

doi: 10.3788/gzxb20164508.0814001

面向脉冲量子级联激光器气体检测的锁相放大器

苗春壮¹, 蔺百杨¹, 党敬民¹, 李春光¹, 王利军², 郑传涛¹, 王一丁¹

(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 中国科学院半导体研究所 材料科学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:为了在基于脉冲式中红外量子级联激光器的气体检测系统中, 精确提取窄脉冲传感信号的幅度, 设计并实现了一种微秒级窄脉冲锁相放大器. 根据微秒级窄脉冲的特点, 窄脉冲信号经过窄带通滤波电路, 得到基频正弦波信号, 再经过主放大、移相、相敏检波电路, 得到与脉冲幅值有关的直流信号. 利用信号发生器产生的幅度、频率、相位可调的窄脉冲待测信号, 对锁相放大器进行功能验证实验. 结果表明, 锁相放大器输出直流信号与输入信号的幅度呈良好的线性关系, 线性拟合度约为 98.043%; 信号幅值的相对测量误差不超过 3%; 在 1 h 的测试时间内, 信号波动范围在 1% 以内. 利用配备的不同浓度的一氧化碳样品及研制的锁相放大器, 开展了一氧化碳气体检测实验. 在 0~180 ppm 范围内, 随着一氧化碳浓度的增加, 锁相放大器的输出电压值与一氧化碳浓度呈现良好的 e 指数关系. 根据 Allan 方差预测的系统检测下限为 0.4123ppm. 与商用锁相放大器相比, 该放大器具有体积小、成本低、易于集成等特点, 在基于脉冲式中红外量子级联激光器的气体检测中具有较好的应用前景.

关键词:锁相放大器; 窄脉冲信号; 窄带滤波电路; 中红外气体检测; 量子级联激光器

中图分类号: TH83

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0814001-6

Lock-in Amplifier for Pulse-Driven Quantum Cascade Lasers Gas Detection System

MIAO Chun-zhuang¹, LIN Bai-yang¹, DANG Jing-min¹, LI Chun-guang¹, WANG Li-jun²,
ZHENG Chuan-tao¹, WANG Yi-ding¹

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

(2 State Key Laboratory of Material Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Science,
Beijing 100083, China)

Abstract: For the gas detection system based on pulse-type infrared quantum cascade lasers, a μs -level narrow-pulse lock-in amplifier was designed and achieved to accurately extract the amplitude of the narrow pulse sensing signal. According to the characteristics of the microsecond narrow pulse signal, the narrow pulse signal passed through a narrow bandpass filter and a fundamental sine-wave signal was obtained. Then, the sine-wave signal passed through a preamplifier, a phase-shifter and a phase-sensitive detection circuit, so that a direct current signal related to the pulse amplitude was obtained. As a testing signal, the narrow pulse whose amplitude, frequency and phase were adjustable was produced by a signal generator, the detailed functional verification experiments were carried out to validate the performance of the proposed lock-in amplifier. The results show that, a good linear relationship is found between the

基金项目: 国家科技支撑计划 (Nos. 2013BAK06B04, 2014BAD08B03)、国家自然科学基金 (Nos. 61307124, 11404129)、吉林省科技厅发展计划 (Nos. 20120707, 20140307014SF)、长春市科技发展计划 (Nos. 11GH01, 14KG022) 和集成光电子学国家重点联合实验室课题 (No. IOSKL2012ZZ12) 资助

第一作者: 苗春壮 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为红外气体检测仪. Email: Wendy_woody@163.com

导师: 王一丁 (1956-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为红外光电子学. Email: ydwang@jlu.edu.cn

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

收稿日期: 2016-02-23; **录用日期:** 2016-06-03

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

output direct current voltage and the amplitude of the standard input pulse signal; the fitness of the system is about 98.043%; the relative detection error of its output voltage is less than 3%; within one hour's test, the fluctuation range of the measured signal is less than 1%. The detailed gas detection experiments were carried out using prepared carbon monoxide (CO) samples with different concentrations and the lock-in amplifier. Within the CO concentration range of 0~180 parts per million (ppm), the output voltage from the lock-in amplifier reveals an exponential relationship with CO concentration, which also proves the normal function of this device. The limit of detection predicted from the Allan variance is 0.412 3 ppm. Compared with commercial lock-in amplifiers, this amplifier has special characteristics including small volume, low cost, ease of integration, and so it has a good application prospect for mid-infrared gas detection based on quantum cascade lasers.

Key words: Lock-in amplifier; Narrow pulse signal; Narrowband filter circuit; Mid-infrared gas detection; Quantum cascade laser

OCIS Codes: 130.3060; 140.3538; 300.6340; 300.6360

0 引言

由于大部分气体分子,在中红外波段(2~20 μm)具有基频吸收带,如一氧化碳(CO)分子的吸收带在4.65 μm 波段,因此可根据中红外吸收光谱进行气体检测.红外吸收检测法具有灵敏度高、稳定性强、选择性好、响应速度快等优点^[1],已广泛应用于工业、医疗等领域^[2-3].量子级联激光器(Quantum Cascaded Laser, QCL),具有高输出光功率、高稳定性及单色性等特点^[4-5],其发光波长能很好地覆盖中红外波段,因而特别适用于高灵敏度的气体检测^[6].出于寿命考虑,QCL仅能工作于窄脉冲模式,该模式下传感器系统中探测器的输出信号是一种宽度仅为微秒级的窄脉冲信号,因此,窄脉冲信号锁相放大器是脉冲式QCL气体检测系统的重要组成部分.然而,国外相对比较成熟的锁相放大器,如美国斯坦福公司研制的SR830锁相放大器、法国的TE9822C型锁相放大器等^[7],价格昂贵、体积庞大,难以用于便携式仪器中.

相比一般的锁相放大器,窄脉冲锁相放大器必须具有良好的瞬时响应特性才可准确测出相应参量,因而检测难度大大增加^[8-9].同时,锁相放大器必须解决窄脉冲信号过冲带来的问题,如器件损坏、保护电路失效或产生误触发等,从而大大减弱电路的抗干扰能力.鉴于此,本文结合窄带滤波、相关运算等模拟信号处理技术,设计并实现了一种用于提取微秒级窄脉冲信号幅度的锁相放大器.以便携式、低功耗和推广应用为目标,对该该锁相放大器进行了整体设计与集成、基本功能测试、气体检测应用实验等.

1 窄脉冲锁相放大器的设计

1.1 窄脉冲信号检测方法

对频率为5 kHz、占空比为1%的脉冲信号进行处理分析.信号波形如图1,上分支为QCL的驱动脉冲波形,下分支为探测器输出的传感信号波形.

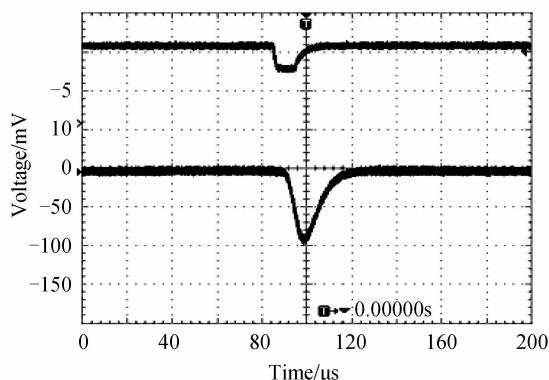


图1 QCL的驱动信号波形和探测器输出的传感信号波形
Fig. 1 The driving signal of QCL and the sensing signal output from the detector

由于脉冲的持续时间较短,仅有2 μs ,直接探测该信号十分困难,需要较高的采样率.为了提高采样准确度,同时降低数据处理的复杂度,提出一种处理窄脉冲信号的方法,具体实现步骤为:先利用窄带滤波电路,得到脉冲传感信号的基频正弦波信号,再经过主放大、移相、相敏检波电路,得到与脉冲幅值有关的直流信号.理想情况下,经巴特沃斯带通滤波器后,脉冲信号的幅值与基频正弦波的幅值符合正比例关系^[10].假设在一个周期内($-\frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau}{2}$),矩形波的表达式为

$$f_1(t) = E \left[U\left(t + \frac{\tau}{2}\right) - U\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right] \quad (1)$$

傅里叶级数为

$$f_1(t) = \frac{E\tau}{T} + \frac{4E}{T\omega} \sum_{n=1}^m \frac{1}{n} \sin \frac{n\omega\tau}{2} \cos n\omega t \quad (2)$$

$$(t \neq kT \pm \frac{\tau}{2}, k = 0, 1, 2, \dots)$$

经带通滤波滤掉高频成分,此时,取 $\tau/T = 1\%$,代入式(2)得

$$f_2(t) = 0.02E \cos \omega_1 t \quad (3)$$

经计算,输出正弦信号与输入脉冲信号幅度的比值约为0.02,因此需在后端加入低噪声高准确度的放大器将微弱信号进一步放大.随后再通过移相、检波等电路

提取出有用信号^[10].最后,依据朗伯比尔定律,即可计算出相应气体的浓度^[11].

1.2 窄脉冲锁相放大器硬件构成

窄脉冲锁相放大器的整体结构如图2,它包括窄带滤波电路、前置放大电路、乘法器电路、低通滤波电路、分频倍频电路、移相电路等^[12].在图2(a)中, $R(t)$ 为参考信号,与QCL的驱动脉冲信号同频、同相;而 $S(t)$ 为探测器的输出信号,和QCL的驱动脉冲信号也具有相关性.因此, $R(t)$ 和 $S(t)$ 在频率和相位上都具有关联性,二者属于相关信号.由于对 $S(t)$ 做了窄带滤波、前置放大等处理,这将会引入相位延迟,因此必须对 $R(t)$ 移相,以保证 $S(t)$ 和 $R(t)$ 这两路信号在进入乘法器之前具有相同的相位.设计的目的就是找到 $R(t)$ 的最佳移相相位,从而使锁相放大器输出信号幅值达到最大值,实现锁相放大.

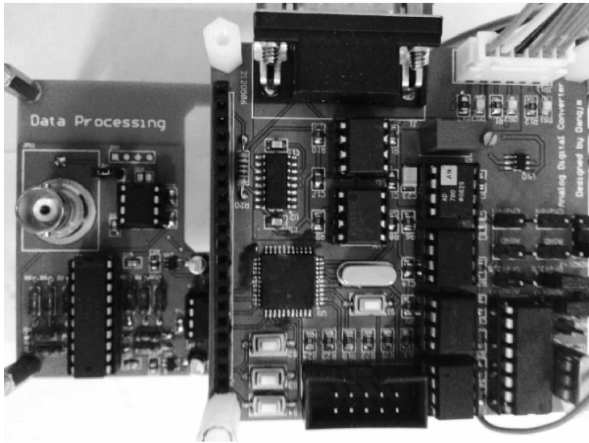
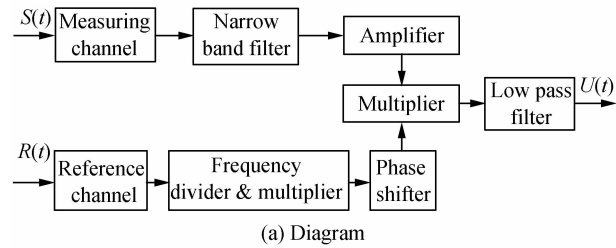


图2 研制的窄脉冲锁相放大器的结构及实物照片
Fig. 2 Structure and photo of the narrow-pulse lock-in amplifier

窄带滤波器电路的核心器件为美国Maxim公司的MAX275芯片,其内部由四个二阶滤波单元组成,可实现四阶滤波功能,中心频率精确度高且无时钟噪声.设计中,除了从窄脉冲信号中提取出基频正弦波信号外,该电路还将用于AD630乘法器前,以实现输入信号的滤波,从而更好地限制输入信号的幅值,滤除过高频、过低频的噪声干扰.实验测试结果如图3.

乘法器电路的主控器件为美国AnalogDevices公

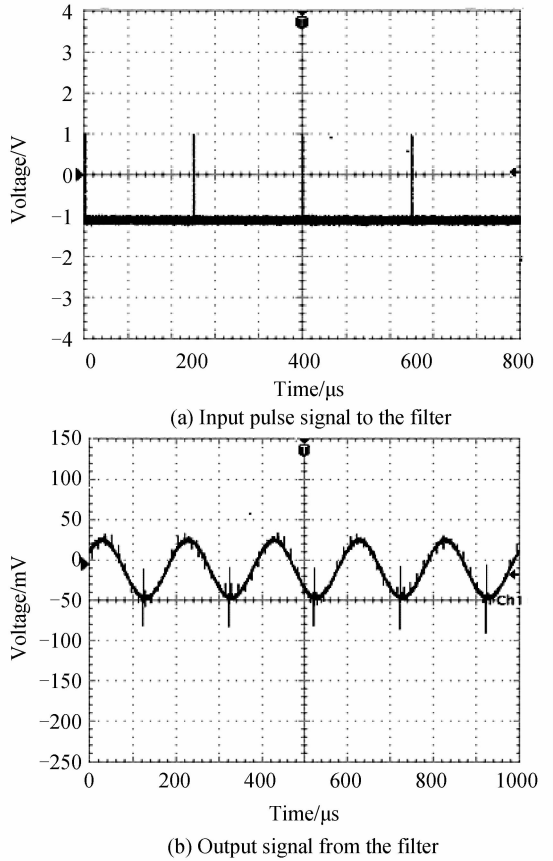
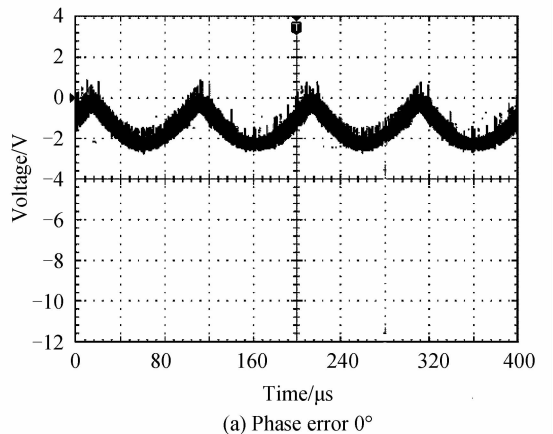


图3 带通滤波电路的测试波形

Fig. 3 Measured waveforms of band-pass filter circuit
司生产的具有很高稳定性和准确性的AD630,它主要由比较器、调制器、缓冲放大器构成.在实际测试中,如果知道信号的频率和相位,即使存在比振幅大得多的噪声,该放大器也能检测出微弱的直流信号^[13].参考其典型应用电路即可设计出实用化的乘法电路.

移相电路的关键器件为OP37.在保证相移准确度的基础上,调节电位器即可得到连续的相位变化,具有实现方便、操作简单等优点.输入信号与输出信号相位差为 0° 和 90° 时,相敏检波实验结果如图4.



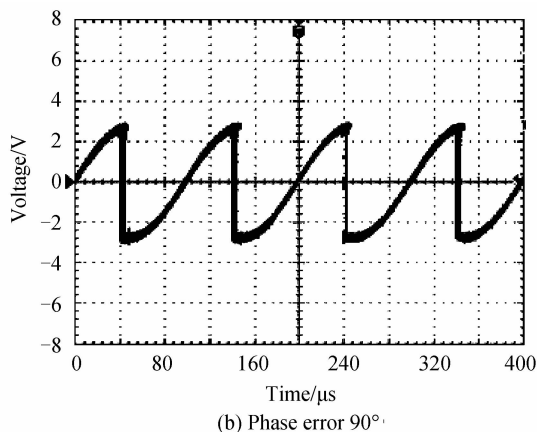


图4 带有相位差的相敏检波测试结果
Fig. 4 Test results of phase sensitive detection

2 脉冲锁相放大器的性能测试

2.1 脉冲锁相放大器的线性度测试

保持输入信号频率为 5 kHz、占空比为 1% 不变, 利用脉冲锁相放大器对不同幅值脉冲信号的幅值信息进行了提取实验(输入信号幅值范围为 0~7 V). 为了更加直观地观察输入信号与输出信号的线性关系, 运用最小二乘法对实验结果做了线性拟合, 结果如图 5.

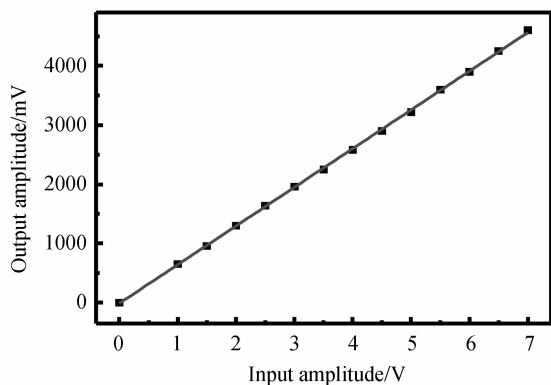


图5 锁相放大器的线性度曲线
Fig. 5 Linearity curve of the lock-in amplifier

可以看出输出直流量与输入信号的幅值呈现较为理想的线性关系, 说明设计的锁相放大器具有良好的线性度. 根据线性度拟合式(4)计算其拟合优度为 98.043%.

$$R = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

2.2 脉冲锁相放大器的响应带宽测试

保持输入信号幅值为 4V、占空比为 1% 不变, 只改变输入脉冲信号的频率, 提取出相应的直流输出信号, 实验结果如图 6, 可以看出该锁相放大器的频率响应曲线与理论曲线基本一致, 中心频率为 5 kHz, 3 dB 带宽约为 80 Hz.

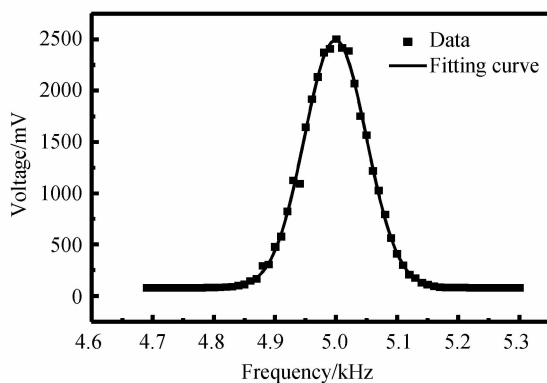


图6 锁相放大器频率响应曲线
Fig. 6 Frequency response of the lock-in amplifier

3 CO 检测应用

3.1 基于脉冲 QCL 的中红外 CO 检测系统

如图 7, 中红外 CO 检测系统由光学系统以及电学系统构成. 光学系统采用差分吸收光谱检测原理、单光源双探测器的光路结构, 以中红外 QCL 作为光源^[14]. 电学系统包括光电转换模块、前置放大器、窄带滤波器、锁相放大器、主控制器 (Atmega16) 及其外围控制电路. 该系统主要依据相关检测原理、锁相放大原理对脉冲传感信号的幅值信息进行有效处理和提取.

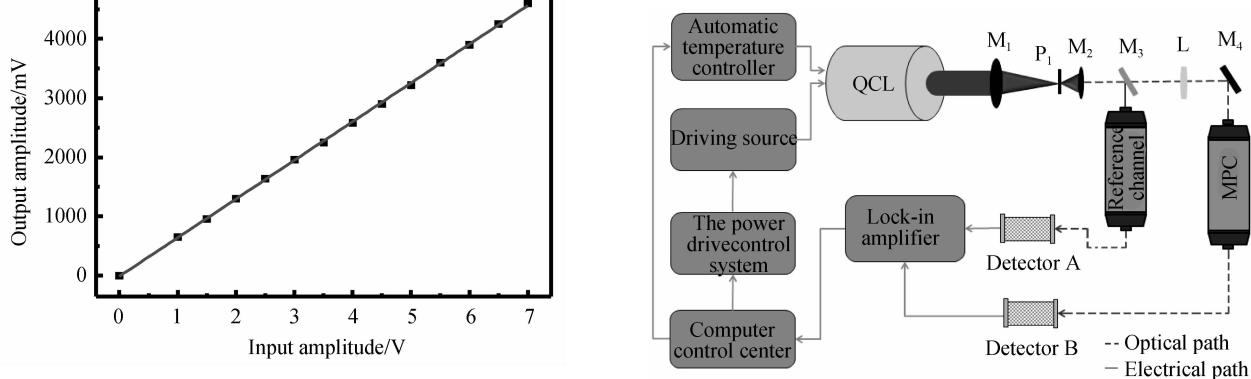


图7 QCL 气体检测系统原理图

Fig. 7 Block diagram of QCL-based gas detection system

实验中采用的量子级联激光器为中科院北京半导体研制的中心波长为 4.76 (波数为 2104.5) 的 DFB-QCL. 激光器工作在脉冲模式下, 输出光功率高且较为稳定 (当驱动电流为 700 mA 时, 输出光功率为 500 mW)^[1], 输出激光光束经缩束准直后进入多通池, 经由探测器转换为电信号, 再经过放大器放大后送入锁相放大器, 最终获得直流信号再经计算机进行预处理与显示.

3.2 CO 检测实验

对配备多种浓度的 CO 气体分别进行 16 组实验, 得到如图 8 所示的关系曲线, 横轴为 CO 气体浓度, 纵轴为多通池内通入不同浓度的 CO 后锁相放大器输出的电压值. 其中黑色方形点为实验数据点, 曲线是这些

数据点拟合的结果,关系式为

$$u = u_0 + A_1 \cdot \exp\left(-\frac{c}{m}\right) \quad (5)$$

可见,横轴和纵轴之间呈现为 e 指数关系,符合比尔-朗伯定律. 其中 $u_0 = 2416.791$, $A_1 = 2.932$, $m = 24.423$, 据式(5)可推算出 c 的计算公式为

$$c = -24.423 \cdot \ln \frac{u - 2416.791}{2.932} \quad (6)$$

所以,通过对被测 CO 气体进行多次重复测试,并将相对应的后端锁相放大器输出的电压信号进行平均化处理,就可以计算出被测气体的浓度.

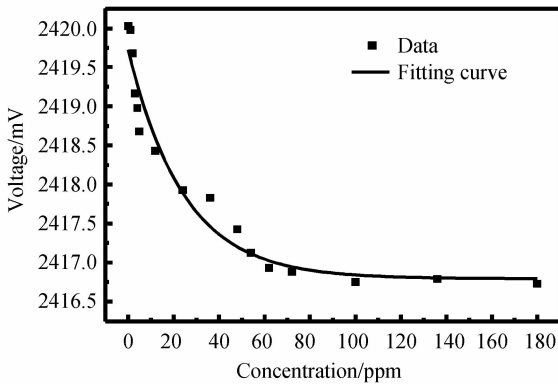


图8 脉冲锁相放大器的输出和待测 CO 气体浓度的关系
Fig. 8 The curve between the concentration of CO and the output voltage of the developed lock-in amplifier

3.3 稳定性测试及阿伦方差曲线测试

采用 0 ppm 的 CO 作为待测气体,对图 7 所示的 CO 检测系统进行稳定性测试. 锁相放大器的输出信号如图 9. 在 1h 的测试时间内,输出信号幅值波动在 1mV 以内,证实该系统具有较好的稳定性.

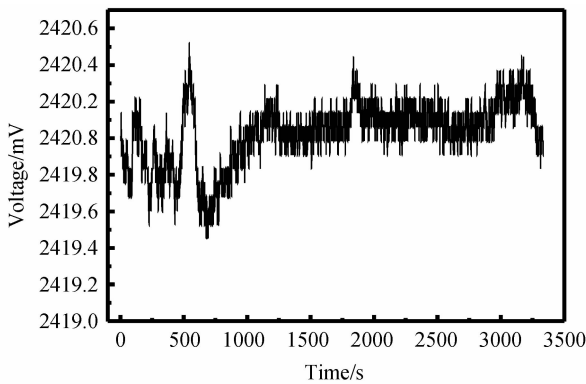


图9 0 ppm CO 浓度下,锁相放大器输出的直流信号
Fig. 9 Direct current output from the lock-in amplifier under 0 ppm concentration

在 N_2 环境下,测试输出信号的幅值,连续测得 1000 个点,时间间隔为 1.1s. 将幅值信号转换为浓度信号,通过 MATLAB 软件对采样得到的数据进行分段求均值,并对相邻差值做方差运算,分离表征出各项误差源及对应的误差系数^[15]. 再通过 Origin 绘图软件得到整个积分时间上的 Allan 方差曲线,如图 10. 从图

中可以看出,当积分时间为 1.1s 时,系统的 Allan 方差为 7.9 ppm²,预测系统的检测下限为 2.81 ppm. 另外从曲线可以看出,当积分时间为 84.7s 时,系统的 Allan 方差最小,此时系统的稳定性最好,预测此时系统的检测下限可以达到 0.412 3 ppm.

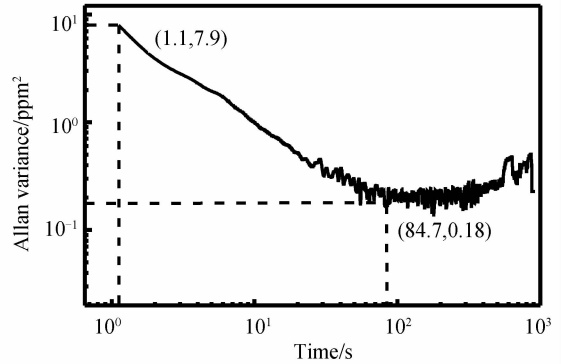


图10 检测准确度及 Allan 方差

Fig. 10 Detection precision and Allan variance

4 结论

本文设计并实现了一种微秒级窄脉冲锁相放大器. 该放大器由窄带滤波电路、前置放大电路、乘法电路、低通滤波电路、分频/倍频电路、移相电路组成. 利用配备的不同浓度的 CO 样品及研制的锁相放大器,开展了 CO 气体实验,在 0~180 ppm 范围内,随着 CO 浓度的增加,锁相放大器的输出电压值与 CO 浓度呈现良好的 e 指数关系,验证了所研制的锁相放大器的功能. 通过 Allan 方差计算,预测了在积分时间为 84.7 s 时,系统的检测下限为 0.412 3 ppm,基本实现了中红外波段 CO 气体的高灵敏度检测. 由于性能稳定、测量误差小、检测准确度高,该锁相放大器可满足实验室红外气体检测系统的要求,实现仪器的小型化、便携化.

参考文献

- [1] WENG Zhi-yu, WANG Ling-fang, CHEN Gang. Development and application of gas detection system based on quantum cascade laser[J]. *Chinese Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(8): 2043-2048.
温志渝, 王玲芳, 陈刚. 基于量子级联激光器的气体检测系统的发展与应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(8): 2043-2048.
- [2] DANG Jing-min, ZHAI Bing, GAO Zong-li. Nanosecond driver for multiple pulse-modulated infrared quantum cascade lasers[J]. *Chinese Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(9): 2209-2216.
党敬民, 翟冰, 高宗丽. 纳秒级脉冲型群红外外量子级联激光器驱动电源[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(9): 2209-2216.
- [3] WIDIATMONO R, MANDON J, HARREN FJM, et al. QCL based integrated cavity output spectroscopy for CO gas detection[C]. *Proceeding of International Conference On Research, Implementation And Education Of Mathematics And Sciences*. Yogyakarta State University, 2014: 55-63.
- [4] WIDIATMONO R, MANDON J, HARREN FJM, et al. Sub

- ppb CO gas measurement using a non invasive QCL laser absorption spectrometer technique[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **771**: 133-136.
- [5] REN Wei, WEN Zhe-jiang, TITTEL K. QCL based absorption sensor for simultaneous trace-gas detection of CH₄ and N₂O[J]. *Applied Physics B*, 2014, **114**: 245-251.
- [6] ZHAI Bing, HE Qi-xin, HUANG Jian-qiang. Design and realization of harmonic signal orthogonal lock-in amplifier used in infrared gas detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1125001.
翟冰, 何启欣, 黄健强. 红外气体检测中谐波信号正交锁相放大器设计与实现[J]. *光子学报*, 2014, **43**(11): 1125001.
- [7] CHANG Ning-ning, LU Chang-hua, LIU Chun. Research on detection method of nanosecond periodic signal[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2006, **20**(4): 86-101.
苒凝凝, 鲁昌华, 刘春. 纳秒级周期脉冲信号检测方法的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2006, **20**(4): 86-101.
- [8] AGUIRRE J, MEDRANO N, CALVO B, *et al.* Lock-in amplifier for portable sensing systems[J]. *Electronics Letters*, 2011, **47**(21): 1172-1173.
- [9] NIE Ya-qin. Weak signal detection method based on lock-in amplifier[D]. Changsha: Central South University, 2014: 1-56.
聂娅琴. 基于锁相放大器的微弱信号的检测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014: 1-56.
- [10] D'AMICO A, MARCELLIS DA, CARLO DC, *et al.* Low-voltage low-power integrated analog lock-in amplifier[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, **144**: 400-406.
- [11] CHEN Xiao, SUI Qing-mei, MIAO Fei, *et al.* Design of detecting system for multi-component gases based on single ultra-narrow-line width laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1498-1499.
陈霄, 隋青美, 苗飞, 等. 应用单一超窄线宽激光器的多气体检测[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1498-1499.
- [12] CAO Tian-shu. Lock-in amplifier of second harmonic in the TDLAS gas detection[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 1-60.
曹天书. TDLAS 气体检测中二次谐波的锁相放大器的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-60.
- [13] ZHU Xiao-li, LI Xia. The design of dual-phase lock-in amplifier based on AD630[J]. *Chinese Electrical Engineering Technology*, 2012, **41**(06): 19-23.
朱晓莉, 厉霞. 基于 AD630 的双相锁相放大器设计[J]. *机电工程技术*, 2012, **41**(06): 19-23.
- [14] CHEN Chen, WANG Biao, LI Chun-guang, *et al.* A trace gas sensor using mid-infrared quantum cascaded laser at 4.8 μm to detect carbon monoxide[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(3): 838-842.
陈晨, 王彪, 李春光, 等. 采用 4.8 μm 中红外量子级联激光器的痕量一氧化碳气体检测仪[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(3): 838-842.
- [15] TAN Tu, LIU Kun, WANG Gui-shi, *et al.* Research on high sensitivity measurement of N₂O and CO based on MIR-QCL and novel compact multi-pass gas cell[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 0230005.
谈图, 刘锴, 王贵师, 等. 基于中红外 QCL 激光和新型多通池高灵敏度测量 CO 和 N₂O 的研究[J]. *光学学报*, 2015, **35**(2): 0230005.

Foundation item: The National Key Technology R&D Program of China (Nos. 2013BAK06B04, 2014BAD08B03), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 61307124, 11404129), the Science and Technology Department of Jilin Province of China (Nos. 20120707, 20140307014SF), the Changchun Municipal Science and Technology Bureau (Nos. 11GH01, 14KG022), the Opened fund of State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics (No. IOSKL2012ZZ12)