

文章编号: 0258-7025(2004)11-1312-05

用 B 样条函数对 S 形弯曲波导进行结构优化

张冰娜, 朱大庆, 雷 伟, 曾四化

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 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。弯曲波导插入损耗(不包括由于结构缺陷而产生的光的散射损耗)由两部分组成: 纯弯曲损耗和过渡损耗。从弯曲损耗产生的机理入手, 提出用 B 样条函数逼近理论实现任意边界条件下 S 形的优化方法, 得到纯弯曲损耗尽可能小, 并消除与直波导相连处过渡损耗的 S 形波导。且与正弦、余弦和双圆弧曲线得到的 S 形进行对比, 用光束传播法验证。结果表明优化曲线插入损耗明显小于双圆弧和余弦曲线。

关键词 集成光学; S 形弯曲波导; B 样条; 结构优化

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Configuration Optimization of S-Shaped Bend Waveguide Using B-Spline

ZHANG Bing-na, ZHU Da-qing, LEI Wei, ZENG Si-hua

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract S-shaped bend waveguide is indispensable to realize the lateral displacement and connections in the integrated optical devices, such as the optical switch matrix, star coupler and arrayed waveguide grating (AWG). Even when various optical devices are integrated onto one chip, S-bend also plays important roles. Its size and optical loss directly influences the integration dense and loss of whole device. The insertion loss (except the dispersion loss produced by the configuration deflection) of S-bend includes two parts: pure bending loss and transition loss. A method using functional approximation theory of B-spline to realize the optimization of S-shaped bend under the arbitrary boundary condition is set forth in this paper. Eventually, S-shaped bend waveguide with characteristic of pure bending loss as small as possible is got. Moreover, the transition loss at the ends connecting with other waveguides is eliminated completely. Contrast among sin, cosine, double-arc-generated S-shaped bend and the curve got by B-spline is performed and verified using the beam propagation method (BPM). The result shows that the loss of optimized curve got in this paper is obviously less than that of double-arc and cosine-generated S-bend; a good agreement is reached.

Key words integrated optics; S-shaped bend waveguide; B-spline; structure optimization

1 引 言

在光开关阵列、星形耦合器以及阵列波导光栅^[1]等器件中, 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。在将多个元件集成到一起时, 也要用到 S 形弯曲波导。S 形弯曲的尺寸和损

耗直接影响整个器件的损耗以及集成密度, 从而影响生产效率和成品率。因此获得损耗小且尺寸紧凑的 S 形波导具有十分重要的意义。文献[2, 3]提出用插值的方式来获得插入损耗尽可能小的 S 形弯曲波导, 但是不能消除波导连接处的过渡损耗, 或者能消除但使计算变得复杂。本文提出一种用三次 B

收稿日期: 2003-06-23; 收到修改稿日期: 2003-08-26

基金项目: 国家 863 项目(编号: 2001AA312170)和国家自然科学基金(编号: 60107001)资助项目。

作者简介: 张冰娜(1974—), 女, 山西人, 华中科技大学激光技术国家重点实验室硕士, 主要从事集成光学方面的研究。

E-mail: zhang_bn@sohu.com

样条函数逼近的方法来实现任意波导的侧向位移和连接的方法。不仅可以保证使其具有最小纯弯曲损耗,还可以消除波导相连处的过渡损耗。

2 弯曲损耗产生的机理

在对称条形直波导中,光场对于波导对称,峰值在波导中心处。但是当波导弯曲时,光场峰值向着远离圆弧中心方向发生偏移,光场因而变得不对称,宽度也发生变化。假设直波导中的光场为高斯场(如果不是高斯场,可以用重叠积分的办法使之近似用高斯场表示)^[4]

$$E_0(y) = A \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{w_0}\right)^2\right] \quad (1)$$

$y = 0$ 代表波导的中心,当波导弯曲半径为 R 时,光场的表达式变为

$$E(y,R) = E_0(y) \cdot \left[1 + \frac{1}{R}(2\pi n_e w_0 / \lambda_0)^2 y\right] \quad (2)$$

式中 n_e 为波导芯层的有效折射率。 λ_0, w_0, n_e 值分别为 $1.553 \mu\text{m}, 2.96985 \mu\text{m}$ 和 1.548 。图 1 为弯曲半径 R 不同时条形波导横截面光场的等值线图,从图中可以看出随着曲率半径不断增大,光场不对称和偏移程度逐渐减小。

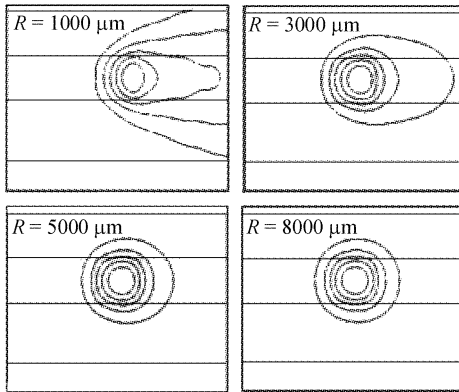


图 1 弯曲半径 R 不同的光场等值线图
Fig. 1 Contour of the field in the different bending radius R

弯曲波导的插入损耗(不包括由于结构缺陷而产生的光的散射损耗)由两部分^[5]组成。一部分是纯弯曲损耗,另外一部分是过渡损耗。当光沿着弯曲波导传输时,因为弯曲模为泄漏模,光功率切向离开波导而转化成辐射模形成辐射损耗。可以增加弯曲半径或者增加波导与芯层的折射率差来减少纯弯曲损耗。但是当折射率差增大时,传输损耗也随之增大,所以通常采用尽量增大弯曲半径的方法来减

少纯弯曲损耗。当曲率方向或大小不同的波导相连时,模场的峰值偏移和变形不同,导致模场不匹配,因而产生过渡损耗。为此可以通过以连续渐进的方式改变波导弯曲半径,尽量避免弯曲半径或方向突变来减小过渡损耗;或者在波导弯曲半径和方向突变的情况下,采用侧向偏移的方式来减少模式不匹配^[4,6]。但是后一种方法会因为结构突变而引起散射损耗,同时也会增大加工和刻蚀的难度,所以尽量采用连续渐进地改变波导弯曲半径的方式来设计 S 形弯曲波导。

3 S 形弯曲波导结构的优化

对于条形波导,使用有效折射率法,可以将三维波导转化为二维波导来处理。对于二维平板弯曲波导, Marcuse 的研究结果表明,纯弯曲损耗系数 α 可以表述为^[7]

$$\alpha = C_1 \exp(-C_2 R) \quad (3)$$

式中 C_1, C_2 由平板直波导的结构确定(文中 C_1, C_2 分别取 $0.044751, 1.0305 \times 10^{-3}$),与弯曲半径 R 无关。要使纯弯曲损耗最小,即是要求

$$\alpha_{\text{loss}} = \int_a^b C_1 \exp[-C_2 R(x)] \sqrt{1 + y'(x)^2} dx \quad (4)$$

最小。设纵向偏移量为 h ,且此 S 形波导两端与水平直波导相连,如图 2 所示。为了消除与直波导连接时由于模式不匹配而产生的过渡损耗,设在相连处一阶导数、二阶导数分别与水平直波导一致,则可以加上边界条件

$$\begin{cases} y(a) = 0, y'(a) = 0, y''(a) = 0 \\ y(b) = h, y'(b) = 0, y''(b) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

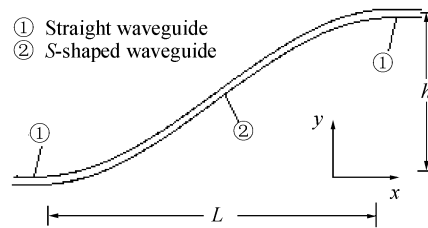


图 2 S 形波导结构图
Fig. 2 Structure of S-shaped waveguide

这样的边界条件,可以保证 S 形弯曲与直波导连接处曲率半径为无穷大,从而从根本上消除连接处的过渡损耗。在此基础上利用文献[8]关于 B 样条函数的一元泛函逼近理论(B 样条函数取三次即可使所得曲线充分光滑和满足其边界条件),就可以求出在此边界条件下的最优 S 形弯曲波导。

4 优化结果与分析

利用上述方法,对特定的 $L(L = b - a)$, h 以及相应的边界条件,就可以求出最优的 S 形弯曲波导。本文还将所得的曲线分别与正弦和余弦以及两个圆弧产生的 S 形波导进行对比。

当增大分划区间 N 的个数时,所求得的弯曲损耗不断减少,图 3 为 N 增大时, α_{loss} 与 N 的关系图 (L, h 分别为 2000 和 250 μm)。从图中可以看出,当 N 不断增大时, α_{loss} 趋于稳定,达到其极小值。

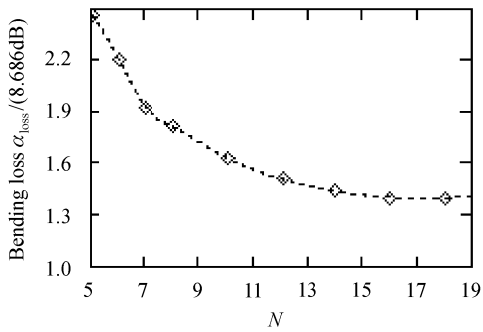


图 3 纯弯曲损耗与区间数目 N 的关系图

Fig. 3 Relation between pure bending loss and number of subdivision of B-spline

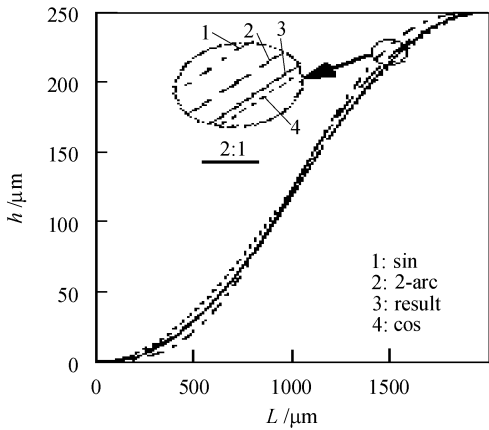


图 4 各种曲线示意图(其中小图为局部放大图)

Fig. 4 Sketch map of the different S-shaped bends (including the chart zoomed in)

图 4 为所得的 S 形波导优化曲线与正弦、余弦和双圆弧曲线的对比示意图。从图中可以看出,正弦曲线产生的 S 形波导半径较小,因而弯曲损耗较大。实际上,已经有研究^[9]认为正弦曲线产生的 S 形波导虽然在两端与直波导相连处产生的过渡损耗相对较小,但与余弦曲线相比具有较大的纯弯曲损耗。图 5 为各种曲线产生的纯弯曲损耗随传输距离的变化图。

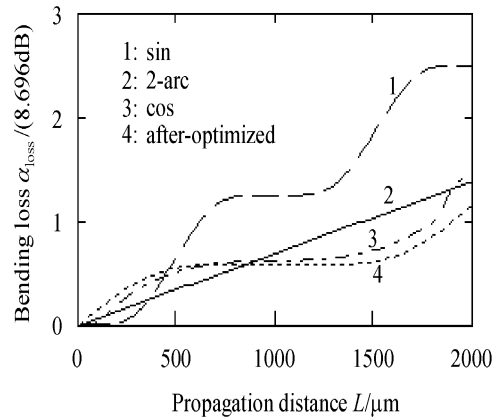


图 5 纯弯曲损耗随传输距离 L 的关系图

Fig. 5 Pure bending loss with propagating distance L

从图 5 中也可得出,正弦曲线的纯弯曲损耗最大,因而尽量不使用正弦曲线。余弦曲线和双圆弧曲线在与直波导相连处有较大的过渡损耗(双圆弧曲线在中部转折处也有较大的过渡损耗),但纯弯曲损耗较小。而本文所得到的优化 S 形综合余弦和正弦曲线的优点,在与直波导相连处消除了过渡损耗,而又能使纯弯曲损耗尽可能小。而且,尽管所得的优化曲线与余弦曲线相比,纯弯曲损耗略为偏大,但是如果加上 S 形两端与直波导相连处以及 S 形中部由于曲率半径方向突变而产生的过渡损耗,则所得曲线的优势就非常明显了。

另外,优化所得 S 形是在保证消除与直波导相连处的过渡损耗以及纯弯曲损耗最小的前提下得到的。其曲率半径是渐变的而非一成不变的。在曲率半径连续渐变的波导中,不仅存在着纯弯曲损耗,而且也存在着由于模场失配而产生的过渡损耗。对式(2)进行重叠积分^[4]来求 R_1 和 R_2 反方向[(6)式]和同方向[(7)式]时的过渡损耗(以 R_2 是 R_1 的 1.1, 1.2, 1.3 和 1.5 倍为例,其实所得 S 形曲率半径是连续变化的),结果如图 6,7 所示。

$$L_{\text{con}} = -10 \lg \left(\frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E(y, R_1) \cdot E(-y, R_2) dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} E(y, R_1)^2 dy \cdot \int_{-\infty}^{\infty} E(-y, R_2)^2 dy} \right) \tag{6}$$

$$L_{\text{same}} = -10 \lg \left(\frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E(y, R_1) \cdot E(y, R_2) dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} E(y, R_1)^2 dy \cdot \int_{-\infty}^{\infty} E(y, R_2)^2 dy} \right) \tag{7}$$

从图 6,7 可以看出,曲率方向相同的弯曲波导进行重叠积分时,所产生的过渡损耗在半径较小时略大,半径逐渐变大时,则可以忽略不计。而曲率方

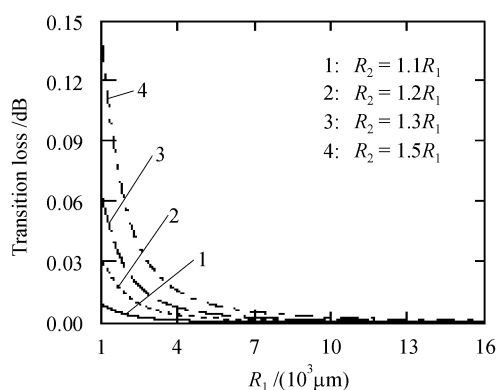
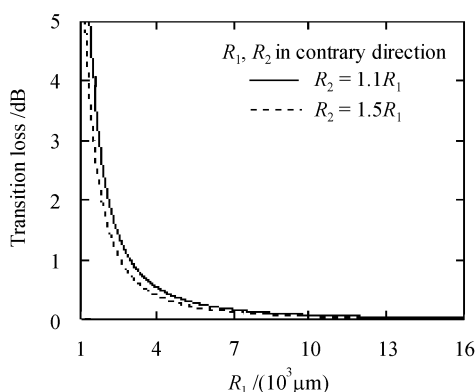


图 6 曲率方向相同时过渡损耗与弯曲半径关系图

Fig. 6 Transition loss when R_1 and R_2 have same curvature direction图 7 R_1 和 R_2 方向相反时过渡损耗图Fig. 7 Transition loss when R_1 and R_2 have contrary curvature direction

向相反时,产生的过渡损耗相比要大得多。因而对本文所得的 B 样条逼近 S 形波导,尽管弯曲半径是渐变的,但是除了中部曲率方向改变的部位可能产生较大的过渡损耗外(但此处曲率半径几乎达无穷大,从图 7 知也可以忽略不计),别的部位的过渡损耗均可以不予考虑。从而得到总的弯曲损耗优化的 S 形弯曲。

最后,对余弦、双圆弧以及所得的 S 形曲线用有限差分光束传播法(Finite Difference Beam Propagation Method-FDBPM)进行验证。所得结果如表 1,2 所示,其中纯弯曲损耗由式

$$L_{\text{bend}} = -10 \lg[\exp(-\alpha_{\text{loss}})] \quad (8)$$

计算所得。过渡损耗指与直波导相连处产生的损耗(除双圆弧产生的 S 形考虑中部曲率方向突变处产生的过渡损耗外),忽略其他部分的过渡损耗。从表中可以看出,所得优化曲线的插入损耗要明显小于双圆弧和余弦曲线。

表 1 $L=2200 \mu\text{m}, h=125 \mu\text{m}$ 时的损耗(dB)表Table 1 Total loss (dB) of different S-bend when $L=2200 \mu\text{m}, h=125 \mu\text{m}$

	Bending loss	Transition loss	Total loss	BPM loss
cos	0.034	0.075	0.109	0.147
2-arc	0.019	0.147	0.166	0.261
Result	0.083	0	0.083	0.114

表 2 $L=3000 \mu\text{m}, h=250 \mu\text{m}$ 时的损耗(dB)表Table 2 Total loss (dB) of different S-bend when $L=3000 \mu\text{m}, h=250 \mu\text{m}$

	Bending loss	Transition loss	Total loss	BPM loss
cos	0.083	0.086	0.169	0.181
2-arc	0.051	0.169	0.22	0.328
Result	0.148	0	0.148	0.123

5 结 论

利用 B 样条的一元泛函逼近理论得到了优化的 S 形弯曲,且用有限差分光束传播法对其进行验证。验证结果表明所得曲线的损耗明显小于余弦和双圆弧产生的 S 形弯曲,达到预期的目标。其实,不只是本文提到的水平直波导,对任意两条需要连接起来的有侧向位移的波导,只要知道边界条件(即一阶、二阶导数),均可以利用此方法得到优化的 S 形弯曲实现其连接,因而这种方法具有通用性。

同时,这种方法更适合于弯曲半径相对较大(大于 $5000 \mu\text{m}$),损耗较小的情况。因为从图 7 可以看出,弯曲半径较小时,当曲率半径渐进变化时,也会产生略大的过渡损耗,因而设计出来的波导,尽管纯弯曲损耗较小,但总的损耗不一定很小。

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):805~808
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):805~808
- Yang Jianyi, Wang Minghua. Optimizing design to optical waveguide bend structure [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1999, **10**(4):305~309
杨建义,王明华. 光波导弯曲的结构优化[J]. *光子·激光*, 1999, **10**(4):305~309
- F. J. Mustieles, E. Ballesteros, P. Baquero. Theoretical S-bend profile for optimization of optical waveguide radiation losses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(5):551~553
- Vijaya Subramaniam, Gregory N. De Brabander, David H.

Naghski *et al.*. Measurement of mode field profiles and bending and transition losses in curved optical channel waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6):990~997

5 Zhang Xiaokang, Liao Changjun, Liu Songhao. The relationship of the radius to the loss in bending waveguide [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2):147~150
 张小康, 廖常俊, 刘颂豪. 波导弯曲半径与弯曲损耗的关系[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2):147~150

6 Tsutomu Kitoh, Norio Takato, Mitsuo Yasu *et al.*. Bending loss reduction in silica-based waveguides by using lateral offsets [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4):555~561

7 Fang Junxin, Cao Zhuangqi, Yang Fuzi. Physics Base of Optical Waveguide [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1987
 方俊鑫, 曹庄琪, 杨傅子. 光波导技术物理基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987

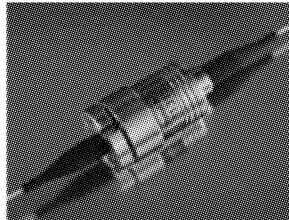
8 Wang Shengfu. Spline Function and Its Application [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical Uni. Press, 1989
 王生甫. 样条函数及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1989

9 R. Baets, P. E. Lagasse. Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(2):177~182



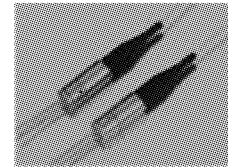
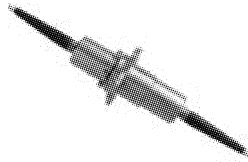
• 广告

北京中加林科技有限公司



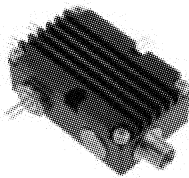
单 / 双通道光纤旋转接头

单/多模可选择, 旋转速度 2000/分, 波长范围: 850~1650 nm, 插入损耗: < 3 dB, 回传损耗 >50 dB, 应用于: 光纤制导, 石油勘探, 激光雷达武器平台, 光声纳阵列, 水下机器人遥控, 工业传感及过程控制。



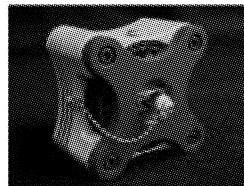
光纤耦合激光器

极低的反射率, 高效率耦合, 性能稳定, 波长范围: 635~1625, 耦合效率 >10% (单模), 耦合效率 >30% (多模), 应用于: 光纤通信设备及测试仪器的研发和生产。



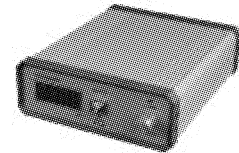
波长激光束合成器

波长范围: 635~1560 nm 适用于多种形式的光纤, 应用于: 医疗诊断, 传感系统, 频谱分析, 测试仪器等。



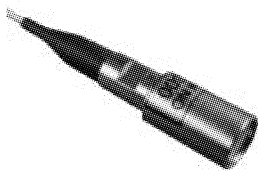
可旋转偏振光源

光功率 >0 dB (单模光纤输出), 消光比 >35 dB (SM), >25 dB (PM)。波长范围: 630~1625 nm, 可 360° 任意旋转。



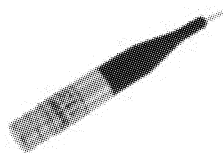
稳定激光光源

光功率 >0 dB (单模光纤输出), 光功率稳定度 <0.05 dB; 波长范围: 630~1625 nm, 应用于: 光学器件生产, 光纤系统测试激光定位及科研领域。



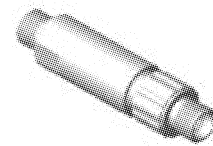
光纤准直器

波长范围: 635~1625 nm, 光束直径任选, 传输与接受口径可达 30 mm。应用于: 特殊光学系统, 自由空间通信系统等。



法拉第光纤旋转镜

波长: 1310 nm 和 1550 nm, 插入损耗: <1.0 dB; 应用于: 增大功率输出。



多模光纤集成器

波长范围: 635~1590 nm, 最大可达 19 路光纤输出等。应用于: 增大功率输出。

地址: 北京市朝阳区西大望路 19 号金港国际 1 号楼 B 座 808 室

邮编: 100022 电话: (010)87756030 传真: (010)87756031

经理 E-mail: manager@zjltech.com 销售代表 E-mail: owen-ljy@163.com

公司网址: www.zjltech.com