

基于 Fabry-Perot 结构的可调波长选择光开关

李新碗,陈建平,叶爱伦,吴龟灵,卢加林

(上海交通大学电子工程系“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室,上海 200030)

摘 要: 本文提出波长选择光开关的概念,首次研制出一个基于 Fabry-Perot 结构的可调波长选择光开关,该开关为 2×2 光纤端口,每个端口携带 N 个波长,工作时可以选 1 个或多个波长,插入损耗小于 3dB,波长调谐范围 10nm,调谐机构为一对多层三明治结构的压电陶瓷,具有驱动电压低,小于 5V 的驱动电压可以达到 3.3nm 的调谐,最大开关时间为 1 毫秒,开关比优于 30dB. 最后还分析了其基本透射与反射光谱性能,并讨论其对光通信、光交换网络产生的重要应用价值.

关键词: 波长选择光开关; Fabry-Perot 腔; 压电效应; 波长调谐; 光通信

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12A-057-04

Tunable Wavelength Selective Optical Switch Based on Fabry-Perot Cavity Structure

LI Xin-wan, CHEN Jian-ping, YE Ai-lun, WU Gui-ling, LU Jia-lin

(The State Key Laboratory on Fiber Optical Local Communication Networks and Advanced Optical Communication System, Dept. of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A kind of tunable wavelength selective optical switch was proposed for the first time. It is based on Fabry-Perot cavity. The optical switch has two-input and two-output fiber ports. Each fiber carries N wavelengths, one or more of which can be selected. The maximum insertion loss is 3 dB and the tunable wavelength range is over 10 nanometers. The tuning mechanism is a sandwiched multi-layered piezoelectric ceramic. The tunable span can reach 3.3 nm under 5 V DC voltages. The switching time is about 1 ms and the on/off ratio is over 30dB. The optical spectrum of the switch is also studied. At last, some applications of such optical switch are discussed.

Key words: wavelength selective optical switch; Fabry-Perot cavity; piezoelectric effect; wavelength tuning; optical communication

1 引言

光开关在现有密集波分复用(DWDM, Dense wavelength division multiplexing)通信系统的测试、网络链路的自愈保护中发挥了极其重要的作用,并为构建全光通信传送网络(OTN, optical transport network)提供了重要物理基础,如光分插复用设备(OADM: optical add/drop multiplexer),光交叉连接设备(OXC: optical cross-connect)等. 目前主要有:机械式光开关(光纤开关,自由空间棱镜开关和微电子机械开关 MEMS),电光开关(铌酸锂光开关, InP 光开关和 SOA 门开关),声光开关,液晶光开关,热光开关,气泡开关和全息光开关等. 但是,目前处于主流地位的实用化光开关主要有三类:第一类为传统机械微光学光开关,大量用于光纤系统中的光路自愈保护,是最

成熟的技术,性能优良,设计配置简单、成本较低、对环境要求不高,获得广泛的应用,但体积大、开关速度慢、可靠性不理想、矩阵规模小;第二类为微电子机械光开关(MEMS, micro electrical mechanical system),将自由空间互连与硅基单片集成技术相结合,继承了半导体集成工艺,具有小型化、大规模、可扩展性强等优点. 高密度矩阵的两维(2D)或三维(3D) MEMS 成功用于大容量光交叉连接设备 OXC,这种机电一体化的开关器件具有结构紧凑集成度高、矩阵规模大、便于批量生产而且具有灵活可变、对比特率和协议透明、跨越电子限制等优点,正成为实用化大型 OXC 的主要技术之一,但目前的开关速度较慢,10ms 到 5ms,且可靠性遇到了实践检验的挑战;第三类为电光开关,如 LiNbO₃ 光波导开关、SOA 光开关,但存在价格高、偏振依赖大、存在较大串扰以及可扩展的规模有限等

收稿日期:2004-09-20;修回日期:2004-11-20

基金项目:国家 863 计划(No. 2001AA122074, 2002AA122022);国家自然科学基金(No. 902040006, 60377013);教育部和上海市科委(No. 022261001, No. 036105009)

问题,目前仅限于高速控制或光突发、光分组交换试验网络。从总的趋势看,光开关正面临性能最优化、规模可扩展、功能多样化等多方面的挑战,并成为建设下一代光网络的瓶颈。

由于目前报道的上述光开关大多基于空间域的,而对波长是均一的,即对所有波长都是同时实现开/关的切换。事实上从光通信中的几个尺度来观察,光开关可以分为空间域(不同光纤)、频率域(不同波长)、时间域(不同时间隙),目前光开关是面向空间域和时间域的交换状态,对频率域无交换选择功能。从 OADM 和 OXC 的构成来看,一般均以波长复用和机械开关一起构成其波长交换功能。如果光开关具有波长选择性,可以允许多种控制组合状态: C_N^k , 其中 N 表示单纤中的波长通道数, k 表示选择波长的个数。例如:单波长的选择时,控制状态数为 N 个。本文通过总结和提炼传统光开关的性能和发展需要出发,提出一种新型的带波长选择的光开关,包括其设计思想、原理实现、基本性能及其在光交换网络中的应用研究,特别是现有 OADM 和 OXC 的结构带来的重要影响。

2 波长选择的光开关概念的提出与工作原理

传统光开关是基于空间光路的切换,同一光路中覆盖的光谱宽度一般非常宽,典型膜片反射/透过性开关,工作频谱宽度可以大于 100 纳米,因而,可以复用的波长通道非常多,如以 0.8 纳米为通道间隔,可以容纳 120 多个光波长通道,在工作带宽内,各个波长都是平等的,因而,可以称之为无波长选择性的空间光开关。关于波长选择性开关,这是近年来引起人们关注的课题,相关报道和国内外专利不多,如 1996 年美国 Case Western Reserve University 的 David A. Mith 提出的基于声光效应的波长路由开关^[1], 2001 年美国 Optical Coating Laboratory 的 Michael A. Scobey 等人申请的美国专利 US 6,320,996^[2],发明了“Wavelength Selective Optical Switch”(波长选择开关),采用一种机械移动窄带滤光膜片方式,实现某一固定波长的选择,其他波长被反射。2003 年 S. Sumriddetchkajorn, and K. Chaitavon 等人发表的基于膜片和 MEMS 机械传动机构实现的可重构上下路开关结构^[3]。另外,2001 年,美国 Tellium, Inc 和 Telcordia Technologies, INC 的 Jayantilal Patel, W. John Tomlinson, Janet Lehr Jackel 发明的美国专利 US 6,327,019^[4] 双液晶波长选择开关,采用波长色散单元-光栅,极化色散单元-Wol-

laston Prism(渥棱斯顿棱镜)及液晶极化调制器组成,上海交通大学在 2004 年公开发表的美国申请专利 US2004/0062473 A1^[5],提出快速可调谐波长选择光开关,采用基于电光聚合物膜片实现电光调谐。因此波长选择光开关为广大科技研究人员的兴趣,特别是由于集成工艺的发展,人们把目光投向可用集成工艺实现的带有波长选择的光波导器件。

图 1 表述了带有波长选择的光开关原理。图 1 中,开关的输入光纤中的 N 个波长(图中用三个箭头表示 3 个波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$),如果有 0 个波长透过波长选择膜片并进入一个输出光纤,则由 $N(N=3)$ 个波长被膜片反射进入另一个输出光纤,此状态表示为 $(0 \cdot \lambda)/N$ 波长选择光开关,这就是一个典型的传统光开关工作原理。同样,如果膜片有任意 1 个波长选择功能,则这一个被选择波长将透过波长选择膜片并进入一个输出光纤,由 $N-1(N=3)$ 个波长被膜片反射进入另一个输出光纤,此状态表示定义为 $(1 \cdot \lambda)/N$ 波长选择光开关,此时,实际控制状态数有 N 个, N 的大小依赖于膜片支持的调谐波长通道数(可以定义为 $N = BW/CS$, BW 为膜片调谐带宽,单位为 nm, CS 为网络或系统的波长通道间隔,可以为 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz 等。以此类推。我们可以定义该类开关为 $(k \cdot \lambda)/N$ 波长选择光开关, k 为被选择的波长个数,记为: C_N^k , 表示 N 选 k 的组合表达式。关于 $(k \cdot \lambda)/N$ 波长选择光开关的控制状态分析见文献[6]

3 基于 Fabry-Perot 结构的可调波长选择光开关

光波长选择开关与普通光开关相比,最大的不同是前者具有波长选择的功能,即利用选择波长完成波长交换矩阵功

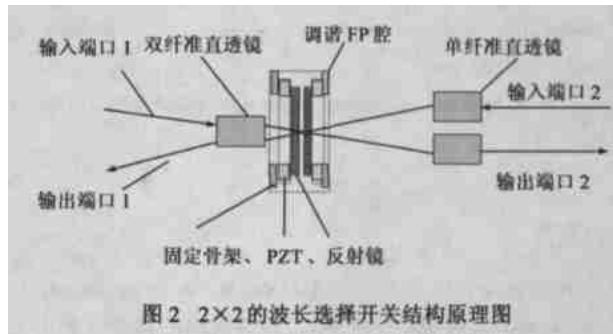


图 2 2×2 的波长选择开关结构原理图

能。图 2 为一个 2×2 的波长选择开关结构原理图。具体包括以下两个部分:光路结构和调谐传动结构。光路结构包括两对输入、输出光纤准直光路,一对构成 Fabry-Perot 腔的反射膜片。调谐传动结构包括多层三明治夹心结构的压电陶瓷 PZT 及固定骨架。其中输入、输出光纤准直光路分别由一个双纤光纤准直器和两个单纤光纤准直器组成。其核心结构就是一个基于压电陶瓷 PZT 的可调 F-P 腔滤波器。不同于文献报道的传统可调 F-P 腔滤波器之处在于:多端口输入输出工作方式,以及多层三明治夹心结构的压电陶瓷 PZT 具有超低电压驱动(5V 以下),从而比较适合应用于通信领域。可调 F-P 腔滤波器具有一个或多个带通波长(依赖于腔的自由光谱宽度 FSR 及工作波长带宽)。作为例子,我们设计在 1550 纳米窗口(C 波段)30 纳米带宽范围内工作一个波长, F-P 腔的腔长为 49.

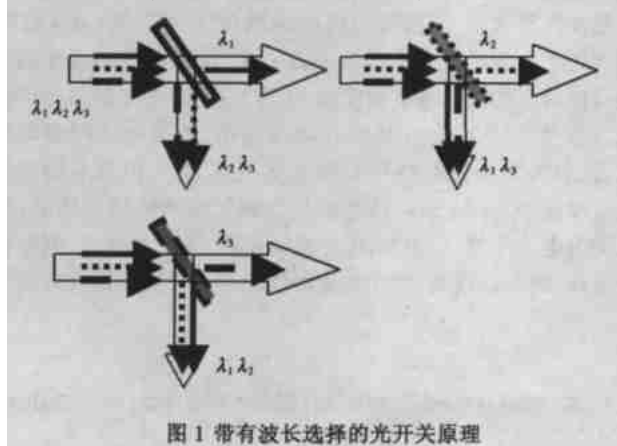


图 1 带有波长选择的光开关原理

725 微米 ($m = 65$, m 为干涉级数), 反射率 98.3%, 透过率为 1.5%, 膜片吸收 $A = 0.2\%$, 利用 FP 腔的传输函数公式^[7]

$$T(\lambda) = 20 \log \left[\frac{1 - \frac{A}{1-R}}{1 + \frac{2\sqrt{R}}{1-R} \sin(2\pi n(l_0 + \Delta l)/\lambda)} \right]^2 \quad (1)$$

其中, A 为膜片材料及腔内的吸收系数, R 为膜片反射率, n 为腔内材料折射率, l_0 为腔长, $T(\lambda)$ 为 FP 腔随波长的传输率变化特征. Δl 为多层 PZT 的位移变化^[8]

$$\Delta l = Nd_{33}V = Ntd_{33}E = ld_{33}\frac{V}{t} \quad (2)$$

上式(2)中, l 为陶瓷的总厚度 ($l = 2\text{mm}$), N 为陶瓷的层数 ($N = 35$), t 为每层陶瓷薄膜的厚度 ($t = 47\mu\text{m}$), d_{33} 为厚度方向的压电应变系数 (d_{33} 由于压法测得, 平均为 $500\text{pC}/N = 500\text{pm}/V$), V 为外加电压.

利用式(1)和式(2)可以推出 FP 腔的中心波长随电压的关系如下:

$$\lambda = \left[1 + \frac{1}{l_0} d_{33} \frac{V}{t} \right] \lambda_{\text{CW}} = \left[1 + \frac{N}{l_0} d_{33} V \right] \lambda_{\text{CW},m} \quad (3)$$

式(3)中, $\lambda_{\text{CW},m}$ 为第 m 级 FP 腔的工作中心波长.

因此, 波长变化可以表示为:

$$\Delta\lambda = \frac{N}{l_0} d_{33} V \lambda_{\text{CW},m} \quad (4)$$

公式(4)表明, 在同一个 FP 腔的干涉级数(对应于一个干涉中心波长)范围内, 其波长调谐独特性是线性变化的. 但是, 不同干涉级数(即不同的干涉中心波长), 其调谐斜率不一样, 即依赖于干涉谐振峰. 这一点, 理论和实验容易得到验证.

由于 FP 腔的透射中心波长与外加电压下引起的波长偏移量是相关的, 根据公式(1)和(4)容易获得相邻两个透射的中心波长随外加电压关系如图 3.

图 3 为外加电压与透射波长偏移的曲线, 横坐标为外加电压, 纵坐标为波长偏移量. 实线为公式(4)的理论计算值, 点为实验测试值. 测试采用安立 9710B 光谱分析仪. 测试的分辨率设为 0.07nm . 可以看出, 在 0 到 40 伏范围, 基本为线性, 根据测量, 大约获得 $1\mu\text{m}$ 的位移, 因而, 可以获得 18.2nm 的漂移. 在 5V 电压驱动下, 可以获得 3.3nm 的波长偏移量, 按照 0.8nm 的通道间隔, 可以实现 5 个通道的调谐能力. 这样, 实现低压 (小于 5V) 调谐的 FP

图 3 外加电压与透射波长偏移关系曲线

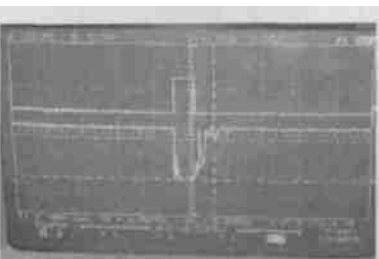


图 4 响应时间测试曲线

腔对光通信系统具有非常重要的现实应用价值.

同时, 我们还测试了通过调谐实现波长切换的响应时间, 图 4 为响应时间测试曲线, 测试表明, 上升沿较快, 小于 0.1ms , 下降沿较慢, 1.2ms . 可以看出, 这类开关的尾部有一个强烈的抖动, 这是对光交换网络不喜欢的, 因此如何改进其抖动, 并降低其抖动可以提高开关的总体响应时间, 这样, 可以降低光网络交换的保护时间.

最后, 我们测试了

波长调谐响应曲线, 见

图 5. 图 5 中包括两个

曲线, 上曲线为 0V 电

压下的从输入端口 1

到输出端口 2 的透射

光谱, 下曲线为 4.2V

电压下的从输入端口 1

到输出端口 2 的光谱,

可以看出, 两个通道之

间发生了 2.95nm 的调

谐偏移, 随着电压的增

加, 波长偏移范围增

加, 并按照图 3 的线性

变化. 同样可以观察从

输入端口 1 到输出端口 1 的反射光谱,

反射特性与透射特性一致.

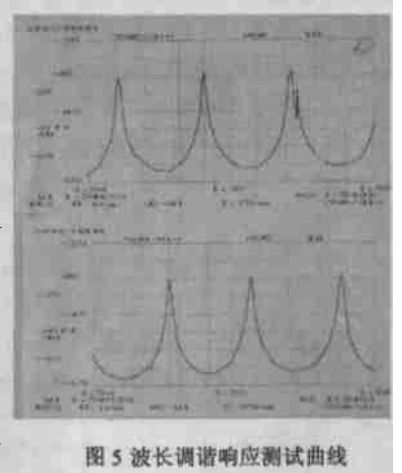


图 5 波长调谐响应测试曲线

4 波长交换光开关在下一代光网络中的应用

光波长选择开关确实有非常广阔的发展前景, 因为它把波长选择、交换结合起来, 在新一代光传送网中可以完成新型光复用/解复用、新型光交叉连接设备, 由于采用波长选择开关, 新型光复用/解复用、新型光交叉连接设备大大降低了设备的复杂性, 运用也更灵活. 但是, 对于它的研究现在还处于一个起步阶段.

利用上述 2×2 结

构, 可以构成如图 6 所

示矩阵结构, 其中每个

输入输出光纤可以携

带多个波长通道, 而实

现了波长动态交换.

为了增加网络容

量, 一般通过提高光交

换矩阵和复用波长的

规模, 但是, 扩大规模

的同时, 带来的问题就

是构成光网络的成本

按照通道数的指数增

加, 因此, 近年来, 人们

提出了波带交换的概念,

所谓波带交换^[9], 就

是将不需要下载或交换

的一组光波长构成一个

波带, 在经过光交换矩

阵时, 不必将每个波长

都进行交换, 而是将他

们当成一个通道, 也叫

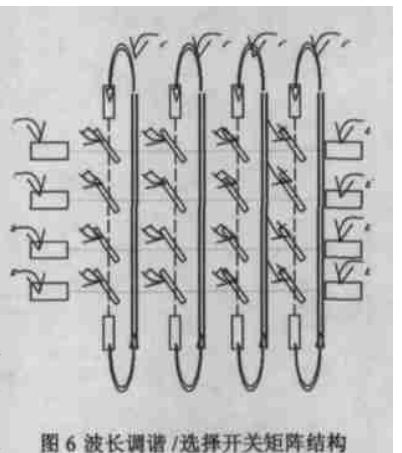


图 6 波长调谐 / 选择开关矩阵结构

们当成一个通道, 也叫波带通道, 这样, 可以大大降低光交换矩阵的规模, 从而, 降低了网络建设的成本. 波长选择开关则

是一个非常好的完成波带交换的例子.

5 总结

本文研制出一个基于 Fabry-Perot 结构的可调波长选择光开关,该开关为 2×2 光纤端口,每个端口携带 N 个波长,工作时可以选 1 个或多个波长,插入损耗小于 3dB,波长调谐范围 10nm,调谐机构为一对多层三明治结构的压电陶瓷,具有驱动电压低,小于 5V 的驱动电压可以达到 3.3nm 的调谐,最大开关时间为 1 毫秒,开关比优于 30dB,同时讨论了波长调谐/选择开关矩阵结构和动态波长上下路复用/解复用设备与传统光分插复用设备和光交叉连接设备的不同,最后研究了 N 选 k 波长选择开关在光交换网络,特别是波带交换网络建设中的应用,并讨论其对光通信、光交换网络产生的重要应用价值.

参考文献:

- [1] D A Smith, R S Chakravarthy, Z Bao, J E Baran, J L Jackel, A d'Alessandro, D J Fritz, S H Huang, X Y Zou, S M Hwang, A E Willner, K D Li. Evolution of the acousto-optic wavelength routing switch[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(6): 1005 - 1019.
- [2] Michael A Scobey, et al. Wavelength selective optical switch[P]. US Patent, 6,320,996, 2001.
- [3] S Sumriddetchkajorn, K Chaitavon. A reconfigurable thin-film filter-based 2×2 add-drop fiber-optic switch structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(7): 930 - 932.
- [4] Jayantilal Paterl, W John Tomlinson, Janet Lehr Jackel. Dual liquid-crystal wavelength selective optical switch[P]. US Patent, 6,327,019,

2001.

- [5] Li Xinwan, Ye Ailun, Chen Jianping. Fast tunable wavelength selective optical switch [P]. US Patent Application Publication, Pub. 2004/0062473A1, 1. 2004.
- [6] 李新碗, 陈建平, 叶爱伦, 吴龟灵, 卢加林, 黄妍隽. 新型波长选择的光开关状态控制及其在光交换中的应用研究[J]. 光电子激光, 2004, 15(增刊): 172 - 175.
- [7] R Ramaswami, K N Sivarajan. Optical networks: a practical perspective [M]. USA: Academic Press, 1998. 102 - 106.
- [8] 李国荣, 陈大任, 殷庆瑞. PZT 系多层片式压电陶瓷微驱动器位移性能研究[J]. 无机材料学报, 1999, 14(3): 418 - 424.
- [9] Xiaojun Cao, Vishal Anand, Chunming Qiao. Waveband switching optical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(4): 105 - 111.

作者简介:



李新碗 男, 1967 年出生于江苏泰兴, 上海交通大学电子系光纤通信国家重点实验室副教授, 主要研究方向光交换技术.

陈建平 男, 1962 年出生于浙江金华, 上海交通大学电子系光纤通信国家重点实验室副主任, 教授, 博士生导师, 研究方向: 光传输与交换, 光纤传感技术. E-mail: Jpchen62 @sjtu. edu. cn.