

硅基二氧化硅波导的应力和偏振相关性的数值分析*

邓晓清 杨沁清 王红杰 胡雄伟 王启明

(中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083)

摘要: 使用有限元方法分析了硅基二氧化硅光波导的应力分布, 结果表明波导主要受横向压应力影响, 而且应力主要集中在芯区和包层的界面附近。根据波导的应力分布, 得出波导的折射率分布, 并使用 ADI 全矢量方法求解出波导的模式折射率。比较考虑应力和未考虑应力的波导模式折射率可以得出: 波导的双折射效应主要是由于波导应力引起的, 阵列波导光栅的偏振相关与中心波长的漂移是受阵列波导的应力分布的影响。

关键词: 有限元; 应力; 硅基二氧化硅波导; 双折射效应

EEACC: 6240D

中图分类号: TN 814⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)11-1196-05

1 前言

目前许多无源器件都采用硅基二氧化硅波导结构。硅基二氧化硅波导与其他类型的波导相比具有传输损耗小, 与光纤耦合损耗低, 工艺简单, 机械强度高, 物理和化学性能稳定, 可以与硅平面工艺相兼容等优点。但是由于硅衬底和二氧化硅膜的热膨胀系数相差较大, 二氧化硅薄膜受到的应力较大, 而且二氧化硅波导在两个正交方向所受到的应力大小不同, 由光弹性效应引起各个方向的折射率不同, 形成快轴与慢轴, 从而产生双折射效应。另外波导的几何因素也会产生双折射效应。

双折射效应对各种光波导器件会产生偏振色散和偏振噪音等不利影响, 因而分析二氧化硅波导中的应力分布对研究硅基二氧化硅波导器件的偏振特性具有重要意义。用解析方法求解二氧化硅波导的应力分布是非常复杂的, 而且精度也不能满足要求。有限元方法^[1~3]是求解偏微分方程的常用手段, 适用于求解波导应力集中问题。一些作者^[1,2]报道了使

用有限元方法求解光纤和波导的内部应力分布, 并求解出双折射参数, 但是还没有关于硅基二氧化硅波导尤其是低折射率差的硅基二氧化硅波导的应力分布的报道, 而且文献报道的双折射参数精度不够。本文用有限元方法分析了低折射率差的硅基二氧化硅波导的应力分布, 阐述了应力分布对硅基二氧化硅阵列波导光栅(AWG)偏振相关性能的影响, 并用 ADI 全矢量法求解出波导的模式折射率。

2 模型建立

AWG 的偏振相关主要是由于阵列波导在两个垂直方向所受到的应力大小不同, 引起两个方向的折射率变化不同, 因而阵列波导的 TE 模和 TM 模的传播速度不同, 聚焦在输出罗兰圆的不同位置上所造成的。因此研究器件偏振相关特性只需计算阵列波导的应力分布。下面以相对折射率差为 0.75%, 芯区尺寸为 $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ 的 SiO_2/Si 阵列波导光栅为例, 说明应力引起的偏振特性对 AWG 性能的影响。

* 国家自然科学基金(批准号: 69889701)和国家重点基础研究发展规划(No. G2000036602)资助项目

邓晓清 男, 1974 年出生, 博士研究生, 现从事硅基二氧化硅阵列波导光栅及其理论研究。

2002-02-26 收到, 2002-04-29 定稿

©2002 中国电子学会

相对折射率差为 0.75%, 芯区尺寸为 $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ 的二氧化硅波导在保证光完全约束在波导内的条件下, 波导下包层应大于 $20\mu\text{m}$, 上包层应大于 $30\mu\text{m}$. 波导结构如图 1 所示. 由于波导与硅片相比厚度要小得多, 而且芯区面积只占波导截面积的小部分, 因而可以认为波导应力问题是应力集中问题, 要满足计算精度, 计算窗口不应取得过大. 在阵列波导部分波导数目较多, 而且是周期排列, 可以认为各根阵列波导的受力是相同的, 因而只需计算一根波导的应力分布. 利用阵列波导的周期性, 取波导中心和相邻两波导的间隔中心为两个对称面, 可以大大减小计算窗口的尺寸. 计算窗口大小为 $12.5\mu\text{m} \times 556\mu\text{m}$. 在两对称面左右, 应力分布是对称的.

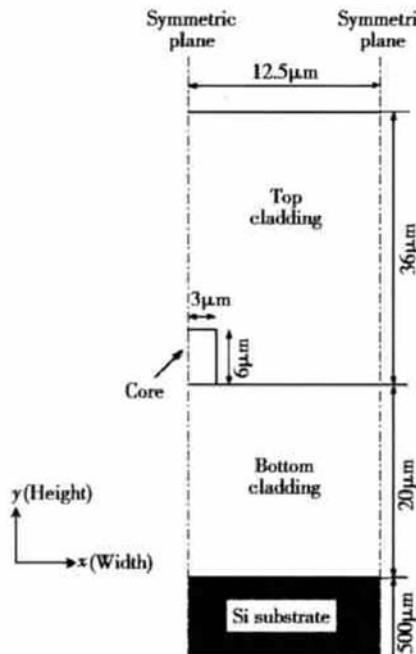


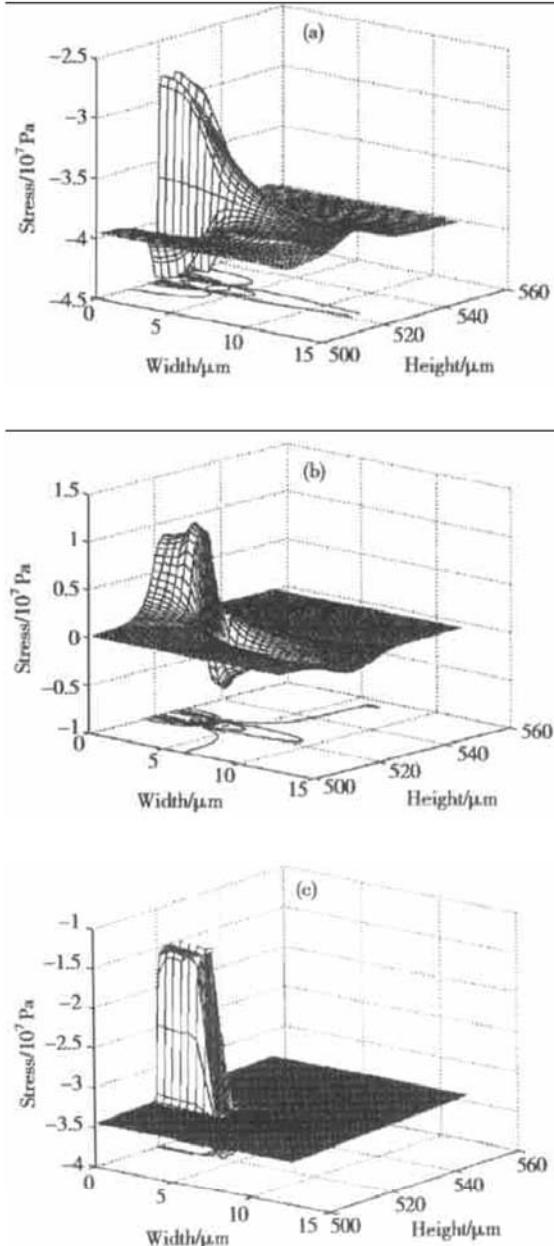
图 1 波导结构简图

Fig. 1 Diagram of SiO_2/Si waveguide structure

波导结构中的应力是由于硅衬底、各二氧化硅层的热膨胀系数不一样造成的, 而且大部分应力是由于硅衬底和二氧化硅层的热膨胀系数相差较大引起的. 在本计算中, 上下包层的折射率和热膨胀系数取为相等, 分别为 1.444 和 0.55×10^{-6} ; 由于芯区与包层的掺杂量不同, 其热膨胀系数与包层的不同, 取热膨胀系数 1.35×10^{-6} ; 硅衬底的热膨胀系数取 2.33×10^{-6} . 硅衬底泊松比为 0.28, 二氧化硅材料泊松比为 0.17. 温度变化范围是从二氧化硅薄膜淀积温度 300°C 冷却到室温 30°C .

3 应力分析

二氧化硅波导应力分布如图 2 所示. 从图中可以看出各波导层在 x 方向受压应力, 这是由于硅衬底热膨胀系数大于二氧化硅层热膨胀系数, 在冷却过程中挤压二氧化硅层引起的. 从图 2(a) 中可以看出在芯区内部 x 方向的压应力要小于包层内部的

图 2 硅基二氧化硅波导应力分布图 (a) x 方向受力图; (b) y 方向受力图; (c) z 方向受力图Fig. 2 Stress distribution in SiO_2/Si waveguide
(a) Stress in the x direction; (b) Stress in the y direction; (c) Stress in the z direction

压应力, 在上下界面 x 方向的应力分布是非连续的, 而在芯区的右界面上 x 方向应力分布是连续的。这是由于在计算应力时, 取上下包层的热膨胀系数小于芯区的热膨胀系数, 芯区延 x 方向的收缩量大于包层的收缩量, 受包层的横向拉伸作用, 这部分力部分地抵消了硅衬底与二氧化硅层热膨胀系数失配所产生的压应力, 因而芯区内部的压应力小于波导其他地方的压应力。对于包层, 不同位置受力情况不同。在上下界面, 包层不仅要受到硅衬底的横向挤压作用, 而且还要受到芯区横向收缩对它的挤压作用, 因而在上下界面上包层的压应力最大。而在右界面, 包层虽然受到硅衬底的挤压作用, 但同时还受到芯区收缩对它的横向拉伸作用, 这两部分力相互抵消。在右界面包层的收缩量与芯区的收缩量相同, 因而在右界面两边应力大小相等, 应力分布连续。从图 2(b)可以看出在芯区的右界面 y 方向的应力分布也是突变的, 而在上下表面是连续的。由于硅衬底沿 y 方向可以自由收缩, 二氧化硅层对其 y 方向的应力分布不起作用, 因而二氧化硅波导层内的 y 方向应力主要来源于芯区与包层之间热膨胀系数的失配, 硅衬底对二氧化硅波导内部的 y 方向应力分布不起作用, 在图中表现为在远离芯区的波导层内 y 方向应力为零。芯区右界面附近的 y 方向应力分布与芯区上下界面附近的 x 方向应力分布相类似; 上下界面附近的 y 方向应力分布与右界面附近的 x 方向应力分布相类似, 在此不作具体分析。图 2(c)是波导在 z 方向的受力分布图, 从图中可以看出波导在 z 方向同样受压应力作用。另外从应力分布图分析可得, 在宽度为 $12.5\mu\text{m}$ 的对称面上, 还是存在一定的应力, 这说明波导之间存在应力。

4 偏振相关性分析

从以上结果可知, 在波导结构中, 尤其是在芯区与包层界面附近存在应力集中, 根据光弹性理论, 芯区和包层的折射率要发生变化, 变化量主要与波导在两个正交方向上受力大小有关。由于波导结构的应力分布不是均匀分布, 这必然导致折射率分布也不是均匀分布。因而不能用解析方法求解波导模式。目前大量文献报道了求解折射率非均匀分布波导模式的方法, 其中较为有效的方法是有限差分方法^[4-6]。由于考虑应力分布后的波导折射率不是均匀分布的, 因而在用有限差分方法求解模式时需要

考虑各格点之间的界面条件。由于电场矢量的垂直分量在界面是突变的, 对于非磁性物质, 由于磁导率 $\mu_1 = \mu_2$, 因而在界面两边磁场矢量无论是切向分量还是法向分量都是连续的, 所以在用有限差分方法求解亥姆赫兹方程时用磁场矢量计算更为方便, 具体解法可参考文献[7]。

为了求解出波导的模式, 首先需要根据应力分布计算出波导的折射率分布^[8]。波导在应力作用下, x 、 y 和 z 方向的折射率变化量可通过以下公式计算:

$$\Delta n_x = n_x - n = -B_2\sigma_x - B_1(\sigma_y + \sigma_z) \quad (1)$$

$$\Delta n_y = n_y - n = -B_2\sigma_y - B_1(\sigma_x + \sigma_z) \quad (2)$$

$$\Delta n_z = n_z - n = -B_2\sigma_z - B_1(\sigma_x + \sigma_y) \quad (3)$$

$$\Delta n_x - \Delta n_y = -(B_2 - B_1)(\sigma_x - \sigma_y) \quad (4)$$

对于石英材料, $B_1 = 4.2 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ 及 $B_2 = 6.5 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ 。设定光波沿 z 方向传播, 因而只需计算波导 x 方向和 y 方向的折射率分布。从公式(4)可得, 波导的偏振相关主要与 x 和 y 方向的受力有关, z 方向的受力对波导的偏振相关影响较小。

为了说明波导中的应力对波导器件的影响, 需要比较未考虑应力时的模式折射率和考虑应力后的模式折射率。由于计算应力分布时, 采用的计算窗口的宽度是 $12.5\mu\text{m}$, 这会导致在计算波导模式时产生过大的误差, 因而需要扩展计算窗口宽度。在满足计算精度的前提下, 模式计算窗口的大小取为 $40\mu\text{m} \times 56\mu\text{m}$ 。在未考虑应力分布的情况下, 用全矢量 ADI 计算方法计算出的 TE 模模式折射率为 1.4498567, TM 模模式折射率为 1.44985547。双折射参数 $\Delta n_{\text{TE-TM}}$ 为 1.2×10^{-6} 。在考虑应力分布的情况下, 用同样的计算参数计算出的 TE 模的折射率为 1.45008959, TM 模的折射率为 1.45023543, 双折射参数 $\Delta n_{\text{TE-TM}}$ 为 -1.5×10^{-4} 。阵列波导光栅方程为^[9]:

$$dn_s \sin \theta = dn_s \sin \theta_0 + n_e \Delta L = m \lambda \quad (5)$$

式中 d 是阵列波导间距; n_s 是平板波导的有效折射率; θ 和 θ_0 分别是输入和输出罗兰圆的衍射角; n_e 是阵列波导的有效折射率; ΔL 是相邻阵列波导的长度差; m 是衍射级数; λ 是工作波长。当 AWG 的中心波长从中心输入波导输入时, θ 和 θ_0 分别为零。对于普通 AWG ΔL 大约为几十 μm , 衍射级数 m 约为几十, 根据(5)式可以计算出二氧化硅 AWG 偏振相关系数约为 0.2nm, 这与文献[10, 11]报道的实验数据相吻合。另外与未考虑应力的双折射参数

相比,考虑应力后的双折射参数要大得多。这说明波导的双折射效应主要与波导内部的应力分布有关。因而要改善波导的双折射效应,应尽可能减小波导的内部应力。另外比较这两种情况下的模式折射率,可以得出波导的模式折射率由于应力的存在而发生变化。由于波导主要受到压应力的作用,芯区和包层的折射率都会增加,TE 和 TM 模的模式折射率都会增大。因而阵列波导光栅的中心波长的漂移与器件中的应力分布有一定关系。同样根据光栅方程可以计算出实际波长要比设计波长长 0.2nm 左右。

5 结论

波导结构的应力分布可以使用有限元方法求解,尤其适用于求解波导结构中的应力集中问题。与其他方法相比,这种方法具有精度较高、通用性强等优点,可以求解复杂结构的应力问题。通过结果分析可知,波导内部尤其是芯区和包层的界面附近存在应力集中;相邻两波导之间存在较大的应力分布;各波导层在两正交方向受力不等,主要是受水平方向的压应力,这是导致波导器件双折射效应的主要原因;波导的应力分布不仅对波导的双折射效应起作用,还可以增大波导的模式折射率,对阵列波导光栅的中心波长的漂移有一定的影响。

参考文献

- [1] Okamoto K, Hosaka T, Edahiro T. Stress analysis of optical fibers by a finite element method. IEEE J Quantum Electron, 1981, 17: 2123
- [2] Saitoh K, Koshiba M, Tsuji Y. Stress analysis method for elastically anisotropic material based optical waveguides and its application to stain-induced optical waveguides. J Lightwave Technol, 1999, 17: 255
- [3] Wang Xucheng, Shao Min. Basic principle and numerical methods in finite elements method. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2000(in Chinese) [王勣成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2000]
- [4] Lusse P, Stuwe P, Schule J, et al. Analysis of vectorial mode fields in optical waveguides by a new finite difference method. J Lightwave Technol, 1994, 12: 487
- [5] Kim C M, Ramaswamy R V. Modeling of graded-index channel waveguides using nonuniform finite difference method. J Lightwave Technol, 1989, 7: 1581
- [6] Shulz N, Bierwirth K, Arndt F. Finite difference analysis of integrated optical waveguides without spurious mode solution. Electron Lett, 1986, 22: 963
- [7] Ronald Hadley G, Smith R E. Full-vector waveguide modeling using an iterative finite-difference method with transparent boundary conditions. J Lightwave Technol, 1995, 13: 465
- [8] Scherer G W. Stress-induced index profile distortions in optical waveguides. Appl Opt, 1980, 19(12): 2000
- [9] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang Qingqing, et al. Simple method for designing 1×8 arrayed-waveguide grating multi/demultiplexers. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(8): 798 (in Chinese) [欧海燕, 雷红兵, 杨沁清, 等. 1×8 波导阵列光栅波分复用/解复用器设计的一种简单方法. 半导体学报, 2000, 21(8): 798]
- [10] Wildermuth E, Nadler Ch, Lanker M, et al. Penalty-free polarization compensation of SiO₂/Si arrayed waveguide grating wavelength multiplexers using stress release grooves. Electron Lett, 1998, 34: 1661
- [11] 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: 78

Stress Analysis of Silica Optical Waveguide on Silicon by a Finite Element Method*

Deng Xiaoqing, Yang Qinling, Wang Hongjie, Hu Xiongwei and Wang Qiming

(R & D Center of Optoelectronics, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Stress distribution in silicon-based silica optical waveguide is calculated by using a finite element method. The waveguide is mainly subjected to compress stress along lateral direction, and the stress is accumulated near the interface between the core and the cladding layers. With the stress distribution, the mode index is calculated by the finite-difference solution for the full-vector waveguide equation based upon the alternating-direction-implicit (ADI) iterative method. The birefringence of the waveguide is mainly the stress-induced birefringence, and the mode index is larger than that without considering the stress effect.

Key words: finite element method; stress; silica optical waveguide on silicon; birefringence

EEACC: 6240D

Article ID: 0253-4177(2002)11-1196-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 69889701), and National Key Basic R&D Plan of China (G2000036602)

Deng Xiaoqing male, was born in 1974, PhD candidate. His research interest lies in silica optical waveguide on silicon.

Received 26 February 2002, revised manuscript received 29 April 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics