

doi: 10.3788/gzxb20184704.0423001

# 中红外量子级联激光气体检测系统

蔺百杨<sup>1</sup>, 党敬民<sup>2</sup>, 郑传涛<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>, 王一丁<sup>1</sup>

(1 吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130012)

(2 吉林大学 生物与农业工程学院, 长春, 130022)

**摘 要:** 为了满足基于室温连续量子级联激光器(QCL)的中红外气体检测系统的需求, 研制了板级量子级联激光器的驱动电路以及谐波锁相放大电路。通过信号发生电路产生高精度的直流偏置信号、低频锯齿波扫描信号和高频正弦波调制信号, 控制激光器的工作电流, 进而扫描/调制激光器的输出波长; 为了探测痕量气体吸收光谱的二次谐波信号, 并获得较高的信噪比, 研制了锁相放大电路, 主要包括倍频电路、正交转换电路和数据转换电路; 为了提高系统的稳定性和可靠性, 研制了高稳定性的线性供电电路以及保护电路。采用中科院半导体所研制的波长为  $4.76 \mu\text{m}$  的 QCL 作为光源, 开展了电学系统的功能验证实验以及气体检测实验。实验结果表明: QCL 驱动电路线性度为  $0.0063\%$ , 长期电流稳定度为  $5.0 \times 10^{-5}$ , QCL 光强稳定度为  $5.07 \times 10^{-4}$ ; 锁相放大器系统具有较高的稳定性和较低的误差, 一次谐波的最大误差在  $2.4\%$  以内, 二次谐波的最大误差在  $5.5\%$  以内, 通过动态配气方式开展了低浓度一氧化碳(CO)气体检测实验, 在  $0 \sim 100 \text{ ppm}$  范围内, 二次谐波信号的幅值与 CO 气体浓度具有较高的线性度(拟合优度  $> 0.99$ ), 表明所研制的电学系统具有良好的稳定性和可靠性, 为中红外 CO 气体的检测提供了安全可靠的保障。

**关键词:** 光电子学; 中红外; 驱动电路; 锁相放大; 量子级联激光器; 气体检测

中图分类号: TN21

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)04-0423001-8

## Mid-infrared Quantum Cascade Laser Gas Detection System

LIN Bai-yang<sup>1</sup>, DANG Jing-min<sup>2</sup>, ZHENG Chuan-tao<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, WANG Yi-ding<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

(2 College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** To meet the requirement of mid-infrared gas detection based on continuous Quantum Cascade Laser (QCL), a board-level QCL driver and a lock-in amplifier are developed. High-precision direct-current (DC) bias signal, low-frequency saw-tooth scan signal and high-frequency sine-wave modulation signal are generated by a signal generation circuit to control the laser current and scan/modulate laser output wavelength. The developed lock-in amplifier includes a multiple frequency circuit, an orthogonal conversion circuit, and a data-conversion circuit, which detects the second harmonic (2f) signal from the trace gas absorption signal and gains a high signal-to-noise ratio. In addition, in order to improve the stability and reliability of the system, a linear power supply with high stability and a high-performance protection circuit are designed. A QCL with a wavelength of  $4.76 \mu\text{m}$  developed by the Semiconductor Institute of Chinese Academy of Science is used as a light source, and function verification and gas

**基金项目:** 国家重点研发计划 (Nos. 2016YFD0700101, 2016YFC0303902), 国家自然科学基金 (Nos. 61775079, 61627823, 61307124), 吉林省科技发展计划项目 (No. 20140307014SF), 吉林省省级产业创新专项资金项目 (No. 2017C027), 长春市科技发展计划项目 (Nos. 11GH01, 14KG022) 资助

**第一作者:** 蔺百杨 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外气体检测系统. Email: linby15@mails.jlu.edu.cn

**通讯作者:** 郑传涛 (1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电子器件与系统. Email: zhengchuantao@jlu.edu.cn

**收稿日期:** 2017-08-09; **录用日期:** 2017-11-21

<http://www.photon.ac.cn>

detection experiments of the electrical system are carried out. The experimental results show that the linearity of laser driver is as high as 0.006 3%, the long-term current stability is  $5.0 \times 10^{-5}$ , and the long-term power stability of QCL is  $5.07 \times 10^{-4}$ . The lock-in amplifier has an average detection error on the first harmonic (1f) signal of less than 2.4% and an error on the 2f signal of less than 5.5%. Low-concentration carbon monoxide (CO) detection is carried out, and there is a high linearity ( $R^2 > 0.99$ ) between the amplitude of 2f signal and CO gas concentration in the concentration range of 0-100 ppm. These results confirm that the developed electrical system has good stability and reliability, assuring a safe and reliable mid-infrared CO gas detection.

**Key words:** Optoelectronics; Mid-infrared; Driving circuit; Lock-in amplifier; Quantum cascade laser; Gas detection

**OCIS Codes:** 230.4480; 250.0040; 040.1880; 040.3060; 260.3060

## 0 引言

痕量气体检测已应用于各个领域,如温室气体检测、环境污染气体检测、矿井爆炸气体检测等<sup>[1-2]</sup>。一氧化碳(CO)属于有毒、爆炸性气体,检测CO浓度对于工业生产安全、预防火灾与人员中毒具有重要意义。目前,常见的CO检测方法有非分光红外光谱技术、波长/频率调制光谱技术<sup>[3]</sup>、光声光谱技术<sup>[4]</sup>、腔增强光谱技术等。可调谐半导体激光吸收光谱技术<sup>[5]</sup>(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)是一种常见的高灵敏度气体检测方法,通过调节激光器中心波长使其扫过待测气体吸收峰,进而使激光光束与待测气体相互作用,从而得到与气体吸收具有相同特征的信号。该技术具有高灵敏度,高选择性和快响应速度等优点。由于光源输出特性直接影响检测系统的检测灵敏度、检测下限等重要技术指标<sup>[6]</sup>,所以选择适合的光源并使其安全稳定可靠的工作十分重要。本文选择中红外波段的量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)作为光源,它具有输出光功率高、线宽窄、单模可调谐等优点<sup>[7]</sup>。同时,利用锁相放大器有效的提取出经过气体吸收后的二次谐波信号,提高信噪比,也是气体检测的关键<sup>[8]</sup>。

目前,无论是工作于脉冲模式还是工作于连续模式的QCL驱动电源,都具有商品化的产品,例如,Newport公司生产的LDX-3620B超低噪声激光二极管驱动产品、Wavelength Electronics公司生产的QCL OEM系列的驱动电源、北京特一安电源科技有限公司出售的半导体激光器驱动电源TNZ-03V60A-T等。针对工作于连续模式的QCL驱动电源,驱动电流能从几毫安调制至几安培、工作带宽达兆赫兹、拥有人机交换以及远程控制接口<sup>[9]</sup>。在锁相放大器的研制方面,国内外也出现了很多商用产品,如美国斯坦福公司研制的SR810数字锁相放大器,德国FEMTO品牌锁相放大器LIA-MV-150,日本NFCORP公司研制的LI5630/LI5640型锁相放大器,北京北光仪器有限公司出售的OE1022系列等,但是这些商品化产品体积大、成本高,不利于应用在便携式产品中。国内一些科研机构研制的激光器驱动电源<sup>[10-11]</sup>和锁相放大器<sup>[12]</sup>,与商用产品相比,虽然功能相对全面,但产品性能有待完善<sup>[13-14]</sup>。

针对中红外量子级联激光器CO气体检测系统,本文研制了QCL驱动器和提取二次谐波信号的锁相放大器,在满足调制和解调功能的条件下,充分简化了电路结构,进而降低成本,缩小体积,有利于应用在便携式检测仪中。通过开展气体检测实验,验证了检测系统的性能。

## 1 基于QCL的CO气体检测系统的原理

### 1.1 系统构成

如图1,气体检测系统由电学系统和光学系统组成。电学系统由激光器驱动电路、温度控制电路、锁相放大电路、微控制器以及外围电路组成;利用差分吸收光谱检测原理并采用单光源双探测器的光路结构。利用电光调制、相关检测以及锁相放大解调原理对微弱信号进行处理,并提取与CO气体浓度相关的信息<sup>[15]</sup>。

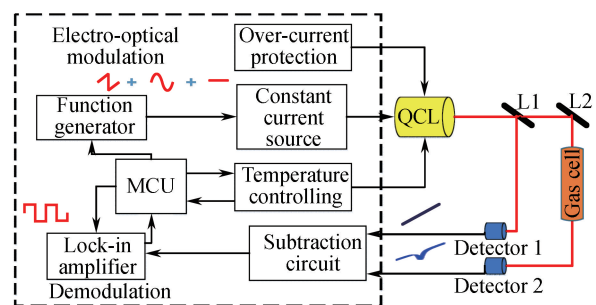


图1 中红外QCL CO气体检测系统框架图  
Fig.1 Schematic of CO detection system based on a mid-infrared QCL

采用中科院半导体所研制的中心波长为  $4.76 \mu\text{m}$  的 QCL 作为光源,其阈值电流为  $310 \text{ mA}$ ,正向导通电压约  $16 \text{ V}$ ,动态电阻约  $9 \Omega$ ;采用湖北金卫公司研制的 Herriott 多次反射气室,光程为  $16 \text{ m}$ ,内腔尺寸为  $400 \times 50 \times 25 \text{ mm}(L \times W \times H)$ ,容积为  $500 \text{ ml}$ .两个探测器均为光伏型碲镉汞红外探测器,其响应截止波长为  $10.6 \mu\text{m}$ ,响应度为  $0.002 \text{ A} \times \text{mm}/\text{W}$ ,探测度为  $1 \times 10^7 \text{ cm} \times \text{Hz}^{1/2} \times \text{W}^{-1}$ .采用 TDLAS 技术检测 CO 浓度,三角波扫描信号的频率为  $10 \text{ Hz}$ ,正弦波调制信号的频率为  $5 \text{ kHz}$ .

本文主要研制了传感器的电学系统,其中包括供电电路、激光器驱动电路和锁相放大电路.线性稳压软启动电路,既可以为激光器回路提供稳定可靠的电源,又能够消除浪涌冲击以及尖峰干扰;驱动电路由信号发生电路、恒流源电路、保护电路和温度控制电路组成.信号发生电路采用模拟方式产生激光器扫描/驱动信号,控制恒流源电路,从而有效的调谐激光器输出波长.温度控制电路能够有效的控制激光器温度,使激光器安全稳定的工作.锁相放大电路包括差分放大电路、相移电路、乘法器电路、低通滤波器电路、模数转换电路以及 MCU 处理和显示电路;首先,差分信号分别与两个二倍频、相位相差  $90^\circ$  的参考信号相乘;然后,利用低通滤波器提取两路正交信号;最后,对两路信号进行矢量求和.采用调制与解调技术减少噪声,提高抗干扰能力;同时,二次谐波信号的幅度随调制指数的改变而改变,并存在着最优值<sup>[16]</sup>.可见,激光器驱动/调制电路与锁相放大解调电路相互影响,它们的性能均影响气体检测系统的整体性能.

### 1.2 系统原理

TDLAS 技术是利用半导体 QCL 的波长调谐特性,通过改变注入电流和工作温度,使其输出波长扫描待测气体分子吸收峰,同时结合谐波检测技术,实现对痕量气体分子的测量<sup>[17]</sup>.该技术的理论基础是朗伯—比尔(Lambert-Beer)定律<sup>[8]</sup>

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)LC] \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光强,  $I$  为出射光强,  $\alpha(\lambda)$  为吸收系数,  $L$  为光程,  $C$  为待测气体浓度.在正弦调制信号驱动下,激光器的输出光强为

$$I'_0(\nu, t) = I_0(\nu, t) [1 + n \sin(\omega t)] \quad (2)$$

式中  $n$  为调制系数.将式(2)代入式(1),采用洛伦兹(Lorentz)线型模拟气体的吸收线型  $\alpha(\nu)$ ,将其按傅立叶级数展开,最终得到一次谐波( $1f$ )和二次谐波( $2f$ )信号的幅值为

$$\begin{cases} I_f = nI_0 \\ I_{2f} = -k\alpha_0 LCI_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $k = \frac{2[2 + \omega^2 - 2(1 + \omega^2)^{0.5}]}{\omega^2(1 + \omega^2)^{0.5}}$ .从式(3)可以看出,一次谐波信号的幅值取决于光强,二次谐波信号的幅值与气体浓度成正比,从而可通过检测二次谐波信号幅值测定气体浓度.

## 2 传感器电学系统的设计与功能测试

### 2.1 线性稳压软启动电路

图 2(a)为线性稳压软启动电路原理图,该电路主要为 QCL 提供稳定的直流电源,同时可避免上电时出现瞬时尖峰或者脉冲干扰等不确定因素,使激光器安全可靠的工作.

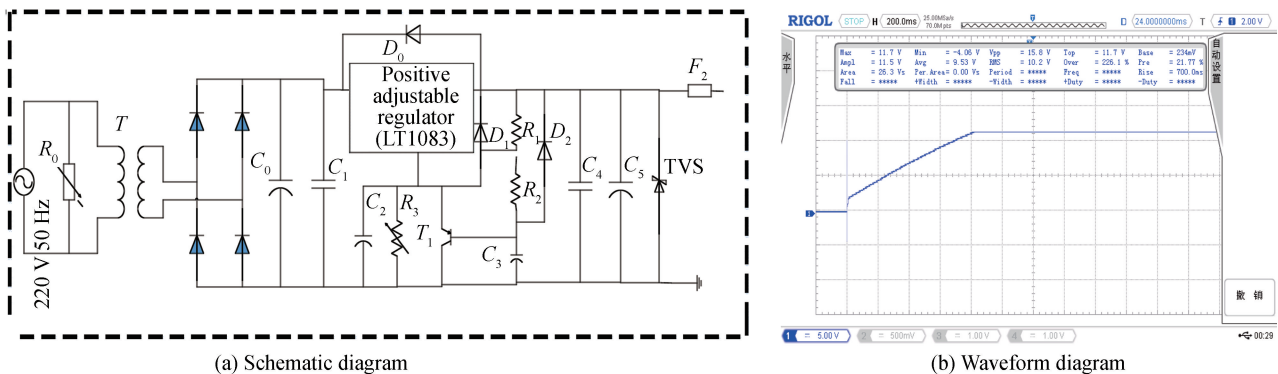
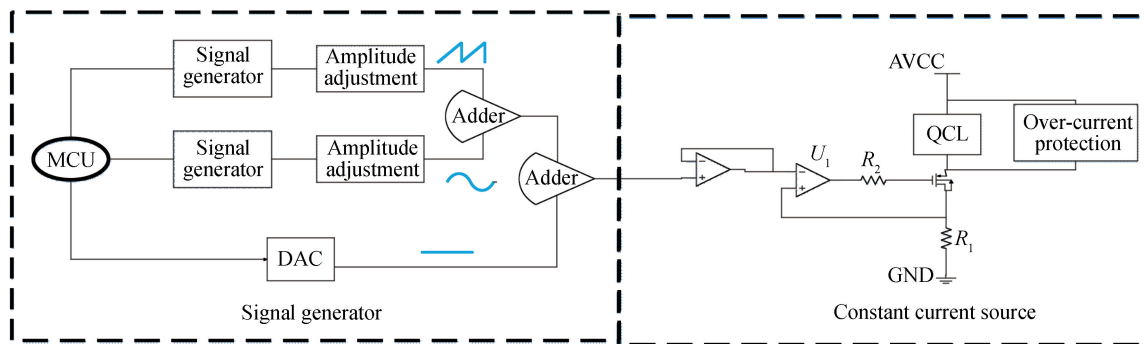


图 2 线性稳压软启动电路原理图及测试波形图  
Fig.2 Schematic and measured waveform of the linear regulating and slow starting circuit

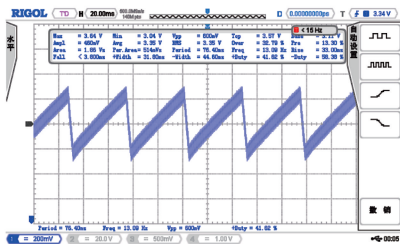
首先,变压器 T 对 220 V 交流电进行电压转换,通过整流桥变换为直流电压;然后,经过电容滤波,去除高频干扰成分.最后,利用可调稳压器 LT1083(其最大纹波为 0.000 2%),在 1.3 V 到 30 V 范围内调节输出电压,提高带负载能力.为了抑制、吸收供电过程中引起的电压尖峰,在电路中加入了氧化锌压敏电阻  $R_0$ ,减小了输出噪声;采用瞬变电压抑制器(Transient Voltage Suppressor, TVS)吸收浪涌功率,预防静电、过压、电网干扰以及电源噪声.采用软启动电路,其原理是:开始上电时,电阻  $R_1$  两端的电压为 1.25 V,电容初始电压为 0 V,三极管  $T_1$  导通,三端稳压器 LT1083 的输出初始电压为 1.25 V,随着时间的推移,电容  $C_3$  持续充电,三极管  $T_1$  基极电压逐渐增大, $T_1$  也逐渐离开饱和区,当电容  $C_3$  充电完成时,三极管  $T_1$  截止,稳压器输出稳定的直流电压值.实验测得的软启动波形如图 2(b),软启动输出电压以及启动时间均可调节.

## 2.2 激光器驱动电路

电流调谐模块框图如图 3(a),包括信号产生以及恒流源控制两部分.信号发生电路采用模拟电路产生低频锯齿波以及高频正弦波,芯片型号为 MAX038,该芯片具有频率范围宽、单片集成化、功能全、外围电路简单等优点.输出频率范围从 0.1 Hz 到 20 MHz 可调,且占空比亦连续可调.MAX038 的输出信号峰峰值为 2 V,通过在输出端加入电压调节电路,实现了与恒流源电路的匹配.通过 MCU 控制 16 位 DAC 模块产生直流信号,为系统提供高稳定的直流偏置信号.最后利用加法电路将产生的正弦调制信号、锯齿扫描信号以及直流偏置信号叠加在一起,输出值恒流电路.实验测得的恒流源驱动电流波形如图 3(b)所示,研制的 QCL 驱动电路实物如图 3(c).



(a) Schematic diagram



(b) Waveform diagram



(c) Board of drive power

图 3 驱动电路框图、驱动信号波形以及实物图

Fig.3 Schematic, waveform and photograph of the laser driver

恒流源模块利用深度负反馈原理使激光器的输出电流保持在动态平衡中,从而稳定的调节激光器驱动电流,如图 3(a).恒流源模块主要由运算放大器  $U_1$ 、大功率金属氧化物场效应(MOSFET)管和高精度采样电阻  $R_1$  组成.工作过程:首先,采样电阻  $R_1$  采集 QCL 的驱动电流,并将其转化为电压信号反馈到运算放大器的反相输入端;然后,将反相输入端的电压与正向输入端的控制电压比较,通过运算放大器对两者的误差电压进行放大;最后,利用输出的电压控制 MOS 管的栅极,实现对激光器电流以及输出波长的调整.

为了提高系统的稳定性,防止出现尖峰和震荡,在  $U_1$  与 MOSFET 之间加入了电阻  $R_2$ ,并且根据具体驱动指标的要求,合理的选择运算放大器、MOSFET、栅极电阻等元器件.采样电阻  $R_1$  的性能直接影响着驱动电流的稳定性、线性度等相关指标,同时,需要合理的布局布线,注意缩短恒流源闭环回路的走线以降低寄生电感和电容对驱动电流的干扰,提高电路性能.

## 2.3 驱动电源的线性度和稳定性测量

利用 RIGOL DM3061 6<sup>1/2</sup> 数字万用表测量驱动电源输入电压和流过 QCL 的电流值,驱动电流可通过

读取采样电阻的两端电压得到,本文采用的采样电阻为RX70 军工电阻,精度为0.01%,阻值为1 Ω.恒流源的控制电压与驱动电流的关系如图4(a)所示,实验中,驱动电压范围为0~400 mV,步进为10 mV.在理论设定电压下,测量了QCL的实际工作电流与设定工作电流的绝对偏差,结果如图4(b).可以看出,恒流源输出的实际电流最大偏差为0.025 mA.驱动电源线性度是衡量驱动系统性能的重要指标,线性度定义为测量的最大电流偏差与满量程输出的百分比<sup>[18-19]</sup>.由于该驱动电源的设定量程为400 mA,因此该驱动电源的线性度为0.0063%.

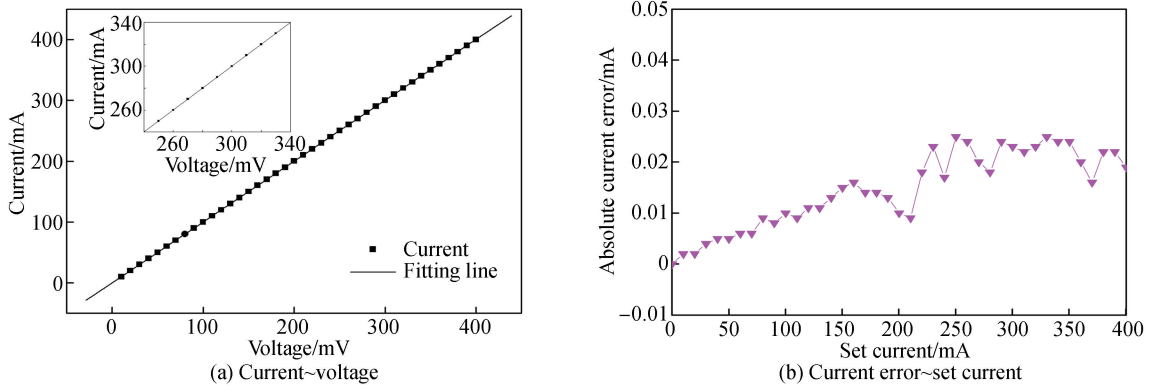


图4 激光器工作电流随恒流源驱动电压的变化曲线及电流误差曲线

Fig.4 Curves of laser driver current versus driving voltage and laser current error

驱动电源输出电流稳定度定义为驱动电流与校准电流的偏差和驱动电流平均值的比值.实验中采用10 Ω大功率电阻作为负载,进行驱动电源输出电流的稳定性实验,时长240 h.通过MCU采集、处理驱动电流信号,将其发送到上位机,进行数据的存储及显示,实验结果如图5(a).实验中,预设驱动电流为200 mA,均值为200.04 mA,电流稳定度优于 $5.0 \times 10^{-5}$ .同时进行了激光器光强稳定性实验,时长240 h.设定电流为350.04 mA,温度为21.166 °C.采用光功率计测量的数据如图5(b)所示,QCL输出光强的标准差为0.01 mW,平均值为20.36 mW,光强稳定度为 $5.07 \times 10^{-4}$ .

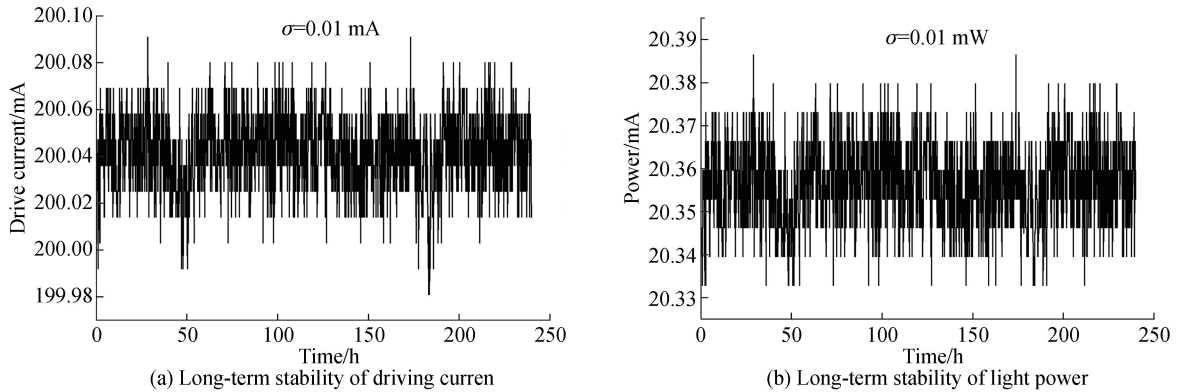


图5 驱动电流长期稳定性及QCL光强长期稳定性测量曲线

Fig.5 Curves of long-term stability of driving current and light power

## 2.4 锁相放大电路

锁相放大电路原理图如图6(a).首先,利用差分变换电路将两个探测器输出的放大信号做差,主芯片型号为OP07;然后,将差分变换电路输出的信号送至乘法器电路;利用处理器的PWM功能产生一个方波参考信号,再经过锁相倍频以及正交变换电路,改变信号的频率以及相位,主芯片的型号为74LS74.经过锁相倍频以及相移的参考信号(相位相差 $90^\circ$ )分别输入到两乘法器电路,分别与测量信号相乘.乘法器电路是锁相放大器的核心,本文采用AD630芯片实现乘法器的功能.经过AD630相乘之后的信号被送入到低通滤波器(型号为MAX291)进行滤波处理,从而提取谐波信号.最后,对滤波后的信号进行向量求和运算,并通过模数转换(型号为AD7866)电路将结果显示在液晶屏(LCD)上.微控制器作为整个锁相放大器电路的控制中枢,控制各电路的功能,处理并输出谐波信号.图6(b)为调试完成的锁相放大器的电路板.

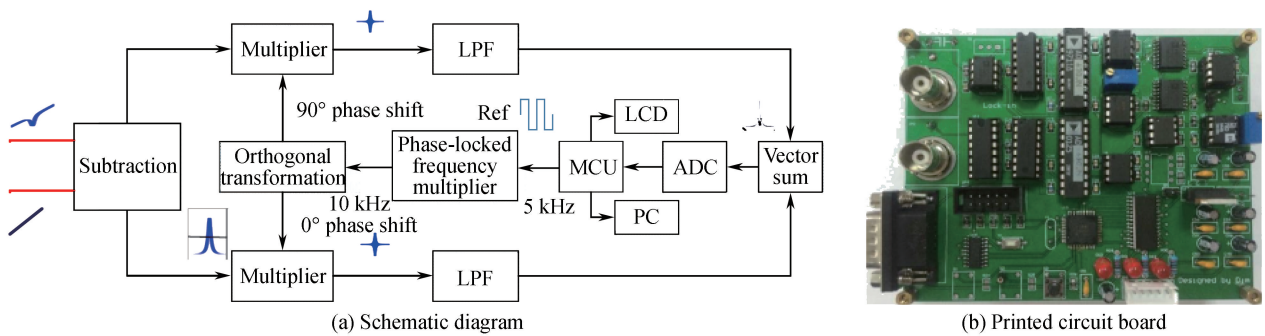


图6 锁相放大电路原理图及电路板实物照片

Fig.6 Schematic and photograph of the developed lock-in amplifier

### 2.5 锁相放大器长期稳定性测试

为了测试锁相放大电路的稳定性,本文利用 MATLAB 软件模拟产生了浓度为 30 ppm 的 CO 气体吸收信号,并以数组的形式储存,运用单片机将模拟吸收信号经过数模转换器(DAC)输出.将模拟吸收信号输入至锁相放大器中,在较长测试时间内多次提取了一次谐波和二次谐波信号.如图 7,分别为一次谐波(a)和二次谐波(b)峰峰值的提取结果,去掉个别突出点,一次谐波峰峰值的测量平均误差小于 1.88%、二次谐波的平均误差小于 4.45%.

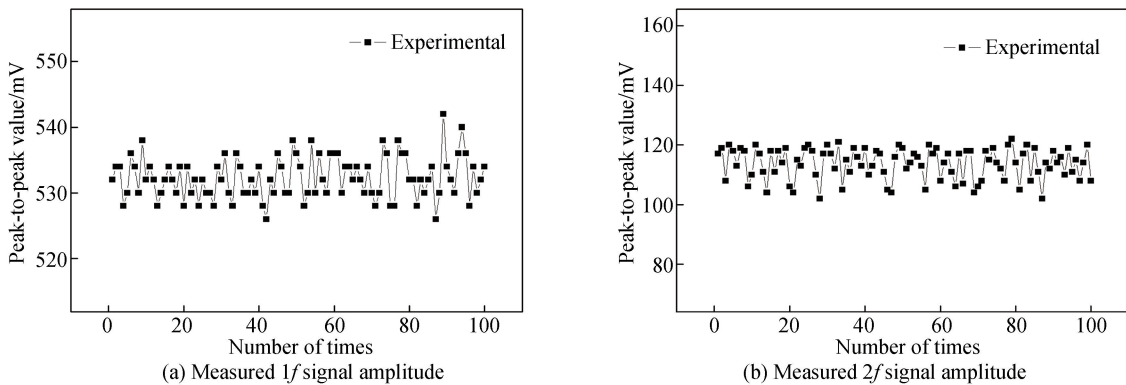


图7 谐波信号的幅度测量结果(30 ppm CO)

Fig.7 Measured results of harmonic signal amplitude(30 ppm CO)

为了进一步验证锁相放大器在整个气体检测系统量程内的性能,在同等实验条件下,本文多次提取了 0~100 ppm CO(步进为 10 ppm CO)模拟吸收信号的一次谐波和二次谐波信号,并且计算出了相应的平均误差.如图 8 所示,信号的平均误差大体上随着浓度的升高而不断减小,并且二次谐波的平均误差高于一次谐波的平均误差,这是由于二次谐波幅度较小、易受噪声干扰.从图中可以观察到,一次谐波的平均误差在 2.4%以内,二次谐波的平均误差在 5.5%以内.

## 3 气体检测实验与结果分析

### 3.1 配气方法与误差

利用自主研发的驱动及锁相放大器,结合光学系统及配气系统,开展了气体检测实验.以质量流量控制器为核心,采用动态配气法,实验中选择的两个流量控制器的量程分别为 1 slm (CO 标准气)和 10 slm(高纯 N<sub>2</sub>),质量流量控制器的准确度为 ±0.35% F.S. (<35% F.S.)、±1.0% S.P. (≥35% F.S.),其最大流量误差 1% F.S..结合高纯氮气 N<sub>2</sub> 和 100 ppm CO 的标准气实现低浓度目标气体的配置.首先通入高纯 N<sub>2</sub> 对气室

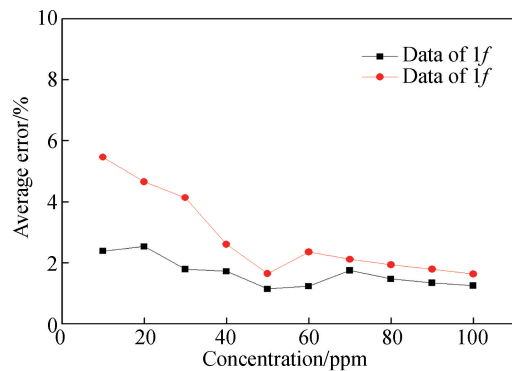


图8 锁相放大器在整个测量量程内的平均误差测试结果  
Fig.8 The average error of the lock-in amplifier in the whole measuring range

进行冲洗,其次,用较低的流量将 CO 通入气室,可以通过改变氮气的流量而配置出不同浓度的 CO 气体,从而生成浓度从 0 ppm 到 100 ppm 的 CO 气体.

按照动态配置方法所得气体样品浓度的计算公式为

$$C = \frac{Q_0}{Q_0 + Q} \times C_0 = \frac{1}{1 + Q/Q_0} \times C_0 \quad (4)$$

式中,  $C$  为所配备的目标气体的浓度,  $Q$  为 CO 标准气体样品的流量(实验中设定为 1 L/min),  $Q_0$  为高纯氮气的流量,  $C_0$  为一氧化碳标准气的浓度(本文取为 100 ppm). 根据式(4)计算出配备相应浓度时需要通入的高纯 N<sub>2</sub> 的流量  $Q$ , 然后根据流量计的误差范围可估计出所配备浓度的最大值和最小值分别为

$$C_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{Q - 1\% \text{F.S.}|_{N_2}}{Q_0 + 1\% \text{F.S.}|_{CO}}} \times C_0 \quad (5)$$

$$C_{\min} = \frac{1}{1 + \frac{Q + 1\% \text{F.S.}|_{N_2}}{Q_0 - 1\% \text{F.S.}|_{CO}}} \times C_0 \quad (6)$$

根据流量计的误差, 计算得到 1~100 ppm 样品的配气相对误差为 ±1.9~3.4%.

### 3.2 气体检测实验

将 10~100 ppm 的不同浓度的 CO 气体样品依次通入气室 2 分钟, 提取相应气体样品的一次谐波和二次谐波信号, 设定数据采集周期为 1 s, 一次谐波和二次谐波峰峰值随 CO 浓度的变化如图 9. 对数据进行了线性拟合, 一次谐波与气体浓度的线性拟合优度为 0.996, 二次谐波与气体浓度的关系线性拟合优度为 0.993.

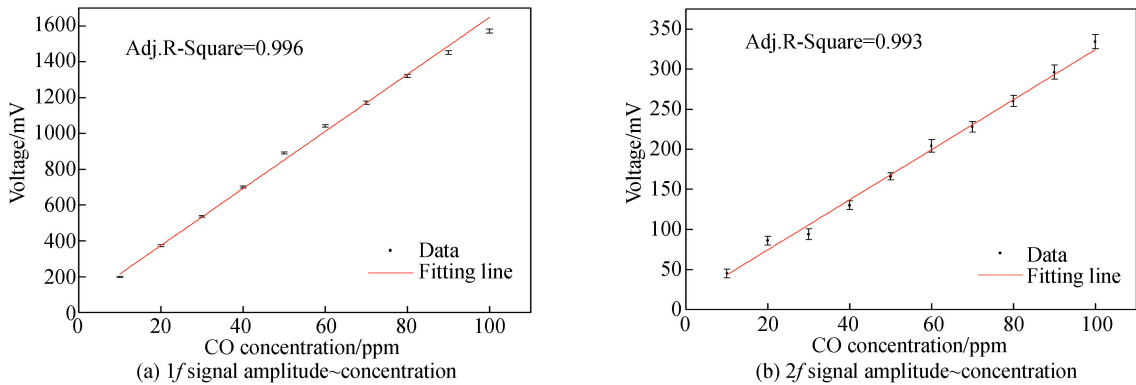


图 9 一次谐波峰峰值及二次谐波峰峰值随着 CO 浓度的变化曲线  
Fig.9 Curves of 1f and 2f amplitudes versus CO concentration

由于配气误差的存在, 同时测量得到的一次和二次谐波信号幅值也存在一定的测量误差, 这些都会对拟合的线性关系曲线产生影响. 图(10)为考虑配气误差和二次谐波信号测量误差情况下绘制的谐波信号幅值与气体浓度的关系图. 图中, 各浓度点对应的长方形的长度代表配气误差, 宽度代表 2f 信号幅值的测量误差. 当考虑配气与谐波测量误差时, 浓度与谐波幅度的拟合关系也将存在一定偏差. 图中的红色曲线为配气误差为零、谐波信号幅值取为测量平均值时的拟合曲线.

## 4 结论

研制了基于 QCL 的中红外气体检测仪的电学系统, 开展了激光器驱动电路测试实验、锁相放大电路误差稳定实验以及低浓度中红外气体 CO 测量实验.

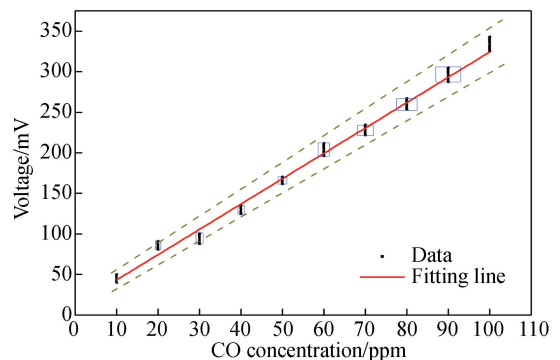


图 10 考虑配气误差和二次谐波信号测量误差情况下, 谐波信号幅值与气体浓度的关系  
Fig.10 Relation between 2f amplitude and CO concentration considering gas preparation error and 2f extraction error

实验表明,激光器驱动电源的线性度为 0.006 3%,驱动电流长期稳定度优于  $5.0 \times 10^{-5}$ ,QCL 光强稳定性为  $5.07 \times 10^{-4}$ ,满足激光器的驱动要求.同时锁相放大电路对一次谐波和二次谐波峰峰值的平均测量误差分别在 2.4%、5.5%以内.在 0~100 ppm CO 浓度范围内,二次谐波幅值与气体浓度呈现较好的线性度(拟合优度大于 99%).本文研制的电学系统安全可靠、集成度高、成本低廉,为中红外 CO 气体的检测提供了基础.

#### 参考文献

- [1] THOMAS R, JOHN L, JOHNNY C, *et al.* Tropical cyclones and climate change[J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(3): 157-163.
- [2] JINGSONG L, PARCHATKA U, FISCHER H, *et al.* Development of field-deployable QCL sensor for simultaneous detection of ambient  $N_2O$  and CO[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, **182**: 659-667.
- [3] TANG Yuan-yuan, LIU Wen-qing, KAN Rui-feng, *et al.* Measurements of NO and CO in Shanghai urban atmosphere by using quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(21): 20224.
- [4] MA Yu-fei, LEWICKI R, RAZEGHI M, *et al.* QEPAS based ppb-level detection of CO and  $N_2O$  using a high power CW DFB-QCL[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(1): 1008.
- [5] YIN X, DONG L, ZHENG H, *et al.* Impact of humidity on quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy based CO detection using a Near-IR telecommunication diode laser[J]. *Sensors*, 2016, **16**(2): 162.
- [6] KOSTEREV A, WYSOCKI G, *et al.* Application of quantum cascade laser to trace gas analysis[J]. *Applied Physics B*, 2008, **90**(2): 165-176.
- [7] TAN S, ZHANG J, ZHUO N, *et al.* Low-threshold, high SMSR tunable external cavity quantum cascade laser around  $4.7 \mu m$ [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2013, **45**(11): 1147-1155.
- [8] ZHAI Bing. Quadrature lock-in amplifier research based on DSP and its infrared gas sensing applications[D]. Jilin University, 2015: 1-54.  
翟冰. 基于 DSP 的正交锁相放大器研制及其红外气体检测应用[D]. 吉林大学, 2015:1-54.
- [9] ZXYS Colorado[EB/OL].<http://www.directedenergy.com/>.
- [10] CHEN Yan-chao, FENG Yong-ge, ZHANG Xian-bing. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2014, **22**(11): 3145-3151.  
陈彦超,冯永革,张献冰. 用于半导体激光器的大电流纳秒级窄脉冲驱动电路[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(11):3145-3151.
- [11] CHEN Chen, HUANG Jian-qiang, LU Mo, *et al.* High-precision narrow pulse drive power for infrared quantum cascade laser[J]. *Journal of Jilin University*, 2011, **41**(6): 1738-1742.  
陈晨,黄渐强,吕默,等. 高精度纳秒级红外量子级联激光器驱动电源[J]. 吉林大学学报, 2011, **41**(6):1738-1742.
- [12] ZHOU P, YANXING M, XIAOLIN W, *et al.* Tiled-aperture coherent beam combining of two high-power fibre amplifiers[J]. *Chinese Physics B*, 2010, **19**(1): 289-293.
- [13] DANG jing-min, FU Li, YAN Zi-hui, *et al.* A review of mixed gas detection system based on infrared spectroscopic technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(10): 2851-2857.  
党敬民,付丽,闫紫薇,等. 基于红外光谱技术的混合气体检测系统概述[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(10):2851-2857.
- [14] ZHAO Yong-guang, WANG Zheng-ping, YU Hao-hai, *et al.* 6.5-ns actively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser operating at  $1.34 \mu m$ [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(8): 081401.
- [15] SHAO J, XIANG J, AXNER O, *et al.* Wavelength-modulated tunable diode-laser absorption spectrometry for real-time monitoring of microbial growth[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(9): 2339.
- [16] DANG Jing-min. Study on quantum cascade Laser based system for carbon monoxide[D]. Jilin University, 2016: 1-144.  
党敬民. 基于 QCL 的红外 CO 检测系统的研究[D]. 吉林大学, 2016:1-144.
- [17] HE Qi-xin, ZHENG Chuan-tao, *et al.* A near-infrared acetylene detection system based on a  $1.534 \mu m$  tunable diode laser and a miniature gas chamber[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **75**: 93-99.
- [18] DANG Jing-min, ZHAI Bing, GAO Zong-li, *et al.* Nanosecond driver for multiple pulse-modulated Infrared quantum cascade lasers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(9): 2209-2216.  
党敬民,翟冰,高宗丽,等. 纳秒级脉冲型群红外量子级联激光器驱动电源[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(9):2209-2216.
- [19] LIU Qian, YUAN Dao-cheng, HE Jian-guo. Phase shift extraction algorithm with error estimation in phase-shifting interferometry[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(10): 2565-2571.  
刘乾,袁道成,何建国. 可实现误差估计的移相量计算方法[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(10):2565-2571.

**Foundation item:** The National Key R&D Program of China (No. 2016YFD0700101, 2016YFC0303902), Natural Science Foundation of China (Nos. 61775079, 61627823, 61307124), Science and Technology Development Program of Jilin Province (No. 20140307014SF), Industrial Innovation Program of Jilin Province (No. 2017C027), and Changchun Municipal Science and Technology Bureau (Nos. 11GH01,14KG022)