

蝶形多模干涉耦合器的数值分析

严朝军 万钧力 蒋冰华 向柳林 杰

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要 设计蝶形多模干涉(MMI)耦合器时,需要根据所要求的功率分割比率确定器件的结构参量。作为矩形多模干涉耦合器的特征参量的耦合长度,通过数值分析对称干涉型矩形多模干涉耦合器的成像位置而得到,从而可利用模传输分析(MPA)法的公式设计出蝶形多模干涉耦合器的理论预期结构。使用有限差分波束传输法(FD-BPM)对设计参量进行校正,并且数值算出器件实际实现的功率分割比率。针对基于 SOI 晶片的设计实例表明,仿真得到的蝶形多模干涉耦合器的长度较理论预期大 $2\sim 4\ \mu\text{m}$,实际实现的功率分割比率较理论预期值低且器件形状越偏离矩形,其值相差越大。

关键词 集成光学;多模干涉耦合器;功率分割;蝶形;有限差分

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

Numeric Analysis of Butterfly Multimode Interference Couplers

Yan Chaojun Wan Junli Jiang Binghua Xiang Liu Ling Jie

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract The structural parameters of butterfly multimode interference (MMI) coupler need to be determined according to the special ratio of power splitting when the device is designed. The coupling length, as a characteristic parameter of rectangular MMI coupler, is determined by the finite difference beam propagation method (FD-BPM) which is applied to the modeling of symmetrical interference rectangular MMI coupler and then the structural parameters of butterfly MMI coupler are designed by the formulas of mode propagation analyse (MPA) method which is an approximate method. Finally the FD-BPM is used to correct the parameters of butterfly MMI couplers, including the structural parameters and the ratio of power splitting. It is indicated by an example of practical device in SOI wafer that the length of butterfly MMI coupler obtained by simulation is more than the length expected by MPA theory within the range of two to four micrometers. The actual power splitting ratio is lower than the predicted values of MPA theory. And the further the shape of butterfly MMI coupler departs from the shape of rectangular MMI coupler, the more deviation grows between these two values.

Key words integrated optics; multimode interference couplers; power splitting; butterfly; finite difference

1 引 言

在多波长光网络中,光节点需要以一定功率比进行分波或合波;在复杂的集成光路中,光功率分割器是常用的功能模块。有多种方案可实现光功率的分割或合成^[1],其中,多模干涉(MMI)耦合器^[2]因其低损耗、偏振无关、制作容差大等优点而得以广泛应用^[3]。当要求器件紧凑并且制作容差性能好时,往往选择叠加型的多模干涉耦合器。如果多模干涉耦合器的多模波导部分的俯视几何形状为矩形,对于 2×2 叠加型多模干涉耦合器,两个输出端口能实现四种数值离散但固定的功率分割比。为了实现任意的功率分割比,蝶形多模干涉耦合器是一种可

行的方案^[4]。

将多模干涉耦合器的多模部分由矩形改变成蝶形,等效于改变光波传输过程中的相位从而得到不同的干涉结果,即得到不同的端口输出功率比。其分析方法主要是模传输分析(MPA)法^[5],这种方法需要知道多模波导所支持的各阶导模的具体参量。但对于三维波导结构,欲得到解析解并不容易。即便如此,这种方法还是一种近似方法,加之蝶形多模干涉的波导结构并非一成不变的矩形,因此模传输分析更加困难。本文采用全数值的三维有限差分波束传输法^[6]分析蝶形多模干涉耦合器,得到多模波导的几何结构以及不同情况下的光功率分割比。

作者简介: 严朝军(1968—),男,湖北人,副教授,博士,主要从事集成光波导器件、光网络等方面的研究。

E-mail: flying_matrix@yahoo.com.cn

2 耦合器结构

对于矩形 2×2 多模干涉耦合器,取不同的波导参量,可以得到四种不同的功率分割比。其俯视图如图 1 所示,其中 x_0 和 x_1 表示输入波导的位置, W_0 为多模波导的宽度, L 为其长度。如果 L_c 为多模波导的耦合长度, P_c/P_b 为功率分割比,四种耦合器(器件 A, B, C, D)的输入、输出波导位置、多模波导长度以及输出端口的功率分割比如表 1 所示^[4]。

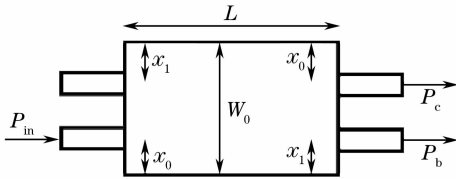


图 1 矩形多模干涉耦合器俯视图

Fig. 1 Top view of rectangular MMI couplers

表 1 输入、输出波导位置以及波导长度与功率分割比

Table 1 Positions of input/output waveguide, the length of multimode waveguide and the power splitting ratio

Parameters	x_0	x_1	L	P_c/P_b
A	$W_0/3$	$W_0/3$	$L_c/2$	50/50
B	$W_0/3$	$W_0/3$	L_c	100/0
C	$W_0/4$	$W_0/4$	$3L_c/4$	85/15
D	$W_0/5$	$2W_0/5$	$3L_c/5$	72/28

为了得到任意的功率分割比,蝶形多模干涉耦合器改变了图 1 中多模部分的矩形结构,有对称和非对称两种类型的蝶形多模干涉耦合器,如图 2 所示。其中图 2(a)和图 2(b)具有对称的形状,而图 2(c)是非对称的。改变四种矩形多模干涉耦合器为蝶形多模

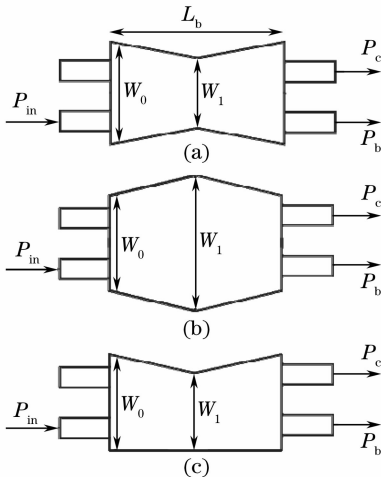


图 2 蝶形多模干涉耦合器的俯视图。

(a), (b) 对称, (c) 非对称

Fig. 2 Top view of butterfly MMI couplers, (a), (b) symmetrical, (c) asymmetrical

干涉耦合器,就可以得到任意要求的功率分割比。

模传输分析理论表明,蝶形多模干涉耦合器的输出功率 P_c 可表示为^[4]

$$P_c \approx \cos^2(0.5\pi d\Omega), \quad (1)$$

$$P_c \approx 0.2 + 0.8\cos^2(0.563\pi d\Omega), \quad (2)$$

(1)式适合器件 A, B, C, (2)式适合器件 D。 $d\Omega$ 的表达式对于不同的器件是不同的,具体对于器件 A, $d\Omega = -dW/W_0 - 1/2$; 器件 B, $d\Omega = dW/W_0$; 器件 C, $d\Omega = -dW/2W_0 - 1/4$; 器件 D, $d\Omega = -0.71dW/W_0 - 0.355$ 。无论哪种器件都有 $P_b = 1 - P_c$ 。 dW 对于对称型蝶形多模干涉耦合器为 $|W_0 - W_1|/2$, 而对于非对称类型为 $|W_0 - W_1|$ 。蝶形多模干涉耦合器的长度 L_b 同样具有表 1 中的 L 的形式,但是其耦合长度 $L_c^b = W_1 L_c / W_0$ 。

3 耦合器数值分析

对于任意需要的功率分割比,可以由(1)式和(2)式得到 $d\Omega$,假设 W_0 是确定的,那么根据 $d\Omega$ 可以定出 W_1 ,如果已知多模波导宽度为 W_0 的矩形多模干涉耦合器的耦合长度 L_c ,根据公式可以定出蝶形多模干涉耦合器的耦合长度 L_c^b 以及蝶形多模干涉耦合器的长度 L_b 。但该设计却需要预先得到矩形多模干涉耦合器的耦合长度 L_c ,此值需要通过多模波导的模参量而求得,这对于三维多模波导是比较麻烦的。事实上即使按公式得到了多模波导的长度,仿真得到的长度和它还是有一定偏差。另外一个问题是最终依据(1)式,(2)式算得的功率分割比作为一种近似公式其近似程度又如何呢? 本文通过有限差分波束传输法(FD-BPM)求出矩形多模干涉耦合器的耦合长度 L_c ,从而借助于解析公式确定蝶形多模干涉的结构,数值算出蝶形多模干涉耦合器的功率分割比。

多模波导假定系 SOI 材料的脊波导^[7,8],其横截面如图 3 所示,光波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。蝶形波导沿波导传输方向脊宽作蝶状改变,其初始宽度 $W_0 = 16 \mu\text{m}$ 。本文将 A、C、D 类矩形多模干涉耦合器改

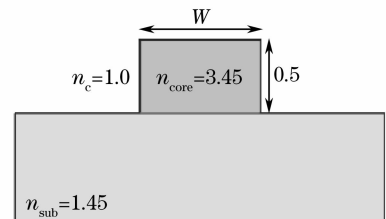


图 3 SOI 晶片多模波导横截面示意图

Fig. 3 Cross section of waveguide on SOI wafer

为如图 2(a)所示的对称型蝶形耦合器。

先算出矩形多模干涉耦合器的耦合长度 L_c 。假设从波导中心输入图像,通过有限差分波束传输法运算,观察输出面成四个像时多模波导的长度 L ,由关系式 $L=3L_c/16$ 得到耦合长度 L_c [9],本例算得 $L_c=528 \mu\text{m}$ 。针对蝶形多模干涉耦合器,取不同的 dW ,从理论上算出 L_c^b ,同时也确定了蝶形部分(也即多模部分)的理论预期长度。从输入波导中输入光场,通过有限差分波束传输法的运算观察输出面上的成像,找出对应于最佳成像质量时多模波导的长度,此长度和预期长度并不相等(即“蝴蝶”两翼并不对称)。以此长度作为蝶形波导的长度,调整“蝴蝶”的两翼使之对称,重新作有限差分波束传输法运算,计算两个输出波导的功率分割比。

计算结果表明,对应于不同的 $d\Omega$,仿真得到的蝶状多模波导长度较理论预期值大,一般相差 $2\sim 4 \mu\text{m}$ 。图 4 为当假设 $P_c + P_b = 1$ 恒成立时,由仿真得到的两个输出波导中的归一化功率与 $d\Omega$ 的关系,图中并没有包含全部可能的 $d\Omega$,而只是包含其中的一部分,并且只针对 A, C, D 三类蝶形多模干涉

耦合器作了数值分析,但是有一点很明确,即可以根据欲得到的功率分割比选择不同种类的(A, C, D)蝶形耦合器以满足设计要求。图 5 显示了对应于 A, C, D 三类蝶形多模干涉耦合器,理论上计算两个输出波导的功率比与数值分析得到的功率比的差异。很明显,当蝶形多模干涉耦合器的形状越来越偏离矩形多模干涉耦合器时,理论值和仿真值偏离越大。

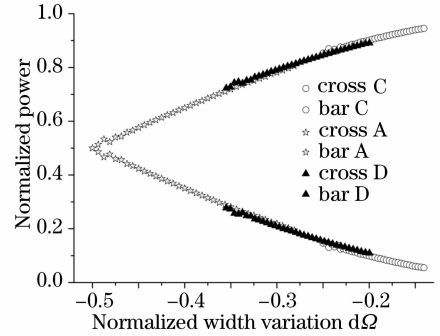


图 4 仿真得到的三类蝶形多模干涉耦合器两输出端口归一化功率
Fig. 4 Normalized power in two output ports (called Cross port and Bar port respectively) for butterfly MMI couplers of three types

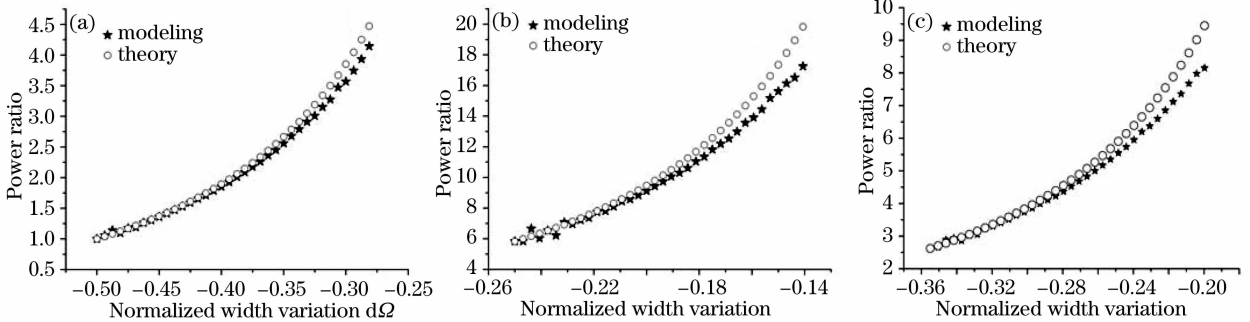


图 5 三类蝶形多模干涉耦合器仿真得到的输出端口功率比与模传输分析理论值比较。(a) 器件 A, (b) 器件 C, (c) 器件 D
Fig. 5 Comparison of power splitting ratio of two output waveguides by numeric simulation with MPA method.

(a) type A of butterfly MMI couplers, (b) type C, (c) type D

4 结 论

利用有限差分波束传输法,数值设计了蝶形多模干涉耦合器,根据需要的输出端口功率分割比率确定蝶形多模干涉耦合器的结构参量,包括蝶形多模干涉耦合器的长度、腰宽等,得到矩形多模干涉耦合器的耦合长度。利用耦合长度结合模传输理论解析地设计出器件的结构参量,再对此器件进行有限差分波束传输法仿真,校正设计参量。计算表明,实际的蝶形多模干涉耦合器长度较模传输理论预计的长度要长 $2\sim 4 \mu\text{m}$,并且实际得到的光功率分割比率较理论预期低,蝶形多模干涉耦合器的形状越偏

离矩形,两者相差越大。该设计方法不需要预先求出多模波导的各阶模场,避免了解析分析方法的困难,并且提高了设计的精确度。

参 考 文 献

- Zhang Liang, Li Chengfang, Liu Wen *et al.*. Development of broadband polarizing beam splitter/combiner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1048~1052
张亮,李承芳,刘文等.一种亚波长偏振分波/合波器的研制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1048~1052
- Jia Xiaoling, Gao Fan, Zhang Feng. Design and optimization of a new type 3×3 silicon-on-insulator multimode interference optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1208~1213
贾晓玲,高凡,张峰.新型 SOI 基 3×3 多模干涉波导光开关

- 的优化设计[J]. 光学学报, 2005, **25**(9): 1208~1213
- 3 Wan Zhujun, Wu Yaming, Li Sihua. Experimental research on integrated thermo-optic switch based on multimode interference couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1187~1191
万助军, 吴亚明, 李四华. 基于多模干涉耦合器的集成热光开关实验研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1187~1191
- 4 Pierre A. Besse, Emilio Gini, Maurus Bachmann *et al.*. New 2×2 and 1×3 multimode interference couplers with free selection of power splitting ratios [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10): 2286~2293
- 5 Sun Yiling, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Analysis of general self-imaging positions in multimode interference couplers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 759~762
孙一翎, 江晓清, 王明华. 多模干涉耦合器一般成像位置分析[J]. 光学学报, 2004, **24**(6): 759~762
- 6 Yan Chaojun, Xu Zhenquan, Chen Yixin. Three dimension finite difference beam propagation method: application to $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ directional coupler modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(6): 778~781
严朝军, 许政权, 陈益新. 三维有限差分波束传输法: 用于 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 方向耦合器的模拟[J]. 光学学报, 1997, **17**(6): 778~781
- 7 Jiang Xiaoqing, Ma Huilian, Mao Huiling *et al.*. Asymmetrical self-imaging effects of MMI devices with two-dimensional confinement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3): 253~256
江晓清, 马慧莲, 毛慧玲 等. 二维限制多模干涉耦合器非对称自映像特性[J]. 中国激光, 2002, **A29**(3): 253~256
- 8 Zhiyong Li, Jingzhong Yu, Shao Wu *et al.*. Paired interference 3-dB coupler based on SOI rib waveguides with anisotropic chemical wet etching [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 215~217
- 9 Lucas B. Soldano, Erik C. M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615~627