

文章编号: 0253-2239(2010)04-1168-05

一种基于微机电系统技术的新型波长选择开关

胡强高^{1,2,3} 刘德明¹ 张 玏^{2,3} 袁志林^{2,3} 张 博^{2,3}

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; ² 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)
³ 新一代光纤通信技术和网络国家重点实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

摘要 波长选择开关(WSS)被认为是最重要的波长引擎技术,已成为运营商在下一代网络部署中的关键器件。提出了一种新型的波长选择开关结构,用基于一维的微机电系统(MEMS)转镜实现切换的功能和透射式 MEMS 衰减器技术实现无干扰(Hitless)功能,相对于使用二维 MEMS 转镜同时实现波长切换和 Hitless 功能的 WSS。其具有技术成熟,成本相对低廉等优点。理论分析并数值模拟了该 WSS 的几个关键参数,实际制作并测试了这种新型的 WSS,实现了最大衰减量约 34 dB,插入损耗约 6.4 dB,通道内色散变化范围为 $-1.64\sim 6$ ps/nm,与数值模拟结果能够较好地吻合。

关键词 波长选择开关;无干扰功能;微机电系统转镜;微机电系统衰减器

中图分类号 TN209 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1168

A Novel Wavelength Selective Switch Using Micro-Electro-Mechanical Systems Technology

Hu Qianggao^{1,2,3} Liu Deming¹ Zhang Di^{2,3} Yuan Zhilin^{2,3} Zhang Bo^{2,3}

¹ Department of Opto-Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

³ State Key Laboratory for New Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The wavelength selective switch (WSS) is now considered to be the most important wavelength engine technology, and will be the key component of next-generation optical networks for carriers all over the world. A novel WSS is theoretically and experimentally presented in this paper, which implements an one dimensional MEMS mirror to realize the function of wavelength switching, while the Hitless switching is achieved by a MEMS attenuator. Compared with traditional WSS implementing two dimensional MEMS mirror to achieve the two functions simultaneously, this novel WSS is manufactured based on mature technologies, so it is cost-effective and productive. The maximum attenuation of 34 dB, insertion loss of 6.4 dB, dispersion range of $-1.64\sim 6$ ps/nm are reported, indicating a high uniformity with the simulation results.

Key words wavelength selective switch; Hitless; micro-electro-mechanical systems mirror; micro-electro-mechanical systems attenuator

1 引 言

随着波分系统的发展,人们对系统灵活性的要求也越来越高,而可重构的光分叉复用器(ROADM)是构建未来灵活、智能光网络的关键器件^[1]。ROADM的发展经历了固定 OADM 及光交叉互联(OXC)器件^[2,3],波长阻塞器(WB)^[4],平面光波导型 ROADM^[5]以及波长选择开关(WSS)^[6]

等几个阶段。作为第三代 ROADM 器件,WSS 具有任意端口波长任意上下的功能,给光网络的灵活组网提供了必要的技术平台,正逐渐得到应用^[7,8]。不同于普通的光开关(OS)^[9],WSS 的主要功能包括:波分复用/解复用、波长切换和功率衰减。一般来讲,WSS 需要具有无干扰(Hitless)切换功能^[10],即要求在通道间切换时对光功率的衰减量大于

收稿日期: 2009-05-29; 收到修改稿日期: 2009-06-19

基金项目: 国家 863 计划(2009AA03Z443)资助课题。

作者简介: 胡强高(1973—),男,博士研究生,主要从事光通信无源器件与子系统等方面的研究。

E-mail: qianggao.hu@accelink.com

导师简介: 刘德明(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与光电传感等方面的研究。

E-mail: dmliu@mail.hust.edu.cn

35 dB,文献[11]提出用二维微机电系统(MEMS)反射镜的一个方向的旋转实现光路切换选择功能,另一方向的旋转实现每通道的衰减和 Hitless 功能。但二维 MEMS 反射镜的设计和制作工艺难度大,成品率较低,使得基于二维 MEMS 反射镜技术的波长选择开关成本较高。

为了克服现有的技术问题,提出了一种基于一维的 MEMS 转镜实现切换的功能和透射式 MEMS 衰减器技术实现 Hitless 功能的波长选择开关,对

几个关键参数进行了分析和数值模拟,实际制作了该 WSS,并通过实验验证了器件的性能。

2 原理及分析

提出的一维的 MEMS 转镜和透射式 MEMS 衰减器技术实现 Hitless 功能的波长选择光开关,其结构如图 1 所示。

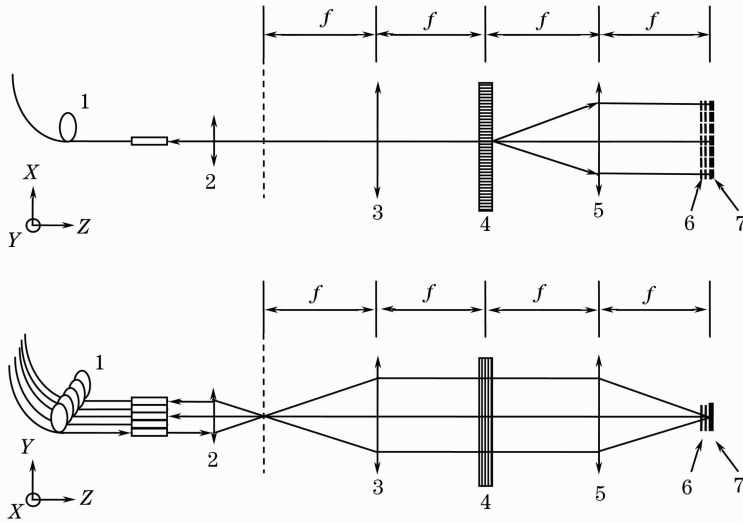


图 1 新型的 WSS 原理示意图

Fig. 1 Diagrams showing the principle of the novel WSS

它包括光纤准直器阵列 1,准直透镜 2 和 3,衍射光栅 4,聚焦透镜 5,透射式 MEMS 衰减器 6,反射式一维 MEMS 转镜 7, f 为透镜焦距。

2.1 工作原理

WSS 的工作原理可解释为,包含多个波长的光信号在一根光纤中传输后进入阵列准直器的端口 1,从端口 1 出射的光线经准直透镜后光斑扩大,入射在衍射光栅上,经过衍射光栅后,不同的波长沿不同的方向展开,由会聚透镜将不同波长的光线沿光栅刻线方向聚焦分布在不同的位置上,光线经过放

置在焦平面之前的阵列透射式 MEMS 衰减器之后,入射到焦平面上的阵列 MEMS 反射镜的反射面上。光线入射在该面上反射后再次经过透射 MEMS 衰减器,经会聚透镜、衍射光栅、准直透镜和聚焦透镜后进入阵列准直器的某个端口,进入光纤, MEMS 反射镜的角度决定了返回的光线进入的端口位置,即实现了任意波长到任意端口的开关选择。

所述透射式 MEMS 衰减器是基于多光束干涉原理实现的,如图 2 所示。

衰减反射单元中的反射镜通过绕 Y 轴旋转实

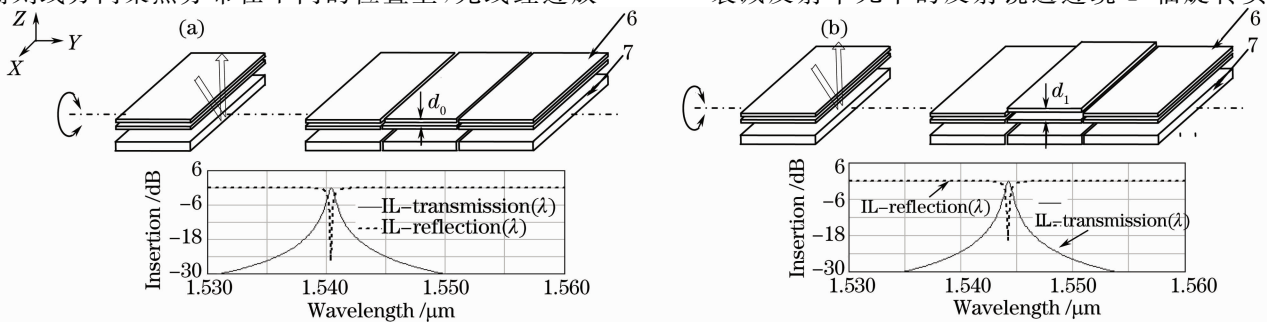


图 2 MEMS 衰减器工作原理。(a)“通”状态;(b)“断”状态

Fig. 2 Schematic of the proposed MEMS attenuator. (a) “on” state; (b) “off” state

现对入射到该镜面的通道波长光信号的偏转,可以实现光路对应偏转到目标地址的输出端口。通过改变两个具有高反射率的平行平面之间的距离,可以调节透射 MEMS 衰减器的衰减量,从而实现对信号的衰减功能。衰减反射单元中的 MEMS 衰减器可将衰减量设置到最大衰减量后再进行切换,当衰减值超过 35 dB 时,即认为实现 Hitless 切换功能。设平行平板的反射率为 R ,两平行平板之间的距离为 d ,介质折射率为 n ,入射角为 θ ,那么该衰减器的透射谱可表示为

$$T(\lambda) = \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4R \cdot [\sin(2\pi nd \cos \theta / \lambda)]^2} \quad (1)$$

图 2 列出了模拟的该 MEMS 衰减器的传输谱线,当平行平板之间的距离为 d_0 时[对应图 2(a)],MEMS 衰减器处于状态“1”,对该通道没有衰减;平行平板之间的距离为 d_1 时[对应图 2(b)],MEMS 衰减器处于状态“2”,对该通道产生衰减。由于对应该通道波长的光束要经过该 MEMS 衰减器两次,因此为了实现 Hitless 功能,经过衰减器一次产生的衰减量达到 17.5 dB 即可。

2.2 WSS 的关键参数分析

2.2.1 插入损耗

在基于该结构的 WSS 中,插入损耗由以下几个方面产生:准直器的耦合损耗,透镜等光学元件的表面所镀增透膜的吸收损耗,光栅的透射率的影响。

一般来讲,若光栅的透射率为 85%,经过光栅两次所引入的插损约为 1.4 dB;在图 1 所示的结构中,假设增透膜的透射率为 99%,那么由于准直器以及透镜上增透膜的吸收引入的插损约为 0.8 dB,准直器的耦合损耗约为 1 dB。透射式 MEMS 衰减器的自身插入损耗约为 1.0 dB,两次通过约为 2.0 dB。因此,WSS 的插入损耗在理论上约为 5.2 dB。

2.2.2 工作带宽

MEMS 衰减器的透射谱线会影响到 WSS 的工作带宽,如图 3 所示。

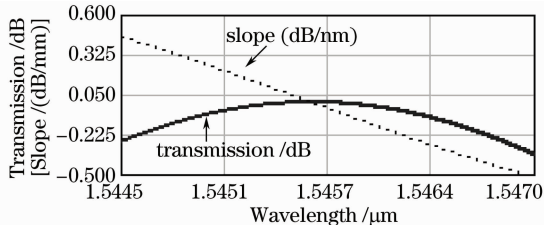


图 3 MEMS 衰减器的透射谱线与斜率

Fig. 3 Transmission spectrum and the slope of the spectrum

在以透射谱线峰值波长为中心,±0.4 nm (±50 GHz)的带宽范围内,透射谱线有一定的斜率,因此,理论上加入 MEMS 衰减器后会导致 WSS 带宽的变窄。但从图 3 可知,在±0.4 nm 的范围内透射谱线的斜率的绝对值小于 0.15 dB/nm,在 0.4 nm 的范围内引起的插损变化小于 0.06 dB,可以认为对带宽不会造成大的影响。

2.2.3 色散分析

基于该结构的 WSS 的色散主要由两功能器件引起:衍射光栅和产生多光束干涉的平行平板,下面来分别分析这两个功能器件的色散特性:

1) 衍射光栅

由于光栅对不同波长的光衍射角不同,由图 4 可知,对任意一个通道,不同波长的衍射光波经聚焦透镜后到达反射镜时经历的光程不同,导致了群时延,因此产生了色散。

设通道数为 40,通道间隔 100 GHz,频率范围从 191300~195200 GHz(对应波长范围:1535.82~1567.13 nm),并假设中心通道(第 20 个波长,193200 GHz)的入射角与衍射角相等,定义为 θ ,光栅刻线频率为 Γ ,聚焦透镜的焦距为 f 。

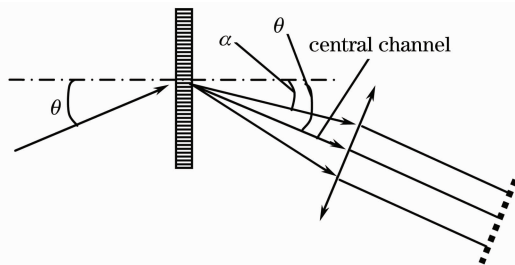


图 4 由光栅引起的色散

Fig. 4 Dispersion introduced by grating

对某一波长 λ ,光栅的衍射角 α 可以表示为

$$\alpha = \arcsin(\Gamma\lambda - \sin \theta), \quad (2)$$

因此,到达反射镜时不同波长的光经历的光程可以表示为

$$\Delta L(\lambda) = f / \cos(\theta - \beta). \quad (3)$$

图 5 为上述 40 个通道,间隔为 100 GHz 时,各个波长所经历的光程曲线。

而光程差对波长的二阶导数即为该衍射光栅的色散,由于光栅对长波长的衍射角要大于短波长,因此在长波端的色散要大,即中心波长为 1567 nm 所对应的通道内色散最大。那么,知道了该通道内的色散曲线便可以估算出 WSS 的色散。经数值模拟得出该通道内的色散曲线如图 6 所示。

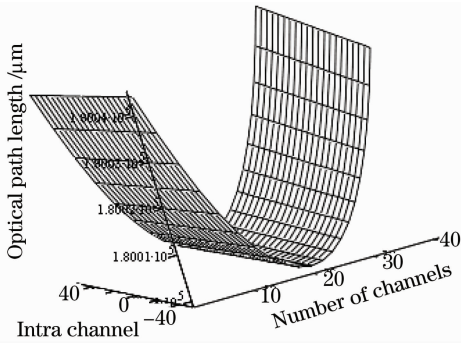


图 5 各个通道内光程曲线

Fig. 5 Optical path length in different channels

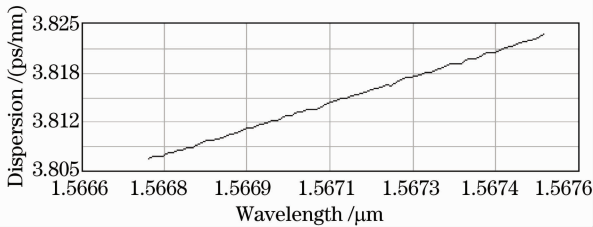


图 6 色散最大通道内光栅的色散曲线

Fig. 6 Dispersion curve of the grating in the long-wavelength channel

2) 平行平板

平行平板可以看作是一法布里-珀罗 (Fabry-Pérots) 标准具, 以一定角度入射的光束在平行平板内发生多次反射从而产生多光束干涉, 设平行平板之间的间距为 $2 \mu\text{m}$, 两表面的反射率均为 95%, 经数值模拟得出传输曲线与色散如图 7 所示。

由图 7 可知, 由平行平板产生的色散约为 $\pm 1.5 \text{ ps/nm}$ 。因此, 若忽略由透镜, 准直器等光器件本身的色散, 该波长选择开关的色散主要由衍射光栅

和平行平板引起, 模拟得出的色散值应在 $-1.5 \sim 5 \text{ ps/nm}$ 范围内。

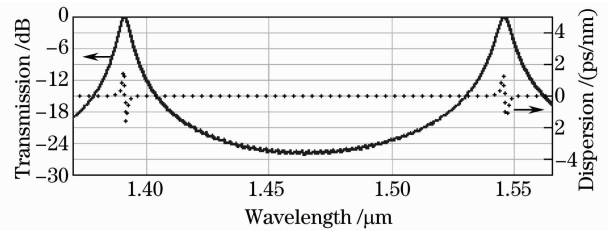


图 7 平行平板产生的透射谱线与色散曲线

Fig. 7 Transmittance and dispersion curve of the F-P cavity

3 实验及结果分析

实际制作了基于上述结构的 WSS, 实物图如图 8 所示。



图 8 实际制作的 WSS 实物图

Fig. 8 Photograph of the proposed WSS

为了验证上述数值模拟结果, 按照图 1 搭建了相应的实验平台, 通过调节加于 MEMS 衰减器 6 的电压, 可以控制衰减量从而实现 Hitless 的功能, 实验测得衰减前后 WSS 的光谱如图 9 所示。

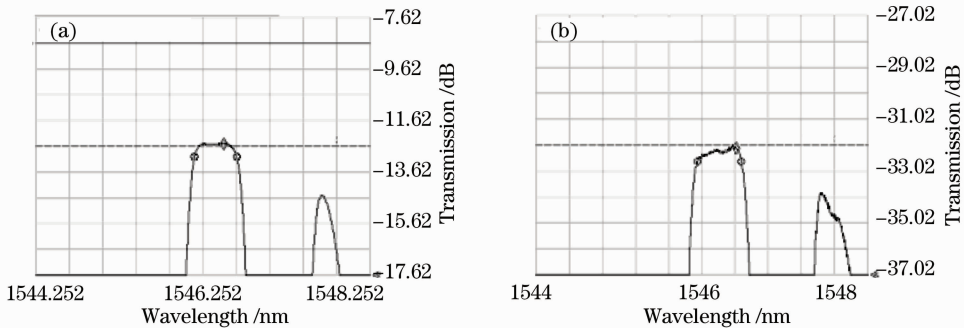


图 9 衰减前后的 WSS 透射谱线。(a) 衰减前; (b) 衰减后

Fig. 9 Transmission spectrums: (a) before and (b) after attenuation

如图 9 所示, 当调节 MEMS 衰减器的电压时, 最小可衰减至 -34 dB 左右, 与理论模拟结果基本吻合。MEMS 衰减器对该 WSS 的带宽几乎没有影响, 从图中 -0.5 dB 带宽值可以看出, 从而实现了 Hitless 功能。在实际测试中, 图中显示插损为

13.1 dB , 去掉实验光路中用于监测光功率的 3 dB 耦合器, 环形器 (引入 0.7 dB 的插入损耗) 以及偏振光学元件的分光作用 (如起偏分束器将寻常光与非寻常光分离导致的 3 dB 的损耗), 实际插损应在 6.4 dB , 与理论分析基本吻合。

为了验证该 WSS 的色散特性,用 Agilent86038B 色散及损耗分析仪测试了每个通道内的色散,图 10

列出了通道中心波长为 1546.13 nm 和 1563.07 nm 的群时延与色散的测试结果。

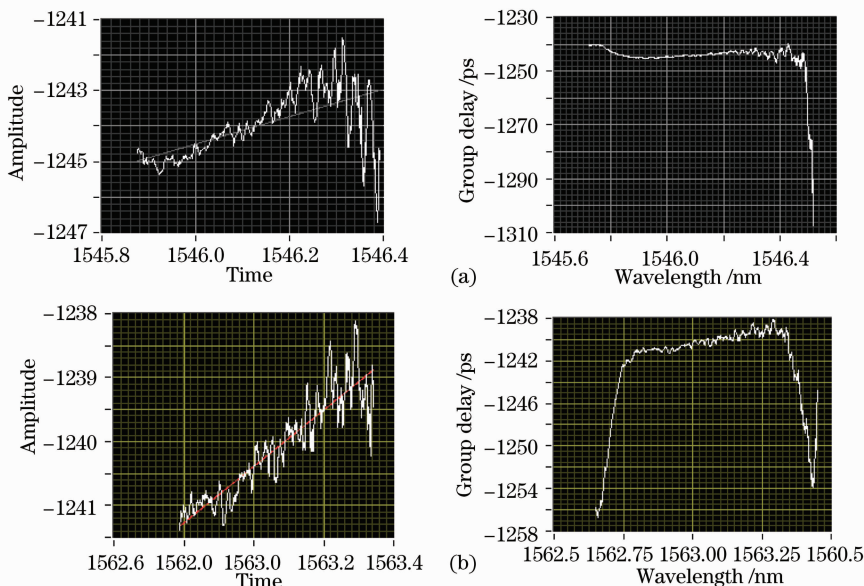


图 10 群时延与色散测试结果。(a)1546.13 nm;(b)1563.07 nm

Fig. 10 Test results of group delay and dispersion. (a) 1546.13 nm; (b) 1563.07 nm

图 10 仅列出了 2 个通道的测试结果,实际测得在所有 40 个通道内,色散的变化范围为 $-1.64 \sim 6$ ps/nm,与理论模拟结果吻合良好。

4 结 论

提出了一种基于 MEMS 技术的新型波长选择开关,相对于传统的使用二维 MEMS 转镜同时实现波长切换和 Hitless 功能,该新型的 WSS 使用现有的成熟技术:一维的 MEMS 转镜和透射式 MEMS 衰减器技术实现波长切换和 Hitless 的功能,具有成本低廉、成品率高等优点。对该 WSS 的关键性能参数进行了理论分析,并搭建了相应的实验平台,实现了最大衰减值约 34 dB,插入损耗约 8 dB,色散的变化范围为 $-1.64 \sim 6$ ps/nm,与理论结果能够较好地吻合。

参 考 文 献

- 1 M. D. Feuer, D. C. Kilper, S. L. Woodward. Optical Fiber Telecommunications VB: Systems and Networks[M]. Elsevier Inc., 2008. 293~305
- 2 Zong Lei, Li Yanhe, Zheng Xiaoping *et al.*. Study on homodyne crosstalk reduction in integrative OADM/OXC node[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1): 57~60
宗磊,李艳和,郑小平等.一体化 OADM/OXC 节点降低串扰结构研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1): 57~60

- 3 Li Wei, Liu Deming, Yang Chunyong *et al.*. Design and implementation of a novel low cost intelligent optical wavelength cross converter connect[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **33**(3): 351~355
李蔚,刘德明,杨春勇等.一种低成本智能全光波长交叉交换连接器的设计和实现[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 351~355
- 4 A. Liu, J. Lam, M. Yan. Low-loss PLC integration of wavelength blockers and monitored VOA-multiplexers for ROADM applications[C]. Proc. OFC2005, 2005, JWA 73
- 5 L. Eldada, J. Fujita, A. Radojevic *et al.*. 40-Channel ultra-low-power compact PLC-based ROADM subsystems[C]. Proc. OFC 2006, 2006, NThc4
- 6 K. Yu, N. Park, D. Lee *et al.*. A wavelength selective switch with flat passband using a free-space grating and MEMS phase-shifters[C]. Proc. OFC 2005, 2005 JTUC67
- 7 V. Kaman, S. Yuan, O. Jerphagnon *et al.*. Comparison of wavelength-selective cross-connect architectures for reconfigurable all-optical networks[C]. Photonics in Switching Conference, 2006. 1~3
- 8 D. M. Marom, D. T. Neilson, D. S. Greywall *et al.*. Wavelength-selective 1xK Switches using free-space optics and MEMS micro-mirrors: theory, design and implementation[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2006, **9**(22): 1620~1630
- 9 Li Wei, Liang Jingqiu, Li Xiaoqi *et al.*. Design and simulation analysis of micro optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1151~1154
李伟,梁静秋,李小奇等.一种微型光开关的设计与仿真分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1151~1154
- 10 Qianggao Hu, Deming Liu, Liping Sun *et al.*. A novel 1xN WSS module based on the MEMS technology [C]. *SPIE*, 2008, **7136**: 71361W-1~71361W-8
- 11 M. Mala, J. M. Miller, G. McKinnon *et al.*. Piano MEMS Micromirror[P]. U. S. Patent, No.: US6934439 B2, 2005, 1~21