

SiON 对 Si 基 SiO₂ AWG 偏振补偿的数值分析*

安俊明^{1,2} 鄢定山¹ 李健¹ 李建光¹ 王红杰¹ 胡雄伟¹

(1 中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083)

(2 内蒙古大学物理系, 呼和浩特 010021)

摘要: 采用全矢量交替方向隐含迭代方法系统分析了高折射率SiON 薄膜对Si 基SiO₂阵列波导光栅中波导应力双折射的影响。分析结果表明在芯区上或下表面沉积SiON 薄膜可以明显减小Si 基SiO₂阵列波导光栅(AWG) 中波导的应力双折射, 但这两种补偿方法容易使模场偏移中心位置, 不利于波导与光纤的耦合。理想的补偿方法是在芯区上下同时补偿, 可减小模场偏移, 并用该方法设计了偏振无关的16通道AWG。

关键词: SiON 薄膜; Si 基 SiO₂ 波导; 应力; 双折射; 阵列波导光栅; 偏振补偿

EEACC: 4130

中图分类号: TN814⁺.6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)07-0858-05

1 引言

Si 基 SiO₂ 阵列波导光栅(AWG) 作为光网络中 DWDM 技术的关键器件, 由于其损耗小、工艺稳定并与现代硅工艺兼容而成为研究的热点^[1,2]。该器件材料的制备常采用火焰水解法(FHD), 该方法沉积速率快、工艺稳定, 与 PECVD 法相比, 更易于大规模生产。但 FHD 法制备 SiO₂ 波导时, 需在高温下进行玻璃化处理, 由于 Si 衬底和 SiO₂ 的热膨胀系数相差较大, 高温处理后在波导平行和垂直于 Si 衬底两方向存在非对称热应力, 进而由光弹效应产生应力双折射现象, 使 Si 基 SiO₂ AWG 存在约 0.2~0.4 nm 偏振相关波长(PDW)。作为实用的 AWG 器件应是偏振不灵敏的, 其波导的双折射系数应降到 10⁻⁵ 量级, PDW 应减小到 0.05 nm 以下。目前对 Si 基 SiO₂ AWG 偏振相关补偿的方法有沉积非晶硅薄膜法, 插入半波片法, 应力释放槽法, 上包层重掺杂 B、P 法, 不同宽度的波导混合集成法等^[3~7]。Worhoff 报道了用 LPCVD 法生长高折射率 Si₃N₄ 作补偿层, PECVD 法生长 3 μm × 3 μm 低折射率 SiON 作芯区的双芯区方法减小波导的双折射效应^[8]。本文以此

为基础, 设计了用 PECVD 法生长高折射率 SiON 补偿层, FHD 法快速生长 GeO₂-SiO₂ 6 μm × 6 μm 芯区的双芯区补偿方法, 采用全矢量 ADI 方法分析了 SiON 补偿层对应力作用下的相对折射率差为 0.75% 的波导双折射和模场偏移的影响, 并提出在芯区上、下表面同时补偿的方法来改善模场偏移; 最后给出了经优化 SiON 补偿层后的 16 通道 AWG 中心波长处的频谱图, 对设计 Si 基 SiO₂ AWG 偏振无关具有指导意义。

2 理论模型

Si 基 SiO₂ 波导应力分析和折射率计算模型如图 1 所示。首先在 Si 衬底上热氧化下包层, FHD 法生长芯区和上包层, 其中生长芯区时掺杂适量的 Ge, 形成相对折射率差为 0.75% 的 GeO₂-SiO₂ 芯区, 生长上包层时掺杂 B、P 来降低玻璃化温度, 芯区的上或下方的 SiON 补偿层采用 PECVD 法生长。应力分析及材料折射率的计算与文献[9] 相同, 由于 SiON 的热膨胀系数、泊松比和杨氏模量目前无实验数据, 其相关参数近似与芯区的相同。

利用有限元方法得到芯区附近的应力分布, 在

* 国家重点基础研究发展规划(No. 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, 博士研究生, 现从事 Si 基 SiO₂ 阵列波导光栅的理论研究。

2003-06-13 收到, 2003-09-08 定稿

©2004 中国电子学会

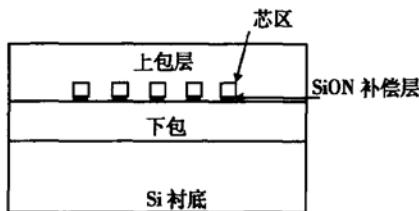


图1 分析模型

Fig. 1 Model for analysis

计算波导模式折射率时 SiON 折射率在 1.5~1.6 之间可调, 厚度在 100~300nm 之间可调。准 TE, TM 模模场及模式折射率服从全矢量亥姆霍兹方程^[10]:

$$\frac{\Delta^2}{\Delta} H^x + (\epsilon - n_{\text{eff}}^2) H^x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\Delta^2}{\Delta} H^y + (\epsilon - n_{\text{eff}}^2) H^y = 0 \quad (2)$$

其中 ϵ, n_{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, 边界采用透明边界条件处理, 差分离散方程中的 n_{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。

$$n_{\text{eff}}^2 = \frac{\iint H^* \left(\frac{\Delta^2}{\Delta} + \epsilon \right) H \, dA}{\iint H^* H \, dA} \quad (3)$$

在不考虑 AWG 传输损耗时, 用简化的归一化传输函数法获得 AWG 频谱响应图。

$$T = \frac{\left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} [j n_s d(\theta_i + \theta_o) + j(n_c \Delta L_c + \phi(j))] \right] \right|^2}{\left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \right|^2} \quad (4)$$

$$\text{Loss(dB)} = 10 \lg T \quad (5)$$

式中 $\rho_g(j, 0)$ 为功率分布函数, 本文取高斯分布, $n_s, n_c, d, \theta_i, \theta_o, \Delta L, \phi(j)$ 分别为 AWG 平板波导有效折射率、阵列波导的有效折射率、阵列波导间距、罗兰圆输入角、罗兰圆输出角、相邻阵列波导长度增量及初始相位。

3 模拟结果及讨论

3.1 SiON 补偿层对芯区 TE, TM 模模式折射率及双折射的影响

在玻璃化处理后, 芯区附近的应力分布在文献 [9] 中有详细的讨论, 本文重点分析 SiON 补偿层对波导折射率的影响。表 1 给出了无补偿层和在芯区下方淀积不同厚度、不同折射率的 SiON 补偿层后的芯区 TE, TM 模模式折射率和双折射系数。可以看出, 在没有补偿层时, TM 模模式折射率大于 TE 模模式折射率, 存在较大的双折射系数, 为 2.21×10^{-4} ; 当加入 SiON 补偿层, 在补偿层厚度相同时, 随着补偿层折射率的增大, TE, TM 模模式折射率虽均有所增大, 但 TE 模模式折射率增加量大于 TM 模模式折射率的增加量, 正好与应力作用下 TM 模模式折射率大于 TE 模模式折射率相反, 有使双折射系数减小的趋势。从表 1 可知随着补偿层厚度的增加, 达到相同补偿效果所需的补偿层折射率相应在减小, 这说明 SiON 补偿应力双折射是由其折射率和厚度共同决定的, 恰当地选择补偿层的折射率和厚度, 可使 TE, TM 模模式折射率趋于相同, 将双折射系数减小到 10^{-5} 量级。这一模拟结果表明高折射率补偿层对减小波导应力双折射是可行的, 能够用于实现 AWG 的偏振无关。

表1 SiON 补偿层对芯区 TE, TM 模模式折射率及双折射影响比较

Table 1 Comparison of the effect on TE, TM mode index and birefringence of SiON layer

SiON 厚度/nm	0	100		200		300	
SiON 折射率	0	1.56	1.58	1.52	1.54	1.5	1.52
n_{TE}	1.450634	1.451124	1.451476	1.451602	1.452573	1.451767	1.453395
n_{TM}	1.450855	1.451141	1.451358	1.451608	1.452295	1.451814	1.453076
$\Delta n_{\text{TM-TE}}/10^{-4}$	2.21	0.1794	-1.1775	0.0572	-2.7872	0.4694	-3.1946

3.2 SiON 补偿层对芯区 TE, TM 模模场分布的影响

图 2~4 分别是没有补偿层和在芯区的上或下

方淀积厚度 100nm, 折射率为 1.56 的 SiON 补偿层的模场分布图。比较图 2(a)、(b) 可知, 在无补偿层时, TE 模模场和 TM 模模场均是相对于芯区中心对称的; 但比较图 3, 4 的(a), (b) 可知, 当在芯区的上

方或下方淀积 SiON 补偿层时, 模场都向高折射率的 SiON 补偿层偏移, 且 TE 模模场偏移比 TM 模模场偏移严重。这说明 SiON 补偿层在改善波导双折射的同时, 将不利于波导与光纤的耦合。为改善模场偏移, 本文提出在芯区上下同时生长补偿层的方法。图 5(a) 和(b) 分别为在芯区上下同时沉积厚

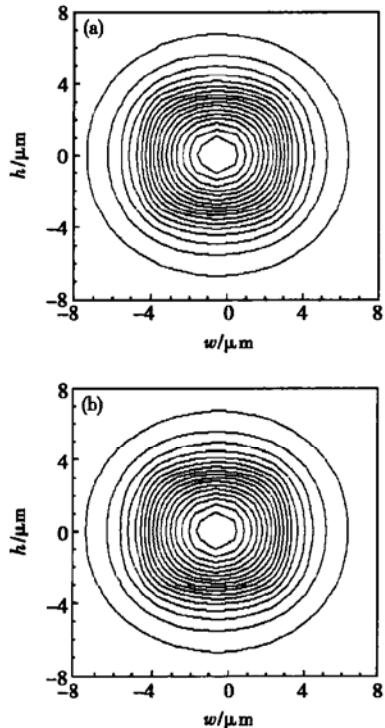


图 2 无补偿层时 TE, TM 模模场分布截面 (a) TE 模; (b) TM 模

Fig. 2 Cross sections of field profiles for TE(a) and TM(b) without compensation layer

度 100nm, 折射率为 1.55 的 SiON 的 TE, TM 模场分布。这一方法改善了模场偏移, 近似为中心对称分布, 同时其双折射系数也可减小到 10^{-5} 量级。

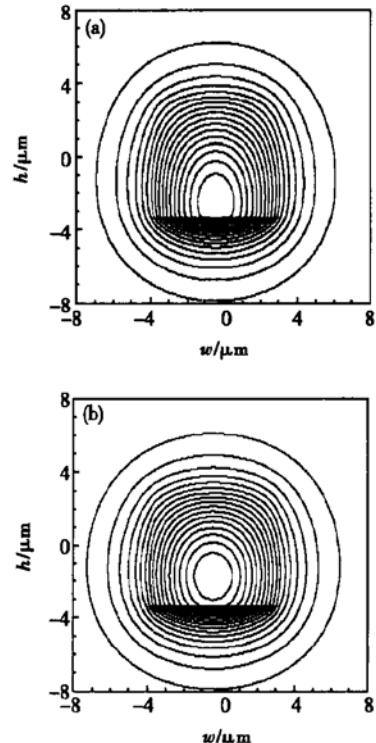


图 3 芯区下方有补偿层时 TE, TM 模模场分布截面(补偿层厚度、折射率分别为 100nm, 1.56) (a) TE 模; (b) TM 模

Fig. 3 Cross sections of field profiles for TE(a) and TM (b) with compensation layer below the core (The thickness of compensation layer and refraction index are 100nm and 1.56, respectively).

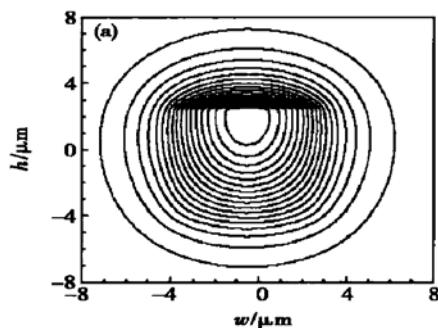
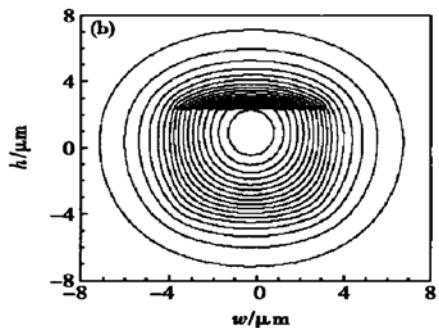


图 4 芯区上方有补偿层时 TE, TM 模模场分布截面(补偿层厚度、折射率分别为 100nm, 1.56) (a) TE 模; (b) TM 模

Fig. 4 Cross sections of field profiles for TE(a) and TM (b) with compensation layer on the core (The thickness of compensation layer and refraction index are 100nm and 1.56, respectively).



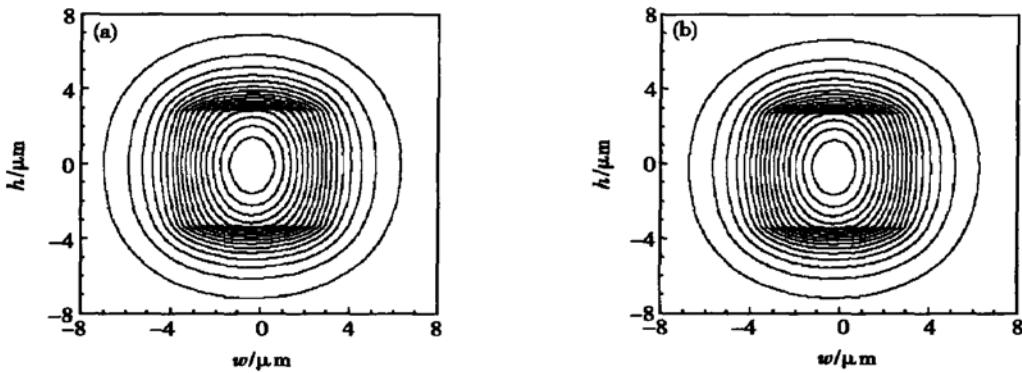


图5 在芯区上下都有补偿层时波导TE, TM 模场分布截面(补偿层厚度、折射率分别为100nm, 1.55) (a) TE模; (b) TM模

Fig. 5 Cross sections of field profiles for TE(a) and TM(b) with compensation layers below and on the core. The thickness of compensation layer and refraction index are 100nm and 1.55, respectively.

3.3 具有SiON补偿层的偏振不灵敏AWG设计

Si基SiO₂波导应力的存在对AWG的偏振相关波长(PDW)有较大的影响。本文首先在不考虑补偿时计算了应力16×16 AWG器件参数,见表2,利用传输函数得到在中心波长处的归一化频谱响应,如图6(a)所示。应力作用下的AWG由于波导TE,TM模式折射率的不同,产生了明显的偏振色散,PDW

约为0.22nm,与实验报道相一致^[5]。所以在AWG器件设计时必须考虑波导应力对AWG偏振的影响,采取双折射补偿措施。图6(b)是在芯区上、下同时沉积厚度100nm、折射率1.55的SiON对双折射进行补偿后的频谱响应图,器件设计参数如表2所示。由图可知两偏振态的频谱基本重合,使器件的PDW显著减小,这说明高折射率SiON补偿层是减小AWG器件PDW的有效途径。

表2 16通道AWG设计参数
Table 2 Design parameters of AWG with 16 channels

	通道数	通道间隔/nm	中心波长/μm	衍射级数	相邻阵列波导路径差/μm	罗兰圆半径/μm	阵列波导数
补偿前	16	0.8	1.55	80	85.4760	9040.5	85
补偿后	16	0.8	1.55	80	85.4289	9045.5	85

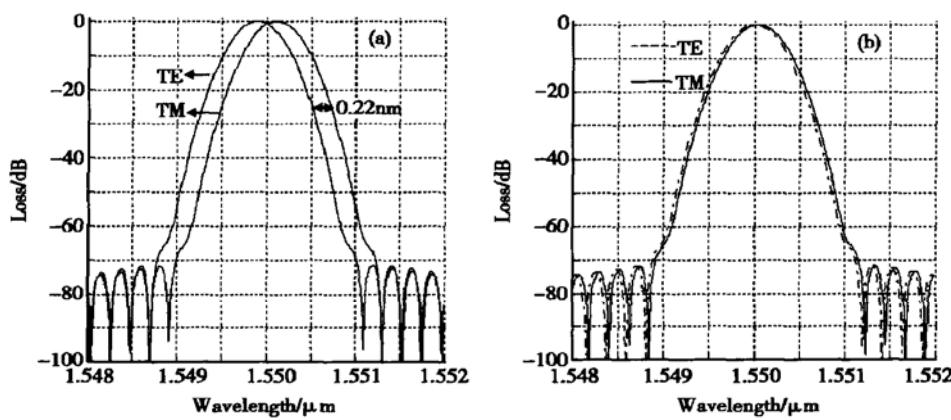


图6 应力作用下无补偿层(a)和有补偿层(b)的16通道AWG在中心波长处的频谱响应

Fig. 6 Spectra response for stressed AWGs with 16 channels without (a) and with (b) compensation layer at central wavelength

4 结论

AWG 的偏振相关性本质上是其阵列波导的双折射问题。本文从理论上论证了采用高折射率 SiON 补偿层减小 Si 基 SiO₂ 波导应力双折射的可行性, 提出了上下对称补偿法来改善模场偏移, 更有利于波导与光纤的耦合; 设计了高折射率 SiON 补偿下的 16 通道 AWG 器件相关参数, 得到了偏振无关的 AWG 频谱。说明沉积适当厚度的高折射率 SiON 补偿层是减小 AWG 器件 PDW 的有效方法。

参考文献

- [1] Hida Y, Hibino Y, Kitoh M T, et al. 400-channel 25-GHz spacing arrayed waveguide grating covering a full range of C- and L-bands. Proc OFC2001, 2001: WB2
- [2] Hibino Y. Recent advances in high - density and large - scale AWG muti/demulti-plexers with higher index-contrast silica-based PLCs. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2002, 8(6): 1090
- [3] Takahashi H, Hibino Y, Ohmori Y, et al. Polarisation-insensitive arrayed-waveguide wavelength multiplexer with birefringence compensation film. IEEE Photonics Technol Lett, 1993, 5(6): 707
- [4] Inoue Y, Takahashi H, Ando S, et al. Elimination of polarization sensitivity in silica-based wavelength division multiplexer using a polyimide half waveplate. IEEE J Lightwave Technol, 1997, 15(10): 1974
- [5] Suzuki S, Sumida S, Inoue Y, et al. Polarisation insensitive arrayed-waveguide gratings using dopant rich silica-based glass with ghermal expansion adjusted to Si substrate. Electron Lett, 1997, 33(13): 1173
- [6] Wildermuth E, Nadler C, Lanker M, et al. Penalty-free polarisation compensation of SiO₂/Si arrayed waveguide grating wavelength multiplexers using stress release grooves. Electron Lett, 1998, 34(20): 1661
- [7] Inoue Y, Itoh M, Hibino Y, et al. Novel birefringence compensating AWG design. Optical Society of America, 2000: WB4-I
- [8] Worhoff K, Offrein B J, Lambeck P V, et al. Rirefringence compensation applying double-core waveguide structures. IEEE Photonics Technol Lett, 1999, 11(2): 206
- [9] Deng Xiaoqing, Yang Qingqiang, 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]
- [10] Hadley G R, Smith R E. Full-vector waveguide modeling using an iterative finite-difference method with transparent boundary conditions. IEEE J Lightwave Technol, 1995, 13(3): 465

Numerical Analysis for Polarization Compensation of Silica on Silicon AWG Using SiON*

An Junming^{1,2}, Gao Dingshan¹, Li Jian¹, Li Jianguang¹, Wang Hongjie¹ and Hu Xiongwei¹

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

(2 Department of Physics, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: The influence of high refraction index SiON film on stress birefringence of waveguide in silica on silicon arrayed waveguide grating(AWG) is analyzed systematically using full-vector alternating direction implicit(ADI) iterative method. The result shows that the stress birefringence of the waveguide in silica on silicon AWG can be improved by depositing SiON film above or below the waveguide, but the position of the mode profile will deflect the centre of the waveguide in this condition. The deflection can be improved by depositing the SiON film both above and below the waveguide. A polarization independent 16 channels AWG is theoretically designed using this method.

Key words: SiON film; silica optical waveguide on silicon; stress; birefringence; AWG; polarization compensation

EEACC: 4130

Article ID: 0253-4177(2004)07-0858-05

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

An Junming male, was born in 1969, PhD candidate. His research interest lies in silica AWG on silicon.

Received 13 June 2003, revised manuscript received 8 September 2003

© 2004 The Chinese Institute of Electronics