

余弦形波导弯曲损耗模型分析

张颖^{1,2,3} 王烁^{1,2,3} 高云磊^{1,2,3}

¹燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

²燕山大学河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

³燕山大学光纤传感技术研究所, 河北 秦皇岛 066004

摘要 S形弯曲波导是集成光器件中不可缺少的部分。对比分析了常见不同形状的S形光波导的传输损耗,找到了低损耗的余弦形状。在 Marcuse 弯曲波导研究的基础上,通过曲线拟合方法,得到了几种近似计算损耗的公式。用 Matlab 进行仿真,得到了损耗曲线。与传统低坡模型进行对比分析,以找到与实际值最接近的模型。结果表明,高斯曲线拟合方法可以更好地描述余弦形状波导的损耗。

关键词 集成光学; 余弦型波导; Matlab 仿真; 高斯损耗模型

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.050602

Bending Loss Model of Cosine-Shaped Waveguide

Zhang Ying^{1,2,3} Wang Shuo^{1,2,3} Gao Yunlei^{1,2,3}

¹College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Hebei Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

³Institute of Fiber Optic Sensing, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract S-shaped bend waveguide is indispensable to realize the lateral displacement and connections in the integrated optical devices. The transmission losses of different S-shaped waveguides are analyzed, and the low-loss cosine shape mode is found. On the basis of the previous Marcuse theoretical conclusions of bending waveguide, a curve fitting method is used and several approximate loss calculation formulas are obtained. By using the Matlab software, the loss graph is gotten. Then compared with the traditional low-slope model, the closest one to the theoretical model is found. The results show that the Gaussian curve fitting method can better describe the cosine-shaped waveguide loss.

Key words integrated optics; cosine waveguide; simulation by Matlab; Gaussian loss model

OCIS codes 060.2310; 120.7000; 130.2790

1 引言

S形弯曲波导是集成光器件中不可缺少的部分。在光开关阵列、星形耦合器以及阵列波导光栅^[1-2]等器件中,以及将多个元件集成到一个芯片上时,都需要很多的S形弯曲波导来实现波导的侧向位移和连接,其尺寸和损耗直接影响整个器件的损耗以及集成密度,从而影响系统的性能^[3-4]。所以,为了减少波导弯曲带来的损耗,除了改变光波导的横截面结构与参数^[5-6]以外,人们还提出了一系列方法来对S形波导形状进行优化,如在有效折射率基础上建立高阶函数法^[7-8]、样条插值法^[9-11]等,将损耗计算推向数值化。

本文从原始S型光波导模型出发,研究了弯曲波导损耗产生的根源,对比分析了几种弯曲损耗的模型。找到低损耗的余弦模型,并运用曲线拟合的方法得到了余弦型波导的指数、对数及高斯损耗公式。对比低坡模型在 Matlab 上进行对比仿真,以证实高斯模型的准确性。

2 弯曲波导损耗的模型

弯曲波导可以分为很多种,以往文献中出现的形状大体上可分为上升反正弦型、余弦型、双圆弧型和若

收稿日期: 2014-09-15; 收到修改稿日期: 2014-11-03; 网络出版日期: 2015-04-25

作者简介: 张颖(1963—),男,博士,教授,主要从事光纤及光栅传感技术、光纤光栅研制、光电传感和光纤通信技术等方面的研究。E-mail: zhangy@ysu.edu.cn

干优化模型。根据弯曲波导的基本损耗理论,过渡损耗是由于波导的曲率变化不连续所引起。上升反正弦型与余弦型在连接处曲率半径接近无限大,过渡损耗接近为0;而双圆弧型在连接处不够平滑,使得其过渡损耗较大,故排除对其分析。另外,对优化模型的讨论现在也已经很成熟,出现了一系列方法,它们实质都是给定函数 $\int_0^L C_1 \exp(C_2 R) \sqrt{1+y'(x)^2} dx$, 通过限定边界条件最终求得最小值。但是结果或是表达式过于复杂,或是根本无法用初等函数表示。故接下来主要分析前两种模型。

图1为两个相距为 h (连接的纵向间距)的平行波导与长为 L (过渡长度)的S形过渡波导连接后组成的波导模型。其中,反升正弦型弯曲波导的表达式为^[12-13]

$$y_{\sin}(x) = \frac{xh}{L} - \frac{h}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right), \quad (1)$$

余弦型弯曲波导表达式为^[14-15]

$$y_{\cos}(x) = \frac{h}{2} [1 - \cos(\pi x/L)], \quad (2)$$

y 、一阶导数 y' 和二阶导数 y'' 均是连续的。因此,两模型可实现低损耗连接。

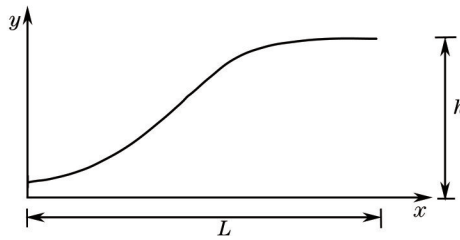


图1 S形波导物理模型

Fig.1 Physical model of S-shaped waveguide

对于二维平板弯曲波导,根据 Marcuse 研究,纯弯曲损耗系数表示为^[16]

$$\alpha = C_1 \exp(C_2 r), \quad (3)$$

式中 C_1 与 C_2 常数是只取决于波导的结构,与弯曲半径无关。

其弯曲半径 $r(x) = \frac{[1+y'(x)^2]^{3/2}}{|y''(x)|}$ ^[10], 将损耗表示成分贝形式,可以得到任意形状波导的损耗表达式为

$$\alpha_r = \frac{10}{\ln 10} \int_0^L C_1 \exp\left\{C_2 \frac{[1+y'(x)^2]^{3/2}}{|y''(x)|}\right\} dx, \quad (4)$$

(4)式为任意弯曲波导损耗的基本模型。将(1)式与(2)式代入,可得到反正弦函数^[17]与余弦函数的低坡模型,表达式如下:

$$\alpha_{r-\sin} = \frac{10}{\ln 10} C_1 \int_0^L \exp\left[-\left(\frac{C_2 L^2}{2\pi h}\right) \frac{1}{|\sin(2\pi x/L)|}\right] dx, \quad (5)$$

$$\alpha_{r-\cos} = \frac{10}{\ln 10} C_1 \int_0^L \exp\left[-\left(\frac{2C_2 L^2}{\pi^2 h}\right) \frac{1}{|\cos(\pi x/L)|}\right] dx. \quad (6)$$

上面的模型是在 $L \gg h$ (即低坡)条件下成立的。所以下面的讨论也是在满足此条件下进行的。将它们仿真到同一坐标下,如图2所示。从图中看出余弦形状波导明显比反正弦形状波导损耗要小。

3 余弦形波导损耗的理论研究

对于反正弦模型,人们已经做了很多研究,推导了一系列近似损耗表达式。而对于余弦模型,却很少有人涉及。本文参照先前研究反正弦的方法,尝试通过曲线拟合的方法,来找到最佳损耗模型。首先,将(6)式

化简。定义新的变量 $\gamma = \frac{2C_2 L^2}{\pi^2 h}$ 和 $\theta = \frac{\pi x}{L}$, 则可以导出

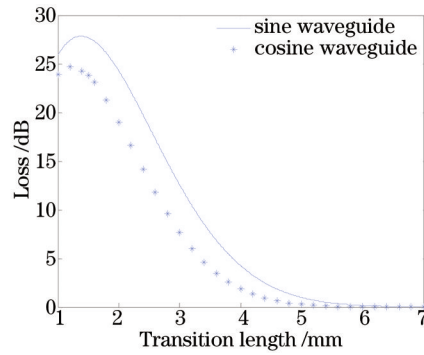


图2 两种形状波导损耗对比

Fig.2 Loss comparison of two shapes waveguides

$$\alpha_{r-\cos} = \frac{10}{\ln 10} \frac{C_1 L}{\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{-\gamma}{\cos \theta} \right) d\theta, \quad (7)$$

由于 $\cos(\theta)$ 在 $0 \sim 2\pi$ 具有对称性, 可将其等效。然后将积分公式展开, 最终公式如下:

$$\alpha_{r-\cos} = \frac{10}{\ln 10} \frac{C_1 L}{\pi} \exp(-\gamma) U, \quad (8)$$

式中 U 是与 γ 有关的优化项。通过曲线拟合的方法将(8)式分别拟合成3种不同模型, 如下:

$$\alpha_{r-\cos} = \frac{10}{\ln 10} \frac{C_1 L}{\pi} \exp(-\gamma) [1.042 + 1.685 \exp(-\gamma)], \quad (9)$$

$$\alpha_{r-\cos} = \frac{10}{\ln 10} \frac{C_1 L}{\pi} \exp(-\gamma) (1.668 - 0.523 \lg \gamma), \quad (10)$$

$$\alpha_{r-\cos} = \frac{10}{\ln 10} \frac{C_1 L}{\pi} \left\{ 3.962 \exp \left[- \left(\frac{\sqrt{\gamma} + 0.392}{1.021} \right)^2 \right] \right\}. \quad (11)$$

分别将指数模型[(9)式]、对数模型[(10)式]、高斯模型[(11)式]、低坡模型[(6)式]在 Matlab 下仿真, 以验证上述损耗模型的准确度与误差大小。这里采用文献[8]的 S 形波导结构参量, 即 $C_1 = 8.64 \text{ mm}^{-1}$, $C_2 = 0.105 \text{ mm}^{-1}$ 。分别在 $h = 0.1 \text{ mm}$ 和 $h = 0.2 \text{ mm}$ 取得的仿真图, 如图3所示。

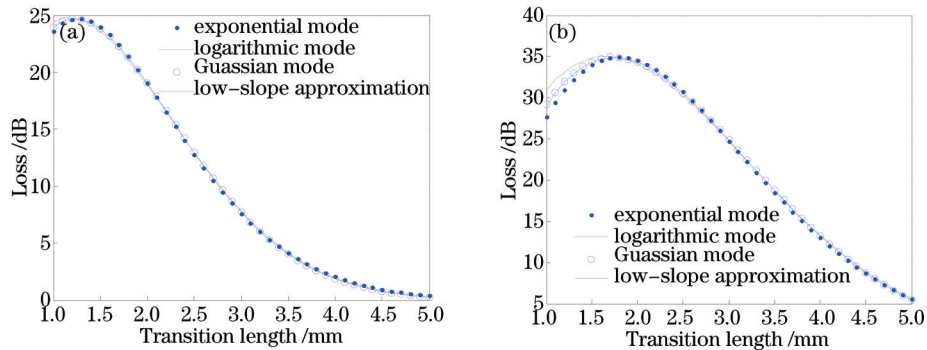
图3 近似模型比较。(a) $h = 0.1 \text{ mm}$; (b) $h = 0.2 \text{ mm}$ Fig.3 Comparison of different approximate modes. (a) $h = 0.1 \text{ mm}$; (b) $h = 0.2 \text{ mm}$

图3显示, 指数模型与对数模型在 L 较小时偏差较大, L 较大时相对准确些。而高斯模型与低坡模型最为接近。尤其当 $L > 2 \text{ mm}$ 时轨迹基本相同, 但无法看出谁更接近。进一步进行误差仿真结果如图4所示。可见, 指数模型与对数模型围绕误差零点上下波动; 只有高斯模型的误差是最接近零点的, 随着传输长度的增加误差基本不变。故可得出, 高斯模型是最接近的模型。

4 结 论

从 Marcuse 损耗公式开始, 讨论了一些 S 形波导损耗特性。确定了余弦型弯曲波导是最具有研究价值的模型。结合解析法并运用曲线拟合的方法, 建立几种余弦损耗公式。利用 Matlab 在低坡条件下仿真。结果表明, 高斯模型是最接近实际的模型, 使原本复杂的计算变得更加精确和容易。需要强调的是, 建立起的

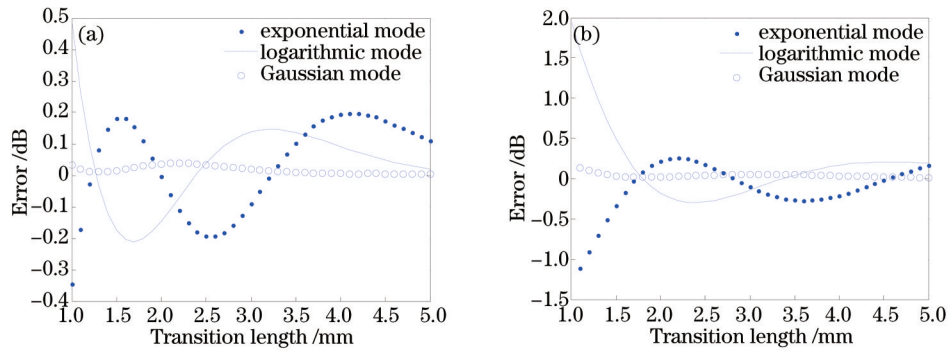


图4 近似模型与真值的误差比较。(a) $h = 0.1$ mm; (b) $h = 0.2$ mm

Fig. 4 Errors of each approximate modes. (a) $h = 0.1$ mm; (b) $h = 0.2$ mm

所有模型均是居于 $L \gg h$ 基础上进行的。对于 L 与 h 的其他情况,还需要进一步研究与讨论。

参考文献

- Lu Ping, Liu Deming, Cao Qian, *et al.*. Theoretical analysis of arrayed-waveguide grating as a linear system and its optimal structure design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(7): 804-808.
鲁平, 刘德明, 曹倩, 等. 阵列波导光栅线性系统理论分析及优化设计[J]. *光学学报*, 2003, 23(7): 804-808.
- Zhao Jianyi, Chen Xin, Qian Kun, *et al.*. Design and manufacture of InP 16-channel 200 GHz array waveguide grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 33(6): 0605002.
赵建宜, 陈鑫, 钱坤, 等. InP基16通道200 GHz阵列波导光栅的设计和制备[J]. *光学学报*, 2006, 33(6): 0605002.
- Wu Changshen, Yang Mingwei, Yang Yuanhong, *et al.*. Effect of fiber bend interferometric fiber optical gyroscopes performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0306005.
吴长莘, 杨明伟, 杨远洪, 等. 光纤弯曲对干涉式光纤陀螺性能的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0306005.
- Liao Suying, Gong Mali. Analysis of mode evolution between straight and curved fiber transition in large mode area fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305006.
廖素英, 巩马理. 大模场光纤直弯过渡中的模场演变分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305006.
- Zhang Ziyang, Ren Guobin, Zhou Ding'an, *et al.*. Study on bending losses of trench-assisted single mode optical fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020605.
张子阳, 任国斌, 周定安, 等. 下陷层辅助单模光纤的弯曲损耗研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020605.
- Zeng Xuan, Liu Binghong, He Yujing, *et al.*. Fabrication of low-loss AgI/Ag hollow fibers for laser light delivery in the near infrared region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0306001.
曾旋, 刘炳红, 何宇婧, 等. 近红外低损耗AgI/Ag空芯光纤的制作[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0306001.
- Sun Guangchun, Zhou Zigang, Yang Yongjia, *et al.*. Design of new type S-shaped optical waveguide low-loss bending path[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 690-693.
孙光春, 周自刚, 杨永佳, 等. 新型S形光波导低弯曲损耗路径设计[J]. *激光技术*, 2010, 34(5): 690-693.
- Li Jun, Lu Huaiwei, Zhang Huixia. Bending loss calculation of S-shaped waveguide[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2014, 33(3): 125-128.
李军, 鲁怀伟, 张晖霞. S形矩形波导的弯曲损耗计算[J]. *兰州交通大学学报*, 2014, 33(3): 125-128.
- Yang Jianyi, Wang Minghua. Optimization on curved waveguide structure[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 1999, 10(4): 305-309.
杨建宜, 王明华. 光波导弯曲的结构优化[J]. *光电子·激光*, 1999, 10(4): 305-309.
- F J Mustieles, E Ballestores, P Baquero. Theoretical S-bend profile for optimisation of optical waveguide radiation losses[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1993, 5(5): 551-553.
- Zhang Bingna, Zhu Daqing, Lei Wei, *et al.*. Configuration optimization of S-shaped bend waveguide using B-spline[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(11): 1312-1316.
张冰娜, 朱大庆, 雷伟, 等. 用B样条函数对S形弯曲波导进行结构优化[J]. *中国激光*, 2004, 31(11): 1312-1316.
- W J Minford, S K Korotky, R D Alferness. Low-loss Ti:LiNbO₃ waveguide bends at $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Quantum Electron*, 1982, 18(10): 1802-1806.

- 13 D Marcuse. Length optimization of an S-shaped transition between offset optical waveguides[J]. Appl Opt, 1978, 17(5): 763-768.
- 14 K T Koai, P L Liu. Modeling of Ti: BLiNbO₃ waveguide devices. II. S-shaped channelwaveguide bends[J]. J Lightwave Technol, 1989, 7(7): 1016-1022.
- 15 Zheng Honglin, Chen Fushen. Bending loss of two kinds of Y-branch optical waveguides[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(1): 30-33.
郑宏林, 陈福深. 两种不同Y分支光波导的弯曲损耗研究[J]. 半导体光电, 2005, 26(1): 30-33.
- 16 D Marcuse. Bending losses of the asymmetric slab waveguide[J]. Bell System Technical Journal, 1971, 50(8): 2551-2563.
- 17 A Syahriar. A simple analytical solution for loss in S-bend optical waveguide[C]. IEEE International RF and Microwave Conference, 2008: 357-360.

栏目编辑: 王晓琰