

硅基二氧化硅波导和 SOI 脊型波导应力双折射研究

何忠蛟

(浙江工商大学信息与电子工程学院, 杭州 310035)

摘要 采用有限元方法分析了硅基二氧化硅波导和 SOI(Silicon on Insulator)脊型波导内部残留热应力引起的双折射. 对于硅基二氧化硅波导, 应力双折射系数的数量级为 10^{-4} , 对于上包层为空气的 SOI 脊型波导, 该系数的数量级为 10^{-5} , 对于上包层为 SiO_2 的 SOI 脊型波导, 该系数的数量级为 10^{-3} , 可见在硅基二氧化硅波导和上包层为 SiO_2 的 SOI 脊型波导中产生了大的应力双折射, 而在上包层为空气的 SOI 脊型波导中应力双折射较小.

关键词 光波导; 应力; 双折射; 有限元方法

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

硅基平面光波导有许多优点^[1]: 硅基底器件的插入损耗较低, 工艺简单, 成本低, 与光纤耦合效率高. SOI 材料的制作工艺更为成熟^[2], 顶层硅膜的厚度不受限制, 可以制作大截面尺寸的 SOI 波导^[3], 减小与光纤的耦合损耗. 然而, 硅与二氧化硅的热膨胀系数相差较大, 基底, 包层, 芯层热膨胀系数的不匹配会引起光波导中的应力. 由于弹光效应, 波导中的应力引起了双折射, 这样将导致光波导器件具有较明显的偏振相关性, 产生偏振模色散(PMD)对通信造成影响^[4]. 许多文献提出了可以通过调整波导器件中的应力来控制双折射的方法, 比如: 硅双折射补偿膜(Si-birefringence compensation)^[5], 应力硅膜(stress-applying silicon film)^[6], 二氧化硅基底(silica substrate)^[7], 应力释放槽(stress release groove)^[8], 以及调节上包层热膨胀系数(tuning the thermal expansion coefficient of the upper cladding layer)^[9]等. 一种估算应力的有效方法就是数值方法. 分析硅基二氧化硅波导应力分布的文献较多, 然而分析脊型光波导应力分布以及比较这两类波导应力双折射的文献比较少见. 本文采用有限元方法^[10]分析了两类光波导内部的残留热应力分布以及由此产生的折射率变化及近似的应力双折射系数, 并比较了这两类光波导中的应力双折射.

1 应力分析模型

1.1 硅基二氧化硅波导的应力分析模型

典型的硅基二氧化硅波导由四层组成: Si 基底(Substrate), 缓冲层(Buffer), 芯层(Core)和覆层

(Cladding), 图 1 为其波导的截面图, 芯层尺寸为 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$.

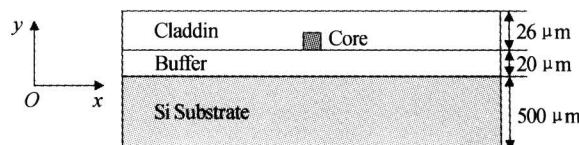


图 1 硅基二氧化硅波导横截面示意图
Fig. 1 The cross section of the silica waveguide on the silicon

对该波导结构作应力分析时, 可以认为应力分布对于通过芯层中心的垂直面是对称的, 这样在有限元分析时可以减少计算量. 对称面上的位移边界条件设定为沿 x 方向位移为 0, 计算窗口宽度为 $500 \mu\text{m}$. 在计算时用到的材料参量^[11,12]见表 1.

表 1 波导物理参量

Material region	E/GPa	μ	$\alpha/(10^{-6} \text{K}^{-1})$
Substrate	131	0.28	3.6
Buffer&Cladding	65	0.17	0.55
Core	70	0.17	1.35

表中 E 为杨氏弹性模量, μ 为泊松比, α 为热膨胀系数. 取温度变化为 1000°C , 即退火到室温时的温度变化量.

1.2 SOI 脊型波导的应力分析模型

SOI 脊型波导的结构如图 2.

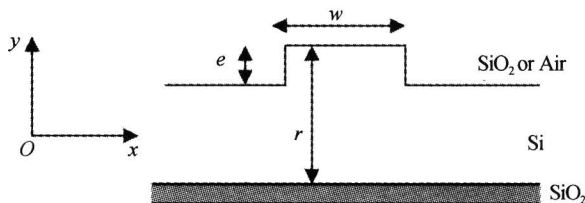


图 2 SOI 脊型波导结构
Fig. 2 The structure of the SOI rib waveguide

采用参考文献^[13]的单模结构参量: $r=4.32 \mu\text{m}$, $e=1.7 \mu\text{m}$, $w=2.73 \mu\text{m}$, SiO_2 埋层的厚度为 $0.398 \mu\text{m}$, Si 基底的厚度为 $500 \mu\text{m}$. 温度变化仍然取成

1000℃. 由于结构的对称性, 计算时可以只计算右半侧, 对称面上的位移边界条件设定为沿 x 方向位移为 0, 计算窗口宽度为 500 μm . 材料参量采用表 1 的数据. 其中 SiO_2 层的参量采用表 1 中 Buffer&Cladding 的数据.

2 计算结果

弹性力学^[14]给出了应力应变关系为

$$\epsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha T \quad (1)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha T \quad (2)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha T \quad (3)$$

为简单起见, 仅仅给出了 x, y, z 方向的应力应变关系. 其中 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 是沿 x, y, z 方向的应变, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 是沿 x, y, z 方向的应力.

应变与材料体内部位移场分布由几何方程联立:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5)$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

式中 u, v, w 分别是沿 x, y, z 方向的位移.

用有限元方法解决力学问题. 先对模型进行网格划分, 再把载荷(外力或温度变化)转化为节点载荷, 根据弹性力学中的虚功原理, 得到线性方程

$$Kq = P \quad (7)$$

式中 q 为待求位移场, K, P 分别为与模型结构和边界条件相关的矩阵、列向量. 从方程组可以解出节点的位移场, 根据式(4)~(6)可得到应变 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$, 再根据式(1)~(3)进一步得到应力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$.

当材料内部有应力存在时, 材料的折射率会产生变化^[15], 变化前后的折射率由下面的光弹效应方程给出

$$n_x = n_{x0}(x, y) - C_1\sigma_x(x, y) - C_2[\sigma_y(x, y) + \sigma_z(x, y)] \quad (8)$$

$$n_y = n_{y0}(x, y) - C_1\sigma_y(x, y) - C_2[\sigma_x(x, y) + \sigma_z(x, y)] \quad (9)$$

式中 $n_{x0}(x, y), n_{y0}(x, y)$ 是没有应力时的折射率; C_1, C_2 对于确定的材料是常量. 式(8), 式(9)是用应力来表示的光弹效应, 若用应变来表示, 则为

$$\Delta n_x = n_x - n_{x0} = -\frac{n_0^3}{2}\Delta B_1 = -\frac{n_0^3}{2}(\epsilon_{xx}p_{11} + \epsilon_{yy}p_{12}) \quad (10)$$

$$\Delta n_y = n_y - n_{y0} = -\frac{n_0^3}{2}\Delta B_2 = -\frac{n_0^3}{2}(\epsilon_{xx}p_{12} + \epsilon_{yy}p_{11}) \quad (11)$$

式中 p_{11}, p_{12} 是与材料相关的常量.

式(10), 式(11)没有出现纵向应变分量 ϵ_{zz} , 这是因为建立的应力分析模型是平面应变问题^[14], 对于这类问题 $\epsilon_{zz} = 0$. SiO_2 以及 Si 的光弹效应相关常量^[11,16,17]为

$$\text{SiO}_2: C_1 = 6.5 \times 10^{-7} \text{MPa}^{-1}, C_2 = 4.2 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1};$$

$$\text{Si}: p_{11} = -0.101, p_{12} = 0.0094.$$

由应力分析模型获得波导内部的应力场分布, 再根据式(8), 式(9)或者式(10), 式(11)就能得到波导折射率的变化情况.

2.1 硅基二氧化硅波导应力分析

根据式(8), 式(9)可以得到对应的折射率 $\Delta n_x, \Delta n_y$ 的分布, 图 3 给出了在 y 方向通过芯层中心的对称线上的折射率变化分布. 其中 $\text{DNX}, \text{DNY}; \text{DNX-DNY}$ 分别表示 $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_x - \Delta n_y$, 图 3 中横坐标表示离开硅基底顶端的距离(图 3, 图 5, 图 6 的横坐标单位为 μm). 用芯中心的 $\Delta n_x - \Delta n_y$ 近似应力双折射系数 B , 得 $B \approx \Delta n_x - \Delta n_y = -7.7132 \times 10^{-4}$.

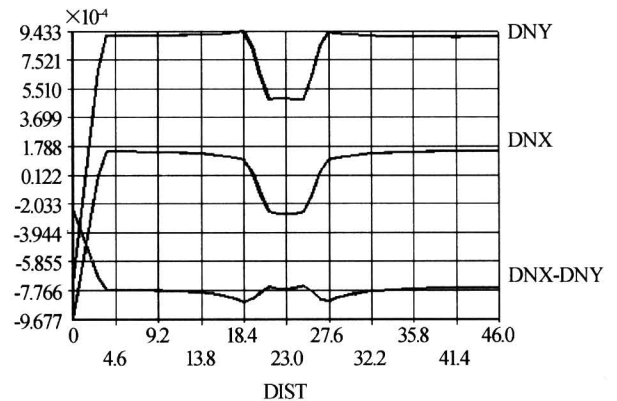


图 3 Δn 在 y 方向的分布

Fig. 3 Δn distribution in the direction of y

2.2 SOI 脊型波导应力分析

波导层(Si)对称面的折射率增量分布见图 4, 即沿着图 4 中的 AB.

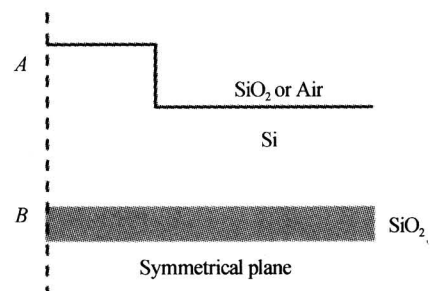


图 4 SOI 波导截面右半部分

Fig. 4 The right half of the SOI structure

图 5 给出了覆盖层为空气时折射率增量的分布图. 图 5 中 DIST=0 表示 B 点的纵坐标. 在 AB 中点 $\Delta n_x - \Delta n_y = 1.0135 \times 10^{-5}$, 即应力双折射系数 $B \approx 1.0135 \times 10^{-5}$.

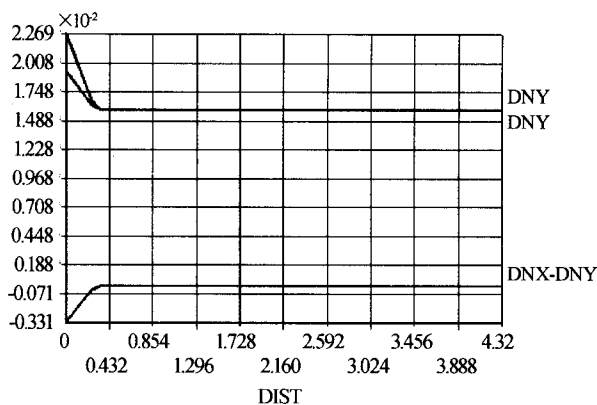


图 5 Δn 沿 AB 的分布

Fig. 5 Δn distribution through AB

图 6 给出了覆盖层为 SiO_2 时折射率增量的分布图. SiO_2 覆层与波导层 Si 总厚度为 $10 \mu\text{m}$ (Si 层的脊顶离开 SiO_2 覆层顶为 $5.68 \mu\text{m}$). 在 AB 中点 $\Delta n_x - \Delta n_y = 1.4347 \times 10^{-3}$, 即应力双折射系数 $B \approx 1.4347 \times 10^{-3}$.

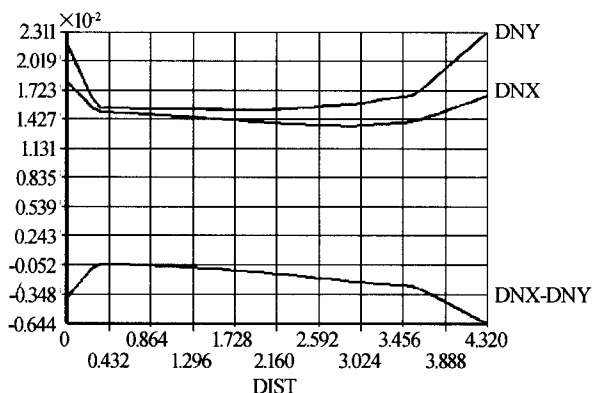


图 6 Δn 沿 AB 的分布

Fig. 6 Δn distribution through AB

3 结论

覆盖层为空气的 SOI 波导中应力双折射很小, 而硅基二氧化硅波导以及覆盖层为 SiO_2 的 SOI 波导中存在较大的应力双折射, 因而在这些器件中减小偏振相关性是非常重要的. 在本文的 SOI 波导 (覆层为 SiO_2) 计算实例中, 由于覆层 SiO_2 与波导层 Si 厚度相当, 因而在波导层产生了较大的应力, 与覆盖层为空气的 SOI 波导的分析结果比较可知减小覆层 SiO_2 的厚度可以减少波导层的应力从而减小双折射. 在本文中, 用波导中心的 $\Delta n_x - \Delta n_y$ 来近似应力双折射系数, 已经可以了解波导中应力双折射系数的范围. 准确的应力双折射系数的计算需要通过数值方法 (有限差分方法或者有限元方法

等) 求解各向异性介质波导本征值问题来获得, 这有待下一步的研究.

参考文献

- 1 吴远大, 张乐天. 硅基二氧化硅厚膜材料的快速生长. 光子学报, 2003, **32**(2): 195~198
Wu Y D, Zhang L T. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 195~198
- 2 Jalali B, Yegnanarayanan S, Yoon T. Advances in Silicon-on-Insulator optoelectronic. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, **4**(6): 938~947
- 3 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
Yang Q F, Yu J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 555~558
- 4 陈林, 张晓光, 张茹, 等. 偏振模色散对多信道光纤通信系统信号的影响. 光子学报, 2004, **33**(4): 443~447
Chen L, Zhang X G, Zhang R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 443~447
- 5 Takahashi H, Hibino Y, Ohmori Y, et al. Polarization-insensitive arrayed-waveguide wavelength multiplexer with birefringence compensating film. *IEEE Photon Technol Lett*, 1993, **5**(6): 707~709
- 6 Okuno M, Sugita A, Jinguji K, et al. Birefringence control of silica waveguides on Si and its application to a polarization-beam splitter/switch. *J Lightwave Technol*, 1994, **12**(4): 625~633
- 7 Suzuki S, Inoue Y, Ohomori Y. Polarization-insensitive arrayed waveguide grating multiplexer with SiO-on-SiO structure. *Electron Lett*, 1994, **30**(3): 642~643
- 8 Nadler C K, Wildermuth E K, Lanker M, et al. Polarization insensitivity, low-loss, low-crosstalk wavelength multiplexer modules. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 1999, **5**(10): 1407~1412
- 9 Ojha S M, Cureton C, Bricheno T, et al. Simple method of fabricating polarization-insensitive and very low crosstalk AWG grating devices. *Electron Lett*, 1998, **34**(1): 78~79
- 10 王勛成, 劭敏. 有限元法基本原理和数值方法. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1997. 38~88
Wang X C, Shao M. *Fundamental of finite element method and numerical method*. Beijing: Tsinghua Press, 2000. 38~88
- 11 杨沁清, 王红杰, 胡雄伟. 硅基二氧化硅波导的应力和偏振相关性的数值分析. 半导体学报, 2000, **23**(11): 1196~1200
Yang Q Q, Wang H J, Hu X W. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, **23**(11): 1196~1200
- 12 Kilian A, Kirchof J, Kuhlow B. Birefringence free planar optical waveguide made by Flame Hydrolysis Deposition (FHD) through tailoring of the overcladding. *Journal of Lightwave Technology*, 2000,

- 18(2);193~198
- 13 Rickman A G, Reed G T. Silicon-on-insulator optical rib waveguide: loss, mode characteristics, bends and y-junctions. *IEE Proc-Optoelectron*, 1994, **141**(6); 391~393
- 14 吴家龙. 弹性力学. 北京: 高等教育出版社, 2001. 277~298
Wu J L, Theory of elasticity. Beijing: Higher Education Press, 2001. 277~298
- 15 张霞, 黄永清, 任晓敏. 光纤光栅双折射效应的实验研究. 光子学报, 2005, **34**(2); 241~243
Zhang X, Huang Y Q, Ren X M. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2); 241~243
- 16 Yu L S, Guan Z F, Liu Q Z, *et al.* Silicon on insulator photo elastic optical waveguide and polarizer. *Appl Phys Lett*, 1995, **66**(16); 2016~2018
- 17 Lea E, Weiss B L. Modelling and characteristics of photoelastic waveguides in SiGe/Si heterostructures. *IEE Proc-Optoelectron*, 2000, **147**(2); 123~131

Analysis of Stress Birefringence for Silica Waveguide on Silicon and SOI Rib Waveguide

He Zhongjiao

Information and Electron Engineering College, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035

Received date: 2005-05-15

Abstract The birefringence originated from the residual stress of the silica waveguide on the silicon and the SOI (Silicon on Insulator) rib waveguide is analyzed using the finite element method. It is found that the coefficient of the stress birefringence is of the order of 10^{-4} for the silica waveguide on the silicon; the coefficient is of the order of 10^{-5} and 10^{-3} for the SOI rib waveguide covered by air and SiO_2 respectively. It can be seen that the large birefringence arise in the silica waveguide on the silicon and the SOI rib waveguide covered by the SiO_2 while there is small birefringence in the SOI rib waveguide covered by air.

Keywords Optical waveguide; Stress; Birefringence; Finite element method



He Zhongjiao was born in 1974, received Bachelor and master degree in Department of Optical Engineering, Zhejiang University. He is now a lecturer in Information and Electron Engineering College, Zhejiang Gongshang University. His main interests are the fiber communication technology.