

文章编号:1001-9014(2005)01-0053-03

SOI 波导弯曲损耗改善方法的研究

陈媛媛, 余金中, 陈少武, 樊中朝

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:采用有效折射率方法 EIM (Effective Index Method) 和二维束传播算法 (2D-BPM) 对 SOI (Silicon-on-insulator) 波导弯曲损耗的改善方法进行了模拟分析. 模拟发现, 在波导连接处引入偏移量和在波导外侧刻槽等两种不同方法都能有效减小弯曲损耗, 并且后者的效果更明显. 同时通过实验获得了验证. 对 $R = 16\text{mm}$ 、横向位移为 $70\mu\text{m}$ 的弯曲波导, 通过刻槽方法将插入损耗降低了 5dB , 基本消除了弯曲所带来的附加损耗.

关键词:集成光学; 弯曲损耗; BPM; SOI 波导

中图分类号: TN252; TN814+.6 **文献标识码:** A

RESEARCH ON IMPROVED METHODS OF REDUCTION OF BEND LOSS OF SILICON-ON-INSULATOR WAVEGUIDES

CHEN Yuan-Yuan, YU Jin-Zhong, CHEN Shao-Wu, FAN Zhong-Chao

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Improved methods of reduction of bend loss of silicon-on-insulator waveguides were simulated and analyzed by means of effective index method (EIM) and two dimensional beam propagation method (2D-BPM). The simulation results indicate that two different methods, one of which are introducing an offset at the junction of two waveguides and the other is etching groove at the outside of bend waveguide, can decrease bend loss. And the later one is more effective. Meanwhile, experiments validate them. By etching groove, the insertion loss of bend waveguide of $R = 16\text{mm}$, transverse displacement $70\mu\text{m}$ was decreased 5dB . And its bend loss was almost eliminated.

Key words: integrated optics; bend loss; BPM; silicon-on-insulator waveguide

引言

近年来,随着硅基集成光学发展,SOI 材料由于其良好的导波性能获得了越来越广泛的应用. 特别是大截面尺寸的脊型结构波导的研制成功^[1],降低了 SOI 单模波导与光纤的耦合损耗,极大地推动了 SOI 光波导器件的发展^[2].

在集成光学中经常需要使用弯曲波导进行光路连接. 而 SOI 波导,水平方向上的光场限制较弱. 弯曲损耗往往较大,成为影响器件插入损耗的一个十分重要的因素. 因此,采取措施减小弯曲损耗很有必要.

本文通过有效折射率方法和 2D-BPM 结合,对 SOI 脊型弯曲波导进行了模拟. 在分析波导弯曲损耗机理的基础上,提出并比较了在波导连接处引入

偏移量和在波导外侧刻槽等两种不同方法对波导弯曲损耗的改善效果. 通过模拟获得了结构改进的优化参数,并应用这些参数进行实验,获得了良好的实验结果. 对 $R = 16\text{mm}$ 的弯曲波导能基本消除其弯曲损耗.

1 弯曲损耗机理及改善方案

对脊型结构的 SOI 弯曲波导,采用三维束传播方法进行精确分析计算十分复杂. 有效折射率方法 EIM (Effective Index Method) 是一种简单有效的三维波导近似分析方法,采用 EIM 可将 SOI 三维脊型波导简化为二维 3 层对称平板光波导. 其弯曲损耗是由于传播导波模的介质波导发生弯曲后,波导内完全内反射现象受到破坏而引起的. 波导中光的能量衰减系数 α 随弯曲半径、刻蚀深度和波导宽度的

收稿日期:2004-04-20,修回日期:2004-10-13

Received date: 2004-04-20, revised date: 2004-10-13

基金项目:国家科技部“973”计划(G2000-03-66)、“863”计划(20002AA312060)、国家自然科学基金资助项目(60336010)

作者简介:陈媛媛(1979-),女,湖北大冶人,中科院半导体研究所博士生,主要从事硅基光波导器件研究.

减小而迅速增加^[3]. 弯曲半径的选取与器件尺寸相关, 而刻蚀深度和波导宽度则需由单模条件确定. 在这几个参数确定后, 如何继续减小波导弯曲损耗, 本文提出了在波导连接处引入偏移量和在波导外侧刻槽等两种方法. 并以波导宽度为 $4\mu\text{m}$, 内外脊高度分别为 $5\mu\text{m}$ 和 $3.25\mu\text{m}$ 的脊型 SOI 波导^[4] 为例, 对横向位移为 $70\mu\text{m}$ 的 S 形弯曲波导进行了模拟和实验.

1.1 在波导连接处引入偏移量

在如图 1(a) 所示的 S 形弯曲波导中, 弯曲造成部分光从波导外侧泄漏, 同时波导中的模场中心位置也随弯曲方向发生向外偏移. 在波导连接处由于这种模场中心位置的不匹配而引起连接损耗. 如果在连接处引入恰当的偏移量, 如图 1(b) 所示, 就可以减小这种损耗.

针对前述结构参数的脊形波导, EIM 计算出其等效二维 3 层平板波导芯层和覆盖层的有效折射率分别为 3.474 和 3.467. 利用二维束传播算法 (2D-BPM) 模拟, 当弯曲半径 R 为 8mm 时弯曲损耗随两段弯曲波导连接处偏移量的变化曲线如图 2 所示. 可以看到: 弯~弯的偏移量为 $1.7\mu\text{m}$ 时, 弯曲损耗最小, 损耗从无偏移量时的 3.58dB 下降到 2.60dB . 同理我们对直~弯的偏移量进行模拟得到最优值为 $1\mu\text{m}$. 此时弯曲损耗进一步下降为 2.05dB . 对一组不同弯曲半径的波导, 半径范围在 $8\text{mm} \sim 16\text{mm}$, 我们通过模拟获得了其优化的偏移量值如表 1 所示.

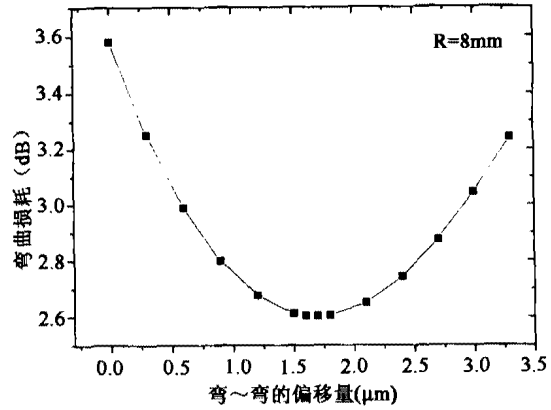


图 2 弯曲损耗与偏移量的关系
Fig. 2 Relation between bend loss and offset

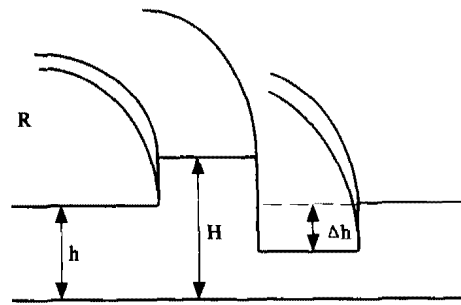


图 3 外侧刻槽结构的 SOI 弯曲波导
Fig. 3 SOI bend waveguide with etching groove at the outside

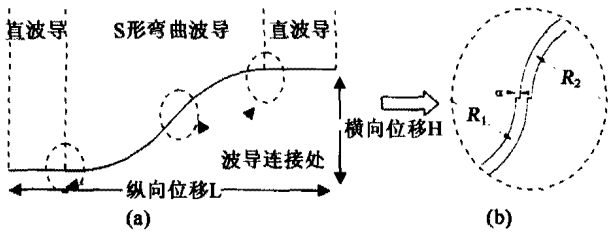


图 1 (a) S 形弯曲波导形状; (b) 两段圆弧波导连接处引入正向偏移量 a
Fig. 1 (a) Profile of S-bend waveguide; (b) junction of two waveguide arcs showing a positive offset a

表 1 不同弯曲半径下 SOI 弯曲波导偏移量与损耗的关系

Table 1 Relation of bend loss and the offset of SOI bend rib waveguide for different bend radii

弯曲半径 $R(\text{mm})$	最优偏移量 (μm)		普通波导弯曲 损耗 (dB)	波导间有偏移时的 弯曲损耗 (dB)	波导间有偏移时弯 曲损耗的减小量 (dB)
	弯~弯	直~弯			
8	1.7	1	3.58	2.05	1.53
10	1.3	0.7	2.02	1.08	0.96
12	1.05	0.5	1.21	0.59	0.62
14	0.9	0.4	0.77	0.34	0.33
16	0.8	0.4	0.53	0.22	0.31

1.2 在波导外侧刻槽

如图 3 所示, 在弯曲波导外侧刻深槽可以增大水平方向的折射率差, 光场限制加强, 使得弯曲辐射损耗减小. 并且光场主要是从外侧辐射出去的, 深槽可以阻挡辐射. 同时也阻止了弯曲波导模场中心位置的侧向偏移, 使连接损耗减小. 在 SOI 波导中, 槽的深度 Δh 可以刻蚀到底部二氧化硅层. 槽的宽度不能无限增大, 否则会影响弯曲波导外侧其他波导组件的设计. 模拟中, 我们发现槽宽大于 3 倍波导宽度之后, 弯曲损耗几乎就不再变化了.

采用 2D-BPM 模拟刻槽结构对弯曲损耗的影响. 结果如表 2 所示:

表 2 不同弯曲半径下 SOI 弯曲波导刻槽结构与损耗的关系

Table 2 Relation of bend loss and groove-type structure of SOI bend rib waveguide for different bend radii

弯曲半径 $R(\text{mm})$	普通波导弯曲 损耗 (dB)		刻槽结构波导 弯曲损耗 (dB)	
	普通波导弯曲 损耗 (dB)	刻槽结构波导 弯曲损耗 (dB)	刻槽结构波导 弯曲损耗 (dB)	刻槽结构波导 损耗的减小量 (dB)
8	3.58	0.19	0.19	3.39
10	2.02	0.13	0.13	1.89
12	1.21	0.11	0.11	1.1
14	0.77	0.14	0.14	0.63
16	0.53	0.21	0.21	0.32

刻槽后弯曲损耗获得了很大改善. 特别是在弯曲半径较小时, 弯曲损耗的改善程度更高. 表中刻槽后 $R = 16\text{mm}$ 的波导弯曲损耗还要大于 $R = 8\text{mm}$ 时, 这是因为纵向位移一定时, 半径越大波导实际长度越大, 刻槽后衰减系数差别变小, $R = 16\text{mm}$ 时的衰减系数虽然还小于 $R = 8\text{mm}$ 时的衰减系数, 但由于波导实际长度较长导致弯曲损耗反而较大.

根据模拟结果比较上述两种方法发现, 刻槽方法能更有效减小弯曲损耗. 特别是对于弯曲半径较小时, 它的优势更明显.

2 实验结果及分析

采用干法刻蚀制作不同结构的弯曲波导, 并用功率计测定其插入损耗. 以直波导损耗为参考, 弯曲引起的附加损耗为总的插入损耗减去相同长度直波导的插入损耗. 由于波导和光纤端面间存在 FP 腔效应, 导致测量的波动误差为 1dB.

实验结果如表 3:

波导插入损耗相当大, 直波导损耗高达 18 dB, 这主要是由于干法刻蚀质量不是很好造成波导传输损耗很大. 另外, 弯曲损耗也远比模拟估计值要大. 这是由于版图中弯曲波导是由折线连接而成, 而非理想的光滑圆弧连接. 而弯曲又造成刻蚀表面平整度进一步下降, 表面散射损耗增加, 从而导致实际弯曲损耗远大于模拟值.

而根据模拟结果, 引入偏移量对弯曲损耗的减小作用不大. 弯曲损耗变化几乎完全被传输损耗淹没了. 同时由于我们的测量方法误差比较大, 故没有观察到它对弯曲损耗太明显的改善效果. 相比之下,

表 3 不同结构 SOI 弯曲波导的损耗

Table 3 Loss of different structure SOI bend rib waveguide

波导类型	直波导	R = 16mm		R = 8mm	R = 8mm 刻槽结构
		R = 16mm	引入偏移 量结构		
插入损耗(dB)	18	23	22	18	23
弯曲损耗(dB)	0	5	4	>8	5
弯曲损耗的减小量	—	—	1	—	>3

刻槽方法要有效得多. 如表 3 中所示, 引入折射率下降区的新结构后弯曲损耗有了很大程度的减小, 在 $R = 16\text{mm}$ 时基本消除了弯曲损耗的影响; 在 $R = 8\text{mm}$ 时虽然还存在弯曲损耗, 但已经可以观察到明显的输出光场光斑.

由于刻槽方法需要进行二次光刻刻蚀, 光刻对准精度有限也给刻槽带来了困难. 如果对准不好, 很可能造成波导部分被刻蚀掉. 为了避免这个问题, 可以在槽与波导之间预留一定距离或将弯曲波导部分略微加宽, 为光刻留下足够的对准容差.

3 结语

作为光波导器件中的一种重要组件, 弯曲波导引起的损耗问题一直困扰着器件性能. 本文通过模拟和实验发现在 SOI 弯曲波导外侧刻槽可以有效消除弯曲损耗. 对 $R = 16\text{mm}$ 的弯曲波导可将损耗降低 5dB 左右; 对 $R = 8\text{mm}$ 的弯曲波导也获得了较好的光场输出. 采用这种方法可以在器件中使用小弯曲半径的波导, 解决了缩小器件尺寸时面临的一个重要难题.

同时由于测量条件的限制, 测量误差很大, 当损耗变化小时很难测量. 在实验中没有发现在波导连接处引入偏移量方法对弯曲损耗的明显改善. 此外, 刻槽方法将增加一步工序, 工艺过程变复杂.

REFERENCES

- [1] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi/Si and Si-on-SiO₂. [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27(8):1971—1974.
- [2] Jalai B, Yegnanarayanan S, Yoon T, et al. Advances in silicon-on-insulator optoelectronics. [J]. *IEEE J of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4: 938—946.
- [3] Wei Hong-Zhen, Yu Jin-Zhong, Zhang Xiao-Feng, et al. Simple method for estimating minimum bend radii of SOI single mode curved rib waveguides. [J]. *J Infrared Millim Waves* (魏红振, 余金中, 张小峰等. 估算 SOI 单模脊形弯曲波导最小弯曲半径的简单方法. *红外与毫米波学报*), 2001, 20: 398—400.
- [4] Pogossian S P, Vescan L, Vonsovici A. The single-mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross section, [J]. *Lightwave Technol.*, 1998, 16(10):1851—1853.