

• 光电测量与检测 •

VCSEL 型复合式 CO 和 CH₄ 激光气体检测系统的研究王彪¹, 黄硕^{1,2}, 程林祥^{1,2}, 俞泳波^{1,3}, 戴童欣^{1,3}, 连厚泉^{1,3}¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学技术大学, 合肥 230026

摘要: 选择 VCSEL 激光器作为此系统的光源, 设计搭建用于 CO 和 CH₄ 气体检测的低功耗型一体化复合式激光气体检测系统, 驱动两个 VCSEL 型激光器产生对应两种气体特定波长的激光束, 经过光纤合束器入射到检测气室内部, 所发射的激光经被测气体吸收后由气室后端出射到光电探测器上, 由光电探测器将光信号转变成相应的电信号。本文采用 TDLAS 气体检测技术, 同时检测 CO 和 CH₄ 混合气体中各气体浓度, 设计的系统具有体积小、功耗低等优点。

关键词: TDLAS; VCSEL; 复合式

中图分类号: TN271.5 文献标识码: A doi: 10.14016/j.cnki.jgzz.2021.06.012

Research on VCSEL composite CO and CH₄ laser gas detection systemWANG Biao¹, HUANG Shuo^{1,2}, CHENG Linxiang^{1,2},YU Yongbo^{1,3}, DAI Tongxin^{1,3}, LIAN Houquan^{1,3}¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: VCSEL laser is selected as the light source of this system in this paper, and a low power consumption integrated composite laser gas detection system for CO and CH₄ gas detection is designed and built. Two VCSEL lasers are driven to generate laser beams corresponding to specific wavelengths of two gases, and then incident into the detection chamber through the fiber combiner, after being absorbed by the measured gas, the emitted laser is emitted to the photodetector from the rear end of the gas chamber, and the photodetector converts the optical signal into the corresponding electrical signal. In this project, TDLAS gas detection technology is used to detect the gas concentration of CO and CH₄ mixture at the same time. The designed system has the advantages of small volume and low power consumption.

Key words: TDLAS; VCSEL; composite

1 引言

一氧化碳(CO)是一种有毒、可燃、易爆气体,是含碳燃烧物在发生不完全燃烧时生成的中间产物,主

要来源于内燃机排气及锅炉燃烧。一氧化碳被国内外普遍选用为反映煤转化和燃烧程度以及煤层火灾预警的主要指标气体^[1]。

甲烷(CH₄)是一种无色无味的可燃气体,是瓦斯和天然气的主要成分,CH₄气体浓度检测在很多行业都有着广泛的应用,一旦发生管道泄漏不仅带来经济损失,还会造成安全隐患,因此CH₄浓度的检测对于提高管道安全运营具有十分重要的应用价值^[2]。

一氧化碳和甲烷都是引发煤矿发生火灾、爆炸事

收稿日期: 2021-02-19

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制项目(No. 61727822)

作者简介: 黄硕(1996-),女,硕士研究生,主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: 1194451282@qq.com

通信作者: 王彪(1981-),男,博士,副研究员,主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: wb5996@163.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

http://www.laserjournal.cn

故,危害煤矿开采人员的危险因素,若能及时有效地发现煤矿甲烷及一氧化碳浓度超过安全值,则可尽快采取相关措施,降低事故发生的几率^[3]。

本文旨在研究低功耗型一体化复合式激光气体检测系统,可以检测 CO 和 CH₄ 混合气体中各气体浓度,具有功耗低、体积小、准确度高等特点。此系统的研制对于大气环境质量的预报、环境灾害的预警、工业的安全生产和减少燃爆事故的发生等方面具有重要的科学意义和社会意义。

VCSEL 激光器与以通常用的 DFB 激光器在结构上存在差异。VCSEL 激光器的工作电流一般为十毫安以内,在 15℃ 时其阈值电流小于 1mA,而 DFB 的工作电流为一百毫安,相比之下 VCSEL 的功耗低且效率高。

采用 VCSEL 激光器作为核心光源的 TDLAS 气体检测系统是近几年提出的一种新型的检测方案,其具有更小的体积、更低的功耗,可方便的搭载到中小型的移动设备上,具有很强的研究意义和应用价值^[4]。

2 TDLAS 气体检测技术

在气体检测领域,TDLAS 技术被广泛应用。在激光光谱技术中指出,气体分子会对激光进行“选频”吸收,吸收的激光光强同气体的浓度相关,TDLAS 气体检测技术就是利用这一原理来实现气体浓度的检测的。TDLAS 气体检测技术具有高检测灵敏度、单一选择性、检测速度快、设备寿命长等诸多优点^[5]。

2.1 比尔-朗伯定律

一束激光穿过被测气体,当激光波长和被测气体某个吸收谱线中心频率相同时,气体分子(原子)会吸收光子而跃迁到高能级,表现出来,就是激光的能量衰减^[6]。激光的能量衰减可以由比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律来描述:

$$I_v = I_{v,0} \exp [-S(T) g(v-v_0) P \rho L]$$

通过公式可以看出,在确定了吸收系数、气室内压强 P 和气体吸收光程 L 的条件下,输出光强只与气室内气体浓度有关,即光信号的衰减程度只与待测气体的浓度 C 有关,由此反推出待测气体的浓度,通过此公式即可对待测气体浓度进行高精度的测量。

3 系统总体方案设计

在深入研究理论的基础上,提出一种采用 TDLAS 技术的一体化激光器光源模块来检测气体浓度的检测方案,如图 1 所示。

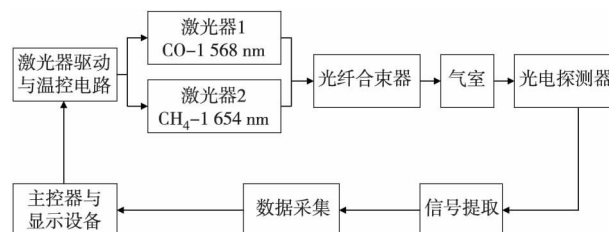


图1 低功耗型一体化复合式激光气体检测系统示意图

主控器选择 STM32F105R8,工作频率为 72MHz,其具有 64KB 的 FLASH,64KB 的 RAM。主控器中包含两个十二位 ADC(模数转换器),一个 ADC 具有十六个通道^[7]。

在主控器控制下,激光器驱动及温控单元和调制信号单元产生分别的信号叠加后,作为激光器驱动信号,驱动 VCSEL 激光器产生特定波长的激光束入射到检测气室内部,激光器 1 产生对应 CO 气体波长的激光束,激光器 2 产生对应 CH₄ 气体波长的激光束,再经过光纤合束器入射到检测气室内部。气室的入射端与出射端均具有准直器。

发射的激光经被测气体吸收后由气室尾端出射到光电探测器上,由光电探测器将光信号转变成相应的电信号。调制信号发生单元的另一路信号作为参考信号,同光电探测器所输出的携带了被测气体浓度信息的电信号一起,输入到锁相放大检测单元内,通过锁相放大检测后,经数据采集与处理单元输出最终被测气体的浓度数据。

3.1 选择激光器

对 CH₄、CO 进行气体浓度检测的关键,在于要选择一个合适的特征吸收峰位,并且要使所选的吸收峰位与其它干扰物质分子(比如水,大气其它气体成份等)的吸收峰不重叠,以此来减小检测干扰^[8]。在确定气体吸收峰后,根据实际需求选择相应的 VCSEL 激光器。

3.1.1 CH₄ 吸收线选择及对应激光器

CH₄ 气体的近红外吸收光谱如图 2 所示,图中横坐标为波数。

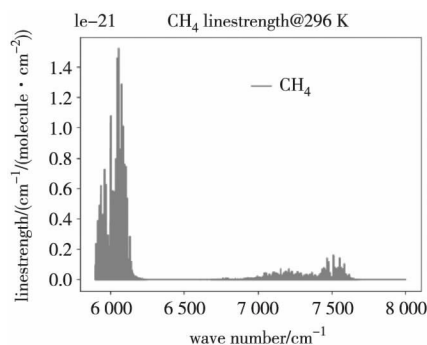


图2 CH₄ 气体的近红外光谱图

观察 CH₄ 的光谱图可知,该气体具有数以万计的吸收谱线,而本实验要选择的吸收谱线不仅要吸收峰值高且满足激光器可以发射的波长范围,还要避开其他气体吸收谱线的干扰^[9]。根本这个原则,在 HITRAN 数据库中寻找 CH₄ 的吸收谱线,最终选择 1 654 nm 作为本系统 CH₄ 气体测量的检测吸收谱线。

相应地,选择德国 VERTILAS 公司生产的型号为 VL-1654-1-ST-H4 的 VCSEL 激光器如图 3 所示,其中心波长为 1 654 nm。



图 3 VCSEL 激光器

3.1.2 CO 吸收线选择及对应激光器

红外波段的 CO 气体谱线强度分布图如图 4 所示,从图中可以看出 CO 气体吸收谱线主要分布在 4.5 ~ 5.2 μm 波段,1.5 ~ 1.6 μm 波段和 2.3 ~ 2.5 μm 波段。由于 1.5 ~ 1.6 μm 波段的谱线位于通信波段,而通信波段的激光器技术成熟,所以采用位于通信波段的 1 568 nm 波段附近的激光器作为本实验系统的光源^[10]。

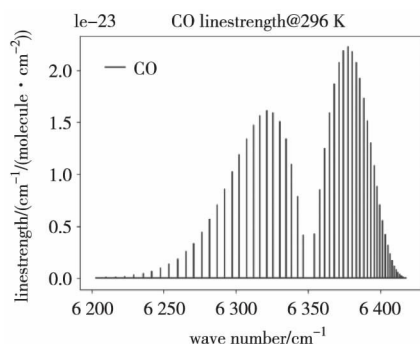


图 4 CO 气体的近红外光谱图

因此,本文选择 VERTILAS 公司设计型号为 VL-1567-1-SE-A4 的 VCSEL 激光器如图 5 所示。VCSEL 激光器具有一定的电流依赖性,有四纳米的可调谐波长范围,适用于 TDLAS 技术测量气体。

3.2 光学系统模块设计

本文选择 VCSEL 激光器作为此系统的光源,设

计搭建用于 CO 和 CH₄ 的低功耗型一体化复合式激光气体检测系统,驱动两个 VCSEL 型激光器分时合作检测 CO 与 CH₄ 气体,激光器 1 产生对应 CO 气体波长为 1 568 nm 的激光束,激光器 2 产生对应 CH₄ 气体波长为 1 654 nm 的激光束,再经过光纤合束器入射到检测气室内部。

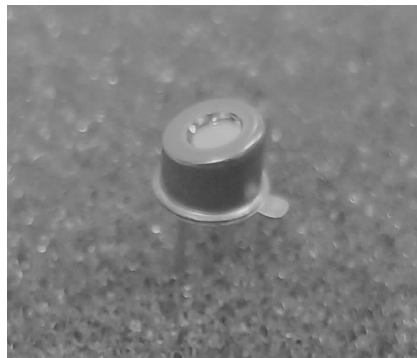


图 5 VCSEL 激光器

光纤合束器如图 6 所示,定做全波段单模光纤合束器,50 : 50 的耦合比。

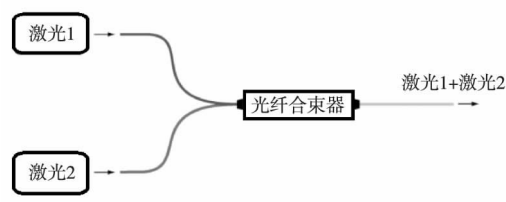


图 6 光纤合束器示意图

根据实际需求,设计特定结构的金属气室,使激光束在气室内光程达到检测需求的长度,同时有效隔绝外界干扰,气室材料不与被测气体发生化学反应,且不会干扰激光束在气室中的传播,以减小对测量结果的影响。实际应用时,拟采用微型气泵将气室内充入待检测气体,激光束从中穿过气室以完成气体吸收过程。所发射的激光经被测气体吸收后由气室后端出射到光电探测器上,由光电探测器将光信号转变成相应的电信号^[11]。光路设计结构图如下图 7 所示。

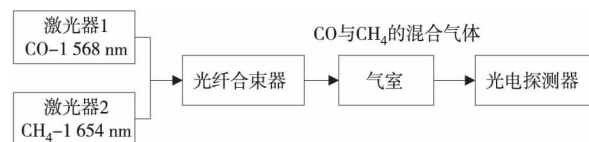


图 7 光路设计结构图

选择光电探测器时,其参数的选择极其重要,着重考虑其频率响应范围、灵敏度、线性度、等效噪声功率和暗电流等因素^[12-13],在多方对比后,选用 THORLABS 公司生产的 FGA01 InGaAs 光电探测器,波长范围为 800~1 700 nm。光电探测电路如图 8 所示。

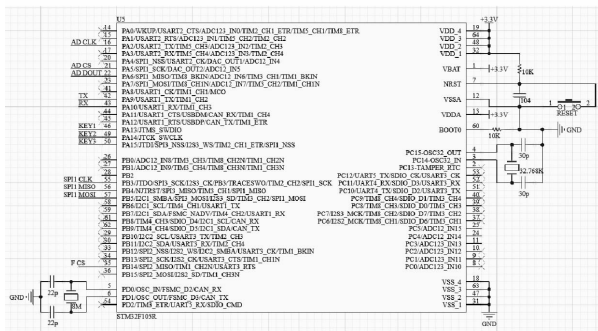


图8 光电探测电路图

4 建立反演数学模型

激光穿过被测气体后,系统测得的二次谐波幅值不能直接表达被测气体的实际浓度,需要多次测量探究两者关系,建立数学模型来反演被测气体当前浓度值,并不断与实际浓度值进行对比修正,直至实际测量的精度达到系统要求,编写软件算法并移植到系统主控制器中。

保持温度不变,气室光程为 20 m,将一氧化碳与甲烷气体分别按照不同的浓度混合后,充入气室,经测试得到实验结果,可在甲烷与一氧化碳的混合气体中检测出各气体浓度值。

表1 气体浓度与对应的二次谐波幅值

CO 气体 浓度 (ppm)	CO 气体 二次谐波幅值 (mV)	CH ₄ 气体 浓度 (ppm)	CH ₄ 气体 二次谐波幅值 (mV)
100	70	100	102
200	133	200	203
500	319	500	506
700	445	700	708
1 000	632	1 000	1 012

5 测试与总结

本文设计搭建用于 CO 和 CH₄ 气体检测的低功耗型一体化复合式激光气体检测系统,主控制器驱动两个 VCSEL 型激光器产生对应两种气体特定波长的激光束,再经过光纤合束器入射到检测气室内部,所发射的激光经被测气体吸收后由气室后端出射到光电探测器上,由光电探测器将光信号转变成相应的电

信号。

本文采用 TDLAS 气体检测技术,同时检测 CO 和 CH₄ 混合气体中各气体浓度,设计的系统具有体积小、功耗低等优点。此系统同样适用于其他多种混合气体的检测。

参考文献

- [1] 张保龙. 基于 TDLAS 的 CO 浓度检测系统的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [2] 李永刚, 张涛, 李洪刚. 用于测量长光程 CO 和 CO₂ 浓度的 TDLAS 传感器系统室内试验 [J]. 天津科技, 2020, 47(05): 60–63.
- [3] 周言文. 煤矿甲烷/一氧化碳检测仪电学系统的研制 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [4] 王傲, 邹永刚, 李明宇, 等. 高调谱效率 V 型腔可调谐半导体激光器设计与研究 [J]. 发光学报, 2020, 41(08): 977–983.
- [5] 张继业, 李雪, 张建伟, 等. 垂直腔面发射激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2020, 41(12): 1443–1459.
- [6] 聂伟, 阙瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展 [J]. 中国激光, 2018, 45(09): 9–29.
- [7] 谢仕永, 王久旺, 孙勇, 等. 垂直腔面发射激光端面泵浦的高能量调 Q Nd: YAG 激光 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(03): 558–564.
- [8] 杨卓凯, 田思聪, LARISCH Gunter, 等. 基于 PAM4 调制的高速垂直腔面发射激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2020, 41(04): 399–413.
- [9] 刘京, 邓永停, 李洪文. 基于级联滑模控制的高精度光电跟踪与捕获 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(02): 350–362.
- [10] 周华, 姚传飞, 贾志旭, 等. 中红外可调谐大能量飞秒脉冲激光产生 [J]. 发光学报, 2020, 41(04): 435–441.
- [11] 刘立富, 邱梦春, 温作乐, 等. 基于 TDLAS 技术在线监测烟气排放一氧化碳的应用 [J]. 中国环保产业, 2019(04): 29–32.
- [12] 朱凡, 李颖先, 谭久彬. 高精度激光光束准直系统设计 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(04): 817–826.
- [13] 卢庆杰, 刘薇, 魏光宇, 等. 基于光强实时反馈控制和同步校准的波长调谐移相干涉系统 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(04): 878–884.