

文章编号: 0258-7025(2008)12-1955-04

# 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器

徐 平 庞拂飞 陈 娜 陈振宜 王廷云

(上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 基于菲涅耳反射原理和光时域反射(OTDR)技术,提出了一种新型的、结构简单的准分布式光纤温度传感器。传感器由两个端面抛光的光纤对接构成,并在两端面间隙中填充温敏材料。传感器周围温度变化改变温敏材料的折射率,从而引起菲涅耳反射强度的变化。将三个传感头串联,利用 OTDR 探测各传感器菲涅耳反射的微弱变化实现温度传感和传感器定位。在 $-30\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,随着温度升高,该系统各个传感头的菲涅耳反射强度单调增大,且温度传感特性具有良好的重复性,同时具有极低的附加损耗。

**关键词** 光纤光学;传感器;准分布式温度传感器;光时域反射;菲涅耳反射

**中图分类号** TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1955

## A Quasi-Distributed Optical Fiber Temperature Sensor Based on Fresnel Reflection

Xu Ping Pang Fufei Chen Na Chen Zhenyi Wang Tingyun

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,

Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract** Based on the principle of Fresnel reflection and the optical time-domain reflectometry (OTDR) techniques, a quasi-distributed optical fiber temperature sensor which can achieve accurate temperature measurement is presented. The sensor head is made of two face-to-face single-mode optical fibers whose end surfaces have been polished. The gap between two fibers is filled with a temperature-sensitivity material. The temperature variation causes the refractive index of the filling material to change, and then the intensity of Fresnel reflection will be changed. A sensing scheme with three sensor heads in series is investigated in experiment. The slight changes in Fresnel reflection intensity are detected by OTDR, with which the temperature sensing characteristics are studied. The experimental results show that the Fresnel reflectivity increases monotonically when the temperature varies from  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The sensor heads have good repeatability and low insertion loss.

**Key words** fiber optics; sensors; quasi-distributed optical fiber temperature sensor; optical time-domain reflectometry; Fresnel reflection

## 1 引 言

温度是生产、生活中十分重要的物理量,随着工业生产、生活自动化程度的不断提高,建立长距离、密集型的网络化温度传感系统尤为重要<sup>[1]</sup>。光纤传感器以其灵敏度高、抗电磁干扰、抗化学腐蚀、传输容量大、易于复用组网等优点,已经成为网络化温度

监测的最佳技术<sup>[2]</sup>。目前,典型的分布式光纤传感器网络主要基于拉曼或布里渊散射及光时域反射(OTDR)技术<sup>[3~6]</sup>。光时域反射计是光纤领域最早出现的参数测试技术,它可以直接探测光纤中微弱的背向散射光,具有灵敏度高、定位精确等特点<sup>[7]</sup>。随着 OTDR 技术不断成熟、成本不断下降,其在光

收稿日期:2008-01-30;收到修改稿日期:2008-04-30

**基金项目**:国家自然科学基金(60807031,60677031),上海研发公共服务平台建设专项(上海市科委 2007 年度“创新行动计划”项目研发基地能力建设专项)(07DZ22024),上海市晨光人才计划(2007CG54),上海市国际科技合作基金(075307017)和上海市教委(08ZZ49,06AZ032)资助项目。

**作者简介**:徐 平(1982—),女,北京人,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail:misssxuping@yahoo.com.cn

**导师简介**:王廷云(1963—),男,河北人,教授,博士生导师,主要从事特种光纤及光电测试技术方面的研究。

E-mail:tywang@mail.shu.edu.cn

纤传感领域的应用得到了广泛关注。科研人员已经开发出基于 OTDR 的多种传感网络技术,如基于光纤光栅<sup>[8]</sup>、光纤法布里-珀罗 (F-P) 腔<sup>[9]</sup>、微弯光纤<sup>[10]</sup>等,光纤光栅和 F-P 技术是基于 OTDR 中的反射进行传感,微弯光纤是基于损耗进行传感。它们均存在着一定的不足:光纤光栅需要控制不同的反射波长以实现大规模的复用;F-P 腔要严格控制腔长来保证输出的单值性;微弯光纤具有较大的损耗导致复用的传感点有限。

本文设计了一种基于 OTDR 技术的用于温度监测的准分布式光纤温度传感系统。利用 OTDR 探测各个相互独立的传感头产生的菲涅耳反射的微弱变化实现温度传感。同时,通过探测光纤背向瑞利散射光可在时域上对各个传感头进行定位。

## 2 原理分析

OTDR 技术用于探测光纤中的瑞利背向散射、菲涅耳反射等光信号,其光强探测灵敏度非常高。当光纤线路中发生菲涅耳反射时,反射光强度比背向散射光强度大得多,在 OTDR 上可以明显地观察到该现象。同时,不易检测的菲涅耳反射率的微小变化也会被 OTDR 精确探测。基于 OTDR 技术设计了一种如图 1 所示的光纤温度传感器,它由两个完全对准的光纤对接构成(光纤轴在一条直线上),两对接光纤端面处理成为光学镜面。两对接光纤折射率为  $n_1$ ,间隙物质折射率为  $n_2$ ,当  $n_1 \neq n_2$  时,在两个交界面处形成了折射率的突变,从而产生菲涅耳反射<sup>[11]</sup>。利用具有温度敏感特性的材料作为间隙填充物,其折射率随温度变化而变化,使得菲涅耳反射光强度发生变化,利用 OTDR 探测此光强度变化即可实现温度传感。

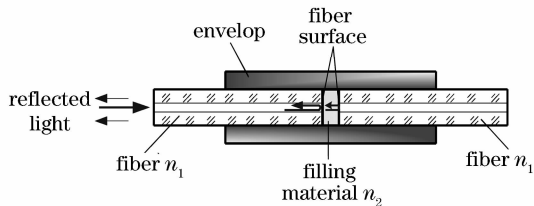


图 1 传感头示意图

Fig. 1 Scheme of the sensor head

当填充的间隙物质折射率与石英光纤相当时,光纤端面的反射具有低菲涅耳反射率,可以利用光纤两个端面的反射光形成的双光束干涉来计算反射率  $R^{[12]}$ ,即反射光强  $P_r$  与入射光强  $P_i$  之比

$$R = 10 \lg \left( \frac{P_r}{P_i} \right) = 10 \lg [r + (1-r)^2 r + 2r(1-r) \cos \Phi], \quad (1)$$

式中  $\Phi = \frac{4\pi n_2 L}{\lambda}$  为两光束间的相位差, $\lambda$  为光源波长, $L$  为间隙厚度即腔长, $r = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}$  是根据菲涅耳公式得到的反射系数。

反射率  $R$  反映出 OTDR 探测到的菲涅耳反射光能量的大小,反射率越大则菲涅耳反射越强。由 (1) 式可以看出,  $R$  是相位差  $\Phi$  的周期变化函数。对于确定的光波长,周期由腔长和间隙物折射率共同决定,如图 2 所示。计算中取光纤的折射率  $n_1 = 1.45$ ,可以看出,  $n_2$  在一定区间内变化时,  $L$  越大,  $R$  周期越小,此时  $n_2$  越接近  $n_1$ ,  $R$  随  $n_2$  变化率越大,因此,通过调节  $L$  可设计出高灵敏度的光纤传感器。

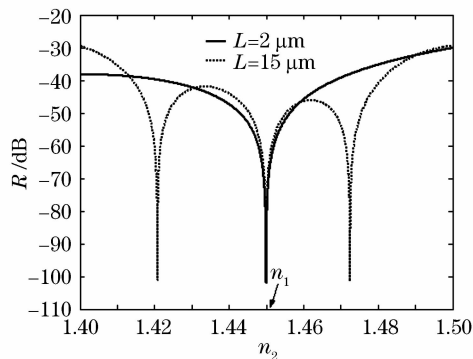


图 2 反射率  $R$  随  $n_2$  的变化

Fig. 2 Reflectivity  $R$  versus refractive index  $n_2$

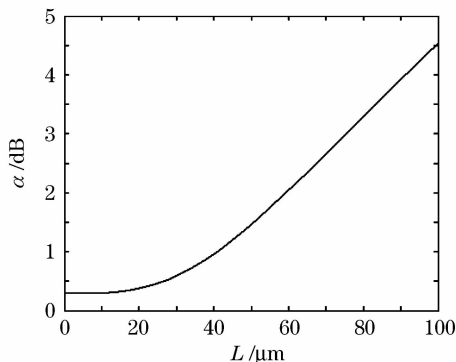
对于光纤温度传感结构,若要实现大规模的复用,且实现长距离温度检测,传输损耗是决定传感头复用数目的主要因素,传感头的传输损耗主要是菲涅耳反射引起的损耗  $\alpha_f$  和两根对接光纤间距引起的光耦合损耗  $\alpha_L$ <sup>[12]</sup>,表示为

$$\alpha = \alpha_f + \alpha_L = -10 \left\{ \lg \frac{16n_1^2 n_2^2}{(n_1 + n_2)^4} + \lg \left[ \frac{2\omega_0 \omega(L)}{\omega_0^2 + \omega^2(L)} \right]^2 \right\}, \quad (2)$$

式中  $\alpha_L$  由光纤基模模场半径  $\omega_0$  和反射光束模场半径  $\omega(L)$  叠加积分求得,对于高斯光束,  $\omega(L)$  可表示为腔长  $L$  的函数

$$\omega(L) = \omega_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_0^2} 2L \right)^2}. \quad (3)$$

若以空气腔计算得到菲涅耳反射的最大损耗值,取空气介质折射率  $n_0 = 1$ ,则  $\alpha_f$  约为 0.3 dB。此时,由 (2) 式知,若  $L$  小于 30  $\mu\text{m}$ ,传输损耗小于 0.5 dB,如图 3 所示。若 OTDR 的动态范围为  $\alpha_m$ ,

图3 传输损耗  $\alpha$  与  $L$  的关系Fig. 3 Relationship between transmission loss  $\alpha$  and cavity length (depth of the filling material)  $L$ 

则传感头的最大复用数为  $N = \alpha_m / \alpha$ 。

由此可见,为了使系统能够复用更多的传感头,应当尽量减小腔的长度  $L$ ,但是由于菲涅耳反射率与腔内的相位  $\Phi$  之间呈现余弦的变化关系,因此,还必须根据工作波长及温敏材料折射率变化范围合理地选择腔长,使传感器能够工作在近似线性的区域内,实现不同测量范围和灵敏度的温度传感器。

### 3 实验结果和分析

利用 OTDR 探测光纤菲涅耳反射率变化的原理,搭建如图 4 所示的光纤温度传感器测试系统。传感头由两个 FC/PC 光纤头对接而构成,它们之间通过陶瓷管对准固定,利用精密机械平移台(精度大于  $1 \mu\text{m}$ ) 调整光纤端面间距,使腔长  $L$  取  $5 \sim 15 \mu\text{m}$ 。在两光纤端面间涂上具有温度敏感特性的硅橡胶。该涂敷材料具有负热光系数,常温下 ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 折射率为 1.43。将三个传感头 S1, S2, S3 串联,放置于温控箱 (ESPEC ESL-04KA) 中。每个传感头相距约  $100 \text{ m}$ , 输入端与 OTDR (EXFO FTB-150-S1-E3-ED) 相连。利用 OTDR 对传感光纤测试,选择激发波长  $1550 \text{ nm}$ , 脉冲宽度  $10 \text{ ns}$ , 测试结果如图 5 所示。

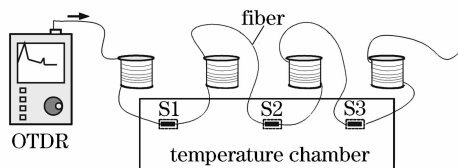


图4 光纤温度传感器测试系统

Fig. 4 Optical fiber temperature sensing system

图 5 中前三个反射峰分别对应于三个传感头所引起的菲涅耳反射,最后一个反射峰是光纤末端的端面反射。图 5 中横坐标为光纤线路的长度信息,

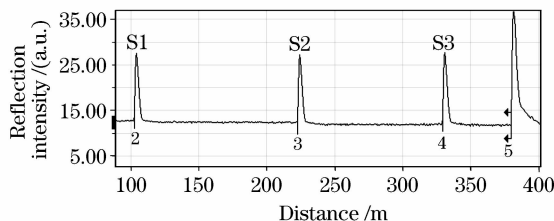


图5 OTDR 测试三个传感头的菲涅耳反射峰

Fig. 5 Reflected signal for three sensing heads measured by OTDR

由此可以判断传感头所在位置。纵坐标为相对反射光功率,它由 OTDR 接收器获得的瑞利背向散射光功率和菲涅耳反射光功率取对数后叠加得到。可以看出,光纤传感头所产生的菲涅耳背向反射光远大于瑞利散射光。通过对比传感头前后瑞利散射光的强度,可以得到光通过传感头的损耗。由图 5 可知,本系统的每个传感头的损耗很小(约为  $0.3 \text{ dB}$ ),与理论分析相符。实验中所采用的 OTDR 最小分辨间距为  $5 \text{ m}$ ,这也是传感头复用连接的最小间距。

考虑到硅橡胶的温度稳定性,实验选取的温度变化范围为  $-30 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。如图 6 所示,反射峰是利用 OTDR 所探测到的传感头菲涅耳反射光强变化曲线。由于硅橡胶的折射率小于石英材料折射率,且具有负热光系数,因此,菲涅耳反射率随温度的升高单调增大。此外,光纤瑞利散射光强几乎不变,即随着温度的变化在光纤连接处没有引入明显的光损耗。

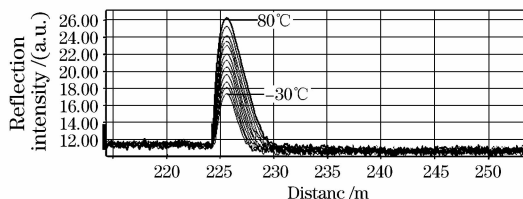


图6 菲涅耳反射随温度的变化

Fig. 6 Change of Fresnel reflection with temperature

为了获得菲涅耳反射率的温度传感特性,系统地测试了三个传感头反射峰随温度的变化关系,温度测试范围在  $-30 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$  之间,每次温度改变量为  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , OTDR 测试结果如图 7 所示。随着温度的升高,三个传感头的菲涅耳反射强度均呈现单调且近似线性的增大。但是三个传感点的温度传感特性曲线存在一定的差异,这是由光纤端面之间距离的微小差别所引起的。在实际的应用系统中,可以通过对光纤间距进行更加精密的控制,以获得传感特性一致的传感头,实现对整个温度传感系统进行优化。

还对传感头温敏特性在升温-降温过程的重复性进行了实验测试,如图 8 所示。在  $-30 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$  范

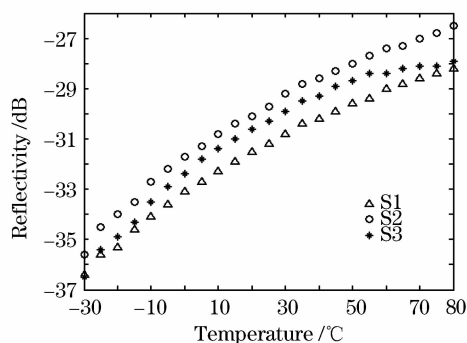
图7 反射强度随温度  $T$  的变化关系

Fig. 7 Relationship between reflection signal and temperature

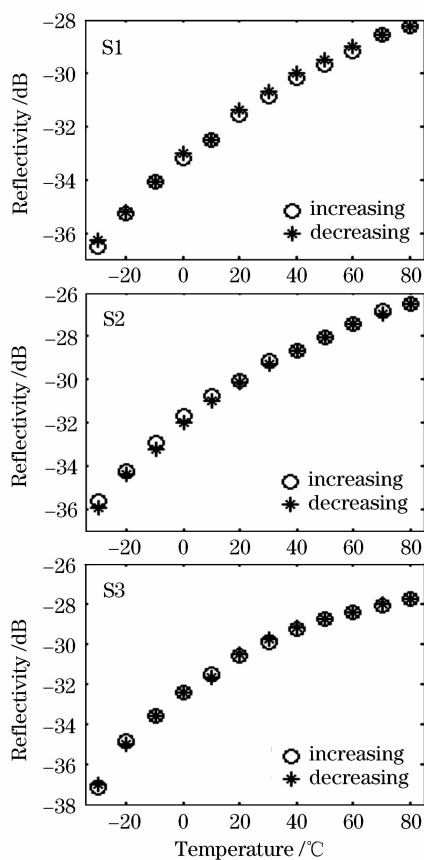


图8 温度传感特性的重复性

Fig. 8 Repeatability of the temperature sensing characteristics in temperature increasing and decreasing tests

围内,三个传感头的升温与降温之间的菲涅耳反射率偏差在0.2 dB以内,因此,此传感系统具有良好的重复性。

## 4 结 论

提出了一种基于 OTDR 原理、利用菲涅耳反射

实现温度检测的准分布式光纤传感器。利用温度敏感材料折射率随温度变化而产生的微小变化来改变反射腔中菲涅耳反射的强度,从而实现温度传感。实验研究了三个串联在不同位置传感头所构成的准分布系统。结果表明,该温度传感系统在一30~80 °C范围内具有较好的单调性,升温与降温过程中反射率偏差在0.2 dB以内,具有良好的重复性。

## 参 考 文 献

- 1 R. Rathod, R. D. Pechstedt, D. A. Jackson *et al.*. Distributed temperature-change sensor based on Rayleigh backscattering in an optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8): 593~595
- 2 Zhang Guiju, Yu Qingxu, Song Shide. Fiber optic temperature sensor based on F-P cavity interferometric-intensity modulation mechanism [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):228~231  
张桂菊,于清旭,宋世德. 基于 F-P 腔的干涉/强度调制型光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):228~231
- 3 Mostafa, Ahangrani, Farahani *et al.*. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(8):1379~1391
- 4 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Liu Honglin *et al.*. Experimental research of 30 km long distance distributed optical fiber Raman temperature sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):613~616  
张在宣,王剑锋,刘红林等. 30 km 远程分布光纤拉曼温度传感器系统的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):613~616
- 5 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical time domain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electrooptic modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1053~1056  
宋牟平,赵斌,章献民. 基于微波光电调制的布里渊光时域分析传感器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1053~1056
- 6 G. Hewa-Gamage, P. L. Chu. A multiplexed point temperature fibre sensor array using OTDR technique and TDM mechanism [C]. *Sensors, Proceedings of IEEE*, 2002. 111~115
- 7 Shintaro Sumida, Shinji Okazaki, Shukuji Asakura *et al.*. Distributed hydrogen determination with fiber-optic sensor [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, **108**(1-2):508~514
- 8 Lo Yu-Lung, Xu Shao-Hung. New sensing mechanisms using an optical time domain reflectometry with fiber Bragg gratings [J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2007, **136**(1):238~243
- 9 V. Murphy, B. D. MacCraith, T. Butler *et al.*. Quasi-distributed fibre-optic chemical sensing using telecom optical fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(7):618~619
- 10 N. M. P. Pinto, O. Frazao, J. M. Baptista *et al.*. Quasi-distributed displacement sensor for structural monitoring using a commercial OTDR [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**(8):771~778
- 11 Wu Chongqing. *Optical Waveguide Theory* [M]. 1st ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 133~134  
吴重庆. *光波导理论*[M]. 第一版. 北京:清华大学出版社, 2005. 133~134
- 12 Edvard Cibula, Denis Donlagic. In-line short cavity Fabry-Perot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard OTDR [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(14):8719~8730