

文章编号: 0253-2239(2008)01-0110-05

采用三维波束传输法的多模干涉耦合器 成像位置的数值计算

严朝军

(三峡大学 电气信息学院电子工程系, 湖北 宜昌 443002)

摘要 多模干涉(MMI)耦合器需要精确定位成像位置,以便器件的设计制作。针对强限制和弱限制的三维多模波导干涉耦合器,采用三维交替方向隐式有限差分光束传输法(BPM),数值计算得出多模波导长度、输入波导和输出波导位置。首先通过对对称干涉多模干涉耦合器的数值分析求得多模干涉耦合器的等效宽度 W_{eq} 及最低二阶模之间的拍长 L_c ,然后将这些参量结合光束传输法直接用于器件设计。计算显示该方法得到的成像位置和导模传输分析法(MPA)的理论预测比较接近,但 W_{eq} 和 L_c 却是由光束传输法计算得到的,导模传输分析法理论只能在得到 W_{eq} 和 L_c 的前提下才能得到成像位置。该方法直接针对三维波导进行,没有采用基于等效折射率方法的从三维波导到二维波导的简化处理,并且也没有采用导模传输分析法所采用的近似,保证了计算精度,对于实际多模干涉器件的设计制作可起参考作用。

关键词 集成光学; 成像位置; 有限差分光束传输法; 多模干涉; 强限制波导; 弱限制波导

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

Numerical Calculation of Imaging Positions in Multimode Interference Couplers by the Three-Dimensional Beam Propagation Method

Yan Chaojun

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

Abstract In order to design and make multimode interference (MMI) couplers, the imaging positions must be located accurately. The implicit finite difference beam propagation method (BPM) in three-dimensional alternate directions is used for the analysis of strongly guided and weakly guided multimode interference couplers. The length of multimode waveguide, the positions of input guides and output guides are determined precisely. The equivalent width W_{eq} and the beat length L_c of two lowest modes of multimode waveguide are obtained first by the numeric modeling of a symmetric interference MMI, and then these parameters together with BPM are used for the device design. The imaging positions showed the close results between BPM and the predictions of the mode propagation analysis (MPA) theory, however, W_{eq} and L_c were obtained by the BPM, MPA theory will not give any result without these parameters. The three dimensional (3D) waveguides are not treated as 2D waveguides by means of effective index method (EI), therefore, this method can be used directly to 3D waveguides. As a kind of numerical method, some normal approximations are not introduced as MPA theory, so it will ensure the precision of calculation and can afford reference for practical MMI device design.

Key words integrated optics; imaging positions; finite difference beam propagation method (BPM); multimode interference (MMI); strongly guided waveguide; weakly guided waveguide

1 引 言

基于多模波导自成像效应的多模干涉(MMI)耦合器或者由此效应派生出的各种光通信器件,其显著优点为结构紧凑、工艺容差性好、插入损耗小以

及偏振不敏感等,因此具有广泛的应用价值^[1,2]。

设计 $N \times N$ 多模波导干涉耦合器需要确定输出面上成 N 个像时多模波导的长度 L_N 以及成像面上 N 个像的分布位置(实际上也即输出波导的位

收稿日期: 2007-03-08; 收到修改稿日期: 2007-07-10

作者简介: 严朝军(1968—),男,湖北省人,副教授,博士,主要从事光波导器件与光网络等方面的研究。

E-mail: flying_matrix@yahoo.com.cn

置)。L. B. Soldano^[3]、Sun Yiling^[4]等采用导模传输分析法(MPA)分析和设计多模干涉器件。使用导模传输分析法有个前提条件,即需要知道多模波导的模参量,例如模传播常量甚至模场分布。而对于三维波导而言,通常很难有这些参量的解析表达式。因此使用导模传输分析法时常使用近似方法来得到这些模参量,等效折射率法(EIM)就是常采用的一种方法,它将三维波导问题等效为平面波导问题来求解。Huang Nairong^[5]基于等效折射率法作了一定的改进来分析多模干涉耦合器,但是等效折射率法的使用有时候是完全不可行的^[6]。

为了精确的设计出多模干涉器件,需要采用针对三维波导的仿真技术,本文将选用三维交替方向隐式有限差分光束传输法(ADI FD-BPM)^[7]来分析多模干涉耦合器,该方法并不需要先验的模相关参量。

2 多模干涉耦合器的光束传输法分析

假设只考虑一维成像多模干涉器件,具有 N

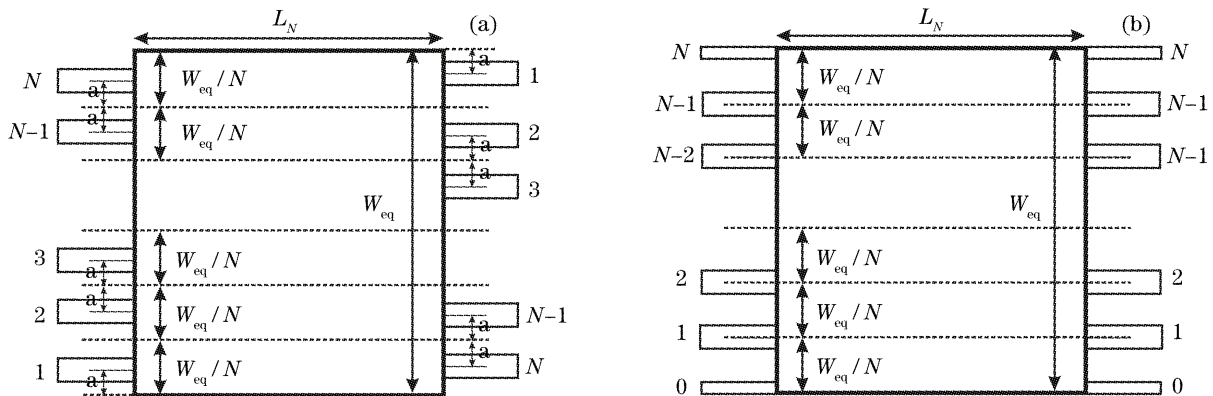


图1 (a) $N \times N$ general-MMI, N 奇数, 输入、输出波导位置由参量 a 和多模干涉等效宽度 W_{eq} 决定, (b) $N \times N$ overlap-MMI, N 奇偶数均可, 输入、输出波导位置由等效宽度 W_{eq} 和 N 唯一决定

Fig. 1 (a) $N \times N$ general-MMI, N is odd, the position of input- and output guides are defined by parameter a and MMI width W_{eq} , (b) $N \times N$ overlap-MMI, N odd is or even. All waveguide positions are solely defined through the MMI-width W_{eq} and N

输入、输出波导的位置根据导模传输分析法理论是固定的^[4]。由图1可见其位置由 N 和 a 决定, a 的度量是相对于 W_{eq} 的, 所以确定输入、输出波导位置的关键是求出 W_{eq} 。可以采用间接方法求出 W_{eq} 。对于 N 取偶数的 overlap-MMI, 由图1(b)可见, $W_{eq}/2$ 一定可以作为输入波导的位置。但是多模波导几何中心位置 $W/2$ 和 $W_{eq}/2$ 是重合的, 也就是说这个位置不需要知道 W_{eq} 就可确定。这种中心位置输入的 overlap-MMI 也被称为对称多模干涉耦合器。 $1 \times K$ overlap-MMI (也可称为 $1 \times K$ 功率分割器) 就是对称多模干涉耦合器的一种特例^[3], 该

个成像的多模波导长度为^[3]

$$L_N^M = \frac{M}{N} \times 3L_c, \quad (1)$$

式中 $L_c = 4n_{eff}W_{eq}^2/(3\lambda)$, M 和 N 是互质的正整数, n_{eff} 表示基模的有效折射率, λ 是真空中波长, W_{eq} 称为等效波导宽度。一般设计力求器件紧凑, 常取 $M=1$, 即 $L_N^M = L_N$ 。输出面上成像位置和 W_{eq} 有关。

根据输入波导位置的不同以及成像功率的大小, 多模干涉耦合器可分为两类^[4]。一类为 general-MMI, 另一类为 overlap-MMI。图1(a)所示为当 N 为奇数时的 general-MMI 结构示意图。其中 a 是编号为1的输入波导中心与多模波导边缘的距离, 需要满足关系 $0 < a < W_{eq}/N$ 。图1(b)显示 overlap-MMI 的结构, 注意到其输入、输出波导位置完全位于 W_{eq} 的 N 等分线上。两类多模干涉的区别在于 general-MMI 得到强度均匀的 N 重像, 而 overlap-MMI 的 N 重像强度不均。

overlap-MMI 的 $N=4K$ 。根据所成的 K 个像的间距, 就可以确定 W_{eq} 的大小。例如 $K=4$ 时, 两个相邻像间的间距就等于 $W_{eq}/4$ 。

由光束传输法通过数值计算确定多模干涉耦合器成像位置的方法可以总结为: 从多模波导中心输入一个波场(输入像), 借助光束传输法的运算求得 K 个输出像, 根据 K 个输出成像的横向间距, 求出多模波导的 W_{eq} 。由对称干涉耦合器的长度, 推出 L_c , 知道了这二个参量, 由导模传输分析法理论可以得出成任意 N 个像时多模干涉的输入、输出波导位置以及多模波导的长度的预期值, 由光束传输法运

算对此预期值再加以校正。

3 多模干涉耦合器算例

根据文献[3],对于强限制波导,近似满足 $W_{eq} \approx W$,而对于弱限制波导,必须考虑 W_{eq} 与 W 的差别。算例分强限制多模干涉耦合器和弱限制多模干涉耦合器分别讨论。

3.1 强限制多模干涉耦合器

采用脊波导多模干涉耦合器作为算例。波导横截面结构如图2所示。

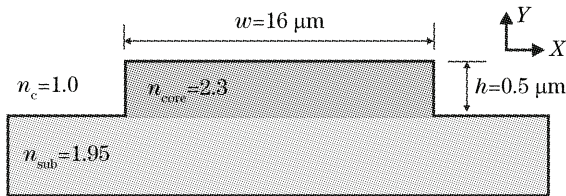


图2 多模脊波导横截面

Fig. 2 Cross section of multimode ridged waveguide

所取计算截面在 x 方向是对称的,取值范围为 $(-20 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m})$; y 方向取值范围为 $(-2 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m})$,脊波导顶端平面坐标 $y=0.3 \mu\text{m}$;截面上格点数取 3200×50 ,之所以两个方向上格点数相差较悬殊是因为算例中重点是横向位置的精确定位。真空波长 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$,诸如折射率、脊高等具体参量见图2。多模波导脊宽 $W=16 \mu\text{m}$ 。

为了确定 W_{eq} ,考虑中心输入的 1×4 光功率分割器 ($N=4K=16$)。从多模波导中心位置输入波场。经过一定的传输距离后,成四个像时输出面上的波场绝对值的等高线图如图3(a)所示。通过对输出面上波场横向峰值的观察,对于强限制波导,有

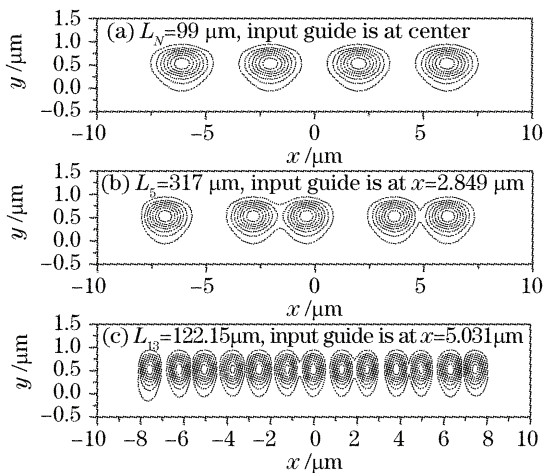


图3 强限制多模干涉耦合器输出面上波场等高线图
Fig. 3 Field profile at output plane of strongly guided

MMI coupler

$W_{eq}=16.36 \mu\text{m}$,并且此时多模波导长度为 $99 \mu\text{m}$,由(1)式可知 $L_c=528 \mu\text{m}$ 。

W_{eq} 主要用来确定输入、输出波导的位置,成 N 个像时多模波导的长度 L_N 由(1)式根据 L_c 的值及成像数 N 确定。

下面用所得到的 W_{eq} 和 L_c 设计一个 5×5 general-MMI。参考图1(a),设 $a=1.213 \mu\text{m}$,输入像从编号为2的输入波导中输入,结合 W_{eq} 可知其坐标为 $x=2.849 \mu\text{m}$,经过 $317 \mu\text{m}$ 的光束传输法运算,其输出面上的波场等高线图如图3(b)所示。五个成像的功率离散为 0.11 dB 。下面加大成像个数 N ,考虑 13×13 的 general-MMI,设 $a=0.63 \mu\text{m}$,输入像从第三个输入波导中输入,其坐标为 $x=5.031 \mu\text{m}$,经过 $122.15 \mu\text{m}$ 的光束传输法运算后,输出面上得到的波场等高线图如图3(c)所示。十三个成像的功率离散为 0.35 dB 。表1罗列了光束传输法计算得到的输出波导位置以及多模波导长度和在 W_{eq} 与 L_c 已知的前提下导模传输分析法理论预测的结果,经比较,两者比较接近,但还是存在偏差,因为导模传输分析法理论本身有一定的近似性,这种偏差也是合理的。

表1 输出波导位置以及多模干涉耦合器长度的导模传输分析法理论预期和光束传输法的计算结果

Table 1 The prediction by mode propagation analysis theory and beam propagation method computation results about the positions of output waveguides and multimode interference coupler length

(a) 5×5 general-MMI

	MPA	BPM		MPA	BPM
$x_1/\mu\text{m}$	-6.965	-6.883	$x_4/\mu\text{m}$	3.694	3.645
$x_2/\mu\text{m}$	-2.849	-2.845	$x_5/\mu\text{m}$	6.120	6.108
$x_3/\mu\text{m}$	-0.423	-0.406	$L_5/\mu\text{m}$	316.8	317.0

(b) 13×13 general-MMI

	MPA	BPM		MPA	BPM
$x_1/\mu\text{m}$	-7.548	-7.584	$x_8/\mu\text{m}$	1.257	1.294
$x_2/\mu\text{m}$	-6.291	-6.196	$x_9/\mu\text{m}$	2.517	2.470
$x_3/\mu\text{m}$	-5.031	-5.058	$x_{10}/\mu\text{m}$	3.773	3.820
$x_4/\mu\text{m}$	-3.775	-3.732	$x_{11}/\mu\text{m}$	5.033	4.970
$x_5/\mu\text{m}$	-2.515	-2.520	$x_{12}/\mu\text{m}$	6.289	6.308
$x_6/\mu\text{m}$	-1.259	-1.232	$x_{13}/\mu\text{m}$	7.549	7.496
$x_7/\mu\text{m}$	0.001	-0.031	$L_{13}/\mu\text{m}$	121.85	122.15

3.2 弱限制多模干涉耦合器

选用掩埋式波导作为弱限制多模干涉耦合器之算例^[8],波导结构横截面如图4所示。

弱限制波导的成像仿真难度比强限制波导大。理由如下:1) 欲使参与干涉成像的模式数目较多,

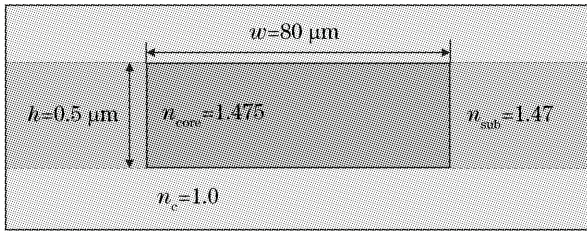


图4 多模掩埋式波导横截面

Fig. 4 Cross section of multimode buried waveguide
波导尺寸一定较大,加之弱限制波导的模场范围较强限制波导大,因此弱限制多模干涉耦合器的光束传输法计算需要较大数目的空间格点数,运算量大为增加;2) 当成像数 N 较大时,各输出波导之间的间距较小,为了减小相邻波导间的成像重叠,势必减小输入像的横向尺寸,但因为波导模场空间分布区域较广,这将导致波导各模权重很小,对于成像质量影响较大。因此大成像数目的多模干涉耦合器很难通过光束传输法观察到成像。

本例中, x 方向取值范围($-300 \mu\text{m}, 300 \mu\text{m}$); y 方向取值范围($-2 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}$),波导横截面对称中心即为坐标原点;截面上格点数取 6400×50 。真空波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。多模波导脊宽 $W = 80 \mu\text{m}$ 。

1×4 对称干涉多模干涉耦合器的计算表明,当多模波导长度为 $1784 \mu\text{m}$ 时,波导输出面成四个像,此时 $W_{\text{eq}} = 86.451 \mu\text{m}$,显然对于弱限制波导多模干涉的确不能忽略 W_{eq} 和 W 的差别。 $L_c = 9515 \mu\text{m}$ 。图 5(a)显示了输出面上的成像的等高线图。这里得到部分 1×4 功率分割器的设计数据,四个输出波导分别位于 $x_1 = -31.93 \mu\text{m}$ 、 $x_2 = -10.27 \mu\text{m}$ 、 $x_3 = 9.99 \mu\text{m}$ 和 $x_4 = 31.55 \mu\text{m}$ 处;功率离散为 0.048 dB 。此算例波导参量与文献[8]中基本相同(只是 $n_c = 1.45$,但因为是一维成像,所以推测这点应该影响不大),文献[8]中采用精确模分析法(EMA)结合等效

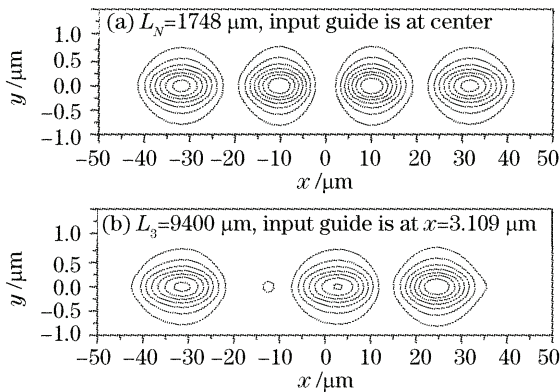


图5 弱限制多模干涉耦合器输出面上波场等高线图
Fig. 5 Field profile at output plane of weakly guided MMI coupler

折射率法(EIM)做模拟计算,但并没有给出输出波导的具体位置。

下面使用得到的 W_{eq} 和 L_c 来设计一个 3×3 general-MMI。参考图 1(a),设 $a = 11.3 \mu\text{m}$,输入像从编号为 2 的输入波导中输入,结合 W_{eq} ,可知其坐标为 $x = -3.109 \mu\text{m}$,经过 $9400 \mu\text{m}$ 的光束传输法运算,其输出面上的波场等高线图如图 5(b)所示。三个像的功率离散为 0.268 dB 。表 2 罗列了光束传输法的计算结果和导模传输分析法理论预期的结果。可以看出两者仍然比较接近。

表 2 输出波导位置以及多模干涉耦合器长度的导模传输分析法理论预期和光束传输法的计算结果, 3×3 general-MMI

Table 2 Prediction of MPA theory and BPM computation results about the positions of output waveguides and MMI length for 3×3 general-MMI

	MPA	BPM		MPA	BPM
$x_1/\mu\text{m}$	-31.926	-31.271	$x_3/\mu\text{m}$	25.709	24.613
$x_2/\mu\text{m}$	3.109	2.860	$L_3/\mu\text{m}$	9323	9400

为了通过光束传输法运算观察到多模干涉耦合器理想的成像,需要仔细设定输入像的波形。本文一律取 $\exp(-x^2/x_c^2)$ 的形式。当成像数目 N 较大时,需要减小 x_c 值。如何确定输出平面上成像的位置呢? 比如文中算例 $y = 0.0$ 这条线上 x 方向的格点数有 3200(强限制波导)或 6400(弱限制波导),找出对应 N 个成像的 N 个极大值的位置作为成像位置的 x 坐标,也即输出波导的位置。在确定多模波导长度 L_N 时,第一判据是功率离散较小(只针对 general-MMI),其次结合成像质量考虑,因为根据交叉积分计算出来的 N 个成像的功率离散最小时,成像质量往往并非最佳。

4 结 论

本文通过三维有限差分波束传输法求得多模干涉耦合器的输入、输出波导位置、多模波导的长度以及功率离散等参量,设计的关键点为通过对称干涉多模干涉的计算求得多模波导的等效宽度 W_{eq} 及最低阶两个导模的拍长 L_c ,从而为确定 general-MMI 或 overlap-MMI 输入、输出波导位置及多模波导成像长度提供依据。对于强限制多模干涉耦合器和弱限制多模干涉耦合器分别作了算例,演算结果和导模传输分析法理论预期的结果比较接近。该方法直接针对三维波导,可以适用于等效折射率法不能适用或者误差较大的场合,对于实际波导器件的制作

具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Longzhi Li, Yi Tang, Jianyi Yang *et al.*. Compact all-optical switches based on photo-induced suppression of mode interference [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 93~95
- 3 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
- 4 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
- 5 Huang Nairong, He Qian, He Sailing. Optimized parameters of MMI splitter's structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 81~85
黄耐容,何谦,何赛灵. MMI 功分器结构参量优化设计[J]. *光子学报*, 2003, **32**(1): 81~85
- 6 Ma Huilian, Wang Minghua. Optimization of MMI optical power splitter using discrete spectral index method [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(9): 1042~1045
马慧莲,王明华. 离散谱折射率法优化设计 MMI 型光功分器[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(9): 1042~1045
- 7 Yan Chaojun, Xu Zhenquan, Chen Yixin. Three-dimensional finite difference beam propagation method; application to Ti:LiNbO₃ 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 Ti:LiNbO₃ 方向耦合器的模拟[J]. *光学学报*, 1997, **17**(6): 778~781
- 8 Xia Junlei, Gao Dingshan, An Junming *et al.*. Properties simulation of weak guided buried MMI[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(5): 522~524
夏君磊,郝定山,安俊明等. 掩埋式弱限制 MMI 的性能模拟[J]. *光学技术*, 2004, **30**(5): 522~524