

硅基二氧化硅保偏光波导起偏器的设计*

李 蔚 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 利用平面波导结构中的双折射效应并结合模式理论, 设计了一种新型 SiO₂/Si 基的保偏波导起偏器, 使得两个正交偏振模式中的 TM 模式被截止, TE 模式可以通过. 利用三维有限差分光束传输法(3D FD-BPM)进行数值模拟, 结果显示, 当入射波长为 1.55 μm, 器件长度为 8mm 时, 起偏器的消光比可高达 50dB 以上. 在不增加工艺复杂度的前提下, 采用这种光波导的结构可以直接制作起偏器, 同时还可以方便地与其他平面波导器件集成.

关键词: 双折射效应; 偏振保持; 平面波导

EEACC: 1320

中图分类号: TN814

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)10-1311-04

1 引言

在光纤通信网络中, 尤其是高速光通信系统, 要求所用的无源光器件与偏振无关, 即无源光器件对不同偏振状态的光信号的响应特性保持稳定, 具体表现为器件的低偏振相关损耗、低偏振模色散等. 但是由于材料本身的双折射特性以及应力等因素^[1], 在平面光波导中传输的两个正交模式的偏振态会发生耦合, 从而引起偏振态会随上述因素而发生变化, 导致一系列器件特性与偏振状态相关联的问题. 因此为了维持光波导偏振态, 发展保偏波导及其器件是相当必要的.

对于采用平面光波导结构制作的器件, 如阵列波导光栅(arrayed waveguide grating, AWG)复用器/解复用器、光功率分配器(splitter)等, 偏振相关性表现为较大的偏振相关损耗(polarization dependent loss, PDL)、偏振模色散(polarization mode dispersion, PMD)或者中心波长漂移, 等等. 因此, 为了保持光波导中光信号的偏振态, 尽可能降低器件性能的偏振相关性, 发展保偏波导起偏器并通过单片集成/混合集成等方式进一步制作相应的保偏

波导器件^[2]是十分关键的.

迄今为止, 已经有不少关于波导型偏振分束器的研究工作. 总体上可以分成以下的几种类型: (1) 利用 LiNbO₃ 材料双折射特性的保偏波导, 主要是采用定向耦合器的结构, 再利用 TE/TM 两种模式的传输长度不同实现这两种偏振光的分离^[3]; (2) 基于多层 III-V 族化合物半导体材料, 利用包层与芯层较大的折射率差来实现 TE/TM 两种模式的分离^[4]; (3) 采用 SiO₂/Si 基材料, 主体结构是通过增加附加层或是金属包层以增大 TE 与 TM 模传播常数的差别, 然后再利用不对称的 Y 分支波导结构或者是不对称的定向耦合器结构来实现^[5,6]; (4) 利用聚合物(polymer)材料, 通过选择不同的双折射材料来实现^[7,8]. 上述各种方案的器件结构都相当复杂, 同时都要求较高的工艺制作精度, 因此实现起来都比较困难.

文献[9]对 SiO₂/Si 保偏波导^[10]进行了专门研究, 其主要思路在于通过多层结构来增大 TE 模与 TM 模传播常数的差别, 使得芯层的 TM 模式折射率大于包层折射率. 而芯层的 TE 模式折射率小于包层折射率, 从而使 TE 模式被截止. 同样, 这种设计也存在制作工艺复杂、实现难度大的问题.

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2003AA312060)和武汉市重大科技攻关(编号: 2002100513004)资助项目

李 蔚 女, 1968 年出生, 博士研究生, 主要研究方向: 光通信网络、系统以及通信光电子器件集成技术. Tel: 027-87556188, Email: weilee@hust.edu.cn

尽管目前的 SiO₂/Si 平面光波导制作工艺已经相当成熟,但是其中由线膨胀系数不匹配所导致的应力双折射仍然难以完全消除.因此,本文的设计思路在于:应用这种相对比较高的双折射,在不增加工艺难度的前提下,通过波导参数的合理选取,滤掉其中一个偏振模,形成单偏振波导,即只让波导传输两个正交模式中的一个,从而实现起偏的目的.这样设计的波导结构简单,也便于与其他的波导器件直接集成.

2 理论分析

2.1 平面光波导中的双折射

平面光波导主要包括四层:衬底层、下包层、波导芯层和上包层.人们在进行波导芯层设计时容易直接选用正方形的截面结构,相当于使波导处在一个没有方向相关性的各向同性介质材料当中,从而可能实现偏振无关,即相当于材料中两种偏振态的折射率相同,即 $n_{TM} = n_{TE}$.而对于掩埋型的 SiO₂/Si 基波导而言,由于 SiO₂ 的热膨胀系数与 Si 衬底不同,因此会在波导中形成应力双折射效应,即材料中两种偏振态的折射率 $n_{TM} \neq n_{TE}$.而本文就是要利用上述应力双折射效应,使不同的偏振态具有不同的折射率,通过波导参数的合理选取,滤掉其中一个偏振模,最终实现起偏的目的.

考虑衬底与每一层薄膜材料热膨胀系数的不同以及其在波导中引起的双折射变化情况,相应的应力计算公式为:

$$\sigma = \frac{(\alpha_s - \alpha_f) \Delta T E_f}{1 - \nu_f} \quad (1)$$

其中 σ 为应力; α_s 和 α_f 分别为衬底和薄膜材料的热膨胀系数; ΔT 为温度变化; E_f 为薄膜材料的杨氏模量; ν_f 为薄膜材料的泊松比.按照光弹性应力分析^[11],可以得到,

$$n_{TE} = n_0 \left[1 - \frac{1}{2} (C_1 + C_2) \sigma n_0^2 \right] \quad (2)$$

$$n_{TM} = n_0 \left[1 - C_2 \sigma n_0^2 \right] \quad (3)$$

其中 n_0 是无应力作用时 SiO₂ 材料的折射率; C_1 , C_2 为 SiO₂ 材料的光弹性系数. C_1 , C_2 的计算公式为^[10]:

$$C_1 = E_f^{-1} [p_1 - 2\nu_f p_2] \quad (4)$$

$$C_2 = E_f^{-1} [(1 - \nu_f) p_1 - \nu_f p_2] \quad (5)$$

其中 p_1, p_2 为波导材料的应变光常数.那么通过以上的几个公式就可以计算出薄膜材料中的双折射大小:

$$B = n_{TM} - n_{TE} \quad (6)$$

可以看出双折射的产生是由于衬底与各层中的热膨胀系数不同而引起的.

2.2 等效折射率法分析

从波导的传输模式理论我们知道,要使其中某一种模式完全截止,需要尽量避免对称结构.这里选择三种不同折射率的下包层、芯层和上包层.设上包层的折射率为 n_3 ,芯层的折射率为 n_1 ,下包层的折射率为 n_2 ,波导的宽度和厚度分别为 a 和 d .应用等效折射率方法,可以等效为两个平板波导的叠加,如图 1 所示.

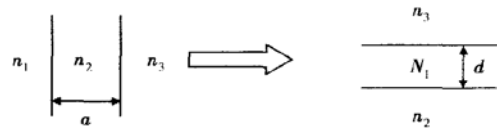


图 1 等效折射率方法应用示意图

Fig. 1 Schematic of effective index method

在进行第一步的等效时,得到的是一个对称结构的三层平板波导,因此在这一步得出的等效折射率为 N_1 .模式的本征方程为:

$$k(n_1^2 - N_1^2)^{1/2} a = m\pi + 2 \tan^{-1} \left[\left(\frac{N_1^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_1^2} \right)^{1/2} \eta_{13} \right] \quad (7)$$

其中 $\eta_{13} = \begin{cases} 1, & \text{TM 模} \\ (n_1/n_3)^2, & \text{TE 模} \end{cases}$

在这个对称结构中,波导的两种导模都不会发生截止,维持基模($m=0$)的条件为:

$$a < \frac{\pi}{k(n_1^2 - n_3^2)^{1/2}} \quad (8)$$

从公式(8)可以得出 a 的值.同时从公式(7)中还可以得到两个 N_1 的值分别为: N_1^{TE} 和 N_1^{TM} .

在进行第二步的等效时,得到的是一个非对称结构的三层平板波导.注意这里一定要保证上包层与下包层的折射率不等,且假定 $n_2 > n_3$.此时的模式本征方程为:

$$k(N_1^2 - N_{mn}^2)^{1/2} d = n\pi + \tan^{-1} \left[\left(\frac{N_{mn}^2 - n_3^2}{N_1^2 - N_{mn}^2} \right)^{1/2} \eta_{m3} \right] + \tan^{-1} \left[\left(\frac{N_{mn}^2 - n_2^2}{N_1^2 - N_{mn}^2} \right)^{1/2} \eta_{m2} \right] \quad (9)$$

$$\text{其中 } \eta_{mj} = \begin{cases} 1, & \text{TE 模} \\ (N_1/n_j)^2, & \text{TM 模} \end{cases}$$

由于 $n_2 \neq n_3$, 导模存在的条件为 $N_1 > N_{mn} > n_2$. 这时的导模截止条件为 $N_{mn} = n_2$, 导模截止方程为:

$$k(N_1^2 - n_2^2)^{1/2}d = n\pi + \tan^{-1} \left[\left(\frac{n_2^2 - n_3^2}{N_1^2 - n_2^2} \right)^{1/2} \eta_{m3} \right] \quad (10)$$

从公式(10)中可以得出维持单模的条件,

对于 TE 模式可得到:

$$d_0(n=0) < d < d_1(n=1)$$

对于 TM 模式可得到:

$$d_2(n=0) < d < d_3(n=1)$$

要让 TM 模式截止并维持 TE 基模传输,则需要取

$$d_0(n=0) < d < d_2(n=0) < d_1(n=1) \quad (11)$$

同样地,要是 TE 模式截止并维持 TM 基模传输,则需要取

$$d_2(n=0) < d < d_0(n=0) < d_3(n=1) \quad (12)$$

3 数值模拟结果

按照文献[12]中给出的数据(表1)进行数值模拟.数值模拟表明,层与层之间双折射较大的差异是实现保偏波导设计的基础,可以通过掺杂^[13]来调整各层中的热膨胀系数大小.模拟时发现当下包层利用较纯的 SiO₂ 材料时,因为它的热膨胀系数与衬底 Si 相差很大,其中的双折射效应就比较明显.而对于上包层和芯层通过掺入 Ge, B 或 P 的方式,可以提高热膨胀系数,使其与衬底的热膨胀系数接近,从而双折射效应较小.这样再代入公式(7)~(11)计算,可以增大 d_0 与 d_2 的数值差距,从而扩大可选择的波导宽度范围.得到 TM 模式截止,TE 基模可传输的一组设计为:

(1) 对于上包层: $\alpha = 2.8 \times 10^{-6}$, $n_0 = 1.4451$, 代入公式(1)~(6)可得:

$$n_{\text{TM}} = 1.44479, n_{\text{TE}} = 1.44452, B = 2.7 \times 10^{-4}.$$

(2) 对于芯层: α 为 3.0×10^{-6} , $n_0 = 1.44944$, 代入公式(1)~(6)可得:

$$n_{\text{TM}} = 1.4492, n_{\text{TE}} = 1.4490, B = 2 \times 10^{-4}.$$

(3) 对于下包层: α 取 0.5×10^{-6} , $n_0 = 1.4475$, 代入公式(1)~(6)可得:

$$n_{\text{TM}} = 1.4463, n_{\text{TE}} = 1.4453, B = 1.0 \times 10^{-3}.$$

表1 材料特性

Table 1 Material properties

材料	α/K	E/GPa	ν	p_{11}	p_{12}	$\Delta T/\text{K}$
上包层	可调	65	-0.2	0.121	0.27	1000
芯层	可调	70	-0.2	0.121	0.27	1000
下包层	可调	72.5	-0.17	0.121	0.27	1000
衬底	3.6×10^{-6}	130	-0.279	0.121	0.27	1000

把这三组计算结果分别代入公式(7)~(11),经过计算可以得到:当 $a = 4\mu\text{m}$, 要得到 TM 模式截止的设计值为:

$$3.1\mu\text{m} < d < 9.25\mu\text{m}$$

为了验证计算的准确性,本文对波导的传输特性进行了数值模拟,取 $d = 8\mu\text{m}$, 波导的长度为 8mm. 波导长度的选择原则上是越长越好,尽量保证 TM 基模被全部辐射掉.数值模拟以高斯场作为输入场(考虑了与光纤的耦合损耗),入射波长为 $1.55\mu\text{m}$. 模拟方法采用了三维有限差分光束传输法(FD-BPM)^[14]并结合透明边界条件(TBC)^[15].表2显示了我们的设计结果与文献[9]保偏波导设计结果的比较.

表2 模拟结果的比较

Table 2 Comparison of the simulation results

参数	本文模拟结果	文献[9]的结果
传输模式插损/dB	0.85	1.1
消光比/dB	56.8	30

显然,我们的制作工艺简单,同时消光比模拟结果远好于文献[9]的设计结果.

4 结论

本文从理论上讨论了 SiO₂/Si 平面波导结构中双折射的产生原因和各层薄膜双折射的计算方法;应用这种相对比较高的双折射,通过合理选取波导参数,滤掉其中一个偏振模,形成单偏振波导,从而实现起偏的目的.数值模拟结果显示,这种保偏光波导起偏器具有非常理想的消光比特性.同时该波导结构简单,不增加工艺难度,便于与其他的波导器件直接集成.

参考文献

- [1] 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性的数值分析. 半导体学报, 2002, 23(11): 1196]
- [2] Hu H Z, Chen J, Yang J S, et al. Structural auto-optimization of integrated optical directional coupler polarization splitters and reflectors. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(5): 868
- [3] Maruyama H, Haruna M, Nishihara H. TE-TM mode splitter using directional coupling between heterogeneous waveguides in LiNbO₃. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(7): 1550
- [4] Van der Tol J J G M, Pedersen J W, Metaal E G, et al. A short polarization splitter without metal overlays on In-GaAsP-InP. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9(2): 209
- [5] Lin K C, Chuang W C, Lee W Y. Proposal and analysis of an ultrashort directional coupler polarization splitter with an NLC coupling layer. *J Lightwave Technol*, 1996, 14(11): 2547
- [6] De Ridder R M, Sander A F M, Driessen D, et al. An integrated optic adiabatic TE/TM mode splitter on silicon. *J Lightwave Technol*, 1993, 11(11): 1806
- [7] Oh M C. Polymeric waveguide polarization splitter with a buried birefringent polymer. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1999, 11(9): 1144
- [8] Lee S S, Garner S, Steier W H, et al. Integrated optical polarization splitter based on photobleaching induced birefringence in azo dye polymers. *Appl Opt*, 1999, 38(3): 530
- [9] Hayakawa T, Asakawa S, Kokubun Y. ARROW-B type polarization splitter with asymmetric Y-branch fabricated by a self-alignment process. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(7): 1165
- [10] Xu Yongqing, Liang Chunguang, Yang Yongjun, et al. Silicon-silicon optical waveguides. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(12): 1546 [徐永青, 梁春广, 杨拥军, 等. 硅基 SiO₂ 光波导. 半导体学报, 2001, 22(12): 1546]
- [11] Lukosz W, Pliska P. Determination of thickness, refractive indices, optical anisotropy of, and stresses in SiO₂ films on silicon wafers. *Opt Commun*, 1995, 117(1~2): 1
- [12] Gottlieb M. Elastooptic materials. In: *CRC Handbook of Laser Science and Technology*. Vol. IV, Part 2, Boca Raton: CRC Press, 1986, ch. 2. 3
- [13] Kilian A, Kirchhof J, Pryzrembel G, 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
- [14] Huang W P, Xu C L. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method. *J Quantum Electron*, 1993, 29(10): 2639
- [15] Hadley G R. Transparent boundary condition for the beam propagation method. *J Quantum Electron*, 1993, 28(1): 363

Design of PM Polarizer Based on SiO₂/Si PLC Waveguide*

Li Wei, Liu Deming and Huang Dexiu

(Department of Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A novel TE mode transmission waveguide polarizer is designed based on SiO₂/Si waveguide birefringence effect and coupling mode theory, which cut off TM mode and transmit TE mode. After numerical simulation by 3D FD-BPM method combined with transparent boundary condition, the typical polarizer can achieve a high extinction ratio over 50dB with 8mm device length at 1.55μm wavelength. Without increasing the complexity of waveguide fabricating process, this structure can be used as a polarizer directly, and also can be integrated easily with other waveguide devices.

Key words: birefringence; polarization maintenance; planar waveguide

EEACC: 1320

Article ID: 0253-4177(2004)10-1311-04

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China(No. 2003AA312060) and Wuhan Key Technologies R&D Program(No. 2002100513004)

Li Wei female, was born in 1968, PhD candidate. Her research interest is in the field of optical communication network, systems, and the integration technologies for optoelectronic components.

Received 13 January 2004, revised manuscript received 19 April 2004

©2004 The Chinese Institute of Electronics