

文章编号: 1001-5078 (2006) 09-0837-03

铁电薄膜光波导的研究进展

李 锋, 刘保亭, 赵庆勋, 闫 正
(河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002)

摘 要: 文章介绍了铁电薄膜光波导的特点和表征方法, 综述了铁电薄膜材料与制备方法, 探讨了铁电薄膜光波导的发展趋势。

关键词: 平面光波导; 光波导器件; 铁电薄膜

中图分类号: TN252; O484. 1 **文献标识码:** A

Research Progress of Optical Waveguide Using Ferroelectric Film

LI Feng, LU Bao-ting, ZHAO Qing-xun, YAN Zheng
(College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: Research progress of ferroelectric film optical waveguide is summarized based on the characteristics and characterization of ferroelectric waveguide, ferroelectric film materials, and deposition methods. Some aspects for future ferroelectric waveguide device have been proposed.

Key words: planar waveguide; waveguide device; ferroelectric

1 引 言

平面光波导是集成光学重要的基础性部件, 近年来, 由于高科技发展的需要, 人们对平面光波导进行了大量的研究, 以它为基础的光信息处理、光计算等技术发展十分迅速。光波导最早的研究可追溯到 1910 年, Hondros 和 Debye 关于电介质棒的研究工作^[1]。直到激光问世以后, 才真正开始了光波导的研究。平面波导型光器件 (光子集成器件) 是采用集成光学工艺, 根据功能要求制成各种平面光波导, 有的还要在一定的位置上沉积电极, 然后光波导再与光纤或光纤阵列耦合, 是多类光器件的研究热点。目前, 常用的光波导按材料主要分为以下几种: 硅基沉积二氧化硅光波导^[2]、InGaAsP/InP 光波导^[3]和聚合物 (Polymer) 光波导^[4]。此外, 为了获得更好的光波导性能, 许多研究机构正在探索新型材料光波导, 其中, 铁电薄膜光波导在世界范围内已经引起了人们的关注, 而铌酸锂 (LiNbO₃) 是研究的最早的铁电光波导材料。随着薄膜生长技术的发展, 铁电多层薄膜光波导器件得到了很大的发展。

2 铁电薄膜光波导特点

平面薄膜波导是由三层平面介质薄膜组成的光波导。中间一层介质膜的折射率最大, 为光传播的通道, 称为波导膜。下层为衬底, 上层为覆盖层, 可以用空气做覆盖层, 衬底与覆盖层折射率相等的为对称型波导, 不相等的为非对称型波导。由于铁电薄膜的光学和电光性质, 可以用铁电薄膜作为平面光波导的中间介质膜。相对于体材料而言, 铁电薄膜具有许多优点: 可望与广泛使用的微电子或光电子元件集成, 从而构成单片集成器件。将铁电薄膜与半导体二极管激光器集成制作小型、紧凑、单片集成的电光或倍频器件就是一个明显的例子; 薄膜与衬底之间大的折射率差, 使薄膜与衬底本身就构成一个光波导, 并可望使器件实现高能光束限定,

基金项目: 国家自然科学基金 (50572021); 国家人事部优秀回国人员基金 (G05 - 06); 河北省自然科学基金 (E2005000130); 教育部留学回国人员科研启动基金。

作者简介: 李 锋 (1980 -), 男, 硕士研究生, 主要从事铁电薄膜及器件的研究。E-mail: fengaddress@163.com

收稿日期: 2006-03-18

从而使器件具有高的功率密度; 可实现集成光波导器件的小型化; 抗光损伤能力优于同类型的体材料。相对于其它材料光波导来说, 铁电薄膜光波导优势主要表现在: 价格低廉, 易于制作, 结构紧凑, 可靠性强。

3 铁电薄膜的制备方法

用于制备光波导的理想铁电薄膜应该具有好的结晶性、高度择优外延取向性、良好的表面平整性等优点。只有高质量的铁电薄膜才具有以下优点: (1) 强的约束光的能力; (2) 高密度集成; (3) 高的能量密度; (4) 大的非线性系数; (5) 良好的热稳定性。因此, 铁电薄膜的制备方法和处理工艺非常重要。

铁电薄膜的制备方法很多, 目前最常用的方法有: 磁控溅射法 (magnetron sputtering)^[5-6]、脉冲激光沉积法 (pulsed laser deposition)^[7]、金属有机物化学气相沉积法 (metal-organic chemical vapor deposition)^[8]、溶胶-凝胶法 (sol-gel)^[9-10] 等。

铁电薄膜的成分和结构决定铁电薄膜器件的性能。

4 铁电薄膜材料

在材料选择与薄膜制备、性能测试与表征、光学损耗机制研究及降低光学损耗的措施等方面, 人们已经开展了大量的工作。

铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体是一种比较成熟的材料, 它最大的优点是具有大的电-光系数、宽的光透射范围 (从可见光到红外光) 以及好的热和化学稳定性。铌酸锂铌光波导开发较早, 其主要工艺过程是: 首先在铌酸锂基体上用蒸发沉积或溅射沉积的方法镀上铌膜, 然后进行光刻, 形成所需要的光波导图形, 再进行扩散, 可以采用外扩散、内扩散、质子交换和离子注入等方法来实现, 并沉积上二氧化硅保护层, 制成平面光波导。该光波导的损耗一般为 $0.2 \sim 0.5 \text{ dB/cm}$ 。目前, LiNbO_3 已广泛应用于电光调制器、电光偏转器和电光开关, 应当指出, 高品质 LiNbO_3 薄膜的生长仍然是光波导领域的研究热点。X Lansiaux 等人以 (0001) 取向的 Al_2O_3 为基片, 在 490 低温下, 成功制备出了 (0001) 取向的单晶 LiNbO_3 薄膜^[11]。一些看似困难的问题已经得到了解决: 使用剥离技术和嫁接技术实现 LiNbO_3 光波导与光电子线路的集成; 通过 Mach-Zehnder 结构实现高速和宽带工作; 通过注入稀土离子 (如 Er^{3+}) 实现光致发光。但是, LiNbO_3 光波导要真正得到广泛应用, 还需要继续努力。

在铁电薄膜材料中, 锆钛酸铅 (PZT) 具有优异的铁电和光学性质, 已引起人们的极大关注^[12-14]。可以通过调节它的成分比例和退火工艺来调节其光学性能, 例如, 增加 Zr 的含量或提高退火温度可以降低折射率, 也可以通过掺杂来改变折射率。这种性能可调的材料在器件上非常实用, 特别是制备阵列波导装置。另外, 器件实用化要求用于光波导的薄膜的均方根粗糙度 (rms) 小于 1 nm , 这对基片、环境以及制备工艺都提出了很高的要求。我们组的刘保亭等人应用不同的方法制备了外延铁电薄膜^[15-16]; S H. Hu 用 sol-gel 法在单晶的 SrTiO_3 基片上制备出了 (001) 择优取向 PZT 薄膜^[17]。

锆钛酸铅镧 (PLZT) 也被认为是一种很有前途的光波导材料。它具有比 LiNbO_3 还要高很多的电光系数, 所报道的 PLZT (8/65/35) 陶瓷的电光系数为 612 pm/V (LiNbO_3 的电光系数为 $3 \sim 31 \text{ pm/V}$)。然而, 一般的 PLZT 薄膜的光学损耗很高, 制备结晶良好、晶向单一、化学成分比均匀、表面平整度高的 PLZT 薄膜, 是降低光学损耗的关键因素。Jan Lancok 等人用脉冲激光沉积法做出了可用于光波导的 PLZT 薄膜^[18]; 近来 Keiichi Nashimoto 等人在铌 (Nb) 掺杂的钛酸锶 (SrTiO_3) 半导体基片上, 用固相外延法 (solid-phase epitaxy) 制备出了 PLZT 铁电薄膜光波导, 并合成了低压驱动波导装置, 其中 PLZT 铁电薄膜光波导的光学损耗不到 1 dB/cm , 表面均方根粗糙度仅为 0.6 nm ^[19-20]。

其它铁电材料如: 钛酸钡 (BTO)、铌酸锶钡 (SBN) 等, 也是研究的非常多的光波导材料^[21-22]。这些材料从性能到制备工艺要求上各有不同。

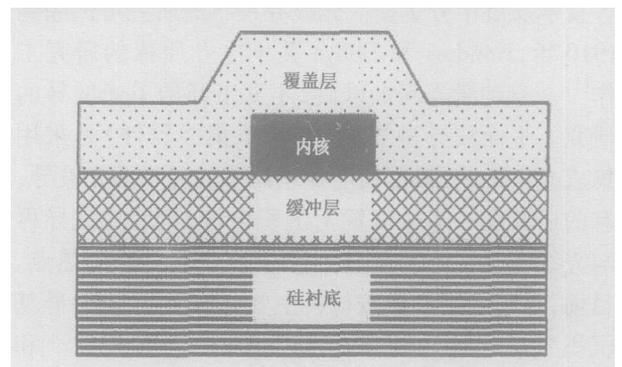


图 1 硅基铁电光波导示意图

在半导体衬底上制备高质量的铁电薄膜是实现铁电器件与半导体微电子器件集成的前提, 图 1 给出了硅基铁电薄膜光波导示意图。缓冲层的应用使得在半导体衬底上制备高质量的铁电薄膜成为可能。应用 MgO 作为缓冲层, 可以实现 Si 衬底上

LNbO₃ 薄膜的生长^[23]。刘保亭等人应用掺 La 的 SrTiO₃ 作模板,在硅基片上外延生长了 PZT 薄膜^[16]。最近, Jiwei, Zhai 等人研究发现,生长在 SiO₂ 上的 PZT 薄膜随温度的升高其光学损耗呈上升趋势,而生长在 SrTiO₃ 上的 PZT 薄膜随温度的升高其光学损耗呈下降趋势^[24]。

5 铁电薄膜光波导的表征

铁电薄膜光波导可以采用棱镜耦合的测试原理来测试材料折射率、薄膜厚度、平面光波导损耗等光学性能参数,这些光学性能测量的原理虽然相对简单,但对测量装置的精度要求较高。铁电薄膜集成光波导器件基本参数主要包括:二次谐波产生系数(SHG)、电光系数、光学损耗系数以及折射率等,其中,光学损耗系数是最重要的参数之一,它直接影响着铁电薄膜光波导的性能。薄膜光学损耗主要来源于光吸收损耗、散射损耗、漏电损耗和薄膜表面粗糙度。由于光吸收是一种本征特性,因而降低薄膜光学损耗最重要的途径是降低散射损耗和降低表面粗糙度。铁电薄膜择优取向越好、缺陷越少、表面粗糙度越小,那么光学损耗系数就越小。一般铁电薄膜的光学损耗降到 1dB/cm 以下,便可应用到实际器件中。

6 铁电薄膜光波导的发展趋势

铁电薄膜光波导的研究主要集中在以下几个方面:(1)高质量外延铁电厚膜的制备;(2)新型结构铁电光波导的设计与构架;(3)新型铁电薄膜材料研究和薄膜制备方法探索;(4)集成铁电体的制备;(5)应用铁电体的电光性能,广泛开展电光器件的研究。

7 结束语

尽管铁电薄膜光波导及其制备技术研究已取得很大进展,但是铁电薄膜光波导要在实际应用上取得重大突破,还有大量工作要做。可以预料,随着铁电薄膜研究的深入,高性能的铁电光波导器件将不断涌现,铁电薄膜光波导将以其自身的特点,在未来发挥更重要的作用。

参考文献:

[1] D Hondros, P Debye Electromagnetische wellen an dielektrischen drahten[J]. Ann Phys, (Leipzig) 1910, 32, 465 - 476
 [2] Lee Jeong Woo, Kim Sang Sub, Lee Byung-Taek, et al Ge-doped SiO₂ glass films prepared by plasma enhanced chemical vapor deposition for planar waveguides[J]. Ap-

plied Surface Science, 2004, 228: 271 - 276
 [3] Zengerle R Weiershausen W. Tapered two-layer In-GaAsP/InP waveguides for highly efficient chip coupling to single-mode fibers[J]. Optics Communications, 1995, 115: 453 - 460
 [4] ShiWei Ding, Yujie J, Fang Changshui, et al Single-mode rib polymer waveguides and electro-optic polymer waveguide switches[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 38: 361 - 371.
 [5] Ezhilvalavan S, Victorsamper, Toh Wei Seng, et al Ferroelectric properties and leakage current characteristics of radio-frequency-sputtered Sb₂(VO₂·1Nb₂O₉)₂ thin films[J]. J. Appl Phys, 2004, 96(4): 2181 - 2185.
 [6] Song-min NAM, Takaaki Tsurumi In Situ Epitaxial Growth of Lead Zirconate Titanate Films by Bias Sputtering at High RF Power[J]. Jpn J. Appl Phys, 2004, 43(5): 2672 - 2676.
 [7] Lookman A, Bowman R M, Gregg J M. Thickness independence of true phase transition temperatures in barium strontium titanate films[J]. J. Appl Phys, 2004, 96(1): 555 - 562
 [8] Takahiro Oikawa, Hitoshi Morioka, Atsushi Nagai, et al Thickness scaling of polycrystalline Pb(Zr, Ti)O₃ films down to 35 nm prepared by metalorganic chemical vapor deposition having good ferroelectric properties [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(10): 1754 - 1756
 [9] Jiwei ZHA I, Hung T F, Haydn CHEN. Relaxor and nonlinear behaviors of SrTiO₃/BaTiO₃ multilayers derived by a sol-gel process[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(11): 2026 - 2028
 [10] Maki K, LU B T, SO Y, et al Low-Temperature Fabrication of Epitaxial and Random-Oriented Pb(Zr, Ti)O₃ Capacitors with SrRuO₃ Electrodes on SiWafers[J]. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52: 19 - 31.
 [11] X Lansiaux E Dogheche, D Remiens LNbO₃ thick films grown on sapphire by using a multistep sputtering process [J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(10): 5274 - 5277.
 [12] Yang Wein-Dua PZT/PLZT ceramics prepared by hydrolysis and condensation of acetate precursors[J]. Ceramics International, 2001, 27(4): 373 - 384.
 [13] Park Hyeong-Ho, Park Hyung-Ho, Hill Ross H. Stacking effect on the ferroelectric propertise of PZT/PLZT multilayer thin films formed by photochemical metal-organic deposition[J]. Applied Surface Science, 2004, 237: 427 - 432
 [14] Thomas Reji, Mochizuki Shoichi, Mihara Toshiyuki, et

(下转第 857 页)

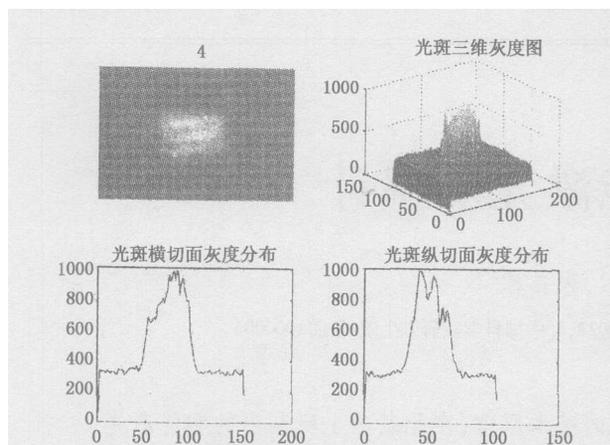


图 6 实验结果图

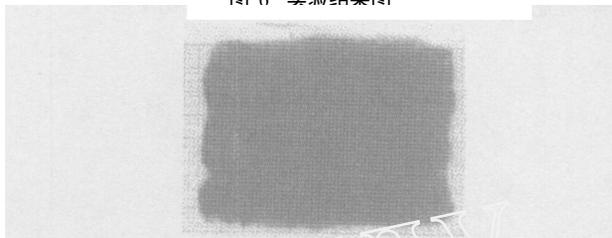


图 7 热敏纸实际接收光斑

图 6 为软件处理最后给出的 figure 窗口,其中左上图为鉴别出的光斑图像,标题“4”表示被鉴别出光斑的序号,右上图绘出了该光斑三维灰度分布图,左下图和右下图分别表示从该光斑形心处切开的整个图像横切面与纵切面的灰度分布图。图 7 给

出热敏纸接收的该光斑形状。经多次实验证明,通过该软件鉴别出的最佳调谐位置与通过人工鉴别出的位置误差在 ± 16 以内。

5 结论

随着激光探测器件的发展和计算机处理水平的提高,利用计算机处理光斑图像进而分析激光特性将成为激光探测和应用中的关键技术。本文针对光栅调谐 TEA CO₂ 激光器,通过计算机对红外热像仪采集到的光斑进行数字图像处理,最终实现了对光斑的鉴别,得到了最佳光斑输出。这一方法代替了人工操作,将逐渐得到发展和广泛应用。

参考文献:

- [1] 赖志国,余啸海. Matlab图像处理与应用 [M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [2] 宋海平,叶征宇,柯常军,等. 非制冷焦平面热像仪获取脉冲 CO₂ 激光光斑研究 [J]. 激光与红外,2004,34(3):203-205.
- [3] 李伦,巩马理,刘兴占,等. Matlab用于激光光束质量分析 [J]. 激光技术,2000,24(6):405-408.
- [4] 阮秋琦. 数字图像处理学 [M]. 北京:电子工业出版社,2001.
- [5] 周炳琨. 激光原理 [M]. 北京:国防工业出版社,1995.

(上接第 839 页)

al PZT(65/35) and PLZT(8/65/35) thin films by sol-gel process: a comparative study on the structural, microstructural and electrical properties [J]. Thin Solid Films, 2003, 443: 14-22.

- [15] B T Liu, Z Hao, Y F Chen, et al Investigation on Ag/Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O₃/YBa₂Cu₃O_{7-x} three-terminal system with small gate area [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(14): 2044-2046.
- [16] B T Liu, K Maki, Y So, et al Epitaxial La-doped SrTiO₃ on silicon: A conductive template for epitaxial ferroelectrics on silicon [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(25): 4801-4803.
- [17] S H Hu, X J Meng, G J Hu, et al Preparation and optical waveguide property of metal alkoxide solution-derived Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O₃ thick films [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(18): 3609-3611.
- [18] Jan Lancok, Miroslav Jelinek Structural and optical properties of PLZT thin films deposited by pulsed laser deposition [A]. In: Peter A. Atanasov, Stefka Cartaleva eds Laser Physics and Applications [C]. 11th International School on Quantum Electronics, 2001, 4397: 305-308.
- [19] Keiichi Nashimoto Patterning of (Pb, La) (Zr, Ti) O₃

waveguides for fabricating micro-optics using wet etching and solid-phase epitaxy [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(8): 1054-1056.

- [20] Keiichi Nashimoto Epitaxial PLZT waveguide technologies for integrated photonics [A]. In: Yakov Sidorin, Christoph A. Waechter eds Integrated Optics Devices, Materials, and Technologies IX [C]. 2005, 5728: 34-43.
- [21] Pingsheng Tang, D J Towner, A L Meier, et al Low-voltage, polarization-insensitive, electro-optic modulator based on a polydomain barium titanate thin film [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(20): 4615-4617.
- [22] S I Khartsev, M A Grishin, A M Grishin Characterization of heteroepitaxial Na_{0.5}K_{0.5}NbO₃/La_{0.5}Sr_{0.5}CoO₃ electro-optical cell [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86.
- [23] Kim Ryoung-Han, Park Hyung-Ho, Joo Gi-Tae Cation diffusion characteristics in MgO-doped LNbO₃ during Ti diffusion [J]. Applied Surface Science, 2001, 169-170: 570-574.
- [24] Jiwei Zhai, Xi Yao, Liangying Zhang The optical waveguide characteristics of highly orientated sol-gel derived polycrystalline ferroelectric PZT thin films [J]. Ceramics International, 2001, 27: 585-589.