

一种多模干涉耦合器的性能模拟

武继江 石邦任 孔 梅

(长春理工大学物理系, 长春 130022)

摘 要 为减小多模干涉(Multimode Interference, MMI)耦合器件的尺寸,提出一种多模波导宽度为指数型变化的 Taper 结构. 理论分析了多模波导长度与该 Taper 结构的参量之间的关系. 与已被用于减小 MMI 器件尺寸的抛物线型 Taper 结构相比,该结构可进一步减小器件的尺寸. 就几种波导结构参量下的 MMI 耦合器,利用宽角光束传播法进行了数值模拟. 结果表明,指数型 MMI 耦合器的性能与抛物线型 MMI 耦合器的性能类似. 指数型 Taper 结构可以用于 MMI 器件以减小该类器件的尺寸.

关键词 导波光学;多模干涉耦合器;有限差分光束传播法;指数型 Taper 波导

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

光耦合器是光网络中最基本的器件之一. 光耦合器主要有 Y 分支型、定向耦合器型、衍射星型耦合器和多模干涉(Multimode Interference, MMI)型等. 相对于其他几种耦合器,基于自成象效应(Selfimaging Effect, SIE)的 MMI 型耦合器具有结构紧凑、宽带宽、低插损、较大的工艺容差、偏振不敏感等优点而日益受到广大研究者的关注^[1~4].

传统的 $1 \times N$ MMI 光耦合器是由一个单模输入波导,一个宽 W 长 L_{MMI} 的矩形多模波导和 N 个具有与单模输入波导相同结构的单模输出波导组成. 该器件的关键是多模波导,主要缺点是 L_{MMI} 与 W 成近似平方关系,当 N 较大时, L_{MMI} 将非常大. 人们从 L_{MMI} 与 W 的关系出发,提出在 MMI 波导部分引入合适的 Taper 结构,来减小 L_{MMI} . 其中抛物线型 Taper 结构已被证明是一种有效的 Taper 结构^[5~11]. 本文提出利用指数型 Taper 结构来减小 L_{MMI} . 首先从理论上分析了这种 Taper 结构能够减小 L_{MMI} , 并与抛物线型 Taper 结构做了比较,最后用宽角有限差分光束传播法(Finite Difference Beam Propagation Method, FD-BPM)对 MMI 器件的性能进行了模拟分析. BPM 是目前应用较为广泛的分析光波导器件的有效数值方法之一. 该方法能够用于分析具有任意折射率分布的波导结构,能直观地分析模场的分布、传输和畸变,是一种分析设计光波导器件的有力工具.

1 理论

具有指数型 Taper 结构的 1×2 MMI 耦合器如图 1.

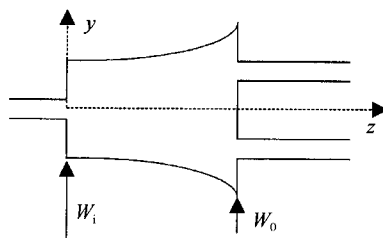


图 1 指数型 Taper 结构 1×2 MMI 耦合器
Fig. 1 Schematic diagram of a 1×2 exponentially tapered MMI coupler

MMI 区的宽度变化为

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

$$A = (W_o - W_i) / (\exp(g) - 1) \quad (2)$$

式中 z 为光传播的方向; W_o 和 W_i 分别为 MMI 区的输出端和输入端的宽度; g 为指数型 Taper 结构的形状因子.

根据色散方程,在 MMI 区侧向波数 k_ν 和传播常量 β_ν 由式(3)相联系^[1]

$$k_\nu^2 + \beta_\nu^2 = k_0^2 n_r^2 \quad (3)$$

这里 ν 为模阶数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为真空中波长, n_r 为 MMI 区的折射率, $k_\nu = (\nu + 1)\pi/W_e(z)$, 而 $W_e(z)$ 为 MMI 区的有效宽度

$$W_e(z) = W(z) + W_g \quad (4)$$

式中 W_g 为 Goos - Hänchen 位移

$$W_g = \left[\frac{\lambda}{\pi} \right] \left[\frac{n_c}{n_r} \right]^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{-1/2} \quad (5)$$

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

由式(3)可得传播常量 β_ν

$$\beta_\nu \approx k_0 n_r - \frac{(\nu + 1)^2 \pi \lambda}{4n_r W_e^2(z)} \quad (6)$$

那么,对指数型 Taper 结构 MMI 波导, ν 阶模和基模间的位相差为

$$\Delta\phi = (\beta_0 - \beta_i)L_{MMI} = \int_0^{L_{MMI}} (\beta_0 - \beta_i) dz = \nu(\nu+2) \frac{\pi\lambda}{4n_r} \int_0^{L_{MMI}} \frac{dz}{W_c^2(z)} \quad (7)$$

把式(1), (2), (4)和式(6)代入式(7)可得

$$\beta_0 - \beta_i = \frac{\nu(\nu+2)\pi\lambda\gamma}{4n_r W_0^2} \quad (8)$$

式中

$$\gamma = \frac{W_0^2}{(W_g + W_i - A)^2} - \frac{W_0^2}{g(W_g + W_i - A)^2} \ln \left[\frac{W_g + W_0}{W_g + W_i} \right] - \frac{W_0^2(W_0 - W_i)}{g(W_g + W_i - A)(W_g + W_0)(W_g + W_i)} \quad (9)$$

则两低阶模间的拍长 L_π^c 为

$$L_\pi^c = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_i} = \frac{4n_r W_0^2}{3\gamma\lambda} \quad (10)$$

对具有抛物线型 Taper 结构的 MMI 波导, 两低阶模间的拍长为^[9]

$$L_\pi^p = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_i} = \frac{4n_r W_0^2}{3\alpha\lambda} \quad (11)$$

式中

$$\alpha = \frac{W_0^2}{2(W_g + W_i)(W_g + W_0)} + \frac{W_0^2 \tan^{-1}[(W_0 - W_i)/(W_g + W_i)]^{1/2}}{2(W_0 - W_i)^{1/2}(W_g + W_i)^{3/2}} \quad (12)$$

对 $1 \times N$ MMI 耦合器, 得到输入像 N 重像的 MMI 区的最小长度应为

$$L_{MMI} = \frac{3}{4N} L_\pi^s \quad (13)$$

式中 s 为 e 或 p . 由式(10), (11)和式(13)可知, 对具有这两种 Taper 结构的 MMI 耦合器, MMI 区长度 L_{MMI} 的差别在于参量 γ 和 α , $\gamma(\alpha)$ 越大, L_{MMI} 越小.

定义归一化宽度 $d\Omega$: $d\Omega = (W_0 - W_i)/W_0$. 图 2 给出 γ 和 α 随 $d\Omega$ 的变化曲线. 计算中取以下参量: $n_r = 1.472$, $n_c = 1.467$, $g = 4$, $\sigma = 0$, $W_0 = 30 \mu\text{m}$. 易见, γ 和 α 均随 $d\Omega$ 的增大而增大, 也即输入端口和输出端口二者的宽度差别越大, γ 和 α 的值越大, 但总有 γ 大于 α . 图 2 还给出了相应参量下 1×2 MMI

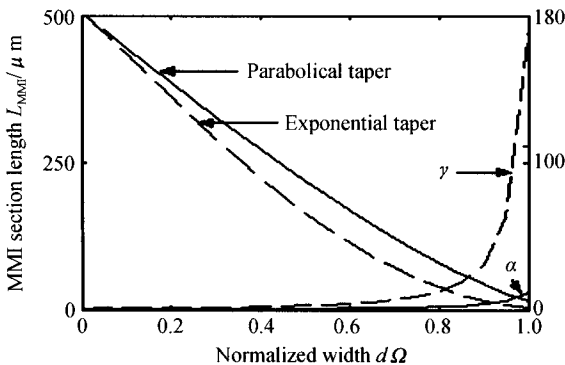


图 2 MMI 区长度及 γ 和 α 随 $d\Omega$ 的变化曲线
Fig. 2 The MMI section length and $\gamma(\alpha)$ as a function of the normalized width

耦合器 MMI 区长度 L_{MMI} 随 $d\Omega$ 的变化曲线, L_{MMI} 的变化与 γ 和 α 随 $d\Omega$ 的变化趋势正相反. 可以看出, 具有指数型 Taper 结构的 MMI 耦合器的 L_{MMI} 较小.

图 3 为在不同的输入端口宽度下, γ 随形状因子 g 的变化情况. 计算中, 其他参量同图 2. 由图 3 可以看出 γ 随 g 的变化是先减小后增大, 存在一个使 γ 最小的 g 因子. 由图 3 还可知, 输入输出端口差别越大, 也即 $d\Omega$ 越大, γ 越大, 这和图 2 结果是一致的. 计算还表明, 波导芯区和包层区折射率差对 γ 也有较大的影响, 折射率差越大, γ 越大.

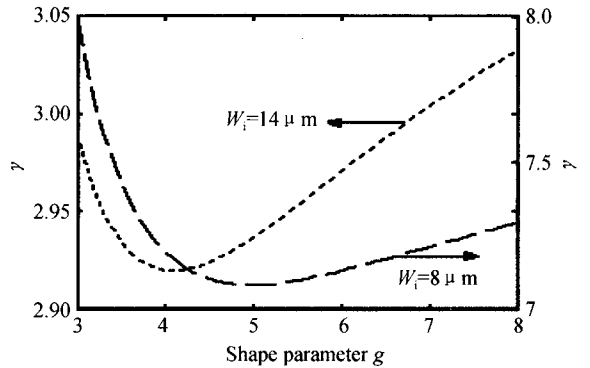


图 3 γ 随形状因子 g 的变化曲线
Fig. 3 γ as a function of the shape parameter g

由以上分析可知, 带有 Taper 结构的 MMI 型耦合器 MMI 区的长度与归一化宽度和折射率差有关. 对指数型 MMI 耦合器, MMI 区的长度还与形状因子 g 有关.

2 数值模拟与分析

为了解具有指数型 Taper 结构的 MMI 耦合器的性能, 应用 BPM 对其进行了模拟, 并与抛物线型 MMI 耦合器进行了比较. 计算采用基于 Padé 近似的宽角 FD-BPM^[12], 边界条件采用透明边界条件. 由于根据自成像理论所得到的输出波导的位置与实际成像的中心位置有一定的偏移^[13], 而 Taper 结构的引入会使这种偏移更加严重. 因此在计算中, 输出波导的位置有一定的小的调整. 计算中 MMI 区长度由式(13)确定.

图 4 是在不同的 MMI 区和包层区折射率下, 具有两种 Taper 结构的 1×2 MMI 耦合器输出光场的相对强度分布情况. 图 5 为波导 MMI 区和包层区的折射率分别为 1.467 和 1.460 时, 具有两种 Taper 结构的 1×4 MMI 耦合器输出光场的相对强度分布情况. 对 1×2 MMI 耦合器, 计算中 W_0 和 W_i 分别取 $30 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m}$, 形状因子 g 为 6. 对 1×4 MMI 耦合器, 计算中 W_0 和 W_i 分别取 $80 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$, 形状因子 g 为 4.

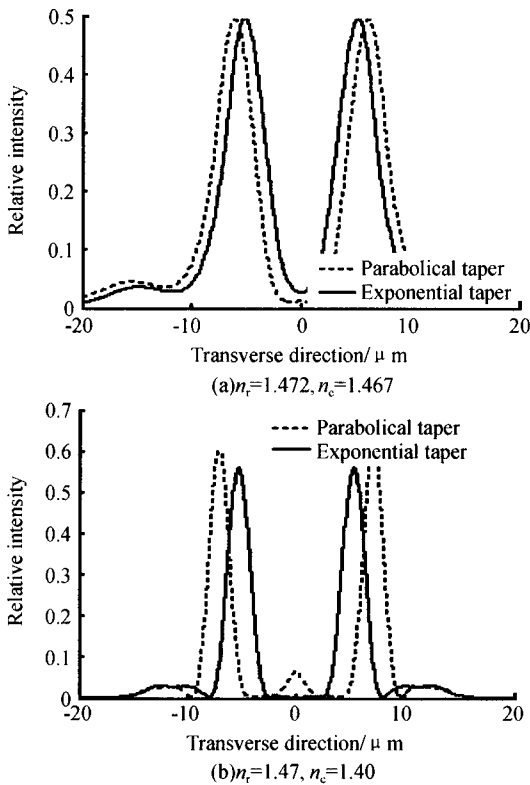


图4 1×2 MMI 耦合器输出光场分布
Fig. 4 Output intensity of 1×2 MMI coupler

三种情况下,具有指数型 Taper 结构的 MMI 耦合器的长度相对于具有抛物线型 Taper 结构的 MMI 耦合器的 MMI 区长度均有所减小,而器件的性能却相差不大.对 1×2 MMI 耦合器,两输出端保持了很好的一致性.因此,在 MMI 器件中引入指数型 Taper 结构,同引入抛物线型 Taper 结构一样,可以减小器件 MMI 区的长度.

由图还可以看出,尽管指数型 MMI 器件的长度有所减小,但输出光场相对强度却与抛物线型 MMI 器件相差不大,这说明指数型 MMI 器件的传输损耗较大.

由图 4 可见,MMI 区与包层区折射率差除对 MMI 区长度有一定的影响外,对器件输出强度分布也有一定的影响.由图 5 可知,指数型 Taper 结构

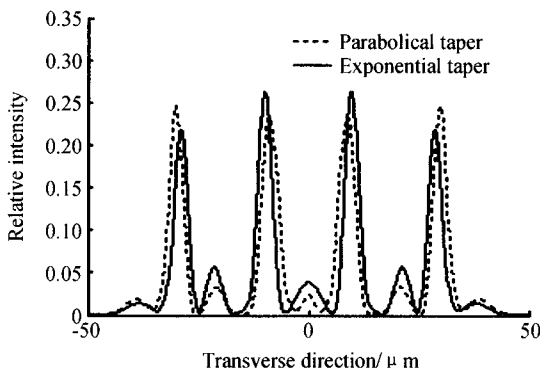


图5 1×4 MMI 耦合器输出光场分布
Fig. 5 Output intensity of 1×4 MMI coupler

同抛物线型 Taper 结构一样,会降低器件输出的均匀性.

图 6 为形状因子 g 对具有指数型 Taper 结构的 1×2 MMI 耦合器输出性能的影响.除形状因子外,其他参量同图 4(a).可以看出,形状因子 g 不同,耦合器件性能也有所差别.

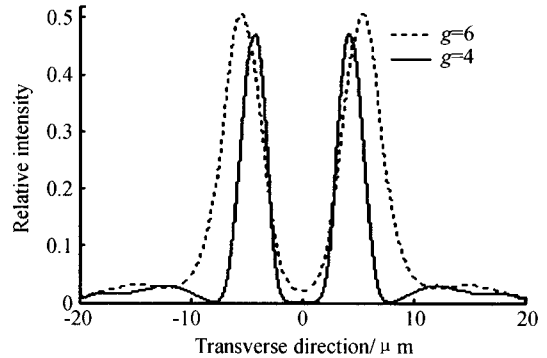


图6 不同形状因子 g 时 1×2 MMI 耦合器输出光场分布
Fig. 6 Output intensity of 1×2 MMI coupler for different shape parameters g

总之,在 MMI 器件中引入指数型 Taper 结构可以减小 MMI 器件的长度,而器件性能与应用抛物线型 Taper 结构相比并无太大的差别.尽管指数型 Taper 结构的引入增加了传输损耗,但通过优化指数型 Taper 结构的参量,如归一化宽度、形状因子、折射率差和输出波导位置等,是可以提高器件性能,满足实际的需要的.

3 结论

为进一步减小 MMI 耦合器件的长度,提出在 MMI 区引入指数型 Taper 结构.理论分析表明该 Taper 结构可以减小 MMI 器件的长度.而 BPM 数值模拟结果表明,具有指数型 Taper 结构的 MMI 耦合器的性能与具有抛物线型 Taper 结构的 MMI 耦合器的性能类似,对该类 MMI 器件,可通过对器件结构参量的优化来提高器件的性能,以满足实际的要求.

参考文献

- 1 Soldano L B, Pennings E C M. Optical multimode interference devices based on self-imaging; Principles and applications. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13** (4): 615~627
- 2 王章涛,樊中朝,陈少武,等. SOI 通道转换型多模干涉耦合器的研究. *光子学报*, 2004, **33**(9): 1047~1049
Wang Z T, Fan Z C, Chen S W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1047~1049
- 3 王小龙,余金中. 不同衬底折射率的多模干涉耦合器. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1045~1048
Wang X L, Yu J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):

- 1045~1048
- 4 马慧莲. 二维限制 MMI 耦合器自镜像特性. 光子学报, 2003, **32**(6): 657~660
Ma H L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 657~660
- 5 Levy D S, Scarmozzino R, Li Y M, *et al.* A new design for ultracompact multimode interference-based 2×2 couplers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(1): 96~98
- 6 Levy D S, Scarmozzino R, Osgood R M. Length reduction of tapered $N \times N$ MMI devices. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(6): 830~832
- 7 Levy D S, Park K H, Scarmozzino R, *et al.* Fabrication of ultracompact 3 dB 2×2 MMI power splitters. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(8): 1009~1011
- 8 Wei Hongzhen, Yu Jinzhong, Liu Zhongli, *et al.* Fabrication of 2×2 tapered multimode interference coupler. *Electronics Letters*, 2000, **36**(19): 1618~1619
- 9 Wei Hongzhen, Yu Jinzhong, Zhang Xiaofeng, *et al.* Compact 3 dB tapered multimode interference coupler in silicon-on-insulator. *Optics Letters*, 2001, **26**(12): 878~880
- 10 严清峰, 余金中. 一种新型 SOI Mach-Zehnder 干涉型电光调制器的设计. 光子学报, 2003, **32**(5): 555~558
Yan Q F, Yu J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 555~558
- 11 Themistos C, Rajarajan M, Rahman B M A, *et al.* Rigorous comparison of parabolically tapered and conventional multimode-interference-based 3 dB power splitters in InGaAsP/InP waveguides. *Applied Optics*, 2004, **43**(27): 5228~5235
- 12 Hadley G R. Wide angle beam propagation using Padé approximant operators. *Optics Letters*, 1992, **17**(20): 1426~1428
- 13 王谦, 何塞灵, 黄耐容, 等. 弱导波导多模干涉耦合器结构参量优化设计. 光子学报, 2002, **31**(3): 354~359
Wang Q, He S L, Huang N R, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 354~359

Properties Simulation of a Multimode Interference Coupler

Wu Jijiang, Shi Bangren, Kong Mei

Department of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022

Received date: 2005-07-08

Abstract A multimode interference (MMI) coupler with the exponentially tapered multimode waveguide is proposed in order to reduce the scale of the MMI device. The relation between the length of the multimode waveguide and the parameters of the tapered structure was analyzed in theory. Compared with the parabolically tapered structure, which has been successfully used in the MMI devices, this structure could further reduce the length of the MMI devices. The results of the simulation by the wide-angle finite difference beam propagation method (FD-BPM) for some MMI couplers with different parameters were given. It was shown that the performance of the MMI couplers with the exponentially tapered structure was similar to the devices with the parabolically tapered structure. As a result, the exponentially tapered structure can be used in MMI devices to reduce the length of this kind of devices.

Keywords Guided wave optics; Multimode interference coupler; Finite different beam propagation method (FD-BPM); Exponential taper waveguides



Wu Jijiang was born in 1974. He received his Bachelor's degree from Changchun Institute of Optics and fine Mechanics and the Master degree form Changchun University of Science and Technology in 1999 and 2003 respectively. Now he is a P. D. degree candidate in Changchun University of Science and Technology. His present research interests include integrated optics, optical guided-wave theory and optical fiber sensor.