共收到论文 260 余篇,大会安排报告 190 篇,经大会学术委员会组织专家讨论和评选,遴选出 201 篇论文编入《全国第 11 次光纤通信暨第 12 届集成光学学术会议(OFCIO '2003)论文集》。本次会议的内容广泛,收录的论文是作者们的研究成果和工作经验的认真总结,包含了不少新成果、新技术,比较全面地反映了我国当前光纤通信、纤维光学与集成光学技术领域的状况和水平,这次会议对中国光纤通信和集成光学的发展起到一定的推动作用。