

# 基于温度变化的涂覆型熔锥光纤传输特性

傅海威<sup>1</sup> 许士超<sup>1</sup> 乔学光<sup>1,2</sup> 刘颖刚<sup>1</sup> 周 红<sup>1</sup> 雒明世<sup>3</sup> 邱淑伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065  
<sup>2</sup>西北大学物理学系, 陕西 西安 710069  
<sup>3</sup>西安石油大学计算机学院, 陕西 西安 710065

**摘要** 基于光在熔锥光纤中传输的基本原理,分析了在外界温度不断变化的情况下涂覆折射率匹配液的熔锥光纤传输损耗特性。利用计算机仿真与实验得到了这种器件的传输损耗特性曲线,计算机仿真结果和实验结果的一致性很好地说明了熔锥光纤传输特性随温度变化的关系。随着外界环境温度的升高,折射率匹配液的折射率降低,熔锥光纤所携带的光功率占总光功率的比值增加,导致传输损耗减小。同时利用这种传输特性得到了一种温度可调的短通滤波器器件,在一定温度下,这种滤波器对长波的滤波大于 35 dB,其滤波截止波长随温度升高而向长波方向漂移,温度系数是 40 nm/°C。

**关键词** 光纤光学;熔锥光纤;温度;传输特性

**中图分类号** TN253;TN214 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0305001

## Coated and Tapered Fiber Transmission Characteristics Based on Temperature Variation

Fu Haiwei<sup>1</sup> Xu Shichao<sup>1</sup> Qiao Xueguang<sup>1,2</sup> Liu Yinggang<sup>1</sup>

Zhou Hong<sup>1</sup> Luo Mingshi<sup>3</sup> Qiu Shuwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Photoelectric Gas & Oil Logging and Detecting of Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China  
<sup>2</sup>Department of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China  
<sup>3</sup>School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

**Abstract** Based on the basic principles of tapered optic fiber transmission, this paper primarily analyzes the transmission characteristics of fused tapered optic fiber which is coated with refractive index-matching fluid versus the index-matching liquids' temperature variations. The transmission loss curves of computer simulation and experiment are very close in tendency. The results show the relationship between the transmission characteristics of tapered optic fiber and the temperature changes. With the temperature increment of outside ambient, the refractive index of index-matching liquids declines. Based on this, the ratio of the optical power carried by the tapered fiber to the total optical power increases. As a result, transmission loss is reduced. Based on the transmission characteristics of this optical device, a temperature-controlled short-pass filter is proposed, the cut-off wavelength of this filter becomes longer with the temperature increased. The rejection efficiency can be above 35 dB and the temperature coefficient of this filter is 40 nm/°C.

**Key words** fiber optics; tapered optic fiber; temperature; transmission characteristics

**OCIS codes** 060.2370; 220.4241; 230.7408

## 1 引 言

熔锥型光纤器件以其制造方法简便、成本低、稳

定性好等特点,在近几年已经发展成为一种重要的光纤器件。熔融拉锥光纤是把剥除涂覆层的裸单模

**收稿日期**: 2011-10-17; **收到修改稿日期**: 2011-11-25

**基金项目**: 国家自然科学基金(60727004)、国家 863 计划(2009AA06Z203)、教育部重大科技项目(708087)、陕西省“11315”科技项目(2009ZDKG-42)和陕西省自然科学基金(2011JM8028)资助课题。

**作者简介**: 傅海威(1966—),男,博士,教授,主要从事光纤传感理论与技术等方面的研究。E-mail: hwf@xssy. edu. cn

光纤经过高温加热处理,然后将包层和纤芯同时拉细,通过对光纤的拉锥可以改变光纤的直径,从而影响光在光纤中传播的形式,实现耦合器、波分复用器和传感器等光纤器件的制作<sup>[1~5]</sup>。

近年来,将熔锥光纤器件应用于光传感领域逐渐成为研究热点,国内外的一些学者和研究机构进行了相应的研究。利用一定的外部环境,根据拉锥光纤的表面倏逝场强烈的相互作用制成了多种传感器,如液体折射率传感器<sup>[3]</sup>、压力传感器<sup>[4]</sup>、温度传感器<sup>[5,6]</sup>。在已报道的熔锥光纤温度传感器中<sup>[5,6]</sup>,主要是利用熔锥光纤器件产生干涉条纹,实现温度传感。本文对涂覆折射率匹配液(IML)的熔锥光纤的温度传输特性进行研究,根据光在熔锥光纤中传输的原理和匹配液的折射率与温度之间的关系,得到熔锥光纤的温度传输特性模型,并与实验结果达到很好的匹配。根据涂覆折射率匹配液的熔锥光纤的温度传输特性,得到了一种可调短通滤波器。

## 2 熔锥光纤温度传输特性的理论研究

在单模光纤中,纤芯的折射率稍高于包层折射率,利用全反射原理,光被限制在纤芯中沿着光纤向前传输。涂覆层用来保护光纤免受环境污染和机械损伤,一般由聚合物材料构成,对里面的光学传输性质没有影响。熔锥光纤的基本制作方法是在热源的加热下,对单根去掉涂覆层的标准单模光纤的部分区域进行加热,待光纤在熔融状态下时,通过对加热区域两端的光纤进行拉伸,得到所需要的锥形光纤。这种熔锥光纤的典型结构如图1所示,主要分为三个部分,分别为标准单模光纤部分(即未拉伸部分),锥形过渡区域部分( $\tau$ )和锥腰部分( $L$ ),其中锥腰直径用 $\rho$ 表示。

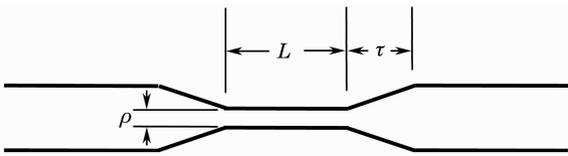


图1 熔锥光纤的典型结构图

Fig. 1 A typical structure of tapered fiber

光纤拉锥的过程中,光束在一个直径变化的光纤锥体结构中传播。随着拉锥的进行,纤芯导模的模场半径逐渐从小变大。当纤芯拉细到一定程度时,纤芯已不能约束导模的传输,光束开始进入原光纤的包层传输,形成包层中的传导模和辐射模。在锥腰部分,由于锥腰直径在微纳尺度,此时锥腰部分

的纤芯直径已经可忽略不计,进入到锥腰部分的传导模成为锥腰部分的主要能量。这部分能量随着模场半径的进一步增大,以倏逝场的形式在外界环境中传播,外界环境可以是空气,也可以是其他折射率较原光纤包层折射率低的媒质。光纤纤芯、包层与匹配液之间的的折射率关系如图2所示。

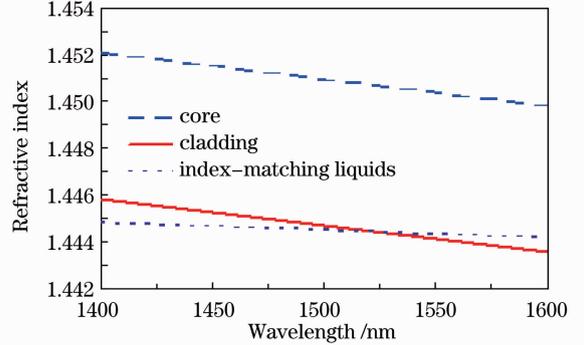


图2 光纤纤芯、包层和匹配液的折射率图

Fig. 2 Refractive index of fiber core, fiber cladding and index-matching liquids

对于熔锥光纤理论模型,一些文献已经报道过<sup>[7,8]</sup>,然而,由于熔锥光纤器件参数的高度敏感性,这些理论一般用于分析熔锥光纤的基本特性。本文利用熊贻坤等<sup>[9]</sup>建立的芯层所携带的光功率与总光功率关系的模型,简单分析了涂覆折射率匹配液的熔锥光纤的传输特性与外部环境温度变化之间的关系。建立模型如下:原来熔锥光纤的芯层和包层等效成模型的新芯层,而把折射率匹配液作为模型的新包层。新芯层的折射率可以由原熔锥光纤的有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 来表示,而新包层的折射率即为匹配液的折射率 $n_0$ 。以 $LP_{01}$ 模为例说明当新包层折射率 $n_0$ 变化时涂覆折射率匹配液的熔锥光纤的传输特性,新芯层所携带的光功率占总功率的比值为<sup>[10]</sup>

$$\frac{P_c}{P_t} \approx 1 - \exp\left[-2\left(\frac{b}{s_0}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 $P_c$ 表示新芯层携带的光功率, $P_t$ 表示总的光功率, $b$ 表示新芯层半径, $s_0$ 表示新模场半径。对于阶跃折射率光纤,模场半径与芯层半径存在如下关系<sup>[11]</sup>:

$$s_0^2 = \frac{2b^2}{\ln(2\Delta k_0^2 n_{\text{eff}}^2 b^2)}, \quad (2)$$

式中 $\Delta = \frac{n_{\text{eff}} - n_0}{n_{\text{eff}}}$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。

根据(1)式和(2)式可得

$$\frac{P_c}{P_t} \approx 1 - \frac{1}{C_1 - C_2 n_0}, \quad (3)$$

式中 $C_1 = 2k_0^2 n_{\text{eff}}^2 b^2$ ,  $C_2 = 2k_0^2 n_{\text{eff}} b^2$ 。

(3)式表示新纤芯携带的光功率占总功率的比值随匹配液折射率  $n_0$  改变而发生变化,随着匹配液折射率  $n_0$  的减小,芯层所携带的光功率占总功率的比值是增大的,而匹配液折射率与外界环境温度之间是反比关系,所以,随着匹配液温度的升高,匹配液折射率  $n_0$  变小,熔锥光纤传输的损耗减小。

### 3 实验结果与计算机仿真结果分析

实验使用美国 Cargille 公司的折射率匹配液,型号为 1806X,匹配液成分包括硅酮、脂肪烃和脂环烃。匹配液在 25 °C 的折射率  $n=1.4560\pm 0.0002$ ,温度系数为  $dn/dT=-3.89\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ,可以计算出在 0 °C 时  $n=1.4463\pm 0.0002$ 。所以得到匹配液折射率  $n_0$  与温度  $T$  的关系为

$$n_0 = 1.4463 - 3.89 \times 10^{-4} T. \quad (4)$$

使用丁烷喷灯对标准单模光纤 SMF-28 进行拉锥,通过显微镜控制熔锥光纤的参数,为了增加实验的对比性,在保持熔锥光纤的锥形过渡区和锥腰长度一致的前提下,制作了两个不同锥腰直径的熔锥光纤,其中  $\tau=10\text{ mm}$ ,  $L=20\text{ mm}$ ,  $\rho_1=10\text{ }\mu\text{m}$ ,  $\rho_2=20\text{ }\mu\text{m}$ 。然后把这两个熔锥光纤放置在装有折射率匹配液的 V 型槽中,V 型槽的材料是有机玻璃,宽度和深度为 2 mm,长度为 50 mm。最后将它们放在温箱中,采用波长为 1550 nm,功率为 0 dBm 的激光光源,得到熔锥光纤的传输损耗随折射率匹配液温度变化的实验结果,如图 3 所示。

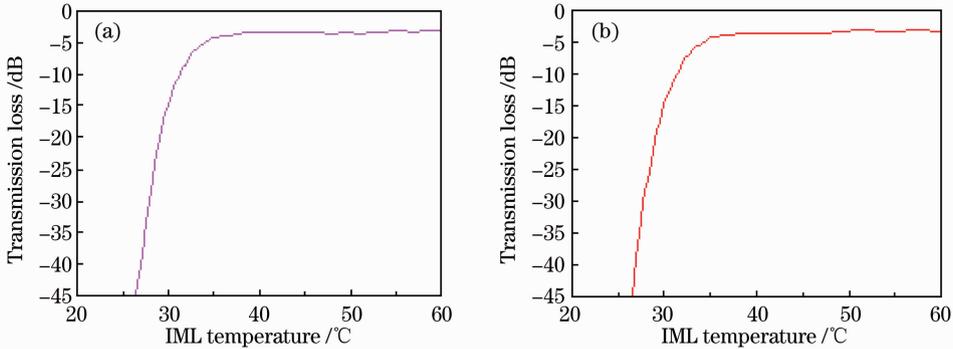


图 3 熔锥光纤传输损耗随折射率匹配液温度变化的实验结果。(a)  $\rho_1=10\text{ }\mu\text{m}$ ; (b)  $\rho_2=20\text{ }\mu\text{m}$

Fig. 3 Experimental results of the tapered fiber transmission loss versus the IML temperature.

(a)  $\rho_1=10\text{ }\mu\text{m}$ ; (b)  $\rho_2=20\text{ }\mu\text{m}$

根据实验结果, $\rho_1=10\text{ }\mu\text{m}$ , $\rho_2=20\text{ }\mu\text{m}$ 时,得到的关系曲线基本一致,因此在研究这种熔锥光纤的传输损耗时可忽略熔锥光纤直径的影响。在这两种情况下,随着外界环境温度的升高,传输损耗先是剧烈地减小,最后趋于稳定。

在计算机仿真中,把匹配液折射率  $n_0$  与温度  $T$  之间的关系式(4)式代入(3)式,就可以得到涂覆折射率匹配液的熔锥光纤传输损耗与温度之间的关系。根据实验结果,在仿真中忽略纤芯的直径对传输特性的影响,即取  $\lambda=b=1.55\text{ }\mu\text{m}$ 。然后根据图 2 取  $n_{\text{eff}}=1.445$ ,利用 Matlab 得到函数的仿真曲线,如图 4 中实线所示。

图 4 中的实线表示仿真曲线,虚线表示  $\rho_1=10\text{ }\mu\text{m}$  的实验曲线,通过对比可知,理论的趋势线和实验结果达到较好的匹配,即随着外界温度的升高,涂覆折射率匹配液的熔锥光纤传输损耗降低。在温度较低处,传输损耗随温度升高而迅速减少,这是因为在该温度附近折射率匹配液作为新的包层对光在

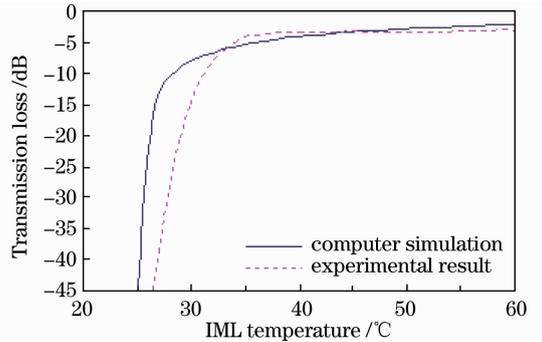


图 4 熔锥光纤传输损耗随折射率匹配液温度变化的计算机仿真结果和实验结果对比

Fig. 4 Comparison of simulation result with experimental result of the tapered fiber transmission loss versus the IML temperature

光纤中的传输有显著的影响。低于这一温度,由于匹配液折射率升高,熔锥光纤色散较强,大部分光发散到折射率匹配液中;而高于这个温度,匹配液折射率降低,从而保证大部分光在纤芯中传播。理论结果与实验结果之间也有一定的误差:在温度较低处,

传输损耗对温度非常敏感,容易受匹配液的折射率误差、温箱中温度误差的影响,从而造成误差;在温度较高处,随着温度的升高,传输损耗的理论结果减少,而实验结果趋于稳定,这主要是因为是在实验中使用了火焰拉锥的方法,熔锥光纤产生了插入损耗,大约为 3 dB。因此,可以将这种熔锥光纤器件的传输特性归结为:随着外界环境温度的升高,匹配液折射率  $n_0$  降低,芯层(熔锥光纤)携带的光功率占总光功率的比值增加,导致传输损耗减小。

从以上分析得出,温度小于 30 °C 时,这种涂覆折射率匹配液的熔锥光纤器件对光波波长非常敏感,熔锥光纤的传输损耗变化比较剧烈。基于此,利用宽带光源得到了如图 5 所示的不同波长的光传输损耗变化情况,在同一温度下,传输损耗随波长的增加而迅速变大。这是一种短通滤波器,这种滤波器可以制作光开关、S 波段掺铒放大器等<sup>[12,13]</sup>。图 5 给出了温度分别为 27.8 °C 和 28.8 °C 的两条曲线,可以看出这种滤波器的滤波截止波长随温度升高而向长波方向漂移,其温度系数为 40 nm/°C,对较长光波的抑制滤波大于 35 dB。

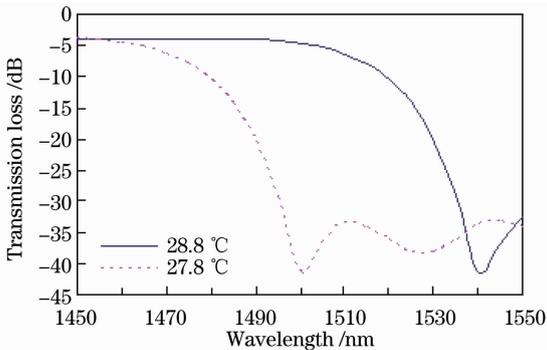


图 5 温控短波滤波器的传输损耗

Fig. 5 Transmission loss of temperature-controlled short-pass filter

## 4 结 论

从理论仿真和实验的角度分析了涂覆折射率匹配液的熔锥光纤的传输特性,结果表明随着外界温度的升高,涂覆折射率匹配液的熔锥光纤传输损耗降低。这种熔锥光纤器件对熔锥的参数要求不是很严格,比较容易实现。利用熔锥光纤的这种特性,可以设计光学温度传感器、液体折射率传感器和滤波

器等,在实际应用工作中有很大的优势。

## 参 考 文 献

- 1 M. Lehtonen, G. Genty, H. Ludvigsen. Tapered microstructured fibers for efficient coupling to optical waveguides: a numerical study [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(2): 295~300
- 2 You Shanhong, Li Xinwan, Yin Zongmin *et al.*. CWDM passive components fabricated by FBT[J]. *Communications Technology*, 2002, (12): 3~5  
游善红, 李新碗, 殷宗敏等. 基于熔融拉锥技术的全光纤粗波分复用器[J]. *通信技术*, 2002, (12): 3~5
- 3 Zhaobing Tian, Scott S.-H. Yam, Jack Barneset *et al.*. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 626~628
- 4 J. Villatoro, V. P. Minkovich, D. Monzón-Hernández. Temperature-independent strain sensor made from tapered holey optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 305~307
- 5 D. Monzón-Hernández, V. P. Minkovich, J. Villatoro. High-temperature sensing with tapers made of microstructured optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(3): 511~513
- 6 Benye Li, Lan Jiang, Sumei Wang *et al.*. Ultra-abrupt tapered fiber Mach-Zehnder interferometer sensors [J]. *Sensors*, 2011, **11**(6): 5729~5739
- 7 Chen Zhihao, Gu Donghua, Peng Jiangde *et al.*. Modeling of optical biconical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1549~1555  
陈智浩, 顾东华, 彭江得等. 双锥光纤模拟理论方法[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1549~1555
- 8 Zhao Chujun, Fan Dianyuan, Zhou Ping *et al.*. Power distribution characteristics of tapered fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 422~425  
赵楚军, 范滇元, 周萍等. 锥形光纤的功率分布特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 422~425
- 9 Xiong Yikun, Huang Xuguang. Optical fiber sensor for liquid refractive index based on fiber optic taper [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1956~1960  
熊贻坤, 黄旭光. 基于熔融拉锥光纤的液体折射率传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1956~1960
- 10 Liao Yanbiao. *Fiber Optics: Principles and Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. 41~47  
廖延彪. *光纤光学——原理与应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. 41~47
- 11 Yan Fengping, Zhang Liangzhong, Shan Ying *et al.*. Numerical analysis of the mode field radius for the square law and step index field[J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(1): 66~70  
延凤平, 张良忠, 单英等. 基于平方律和阶跃型纤芯折射率分布下光纤模场半径的数值分析[J]. *光学技术*, 2000, **26**(1): 66~70
- 12 J. B. Rosolem, A. A. Juriollo, M. A. Romero. S-band EDFA using standard erbium-doped fiber [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(22): 1186~1188
- 13 Hirotaka Ono, Makoto Yamada, Makoto Shimizu. S-band erbium-doped fiber amplifiers with a multistage configuration: design, characterization, and gain tilt compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2240~2246