

基于多模干涉液芯可调谐滤波器

张燕君^{1,2} 徐华斌¹ 谢晓鹏¹ 刘双柱¹

¹燕山大学信息科学与工程学院,河北省特种光纤与光纤传感重点实验室,河北 秦皇岛 066004)

²江苏天明机械集团有限公司,江苏 连云港 222062

摘要 提出了一种基于充液毛细管代替多模光纤的可调谐反射式带阻滤波器,滤波器结构中重要组成部分是一段充入了溶液和汞的毛细管。毛细管的一端与单模光纤共轴对接,另一端用热熔胶密封。由于液体折射率大于毛细管折射率并且毛细管芯径较大,因此液体和毛细管相当于形成了一种大芯径的多模光纤。利用汞的高反射率,实现一种反射式的单模-多模-单模光纤滤波结构。由于毛细管液芯结构对温度的敏感性,在多模干涉原理的基础上,实现可调谐滤波,并从理论仿真和实验证实了可行性。该滤波器具有结构简单、成本低廉等特点,插入损耗为 5.12 dB,3 dB 带宽为 3.3 nm,滤波范围可达到 7 nm。

关键词 光学器件;多模干涉;毛细管;波分复用;液芯;可调谐滤波器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0206005

Tunable Liquid-Core Optical Filter Based on Multimode Interference

Zhang Yanjun^{1,2} Xu Huabin¹ Xie Xiaopeng¹ Liu Shuangzhu¹

¹Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Jiangsu Tianming Machinery Group, Lianyungang, Jiangsu 222062, China

Abstract A tunable reflection type band-rejection optical filter based on capillary filled with liquid instead of multimode fiber is projected. The active component of the structure of filtering is a segment of capillary filling liquid and Hg. One end of the capillary is docked co-axial with a single-mode fiber and the other end is sealed with hot melt adhesive. Refractive index of liquid is greater than the capillary refractive index and the capillary core diameter is larger, so there is equivalent to the formation of a large core diameter multimode fiber. On the basis of the multimode interference principle, because the capillary liquid core is sensitive to the temperature, the tunable optical filtering is achieved. Simulation and experiment confirm the feasibility of the theory. The filter has some advantages, such as simple structure, low cost and so on, for which insertion loss is 5.12 dB, 3 dB bandwidth is 3.3 nm and the filtering range is up to 7 nm.

Key words optical devices; multimode interference; capillary; wavelength division multiplex; liquid-core; tunable optical filter

OCIS codes 060.2280; 060.2340; 060.4510; 350.2460

1 引言

可调谐光滤波器作为波分复用技术中最重要的光学器件之一,越来越受到人们的重视。滤波器的结构多种多样,常见的有基于耦合器的光滤波器^[1]、基于光纤光栅原理的光滤波器^[2,3]、基于干涉仪原理的光滤波器^[4,5]、以声光调制为机理的声光滤波器^[6,7]等。但传统滤波器结构较复杂,加工工艺要求较高,因此滤波器的造价较高。

文献[8]中提出了基于多模干涉效应的单模-多模-单模(SMS)光纤的滤波结构,具有结构简单、成本低廉和插入损耗低等优点,但其调节的范围只有 2 nm,3 dB 带宽比较宽,为 13 nm。文献[9]提出了一种基于应变效应的多模光纤可调谐滤波器,此滤波器调节范围可达 5 nm,3 dB 带宽为 4.3 nm,但该结构制作复杂,插入损耗较高。而本文从多模干涉原理出发提出了一种反射式可调谐滤波结构,此结构不仅具

收稿日期: 2012-08-20; 收到修改稿日期: 2012-10-30

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)和国家自然科学基金(61077067)资助课题。

作者简介: 张燕君(1973—),女,博士,副教授,主要从事光纤传感、光电检测和信号处理等方面的研究。

E-mail: ysu yzhang@yahoo.com.cn

有 SMS 光纤滤波结构的优点,而且具有可调谐滤波范围大、3 dB 带宽窄、插入损耗较小的特点。

2 原 理

如图 1 所示的 SMS 光纤结构^[8]中,入射光沿着单模光纤(SMF)进入多模光纤后,在多模光纤前表面形成近似高斯分布的光场,即多模光纤的入射场。

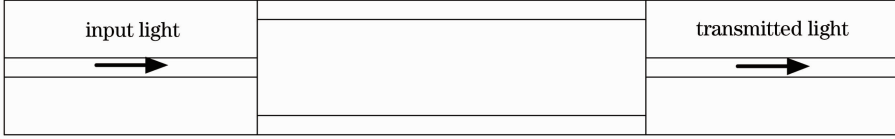


图 1 SMS 光纤结构

Fig. 1 Structure of SMS

选用能量均匀的宽谱光源作为输入时,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,输出光场中不同波长对应不同的光强,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 ψ_j 为第 j 阶模场振幅, a_j 为第 j 阶模场的展开系数, M 为多模光纤中导模数的总和, β_j 为多模光纤中第 j 阶模式的纵向传播函数。第 j 阶模场展开系数 a_j 可表示为

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

$$p_j = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\infty} |\psi_j(r, \theta)|^2 r dr d\theta, \quad (3)$$

式中 E_s 为入射单模光纤中基模模场的分布。 p_j 为第 j 阶模场的功率,多模光纤与出射单模光纤的耦合效率为

$$\eta = \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{h=0}^{M-1} \bar{a}_j \bar{a}_h^* \exp[i(\beta_j - \beta_h)z]. \quad (4)$$

式中展开系数 \bar{a}_j 为

$$\bar{a}_j = a_j \sqrt{\frac{p_j}{p_s}}, \quad (5)$$

该入射场激励起多个互相独立的高阶本征模式,各模式在多模光纤传播过程中相互干涉耦合,形成光场的周期性分布,这就是多模干涉效应^[10~12]。由于不同阶数的导模模场分布的差异性,只有少数的导模能耦合到单模光纤中去,其他模式的导模将耦合到包层中损耗掉。

入射功率 p_s 为

$$p_s = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\infty} |E_s(r, \theta)|^2 r dr d\theta. \quad (6)$$

由(4)式可知,当幅角 θ 必须为 2π 的整数倍时,多模光纤和出射单模光纤之间的耦合效率可以通过调节多模光纤长度达到最大值。在多模光纤末端端面镀一层高反膜,可使光波反射回到入射单模光纤中输出,从而实现反射式滤波结构。

3 多模干涉滤波器的结构设计与仿真

SMS 型多模干涉滤波器的带宽和中心波长可通过调整多模光纤的参数来控制,通常是通过应变效应进行控制,但是 3 dB 带宽较宽,调节范围有限。因此本文提出了一种新型的多模可调谐滤波器结构。

该可调谐滤波器基本结构不同于原有的多模干涉型滤波器的 SMS 光纤结构,利用位移平台,将单模光纤和内部充有香柏油的毛细管进行轴心对准,然后用胶进行密封,形成反射式滤波结构,如图 2 所示。溶液 A 的折射率 n_0 大于毛细管壁的折射率 n_1 ,因此,光从单模光纤入射到毛细管溶液中会发生全发射。由于毛细管芯径远远大于单模光纤,入射光将在溶液 A 中发生多模干涉。

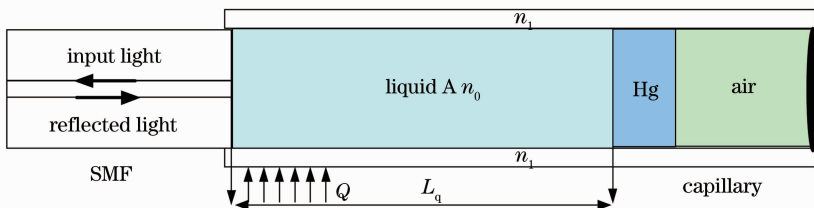


图 2 液芯 SMS 滤波结构

Fig. 2 Structure of liquid-core SMS

利用热胀冷缩的原理,随着半导体致冷器(TEC)作用在 Q 处温度的改变,由于空气密度较小,容易被压缩,溶液 A 的长度 L_q 也随之改变,相当于 SMS 光纤滤波结构中多模光纤的长度改变。光在毛细管中的模式干涉将导致溶液 A 纵向光场的分布随 L_q 变化而周期变化。随着 L_q 的变化,不同的波长会出现不同的能量光谱,实现光滤波的功能;此滤波结构中汞(Hg)的作用是将入射光反射回入射单模光纤中输出,以此构成反射式滤波器。

光通过单模光纤入射到溶液 A 时将激发高阶模式,由于激发出的各高阶模式的耦合系数不同,导致在溶液 A 中不同位置的高阶模式能量不同。在弱导近似条件下,高阶模式在溶液 A 中纵向传播常数差可表示为

$$\beta_m - \beta_n = \frac{u_m^2 - u_n^2}{2kR^2 n_0}, \quad (7)$$

式中 $u_m = \pi\left(m - \frac{1}{4}\right)$ 和 $u_n = \pi\left(n - \frac{1}{4}\right)$ 是零阶贝塞尔函数的根, R 是毛细管的内半径($R = D/2$, D 为纤芯直径), $k = 2\pi/\lambda$ 为入射光的波数,脚标 m 和 n 分别代表光的不同模式,将相位匹配条件代入(7)式中,可得到发生干涉时波长的满足条件

$$\lambda = \frac{16n_0 R^2 N}{(m-n)[2(m+n)-1]L_q}, \quad m > n \quad (8)$$

由于不同模式之间的干涉,会产生能量的极小值和极大值。由(8)式可知,在毛细管内径、液体折射率等外界条件一定的情况下,干涉波长 λ 与溶液长度 L_q 呈线性关系。即毛细管溶液长度改变,可使得能量极值点发生移动^[13,14]。

采用光束传播法对这种新型的光纤滤波结构进行了仿真。仿真时以 1550 nm 波长的入射光入射,模拟毛细管干涉腔长取 6.4 cm,腔内填充折射率为 1.49 的溶液。从图 3 可知,多模干涉不仅能在毛细管内部产生,而且干涉强度随干涉腔长呈周期性变化,因此入射光在传播过程中,会重复地出现自聚焦效应。

文献[8]验证了 SMS 光纤滤波结构的中心波长、带宽易受到多模光纤的长度、纤芯直径、包层折射率等因素的影响,其中 SMS 光纤滤波结构的带宽由多模光纤纤芯直径决定,半径越大,带宽越窄,如图 4 所示。通过波长扫描的方法来模拟宽带光源的输入,然后分析多模光纤不同长度上对应不同波长的基模的归一化强度。随着多模光纤长度由 3.684 cm 变化到 13.844 cm,输出光谱发生蓝移,如图 5 所示。由此可知通过调节毛细管溶液长度可以控制这种新结构的输出光谱特性。

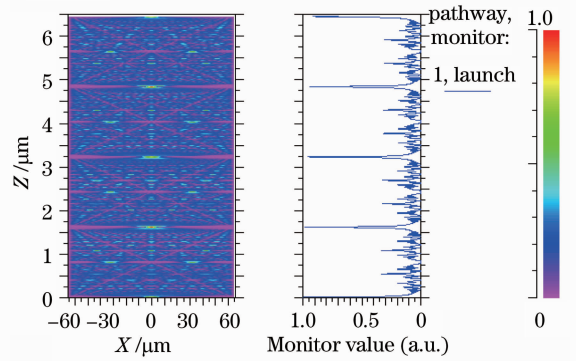


图 3 干涉腔长为 6.4 cm 时的传输场
Fig. 3 Transmission field of interference cavity length of 6.4 cm

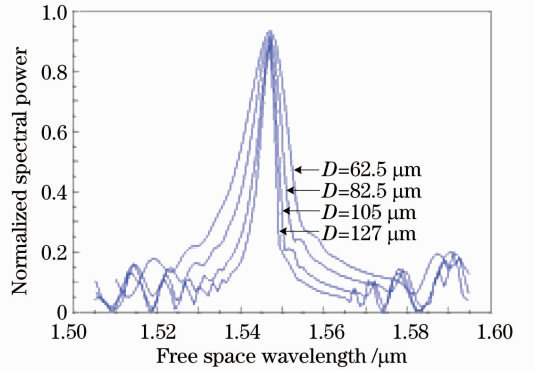


图 4 随多模光纤纤芯直径变化的传输场
Fig. 4 Transmission field with multimode fiber core diameter

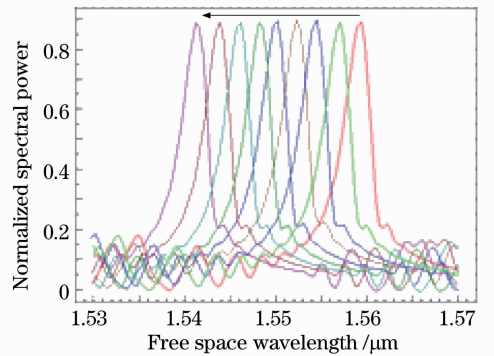


图 5 随多模光纤长度变化中心波长的漂移
Fig. 5 Drift of centre wavelength with multimode fiber length

由图 4 可知,随着多模光纤芯径的变大,响应光谱的带宽会逐渐地减小。此结构在减小插入损耗的情况下还减小了带宽。当使用宽带光源入射时,光会在毛细管所充液体内部发生多模干涉。由于 Hg 的张力大,Hg 的表面会呈现一个弧度,充入液体的端面与毛细管管壁是不垂直的。又因为毛细管内径很细,因此充入液体的端面与毛细管管壁可以近似视

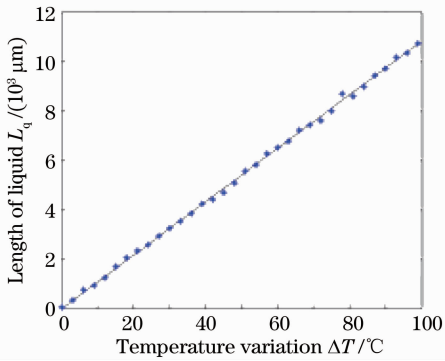


图 6 液体的长度与温度变化曲线

Fig. 6 Linear relationship between temperature and length of liquid

为垂直的,其影响对整个结构来说可以忽略不计。通过 Hg 液面的反射,可以得到能量随波长变化而变化的输出光谱。干涉腔长的长度是通过控制毛细管和其充入液体的温度来调谐的。通过 TEC 的温度调节控制干涉腔长变化量^[15]可以表示为

$$\Delta L = (\alpha_1 L_q - \alpha_c L_c) \cdot \Delta T, \quad (9)$$

式中 α_1 和 α_c 分别为溶液 A 和毛细管的热膨胀系数,由于溶液 A 的热膨胀系数 $\alpha_1 = 1.2 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 毛细管的热膨胀系数 $\alpha_c = 3.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 两者数量级相差比较大,所以 TEC 控制温度变化 ΔT 时,毛细管的膨胀相对于液体来说可以忽略不计。对文献[15]中的(9)式仿真得到液体的长度与温度变化曲线,如图 6 所示,通过此曲线可以看出溶液 A 的长度与温度的变化量呈线性关系。可以通过控制温度的变化来控制液体长度的变化,即干涉腔长的变化,进而控制波长的漂移。

4 实验分析

利用光谱分析仪(OSA)、放大自发辐射(ASE)宽谱光源和环形器等设备对这种滤波器进行了实验测试。将 ASE 与环形器的 1 端口相连,环形器的 2 端口与滤波器的输入端相连,再将环形器的 3 端口与 OSA 相连接,滤波器放置在 TEC 上,毛细管内部充入的液体的长度为 7 cm,通过控制 TEC 温度变化改变毛细管内部折射率液体的长度,如图 7 所示。

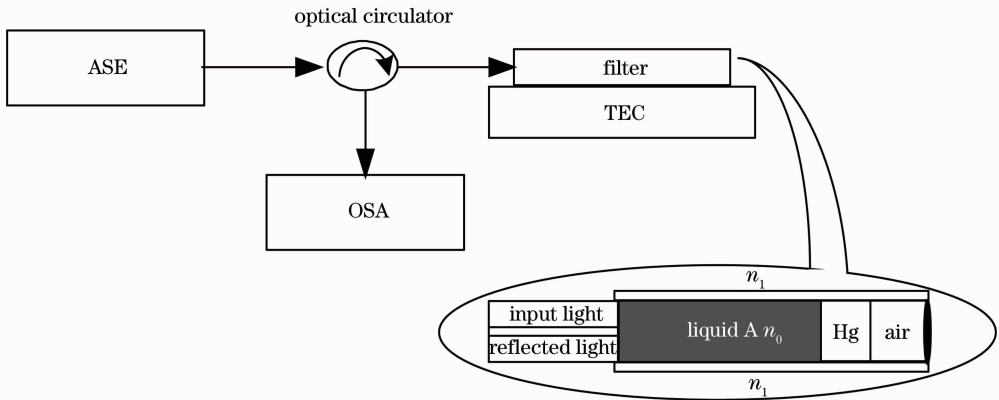


图 7 滤波器实验原理图

Fig. 7 Principle diagram of filter experiment

如图 8 所示,曲线 c_1 滤波前光源的输入光谱,曲线 c_2 为滤波后光源的输出光谱。从曲线组 c_2 可以看出随毛细管中液体长度的改变,这种新结构的输出光谱发生了漂移,即液体长度变长,输出光谱发生蓝移,滤波器的中心波长从 1559.1 nm 漂移到 1552.3 nm,滤波器的可调谐范围约为 7 nm,3 dB 对应的带阻滤波带宽约为 3.3 nm,实验结果与数值仿真结果相吻合。通过实验测得输入和输出的光功率,再由插入损耗公式计算得到此结构的插入损耗为 5.12 dB。

图 9 中的拟合曲线可更清楚地反映出滤波器的中心波长同毛细管内所冲入的液体长度之间的线性

关系。为了避免液体温度接近沸点而产生气泡,温度的可调谐范围设定为 $20 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。通过图 6 可知折射率溶液长度的变化是随温度变化而变化的,其变化率为 $108 \text{ } \mu\text{m}/^\circ\text{C}$,所以液体最大可调谐长度为 $(80 \sim 20) \text{ } ^\circ\text{C} \times 108 \text{ } \mu\text{m}/^\circ\text{C} = 6.48 \text{ mm}$,算出腔长可调谐范围为 $0 \sim 6.48 \text{ mm}$ 。

需要指出的是,该结构是通过温度控制液芯腔长变化实现对光的滤波,但温度同样能改变液芯折射率的变化。在保证被测溶液温度不变的情况下,利用阿贝折射仪^[16]测出溶液在不同温度下的折射率。经过多次测量,溶液折射率随温度变化如图 10 所示。

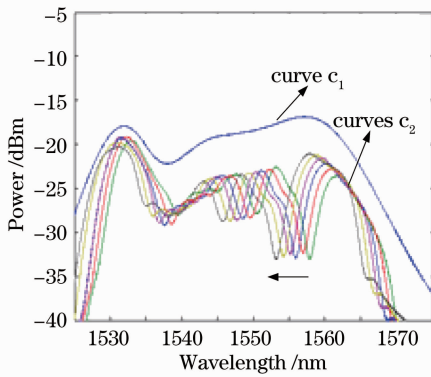


图 8 输出光谱随毛细管内液体的长度
Fig. 8 Transmission spectra changes with length of liquid

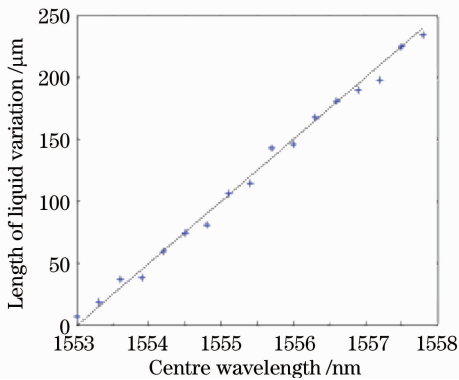


图 9 中心波长同毛细管内所充的液体长度变化量之间的线性关系
Fig. 9 Linear relationship between centre wavelength and liquid filled capillary

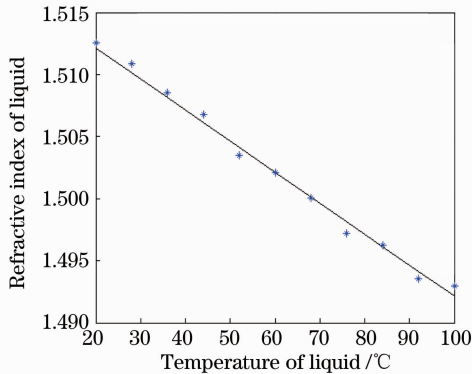


图 10 液体的折射率与温度变化曲线
Fig. 10 Linear relationship between temperature and refractive index of liquid

从图 10 可明显地看出液体折射率随温度的变化情况,温度升高,折射率随之减小。采用光束传播法分析可知,溶液折射率的变化会影响该滤波结构中心波长的漂移,随着温度的升高,液体的折射率减小,中心波长的变化率为 $-46.25 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

综上所述可得:此滤波结构输出光谱的中心波长随

温度变化率为 $-0.1512 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,该变化率是由于温度改变了液体折射率和液体长度,从而对中心波长共同作用的结果。该滤波器的温漂特性表现在不同环境下滤波器的初始腔长不同。但是当滤波器加热到相同的温度时,会滤出相同中心波长的光。

5 结 论

基于多模干涉原理,本文设计了一种液芯反射式滤波器,其重要组成部分是一段充入了液体和 Hg 的毛细管。毛细管的一端与单模光纤共轴对接,另一端用热熔胶密封。利用 Hg 的高反射率,实现一种反射式的 SMS 光纤滤波结构。通过数值仿真和实验两个方面进行分析,在数据仿真中验证了滤波结构的可行性,在实验条件下得到此种滤波结构 3 dB 带宽为 3.3 nm, 20 dB 带宽为 8 nm, 可调谐波长为 7 nm, 插入损耗为 5.12 dB, 具有线性度良好、制作成本低廉等优点。实验中发现滤波器的初始腔长容易受到外界环境温度变化的影响。

参 考 文 献

- Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Fan Linyong *et al.*. Comb-fiber based on twin-core fiber coupler[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505001
江微微, 赵瑞峰, 范林勇等. 基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0505001
- Sun Guodan, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Design and implementation of comb filter with arbitrary channel spacing based on fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0305007
孙帼丹, 王荣, 蒲涛等. 任意波长间隔的光纤光栅梳状滤波器设计与实现[J]. 中国激光, 2012, **39**(3): 0305007
- Lu Shaohua, Xu Ou, Feng Suchun *et al.*. Design and application of optical fibers based on chirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1675~1680
鲁韶华, 许鸥, 冯素春等. 基于啁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
- 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
- Lu Huaiwei, Wei Yun, Wu Kaijun *et al.*. Design of all-fiber asymmetric interleaver with 3×3 and 2×2 fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1106002
鲁怀伟, 魏赞, 邝开俊等. 基于 3×3 和 2×2 光纤耦合器的全光纤不等带宽梳状滤波器的设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1106002
- Zhang Chunguang, Wang Hao, Qiu Yishen. Selection of design theory for near infrared non-collinear acousto-optic tunable filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0916001
张春光, 王号, 邱怡申. 近红外非共线声光可调谐滤波器设计理论的选取方法[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0916001
- Pal Maak, Sandor Lenk, Laszlo Jakab *et al.*. Optimization of transducer configuration for bulk acousto-optic tunable filters[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**(1-3): 87~98

- 8 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
- 9 Peng Shijun, Liu Ya'nan, Xue Jinlai *et al.*. Design of multi-mode fiber tunable optical filter based on strain[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505004
彭石军, 刘亚南, 薛金来 等. 基于应变的多模光纤可调谐光纤滤波器设计[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0505004
- 10 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205001
孙浩, 忽满利, 乔学光 等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0205001
- 11 Waleed S. Mohammed, Peter W. E. Smith, Xijia Gu. All-fiber multimode interference bandpass filter[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2547~2549
- 12 J. E. Antonio-Lopez, A. Castillo, D. A. May-Arrijoja *et al.*. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 324~326
- 13 Tang Chunxiao, Li Enbang, Wang Changle *et al.*. Reflection-type fiber-optic biosensor based on multimode interference[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(8): 1138~1142
唐春晓, 李恩邦, 王长乐 等. 基于多模干涉的反射式光纤生物传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(8): 1138~1142
- 14 Lü Peng, Li Enbang, Wang Wei *et al.*. Numerical simulation and experimental study of all-fiber multimode-interference-based strain sensors [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2008, **21**(12): 1900~1994
吕鹏, 李恩邦, 王玮 等. 光纤多模干涉应变传感器的数值模拟及实验研究[J]. 传感技术学报, 2008, **21**(12): 1900~1994
- 15 Zhengying Li, Jianmin Gong, Bo Dong *et al.*. Compact optical path scanner and its application for decoding fiber-optic interferometers[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1284~1286
- 16 Zhang Hong, Wan Baohong. Measuring liquid refractive index with temperature changes[J]. *Physical Experiment of College*, 1998, **11**(1): 1~3
张宏, 万葆红. 测量液体折射率随温度的变化[J]. 大学物理实验, 1998, **11**(1): 1~3

栏目编辑: 王晓琪