

文章编号: 1001-3806(2010)05-0690-04

新型 S 形光波导低弯曲损耗路径设计

孙光春, 周自刚*, 杨永佳, 王 强
(西南科技大学 理学院, 绵阳 621010)

摘要: 为了降低光波导中的弯曲损耗, 从理论上分析了光波导的弯曲损耗、过渡损耗产生的根源, 并以此为依据推导出符合弯曲、过渡低损耗的 5 次, 6 次, 7 次, 8 次和 9 次幂函数表达式。由 MATLAB 和 MAPLE 工具软件计算可知, 9 次幂函数的图形曲线最圆滑, 当取 $h = 125\mu\text{m}$, $L = 800\mu\text{m}$ (高分支比) 时其弯曲损耗可以减小到 4.57dB, 与传统常用的余弦函数和反正弦函数进行比较, 在相同条件下弯曲损耗有了明显的降低。结果表明, 所设计的 1×4 光功分器优化路线, 传输性能优良, 分配均匀。这为以后 Y 分支光波导的制作有很好的指导意义。

关键词: 集成光学; 低弯曲损耗; 9 次幂函数; MATLAB; 有限差分光束传输法

中图分类号: TN252; TN256 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.031

Design of new type S-shaped optical waveguide low-loss bending path

SUN Guang-chun, ZHOU Zi-gang, YANG Yong-jia, WANG Qiang

(School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to reduce the bending loss of optical waveguide, the source of bending loss and transition loss of optical waveguide was analyzed. A series of curved line expression were obtained, i. e., five-power function, six-power function, seven-power function, eight-power function and nine-power function expression. With the help of MATLAB and MAPLE, calculation results show that the curves of the nine-power function is the most smooth, when taking $h = 125\mu\text{m}$, $L = 800\mu\text{m}$ (high branching ratio), the loss can be reduced to 4.57dB, which is much smaller than conventional sine function and cosine functions. At last, an optimum route composed of 1×4 optical splitters was designed and simulated in which the energy distribution was symmetric and uniform. This can offer some valuable guidance to the research of Y-type optical waveguide.

Key words: integrated optics; low bending loss; nine-power function; MATLAB; finite different beam propagation method

引 言

光波导是集成光学中必不可少的器件。由于光波导中光束传播方向的改变和光束传输轴移位的需要, 光波导中的弯曲是必需的, 波导弯曲会引起波导材料在光的传输方向上光学特性分布的变化, 引入传输中光波的额外损耗。在光波导器件中为了使光波按要求传输, 同时尽可能减小传输损耗, 人们对光波导弯曲的光路设计进行了广泛的研究^[1-4]。因此, 找到一种大角度、低损耗的波导弯曲路径就变得很重要。为了设计出低损耗的光波导, 得出有效的计算方法, 本文将分析波导弯曲中产生的根源, 考虑相关的边界条件, 推导光波导 S 弯曲的优化函数公式, 并进一步理论上计算弯曲函数的损耗。

基金项目: 四川省教育厅科技项目资助项目(06ZD1020)

作者简介: 孙光春(1984-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光波导、微小光学、集成光学方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhouzigang1973@163.com

收稿日期: 2009-09-16; 收到修改稿日期: 2009-11-04

1 弯曲损耗理论分析

1.1 纯弯曲损耗

若仅仅基于弯曲的本质性考虑, 其损耗可分为两部分: 纯弯曲损耗和过渡损耗^[5], 弯曲损耗系数可以表示为:

$$\alpha(R) = C \exp(-C_0 R) \quad (1)$$

式中, R 为弯曲段的曲率半径, C, C_0 与 R 无关, 由相应的直波导决定^[6]。其中, $R = |(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}} y''^{-1}|$, y' 和 y'' 分别表示函数 y 的 1 次导数和 2 次导数, C 的表达式比较复杂, 详见参考文献[7], $C_0 = \frac{2\pi(2\Delta N)^{3/2}}{\lambda\sqrt{n_b}}$, 而

$\Delta N = N - n_b$, N 为对称波导的有效折射率, n_b 为衬底和覆盖层折射率, λ 为自由空间波长。最后得到纯弯曲损耗表达式:

$$\alpha(R) = 8.686C_1 \exp(-C_2 R) \quad (\text{dB/cm}) \quad (2)$$

在此采用 MUSTIELES 等人^[8]所分析的 S 形波导弯曲及相应的波导结构参量, 如此 $C_1 = 8.64\text{mm}^{-1}$, $C_2 =$

0.10mm^{-1} , 总的损耗 α_1 为: $\alpha_1 = \int_0^L \alpha(R) ds$ 。可以化为:

$$\alpha_1 = \int_0^L \alpha(R) \sqrt{1+y'^2} dx \quad (3)$$

式中, s 为波传输的路径。

1.2 过渡损耗

过渡损耗是由于波导的曲率变化不连续所引起, 通常这部分损耗会发生在直波导和弯曲波导之间的连接处, 若弯曲结构函数的1阶和2阶导数均连续, 则可使过渡损耗减至最小为0。

2 低损耗优化路线设计

根据损耗理论可知, 波导弯曲的总损耗是弯曲结构的泛函^[10], 对于给定的位置及要求, 必存在一个使弯曲损耗最小的弯曲结构函数 $y(x)$ 。优化的波导弯曲结构应该具有的基本条件为: 结构函数、导函数和曲率函数均连续, 并在此基础上略去端点(曲率半径为0)的过渡损耗, 将弯曲区的纯弯曲损耗降至最低, 并且考虑将两个相反的S型弯曲结构合并时产生的耦合损耗降至最低(如图1所示)。

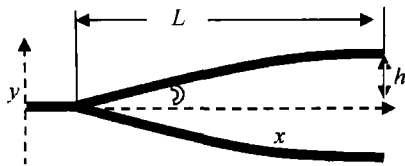


Fig. 1 Y-waveguide

若给定结构函数的边界条件(长为 L , 分支曲线最大间距为 $2h$ 的区域), 考虑消除端点处的过渡损耗, 可令曲率半径在端点处的值为无穷大, 从曲率半径的表达式可知2阶导函数的值为0。即:

$$y''(0) = 0, y''(L) = 0 \quad (4)$$

对于分支耦合损耗, 如果光路分支能够从无间隙开始分离去, 将获得最大的耦合效率, 分支损耗最小。故在不考虑线宽的情况下, 从无间隙开始分开意味着弯曲结构在端点处的分支角为0(1阶导函数为0)。即:

$$y'(0) = 0, y'(L) = 0 \quad (5)$$

同时, 由弯曲结构本身可知, 在端点处的值分别为0和 h 。即:

$$y(0) = 0, y(L) = h \quad (6)$$

由上述(4)式~(6)式的边界条件, 按照数学理论, 可满足5次幂函数的求解, 故可假设弯曲结构的方程为:

$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f \quad (7)$$

式中, a, b, c, d, e, f 为待定常数。

将边界条件代入(7)式则有:

$$\begin{cases} y(0) = 0 = f \\ y'(0) = 0 = e \\ y''(0) = 0 = d \\ y(L) = h = aL^5 + bL^4 + cL^3 \\ y'(L) = 0 = 5aL^4 + 4bL^3 + 3cL^2 \\ y''(L) = 0 = 20aL^3 + 12bL^2 + 6cL \end{cases} \quad (8)$$

由上式可得(MATLAB编程求解): $a = \frac{6h}{L^5}, b = -\frac{15h}{L^4},$

$c = \frac{10h}{L^3}, d = 0, e = 0, f = 0。$

故得弯曲结构函数为:

$$y = \frac{6h}{L^5}x^5 - \frac{15h}{L^4}x^4 + \frac{10h}{L^3}x^3 \quad (9)$$

同理, 如果为了更好地使初端和末端有更好的弯曲程度, 加入 $y'''(0) = 0$ 或 $y'''(L) = 0$, 理论上这样会得到更好的平滑曲线, 这就得到了7个边界条件, 从而可以确定两个6次幂函数。设6次幂函数为: $y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + g。$

有边界条件可得:

$$\begin{cases} y(0) = 0 = g \\ y'(0) = 0 = f \\ y''(0) = 0 = e \\ y'''(0) = 0 = d \\ y(L) = h = aL^6 + bL^5 + cL^4 \\ y'(L) = 0 = 6aL^5 + 5bL^4 + 4cL^3 \\ y''(L) = 0 = 30aL^4 + 20bL^3 + 12cL^2 \end{cases} \quad (10)$$

或:

$$\begin{cases} y(0) = 0 = g \\ y'(0) = 0 = f \\ y''(0) = 0 = e \\ y(L) = h = aL^6 + bL^5 + cL^4 \\ y'(L) = 0 = 6aL^5 + 5bL^4 + 4cL^3 \\ y''(L) = 0 = 30aL^4 + 20bL^3 + 12cL^2 \\ y'''(L) = 0 = 120aL^3 + 60bL^2 + 24cL \end{cases} \quad (11)$$

从而求得6次幂函数为:

$$y = \frac{10h}{L^6}x^6 - \frac{24h}{L^5}x^5 + \frac{15h}{L^4}x^4 \quad (12)$$

或:

$$y = \frac{-10h}{L^6}x^6 + \frac{36h}{L^5}x^5 - \frac{45h}{L^4}x^4 + \frac{20h}{L^3}x^3 \quad (13)$$

同理, 为了更光滑, 直接引入 $y'''(0) = 0$ 和 $y'''(L) = 0$ 的初始条件, 从而可以求得一个7次幂函数, 为:

$$y = \frac{-20h}{L^7}x^7 + \frac{70h}{L^6}x^6 - \frac{84h}{L^5}x^5 + \frac{35h}{L^4}x^4 \quad (14)$$

同理, 再追加引入 $y^{(4)}(0) = 0$ 或 $y^{(4)}(L) = 0$, 可得两

个8次幂函数为:

$$y = \frac{-35h}{L^8}x^8 + \frac{120h}{L^7}x^7 - \frac{140h}{L^6}x^6 + \frac{56h}{L^5}x^5 \quad (15)$$

或:

$$y = \frac{35h}{L^8}x^8 - \frac{160h}{L^7}x^7 + \frac{280h}{L^6}x^6 - \frac{224h}{L^5}x^5 + \frac{70h}{L^4}x^4 \quad (16)$$

同理, $y^{(4)}(0) = 0$ 和 $y^{(4)}(L) = 0$ 同时满足, 可求得9次幂函数为:

$$y = \frac{70h}{L^9}x^9 - \frac{315h}{L^8}x^8 + \frac{540h}{L^7}x^7 - \frac{420h}{L^6}x^6 + \frac{126h}{L^5}x^5 \quad (17)$$

Table 1 The length of path

bend function	five-power	six-power A	six-power B	seven-power	eight-power A	eight-power B	nine-power	sine	cosine
length of path/ μm	813.738	814.939	814.9391	815.6112	816.6031	816.6031	817.2688	814.3981	811.9147

3 路线模拟和损耗计算

首先给出以往常用的上升反正弦函数弯曲曲线和余弦函数弯曲曲线。上升反正弦型弯曲波导表达式为^[7]:

$$y(x) = \frac{h}{L}x - \frac{h}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \quad (18)$$

余弦型弯曲波导表达式为:

$$y(x) = h\left(1 - \cos\frac{\pi x}{L}\right) \quad (19)$$

接着对所有函数表达式进行图像模拟和损耗计算, 综合考虑分支比与损耗的关系, 取 $h = 125\text{nm}$, $L = 800\text{nm}$, 此时 $L^2/h = 5120\text{nm}$ 及分支角 $\theta = 2\arctan(h/L) = 17.77^\circ$ (有比较大的分支角度), 为了形象地表示曲线, 本文中利用 MATLAB 模拟了各曲线表达式的传输路线图。图 2 和图 3 是 MATLAB 的模拟路线图, 从图形中可以看出曲线的弯曲程度和光滑程度。

由(3)式, 利用 MAPLE 和 MATLAB 编程可以求出

Table 2 Bending loss

bend function	five-power	six-power A	six-power B	seven-power	eight-power	eight-power B	nine-power	sine	cosine
bending loss/dB	4.869	4.761	4.761	4.755	4.631	4.631	4.574	4.907	4.665

从损耗上看, 9次幂函数的损耗为最低, 明显比以往的正弦和余弦函数曲线的损耗降低了许多。

4 优化路线模拟

本文中同时利用有限差分光束传播法 (finite difference beam propagation method, FD-BPM), 模拟了一个分支比较小的与现实社会应用广泛的 1×4 型 Y 分支光功分器的传输路线图, 分析 TE 模在 Y 分支中的传输特性, 设波导宽度为 $6\mu\text{m}$, 入射波长 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, 波导折射率为 2.21, 衬底折射率为 2.20, 参考折射率为 2.2073。

当然原则上可以无限求下去, 不过由 MATABLE 画图和对曲线求路程积分 (见表 1) 看出, 解到 9 次幂传输路程明显增大, 路程越长意味着材料对光信号的本征吸收、散射损耗越大, 目前工业制造的光纤在 $1.3\mu\text{m}$ 波段附近, 其损耗在 $0.3\text{dB/km} \sim 0.4\text{dB/km}$ 范围之间^[11], S 型弯曲路线的吸收损耗、散射损耗更大得多。加上本身考虑到理论上已经达到足够高的精度和实验上操作的简洁性、可实现性, 所以没必要继续往下求解。

各曲线的弯曲损耗 (dB)。

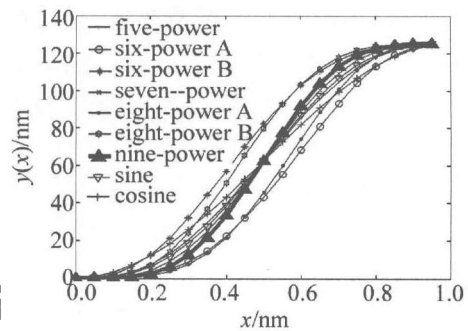


Fig. 2 Simulation diagram by MATLAB

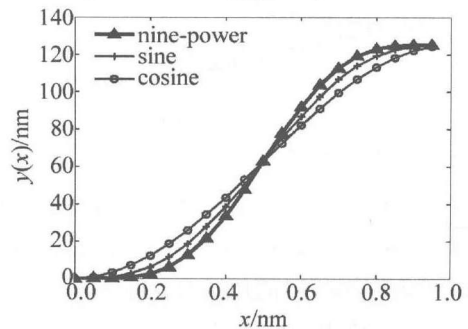


Fig. 3 Sine, cosine, nine-power function

从图 4 可知, 峰的高低代表光传输的能量, 光传输的每一个位置都比较均匀, 光的能量分配的比较均匀。

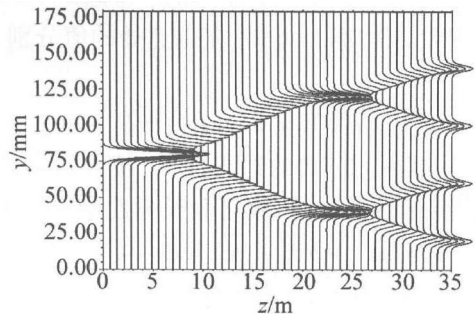


Fig. 4 The transmission line of 1×4 waveguide

由图5可知(横坐标表示光信号输出的位置,单位 nm;峰的高度代表光信号能量的相对强度),输出的4个端口光能量的分布基本是均匀、均等的,两端的输出能量比内侧稍大(与Y分支光波导和光传播本身有关),与其它Y分支光波导相比,有比较好的输出分配比,效果更好。

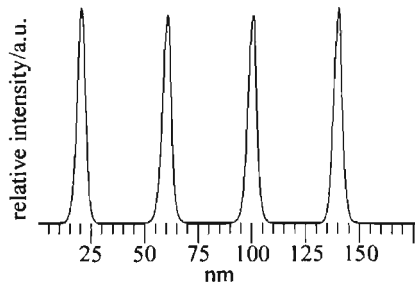


Fig. 5 Energy distribution

5 结 论

通过分析弯曲损耗、过渡损耗的根源,求解了一系列符合弯曲低损耗条件的高次幂函数表达式,取 $L = 800\mu\text{m}$, $h = 125\mu\text{m}$ 时求其各函数的弯曲损耗,9次幂函数的弯曲损耗可达 4.57dB,与以往的正弦、余弦函数比较,损耗有了明显的降低,表明在高分支比 ($\theta = 2\arctan(h/L) = 17.77^\circ$) 的弯曲路线下此表达式损耗低,最后设计了一个 1×4 Y分支光波导,并通过 FD-BPM 模拟可以看出,传输性能优良、分配均匀,对以后 Y分支光波导的制作有很好的指导意义。

参 考 文 献

- [1] LI A Y, YANG Y P. Review of the new development of beam propagation method for analysis of optical waveguide[J]. *Laser Technology*, 2000, 24(4): 236-239(in Chinese).
- [2] HU T G. The optical access network and optical device[J]. *Optical Communication Technology*, 1998, 22(2): 79-85(in Chinese).
- [3] GRANESTRAND P, STOLTZ B, THYLEN L, et al. Strictly non-blocking 8×8 integrated optical switch matrix[J]. *Electron Lett*, 1986, 22(15): 816-818.
- [4] CHUNG P S, CHAN H P, PUN E Y B. Novel design of integrated optical beam splitters using symmetric Y-branch structures[J]. *IEEE J Q E*, 1990, 137(5): 340-344.
- [5] GERD K. *Fiber optic communications*[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2005: 78-79(in Chinese).
- [6] YANG J Y, WANG M H. Optimizing design to optical waveguide bend structure[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1999, 10(4): 305-309(in Chinese).
- [7] ZHENG H L, CHEN F S. Bending loss of two kinds of Y-branch optical waveguides[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26(1): 30-33(in Chinese).
- [8] MUSTIELES F J, BALLESTEROS E, BAQUERO P. Theoretical S-bend profile for optimization of optical waveguide radiation losses[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(5): 551-553.
- [9] PETERMANN K. Fundamental mode microbending loss in graded-index and W fibres[J]. *Opt & Quant Electron*, 1977, 9(2): 167-175.
- [10] TETSURO Y, MASAHIRO G, SHINNOSU K S. New design method for low-loss Y-branch waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(9): 1376-1384.
- [11] LI Y Q, CUI M. *Optical waveguide theory and technology* [M]. Beijing: Posts Telecommunications Press, 2002: 2(in Chinese).
- [5] LONG H, XU Y P, CHEN L. Performance comparison between two feedback signals for PMD compensation[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 655-658(in Chinese).
- [6] HU Ch W. Merge of OFDM and MIMO technology in wireless network [J]. *China New Telecommunications*, 2009, 12(9): 62-65(in Chinese).
- [7] LI M, LI S P, TIAN X F. Adaptive channel estimation for OFDM systems[J]. *Wireless Communication Technology*, 2009, 26(3): 1-9(in Chinese).
- [8] WU Y P, WANG H X, ZHOU Zh R, et al. Simulation of circular harmonic Mellin filter in pattern recognition[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 86-88(in Chinese).
- [9] YANG Zh, BAI W L, LIU Z M. A decision-aided residual ISI cancellation algorithm for OFDM systems[C]//Signal Processing, 2006 8th International Conference. New York: IEEE, 2006: 463-468.
- [10] ZHONG X Q, XIANG A P, CHEN J G, et al. Frequency chirps and spectra of optical pulses propagating in optical fibers with cubic-quintic nonlinearity [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 479-482(in Chinese).

(上接第 652 页)