

大截面 SOI 脊型波导单模条件的研究*

殷源 戴道铤 时尧成 何赛灵

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘要 利用有限差分方法(FDM)对大横截面 SOI(Silicon-on-insulator)脊型光波导的本征模进行了计算分析,从而确定了 SOI 脊型波导的单模条件,即归一化外脊高和归一化脊宽的关系. 通过比较,进一步明确了归一化外脊高大于 0.5 时现有的单模条件解析公式中常数项的取值为 0.3. 同时,还对归一化外脊高小于 0.5 时的单模条件也做了计算和讨论.

关键词 单模条件;有限差分方法;脊型波导

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

脊型波导是集成光学中最常用的波导结构之一,广泛应用于各种无源和有源集成光器件. 常用的光波导材料包括 SiO₂, GaAs, InP, Si 等. 近年来,基于 SOI(silicon-on-insulator)衬底的脊型光波导备受关注^[1]. 目前 SOI 材料在 1.3~1.5 μm 窗口内的传输损耗已经降低至 0.1 dB/cm^[2]. SOI 材料具有很多优点,尤其是和现有的集成电路具有很好的兼容性,因而硅材料光集成得到迅速发展,已研制出多种基于 SOI 的集成光波导器件,如阵列波导光栅^[3],光开关^[4]等.

由于多模会降低光集成器件的性能,因此单模成为光波导的基本要求. 在 SOI 波导中,芯层材料 Si 和包层材料 SiO₂ 的折射率(3.455/1.46)相差很大. 对于 SOI 平板波导,若要满足单模条件,芯层厚度须小于 0.2 μm,这与单模光纤(模场直径约为 9 μm)极不匹配,将产生很大的耦合损耗. 为了减小耦合损耗,通常采用大截面脊型结构(相对波长而言)^[5]. 对于大截面脊型波导,只要满足一定几何关系(即通常所说的单模条件),仍可以实现单模传输^[6]. 此单模条件是大截面脊型光波导设计的基础,因此单模条件的准确性和可靠性极为重要.

对于现有的单模条件解析公式中常数项 c 的取值^[6-12],不同方法得到的结果略有不同. Peterman 等人利用模式匹配技术得到的结果是 $c = 0.3$ ^[7,8]. 而利用有效折射率法(EIM)得到的结果为 $c = 0$ ^[9]. Pogossian 根据文献[10]中的实验数据,进行拟合得到 c 的取值为 -0.05 ^[6]. Olly Powell 认为文献[10]中的实验数据难免存在一定的误差,因而为了精确地确定 c 的取值,采用了 BPM 方法对 SOI 脊型光波导进行了模拟传输(输入场与波导中心偏离以激发高阶模),所得结果与模式匹配技术的结果更为接

近,即 $c = 0.3$ ^[11]. 由此可见,关于 c 的取值,仍然存在分歧.

为了进一步确定 c 的取值,本文利用半矢量有限差分方法(FDM)对大截面 SOI 脊型光波导的模式进行了计算研究,从而确定了单模条件. 和 BPM 计算相比,用 FDM 分析波导本征模更加直接可靠. 同时注意到以往单模条件的前提均为 $r > 0.5$, 本文将单模条件拓展到 $r < 0.5$ 的范围. 这对于大截面 SOI 脊型光波导的设计具有一定的指导意义.

1 理论、计算和讨论

1.1 理论和计算分析

目前,对大截面脊型波导,常用的单模条件是在 $r > 0.5$ 前提下满足

$$t < r / (1 - r^2)^{1/2} + c \quad (1)$$

式中 $t (= W/H)$ 和 $r (= h/H)$ 分别是归一化的脊宽和归一化的外脊高, c 是常数^[6-12]

本文采用结合 PML 边界的 FDM 方法^[12]来计算 SOI 脊型光波导的本征模. 电场的全矢量波方程可以写为(波导截面在 xy 平面内)^[13]

$$\begin{pmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中

$$P_{xx}E_x = \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial (n^2 E_x)}{\partial \tilde{x}} \right] + \frac{\partial^2 E_x}{\partial \tilde{y}^2} + n^2 k_0^2 E_x$$

$$P_{xy}E_y = \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial (n^2 E_y)}{\partial \tilde{y}} \right) - \frac{\partial^2 E_y}{\partial \tilde{x} \partial \tilde{y}}$$

$$P_{yx}E_x = \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial (n^2 E_x)}{\partial \tilde{y}} \right] + \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left[\frac{\partial E_x}{\partial \tilde{x}} \right] + n^2 k_0^2 E_x$$

$$P_{yy}E_y = \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial (n^2 E_y)}{\partial \tilde{x}} \right) - \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left[\frac{\partial E_y}{\partial \tilde{y}} \right]$$

$n(\tilde{x}, \tilde{y})$ 是有效折射率的分布, k_0 是真空中波数. 复坐标 x 和 y 定义为

$$\zeta = \int_0^{\zeta} s_{\zeta}(\zeta') d\zeta' \quad (\zeta = x, y) \quad (3)$$

式中 $s_{\zeta}(\zeta')$ 表示为^[13]

*浙江省科技计划项目 No. 2004C131095 和国家自然科学基金(60377022)

Tel: 0571-87953127 Email: yy@coer.zju.edu.cn

收稿日期: 2004-03-29

$$s_{\zeta}(\zeta') = \begin{cases} 1 & \text{(在非 PML 区域)} \\ 1 - j \frac{\sigma_{\zeta \max}}{\omega \epsilon_0} \frac{|\zeta - \zeta_0|^2}{d^2} & \text{(在 PML 区域)} \end{cases} \quad (4)$$

式中 ω 是角频率, ϵ_0 是真空中介电常数 ($\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$), ζ_0 是 PML 界面, d 是 PML 层的厚度, $\sigma_{\zeta \max}$ 是常数, 可以对其优化以减少反射. 令

$$E_x = \tilde{E}_x(\tilde{x}, \tilde{y}) \exp(-j\beta z)$$

$$E_y = \tilde{E}_y(\tilde{x}, \tilde{y}) \exp(-j\beta z)$$

并将 E_x, E_y 代入式(2), 可以获得下面准 TE 模和准 TM 模并忽略耦合项 P_{xy}, P_{yx} 的半矢量特征方程

$$P_{xx} \tilde{E}_x = \beta^2 \tilde{E}_x \quad (5a)$$

$$P_{yy} \tilde{E}_y = \beta^2 \tilde{E}_y \quad (5b)$$

对式(5a) 应用中心有限差分, 对准 TE 模可以获得下面的特征方程^[14]

$$\begin{aligned} a_{mn} \tilde{E}_x(m-1, n) + b_{mn} \tilde{E}_x(m, n) + \\ c_{mn} \tilde{E}_x(m+1, n) + d_{mn} \tilde{E}_x(m, n-1) + \\ e_{mn} \tilde{E}_x(m, n+1) = \beta^2 \tilde{E}_x(m, n) \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{mn} &= \frac{n_{m-1}^2}{2\Delta x_m \Delta x_{m-1/2}} \left(\frac{1}{n_{m-1}^2} + \frac{1}{n_m^2} \right) \\ b_{mn} &= -\frac{n_m^2}{2\Delta x_m} \left[\left(\frac{1}{n_{m+1}^2} + \frac{1}{n_m^2} \right) \frac{1}{\Delta x_{m+1/2}} + \left(\frac{1}{n_{m-1}^2} + \frac{1}{n_m^2} \right) \frac{1}{\Delta x_{m-1/2}} \right] - \frac{1}{\Delta y_n} \left(\frac{1}{\Delta y_{n+1/2}} + \frac{1}{\Delta y_{n-1/2}} \right) + n_{mn}^2 k_0^2 \\ c_{mn} &= \frac{n_{m+1}^2}{2\Delta x_m \Delta x_{m+1/2}} \left(\frac{1}{n_{m+1}^2} + \frac{1}{n_m^2} \right) \\ d_{mn} &= \frac{1}{\Delta y_n \Delta y_{n-1/2}} \\ e_{mn} &= \frac{1}{\Delta y_n \Delta y_{n+1/2}} \end{aligned} \quad (7)$$

且有

$$\Delta x_{m+1/2} = x_{m+1} - x_m$$

$$\Delta x_{m-1/2} = x_m - x_{m-1}$$

$$\Delta x_m = x_{m+1/2} - x_{m-1/2}$$

类似地, 可以得到准 TM 模的特征方程. 通过解算这些特征方程, 可以获得光波导的各阶本征模, 若存在高阶模, 则该波导为多模波导. 为了确定单模和多模的临界点, 我们首先固定 SOI 光波导的外脊高 h , 然后逐渐增大脊宽 (增量 ΔW 为 $0.2 \mu\text{m}$), 直到出现高阶模为止. 对脊型波导的脊高和脊宽进行扫描, 则可得到单模条件.

1.2 计算结果讨论

图 1 为 SOI 脊型光波导的截面示意图. 波导绝缘层、芯层和上包层的折射率分别为 1.46、3.455 和 1.0 (空气). 计算波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$. FDM 的离散格点大小取为 $\Delta x = \Delta y = 0.1 \mu\text{m}$.

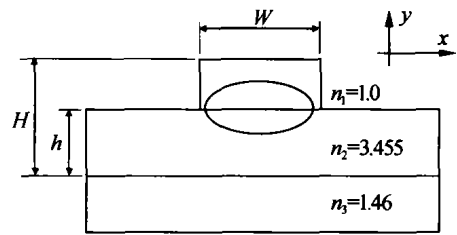


图 1 SOI 脊型波导二维结构横截面图
Fig. 1 Schematic cross-section of a SOI rib waveguide

图 2 给出了用 FDM 获得的单模条件 (如 “x” 所示). 在此, 选取波导芯层厚度 $H = 5 \mu\text{m}$. 为了对比, 图中也给出了由式(1) ($c = -0.05^{[6]}, 0.3^{[8]}$) 确定的单模曲线, 如图中实线所示. 由于该解析式的适用范围是 $r > 0.5$, 当 $r < 0.5$ 时, 用虚线表示. 由图 2 可见, 用 FDM 确定的单模条件几乎介于 $c = 0.3$ 和 $c = -0.05$ 之间. 这表明, 由 $c = -0.05$ 确定的单模条件过于严格. 由式(1)可见, 当波导脊宽 ($t = W/H$) 固定时, c 值越小, 单模条件允许的波导脊高 ($H - h$) 也越小, 这将不利于减小波导弯曲半径从而提高器件集成度.

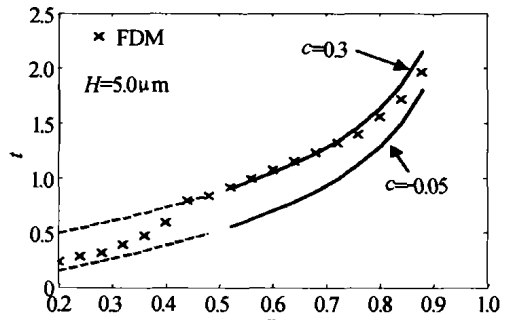


图 2 $H = 5 \mu\text{m}$ 时 SOI 脊型光波导的单模条件
Fig. 2 The single mode condition for a rib SOI waveguide when $H = 5 \mu\text{m}$

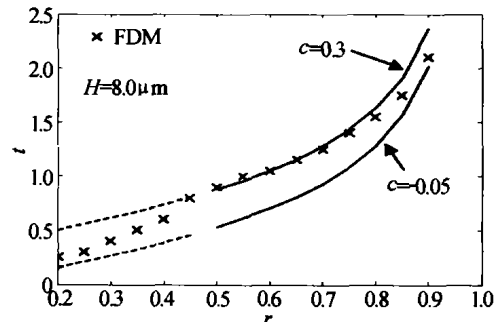


图 3 $H = 8 \mu\text{m}$ 时 SOI 脊型光波导的单模条件
Fig. 3 The single mode condition for a rib SOI waveguide when $H = 8 \mu\text{m}$

图 2 表明, 当 $r < 0.4$ 时, FDM 获得的单模条件曲线位于 $c = 0.3$ 和 $c = -0.05$ 的单模条件之间. 而 $r > 0.75$ 时, FDM 获得的单模条件曲线从 $c = 0.3$ 的单模曲线逐渐逼近 $c = -0.05$ 的单模曲线. 当 $0.45 < r < 0.75$ 时, FDM 获得的单模条件曲线和 $c = 0.3$ 的单模条件非常吻合, 这是通常设计中所选取波导归一化外脊高的值. 因此, 对于大多数设计 ($0.45 < r < 0.75$) 来说, 仍然可以用式(1) ($c = 0.3$) 来判断是否为单模, 这和^[11]中利用 BPM 模拟得到

的结论是一致的,也进一步证实了文献[11]关于文献[10]中实验数据存在一定误差的结论.

图2是针对 $H=5\ \mu\text{m}$ 的情况所得的结果.为了验证其通用性,用FDM计算分析了 $H=8\ \mu\text{m}$ 时的单模条件,计算结果如图3.图3中的单模条件和图2中的结果非常接近.因此,在设计不同芯层厚度的SOI脊型光波导时,可以以图2中FDM确定的曲线作为单模判据.

2 结论

本文利用FDM计算了SOI脊型光波导的本征模,并由此确定了一个更为准确的单模条件,结果表明 $c=-0.05$ 的单模条件过于严格.对于大多数设计来说,归一化外脊高 r 范围为 $[0.45, 0.75]$.而当 $0.45 < r < 0.75$ 时,FDM获得的单模条件曲线和 $c=0.3$ 的单模条件非常吻合.因此,在通常的设计中,可以采用 $t < r/(1-r^2)^{1/2} + 0.3$ 作为单模判据.

参考文献

- 1 王小龙,余金中.不同衬底折射率的多模干涉耦合器.光子学报,2003,32(9):1045~1048
Wang X L, Yu J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1045~1048
- 2 Fischer U, Zinke T, Kropp J-R, et al. 0.1 dB/cm waveguide losses in single-mode SOI rib waveguides. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, 8(5): 647~648
- 3 Trinh P D, Yegnanarayanan S, Coppinger F, et al. Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelength multi/multiplexer with extremely low-polarization sensitivity. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9(7): 940~942
- 4 严清峰,余金中.一种新型SOI Mach-Zehnder干涉型光电调制器的设计.光子学报,2003,32(5):555~558
- 5 Yan Q F, Yu J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 555~558
- 6 戴道铤,梅维泉,周勤存,等.用于SOI脊型波导的模式匹配器的设计.光电子·激光,2003,14(6):602~605
Dai D X, Mei W Q, Zhou Q C, et al. *J Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(6): 602~605
- 7 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
- 8 Petermann K. Properties of optical rib-guides with large cross-section. *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, 1976, 30: 139~140
- 9 Soref R A, Schmidtchen H, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27(8): 1971~1974
- 10 Ramaswamy V. Strip loaded film waveguides. *Bell Syst Tech J*, 1974, 53: 697~705
- 11 Rickman A G, Reed G T, Namavar F. Silicon-on-insulator optical RIB waveguide loss and mode characteristics. *J Lightwave Technol*, 1994, 12(10): 1771~1776
- 12 Powell O. Single-mode condition for silicon rib waveguides. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(10): 1851~1855
- 13 徐静,戴道铤,何赛灵.基于PML边界的有限差分法及其在光波导泄漏损耗计算中的应用.光子学报,2003,32(12):1426~1429
Xu J, Dai D X, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(12): 1426~1429
- 14 Feng N N, Zhou G R, Huang W P. Computation of full-vector modes for bending waveguide using cylindrical perfectly matched layers. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(11): 1976~1980
- 15 Dai D X, He S L. Analysis of the birefringence of a silicon-on-insulator rib waveguide. *Applied Optics*, 2004, 43(5): 1156~1161

Analysis of the Single-mode Condition for a Rib SOI Waveguide with a Large Cross Section

Yin Yuan, Dai Daoxin, Shi Yaocheng, He Sailing

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Centre for Optical and Electromagnetic Research,
Joint Laboratory of Optical Communications of Zhejiang University, Zhejiang University, Yu-Quan, Hangzhou 310027

Received date: 2004-03-29

Abstract The single mode condition for a rib waveguide based on silicon-on-insulator (SOI) is determined through the eigen mode analysis using a finite difference method. This single mode condition gives the relation between the normalized rib height r and the normalized rib width t . A comparison is made between the present result obtained with a FDM and previous analytical formulas for the single mode condition. Simulation results show that the value for the constant in the previous analytical formulas should be chosen as 0.3 when $r > 0.5$. The present single mode condition is also extended to the range of $r < 0.5$ (which is not considered before).

Keywords Single mode condition; Finite-Difference-Method (FDM); Rib waveguide

Yin Yuan was born in 1967. He received the Master degree in Optical Engineering Department from Zhejiang University, in 1999. He is pursuing his Ph. D. degree in Zhejiang University, and his research activities are in designs, simulations and fabrications of integrated wavelength division multiplexers.

