

SiO₂ 脊形条波导热极化引起的电光效应*

曹 霞 秦海燕† 成丽华

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2005 年 11 月 29 日收到 2006 年 3 月 15 日收到修改稿)

通过理论模拟对具有上覆盖层的 SiO₂ 脊形条波导结构进行了优化,在此基础上利用微电子工艺制作了 SiO₂ 脊形波导 Mach-Zehnder 型电光调制器,并进行热极化引起的电光和非线性效应的研究.热极化过程大幅增强了样品的电光及非线性效应.二次电光系数由热极化前的 $1.56 \times 10^{-22} (\text{m/V})^2$ 提高到热极化后的 $8.50 \times 10^{-22} (\text{m/V})^2$.极化后得到了 0.093pm/V 的线性电光系数.对热极化的物理机理进行了理论分析.

关键词:电光调制器, SiO₂ 光波导, 电光效应, 热极化

PACC: 4280K, 4280L, 7820J, 4265

1. 引 言

在光纤通信集成光学器件所用到的众多光波导材料中, SiO₂ 具有其独特的应用优势. SiO₂ 材料不仅成本低, 损耗小, 宽波段透光, 而且与硅半导体电子工艺相匹配, 和光纤有很好的兼容性. 但是 SiO₂ 材料通常是一种无定形体, 具有各向同性、中心对称的性质, 因此它不具有线性电光效应及二阶非线性效应, 难以替代昂贵的晶体材料, 如铌酸锂、磷酸二氢钾(KDP)、磷酸钾铽(KTP)等. 这限制了其在一些重要光器件(如电光调制器、光开关、可调滤波器及波长转换器等)中的应用.

1991 年, Myers 等人通过在高温下对 SiO₂ 材料进行热极化的方法^[1], 成功地在 SiO₂ 中得到了二阶非线性效应, 为 SiO₂ 应用在更广阔的器件领域提供了可能性. 之后, 人们通过不同的途径提高极化引起的非线性效应, 如采用不同的极化技术^[2-7]、材料组份^[8-10]和极化控制条件^[11, 12]对 SiO₂ 体材料进行研究, 而对于条波导的研究则很少. 从器件应用方面, 只有日本 NTT 公司电光开关见诸报道^[13], 但该器件极化效率很低, 得到的线性电光系数只有 0.02pm/V.

本研究在优化 SiO₂ 脊形条波导的设计的基础上, 进行热极化处理, 通过改变极化工艺过程参数以

及 SiO₂ 材料组份等方法, 提高极化引起的线性电光系数, 从而设计和制作出 SiO₂ 脊形波导 Mach-Zehnder(MZ)型电光调制器, 并对热极化的物理机理进行了实验和理论研究.

2. SiO₂ 光波导热极化的机理

SiO₂ 的热极化过程使材料在强的外加电场(约 250 V/ μm)作用下, SiO₂ 材料中的杂质电离子定向移动在材料中形成内部电场或偶极子沿外电场重新取向, 当材料冷却到室温后将外加电场撤去, 在高温高压下形成的内部电场或偶极子的重新取向不会消退, 而是冻结在材料内部, 形成冻结电场 $E_{\text{dc}}(\text{rec.})$.

热极化后的波导中的电场可以表示为以下三部分^[14]热极化在波导中形成的冻结电场 $E_{\text{dc}}(\text{rec.})$ 、外加调制电场 $E_{\text{dc}}(\text{appl.})$ 以及光波的电场分量 $\text{Re}\{E(\omega)\exp(j\omega t)\}$, 即

$$E = E_{\text{dc}}(\text{rec.}) + E_{\text{dc}}(\text{appl.}) + \text{Re}\{E(\omega)\exp(j\omega t)\}, \quad (1)$$

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + 2dE^2 + 4\chi^{(3)} E^3 + \dots, \quad (2)$$

将(1)式代入极化强度 P 的表达式(2)中, 可得到

$$\begin{aligned} P &= \epsilon_0 \chi^{(1)} E + 4[d + 6\chi^{(3)} E_{\text{dc}}(\text{rec.})] E_{\text{dc}}(\text{appl.}) E \\ &\quad + 12\chi^{(3)} E_{\text{dc}}^2(\text{appl.}) E \\ &= \epsilon_0 \chi^{(1)} E + 4\chi_{\text{eff}}^{(2)} E_{\text{dc}}(\text{appl.}) E \end{aligned}$$

* 国家自然科学基金(批准号: 60377022, 60408001)和教育部留学回国人员科研启动基金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: hattieqin@coer.zju.edu.cn

$$+ 12\chi^{(3)} E_{dc}^2(\text{appl.}) E, \quad (3)$$

因此有

$$\chi_{\text{eff}}^{(2)} = d + 6\chi^{(3)} E_{dc}(\text{rec.}), \quad (4)$$

其中 P 为极化强度, ϵ_0 为真空电容率, $\chi^{(1)}$ 为电极化率, E 为光波的电场分量, d 为二阶非线性光学系数, $\chi^{(3)}$ 为三阶非线性光学系数, $\chi_{\text{eff}}^{(2)}$ 为等效二阶非线性光学系数, $E_{dc}(\text{rec.})$ 为波导中由于极化形成的冻结电场, $E_{dc}(\text{appl.})$ 为外加电场。

(4) 式中, 由于 SiO_2 材料属于无定性体, 二阶非线性光学系数 d 为 0, 因此等效二阶非线性光学系数为

$$\chi_{\text{eff}}^{(2)} = 6\chi^{(3)} E_{dc}(\text{rec.}). \quad (5)$$

因此, 热极化形成材料内部冻结电场 $E_{dc}(\text{rec.})$, 引起等效二阶非线性系数 $\chi_{\text{eff}}^{(2)}$, 从而在 SiO_2 材料中会表现一定的线性电光效应及二阶非线性效应。

3. SiO_2 脊形波导 MZ 型电光调制器的设计与制作

以往的研究结果表明, SiO_2 电极化引起的电光和非线性效应的有效深度为电极沿波导深度方向约几个微米, 极化电极距离导波层越近, 极化的效果就越显著, 因此应当尽可能地使导波层接近极化电极。另一方面, 由于波导上方调制电极的存在需要波导层和电极之间的缓冲层足够厚, 以使电极引起的光传输损耗足够低。

我们通过 BeamPROP 软件的设计和模拟, 比较具有相同覆盖层厚度的脊形波导和掩埋式波导用于热极化实验的优劣。图 1 为两种波导结构的横截面示意图。模拟中, 取脊形条波导和掩埋式条波导的波导参数相同(如缓冲层和导波层的折射率、厚度以及条波导宽度等), 实际模拟取 $n_1 = 1.4835$, $n_2 = 1.4687$, 基底厚度 $6.5\mu\text{m}$, 波导芯层厚度 $6\mu\text{m}$, 脊形波导芯层非脊处厚度 $4.5\mu\text{m}$ 。假设波导截面光场最大光强为 1, 计算出光衰减到波导上覆盖层表面处光的强度, 分别得到脊形波导和掩埋式波导的波导表面光强 P 与上覆盖层厚度 d 的关系如图 2 所示(TE 偏振情形)。

图 2 结果显示, 上覆盖层厚度范围为 $1\text{--}3\mu\text{m}$ 时, 有覆盖层的脊形波导的波导表面光强比具有同样厚度覆盖层的掩埋式波导表面光强明显要小, 即光波在脊形波导中传播能量更集中, 受到电极的影响更小, 更适合用于 SiO_2 波导的热极化研究。模拟

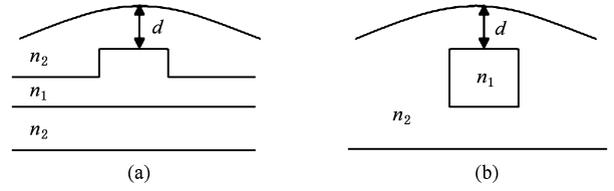


图 1 具有上覆盖层的脊形波导(a)和掩埋式波导(b)的横截面结构示意图

发现图 2 所示的模拟结果对波导折射率增量并不敏感。图 2 为 TE 偏振情况下的模拟结果, 模拟发现 TM 偏振有相同结论。

根据以上计算结果, 实验中我们取脊形波导上覆盖层的厚度 $d = 2.5\mu\text{m}$, 控制导波层相对缓冲层的折射率增量为 1.2%, 保证波导上方的调制电极不会造成大的光传输损耗。图 3 为所设计的具有上覆盖层的脊形波导的模拟光场分布情况。

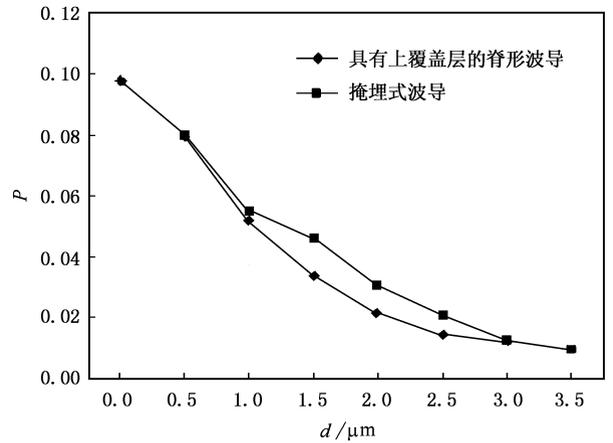


图 2 具有上覆盖层的脊形波导与掩埋式波导的波导表面光强 P 与上覆盖层厚度 d 的关系对比

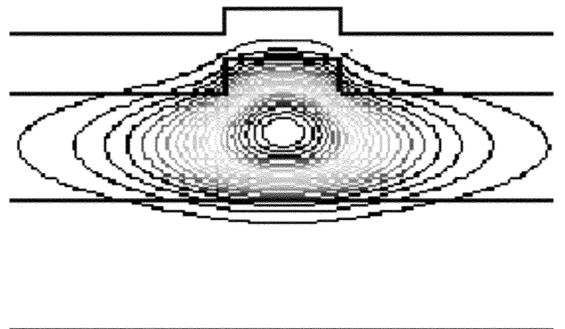


图 3 带覆盖层的脊形波导的光场分布情况

根据上述设计, 我们利用微电子工艺制作具有

上覆盖层的 SiO₂ 脊形波导 MZ 型电光调制器. 首先在洁净的硅片上利用等离子体增强化学气相沉积方法 (PECVD) 依次生长 SiO₂ 缓冲层 (6.5 μm 厚) 和掺 GeO₂ 的 SiO₂ 导波层 (6 μm 厚), 利用光刻工艺在基片上形成 MZ 型电光调制器图形, 用电感耦合等离

体 (ICP) 对掺 GeO₂ 的 SiO₂ 导波层进行刻蚀 (刻蚀深度为 1.5 μm), 以形成宽 6 μm 的脊形波导结构; 再次利用 PECVD 生长 SiO₂ 上覆盖层 (2.5 μm 厚); 最后, 在 MZ 电光调制器的一个臂上依次蒸镀金属 Ti (16 nm) 和 Ni (400 nm), 作为极化和调制电极.

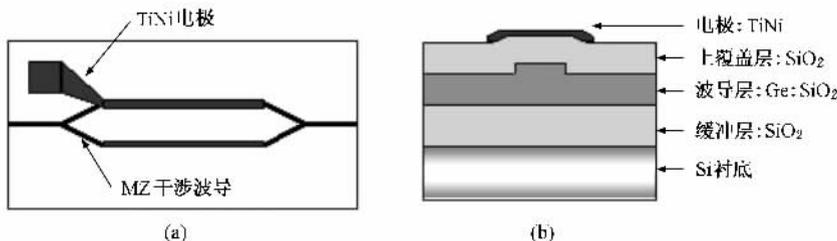


图 4 具有上覆盖层的 SiO₂ 脊形波导 MZ 电光调制器示意图 (a) 俯视图; (b) 横截面图

4. 热极化实验

在对所制作的 SiO₂ 脊形波导 MZ 型电光调制器进行热极化处理之前, 首先需要测量其电光效应, 以便与热极化处理后的电光效应性质作对比. 我们较早时期的研究^[15]发现, 无论极化前还是极化后, SiO₂ Mach-Zehnder 电光调制器 TE 和 TM 模的半波电压几乎相等, 即在不同的偏振模式下, 电光效应没有显著差别, 因此电光效应的测试实验中不必对入射光的

偏振进行控制.

MZ 波导调制器的一个臂上蒸镀的 Ti 和 Ni 作为极化正电极, 硅片背面相应位置涂抹导电胶作为地电极, 并在两电极上分别用导电胶粘上铜导线作为电极引线. 将样品的正电极和地电极分别与高压电源的正电极和地电极相连, 如图 5 所示. 通过单模光纤把波长为 1550 nm 的光波耦合进入 MZ 电光调制器一端, 用光功率计在另一端实时测量输出光强. 缓慢升高调制电压, 每升高 50 V 记录一次输出光强, 得到极化前的调制电压-输出光强曲线, 见图 6.

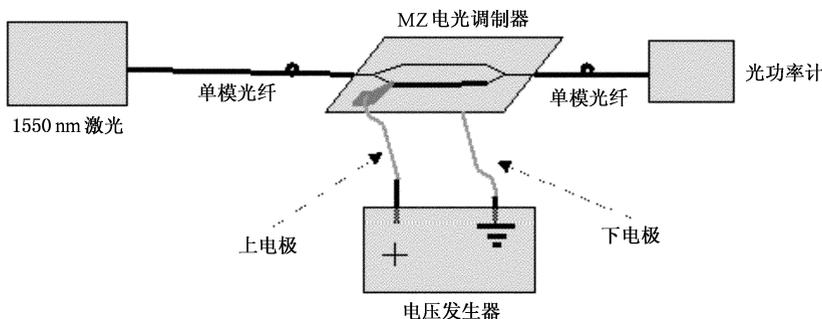


图 5 电光效应测量装置示意图

然后对样品进行热极化处理. 把样品置于高温炉内, 将样品的正电极和地电极分别与高压电源的正电极和地电极相连. 经过 1 h 缓慢升温, 从室温升至 300 °C, 保持恒温. 对波导施加电压, 从 0 V 开始慢慢升到 3.5 kV, 保持恒温恒电压 1 h, 然后缓慢降温, 为了防止高温下内电场退化, 必须在温度降至室温后才撤去外电场. 整个过程大约持续 3—4 h.

热极化处理后, 再次测量样品的调制电压-输出光强曲线 (见图 6), 与热极化前的结果进行比较和

分析.

5. 结果分析与讨论

如图 6 所示, 热极化前样品的半波电压约为 3500 V, 热极化后半波电压约为 1500 V, 分别计算出极化前后样品的二次电光系数 $s = \frac{\lambda d^2}{n^3 V_{\pi} L}$, 其中, λ 为测试光波长, d 为波导厚度 (即上下电极距离), n

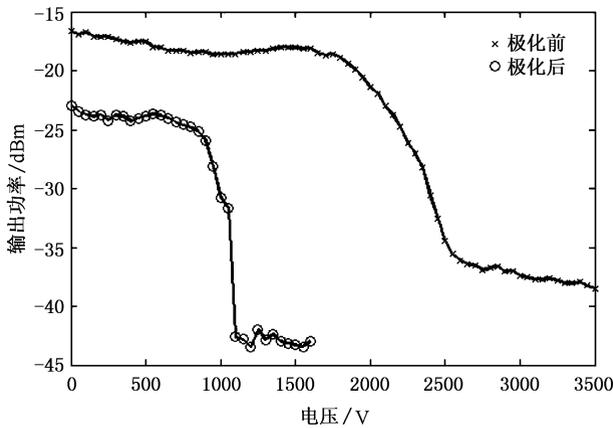


图 6 SiO_2 脊形波导 MZ 调制器的输出光强与外加电压曲线

为波导层折射率, V_π 为半波电压, L 为电场作用长度(即电极长度). 极化前后样品的二次电光系数分别为 $1.56 \times 10^{-22} (\text{m/V})^2$ 和 $8.50 \times 10^{-22} (\text{m/V})^2$, 即热极化使样品的二次电光系数提高到极化前的近 5.5 倍. 根据 $r = \frac{\lambda d}{n^3 V_\pi L}$, 得到极化后样品的线性电光系数为 0.093 pm/V , 比我们在较早时期对不同覆盖层厚度的同类结构极化得到的线性电光系数 (0.05 pm/V)^[15] 高出近一倍, 且显著优于日本 NTT 公司报道的基于掩埋式波导的 0.02 pm/V 的线性电光系数^[13]. 实验结果与我们前面的理论分析是一致的,

即热极化过程形成并增强了材料内部的冻结电场, 从而引起明显的线性电光效应及二阶非线性效应.

图 6 中可以看到, 器件在极化后的输出功率比极化前小, 即器件极化后插入损耗变大. 这是由于器件在极化前的电光效应测试之后经历了一系列的实验步骤, 如: 在样本上去除及制作电极、热极化、清洗样品等等, 特别是去除金属电极的步骤较复杂(包括金属电极及导电胶的溶解、酸碱液清洗、超声清洗等步骤), 这些实验过程不可避免地损伤波导的端面 and 表面, 因此增大了波导的损耗, 因此器件的制作及测试整个过程还需进一步改善, 以减小器件的插入损耗.

6. 结 论

本文对具有上覆盖层的 SiO_2 脊形条波导结构进行了优化, 利用微电子工艺制作了 SiO_2 脊形条波导和 MZ 型电光调制器, 在此基础上研究热极化引起的电光效应及非线性效应, 得到了 0.093 pm/V 的线性电光系数, 约为未经优化的同类波导结构极化后线性电光系数 (0.05 pm/V)^[15] 的两倍, 显著优于已有报道的基于掩埋式波导极化后的线性电光系数 (0.02 pm/V)^[13], 并对热极化引起的电光和非线性效应进行了理论分析.

- [1] Myers R A, Mukherjee N, Brueck S R J 1991 *Opt. Lett.* **16** 1732
 [2] Fujiwara T, Wang D, Zhao Y, Fleming S, Poole S, Sceats M 1995 *Electron. Lett.* **31** 573
 [3] Corbari C, Mills J D, Deparis O, Klappauf B G, Kazansky P G 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1585
 [4] Blazkiewicz P, Xu W, Fleming S 2002 *J. of Lightwave Technology* **20** 965
 [5] Okada A, Ishii K, Mito K, Sasaki K 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 2854
 [6] Kazansky P G, Kamal A K, Russell P St J 1993 *Opt. Lett.* **18** 693
 [7] Fokine M, Saito K, Ikushima A J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87**
 [8] Qiu M X, Mizunami T, Koya H, Pi F, Orriols G 1998 *Proceedings of Nonlinear Optics* **98** 370
 [9] Luo Y, Biswas A, Frauenglass A, Brueck S R J 2004 *Appl. Phys.*

Lett. **84** 4935

- [10] Deparis O, Mezzapesa F P, Corbari C, Kazansky P G, Sakaguchi K 2005 *J. of Non-Crystalline Solids* **351** 2166
 [11] Takebe H, Kazansky P G, Russell P St J, Morinaga K 1996 *Opt. Lett.* **21** 468
 [12] Bai Y X, Zhang Z H, Fan D Y, Wang Z J, Zhang G Q 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1564 (in Chinese) [白迎新、张筑虹、范滇元、王之江、张国庆 1994 物理学报 **43** 1564]
 [13] Abe M, Kitagawa T, Hattori K, Himeno A, Ohmori Y 1996 *Electron. Lett.* **32** 893
 [14] Bahaa E A Saleh, Malvin Carl Teich 1991 *Fundamentals of Photonics* (New York: John Wiley & Sons, Inc)
 [15] Cao X, He S 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1081



Electro-optic effect induced by thermal poling in SiO₂ ridge waveguides^{*}

Cao Xia Qin Hai-Yan[†] Cheng Li-Hua

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China*)

(Received 29 November 2005 ; revised manuscript received 15 March 2006)

Abstract

The structure of silica ridge waveguides with upper-cladding is optimized by theoretical simulation. Based on this design , a Mach-Zehnder electro-optic modulator is fabricated by micro-electronics techniques , which is used for the study of electro-optic effect and nonlinear effect induced by thermal poling. The nonlinear effects in silica are improved after thermal poling , with 0.093pm/V and $8.50 \times 10^{-22}(\text{ m/V})^2$ achieved in the experiment for linear electro-optic coefficient and second-order electro-optic coefficient , respectively. The physical mechanism of the enhancement of nonlinear effects in silica by thermal poling is also analyzed theoretically.

Keywords : electro-optic modulator , SiO₂ waveguide , electro-optic effect , thermal poling

PACC : 4280K , 4280L , 7820J , 4265

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 60377022 , 60408001) and the Scientific Research Starting Foundation for Returned Overseas Chinese Scholars , Ministry of Education , China.

[†] Corresponding author. E-mail : hattieqin@coer.zju.edu.cn