

# 光纤后向拉曼散射的温度特性及其应用\*

刘天夫 张步新 陈阳 陈晓竹 张在宣

(中国计量学院光电子研究所, 杭州 310034)

**提要** 利用波长为 905 nm, GaAs 大功率半导体脉冲激光器为泵浦光源, 采用光时域反射 OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) 技术, 以及高速采样平均技术对芯径为 50/125  $\mu\text{m}$ , 1 km 长的 GI 多模光纤的后向散射光光谱进行了分析与测量。着重研究了光谱成份中, 强度仅为入射光强的  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  极其微弱的反斯托克斯散射光的温度特性及其应用——分布光纤温度传感系统。

**关键词** 光时域反射技术, 后向散射, 多模光纤, 反斯托克斯散射光, 斯托克斯散射光, 波分复用器, 1×3 路双工器

## 1 引言

随着光纤在通信、传感等应用领域的发展, 人们对光纤中种种非线性效应及散射过程的研究越来越感兴趣。众所周知, 光纤中散射过程可分为三种类型: 一种是由于光纤折射率的微小涨落而引起的瑞利散射<sup>[1]</sup>; 还有一种是因热振动声子而产生的布里渊散射<sup>[2]</sup>; 另外还有一种是由于光子与光声子的相互作用而引起的拉曼散射过程<sup>[3]</sup>。其中, 瑞利散射波长不发生变化, 它在光纤传播过程中只存在强度的损耗。因此, 可以利用光学雷达原理, 通过观测光纤后向瑞利散射光的波形, 来断定光纤的长度、接头损耗大小及外界应力等信息, 这就是近年来在光纤工程中应用十分广泛的 OTDR 技术。而另外两种散射, 皆因伴随有与声子能量交换的复杂过程, 因此它们的波长都要发生“频移现象”, 并且它们的强度都与温度有密切的关系<sup>[4]</sup>。

由于光纤中非线性光学效应十分微弱, 特别是对温度十分敏感的反斯托克斯信号更加微弱, 它们仅为入射光强的  $10^{-9}$  量级左右<sup>[5]</sup>。因此, 我们所感兴趣的拉曼散射光信号完全被淹没在噪声之中, 这也正是该项工作的困难之处。为此, 实验中我们精心设计了光学部件及软硬件结构, 并采用高增益、低噪声放大电路及高精度、高速 A/D 变换等电路构成了光电微弱信号的处理系统。

## 2 光纤后向拉曼散射特性

### 2.1 光纤后向散射光光谱的测量

由于光纤中拉曼散射信号十分微弱, 在测量中为了增加干涉滤光片的隔离度、提高信噪

\* 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12月12日; 收到修改稿日期: 1995年2月20日

比,需要对光纤后向散射信号进行测量。图 1 示出了测量光纤后向散射光光谱的实验装置图。图中脉冲驱动源直流内阻小于  $1 \Omega$ , 输出脉宽为  $50 \text{ ns}$ , 重复频率选为  $1 \text{ kHz}$ 。泵浦光源采用 GaAs 半导体激光器, 中心波长为  $905 \text{ nm}$ , 由  $44 \text{ W}$  型单色仪测得其发光光谱如图 2 所示。由图 2 可见, 泵浦光源的光谱宽度为  $5 \text{ nm}$  左右。

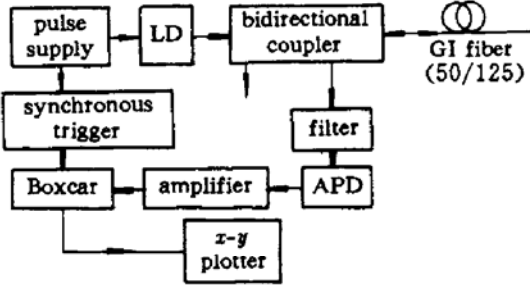


Fig. 1 Experimental arrangement for Raman backscattering measurement avalanche photodiode

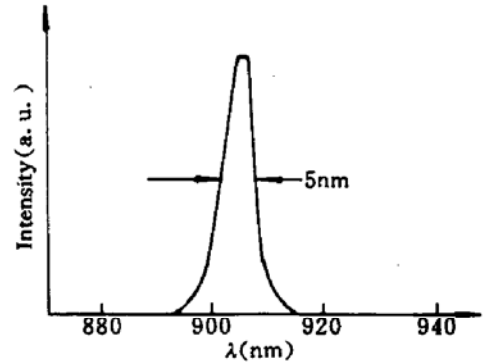


Fig. 2 Spectrum of light source

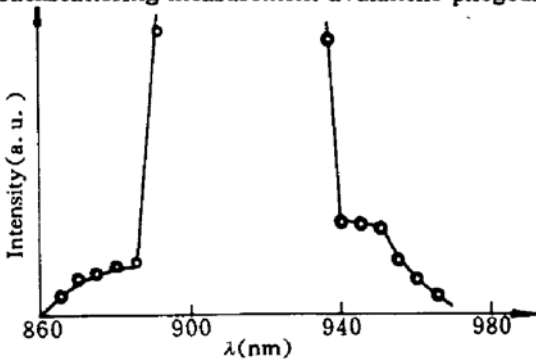


Fig. 3 Spectrum of backscattering light

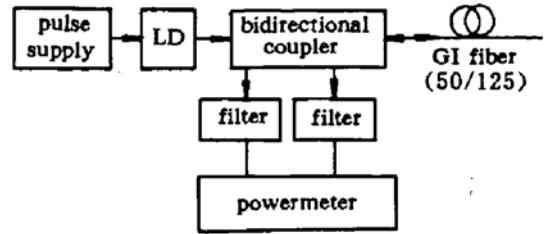


Fig. 4 Experimental arrangement for the measurement of input power dependence of Raman backscattering intensity

为了提高激光耦合效率,尽可能减少系统的光功率传输损耗,我们对  $1 \times 3$  路双工器及波分复用器的结构、工艺采取了许多有效的措施和办法<sup>[6]</sup>。同时,为了测量后向散射光光谱,波分复用器选用 20 组分立的高性能干涉滤光片作为分光器件,它们的中心波长间隔为  $5 \text{ nm}$ ,并具有优于  $35 \text{ dB}$  的隔离度。由于拉曼信号十分微弱,我们对偏离泵浦光源中心波长  $\pm 37 \text{ nm}$  处左右光谱位置的散射光信号经两级放大后,进入 QYJ-I 型定点取样积分器,测得的光纤后向散射光光谱如图 3 所示。由图 3 可见,在中心波长  $905 \text{ nm}$  处是极强的瑞利散射光,而且频宽比半导体激光光谱宽许多,扩展在  $890 \sim 935 \text{ nm}$  之间,其原因主要是因为受到滤光片隔离度的限制而混漏的瑞利散射光所致。波长在  $945 \text{ nm}$  以上和  $875 \text{ nm}$  以下时,由于滤光片的分光特性,可以把混漏的瑞利散射光抑制在万分之五以下,并且可以清楚地看到在  $870 \text{ nm}$  处光谱有小凸起,它就是反斯托克斯光,在中心波长右侧  $942 \text{ nm}$  处的凸起是斯托克斯光。这和理论值因 Si-O 原子热振动的拉曼频移量  $440 \text{ cm}^{-1}$  及其掺杂 Ge-O 原子热振动拉曼频移  $420 \text{ cm}^{-1}$  所对应的波长完全一致<sup>[7]</sup>。

### 2.2 光纤后向拉曼散射与入射光强的关系

为了观测后向拉曼散射与入射光强的关系,我们采用了图 4 所示的实验装置图。从图 4 可见,由  $1 \times 3$  路双工器分出两路后向散射光,分别进入由中心波长为  $875 \text{ nm}$ (反斯托克斯光)与  $945 \text{ nm}$ (斯托克斯光)滤光片组成的波分复用器,其输出用 GJ-I 型快速微光功率计测量。通

过改变半导体激光器驱动电源的电压,使入纤功率控制在 40~400 mW 之间变化,测得室温 (31 °C) 条件下的结果如图 5 所示。

Table 1 Intensity of backscatter light

Variety	Relative intensity
Rayleigh backscatter	-46 dB
Stokes backscatter	-69 dB
Anti-Stokes backscatter	-74 dB

Table 2 Loss of Raman backscatter signal

Variety	Loss
Stokes backscatter	3.7 dB/km
Anti-Stokes backscatter	4.3 dB/km

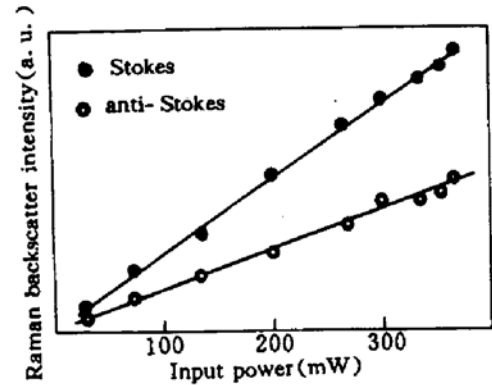


Fig. 5 Input power dependence of Raman backscattering intensity

从图 5 可以看出,斯托克斯散射光和反斯托克斯散射光都与入射光强度成线性关系;并且在相同温度条件下,反斯托克斯散射比斯托克斯散射光强弱 10 倍左右,这与理论分析结果相一致。此外,我们以入射光强为基准,测得各种散射光光强度的结果如表 1 所示。对光纤中拉曼散射光的传输损耗大小测得结果如表 2 所示。实际上,我们测得的后向拉曼散射光强的大小,是光纤各点的拉曼散射光经过往返传输损耗后的强度值。由于斯托克斯与反斯托克斯光波长不同,因此在光纤中的传输损耗也不相同。这一点从表 2 测得的结果可以清楚地看出,它与光纤的传输损耗和波长关系特性曲线完全一致。

### 2.3 光纤后向拉曼散射的温度特性

为观测光纤后向拉曼散射的温度特性,我们采用如图 4 所示的实验装置,并将 1 km 光纤全部放入可控恒温槽内。由两路干涉型波分复用器分别把斯托克斯与反斯托克斯光信号送入 GJ-I 型快速微光功率计进行测量,如果把在室温 (31 °C) 下光纤后向反斯托克斯光强作为基准,并调恒温槽温度,使其在 0~100 °C 范围内变化,测得反斯托克斯与斯托克斯光强相对于基准光强的变化如图 6 所示。此时,我们还可以计算出光纤后向拉曼散射对温度变化的速率,其结果如表 3 所示。

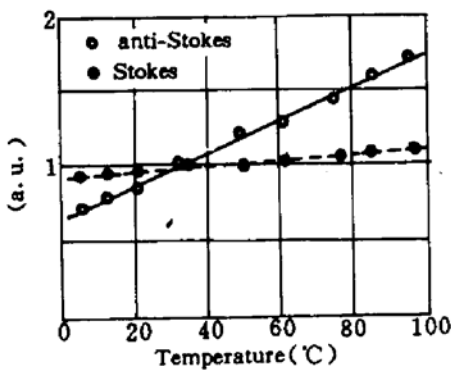


Fig. 6 Temperature dependence of Raman backscattering intensity

Table 3 Temperature sensitivity of Raman backscatter intensity

Variety	Temperature rate
Stokes backscatter	0.1%/°C
Anti-Stokes backscatter	0.6%/°C

由以上结果可以看出,虽然光纤后向斯托克斯与反斯托克斯光强都随温度升高呈指数增长的关系,但从实验结果可以看出,反斯托克斯光强随温度的变化更加显著,这与理论分析结果一致。由表 3 可以看出,反斯托克斯光强对温度的敏感度比斯托克斯约大 6 倍左右。

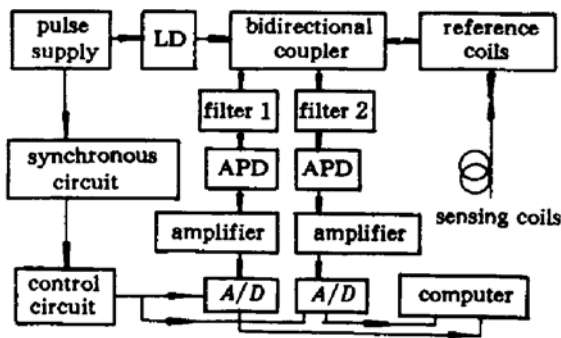


Fig. 7 Structure of a distributed temperature sensor

### 3 光纤后向拉曼散射的应用

#### 3.1 分布光纤温度传感器

综合上述实验及结果,我们研制的分布光纤温度传感器如图 7 所示,它的工作原理是基于光纤后向拉曼散射的温度特性。由于代表光纤各点温度信息的是幅值不等的拉曼散射光脉冲信号,所以根据光波在介质中的传播速度并利用 OTDR 技术,观测光纤后向反斯托克斯散射光信号的相对往返时间及其幅值大小,就可以精确地

检测出光纤所有各点的即时温度及其变化情况<sup>[9]</sup>。系统的传感光纤全长 1 km,其中 50 m 放入标准恒温槽中作温度定标用。如图 7 所示,光纤后向散射光由 1×3 路双工器分成两路,分别进入中心波长为 875 nm(反斯托克斯光)、偏离中心波长 17 nm 隔离度优于 35 dB,和中心波长为 945 nm(斯托克斯光)、偏离中心波长 20 nm 隔离度优于 35 dB 的两组干涉滤光片组成的波分复用器分光系统。因从两路波分复用器输出的斯托克斯与反斯托克斯光信号非常微弱,所以我们采用了高灵敏度并带有前置放大器的雪崩二极管进行光电转换。尽管如此,有用信号仍然被淹没在系统的噪声中。为此,我们设计了低噪声、高动态范围、宽频带主放大器对光电信号进行两级放大后进入高速 A/D 变换系统。其温度的测量,是通过反斯托克斯与斯托克斯光强之比来确定的,即

$$I_{as}/I_s \propto \exp(hc\Delta\nu/kT) \quad (1)$$

式中, $I_{as}$ 为反斯托克斯散射光光强度, $I_s$ 为斯托克斯散射光光强度, $h$ 为普朗克常数, $c$ 为真空中的光速, $\Delta\nu$ 为拉曼频移量, $k$ 为波尔兹曼常数, $T$ 为绝对温度。由于其比值只与温度有关<sup>[9]</sup>。采用两者比值确定温度的最大优点是可以消除因为光纤种种变动产生的应力、损耗,或因激光功率的变化而引起的测量误差。

系统中,测温空间分辨能力是分布光纤温度传感器特有的物理量,它主要决定于两个因素:一是泵浦光源的脉冲宽度,另外是 A/D 变换系统中的采样脉冲宽度。系统的最高测温空间分辨能力在数值上等于上述两个宽度时间的最大者对应光波的行进距离的一半(往返值)。例如在我们的系统中,泵浦光源输出脉冲宽度为 100 ns,所以测温的空间分辨能力最高也只能为 10 m。另一方面,为了提高系统的信噪比  $S/N$ ,在信号处理过程中,我们采用了多次平均累加技术。利用计算机系统累加  $2^{14}$  次平均,大约需要 38 s 左右。根据定标温度由计算机给出传感光纤分布温度的准确值,表 4 列出了我们通过国家技术监督局科技司主持鉴定的系统的主要特性参数。

#### 3.2 测温实例

在测温实验中,为了同时观测空间分辨能力对测温结果的影响,我们在传感光纤的尾端部位,绕制了五个长度分别为 2, 5, 8, 10, 15 m 直径均为 5 cm 的光纤环,且每个环的间隔均为 20 m。将这五个环同时置入 70 °C 的恒温槽内进行测温实验。经系统累加  $2^{14}$  次后,测得的拉曼信号及温度结果如图 8 所示。为了与系统的 A/D 变换带宽相适应,同时增加泵浦光脉冲宽度可以提高入纤能量、改善信噪比,因此,我们在样机系统中把半导体激光脉冲宽度由 50 ns 增加到 100 ns,由它所决定的光纤的温度空间分辨能力为 10 m。这一点,从图 8 的实验结果也可以

清楚地看出,由 10~15 m 两个光纤环测得的温度值是恒温槽的实际温度值,而由 2~8 m 的三个光纤环测得的温度比恒温槽实际温度值要低。

**Table 4 Characters of the distributed temperature sensor**

Characters	Criterion
Temperature range measurement	-50~150 °C
Accuracy	±2 °C
Spatial resolution	10 m
Measurement Range	2 km

## 4 结 论

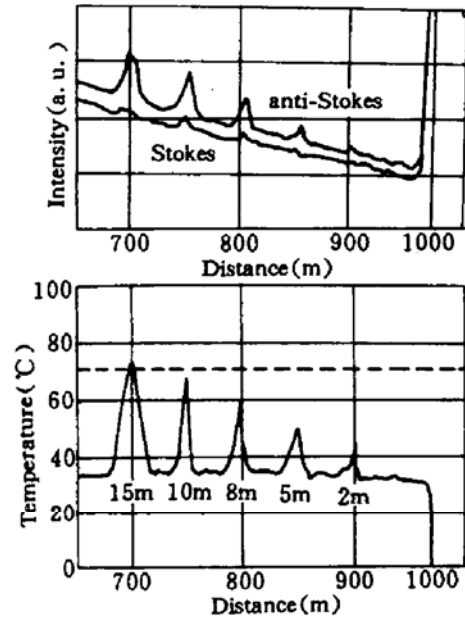
通过对 50/125 μm 的 GI 多模普通通信光纤的实验结果表明,光纤中拉曼效应及其温度关系等实验结果与理论预测完全一致。它表明,利用光纤后向拉曼散射效应,可以制成一种连续多点高精度测温的新型传感系统——分布光纤温度传感器。

这种传感器使用柔软、芯径细小、本身绝缘的光纤作为感知并传送温度信号的媒体,因此系统具有不受任何电磁场干扰、安全、可靠等特点。并且可以对任何形状复杂、环境恶劣的温度、压力等信息实现在线检测和定位。因此,可以预测今后它将会取代传统的单点热电偶测温方式,并将广泛地应用于电站、矿井、大型变压器、地下管路、隧道及高层建筑等场合的温度检测及火灾预报等系统。

今后,我们拟将进一步开展超长距离传感和高空间分辨能力的分布光纤温度传感系统的研究工作。

## 参 考 文 献

- 1 A. H. Hartog. A distributed temperature sensors based on liquid-core optical fibers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1983, LT-1(3): 498~509
- 2 T. Horiguchi, M. Tateda. BOTDA Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction; Theory. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(8): 1170~1176
- 3 A. H. Hartog, A. P. Leach, M. P. Gold. Distributed temperature sensor in solid-core fibers. *Electron Lett.*, 1985, 21(23): 1061~1062
- 4 倉嶋利雄, 堀口常雄, 立田先広等. 石英系光ファイバにおける Brillouin 周波数シフトの温度依存性. 信学技報, 1989, CS9-3: 144~152
- 5 塩田. OTDR を用いた分布型温度センサ. センサ技術, 1987, 7(8): 41~43
- 6 Zhang Zaixuan, Liu Tianfu, Zhang Buxin et al.. Laser Raman spectrum of optical fiber and the measurement of temperature field in space. *SPIE*, 1994, 2321: 186~190
- 7 F. L. Galecmer, J. C. Mikkelsen, R. H. Geils et al.. The relative Raman cross section of vitreous SiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, 32(1): 670~677
- 8 J. P. Dakin, D. J. Pratt. Optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electron Lett.*, 1985, 21(13): 569~570
- 9 戸崎達哉, 加藤正巳, 稻田浩一等. 光ファイバのラマン散乱特性と分布型温度センサ. フジクテ技報, 1989, 4: 28~32



**Fig. 8 Measurement of Raman signal and temperature**

## Temperature Character of Optical Fiber Raman Backscattering and Its Application

Liu Tianfu Zhang Buxin Chen Yang Chen Xiaozhu Zhang Zaixuan

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

**Abstract** A high power pulsed laser diode is used to pump a 1 km GI multimode optical fiber in which the ratio of core to cladding is 50/125  $\mu\text{m}$ . Meanwhile, the OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) technique and high speed sample average technique are adopted to measure and analyse spectra from backscattering fibers. The study of the temperature character of anti-stokes scattering, the intensity of which is only  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  of the incident light, and its application in the distributed optical fiber temperature sensors are emphasized.

**Key words** optical time domain reflection, backscattering, multimode optical fiber, anti-Stokes light, Stokes light, wavelength division multiplier,  $1 \times 3$  bidirection coupler



### 风冷氩离子激光器

本公司系美国离子激光技术公司(ILT)与上海激光技术研究所等中方单位共同投资创办的高技术企业。公司从美国全套引进当代世界一流的离子激光器生产设备,并全部采用进口零件生产,销售各种小型风冷氩离子激光器及有关激光应用整机。产品投放国内市场近两年来,因其价格合理,质量稳定,使用方便而受到国内广大用户的赞誉。本公司将一如继往奉行用户是上帝、质量是生命的宗旨为您提供下列产品和服务。

#### 一、5000 系列风冷氩离子激光器(配置小型高效激光开关电源)

(1) 输出功率从 5~500 mW 不等,稳光或稳流输出;(2) 多谱线、单谱线、单纵模、谱线可调(457.9~514.5 nm)、多线/单线互换等多种选择输出方式;(3) 钥匙开关、自动触发、过热保护,铟钢谐振腔、耐振动;(4) 设计寿命大于 10000 小时;保用两年或 5000 小时。

#### 二、彩色激光广告/娱乐表演机系列

1. 可选配置:(1) 各种功率,各种颜色(蓝、绿、黄、红)激光发生器;(2) 转镜系列或光笔(振镜)系列激光图形发生器;(3) PC 机、单片机或电子逻辑激光图形发生控制器。

2. 可选功能:(1) 产生各种几何/衍射激光图形,图形声控及变换;(2) 激光文字和图形的即时输入、存储、编辑和投放;(3) 文字和图形的放大、缩小、旋转和翻滚。

#### 三、工程及服务

- 承接各种激光广告、娱乐表演系统的现场光路及效果设计,激光广告或表演系统的现场设备安装及调试;
- 承接各种进口风冷氩离子激光器,进口氩离子激光应用整机(如:电子分色机、氩离子激光细胞分类仪、激光测速仪、激光粒子分析仪、氩离子激光眼科治疗仪等)的激光管和激光电源的维修业务。

中美合资上海埃恩激光技术有限公司

联系人: 陆雪标 王纯尧 胡晓青

电 话: (021) 4304207 传 真: (021) 4304208

地 址: 上海闵行文井路 247 号 邮 编: 200240