

文章编号: 0258-7025(2010)06-1440-05

一种应用于分布式光纤拉曼温度传感器的 温度补偿电路

余向东¹ 张在宣¹ 祝海忠² 刘红林¹ 王剑锋¹

(¹ 中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)
(² 杭州欧忆光电科技有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要 介绍了一种应用于分布式光纤拉曼温度传感器的温度补偿电路,该温度补偿电路通过对雪崩光电二极管的反偏电压进行温度补偿来抵消环境温度对雪崩光电二极管的影响,从而大大降低了系统的温度漂移。采用该温度补偿电路的系统可在 0~60 ℃ 的环境温度范围内将温漂引起的测量偏差控制在 ±0.1 ℃ 之内。和传统的恒温装置相比,采用温度补偿电路可有效降低系统的功耗和成本。

关键词 传感器;分布式光纤拉曼温度传感器;温度补偿;温度漂移

中图分类号 TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1440

A Temperature Compensating Circuit for Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor

Yu Xiangdong¹ Zhang Zaixuan¹ Zhu Haizhong² Liu Honglin¹ Wang Jianfeng¹

(¹ Institute of Optoelectronics, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)
(² Hangzhou OE Opto-Electronics Technology Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract This paper presents a temperature compensating circuit which is used in distributed optical fiber Raman temperature sensor. The temperature compensating circuit through temperature compensation for the avalanche photodiode reverse bias voltage to offset the impact of environmental temperature on the avalanche photodiode, thus reducing the temperature drift of the system. By using this technology, the system measurement error caused by ambient temperature drift can be controlled within ±0.1 ℃ from 0 to 60 ℃. Compared with traditional constant temperature device, using temperature compensating circuit can effectively reduce system power consumption and cost.

Key words sensors; distributed optical fiber Raman temperature sensor; temperature compensation; temperature drift

1 引 言

分布式光纤拉曼温度传感器系统(DTS)因其具有连续线性测温、抗电磁干扰、安全性高和耐腐蚀等优点,已大量应用于隧道、电力电缆、煤矿和油井等领域的在线实时温度监测、报警^[1~5]。在分布式光纤拉曼温度传感器的应用中,环境温度变化会使系统中的部件产生温度漂移,进而给系统的测量结果引入误差。而在系统中的众多部件中,雪崩光电二极管(APD)的温度漂移^[6]对系统的影响最大。当

APD 的反向偏置工作电压不变,环境温度升高时,其响应率会剧烈下降(例如硅型 APD C30902E,当环境温度每升高 1 ℃ 时其响应率会相应降低约 13%),而环境温度降低时,又可能使 APD 因反向偏置电压过高而导致噪声剧增甚至被击穿。

对应上述的影响,传统的解决办法是给雪崩光电二极管加上恒温装置^[7]使其保持温度恒定,或采用温控加偏压修正的办法^[8,9],但这样会增加系统的成本和功耗。温度补偿电路因其具有成本低、功耗小和可

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-04-20

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327804)、国家自然科学基金(60608009)和浙江省重大科技专项(2009C11049)资助课题。

作者简介: 余向东(1968—),男,教授级高级工程师,主要从事分布光纤温度传感器、激光测距仪等光电子技术领域的研究。E-mail: yuxd@cjlu.edu.cn

靠性好等优点已在众多系统中得到广泛的应用。本文介绍一种结构简单、易于实现的应用于分布式光纤拉曼温度传感器中的温度补偿电路,该补偿电路通过对 APD 反偏电压进行温度补偿,并结合系统的解调方式达到克服环境温度对 APD 的影响,可在 0~60 °C 环境温度内可靠地工作。

2 系统工作原理

采用温度补偿电路的分布式光纤拉曼温度传感器的系统原理^[10~12]框图如图 1 所示。激光驱动器驱动激光二极管发出窄脉冲抽运激光经光纤双向耦合器进入本征型测温光纤,光波分复用器(OADM)接收从双向耦合器返回的背向散射光将其分解为斯托克斯和反斯托克斯拉曼背向散射^[13,14]光并分别送给两路光电接收放大器^[15~17]。信号处理器对两路光电接收放大器送出的模拟电信号进行逐点采集,将模拟信号转换为数字信号送给计算机进行数据处理、解调^[18,19]和定标,最终恢复出测温光纤上

的温度信息。在温度解调处理过程中,反斯托克斯拉曼散射光作为测量温度信号通道,斯托克斯拉曼散射光作为测量温度参考通道。系统的测温表达式为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \times \left[\ln \frac{\phi_{aL}(T)/\phi_{sL}(T)}{\phi_{aL_0}(T_0)/\phi_{sL_0}(T_0)} + (\alpha_a - \alpha_s)(L - L_0) \right], \quad (1)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数, h 为普朗克常数, $\Delta\nu$ 为光纤声子的振动频率, L 为测温点到入射端的光纤长度, L_0 为光纤取样环到入射端的光纤长度, T 为 L 处被测温度, T_0 为光纤取样环的温度, α_s, α_a 分别为斯托克斯拉曼散射光、反斯托克斯拉曼散射光的光纤传输损耗, $\phi_{aL_0}(T_0), \phi_{sL_0}(T_0)$ 为温度为 T_0 时 L_0 处光纤取样环反斯托克斯、斯托克斯拉曼散射光子通量, $\phi_{aL}(T), \phi_{sL}(T)$ 为 L 处被测温度点反斯托克斯、斯托克斯拉曼散射光子通量。

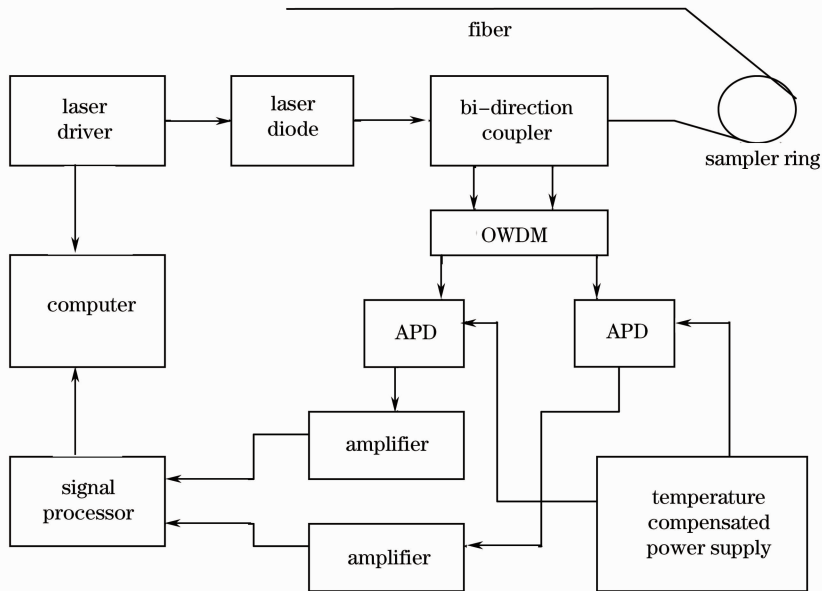


图 1 DTS 系统原理框图

Fig. 1 Configuration of DTS system

由(1)式可知,被测温度 T 的准确性与公式

$$\frac{\phi_{aL}(T)/\phi_{sL}(T)}{\phi_{aL_0}(T_0)/\phi_{sL_0}(T_0)} \quad (2)$$

的测量准确性有很大的关系。而(2)式的值在实际测量中需将斯托克斯和反斯托克斯背向散射光通过光电转换、放大和模/数转换并经计算获得。在未采用恒温或温度补偿的情况下,当环境温度发生变化时,斯托克斯、反斯托克斯测量通道中的 APD,放大器等部件均会受到温度变化而对(2)式的结果产生

影响。在测量通道中的各部件中,APD 受温度影响最大,对测量结果产生的影响也最大。从(2)式可知,分子、分母中反斯托克斯信号与斯托克斯信号的两次相除以及分子分母的相除可有效减少(2)式的值对环境温度变化的敏感度。在实际应用中,为了尽量减小环境温度的影响,斯托克斯和反斯托克斯测量通道中应尽量选取温度特性一致的元件。实验证明,(2)式的自除效应可在小范围的环境温度变化中(大约几度,具体视 APD 型号而定)起到良好的

稳定作用,超过这一范围将给系统的测量结果带来较大的误差,甚至无法正常工作。

APD在正常工作时需加上几十至几百伏的反向偏压,使其进入雪崩区以获得最佳灵敏度。最佳偏置电压大小一般和环境温度成正比,环境温度越高,所需最佳反向偏置电压越高,反之则越低。利用APD的这一特点,可通过对APD偏置电压实施温度补偿的办法来达到消除环境温度对APD的影响。

3 温度补偿电路

APD偏置电压温度补偿电路如图2所示。该电路实际上是一个经改装的串联式稳压电路。输入电压 U_1 为需补偿偏置电压,输出电压 U_0 为已补偿偏置电压,该电压提供给APD。晶体管T2和电阻 R_C 组成比较放大部分。电阻 R_Z 和稳压管 D_Z 组成基准电压部分, U_Z 为基准电压。电阻 R_1 , R_2 ,电位器 V_{R1} 以及负温度系数热敏电阻 R_T 和电阻 R_3 构成了热敏电阻反馈采样部分, U_f 为反馈采样电压。 U_f 和 U_Z 值之差经放大后送给调整管T1,由T1对输出偏置电压 U_0 进行调节。

设 $R = R_1 + V_{R1}$, $U = U_Z + U_{BE2}$, $R_X = R_2 + R_T // R_3$, U_{BE2} 为晶体管T2基极和发射极之间的电压,由图2可得

$$U_f = U, \quad (3)$$

$$U_f = U_0 \times R_X / (R + R_X). \quad (4)$$

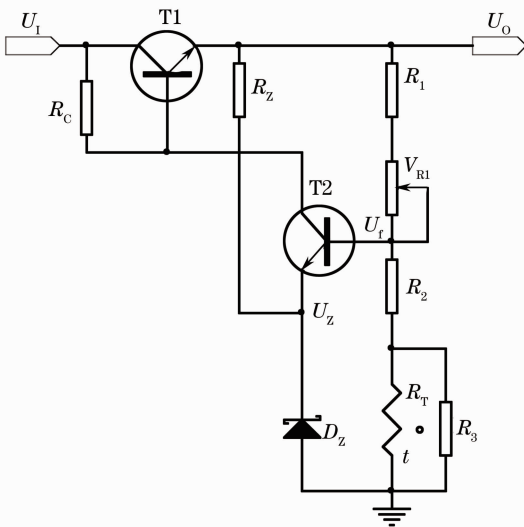


图2 温度补偿电路

Fig.2 Temperature compensating circuit

由(3),(4)式可得

$$U_0 = U(R + R_X) / R_X = U(1 + R/R_X). \quad (5)$$

由(5)式可知,当 U 和 R 不变时,输出电压 U_0

随 R_X 值的减少而增大。热敏电阻 R_T 采用市场上品种齐全、温度灵敏度较高的负温度系数热敏电阻(NTC),当环境温度升高时, R_T 阻值变小, R_X 值变小, U_0 变大,当环境温度降低时, R_T 阻值变大, R_X 值变大, U_0 变小,由此可起到对输出电压 U_0 温度补偿的作用。

电阻 R_2 , R_3 ,热敏电阻 R_T 组成串并网络,其作用一是为了方便调整温度补偿系数,其二是为了修正负温度系数热敏电阻的非线性。由(5)式可知,输出电压和 R_X 并非成线性关系,但由于APD所需反偏电压较大(几十伏到几百伏),所需温度补偿系数小(0.1~0.7 V/°C),在通常的温度变化范围内(-10 °C~70 °C), R_X 所需的相对变化范围很小。因此在一定范围内,可近似认为 R_X 和 U_0 成线性关系。

从(5)式又可以看到, R 与 U_0 完全成线性关系,因此也可将电阻 R_1 改用为温敏元件,比如用正温度系数的热敏电阻,但正温度系数的热敏电阻市场上品种较少,不宜实现。此外,也可用数字电位器取代电阻 R_1 ,通过由系统实测环境温度再调节数字电位器的阻值来达到温度补偿的目的,采用这一办法具有良好的控制线性,但实时性较差,此外实现复杂度也较高。

4 实验结果

将图2所示的温度补偿电路置于环境温度试验箱内,从-5 °C~70 °C改变实验温度,大约每隔5 °C测一点,实测的温度补偿电路输出APD反偏电压与工作环境温度的关系曲线如图3所示。可以看到,在-5 °C~60 °C范围内温度补偿系数大致为0.68 V/°C(适用于硅型APD C30902E),超过60 °C补偿系数有所下降,主要原因和热敏电阻的非线性以及在高温区电子元件性能有所下降有关。

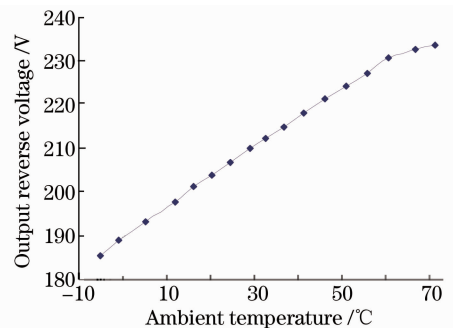


图3 APD反向偏置电压与环境温度的关系

Fig.3 APD reverse operating voltage versus ambient temperature

为了验证温度补偿电路对整个系统的作用,将装有上述温度补偿电路的分布式光纤拉曼温度传感系统置于环境温度试验箱进行环境温度实验,实验方案如图 4 所示。该系统波长为 905 nm,测程为 2 km,采用受环境温度影响极大的硅型 APD C30902E 作为光电转换器件。将被测光纤环设置在距发射端大约 150 m 光纤长度处并放置在 54 °C 的恒温槽内。环境温度试验箱的温度在 -5 °C ~ 70 °C 改变,间隔 5 °C,并经足够时间的稳定后用系统测量置于 54 °C 恒温槽内的光纤环的温度值。为了使测量结果不受系统噪声的影响,每次测量均作 2 万次以上平均。

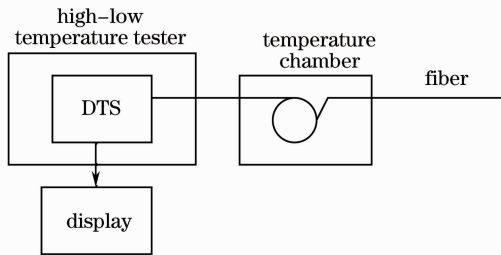


图 4 系统温度试验方案

Fig. 4 Configuration of temperature test for DTS system

试验箱内环境温度与用分布式传感系统实测的置于 54 °C 恒温槽内的光纤环温度值关系曲线如图 5 所示。在 0 ~ 60 °C 范围内,系统实测的光纤环温度值与光纤环所处恒温槽真实值(54 °C)的偏差控制在 ±0.1 °C 范围内,这其中还包括了系统其他噪声的影响。当环境温度超过 60 °C 时偏差逐渐增大,低于 0 时偏差也有所增加。从图 3 可以看到,补偿电路输出偏压和环境温度的关系即使在 0 ~ 60 °C 的范围内也并非呈完全的线性关系,此外,系统中除了 APD 受温度影响外,光源、光电转换放大器等部件均会受环境温度的影响,系统对环境温度变化的抵制作用实际上是温度补偿电路和(2)式的两次相除作用共同影响的结果,其中温度补偿电路发挥了主要作用,(2)式的两次相除作用再对因温度补偿电路非线性所引起信号波动以及光源、光电转换放大器等部件的温漂进行抵消。在 0 ~ 60 °C 范围内,温度补偿电路的电压补偿系数较合适,系统其他部件的温漂也在(2)式自除的可控范围内,因此在这一温度范围内系统的测量偏差较小。当环境温度超过 60 °C 时,温度补偿电路的补偿系数因热敏电阻阻值随温度变化的非线性有所变小,对 APD 的温度补偿能力下降。另外,当环境温度过高或过低时,系统的电子元件性能变差,会引起较大的漂移,最终使得

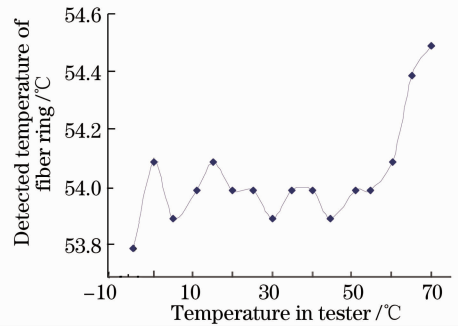


图 5 光纤环实测温度与试验箱环境温度的关系

Fig. 5 Detected temperature of fiber ring versus temperature in tester

系统的测量偏差变大。

5 结 论

从实验结果可知,采用图 2 方案的温度补偿电路并结合(2)式的两次相除作用可使系统有效抵制环境温度的影响,在 0 ~ 60 °C 的环境温度范围内因温漂引起的测量偏差小于 ±0.1 °C。和采用恒温、控温系统的分布光纤拉曼温度传感器系统相比,采用该温度补偿电路的系统可有效降低系统的功耗、体积和成本。该温度补偿系统目前已应用在由杭州欧忆光电科技有限公司生产的 FGC 系列分布光纤拉曼温度传感器系统中,并在几个工程中进行了实际应用,取得了良好的效果。

参 考 文 献

- Jia Zhen'an, Zhou Xiaobo, Qiao Xueguang *et al.*. Current status and developing trend of distributed optical fiber temperature sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2008, (11): 36~39
贾振安, 周晓波, 乔学光等. 分布式光纤温度传感器发展状况及趋势[J]. *光通信技术*, 2008, (11): 36~39
- Zhang Ying, Zhang Juan, Guo Yujing *et al.*. Current status and developing trend of distributed optical fiber temperature sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2007, (8): 1~3.9
张颖, 张娟, 郭玉静等. 分布式光纤温度传感器的研究现状及趋势[J]. *仪表技术与传感器*, 2007, (8): 1~3.9
- Ni Yuting, Lü Chengang, Ge Chunfeng *et al.*. Principle and application of the distributed optical fiber sensors based on OTDR [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2006, (1): 1~4
倪玉婷, 吕辰刚, 葛春风等. 基于 OTDR 的分布式光纤传感器原理及其应用[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2006, (1): 1~4
- Chen Jixuan, Gong Huaping, Zhang Zaixuan *et al.*. Development and engineering applications of optical fiber sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2009, (10): 38~40
陈继宣, 龚华平, 张在宣等. 光纤传感器的工程应用及发展趋势[J]. *光通信技术*, 2009, (10): 38~40
- Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958
徐平, 庞拂飞, 陈娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温

- 度传感器[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1955~1958
- 6 Zou Jian, Fu Xin. Experiment research on the APD's thermo-behaviour[J]. *Piezoe Lectrics & Acoustooptics*, 1999, **21**(2): 158~160
- 邹建, 扶新. 雪崩光电二极管温漂特性的实验研究[J]. 压电与声光, 1999, **21**(2): 158~160
- 7 Chang Sheng, Li Weiliang. Distributed optical fiber temperature sensing technique and its applications[J]. *Guangdong Electric Power*, 2002, **15**(4): 36~38
- 常胜, 李伟良. 分布式光纤温度传感检测技术及其应用[J]. 广东电力, 2002, **15**(4): 36~38
- 8 Li Shuibing, Wang Yu, Zhao Jiankang *et al.*. Research on stability of the gain of APD in fiber Raman temperature sensor [J]. *Optoelectronic Technology*, 2009, **29**(3): 168~170
- 李水冰, 王宇, 赵健康等. 光纤喇曼测温系统中 APD 增益稳定的研究[J]. 光电子技术, 2009, **29**(3): 168~170
- 9 Chang Cheng, Li Zheng, Zhou Yinqing *et al.*. Analysis of optimal APD avalanche gain in distributed temperature sensor system based on the Raman-backscattering[J]. *Laser Journal*, 2001, **22**(1): 17~19
- 常程, 李铮, 周荫清等. 基于后向喇曼散射测温系统 APD 最佳雪崩增益分析[J]. 激光杂志, 2001, **22**(1): 17~19
- 10 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Liu Honglin *et al.*. Experimental research of 30 km long distance 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 远程分布式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
- 11 Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1): 100~105
- 王玮, 周邦全, 张在宣等. 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度[J]. 光学学报, 1999, **19**(1): 100~105
- 12 Zhang Zaixuan, Feng Haiqi, Yu Xiangdong *et al.*. Distributed optical fiber Raman photonic sensor system[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1999, **20**(2): 83~85
- 张在宣, 冯海琪, 余向东等. 分布光纤喇曼光子传感器系统[J]. 半导体光电, 1999, **20**(2): 83~85
- 13 Zhang Zaixuan, I. S. Kim, Wang Jianfeng *et al.*. Temperature effect of amplified anti-Stokes Raman spontaneous backscattering in the single mode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 609~613
- 张在宣, I. S. Kim, 王剑锋等. 在单模光纤中放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射的温度效应[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 609~613
- 14 Yin Jun, Lin Ziyang, Qu Junle *et al.*. Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopic imaging technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2477~2484
- 尹君, 林子扬, 屈军乐等. 相干反斯托克斯拉曼散射显微成像技术[J]. 中国激光, 2009, **36**(10): 2477~2484
- 15 Su Guobin, Li Zheng. The dynamic range evaluation of optical receiver in distributed fiber temperature sensor based on Raman back scattering and temperature correction [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4): 475~479
- 苏国彬, 李铮. 分布式光纤喇曼测温系统光接收机的动态范围及测温数据的修正[J]. 光子学报, 2002, **31**(4): 475~479
- 16 Li Wei, Chen Long, Huang Dexiu. Design and implementation of an array optical receiver device of density wavelength-division multiplexing-PIN-TIA for wavelength-division multiplexing passive optical networks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 82~86
- 李蔚, 陈龙, 黄德修. 一种应用于波分复用无源光网络系统中的滤波片-PIN-TIA 阵列光接收组件[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 82~86
- 17 Bo Guangyu, Zhong Zhiqing, Liu Bo *et al.*. Design of optical receiver and signal detection unit for combined Rayleigh-Raman-Mie lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3020~3025
- 伯广宇, 钟志庆, 刘博等. 瑞利-拉曼-米氏激光雷达光学接收和信号检测设计[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 3020~3025
- 18 Zhang Lixun, Liao Yun, Liu Yongzhi *et al.*. Circulation demodulation method for 1.55 μm Raman temperature sensors [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 165~167
- 张利勋, 廖云, 刘永智等. 1.55 μm 喇曼温度传感器的强循环解调方法[J]. 激光技术, 2006, **30**(2): 165~167
- 19 Zhang Lixun, Ou Zhonghua, Liu Yongzhi *et al.*. A circulated demodulated method of distributed fiber Raman temperature sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1176~1178
- 张利勋, 欧中华, 刘永智等. 分布式光纤喇曼温度传感器的循环解调法[J]. 光子学报, 2005, **34**(8): 1176~1178