

# 基于模式测试的单模-多模-单模光纤滤波器设计理论

王凯军<sup>1,2</sup> 张建中<sup>1</sup> 郭明磊<sup>1</sup> 高麒麟<sup>1</sup> 彭石军<sup>1</sup> 孙伟民<sup>1</sup> 苑立波<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; <sup>2</sup> 中南林业科技大学理学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要** 光纤内集成式滤波器有着广泛的应用需求,是光纤光学领域的重要研究内容之一。开展了基于单模-多模-单模光纤结构的滤波器设计的理论研究,给出了对单模-多模-单模光纤结构中多模光纤内激励起的模式的干涉测试方案。该测试证实了基于单模-多模-单模光纤结构的滤波器分析理论中的激发多模式假设,同时为理论分析提供了重要的经验参数。给出了根据理论分析所设计的滤波器,测试结果表明该滤波器设计理论的有效性。讨论了影响该滤波器性能的因素。

**关键词** 光纤光学;滤波器;单模-多模-单模结构;多模式测试

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0292

## Theory of Designing Single-Multi-Single Mode Fiber Filter Based on Mode Measurement

Wang Kaijun<sup>1,2</sup> Zhang Jianzhong<sup>1</sup> Guo Minglei<sup>1</sup> Gao Qilin<sup>1</sup> Peng Shijun<sup>1</sup>  
Sun Weimin<sup>1</sup> Yuan Libo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Sciences, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup> School of Sciences, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China

**Abstract** In-fiber filter has been focused on for many years and has broad applications in fiber optics area. The theoretical analysis of a single-multi-single mode (SMS) fiber based filter is presented. A multimode-measurement is realized based on an interference method in order to prove the excited multimode in the multimode fiber of SMS structure and to provide more accurate parameters used in the theoretical analysis. Designed filters are given to show the validity of the theoretical analysis. Other factors influencing the performance of the SMS based filter are discussed at last.

**Key words** fiber optics; filter; single-multi-single mode fiber structure; multimode measurement

## 1 引言

光纤滤波器是光纤通信和光纤传感中的重要器件。基于光纤光栅的滤波器被广泛地研究和应用<sup>[1~5]</sup>。最近,单模-多模-单模光纤(SMS)结构透射谱展示的滤波特性被广泛关注<sup>[6~12]</sup>,用来实现带通滤波和边沿滤波<sup>[7,8]</sup>,同时该结构直接被应用于温度和应变传感<sup>[10,11]</sup>。文献[9]利用弱导和线偏模近似对基于阶跃多模光纤的SMS结构的透射光谱特性进行了理论分析。然而对于具有不同折射率分布的多模光纤,该方法就有所局限。本文提出了简

单的基于对多模光纤模式测量的模式干涉分析法,对SMS结构的透射光谱特性提供一种有效的预测方法。该方法不局限于基于阶跃多模光纤的SMS滤波的分析,可以方便地应用于各种多模光纤构成的SMS结构。文中详细给出了利用干涉仪结合快速傅里叶变换(FFT)解调实现SMS中多模光纤内激励起的模式测试的方法。通过对SMS结构的理论设计与实验结果对比证明了理论分析的有效性。最后讨论了影响SMS滤波器性能的因素。

**基金项目**: 黑龙江省留学基金(LC08C02)和哈尔滨科技基金(2007RFLXG007)资助课题。

**作者简介**: 王凯军(1975—),男,硕士研究生,实验师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: wangkj.csfu@126.com

**导师简介**: 张建中(1978—),男,博士,副教授,硕士生导师。主要从事光纤智能结构方向研究。

E-mail: zhangjianzhong@hrbeu.edu.cn

## 2 单模-多模-单模光纤结构及其多模光纤内激励模式的测试

SMS结构如图1(a)所示,由导入标准单模光纤(SMF)和一段多模光纤(MMF)焊接,另一端再通过标准单模光纤引出。当放大自发辐射(ASE)宽谱光由单模光纤引入到多模光纤内后,将激励起多个模式,多个模式的光又会耦合到引出单模光纤内,因此SMS的透射谱将由耦合到引出单模光纤中的多个模式干涉所决定。只要测出多模光纤内激励起的模式的有效折射率和耦合效率,就可以预测SMS结构透射谱,从而做到对SMS结构滤波器的设计。文献[13]给出了一种利用倾斜光栅观察多模光纤模式的方法,本文中则利用简便的白光干涉仪结合FFT技术来实现模式探测。多模光纤的参数如下:纤芯/包层直径为105/125 μm;纤芯/包层折射率为1.4574/1.4420。图1(b)给出了干涉法结合FFT实现多模光纤内模式测试的方案。波长范围1520~1570 nm的放大自发辐射宽谱光源将光注入到由两个2×2耦合器构成的光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪;干涉仪的一臂接入SMS结构,另外一臂由标准单模光纤构成;最终光输入到光谱分析仪(OSA)和计算机系统。

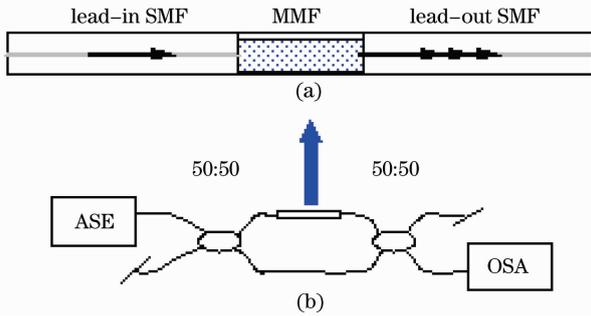


图1 (a)单模-多模-单模光纤结构;(b)模式测试装置  
Fig.1 (a) Single-multi-single mode fiber structure; (b) measurement setup of the excited mode in single-multi-single mode fiber

图2(a)是光谱分析仪(OSA)采集到的马赫-曾德尔干涉仪产生的干涉信号。该干涉谱  $s(\lambda)$  表示为

$$s(\lambda) = \left[ \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \cdot s_0(\lambda) + \sum_{i \neq j=1}^N \eta_i \cdot \eta_j \cdot s_0(\lambda) \cdot \cos(\Delta\varphi_{ij}) + s_0(\lambda) + \sum_{i=1}^N 2\eta_i s_0(\lambda) \cos(\Delta\varphi_{i-ref}) \right] / 4, \quad (1)$$

其中  $\lambda$  表示波长,  $s_0(\lambda)$  为 ASE 光谱,  $\eta_i$  为由单模光纤模式向多模光纤内第  $i$  个模式耦合时的功率耦合系数。 $\Delta\varphi_{ij}$  是第  $i$  个和第  $j$  个模式通过多模光纤时所

引入的相位差,可以表达为

$$\Delta\varphi_{ij} = (\beta_i - \beta_j)L_0 = \frac{2\pi}{\lambda}(n_i - n_j)L_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta\delta_{ij}, \quad (2)$$

其中  $\beta_i$  和  $n_i$  为多模光纤内第  $i$  个模式的传播常数和有效折射率。 $\Delta\delta$  为第  $i$  个和第  $j$  个模式通过多模光纤时引入的光程差,  $L_0$  为 SMS 结构中多模光纤的长度。 $\Delta\varphi_{i-ref}$  为多模光纤中第  $i$  个模式和参考单模光纤内模式的相位差,表示为

$$\Delta\varphi_{i-ref} = \frac{2\pi}{\lambda}(n_i L_0 - n_{ref} L_{ref}), \quad (3)$$

其中  $n_{ref}$  为参考单模光纤中模式的有效折射率。 $L_{ref}$  为参考臂的总长减去 SMS 臂中的单模光纤长度,实验中  $L_{ref}$  和  $L_0$  的选取相差几个厘米以内,为了使光谱分析仪可以采集到干涉信号[如图2(a)所示]。通过对干涉信号在波矢空间进行线性插值,然后进行FFT运算得到如图2(b)所示的FFT谱。观察该谱可以发现有两块干涉区域 S1 和 S2。其中 S1

来源于(1)式中的第二项  $\sum_{i \neq j=1}^N \eta_i \cdot \eta_j \cdot s_0(\lambda) \cdot \cos(\Delta\varphi_{ij})$ , 而 S2 来源于(1)式中的第四项  $\sum_{i=1}^N 2\eta_i s_0(\lambda) \cos(\Delta\varphi_{i-ref})$ 。S1 和 S2 中的每一个峰应当对应于一个干涉项,其横坐标对应于该干涉项中两束光的光程差( $\Delta\delta$ )。故原则上通过观察 S1 可以得到关于  $\Delta\varphi_{ij}$  的信息,但由于 S1 处于低频区,有较大的低频噪声。通过 S2 同样可以得到  $\Delta\varphi_{ij}$ , 根据(3)式有

$$\Delta\varphi_{ij} = \Delta\varphi_{i-ref} - \Delta\varphi_{j-ref}. \quad (4)$$

同时通过(1)式可以看出 FFT 谱中 S2 中的峰 M1~M6 的强度近似正比于  $\eta_i$ 。将从 S2 得到的信息填到表1中。图2(c)中 FFT 峰 M1~M6 横坐标对应于  $n_i L_0 - n_{ref} L_{ref}$ , 纵坐标对应于相对耦合系数(表1中相对耦合系数是对最高峰 M5 归一化结果)。本测试中选取的多模光纤的长度  $L_0$  为 1.10 m。表1将提供用来对 SMS 结构仿真的基本参数。

表1 模拟单模-多模-单模光纤透射谱所用参数

Table 1 Parameters from Fig. 2(c)

Excited mode in MMF	$\Delta\delta/\mu\text{m} \sim n_i L_0 - n_{ref} L_{ref}$	Normalised couple efficiency $\propto \eta_i$
M1	11656	0.1548
M2	12801	0.2944
M3	13383	0.3528
M4	14016	0.8046
M5	14494	1
M6	14927	0.4160

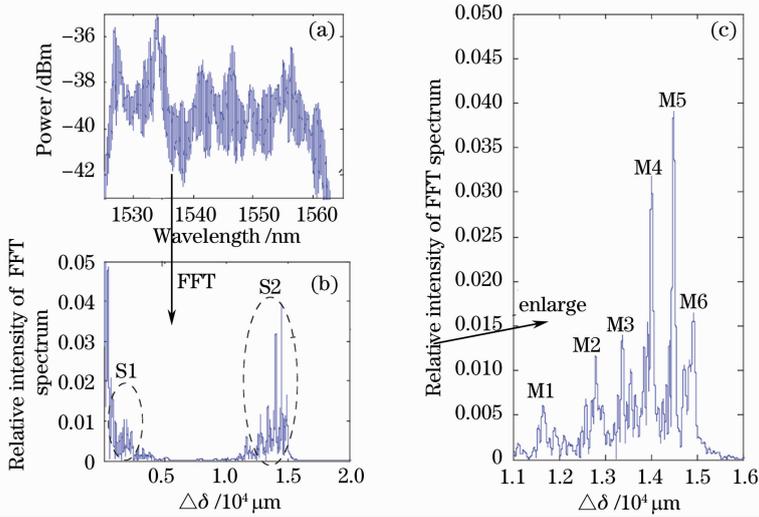


图 2 (a)模式测试的干涉谱;(b)模式测试的干涉谱在波矢空间的FFT谱;(c)局部放大的FFT谱

Fig. 2 (a)An inference spectrum of the excited mode measurement; (b)its FFT spectrum; (c)the enlarge figure of the FFT spectrum

### 3 单模-多模-单模光纤结构滤波器的理论与实际制作

由以上分析可知,当宽谱光通过 SMS 结构时,由于模式干涉将导致部分波长的光可以较低损耗通过,而一些波长的光将很少通过,即实现滤波功能。该滤波器的滤波原理是基于模式的耦合和干涉实现的,可以表达为

$$s(\lambda) = \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \cdot s_0(\lambda) + \sum_{i \neq j=1}^N \eta_i \cdot \eta_j \cdot s_0(\lambda) \cdot \cos(\Delta \varphi_{ij}). \quad (5)$$

式中的  $\Delta \varphi_{ij}$  可以通过表 1 中  $\Delta \delta$  得到。虽然不能直接得到耦合系数  $\eta_i$  的大小,但耦合系数之间的比值是可知的,也就是表 1 中给出的归一化耦合系数,定义了具有最高耦合系数的 M5 模的耦合系数为 1。利用(4)式和表 1 中的参数,计算了具有不同多模光纤

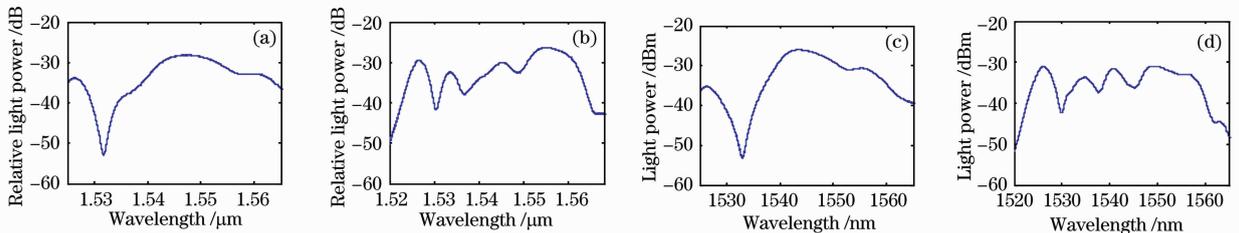


图 3 (a)模拟长约 5.83 cm 多模光纤构成的 SMS 的透射谱;(b)长 5.8 cm 多模光纤构成的 SMS 的透射谱;

(c)模拟长约 13.25 cm 多模光纤构成的 SMS 的透射谱;(d)长 13.3 cm 多模光纤构成的 SMS 的透射谱

Fig. 3 (a) Simulated transmission spectrum of SMS of 5.83 cm in multi-mode fiber length; (b) the experimental transmission spectrum of SMS of about 5.8 cm in multi-mode fiber length; (c) the simulated transmission spectrum of SMS of 13.25 cm in multi-mode fiber length (d) the experimental transmission spectrum of SMS of about 13.3 cm in multi-mode fiber length

长度的 SMS 的透射谱。图 3(a),(c)中给出了 ASE 光通过长度  $L_0$  为 5.83 cm 和 13.25 cm 的多模光纤构成的 SMS 结构的透射光谱仿真图。图 3(b),(d)给出了约为 5.8 cm 和 13.3 cm 的多模光纤构成的 SMS 的实验测试透射谱,仿真结果和实验结果基本一致。但两者间仍有差别,造成这些差别的原因有:首先理论模型建立在线偏模基础上,实际光纤中光的偏振态变化可以引起透射谱产生一定的变化;同时在光纤焊接时,较小的光纤对准偏差将会引入较大透射谱变化;其次在仿真计算时,忽略了耦合效率较低的模式。

### 4 单模-多模-单模光纤结构滤波器稳定性讨论

应用 SMS 结构滤波器时,必须了解该滤波器的稳定性。测试了不同温度和应变下 SMS 的透射谱,

发现 SMS 的透射谱随着温度和应变横向漂移, 响应度分别为  $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $-2.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。同时利用光纤偏振环观察了入射光偏振态对 SMS 滤波器性能的影响, 结果显示透射谱发生了些许变化, 但变化不大, 该器件对偏振不敏感。还观察了该结构的弯曲特性, 发现该结构对弯曲极为敏感, 其主要原因是当多模光纤发生弯曲时, 其内部各个模式之间将发生模式耦合<sup>[14]</sup>, 甚至发生模式泄漏。综上所述, 在应用时应当进行适当封装来避免弯曲, 同时需要考虑封装对该结构的温度应变的补偿。

## 5 结 论

提出了基于模式测量的 SMS 结构的透射谱分析方法。给出了对 SMS 结构中多模光纤内激励起的模式的干涉仪结合 FFT 谱分析的方案。该测试为多模干涉滤波理论分析提供了必要的参数。实验结果和理论模拟的对比证明所提出分析理论的有效性, 该模式干涉理论可以作为设计 SMS 滤波器的有效工具。最后讨论了温度、应变和弯曲等对该滤波器性能的影响。

## 参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguide; application to reflection filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 2 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 3 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave*

- Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 4 C. R. Giles. Lightwave application of fiber Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1391~1404
- 5 Y. Wang, W. Jin, J. Ju *et al.*. Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**: 2784~2790
- 6 Arun Kumar, Ravi K. Varshney, Rakesh Kumar. SMS fiber optic microbend sensor structures: effect of the modal interference[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **232**: 239~244
- 7 W. S. Mohammed, P. W. E. Smith, X. Gu. All-fiber multimode interference bandpass filter[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2547~2549
- 8 Qian Wang, Gerald Farrell, Wei Yan. Investigation on single-mode-multimode-single-mode fiber structure[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(5): 512~519
- 9 W. S. Mohammed, A. Mehta, E. G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *J. Lightwave Technol.* 2004, **22**: 469~477
- 10 E. Li, X. Wang, C. Zhang. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 091119-1
- 11 E. Li. Temperature compensation of multimode interference-based fiber devices[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**: 2064~2066
- 12 Zhang Yan, Zhang Jianzhong, Liu Zhihai *et al.*. Multimode fiber based temperature sensor with the capability of wavelength encoding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 327~330
- 张 滢, 张建中, 刘志海 等. 具有波长标定功能的多模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 327~330
- 13 Yang Chun, Wang Yong, Xu Changqing. Separate detection of degenerated mode group of multimode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1459~1463
- 杨 春, 王 勇, 徐长青. 多模光纤中简并模式群的分别探测[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1459~1463
- 14 Wang Honghai, Tong Weijun. Effect of periodic scrambling on the transmitting characteristic of multimode fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 177~180
- 汪洪海, 童维军. 周期性扰动对多模光纤传输性能的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 177~180