

文章编号 1004-924X(2013)09-2209-08

纳秒级脉冲型群红外量子级联激光器驱动电源

党敬民¹, 翟冰¹, 高宗丽¹, 陈晨², 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 长春 130012;

2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 由于红外混合气体的检测方法要求电源具有驱动群红外量子级联激光器 (QCL) 的能力, 本文设计并研制了一种新型群 QCL 驱动电源。为了避免驱动电流多路输出的交叉影响, 该电源采用了时分复用控制方案, 并结合高速模拟比例-积分 (PI) 反馈, 实现了每一条输出支路电流的独立调节。系统采用脉冲频率调制 (PFM) 与脉冲宽度调制 (PWM) 相结合的方法, 改善了驱动脉冲的频率及脉宽特性, 确保了各支路激光器均工作在最佳状态。利用该驱动电源对中国科学院半导体所研制的中心波长分别为 4.8, 7.49, 7.71 和 10.7 μm 的 4 种 QCL 进行了驱动测试。结果表明: 在长时间 (220 h) 运行中, 系统驱动电流长期稳定性为 4.62×10^{-6} , 线性度为 0.029 1%, 满足驱动群量子级联激光器的要求, 为红外混合气体的检测提供了可靠的保障。

关键词: 红外混合气体检测; 群红外量子级联激光器 (QCL); 驱动电源; 时分复用 (TDM)

中图分类号: TN245 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2209

Nanosecond driver for multiple pulse-modulated Infrared quantum cascade lasers

DANG Jing-min¹, ZHAI Bing¹, GAO Zong-li¹, CHEN Chen², WANG Yi-ding^{1*}

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

2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

* Corresponding author, E-mail: wangyiding48@yahoo.com.cn

Abstract: A driving generator to drive multiple infrared Quantum Cascade Lasers (QCLs) was designed under an experimental validation for detection of mixed infrared gases. To avoid the cross-influence of the driving currents among multi-channels, the Time Division Multiplexing (TDM) method integrating with the fast analog proportional-integral (PI) control theory was used to adjust the regulating output currents in each branch independently. A control method combined pulse frequency modulation (PFM) and Pulse Width Modulation (PWM) was proposed to improve the characteristics of the operating frequency and the pulse width of driving pulse and to guarantee the lasers of each branch to operate in an optimum condition. By utilizing the illustrated driver, a driving test was performed on four QCLs with center wavelengths at 4.8, 7.49, 7.71 and 10.7 μm respectively fabricated by Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences. Experimental results demonstrate that the stabili-

收稿日期: 2013-01-04; 修订日期: 2013-02-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA06Z112, No. 2007AA03Z446, No. 2009AA03Z442);
吉林省科技厅资助项目 (No. 20090422)

ty of driving current is 4.62×10^{-6} and the linearity of power system is 0.029 1% during a long-term operation (220 h), which meets the requirements of driving multiple QCLs and provides a strong guarantee for mixed infrared gas detection.

Key words: infrared multi-gas detection; multiple infrared Quantum Cascade Laser (QCL); driving generator; time division multiplexing

1 引言

由于大部分温室气体在 $2 \sim 25 \mu\text{m}$ 的中红外光谱区域有很强的吸收作用,利用红外吸收原理(NDIR)进行气体浓度检测的方法已经广泛应用于工业领域^[1-2]。量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)具有高输出光功率、高稳定性及单色性等特点,因此非常适合于中红外气体光谱的高灵敏度检测,但是基于中红外 QCL 的混合气体检测系统却鲜有报道^[3-5]。

驱动电源是 QCL 的重要组成部分,目前在其商业化产品方面,国内主要以深圳市南方联合实业有限公司为代表^[6]。国外的生产厂商比较多,而且产品的综合性能指标也普遍优于国内,如 Wavelength 公司的 QCL 系列、ILXlight 的 LDX3200 系列等^[6]。但大部分现有的 QCL 驱动电源均不具备驱动群 QCL 的能力,因此研究具有群驱动能力的驱动电源是十分必要的。本文根据中红外 QCL 混合气体检测系统的指标要求,研制了群红外 QCL 驱动电源。同时,对中国科学院半导体所研制的多种波长的 QCL 进行了测试,结果表明该驱动电源的性能优越,具有良好的实用价值。

2 驱动电源硬件系统设计

纳秒级脉冲型群红外量子级联激光器的驱动电源系统的组成框图如图 1 所示,主要包括控制模块、高速脉冲产生模块、群激光器时分复用信号产生模块、恒流源模块、保护电路模块等。

控制模块采用美国德州仪器公司的 32 位定点数字信号处理器 TMS320LF2812,其主要功能如下:(1)产生高速脉宽宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号;(2)驱动数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)产生高精度模拟信号;(3)控制群激光器时分复用信号产生模

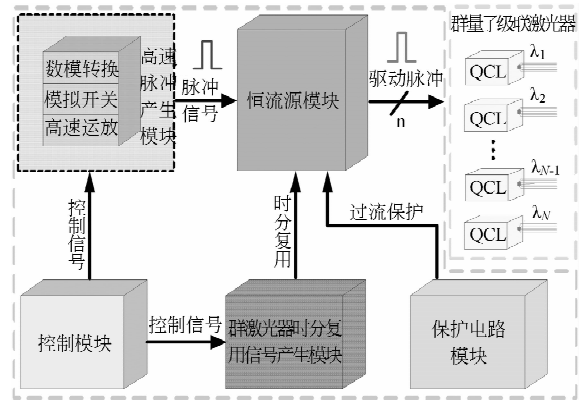


图 1 系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of generator for QCL

块。高速脉冲产生模块可输出幅度、周期、占空比均受控的高速脉冲信号,用于驱动恒流源模块。群激光器时分复用信号产生模块依据“时分复用”方法设计,以使各个支路的 QCL 能分时工作,免于互相干扰。恒流源模块根据其核心器件——MOSFET 的 V_{GS} 与 I_D 的指数关系来调节输出电流,同时结合高速模拟 PID 反馈控制方法^[7],有效提高了恒流源的输出线性度。保护电路模块由过流保护电路、瞬态高压抑制电路、静电防护电路构成,能够有效地保护 QCL,延长其使用寿命^[8]。

2.1 高速脉冲产生模块

高速脉冲产生模块由高精度 DAC、高速模拟开关和高速运算放大器组成,如图 2 所示。PWM

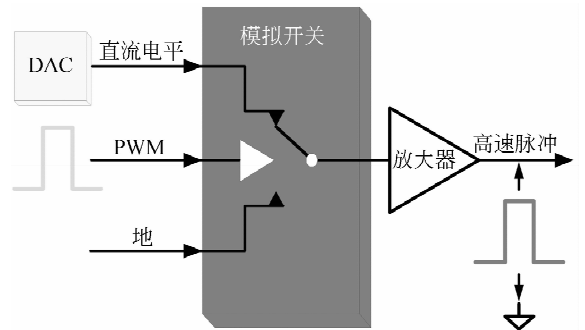


图 2 高速脉冲产生模块原理框图

Fig. 2 Block diagram of fast pulse generator module

通道切换信号将两个输入电平(DAC 输出的直流电平和地电平)高速切换输出,从而在输出端得到幅度、周期、占空比均可控的高速脉冲。最后,上述高速脉冲经过高速运算放大器缓冲后,驱动恒流源模块。其中,用于控制高速模拟开关的通道切换信号(PWM 信号)是由 TMS320LF2812 产生的,且脉冲宽度最窄可达到 6.7 ns。

2.2 群激光器时分复用信号产生模块设计

群激光器时分复用信号产生模块依据“时分复用”方法而设计,以时间为信号分割参量,使各支路驱动信号在时间轴上互不重叠,从而使群激光器协同工作,免于互相干扰^[9]。

如图 3 所示,本模块采用隔离变压的方法,提供自举驱动电压,对高边 MOSFET 实现“浮地”驱动。在实际系统中,采用 YIHONGTAI 公司的 DC/DC 模块 NR5D15,结合 International Rectifier 公司的 MOSFET 驱动芯片 IR2117 来实现对 MOSFET 的“浮地”驱动。同时,IR2117 输出信号的高、低电平分别为 +15 V 和 -5 V,用以提高 MOSFET 的关断能力,避免各支路输出的交叉影响^[10]。

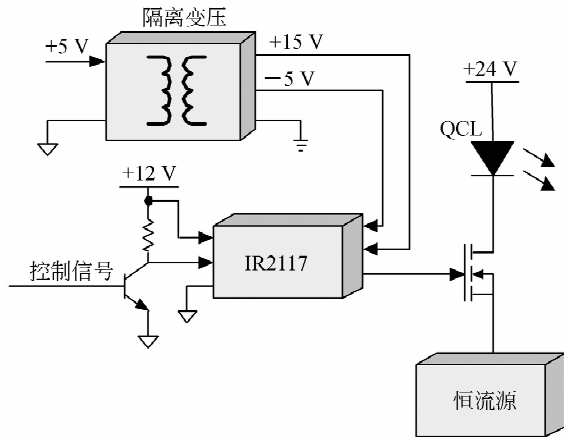


图 3 群激光器时分复用信号产生模块原理框图
Fig. 3 Block diagram of time division multiplexing generator module

2.3 恒流源模块

恒流源模块采用输出电流采样负反馈的压控恒流源(VCCS),模拟 PI 算法有效地提高了恒流源模块的线性度和稳定性^[6],其原理如图 4 所示。

注入 QCL 的电流经过取样电阻 R_5 转换为电压,再经过 U_2 以及 R_3, R_4, C_2 组成的反馈网

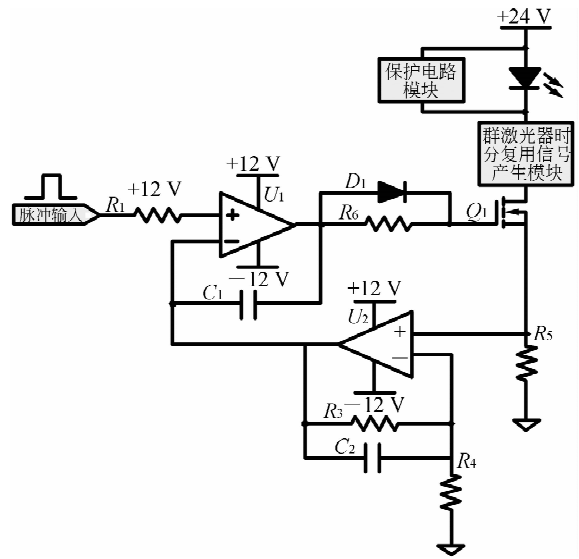


图 4 恒流源模块原理框图
Fig. 4 Schematic of constant current source module

络后送入 U_1 的反相输入端, U_1 放大二者差值驱动 Q_1 , 进而实现对驱动电流的调节^[11-13]。同时, U_2, R_3, R_4 以及 C_2 组成模拟 PI 环节, 增大 PI 环节积分时间 $\tau = C_2 R_4$, 使系统的响应时间变长, 输出电流稳定性变好; 反之, PI 环节响应时间变短, 输出电流稳定性变差。同时, 适当增大比例系数 $P = R_3 / R_4$, 负反馈的深度增加, 提高了系统的响应速度。 R_6 可以减小 Q_1 输入寄生电容 CISS 和环路寄生电感 L 所造成的驱动电流钝化的影响, 从而减小驱动波形的上升沿时间。肖特基二极管 D_1 为 Q_1 输出电容 COSS 提供释放回路, 以减小驱动波形的下降沿时间。实验中应根据具体的驱动指标要求, 合理调节 PI 环节的积分时间和比例系数, 全面权衡系统的稳定性和响应速度, 最终确定满足系统指标要求的最佳方案。

2.4 保护电路模块设计

通常静电会威胁到 QCL 的安全, 激光器驱动电源在设计上采用屏蔽静电金属罩, 避免静电对 QCL 造成损坏。此外, 激光器驱动电源在上电和断电时会产生瞬间高压, 其电量足以击穿 QCL, 因此 QCL 两端并联一个瞬态抑制二极管(TVS), 防止 QCL 被击穿。过流保护电路可以实时监测驱动电流, 当驱动电流超过设定的最大电流值时, 将切断注入 QCL 的电流, 从而进行有效地保护。

3 驱动电源软件系统设计

3.1 分段拟合

如前文所述,压控恒流源采用高速模拟 PID 控制,有效地降低了 MOSFET 的非线性度。为了进一步提高系统的线性度,利用 MOSFET 传输特性离散数据进行高精度“分段拟合”^[14],从而在总体上构成二阶非线性矫正,最终进一步提高系统的线性度。

“分段拟合”即将 MOSFET 传输特性离散数据分成若干段,然后根据各段离散数据的变化趋势分别进行高精度拟合。采用四种模型拟合对离散数据进行分析,分别为 Lorentz 模型拟合、Logistic 模型拟合、二阶多项式模型拟合和 E 指数模型拟合。分段拟合函数及相关系数如表 1 所示。

表 1 MOSFET 分段拟合函数及相关系数

Tab. 1 Fitting functions and correlation coefficients

	拟合函数	相关系数
$V_{GS} \leq 4.25 \text{ V}$	公式 (1)	0.97
$4.25 \text{ V} \leq V_{GS} \leq 4.35 \text{ V}$	公式 (2)	0.95
$4.35 \text{ V} \leq V_{GS} \leq 4.47 \text{ V}$	公式 (3)	0.98
$4.47 \text{ V} \leq V_{GS}$	公式 (4)	0.96

$$I_D = -0.01263 + \frac{0.02001}{4V_{GS}^2 - 34.36624V_{GS} + 73.82448}, \quad (1)$$

$$I_D = 2.17671 - \frac{279.24334}{1 + \left(\frac{V_{GS}}{3.87776}\right)^{60.59626}}, \quad (2)$$

$$I_D = -134.49763 + 56.90667V_{GS} - 5.87302V_{GS}^2, \quad (3)$$

$$I_D = \text{EXP}(18.59786 - 9.01045V_{GS} + 1.13142V_{GS}^2). \quad (4)$$

式中: I_D 为漏极电流, V_{GS} 为栅源电压。

由表 1 可知,各段拟合具有极高的相关度。其中,最大相关系数达到 0.98,平均值高达 0.965。图 5 为利用上述分段模型得到的 MOSFET 特性拟合曲线,它与实验所得离散数据的契合度极高,由此可知 MOSFET 线性度得到了提高,系统的线性度也进一步得到了提升。

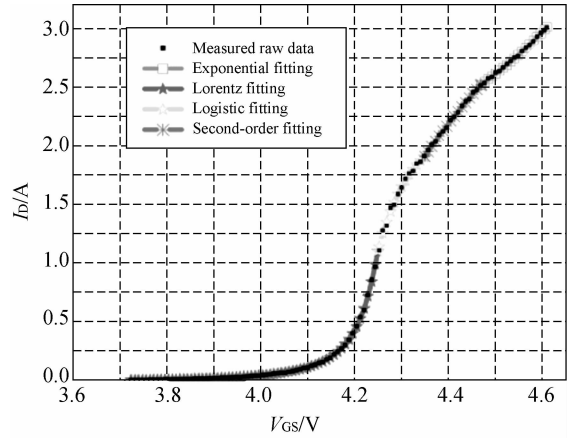


图 5 MOSFET 特性曲线拟合图

Fig. 5 Fitting of MOSFET transfer characteristics

3.2 PFM 与 PWM 相结合控制方案

由于不同激励波长的 QCL 具有各自特定的驱动脉宽。在驱动频率一定的条件下,增加驱动脉冲宽度会使平均驱动功率增加, QCL 内部产生一定的温升,进而导致激光光谱产生一定的红移;反之,激光光谱将会蓝移。同时,各驱动支路在实际工作中可能存在“支路串扰”,“支路串扰”即多路信号在同一设备中,由于空间的辐射、电源的波动等因素,彼此之间形成干扰的现象,通常串扰强度不能大于 -55 dB。本系统基于 QCL 驱动脉宽与激光光谱的关系,首先采用 PWM 寻求最优的驱动脉宽;待系统驱动脉宽调节到最优后,采用脉冲频率调制 (Pulse Frequency Modulation, PFM),寻求最佳驱动频率以减少支路串扰。实验中,对 QCL 的激光光谱进行了测量,得到最优驱动脉宽为 $2 \mu\text{s}$ ^[6],使用功率谱密度测量仪 (EXFO, AXS-610),测得了串扰

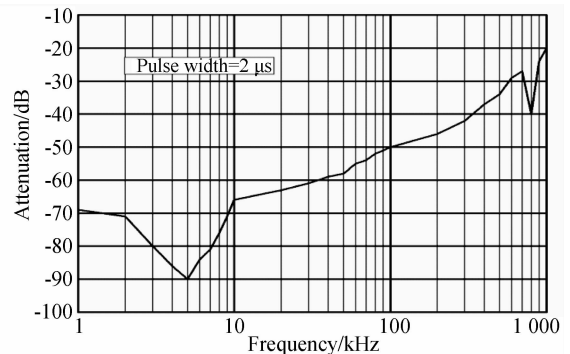


图 6 串扰强度与驱动频率特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of crosstalk intensity versus operating frequency

强度与驱动频率特性曲线,如图6所示。从图中可以看出,驱动频率为5 kHz为串扰强度最低的频率点。

4 驱动电源性能测试

采用本系统对中国科学院半导体所研制的4种QCL进行了测试,其激发波长分别为4.8, 7.49, 7.71, 10.7 μm 。

4.1 驱动电流波形分析

为了深入研究驱动电源的工作性能,实验设定驱动电流为2.4 A,各路驱动脉冲频率为5 KHz,占空比为1%,选用美国泰克公司的MS04034B型四通道数字荧光示波器对驱动脉冲的电流、宽度、上升沿/下降沿时间等参数进行了测量。图7显示了一个完整周期的4路QCL驱动电流波形,椭圆框中为局部放大后的电流波形。从图中可以看出,驱动电流为2.4 A,脉冲宽度为2 μs ,上升沿/下降沿时间小于100 ns,同时各路驱动波形较好,没有串扰现象。

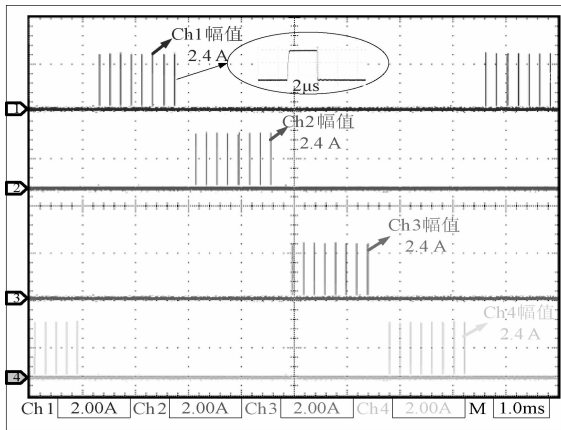


图7 驱动电流波形图

Fig. 7 Schematic of driving current waveforms

4.2 QCL 发光光谱图分析

激光器发光光谱特性是衡量驱动电源性能的主要标准之一,在测试中采用分辨率为0.125 cm^{-1} 的傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, THERM04700)测量了4种QCL的激光光谱。如图8所示,驱动脉冲的脉宽为2 μs ,重复频率为5 kHz。从图中可以看出,各激光器工作在各自标称波长处,工作状态稳定,中心波长未出现漂移。

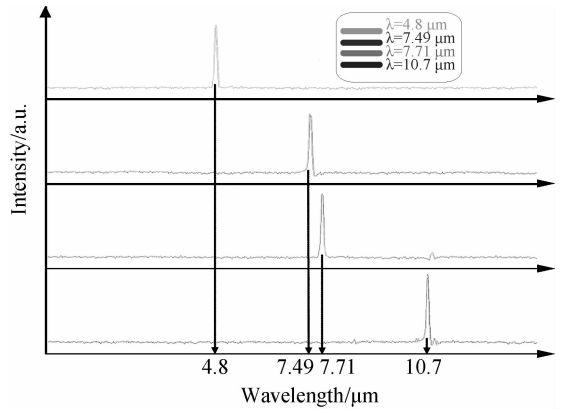


图8 4路QCL发光光谱图

Fig. 8 Emission spectra of four QCLs

4.3 驱动脉冲最窄下限分析

为了获得更高的光谱分辨率,驱动脉冲宽度越窄越好;但当脉冲宽度过窄时,电子学振荡的影响会使误差展宽,因而不能够准确地控制电脉冲的形状^[15]。所以需要适当选取脉冲宽度、重复频率和占空比。基于以上分析,实验对4路QCL驱动脉冲进行了最窄下限分析。设定驱动电流幅值为2 A,逐渐减小脉宽,可得图9中的临界波形。从图中可知,驱动脉冲的脉宽最窄为10 ns。

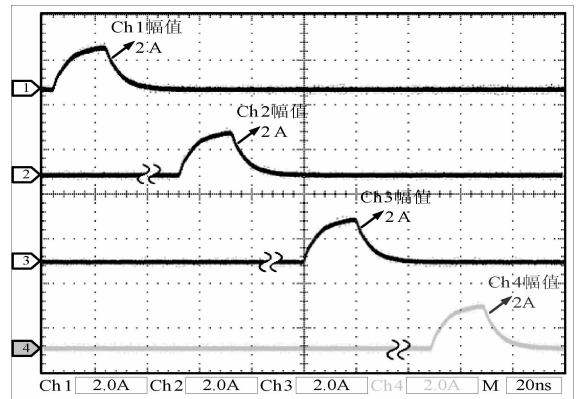


图9 驱动脉冲最窄下限

Fig. 9 Minimum width of driving pulse

4.4 驱动电源系统线性度分析

驱动电源输出电流的I-V关系是衡量系统线性度的一个重要指标。在实验中,通过改变压控恒流源的输入电压测量其输出电流,实验所得二者的关系曲线如图10所示。

实验显示,驱动电源输出电流的最大偏差值为0.873 mA,由此可知该系统的线性度为0.0291%,性能良好^[16]。

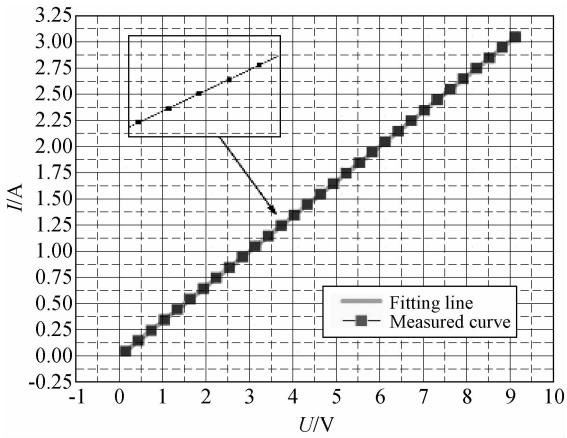


图 10 驱动电源系统线性度实验曲线

Fig. 10 Experimental I - V curve of linearity of driver system

4.5 驱动电源系统输出电流稳定度分析

实验中采用建立 QCL 等效模型的方法^[6],以其假负载(等效阻值为 $1\sim 10\ \Omega$)作为驱动对象,对该驱动电流的稳定度进行测试,实验结果如图 11 所示。

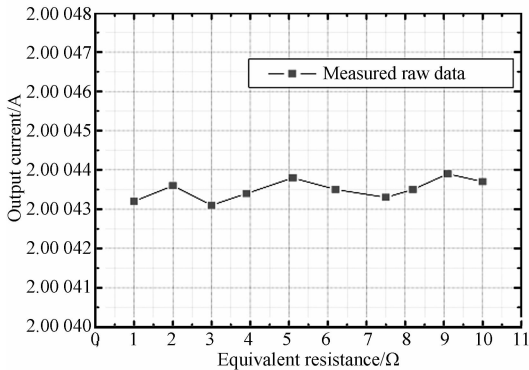


图 11 不同假负载情况下,该系统输出电流稳定度测试结果

Fig. 11 Measured results of output current stability of proposed system under different dummy loads

实验中,预设驱动电流为 2 A,测得最大偏差

值为 $2.000\ 439\ \text{A}$,偏差度小于 $5\times 10^{-4}\ \text{A}$;10 个测试结果的平均值为 $2.000\ 435\ \text{A}$,电流稳定度优于 $4\times 10^{-5}\ \text{A}$ 。同时进一步研究了系统的长期稳定性,实验以阻值为 $10\ \Omega$ 的负载作为被驱动对象^[6],测试时间为 220 h,采样间隔为 5 min,驱动电流的测试结果如图 12 所示。实验测量值的标准差为 9.25×10^{-6} ,均值为 $4.000\ 433\ \text{A}$,可得长期稳定度为 4.62×10^{-6} 。

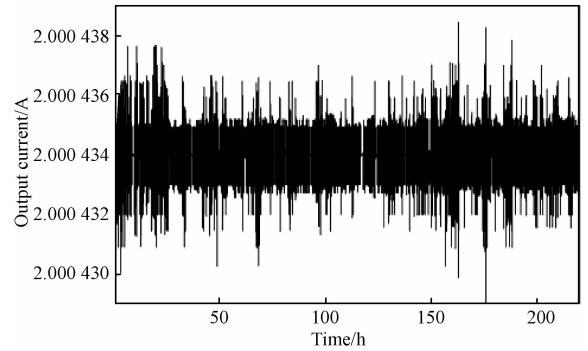


图 12 驱动电流长期稳定性测试结果

Fig. 12 Stability results of driving current during long time

5 结 论

本文介绍了一种基于“时分复用”技术的纳秒级脉冲型群红外量子级联激光器驱动电源。此驱动电源以压控恒流源为核心,采用 PFM 和 PWM 混合调制技术,实现对群红外 QCL 的最佳驱动。同时,结合模拟 PI 控制算法和“分段拟合”方法,有效地提高了系统的线性度和输出电流的稳定度。实验结果显示,本系统的线性度为 $0.029\ 1\%$,驱动电流的长期(220 h)稳定度为 4.62×10^{-6} ,满足群红外量子级联激光器对驱动电源的要求,具有很强的实用价值。该驱动电源系统为中红外混合气体检测提供了坚实的基础,在混合气体检测领域有着广泛的应用前景。

[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(3):219-221.

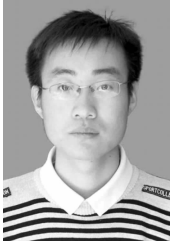
[2] KOSTEREV A A, CURL R F, TITTEL F K. Methane concentration and isotopic composition measurements with a mid-infrared quantum-cascade laser [J]. *Optics Letters*, 1999, 24 (23):

参考文献:

[1] NAMJOU K, CAI S, WHITTAKER E A, *et al.*. Sensitive absorption spectroscopy with a room-temperature distributed-feedback quantum-cascade laser

- 1762-1764.
- [3] MCMANUS J B, ZAHNISR M S, NELSON D D. Dual quantum cascade laser trace gas instrument with astigmatic Herriott cell at high pass number [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(4):74-85.
- [4] TUZSON B, ZEEMAN M J, ZAHNISR M S. Quantum cascade laser based spectrometer for in situ stable carbon dioxide isotope measurements[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, 51(3):198-206.
- [5] ROLLER C, KOSTEREV A A, TITTEL F K, et al.. Carbonyl sulfide detection with a thermoelectrically cooled midinfrared quantum cascade laser [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(21):2052-2054.
- [6] 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的研制[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(6):1739-1740.
- CHEN CH, HUANG J Q, LÜ M, et al.. High-precision narrow pulse drive power for infrared quantum cascade laser[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(6):1739-1740. (in Chinese)
- [7] GE P, JOUANEH M. Tracking control of a piezoceramic actuator[J]. *Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(3):213-214.
- [8] 丛梦龙,李黎,崔艳松,等. 控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1633-1634.
- CONG M L, LI L, CUI Y S, et al.. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1633-1634. (in Chinese)
- [9] 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.
- CHEN X, SUI Q M, MIAO F, et al.. Design of detecting system for multi-component gases based on single ultra-narrow-linewidth laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1498-1499. (in Chinese)
- [10] IYENGAR P, FLETCHER J E, BITTLESTONE D J. Enhanced mosfet gate driver for pulsed power IVA module [C]. *Pulsed Power Conference (PPC), Chicago:IEEE*, 2011:1479-1480.
- [11] 邓军. 半导体激光器驱动模式与可靠性研究[D]. 长春:吉林大学电子科学与工程学院, 2008.
- DENG J. *Study of Drive Modes and Reliability on Semiconductor Laser* [D]. Changchun: College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [12] THOMPSON M T, SCHLECHT M F. High power laser diode driver based on power converter technology [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, 12(1):46-52.
- [13] SACKINGER E, OTA Y, GABARA T. A 15-mW, 155-Mb/s CMOS burst-mode laser driver with automatic power control and end-of-life detection [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, 1999, 34(12):1994-1950.
- [14] LU J F. Piecewise nonlinear fitting method of tunnel surrounding rock displacement and its application [C]. *International Conference on Multimedia Technology (ICMT), Hangzhou*, 2011:1148-1151.
- [15] 王敏,张玉钧,汤媛媛,等. 基于室温脉冲工作量子级联激光器的脉间光谱技术研究[J]. *光学技术*, 2010, 36(3):325-326.
- WANG M, ZHANG Y J, TANG Y Y, et al.. Inter-pulse spectroscopy based on room-temperature pulsed quantum-cascade laser [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(3):325-326. (in Chinese)
- [16] 黄向东,刘立丰,谭久彬,等. 调幅式电容位移传感器的峰值检波电路设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11):2447-2448.
- HUANG X D, LIU L F, TAN J B, et al.. Design of peak detector circuit for AM capacitive displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2447-2448. (in Chinese)

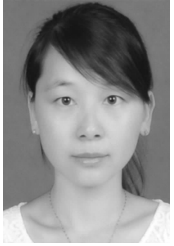
作者简介:



党敬民(1987—),男,天津人,博士研究生,主要从事光电检测、嵌入式系统方面的研究。Email: mailto:dangjim11@mails.jlu.edu.cn



翟冰(1989—),女,吉林省吉林市人,硕士研究生,主要从事红外 CO 检测的研究。E-mail: bing137090227@163.com



高宗丽(1988—),女,河南濮阳人,硕士研究生,主要从事光电检测的研究。E-mail: gaozl12@mails.jlu.edu.cn



陈晨(1983—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事光电检测、嵌入式系统以及人工智能方面的研究。E-mail: chenc09@mails.jlu.edu.cn

导师简介:



王一丁(1956—),男,辽宁新民人,教授,博士生导师,1982年、1991年于吉林大学分别获学士、硕士学位,主要从事光电检测、中红外半导体激光器和发光二极管等方面的研究。E-mail: wangyiding48@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)