

# 估算 SOI 单模脊形弯曲波导最小 弯曲半径的简单方法\*

魏红振 余金中 张小峰 刘忠立 王启明

(中国科学院半导体所集成光电子实验室, 北京, 100083)

史伟 房昌水

(山东大学人工晶体研究所, 山东, 济南, 250100)

**摘要** 采用有效折射率方法计算了 SOI 弯曲波导由于辐射损耗引起模式截止的最小弯曲半径, 得到了一个估算弯曲波导的最小弯曲半径的解析表达式。

**关键词** 集成光学, 光波导, SOI, 光波导理论。

## SIMPLE METHOD FOR ESTIMATING MINIMUM BEND RADII OF SOI SINGLE MODE CURVED RIB WAVEGUIDES\*

WEI Hong-Zhen YU Jing-Zhong ZHANG Xiao-Feng  
LIU Zhong-Li WANG Qi-Ming

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

SHI Wei FANG Chang-Shui

(State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract** A simple method based on the effective index method was used to estimate the minimum bend radii of curved SOI waveguides. An analytical formula was obtained to estimate the minimum radius of curvature at which the mode becomes cut off due to the side radiative loss.

**Key words** integrated optics, optical waveguide, silicon-on-insulator, optical waveguide theory.

### 引言

SOI (Silicon-on-insulator) 光波导是硅基集成光学中最重要的一种波导之一, 它是其它器件如硅基光开关、信号分离器等的基础。由于 Si 和 SiO<sub>2</sub> 的折射率相差很大, 因此平板 SOI 单模波导厚度必须很小, 然而采用脊形结构, 在几何结构参数  $R, A, S_{\text{oref}}^{[1]}$  的单模条件时可以在截面尺寸的 SOI 单模波导。

在集成光学中, 波导弯曲是不可避免的。在常用的器件如 MZI 光开关和相位阵列波分复用器件的设计中, 必须考虑弯曲波导的损耗特性, 确定最小的

弯曲半径, 减小器件的插入损耗。脊形波导的弯曲损耗与波导的刻蚀深度有关, 深刻蚀的脊形波导的弯曲损耗小, 但脊形波导的单模条件要求刻蚀深度小, 为了降低弯曲损耗, 应相应增大波导的弯曲半径。

脊形弯曲波导存在两类损耗机制, 第一类是垂直方向向衬底的泄露损耗。对于 GaAs/AlGaAs、SiGe/Si 等通过外延组份的改变而形成的光波导, 波导层与衬底的折射率相差较小, 波导弯曲时波导层的折射率减小, 因此对衬底的泄露损耗显著增加, 由这一类材料形成的深刻蚀的光波导的弯曲损耗主要由泄露模决定。E. C. M. Pennings<sup>[2]</sup> 等分析了这一类波导的弯曲损耗特性。弯曲波导的另一类损耗是

\* 国家自然科学基金(编号: 69896260, 69990540)资助项目  
稿件收到日期 2000-06-19, 修改稿收到日期 2001-02-05

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 69896260, 69990540)  
Received 2000-06-19, revised 2001-02-05

水平方向的辐射损耗. 在 SOI 光波导中, 由于波导层和衬底覆盖层的折射率相差很大, 波导垂直方向的限制作用很强, 因此波导向衬底的泄露损耗可以忽略. 而对于浅刻蚀的脊形波导, 在水平方向形成的折射率差很小, 此时水平方向的辐射损耗决定了弯曲波导的损耗特性.

对弯曲波导的精确的分析需要用三维束传播方法 (BPM)<sup>[2]</sup>, 然而 BPM 方法计算复杂而且需要大量的计算时间. 有效折射率 (EIM) 方法是一种最简单的三维波导近似分析方法. 在波导远离截止时, EIM 方法具有很高的精度<sup>[4]</sup>. 考虑到 SOI 脊形单模波导的大尺寸特点, 我们采用 EIM 方法对 SOI 脊形单模波导进行二维简化. 在平板弯曲波导分析方法中, 速度方法是一种简单的分析方法. 本文采用 EIM 和速度方法分析了 SOI 脊形单模弯曲波导的损耗特性及最小弯曲半径.

## 1 基本原理

SOI 脊形波导的结构如图 1 所示, 采用有效折射率方法可将三维 SOI 脊形波导简化为二维三层对称平板波导. 图 1 中脊形波导分为两个区域: 内脊区 I 和外脊区 II, 各自对应厚度分别为  $H$  和  $h$  的三层平板波导, 由有效折射率方法可得到各区域相应的有效折射率  $N_1$  和  $N_2$ .

对三层弯曲平板波导可采用速度方法进行分析. 在弯曲波导中, 为了保持光波波形的完整性, 波导中光波的等相位面为以曲率中心为起点的一系列辐射状平面, 这样在波导中心轴外侧, 随着距离中心轴的距离的增加, 导模的相速度越来越大, 等效于波导的有效折射率越来越小, 波导对光场的限制越来越弱, 当距离增加到一定的程度时, 波导的等效折射率等于覆盖层的折射率, 此时波导对光场再没有限制作用, 辐射损耗大大增加. 根据上面的理论得到弯曲平板波导的场振幅衰减系数为<sup>[5]</sup>:

$$\alpha = C_1 \exp(-C_2 R), \quad (1)$$

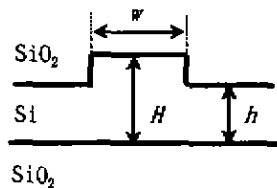


图 1 脊形 SOI 波导结构  
Fig. 1 Schematic graph of SOI rib waveguide

式(1)中

$$C_1 = \frac{\lambda_2 \cos(\frac{k w}{2} e^{p w}}{p [w + \frac{1}{k} \sin(k w) + \frac{1}{\rho} \cos^2(\frac{k w}{2})] [w + \frac{2}{\rho} \cos(\frac{k w}{2})]^2},$$

$$C_2 = \frac{2 \rho (\beta - k_1 N_2)}{k_c N_2},$$

其中,  $\lambda_2 = \lambda_0 / N_2$ ,  $k = \sqrt{k_0^2 - \beta^2}$ ,  $\rho = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 N_2^2}$ ,  $R$  为弯曲半径,  $\beta$  为直波导的传播常数,  $w$  为等效波导厚度.

对一定结构的波导,  $C_1, C_2$  是与曲率半径  $R$  无关的常数, 而振幅衰减系数  $\alpha$  与曲率半径  $R$  为指数关系, 曲率半径  $R$  越小, 辐射损耗越严重.

把振幅衰减系数  $\alpha$  为 1Np/m (1Np=8.686dB) 的曲率半径定义为波导的允许的最小曲率半径, 由式(1)及有效折射率方法就可以得到脊形弯曲波导的最小弯曲半径.

## 2 数值计算结果及分析

弯曲波导的损耗随弯曲半径的减小而指数增加, 而在实际波导设计中希望波导弯曲半径尽量小, 以减小器件的尺寸. 因此确定波导允许的曲率半径是必要的. SOI 脊形波导的弯曲损耗由波导的内外脊高度  $H, h$  以及脊宽  $w$  决定. 内外脊的高度决定了等效平板波导的各层的折射率. 对弯曲波导产生影响的实际上是波导内外脊的折射率的比值. 图 2 为内外脊折射率比值与脊高比  $h/H$  的关系的计算结果. 根据波导本征方程无法得到波导有效折射率与波导的几何尺寸的解析关系, 因此我们用拟合技术对上面的计算结果进行了数值拟合, 得到 SOI 脊形波导的内外脊高比与内外脊有效折射率的关系的

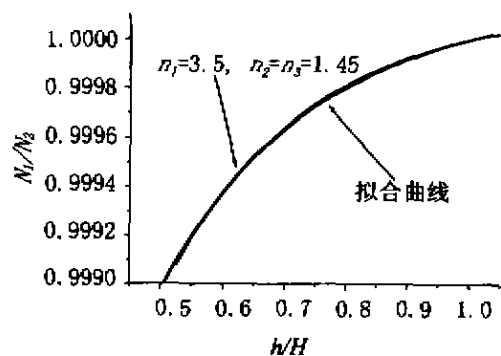


图 2 脊形波导内外脊有效折射率比与脊高比  $h/H$  关系

Fig. 2 The relation between effective index ratio and  $h/H$  of rib waveguide

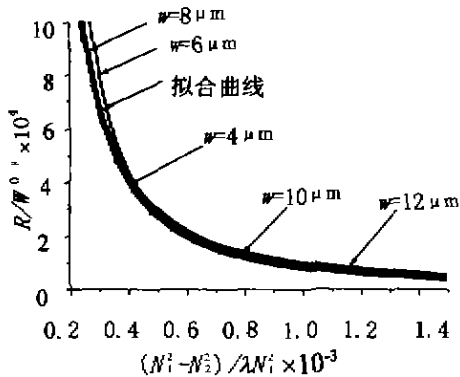


图3 SOI 弯曲波导的最小弯曲半径  
Fig. 3 The minimum bend radius of the SOI rib curve waveguide

近似解析式:

$$N_2/N_1 = 1.00014 - \frac{8}{1 + e^{(N_2/N_1 - 1.62) \times 10^{24}}} \quad (2)$$

拟合曲线如图2虚线所示。

弯曲波导损耗不仅与脊波导内外脊折射率有关,还与波导宽度有关。由速度分析方法可以看到,弯曲脊形波导损耗为发生在波导外侧的辐射损耗。波导的宽度越宽,则波导外侧相速度越大,相应的折射率越小,引起的辐射损耗越大。另一个与辐射损耗有关的因数是波长,从式(1)可见,波长越长,损耗越大。我们计算了不同结构的脊形SOI弯曲波导的最小弯曲半径。参考对称三层平板波导的归一化频率,同时考虑 $w$ 与 $R$ 之间的关系,我们计算了 $R/w^{0.33}$ 与 $(N_2^2 - N_3^2)/(\lambda N_1^2)$ 之间的函数关系,发现这种函数基本上与具体的波导结构无关,计算结果如图3所示。其中 $(N_2^2 - N_3^2)/(\lambda N_1^2)$ 是通过在一定的 $H$ 下改变 $h$ 值而得到的。在不同的 $H$ 和 $h$ 下得到的不同的 $(N_2^2 - N_3^2)/(\lambda N_1^2)$ ,它与 $R/w^{0.33}$ 的关系曲线是一致的。由图3可见,波导各层的折射率相差越大,即脊形波导刻蚀越深,则波导的弯曲损耗越小,最小弯曲半径越小。脊形波导的宽度越大,弯曲损耗越大,最小弯曲半径越大。对曲线进行拟合可得到最小弯曲半径 $R$ 与各波导参数的关系为:

$$R_i = \left( \frac{\lambda w^{1/3}}{1 - (N_2/N_1)^2} \right)^{1.53} \quad (3)$$

拟合曲线如图4中曲线所示。不同的脊宽 $w$ 作用结果等效于对拟合曲线的展宽,在 $w$ 比较大的区域展宽比较小,折射率相差比较大的区域展宽小。因此当

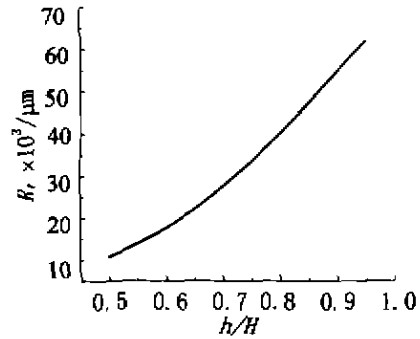


图4 由式(2)和(3)确定的最小弯曲半径与 $h/H$ 的关系

Fig. 4 The relation between the minimum bend radius and  $h/H$  of rib waveguide determined by Eqs. (2) and (3)

$w$ 比较大, $h/H$ 比较小时,由式(3)估算的最小弯曲半径比较准确。同时考虑到SOI脊形波导单模性的要求,应有 $h/H > 0.5$ 。式(3)中 $R_i$ 与波导各参数的关系与E. M. Pennings得到的深刻蚀脊形波导的结论是类似的。由式(2)和式(3),可得到SOI脊形弯曲波导的最小弯曲半径与脊形波导的几何尺寸的解析关系。图4为根据式(2)和式(3)得到的脊形弯曲波导的最小弯曲半径与脊高比 $h/H$ 的关系。

### 3 结语

为了分析SOI单模脊形弯曲波导由于浅刻蚀导致的水平方向的辐射损耗,确定不同结构参数下的最小弯曲半径,我们采用了有效折射率方法以及速度方法进行了分析,由此得到了简单的解析表达式来估算最小弯曲半径。

### REFERENCES

- [1] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi/Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **27**: 1971-1973
- [2] Pennings E C M, Deri R J, Hawkins R J. Simple method for estimating usable bend radii of deep etched optical rib waveguides. *Electronics Letters*, 1991, **27**(17): 1532-1534
- [3] Schulz D, Glingener C, Voges E. Novel Generalized Finite-difference beam propagation method. *IEEE J. of Quantum Electronics*, 1994, **30**(4): 1132-1140
- [4] Benson T M, Bozate R J, Kendall P C. Rigorous effective index method for semiconductor rib waveguides. *IEEE Proceedings-J.*, 1992, **139**(1): 67-70
- [5] Marchetti E A J. Bends in optical dielectric guides. *The Bell Sys. Tech. J.*, 1969, **48**(7): 2103-2132