

# 用光束传输法分析无间距方向耦合器和波导弯曲损耗

郑能 蔡伯荣 陆荣鑫

(电子科技大学, 610054)

**摘要:** 用光束传输法(BPM)计算了无间距方向耦合器的传输特性、电极未对准对器件的影响和渐变折射率波导的弯曲损耗。

**关键词:** 集成光学波导

## Analysis of optical zero-gap couplers and waveguide bending losses by means of beam propagation

Zheng Neng, Cai Bairong, Lu Rongxin

(Chengdu University of Electronics Science and Technology, Chengdu)

**Abstract:** In the paper, we compute by means of beam propagation method (BPM) the propagations of integrated optical zero-gap couplers, the crosstalk resulting from misregistration of the electrodes and the radiation losses incurred integrated optical graded index waveguides.

**Key words:** integrated optical waveguides

### 一、引言

钛扩散铌酸锂光波导是许多集成光学器件的基础。可用两模干涉理论模型来模拟<sup>[1]</sup>, 但最直接和有效的分析手段是光束传输法(BPM)。BPM比耦合模理论在计算光纤、波导方面精确<sup>[2]</sup>。A. Neyer等已用BPM对 $2\Delta n$  X型开关进行了计算<sup>[1]</sup>。本文对无间距方向耦合器的传输特性及无间距方向耦合器和 $2\Delta n$  X型开关共同存在的电极未对准所引起的ON/OFF比降低的问题用BPM进行了计算。

波导弯曲损耗的计算有Macatili和Miller发展的“速率法”<sup>[3,4]</sup>, 但这种方法只考虑了模的辐射, 而未考虑模间耦合和反射。BPM考虑了模的辐射和模间耦合。R. Baets等用BPM计算了阶跃折射率波导的弯曲损耗<sup>[5]</sup>。本文用BPM对渐变折射率弯曲波导的损耗进行了计算。

### 二、光束传输法(BPM)

Helmholtz方程为

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

式中  $E$  是电场的横向分量, 令  $E = \epsilon(x, y, z) \exp(-ikz)$ ,  $k = n_0 \omega / c$ ;  $\omega$  是光场角频率;  $c$  是真空中光速;  $n_0$  是衬底折射率;  $n(x, y, z)$  是波导的折射率分布, 解(1)式可得<sup>[6]</sup>

$$\epsilon(x, y, \Delta z) = \exp\left\{-i\Delta z \left[ \frac{\nabla_{\perp}^2}{(\nabla_{\perp}^2 + K^2)^{1/2} + K} + \chi(x, y, 0) \right]\right\} \cdot \epsilon(x, y, 0) \quad (2)$$

$$\chi(x, y, z) = K [n(x, y, z) / n_0 - 1] \quad (3)$$

式中  $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ 。

$\epsilon(x, y, z)$  可表示为有限二维傅氏变换:

$$\epsilon(x, y, z) = \sum_{m'=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} \sum_{n'=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} \mathcal{E}_{m'n'}(z) \exp\left[\frac{2\pi i(m'x+n'y)}{N}\right] \quad (4)$$

在  $x$ - $y$  空间, 是以  $L' = N\Delta x = N\Delta y$  为边长的一个方格周期,  $N$  为偶正整数,  $N$  越大,  $\epsilon(x, y, z)$  的精度就越高。在折射率为  $n_0$  的均匀介质中传播  $\Delta z$  距离(这时  $z=0$ ), 由(2)式可得

$$\mathcal{E}_{m'n'}(\Delta z) = \mathcal{E}_{m'n'}(0) \exp\left\{i\Delta z \left[ \frac{K_x^2 + K_y^2}{(K - K_x^2 - K_y^2)^{1/2} + K} \right]\right\} \quad (5)$$

式中  $K_x, K_y$  分别为  $x$  向和  $y$  向的横向波数:

$$K_x = 2\pi m' / N, \quad K_y = 2\pi n' / N \quad (6)$$

在折射率为  $n(x, y, z)$  的非均匀介质中  $\Delta z$  传播的场由(2)式求得

$$\epsilon'(x, y, \Delta z) = \exp(-i\chi\Delta z) \cdot \epsilon(x, y, \Delta z) \quad (7)$$

BPM 的算法可概括为

1. 对给定初始场(输入场)  $\epsilon(x, y, 0)$  求傅氏变换, 得到  $\mathcal{E}_{m'n'}(0)$ 。这可用快速傅氏变换(FFT);

2. 用因子  $\exp\left\{i\Delta z \cdot \frac{K_x^2 + K_y^2}{(K - K_x^2 - K_y^2)^{1/2} + K}\right\}$  乘以  $\mathcal{E}_{m'n'}(0)$  得到  $\mathcal{E}_{m'n'}(\Delta z)$ ;

3. 对  $\mathcal{E}_{m'n'}(\Delta z)$  进行反傅氏变换得到通过折射率为  $n_0$  的均匀介质  $\Delta z$  距离的场  $\epsilon(x, y, \Delta z)$ ;

4. 用扰动因子  $\exp(-i\chi\Delta z)$  乘以  $\epsilon(x, y, \Delta z)$  得到通过折射率分布为  $n(x, y, z)$  介质  $\Delta z$  距离的场分布  $\epsilon'(x, y, \Delta z)$ 。

重复上述 4 个过程就可得到任意点处的光场  $\epsilon(x, y, z)$ 。

### 三、无间距方向耦合器的性质

无间距方向耦合器如图 1 所示。  $W$  为波导宽度, 分叉角为  $\theta$ ,  $2W$  区的长度为  $L$ ,  $P_{in}$  为

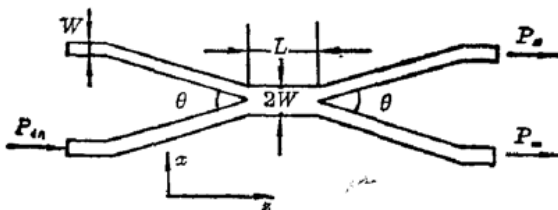


图 1 无间距方向耦合器

输入光功率,  $P_+$  和  $P_-$  为两输出端的光功率。假定在波导的深度方向为单模, 这样在宽度方向的折射率分布就可用有效折射率方法求得。假设在宽度方向  $x$  的折射率分布为  $\cos h^{-2}$  型, 则

$$n(x) = n_0 + \Delta n \cos h^{-2}(2x/W) \quad (8)$$

其本征模场  $\psi$  由[7]给出:

$$\psi = \cos h^{-Q}(2x/W) \quad (9)$$

$$Q = [(1+V^2)^{1/2} - 1] / 2 \quad (10)$$

$$V = KW (2n_0 \Delta n)^{1/2} \quad (11)$$

波导中能支撑的导模数  $S$  是等于取  $Q$  的整数。

BPM 的误差主要取决于  $\Delta z$  的大小,  $\Delta z$  大误差大,  $\Delta z$  太小计算机耗时多, 另外计算机取样点数目  $N$  也影响计算精度, 在以下的计算中取  $N=2^7=128$ , (实际上,  $N=2^6=64$ , 其结果也差不多),  $n_0=2.1512$  ( $\text{LiNbO}_3$  衬底折射率), 波长  $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ ,  $W=6 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n=0.0035$ 。由 (10) 式得  $Q=1.26$  即在分离区只有一个模, 而在  $2W$  区,  $Q=2.45$  即能支撑两个模。为了使远离波导的场不影响波导附近的场, 在计算机取样点边缘附近设置  $15 \mu\text{m}$  的吸收层, 即在每一步计算后 ( $\Delta z$ ) 使边缘附近的场为零。图 2 是我们分别取  $\Delta z=5、20、40、80 \mu\text{m}$  时, 在直波导输入折射率分布为  $\cosh^{-2}$  型的本征基模如 (9) 式时, 传播了  $800 \mu\text{m}$  (在  $z$  方向) 时的场振幅分布。在  $\Delta z \leq 20 \mu\text{m}$  时, 输出和输入场的振幅的相对误差为  $3 \times 10^{-3}$ , 以下计算都取  $\Delta z=5 \mu\text{m}$ 。图 3 是在不同作用长度  $L$  下, 在无间距方向耦合器输入本征基模时的光振幅分布,  $\theta=1/100$ 。图

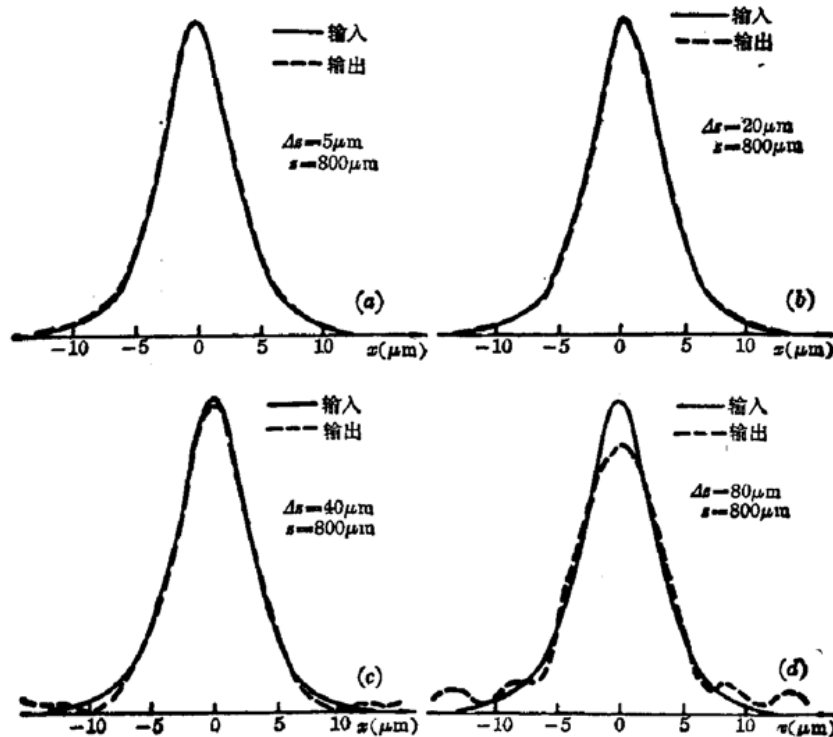


图 2 在直波导中的光振幅分布

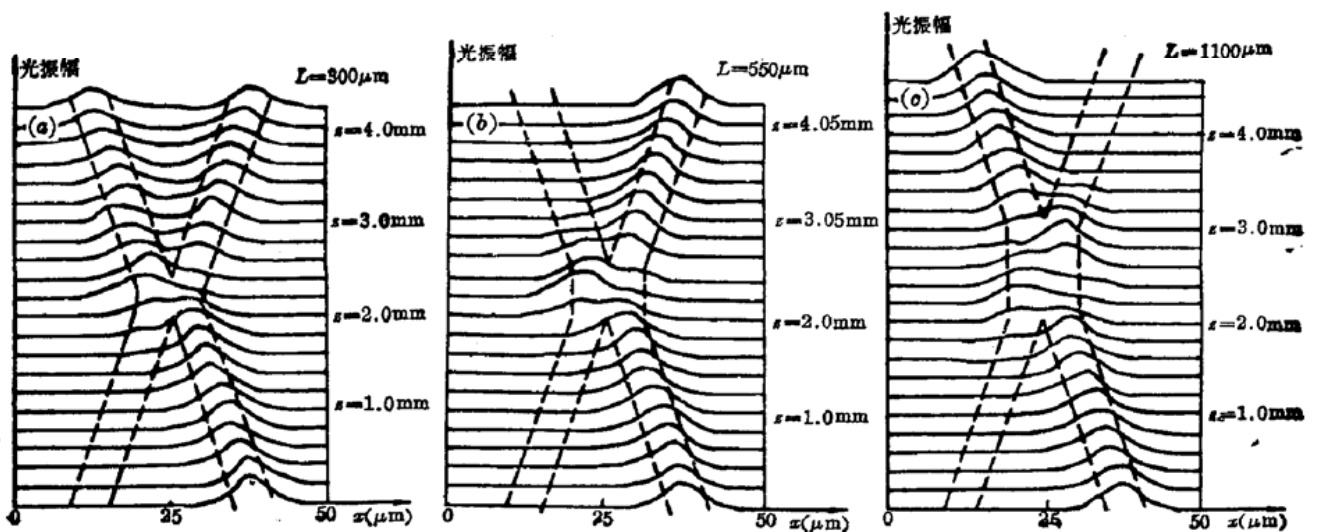


图 3 无间距方向耦合器的光场分布

4 是其输出光功率  $P_-$ 、 $P_+$  和  $L$  的关系, 它和[1]中用对称模和反对称模模拟的公式:

$$P_+/P_{in} = \cos^2(\overline{\Delta\beta} \cdot L) \tag{12}$$

$$P_-/P_{in} = \sin^2(\overline{\Delta\beta} \cdot L) \tag{13}$$

相似, 式中  $\overline{\Delta\beta}$  是对称模和反对称模在作用区内传播常数的平均差。

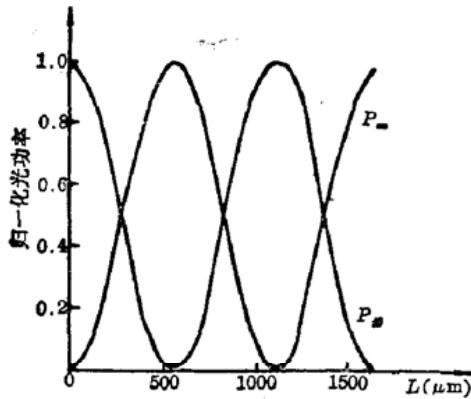


图4 无间距方向耦合器的输出光功率和作用长度  $L$  的关系



图5 曲线型无间距方向耦合器

用曲线来代替图1中的斜线部分(如图5示), 可减小弯曲损耗(后面将详细讨论)和增加有效作用长度(这时电极应长于  $L$ )。图5中的曲线为上升的正弦曲线:

$$X(z) = \frac{h}{l} \cdot z - \frac{h}{2\sigma} \sin\left(\frac{2\sigma}{l} \cdot z\right) \tag{14}$$

$h$  和  $l$  分别是曲线过渡的总高度和总长度。由电场引起的折射率变化用高斯分布近似模拟为

$$\delta n = \delta n_0 \exp[-(x/b)^2] \tag{15}$$

在计算中取  $b=2\mu\text{m}$ ,  $h=10\mu\text{m}$ ,  $l=2\text{mm}$ , 相当于  $\theta=1/100\text{rad}$ 。图6是从斜线分叉和式(14)中曲线分叉计算的输出光功率和  $\delta n_0$  之间的关系曲线。

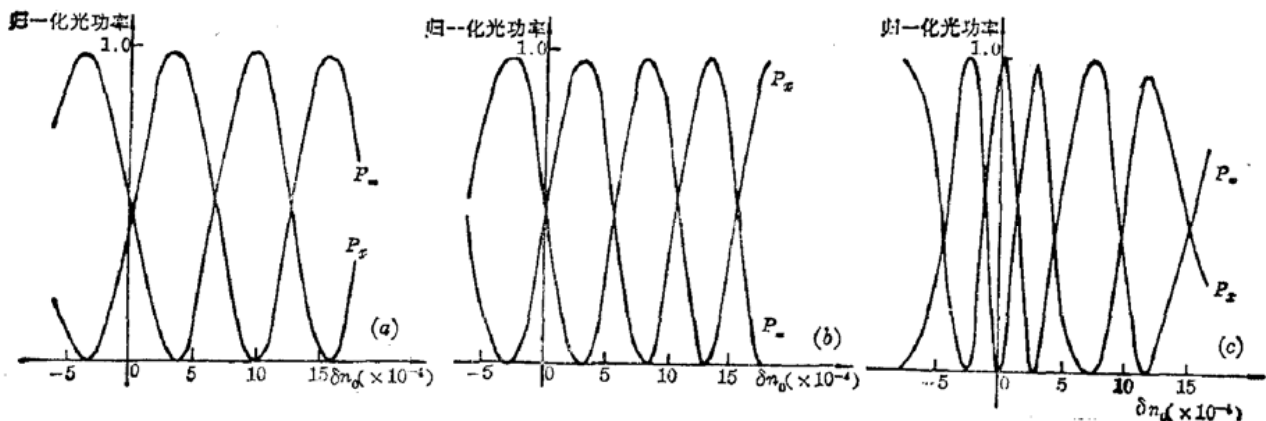


图6 无间距方向耦合器的输出特性 ( $L=3\text{mm}$ )

- a) 斜线分叉 ( $\theta=1/100\text{rad}$ , 电极长  $3\text{mm}$ );
- b) 斜线分叉 ( $\theta=1/100\text{rad}$ , 电极长  $5\text{mm}$ );
- c) 上升的正弦曲线分叉 ( $h/l=1/200$ , 电极长  $5\text{mm}$ )

在实际制作无间距方向耦合器时, ON/OFF 比值受到多种因素影响。本文仅计算电极未对准对器件的影响。图7是在电极中心轴线平行偏离波导中心轴线距离  $\delta x=0.5\mu\text{m}$  和  $\delta x=1\mu\text{m}$  时, 输出光功率和  $\delta n_0$  之关系, 要保证 ON/OFF 比  $\geq 30\text{dB}$ ,  $\delta x \leq 0.5\mu\text{m}$ 。这对目前工艺条件来说是困难的。

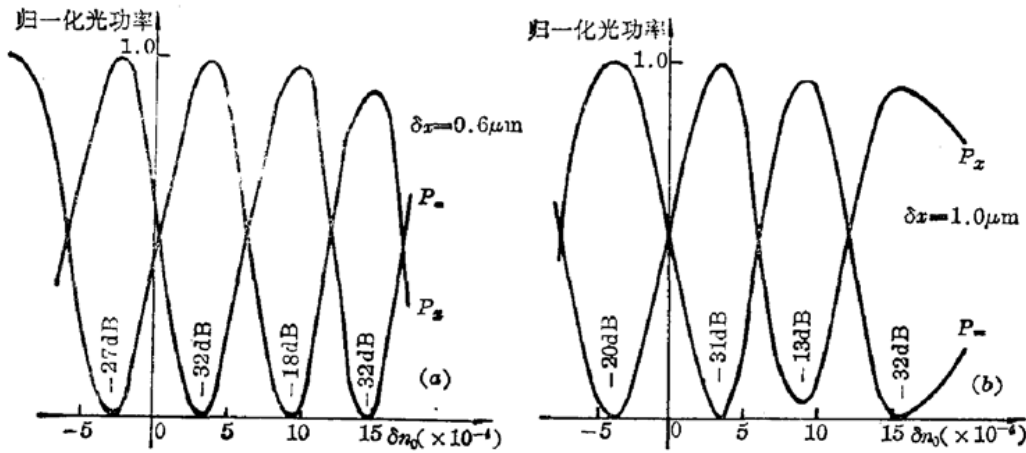


图 7 电极未对准器件的影响(斜线交叉,  $L=3\text{mm}$ , 电极长  $5\text{mm}$ )

### 四、波导弯曲损耗的计算

连结两平行直波导的弯曲波导如图 8 所示。我们计算了下列四种常用的连结两平行波导的弯曲波导的线型: 1. 斜线:  $x(z) = (h/l)z$ ; 2. 余弦曲线:  $x(z) = h(1 - \cos \pi z/l)/2$ ; 3. 用两段圆弧连结的曲线, 其曲线为:  $R = \pm (l^2/4h + h/4)$ ; 4. 上升的正弦曲线:  $x(z) = hz/l - (h/2\pi)\sin(2\pi z/l)$ 。波导的折射率分布仍用  $\cos h^{-2}$  型,  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2.1512$  和  $W = 6 \mu\text{m}$ 。这样, 根据(10)、(11)式在  $\Delta n = 0.003 \sim 0.004$  范围内的直波导是单模的。用 BPM 计算的结果见图 9, 从图 9(a)、(b)中, 在  $h/l$  小于  $1/40$  时, 曲线 4 有较低的损耗, 但在  $h/l$  大于  $1/40$  时, 用曲线 2 较好。图 9(c)是波导折射率增量取不同值时曲线 4 的波导弯曲损耗。  $\Delta n$  越大, 波导中光场限制得越好, 弯曲损耗越小。在保证波导为单模的前提下, 使波导远离截止比选择适当的波导弯曲线型更能减小波导的弯曲损耗。

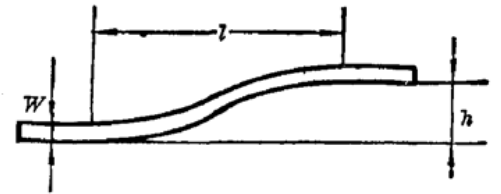


图 8 波导弯曲图

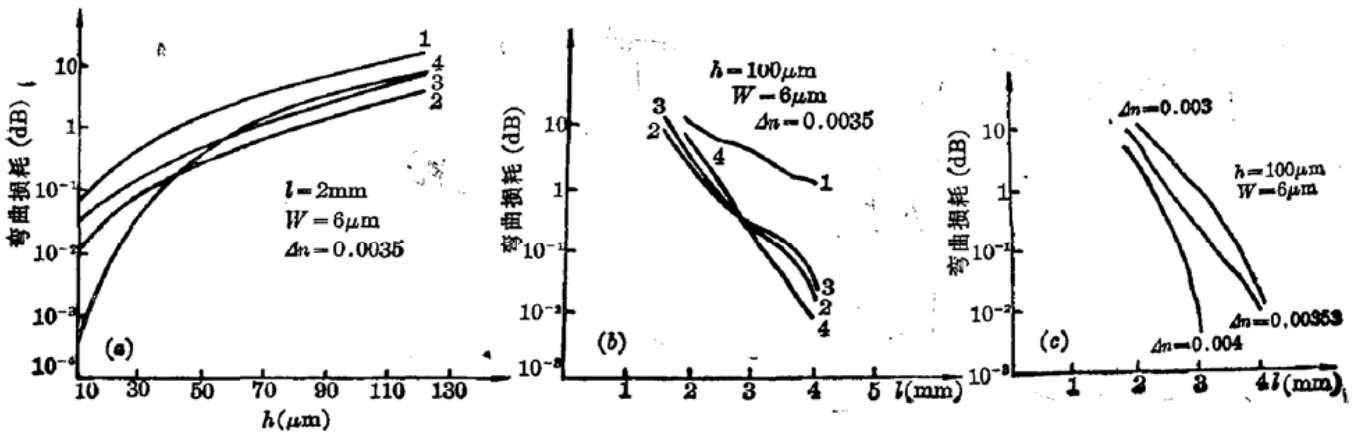


图 9 波导弯曲损耗

### 参 考 文 献

- 1A. Neyer et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20**, 999 (1984)
- 2 L. Thylèn et al., *Appl. Phys.*, **21**, 2751 (1982)
- 3 E. A. J. Macatili et al., *Bell. Syst. Tech. J.*, **48**, 2161 (1969)
- 4 S. E. Miller, *Bell. Syst. Tech. J.*, **43**, 1727 (1964)
- 5 B. Baets et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, 177 (1983)
- 6 D. Yevick et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 1084 (1982)