

doi: 10.3788/gzxb20154402.0214001

# 分布反馈量子级联激光器脉冲驱动电源的研制

党敬民<sup>1</sup>, 付丽<sup>1</sup>, 何启欣<sup>1</sup>, 陈晨<sup>2</sup>, 郑传涛<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 仪器科学与电气工程学院, 长春 130026)

**摘 要:** 为了满足中红外一氧化碳检测中分布反馈量子级联激光器的驱动要求, 设计并实现了一种专用型脉冲驱动电源. 首先, 研制了高稳定的供电系统和完善的保护系统, 显著提高了驱动脉冲的质量并保证了电源工作的可靠性; 其次, 依据“多级隔离”的思想设计了电源各功能电路, 很大程度上提高了驱动电源的抗干扰能力; 同时, 将深度电压负反馈与比例-积分-微分控制算法相结合, 有效提高了输出电流的稳定度. 利用该驱动电源对中科院半导体所研制的波长为  $4.76 \mu\text{m}$  的分布反馈量子级联激光器做了驱动测试. 实验结果表明, 在长时间 (200 h) 运行中, 系统驱动电流的稳定度为  $2.5 \times 10^{-5}$ , 线性度为  $0.004\%$ , 满足分布反馈量子级联激光器的驱动要求, 为中红外一氧化碳的可靠检测提供了保障.

**关键词:** 光电子学; 红外; 量子级联激光器; 电源; 驱动电路

中图分类号: TH83

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0214001-7

## Development of Pulse-mode Driver for Distributed-feedback Quantum Cascade Laser

DANG Jing-min<sup>1</sup>, FU Li<sup>1</sup>, HE Qi-xin<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>2</sup>, ZHENG Chuan-tao<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 Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** In considering the exciting ability of driving Distributed-feedback quantum cascade laser in infrared carbon monoxide detection, a novel generator under experimental validation was carried out accordingly. Firstly, low ripple power supply and perfect protective module were developed, which improved the quality of drive pulse significantly and ensured the reliability of the power supply work. Secondly, corresponding function circuits were designed by the concept of “Multiple Isolation”. So the system anti-interference ability was enhanced greatly. Lastly, deep voltage feedback method and proportional-integral-differential control theory were used to improve the stability of drive current efficiently. Utilizing illustrated driver, driving test was conducted on one Distributed-feedback quantum cascade laser with center wavelength at  $4.76 \mu\text{m}$ , which was fabricated by institute of semiconductor, CAS. Experimental results demonstrate during a long-term operation (200 h), stability of drive current is  $2.5 \times 10^{-5}$ , linearity of the drive power system is  $0.04\%$ , which meet the requirements of driving Distributed-feedback quantum cascade lasers and provide a strong guarantee for infrared carbon monoxide detection.

**Key words:** Optoelectronics; Infrared; Quantum cascade lasers; Power; Drive circuits

**OCIS Codes:** 130.0250; 140.3070; 140.3570; 230.3240

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (Nos. 2013BAK06B04, 2014BAD08B03)、吉林省科技发展计划项目 (Nos. 20120707, 201101036) 和长春市国际合作项目 (No. 11GH01) 资助

第一作者: 党敬民 (1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为红外气体检测系统. Email: djingm123@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: wangyiding48@yahoo.com.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: 2014-06-20; 录用日期: 2014-08-20

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

## 0 引言

分布反馈量子级联激光器 (Distributed-Feedback Quantum Cascade Laser, DFB-QCL) 自 1996 年问世以来, 就以其单模输出、极窄的线宽、较高的光功率及可在室温下工作等特性, 成为中红外痕量气体检测中的理想光源<sup>[1-3]</sup>. 由于光源特性在很大程度上决定检测方法, 又与检测灵敏度等重要指标直接相关<sup>[4]</sup>, 故对于整个检测系统而言, 确保 DFB-QCL 的稳定、安全工作十分重要. 目前, 商品化 DFB-QCL 已能够工作于连续模式. 针对工作于脉冲条件下的 DFB-QCL, Newport、Wavelength、Directed Energy 等公司已有商用驱动产品, 国内的厂商主要以深圳市南方联合实业有限公司为代表<sup>[5]</sup>. 商用产品的一般性能为: 驱动脉冲重复频率较高 (可达数 MHz)、脉宽很窄 (几十 ns)、上升/下降时间较短 (数十 ns)、电流输出能力很强 (最高可达数十 A), 且具有完备的保护系统和良好的人机接口<sup>[6]</sup>. 但是它们的体积较大, 不利于与气体检测仪集成, 而且价格十分昂贵 (一般为数万元). 近些年, 国内外的研究机构也对 DFB-QCL 驱动电源进行了研究. 美国马萨诸塞州物理科学公司的 Rawlins 等设计了一款可以集成于激光器底座的单板驱动电路<sup>[7]</sup>. 波兰军事技术大学光电子学研究所的 Mikolajczyk 等研制了一种能够同时驱动连续和脉冲型 QCL 的驱动电源<sup>[8]</sup>. 中科院微电子研究所的余兆安等对 DFB-QCL 的驱动电路建模并仿真, 得到了较好的效果<sup>[9]</sup>. 吉林大学的陈晨等开发了

一款高准确度纳秒级 QCL 脉冲电源<sup>[10]</sup>. 与商用驱动电源相比, 科研机构所研制的驱动电源, 虽然整体功能不够全面, 但在某些特性 (如驱动电流值、频率、体积等) 上较为优越, 便于降低成本, 实现系统的微型化.

针对中科院半导体所研制的 DFB-QCL, 本文设计并研制了一种专用驱动电源, 具有体积小、成本低、便于操作等特点.

## 1 系统原理

DFB-QCL 脉冲驱动电源系统组成原理如图 1, 它主要包括线性稳压软启动模块 (Linear regulating and soft starting module)、脉冲驱动模块 (Pulse drive module)、高准确度电流检测与控制模块 (Current detection and control module)、过流保护模块 (Over-current protection module)、显示与控制模块 (Display and Control module) 等. 线性稳压软启动模块为整个系统提供高稳定、超低纹波的电力供应, 并具有防浪涌电流的功能. 脉冲驱动模块是整个驱动电源的核心, 它包括微控制器 (Micro Control Unit, MCU)、脉冲产生 (Pulse generator) 和恒流源 (Constant current source) 三部分, 且直接作用于 DFB-QCL. 高准确度电流检测与控制模块将采样电流信号处理 (Processing) 并经模数转换器 (Analog/Digital Converter, ADC) 转换, 再由 MCU 完成对激光器工作电流的实时监测与控制, 使驱动电流保持在较高的稳定状态. 当发生“过流”时, 过流保护模块中的状态判决器 (State judge) 会控制保护电

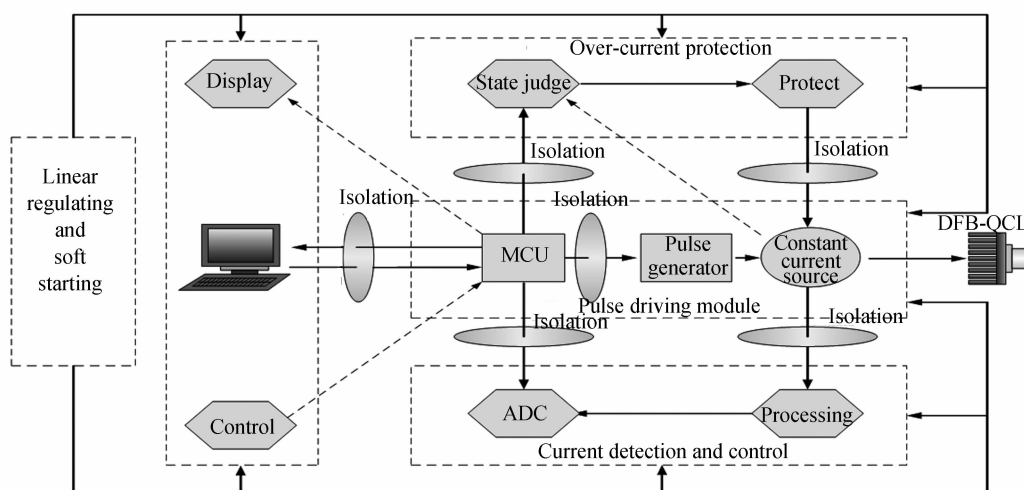


图 1 系统组成框图

Fig. 1 System block diagram

路 (Protect) 以极快的速度切断恒流源回路, 保护激光器使其免受损坏. 显示与控制模块实现对驱动电流参量和比例积分微分 (Proportional-Integral-Differential, PID) 参量的设定以及对当前工作电流的实时显示. 此外还设置了串行通信模块以实现人机交

互的功能.

设计中, 为提高抗干扰能力, 通过一定的技术手段将微控制器、恒流源、电流检测模块、保护模块以及上位机互相隔离, 达到“多级隔离”的效果.

## 2 系统具体实现

### 2.1 线性稳压软启动

线性稳压软启动模块的原理电路如图 2,其特性如表 1. 输入的 220 V 交流电压经隔离变压后,得到所

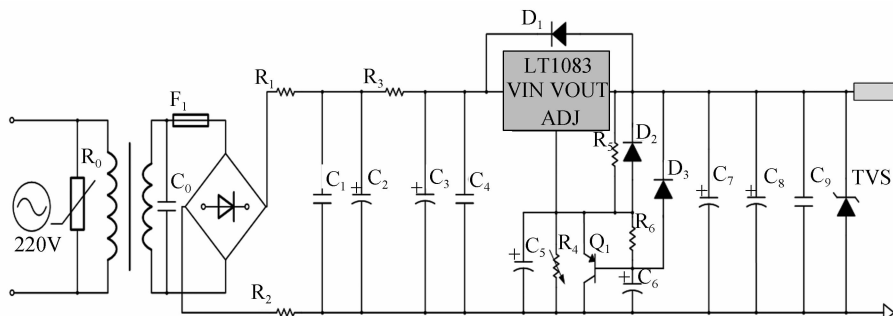


图 2 线性稳压软启动模块  
Fig. 2 Linear regulating and soft starting module

表 1 线性稳压软启动模块的性能  
Table 1 Performance of Linear regulating and soft starting module

Parameters	Value
Output voltage/V	1.3~30
Output current/A	7.5(max)
Ripple coefficient	0.0002%(max)
Load regulation	0.5%
Line regulation	0.03%

为了防止浪涌,本模块加入了氧化锌压敏电阻( $R_0$ )、瞬变电压抑制器(Transient Voltage Suppressor, TVS)以及软启动部分. 其中压敏电阻能够有效地抑制、吸收由各种原因引起的电压尖峰,达到减小输出噪声的目的<sup>[11]</sup>. TVS 是一种高效能的电路保护器件,它能吸收高达数千瓦的浪涌功率,对静电、过压、电网干扰及电源噪声震动保护尤为有效. 软启动电路<sup>[12]</sup>由 PNP 型三极管  $Q_1$ 、二极管  $D_3$ 、电阻  $R_5$  以及电解电容  $C_6$  共同构成. 启动过程可分为三个阶段:1)初始阶段. 电阻  $R_5$  两端存在一个 1.25 V 电压(详见 LT1083 数据手册),而电容  $C_6$  两端电压为 0,故三极管  $Q_1$  饱和导通,电阻  $R_1$  被“短路”,不起作用,线性稳压软启动模

需的交流信号. 其先经过  $C_0$  旁路高频干扰信号,然后被全波整流后得到脉动的直流信号,再由  $\pi$  型滤波电路进一步滤除高频成分,最后通过基于 LT1083 的稳压电路进行稳压,以提高抗扰能力和带载能力,并使输出的直流电压更纯净,纹波更小.

块输出一个 1.25 V 左右的电压. 2) 充电阶段. 随着电容  $C_6$  的不断充电,三极管  $Q_1$  逐渐退出饱和区,LT1083 的输出电压也不断升高,直至  $Q_1$  截止,而启动时间由  $\tau=R_6 \cdot C_6$  决定. 3) 稳定阶段. 线性稳压软启动模块输出额定的直流电压,该电压的大小可以通过  $R_4$  设定. 软启动的过程如图 3.

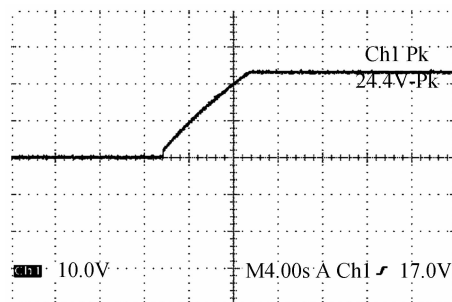
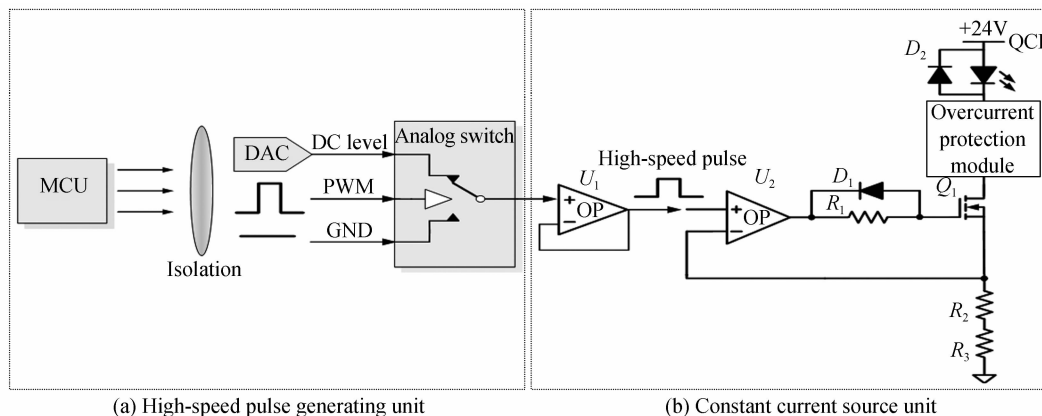


图 3 软启动过程

Fig. 3 Procession of soft starting

### 2.2 脉冲驱动模块

脉冲驱动模块是 DFB-QCL 脉冲驱动电源的核心,其组成原理如图 4,主要包括 MCU、高速脉冲产生



(a) High-speed pulse generating unit

(b) Constant current source unit

图 4 脉冲驱动模块  
Fig. 4 Scheme of the pulse drive module

单元和恒流源单元等.采用光电耦合器将“数字部分”与“模拟部分”隔离.

微控制器单元的主控芯片为 Atmel 公司高性能、低功耗的 8 位处理器—ATmega16,其主要功能为:控制数模转换器(Digital/Analog Converter, DAC)产生高准确度直流电平信号,产生高速脉宽宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号.高速脉冲产生单元是为恒流源服务的,该部分的作用是产生一个周期、脉宽、幅度都可数控的高速脉冲信号.而作为驱动 QCL 的直接部件,恒流源单元由运算放大器、MOSFET、采样电阻(电流值采样电阻和过流保护采样电阻)共同构成,依据电压负反馈原理,达到恒流的效果.

### 2.2.1 高速脉冲产生

高速运算放大器、模拟开关、高准确度 DAC 共同构成高速脉冲产生单元,如图 4(a).微控制器单元产生的 PWM 信号经隔离后,作用于模拟开关的选通通道,而 DAC 输出的直流电平和模拟“地”电平分别输入到模拟开关的两个信号通道,利用 PWM 信号切换两路输入信号,使模拟开关输出一个周期、脉宽、幅度都可调的高速脉冲信号,该信号经高速运放缓冲后作为恒流源的驱动信号.

### 2.2.2 恒流源

恒流源单元依据电流采样和负反馈原理设计,属压控恒流源,其原理如图 4(b).为了提高恒流源的闭环速度,不再采用模拟比例-积分控制<sup>[10]</sup>.流经 QCL 的电流被取样电阻转换为电压后,直接送入  $U_2$  的反相输入端,  $U_2$  对二者差值放大后驱动 MOSFET,进而实现对驱动电流的调节<sup>[13]</sup>.其中,栅极电阻  $R_1$  可以降低  $Q_1$  输入寄生电容  $C_{iss}$  和环路寄生电感  $L$  所造成驱动电流钝化的影响,从而减小驱动信号的上升时间.肖特基二极管  $D_1$  为  $Q_1$  输出电容  $C_{oss}$  提供放电回路,能够减小驱动信号的下降时间.实验中应根据具体驱动指标要求,合理选择运算放大器、MOSFET 及栅极电阻  $R_1$  的阻值,尽量缩短闭环回路的走线,降低寄生电容、电感的影响,使系统响应速度和稳定性达到最优.

### 2.3 高准确度电流检测与控制

本模块采用的“异地采样法”是“隔离”思想的具体实现,选取电流值采样电阻与 MOSFET“源极”之间一点作为高准确度电流检测系统的“地”电平,并且为该系统提供与恒流源单元不同的供电.通过不同的系统对电流进行采样分析,能避免其对恒流源模块的干扰,提高驱动电流的稳定度.

系统需要对频率为 5 kHz, 占空比为 1% 的脉冲电流信号进行处理、分析.由于脉冲较短(2  $\mu$ s),直接对其采样难度较大(需要较高的采样率),为了提高采样

准确度、降低数据处理复杂度,对脉冲信号进行了相应的处理,得到与脉冲峰值相关的直流信号.信号调理过程如图 5.

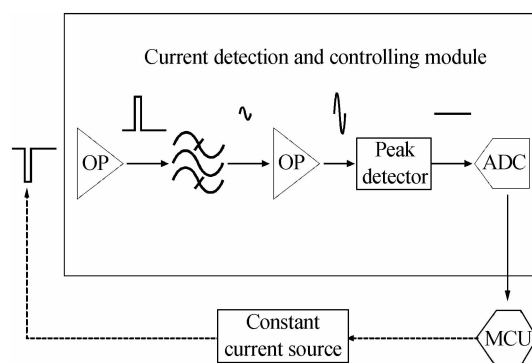


图 5 信号调理过程

Fig. 5 Schematic of signal conditioning

采样脉冲信号先经反向处理,然后通过带通滤波器得到其基频正弦信号,再经过主放大,放大后的正弦波被峰值检波器捕获并得到直流信号,该直流信号由 ADC 量化后送微控制器处理,微控制器通过控制恒流源的输入电压来实现被测电流与设定电流的一致性.实际中,为了提高控流准确度,PID 算法已应用于系统软件设计.图 6 为将恒流源电流设定为 450 mA 时,驱动电流随时间变化的关系曲线,从图中可以看出,系统的稳流时间为 10 s,控流准确度约为  $\pm 0.03$  mA.

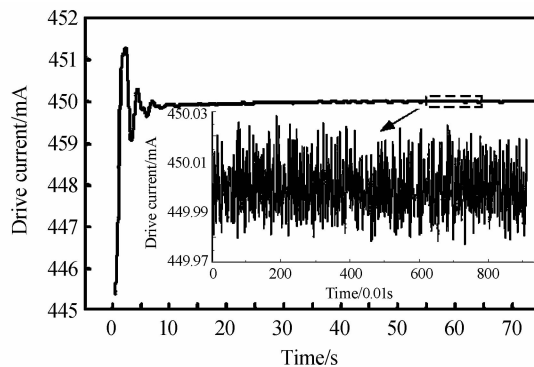


图 6 驱动电流的检测与控制过程

Fig. 6 Detecting and controlling of the drive current

### 2.4 高速过流保护

当注入电流超过 QCL 的最大工作电流时,其有源区温度升高,导致其性能下降或彻底损坏<sup>[14]</sup>.故研制具有快速响应特性的保护电路对于系统的稳定工作非常必要.

本模块同样以“隔离”作为设计理念,并采用“浮地”驱动的实现方法<sup>[15]</sup>,以达到保护激光器的目的,其原理如图 7.

将采样电阻采集到的脉冲信号先经电压跟随器缓冲,然后进入状态判决器,状态判决器根据其自身设定的阈值电压来决定输出的状态—高电平(5 V)或低电

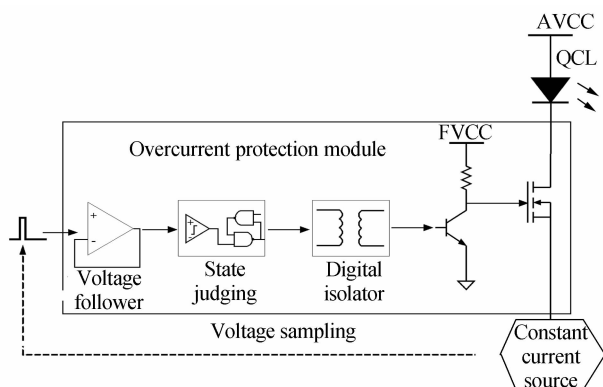


图7 过流保护过程原理

Fig. 7 Schematic of over-current protection

平(0 V)。该电平作为“浮地”驱动部分的输入信号。“浮地”驱动部分是由三极管与 MOSFET 共同构成。恒流源正常工作时,采样脉冲信号的幅值低于状态判决器的阈值电压,其输出低电平,三极管不导通;当“过流”时,采样脉冲信号的幅值越过状态判决器的阈值,其输出的高电平会使三极管导通,进而快速关断 MOSFET,从而起到保护 QCL 的作用。

根据 QCL 的等效模型<sup>[10]</sup>,实验中以  $1\ \Omega$  电阻作为假负载,设定阈值保护电流为 1 A,逐渐增加驱动电流值,得到了过流保护模块响应曲线,如图 8。通道 1 为驱动脉冲信号,通道 2 为 MOSFET 关断控制信号(高电平有效)。从图 8 中可以看出,该保护电路的响应时间约为 200 ns。

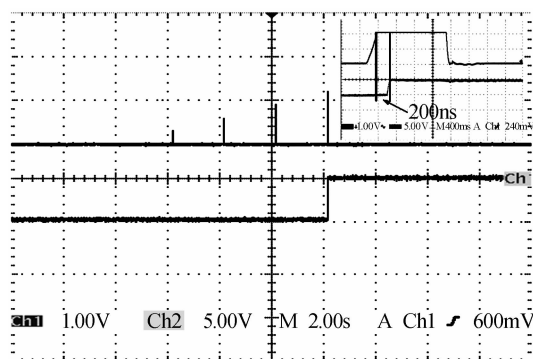


图8 过流响应曲线

Fig. 8 Response curves of under over-current condition

### 3 系统测试

实验中采用的激光器为中科院半导体所研制的中心波长为  $4.76\ \mu\text{m}$  (波数为  $2\ 104.5\ \text{cm}^{-1}$ ) 的 DFB-QCL,主要参量如表 2。针对其电学性能,利用所研制的驱动电源,选取表 3 中的参量条件对其进行测试,驱动脉冲波形如图 9。可以看出,该驱动脉冲波形稳定,无毛刺现象,上升时间为 309.9 ns,下降时间为 358.9 ns,无“过冲”,脉冲宽度为  $2.091\ \mu\text{s}$ 。

表 2 DFB-QCL 的主要性能参量

Table 2 The main performance of DFB-QCL

DFB-QCL parameters	Value
Wave number/ $\text{cm}^{-1}$	2104.5
Threshold current/mA	300
Threshold voltage/V	16
Drive pulse repetitive frequency/kHz	5
Width of drive pulse/ $\mu\text{s}$	2
Dynamic resistance/ $\Omega$	1

表 3 DFB-QCL 的驱动参量

Table 3 Drive parameter of DFB-QCL

DFB-QCL drive parameters	Value
Drive current/mA	350
Forward bias voltage/V	24
Drive pulse repetitive frequency/kHz	5
Width of drive pulse/ $\mu\text{s}$	2

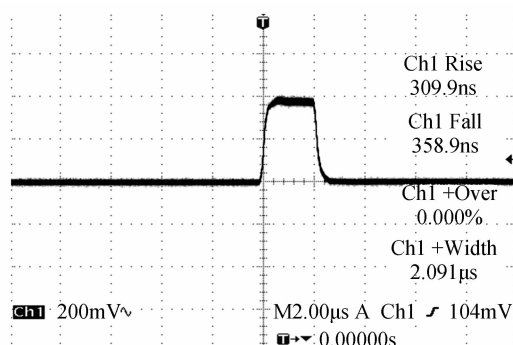


图9 QCL 驱动脉冲波形

Fig. 9 QCL drive pulse waveform

### 3.1 激光器发光功率测量

激光器的发光功率是表征其性能的重要指标之一,它与气体的检测灵敏度直接相关<sup>[4]</sup>。对 DFB-QCL 的光功率进行了测量,得到了电流-光功率曲线,如图 10。从图中可知,当驱动电流为 300 mA 时,激光器开始发光;当驱动电流为 700 mA 时,发光功率达到 500 mW,DFB-QCL 的发光功率随驱动电流的增加呈线性变化趋势。

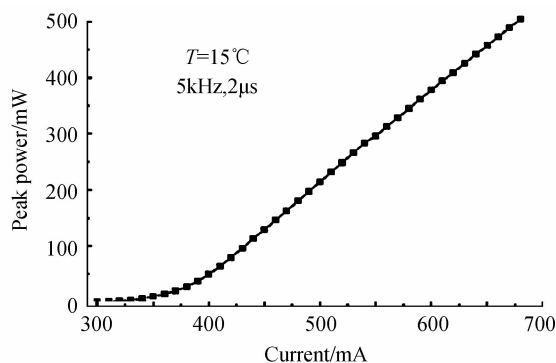


图10 QCL 功率曲线图

Fig. 10 Quantum cascade laser power curve

### 3.2 激光器发光光谱测量

在气体检测中,需要获取激光器的实际发光峰位,以便与被测气体的吸收峰相吻合.利用所研制的驱动电源,设定驱动电流为 350 mA,驱动脉冲重复频率 5 kHz,占空比 1%,并结合商用温控仪(Model 350B),逐渐改变激光器工作温度,测得了DFB-QCL的发光光谱,如图 11.从图中可知,随着温度的改变,DFB-QCL的发光峰位在  $2103.0\text{ cm}^{-1}\sim 2106.0\text{ cm}^{-1}$  之间移动,且无杂峰干扰,激光器发光稳定,强度较高.

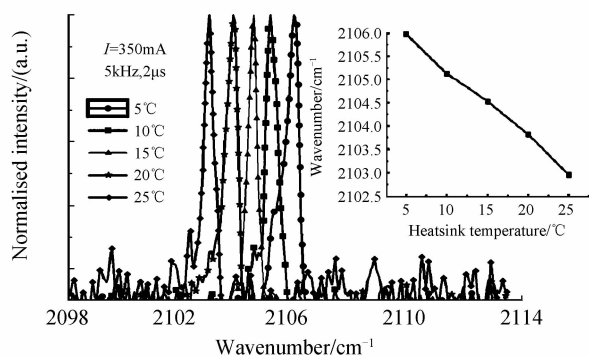


图 11 QCL 激光光谱图

Fig. 11 Spectra of quantum cascade laser

### 3.3 驱动电源线性度分析

系统线性度是驱动电源的一个重要指标.它是系统测量所得最大偏差值与满量程输出的百分比<sup>[16]</sup>.设定一电压值作为恒流源的输入电压,驱动电流经采样电阻后转换成电压信号,经调理电路后由 ADC 采集(详见 2.3 节),然后存储并显示采集的结果.实验中逐渐增大恒流源的输入电压,逐一观测对应的驱动电流值,实验测得二者的关系曲线如图 12.

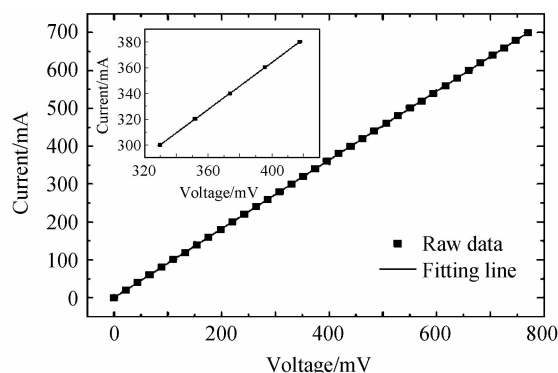


图 12 驱动电源系统线性度实验曲线

Fig. 12 The experimental curve of linearity of driver system

结果显示,在  $0\sim 700\text{ mA}$  范围内,驱动电源输出电流的最大偏差为  $0.029\text{ mA}$ ,由此可知该系统的线性度为  $0.004\%$ .

### 3.4 驱动电源输出电流稳定度分析

驱动电源输出电流稳定度为输出电流的最大变化量与电流平均值的比值<sup>[17]</sup>.实验中以DFB-QCL的假负载(等效阻值为  $1\sim 10\Omega$ )作为驱动对象,对驱动电源

输出电流的稳定度进行测试,实验结果如图 13.预设驱动电流为  $400\text{ mA}$ ,测得最大偏差值为  $399.983\text{ mA}$ ,可知,电流稳定度优于  $5\times 10^{-5}$ .

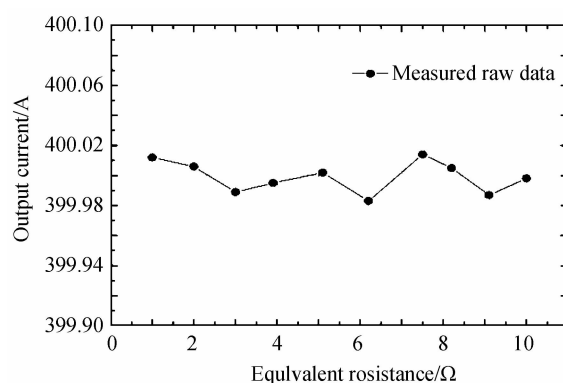


图 13 不同假负载情况下,该系统输出电流稳定度测试结果  
Fig. 13 The measured results of output current stability of proposed system under different virtual loaders

同时,进行了系统长期稳定性测量(200 h),测试结果如图 14.设定采样时间间隔为  $10\text{ min}$ ,将采样结果通过串口上传到上位机,以完成数据的实时显示与存储.对实验数据分析可得,测量值的标准差为  $0.01\text{ mA}$ ,均值为  $399.995\text{ mA}$ ,可得长期稳定度为  $2.5\times 10^{-5}$ .

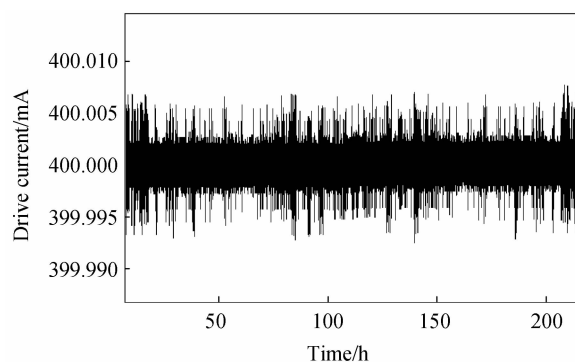


图 14 驱动电流长期稳定性测试结果

Fig. 14 The stability results of drive current during longtime

测试系统没有采用电流表(能够测试脉冲电流的电流表十分昂贵),而是利用 ADC 采集与脉冲电流相关的电压来表征电流值.故测试系统误差主要取决于采样系统的准确度,它与 ADC 的积分非线性(Integral Nonlinearity, INL)、失调和增益误差、电压基准的准确度等因素密切相关.系统中采用的 ADC 为具有 24 位分辨率(即精确到  $0.1\text{ }\mu\text{V}$ )的 AD7714,其积分非线性为  $0.0015\%$ ,通过软件对其失调和增益误差进行补偿,使 ADC 的误差降到最低( $0.0015\%$ ).选取 AD780 作为 ADC 的电压基准源,它的误差为  $0.0196\%$ ,这样整个测试系统的误差约为  $0.0211\%$ .采用高品质元件并逐渐改进印制电路板的特性将有助于减小误差,提高仪器的准确度,使其性能趋于完善.

## 4 总结

本文依据“多级隔离”思想研制了一种应用于红外 CO 气体检测的 DFB-QCL 脉冲驱动电源. 实验表明, 其驱动脉冲上升/下降时间为纳秒量级, 无“过冲”, 波形较好, 而且具有较高的线性度和稳定度. 满足 DFB-QCL 对驱动电源的要求, 具有一定的实用价值和参考价值. 今后将进一步研制具有大电流驱动能力的驱动电源, 为中红外 CO 气体检测提供更为坚实的基础.

### 参考文献

- [1] FAIST J, GMACHL C, CAPASSO F, *et al.* Distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, **70**(20): 2670-2672.
- [2] WITTMANN A, GIOVANNINI M. Room temperature, continuous wave operation of distributed feedback quantum cascade lasers with widely spaced operation frequencies[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(14): 141116.
- [3] LEE J B, BELKIN M A. Widely tunable single-mode quantum cascade laser source for mid-infrared spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(23): 231101.
- [4] KOSTEREV A, WYSOCKI G, BAKHIRKIN Y, *et al.* Application of quantum cascade lasers to trace gas analysis[J]. *Applied Physics B*, 2008, **90**(2): 165-176.
- [5] CONG Meng-long, LI Li, CUI Yan-song, *et al.* Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(7): 1633-1634.  
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.
- [6] ZXYX Colorado [EB/OL]. [2014-06-20]. <http://www.directedenergy.com/>
- [7] RAWLINS W T, HENSLEY J M, SONNENFROH D M, *et al.* Quantum cascade laser sensor for SO<sub>2</sub> and SO<sub>3</sub> for application to combustor exhaust streams[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(31): 6639.
- [8] MIKOLAJCZYK J, NIEDBALA R, WESOŁOWSKI M, *et al.* An integrated driver for quantum cascade lasers [C]. International Society for Optics and Photonics, 2012, **8397**: 83970G.
- [9] YU Zhao-an, LÜ Tie-liang, YAO Zhi-hong, *et al.* Circuit model and simulation of pulsed quantum cascade lasers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(12): 121-125.
- [10] CHEN Chen, HUANG Jian-qiang, LÜ Mo, *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.  
陈晨, 黄渐强, 吕默, 等. 高准确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.
- [11] YANG Chun-li, JIA Hong-zhi, XIA Gui-zhen. Design for the circuit to eliminate surge of the laser diode power supply[J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(4): 310-312.  
杨春莉, 贾宏志, 夏桂珍. 半导体激光器电源防浪涌电路的设计[J]. *应用激光*, 2008, **28**(4): 310-313.
- [12] WANG Jin-ding, LIU Hong-lin, WANG Yun-cai. Novel protective circuits of diode lasers[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(2): 120.  
王金定, 刘宏林, 王云才. 新型的半导体激光器保护电路[J]. *应用激光*, 2006, **26**(2): 120-121.
- [13] 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.
- [14] CURL R F, CAPASSO F, GMACHL C, *et al.* Quantum cascade lasers in chemical physics [J]. *Chemical Physics Letters*, 2010, **487**(1): 7-9.
- [15] DANG Jing-min, ZHAI Bing, GAO Zong-li, *et al.* Nanosecond driver for multiple pulse-modulated Infrared quantum cascade laser [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.
- [16] HUANG Xiang-dong, LIU Li-feng, TAN Jiu-bin, *et al.* Design of peak detector circuit for AM capacitive displacement sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(11): 2447-2448.  
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.
- [17] ZHANG Xiu-yong, GAO Chun-qing, GAO Ming-wei, *et al.* Study of high stable LD driver for low noise DPL lasers[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 779-780.  
张秀勇, 高春清, 高明伟, 等. 用于低噪音 DPL 激光器的高稳定性 LD 驱动源的研制[J]. *光学技术*, 2007, **33**(5): 779-780.