

# 硅基二氧化硅波导的双折射效应补偿理论分析\*

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波导的两种偏振补偿方法的可行性. 结果表明采用应力释放槽和调节上包层热膨胀系数都可改善波导的偏振相关性. 采用应力释放槽可以释放波导中的由于硅衬底与二氧化硅热膨胀系数失配造成的压应力, 可以影响芯区附近的应力分布, 但是只有释放槽的深度达到一定值时才能改善波导的偏振相关性, 增大槽的宽度也在一定程度改善偏振相关性, 但效果较差. 调节波导上包层的热膨胀系数可以很好的解决波导的偏振相关问题, 而调节波导的其它层的热膨胀系数对波导的偏振相关作用较小.

**关键词:** 硅基二氧化硅波导; 偏振补偿; 双折射

**EEACC:** 4130; 6150C; 7320P

**中图分类号:** TN814<sup>\*</sup>.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2002)12-1303-05

## 1 前言

随着通讯业务的迅速增加, 光纤通讯飞速发展, 发展全光网络成为必然. 波导器件在全光网络普遍使用, 需求量也日益增加, 但是许多波导器件都需要解决双折射效应问题, 如阵列波导光栅、调制器等. 双折射效应对各种光波导器件可以产生偏振色散和偏振噪音等不利影响. 双折射效应除了与波导的结构、几何形状、弯曲等因素有关外, 波导内部的应力分布也是不可忽视的因素, 尤其是对硅基二氧化硅波导的影响尤为突出. 由于硅衬底和二氧化硅膜的热膨胀系数失配较大, 二氧化硅膜受到较大的压应力的作用, 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, 由光弹性效应在这两个方向引起的折射率变化不同, 形成快轴与慢轴, 从而产生双折射效应.

阵列波导光栅(AWG)中解决双折射效应的主要方法有在阵列波导中部插入半波片<sup>[1]</sup>、采用应力释放槽释放应力<sup>[2]</sup>、调节上包层的热膨胀系数<sup>[3]</sup>等. 使用半波片是将在阵列波导的前半部分产生的偏振相关通过 TE 模和 TM 模相互转换在阵列波导的后半部

补偿. 而采用应力释放槽和调节上包层的热膨胀系数是通过改变波导内部的应力大小和分布解决偏振相关.

作者在文献[4]中介绍了使用有限元方法分析硅基二氧化硅波导内部的应力分布, 阐述了波导内部应力是产生波导双折射效应的主要原因, 并对阵列波导光栅的中心波长有影响. 本文在此基础上分析了两种偏振补偿方法对 SiO<sub>2</sub>/Si 波导的应力分布和双折射系数的影响, 并以 SiO<sub>2</sub>/Si 阵列波导光栅为例分析了这两种方法的可行性.

## 2 应力释放槽对双折射效应的补偿

### 2.1 模型建立

Wildermuth 等人<sup>[2]</sup>报道了用应力释放槽的方法解决硅基二氧化硅 AWG 中的偏振相关问题, 使 AWG 的偏振相关由 0.2nm 降低到小于 0.05nm, 这说明了应力释放槽的方法可以解决波导的双折射效应. 下文分析了应力释放槽的几何尺寸对波导双折射系数的影响.

文献[4]介绍了硅基二氧化硅波导的应力有限

\* 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.

2002-03-28 收到, 2002-05-24 定稿

©2002 中国电子学会

元模型. 为了说明应力释放槽的几何结构对双折射效应的补偿作用, 需要建立新的模型, 如图 1 所示. 以  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  阵列波导光栅为例, 有限元模型参数与文献[4]中的有限元模型参数大致相同, 分别取: 相

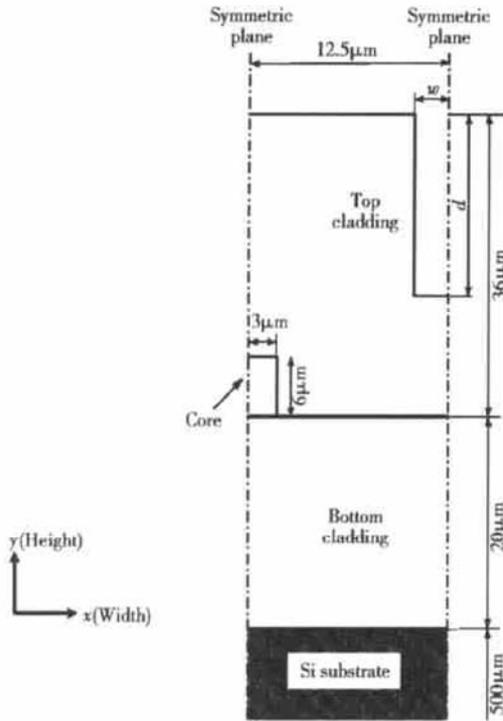


图 1 带应力释放槽的波导结构简图

Fig. 1 Diagram of  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  waveguide structure with stress release groove

对折射率为 0.75%, 上下包层折射率为 1.444, 芯区尺寸为  $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ , 上包层厚度为  $36\mu\text{m}$ , 下包层厚度为  $20\mu\text{m}$ , 芯区热膨胀系数为  $1.35 \times 10^{-6}$ , 上下包层热膨胀系数为  $0.55 \times 10^{-6}$ , 二氧化硅材料泊松比为 0.17, 硅衬底的热膨胀系数取  $2.33 \times 10^{-6}$ , 硅衬底泊松比为 0.28, 温度变化是从二氧化硅膜沉积温度  $300^\circ\text{C}$  冷却到室温  $30^\circ\text{C}$ , 计算窗口大小为  $12.5\mu\text{m} \times 556\mu\text{m}$ , 分别取  $x = 0$  和  $x = 12.5$  为对称面. 应力释放槽开在两相邻波导中间, 槽深为  $d$ , 槽宽为  $2w$ .

波导的折射率分布可以根据应力分布计算<sup>[4]</sup>. 对于各向同性材料, 若材料横向受压不等, 当光沿  $z$  方向传输时, 沿  $x$  和  $y$  方向偏振的两个波其折射率的变化分别为:

$$\Delta n_x = -\frac{n^3}{2} [p_{11}\epsilon_x + p_{12}\epsilon_y + p_{12}\epsilon_z] \quad (1)$$

$$\Delta n_y = -\frac{n^3}{2} [p_{12}\epsilon_x + p_{11}\epsilon_y + p_{12}\epsilon_z] \quad (2)$$

式中  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  和  $\epsilon_z$  分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的应变变量.

对于石英材料, 弹性模量  $E \approx 7 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ , 泊松比  $\mu \approx 0.17$ ,  $p_{11} = 0.12$ ,  $p_{12} = 0.27$ . 根据上式可以计算出波导的折射率沿  $x$  和  $y$  方向的分布.

波导的模式折射率可以根据波导的折射率分布使用 ADI 有限差分法计算, 具体算法参考文献[5~7].

## 2.2 波导的双折射效应分析

作者在文献[4]报道了二氧化硅与硅衬底热膨胀系数的失配导致二氧化硅波导的芯区和包层在  $x$  方向都受压应力作用; 二氧化硅波导  $y$  方向受力主要与二氧化硅层之间的热膨胀系数失配有关, 表现为二氧化硅层芯区在  $y$  方向受张应力作用; 右界面附近的包层受  $y$  方向压应力作用, 上下界面附近的包层受  $y$  方向张应力作用. 由于应力作用, 波导的双折射系数 ( $n_{TE} - n_{TM}$ ) 约为  $-1.5 \times 10^{-4}$ , 对于硅基  $\text{SiO}_2$  AWG, 其衍射级数  $m$  一般要大于相邻波导长度差  $\Delta L$ , 因而 AWG 的 TE 模的中心波长比 TM 模的中心波长长  $0.2 \text{nm}$  (即器件的偏振相关系数为  $0.2 \text{nm}$ ). 该情况对应于应力释放槽槽深为零或槽宽为零的情况.

图 2 是应力释放槽的几何结构与波导双折射效应关系图. 图 2(a) 是槽宽为  $6\mu\text{m}$ , 应力释放槽深度与模式折射率和双折射系数关系图. 从图中可以看出波导模式的折射率并不是随槽的深度单调减小, 而会发生增大的现象, 同样双折射系数 ( $n_{TE} - n_{TM}$ ) 也与槽的深度并不是保持单调关系. 从图中分析可知, 波导的双折射系数发生明显增大时对应槽的深度约为  $25\mu\text{m}$ , 这说明二氧化硅波导中的应力释放槽只有大于某个深度时才能对波导的偏振相关性起补偿作用. 当不能满足这一条件时甚至会增大波导的偏振相关性. 当在波导间隔中刻蚀应力释放槽后, 由于硅片与二氧化硅层热膨胀系数失配发生变形, 导致应力在释放槽的底部集中. 当槽的深度小于一定数值时, 在释放槽底部集中的应力对芯区附近的应力分布影响较小, 因而对波导的模式影响较小. 但是由于释放槽的引入, 减小了二氧化硅层的有效厚度, 二氧化硅层受到的  $x$  方向压应力增大; 而在  $y$  方向芯区的收缩量增大, 导致上下包层中的  $y$  方向张应力增大. 根据公式(1)和(2)可知, 当二氧化硅波导中的  $x$  方向压应力增大时,  $y$  方向的折射率增大量要大于  $x$  方向的折射率增大量, 而  $y$  方向的张应力增大时,  $x$  方向的折射率减小量要大于  $y$  方向的

折射率减小量,因而随着应力释放槽的深度增加(在小于一定深度的条件下),波导的 TE 模式折射率减小, TM 模式折射率增大,波导的双折射效应增强.当槽的底部靠近芯区时,由于应力释放槽底部集中的应力对芯区附近的应力分布有很大的影响,情况较为复杂,在此就不再具体分析.但是当槽的深度达到下包层表面时或深入到下包层中,应力释放槽可以大大减小芯区和上包层中的  $x$  方向的压应力,因而波导的 TM 模的折射率逐渐靠近未考虑应力时的 TM 模式的折射率.当应力释放槽的深度达到硅

衬底的表面时,  $x$  方向的压应力主要集中在二氧化硅层与硅衬底的界面附近,这部分压应力对波导的模式几乎不产生影响,而只有芯区和上下包层热膨胀系数失配产生的应力对波导模式有影响.但是这部分应力与硅衬底和二氧化硅热膨胀系数失配产生的应力相比数值较小,因而对波导模式影响较小,这时波导基本偏振无关.

图 2(b) 是刻蚀深度为  $36\mu\text{m}$ , 应力释放槽的半宽与模式折射率与双折射参数关系图.从图中可以看出: TE 模和 TM 模的折射率都是随着槽的宽度

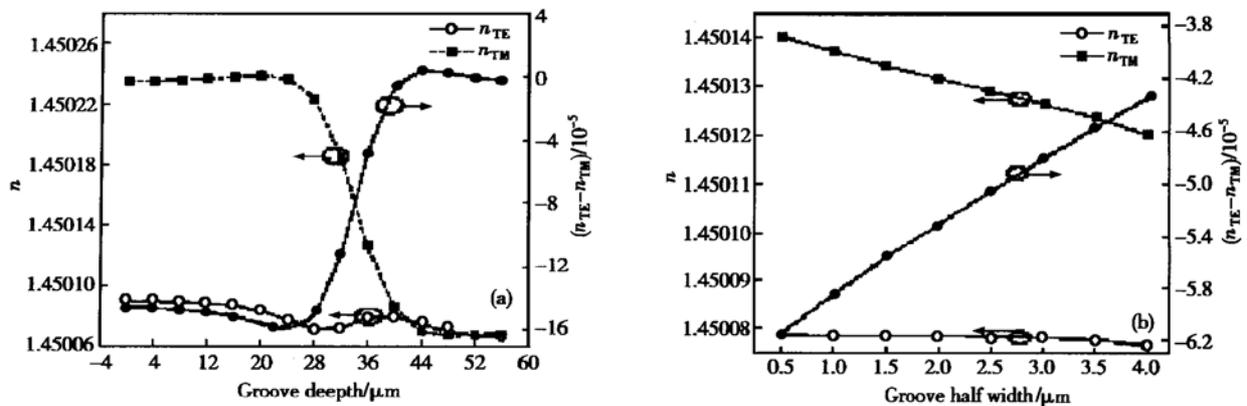


图 2 应力释放槽的几何尺寸与模式折射率和双折射参数关系图 (a) 应力释放槽深度与模式折射率和双折射参数关系图 (槽宽为  $6\mu\text{m}$ ); (b) 应力释放槽半宽与模式折射率和双折射参数关系图 (槽深为  $36\mu\text{m}$ )

Fig. 2 Relation in dimension of stress-release groove to the mode index and the birefringence (a) Relation in groove depth to the mode index and the birefringence (with groove width  $6\mu\text{m}$ ); (b) Relation in groove half width to the mode index and the birefringence (with groove depth  $36\mu\text{m}$ )

增大而减小,双折射系数略有增大.这也说明应力释放槽可以释放二氧化硅层中的压应力,但改善波导的双折射效应效果不佳.

在硅基二氧化硅阵列波导光栅器件上采用应力释放槽可以解决器件的偏振相关性,甚至可以将器件的偏振相关性降为零.从工艺角度考虑,这种方法对于高折射率差的波导器件是可行的,因为波导尺寸较小,刻蚀应力释放槽的深度不需很深,但是对于低折射率差的波导器件,需刻蚀较深的应力释放槽,这增加了工艺难度.

### 3 调节上包层热膨胀系数对双折射效应的补偿

Ojha 等人<sup>[3]</sup>报道了通过调节上包层二氧化硅

的热膨胀系数改善硅基二氧化硅波导阵列光栅的偏振特性.该文献报道了通过重掺杂使上包层二氧化硅的热膨胀系数达到硅衬底的热膨胀系数时,器件的偏振特性由未补偿前的  $0.2\text{nm}$  改善为  $0.03\text{nm}$ ,而提高下包层与芯层的热膨胀系数不能改善器件的偏振特性.下文分析改变下包层,上包层和芯层的热膨胀系数对器件双折射效应的影响.

为了求解出不同热膨胀系数时的应力分布,有限元模型采用文献[4]中的有限元模型.图 3(a) 是上包层热膨胀系数取  $0.55 \times 10^{-6}$ ,芯区热膨胀系数取  $1.35 \times 10^{-6}$ ,下包层热膨胀系数由  $0.55 \times 10^{-6}$  变化到  $2.33 \times 10^{-6}$  (硅衬底热膨胀系数) 时模式折射率与双折射系数的变化曲线.从图中可以看出 TE, TM 模的折射率随着下包层热膨胀系数的增大而缓慢减小,而双折射系数缓慢增大.这是由于增大下

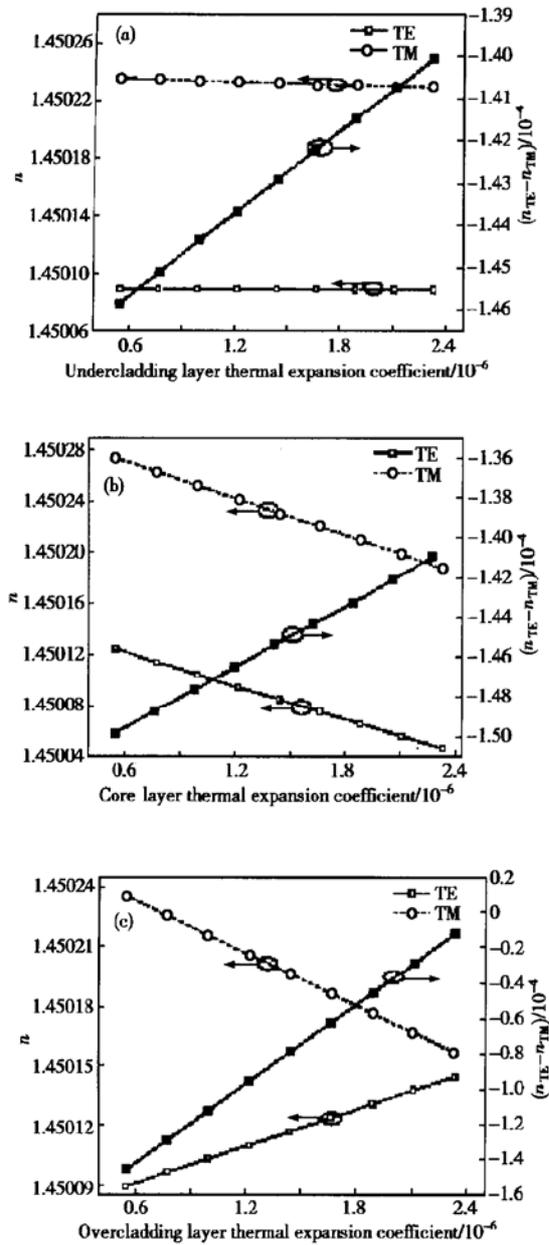


图3 硅基二氧化硅波导上包层, 芯区, 下包层的热膨胀系数与模折射率和双折射系数关系图 (a) 下包层热膨胀系数与模折射率和双折射系数关系图; (b) 芯层热膨胀系数与模折射率和双折射系数关系图; (c) 上包层热膨胀系数与模折射率和双折射系数关系图

Fig. 3 Relation in the thermal expansion coefficient of overcladding layer, core layer and undercladding layer of silicon-base silica waveguide to the mode index and the birefringence (a) Relation in the thermal expansion coefficient of overcladding layer to the mode index and the birefringence; (b) Relation in the thermal expansion coefficient of core layer to the mode index and the birefringence; (c) Relation in the thermal expansion coefficient of undercladding layer to the mode index and the birefringence

包层的热膨胀系数时, 下包层在  $x$  方向受到的力由压应力转变为张应力; 而芯区与上包层在  $x$  方向受到的压应力增大, 这两部分力对波导模式折射率的变化起着相互抵消的作用, 因而波导的 TE 模和 TM 模的模式折射率变化不大. 在本模型中可能下包层受到的张应力起着主要作用, 导致 TE 和 TM 模式折射率都缓慢减小, 因而波导的双折射系数变化量不很显著. 对于硅基二氧化硅阵列波导光栅而言, 增大下包层的热膨胀系数不能明显改善器件的偏振相关性, 器件的偏振相关系数仍保持在 0.2nm 左右. 图 3(b) 是上下包层热膨胀系数取  $0.55 \times 10^{-6}$ , 芯区热膨胀系数由  $0.55 \times 10^{-6}$  变化到  $2.33 \times 10^{-6}$  时模式折射率与双折射系数的变化曲线. 随着芯区热膨胀系数的增加, TE 模和 TM 模的折射率都减小, 双折射系数也缓慢增大. 这是由于增大芯区的热膨胀系数, 芯区的收缩量增大, 其内部  $y$  方向受到的张应力增大; 而在  $x$  方向可以部分补偿由于硅衬底和二氧化硅层热膨胀系数失配造成的压应力, 因而导致 TE 模和 TM 模的折射率同时减小, 双折射系数变化量不明显. 显然增大芯区的热膨胀系数也不能改善 AWG 器件的偏振相关性. 图 3(c) 是下包层热膨胀系数取  $0.55 \times 10^{-6}$ , 芯区热膨胀系数取  $1.35 \times 10^{-6}$ , 上包层热膨胀系数由  $0.55 \times 10^{-6}$  变化到  $2.33 \times 10^{-6}$  时折射率与双折射系数的变化曲线. 从图中可以看出随着上包层的热膨胀系数增大, 二氧化硅波导的 TE 模式折射率增大, TM 模式折射率减小, 双折射系数增大. 这是由于增大上包层热膨胀系数, 芯区在  $y$  方向由张应力转变为压应力, 这使 TE 模的折射率增大; 而在  $x$  方向, 下包层抑制上包层收缩, 使上包层受张应力作用, 导致 TM 模折射率下降. 与调节下包层与芯层的热膨胀系数相比, 调节上包层的热膨胀系数可减小  $|n_{TE} - n_{TM}|$  一个量级, 因而可以明显改善波导的双折射效应. 根据 AWG 器件光栅方程<sup>[8]</sup>, 当上包层的热膨胀系数增大到硅衬底热膨胀系数时, 器件的偏振相关由 0.2nm 改善为 0.02nm, 该结果与文献[3]报道基本吻合.

## 4 结论

本文以硅基二氧化硅波导阵列光栅为例, 用有限元方法分析了应力释放槽和调节上包层热膨胀系数两种偏振补偿方法的可行性. 文章分析了应力释

放槽的槽深和槽宽对双折射效应的影响, 结果表明应力释放槽的深度只有达到一定值时才能改善波导的双折射效应; 增大槽的宽度不能较好地改善波导的双折射效应, 而加上包层的热膨胀系数却能很好解决波导的双折射效应问题. 当上包层的热膨胀系数达到硅衬底的热膨胀系数时, 可以将波导的双折射系数减小一个量级, 而增加波导的芯层和下包层的热膨胀系数对波导的双折射系数影响较小. 以上分析与文献报道的试验结果基本吻合. 从两种偏振补偿方法比较得知, 采用应力释放槽的方法工艺难度较大, 需要刻蚀的深度较深, 而调节上包层热膨胀系数工艺简单, 效果较好.

### 参考文献

- [ 1 ] Takahashi H, Hibino Y, Nishi I. Polarisation-insensitive arrayed-waveguide grating wavelength multiplexer on silicon. *Opt Lett*, 1992, 17: 499
- [ 2 ] Wildermuth E, Nadler Ch, Lanker M, et al. Penalty-free polarization compensation of SiO<sub>2</sub>/Si arrayed waveguide grating wavelength multiplexers using stress release grooves. *Electron Lett*, 1998, 34: 1661
- [ 3 ] 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
- [ 4 ] Deng Xiaoqing, Yang Qinqing, Wang Hongjie, et al. Stress analysis of silico optical waveguide on silicon by a finite element method. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23 (11): 1196 [ 邓晓清, 杨沁清, 王红杰, 等. 硅基二氧化硅波导中的应力和偏振相关性的数值分析, *半导体学报*, 2002, 23 (11): 1196 ]
- [ 5 ] 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
- [ 6 ] Kim C M, Ramaswamy R V. Modeling of graded-index channel waveguides using nonuniform finite difference method. *J Lightwave Technol*, 1989, 7: 1581
- [ 7 ] Shulz N, Bierwirth K, Arndt F. Finite difference analysis of integrated optical waveguides without spurious mode solution. *Electron Lett*, 1986, 22: 963
- [ 8 ] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang Qinqing, et al. Simple method for design 1×8 arrayed-waveguide grating multi/demultiplexers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, 21: 798 [ 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: 798 ]

## Theoretical Analysis on Birefringence Compensation in Silica Optical Waveguide on Silicon\*

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

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

**Abstract:** Two kinds of polarization compensation ways for silica waveguide on silicon are analyzed by finite element method. It is shown that the polarization within silica waveguide can be compensated by making stress release grooves and adjusting thermal expansion coefficient of overladding layer. The stress release groove is applied to release a compress stress introduced by a difference of thermal expansion coefficient between silica and silicon substrate, and to change the distribution of stress around the core. But, when its depth is over a certain value, the groove will modify and release the polarization of waveguide. In compensation with groove depth, groove width does a little. The adjusting of thermal coefficient of overladding compensates waveguide polarization, but that of undercladding layer or core layer has little effect.

**Key words:** silica optical waveguide on silicon; polarization compensation; birefringence

**EEACC:** 4130; 6150C; 7320P

**Article ID:** 0253-4177(2002)12-1303-05

\* Project supported by 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. He is engaged in the research on silica optical waveguide grating on silicon and its theory.

Received 28 March 2002, revised manuscript received 24 May 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics