

文章编号: 0258-7025(2009)03-0540-07

# 光纤滤波器的原理、结构设计及其进展

刘卓琳 张伟刚 姜萌 张绮 刘亚萍 林锦海 尚佳斌 王春宝

(南开大学现代光学研究所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 介绍了光纤滤波器的原理、结构及主要应用,提出了级联设计滤波器的概念。在总结典型级联式滤波器基础上,详细分析了其结构设计及工作原理,评述了其优缺点。结合微结构光纤(MOF)及光栅的特殊性质,阐述了典型的微结构光纤滤波器的结构设计及工作原理,展示了其典型应用。提出了级联微结构光纤及光栅设计滤波器方案,展望了光纤滤波器的发展,并指出了进一步拓展及应用的方向。

**关键词** 光栅; 光纤滤波器; 级联; 微结构光纤; 微结构光纤光栅

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0540

## Configuration and Development of Fiber Optical Filter

Liu Zhuolin Zhang Weigang Jiang Meng Zhang Qi Liu Yaping

Lin Jinhai Shang Jiabin Wang Chunbao

(*Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

**Abstract** The principle, structure and application of fiber optical filter are introduced, and a significant conception of cascaded fiber optical filter is proposed. Its structural and working principle are observed in detail, on the base of summing up typical cascaded fiber filters. The structural design and working principle of microstructure optical fiber (MOF) and microstructure optical fiber grating (MOFG) are demonstrated, by analyzing the particular properties of them. And their application in the design of the fiber optical filters is summarized. The scheme of MOF and MOFG cascaded filter is proposed, and its future development is presented. It can broaden the category of filter scheme and make the configuration of the filter variable.

**Key words** grating; fiber optical filter; cascaded; microstructure optical fiber; microstructure optical fiber grating

## 1 引言

光纤滤波器是波分复用(WDM)光通信系统和传感系统中基本的关键器件之一。波长可调谐、插入损耗低、与光纤通信系统易于集成的全光纤可调谐滤波器,正受到科研工作者的青睐。根据光的干涉和衍射原理实现光纤滤波的方法很多,已经设计出了多种光纤滤波器结构。包括:

1) 基于耦合器的光纤滤波器:如抛光非平衡光纤耦合器、级联熔锥光纤耦合器、非对称双芯光纤耦合器<sup>[1]</sup>等。

2) 基于光纤光栅的光纤滤波器:有两种光纤滤波器已实现商业化,即 Bragg 光栅滤波器和长周期光栅滤波器<sup>[2]</sup>,此外还有基于啁啾相移光纤光栅滤波器<sup>[3]</sup>等。

3) 基于光纤干涉仪的光纤滤波器:Fabry-Perot 干涉仪、非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪<sup>[4]</sup>和 Michelson 干涉仪等光纤滤波器。

4) 基于声光调制机制的声光滤波器<sup>[5]</sup>等。

常规光纤及光纤光栅的滤波器种类繁多,但因其结构变化少,仍不能满足实际需要。微结构光纤

收稿日期: 2008-12-08; 收到修改稿日期: 2008-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(10674075, 60577018)资助课题。

作者简介: 刘卓琳(1984-),女,硕士研究生,主要从事光子技术及光通信方面的研究。E-mail: lzl419@sina.com

导师简介: 张伟刚(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

(MOF)以其独特的性能如无截止单模传输<sup>[6]</sup>、小模场面积与高非线性<sup>[7]</sup>、大模场面积<sup>[8]</sup>、高双折射<sup>[9]</sup>及光子带隙效应等,一经出现便引起了人们的广泛关注。研究表明,以微结构光纤为基本元件的光滤波器,为研制新型光纤滤波器注入了新的设计理念,并且有望使滤波器的设计与研制达到一个新的水平。

本文总结了几类典型的光纤滤波器,分析了其结构设计及滤波原理,并展望了新型光纤滤波器的设计。

## 2 光纤滤波器的基本原理及构成

### 2.1 滤波器的一般分类

滤波器的分类方式较多,常见的一般分类方法有:

#### 2.1.1 从频带区域选择上划分

滤波器大致可分为低通滤波器(LPF)、高通滤波器(HPF)、带通滤波器(BPF)和带阻滤波器(BRF)四类,它们的幅度波长特性曲线如图1所示。

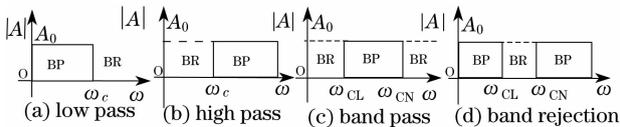


图1 幅度频率特性曲线示意图

Fig. 1 Frequency response of fiber optical filter

#### 2.1.2 从滤波宽窄范围上划分

滤波器又可分为窄带滤波器(Narrowband filter)和宽带滤波器(Broadband filter),通常认为带宽小于0.8 nm的为窄带滤波器,大于100 nm的为宽带滤波器。随着对滤波器性能要求的不断提高以及应用范围的不断扩大,近些年又出现了超窄带滤波器(Ultra-narrowband filter)<sup>[10]</sup>和超宽带滤波器(Ultra-broadband filter)<sup>[11]</sup>,它们的带宽分别达到小于1 pm和大于200 nm的标准,这无疑是对滤波器滤波范围的进一步窄化和扩展,从而其性能也随之得到进一步提升。需要指出的是,许多器件尽管不被称为滤波器,但因其具有与滤波器相似的特性,故亦应将其归类为滤波器范畴,例如,光开关、光调制器、干涉仪、光栅等。

### 2.2 滤波器的原理及用途

根据光干涉和衍射原理设计而成的光纤滤波器主要用来滤除信号中无用的频率(波长)成分。例如,中心波长为1550 nm的窄带信号,其中包含较大范围其他波长信号干扰。以低通滤波器为例,滤波器滤波原理如图2所示。

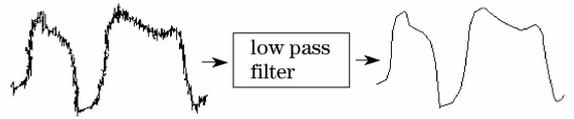


图2 滤波器滤波原理示意图

Fig. 2 Principle of the fiber optical filter

正是由于滤波器可以实现上述滤波过程,使得光纤滤波器在诸如WDM光纤通信系统和光纤传感系统中有着广泛的应用。一些以光纤为基本元件研制的光纤滤波器也可用于气体的高精度定标<sup>[12]</sup>、光纤激光器中的波长选择、光相干层析技术(OCT)以及具有特殊光谱函数的新型光学系统等<sup>[13]</sup>。例如,窄带带通滤波器可用作激光器,宽带带通滤波器可用于能量补偿,宽带带阻滤波器可用于掺饵光纤放大器(EDFA)增益平坦等。因其应用方面有所不同,故对滤波器中心响应波长、带宽和峰值功率等的要求亦有差异。

### 2.3 光纤滤波器的类型

构成光纤滤波器的结构设计有多种选择,常见的有基于Sagnac双折射环型、耦合器型、光纤光栅型、级联光纤或光栅型、级联高双折射光纤环镜型等<sup>[14]</sup>,这些类型的光纤滤波器都具有各自的滤波区域、滤波范围以及可调谐范围。其中,采用级联方式设计光纤滤波器是一种新的方法。级联的概念,是指将光学元件(如光纤、光栅、耦合器等)按照一定拼接方式(如顺次串联、空间并联以及混合拼接等)构成光纤滤波器的设计新方法。这种新方法为设计新型可调谐光纤滤波器提供了更为宽阔的空间以及灵活的自由度。

通过选择不同的级联元件,或者采取不同的级联方式,可以有效扩大光纤滤波器的设计自由度,进一步丰富光纤滤波器的设计结构。并且,对不同的光纤或光栅等级联元件的某些光谱特性进行选择或整合,可设计并研制出结构新颖、性能优异的级联式新型高性能可调谐光纤滤波器。例如,根据实际需求,采用级联方式可以设计并研制诸如带通型、带阻型、边缘型滤波器、超宽带滤波器、超窄带滤波器以及通道滤波器<sup>[15]</sup>等。

## 3 几种典型级联式滤波器的结构及原理

### 3.1 基于耦合器的光纤滤波器

#### 3.1.1 基于侧面抛光定向耦合器的光纤滤波器

1994年,J. L. Archambarlt等<sup>[16]</sup>将Bragg光栅引入普通2×2定向耦合器,设计并实现了耦合器

型光纤滤波器,其结构如图3所示。

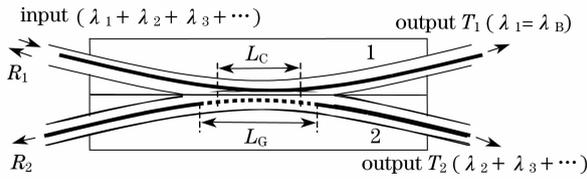


图3 基于侧面抛光定向耦合器的光纤滤波器结构示意图

Fig. 3 Schematic of fiber optical filter based on side polished directional coupler

**设计方法:**将两根相同的单模光纤侧面抛光,形成定向耦合器,耦合器的最大耦合效率达97%, $L_C$ 为耦合器有效耦合长度。将其中的光纤2纤芯上刻制Bragg反射式光栅,该光栅长度为 $L_G$ ,中心波长 $\lambda_B = 1535 \text{ nm}$ 。将该器件进行封装,制作成基于耦合器型的光纤滤波器。

**工作原理:**当入射波长远离 $\lambda_B$ 时,该滤波器与普通 $2 \times 2$ 定向耦合器一样,即将光纤1中的光波耦合到光纤2中传输;当入射波长接近 $\lambda_B$ 时,入射光因受Bragg光栅作用不能从光纤1耦合到光纤2中,而是从另一个通道输出。

实验测得滤出光 $T_1$ 的带宽为0.7 nm,从而实现了窄带带通滤波;而从该滤波器另一个输出端测量 $T_2$ ,则只缺少了 $\lambda_B$ ,从而实现某一波长( $\lambda_B$ )的带阻滤波。

该滤波器的缺点:实验测量和理论分析结果存在较大差异,其滤波性能有待进一步提高。

### 3.1.2 基于光纤扭转拉锥耦合器的光纤滤波器

2007年,M. J. Kim等<sup>[11]</sup>将两根光纤拉锥的方法构成耦合器,设计并研制出了超长带宽的光纤滤波器。

**设计方法:**将两根纤芯刻有长周期光栅的单模光纤扭转在一起,再用普通熔锥方法将其拉锥构成耦合器结构,从而设计并实现了具有超长带宽的光纤滤波器,其结构如图4所示。该滤波器中的长周期光栅长度为200 mm,栅格周期 $\Lambda = 400 \mu\text{m}$ ,响应波长为1480 nm。

**工作原理:**光从入射端入射,首先经第一个长周期光纤光栅(LPG)后,纤芯 $LP_{01}$ 模与同向传输的 $LP_{08}$ 高阶包层模耦合,通过消逝场作用,传输光被耦合到与其扭转的另一根光纤中;然后,经过第二个LPG后,满足相位匹配条件的包层模式又将与纤芯模式耦合,并从出射端输出。采用这种结构的光纤滤波器,可以实现带宽大于200 nm的超宽带滤波。

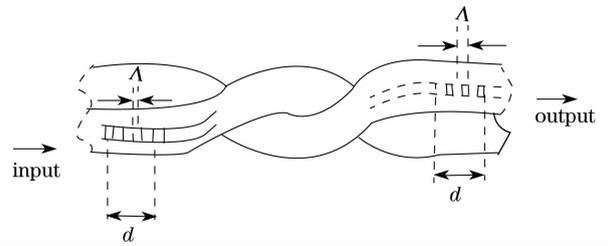


图4 基于光纤扭转拉锥耦合器的光纤滤波器结构示意图

Fig. 4 Schematic of fiber optical filter based on the tapping coupler with the arms inscribed LPG respectively

该滤波器的缺点:插入损耗相对较大,一般可达5 dB。降低插入损耗,将是该滤波器研制必须解决的关键问题。

上述两种光纤滤波器的结构均采用两根光纤以拉制耦合器的方式进行设计。然而,从设计方法的角度考察,在一根光纤内部利用双芯或多芯的耦合作用,也可以实现滤波性能。2007年,F. Y. M. Chan等<sup>[17]</sup>就设计出了一种基于不对称非线性双芯光纤的长周期耦合器模型,这种耦合器预期耦合效率可达100%,有望实现波长可调谐优异滤波性能。但是,这种结构的滤波器要求工艺严格,制作难度较大,在实验上需要进一步探索及相应的证明。此外,董小伟等<sup>[18]</sup>利用布拉格光栅反射作用的联合效应形成的双光栅耦合器,具有结构紧凑、滤波效率显著的优点。

## 3.2 串联式光纤滤波器

串联式光纤滤波器是级联式光纤滤波器中的一种类型。事实上,光学元件的级联方式不限于顺次拼接(串联),也可以并列拼接,即并联方式。基于耦合器的光纤滤波器,就可以认为是一种并联式的光纤滤波器。在实际应用中,串联式光纤滤波器的设计与研制占有重要地位。

### 3.2.1 基于单模和多模光纤的串联式滤波器

2004年,W. S. Mohammed等<sup>[19]</sup>报道了对基于多模干涉效应的波长可调谐光纤镜的研究,他们将普通单模光纤与多模光纤对接在一起,通过改变入射光波长使轴向聚焦位置发生变化,发现二者呈线性关系,并在实验上得到了验证。随后,研究人员利用自成像现象和多模干涉效应,对此类结构作了进一步研究。

**设计方法:**2006年,W. S. Mohammed等<sup>[20]</sup>在上述研究基础上,将单模—多模—单模光纤顺次级联,基于多模干涉和再成像效应,研制出光纤带通滤波器,其结构如图5所示。

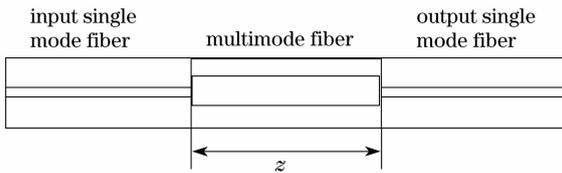


图 5 全光纤多模干涉带通滤波器结构图

Fig. 5 Schematic of all-fiber multimode interference bandpass filter

该滤波器 13 dB 对应的带宽约 100 nm, 而插入损耗只有 0.4 dB; 6 cm 的长度使其易于封装, 中心波长位于 1550 nm 附近, 这在通信领域具有很好的应用前景。此后, Q. Wang 等<sup>[21]</sup>又对这种结构作了更细致、精确的研究, 并提出了一种简单的光谱响应分析方法。

工作原理: 光波由单模光纤输入端以类高斯场入射到多模光纤, 多模光纤长度为  $z$ 。当光波沿多模光纤传播时, 输入类高斯场会激发出一些传导模,  $s$  对于纤芯半径较大的多模光纤而言, 输入光场可仅由这些传导模来表征。分析表明, 增大多模光纤半径, 可以有效增加其导模的数量和限制包层模能量的损耗。于是, 多模光纤末端的场分布可表示为

$$E_{\text{MMF}}(r, \theta) = \sum_{j=0}^M a_j \psi_j(r, \theta) \exp(i\beta_j z), \quad (1)$$

式中  $\psi_j$  和  $a_j$  分别为第  $j$  阶模电场振幅和场的展开系数,  $M$  为多模光纤中所有导模数的总和。展开系数  $a_j$  可表示为

$$a_j = \frac{\int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\infty} E_s(r, \theta) \times \psi_j(r, \theta)^* r dr d\theta}{P_j = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\infty} |\psi_j(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \quad (2)$$

其中  $E_s$  为单模光纤基模场的分布。对两根相同单模光纤而言, 其总耦合效率为

$$\eta = \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{h=0}^{M-1} \tilde{a}_j^2 \tilde{a}_h^2 \exp[i(\beta_j - \beta_h)z] \quad (3)$$

修改后的展开系数  $\tilde{a}_j$  被定义为

$$\tilde{a}_j = a_j \sqrt{P_j / P_s}, P_s = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\infty} |E_s(r, \theta)|^2 r dr d\theta \quad (4)$$

其中  $P_s$  为入射功率。

由(3)式可知, 通过调整多模光纤长度, 可使耦合效率达到极大, 即多模光纤端面上的场分布恰好是入射光场的像。此时, 幅角  $\theta$  必须为  $2\pi$  的整数倍, 而此条件的成立依赖于入射波长。当不满足此条件时, 有效耦合效率将下降。于是, 光滤波功能得以实现。

W. S. Mohammed 等<sup>[19]</sup>从理论和实验两方面

研究了多模光纤的长度、单模和多模光纤的几何尺寸等因素对滤波器中心波长、带宽等的影响, 其理论分析与实验结果相符合。由此, 可得到两点结论: 滤波器的带宽由多模光纤纤芯尺寸决定, 半径越小, 带宽越宽; 多模光纤长度可用于控制滤波器中心波长的位置。通过综合选择多模光纤纤芯尺寸和长度, 可使滤波器中心波长位置保持不变。

### 3.2.2 包含长周期光栅对的光纤滤波器结构

1996 年, A. M. Vengsarkar 等<sup>[2]</sup>首先提出将长周期光纤光栅作为均衡器应用于 EDFA 和带阻滤波器。LPG 可作为宽带带阻型滤波器使用, 但不能用作窄带滤波器, 特别是多波长窄带滤波器。

设计方法: 1998 年, X. J. Gu<sup>[22]</sup>提出将两个 LPG 对接在一起, 此器件可用于 WDM 系统中的多波长滤波。利用这种结构, 还可实现可调谐多波长滤波器的功能<sup>[23]</sup>。此后, 研究者又在该结构基础上加以改进, 将长周期带阻型滤波器转变成带通滤波器。一种典型的基于 LPG 光纤带通滤波器结构如图 6 所示, 该结构包含一对长周期光栅和一根纤芯模式隔离装置<sup>[24, 25]</sup>。

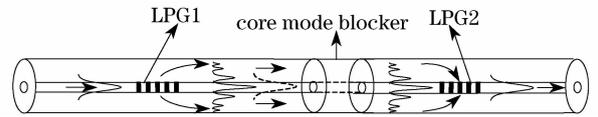


图 6 包含 LPG 对的光纤带通滤波器典型结构示意图

Fig. 6 Typical schematic of fiber bandpass filter based on long-period gratings

工作原理: 入射光波经过第一根 LPG1, 纤芯基模被耦合到满足相位匹配条件的包层模, 这些模式继续向前传播; 在经过纤芯模式隔离装置时, 纤芯模式被阻止, 而包层模向前传播; 包层模到达第二根 LPG2 时, 又被耦合到满足相位匹配条件的纤芯模, 从而实现光滤波功能。其他研究者也提出了类似的结构, 所不同的是: 文献[24]中纤芯模式隔离装置采用的是空芯光纤, 而文献[25]中则是通过一种自准直技术制作完成的。

该滤波器的缺点: 对于 LPG 级联, 对每个 LPG 的匹配性要求很高, 而且外插入的纤芯模式隔离装置长度不能太长, 否则将使传播的光能量有很大的衰减。

### 3.2.3 其他串联结构

近些年, 光纤滤波器迅速发展的原因还包括滤波器的组成元件(光纤和光栅)的不断更新, 这使得滤波器的结构有了更丰富的组合形式。

设计方法: 2008 年, W. Shin 等<sup>[26]</sup>提出螺旋面

长周期光栅—空芯光纤—多模光纤的光纤滤波器结构,如图 7 所示。采用这种结构,能够实现波长可调谐带通滤波功能。

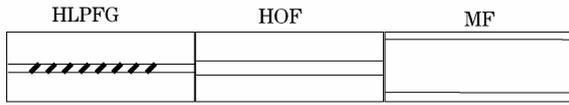


图 7 螺旋面长周期光栅—空芯光纤—多模光纤  
光纤滤波器结构示意图

Fig. 7 Schematic of fiber optical filter with helicoid long period fiber grating (HLPFG)-hollow optical fiber (HOF)-multimode fiber(MF) cascaded

工作原理:对于不满足相位匹配的模式,经过长周期光栅后到达空芯光纤时被阻止,而满足相位匹配条件的模式,则被耦合到包层中空芯光纤继续向前传播;在空芯光纤中传播的模式被耦合到多模光纤纤芯模式;通过对螺旋面长周期光栅施加不同扭转力来改变长周期光栅响应波长,从而实现光纤滤波器波长可调功能。

该滤波器的缺点:因制作螺旋面长周期光栅工艺

的限制,导致该结构插入损耗相对较高,约 3 dB。降低插入损耗,将是该滤波器应用必须解决的关键问题。

## 4 基于微结构光纤的滤波器设计

微结构光纤(MOF)及微结构光纤光栅(MOFG)具有比常规光纤(GF)及光纤光栅(GFG)更为丰富的结构和光学特性。改变 MOF 中微孔的排列、大小以及占空比,设计双芯或多芯,或者将特殊介质载入微孔,均可改变 MOF 及 MOFG 的光学性质,获得优于 GF 及 GFG 的光学特性<sup>[27]</sup>。因此,MOF 及 MOFG 的出现,为新型光滤波器的设计与研制提供了广阔的创造空间。

### 4.1 利用微结构光纤弯曲损耗特性设计滤波器

根据级联型光纤滤波器的设计理念及方法,将具有不同弯曲损耗边沿的微结构光纤相对接,通过改变两光纤不同的弯曲半径,可以实现带宽可调谐宽带带通滤波器<sup>[13, 28]</sup>设计。文献<sup>[28]</sup>中选择的两种 MOF,其端面图和弯曲损耗边沿特性曲线如图 8 和图 9 所示。

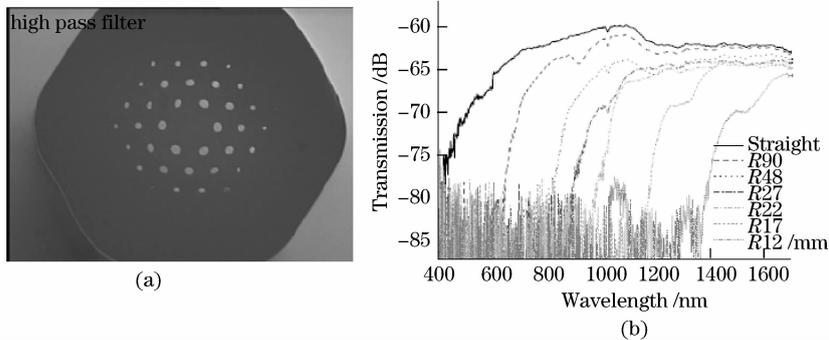


图 8 (a)微结构光纤 1 端面图;(b)弯曲损耗边沿特性曲线

Fig. 8 (a) MOF1 cross sectional view; (b) transmission spectra versus various bend radius for MOF with a single-turn bend

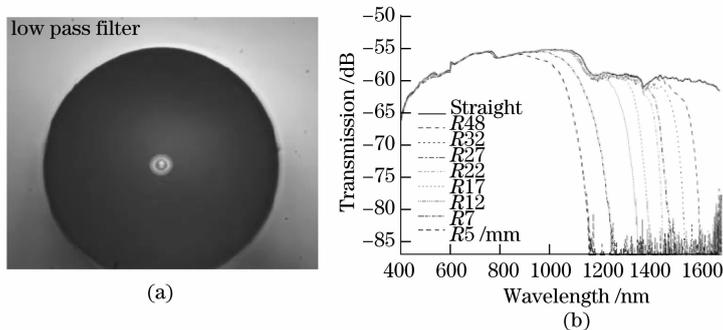


图 9 (a)微结构光纤 2 端面图;(b)弯曲损耗边沿特性曲线

Fig. 9 (a) MOF2 cross sectional view; (b) transmission spectra versus various bend radius for MOF with single-turn bend

设计方法:MOF1 具有短波方向弯曲损耗边沿,MOF2 则具有长波方向弯曲损耗边沿。将两根

MOF 对接后,构成的滤波器传输光谱如图 10 所示。其中,长波和短波方向上的弯曲损耗边沿曲线,整合

成了一条宽带传输光谱曲线。

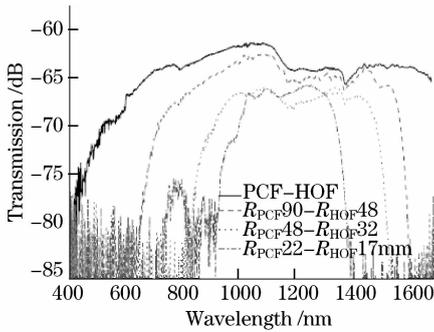


图 10 两个 MOF 对接构成的滤波器传输光谱

Fig. 10 Transmission spectra with short-and long-wavelength bend-loss edge

工作原理: 利用不同的弯曲损耗边缘, 通过选择不同弯曲的曲率半径, 可以实现带宽可调谐功能。该滤波器带宽宽度可调谐范围达到 300~1000 nm。

文献[13]将全固型 MOF 与 Bragg 光纤对接, 设计了一种可调谐宽带光纤滤波器。这种利用 MOF 不同弯曲损耗边缘特性设计的光纤滤波器, 其优点在于不需要引入光纤光栅等其他元件, 制作工艺相对简单。

#### 4.2 利用微结构光纤带隙特性设计滤波器

微结构光纤按其传光机制可分为全内反射方式和光子带隙效应。由于 MOF 特殊的传导机制和灵活设计的结构, 使其具有普通光纤难以比拟的独特性质。将 MOF 及 MOFG 用于滤波器设计与研制, 可使滤波器结构更为简洁, 滤波性能更加优良。

设计方法: 2008 年, Danny 等<sup>[29]</sup>在具有大模场面积特性的 MOF 包层空气孔中填充高折射率液晶, 设计了一种液晶填充光子晶体带隙凹口滤波器。

工作原理: 因液晶对温度比较敏感, 故可通过改变外界温度使其折射率发生变化, 从而改变其带隙位置, 实现波长可调谐滤波。填充于 MOF 包层空气孔中的高折射率液晶, 因其按一定方向排列的液晶具有单轴双折射性, 且其光轴可以通过改变外加电场来调整, 因此能够使带隙位置发生改变。该滤波器实现的波长可调谐范围约 50 nm, 而且所需元件简单, 易于集成。

除了运用光子带隙传导机制设计、研究光滤波器之外, 还有研究者将全内反射和光子带隙传导机制相结合, 设计出混合传导机制的双芯微结构光纤。这种新型光纤可用于实现波长可选择滤波功能<sup>[1]</sup>, 但这种结构需要通过预填充来实现。在全固型光子带隙光纤和柚子型微结构光纤中写入 Bragg 光纤光栅, 均可实现优良的滤波功能<sup>[30,31]</sup>, 其中后者可用

于多波长掺铒光纤激光器的设计与研制。

总体来看, 从微结构光纤成功拉制<sup>[32]</sup>至今, 科研工作者经历十几年时间, 尽管取得了巨大的突破, 但仍有很大的发展空间。在由传统光纤或光栅构成的滤波器结构中引入微结构光纤, 有望获得性能更优异或结构更简单的光纤滤波器<sup>[33,34]</sup>, 通过选择填充特种介质, 可望实现波长可控、可调谐。

## 5 新型光纤滤波器总结与展望

在分析各种典型光纤滤波器的原理和结构的基础上, 提出了级联设计滤波器的概念; 对级联型光纤滤波器进行了分类, 并分析了其优缺点。结合光纤滤波器设计新概念, 分析了典型的 MOF 及 MOFG 滤波器, 阐述了基于 MOF 及 MOFG 滤波器的设计方法和工作原理。

随着光纤和光栅工艺的不断发展, 光纤滤波器的研究有望在以下几个方面取得进一步拓展:

1) 探索以多种光纤(常规光纤、微结构光纤等)为组合元件的新型级联方式。

2) 将滤波器级联获得新型滤波谱线: 相近自由光谱范围的滤波器相连接可得到更窄的通带光谱; 将具有不同自由光谱范围的滤波器相连接后的新滤波器带宽更宽<sup>[35]</sup>, 从而满足在不同方面的要求。

3) 新的光栅写入技术: 写入非均匀长周期光纤光栅和微结构长周期光栅, 将其引入到光纤滤波器结构, 有望设计出性能更优越、结构更简单的光纤滤波器。

4) 介质载入技术: 不同介质、填充部位等因素对 MOF 传光性能的影响。通过施加外场(力场<sup>[36]</sup>、温度场、电磁场或光场)调控光子晶体光纤带隙位置, 有望实现多参数、多方式调节。

综上所述, 既可以从结构上入手, 将光纤的不同特性相结合(级联)设计出结构新颖的新型滤波器; 又可以从元件上入手, 引入微结构光纤及其光栅, 通过将新型光学元件替换光纤滤波器结构中的传统光纤及光栅来探索提高滤波器更高性能的途径, 开辟其在光纤通信及光纤传感方面的更广阔空间。

## 参 考 文 献

- 1 Xiwen Sun. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2484~2486
- 2 Ashish M. Vengsarkar, Paul J. Lemaire Justin B. Judkins et al.. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J.*

- Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1):58~65
- 3 Lu Shaohua, Xu Ou, Feng Suchun *et al.*. Design and application of optical filters based on dhirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1675~1680  
鲁韶华, 许 鸥, 冯素春 等. 基于啾啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1675~1680
  - 4 Li Weibin, Sun Junqiang. Analysis of characteristics of the interleaver based on a double-coupler resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8):1191~1194  
李卫彬, 孙军强. 一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8):1191~1194
  - 5 Jung Y., Choi S., Jeong Y. S. *et al.*. Hollow optical fiber core mode blocker for acousto-optic tunable bandpass filter [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2004 paper: CThMM6
  - 6 Birks T. A., Knight J. C., St. J. Russell P.. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13):961~963
  - 7 Broderick N. G. R., Monro T. M., Bennett P. J. *et al.*. Nonlinearity in holey optical fibers; measurement and future opportunities[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(20):1395~1397
  - 8 Mortensen N. A., Nielsen M. D., Folkner J. R. *et al.*. Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6):393~395
  - 9 Ortigosa-Blanch A., Knight J. C., Wadsworth W. J. *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18):1325~1327
  - 10 Liu Xueming, Lin Aoxiang, Sun Guoyong *et al.*. Identical-dual-bandpass sampled fiber Bragg grating and its application to ultranarrow filters[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(30):5637~5643
  - 11 Myoung Jin Kim, Yong Min Jung, Bok Hyeon Kim *et al.*. Ultra-broadband optical filter based on long-period fiber gratings using higher-order cladding modes [C]. *Conference on Lasers and Electro-optics/Pacific Rim*, 2007
  - 12 Qiao Xueguang, Wang Yu, Fu Haiwei *et al.*. High-accuracy real time calibration of tunable Fabry-Perot filter on large range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):852~855  
乔学光, 王 瑜, 傅海威 等. 可调谐法布里-珀罗滤波器的高精度大范围实时定标[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):852~855
  - 13 Bowen Liu, Minglie Hu, Xiaohui Fang *et al.*. Tunable bandpass filter with solid-core photonic bandgap fiber and Bragg fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8):581~583
  - 14 Lihui Liu, Qida Zhao, Guang Zhou *et al.*. Study on an optical filter constituted by concatenated Hi-Bi fiber loop mirrors[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, **43**(1):23~26
  - 15 Han Jun, Sheng Qiuqin, Chen Kai *et al.*. Sampled long-period-fiber-gratings multi-channel band rejection filters[J]. *Chin. J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(4):510~515  
韩 军, 盛秋琴, 陈 凯 等. 取样长周期光纤光栅多通道带阻滤波器[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(4):510~515
  - 16 Archambault J. L., Russell P. St J., Hua P. *et al.*. Novel channel-dropping filter by grating-frustrated coupling in single-mode optical fiber [C]. *Optical Fiber Communication Conference, (OFC)*, 1994 paper: TuL5
  - 17 Florence Y. M. Chan, Kiyotoshi Yasumoto. Design of wavelength tunable long-period grating couplers based on asymmetric nonlinear dual-core fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(23):3376~3378
  - 18 Dong Xiaowei, Xu Ou, Lu Shaohua *et al.*. Design and experiment of add/drop filter based on double-fiber-bragg-gratings coupler[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(8):1106~1109  
董小伟, 许 鸥, 鲁韶华 等. 双光栅耦合器型上下话路滤波器的设计和实验[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1106~1109
  - 19 Waleed S. Mohammed, Alok Mehta Eric G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2):469~477
  - 20 Waleed S. Mohammed, Peter W. E. Smith. All-fiber multimode interference bandpass filter[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17):2547~2549
  - 21 Qian Wang, Gerald Farrell, Wei Yan. Investigation on single-mode-multimode-single-mode fiber structure[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(5):512~519
  - 22 Gu X. J.. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7):509~510
  - 23 Chen S., Zhao Q., Liu L. *et al.*. Widely tunable multiwavelength filter based on cascaded long period fiber gratings[J]. *Technical Physics Letters*, 2005, **31**(5):212~214
  - 24 Choi S., Eom T. J., Yu J. W. *et al.*. Tunable all-fiber bandpass filter based on hollow optical fiber[J]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2003, Paper: CTuP2
  - 25 Sakata Hajime, Suzuki Shunpei, Hisashi Ito *et al.*. Long-period fiber-grating-based bandpass filter using self-aligned borosilicate core mode blocker[J]. *Optical Fiber Technology*, 2008, **14**(2):93~96
  - 26 Shin W., Oh K., Yu B. A. *et al.*. All fiber wavelength tunable bandpass filter for optical inter-connections[C]. *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, 2008 paper: OW11
  - 27 Zhang Weigang. Progress in microstructure optical fiber sensor designing[J]. *Progress in Physics*, 2007, **27**(4):449~466  
张伟刚. 微结构光纤传感器设计的新进展[J]. *物理学进展*, 2007, **27**(4):449~466
  - 28 Jung Y., Han S. R., Kim Soan *et al.*. Tunable bandpass filter by concatenated microstructured fiber-hollow optical fiber based on bend-loss edge shift[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2006, Paper: JWB60
  - 29 Noordegraaf D., Scolari L., Lægsgaard J. *et al.*. Avoided-crossing-based liquid-crystal photonic bandgap notch filter[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9):986~988
  - 30 Long Jin, Zhi Wang, Qiang Fang *et al.*. Bragg grating resonances in all-solid bandgap fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(18):2717~2719
  - 31 Sun Tingting, Kai Guiyun, Wang Zhi *et al.*. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on a microstructure fiber Bragg grating[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, **46**(2):162~164
  - 32 Knight J. C., Birks T. A., Russell P. St J. *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1547~1549
  - 33 Ha W., Jung Y., Kim J. *et al.*. Fabrication of broad bandwidth rejection filter using hollow optical fiber with femtosecond laser pulses[C]. *In Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2007, Paper MD1~4
  - 34 Nan Kuang Chen, Sien Chi. Evanescent wave photonic crystal fiber tunable filter using dispersive optical polymers[C]. *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, 2005, paper: OWD3
  - 35 Harry J R Dutton. Understanding optical communications[J]. *International Technical Support Organization*. 1998, 231~232
  - 36 Yang Yefei, Zhang Weigang, Liu Bo *et al.*. A novel fiber Bragg grating tunable filter with wide range[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(8):910~912  
杨亦飞, 张伟刚, 刘 波 等. 一种新颖的宽带可调谐光纤光栅滤波器[J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(8):910~912