

文章编号: 1001-3806(2013)04-0493-05

## 超窄带宽可调光滤波器的研究

夏源<sup>1,2,3</sup> 谢卉<sup>2,3</sup> 孙莉萍<sup>2,3\*</sup> 胡强高<sup>2,3</sup>

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 新一代光纤通信技术和网络国家重点实验室(筹), 武汉 430074; 3. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

**摘要:** 为了降低可调光滤波器的带宽, 采用双光栅结构和基于微机电系统的反射镜相结合的方法, 构建了具有波长连续可调谐的超窄带宽滤波器, 并进行了理论分析和实验验证, 取得了滤波带宽小于 0.4nm 的数据。结果表明, 双光栅结构的光滤波器具有性能稳定、重复性优良的性能特点, 并且很好地满足了带宽需求。这种结构显著降低了可调谐光滤波器的滤波带宽, 提高了系统的稳定性。

**关键词:** 光学器件; 可调光滤波器; 双光栅; 微机电系统

中图分类号: TN713 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.04.017

### Research of tunable optical filters with ultra-narrow bandwidth

XIA Yuan<sup>1,2,3</sup> XIE Hui<sup>2,3</sup> SUN Li-ping<sup>2,3</sup> HU Qiang-gao<sup>2,3</sup>

(1. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory for New Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China; 3. Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430205, China)

**Abstract:** In order to reduce the bandwidth of tunable optical filters, a continuous tunable optical filter with ultra-narrow bandwidth wavelength was designed by using double gratings and mirror of micro-electromechanical system. Through theoretical analysis and experimental verification, filter bandwidth less than 0.4nm was obtained. The results show that an optical filter with double gratings has high stability and excellent repeatability. This scheme can reduce the filter bandwidth, which meets the bandwidth demand.

**Key words:** optical devices; tunable optical filter; double gratings; microelectromechanical systems

### 引言

随着密集波分复用技术的飞速发展以及带宽需求的持续增长, 全光网络(all optical network, AON)将成为光通信网络的发展趋势<sup>[1]</sup>。光交换技术与信道监控技术是全光网络发展中有待突破技术难题。光通道监测器(optical channel monitor, OCM)是支持密集波分复用传送、节点智能化的重要技术之一, 它提供了对每个信道行为的监控能力, 做到了在光层面的网络监控和管理, 满足了发展 AON 的一个

必要前提<sup>[2-3]</sup>。以可调谐光滤波器为基础的 OCM, 则不需针对每一个波长分别构建光电转换及监测设备, 只需要通过可调谐光滤波器将需要处理的波长筛选出来即可。在基于可调谐光滤波器的 OCM 中, 最核心的部分是其光模块——可调谐光滤波器(tunable optical filter, TOF)。TOF 将需要处理的波长信号筛选出来并进行算法分析, 而不需要针对单一波长分别构建光电转换和监控设备, 从而大幅降低设备成本。但是, TOF 的滤波带宽直接限制了 OCM 的性能<sup>[4]</sup>。因此, TOF 光路设计的核心便是降低带宽。针对 TOF 的带宽需求, 本文中采用将两块衍射光栅级联的方案来达到降低带宽的目的。同时, 为实现波长的连续可调谐, 又采用了基于微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)的反射模块, 这样的结构不仅有效降低了光滤波器的滤波带宽, 又提高了系统的稳定性和重复性。

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2011BAH07B01)

作者简介: 夏源(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子器件。

\* 通讯联系人。E-mail: liping\_sun@accelink.com

收稿日期: 2012-09-20; 收到修改稿日期: 2012-10-29

### 1 工作原理

#### 1.1 级联的衍射光栅

将光路中传播的光信号以高斯模型进行分析, 于是沿 z 轴传播的高斯光束可以描述为:

$$E(x, y, z) = \frac{A_0}{w(z)} \cdot \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{w^2(z)}\right] \cdot \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot R(z)}\right) - \varphi(z)\right]\right\} \quad (1)$$

式中  $A_0$  为原点的中心光振幅,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长,  $w(z)$  为观察点  $z$  处的光斑半径,  $R(z)$  为观察点  $z$  处的曲率半径,  $\varphi(z)$  为观察点  $z$  处的相位函数。

由夫琅禾费衍射原理可知, 入射光经过光栅产生极大值的条件是:

$$d(\sin\alpha \pm \sin\beta) = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

式中  $d$  为光栅相邻两条缝之间的间隙大小, 单位为 mm,  $\alpha$  为光线的入射角度,  $\beta$  为光线的折射角度。

(2) 式也称为光栅方程。由光栅方程可以看出, 入射光经过光栅后产生了  $\theta = (\alpha + \beta)$  的偏角。此现象也可以看作是两个高斯光束在光栅面以  $\theta$  角耦合的结果。不妨设这两个高斯光束的函数表达式为  $E_1(x, y, z)$  和  $E_2(x, y, z)$ <sup>[5]</sup>。于是, 两个高斯光束的耦合效率可以表示为:

$$\eta = \left| \iint E_1(x, y, z) E_2^*(x, y, z) dx dy \right|^2 \quad (3)$$

式中  $E_2^*(x, y, z)$  为  $E_2(x, y, z)$  的共轭函数。

对于圆高斯光束, 可得到如下计算公式:

$$\eta = \frac{1}{\frac{(w_1^2 + w_2^2)^2}{4w_1^2w_2^2} + \left[\frac{\lambda(z_1 + z_2)}{2\pi w_1 w_2}\right]^2} \cdot \exp\left\{-\left[\frac{\frac{2z_1^2w_2^2 + 2z_2^2w_1^2}{w_1^2 + w_2^2} + \frac{2\pi^2w_1^2w_2^2}{\lambda^2(w_1^2 + w_2^2)}}{1 + \left[\frac{\lambda(z_1 + z_2)}{\pi(w_1^2 + w_2^2)}\right]^2}\right]\theta^2\right\} \quad (4)$$

式中  $w_1$  和  $w_2$  为  $E_1(x, y, z)$  和  $E_2(x, y, z)$  的束腰半径,  $z_1$  和  $z_2$  为  $E_1(x, y, z)$  和  $E_2(x, y, z)$  的束腰到两光束交界面的距离。本文中  $E_1(x, y, z)$  和  $E_2(x, y, z)$  为同一高斯光束经过衍射光栅衍射前后的状态, 所以  $w_1 = w_2$  且  $z_1 = z_2 = 0$ , 代入 (4) 式得:

$$\eta = \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot \theta^2 \cdot w^2}{\lambda^2}\right) \quad (5)$$

在复色光的情况下, 波长为  $\lambda_c$  的高斯光束与波长为  $\lambda_{c\Delta}$  的高斯光束的耦合效率为:

$$\eta = \frac{I(\lambda_{c\Delta})}{I(\lambda_c)} = \exp\left[-\frac{\pi^2 \times (\theta_c^2 - \theta_{c\Delta}^2) \times w^2}{\lambda_c^2}\right] \quad (6)$$

式中  $w$  为光栅面出的光斑半径值, 即  $w = w_1 = w_2$ 。 $\theta_c$ 、 $\theta_{c\Delta}$  分别是中心波长对应角度与偏光对应角度:

$$\begin{cases} \theta_c = \arcsin(m\lambda_c/d - \sin\alpha) \\ \theta_{c\Delta} = \arcsin(m\lambda_{c\Delta}/d - \sin\alpha) \end{cases} \quad (7)$$

由 (6) 式容易得出, 当光路中的准直透镜和光栅特征常数固定的情况下, 耦合效率仅与  $(\theta_c - \theta_{c\Delta})$  有关。

由光栅方程可知, 光栅的入射光波长  $\lambda_c$  与该入射光的出射角  $\theta_c$  为一一对应关系, 所以, 复色高斯光束的耦合效率可以表示为:  $\eta = \eta(\lambda_c, \lambda_{c\Delta})$ 。又因为可调谐滤波器的滤波带宽可以理解为耦合效率一定时, 滤波的边缘与中心波长之差的两倍。例如, 求解可调谐滤波器的 -20dB 滤波带宽时, 固定耦合效率  $\eta = \frac{1}{100}$ , 滤波带宽可表示为:

$$W_{20dB} = 2|\lambda_{c\Delta} - \lambda_c|, \left(\eta = \frac{1}{100}\right) \quad (8)$$

由 (6) 式、(8) 式容易得出可调谐滤 20dB 滤波器的滤波带宽  $W$  与不同波长间的偏光角度差  $(\theta_c - \theta_{c\Delta})$  具有对应关系, 且两者的值成反比例关系。即当  $(\theta_c - \theta_{c\Delta})$  越大时, 对应的滤波带宽越窄。同时, 由光栅方程可知, 复色高斯光束每经过一次光栅, 相应的波长偏光角度差  $(\theta_c - \theta_{c\Delta})$  便会增大, 带宽  $W$  便会减小。双光栅设计方案就是基于这个原理来降低滤波带宽的<sup>[6-7]</sup>。

#### 1.2 MEMS 转镜工作原理

作者所使用的 MEMS 反射镜结构正是基于梳状驱动设计的。以下将简要介绍基于静电力的梳状结构的工作原理。由库仑定律可知, 置于电场中的两个带电粒子 A(电量为  $q$ ) 和粒子 B(电量为  $q'$ ) 产生的静电力大小为:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qq'}{r^2} \quad (9)$$

式中  $\epsilon$  是介质的介电常数, 在自由空间中  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} C^2 / (N \cdot m^2)$ ,  $r$  是电场中两个带电粒子间的距离。

如图 1 所示, 为两块正对的由介电材料隔开的带电平板, 其间距为  $d'$ 。当在两块平板上加以电压时, 平板就会被充电, 从而产生电容:

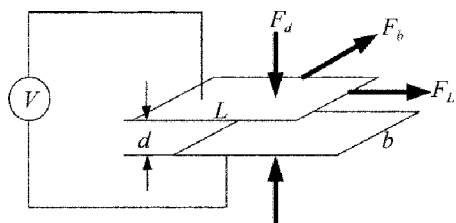


Fig. 1 Electrostatic force on parallel plates

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{bL}{d} \quad (10)$$

式中  $A$  是平板的面积,  $\epsilon_r$  是相对介电常数,  $b$  和  $L$  分别为平行平板的宽度和长度。

图1中,只要保持加在两块平行板上的电压  $V$ , 上下两块平行板就可以一直保持不同的电荷。因此,可以认为在这种情况下确实存在着电势。与该电势相对应的电势能可以表示为:

$$U = -\frac{1}{2}CV^2 = -\frac{1}{2}\epsilon_r \epsilon_0 \frac{bLV^2}{d} \quad (11)$$

式中,负号说明电压升高时,电势能会减小。

垂直于平板(沿  $d$  方向)相应的静电力大小可以通过(11)式中的电势能导出:

$$F_d = -\frac{\partial U}{\partial d} = -\frac{1}{2}\epsilon_r \epsilon_0 \frac{bLV^2}{d^2} \quad (12)$$

由于在宽度  $b$  和长度  $L$  上受到的静电力是在平行平板相应方向上分布排列而推导出来的。因此,可以推导出(12)式的一般形式:

$$F_i = -\frac{\partial U}{\partial x_i} \quad (13)$$

式中  $i$  代表的是所感兴趣那部分的方向,可取为厚度  $d$  的方向,或宽度  $b$  的方向,或长度  $L$  的方向。根据(11)式和(13)式可以写出平行平板在宽度  $b$  和长度  $L$  上受到的静电力的表达式。

在宽度  $b$  方向上的静电力大小为:

$$F_b = \frac{1}{2}\epsilon_r \epsilon_0 \frac{LV^2}{d} \quad (14)$$

在长度  $L$  方向上的静电力大小为:

$$F_L = \frac{1}{2}\epsilon_r \epsilon_0 \frac{bV^2}{d} \quad (15)$$

由(14)式和(15)式两个式子可以看出,  $F_b$  与宽度  $b$  无关,  $F_L$  与长度  $L$  无关。用这些静电力作为微致动器的驱动力的主要缺点是通过这种方式获得的驱动力往往比较小。因此,在 MEMS 的实际设计中,广泛地应用了多组相互错开的极板的布局,这种布局通常称作梳状驱动。

图2为梳状驱动中的静电力模型。图中一对固定电极夹着一个移动电极,构成了梳状驱动中的一

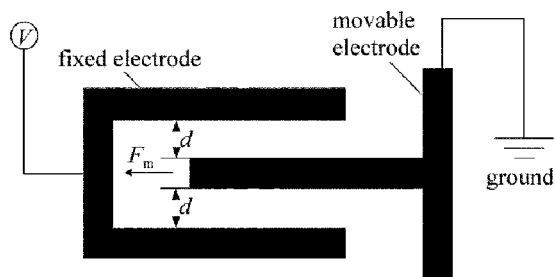


Fig. 2 Electrostatic force model of comb drive

组平板结构。其中,移动电极与固定电极的间距是  $d$ , 移动电极的宽度是  $b$ , 加在固定电极上的电压为  $V$ 。通过以上对于平行板间静电力的分析,可以得出,此时产生的静电力将使得移动电极沿着图中  $F_m$  的方向移动,静电力的大小为两组平行平板产生的静电力的叠加。根据(15)式的结论,不难得出,移动电极上的静电力  $F_m$  大小为:

$$F_m = 2F_L = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{bV^2}{d} \quad (16)$$

于是,在该静电力的驱动下,相互咬合的多对梳状齿产生相对运动,从而拉动位于梳状齿中部的反射镜,使其产生转动<sup>[8-10]</sup>。图3所示为 MEMS 反射镜的结构示意图。

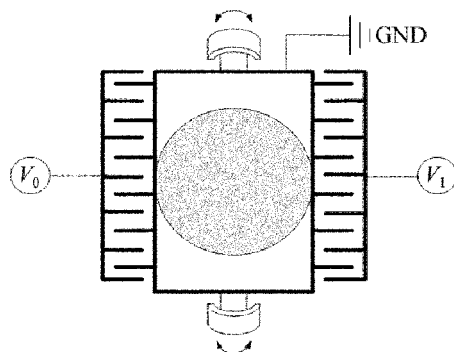


Fig. 3 Schematic diagram of MEMS mirror

## 2 实验光路的设计与分析

下面将介绍一种超窄带宽波长可调谐滤波器的光路设计方案。

首先,由高斯光束带宽的计算公式可知,当入射的中心波长固定时,带宽的大小与光斑的尺寸成反比,即光斑尺寸越大,带宽越小。因此,本文中在实际应用的前提下选取了一个准直透镜,将插针出射的散斑进行准直,并获得一个尺寸为  $\varnothing 4\text{mm}$  的光斑。

然后,为了得到一个超窄带宽的滤出峰,采用的将两块光栅级联的方案,即光束传播过程经过4次光栅。本文中采用了两块线数为900的衍射光栅,由(2)式光

栅方程容易计算得到,当中心波长为 1548.47nm 时,入射角度与出射角度相等,同为 44.172°。

由于 MEMS 转镜的镜面大小受制于加工工艺,目前的技术条件下,转镜的面积较小,且小于光斑的尺寸,所以在 MEMS 转镜的前端采用了一个望远镜组对光斑进行缩放。于是,得到超窄带宽波长可调谐滤波器的光路如图 4 所示。

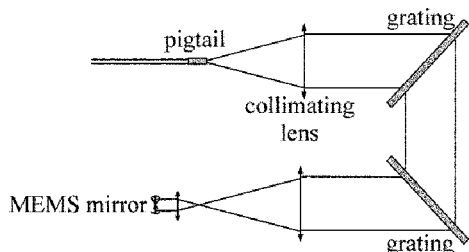


Fig. 4 Optical path schematic diagram of ultra-narrow bandwidth of tunable optical filter

### 3 实验结果与分析

根据第 2 节中设计的光路制作了一个实验样品,并通过严密的实验测试得到了本方案的预期结论。具体的实验过程和结果展示如下面所示:利用光谱分析仪(型号: AQ6370B,横河)测试光滤波器在无偏压状态下的滤波输出。如图 5 所示,当入射光为 C 波段光源时,滤出波的波长为 1548.49nm,插入损耗为 -2.86dB,带宽为 0.3468nm。

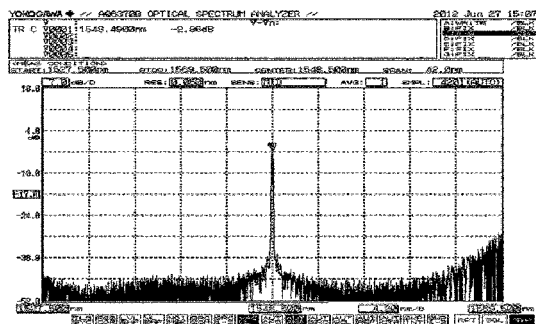


Fig. 5 Power output of tunable optical filter in non-bias state

测试光可调滤波器在电压连续变化时,输出光信号的波长、带宽及插入损耗的变化关系。图 6 为光可调滤波器的测试系统示意图:利用放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)光源提供的稳定输出光(C 波段)作为光滤波器的输入信号;上位机程序通过串口通信控制压变电路的输出电压,从而改变光滤波器的反射镜偏角,最终滤出所需波长的光信号;同时,上位机通过串口通信控制光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)采集数据,并回传数据以供分析。图中,SMF(single mode fiber)代表单模光纤。

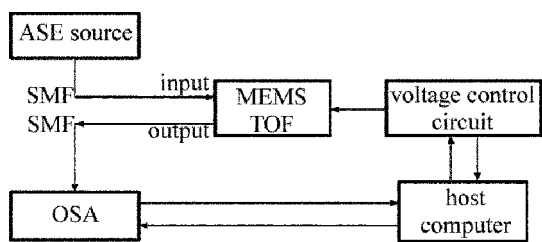


Fig. 6 Testing program of ultra-narrow bandwidth TOF

射(amplified spontaneous emission, ASE)光源提供的稳定输出光(C 波段)作为光滤波器的输入信号;上位机程序通过串口通信控制压变电路的输出电压,从而改变光滤波器的反射镜偏角,最终滤出所需波长的光信号;同时,上位机通过串口通信控制光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)采集数据,并回传数据以供分析。图中,SMF(single mode fiber)代表单模光纤。

图 7 为输出光信号的滤波带宽与波长的关系。在实验测试的波段范围内(1538nm ~ 1558nm),带宽完全控制在 0.4nm 内,大部分波段的带宽控制在 0.35nm 附近,基本达到设计预期。

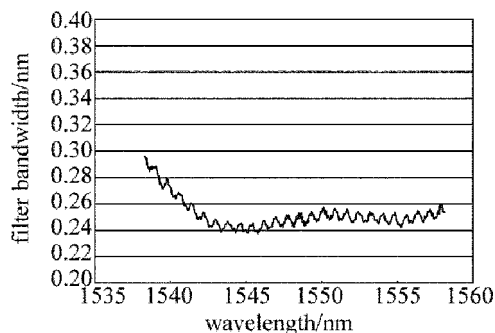


Fig. 7 Filter bandwidth versus wavelength

图 8 为输出光信号的插入损耗与滤波波长的关系。受限于衍射光栅的衍射效率、光学元件的像差以及熔接差损等因素,目前样品器件的插入损耗控制在 3.8dB 以内,基本达到设计目标。

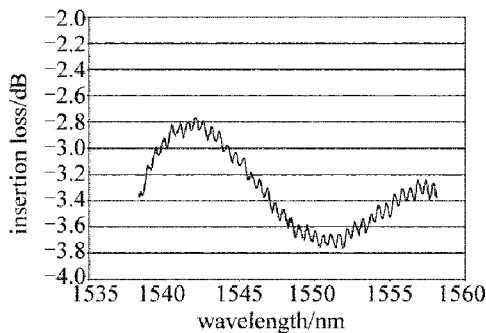


Fig. 8 Insertion loss versus wavelength

### 4 结论

窄带滤波器在高速光通信领域中的应用是近年来的研究热点。为了有效降低滤波带宽,本文中采用了双光栅结构的光路设计。通过理论推导和实验样品制作,论证了该方案的可行性和实用价值。实验测试结果证明,该方案对带宽的控制非常理想,并且具备结构简单、稳定性高、重复性好的性能特点,具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] BARRY R A ,CHAN V W S ,HALL K L *et al.* All optical network consortium-ultrafast TDM network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications ,1996 ,14( 5) : 999-1013.
- [2] YU Ch P ,WANG Y. A novel MEMS OTF and its applications in EDFA[J]. Study on Optical Communications ,2007 ,32( 1) : 64-65.
- [3] CHUNG W H ,TAM H Y ,DEMOKAN M S *et al.* Wavelength and power monitoring of DWDM networks using scanning F-P filter and F-P laser[C]//The 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society ,2001. Hongkong , China: IEEE Press , 2001: 28-29.
- [4] HABEL R ,ROBERTS K ,SOLHEIM A *et al.* Optical domain performance monitoring [J]. Optical Fiber Communication Conference 2000 2: 171-173.
- [5] ZHANG X ,HUANG L ,WANG D Sh *et al.* Study on characteristics of output beam of combined optical diode lasers [J]. Laser Technology 2007 31( 3) : 228-231( in Chinese) .
- [6] BORE M S ,JUE J P ,BANERJEE D. Optical components for WDM light wave networks[J]. Proceedings of IEEE ,1997 85( 8) : 1274-1307.
- [7] CHRISTOPHER P. Diffractive grating handbook [M]. 5th ed. New York ,USA: Richardson Grating Laboratory Press ,2007: 47-65.
- [8] ZHOU B K ,GAO Y Zh ,CHEN T R *et al.* The principle of laser [M]. 5th ed. Beijing: Beijing National Defense Industry Press , 2007: 70-71( in Chinese) .
- [9] FEYNMAN R. Infinitesimal machinery[J]. Journal of Microelectromechanical Systems ,1992 2( 1) : 60-66.
- [10] MADOU J M. Fundamentals of microfabrication [M]. Boca Raton ,Florida ,USA: CRC Press ,1997: 423-425.