

激光拉曼型分布光纤温度传感器系统*

张在宣 刘天夫 张步新 陈 阳 陈晓竹
(中国计量学院光电子研究所, 杭州 310034)

摘 要 激光拉曼型分布光纤温度传感器系统是一种用于实时测量空间温度场分布的光纤传感系统, 在系统中光纤既是传输媒体也是传感媒体。本文讨论了系统的工作原理、设计思想、系统的结构, 在系统中采用了光纤的光时域反射(OTDR)技术, 背向光纤激光自发拉曼光谱技术, 双波长、双通道光电检测和自校正技术, 高速瞬态采样平均技术。在1 km 传感光纤上采样200点并能对测温点定位; 在0~120℃范围内测温不确定度 $\pm 2^\circ\text{C}$; 测温分辨率0.1℃。

关键词 分布光纤温度传感器, 光纤背向拉曼散射, 光时域反射技术(OTDR)。

1 引 言

分布光纤温度传感器系统(Distributed Optical Fiber Temperature Sensor System 简称DOFTSS)是一种用于实时测量空间温度场分布的传感系统^[1~3]。在此系统中光纤既是传输媒体也是传感媒体。利用光纤拉曼散射的温度效应, 光纤所处空间各点的温度场调制了光纤中传输的光载波, 经波分复用器、光电检测器解调后, 采集了空间温度信息, 再经放大、信号处理系统, 将温度信息实时显示出来(类似于光通信系统); 利用光纤的光时域反射(OTDR)技术, 由光纤中的传播速度和背向光回波的时间, 能对所测温度点定位(类似于光雷达系统)。分布光纤温度传感器系统在一条1公里长的光纤上可实时采样200个点并能对测温点定位; 在0~120℃范围内测温的不确定度可达到 $\pm 2^\circ\text{C}$, 测温分辨率0.1℃。

分布光纤温度传感器系统(DOFTSS)是近年来在光纤的光时域反射(OTDR)技术、激光拉曼光谱技术、双波长、双通道微弱信号检测技术、高速瞬态波形采样、平均技术基础上发展起来的一种光、机、电、计算机一体化的高新技术。

2 光纤背向拉曼散射的温度效应

激光脉冲耦合进光纤, 在光纤中传播并与光纤相互作用, 除了与泵浦激光频率一致的瑞利散射(弹性散射)和光纤端的菲涅尔反射外, 还有受光纤分子振动频率调制的拉曼散射光谱、布里渊散射光谱(均属非弹性散射), 随着光纤的温度升高, 拉曼散射光谱信号增强, 即拉曼散射光谱信号受到温度场的调制, 经光电检测解调后即可得到温度场的信息。

* 本工作得到国家经贸委产学研办公室、国家技术监督局科技项目资助。

收稿日期:1994年8月14日; 收到修改稿日期:1994年12月8日

2.1 光纤激光拉曼光谱

激光脉冲与光纤分子相互作用产生拉曼散射光谱信号, 光纤拉曼散射光谱分成两个区: 光频率低于泵浦激光频率的称为斯托克斯拉曼光谱; 光频率高于泵浦激光频率的称为反斯托克斯拉曼光谱。

斯托克斯拉曼散射光谱:

$$\nu_s = \nu_0 - \Delta\nu \quad (1)$$

反斯托克斯拉曼散射光谱:

$$\nu_a = \nu_0 + \Delta\nu \quad (2)$$

$\Delta\nu$ 是光纤分子的振动频率, 对于通信光纤 $\Delta\nu = 440 \text{ cm}^{-1}$, 拉曼散射频率与分子振动能级图如图 1 所示。

采用光纤光谱仪测量了光纤的激光拉曼光谱, 斯托克斯拉曼散射光谱信号要比反斯托克斯拉曼散射光谱信号强得多。

2.2 背向拉曼散射光谱的温度效应^[4]

背向拉曼散射光强度由能级上的布居、拉曼散射截面、入射激光的能量和光纤的背向散射因子所决定, 拉曼散射光时域反射曲线的背向拉曼散射光的强度分别为

$$I_s = K_s \lambda_s^{-4} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)X] R_s(T) \int_{-\tau_0}^{\tau_0} P(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$I_a = K_a \lambda_a^{-4} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)X] R_a(T) \int_{-\tau_0}^{\tau_0} P(\tau) d\tau \quad (4)$$

式中: K_s, K_a 为一个与拉曼散射截面、拉曼频率处光纤双工器的耦合效率和光纤的背向散射因子等有关的系数; λ_s, λ_a 分别为斯托克斯与反斯托克斯拉曼散射光波长; $\alpha_0, \alpha_s, \alpha_a$ 分别为波长 λ_0 (泵浦波长), λ_s, λ_a 时的光纤损耗系数; X 为光纤入射端到被测点的距离; $P(\tau)$ 为激光二极管的瞬时功率; $2\tau_0$ 为激光脉冲宽度; R_s, R_a 分别与分子拉曼散射上、下能级的布居数有关, 分子能级上的布居数依赖于光纤温度;

$$R_s = [1 - \exp(-hc\Delta\nu/kT)]^{-1} \quad (5)$$

$$R_a = \exp(-hc\Delta\nu/kT) / [1 - \exp(-hc\Delta\nu/kT)] = [\exp(hc\Delta\nu/kT) - 1]^{-1} \quad (6)$$

斯托克斯拉曼散射光的相对强度:

$$I_s/I_{s0} = R_s/R_{s0} = [1 - \exp(-hc\Delta\nu/kT_0)] / [1 - \exp(-hc\Delta\nu/kT)] \quad (7)$$

反斯托克斯拉曼散射光的相对强度:

$$I_a/I_{a0} = R_a/R_{a0} = [\exp(hc\Delta\nu/kT_0) - 1] / [\exp(hc\Delta\nu/kT) - 1] \quad (8)$$

在分布光纤温度传感器系统设计中, 为了消除环境的干扰、光纤弯曲、接头的损耗和激光二极管输出的不稳定性, 采用了双通道双波长比较的方法, 将反斯托克斯拉曼散射光作为信号通道, 而斯托克斯拉曼散射光作为比较通道, 则两者之强度比为:

$$F(T) = I_a/I_s = (\lambda_a/\lambda_s)^{-4} \exp(-hc\Delta\nu/kT) \quad (9)$$

$$\frac{1}{T} = -\frac{k}{hc\Delta\nu} \left[\ln F + 4 \ln \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right) \right] \quad (10)$$

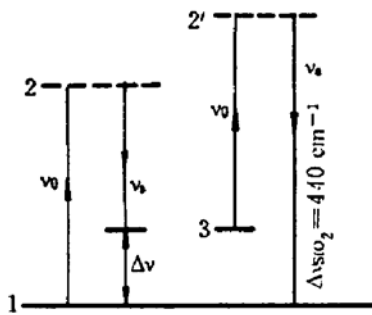


Fig. 1 The energy level diagram of Raman scattering

由(10)式得到分布光纤温度传感器系统的温度灵敏度

$$S(T) = \frac{dF}{dT} = \frac{hc\Delta\nu}{kT^2} F \tag{11}$$

对于一个固定的温度点 T_0 (标定温度)

$$\frac{1}{T_0} = -\frac{k}{hc\Delta\nu} [\ln F_0 + 4 \ln (\frac{\lambda_a}{\lambda_s})] \tag{12}$$

由式(10)~(12), 得

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{hc\Delta\nu} [\ln F - \ln F_0] = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{hc\Delta\nu} [\ln (F/F_0)] \tag{13}$$

因此, 在分布光纤温度传感器系统定标后, 可以通过测定 F 的比值确定分布光纤温度传感器系统光纤各点的温度值, 从而确定了空间温度场的分布。

在 $T_0 = 273 \text{ K}$ 时, 由(7)、(8)和(9)式可计算得到光纤反斯托克斯拉曼散射光相对强度 I_s/I_{s0} 、斯托克斯拉曼散射光相对强度 I_s/I_{s0} 和反斯托克斯拉曼散射光与斯托克斯拉曼散射光比值的相对强度 $F(T)/F(T_0)$ 的温度曲线, 见图 2。

在 $0 \sim 120^\circ\text{C}$ 测温范围内, I_s/I_{s0} 、 $F(T)/F(T_0)$ 和 I_s/I_{s0} 的平均温度灵敏度分别为 $1.078\%/K$ 、 $0.851\%/K$ 和 $0.106\%/K$, 随温度变化, 温度灵敏度也变。

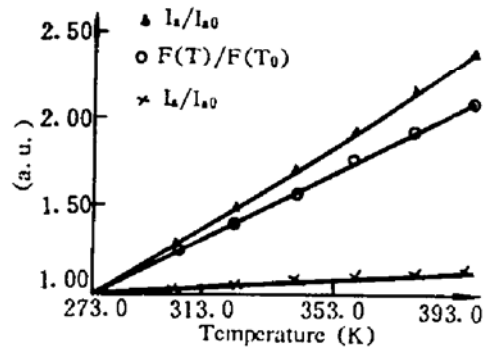


Fig. 2 The temperature curves of relative Raman scattering intensity ratio of optical fiber

3 分布光纤温度传感器系统(DOFTSS)

分布光纤温度传感器系统由脉冲半导体激光二极管系统(LD)、双向耦合器(BDC)、光纤传感回路(optical fiber loop)、光学波分复用器(OWDD)、光电检测系统、信号处理系统(S. P.)和计算机系统等七部分组成, 如图 3 所示。

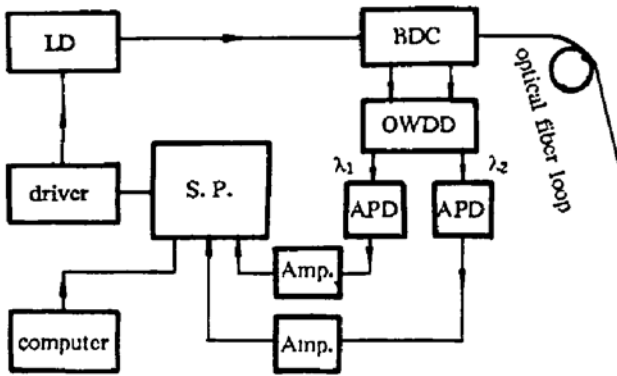


Fig. 3 The configuration of DOFTSS

这里, Driver 为激光二极管的驱动电源, APD. 为硅雪崩光电二极管前放组件, Amp. 为主放大器。激光脉冲通过双向耦合器进入光纤, 光纤各点带有温度信息的拉曼散射回波信号, 通过双向耦合器和波分复用器, 分成两个通道, 一个通道是反斯托克斯拉曼光谱信号; 另一个通道是斯托克斯拉曼光谱信号, 两个通道分别进入光电检测系统, 由于信号是十分弱的, 淹没在噪声中, 因此需要用高速采样及信号累加平均技术把信号提取出来, 然后将温度比较灵敏的反斯托克斯拉曼信号与斯托克斯拉曼信号相比, 来解调测温。由计算机系统实现信号处理及显示功能。

4 实验结果和讨论

4.1 拉曼光时域反射曲线和温度场空间分布曲线

分布光纤温度传感器系统中, 激光的激发波长 $\lambda_0 = 905 \text{ nm}$ ($\sigma_0 = 11050 \text{ cm}^{-1}$), 光纤的拉曼位移 $\Delta\nu = 440 \text{ cm}^{-1}$, 则反斯托克斯拉曼散射波长 $\lambda_a = 870.3 \text{ nm}$ ($\sigma_a = 11490 \text{ cm}^{-1}$), 斯托克斯拉曼散射波长 $\lambda_s = 942.5 \text{ nm}$ ($\sigma_s = 10610 \text{ cm}^{-1}$)。在 1 Km 光纤中将两个光纤绕组放置在 $T = 352 \text{ K}$ (79°C) 的恒温槽中, 其余光纤均处于室温 $T_0 = 287 \text{ K}$ (14°C) 中, 在分布光纤温度传感器系统的显示屏上, 所得到的反斯托克斯拉曼散射光强度 I_a 和斯托克斯拉曼散射光强度 I_s 的光时域反射曲线和相应的温度分布曲线(经实际校正后的), 如图 4 所示。

Table 1. temperature measurement results ($0 \sim 120^\circ\text{C}$)

unit: $^\circ\text{C}$

value of standard thermometer	FGC-W1 value	deviation
0.0	0.2	+0.2
25.9	26.4	+0.5
29.2	28.7	-0.5
40.1	39.0	-1.1
49.6	49.6	0.0
59.5	58.9	-0.6
69.2	69.8	+0.6
79.8	80.1	+0.3
89.6	89.8	+0.2
105.0	105.8	+0.8
124.3	125.8	+1.5
129.3	131.2	+1.8

4.2 温度分度和稳定性、重复性测量结果

在分布光纤温度传感器系统处于正常工作状态后, 将待测的光纤传感头与标准水银温度计(其分度值为 0.1°C , 经修正后的不确定度为 0.05°C) 放置在超级恒温槽($\pm 0.05^\circ\text{C}$) 的同一温区, 在恒温槽内的温度稳定之后, 同时读出分布光纤温度传感器系统计算机显示屏上的测量值和标准水银温度计的读数值进行比较。在 $0 \sim 120^\circ\text{C}$ 温区内在升温 and 降温过程中每隔一、二十度进行重复测量。表 1 列出了分度测量结果。实测结果: 测温不确定度 $< \pm 2^\circ\text{C}$; 温度分辨率 0.1°C ; 线性度优于 $\pm 1.0^\circ\text{C}$; 对于连续测量 8 小时和不同天测量的稳定性、重复性也满足测温不确定度的要求。

4.3 系统的空间分辨率

根据瑞利分辨判据, 在传感光纤的某一点 X_0 处产生一个 $\Delta T = T_1 - T_0$ 的阶跃变化, 当用分布光纤温度传感器系统测量时, 由于激光器脉宽、硅雪崩二极管前放组件的响应、主放大器和高速瞬态采集卡频带宽度的限制, 阶跃的上升变为一个缓慢上升过程, 温度由 T_0 到 T_1 变化所对应的空间距离为空间分辨率。FGC-W1 系统的自由光纤空间分辨率的实测结果小于 10 m, 光纤绕组点探头的局部空间分辨率为 4 cm。

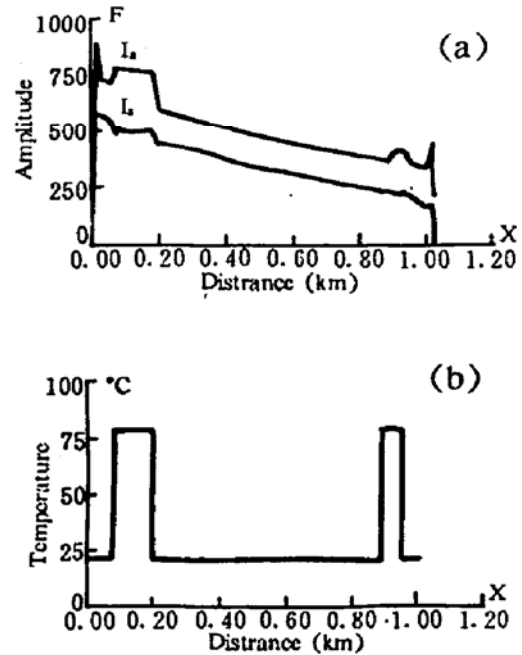


Fig. 4 (a) curves of I_a , I_s ,
(b) temperature distributed curve

结 论 本文研制的 FGC-W1 激光拉曼型分布光纤温度传感器系统已正式通过国家技术监督局科技司主持的专家鉴定会的鉴定, 是国内首次正式鉴定的光机电和计算机一体化的整

机, 根据高等学校项目咨询及科技成果查询中心站于 1994 年 3 月对国内外文献资料和专利的查询、分析所作的科技查新报告, 综合技术指标优于国内文献报导的同类系统, 并相当于国外当前技术水平。

在研制工作的前期, 曹明、陈庆根、林旦等先后参与了工作, 表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] J. P. Dakin, Optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(13): 569~570
- [2] A. H. Hartog, A. P. Leach, M. P. Gold, Distributed temperature sensor in solid-core fibers. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(23): 1061~1062
- [3] A. J. Rogers, Distributed optical-fiber sensors for the measurement of pressure, strain and temperature. *Physics Reports*, 1988, **169**(2): 99~143
- [4] Zhang Zaixuan(张在宣), Liu Tianfu(刘天夫), Zhang Buxin(张步新) *et al.*, Laser Raman spectrum of optical fiber and the measurement of temperature field in space. *Proc. SPIE*, 1994, **2321**: 186~190
- [5] P. J. Samson, Analysis of the wavelength dependence of Raman back-scatter in optical fiber thermometry. *Electron Lett.*, 1990, **26**(3): 163~165
- [6] 张在宣, 分布型光纤传感(DOFT)系统的可靠性分析. 变压器, 1992, **29**(2): 2~6

Laser Raman-Type Distributed Optical Fiber Temperature Sensor System

Zhang Zaixuan Liu Tianfu Zhang Buxin
Chen Yang Chen Xiaozhu

(Chinese Institute of Metrology, Institute of Opto-Electronic Technology, Hangzhou 310034)

(Received 14 August 1994; revised 8 December 1994)

Abstract A laser Raman-type distributed optical fiber temperature sensor system is developed for the real-time measurement of temperature field in space. In this system, the optical time domain reflection (OTDR) technique of optical fiber, laser Raman scattering spectrometry, two-wavelength two channel detection technique and high speed instantaneous wave-shape and sample average technique etc. are applied. The typical performance of the system are given.

Key words distributed optical fiber temperature sensor, back-direction Raman scattering of optical fiber, optical time domain reflection(OTDR).