光电测量与检测

# VCSEL 激光光源的单光路 TDLAS 氨气检测系统的研制

彪<sup>1</sup>, 鹿洪飞<sup>1,2</sup>, 李奥奇<sup>1,3</sup>, 黄 硕<sup>1,2</sup>, 戴童成<sup>1,3</sup>, 连厚泉<sup>1,3</sup> Ŧ

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033;
 中国科学院大学,北京 100049;
 中国科学技术大学,合肥 230026

摘 要: 基于 TDLAS 检测方法,选择了1512 nm 附近 NH。分子的吸收峰作为吸收谱线,研制了一种采用 VCSEL 激光光源的单光路近红外 NH, 检测系统。提出了时分复用差分调制技术,可消除在单光路检测系统中 由于激光光源波动引起的背景噪声。实验研究了不同浓度的 NH, 检测的响应情况,记录二次谐波(2f) 信号的 峰值并进行线性拟合,线性度为0.9997。系统的检测下限为8g/m3,在NH3浓度100~1000g/m3范围内,系 统的检测精度 0.81 %~5.30 %之间。对浓度为 500 g/m3 的 NH3 样品进行了时长 10 h 的稳定度观测实验,检 测数据波动小于±5.72%,表征了系统良好的稳定度。

关键词: 氨气检测; TDLAS-WMS; 单光路; 时分复用差分调制

中图分类号: TN219 DOI 编码: 10. 14016/j. cnki. jgzz. 2020. 05. 057 文献标识码: A

# Design of a single optical path ammonia gas detection system based on TDLAS technology with VCSEL laser

WANG Biao<sup>1</sup>, LU Hongfei<sup>1,2</sup>, LI Aoqi<sup>1,3</sup>, HUANG Shuo<sup>1,2</sup>, DAI Tongxin<sup>1,3</sup>, LIAN Houquan<sup>1,3</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Based on the TDLAS, the absorption peak of the NH<sub>3</sub> molecule near 1 512 nm was selected as the absorption line, and a single optical path near-infrared NH<sub>3</sub> detection system using a VCSEL laser was developed. A time-division multiplexing differential modulation technique is proposed, which can eliminate the background noise caused by the fluctuation of the laser in the single optical path detection system. The experiment studies the response of different concentrations of  $NH_3$  detection, records the amplitude of the second harmonic (2f) signal and performs linear fitting. The linearity is 0.999 7, and the detection limit is 8 g/m<sup>3</sup>, in the range of NH<sub>3</sub> concentration of 100 ~ 1 000  $g/m^3$ , the detection accuracy of the system is between 0.81% and 5.30%. Stability observation experiment was carried out on the NH<sub>3</sub> sample with a concentration of 500  $g/m^3$  for 10 hours. The fluctuation of the detected data was less than  $\pm$  5.72%, which indicated the good stability of the system.

Key words: Ammonia detection; TDLAS-WMS; single optical path; time division multiplexed differential modulation

#### 1 引言

NH, 是一种具有腐蚀性的有毒有害的工业气体, 对皮肤组织有腐蚀和刺激作用<sup>[1-3]</sup>。其对于大气质 量、环境安全、人体健康等有着极大的危害,因此高精

度的实时监测 NH,浓度对于维护环境质量、生存环境 改善等有着巨大的推进作用,在对大气环境质量的准 确预报、环境灾害的准确预警、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。

目前,TDLAS 激光气体检测技术的研究与开发普 遍采用 DFB 激光作为检测光源<sup>[4-8]</sup>。该技术方案相 对功耗较高且体积较大,这将 TDLAS 检测技术的应

收稿日期:2010-01-21

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(No. 61727822)

作者简介: 王彪(1981-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事嵌入式 系统软硬件方面研究。E-mail: wb5996@163.com

用限制在对功率不敏感的场合中。而 VCSEL 型激光器的特点是效率高、功率低、体积小,针对功率敏感的应用,VCSEL 激光器可以有效地改善 TDLAS 检测技术整个系统的功耗和体积问题<sup>[9-10]</sup>。

本论文根据 NH。检测的吸收谱线,选取了合适的 VCSEL激光器,研制了小电流驱动电路,结合光电探 测器及锁相放大器完成了检测系统整体设计与实验 平台的搭建,研制出一款近红外 VCSEL型 TDLAS 氨 气检测系统。采用该系统进行了 NH。气体浓度检测 测试,对其各项性能指标进行了分析,得出结论。

2 检测原理及调制方法

### 2.1 比尔朗博定律

基于比尔-朗伯定律,当一束光透过 NH<sub>3</sub> 分子时,NH<sub>3</sub> 分子对特定波长的光具有吸收作用<sup>[11-12]</sup>。由于 NH<sub>3</sub> 分子的选择性吸收会造成光能量的衰减,光衰减的能量与 NH<sub>3</sub> 的分子数成正比,吸收后的光强为:

$$I_{\iota} = I_{0} e^{\left[-\alpha(v) CL\right]}$$
(1)

式中 $I_0$ 为入射激光光强,L为吸收光程长度,C为待测气体的浓度, $\alpha(v)$ 为吸收线型函数。在一个标准大气压下, $\alpha(v)$ 可采用Lorentz线型:

$$\alpha(v) = \frac{\alpha_0}{\left(\frac{v - v_{cm}}{\Delta v}\right)^2 + 1}$$
(2)

其中, $\alpha_0$ 为吸收系数, $v_{cm}$ 为气体吸收峰的中心频率, $\Delta v$ 为气体吸收峰半宽度。

### 2.2 单光路时分复用差分调制

基于 WMS,采用电流调谐的方式实现调制激光 器的输出波长<sup>[13-15]</sup>。在单光路检测系统中,为了进 一步剔除激光光源波动对检测系统的影响,采用阶梯 分段式低频信号来调制激光器的注入电流。如图 1 所示,低频信号分为 L、M 和 H 段。M 段为锯齿波信 号,该段用于 NH<sub>3</sub>的浓度检测,通过叠加高频正弦波 信号调制激光器的注入电流,使得激光器的输出波长 扫过 NH<sub>3</sub> 分子的吸收峰。L 和 H 段电流恒定,激光器 在该段电流驱动下的输出波长处于 NH<sub>3</sub> 分子的非吸 收区。由于激光器的光强波动主要来源于激光器自 身的背景噪声,在短暂的单周期检测时间内可认为其 均值分布。因此,将 L 和 H 段波形对应的光强进行平 均处理,作为 M 段信号的光强 I<sub>om</sub>的反演依据进行数 据处理,可进一步消除单光路检测系统中激光器光强 波动产生的干扰。



经过调制后,激光器的输出频率v和输出光强 $I'_0$ 为:

$$v = v_0 + v_m \cos\omega t \tag{3}$$

$$I_0 = I_0 (1 + \eta \cos \omega t) \tag{4}$$

式中 $v_0$ 代表激光器输出的中心频率, $v_m$ 为调制信号的振幅, $\eta$ 为强度调制指数, $\omega$ 为调制频率的 $2\pi$ 倍。

由于实际的气体吸收和强度调制均非常 小<sup>[16-18]</sup>,即α(v) <<1 且 η<<1。将将式(4)代入式 (1)进行泰勒展开,高阶项被忽略掉,可以近似得到光 强为:

$$I(v,t) = I_0 \left[ 1 + \eta \cos \omega t - \alpha (v_0 + v_m \cos \omega t) \right] CL$$
(5)

根据式(2),当激光扫过气体吸收峰时,即 $v_0 = v_{cm}$ ,可得:

$$I(v,t) = I_0 \left( 1 + \eta \cos \omega t - \frac{\alpha_0 CL}{1 + m^2 \cos^2 \omega t} \right)$$
(6)

$$m = \frac{v_m}{\Delta v} \tag{7}$$

根据上述的理论推导可知,光电探测器的检测信号 *E*(*t*)可以表示为:

$$E_{L}(t) = spI_{0L}(1 + \eta \cos\omega t)$$
 (8)

$$E_{M}(t) = spI_{0M}\left(1 + \eta \cos\omega t - \frac{\alpha_{0}CL}{1 + m^{2}\cos^{2}\omega t}\right)$$
(9)

$$E_{H}(t) = spI_{0H}(1 + \eta \cos\omega t) \tag{10}$$

其中,s为光电探测器的转换系数,p为检测电路的放大倍数。 $I_{0L}$ , $I_{0M}$ 和 $I_{0H}$ 为低频信号L段、M段和H段所对应的入射激光光强,且满足 $I_{0M} = \frac{I_{0L} + I_{0H}}{2}$ 。差分

信号 
$$E(t) = \frac{E_L(t) + E_H(t)}{2} - E_M(t)$$
为:

$$E(t) = spI_{0M} \left( \frac{\alpha_0 CL}{1 + m^2 \cos^2 \omega t} \right)$$
(11)

对 E(t) 进行傅里叶级数展开,得到二次谐波分量系数 E<sub>2</sub>,为:

$$E_{2f} = \frac{kspI_{0M}CL\alpha_0}{2} \tag{12}$$

$$k = \frac{2(-2 - m^2 + 2\sqrt{1 + m^2})}{m^2\sqrt{1 + m^2}}$$
(13)

由式(12)可知,在m,L一定的情况下, $C 和 E_{2y}$ 是成正比的。实验中,提取二次谐波信号分析,即可计算出待测 NH<sub>3</sub> 气体的浓度, $C 和 E_{2y}$ 之间的关系可以通过校准实验获取。

3 NH<sub>3</sub> 吸收谱线的选择

根据光谱分析,NH<sub>3</sub>分子在中红外的吸收峰明显 强于近红外<sup>[19-20]</sup>,但由于近红外激光器的工艺成熟、 应用广泛、价格相对较为低廉,且在实际检测过程中, 中红外激光器光路耦合较为困难,因此本论文选择 NH<sub>3</sub>分子近红外波段处的特征吸收谱线来检测其浓 度。



图 2 NH<sub>3</sub> 在 6613.76~6613.98 cm<sup>-1</sup>范围内的吸收谱线



如图 2 所示,在 6613.76~6 613.98 cm<sup>-1</sup>范围内, NH<sub>3</sub> 分子在 6 613.878 cm<sup>-1</sup>(1 512 nm) 处具有最强的 吸收谱线,吸收线强度数量级为 10<sup>-22</sup>。而图 2.4 中二 氧化碳(CO<sub>2</sub>)、水(H<sub>2</sub>O)、甲烷(CH<sub>4</sub>)等常见干扰气体 分子在 1 512 nm 处的吸收线强度的数量级均小于 10<sup>-28</sup>,远远小于 NH<sub>3</sub> 分子的吸收强度,在实际检测时 可以忽略其产生的干扰。综合考虑上述因素,为了得 到精确的检测结果,尽可能避免其它气体分子的干 扰,本论文选用 NH<sub>3</sub> 分子 1 512 nm 处的吸收线实现 浓度检测,吸收线强度为 2.222×10<sup>-22</sup>。

### 4 系统配置

检测系统整体结构如图 3 所示,光学模块包括 VCSEL激光器、自行设计的多反射气室和光电探测器 等;电学模块包括激光器驱动电路、高精度温度控制 电路、锁相放大器、数据处理模块等。

根据 NH<sub>3</sub> 气体吸收谱线和激光器的制造工艺成 熟度、功耗、调谐范围和市场价格等因素,本文选取德 国 VERTILAS 公司的近红外 VCSEL 激光器 VL-1512 -1-ST-H4,发射峰波长为1512 nm,具有0.2~3 mW 的输出光功率,可以满足本论文的实际检测需求。

为了提高探测灵敏度,自行设计了多反射气室, 使用三个反射镜面,由熔融石英(JGS1)材料制成,镜 面直径60 mm,反射光谱范围450 nm~20 μm,镜面镀 银膜,反射率大于95%,可通过手动调节光路改变有 效光程。输入端采用 FC/APC 光纤耦合接口,并且通 过调整入射光路,将光路长度设置为30m,具有93次 反射。激光穿过气室被 NH, 吸收发生衰减后,由光电 探测器预处理电路将光电流信号转化为电压信号。 针对单光路检测系统中由激光光源波动所带来的干 扰问题,采用单光路时分复用差分调制技术,经由放 大滤波电路提取出实际的衰减后的激光光强信号。 系统通过锁相放大器提取信号中 2f 信号的峰峰值, 使用 AD 模数转换功能对锁相放大器输出 2f 信号的 峰峰值进行实时连续采集,完成一个扫描周期后,将 计算求得单个检测周期的 NH3 检测浓度。重复多个 扫描周期,记录 NH,浓度检测结果并计算平均值,完 成一次 NH, 浓度检测。

### 5 实验结果与分析

### 5.1 系统标定

为了测量二次谐波(2f)信号的峰峰值和 NH<sub>3</sub> 浓 度之间的关系,采用动态配气法配置出 100 g/m<sup>3</sup>、200 g/m<sup>3</sup>、300 g/m<sup>3</sup>、400 g/m<sup>3</sup>、500 g/m<sup>3</sup>、600 g/m<sup>3</sup>、700 g/ m<sup>3</sup>、800 g/m<sup>3</sup>、900 g/m<sup>3</sup>、1 000 g/m<sup>3</sup> 的 10 种不同标准 浓度的 NH<sub>3</sub>。以 5 分钟时长为间隔,依次向气室内通 入准备好的 10 种浓度的 NH<sub>3</sub>,如图 4 所示,实验中得 到的 2f 信号的峰峰值记为 max(2f),数据表明 NH<sub>3</sub> 对 激光能量的吸收与其浓度呈线性关系,线性拟合得到 式(14)(式中 C<sub>NH3</sub>为被测 NH<sub>3</sub> 浓度):

$$\max(2f) = 0.003C_{NH3} - 0.0023$$
(14)

继而推导出式(15):

$$C_{NH3} = 333.3333 \max(2f) + 0.7667$$
 (15)

使用公式(15)可以将检测到的2f信号的峰峰值 换算为相应的NH<sub>3</sub>浓度,其线性相关度为0.9997。



图 4 10 种不同浓度 NH<sub>3</sub> 的 2f 信号的峰峰值拟合曲线

#### 5.2 检测下限

为了测量 NH<sub>3</sub> 检测系统的检测下限,配置 500 g/m<sup>3</sup> 的 NH<sub>3</sub> 通入检测气室,锁相放大器探测到的 2f 信号如图 5 所示; NH<sub>3</sub> 浓度为 0 g/m<sup>3</sup> 时,其 2f 信号如图 6 所示。数据表明,在 NH<sub>3</sub> 浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 时,2f 信号的峰峰值(SA)为 1.497 V,0 g/m<sup>3</sup> 的噪声信号波动幅值(NA)为 0.024 V,信噪比(SNR)为 35.9 dB,系统的检测下限经计算为:500 g/m<sup>3</sup>×NA/SA ≈ 8 g/m<sup>3</sup>。



图 5 500 g/m<sup>3</sup> NH<sub>3</sub> 的 2f 信号的振幅



图 6  $0 g/m^3 NH_3$  的 2f 信号的振幅

### 5.3 系统精度

为了测试检测系统的精度指标,配置 100 g/m<sup>3</sup>、 200 g/m<sup>3</sup>、300 g/m<sup>3</sup>、400 g/m<sup>3</sup>、500 g/m<sup>3</sup>、1 000 g/m<sup>3</sup> 6 种标准浓度的 NH<sub>3</sub>,检测系统根据拟合公式计算了它 们的浓度数值如表 1 所示,针对检测结果的误差分析 如图 7 所示,蓝色线给出了每组数据的绝对误差,红 色线反映了检测结果的相对误差。数据分析表明, NH<sub>3</sub> 检测系统绝对误差和相对误差的最大值分别为 为 8.8 g/m<sup>3</sup> 和 5.30 %。在 100~1 000 g/m<sup>3</sup> 范围 内,系统的检测精度为 0.81 %~5.30 %之间。

表1 6种浓度的 NH<sub>3</sub> 实测数据

标准浓度(g/m <sup>3</sup> )	100	200	300	400	500	1 000
实测浓度( g/m <sup>3</sup> )	105.3	204.7	296.7	408.8	506.5	991.9
绝对误差	5.3	4.7	-3.3	8.8	6.5	-8.1
相对误差	5.30%	2.35%	-1.10%	2.20%	1.30%	-0.81%



图 7 检测系统对 6 种不同浓度 NH<sub>3</sub> 的检测误差

### 5.4 稳定度分析

为了测定检测系统稳定性,可以通过长时间向气 室内输入一定标准浓度的 NH<sub>3</sub> 气体,观测检测系统输 出值与时间的关系来衡量。将浓度为 500 g/m<sup>3</sup> 浓度 的 NH<sub>3</sub> 通入检测气室内,每 1s 记录一次检测系统输 出的浓度数值,在恒温条件下进行时长 10 h 的稳定度 观测实验,分析检测系统输出的气体浓度数值与时间 的关系,如图 8 所示。在持续 10 h 的长时间检测时, 检测 系 统 输 出 的 NH<sub>3</sub> 浓 度 值 均 处 在 475.1 ~ 528.6 g/m<sup>3</sup> 之间,波动小于± 5.72 %,检测数据的平 均值为 499.95 g/m<sup>3</sup>。数据分析表明了系统具有良好 的稳定度。



## 6 结论

本文采用1512 nm VCSEL激光器,基于 TDLAS 研制了一种近红外 NH<sub>3</sub> 检测系统。针对单光路检测 系统中由激光光源波动所带来的干扰问题,提出了时 分复用差分调制技术,进一步消除了单光路检测系统

中激光器光强波动产生的干扰。深入分析了激光器 驱动、激光照射气体后吸收衰减和二次谐波信号提取 过程中的信号变化,自行设计了新型多反射气室进一 步提高系统检测精度。自行开发的高精度温控和驱 动电路用于驱动激光器。锁相放大器被用于提取 2f 信号。使用该检测系统做了大量的实验,研究了其各 项性能。深入分析检测数据,实验结果表明系统具有 良好的性能指标,检测下限为 8 g/m<sup>3</sup>,在 NH<sub>3</sub> 浓度 100~1 000 g/m<sup>3</sup>范围内,系统的检测精度为 0.81 % ~5.30 %之间。对浓度为 500 g/m<sup>3</sup>的 NH<sub>3</sub> 样品进行 了时长 10 h 的稳定度观测实验,检测数据波动小于 ±5.72 %,表征了系统良好的稳定度。最后,该系统 所采用的时分复用差分调制技术和气室结构同样适 用于其它单光路近红外气体检测系统的精度提升,具 有较高的灵活性和实用性。

### 参考文献

- [1] 王箴等. 化工辞典 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [2] 氨对人体健康的危害.卫生部卫生应急办公室,中国 CDC 职业卫生与中毒控制所.2012-11.
- [3] 王智军. 合成氨工艺技术的现状及其发展趋势[J]. 中国 石油和化工标准与质量,2019,39(24):237-238.
- [4] 艾宸. 基于可调谐激光吸收光谱技术的逃逸氨检测系 统研究 [D]. 北京: 华北电力大学,2017.
- [5] RAO Yi, YANG W, CHASE C, et al. Long-Wavelength VCSEL Using High-Contrast Grating [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1701311-1701311.
- [6] 程丽娟,刘贵珊,万国玲,何建国.可见/近红外高光谱成 像技术对长枣中葡萄糖含量的无损检测[J].发光学报, 2019,40(08):1055-1063.
- [7] 郭健,陈雨行,王丽荣,韦阳,郭宇,赵也明,刘丽兰,陈晓
   禾.非接触式呼吸与心率信号采集系统[J].光学精密工
   程,2019,27(06):1354-1361.
- [8] 李伟,贾军伟,柴昊,等. 基于 TDLAS 的气体检测技术研究[J]. 宇航计测技术,2019,39(04):79-84.
- [9] 高升,王巧华.基于高光谱图像信息融合的红提糖度无

损检测 [J]. 发光学报,2019,40(12):1574-1584.

- [10] ZHANG J W, WANG Y L, XUE R, et al. Progress of advanced and practical NH<sub>3</sub> measurement technology in atmospheric environment [J]. Transducer & Microsystem Technologies, 2013, 32(12): 10–14.
- [11] 郭松杰,刘建鑫,周月婷,许非,马维光.基于电流扫描波 长响应函数直接确定正弦波扫描波长调制光谱中 DFB 激光器的相对波长响应[J].光学精密工程,2019,27 (11):2281-2288.
- [12] 尹增谦,袁春琪,王永杰. Voigt 线型宽度的经验公式及 其应用[J].发光学报,2019,40(08):1064-1069.
- [13] NAGALI V, CHOU S I, BAER D S, et al. Tunable diode– laser absorption measurements of methane at elevated tem– peratures [J]. Applied Optics, 1996, 35 (21): 4026 – 4032.
- [14] 王岳,王勇,李占国,尤明慧. 全息光刻制备 808 nm 腔面 光栅半导体激光器 [J]. 发光学报,2019,40(09):1130-1135.
- [15] GUSTAFSSON U, SANDSTEN J, SVANBERG S. Simultaneous detection of methane, oxygen and water vapour utilising near-infrared diode lasers in conjunction with difference -frequency generation [J]. Applied Physics B, 2000, 71 (6):853-857. [J]. 光学技术, 2011, 37(2):241-244.
- [16] 贾良权,祁享年,胡文军,赵光武,阚瑞峰. 种子呼吸 CO\_2 浓度检测系统 [J]. 光学精密工程,2019,27(06):1397-1404.
- [17] OH D B, HOVDE D C. Wavelength-modulation detection of acetylene with a near-infrared external-cavity diode laser
   [J]. Applied Optics, 1995, 34(30):7002-5.
- [18] 吕鹏飞,陆志谦,何巧芝,王倩,赵辉.基于光声谱法的无 创血糖在体检测[J].光学精密工程,2019,27(06):1301 -1308.
- [19] WANG Q, WANG J, LI L, et al. An all-optical photoacoustic spectrometer for trace gas detection [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2011, 153(1):214-218.
- [20] 郭拴运. 差分光谱吸收的光纤气体传感器 [J]. 应用光 学, 1989(3):44-45.