

基于包层腐蚀的单模光纤型声光滤波器及其轴向应力特性的研究

康泽新¹ 刘超¹ 孙将¹ 马林¹ 油海东^{1,2*} 简水生¹

(¹ 北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

² 青岛农业大学理学与信息学院, 山东 青岛 266109

摘要 实验研究了基于包层腐蚀型单模光纤(SMF)声光滤波器(AOTF)在不同加载声波频率以及不同包层腐蚀深度下的滤波特性。在声光作用下, 光纤中基模(LP₀₁)与包层模(LP₁₁)的耦合效率随着包层直径的减小而增大; 同一包层直径条件下, AOTF 谐振波长随着声波频率的增加而发生“蓝移”。数值模拟了 AOTF 谐振波长随声波频率变化的趋势, 模拟结果与实验数据保持较高的一致性。实验还分析了外加轴向应力对光纤型 AOTF 滤波特性的影响。结果表明, AOTF 的谐振波长随着轴向应力的递增发生“红移”, 这样就方便地实现轴向应力调谐滤波; 调谐带宽随着包层直径的增加而下降; 加载声光频率与调谐带宽成反比。在包层直径 $d=35\ \mu\text{m}$, 声光频率 $f_a=1\ \text{MHz}$ 时, 获得了超过 150 nm 的调谐带宽。

关键词 光纤光学; 单模光纤; 声光滤波器; 包层腐蚀; 轴向应力

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1206003

Investigation on the Cladding Etched Single-Mode Fiber Acousto-Optic Tunable Filter and Its Axial Strain Characteristics

Kang Zexin¹ Liu Chao¹ Sun Jiang¹ Ma Lin¹ You Haidong^{1,2} Jian Shuisheng¹

(¹ Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

² Science and Information College, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China

Abstract The filtering properties of all-fiber acousto-optic tunable filter (AOTF) based on cladding etched single-mode fiber (SMF) are investigated experimentally. Influenced by the acousto-optic effect, the acousto-optic coupling efficiency from LP₀₁ core mode to LP₁₁ cladding mode is enhanced by reducing the cladding diameter. At a fixed cladding diameter, the resonant wavelength of the AOTF shifts to the shorter wavelength side as the acoustic frequency increases. Moreover, the change of resonant wavelength with the acoustic frequency is numerically calculated and the simulation curves are in good agreement with the experimental results. The axial strain characteristics of all-fiber AOTF based on cladding etched SMF are analyzed experimentally. The results show that the resonant wavelength appears red shift as the increasing of axial strain, so it's easy to achieve the tunable filter using the axial strain dependence. The tuning bandwidth is inverse to the acousto frequency and the cladding diameter. When the cladding diameter is kept at 35 μm and the acousto frequency is fixed at 1 MHz, an AOTF with tuning bandwidth greater than 150 nm is demonstrated.

Key words fiber optics; single-mode fiber; acousto-optic tunable filter; cladding etched; axial strain

OCIS codes 230.1040; 060.2430; 230.7408

收稿日期: 2013-06-14; 收到修改稿日期: 2013-07-26

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328206)、北京交通大学基本科研项目(2012YJS010)

作者简介: 康泽新(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤型声光滤波器及半导体环形激光器等方面的研究。

E-mail: newism@hotmail.com

导师简介: 简水生(1929—), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤传感及全光网络等方面的研究。

E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: stuyon@126.com

1 引 言

近年来,随着光波分复用/解复用器^[1-2]、光交叉连接设备^[3-4]、可调谐光源^[5-6]等光通信模块对光滤波器的滤波特性要求越来越高,因此更丰富的滤波特性和更便捷的动态调谐已经成为光滤波器新的发展趋势。众所周知,通过引入特定的折射率调制形式,光纤光栅可以获得丰富的滤波特性^[7-9]。但是,现有光纤光栅调谐速度慢加之难以实现动态调谐,应用受到一定的局限性。而光纤声光滤波器(AOTF)是通过在光纤中加载声波引入折射率的周期调制,因此很容易通过调节声波参数来实现快速动态调谐^[10-12]。基于普通单模光纤(SMF)的可调谐 AOTF 由于具有制作工艺简单、成本低、插入损耗小(小于 0.1 dB)、调谐范围宽(大于 100 nm)以及响应速度快(小于 100 μs)等优点,引起了国内外研究者极大的兴趣。在加载声波的作用下,光纤纵向产生周期性的形变,这种形变将使折射率产生周期性的调制。这样在特定波长处单模光纤中传播的基模 LP_{01} 就会耦合到包层模式中并被光纤涂敷层吸收,形成一定的带阻滤波特性。

全光纤 AOTF 对温度及应力的高灵敏特性使得其在光纤传感领域中占有举足轻重的地位。环境温度的波动以及轴向应力的改变都会对全光纤 AOTF 的滤波特性造成一定的影响。2000 年,Diez 等^[13]对基于熔融拉锥的光纤 AOTF 的应力特性进行了定量分析, Lee 等^[14]在 2009 年报道了轴向应力对单模光纤型滤波器的滤波特性的影响。但是针对基于包层腐蚀的全光纤型滤波器的应力特性研究,至今没有任何报道。本文研究了基于包层腐蚀型光纤 AOTF 在不同加载声波频率以及不同包层腐蚀

深度下的滤波特性的变化情况,比如光纤中基模 LP_{01} 与高阶模 LP_{11} 的耦合效率与包层腐蚀深度的对应关系以及滤波器谐振波长随着声波频率的变化情况。随后在不同包层腐蚀深度及不同的声光频率下,具体测量了光纤 AOTF 的滤波特性随着加载轴向应力的变化情况。随着轴向应力的增加,谐振波长会发生相应“红移”,这样可以方便地实现轴向应力调谐滤波。另外,还分析了调谐带宽与包层直径以及加载声光频率之间的关系。

2 实验装置与滤波原理

基于包层腐蚀的 SMF 型 AOTF 的实验装置如图 1 所示。实验所用的光源为宽带光源(superk™ white light laser, NKT Photonics),其有效带宽为 1200 nm。所用光纤为普通 SMF(Corning SMF-28),光纤经过氢氟酸腐蚀,腐蚀长度即声光作用区长度约为 8 cm;基模和包层模之间的能量耦合效率随着长度的增加呈周期性变化,一般在 8~10 cm 之间能量耦合强度达到最大。所以这里取腐蚀长度为 8 cm。通过控制腐蚀时间,光纤包层分别腐蚀至 35 μm 和 71 μm 。信号源(33120A, Agilent)发出的正弦信号,通过电压放大器(2350, TEGAM)放大后驱动压电陶瓷片(PZT)在与光纤轴向垂直的方向周期振动,通过玻璃圆锥将声波耦合至光纤里。这里玻璃圆锥通过黏结胶与裸纤成点状粘结;另外玻璃圆锥与光纤都为石英成分,因此通过玻璃圆锥施力的稳定性与可靠性比较高,重复性也比较强。AOTF 的输出耦合进入光谱仪(OSA, AQ6375, Yokogawa)进行进一步的光谱观察与数据处理。

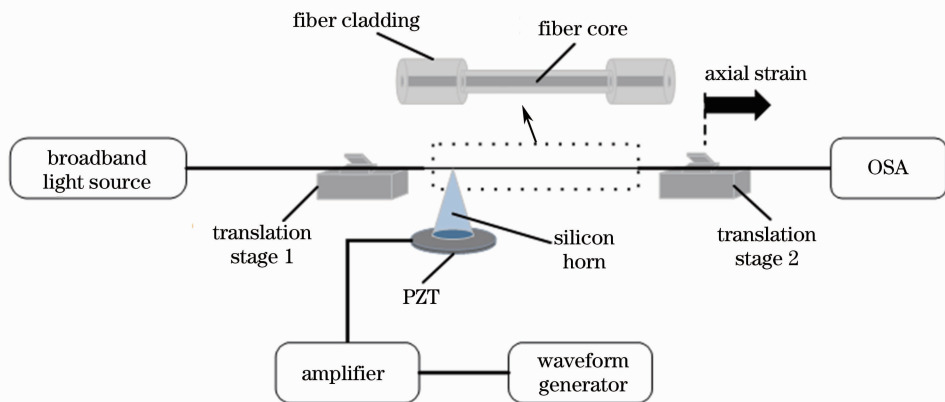


图 1 基于包层腐蚀的 SMF 型 AOTF 的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration for the experimental setup of all-fiber AOTF based on cladding etched SMF

如图 1 所示, PZT 产生声波通过玻璃圆锥加载到光纤上, 使得光纤沿着轴向产生微小周期性形变, 这样相当于光纤纤芯折射率产生了周期性调制, 这就是所谓的声光效应。当加载一定声波信号时, 在光纤横向引入的角向非均匀折射率变化为^[15]

$$\Delta n(r, \theta) = n_0(1 + \chi)k_s^2 r \cos \theta, \quad (1)$$

式中 n_0 是光纤本底折射率, χ 为弹光系数(石英材料 $\chi = -0.22$), k_s 为加载声波的传播常数, 这种角向不均匀分布直接影响声光耦合系数

$$\kappa_0 = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 \int_A \psi_1(r, \theta) \Delta n(r, \theta) \psi_2(r, \theta) d\theta dr, \quad (2)$$

式中 $\psi_1(r, \theta)$ 和 $\psi_2(r, \theta)$ 分别是纤芯模及高阶包层模的场分布。当谐振波长 λ_R 与声光频率 f_a 满足如下相位匹配条件时, 相应波长处纤芯基模 LP_{01} 便会耦合到包层模式中并被光纤涂敷层吸收, 这样光纤传输透射谱在特定谐振波长 λ_R 处形成明显的下陷峰, 形成一定的带阻滤波特性:

$$\lambda_R = (n_{co} - n_{cl}) \sqrt{\frac{\pi c_{ext} d}{2 f_a}}, \quad (3)$$

式中 n_{co} 和 n_{cl} 分别是光纤纤芯和包层的有效折射

率, d 是光纤腐蚀后的包层直径, c_{ext} 是声波在光纤内的传播速度, 为 5760 m/s。

3 声光滤波器本身特性分析

下面首先研究基于包层腐蚀型光纤 AOTF 在不同加载声波频率以及不同包层腐蚀深度下的滤波特性。实验装置如图 1 所示, 这里保持光纤夹具稳定, 即使光纤不承载轴向应力。另外, 实验过程中始终维持 PZT 输入信号振幅电压为 20 V。图 2 为当光纤包层直径分别腐蚀至 35 μm [图 2(a)]和 71 μm [图 2(b)]时, 基于包层腐蚀的 SMF 型 AOTF 在不同声波频率下的滤波光谱。从图中可以看出, 光纤包层直径为 35 μm 的 SMF 型 AOTF 的下陷峰值保持在 -12 dB 附近; 而光纤包层直径为 71 μm 的 AOTF 的峰值约为 -9 dB。这就意味着, 当声波的振幅保持不变时, 随着光纤包层的直径不断减小, 光纤中的基模 LP_{01} 与高阶模 LP_{11} 的耦合效率越来越高。这是由于包层直径越小, 基模与包层模之间的重叠相互作用越强; 另外加载声波有效振幅也随着包层直径的减小而增大。

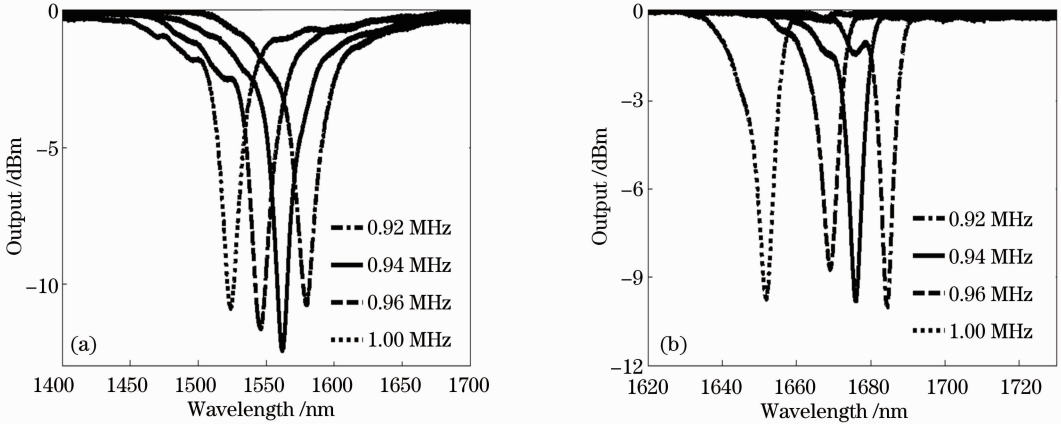


图 2 当 PZT 输入信号的振幅电压为 20 V、光纤包层直径不同时, AOTF 的传输光谱在不同声光频率下的实验结果。

(a) $d=35 \mu\text{m}$; (b) $d=71 \mu\text{m}$

Fig. 2 Experimental transmission spectra of all-fiber AOTF based on cladding etched SMF for different fiber diameters d and acoustic frequencies f_a when the voltage amplitude of PZT input signal is 20 V. (a) $d=35 \mu\text{m}$; (b) $d=71 \mu\text{m}$

不同的光纤包层直径导致同一声波频率下的谐振波长也不尽相同, 具体趋势如图 3 所示。图 3 为当光纤包层直径 d 分别腐蚀至 35 μm 和 71 μm 时, 声波频率与滤波器谐振波长的对应关系, 其中“ Δ ”和“ ∇ ”为实验数据点。实线和虚线数据是由(3)式计算所得, 可以看出, 模拟结果与实验数据保持有较高的一致性。基模 LP_{01} 耦合至高阶模 LP_{11} 的下陷峰, 随着声波频率逐渐增大, 与之对应的谐振波长在

逐渐减小, 可认为下陷峰发生蓝移。另外, 相比而言, $d=35 \mu\text{m}$ 时, 谐振波长的“蓝移”较之 $d=71 \mu\text{m}$ 的情况明显要剧烈一些, 即腐蚀深度越深, 也就是包层直径越小, 其斜率效率越高。这些现象说明包层直径越小, 利用声光频率调谐的谐振波长范围越大, 图 2(a) 和 (b) 的对比度变化也正是由这一原因引起的。

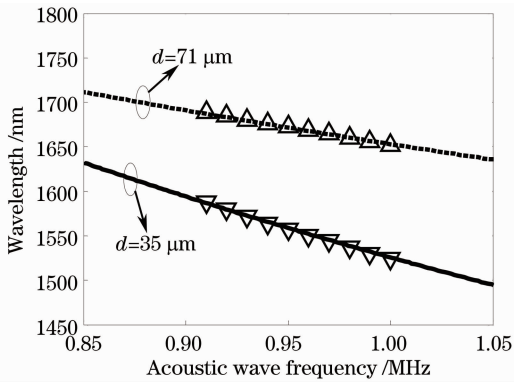


图 3 光纤包层直径分别为 35 μm 和 71 μm 时,滤波器谐振波长随着声波频率的变化趋势

Fig. 3 Optical resonant wavelength of all-fiber AOTF based on cladding etched SMF as a function of the acoustic frequency for fiber diameter $d = 35 \mu\text{m}$ and $d = 71 \mu\text{m}$

4 声光滤波器加载轴向应力特性分析

包层腐蚀型 SMF 型 AOTF 的滤波特性极大依赖于光纤轴向所加载的应力,这也是其作为轴向应力调谐滤波器或衰减器的本质所在。加载轴向应力

可以极大地拓宽包层腐蚀型 SMF 型 AOTF 的调谐带宽。实验装置如图 1 所示,包层腐蚀型 SMF 固定在两夹具之间,而夹具 2 可以在光纤轴向进行精确电动位移,这样可以使轴向应力有效精确地加载耦合到光纤声光作用区。另外,应力的大小用光纤腐蚀长度的相对单位变化量来表示。一般来说,大部分材料在其应力承受极限内,可形变量是十分微小的,以致其应力值都特别小,所以为了工程上的应用方便,常用 $N \times 10^{-6}$ 来表示其值,一般用 $N \mu\epsilon$ 来标示微应力值。综上所述,这里应力计算采用 $F = \frac{\Delta L}{L} \times 10^6 \mu\epsilon$,这里 F 代表轴向应力, $\mu\epsilon$ 表示微应变的单位符号, ΔL 表示光纤夹具 2 的位移值, L 为包层腐蚀光纤的声光作用区长度。

图 4 为在不同的包层直径及声光频率条件下,实验测得的 AOTF 的谐振波长随着轴向应力的变化情况。实验结果表明,随着加载轴向应力的增加,AOTF 的谐振波长相应地往长波长方向移动。其中,图 4(a)和(b)是在固定包层直径 $d = 71 \mu\text{m}$ 的情况下,研究不同声光频率 f_a 对 AOTF 滤波特性的影响。而图 4(b)和(c)是在同一声光频率 $f_a = 1.0 \text{ MHz}$

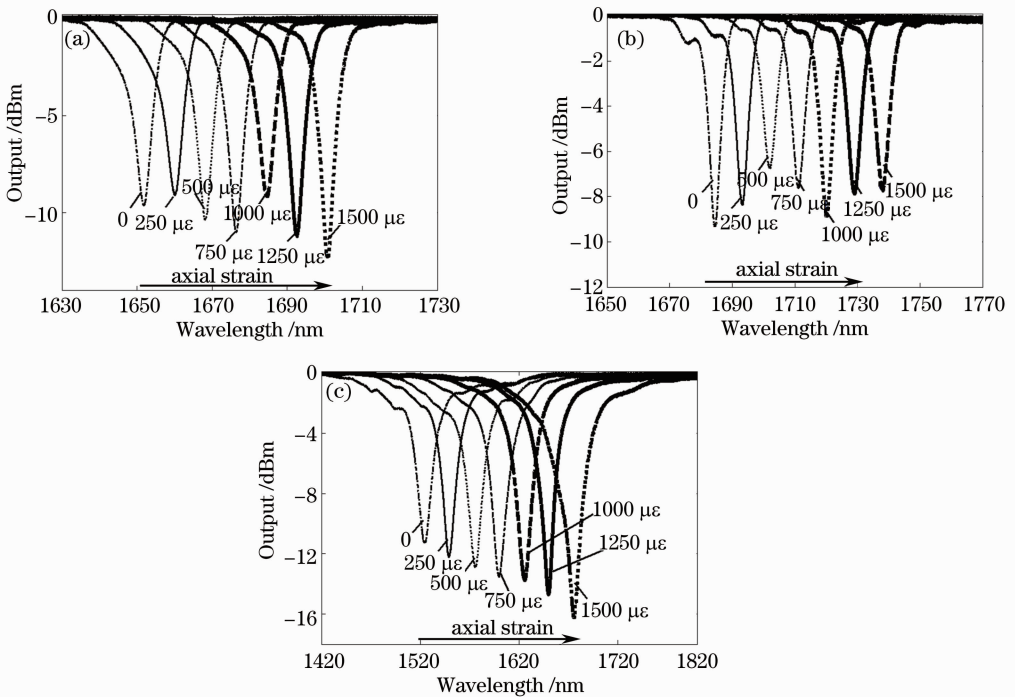


图 4 在不同的包层直径 d 以及不同的声光频率 f_a 作用下,基于包层腐蚀型 SMF 型 AOTF 的滤波特性随着轴向应力的变化情况。(a) $d = 71 \mu\text{m}$, $f_a = 1.0 \text{ MHz}$; (b) $d = 71 \mu\text{m}$, $f_a = 0.92 \text{ MHz}$; (c) $d = 35 \mu\text{m}$, $f_a = 1.0 \text{ MHz}$

Fig. 4 Experimental transmission spectra of all-fiber AOTF based on cladding etched SMF for various strain with different fiber diameters d and acoustic frequencies f_a . (a) $d = 71 \mu\text{m}$, $f_a = 1.0 \text{ MHz}$; (b) $d = 71 \mu\text{m}$, $f_a = 0.92 \text{ MHz}$; (c) $d = 35 \mu\text{m}$, $f_a = 1.0 \text{ MHz}$

下,对比不同的包层直径 d 对 AOTF 滤波特性的影响程度。对比图 2 与图 4 可以发现,通过加载轴向应力,可以极大拓宽包层腐蚀型 SMF 型 AOTF 的调谐带宽。当 $d=35\ \mu\text{m}$, $f_a=1.0\ \text{MHz}$ 时,调节轴向应力至 $1500\ \mu\epsilon$, 滤波器谐振波长范围为 $1530\sim 1680\ \text{nm}$, 实现近 $150\ \text{nm}$ 的调谐带宽。

通过对比图 4(a) 和 (b), 发现在相同的轴向应力条件下, 谐振波长的位移量随着加载声光频率的

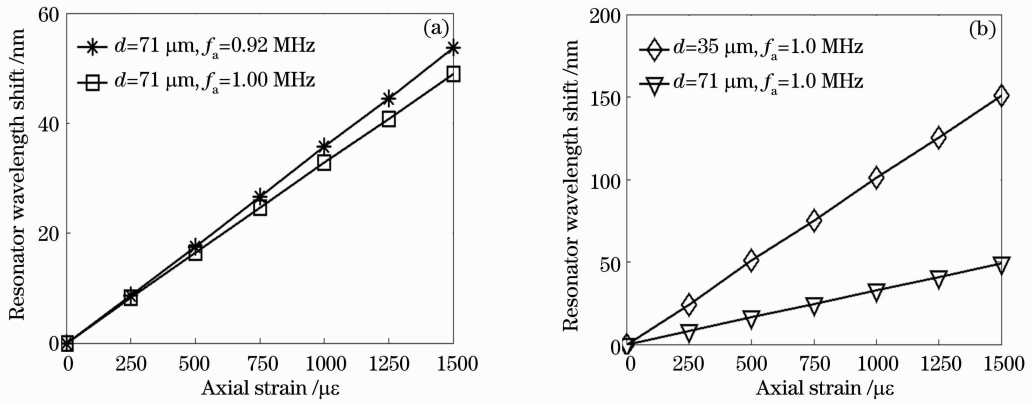


图 5 不同参数条件下, AOTF 的谐振波长与轴向应力的关系曲线图。(a) $d=71\ \mu\text{m}$, $f_a=1.0\ \text{MHz}$ 和 $f_a=0.92\ \text{MHz}$ 之间的对比结果; (b) $f_a=1.0\ \text{MHz}$, $d=71\ \mu\text{m}$ 和 $d=35\ \mu\text{m}$ 之间的对比结果

Fig. 5 Optical resonator wavelength shift of all-fiber AOTF based on cladding etched SMF as a function of the axial strain under the condition of different parameters. (a) $d=71\ \mu\text{m}$, comparison between $f_a=1.0\ \text{MHz}$ and $f_a=0.92\ \text{MHz}$; (b) $f_a=1.0\ \text{MHz}$, comparison between $d=71\ \mu\text{m}$ and $d=35\ \mu\text{m}$

正如图 5(b) 所示, 在轴向应力一定的情况下, 谐振波长的位移量随着包层直径的减小而增加。另外, 谐振波长的位移量与加载的应力成正比。当 $d=35\ \mu\text{m}$ 时, 斜率大概是 $0.1\ \text{nm}/\mu\epsilon$; 而当 $d=71\ \mu\text{m}$ 时, 斜率则降低至 $0.033\ \text{nm}/\mu\epsilon$ 。从图 4(c) 和图 5(b) 中很容易看出, 在 $d=35\ \mu\text{m}$, $f_a=1\ \text{MHz}$ 的条件下, 通过调谐轴向应力, 获得了超过 $150\ \text{nm}$ 的调谐带宽。通过对比图 4(a) 和 (c), 可以看到包层直径 $d=35\ \mu\text{m}$ 时 AOTF 的 3 dB 带宽明显比包层直径 $d=71\ \mu\text{m}$ 的 3 dB 带宽要宽许多。这是由于随着包层直径的减小, 声光作用区长度及声光作用强度的增加导致的^[16]。而且相比而言, $d=35\ \mu\text{m}$ 时, 谐振波长的“红移”较之 $d=71\ \mu\text{m}$ 的情况明显要剧烈一些。即包层腐蚀直径越小, 利用轴向应力调谐的带宽越高。图 4(a) 和 (c) 的对比度变化也正是由这一原因导致的。

综上所述, 包层腐蚀直径不仅影响包层腐蚀型光纤 AOTF 的下陷峰的 3 dB 带宽及下陷峰的幅值, 而且也决定了其调谐带宽的大小。所以在该器件的现场应用时, 应根据实际需要来折中选择包层腐蚀直径。

增加而减小。而更直观的结果描绘在图 5(a) 中, 图 5(a) 和 (b) 分别给出在不同的参数条件下, AOTF 的谐振波长漂移量与加载轴向应力的关系曲线。从图 5(a) 中很容易发现, 谐振波长的漂移量与加载应力成正比。当 $f_a=1.0\ \text{MHz}$ 时, 斜率大约是 $0.033\ \text{nm}/\mu\epsilon$; 而当 $f_a=0.92\ \text{MHz}$ 时, 斜率相对要大一些, 估计在 $0.036\ \text{nm}/\mu\epsilon$ 。

5 结 论

本文对基于包层腐蚀型 SMF 型 AOTF 在不同加载声波频率以及不同包层直径下的滤波特性进行了实验研究。结果表明, 基模与包层模的耦合效率随着包层直径的减小而增强; 同一包层直径条件下, 滤波器谐振波长随着声波频率的增大而发生“蓝移”, 而且“蓝移”趋势与理论分析结果相一致。实验还研究了外加轴向应力对光纤 AOTF 滤波特性的影响。随着轴向应力的递增, 谐振波长相应地发生“红移”, 这样就可方便地实现轴向应力调谐滤波。结果发现调谐带宽随着包层直径的增加而下降; 加载声光频率与调谐带宽成反比。另外由于声光作用强度及长度的不同, 小包层直径的 3 dB 滤波带宽要比大包层直径的 3 dB 滤波带宽大许多。在包层直径 $d=35\ \mu\text{m}$, 声光频率 $f_a=1.0\ \text{MHz}$ 时, 获得了超过 $150\ \text{nm}$ 的调谐带宽。这些结果验证了包层腐蚀型 SMF 作为光学可变衰减器或光调谐带阻滤波器的可行性。

参 考 文 献

1 E Jahn, N Agrawal, H J Ehrke, *et al.*. Monolithically integrated

- asymmetric Mach-Zehnder interferometer as a 20 Gbit/s all-optical add/drop multiplexer for OTDM systems [J]. *Electron Lett*, 1996, 32(3): 216–217.
- 2 Zou Shumin, Shao Yufeng, Zheng Xi, *et al.*. Study on generation of all-optical orthogonal frequency division multiplexing signals based multi-tones modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0706004.
邹书敏, 邵宇丰, 郑曦, 等. 基于多带调制产生全光正交频分复用信号的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0706004.
- 3 R Jensen, A Lord, N Parsons. Highly scalable OXC-based contentionless ROADM architecture with reduced network implementation costs [C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference, IEEE*, 2012. 1–3.
- 4 Li Wei, Liu Deming, Yang Chunyong, *et al.*. Design and implementation of a novel low cost intelligent optical wavelength cross converter connect [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(3): 351–355.
李蔚, 刘德明, 杨春勇, 等. 一种低成本智能全光波长交叉交换连接器的设计和实现[J]. *中国激光*, 2006, 33(3): 351–355.
- 5 Bai Yangbo, Xiang Wanghuo, Zu Peng, *et al.*. Tunable two wavelengths linear-cavity Yb-doped fiber laser based on volume grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1102004.
白扬博, 向望华, 祖鹏, 等. 基于体光栅的可调谐线型腔双波长掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1102004.
- 6 K Takabayashi, K Takada, N Hashimoto, *et al.*. Widely (132 nm) wavelength tunable laser using a semiconductor optical amplifier and an acousto-optic tunable filter [J]. *Electron Lett*, 2004, 40(19): 1187–1188.
- 7 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun, *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 89–91.
张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(1): 89–91.
- 8 Wang Muguang, Wei Huai, Tong Zhi, *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 867–869.
王目光, 魏淮, 童治, 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. *光学学报*, 2002, 22(7): 867–869.
- 9 Ou Xu, Shaohua Lu, Yan Liu, *et al.*. Analysis of spectral characteristics for reflective tilted fiber gratings of uniform periods [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(15): 3990–3995.
- 10 Wending Zhang, Ligang Huang, Feng Gao, *et al.*. Tunable add/drop channel coupler based on an acousto-optic tunable filter and a tapered fiber [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(7): 1241–1243.
- 11 M G Xu, H Geiger, J L Archambault, *et al.*. Novel interrogating system for fibre Bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter [J]. *Electron Lett*, 1993, 29(17): 1510–1511.
- 12 T E Dimmick, G Kakarantzas, T A Birks, *et al.*. Narrow-band acousto-optic tunable filter fabricated from highly uniform tapered optical fiber [C]. *Optical Fiber Communication Conference, IEEE*, 2000, 4: 25–27.
- 13 A Diez, G Kakarantzas, T A Birks, *et al.*. High strain-induced wavelength tunability in tapered fibre acousto-optic filters [J]. *Electron Lett*, 2000, 36(14): 1187–1188.
- 14 K J Lee, I K Hwang, H C Park, *et al.*. Axial strain dependence of all-fiber acousto-optic tunable filters [J]. *Opt Express*, 2009, 17(4): 2348–2357.
- 15 T A Birks, P St J Russell, D O Culverhouse. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers [J]. *J Lightwave Technol*, 1996, 14(11): 2519–2529.
- 16 T Jin, Q Li, J Zhao, *et al.*. Ultra-broad-band AOTF based on cladding etched single-mode fiber [J]. *Photon Technol Lett*, 2002, 14(8): 1133–1135.

栏目编辑: 王晓球