

文章编号: 0253-2239(2010)s100213

一种有源光纤折射率的新型测量方法

张 昊 刘 波* 贾承来

(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 介绍了一种基于多纵模分布布拉格反射(DBR)光纤激光器拍频解调的有源光纤折射率测量方法。利用拍频解调的原理,通过对激光器相邻纵模间拍频的观测实现了对掺铒光纤折射率的测量,该方法具有实验装置易于实现、同传统的波长解调方式相比有解调成本低等优点。对这种新型的有源光纤折射率测量方法进行了理论分析与实验论证,通过利用等强度梁对激光器的谐振腔施加轴向应变,实验测量了不同应变下的掺铒光纤折射率。实验结果表明,掺铒光纤折射率随应变的增加线性减小,其拟合度达到了 0.9971,光纤折射率的应变系数约为 $-6.3086 \times 10^{-7} (\mu\epsilon)^{-1}$,其测量结果与国内外的前期相关研究结果基本一致。

关键词 光纤激光器;折射率测量;拍频解调;多纵模;分布布拉格反射器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100213

A Novel Method for Active Fiber Refractive Index Measurement

Zhang Hao Liu Bo Jia Chenglai

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

Abstract A novel method for active fiber refractive index measurement based on beat frequency interrogation of the multi-longitudinal-mode distributed Bragg reflector (DBR) fiber laser was presented. Based on beat frequency interrogation, the measurement of erbium-doped fiber refractive index had been taken by monitoring the beat note between adjacent longitudinal modes. This method was simple of structure, and low cost compared with the conventional wavelength interrogation approach, etc. The measurement method had been analyzed theoretically and tested experimentally. By utilizing a uniform cantilever beam (UCB) for axial strain on the oscillation cavity, strain dependence of fiber refractive index had been measured. Experimental results indicated that erbium-doped fiber refractive index linearly decreased with strain increased, and its coefficient of determination reached to 0.9971. The strain coefficient of fiber refractive index was about $-6.3086 \times 10^{-7} (\mu\epsilon)^{-1}$, basically in agreement with earlier related studies.

Key words fiber laser; refractive index measurement; beat frequency interrogation; multi-longitudinal mode, distributed Bragg reflector

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2840; 140.3510; 140.3500

1 引 言

自 20 世纪 70 年代末 K. O. Hill 等利用驻波法制作第一根光纤布拉格光栅(FBG)以来,光纤光栅以其抗电磁干扰、体积小、损耗低和灵敏度高等优点

迅速成为一种重要的光纤光子器件,并已被广泛应用于光纤通信和光纤传感领域^[1]。近年来各国学者对光纤布拉格光栅的传感原理进行了深入的研究,各种基于光纤布拉格光栅的传感器已被应用于

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736039)、国家自然科学基金(10904075,11004110,50802044)、国家 973 计划(2010CB327605)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

作者简介: 张 昊(1978—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感与光纤通信技术等方面的研究。

E-mail: haozhang@nankai.edu.cn(中国光学学会会员号:S04001489M)

* 通信联系人。E-mail: liupipi@nankai.edu.cn

诸如温度^[2,3]、应变^[4,5]、压力^[6,7]和振动^[8,9]等各种物理量的测量。然而传统的光纤光栅传感技术属于无源传感技术,通常需要附加光源为光纤传感器提供能量,这使得传感器的信噪比受到限制,尤其是对长距离、大规模传感网络的应用造成了困难。光纤激光技术的兴起为解决这一问题提供了方向,各种基于光纤激光器的有源光纤传感器应运而生。基于光纤激光器的有源光纤传感器本身既作为信号光源又兼有传感的功能,是新一代光纤传感器的主流方向。特别是近年来兴起的基于短腔单纵模分布布拉格反射(DBR)激光器拍频解调的光纤传感技术又以其高灵敏度、高信噪比、无需附加光源和解调成本低等优点吸引了各国学者的研究兴趣,尤其在长距离、大规模的传感网络应用中具有独特的优势^[10,11]。在前期研究中已利用上述短腔单纵模 DBR 激光器实现了对压力和光纤双折射度的测量^[12,13]。然而为了保证 DBR 光纤激光器的单纵模运转,通常需要在厘米量级的高浓度掺铒光纤上写制波长严格匹配且具有极高反射率的光纤布喇格光栅对,以形成有效的激光激射。为了克服这一问题,尝试利用传统的长腔多纵模光纤激光器进行有源传感技术的研究,研制出基于长腔多纵模光纤激光器拍频解调的应变传感器^[14]。这种基于多纵模光纤激光器拍频解调的有源光纤传感技术在保持了高灵敏度、高信噪比和低解调成本的同时,还使光纤激光器的制作难度大为降低,同时由于多纵模激光器具有比短腔单纵模激光器更为复杂的频率差拍,其可利用的传感信息大为丰富。

结合已取得的前期成果,本文提出了一种基于多纵模 DBR 掺铒光纤激光器拍频解调的有源光纤折射率测量方法,通过监测不同轴向应变下多纵模 DBR 掺铒光纤激光器纵模间的拍频的变化,得到了谐振腔内掺铒光纤的折射率随应变的变化曲线,从而实现了掺铒光纤折射率的测量。

2 实验装置与原理

掺铒光纤折射率测量实验系统如图 1 所示,由 980 nm 激光二极管(LD)作为抽运源,在 979 nm 的吸收系数为 15.2 dB/m、数值孔径为 0.22 的掺铒光纤(EDF)作为增益介质,两只反射波长在 1530 nm 附近的光纤布喇格光栅对作为激光器的反射镜,这样就构成了 F-P 结构的 DBR 光纤激光器。为了避免前向 980 nm 剩余抽运光对激光器频谱的影响,选择后向监测方式,同时为了消除反射光对激光器性能的影响,在波分复用器(WDM)的信号端放置了光隔离器(ISO)。在后向激光经过波分复用器(WDM)的信号端和隔离器后,用 3 dB 耦合器将输出激光分为两路,一路送入光谱仪用于监测激光光谱,另一路经过光电探测器(PD)转换为电信号,再利用频谱仪(ESA)对激光器的拍频观测。此外为了测量不同轴向应变下激光器内铒纤折射率,将 16 cm 铒纤沿等强度梁(UCB)中线进行粘贴,通过改变等强度梁的自由端位移能够使铒纤的应变发生相应变化。

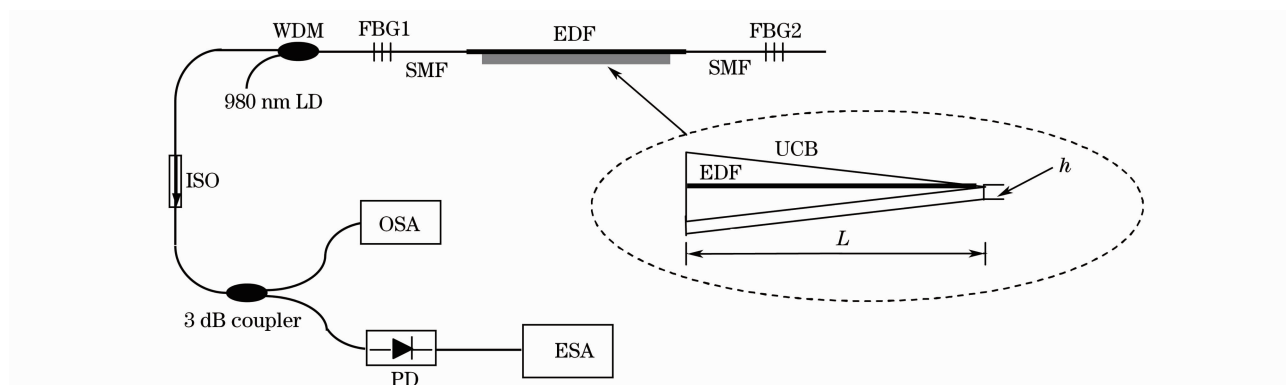


图 1 掺铒光纤折射率测量实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system for erbium-doped fiber refractive measurement

根据激光原理,具有 F-P 结构的线形腔激光器的纵模频率 ν 表示为

$$\nu = \frac{ck}{2nl}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速, k 为激光纵模的阶数, n 为谐振腔内光纤的有效折射率, l 为谐振腔腔长。通常情况下光纤中总是存在一定的固有多折射,因此对应于双折射两个正交偏振方向的激光纵模频率间

有微小频差。这样多纵模激光器的激光拍频同时来源于具有双折射导致微小模式分裂的不同阶纵模之间的差拍和同阶纵模由于光纤固有双折射发生分裂而产生的拍频,因而激光器的拍频 $\Delta\nu$ 属于集合^[14]

$$\left\{ \frac{B\nu}{n}, \frac{cm}{2nl}, \frac{cm}{2nl} \pm \frac{B\nu}{n} \right\}, \quad (2)$$

式中 m 为自然数, B 为光纤的双折射度。

由(2)式可以看到激光器的拍频与光纤的折射率直接相关,因而通过对激光器拍频的观测可实现对光纤折射率的测量。鉴于激光器内的光纤包括单模光纤(SMF)和掺铒光纤,用 n_1 和 n_{20} 分别表示单模光纤折射率和未施加应变时铒纤的折射率, l_1 , l_2 和 l_3 分别代表单模光纤的长度、未粘贴部分铒纤的长度和粘贴部分铒纤的长度。由(1)式可知,在没有对谐振腔内的铒纤施加应变时激光器相邻纵模间的拍频 ν_0 可以表示为

$$\nu_0 = \frac{c}{2(n_1 l_1 + n_{20} l_2 + n_{20} l_3)}, \quad (3)$$

于是有

$$n_1 l_1 + n_{20} l_2 + n_{20} l_3 = \frac{c}{2\nu_0}. \quad (4)$$

当谐振腔内铒纤发生应变 ϵ 时,激光器相邻纵模间的拍频 ν_ϵ 表示为

$$\nu_\epsilon = \frac{c}{2[n_1 l_1 + n_{20} l_2 + n_2 l_3 (1 + \epsilon)]}, \quad (5)$$

于是有

$$n_1 l_1 + n_{20} l_2 + n_2 l_3 (1 + \epsilon) = \frac{c}{2\nu_\epsilon}, \quad (6)$$

(6)式减去(4)式,可得

$$n_2 l_3 (1 + \epsilon) - n_{20} l_3 = \frac{c}{2\nu_\epsilon} - \frac{c}{2\nu_0}, \quad (7)$$

因此任意应变下的谐振腔内铒纤的折射率可以表示为

$$n_2 = \frac{\frac{c}{2\nu_\epsilon} - \frac{c}{2\nu_0} + n_{20} l_3}{l_3 (1 + \epsilon)}. \quad (8)$$

由(8)式可以看到,通过对不同应变下激光器相邻纵模拍频的观测就可以计算得到谐振腔内铒纤折射率随应变的变化关系。

3 实验结果与讨论

由(1)式可知多纵模激光器的纵模频率是由谐振腔内光纤的折射率和长度共同决定的,在布拉格光栅反射谱所决定的频率范围内可能允许多个纵模同时存在,因此多纵模激光器的拍频来源于具有微小模式分裂的纵模间的差拍。图2为利用频谱仪观

察的在铒纤未被粘贴时的激光器拍频频谱图,可以发现激光器的拍频频谱呈现周期性的分布,与(2)式的结论相符。其中强度较高的一系列拍频对应于(2)式的中间项,强度较低的一系列拍频对应于(2)式中的第一项和第三项。由(8)式可知,利用激光器相邻纵模的拍频(如图2中A所示)就可以计算得到铒纤的折射率。

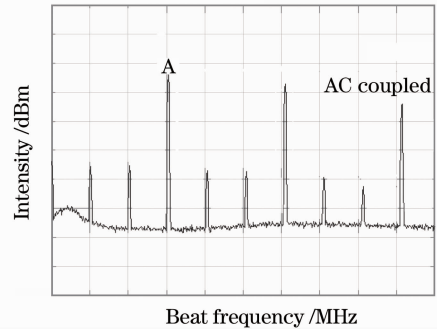


图2 多纵模 DBR 光纤激光器的拍频频谱图

Fig. 2 Beat frequency spectrum of the multi-longitudinal-mode DBR fiber laser

通过改变等强度梁自由端的位移 D , 实验观察了激光器相邻纵模间拍频随应变的变化情况,如图3所示。可以看到随着应变的增加激光器相邻纵模间的拍频逐渐减小,当等强度梁自由端的位移由 -50.46 mm(压缩状态)增至 40.11 mm(拉伸状态)时激光器相邻纵模间的拍频由 305.167 MHz 减少至 304.533 MHz。图4反映出激光器相邻纵模间拍频与等强度梁自由端位移之间存在线性关系,其线性拟合度 R^2 达到了 0.9983 。

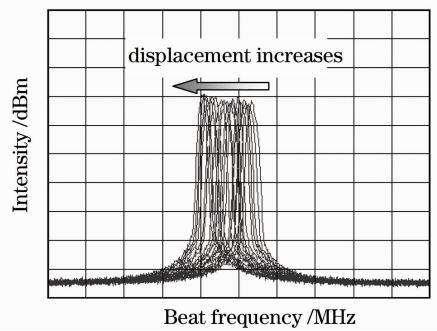


图3 等强度梁自由端不同位移时激光器相邻纵模间拍频频谱

Fig. 3 Beat frequency spectra of adjacent longitudinal modes for different free end displacements of UCB

由结构力学可知,沿等强度梁中线发生的应变 ϵ 可表示为^[15]

$$\epsilon = \frac{hD}{L^2}, \quad (9)$$

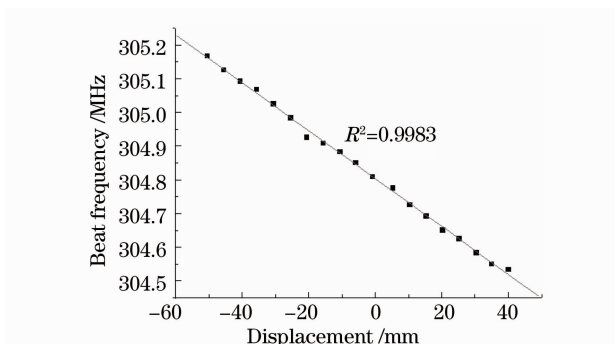


图 4 激光器相邻纵模间拍频随等强度梁自由端位移的变化曲线

Fig. 4 Beat frequency of adjacent longitudinal modes as a function of the free end displacement of UCB

式中 h 为等强度梁的厚度, L 为等强度梁的长度, D 表示等强度梁自由端的位移。

根据(9)式可以计算得到等强度梁自由端位移所对应的应变,从而得到激光器相邻纵模间拍频随应变的变化曲线,如图 5 所示。可以看到随着光纤应变的增加激光器相邻纵模间的拍频向低频方向漂移,二者之间存在线性关系且线性拟合度 R^2 达到 0.9983。

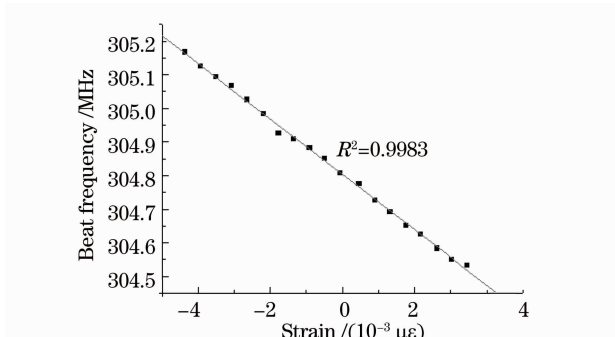


图 5 激光器相邻纵模间拍频随应变的变化曲线

Fig. 5 Beat frequency of adjacent longitudinal modes as a function of strain

由(8)式可以看到,铒纤折射率还与未发生应变时的铒纤折射率相关,因而还需对铒纤的初始折射率进行计算。铒纤的包层是由纯石英组成,根据 Sellmeier 方程^[16]可以得到在激光波长 1530.47 nm 处铒纤的包层折射率 $n_{cl} \approx 1.4443$ 。根据光纤的数值孔径 NA 的定义:

$$NA = \sqrt{n_{20}^2 - n_{cl}^2}, \quad (10)$$

又考虑到实验中使用铒纤的数值孔径为 0.22,可以得到铒纤的初始纤芯折射率 $n_{20} \approx 1.4609$ 。

于是根据(8)式,可以计算得到铒纤纤芯折射率随应变的变化曲线,如图 6 所示。可以看到光纤应

变在 $-4359.744 \mu\epsilon \sim 3465.504 \mu\epsilon$ 的范围内,光纤的纤芯折射率由约 1.4636 降低至约 1.4586,二者之间成线性关系且线性拟合度 R^2 达到了 0.9971,折射率的应变系数约为 $-6.30863 \times 10^{-7} (\mu\epsilon)^{-1}$ 。

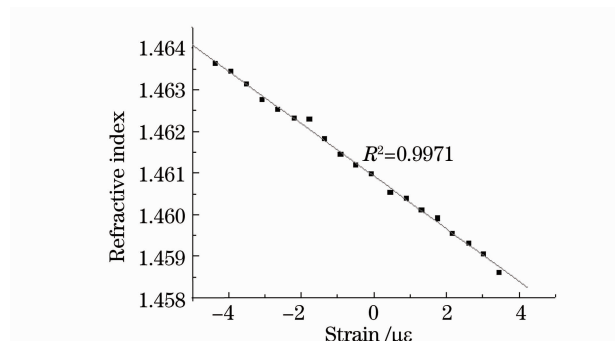


图 6 铒纤折射率随应变的变化曲线

Fig. 6 Refractive index of the EDF as a function of strain

表 1 给出了本文的光纤折射率应变系数测量结果与文献[17~19]报道结果的对比情况。可以看到与文献[17~19]相比,本文的测量结果偏大,这是由于本文是对掺铒光纤的折射率进行测量,而文献[17]的测量对象是 SMF-28 型单模光纤,文献[18]的测量对象为 Δ 型色散位移光纤,文献[19]的测量对象是 P_2O_5/GeO_2 掺杂多模光纤,且文献[17~19]都是针对光纤在 1550 nm 的折射率进行测量。测量结果在光纤折射率应变系数的数量级和光纤折射率随应变的变化趋势上同文献[17~19]一致。由(8)式可知粘贴部分铒纤长度以及光纤拍频测量的精确性将直接影响铒纤折射率的测量结果,同时由于粘贴后的铒纤所受应变还将受到胶粘剂本身的影响,铒纤发生的应变与等强度梁中线上实际发生的应变将有所偏差。以上这些因素是引入测量误差的主要原因,需要在进一步实际测量中加以考虑。对铒纤的折射率随应变的变化情况进行了研究,值得注意的是如果利用已知折射率的铒纤构建激光器,将待测光纤置于谐振腔内并粘贴于等强度梁,该测量方法将同样也适用于对其他类型光纤折射率的测量。

表 1 不同报道中光纤折射率应变系数的比较

Table 1 Comparison of fiber refractive index

	strain coefficients $(\mu\epsilon)^{-1}$		
	Libo Yuan's	J. J. Carr's	A. H. Hartog's
Our result	result ^[17]	result ^[18]	result ^[19]
-6.30863×10^{-7}	-1.649×10^{-7}	-2.5×10^{-7}	-3.6×10^{-7}

4 结 论

研究了一种有源光纤折射率的新型测量方法,通过对多纵模光纤激光器纵模间拍频的观测实现了对不同轴向应变下掺铒光纤折射率的测量,发现在轴向应变在 $-4359.744\ \mu\epsilon\sim 3465.504\ \mu\epsilon$ 的范围内,铒纤的折射率与光纤轴向应变之间存在线性关系且线性拟合度 R^2 达到0.9971。提出的有源光纤折射率测量方案基于由布拉格光纤光栅作为反射镜的DBR光纤激光器,其装置易于实现且信噪比高。此外采用基于射频域的拍频解调方案避免了使用波长解调所需较为昂贵的光纤光谱仪,同时利用成熟的电子学方法能够灵活地对传感信号进行后续处理。

参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides; application to reflection filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 2 C. Zhao, M. S. Demokan, W. Jin *et al.*. A cheap and practical FBG temperature sensor utilizing a long-period grating in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **276**(2): 242~245
- 3 Zhang Weiguang, Xu Zhaowen, Yang Xiangpeng *et al.*. Sensing measurement of two parameters for torsion and temperature using single fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1070~1075
张伟刚, 许兆文, 杨翔鹏等. 用单光纤光栅实现扭转与温度的双参量传感测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1070~1075
- 4 Z. Ran, Y. Rao. A FBG sensor system with cascaded LPPGs and music algorithm for dynamic strain measurement [J]. *Sens. Actuators A*, 2007, **135**(2): 415~419
- 5 Guan Baiou, H. Tam, S. Ho *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 827~830
关柏鸥, H. Tam, S. Ho等. 用一根光纤光栅实现温度与应变的同时测量[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 827~830
- 6 W. Zhang, F. Li, Y. Liu *et al.*. Ultrathin FBG pressure sensor with enhanced responsivity [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(19): 1553~1555
- 7 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristic [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 X. Zeng, Y. Rao. Simultaneous static strain, temperature and vibration measurement using an integrated FBG/EFPI sensor [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(12): 1617~1619
- 9 Yu Youlong, Geng Shuwei, Tan Huayao *et al.*. A novel active fiber Bragg grating sensor system for monitoring mechanical vibration in real-time [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 293~296
余有龙, 耿淑伟, 谭华耀等. 用于机械振动实时监测的光纤光栅有源传感装置[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 293~296
- 10 L. Shao, S. Lau, X. Dong *et al.*. High-frequency ultrasonic hydrophone based on a cladding-etched DBR fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 548~550
- 11 Y. Zhang, B. Guan, H. Tam. Ultra-short distributed Bragg reflector fiber laser for sensing applications [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 10050~10055
- 12 Lan Yuwen, Liu Bo, Luo Jianhua. Pressure sensor based on distributed-Bragg-reflector fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 629~631
兰玉文, 刘波, 罗建花. 基于分布布拉格反射光纤激光器的压力传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 629~631
- 13 B. Liu, C. Jia, H. Zhang *et al.*. DBR-fiber-laser-based active temperature sensor and its applications in the measurement of fiber birefringence [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2010, **52**(1): 41~44
- 14 H. Zhang, J. Luo, Bo Liu *et al.*. Polarimetric multilongitudinal-mode distributed Bragg reflector fiber laser sensor for strain measurement [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2009, **51**(11): 2559~2563
- 15 W. Zhang, Z. Wu, L. Liang *et al.*. Analyses and measurement of strain and deflection of standard beam based on fiber grating [C]. *SPIE*, 2001, **4579**: 269~273
- 16 I. H. Malitson. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(10): 1205~1209
- 17 Yuan Libo. Effect of temperature and strain on fiber optic refractive index [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1713~1717
苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响[J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1713~1717
- 18 J. J. Carr, S. L. Saikkonen, D. H. Williams. Refractive index measurements on single-mode fiber as functions of product parameters, tensile stress, and temperature [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 1990, **9**(4): 393~396
- 19 A. H. Hartog, A. J. Conduit, D. N. Payne. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibers [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1979, **11**: 265~273