

文章编号:1004-4213(2011)12-1870-5

# 采用智能温度补偿电路的分布式光纤喇曼温度传感器

余向东<sup>1</sup>,张在宣<sup>1</sup>,祝海忠<sup>2</sup>,金尚忠<sup>1</sup>,刘红林<sup>1</sup>,王剑锋<sup>1</sup>

(1 中国计量学院 光电子技术研究所, 杭州 310018)

(2 杭州欧忆光电科技有限公司, 杭州 310018)

**摘 要:**采用一种智能温度补偿电路对雪崩光电二极管的反偏电压进行温度补偿,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℃ 到 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,采用该温度补偿电路可有效地降低系统的功耗和成本.相对采用热敏电阻的温度补偿电路,该温度补偿电路的温度补偿线性更好,补偿系数设置更灵活.

**关键词:**传感器; 分布式光纤喇曼温度传感器; 温度补偿; 温度漂移

**中图分类号:** TN253; O437.3

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114012.1870

## 0 引言

分布式光纤喇曼温度传感器 (Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor, DOFS) 具有安全性高、抗电磁干扰、连续线性测温、耐腐蚀等特点,已在国内外大量应用于电力电缆、隧道、煤矿、油井等领域的在线实时温度监测和报警<sup>[1-5]</sup>.在分布式光纤喇曼温度传感器的应用中,系统部件会受环境温度变化的影响而产生温度漂移,进而给测量结果引入误差.在系统中的众多部件中,雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 的温度漂移对系统造成的影响最大.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,又会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<sup>[6]</sup>使其保持温度恒定,或采用温控加偏压修正的办法<sup>[7-8]</sup>,但却增加了系统的成本和功耗.温度补偿电路因其具有成本低、功耗小、可靠性好等优点已在众多系统中得到了广泛的应用.本文介绍一种采用智能式温度补偿电路的分布式光纤喇曼温度传感器系统,该系统采用智能式温度补偿电路对 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,经实验验证可在 0℃ 至 60℃ 环境温度内可靠的

工作.和采用恒温、温控装置的分布式光纤喇曼温度传感器系统相比,采用该温度补偿电路的系统有效地降低了系统的功耗、成本和体积.相对采用热敏电阻的温度补偿电路,该温度补偿电路的温度补偿线性更好,并且温度补偿系数可由软件实时设置,可方便适用于不同类型的 APD.

## 1 系统工作原理

系统原理<sup>[9-14]</sup>框图如图 1.激光驱动器驱动激光二极管发出窄脉冲泵浦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 (Optical Wavelength Division Multiplexer, OWDM) 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喇曼背向散射<sup>[15]</sup>光并分别送给两路光电接收放

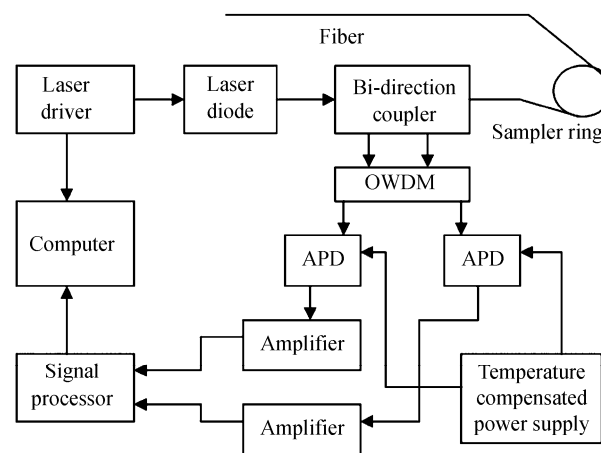


图 1 系统原理框图

Fig. 1 Configuration of DOFS system

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB327804)和浙江省重大科技专项(No. 2009C11049)资助

第一作者:余向东(1968-),男,教授级高工,主要从事分布光纤传感器等光电子技术方向的研究. Email: yuxd@cjl. edu. cn

收稿日期:2011-07-10;修回日期:2011-09-16

大器. 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<sup>[16-17]</sup>、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, 反斯托克斯喇曼散射光作为测量温度信号通道, 斯托克斯喇曼散射光作为测量温度参考通道. 系统的测温表达式为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{K}{H\Delta\nu} \left[ \ln \frac{\frac{\phi_{al}(T)}{\phi_{sl}(T)}}{\frac{\phi_{al_0}(T_0)}{\phi_{sl_0}(T_0)}} + (\alpha_a - \alpha_s)(L - L_0) \right] \quad (1)$$

式(1)中,  $K$  为波耳兹曼常量,  $H$  为普朗克常量,  $\Delta\nu$  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长度,  $T$  为  $L$  处被测温度,  $T_0$  为光纤取样环的温度,  $\alpha_s$ 、 $\alpha_a$  分别为斯托克斯喇曼散射光、反斯托克斯喇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、斯托克斯喇曼散射光子通量,  $\phi_{al}(T)$ 、 $\phi_{sl}(T)$  为  $L$  处被测温度点反斯托克斯、斯托克斯喇曼散射光子通量.

从式(1)可知, 被测温度  $T$  的准确性和式(2)

$$\frac{\phi_{al}(T)/\phi_{sl}(T)}{\phi_{al_0}(T_0)/\phi_{sl_0}(T_0)} \quad (2)$$

的测量准确性有很大的关系. 而式(2)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、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 etc 部件均会受到温度变化而对式(2)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. 从式(2)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式(2)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, 式(2)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)能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关系, 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.

## 2 温度补偿电路

APD 偏置电压温度补偿电路如图 2. 该电路实际上是一个经改装的串联式稳压电路. 图中, 输入电压  $U_i$  为需补偿偏置电压, 输出电压  $U_o$  为已补偿偏置电压, 该电压提供给 APD. 晶体三极管  $T_2$  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  $VR_1$  以及数字电位器  $R_d$  组成串联反馈采样网络,  $U_f$  为反馈采样电压.  $U_f$  和  $U_z$  值之差经放大后送给调整管  $T_1$ , 由  $T_1$  对输出偏置电压  $U_o$  进行调节.

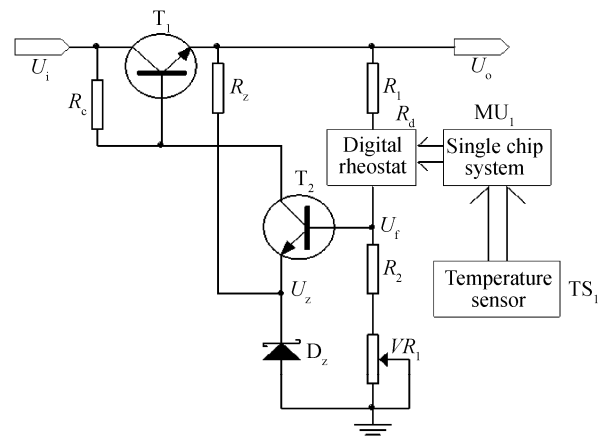


图 2 温度补偿电路

Fig. 2 Temperature Compensating Circuit

设  $R = R_2 + VR_1$ ,  $U = U_z + U_{BE2}$ ,  $R_x = R_1 + R_d$ ,  $U_{BE2}$  为三极管  $T_2$  基极和发射极之间的电压, 由图 2 可得

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

$$U_f = U_o \times R / (R + R_x) \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得

$$U_o = U(R + R_x) / R = U(1 + R_x / R) \quad (5)$$

由式(5)可知, 当  $U$  和  $R$  不变时, 输出电压  $U_o$  随  $R_x$  值的增大而增大, 并且  $U_o$  与  $R_x$  成线性关系.  $R_d$  采用数字电位器并受单片机系统  $MU_1$  控制, 温度传感器  $TS_1$  用于检测环境温度变化, 并将所测环境温度值传送给单片机系统, 单片机系统根据收到的环境温度值变化情况, 实时改变数字电位器的阻值, 从而改变  $U_o$  的输出值. 当环境温度升高时,  $MU_1$  增加  $R_d$  的阻值,  $R_x$  值变大,  $U_o$  变大, 当环境温度降低时,  $MU_1$  降低  $R_d$  的阻值,  $R_x$  值变小,  $U_o$  变小, 由此可起到对输出电压  $U_o$  温度补偿的作用. 采用上述温度补偿电路的好处之一是温度补偿的线性很好, 在整个电路所能承受的环境温度范围内能保持良好的线性, 在这方面该电路要优于采用热敏

电阻的补偿电路<sup>[18]</sup>.此外,该电路的温度补偿系数是可调的,其大小完全由程序设定,这一特点使得该电路可在不变换元件的情况下适用于各种需要不同温度补偿系数的雪崩光电二极管.

### 3 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 $-5^{\circ}\text{C}$ 至 $70^{\circ}\text{C}$ 改变实验温度,大约每隔 $5^{\circ}\text{C}$ 测一点,实测的温度补偿电路输出的APD反偏电压与工作环境温度的关系曲线图如图3所示.从图3看到,在 $-5^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内整个曲线线性较好,基本符合式(5)的理论预期,在该温度范围内温度补偿系数大致为 $0.7\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 左右(适用于硅型APD C30902E),超过 $60^{\circ}\text{C}$ 补偿系数有较大的波动,主要原因和高温区电子元件性能有所下降有关.此外,数字电位器的精度、单片机系统调控的实时性以及测温探头的非线性也是曲线产生波动的一个原因.

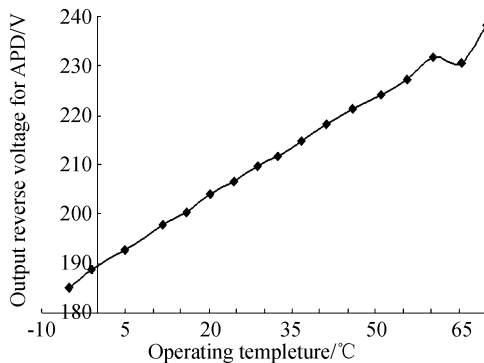


图3 APD反向偏置电压与环境温度关系图  
Fig. 3 APD reverses operating voltage vs. ambient temperature

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喇曼温度传感系统(DOFS)置于环境温度试验箱进行环境温度实验.实验方案图如图4.该系统波长为 $905\text{ nm}$ ,测程为 $2\text{ km}$ ,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 $150\text{ m}$ 光纤长度处并放置在 $54^{\circ}\text{C}$ 的恒温槽内.环境温度试验箱的温度从 $-5^{\circ}\text{C}$ 至 $70^{\circ}\text{C}$ 改变,每间隔 $5^{\circ}\text{C}$ ,并经足够时间的稳定后用系统测量置于 $54^{\circ}\text{C}$ 恒温槽内的光纤环的温度值.为了使测

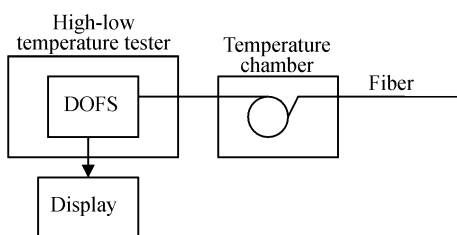


图4 系统温度试验方案图  
Fig. 4 Configuration of temperature test for DOFS system

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.

试验箱内环境温度与用分布传感系统实测的置于 $54^{\circ}\text{C}$ 恒温槽内的光纤环温度值关系曲线图如图5.在 $0^{\circ}\text{C}$ 至 $60^{\circ}\text{C}$ 的范围内,系统实测的光纤环温度值与光纤环所处恒温槽真实值( $54^{\circ}\text{C}$ )的偏差控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的范围内,这其中还包括了系统其它噪声的影响.当环境温度超过 $60^{\circ}\text{C}$ 时偏差逐渐增大,低于 $0^{\circ}\text{C}$ 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 $0^{\circ}\text{C}$ 到 $60^{\circ}\text{C}$ 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式(2)的两次相除作用共同发挥作用的结果,在其中,温度补偿电路发挥了主要作用,式(2)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 $0^{\circ}\text{C}$ 到 $60^{\circ}\text{C}$ 的范围内,温度补偿电路的电压补偿系数较合适,系统其它部件的温漂也在式(2)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 $60^{\circ}\text{C}$ 时,温补电路的补偿系数波动较大,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,最终使得系统的测量偏差变大.

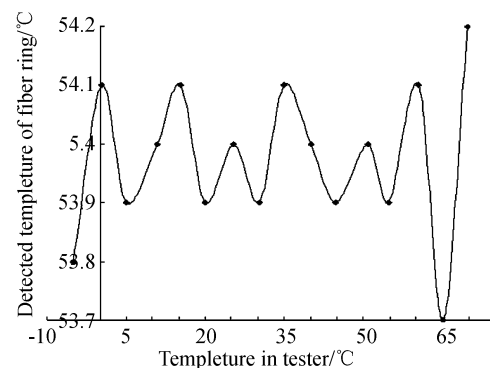


图5 光纤环实测温度与试验箱环境温度关系图  
Fig. 5 Detected temperature of fiber ring vs. temperature in tester

### 4 结论

从上述实验结果可知,采用图2方案的温度补偿电路并结合式(2)的两次相除作用可使系统有效抵制环境温度的影响,在 $0^{\circ}\text{C}$ 到 $60^{\circ}\text{C}$ 的环境温度范围内因温漂引起的测量偏差小于 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ .和采用恒温、控温系统的分布光纤喇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.该温度补偿系统的温度补偿系数可针对不同种类的APD由软件具体设定,应用灵活

方便,可广泛应用于各种不同类型的分布光纤喇曼温度传感器系统中。

#### 参考文献

- [1] ZHANG Zai-xuan, JIN Shang-zhong, WANG Jian-feng, *et al.* Distributed optical fiber Raman photon sensor research review [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(11):2749-2761.  
张在宣,金尚忠,王剑锋,等.分布式光纤拉曼光子温度传感器的研究进展[J].中国激光,2010,**37**(11):2749-2761.
- [2] JIA Zhen-an, ZHOU Xiao-bo, QIAO Xue-guang, *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现状及趋势[J].光通信技术,2008,**11**:36-39.
- [3] 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.
- [4] CHEN Ji-xuan, GONG Hua-ping, ZHANG Zai-xuan. 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.
- [5] WANG Zhong-dong, YAN Tie, WANG Bao-hui, *et al.* Optical fiber pre-warning system for safety of oil pipelines[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(4):576-582.  
王忠东,闫铁,王宝辉,等.光纤式输油管道安全预警系统[J].光学技术,2008,**34**(4):576-582.
- [6] CHANG Sheng, LI Wei-liang. 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.
- [7] LI Shui-bing, WANG Yu, ZHAO Jian-kang, *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 APD 增益稳定的研究[J].光电子技术,2009,**29**(3):168-170.
- [8] CHANG Cheng, LI Zheng, ZHOU Yin-qing, *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.
- [9] MARCELO A S, TIZIANO N, ALESSANDRO S, *et al.* Raman-based distributed temperature sensor with 1m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(13):2557 - 2559.
- [10] GABRIELE B, JONGHAN P, MARCELO A S, *et al.* Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, **18**:3211-3218.
- [11] SONG Mu-ping, BAO Chong, YE Xian-feng. Raman distributed optical fiber sensor with simplex coding optical external modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(6):1462 - 1466.  
宋牟平,鲍翀,叶险峰.采用 Simplex 编码光外调制的拉曼散射分布式光纤温度传感器[J].中国激光,2010,**37**(6):1462-1466.
- [12] LI Wei-liang. Frequency parameters for an optical fiber sensor system based on frequency domain Raman reflectometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):86-90.  
李伟良.光频域喇曼反射光纤温度传感器的频域参量设计[J].光子学报,2008,**37**(1):86-90.
- [13] GENG Jun-ping, XU Jia-dong, LI Yan, *et al.* Theoretical analysis of the fully distributed fiber optic sensor based on Raman optical-fiber frequency-domain reflectometry (ROFDR) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10):1261-1265.  
耿军平,许家栋,李焱,等.基于光频域喇曼散射的全分布式光纤温度传感器模型研究[J].光子学报,2002,**31**(10):1261-1265.
- [14] ZHANG Zaixuan, WANG Jianfeng, LIU Honglin, *et al.* Experimental research of 30 km long distance optical fiber Raman temperature sensor system [J]. *Chinese Journal of 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.
- [15] ZHANG Zai-xuan, INSOO S K, WANG Jian-feng, *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,INSOO S K,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.
- [16] ZHANG Li-xun, LIAO Yun, LIU Yong-zhi, *et al.* Circulation demodulation method for 1.55  $\mu\text{m}$  Raman temperature sensors [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2):165-167.  
张利勋,廖云,刘永智,等.1.55  $\mu\text{m}$  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.
- [17] ZHANG Li-xun, OU Zhong-hua, LIU Yong-zhi, *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.
- [18] YU Xiang-dong, ZHANG Zai-xuan, ZHU Hai-zhong, *et al.* A temperature compensating circuit for distributed optical fiber Raman temperature sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(6):1440-1444.  
余向东,张在宣,祝海忠,等.一种应用于分布式光纤拉曼温度传感器的温度补偿电路[J].中国激光,2010, **37**(6):1440-1444.

## An Intelligent Temperature Compensating Circuit for Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor

YU Xiang-dong<sup>1</sup>, ZHANG Zai-xuan<sup>1</sup>, ZHU Hai-zhong<sup>2</sup>, JIN Shang-zhong<sup>1</sup>,  
LIU Hong-lin<sup>1</sup>, WANG Jian-feng<sup>1</sup>

(1 *Institute of Optoelectronics, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

(2 *Hangzhou OE Optoelectronics Technology Co., Ltd, Hangzhou 310018, China*)

**Abstract:** An intelligent temperature compensating circuit is used to compensate the avalanche photodiode reverse bias voltage for offsetting the impact of environmental temperature on the avalanche photodiode, thus reducing the temperature drift of the system. Using this technology, the system measurement error caused by ambient temperature drift can be controlled within  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  from  $0^\circ\text{C}$  to  $60^\circ\text{C}$ . Compared with traditional constant temperature devices, using temperature compensating circuit can effectively reduce system power consumption and cost. This circuit has better temperature compensation linear, and is more flexible for compensation coefficient setting than the circuit using thermistor.

**Key words:** Sensor; Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor (DOFS); Temperature compensation; Temperature drift