

基于反射型 TDM 的高精度光纤传感器系统设计

孙超^{1,2}, 丁建军¹, 张冈², 陈幼平²

(1. 江汉大学 物信学院, 武汉 430056; 2. 华中科技大学 国家数控技术工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了获得更高的检测精度和更大的测试范围, 研究了激光器的调制深度对输出强度的影响, 并且基于光谱吸收技术设计了一种基于反射型时分复用(TDM)的光纤传感器系统, 首次使用单根光纤完成了多点的气体浓度检测。针对该系统设计了一种适用于多点检测的高精度光源驱动电路。实验结果表明, 在保证能对准吸收峰的情况下, 基于反射型 TDM 的光纤传感器系统具有更高的精度, 并且满足远距离测量的要求。

关键词: 高精度; 光时域反射; 远距离测量

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)01-0020-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.01.006

Design of high precision optical fiber sensor system based on reflective TDM

SUN Chao^{1,2}, DING Jianjun¹, ZHANG Gang², CHEN Youping²

(1. The School of Physics and Information Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China; 2. National NC System Engineer Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper studies the effect of unmodulated depth of laser on output intensity in order to obtain higher detection accuracy and larger test range, based on the spectral absorption technique, it designs a reflective time-division multiplexing (TDM) optical fiber sensor system to complete the multi-point gas concentration detection with single fiber. The paper designs a high-precision light source driving circuit which is suitable for multi-point detection. Ensuring the absorption peak can be aligned, experiment results show that the optical fiber sensor system has higher accuracy and meets the requirements of long-distance measurement.

Key words: high precision; optical time domain reflection; long distance measurement

0 引言

根据气体分子的吸收光谱理论和 Beer-Lambert 定律, 可以建立光谱吸收型光纤气体传感器的理论模型。然而, 传统单点传感器在实际应用中已经不能满足大面积覆盖和多位置检测的要求^[1]。开发光纤传感器技术和提高传感性能, 特别是增加传感器容量和监

测区域范围是非常重要的^[2]。因此, 本文提出一种适用于多点远距离气体浓度检测的激光器驱动及其传感器系统。

1 基于反射型时分复用(TDM)的光纤传感器系统结构设计

传统 TDM 系统需要两倍于气室的光耦合器和两倍于测试距离长度的光纤, 与之相比, 我们采用了反射型气室。基于反射型 TDM 结构能减少光耦合器的数量和光纤长度, 完成准分布式测量^[3]。本文设计的基于反射型 TDM 的光纤传感器系统结构设计如图 1 所示。首先, 将光源调制成脉冲光源, 脉冲光源的频率根

收稿日期: 2017-07-25。

基金项目: 国家科技支撑项目(2013BAD11B02)资助; 国家科技支撑项目(2014BAD14B05-5)资助; 中国科学院科技服务网络计划合作项目(KFJ-SW-STS-172)资助; 武汉市市属高校产学研结合项目(CXY201401)资助。

作者简介: 孙超(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感网络。

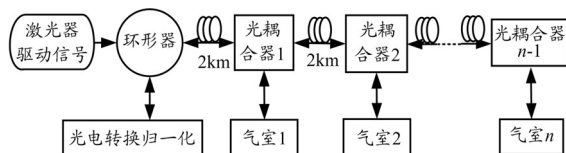


图 1 基于反射型 TDM 的光纤传感器系统结构

据气室数量决定,光源的光经过光环行器到达光耦合器 1。光耦合器 1 将光分为 2 路,第 1 路连接气室 1,第 2 路经过光纤布局线到达光耦合器 2。光耦合器 2 将光分为 2 路,第 1 路连接气室 2,第 2 路经过光纤布局线到达光耦合器 3。传输方式以此类推,直至到达最远端的第 n 个气室。光信号的返回是通过光环行器进行的,含有所有气室气体浓度信号的光经过光环行器到达信号处理部分,通过信号解调分别将各气室的气体浓度计算出来,根据输出信号返回时间将气体浓度与气室的顺序对应,在得到气体浓度的同时也可以得到相应的气室顺序。

当光信号到达光电二极管后,光信号转换为电信号,由于气体对激光光谱的吸收作用,电信号会产生变化,但变化范围很小,即使经过吸收强度较大的气体(如甲烷),信号光谱也仅在毫伏级范围内变化^[4]。

2 光源波长调制的硬件设计及实验

2.1 激光器分析和选型

半导体激光器主要由铟镓砷(InGaAs)、磷化铟(InP)、硫化镉(CdS)和硫化锌(ZnS)等物质组成^[5],具有从可见光延伸至红外区的光谱范围。其中,输出波长范围最大的激光器材料是 InGaAs,可以用于波分复用,且改变驱动电流和控制温度可以实现不同波长范围的输出,输出功率较大,适用于多点、多物质的检测。因此,本文使用 InGaAs 为激光器材料。半导体激光器中的分布反馈式激光二极管(DFB LD)较其它类型的半导体激光器而言,谱线宽度更窄,且在高速脉冲调制的环境下仍能保持动态单纵模特性^[6]。本传感器系统采用型号为 DFB-1653-I-N-I-SM 的大功率 DFB LD 作为光源,其中心波长为 1653.7nm,光谱宽度为 0.2nm,边模抑制比最小值为 35dB,最大输出光功率为 30mW。在该 LD 内部集成了背光探测器(PD)以及由热敏电阻与制冷器(TEC)共同组成的温度控制模块,保证了光源的稳定性。

2.2 LD 电流驱动系统电路设计

LD 电流驱动系统的调制过程如下:信号发生器产生叠加信号,叠加信号经过整形电路后输出至 LD 的电流驱动电路输入端作为调制信号,实现对 LD 的强

度调制和波长调制。为实现波长调制,本文采用的 LD 电流驱动系统主要由电流调制输入电路、恒流源电路、保护电路和电源电路等构成^[7],该系统硬件构成如图 2 所示。低频三角波信号和高频正弦波信号的产生由信号发生器实现,分别通过运放进行整形和叠加,输出信号 LASER POWER+ 和 LASER POWER- 经过一级运放后输出作为调制信号。

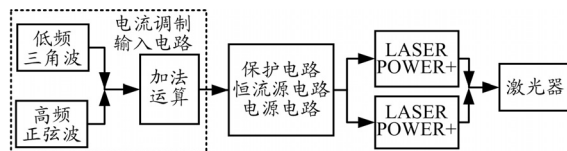


图 2 驱动信号叠加的硬件图

本文采用的调制方法不仅能得到稳定的 LD 频率信号,而且还能通过过滤去除不需要的频率分量。对于具有吸收特征的激光,其产生的一次谐波信号正比于吸收特征的一次导数的波长和强度调制。由比尔-朗伯定律对吸收强度进行量化:

$$I_t = I_0 e^{-\alpha} \approx I_0 (1 - \alpha) \quad (1)$$

其中, I_t 、 I_0 分别表示输入、输出光强的电流信号, α 表示吸收系数。施加余弦信号叠加到三角波形上,得到输入信号为:

$$I_t = [I_0 + \Delta I \cos(\omega t)](1 - \alpha CL) \quad (2)$$

其中, $\Delta I \cos(\omega t)$ 表示叠加频率为 ω 的余弦信号, C 和 L 分别表示待测气体浓度和吸收气室的长度,将 $\Delta I \times \cos(\omega t)$ 使用泰勒级数展开,把 I_t 带入得到的输入信号中,可以得到输入、输出波长的偏移以及波长与强度之间的关系:

$$(\lambda - \lambda_0) = \lambda \cos(\omega t - \psi) \quad (3)$$

其中, $\lambda - \lambda_0$ 表示输入、输出激光峰值波长的偏移, ψ 表示强度与波长偏差之间的相移,由于施加到 LD 的高频正弦信号的作用,锁定放大器可以计算出光电检测器接收的信号二次谐波值,其表达式为:

$$I_{2f} = -\frac{I_0 \alpha CL \nu_m^2}{2} \quad (4)$$

其中,频率调制幅度 $\nu_m \ll 1$ 。从式(4)可知,由于二次谐波信号的输出强度及其不对称性,一次谐波信号通常不用于气体的检测。二次谐波信号相对于具有两个零交叉的吸收线对称,并且在吸收线中心处具有峰值信号。通过这种方法可以获得高稳定度的激光器波长,同时保证输出信号稳定,从而得到更大的测试范围和更高的精度。

2.3 LD 温度控制系统电路设计

LD 的注入电流和温度变化时其输出激光的功率

和波长也会发生相应变化^[8],波长-温度调制率一般为 $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$,可见温度的变化对波长的影响较大。将 LD 应用于光纤传感或密集波分复用等场合时,往往需要将其输出波长偏移控制在数十皮米,甚至数皮米以内。在这些需要对 LD 波长进行调制的场合,可以采用对管芯温度进行调制的方法,也可以采用对注入电流进行调制的方法来实现波长调制。本文采用对管芯温度进行调制的方法设计了 LD 温度控制系统,以实现 LD 温度控制的要求。该系统的硬件结构如图 3 所示。

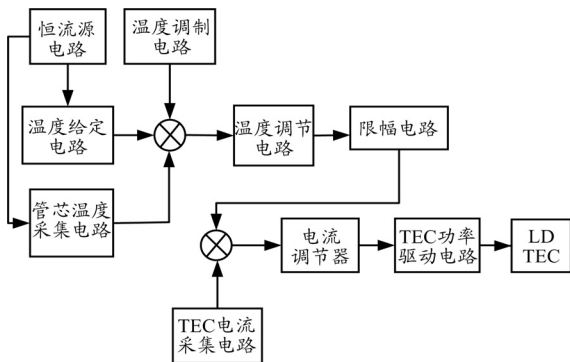


图 3 LD 温度控制系统硬件图

2.4 激光器光谱测试实验

本文使用甲烷气体进行实验研究,光源的发射光谱温度范围为 $10^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$,电流范围为 $10\sim 40\text{mA}$,每次变化 0.5°C 、 1mA 。LD 的温度控制通过调节 TEC 功率驱动电路(采用 MAX8521 芯片)构成的温度控制系统来实现,其精确度在 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 范围内,保证 LD 输出的中心波长在 1653.7nm 处且输出功率稳定。LD 光谱测试图如图 4 所示。

从图 4 可以看出,LD 的电流驱动和温度控制系统能将波长稳定在甲烷吸收波长范围。该系统的波长调谐中心为 1653.7nm ,范围是 $\pm 0.3\text{nm}$,使 LD 波长覆盖 1653.7nm 处的甲烷吸收峰,实现交流调制,调制幅度约为甲烷吸收线型半宽的 2 倍,使解调出来的二次谐

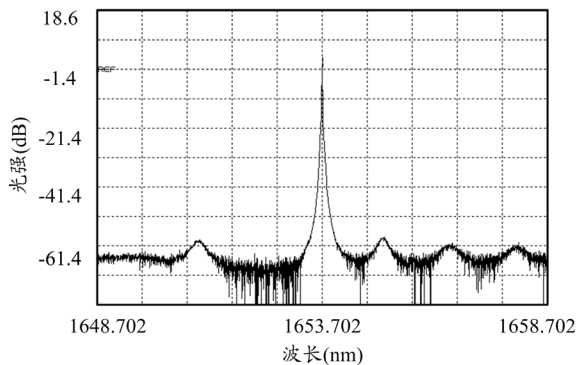


图 4 LD 光谱测试

波峰峰值受气体温度和大气压强变化的影响最小,且峰峰值信噪比最高。

2.5 最佳调制深度

因为本文设计的反射型传感器系统的采集范围比传统的采集范围更大,所以需要设计一种功率合适的光源驱动来满足这个更大的采集范围。不同的光源驱动能获得不同的调制深度,从而获得最大光源功率,使其既满足对准吸收峰的要求,又满足多点的设计要求,可以使接收端接收最远距离处的光信号满足灵敏度的要求。

调制深度对输出信号的影响可以从实验和理论上通过检测器的输出来实现。我们做了调制深度对输出强度影响的研究实验,在光电检测器中提取输出信号发送到锁定放大器(LIA),得到甲烷气体在不同调制深度 V_m 下,扫描一个周期信号的检测器输出,具体结果如图 5 所示。可以看出,本文设计的光源驱动能检测到的最小调制深度是 0.05cm^{-1} ,最大不失真的波长调制光谱的二次谐波(WMS-2f)^[9]信号可获得的调制深度为 0.35cm^{-1} 。

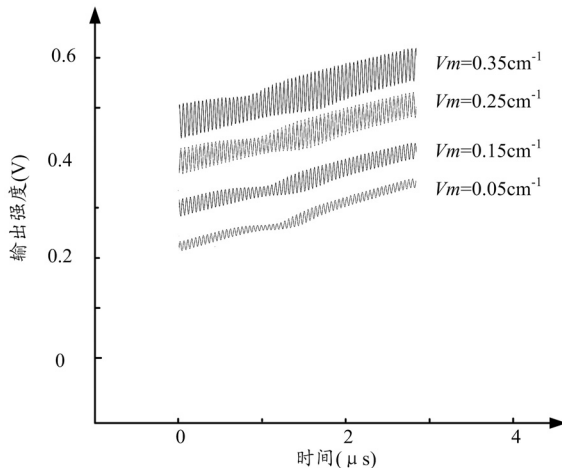


图 5 不用调制深度对输出强度的影响

3 基于反射型 TDM 的光纤传感器系统精度测试实验

为了测试反射型 TDM 的光纤传感器系统精度,我们进行了远距离气体浓度测试实验。实验使用了 3 个气室:第 1 气室在光源处,第 2 气室和第 3 气室与第 1 气室分别相隔 2km 和 4km 。脉冲信号通过这 3 个气室,为了使信号不存在混迭,设置占空比为 0.2。使用了两个耦合器,耦合比分别为 2:1 和 1:1。在气室中加入浓度为 $0.1\%\sim 1\%$ 的甲烷气体,每种浓度测量 20 次,每次时间为 30s 。

本实验是通过信噪比来计算灵敏度(ppm 级)的,信噪比为 1 时的检测浓度即为灵敏度。实验结果如图 6 所示。可以看出,第 1 气室(0km)、第 2 气室(2km)和第 3 气室(4km)的灵敏度分别为 110ppm、350ppm 和 960ppm。与传统 TDM 系统在 4km 处的灵敏度是 2000ppm 相比,本文提出的基于反射型 TDM 的光纤传感器系统获得了更高的灵敏度,所测量的灵敏度满足最低爆炸极限(Lowest Explosion Limit, LEL)的要求。

波长调制光谱测量二次谐波方法与直接吸收测试衰减的方法相比,能提高对噪声的抑制,取得更高的测试灵敏度。这是因为通过锁定放大器提取二次谐波的信号,通过多点算法的设计以及归一化分析来校准测量,增加了检测灵敏度。实验中,通过 0km、2km 和 4km 处的灵敏度衰减可以计算本系统的检测灵敏度,最远测试距离可以达到 40km,表明这是适合多点低浓度气体信号采集的方法。

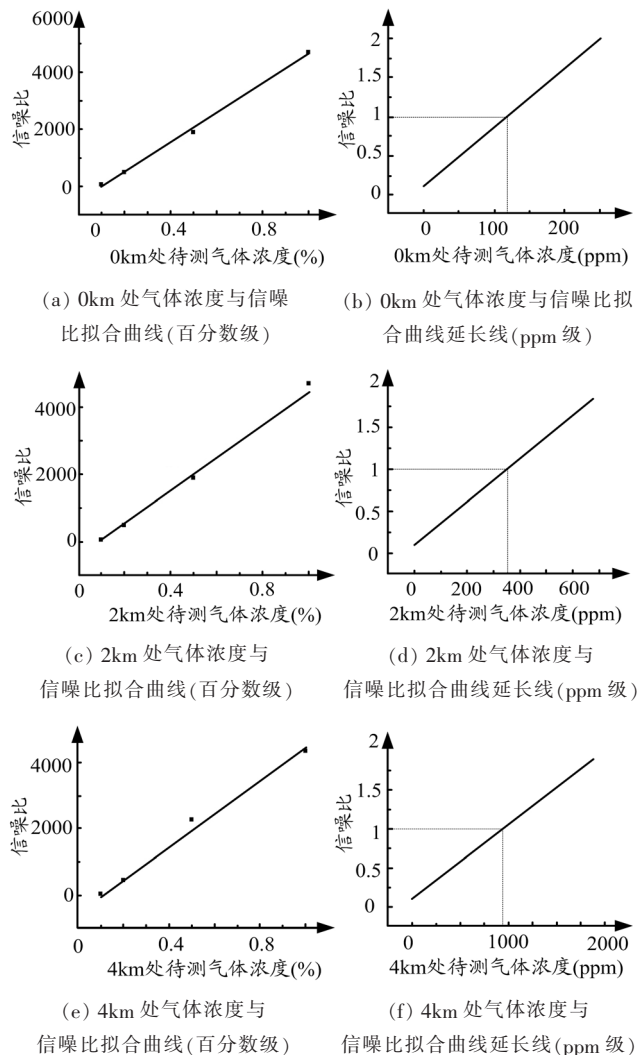


图 6 远距离气体浓度测试实验

4 结束语

本文设计了基于反射型 TDM 的光纤传感器系统,并完成了系统性能实验。实验证明,LD 的电流驱动和温度控制系统能将 LD 的输出波长稳定在 1653nm,准确达到甲烷的吸收波长范围。与传统 TDM 系统在 4km 处 2000ppm^[10]的灵敏度相比,本文提出的系统在 4km 处的灵敏度达到 960ppm,有效提高了测量灵敏度。另外,通过最大检测范围的计算可知,本系统的最远测试距离可以达到 40km,与传统 TDM 最远检测距离^[11]16km 相比,有效提高了测试范围。

参考文献:

- [1] BI Yingying. QPAR: A quasi-passive reconfigurable green node for dynamic resource management in optical access networks[J]. Journal of Light-wave Technology, 2014, 32(6): 1104–1115.
- [2] JORDI VUONG, PETROS RAMANTANIS, YANN FRIGNAC, et al. Mode coupling at connectors in mode-division multiplexed transmission over few-mode fiber[J]. Opt Express 2015, 23(5): 1438–1455.
- [3] STRAULLU S, ABRATE S, GAUDINO R. Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications [M]. London: Intech, 2015.
- [4] YU Kuanglu, WU Chongqing, WANG Zhi. Optical methane sensor based on a fiber loop at 1665nm[J]. IEEE Sensors Journal 2010, 9(10):728–731.
- [5] WERLE P, SLEMR F, MAURER K, et al. Near and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 37(2): 101–114.
- [6] TITTEL F K, RICHTER D, FRIED A. Solid-State Mid-Infrared Laser Sources[M]. Berlin Heidelberg: Springer 2003.
- [7] REIN S, KEITH D. Multispecies absorption spectroscopy of detonation events at 100 kHz using a fiber-coupled, time-division-multiplexed quantum-cascade-laser system[J]. Applied optics, 2016, 55(23): 6256–6262.
- [8] KOSTEREV A A, TITTEL F K, GMACHL C, et al. Trace-gas detection in ambient air with a thermoelectrically cooled, pulsed quantum-cascade distributed feedback laser[J]. Applied Optics, 2000, 39(14): 6866–6872.
- [9] SUN C, CHEN Y, ZHANG G, et al. Multipoint Remote Methane Measurement System Based on Spectrum Absorption and Reflective TDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28 (22): 2487–2490.
- [10] JIN Wei. Crosstalk analysis of a TDM fiber gas sensor array using wavelength modulation of the DFB laser [C]// Conference on Fiber Optic Sensor Technology and Application, April 5–9, 1999, San Francisco, USA. Bellingham: SPIE, 1999.
- [11] FLORIDIA C. Methane leak detection and spectral analysis by using only optical time domain reflectometry in semidistributed remote optical sensors[J]. SENSORS, 2016, 1(1): 1–3.