

# SiO<sub>2</sub>/Si 波导应力双折射数值分析\*

安俊明<sup>1,2</sup> 班士良<sup>1</sup> 梁希侠<sup>1</sup> 李 健<sup>2</sup> 郜定山<sup>2</sup>  
夏君磊<sup>2</sup> 李健光<sup>2</sup> 王红杰<sup>2</sup> 胡雄伟<sup>2</sup>

(1 内蒙古大学物理系, 呼和浩特 010021)

(2 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:** 采用有限元法对 SiO<sub>2</sub>/Si 掩埋光波导制备工艺中的应力变化进行了系统的分析,在此基础上,应用有限差分束传播法(FDBPM)对应力光波导的双折射进行了计算.结果表明上包层的玻璃化过程是 SiO<sub>2</sub>/Si 波导形成水平方向和垂直方向应力差的主要原因,相应的应力双折射系数 B 在 10<sup>-4</sup>量级.进一步的分析表明上包层 B,P 重掺杂可明显减小波导的双折射系数.

**关键词:** SiO<sub>2</sub>/Si; 波导; 应力; 双折射; 数值分析

EEACC: 4130; 6240D

中图分类号: TN814<sup>+</sup>.6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)07-1454-05

## 1 引言

全球通信容量的迅猛增加促进了全光通信网络的发展.密集波分复用/解复用(DWDM)技术是光网络系统中的关键技术之一. SiO<sub>2</sub>/Si 阵列波导光栅(AWG)作为 DWDM 关键器件之一,由于其损耗小、工艺稳定并与现代硅工艺兼容而受到研究者的青睐<sup>[1,2]</sup>.然而用火焰水解法(FHD)制备二氧化硅波导时,需在高温下进行玻璃化处理,由于硅衬底与二氧化硅波导间的热膨胀系数相差较大,高温处理后在波导中有残余的非对称热应力,由弹光效应引起波导的应力双折射,使硅基二氧化硅 AWG 存在较大的偏振相关波长(PDW).目前对 SiO<sub>2</sub>/Si 波导偏振相关补偿的方法已有报道<sup>[3,4]</sup>,但对波导制备工艺中应力分布的物理图像及其对双折射影响分析较少.

本文采用有限元方法建立了 SiO<sub>2</sub>/Si 波导应力分析的物理模型,研究了波导制备工艺中三个关键步骤对波导应力分布的影响.其次用 FDBPM 法求解波导两个偏振状态下的模式折射率,同时计算了

上包层 B,P 重掺对双折射系数的影响.

## 2 模型的建立

### 2.1 应力分析模型

SiO<sub>2</sub>/Si 波导制备简易流程如图 1 所示,首先是下包层与芯层的连续玻璃化;接着用反应离子刻蚀法(RIE)刻蚀波导芯区;最后进行上包层的玻璃化,完成波导的制备.下面将对这三步中 SiO<sub>2</sub>/Si 波导应力分布变化进行计算.

对波导的应力计算采用有限元方法(FEM),计算参数硅衬底、二氧化硅下包层、芯层和上包层的热膨胀系数、泊松比和杨氏模量 E 见表 1<sup>[5]</sup>,其中 Si 衬底的晶向为(100),二氧化硅的包层参数为纯石英玻璃的参数,而芯层参数考虑到 Ge 的掺杂稍有增大.实际的硅衬底为 100mm 或更大,这么大的尺寸在划分单元格点时需占用很大的内存,在一般的计算机上甚至无法实现,为此将模拟尺寸减小为 2000μm 宽、衬底厚度 500μm、下包层厚度 15μm、芯层 6μm、上包层 21μm.

\*国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000036602)和国家自然科学基金(批准号:69889701)资助项目

安俊明 男,1969 年出生,博士,从事硅基二氧化硅阵列波导光栅的设计与制备.

2004-10-15 收到,2004-12-08 定稿

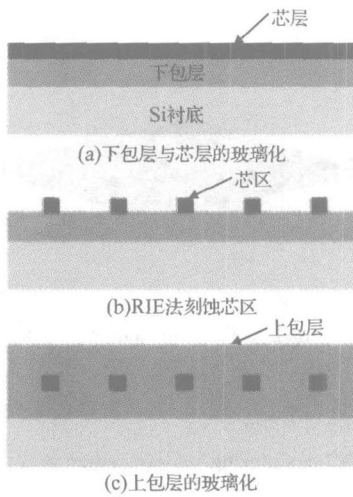


图 1 应力分析模型

Fig. 1 Model for stress analysis

表 1 硅衬底及二氧化硅包层、芯层的热膨胀系数、泊松比和杨氏模量  $E$

Table 1 Young's modulus ( $E$ ), thermal expansion coefficient ( $\alpha$ ) and Poisson's ratio ( $\nu$ ) for Si, SiO<sub>2</sub> cladding and core

参数	Si(100)	SiO <sub>2</sub> cladding	SiO <sub>2</sub> core
$E/10^9 \text{ Pa}$	131	65	70
$\nu$	0.28	0.17	0.2
$\alpha/10^{-6} \text{ K}^{-1}$	3.6	0.5	1.2

工艺中第二、三步应力计算时,取五条波导进行模拟,波导间距为 25 $\mu\text{m}$ ,以满足波导的解耦合要求.另每步工艺中粉末 SiO<sub>2</sub> 的烧结过程为从 1100 降到室温;左右边界取自由收缩边界条件.

### 2.2 模式折射率计算模型

用有限元方法得到波导的应力分布后,折射率变化与应力的关系为<sup>[6]</sup>:

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

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

$$n_x - n_y = -(B_2 - B_1)(\sigma_x - \sigma_y) \quad (3)$$

式中  $n$  为无应力时的折射率; $n_x, n_y$  是沿  $x, y, z$  分别为 SiO<sub>2</sub> 在  $x, y, z$  方向的应力分布,其中  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  方向分别对应图 1 中的水平、垂直和径向方向; $B_1, B_2$  为弹光系数,对 SiO<sub>2</sub> 材料,  $B_1 = 4.2 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ ,  $B_2 = 6.5 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ ,由(3)式可知在平行和垂直于硅衬底方向上的应力差将决定 TE 模与 TM 模的模式折射率差.为保证波导单模存在,在折射率差为 0.75% 的波导中,包层和芯区折射率分别取

1.444, 1.45483.

准 TE, TM 模模场及模式折射率服从亥姆霍兹方程:

$$\nabla^2 E^x + (k^2 - n_{\text{eff}}^2) E^x = 0 \quad (4)$$

$$\nabla^2 E^y + (k^2 - n_{\text{eff}}^2) E^y = 0 \quad (5)$$

其中  $n_{\text{eff}}$  分别为介电常数和模式折射率.对该方程求解采用有限差分 ADI 迭代法<sup>[7]</sup>,边界采用透明边界条件处理,差分离散方程中的  $n_{\text{eff}}$  用下式迭代更新,直到满足所设定的误差,即可得到所求的模场及模式折射率:

$$n_{\text{TE, TM}}^2 = \frac{\iint E^* (\nabla^2 + k^2) E dA}{\iint E^* E dA} \quad (6)$$

双折射系数  $B$  为:

$$B = n_{\text{TM}} - n_{\text{TE}} \quad (7)$$

## 3 模拟结果及讨论

### 3.1 分步模拟应力分布

图 2 为连续生长下包层和芯层玻璃化后的应力分布,在水平方向下包层与芯层均受到压应力,其值为负;而在垂直方向是不受任何约束,无应力存在.

图 3 为刻蚀芯区后的应力分布,由于在芯区侧向的芯层被刻蚀掉,在水平方向芯层受到的压应力被释放,而在垂直方向仍不受应力作用.

图 4(a), (b) 分别是生长上包层后阵列波导在水平与垂直方向的应力分布,可以看出每条波导的应力分布是一致的.由图 4(a) 可知,由于模型中 Si 衬底的热膨胀系数大于整个包层的热膨胀系数,在高温玻璃化过程中, Si 衬底的收缩量要大于整个包层的收缩量,包层沿水平方向的应力为负,是压应力,数量级在 10<sup>7</sup> Pa.在模型中芯区的热膨胀系数大于包层的热膨胀系数,所以芯区中的压应力小于包层的压应力,且在芯区与上、下包层的交界处应力分布是不连续的;芯区侧面与包层交界处应力分布是连续的;同时由于相邻芯区在侧向对包层的拉力作用,使芯区侧向包层所受压应力较小.由图 4(b) 可知,在垂直方向的应力不受 Si 衬底的影响,主要由芯区与包层的热膨胀系数决定,由于芯区的热膨胀系数大于包层的热膨胀系数,芯区中所受应力为正,表现为张应力,包层中与芯区侧面交界处应力为负,表现为压应力,在远离芯区时包层压应力逐渐减小;比较图 4(a), (b) 可知在水平、垂直方向存在较大的应力差.

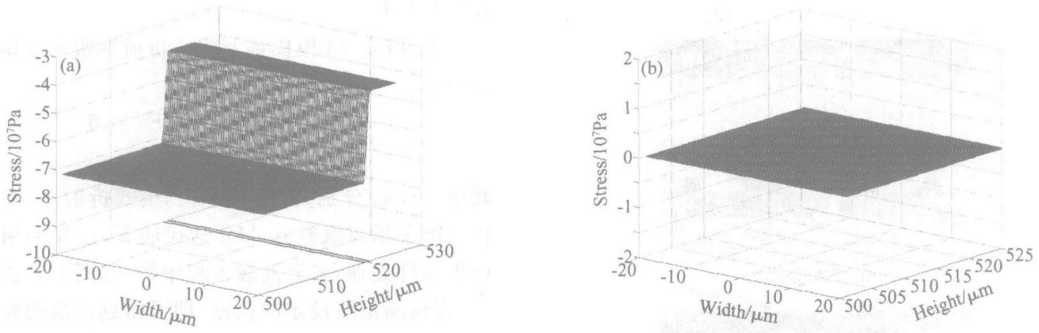


图 2 下包层与芯层玻璃化后的水平(a)与垂直(b)方向应力分布

2. Stress distributions along horizontal (a) and vertical (b) directions after sintering undercladding and core layers

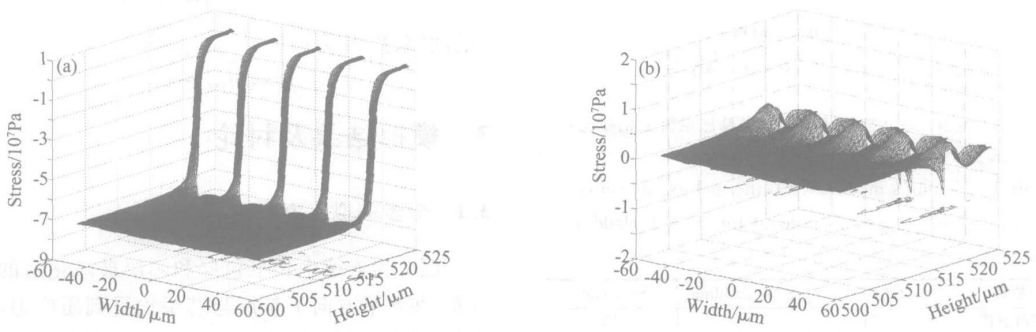


图 3 刻蚀芯区后的水平(a)与垂直(b)方向应力分布

Fig. 3 Stress distributions along horizontal (a) and vertical (b) directions after etching cores

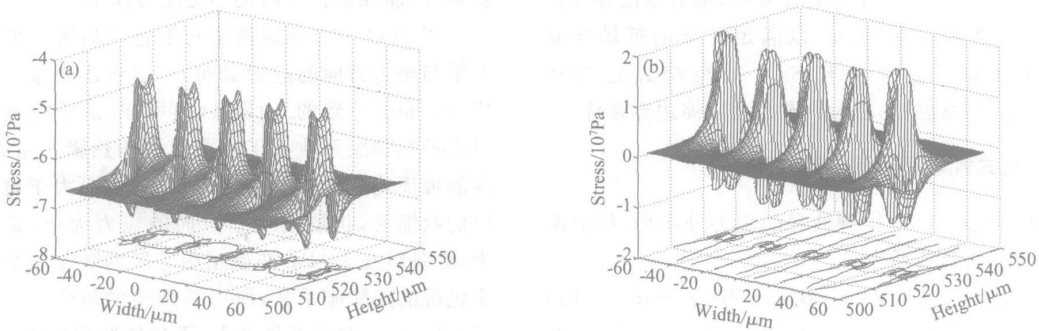


图 4 上包层玻璃化后的芯区水平(a)与垂直(b)方向应力分布

Fig. 4 Stress distributions along horizontal (a) and vertical (b) directions after sintering overcladding layer

### 3.2 上包层热膨胀系数对波导应力分布的影响

通过上面分析制备 SiO<sub>2</sub>/Si 波导的关键工艺,可知上包层的玻璃化是形成波导水平与垂直方向应力差的主要因素.因此,在实际 SiO<sub>2</sub>/Si 波导制备工艺中,通过控制 B、P 的掺杂剂量,可改变上包层的

热膨胀系数,进而控制波导在水平与垂直方向上的应力差<sup>[8]</sup>.图 5 给出了将上包层的热膨胀系数调整为  $2.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,而其他参数不变时的水平和垂直方向的应力分布.由图可知增加上包层的热膨胀系数时,在水平方向下包层与芯区仍受压应力作用;而在垂直方向芯区受力由张应力变为压应力.与图

4(a), (b) 相比较, 上包层重掺 B, P 可以明显减小 SiO<sub>2</sub>/ Si 波导在水平与垂直方向应力差。

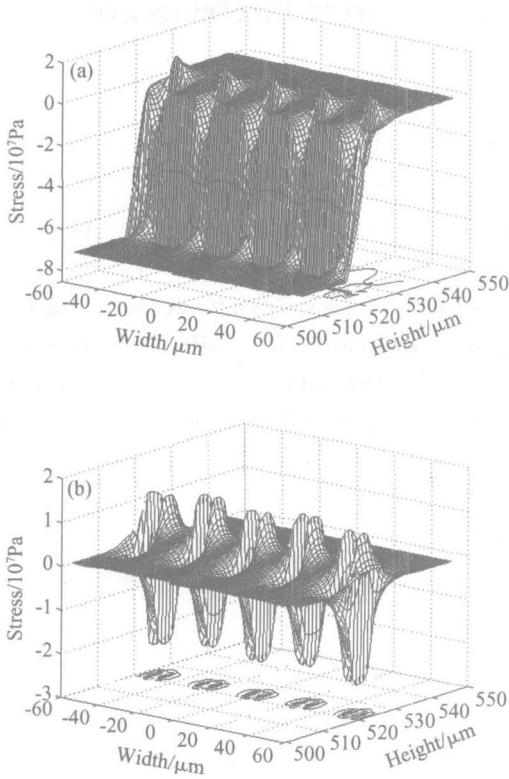


图 5 改变上包层热膨胀系数后芯区处水平(a)和垂直(b)方向的应力

Fig. 5 Stress distributions along horizontal (a) and vertical (b) directions near core after adjusting overcladding thermal expansion coefficient

### 3.3 模式折射率计算结果及讨论

对常规的 SiO<sub>2</sub>/ Si 波导的应力双折射系数与上包层 B, P 重掺波导的应力双折射系数进行计算, 如表 2 所示, 常规的 SiO<sub>2</sub>/ Si 波导存在较大的应力双折射系数, 为  $2.32 \times 10^{-4}$ , 这样的波导用于制备 AWG 时, 将会使 AWG 的偏振相关波长达 0.2nm, 使器件无法使用。而采用上包层 B, P 重掺时, 双折射系数仅为  $0.13 \times 10^{-4}$ , 相应的 AWG 偏振相关波长约为 0.01nm, 远远满足商用 AWG 的要求。因此,

表 2 常规 SiO<sub>2</sub>/ Si 与上包层重掺 B, P 波导双折射系数比较

Table 2 Birefringence comparison of conventional and dopant rich B, P in overcladding SiO<sub>2</sub>/ Si waveguides

折射系数	常规	重掺 B, P
$n_{TM}$	1.450	1.450736
$n_{TE}$	1.450	1.450723
$B$	$2.32 \times 10^{-4}$	$0.13 \times 10^{-4}$

在制备 SiO<sub>2</sub>/ Si AWG 时, 采用上包层重掺 B, P 减小偏振相关波长是非常有效的, 这与文献[8]中的结果相一致。

## 4 结论

系统分析了 FHD 法制备 SiO<sub>2</sub>/ Si 波导工艺中的热应力变化及其对波导双折射的影响。结果表明制备工艺中, 芯层经过压应力、应力释放到最终形成压应力的过程, 其中上包层玻璃化过程是形成波导应力差及双折射的主要原因。重掺 B, P 使上包层热膨胀系数增大, 可平衡波导在水平与垂直方向的应力差, 抑制 SiO<sub>2</sub>/ Si 波导的双折射效应, 进而可制备偏振无关的 AWG。

## 参考文献

[ 1 ] Okamoto K, Takahashi K, Ohmori Y. Fabrication of 128-channel arrayed-waveguide grating multiplexer with 25 GHz channel spacing. *Electron Lett*, 1996, 32(8) :1474

[ 2 ] Hibino Y. Recent advances in high-density and large-scale AWG Muli/Demulti-plexers with higher index-contrast silica-based PLCs. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2002, 8(6) :1090

[ 3 ] Inoue Y, Takahashi H, Ando S, et al. Elimination of polarization sensitivity in silica-based wavelength division multiplexer using a polyimide half waveplate. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(10) :1974

[ 4 ] Inoue Y, Itoh M, Hibino Y, et al. Novel birefringence compensating AWG design. *Optical Society of America*, 2000, WB4-1

[ 5 ] Wortman J J, Evans R A. Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio in silicon and germanium. *J Appl Phys*, 1965, 36(1) :153

[ 6 ] Deng Xiaoqing, Yang Qinqing, Wang Hongjie, et al. Stress analysis of silica optical waveguide on silicon by a finite element method. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(11) :1196(in Chinese) [ 邓晓清, 杨沁清, 王红杰, 等. 硅基二氧化硅波导的应力和偏振相关的数值分析. *半导体学报*, 2002, 23(11) :1196]

[ 7 ] Hadley G R, Smith R E. Full-vector waveguide modeling using an iterative finite-difference method with transparent boundary conditions. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(3) :465

[ 8 ] Kilian A, Kirchoff J, Kuhlow B, et al. Birefringence free planar optical waveguide made by flame hydrolysis deposition (FHD) through tailoring of the overcladding. *J Lightwave Technol*, 2000, 18(2) :193

## Numerical Analysis for a SiO<sub>2</sub>/ Si Waveguide Stress-Birefringence \*

An Junming<sup>1,2</sup>, Ban Shiliang<sup>1</sup>, Liang Xixia<sup>1</sup>, Li Jian<sup>2</sup>, Gao Dingshan<sup>2</sup>,  
Xia Junlei<sup>2</sup>, Li Jianguang<sup>2</sup>, Wang Hongjie<sup>2</sup>, and Hu Xiongwei<sup>2</sup>

(1 Department of Physics, Inner Mongolian University, Huhhot 010021, China)

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

**Abstract :** The stress distribution of a SiO<sub>2</sub>/ Si waveguide during different sintering step is analyzed theoretically using the finite element method. At the same time, the birefringence of the waveguide is also analyzed by the finite difference beam propagation method (FDBPM). The results show that the reasoning for the formation of the stress difference between the horizontal and vertical direction lies mainly in the overcladding sintering. The corresponding birefringence index is about  $10^{-4}$ , which can be effectively reduced by depositing rich B and P in the overcladding.

**Key words :** SiO<sub>2</sub>/ Si; waveguide; stress; birefringence; numerical analysis

**EEACC :** 4130; 6240D

**Article ID :** 0253-4177(2005)07-1454-05

---

\* Project supported by the State Key Program for Basic Research of China (No. G2000036602) and the National Natural Science Foundation of China (No. 69889701)

An Junming male, was born in 1969, PhD. His research interest lies in silica based AWG design and fabrication.

Received 15 October 2004, revised manuscript received 8 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics