

用于人体测温的分布式光纤温度传感器的设计

黄焰, 肖彬

(武汉软件工程职业学院光电子与通信工程系, 湖北 武汉 430205)

【摘要】 比较基于瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射的三种温度传感器的特点, 分析基于拉曼散射温度传感系统的三种温度解调方式, 选择利于研究体表温度场变化特点, 利用拉曼散射比值来解调温度信息的系统结构, 设计基于分布式光纤传感器的人体测温系统, 并针对系统的多项性能参数进行分析。

【关键词】 分布式光纤; 拉曼散射; 温度传感器; 人体测温

【中图分类号】 TP391

【文献标识码】 A

【文章编号】 2095-3518(2015)06-68-02

1 前言

分布式光纤温度传感器是一种新兴的温度传感技术。基于光纤的电绝缘性、几何易变性、抗电磁干扰和固有的大信号传输带宽等优点, 使得分布式光纤温度传感器在具有高的温度灵敏度的同时, 还能有效传输携带温度信息的光信号, 不仅能在恶劣的工业环境中稳定工作, 还能够实现一次测定整个被测光纤区域的一维温度分布场, 对空间温度场实时监测。

临床手术中判断局部麻醉深度的传统方法需要依靠医生的经验, 采用刺痛法。这种传统的判断方法不仅给病人带来了额外的痛苦, 而且带有主观性, 不科学。医学实验结果表明, 麻醉用药后 20 分钟硬膜外麻醉下拇指尖, 前臂等非阻滞区的皮温较用药前分别下降 1.08℃ 和 0.98℃, 而脐部, 脚趾处等阻滞区的皮温上升 0.57~4.33℃ 不等。分布式光纤温度传感系统能有效地对人体温度场分布进行实时监测, 可为局部麻醉深度的判断开创了一种全新的方法。

2 分布式光纤温度传感器设计方案选取

分布式光纤温度传感器通常是将光纤沿温度场排布, 将光纤传输时所产生的散射光运用光时域反射(OTDR)技术, 对光纤传输路径的空间分布和随实践变化的信息进行测量和监控。在分布式光纤温度传感器中主要涉及瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射, 如图 1 所示。其中瑞利散射对温度不敏感, 而拉曼散射和布里渊散射都对温度敏感, 因此, 拉曼散射和布里渊散射都可用来测量温度。由于布里渊散射和瑞利散射在频谱上靠得非常近, 难以分开, 同时受布里渊散射受应力等因素的影响较大, 所以用来测温会有相当难度。因此分布式光纤温度传感器中常应用拉曼散射测温。

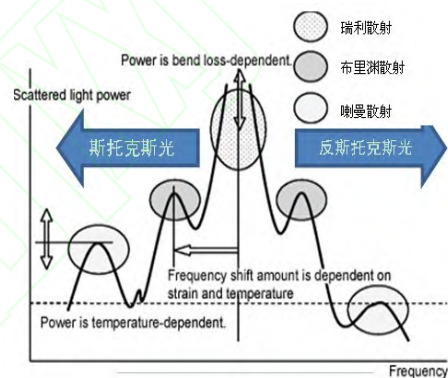


图1 光线中背向散射光的光谱

拉曼散射包含上升频率的散射光——反斯托克斯光及下降频率的散射光——斯托克斯光。散射分子的分布是按玻尔兹曼因子 $e^{-E/kT}$ 分布的, 反斯托克斯光和斯托克斯光强与温度呈简单的指数关系, 分别为:

$$I_{as} = \frac{1}{\lambda_{as}^4} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc\Delta\nu}{k_B T(x)}\right) - 1} \quad (1)$$

$$I_s = \frac{1}{\lambda_s^4} \cdot \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{hc\Delta\nu}{k_B T(x)}\right)} \quad (2)$$

式中 I_{as} 、 I_s 分别表示反斯托克斯和斯托克斯光强, λ_{as} 、 λ_s 分别为反斯托克斯光波长和斯托克斯光波长, $\Delta\nu$ 为喇曼频移。

室温下对于 850nm 的光脉冲, 斯托克斯的光强约为反斯托克斯的六倍, 但是反斯托克斯光强对温度更加敏感。要准确有效的测量温度, 就要充分利用反斯托克斯光所携带的温度信息, 用最佳的方法解调。对于喇曼后向散射分布式温度测量系统, 一般有三种解调方式: 单路反斯托克斯光解调、用反斯托克斯光和斯托克斯光强比值来解调、用反斯托克斯光和瑞利散射光强比值来解调。而这三种常见方法应用于体表温度测量时各有优缺点, 如表 1 所示。故最终采用的是利用反斯托克斯光和瑞利散射光强比值来解调的方法。

【第一作者】 黄焰(1982-), 女, 讲师, 研究方向: 光电子技术、电子与通信。

【基金项目】 2011 年武汉市市属高校科研课题: 光电子技术专业核心课程“光电探测与处理技术”的项目化课程改革(2011102)

表1 三种常见解调方法的比较

解调方法	优点	缺点	本传感器是否适用
单路反斯托克斯光解调	仅需测量单路反斯托克斯后向散射光,光学元件少,光路简单	反斯托克斯光功率易受光功率波动、光纤参数变化、散射光损耗影响	不适用
反斯托克斯光和斯托克斯光强比值解调	斯托克斯光作为参考光源,减少反斯托克斯光影响,算法简单,与温度呈指数关系	光路复杂,双路采集信号,对器件要求高	适用
反斯托克斯光和瑞利散射光强比值解调	瑞利散射光作为参考光源,相对灵敏度高	瑞利散射光的强度比反斯托克斯光的强度高 $10^3 \sim 10^4$,不利于高精度测量	不适用

3 分布式光纤温度传感器系统设计

根据以上的方案确定,我们设计了一套分布式光纤温度传感器系统,系统框图如图2所示。由半导体激光器发射窄脉宽高峰值功率的激光脉冲,光脉冲被光纤耦合器耦合入传感光纤,一边向前传输一边与光纤介质相互作用发生自发喇曼散射,携带了温度信息的后向喇曼散射光沿光纤返回,反斯托克斯和斯托克斯光通过光学滤波片分离出来,由APD探测将光信号转换为电信号,最后经过信号处理的反斯托克斯光和斯托克斯光的比值还原出温度场信息。

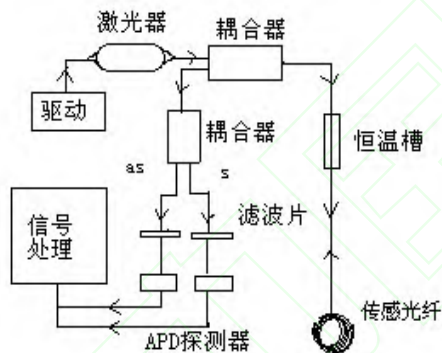


图2 分布式光纤温度传感系统框图

在测量人体体表温度场的传感器的研究中,只需要对人的躯干部位进行温度检测,所需传感光纤长度在1km左右,属于短距离传感,该系统中选择了810nm光纤输出模块(810nm Fiber-coupled CW Module)G081PU1600m 半导体激光器。使用20ns的脉冲宽度,100kHz的重复频率的电流脉冲调制半导体激光器,使其发出脉宽为20ns的光脉冲。因为自发喇曼散射强度很小,约为入射光强的 10^{-7} ,要使散射光被探测到,入射光峰值功率不小于500mw。光脉冲的脉宽较窄,周期较短,无法用眼睛直接观察激光器发射的光波波形,所以我们设计了由PIN探测器(AsGa材料)和MAX3963低噪前置放大电路构成的接收机模块来检测激光器发射的光脉冲波形,将其转换为电信号。

注入光脉冲与传感光纤作用发生散射,散射光除了包含我们所需要的喇曼散射光外,还含有瑞利散射光和布里渊散射光,在APD探测时将引起背景光噪声。特别是瑞利散射光,其光强比喇曼散射光高出3~4个数量级。由于瑞利散射光和布里渊散射光的波长与喇曼散射光的波长不同,可以运用光学带通滤波器将喇曼散射光滤出来。又因为反斯托克斯光和斯托克斯光需

要分别探测,所以使用两个中心波长分别为反斯托克斯光 λ_{as} 和斯托克斯光 λ_s 的滤波器。激光器的中心波长 $\lambda_0 = 808\text{nm}$,喇曼频移为 $\Delta\nu = 440\text{cm}^{-1}$,所以反斯托克斯光波长和斯托克斯光波长分别为:

$$\lambda_{as} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_0} + \Delta\nu} = 780\text{nm} \quad \lambda_s = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_0} - \Delta\nu} = 838\text{nm}$$

喇曼散射光的波长不可能是一个准确的值,而是以 λ_{as} 、 λ_s 为中心有一定的光谱宽度的。为了充分利用光源能量,将滤波器的半高全宽取为15nm。当温度在0~100℃之间变化时,反斯托克斯信号的幅度变化与温度呈线性关系,温度分辨率要求0.2℃时,AD的采样位数应该大于10位。

4 系统工作性能分析

针对该系统的相对温度灵敏度、温度分辨率以及空间分辨率进行了系统分析。

4.1 相对温度灵敏度分析

根据系统测量结果分析,计算得到在 $T = 300\text{K} \sim 315\text{K}$ 时,灵敏度曲线由图3小窗口所示,当 $T = 310\text{K}$ 时, $S_d = 6.6\%$ 。由于系统的相对灵敏度并不高,当测量的温度变化时对后续信号检测不利。为提高系统的相对温度灵敏度采用了掺入氧化锆材料的光纤进行了替代。但该光纤引入后对于微弱信号检测时,信噪比反而增加了。后续采用的反斯托克斯光和斯托克斯光强比值解调的方法将灵敏度进一步增加了。当 $T = 310\text{K}$ 时, $S_d = 7.581\%$,提高了15%。这样即使是高掺锆的传感光纤,灵敏度也会比用两路喇曼光调制的方法要高。

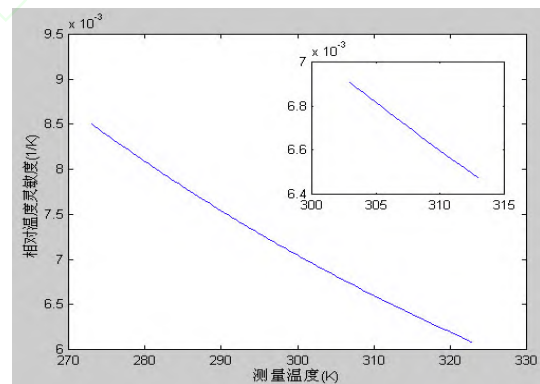


图3 相对温度分辨率与测量温度的关系

4.2 系统温度分辨率的分析

在实际测量系统中,斯托克斯光功率约为反斯托克斯光功率的6倍,测量温度越高,温度分辨率越大。当测量温度一定时,温度分辨率与信噪比成反比,要提高系统温度分辨率,则需提高信号的信噪比。实际应用中可以采用增加激光器输出、采用高掺锆光纤、选择合适APD探测器最佳增益系数的方法提高其温度分辨率。但这三种方法会增加温度传感器的成本,因此在信号处理过程中采用多次测量取平均值的方法滤除噪声的影响。信噪比的提高与测量平均次数的平方根成正比,要达到0.5℃的温度分辨率,累加次数要在 2^{16} 以上。可在累加之前进行小波分析,平均处理之后进行最小二乘法平滑处理,可以在保证信噪比改善同时,减小累加次数。

(下转第109页)

浓度范围内与峰面积呈良好的线性关系。

2.5 仪器精密度试验

精密吸取大黄素对照品溶液,用流动相稀释10倍,连续进样6次,每次20μL,按上述色谱条件下测定,测定其峰面积。结果大黄素对照品溶液的10倍稀释液的平均峰面积值为1618726,RSD为1.8%,说明本方法仪器精密度良好。

2.6 稳定性实验

取供试品溶液,分别在0、2h、4h、8h、12h、24h进样,按上述色谱条件进行测定,测定其峰面积。结果供试品溶液的峰面积平均值为3539267.3,RSD为2.1%,说明供试品在24 h内测定稳定性良好。

2.7 加样回收率

取已知大黄素含量的解毒降脂片供试品溶液6份,约2.0ml/份,向其中加入适量的对照品溶液,按上述色谱条件进行测定,测定其峰面积,计算其中大黄素的含量,并计算回收率、RSD值,结果见表1。

表1 大黄素加样回收率试验结果

序号	供试品溶液量/ml	供试品溶液含大黄素的量/mg	加对照品量/mg	测定总量/mg	回收率/%	平均回收率/%	RSD值
1	2.0	0.0935	0.09	0.1726	0.1835	96.09	1.49
2	1.9	0.0889	0.09	0.1739	0.1789		
3	2.0	0.0935	0.09	0.1762	0.1835		
4	2.0	0.0935	0.09	0.1786	0.1835		
5	2.1	0.0982	0.09	0.1783	0.1882		
6	2.0	0.0935	0.09	0.1785	0.1835		

2.8 样品含量测定

随机取解毒降脂片样品5份,按照供试品溶液的制备方法制

备供试品溶液,按上述色谱条件进行测定,测定大黄素峰面积,计算样品中大黄素的含量。结果见表2。

表2 5份解毒降脂片中大黄素含量测定结果

批号	1	2	3	4	5	平均含量
大黄素含量(mg·片 ⁻¹)	5.476	5.669	5.842	5.856	5.438	5.656

3 讨论

解毒降脂片为虎杖药材经加工处理,加入适量的辅料,压制成片,包糖衣,所制成的糖衣片。虎杖药材中含有多种有效成分,包括以白藜芦醇为代表的多酚类化合物与以大黄素为代表的蒽醌类化合物等^[5]。白藜芦醇在防治心血管疾病方面具有较为明显作用,大黄素具有较为明显的清热解毒、利湿、降脂、治疗肝炎等效果,是解毒降脂片中非常重要活性成分。因此,测定解毒降脂片中大黄素的含量对控制解毒降脂片的质量有着非常重要的帮助作用。根据实验结果,本实验建立的大黄素含量测定方法可作为控制解毒降脂片的质量参考。

参考文献

[1]邓雁北,翁孝刚,齐欣欣,等. 解毒降脂片对伴有2型糖尿病和血脂异常的脂肪肝患者的影响[J]. 中药药理与临床,2007,23(5):201-203.
[2]张丽丽,王倍. 解毒降脂片及易善复联合治疗非酒精性脂肪性肝炎疗效观察[J]. 中国伤残医学,2010,18(3):112-113.
[3]谭克元,辛伐他汀联合解毒降脂片治疗高血脂症的疗效观察[J]. 川北医学院学报,2007,22(5):467-468.
[4]黄莎莎,李萍,周娟,等. HPLC测定解毒降脂片中大黄素的含量[J]. 华西药杂志,2007,22(2):233-234.
[5]李萍,周娟,张蕾. HPLC测定解毒降脂片中白藜芦醇的含量[J]. 中国药品标准,2006,7(2):23-25.

(上接第69页)

4.3 系统空间分辨率分析

由于激光发射的是一列近似方波信号,其脉宽的存在使传感光纤 $\Delta L = \frac{t_w \cdot v_g}{2}$ 这一小段距离的散射信号同时返回注入光功率一端的接收机,而无法分辨,这一小段距离就是空间分辨率。假设后续接收机或信号采集电路的带宽能满足要求,则脉冲宽度越窄,空间分辨率越小,在同样长度的传感光纤上能够测量到更多的温度点信息,使温度场分布曲线更加细致,系统性能就越好。当然脉宽太窄,会使脉冲能量减小,不利于温度分辨率的提高,所以需要综合考虑各种因素而选取最佳脉宽值。

5 结论

根据分布式光纤测温原理,选取了用反斯托克斯光和斯托克斯光强比值来解调的方法设计了一套分布式光纤温度传感器,并对该系统的多项性能参数进行了分析。该分布式光纤温

度传感器用于人体温度测量需采用大量数据进行对比分析,并测试系统的空间分辨率及温度分辨率。后续目标是设计出能够满足空间分辨率为2m和温度分辨率为0.2℃的系统。针对改善系统精度方面并进行实验对比。

参考文献

[1]刘怀清,刘祥平,肖永鸿等.硬膜外和全麻期间体温变化的监测[J].现代医药卫生,2003,19(6).
[2]张在宣,王剑锋等.Raman 散射分布是光纤温度测量方法的研究[J].光子·激光,2001,12(6).
[3]李丽萍.基于DSP的分布式光纤测温系统[J].太原科技,2008,(5).
[4]吉增权.分布式光纤温度监测技术与应用[J].河南科技,2013,(7).
[5]苏国彬,李铮,常程等.基于喇曼散射的分布式光纤测温系统光接收机灵敏度的分析[J].航空学报,2001,22(Sup):103-105.
[6]陈佳主.微弱信号检测[M].北京:中央广播电视大学出版社,1987.