

文章编号: 0253-2239(2001)01-0122-03

# 硅基二氧化硅光波导器件偏振特性的理论分析\*

欧海燕 雷红兵 杨沁清 王红杰 王启明

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

胡雄伟

(国家光电子工艺中心, 北京 100083)

**摘要:** 从理论上分析了硅基二氧化硅光波导器件的芯区尺寸、相对折射率差、内应力和弯曲半径对器件偏振特性的影响, 得出结论: 小折射率差的正方形波导的双折射系数小; 内应力对双折射的影响比几何参数大; 弯曲半径较小时, 双折射系数较大, 弯曲损耗也较大。

**关键词:** 偏振; 线双折射; 硅基二氧化硅光波导

中图分类号: TN814 文献标识码: A

## 1 引 言

线双折射主要是由几何因素和应力引起的。几何线双折射是指由于光波导截面非理想圆形而引起的双折射。应力线双折射是指当光波导沿两正交方向所受应力不等时, 由光弹效应引起的该两方向的折射率不等, 从而形成快轴与慢轴。双折射现象的存在既用来制作有用的器件, 如偏振态变化传感器, 但也会带来不利影响, 如在光纤传输系统和各种光波导器件中, 存在偏振色散和偏振噪声等等。因此对引起线双折射的几何、应力和弯曲等因素对硅基二氧化硅光波导器件偏振特性影响进行理论分析, 对器件设计过程中偏振特性改善有重要指导意义。本文以波导阵列光栅型波分复用/解复用器作为硅基二氧化硅光波导器件的实例, 分析其偏振特性。

## 2 基本理论

矩形硅基二氧化硅光波导的截面为矩形, 所以存在几何线双折射, 计算中采用掩埋矩形结构: 芯区宽为  $a$ , 长为  $b$ , 芯区折射率为  $n_1$ , 掩埋于折射率为  $n_2$  的包层中。包层厚度的适宜选取使衬底的影响可以忽略不计。芯区和包层的相对折射率差  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$ 。采用马卡梯里解法<sup>[1]</sup>, 计算矩形波

导的有效折射率。

在硅基材料上生长二氧化硅, 由于硅的热膨胀系数为  $2.44 \times 10^{-6} / \text{K}$ , 二氧化硅的热膨胀系数为  $5.5 \times 10^{-7} / \text{K}$ , 两者的热膨胀系数差别很大, 在界面和体内将产生应力, 导致应变。

对于各向同性材料, 若光波导横向受压时, 则沿两正交方向的折射率变化差为<sup>[2]</sup>

$$\Delta n = \Delta n_1 - \Delta n_2 = \frac{n^3}{E} p_{44} (1 + \mu) (P_1 - P_2), \quad (1)$$

式中,  $n$  为材料的折射率,  $E$  为杨氏弹性模量,  $\mu$  为泊松比,  $P_1$  和  $P_2$  为横向两个互相垂直的压力,  $p_{44} = (p_{11} - p_{12}) / 2$ 。对于石英, 常数取值为:  $E = 7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $\mu = 0.17$ ,  $n = 1.45$ ,  $p_{11} = 0.12$ ,  $p_{12} = 0.27$ 。其中  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  为应变弹性系数。因此,  $p_{44} = -0.075 < 0$ 。

## 3 理论计算及讨论

### 3.1 几何双折射

用马卡梯里解法分别计算了矩形波导的相对折射率差及宽长比对 TE 和 TM 模传播常数的影响。

相对折射率差对 TE 和 TM 模传播常数的影响示于图 1 中。从图 1 中可看出,  $a/b = 2$  时, 随着相对折射率差的增加, 线双折射系数增加。  $\Delta = 0.75\%$  时的 TE 和 TM 的归一化传播常数差别很小, 两曲线几乎合二为一。当  $b/A_2 = 1$  时,  $\Delta = 50\%$  的双折射系数比  $\Delta = 0.75\%$  的大 40 倍。在远离截止时, 不同折射率差  $\Delta$  的双折射系数都减小,

\* 国家自然科学基金(69889701 和 69896260)资助项目。  
收稿日期: 1999-06-07; 收到修改稿日期: 1999-09-06

因此为减小线双折射的影响, 在选取波导材料的参数时, 相对折射率差宜取较小值, 而几何尺寸的选择应使器件工作在远离截止区。

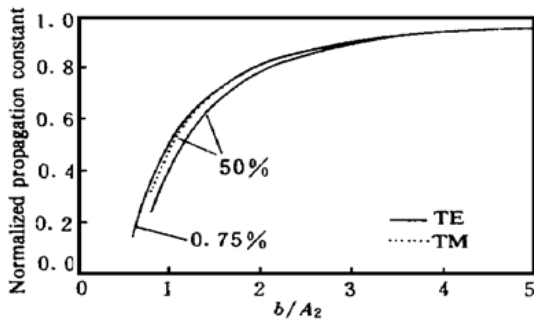


Fig. 1 Normalized propagation constant for different  $\Delta$  ( $a/b = 2$ )

波导宽长比对 TE 和 TM 模的传播常数影响的计算结果如下: 1) 在不同的宽长比情况下双折射系数变化有相同的趋势: 在截止区, 线双折射较大, 随着逐渐远离截止区, 线双折射减小。2) 对应  $b/A_2 = 1$  时, 当  $a/b$  的值分别取为 1.2 和 4 时, 归一化传播常数差分别为 0.0003 和 0.004, 即随着宽长比的增加, 线双折射系数增加。3) 当  $a/b = 1$  时, TE 和 TM 简并, 无偏振色散。

因此, 为消除偏振色散的影响, 一般的波导阵列光栅选取小  $\Delta$ , 远离截止的正方形截面, 常用参数为:  $\Delta = 0.75\%$ ,  $a = b = 6 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。

### 3.2 应力双折射

应力比几何参数对波导的偏振特性影响大。按前面的计算结果, 几何参数对双折射系数的一般贡献为  $10^{-3} \sim 10^{-6}$  ( $a/b \neq 1$ )。图 2 给出了利用公式 (1) 计算的应力对折射率的影响的结果。

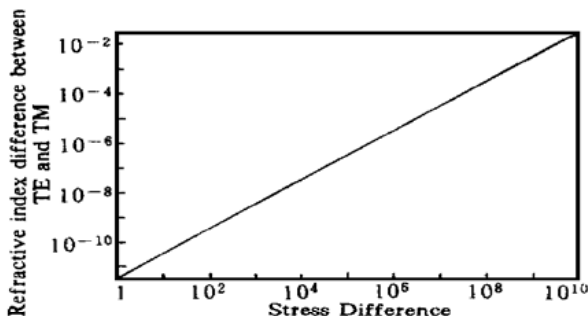


Fig. 2 Refractive index difference versus stress difference

对于一般的热氧化二氧化硅, 二氧化硅中的应力分布为压应力, 值为  $3.0 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ <sup>[4]</sup>。从图 2 中可看出, 对应的 TE 和 TM 的折射率变化差已达  $10^{-2}$ 。对于小折射率差 ( $\Delta < 1\%$ ) 的光波导器件来说, 应力引入的折射率差已和折射率波导本身的折射率差相比拟, 器件的特性, 特别是偏振特性

将受到很大影响。

既然硅基二氧化硅光波导由于多层材料间热膨胀系数不匹配, 在材料内部引入应力而使波导固有了双折射特性, 则我们可用同样原理, 对应力进行补偿, 常用方法有在包层中引入应力释放槽<sup>[5]</sup>、淀积非晶硅薄膜<sup>[6]</sup>、淀积氮化硅薄膜<sup>[7]</sup>等等。

### 3.3 弯曲波导

在制作光波导器件时, 为使器件结构紧凑或实现某些特定功能, 经常会采用“S”形的弯曲波导。当波导受到弯曲时, 几何变形和应力都会产生线性双折射。从文献[8]给出的理论出发, 计算了不同弯曲半径  $R = 1000 \mu\text{m}$ 、 $5000 \mu\text{m}$ 、 $10000 \mu\text{m}$  情况下 TE 和 TM 模传播常数的实部和虚部, 结果如图 3 所示。

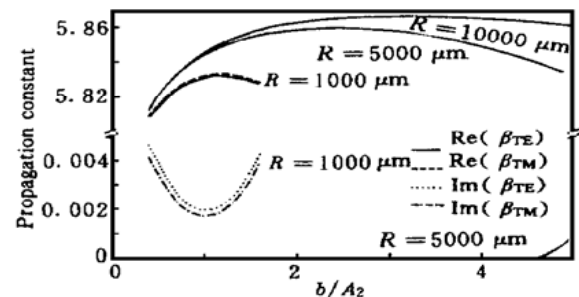


Fig. 3 Propagation constant for different bending radii

从图 3 中可看出, 随着弯曲半径的减小, TE 和 TM 传播常数的差值增加, 即线双折射现象加强。当  $R = 1000 \mu\text{m}$ 、 $5000 \mu\text{m}$ 、 $10000 \mu\text{m}$ ,  $b/A_2 = 1$  时, 传播常数(实部)的差值依次为  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  和  $10^{-5}$  量级, 传播常数虚部的最大值从  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ , 变到  $10^{-6}$  量级。因此在图中, 当  $R = 5000 \mu\text{m}$  时, 只有当  $b/A_2 < 0.5$  和  $b/A_2 > 4.5$  时, 传播常数的虚部才会在图中表示出来; 当  $R = 10000 \mu\text{m}$  时, 无虚部能表示出来, 说明在此弯曲半径下, 弯曲损耗已可以忽略不计。为减小弯曲对偏振色散的影响, 通常在工艺条件和器件尺寸允许的情况下, 选取较大的弯曲半径。

## 4 结 论

通过对影响光波导器件偏振特性的几何、应力和弯曲半径的理论分析, 得到以下结论:

1) 应力产生的线双折射效应比几何产生的线双折射效应显著。由于波导多层材料间热膨胀系数不匹配, 不可避免会在波导材料内部引入应力, 产生线双折射现象, 带来偏振串扰。但是, 我们可采用镀

膜、刻槽等应力补偿法来减小偏振串扰。

2) 波导几何尺寸的选择会对器件偏振特性产生影响。对矩形波导,随着相对折射率差的增加,线双折射增大;随着宽长比趋近 1,线双折射减小。因此,为使器件对偏振不敏感,尽量选择矩形波导的宽长比为 1,相对折射率差较小。

3) “S”形波导的弯曲半径的取值对光波导的偏振特性和传输损耗有重要影响。弯曲半径越大,线双折射系数越小,弯曲损耗越小。

### 参 考 文 献

- [1] Marcatili E A J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics. *Bell System Technical Journal*, 1969, **48**: 2071~ 2102
- [2] 范崇澄,彭吉虎. 导波光学. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 217~ 222
- [3] Lin W H, Li H F, Chen Y J *et al.*. Dual channel-spacing phased-array waveguide grating multi/demultiplexers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11): 1501~ 1503
- [4] Brotherton S D, Read T G, Lamb D R *et al.*. Surface charge and stress in the Si/SiO<sub>2</sub> system. *Solid State Electron.*, 1973, **16**(10): 1367~ 1375
- [5] Wildermuth E, Nadler C, Lanker M *et al.*. Penalty-free polarisation compensation of SiO<sub>2</sub>/Si arrayed waveguide grating wavelength multiplexers using stress release grooves. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(17): 1661~ 1662
- [6] Kawachi M, Takato N, Jinguji K *et al.*. Laser trimming adjustment of waveguide birefringence in silica integrated-optic ring resonators. *Proc. CLEO' 89*, 1989: 84~ 85
- [7] Yaffe H H, Henry C H, Kazarinov R F *et al.*. Polarization-independent silica-on-silicon Mach-Zehnder interferometers. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(1): 64~ 67
- [8] Marcatili E A J. Bends in optical dielectric guides. *Bell System Technical Journal*, 1969, **48**: 2103~ 2132

## Theoretical Analysis on Polarization Characteristics of Silicon-Based Silica Optical Waveguide Devices

Ou Haiyan Lei Hongbing Yang Qinqing Wang Hongjie Wang Qiming  
(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Hu Xiongwei

(National Research Center for Optoelectronic Technology, Beijing 100083)

(Received 7 June 1999; revised 6 September 1999)

**Abstract:** The influence of core size, relative refractive index difference, stress and bending radius of silicon-based silica waveguides on polarization was analyzed. Conclusions were drawn as below: the birefringence of square waveguide with small relative index difference is small. The birefringence caused by residual stress is larger than that by core size. Small bending radius causes high birefringence and loss, so large bending radius is preferred within the permission of chip size to reduce birefringence.

**Key words:** polarization; birefringence; silicon-based silica optical waveguide