

仪器与测量

基于动态标定的拉曼分布式光纤测温系统研究*

冯玉祥# 汪雨辰# 童家欢# 吕立冬†

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 马鞍山 243002)

(2024 年 11 月 27 日收到; 2024 年 12 月 30 日收到修改稿)

拉曼分布式光纤测温系统基于拉曼斯托克斯 (Stokes) 散射光和反斯托克斯 (anti-Stokes) 散射光功率进行温度解调, 拉曼散射光功率直接影响测温精度. 系统中激光脉冲功率以及雪崩光电探测器增益均可能出现随机变化, 从而导致获取的拉曼散射光功率波动, 因此本文提出一种基于动态标定的拉曼分布式光纤测温系统方案, 通过设置温度标定单元并结合提出的功率校正算法, 消除标定单元的温度的动态变化对拉曼散射光功率的贡献, 再基于先前标定的数据, 分别将拉曼 Stokes 散射光和拉曼 anti-Stokes 散射光功率校正到同一激光脉冲功率及雪崩光电探测器增益水平, 从而提升系统的测温精度. 系统采用 50 ns 的激光脉冲, 在 4.6 km 长的单模光纤上开展测温试验, 结果显示: 在 35—95 °C 的测温区间, 基于传统的温度解调算法, 测温偏差为 -5.8—1.0 °C, 均方根误差为 4.0 °C, 而基于动态标定的校正算法, 测温偏差为 -0.8—0.9 °C, 均方根误差为 0.5 °C. 本文提出新的拉曼分布式光纤测温系统具备拉曼散射光功率动态校正功能, 有工程推广价值.

关键词: 分布式光纤传感, 拉曼散射光, 动态标定, 功率校正**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Qb**DOI:** 10.7498/aps.74.20241652**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241652

1 引言

光纤具有无源、轻质、抗电磁干扰性强、柔韧性好、传输损耗小、耐腐蚀、耐恶劣环境等优点^[1], 被广泛应用在通信和传感领域. 分布式光纤传感技术利用光纤作为传感介质, 测量应变、应力、振动、温度等物理参量^[2,3]. 拉曼分布式光纤测温系统, 通常简称为拉曼分布式测温系统 (Raman distributed temperature system, RDTS), 是利用光脉冲在光纤传输中产生的自发拉曼散射光的温度敏感效应对连续空间对象的温度信息进行实时测量^[4-7], 与传统的电子式温度传感器相比, RDTS 系统具有无源、广域、长距离、测量空间连续等优势^[7]. 随着光纤传感技术的发展, 拉曼分布式光纤测温系统在变

电站、城市电力管道、石油输送管道、天然气输送管道等测温方面广泛应用^[8-12]. 根据光纤中传输的光脉冲与光纤介质作用产生的自发拉曼散射光 (拉曼斯托克斯 (Stokes) 光和拉曼反斯托克斯 (anti-Stokes) 光) 的温度敏感函数, 通过拉曼 Stokes 光与拉曼 anti-Stokes 光功率的比值关系可解调温度数据^[13]. 再结合光时域的反射技术, 就可以获取被测光纤沿线任意位置处的温度信息, 进而定位异常温度变化的区域^[14-16]. 相较于点式光纤传感器, 比如光纤光栅, 它的监测空间是连续、无盲区分布的. 而光纤光栅则部署在已知的、离散的待测位置, 要实现长距离监测, 则需要级联多个光纤光栅, 但级联的数量受限, 一般为数十个, 所以实现长距离、高密度的监测覆盖非常困难^[17].

近年来, 拉曼分布式光纤测温传感系统向长距

* 国家自然科学基金 (批准号: 51977001) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn

离、高测温精度、高空间分辨率以及与其他传感机理融合的方向发展. 一般, RDTS 系统的测温精度主要由系统的信噪比决定, 较高信噪比能同时保证长的测温距离和高的测温精度^[18]. 由于噪声严重影响系统的测温距离和温度精度, Li 等^[19]提出使用动态差分算法和小波变换模极大值算法来抑制单光路自解调拉曼分布式测温系统的噪声, 小波变换模极大值算法减小温度波动范围, 动态差分算法延长测温距离, 在 11.5 km 的传感光纤上实现温度波动范围为 ± 0.88 °C, 空间分辨率为 2.1 m. 针对 RDTS 系统中拉曼 Stokes 光功率相对较低的温度响应对解调结果产生测温误差问题, 孙苗等^[20]提出一种动态校准法去修正 Stokes 拉曼散射光, 通过拟合参考温度下的 Stokes 光功率分布, 再利用实际获取的 anti-Stokes 光功率与模拟的 Stokes 光功率的比值关系解调温度数据, 测温准确度提高了 4.3 °C, 同时结合瑞利噪声抑制法, 最终将测温准确度提高了 8.9 °C. 由于拉曼散射光的损耗因素可能引起测温误差, 马天兵等^[21]通过对拉曼散射光之间衰减差进行拟合的方法来实现温度的自补偿, 在传感光纤上不同位置选取参考段和测温段, 采用多阶拟合算法进行初次修正, 再引入衰减差前后的瑞利噪声及其与光纤长度和温度的关系式, 从而消除瑞利噪声, 实现温度的再次修正, 实验在 30.0—90.0 °C, 测温误差从 10.5 °C 下降到 0.9 °C. 针对提升测温系统空间分辨率的问题, 李硕等^[22]提出了一种拉曼散射信号的分段重构方法, 将温度误差从 33.9 °C 降至 5.8 °C, 空间分辨率由 2.27 m 提升到 1.13 m. Chai 等^[23]提出序列解码技术, 通过抑制放大格雷码脉冲的瞬态效应, 保证衰减序列良好互相关性, 以实现无失真解码, 提升信噪比, 在 45.0 km 长的单模光纤上实现了 2.5 °C 的测温精度, 空间分辨率为 5 m. Lu 等^[24]提出了一种多机理融合的分布式光纤传感系统, 实现了测温机理与振动机理融合, 形成新的联合监测装置.

然而, 在长距离分布式光纤测温领域, 仍然存在着外部噪声信号干扰大、附加损耗大、系统响应时间长、空间分辨率低以及测温数据误差大的问题. 根据拉曼分布式光纤测温原理, 激光脉冲功率不稳定及雪崩光电探测器的增益变化, 从而引起获取的拉曼散射光电压随之波动, 出现漂移现象, 导致较大的误差. Li 等^[25]提出了一种动态增益校准方案, 通过稳定光电探测器的工作环境温度来校准

其光电转换增益变化对系统测温精度的影响, 同时采取降低光电探测器工作温度以减少系统的暗电流噪声, 提升系统的测温精度. 然而, 此方案未考虑到激光脉冲功率不稳定和标定区域温度动态变化因素, 不具备对散射光信号的动态校正能力, 要实现高精度测温, 则其系统对激光器和温度标定单元的稳定性要求较高. 对于单光路拉曼分布式测温系统也存在类似问题, 单通道拉曼 Stokes 光功率或拉曼 anti-Stokes 光功率与温度的关联更直接, 受激光脉冲功率及雪崩光电探测器增益变化极为显著, 若不进行校正, 测温误差极大, 而传统的双光路测温方案中采用的比值法有一定的抵消激光脉冲功率及雪崩光电探测器增益变化的能力^[26].

针对拉曼散射光信号出现漂移现象导致的测温误差问题, 本文提出一种动态标定的方案及拉曼散射光功率校正算法, 提升系统的测温精度, 首先设计一个温度标定单元, 获取某一具体温度下的拉曼散射光功率曲线并基于 e 指数拟合算法, 得到标定曲线, 再结合下一次测量获得的拉曼散射光信号功率数据, 选取标定单元内任意位置对应的拉曼散射光功率数据, 然后根据提出的功率动态校正算法, 求解校正系数, 最终将系统的测量数据校正到同一激光脉冲功率和雪崩光电探测器增益系数水平, 从根本上消除激光脉冲功率不稳定和雪崩光电探测器增益变化因素对测温数据的影响. 实验在 4.6 km 长的单模光纤上, 35.0—95.0 °C 的加温范围进行测试, 结果表明, 基于本文提出的动态标定方案及校正算法, 系统的测温偏差范围为 -0.8 — 0.9 °C, 均方根误差为 0.5 °C, 相较于传统的双路解调方案, 测温精度得到极大提升.

2 温度解调原理

2.1 传统温度解调

脉冲光在光纤中传输由于自发拉曼散射效应, 会产生拉曼 Stokes 散射光和拉曼 anti-Stokes 散射光, 光功率分别表示为

$$P_s(T, L) = P_0 K_s S v_s^4 R_s(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L], \quad (1)$$

$$P_a(T, L) = P_0 K_a S v_a^4 R_a(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L], \quad (2)$$

其中 $P_s(T, L)$ 和 $P_a(T, L)$ 为温度 T 下光纤沿线任意位置 L 处的拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的功率; P_0 为注入被测光纤中的激光脉冲功率; K_s 和

K_a 分别为拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的截面系数; S 为背向散射功率捕获因子; ν_s 和 ν_a 分别为拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的光子频率; α_0 , α_s 和 α_a 分别是入射光、拉曼 Stokes 光、拉曼 anti-Stokes 光对应的光纤衰减系数; $R_s(T)$ 和 $R_a(T)$ 分别为温度 T 下拉曼 Stokes 光、拉曼 anti-Stokes 光的温度敏感函数, 表示为

$$R_s(T) = [1 - \exp(-h\Delta\nu/k_B T)]^{-1}, \quad (3)$$

$$R_a(T) = [\exp(h\Delta\nu/k_B T) - 1]^{-1}, \quad (4)$$

其中 h 为普朗克常量; $\Delta\nu$ 为拉曼光谱的带宽 (约 13.2 THz); k_B 是玻尔兹曼常数; T 为开尔文温度, 单位为 K. 拉曼 Stokes 光与 anti-Stokes 光经光电转换后的电压信号表示为

$$U_s(T, L) = g_1 \cdot P_s(T, L), \quad (5)$$

$$U_a(T, L) = g_2 \cdot P_a(T, L), \quad (6)$$

其中 g_1 , g_2 对应光电探测器的增益因子. 由 (5) 式和 (6) 式可知, 在标定温度 T_0 下, 光纤沿线处的拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光对应的电压信号表示为

$$U_s(T_0, L) = g_1 P_0 K_s S v_s^4 R_s(T_0) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L], \quad (7)$$

$$U_a(T_0, L) = g_2 P_0 K_a S v_a^4 R_a(T_0) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L]. \quad (8)$$

由 (5) 式—(8) 式, 可推出解调温度表达式:

$$\frac{U_a(T, L)/U_s(T, L)}{U_a(T_0, L)/U_s(T_0, L)} = \exp\left[-\frac{h\Delta\nu}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]. \quad (9)$$

将 (9) 式进行化简可解调待测温度 T :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \ln \left[\frac{U_a(T, L)/U_s(T, L)}{U_a(T_0, L)/U_s(T_0, L)} \right]. \quad (10)$$

由 (7) 式和 (8) 式可以看出, 若光电探测器的增益因子 g_1 , g_2 发生随机变化, 使时域拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光散射曲线发生漂移, 并且根据 (10) 式在温度解调时无法抵消, 所以传统的双路测温方案获得的温度数据可能存在较大误差, 因此需要对出现的漂移现象进行校正, 获取精度高的数据.

2.2 基于散射光功率动态标定的校正算法

采用传统双路方案解调被测光纤的温度时, 由于激光脉冲功率不稳定, 雪崩光电探测器的增益因子可能发生随机变化, 因此, 将 (7) 式和 (8) 分别改写成 (11) 式和 (12) 式:

$$U_s(T, L) = g'_1 P'_0 K_s S v_s^4 R_s(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L], \quad (11)$$

$$U_a(T, L) = g'_2 P'_0 K_a S v_a^4 R_a(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L], \quad (12)$$

其中 $P'_0 = r P_0$, $g'_1 = h_1 g_1$, $g'_2 = h_2 g_2$, r 表示激光器输出功率变化系数, h_1 , h_2 分别表示雪崩光电探测器 1, 2 的增益变化系数, 由于激光脉冲功率及雪崩光电探测器增益变化的影响, 待测温度下的拉曼 Stokes 与拉曼 anti-Stokes 散射光信号会发生漂移, 因此, 引入了校正系数 $H_1 = r h_1$, $H_2 = r h_2$. 于是, (10) 式可以改写成:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \ln \left[\frac{H_1 \cdot U_a(T, L)/U_s(T, L)}{H_2 \cdot U_a(T_0, L)/U_s(T_0, L)} \right]. \quad (13)$$

2.3 基于动态标定的功率校准方案

设置温度标定单元, 在标定光纤位置 L_c 处, 由温度传感器获得标定温度 T_0 输出, 获取光纤 L_c 处的拉曼 Stokes 光与拉曼 anti-Stokes 光的电压值分别为:

$$U_s(T_0, L_c) = U_0 K_s S v_s^4 R_s(T_0) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L_c], \quad (14)$$

$$U_a(T_0, L_c) = U_0 K_a S v_a^4 R_a(T_0) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L_c]. \quad (15)$$

将被测光纤放置在标定温度 T_0 下, 获到拉曼 Stokes 光与 anti-Stokes 光的电压实时分布 $U_s(T_0, L)$ 和 $U_a(T_0, L)$, 通过 e 指数拟合计算出 (14) 式、(15) 式中衰减系数 $(\alpha_0 + \alpha_s)$, $(\alpha_0 + \alpha_a)$. 由 (14) 式和 (15) 式得标定单元内光纤位置 L_c 处的拉曼 Stokes 光与 anti-Stokes 光信号分别为 $U_s(T_0, L_c)$, $U_a(T_0, L_c)$, 于是, 结合已知的光纤衰减系数 $(\alpha_0 + \alpha_s)$, $(\alpha_0 + \alpha_a)$ 就可以计算出标定光纤位置 L_c 之后任意位置的信号电压值, 表示为

$$U_{sc}(T_0, L) = U_s(T_0, L_c) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)(L - L_c)], \quad (16)$$

$$U_{ac}(T_0, L) = U_a(T_0, L_c) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)(L - L_c)]. \quad (17)$$

由 (16) 式和 (17) 式可知, 在温度标定单元里, 设定标定光纤位置 L_c , 在标定温度 T_0 下的拉曼 Stokes 光与拉曼 anti-Stokes 光的电压值分别为 $U_{sc}(T_0, L_c)$ 和 $U_{ac}(T_0, L_c)$, 再根据 (14) 式和 (15) 式, 在测温实验中, 其标定单元内的温度可能发生变化为 T_1 , 则其电压值为 $U_s(T_1, L_c)$ 和 $U_a(T_1, L_c)$. 于是, 由 (11) 式和 (12) 式可求出校正系数 H_1 和 H_2 :

$$H_1 = \frac{U_s(T_1, L_c)}{U_{sc}(T_0, L_c)} \cdot \frac{R_s(T_0)}{R_s(T_1)}, \quad (18)$$

$$H_2 = \frac{U_a(T_1, L_c)}{U_{ac}(T_0, L_c)} \cdot \frac{R_a(T_0)}{R_a(T_1)}. \quad (19)$$

所以, (13) 式可以改写为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \ln \left[\frac{U_a(T, L)/U_s(T, L)}{U_{ac}(T_0, L)/U_{sc}(T_0, L)} \cdot \frac{H_1}{H_2} \right]. \quad (20)$$

考虑到激光脉冲功率不稳定及雪崩光电探测器增益因素, 导致光功率发生波动, 通过设置温度标定单元, 剔除标定位置 L_c 处温度动态变化对散射光功率变化的影响, 从而得到校正系数 H_1 , H_2 , 进而修正温度解调公式, 最终提升测温精度。

3 系统搭建与测试

3.1 实验系统

图 1 为实验系统, 计算机 (PC) 控制数据采集卡 (DAQ; USB9812A, 北京星烁) 发出电脉冲给驱动模块, 驱动模块发出电脉冲信号给声光调制器 (AOM; T-M200-0.1C2J-3-F2S, Gooch&Housego), 将激光器 (LS; NLL-1550-1, 武汉光迅) 发出的连续光调制成光脉冲, 激光波长为 1550.12 nm, 脉冲宽度为 50 ns, 脉冲光经掺铒光纤放大器 (EDFA; BG-pulse-EDFA-M-20W-1550-FC/APC, 厦门彼格) 提升光功率, 脉冲峰值功率为 35.0 dBm, 随后光脉冲被注入到波分复用器 (WDM; WDM131000049, 铭创光电) 的 1550 nm 端, 然后经 WDM 的 COM 端进入到标定单元模块 (TCU), TCU 包括一只温度传感器 PT100 和一个由一条长约 100 m 的光纤绕成直径约为 8 cm 的光纤环。随后光脉冲进入到

被测光纤 (FUT), 被测光纤采用单模光纤 (G.652, 长飞光纤), 长度约为 4.6 km, 其末端约 60 m 长的光纤被绕成直径为 10 cm 的圆环在加温测试中放置于恒温水槽 (CTB; SC-6, 东莞三量), 其恒温水槽的温控精度为 0.05 °C, 其余部分光纤置于室温环境。光脉冲在被测光纤中产生的拉曼 Stokes 光与拉曼 anti-Stokes 光, 经 WDM 的 1660 nm 端和 1450 nm 端分离, 随后分别进入到两个雪崩光电探测器 (APD1, APD2; BG-APD-100 MHZ-CN2-SE-09MM-1m-FC/APC, 厦门彼格), 雪崩光电探测器将光信号转化成电信号, 并由数据采集卡同步采集、取 50000 次平均后将数据传输至计算机进行处理, 用于后续的温度解调。

首先, 将被测光纤被置于室温环境, 数据采集卡采集到散射光信号电压 $U_s(T_0, L)$ 和 $U_a(T_0, L)$, 将此数据作为标定数据。实验中室温始终维持在 27.3 °C 即标定温度 $T_0 = 27.3$ °C。然后, 将被测光纤末端的光纤圆环置于恒温水槽中, 设定水温, 依次将水温从 35.0 °C 加热至 95.0 °C, 温度间隔设置为 10.0 °C。当温度稳定后采集被测光纤上的散射光信号电压数据, 如图 2 所示。从图 2(a) 和图 2(b) 中可以发现, 处于室温下的被测光纤段对应的曲线出现漂移, 这是激光脉冲功率不稳定及雪崩光电探测器增益变化共同作用的结果。特别是, 在常温段待测温度解调的散射光功率曲线幅值远低于标定曲线。因此, 必须校正激光脉冲功率不稳定及雪崩光电探测器增益变化导致的时域散射曲线漂移问题, 以保证系统的测温精度。

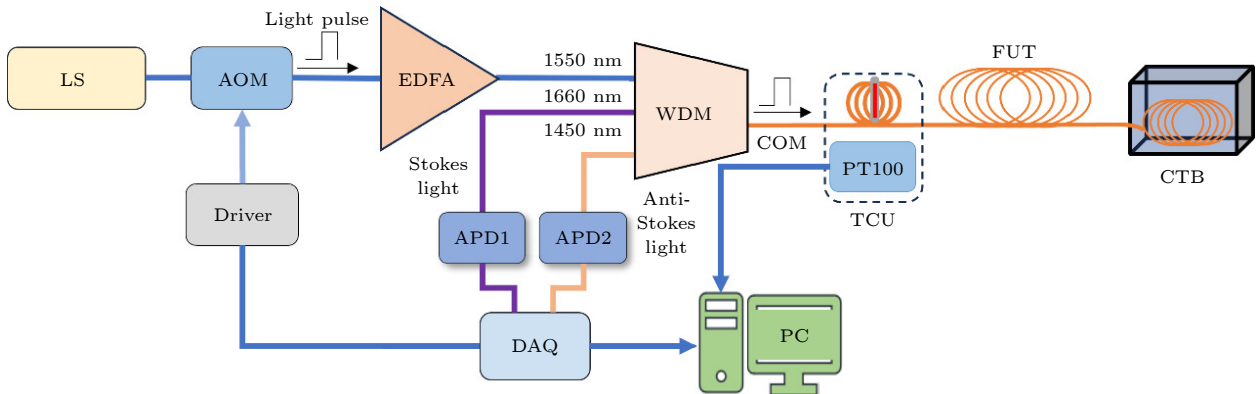


图 1 实验系统原理图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental system. LS, laser source; AOM, acousto-optic modulator; EDFA, erbium doped fiber amplifier; WDM, wavelength division multiplexer; TCU, temperature calibration unit; FUT, fiber under test; CTB, constant temperature box; APD, avalanche photo detector; DAQ, data acquisition card; PC, personal computer.

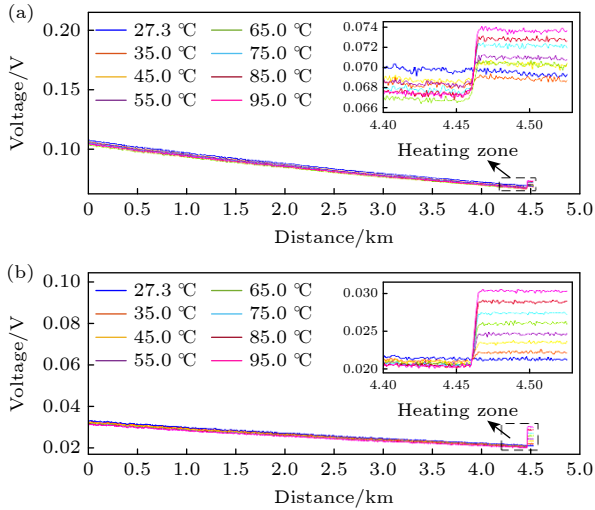


图 2 时域拉曼散射功率曲线 (a) 斯托克斯光; (b) 反斯托克斯光

Fig. 2. Time domain Raman scattering power traces: (a) Stokes; (b) anti-Stokes.

3.2 拉曼散射光动态标定及功率校正算法分析

由于实测的标定曲线 $U_s(T_0, L)$ 和 $U_a(T_0, L)$ 带有噪声, 直接用作标定曲线必然会引起较大的测温误差, 于是分别对其进行 e 指数拟合得到 (14) 式、(15) 式中的衰减系数 $(\alpha_0 + \alpha_s)$, $(\alpha_0 + \alpha_a)$, 然后根据 (16) 式、(17) 式生成一组理想的标定曲线, 如图 3 所示. 对于图 3(a) 中的拟合公式, 根据温度标定单元首位置点电压值 0.10716 V, Stokes 光衰减系数 0.0973, 光纤距离 x , 绘制出平滑处理后基于 e 指数的时域拉曼 Stokes 光功率标定曲线 y . 对于图 3(b) 中的时域拉曼 anti-Stokes 光功率标定曲线拟合公式, 同样是基于上述推导过程得出. 图 3(a), (b) 分别为平滑处理前后的时域拉曼 Stokes 光和拉曼 anti-Stokes 光的散射曲线, 可看出原始标定曲线中的噪声被消除, 这有利于提升系统的测温精度.

然后, 针对激光脉冲功率不稳定及雪崩光电探测器的增益变化导致的漂移校正问题, 通过温度标定单元, 采用动态标定方案, 先拟合出一条与原始曲线高度一致的标定曲线, 再运用温度标定单元, 采用动态功率校正算法, 求取 (20) 式中的 H_1 和 H_2 , 使在实验中待测温度 T 下的拉曼 Stokes 光的时域曲线能更贴合拟合的标定曲线, 如图 4(a) 所示. 同理, 对拉曼 anti-Stokes 光时域曲线进行相同方式处理, 如图 4(b) 所示. 对比图 2 和图 4, 可以发现漂移现象基本得到消除, 测量被校正到同一的激光脉冲功率及雪崩光电探测器的增益条件.

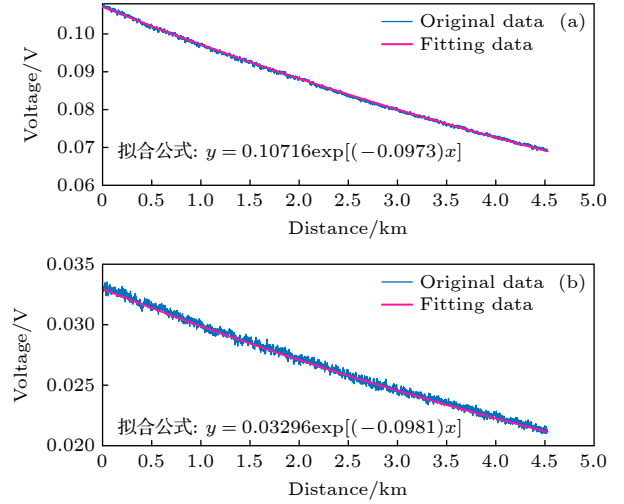


图 3 时域拉曼标定拟合功率曲线 (a) 斯托克斯光; (b) 反斯托克斯光

Fig. 3. Time domain Raman calibration fitting the power traces: (a) Stokes; (b) anti-Stokes.

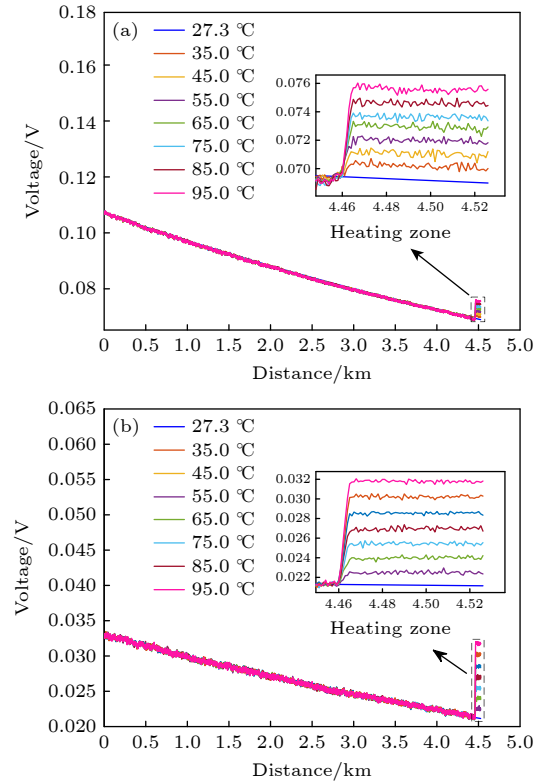


图 4 时域拉曼动态标定及校正后功率曲线 (a) 斯托克斯光; (b) 反斯托克斯光

Fig. 4. Time domain Raman dynamic calibration and corrected power traces: (a) Stokes; (b) anti-Stokes.

4 温度解调效果对比

4.1 传统双路解调

由于拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的波长相

差近 200 nm, 波长的差异导致二者对应的光纤折射率不同, 从而使二者在光纤中的光速不同, 最终产生走离效应, 即同一位置散射的拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光到达时间不同而引起位置偏移, 因此, 在进行温度解调之前必须进行走离校正^[26]. 基于 (10) 式描述的传统温度解调算法, 测温结果如图 5 所示, 详细温度数据列于表 1.

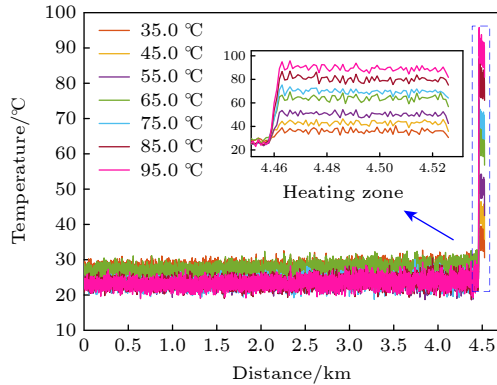


图 5 传统双路温度解调结果

Fig. 5. Results of traditional dual-channel temperature demodulation.

表 1 传统双路温度数据对比

Table 1. Traditional dual-channel temperature data comparison.

实际温度/°C	测得温度/°C	误差/°C
35.0	36.0	+1.0
45.0	43.0	-2.0
55.0	50.4	-4.6
65.0	64.1	-0.9
75.0	69.6	-5.4
85.0	80.2	-4.8
95.0	89.2	-5.8

从图 5 可以看出, 由于激光脉冲功率的不稳定及雪崩光电探测器增益变化, 获取的拉曼 Stokes 光与 anti-Stokes 光功率曲线与标定曲线相比, 出现明显的上下漂移现象, 从而导致室温区的传感光纤段对应的温度数据出现大的漂移即大的测温偏差.

对于加热区的测温效果, 表 1 给出了被测光纤恒温水槽的设定水温即实际温度与实验系统的测得温度数据的对比情况, 系统测得的温度为恒温水槽处被加热的传感光纤各位置解调出的温度数据的均值. 结果显示, 测温的误差范围为 -5.8—1.0 °C, 得到均方根误差为 4.0 °C, 与真实的温度值相比偏差大. 因此, 必须对传统的双路解调算法进

行优化, 并联合新的功率校正算法, 处理漂移问题, 降低测温误差.

4.2 散射光动态标定及校正算法解调

基于图 2(a) 和图 2(b) 中的时域拉曼 Stokes 光与拉曼 anti-Stokes 光功率曲线对应的数据, 根据动态标定方案及校正算法, 求解校正系数 H_1 和 H_2 , 再利用 (20) 式, 得到被测光纤沿线的温度信息, 如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 采用动态标定及功率校正算法, 测温曲线在传感光纤的室温段基本贴合, 从而反映出如图 5 中室温光纤段出现的漂移现象得到消除, 这进一步表明本文提出的方案可提升测温精度. 对于图 6 中的加热区, 从局部放大图可以看出, 被测光纤加热区在恒温水槽 35.0—95.0 °C 温度区间内测得温度均值与恒温水槽实际设定的温度值基本吻合, 温度曲线上下波动范围小, 测温误差范围控制在 ± 1.0 °C 以内.

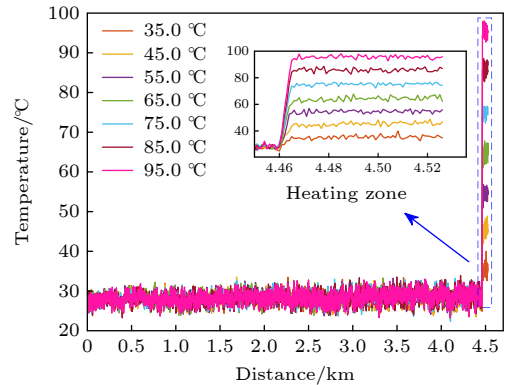


图 6 散射光动态标定及校正算法解调结果

Fig. 6. Demodulation results of scattered light dynamic calibration and correction algorithm.

具体的温度测量结果如表 2 所列. 系统测得恒温水槽区域的光纤温度值代表了加热区域的平均温度状态, 从表 2 中可以看出, 恒温水槽的水温从 35—95 °C, 依次递增 10 °C, 测温偏差范围为 -0.8—0.9 °C, 均方根误差为 0.5 °C. 这表明本文提出的系统方案具备实用价值.

关于系统空间分辨率, 理论上是由激光脉冲宽度决定, 即 50 ns 的激光脉冲对应 5 m 的空间分辨率; 而在实际测评中, 通常将加温测试曲线上升区域中高度为 10%—90% 的区间对应的距离定义为空间分辨率. 从图 6 中选取常温段 27.3—95.0 °C 的上升区间, 标记的空间分辨率如图 7 所示, 系统的空间分辨率为 5 m, 与理论相符.

表 2 基于动态标定及校正算法温度数据对比
Table 2. Temperature data comparison based on dynamic calibration and calibration algorithm.

实际温度/℃	测得温度/℃	比值 H_1	比值 H_2	误差/℃
35.0	35.4	1.0180	1.0150	+0.4
45.0	45.3	1.0100	1.0225	+0.3
55.0	54.6	1.0141	1.0350	-0.4
65.0	64.2	1.0365	1.0366	-0.8
75.0	75.2	1.0204	1.0443	+0.2
85.0	85.9	1.0250	1.0478	+0.9
95.0	95.5	1.0263	1.0500	+0.5

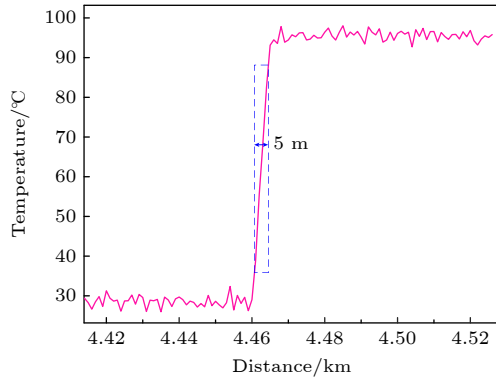


图 7 空间分辨率
Fig. 7. Spatial resolution.

5 结 论

拉曼分布式光纤传感系统根据拉曼 Stokes 散射光功率和拉曼 anti-Stokes 散射光功率进行温度解调, 因此, 对拉曼散射光获取的功率误差将直接影响系统的测温精度. 然而, 在实际系统中, 激光脉冲功率及雪崩光电探测器增益会不可避免地产生随机变化, 从而导致系统获取的拉曼散射光功率存在波动, 进而引起测温误差. 传统的拉曼分布式光纤测温系统采用拉曼 Stokes 光和拉曼 anti-Stokes 光双路解调原理, 通过与标定数据相比的方法虽然具备一定的抗激光脉冲功率和雪崩光电探测器增益波动的能力, 但是拉曼 Stokes 光和拉曼 anti-Stokes 光的光路硬件构成并不完全相同而且散射光功率随机变化因素各异, 因此, 在激光器和雪崩光电探测器都不极其稳定的情况下, 难以保证高的测温精度. 本系统提出一种基于动态标定的拉曼分布式光纤测温系统, 建立拉曼 Stokes 光功率、anti-Stokes 光功率动态标定及校正算法, 利用标定单元某一点电压值, 再结合衰减系数及光纤长度绘制出 e 指数走势的信号电压曲线, 结合功率校正算

法, 消除温度的实际波动对散射光功率的贡献, 将测得的拉曼散射光信号校正到同一激光脉冲功率和雪崩光电探测器增益水平, 从而提升测量精度. 实验采用 4.6 km 长的单模光纤进行测温性能分析, 结果表明, 传统双路方案的温度波动范围为 $-5.8\text{--}1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均方根误差为 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 经过动态标定及校正算法后的温度波动范围为 $-0.8\text{--}0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其均方根误差为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 新系统具备良好的拉曼散射光功率自校正能力, 可有效地去除系统硬件的非稳定性因素对测温精度的影响, 具有推广价值.

参考文献

- [1] Zhang Z L, Lu Y G, Peng J Q, Ji Z Y 2021 *Opt. Lett.* **46** 1776
- [2] Ding Z Y, Wang C H, Liu K, Jiang J F, Yang D, Pan G Y, Pu Z L, Liu T G 2018 *Sensors* **18** 1072
- [3] Liang C S, Bai Q, Yan M, Wang Y, Zhang H J, Jin B Q 2021 *IEEE Access* **9** 41647
- [4] Huang S L, Liang D W, Liu G 1991 *Chin. J. Sci. Instrum.* **04** 25 (in Chinese) [黄尚廉, 梁大巍, 刘龚 1991 *仪器仪表学报* **04** 25]
- [5] Rao Y J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 074207 (in Chinese) [饶云江 2017 *物理学报* **66** 074207]
- [6] Shang Y, Wang C 2021 *J. Appl. Sci.* **39** 843 (in Chinese) [尚盈, 王昌 2021 *应用科学学报* **39** 843]
- [7] Jie R M, Xiao C, Liu X, Zhu C, Rao Y J, Liu B 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0106011 (in Chinese) [介瑞敏, 肖春, 刘旭, 朱琛, 饶云江, 刘波 2024 *光学学报* **44** 0106011]
- [8] Duan S H, Tian J, Zhou Z X, Wang X H, Xu B L 2014 *Laser J.* **35** 47 (in Chinese) [段绍辉, 田杰, 周正仙, 王晓华, 徐邦联 2014 *激光杂志* **35** 47]
- [9] Zhan Z W, Cantono M, Kamalov V, Mecozzi A, Müller R, Yin S, Castellanos J C 2021 *Science* **371** 931
- [10] Huang C, Zhai F C, Fan G 2016 *Chem. Eng. Equip.* **10** 67 (in Chinese) [黄程, 翟富超, 范高 2016 *化学工程与装备* **10** 67]
- [11] Wang X H 2019 *Petrochem. Saf. Environ. Prot. Technol.* **35** 41 (in Chinese) [王雪辉 2019 *石油化工安全环保技术* **35** 41]
- [12] Hu Z A, Wang Q, Gu X H, Zhu K, Xu X M, Wu L L, Hu D 2023 *Laser Infrared* **53** 90 (in Chinese) [胡子昂, 王强, 谷小红, 朱凯, 徐晓萌, 吴琳琳, 胡栋 2023 *激光与红外* **53** 90]
- [13] Zhang M J, Li J, Liu Y, Zhang J Z, Li Y T, Huang Q, Liu R X, Yang S J 2017 *Chin. J. Lasers* **44** 0306002 (in Chinese) [张明江, 李健, 刘毅, 张建忠, 李云亭, 黄琦, 刘瑞霞, 杨帅军 2017 *中国激光* **44** 0306002]
- [14] Xie K L, Rao Y J, Ran Z L 2008 *Acta. Opt. Sin.* **28** 569 (in Chinese) [谢孔利, 饶云江, 冉曾令 2008 *光学学报* **28** 569]
- [15] Liu Y P, Li H, Gao S G, Wang J X, Fan X Z, Li X Y, Tian Y, Yi J Y 2022 *Proc. CSEE* **42** 6126 (in Chinese) [刘云鹏, 李欢, 高树国, 王佳雪, 范晓舟, 李昕烨, 田源, 尹钧毅 2022 *中国电机工程学报* **42** 6126]
- [16] He Z Y, Liu Y P, Ma L, Yang C, Tong W J 2019 *Infrared Laser Eng.* **48** 0422002 (in Chinese) [何祖源, 刘银萍, 马麟, 杨晨, 童维军 2019 *红外与激光工程* **48** 0422002]
- [17] Li Z Y, Sun W F, Li L M, Wang H H 2015 *Acta. Phys. Sin.* **64** 234207 (in Chinese) [李政颖, 孙文丰, 李子墨, 王洪海 2015

- 物理学报 **64** 234207]
- [18] Lu J H, Wan C G, Jin K, Wang M, Huang G M 2023 *Laser J.* **44** 62 (in Chinese) [鲁佳慧, 万成功, 金恺, 王敏, 黄光明 2023 *激光杂志* **44** 62]
- [19] Li J, Li Y T, Zhang M J, Liu Y, Zhang J Z, Yan B Q, Wang D, Jin B Q 2018 *Photonic Sensors* **8** 103
- [20] Sun M, Yang S, Tang Y Q, Zhao X H, Zhang Z R, Zhuang F Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 200701 (in Chinese) [孙苗, 杨爽, 汤玉泉, 赵晓虎, 张志荣, 庄飞宇 2022 *物理学报* **71** 200701]
- [21] Ma T B, Zi B W, Guo Y C, Ling L Y, Huang Y R, Jia X F 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 030701 (in Chinese) [马天兵, 訾保威, 郭永存, 凌六一, 黄友锐, 贾晓芬 2020 *物理学报* **69** 030701]
- [22] Li S, Wang J Q, Gao Z G, Gao J X, Hou Z M, Jiang L, Hou M Y 2023 *Infrared Laser Eng.* **52** 20230076 (in Chinese) [李硕, 王纪强, 高忠国, 高建新, 侯泽民, 姜龙, 侯墨语 2023 *红外与激光工程* **52** 20230076]
- [23] Chai D D, Zhang H J, Gao Y 2022 *IEEE Sens. J.* **23** 2204
- [24] Lu L D, Yong M C, Wang Q S, Bu X D, Gao Q H 2023 *Opt. Commun.* **529** 129096
- [25] Li J, Yan B Q, Zhang M J, Zhang J Z, Qiao L J, Wang T 2018 *App. Opt.* **58** 37
- [26] Feng Y X, Liu Z K, Huang M N, Wang Y S, Lü L D 2024 *Opt. Precis. Eng.* **32** 2645 (in Chinese) [冯玉祥, 刘志凯, 黄闽南, 王一山, 吕立冬 2024 *光学精密工程* **32** 2645]

INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

Research on Raman distributed fiber temperature measurement system based on dynamic calibration^{*}

FENG Yuxiang[#] WANG Yuchen[#] TONG Jiahuan[#] LYU Lidong[†]

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

(Received 27 November 2024; revised manuscript received 30 December 2024)

Abstract

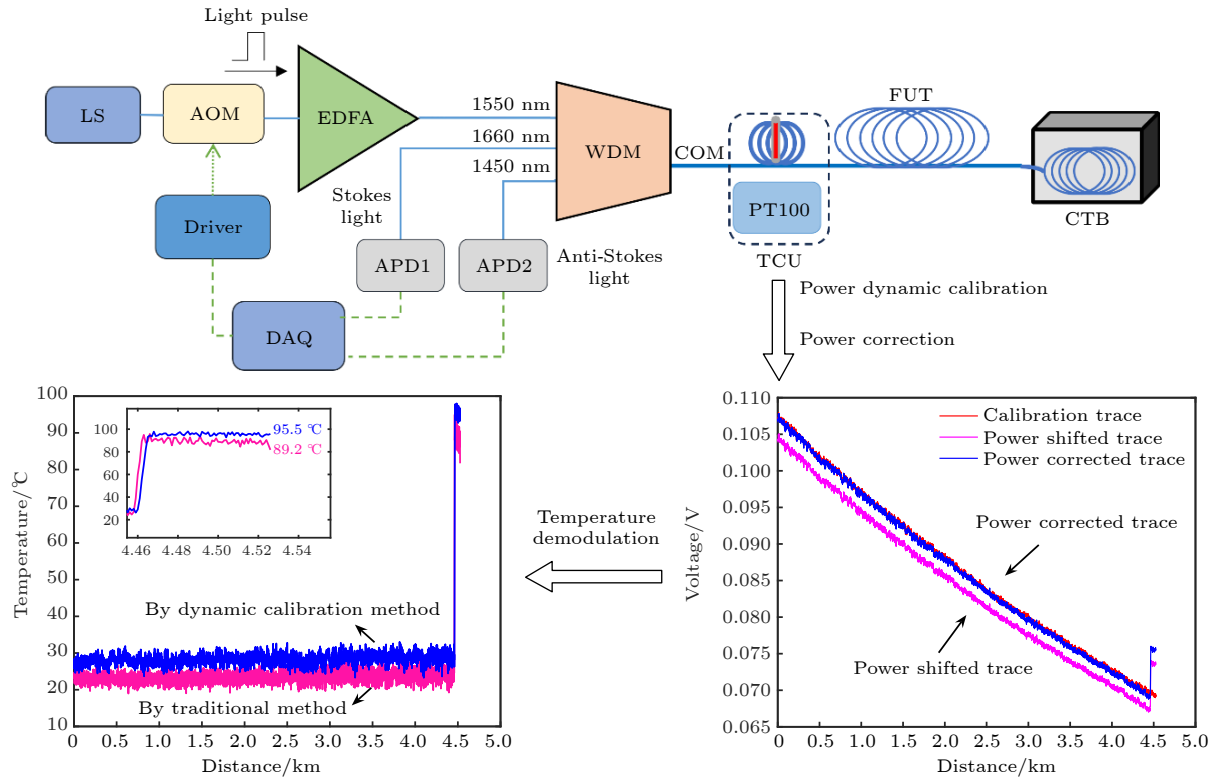
Distributed optical fiber temperature measurement system is widely used in the fields of substation, power cable, natural gas transmission pipeline and other temperature measurement systems. It can continuously measure the temperature information at each location along the sensing direction. Raman distributed optical fiber temperature measurement system demodulates the temperature information based on Raman Stokes scattered light and anti-Stokes scattered light power, and the Raman scattering light power directly affects the temperature measurement accuracy. So, it is a challenging task to control the hardware of the system to ensure the feasibility of the Raman scattering signals. The laser pulse power, and the gain of avalanche photodetector may vary randomly in the system, resulting in fluctuations in the acquired Raman scattered light power data. Therefore, a scheme of Raman distributed fiber temperature measurement system based on dynamic calibration is proposed in this work, and by setting up the temperature calibration unit and combining the proposed power correction algorithm and previous calibration data, the Raman Stokes scattering light and Raman anti-Stokes scattering light power are calibrated at the same laser pulse power level and avalanche photodetector gain, thereby improving the temperature measurement accuracy of the system. For the performance demonstration of the new scheme, the experimental system adopts 50-ns laser pulse to carry out temperature measurement experiments with a 4.6-km long single-mode fiber. The results show that in the temperature measurement range from 35 °C to 95 °C, based on the traditional temperature demodulation algorithm, the temperature deviation measured is in the range from -5.8 °C to 1.0 °C, and the root mean square error is 4.0 °C, and by the dynamic calibration algorithm, the deviation of deviation measured is within -0.8 °C to 0.9 °C and the root mean square error is 0.5 °C. Therefore, the novel Raman-type distributed optical fiber temperature measurement system

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51977001).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn

proposed in this work has the function to dynamically correct the Raman-type scattered light power to suppress the influence caused by instability of the key devices such as pulsed laser and avalanche photodetector and improve the temperature measurement accuracy, which is valuable in practical engineering applications.



Keywords: distributed optical fiber sensing, Raman scattered light, dynamic calibration, power correction

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.74.20241652

CSTR: 32037.14.aps.74.20241652

基于动态标定的拉曼分布式光纤测温系统研究

冯玉祥 汪雨辰 童家欢 吕立冬

Research on Raman distributed fiber temperature measurement system based on dynamic calibration

FENG Yuxiang WANG Yuchen TONG Jiahuan LYU Lidong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 074203 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241652

CSTR: 32037.14.aps.74.20241652

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241652>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于拉曼散射光动态校准的分布式光纤温度传感系统

Distributed fiber optic temperature sensor based on dynamic calibration of Raman Stokes backscattering light intensity

物理学报. 2022, 71(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220611>

非线性效应对前向受激布里渊散射分布式传感的影响

Influence of nonlinear effects on forward stimulated Brillouin scattering distributed sensing

物理学报. 2022, 71(15): 154206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220313>

线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术

Dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging polarimeter

物理学报. 2022, 71(15): 154205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220229>

高精度双斜坡辅助式混沌布里渊光纤动态应变传感

High-accuracy dual-slope-assisted chaotic Brillouin fiber dynamic strain measurement

物理学报. 2021, 70(10): 100704 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201892>

基于1560 nm外腔式激光器的拉曼光锁相技术

Phase locking technology for Raman laser system based on 1560 nm external cavity lasers

物理学报. 2021, 70(17): 170303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210432>

基于混合飞秒/皮秒相干反斯托克斯拉曼散射的动态高温燃烧场温度测量

Thermometry in dynamic and high-temperature combustion field based on hybrid femtosecond/picosecond coherent anti-Stokes Raman scattering

物理学报. 2021, 70(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211144>