

Applications of Ferroelectric Materials in Optoelectronic Engineering

Jing-lin Shang¹, Gu-jin Hu²

¹Shanghai Institute of Work Safety Science, Shanghai, China, 200233

²National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China, 200083

Email: sjl@lbs.51safe.com.cn, jlshang@mail.sitp.ac.cn

Abstract: The role played by the multifunctional ferroelectric oxides in optoelectronic engineering becomes more and more important. The pyroelectric effect of ferroelectrics can be used for fabricating new generation of uncooled infrared detectors. The ferroelectrics with photoelectronic, acoustooptic, and nonlinear optical effects are good candidate for constructing optical switches, power splitters, couplers, filters, frequency doublers, and integrated photonic devices. Especially, the newly developed fabrication technology for ferroelectric-based photonic crystals renders a perspective application of ferroelectric materials in photonic band-gap engineering. This review briefly describes the applications of lead zirconate titanate and barium strontium titanate materials in infrared detectors, waveguides, optical switches, 1D photonic crystals, and optical microcavity.

Keywords: Ferroelectric materials, optoelectronic engineering, infrared detector, waveguide, optical switch, photonic crystal, optical microcavity

铁电材料在光电子技术领域的若干应用

商景林¹, 胡古今²

¹上海市安全生产科学研究所, 上海 200233

²中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083

Email: sjl@lbs.51safe.com.cn, jlshang@mail.sitp.ac.cn

摘 要: 多功能的铁电化合物在光电子技术领域的作用日益显著。具有热释电效应的铁电物质是制作新一代非制冷型红外探测器的理想材料; 利用铁电体的电光、声光和非线性光学效应, 可构建光开关、功分器、耦合器、滤波器、倍频器等无源光学元器件或集成光电子器件; 特别是近年来发展的铁电光子晶体制备技术对推动和拓展铁电氧化物在光子带隙工程领域的应用带来了新的希望。本文简要介绍锆钛酸铅和钛酸锶钡两种铁电材料在热释电红外探测器、光波导、光阀开关、一维光子晶体和光学微腔方面的应用。

关键词: 铁电材料, 光电子技术, 红外探测器, 光波导, 光阀开关, 光子晶体, 光学微腔

1. 引言

以光子作为信息和能量载体的光电子技术在信息、能源、材料、航空航天、生命科学和环境科学中已得到广泛的应用。由于光电子技术追求超快速度、超大容量以及高密度, 要求光电子材料在宏观上具有

短的响应时间、低维和易集成的特性, 在微观上则希望是纳米尺寸的复合体。目前被广泛研究的光电子材料有: 电介质、半导体、生物薄膜、有机高分子聚合物等^[1]。

作为多功能的电介质, 铁电材料完全能够满足光电子技术发展的要求, 它在光通讯领域的成功应用就是一个很好的范例。如利用铌酸锂、钛酸钡、铌酸锶钡和铌镁酸铅等铁电晶体制作的光开关、光波导、光

资助信息: 国家标准化管理委员会资助(计划编号: 20091214-Q-450, 20091212-Q-450), 上海市安全生产科学研究所课题(SFBB-10008)

调制器、光学偏转器、锁模调 Q 激光器等是光纤通信和激光技术中的关键部件。

自上世纪 80 年代铁电薄膜制备技术获得突破性进展以来, 铁电薄膜在光电子技术领域的应用研究备受人们关注。例如: 薄膜型热释电红外探测器已成为当前的研究热点^[2-4]; 铁电薄膜光波导器件的研制促进了光波导向高性能和集成模块方向的发展^[5]; 铁电一维光子晶体的成功制备推动和拓展了铁电材料在光子带隙工程领域的应用^[6-8]。本文简要介绍铅钛酸铅 (PZT) 和钛酸锶钡 (BST) 铁电材料在热释电红外探测器、光波导、光阀开关、一维光子晶体方面的应用。

2. 铁电薄膜型非致冷热释电红外探测器

基于热释电效应工作的红外探测器, 可工作于室温、无需特殊的低温致冷设备, 在工业自动化检测、安全监视和国防军事等领域有广泛应用。然而, 采用铁电体材料制作的热释电探测器存在热隔离差、制作工艺复杂、成品率低、成本高等不足, 限制了其进一步发展。如果将铁电材料直接沉积在植有读出电路的 Si 片上, 形成铁电薄膜与 Si 基读出电路相集成的热释电型红外探测器阵列, 不仅可以避免减薄、研磨和抛光等工艺流程对探测器性能造成的影响, 而且还可提高探测器的灵敏度、响应速度和分辨率。

近几年, 国内在红外探测器方面的研究取得了显著进展。刘祚麟等人用射频溅射方法在 Pt/Ti/SiO₂/Si 衬底上制备的 BST 薄膜具有高达 $6.73 \times 10^{-7} \text{C}/\text{cm}^2\text{K}$ 的热释电系数; 他们通过低温缓冲技术解决了薄膜的均匀性和一致性问题; 利用微细加工技术制作的 BST 薄膜单元探测器, 探测率可达 $4.93 \times 10^7 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ^[9]。王三红等人报道的 BST 薄膜单元探测器的 D^* 值则达到了 $9.3 \times 10^7 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ^[10]。而褚君浩小组先后攻克了器件制作中的多项关键技术, 制备了 256×1 元 PZT 薄膜线列探测器, 单元探测率达 $1 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 为下一步研制高性能室温铁电薄膜红外焦平面阵列打下了坚实的基础。其次, 他们还在国际上首次实现了 PZT 的低温晶化生长, 并进一步在 SiN 支撑层上制作了 128×128 元探测器阵列, 器件的单元热释电系数达 $2 \times 10^{-8} \text{C}/\text{cm}^2\text{K}$ ^[11]。

当前发展铁电薄膜热释电非制冷红外探测器阵列中有待进一步提高的关键技术是: 建立与集成电路工艺兼容的高质量、高可靠、大面积均匀的铁电薄膜低温生长工艺; 改善铁电薄膜与微电子电路间的热隔离

效果; 提出铁电薄膜红外探测器的最佳器件结构设计; 研究适用于铁电薄膜红外焦平面阵列的读出电路, 探索新型光电混合读出方式。

3. 铁电光波导

在信息化时代, 复杂信息网络与交换系统比比皆是, 其中一个最基本单元和关键组件就是光波导。按材料划分, 光波导可分为聚合物光波导、SiO₂ 光波导和半导体光波导^[5]。

为了提高波导及波导型器件的性能, 许多研究小组正在积极探索使用新型材料制作光波导^[12, 13]。其中, 铁电薄膜光波导及器件就是研究较多的一类。例如, 戴宁研究组就用改进的溶胶-凝胶工艺成功构筑了结构为 Si/LaNiO₃/PbZr_{0.5}Ti_{0.5}O₃/PbZr_{0.4}Ti_{0.6}O₃ 的光波导和反射式 1×1 路、 2×2 路铁电薄膜电光开关。尽管基于现有技术制作的 PZT 光波导的传输损耗较大, 但初步实现了对光的传输和约束。

目前, 适用于制作光波导器件的铁电薄膜生长、器件工艺以及与半导体器件集成方面的技术有待突破。今后铁电薄膜光波导的研究将会集中在以下几个方面: 新型铁电薄膜材料和薄膜制备方法的探索; 新型结构铁电光波导的设计与构架等^[5]。

4. 铁电光子晶体

光子晶体的制备、物性及其应用研究一直是科学技术领域最活跃的前沿之一。当今, 如何利用具有电光效应的铁电材料构筑光子晶体已成为人们广泛关注的一个热点。近年来, 戴宁研究组发展了一种操作简单、普适性强, 基于单一化学溶液制备一维铁电光子晶体的技术^[6-8]。借助该方法, 可在硅衬底、钛酸锶衬

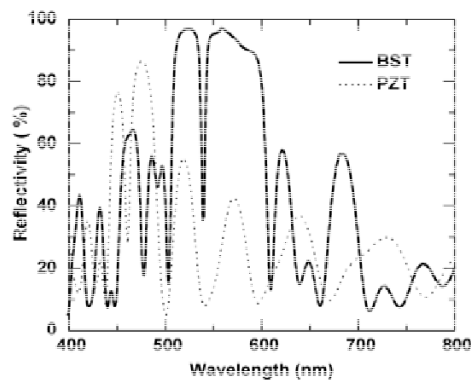


Figure 1. Wavelength dependence of reflectivity of PZT and BST microcavities. The dashed line corresponds to the PZT cavity, and the solid line corresponds to the BST cavity.^[14]

底和石英衬底上生长对特定波段的电磁波具有很高反射率且反射带位置可调的铁电一维光子晶体；同时利用铁电材料的电光效应，通过外加电场初步实现了光子晶体反射带位置的动态调控。此外，他们还解决了玻璃受热易变形以及热胀系数与铁电材料不匹配等技术难题，在石英衬底上成功制作了PZT一维光子晶体，反射谱和透射谱测量表明，这种生长在透明衬底上的一维光子晶体完全可以用作介质反射镜和选择性滤光片^[8]。

由于光学微腔对电磁波具有放大作用、高的激光耦合效率以及小的发散角等性质，光学微腔被广泛应用于垂直腔面发射激光器、多通道滤光片和共振发光二极管。为此，戴宁研究组分别在铁电多层膜的适当位置插入缺陷层构筑了BST和PZT光学微腔^[14]（见图1）。光学测量分析表明，用单一化学溶液技术构筑的BST光学微腔性能可以和半导体材料微腔的性能相比拟。由于其制备工艺简单，成本低，使用的是一种材料且材料具有电光效应，因此，该类器件在未来应用中具有较强的竞争力。

5. 铁电光阀开关

自上世纪八十年代诞生由液晶制作光阀开关的自动变光焊接面罩以来，它被广泛用在船舶制造、铁路车辆、建筑工程、海洋工程、航空航天等行业的焊接作业中。为了预防焊接作业过程中的误操作以及可能发生的职业伤害和生产安全事故，高可靠性的焊接眼面防护具是焊接工必备的个体防护装备。而基于液晶开发的光阀开关有几个无法克服的缺点：响应时间慢（一般在几十个ms）；有效工作温度范围较窄且在（5~10）℃以下时其响应速度大幅度下降；同时，需采用多层迭片才能完成较大的变光范围。

为克服这些缺陷，王怀青等人采用铁电陶瓷取代液晶，成功研制了铁电陶瓷基光阀开关^[15]。光电性能测试表明，其零点几个毫秒的光电响应时间、较宽的工作温度以及稳定的响应速度，明显优于液晶基光阀开关。但是，在铁电陶瓷基光阀开关的制备过程中，需要将铁电陶瓷毛坯切割、研磨、抛光成0.35 mm的薄片，因此，产品存在成品率低和成本高的问题。为实现该产品的产业化，在电极片的制造工艺、电路设计集成化方面仍需要进一步的改进和完善。

6. 结 语

本文简要介绍了多功能铁电化合物在新一代非制冷红外探测器、光波导、光阀开关及一维光子晶体和光学微腔等方面的应用。而文中提到的铁电光子晶体

制备新技术，对推动、拓展铁电材料在光子带隙工程领域的应用，实现光机电一体化，活跃周期性铁电光子晶体基本性质的研究，形成具有自主知识产权的高新技术和新的产业生长点等都具有重要意义。可以预计，铁电材料在光电子技术领域将发挥越来越重要的作用。

References（参考文献）

- [1] Yuanwu Qiu. Applications of photonics in information processing [J]. *Laser & Optonics Progress*, 2005, 42: 41-47
邱元武. 光电子学在信息处理应用中的进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42: 41-47
- [2] Shi Chen, Haibo Zhang, Shenglin Jiang, et al. Status and trend of pyroelectric uncooled infrared focal plane arrays [J]. *Infrared and laser engineering*, 2006, 35: 419-43
陈实, 张海波, 姜胜林, 等. 热释电非制冷红外焦平面现状及发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35: 419-436
- [3] Xu Hu, Yunjian Tai, Jun Yuan, et al. Latest development of hybrid uncooled pyroelectrical IRFPA [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, 25: 22-24
胡旭, 太云见, 袁俊, 等. 非制冷铁电混合式红外焦平面探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25: 22-24
- [4] Tie Lin, Jinglan Sun, Xiangjian Meng, et al. Ferroelectric film thickness dependence of infrared detector with a SiO₂ aerogel thermal insulation layer [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, 26: 329-331
林铁, 孙璟兰, 孟祥建, 等. 用SiO₂气凝胶做隔热层的铁电薄膜红外探测器性能与铁电薄膜层厚度的关系[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26: 329-331
- [5] Feng Li, Baoting Liu, Qingxun Zhao, et al. Research progress of optical waveguide using ferroelectric film [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36: 854-857
李锋, 刘保亭, 赵庆勋, 等. 铁电薄膜光波导的研究进展[J]. *激光与红外*, 2006, 36: 854-857
- [6] Gujin Hu, Xuekun Hong, Jing Chen, et al. Formation mechanism of periodical ferroelectric multilayers with high optical reflectivity [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, 26: 89-91.
胡古今, 洪学鹂, 陈静, 等. 高反射率周期性铁电多层膜形成机理研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26: 89-91.
- [7] J. L. Shang, T. Zhang, H. Wang, et al. Effect of annealing temperature on microstructures and optical properties of Ba_{0.9}Sr_{0.1}TiO₃ films [J]. *Appl. Phys. A*, 2009, 95: 699
- [8] G. J. Hu, X. K. Hong, J. H. Chu, et al. Ferroelectric and optical properties of quasiperiodic PbZr_{0.5}Ti_{0.5}O₃ multilayers grown on quartz wafers [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90: 162903
- [9] Zuolin Liu, Chuangui Wu, Wanli Zhang, et al. Influence of target self-bias in inverted cylindrical RF sputtering on the microstructure and electrical properties of Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO₃ thin films [J]. *Journal of Functional Materials*, 2007, 38: 348-353
刘祚麟, 吴传贵, 张万里, 等. 倒筒式射频溅射自偏压对Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO₃热释电薄膜结构及性能的影响[J]. *功能材料*, 2007, 38: 348-353
- [10] Sanhong Wang, Xiaoqing Wu, Xi Yao. Fabrication and properties of the multi-layer pyroelectric thin film infrared detectors [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, 35: 146-148
王三红, 吴小清, 姚熹. 复合热释电薄膜红外探测器的制备和性能测试[J]. *西安交通大学学报*, 2001, 35: 146-148
- [11] J. H. Chu and X. J. Meng. Study on the ferroelectric thin films for uncooled infrared detection [J]. *Ferroelectrics*, 2007, 352: 260-272
- [12] 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: 4615 - 4617
- [13] S. H. Hu, X. J. Meng, G. J. Hu, et al. Preparation and optical wave guide property of metal alkoxide solution derived $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ thick films [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84: 3609 - 3611
- [14] J. L. Shang, G. J. Hu, T. Zhang, et al. Construction of $\text{PbZr}_{0.4}\text{Ti}_{0.6}\text{O}_3$ and $\text{Ba}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{TiO}_3$ -based optical microcavities by chemical solution deposition [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2009, 92: 2159
- [15] Huaiqing Wang, The Development of Auto-changing Shade Welding Mask Made of Ferroelectric Ceramics [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2006, 2: 24 - 27.
- 王怀青. 铁电陶瓷自动变光焊接面罩的研制[J]. 中国个体防护装备, 2006, 2: 24 - 27.