

MEMS 可调谐平顶窄带光学滤波器

米仁杰^{1,2}, 万助军^{1,2}, 汪涵^{1,2}

- (1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;
2. 华中科技大学 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:设计了一种基于MEMS技术的可调谐光学滤波器,它通过光栅将输入的宽带光信号色散展开,以一个MEMS扭镜选择将对应滤波器通带的光信号反射至输出端,从而实现光学滤波和波长调谐功能。滤波器的输入端采用单模光纤,输出端采用多模或者少模光纤,可以实现窄带且平顶的通带特性。经过参数优化,仿真分析得结果显示,采用多模/少模光纤输出的两种滤波器,其0.5 dB和25 dB带宽分别为0.95 nm/0.29 nm和1.39 nm/0.69 nm,分别满足100 GHz和50 GHz信道间隔的DWDM系统要求。由于输出端采用多模或者少模光纤,从该滤波器输出的光信号不能继续在单模光纤中传输,只能由光探测器接收,因此该滤波器一般应用于全光网络节点中的下载端口。

关键词:可调谐光学滤波器; 密集波分复用; MEMS; 少模光纤

中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0720001

MEMS-based tunable flat-top narrow-band optical filter

Mi Renjie^{1,2}, Wan Zhujun^{1,2}, Wang Han^{1,2}

- (1. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A tunable optical filter(TOF) based on MEMS technology was designed. The broadband optical signal was first dispersed by a grating and then the wavelength corresponding to the passband of the TOF was selectively reflected to the output by a MEMS torsion mirror, thus the optical filtering and wavelength tuning functions were realized. A single mode fiber (SMF) was employed as the input and a multimode fiber (MMF) or few mode fiber(FMF) was employed as the output, thus the passband of the TOF was characterized by narrow-band and flat-top. After parameter optimization, the simulation results show that the 0.5 dB and 20 dB bandwidth are 0.95 nm/0.29 nm and 1.39 nm/0.69 nm with MMF and FMF employed, which meet the requirements by DWDM systems of 100 GHz and 50 GHz channel spacing, respectively. The output is MMF or FMF, the optical signal passing through the TOF cannot be further transmitted in SMF. The output can just be received by a photo detector, thus this TOF is usually applied as the outputs of the nodes in all optical network.

Key words: tunable optical filter; dense wavelength division multiplexing(DWDM);
Micro-Electro-Mechanical System(MEMS); few mode fiber(FMF)

收稿日期:2015-11-05; 修订日期:2015-12-03

基金项目:国家自然科学基金(61107062)

作者简介:米仁杰(1991-),男,硕士生,主要从事光通信器件方面的研究。Email:615353904@qq.com

导师简介:万助军(1978-),男,副教授,博士,主要从事光通信器件方面的研究。Email:zhujun.wan@mail.hust.edu.cn

0 引言

随着人们对信息需求量的不断增长, 光纤已经成为目前最主要的信息传输媒介, 单根光纤中的密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)技术, 使光纤通信系统的传输容量成数十至数百倍的增长, 为了进一步解决光纤通信网络节点处光-电-光转换的瓶颈效应, 基于 ROADM(Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer, 可重构光分叉复用器)节点的全光通信网迅速发展起来, 而在 ROADM 节点中, 可调谐光学滤波器已被广泛应用^[1-3]。

作为一种重要的光器件, 可调谐光学滤波器(Tunable optical filter, TOF) 被广泛应用于光通信系统中。随着密集波分复用技术的发展, 系统要求 TOF 具有更宽的调谐范围以及更窄的滤波线宽, 其中用于波长下载的 TOF, 还应该具有平坦的通带特性以及损耗低的特点^[4-5]。可调谐光滤波器的实现方案, 根据原理不同主要分为三种: 法布里-珀罗干涉仪、马赫-曾德耳干涉仪、以及光栅结构^[6-10]。法布里-珀罗干涉仪结构, 其工作原理为当入射光的频率满足法布里-珀罗共振腔的共振条件时, 其透射频谱会出现很高的峰值, 对应着很高的透射率。通过调整法布里-珀罗共振腔的腔长, 以达到滤波可调谐的目的。马赫-曾德耳干涉仪结构, 其工作原理为利用微环谐振器对光波频率的非线性相位响应和马赫-曾德耳干涉仪的干涉滤波特性来达到滤波的目的, 通过调整马赫-曾德耳干涉仪两臂的臂长差来打到协调的目的。光栅结构, 其工作原理为通过光栅的分光原理将光信以不同波长分离, 通过偏转选择特点波长至输出口以达到可调谐滤波的目的。

通常 TOF 以单模光纤同时作为输入和输出^[11-13], 这将不能很好地实现平顶这一通带特性。然而在某些应用中, 从 TOF 中滤波后的 DWDM 信号直接由光探测器接收, 这就容许以多模或者少模光纤作为 TOF 的输出, 同时实现平顶的通带特性^[14]。

文中提出了一种新颖的基于 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System, 机电系统)技术的 TOF 结构, 以单模光纤作为输入, 以光栅作为分光器件, 以 MEMS 选择输出中心波长, 以多模或者少模光纤作为 100/50 GHz 信道间隔的 DWDM 系统的输出,

并实现平顶的通带特性, 具有损耗低、调谐范围大以及类矩形通带的特点, 满足了 DWDM 系统要求。

1 系统原理及理论模型

1.1 可调谐滤波器的工作原理

基于 MEMS 的可调谐滤波器结构如图 1 所示。文中设计的 TOF 基于空间光学, 包括双光纤准直器、透射式光栅、透镜 I 和透镜 II 组成的望远镜系统以及 MEMS 微镜。双光纤准直器包括一平凸的准直透镜和两根光纤, 一根以单模光纤作为输入, 另一根以多模或少模光纤作为输出。

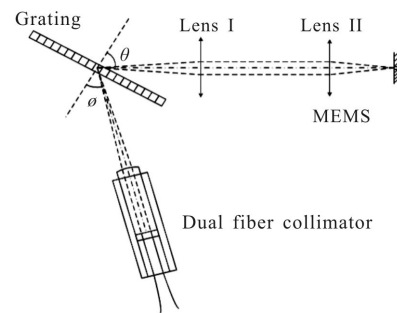


图 1 基于 MEMS 的可调谐滤波器的结构

Fig.1 Structure of the MEMS-based tunable optical filter

图中, 光纤的端面位于准直透镜的前焦面, 光栅位于准直透镜的后焦面以及透镜 I 的前焦面, MEMS 微镜位于透镜 II 的后焦面。

从光纤中出射的高斯光束, 经准直透镜准直后, 变为小发散角的高斯光束。光束以 Littrow 角度入射光栅, 经过光栅色散后, 光束按波长不同而分离, 经过望远镜系统后, 由 MEMS 微镜进行偏转反射后, 再经过望远镜系统汇聚于光栅。由于入射角度的不同, 经过光栅后的衍射角不同, 最终经由准直透镜变换后, 边缘波长的光束与中心波长光束以一定偏差入射进光纤, 从而边缘波长在入射入光纤时会存在损耗以达到滤波的目的。

1.2 理论模型

TOF 的光谱特性是基于光束追踪以及模式耦合进行分析的。从单模光纤中发射的光束的光场, 可以近似地以下面的标准高斯分布表达:

$$E_r = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) \quad (1)$$

其中, 模场半径可以由马库塞公式计算^[10]。

波长 λ_c 的衍射角和通带中心波长 λ_0 的衍射角之差为:

$$\Delta\theta(\lambda) = \frac{\lambda - \lambda_c}{d \cos \theta_c} \quad (2)$$

式中: d 为光栅常数; θ_c 为波长 λ_c 的衍射角。

事实上, 从光纤端面到光栅的空间光路组成了一个基于准直透镜的 $2f$ 系统。经光栅衍射后边缘光束与中心光束其夹角为 $\Delta\theta$, 而由于望远镜系统的变换作用, 边缘光束和中心光束经光栅再次衍射后, 其夹角变为 $2\Delta\theta$, 则返回到输出光纤的光束与光纤中心偏离距离为:

$$\Delta x(\lambda) = 2f\Delta\theta \quad (3)$$

式中: $f=R/(n-1)$ 为准直透镜的焦距; R 为准直透镜凸面的曲率半径; n 为准直透镜的折射率。

在极坐标下, 入射到输出光纤端面的返回光场 E_0 可表示为:

$$E_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega^2}} \exp\left[-\frac{(r\sin\varphi)^2 + (r\cos\varphi - \Delta x)^2}{\omega^2}\right] \quad (4)$$

式中: φ 为极坐标中的方位角。

接收返回光场 E_0 的输出光纤是一多模或少模光纤。 E_0 会激发多模或少模光纤中的不同导模 E_j , 如图 2 所示。

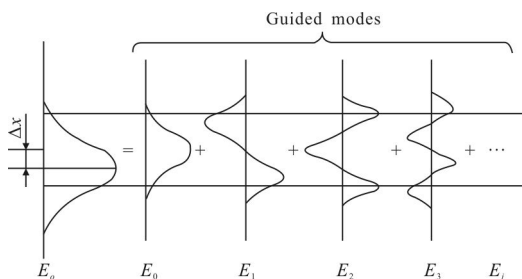


图 2 返回光场 E_0 激发了输出光纤中不同的导模 E_j

Fig.2 Returning optical field E_0 stimulates different guided modes E_j in the output fiber

输出光纤的总耦合效率 η 依赖于各个模式的耦合效率 η_j , 从而 TOF 的传输谱线可由公式(5)得到:

$$\eta = \sum_j \eta_j = \frac{\sum_j \int |E_0 E_j^*| dA}{\int |E_0|^2 dA \cdot \int |E_j|^2 dA} \quad (5)$$

2 仿真计算

2.1 光纤参数的影响

为了产生类矩形的通带, TOF 的输出光纤需为

多模或少模光纤。对于纤芯/包层尺寸为 50/125 且数值孔径(Numerical Aperture, NA)为 0.22 的多模光纤, 在 1.55 μm 波长下归一化频率为 $V=22.3$, 从而在此多模光纤中的导模数接近 70 个。所以, 为仿真计算方便, 当返回光场被多模光纤接收时, 仅考虑低阶模式。图 3 给出了当考虑不同数目的低阶模式时的情况。结果表明, 当考虑 20 个 LP 模时, 精度已足够。

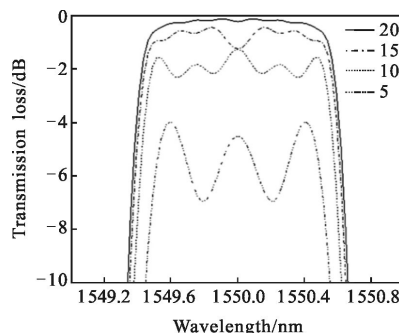


图 3 当考虑不同的 LP 模时的耦合损耗仿真谱线

Fig.3 Simulated spectra when different number of LP modes are taken into account

多模光纤和少模光纤的结构参数决定了图 2 中的模式分布, 从而影响了 TOF 的谱线。考虑不同纤芯直径的多模和少模光纤, 画出其光谱曲线图进行对比。

对于多模光纤, 给定 $NA=0.22$, 纤芯直径 $2a$ 分别取 40 μm 、50 μm 以及 62.5 μm , 其光谱曲线如图 4 所示。结果显示, 62.5 μm 的多模光纤作为输出光纤时, 其通带顶部损耗与 0 dB 仍有一段距离, 并且波动较大, 故而不作考虑。而 40 μm 与 50 μm 的多模光纤作为输出光纤时, 其通带特性较好, 但考虑到光纤易于购买这一方面, 决定选择 50 μm 的多模光纤。

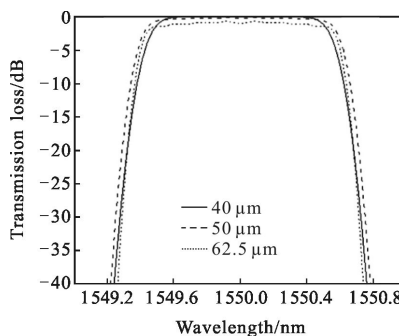


图 4 给定 $NA=0.22$ 时不同纤芯直径的多模光纤的光谱仿真

Fig.4 Simulated spectra for MMF output with given $NA=0.22$ and variable core size

对于少模光纤,给定 $NA=0.12$,纤芯直径分别取 $20\ \mu\text{m}$ 以及 $25\ \mu\text{m}$,仿真曲线如图 5 所示。为满足通带平顶的需求,选取纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的少模光纤。

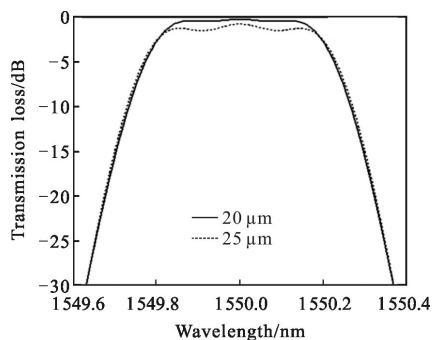


图 5 给定 $NA=0.12$ 时不同纤芯直径的少模光纤的光谱仿真
Fig.5 Simulated spectra for FMF output with given $NA=0.12$ and variable core size

2.2 最佳可调谐滤波器参数

当 TOF 应用于 $50\ \text{GHz}$ DWDM 系统时,输出光纤选取少模光纤,此时系统信道间隔为 $0.4\ \text{nm}$ 。此时, $0.5\ \text{dB}$ 带宽通常要求大于 $0.1\ \text{nm}$,而为了保证与相邻信道之间有一清晰的阻带, $25\ \text{dB}$ 带宽通常要小于 $0.7\ \text{nm}$ 。当 TOF 应用于 $100\ \text{GHz}$ DWDM 系统时,输出光纤选择多模光纤,此时系统信道间隔为 $0.8\ \text{nm}$ 。同样的,要求 $0.5\ \text{dB}$ 带宽大于 $0.2\ \text{nm}$,而且 $25\ \text{dB}$ 带宽小于 $1.4\ \text{nm}$ 。根据这些需求,再考虑到采用易于购买的光纤,选取纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ 、 $NA=0.12$ 的少模光纤以及纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$ 、 $NA=0.22$ 的多模光纤作为 TOF 的输出光纤。经过仿真计算后,得到使用这两种光纤作为输出光纤时的光谱曲线分别如图 6 及图 7 所示。

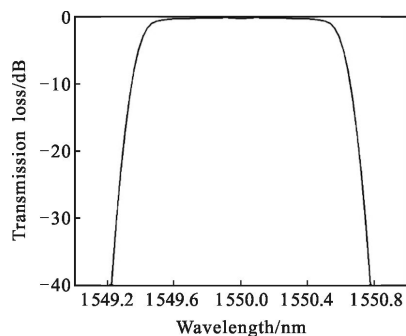


图 6 多模光纤作为输出光纤时的仿真光谱图
Fig.6 Simulated spectrum for MMF output

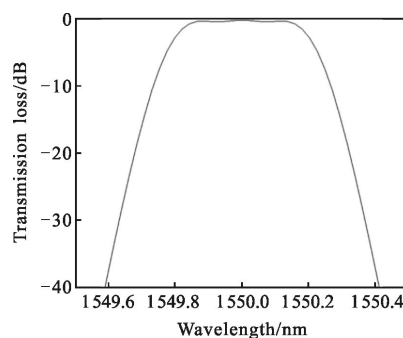


图 7 少模光纤作为输出光纤时的仿真光谱图
Fig.7 Simulated spectrum for FMF output

与光纤参数相对应,TOF 中准直透镜以及光栅、望远镜系统和 MEMS 微镜的参数见表 1。在 $50\ \text{GHz}$ 以及 $100\ \text{GHz}$ DWDM 系统下,TOF 的光谱特性仿真情况见表 2。

表 1 可调谐滤波器各器件参数

Tab.1 Parameters of the optical elements for the tunable optical filter

Elements	Parameters
Input SMF	$2a=8.2\ \mu\text{m}, NA=0.12$
Output MMF	$2a=50\ \mu\text{m}, NA=0.22$
Output FMF	$2a=20\ \mu\text{m}, NA=0.12$
Collimator lens	Few modes: $f=15.19\ \text{mm}, n=1.7434,$ $R=11.29\ \text{mm}$
	Multi modes: $f=12.74\ \text{mm}, n=1.7434,$ $R=9.47\ \text{mm}$
Transmission grating	$d=1/966\ \text{mm},$ Littrow incident
MEMS	Diameter: $1.5\ \text{mm},$ rotation angle $\pm 4^\circ$
Lens I	$f=24\ \text{mm}$
Lens II	$f=6\ \text{mm}$

表 2 可调谐滤波器的光谱特性

Tab.2 Spectrum characteristics of the tunable optical filter

Output fiber	0.5 dB bandwidth/nm	3 dB bandwidth/nm	25 dB bandwidth/nm
FMF	0.29	0.40	0.69
MMF	0.95	1.20	1.39

3 结 论

文中设计了一种基于 MEMS 技术的 TOF 器件, 通过仿真计算了 $NA=0.12$ 时纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$ 的少模光纤的光谱图, 以及 $NA=0.22$ 时纤芯直径为 $40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 以及 $62.5\ \mu\text{m}$ 的多光纤的光谱图, 选取了纤芯直径分别为 $20\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 的少模光纤和多模光纤进行输出, 并对器件参数进行优化计算, 并给出了此 TOF 的仿真输出光谱图。

此 TOF 输入端采用单模光纤, 以光栅作为分光器件, 以 MEMS 来选择输出中心波长, 输出端采用多模或者少模光纤, 可以实现窄带且平顶的通带特性。通过参数优化, 仿真结果表明, 采用多模或者少模光纤输出, TOF 的 $0.5\ \text{dB}$ 和 $25\ \text{dB}$ 带宽分别为 $0.95/0.29\ \text{nm}$ 和 $1.39/0.69\ \text{nm}$, 分别满足在 $100\ \text{GHz}$ 和 $50\ \text{GHz}$ DWDM 系统中的应用需求。由于输出端为多模或者少模光纤, 从该滤波器输出的光信号不能继续在单模光纤中传输, 只能由光探测器接收, 因此该滤波器一般应用于全光网络节点中的下载端口。

参考文献:

- [1] Niwa T, Hirako R, Hasegawa H, et al. Compact wavelength tunable filter fabricated on a PLC chip that construct colorless/directionless/contentionless drop function in optical cross-connect [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2012: OTh3D. 6.
- [2] Huang H, Ren Y, Xie G, et al. Tunable filter for orbital-angular-momentum multiplexed optical channels [C]//CLEO: Science and Innovations, 2013: JTu4A. 89.
- [3] Bi M, Xiao S, He H, et al. Power budget improved symmetric 40-Gb/s long reach stacked WDM-OFDM-PON system based on single tunable optical filter [J]. *Photonics Journal, IEEE*, 2014, 6(2): 1-8.
- [4] Dittrich P, Montemezzani G, Günter P. Tunable optical filter for wavelength division multiplexing using dynamic interband photorefractive gratings [J]. *Optics Communications*, 2002, 214(1): 363-370.
- [5] Zuo Y H, Mao R W, Zheng Y Y, et al. A Si-based tunable narrow-band flat-top filter with multiple-step-type Fabry-Perot cavity structure [J]. *IEEE Photon Technol*, 2005, 17: 2134-2136.
- [6] Luo Z C, Luo A P, Xu W C. Polarization-independent multiwavelength switchable flat-top all-fiber comb filter using variable ratio coupler-based Mach-Zehnder interferometer [C]//2012 17th Opto-Electronics and Communications Conference, 2012.
- [7] Bae J H, Bae J K, Lee S B. Design of tunable flat-top bandpass filter based on two long-period fiber gratings and core mode blocker [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15(2): 202-206.
- [8] Kitoh T, Inoue Y, Itoh M, et al. Low chromatic-dispersion flat-top arrayed waveguide grating filter [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(15): 1116-1118.
- [9] Tu Xinghua, Liu Fengqing, Xu Ning, et al. Design of high channel-count optical fiber filters based on sampled Bragg grating with discrete linear chirp structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 9 (9): 1965-1971. (in Chinese)
- [10] Zhang Chunlei, Xiang Yang, Yu Changsong, et al. Development of pinhole filter in high precision interferometer [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6 (6): 952-957. (in Chinese)
- [11] Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin, et al. Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 6(6): 627-632. (in Chinese)
- [12] Chen Weidong, Yu Na, Chen Ying, et al. Tunable filtering characteristics of cascaded photonic crystal Mach-Zehnder interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 4023-4027. (in Chinese)
- [13] Liu Shuo, Liu Yange, Liu Runyu, et al. All-fiber flat-top comb filter based on high-birefringence photonic crystal fiber loop mirror [J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(1):6-10. (in Chinese)
- [14] Li Wensheng, Zhang qin, Huang Haiming, et al. Comb filtering in terahertz frequency based on photonic crystal containing doped semiconductor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1869-1872. (in Chinese)