

文章编号:1001-5078(2004)06-0403-05

光网络开关中的微热学控制技术研究与应用

曲小鹏,刘 静

(中国科学院理化技术研究所,北京 100080)

摘 要:文中对热光波导光开关、喷墨气泡光开关、微热管光开关、热驱动 MEMS 光开关等几种典型光开关中所涉及的热科学问题进行了评述。在对其关键问题进行深入分析的基础上,尝试提出了几类可能的解决方案,对于研究开发新型光开关及升级改造现有光开关技术具有积极的参考价值。

关键词:热光效应;微尺度热效应;光网络开关;热光开关;喷墨气泡光开关;微热管光开关;热驱动 MEMS 光开关

中图分类号:TN951.02 O551.3 **文献标识码:**A

Research and Application of Micro Thermal Control Techniques in Optical Network Switches

QU Xiao-peng, LIU Jing

(Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In the article, several most typical optical switches such as optical waveguide switch, bubble switch, thermo-capillary optical switch and thermally actuated MEMS optical switch, etc. and the micro thermal problems involved were comprehensively reviewed. Based on an in depth discussion on the key mechanisms, several possible strategies for solving the above issues were proposed. This is expected to provide a valuable reference for further designing new optical switches and improving the currently existing optical switches.

Key words: thermo-optical effect; micro-scale thermal effect; optical network switch; thermo-optic switch; thermo-capillary optical switch; bubble switch; thermally actuated MEMS optical switch

1 引 言

近年来,随着微机电系统(MEMS)科学和纳米技术的飞速发展,对微/纳尺度下热学规律的探索引发许多崭新课题^[1],如碳纳米管热问题的研究与应用、半导体器件和生物芯片的热控制、微尺度生物传热问题等。随着光学器件向小型化、微型化迈进,其集成度越来越高,相应热问题也就显得日益突出。在许多微光学器件中,热问题已成为控制器件稳定工作的关键。本文以光信息科学中的重要部件—光网络开关为例,对其中的一些关键热学问题进行了评述,以期促成热科学与光信息科学的相互交融,并推动热光网络控制技术的持续发展。

2 当前光开关技术的发展概况

所谓光开关,是指在光网络通信中对光上下路信号和不同光路之间进行交叉互连的器件,是光交叉互联(OXC)和光分插复用(OADM)技术中的核心部件。研制性能优良并且成本低廉的光开关对光通信技术的发展有重要意义。

现有光开关技术由图 1 所示,按不同工作原理

作者简介:曲小鹏,(1980-),男,2002年7月毕业于山东大学能源与动力工程学院,获工学学士学位,同年9月进入中国科学院理化技术研究所攻读硕士学位,研究方向是光网络器件中的微尺度传热传质问题。Email:jliu@cl.cryo.ac.cn

收稿日期:2004-04-16;修订日期:2004-06-23

分类,主要包括:微机械光开关^[2,3]、电光开关^[4]、热光开关^[5,6]、喷墨气泡光开关^[7~9]、液晶光开关^[10]等。目前,新的技术仍在不断涌现中。在众多光开关技术中,微机械(MEMS)光开关和波导光开关技术相对成熟,已实现商品化,此类开关主要采用硅微加工技术制造而成^[11,12],批量生产时成本较低,在开关损耗、串扰、消光比、开关尺寸等性能上优势明显,是光开关的较佳选择。目前,国外在大规模光开关的研制上已取得了很大进展,国内则有一些滞后,多集中于 1 × N 等小端口的光开关研制生产,研发力量相对薄弱。

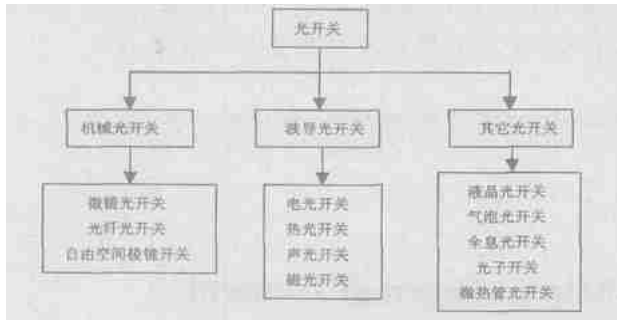


图 1 光开关的分类

对光开关而言,可靠性极为重要,许多光开关对可靠性的要求需达到 99.99%。如图 2 所示, MEMS 光开关中由于要用到复杂的机械驱动装置,系统存在磨损、震动等影响可靠性的问题。波导开关则与此不同,它不含活动部件,因而很好地弥补了这些不足,并在综合性能上有很大提高,在一些小端口应用的场合中优势显著。

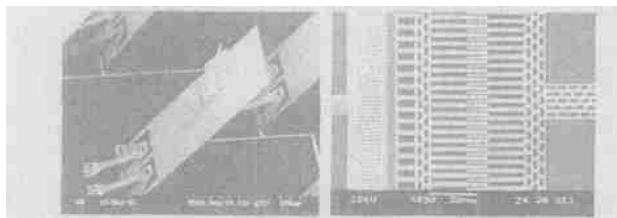


图 2 MEMS 光开关^[2,3]

在各种光波导开关技术中,热控制发挥作用的方式主要体现在如下几方面:(a)基于材料热光效应的波导光开关^[5,6];(b)利用热致相变产生气泡的喷墨气泡光开关^[7~9];(c)利用热驱动液体的热微管光开关^[13];(d)利用热作为驱动原理的 MEMS 光开关^[14](主要是双金属热效应和热胀效应)等。本文主要就这几类光开关及其中的关键热学问题进行分析 and 评价。

3 基于热光效应的波导光开关

热光效应光开关工艺相对成熟,适合阵列化和

大规模生产,成本较低,且能在同一衬底上加以集成。这类光开关利用的是材料的热光效应,即光介质的光学性质(如折射率)会随着温度的改变而发生变化^[15],几乎所有的光波导材料都具有热光效应。至今,就不同材料的热光系统进行理论分析和试验测试已促成许多研究。

在热光效应研究中,一般近似认为材料折射率 n 与温度 T 之间存在线性关系,即:

$$n(T) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T = n_0 + \alpha \Delta T$$

其中, Δn 为折射率变化量, ΔT 为温度变化量, α 为热光系数,与材料种类有关。

热光效应光开关主要有两类:干涉式光开关和数字光开关。其中,干涉式光开关^[16,17]结构紧凑,由两个耦合器和两个波导臂组成(见图 3,图 4)。耦合器将输入一个端口的光信号分成两路相同的光信号,分别经过干涉仪两臂,在波导臂上蒸镀加热器薄膜,薄膜通电后发热致使光信号在干涉仪两臂上产生不同相移,适当地调节加热器电压,即可使两束光的相移满足一定关系,于是输入信号在经过光开关输出端的耦合器后发生干涉作用,实现有选择性的输出。这种结构的光开关对光波长敏感,需要进行温度控制。由硅制成的 M-Z 干涉仪式光开关,由于硅的导热系数相对较高,加热器之间的距离一般至少应保持 100 μ m,以免影响相邻开关的动作^[18]。

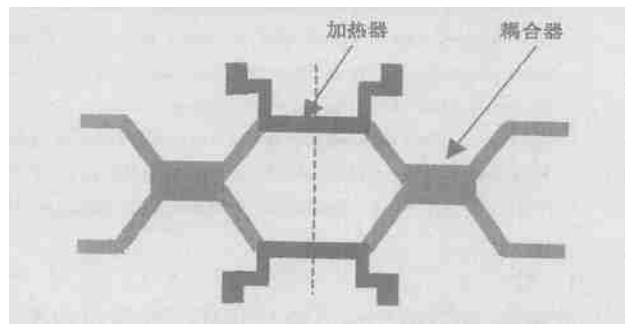


图 3 M-Z 干涉型光开关结构图

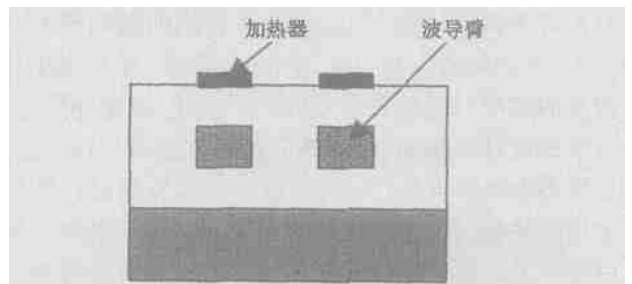


图 4 M-Z 干涉型光开关截面图

与干涉式光开关略有不同的是,数字光开关性

能稳定,只需加热至一定温度,光开关就能保持稳定状态。最简单的数字光开关器件为 1×2 开关,称为 Y 型分支器。图 5 给出的是一种在硅基底上生成的 Y 型光波导,其分支上通常采用表面沉积法形成 T_i 或 C_r 膜加热器。当对其中一个分支进行加热时,其折射率发生改变,使光沿另一个分支传输。这样,依靠两个加热器的联动,即可实现光路的开关切换。

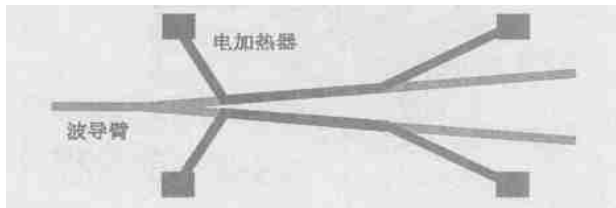


图5 数字光开关结构图

通常,由于硅衬底的热导率比石英和空气大许多,由其引起的热扩散会增加热光开关的功耗,研究者据此提出了一种悬臂梁结构来降低功率消耗^[19,20]。其出发点是在相移区的硅衬底上预先刻出一块凹陷区,之后再在石英包层上刻出许多槽(如图6所示),由此可以大大减少扩散到硅衬底上的热量,从而降低功耗,但这类热光开关功耗的降低是以延长切换时间为代价的,对于造成这种结果的热学规律亟待进一步研究,以便在功率消耗和时间响应之间找到一个平衡点。

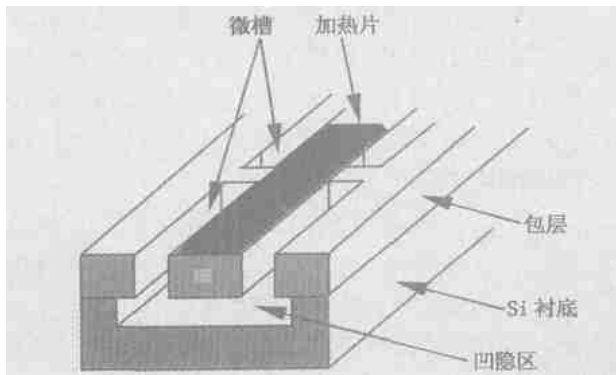


图6 悬梁型 TO 光波导结构

可见,对热光开关进行热设计是提高其热有效利用率及加快热光开关响应速率的关键。此方面,文献[21]提出选用热光系数大的材料或适当延长调制区长度或减小波导层厚度等方法来提高响应时间特性。另外,也可以尝试新的薄膜加热材料如新型合金(目前的加热材料主要是 T_i 和 C_r),用相对小的电流产生大的热量,降低系统能耗等方式。当然,也可考虑采用新的波导加热结构和加热方法,如尽量使加热薄膜靠近波导敷设,或使热量尽可能集中于波导层局部;也可引入激光、微波、射频等空间加热

手段来提高响应时间;以及在开关间采用隔热、绝热结构等。

研制高效率的波导型热光开关,必须清楚其中的关键热力学特性,特别是在稳态下及瞬态响应过程中的温度分布及变化规律。稳态下的温度分布与材料的比热、导热系数、开关结构等参数有关,而开关的响应过程也就取决于这些因素。已有一些研究者对热光开关的热场进行过数值模拟^[22,23]。结果表明,热光型器件的响应速率,在加驱动时取决于温度场的形成和稳定时间,而在去驱动时,则取决于温度场中热的耗散速度。一些已有模型实际上存在诸多有待改进的地方,如各层聚合物的热学特性差异应予考虑,边界上需要考虑辐射效应等,这些都有待于完善的热设计。一般情况下,由于热光波导复杂的几何结构和热学性质所限,解析解很难求得,通常应采用有限元等数值方法对温度场进行分析。此外,各波导臂之间由于温度场的相互干扰还存在热耦合问题,会制约光开关的控制精度。研究者为此提出了一些解决方案,如在硅基底上设置冷却片(图7)或隔热微槽道(图8)等结构^[24],可以降低热耦合的程度,当然,也由于冷却片的存在,加热器需要更大电流来维持开关所需热量,而且冷却片对于某些波导臂埋设较深的系统作用不大。设置隔热微槽道对于降低波导臂热耦合有一定作用,但当波导的间距和深度达到一定条件时,设置微槽道的作用降低^[24]。



图7 设置冷却片的光开关截面结构

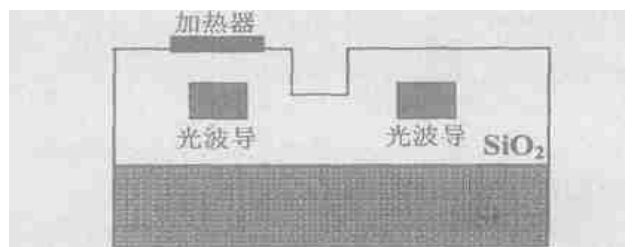


图8 设置隔热微槽道的光开关截面结构

4 喷墨气泡光开关^[8,9]

由图9可见,喷墨气泡光开关由交叉的光波导

组成,其中,交叉处的微腔内填充一种折射率匹配的液体,用以允许缺省条件下的无交换传输,同时在交叉处的液体部位设置微加热片。其工作原理是:当有光路经过交叉点并需要交换时,电热片通电生热,在液体中生成一个微小气泡,光线即被气泡全反射到另一个输出点,从而实现光路的改变,由此起到光开关的作用。

此种光开关的优点是无活动部件,可靠性较高,而且对光偏振相关损耗和偏振模色散均不敏感。缺点是有机液体体积较小,其中气泡的实现需要精确的温度控制电路,而且有机液体在使用过程中得不到更新,一个气泡开关在经过多次冷热交替作用之后可能会造成液体材料质量下降,并引起液体材料折射系数匹配特性发生偏离等不稳定因素。因此有必要研究材料的寿命问题并开发可以长期稳定使用的液体材料。

当光开关长期维持切换状态时,有机液体需长时间加热,因而会导致材料特性变化和温度变化,从而影响相邻信道,如何长时间维持微小气泡并保持其稳定性也是值得研究的关键问题。与 MEMS 技术一样,气泡技术的功能也仅限于开/关(on/off)。显然,热设计在此将发挥重要作用。

针对上述光开关,可尝试利用微液珠操作技术,在通道内设置微小的汞液滴或其它液态金属液滴,通过静电作用驱动液滴在通道内移动,将光线反射进入不同的出射光通道,从而实现光路切换。该设想虽在材料寿命可靠性上有改进,但考虑到有些液态金属存在毒性,这类技术只能在气泡光开关难以发挥作用的场合使用,如气泡状态不易长时间维持的情形。

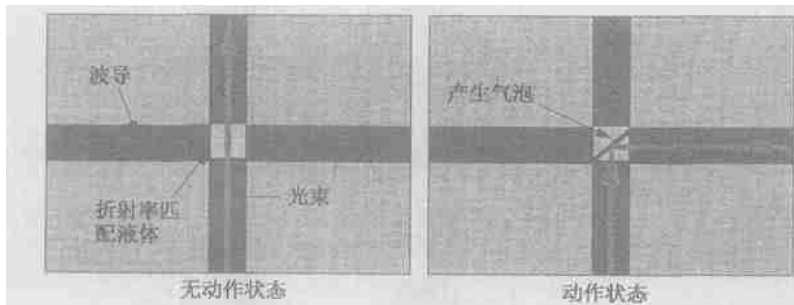


图9 Agilent 气泡光开关结构及工作原理示意图

5 热微管光开关

日本 NTT 实验室研制出一种热微管光开关(图 10)^[13],其结构是在光路上设置微管(微槽道),微管中填充折射率匹配的硅油,常态下光路通过硅油沿直线传播,需要实现光路开关时,两个电阻加热器使

微管两端产生一定的温差,硅油由于受两端温差所产生的表面张力差驱动而在微管道中移动,从而达到改变光束传播方向,实现光开关的操作。

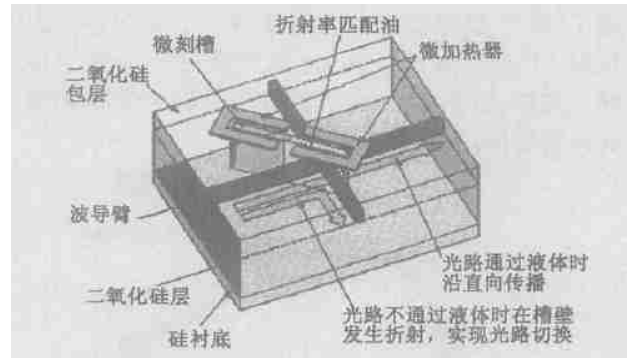


图10 热微管开关的结构示意图^[13]

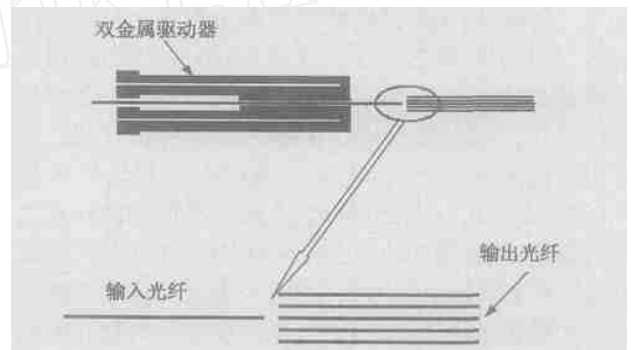


图11 1 xN 热驱动光纤光开关结构

热微管光开关的最大优点是对偏振相关损耗和偏振模色散都不敏感,并易于实现大规模的光开关阵列集成,并且,由于无可动部件因此具有很高的可靠性。缺点是响应频率不高,开关速度慢,只能应用在对频率响应要求不高的场合中。

热微管光开关中的热传导机理也比较复杂,并且涉及到不同相之间的热传递(固、液)。为实现液体精确的动作控制,对于其中的热问题应进行全面深入的研究。另外,应考察在槽道中实现固、液、气三相变化的微型器件中的科学问题,分析其传热传质规律、相变过程并尝试相应器件在光通讯中的可能应用。

对于填充液可能引起的老化问题、热致移动的反应速率问题等应进行广泛实验,以寻找最适合的液体材料。另外,因为这种光开关的驱动方式决定了其动作速率比较慢,所以应尝试采用新的加热方式或新的结构来提高热响应的速率。

6 热致动器驱动的光纤机械开关

在热致动器驱动的光纤机械光开关中主要应用了两种热原理:材料的热膨胀效应和双金属效应^[14]。这种光纤光开关不需要耦合光波导或透镜,并能达到理想的低损耗开关功能,它是在硅片上各向异性刻蚀出U或V形槽,由一个可弯曲的热驱动执行器来移动光纤(见图11),从而实现输入光纤与输出光纤之间的对准,其它位精度可小于1 μm 。

7 结 语

本文对基于热学原理的多种光波导开关技术中的研究进展进行了总结和评述,并讨论了其中所涉及的若干关键热学问题,在此基础上尝试提出了一些可能的解决方案,这些分析对于进一步促进热控制技术与光开关技术的相互交融,从而推动热光网络开关技术的发展具有积极的参考价值。

致 谢:感谢国家自然科学基金项目(50176653)及中科院创新基金项目资助。

参考文献:

- [1] 刘静. 微米/纳米尺度传热学[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [2] Li J, Zhang Q X, Liu A Q. Advanced fiber optical switches using deep RIE(DRIE) fabrication[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2003, 102(3):286 - 295.
- [3] Liu A Q, Zhang X M, Murukeshan V M, et al. An optical crossconnect (OXC) using drawbridge micromirrors[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2002, 97 - 98:227 - 238.
- [4] de Ridder R M, Driessen A, et al. Design and fabrication of electro-optic polymer modulators and switches[J]. Optical Materials, 1999, 12(2~3):205 - 214.
- [5] Diemeer M B J. Polymeric thermo-optic space switch for optical communications[J]. Optical Materials, 1998, 9:192 - 200.
- [6] Hwang W Y, Kim J J. A 1 \times N thermo-optic space switch in a polymeric planar waveguide[J]. Optics Communications, 1994, 109(3 - 4):249 - 252.
- [7] Fouquet J E, Venkatesh S, Troll M, et al. A compact, scalable cross-connect switch using total internal reflection due to thermally-generated bubble [A]. Conference Proceedings Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS, 1998, 2:169 - 170.
- [8] Venkatesh S, Fouquet J E, Haven R, et al. Performance improvements in bubble-actuated photonic crossconnect switches[A]. Conference Proceedings Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS, 2002, 1:39 - 40.
- [9] Jacket J L, Johnson J J. Bistable optical switching using bubbles[C]. Integrated Photonics Research Topical Meeting, 1990, p75.
- [10] Vazquez C, Pena J M S, Aranda A L. Broadband 1 \times 2 polymer optical fiber switches using nematic liquid crystals[J]. Optics Communications, 2003, 224(1 - 3):57 - 62.
- [11] Maboudian R. Surface processes in MEMS technology[J]. Surface Science Reports, 1998, 30(6 - 8):209 - 268.
- [12] Lang W. Silicon microstructuring technology [R]. Material Science and Engineering:R:Reports, 1996, 17(1):1 - 55.
- [13] Makoto S, Makoto H, Nobuaki K, et al. Thermo-capillary optical switch[J]. Hitachi Cable Review, 2001, 20:19 - 24.
- [14] Hoffmann M, Kopka P, Voges E. Bistable micromechanical fiber-optic switches on silicon with thermal actuators[J]. Sensors and Actuators, 1999, 78:28 - 35.
- [15] 黄章勇. 光开关器件及其性能[J]. 飞通光电子技术, 2001, 1(1):11 - 17.
- [16] Lai Q, Hunziler W. Low-power compact 2 \times 2 thermo optic silica-on-silicon waveguide switch with fast response [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(5):681 - 683.
- [17] Goh T, Himeno A, Okuno M, et al. High-extinction ratio and low-loss silica-based 8 \times 8 strictly nonblocking thermo-optic matrix switch[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(7):1192 - 1199.
- [18] 胡军武, 吴涛. 光开关和光开关阵列技术的发展研究[J]. 光通信研究, 2002, (6):58 - 62.
- [19] 许天晖, 庞翠珠, 简水生. 一种新型基于石英的热光型光开关[J]. 光通信技术, 1998, 22(1):29 - 32.
- [20] Okuno M, Takato N, Kitoh T, et al. Silica-based thermo-optic switches[J]. NTT Review, 1995, 7(5):57 - 63.
- [21] 王小龙, 余金中. 光波导开关的最新进展[J]. 物理, 2003, 32(3):165 - 170.
- [22] 杨建义, 江晓清, 杨方辉, 等. 有机聚合物热光器件的热学模型[J]. 光电子 * 激光, 2000, 11(4):349 - 351.
- [23] 钱平凯, 何志义, 钟青. Y分支光波导热光开关[J]. 量子电子学, 1992, 19(2):177 - 180.
- [24] Chao F L, Wang W S. Analysis of temperature profiles of thermo-optic waveguides [J]. Fiber and Integrated Optics, 1994, 13:397 - 406.