

## 用有限差分光束传输法分析过渡波导损耗

李志宏, 何对燕, 贺 磊

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:**为了减小弯曲过渡波导和斜坡过渡波导的功耗,设计研究了几种过渡波导形状函数,并用有限差分光束传输法进行了模拟分析,发现过渡波导形状的选取与坡度和曲折角存在一定的条件关系,经总结给出了该条件关系表达式;并且,在分析计算不同形状过渡波导损耗的过程中,凸现出了有限差分光束传播法在光波导器件及其单元器件模拟分析中的直观性与方便性。

**关键词:** 有限差分光束传输法; 光波导器件; 集成光波导

**中图分类号:** TN913.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0093-04

## Power loss analysis of transitional waveguide by the finite-difference beam propagation method

LI Zhi-hong, HE Dui-yan, HE Lei

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In order to minish the power loss of transitional bending waveguide and transitional grading waveguide, several shape functions of transitional waveguide are proposed and developed at first. Then they are simulated and analyzed by the finite-difference beam propagation method. Based on it, conditional relations between optimized transitional waveguide shape and the angle of transitional waveguide are found and proposed in math formula. During analyzing and calculating the power losses of transitional waveguide with different shapes with the finite-difference beam propagation methods, it is shown that the FD-BPM is perspicuous and convenient in simulating and analyzing optical waveguide device and units.

**Keywords:** Finite-difference beam propagation method; Optical waveguide instrument; Integrated optical waveguide

### 0 引言

随着光纤通信及光信号处理的发展,光集成技术越来越受到人们的关注。集成光波导理论分析中的

解析方法已不能满足分析要求,而用于光波导中的快速、精确的数字模拟技术越来越重要。过去几十年中,基于傅里叶变换的波束传输法(FFT-BPM)已经成功地应用于光纤、薄膜集成光波导、电光器件等领域<sup>[1]</sup>。尽管 FFT-BPM 的应用取得了较大的成功,但

收稿日期:2003-05-26; 修订日期:2003-07-13

作者简介:李志宏(1978-),男,云南昆明人,硕士生,研究方向为光波导技术、光电器件和集成光学。

其应用范围却有一定的局限性。为此,拟采用求解傍轴近似波动方程的另一种方法——基于有限差分(FD)技术的波束传输法(FD-BPM),它不仅保留了BPM方法的直观性,更重要的是比较适合处理FFT-BPM难于处理的问题<sup>[2~4]</sup>。

过渡波导常常用于集成光波导器件<sup>[5]</sup>中,例如在使用光定向耦合器时,实际耦合器的功率输入端和输出端都是弯曲的过渡波导,所以过渡波导是十分重要和有用的器件。文中分析的过渡波导包括弯曲过渡波导和斜坡过渡波导。弯曲过渡波导用于连接两截面相同且中心轴平行的直波导;斜坡波导用于连接两中心轴重合而截面不同的直波导。Macatili和Miller曾用“速率法”<sup>[6]</sup>计算弯曲过渡波导的损耗,但该方法只考虑了模的辐射,而没考虑模间耦合和反射;R. Baets等人用FFT-BPM法<sup>[7]</sup>分析过该类损耗,效果不是很好。

## 1 FD-BPM 法的算法原理

### 1.1 基本公式

对二维波导,光波形式为 $\varphi(x, z)\exp(-i\omega t)$ ,由Maxwell方程可以得到如下的标量波动方程:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} n^2(x, z) \varphi = 0 \quad (1)$$

式中  $z$  为光在波导中的传播方向; $\omega$  为光的角频率; $n(x, z)$  为介质折射率。

令 $\varphi(x, z) = u(x, z)\exp(ik_r z)$ ,  $k_r$  为任意常数,要求 $k_r$ 的选择使 $u(x, z)$ 是 $z$ 的缓变函数,把此式代入波动方程(1),忽略 $\partial^2 u / \partial z^2$ ,则方程变为:

$$2ik_r u_z + u_{xx} + (k^2 - k_r^2)u = 0 \quad (2)$$

式中  $u_z = A(x, z)u_{xx} + B(x, z)u$  (其中  $A(x, z) = i/2k_r$ ;  $B(x, z) = i(k^2 - k_r^2)/2k_r$ );  $k(x, z) = k_0 n(x, z)$  表示依赖于空间坐标的波数(其中  $k_0 = \omega/c$  为自由空间中的波数)。

离散的  $u(x, z)$  (记为  $u_s^r = u(x_s, z_r)$ ) 横向节点位于  $x_s = a + s\Delta x$  ( $s = 0, \dots, N$ ; 节距  $\Delta x = (b - a)/N$  (其中  $a, b$  为横向窗口范围;  $N$  为节点总数 - 1)); 纵向(波导传播方向)节点位于  $z_r = r\Delta z$  ( $r = 0, 1, \dots, n$ ;  $\Delta z$  为纵向步长)。在众多的差分格式中,选择绝对稳定

的Crank-Nicholson<sup>[8]</sup>的修改格式,关于半步长点( $s, r + 1/2$ )对其作差分近似,因为公式完全等同于参考文献[8],这里不再列出。

### 1.2 边界条件

在对波导的分析中,不可能完全地分析理想的本征模式在波导中的传播,那么在非本征模式传播和弯曲波导传播等情况下,必然有辐射模,或者说有光能流出所取的计算窗口,所以每种BPM法都要考虑计算窗口的有限截断会引起边界反射这一问题。文中采用TBC(Transparent Boundary Condition)边界条件<sup>[9]</sup>,它近似认为在边界附近场满足平面波方程。例如对窗口的右边第 $r + 1$ 步有 $u_{N+1}^r = u_{N-1}^r \exp(ik_x dx)$ ,其中 $k_x$ 暂时未定,它由第 $r$ 步的方程 $u_N^r / u_{N-1}^r = u_{N-1}^r / u_{N-2}^r = \exp(ik_x dx)$ 求出;对于窗口的另一端也有类似关系。在迭代过程中, $k_x$ 的实部强迫取为正,以保证场向外辐射,消除从计算窗口壁向内反射的能流,从而保证无辐射模的反射。如果 $k_x$ 的实部为负值,在算法中将其强置为零。

## 2 FD-BPM 对过渡波导损耗的分析

### 2.1 弯曲过渡波导

连接两平行直波导的弯曲波导如图1所示。对于一定的 $h$ 值,要求尽可能缩短 $L$ ,并且连接损耗越小越好。如果采用直线连接两平行波导,在两个弯曲部分有较大的散射损耗。要减小损耗,必须减小曲折角度 $\theta$ ,使满足一定 $h$ 值的 $L$ 变长。因此,为了在不加大过渡波导尺寸的情况下减小过渡功耗,就必须采用弯曲波导来过渡。

采用斜线、双圆弧、正弦和余弦4种弯曲过渡波导的线型来进行比较分析。取波导参数:波导折射率 $n(x) = 2.1512 + 0.0035 \cosh^{-2}(2x/W)$ ,波导宽度

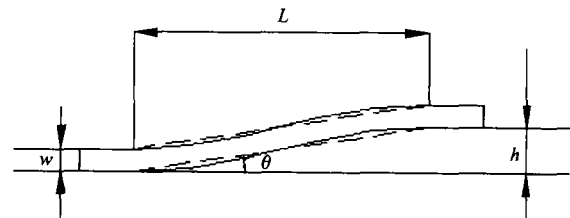


图1 弯曲过渡波导

Fig. 1 Transitional bending waveguide

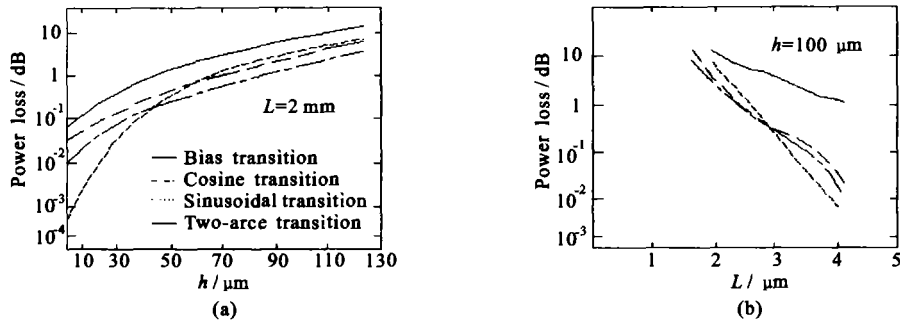


图 2 弯曲波导功耗分析

Fig. 2 Powerloss analysis of bending waveguide

$W = 6 \mu\text{m}$ , 真空光波长  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ , 可以验证, 该波导为单模波导。FD-BPM 计算参数为: 计算窗口为  $300 \mu\text{m}$ , 差分网格数为 1000, 直波导中计算步长为  $5 \mu\text{m}$ , 过渡波导中的步长为  $0.5 \mu\text{m}$ 。计算结果如图 2 所示。从图中可以看出, 当曲折角  $h/L < 1/40$  时, 采用正弦曲线损耗最小, 当  $h/L > 40$  时, 用余弦曲线连接损耗最小。

2.2 斜坡过渡波导

图 3 是斜坡过渡波导的略图。它是连接两个不同宽度直波导的过渡单元, 其评价标准是功率损耗。

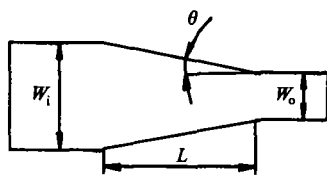


图 3 斜坡波导略图  
Fig. 3 Grade waveguide

波导形状沿光传播方向发生变化会引起散射损耗, 斜坡波导与直波导交接处会引起模转换损耗。采取延长过渡波导的长度和改变过渡波导形状的办法都可以使功耗减到最小。由于光集成需要小尺寸, 所以只能采取改变波导形状的办法来减小功耗。考虑到工艺制作的可行性和采取光滑缓变过渡可以减小功耗的原理, 设计了 4 种过渡斜坡形状(见图 4)来进行了比较分析, 得出最佳的斜坡波导及其使用条件。

通过分析图 3 可知, 一旦确定图中的  $W_i$ 、 $W_o$  和  $L$ , 则图 4 中 (b)、(c) 和 (d) 的形状就可以唯一确定, 而图 4(a) 为  $R = \infty$  的曲线, 即斜线过渡。

在 FD-BPM 法的运算中将采用上述参数; 对于光波导的参数, 为了加大斜坡波导坡度的变化范围,

采用大宽度的单模波导, 波导区的折射率为 1.01, 光限制层的折射率为 1, 真空中波长为 6.28。斜坡形状参数中, 入口端宽度  $W_i = 20$ , 出口端宽度  $W_o$  不定, 用来改变斜坡的坡度, 斜坡长度  $L = 0.1 \text{ mm}$ 。

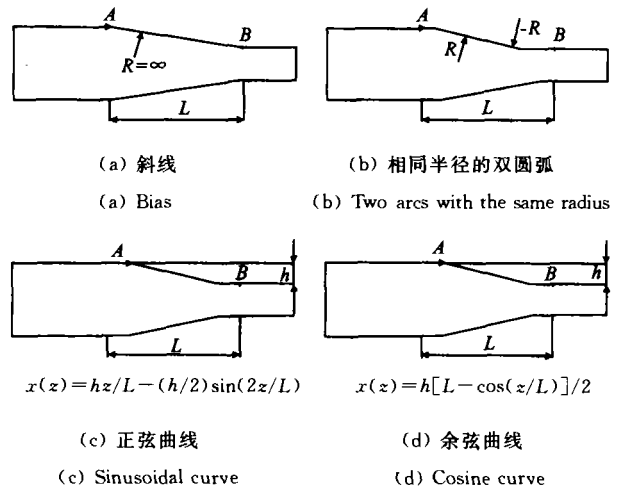


图 4 4 种不同形状的斜坡过渡波导(图中 A, B 两点为临界点)  
Fig. 4 Four grade waveguides with different shapes (A, B are critical points)

4 种形状的斜坡过渡波导分别为: (1) 斜线 ( $R = \infty$  的曲线); (2) 双圆弧曲线  $R = (L^2/4h + h/4)$ ; (3) 正弦曲线  $x(z) = hz/L - (h/2\pi)\sin(2\pi z/L)$ ; (4) 余弦曲线  $x(z) = h[1 - \cos(\pi z/L)]/2$ 。计算结果如图 5(a)~(d) 所示。当斜坡长度  $L$  和出口端宽度  $W_o$  都比较大即坡度很小时, 采用双圆弧连接功耗最小, 正弦曲线不能达到减小功耗的效果。从图中还发现, 双圆弧功耗曲线与斜线功耗曲线存在一交点, 该点所对应的出口端宽度称为临界宽度, 其坡度为临界坡度, 当出口端宽度大于临界宽度时, 可以采用双圆弧斜坡来减小功耗。通过大量计算发现, 使用双圆弧的条件

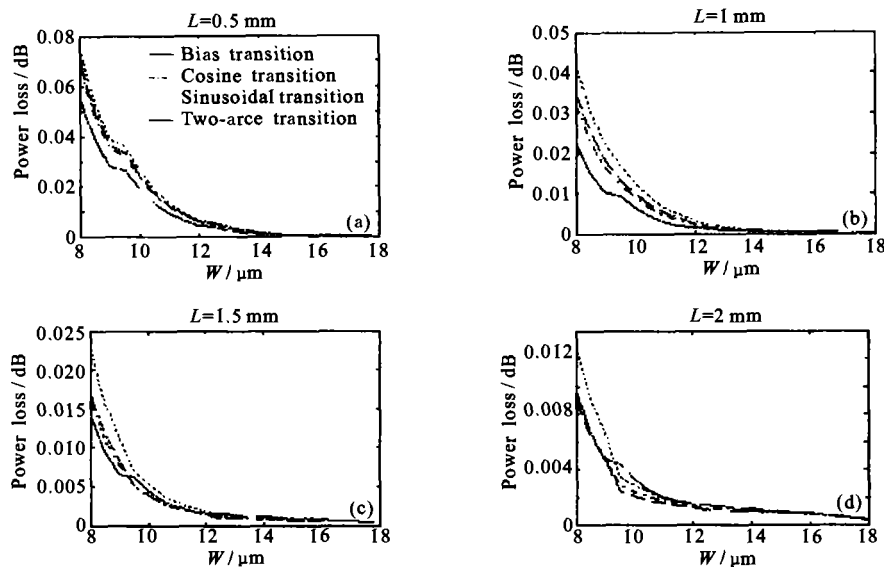


图 5 不同形状斜坡过渡波导的功耗比较分析

Fig. 5 Power loss comparison analysis of different shape grade transitional waveguides

为:  $W_0 > 20 - 6L$ 。

其结果验证如表 1 所示,从表 1 可以看出由  $20 - 6L$  计算出来的值都略大于或接近临界出口宽度。因此当斜坡出口宽度  $W_0 > 20 - 6L$  时采用双圆弧连接的功耗最小,当  $W_0 < 20 - 6L$  时应将双圆弧改为单凸圆弧来连接,其曲率半径应等于或略大于最佳曲率半径。

表 1 结果分析

Table 1 Result of analysis

Grade length/mm	0.5	0.8	1.0	1.3	1.5	1.8	2.0
Critical width/ $\mu\text{m}$	16.3	15	14.5	12.3	10	9.2	6.5
$20 - 6L$	17	15.2	14	12.2	11	9.2	8

### 3 结 论

用 FD-BPM 法模拟分析了光波在斜坡过渡波导和弯曲过渡波导中的传输。设计了 4 种线型函数,作了功耗比较分析,发现过渡波导形状的选取与坡度和曲折角有很大关系,并给出了表达式。对于斜坡过渡波导,在短距离和大坡度条件下应该考虑选用斜线连接;大斜坡长度和小坡度条件下应该用双圆弧过渡。弯曲过渡波导的形状函数也应该根据曲折角来选取优化。通过对过渡波导的分析,看出了用 FD-BPM 法分析光波导器件单元的方便性和直观性,这为实际

器件设计制作工作提供了范例。

### 参考文献:

- [1] Roey J V, Donk J V, Lagasse P E. Beam propagation method: analysis and assessment[J]. J Opt Soc Am, 1981, 71(7): 803-810.
- [2] Scarmozzino R, Osgood R M. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics application[J]. J Opt Soc Am A, 1991, 8(5): 724-731.
- [3] Accornero R. Finite difference methods for the analysis of integrated optical waveguides[J]. Electron Lett, 1990, 26 (23): 1959-1960.
- [4] Chung Y, Dagli N. Explicit finite difference beam propagation: application to semiconductor rib waveguide Y-junction analysis [J]. Electron Lett, 1990, 26 (11): 711-713.
- [5] 雷莹. 用于光纤阵列的 Si-V 型槽的制作[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(5): 447-450.
- [6] Marcatili E A J, Miller S E. Improved relations describing directional control in electron genetic wave guidance[J]. Bell Syst Tech J, 1969, 48(9): 2161-2188.
- [7] Baets B, Lagasse P E. Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides[J]. J Opt Soc Am, 1983, 73 (2): 177.
- [8] 陆金甫, 顾丽珍, 陈景良. 偏微分方程差分解法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988. 193.
- [9] Hadley G R. Transparent boundary condition for beam propagation[J]. Opt Lett, 1991, 16(9): 624-626.