

doi: 10.3788/gzxb20154412.1213001

室温连续中红外量子级联激光器驱动电源的研制

付丽¹, 党敬民¹, 苗春壮¹, 陈晨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 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130026)

摘 要: 为了满足中红外波长调制光谱技术中室温连续中红外量子级联激光器的驱动要求, 设计并研制了一种量子级联激光器驱动电源系统. 首先, 设计了直接数字合成模块来产生直流、锯齿波和正弦波的叠加驱动信号以调谐激光器的电流, 进而调制其输出波长; 其次, 设计了高速(约 40 ns)过流保护电路, 配合电压深度负反馈原理, 保证激光器工作的可靠性, 提高激光器电流的稳定度; 再次, 将比例-积分-微分软件算法与温度模拟控制电路相结合, 在简化电路结构的同时, 有效地控制和稳定激光器的温度, 防止因温度变化造成激光器输出波长的漂移和发光功率的波动. 利用该驱动电源系统对中科院半导体所研制的中心波长为 4.76 μm 的量子级联激光器做驱动测试, 结果表明: 驱动电源系统电流调节的线性度为 0.0068%, 驱动电源的长期(240 h)电流稳定度为 4.99×10^{-5} , 量子级联激光器的光强稳定度为 5.07×10^{-4} , 控温稳定性为 0.01 $^{\circ}\text{C}$, 温度稳定时间为 17 s; 当量子级联激光器的驱动电流为 330 mA, 温度为 21 $^{\circ}\text{C}$ 时, 在 240h 内峰值波长的漂移为 $\pm 0.02\text{nm}$.

关键词: 光电子学; 中红外; 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)12-1213001-8

Development of Driver for Room-temperature Continuous Mid-infrared Quantum Cascade Laser

FU Li¹, DANG Jing-min¹, MIAO Chun-zhuang¹, CHEN Chen²,
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 College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: In order to satisfy the capability of driving room-temperature continuous mid-infrared quantum cascade laser based on the mid-infrared wavelength modulation spectroscopy, a novel quantum cascade laser driver was designed and implemented under experimental evaluation. Firstly, a direct-current, a repetitive ramp and a sinusoid were generated to tune drive current and to produce a modulation in the wavelength of quantum cascade lasers via a function generation module. Secondly, a comprehensive and high-speed (the response time is about 40 ns) over-current protective circuit was developed in conjunction with the deep voltage negative-feedback theory, which guaranteed the laser operation reliability and improved the stability of drive current. Again, a complete temperature analog control circuit and a proportional-integral-differential software algorithm were combined to simplify the circuit structure and to control and stabilize the laser temperature effectively, which prevented the drift of the laser output

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

第一作者: 付丽(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为红外气体检测系统. Email: 1151029954@qq.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: 2015-07-14; **录用日期:** 2015-09-14

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

wavelength and the fluctuations of the emission power caused by the temperature change. Via the use of the driver, driving tests were carried out on a mid-infrared quantum cascade laser with center wavelength at $4.76 \mu\text{m}$, which was fabricated by institute of semiconductors, Chinese Academy of Sciences. Experimental results demonstrated that current regulation linearity of the drive power system is 0.0068% , the stability of drive current during long time (240 h) is 4.99×10^{-5} , the stability of light power is 5.07×10^{-4} , the temperature stability is 0.01°C and the stable control process is 17s, the drift of wavelength at peak within 240 h is $\pm 0.02 \text{ nm}$ when drive current of the quantum cascade lasers is 330 mA and the temperature is 21°C .

Key words: Optoelectronics; Mid-infrared; Quantum cascade lasers; Power; Drive circuits

OCIS Codes: 130.0250; 140.3070; 140.3570; 300.6170

0 引言

痕量气体检测技术已经被广泛应用于大气中的温室气体检测, 环境污染气体检测等领域^[1]. 波长调制光谱(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)技术是一种被广为使用的高灵敏度气体检测方法, 该方法可极大地提高信噪比, 与直接吸收光谱法相比, 检测灵敏度高出两个数量级以上^[2]. 由于多数痕量气体在中红外波段具有较强的吸收峰, 因此可采用 WMS 技术在中红外波段对痕量气体进行检测. 工作于中红外波段的量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)以其输出光功率高(mW 量级)、线宽窄等优点成为中红外波段的理想光源, 广泛应用于痕量气体检测系统中^[3-4]. 由于激光器的发光特性与气体检测限、系统灵敏度以及系统稳定性等指标密切相关^[5], 故研制高性能的驱动电源系统对于保证 QCL 稳定高效地工作和改善痕量气体检测系统的性能指标, 具有十分重要的意义.

当前国内外研制的商用 QCL 激光器驱动电源性能优异, 驱动电流调节范围宽(几毫安至几安培)、调制带宽高(数兆赫兹)、具有直观方便的人机交互界面及电脑远程控制接口^[6], 但缺点是体积大, 成本高, 不利于便携式气体检测系统的小型化集成. 近些年, 研究机构对 WMS 技术和驱动电源系统进行了广泛深入的研究. 2008 年, 美国艾德菲大学的 Andreas Karpf 等使用压电换能器和步进电机作为驱动电源系统, 结合三角波信号和高频正弦波信号, 实现了对外腔连续 QCL 频率的调制^[1]. 2013 年, 斯坦福大学的 K Sun 等采用 PC 机控制同步采样多功能数据采集卡(NI PCI-6110)输出 25Hz 的锯齿波信号和 10KHz 的正弦波信号, 两种信号同时作用于激光器控制器(ILX Lightware LD-3900), 从而实现了可对调谐二极管激光器输出波长的调制^[7]. 2010 年, 中国科学技术大学的赵建华等使用二进制计数器、程控衰减器、模数转换器和 NLD0531BPQ 芯片等构成驱动电源系统, 不仅能够稳定地调节分布式反馈激光器的温度, 而且实现了对激光器电流的调谐处理^[8]. 与价格昂贵的商用产品相比, 这些研究机构研制的驱动电源系统虽然成本更低, 但

有些系统的驱动对象并不是中红外 QCL. 相对于常规半导体激光器的驱动电源, 中红外 QCL 对驱动电源的电流稳定性和线性度要求更高^[9], 需要具有极快响应特性的保护电路以保证激光器稳定工作^[14]. 同时, 系统的某些元件相对独立, 体积较大, 使系统单板整合变得十分困难, 不利于便携式气体检测系统的集成.

本文研制了一种针对中红外 QCL 的“板级”驱动电源系统, 在满足激光器驱动要求的前提下, 充分简化了驱动电源系统的电路结构, 进一步缩小了系统的体积, 显著地降低了成本, 有利于便携式气体检测系统的集成, 且系统操作简单、安全可靠、实用性强.

1 系统原理

WMS 技术与传统的直接吸收光谱法相比, 在激光器锯齿波扫描驱动电流中额外加入了高频正弦波电流信号, 实现了对激光器波长和强度的高频调制^[10]. 以中红外 QCL 为核心元件的气体检测系统原理如图 1. 其中, 作为 QCL 的主控器, 驱动电源系统不仅可以产生直流、锯齿波和正弦波的叠加驱动信号以调谐 QCL 的电流和输出波长, 而且可以精确控制 QCL 的温度, 使其激光波长与气体吸收线相对应. 经过驱动电源系统的调控, QCL 输出相应波长的激光光束, 该光束由 L_1 (BF_2 分光镜) 分成两部分. 一部分光束进入参考通道, 另一部分光束进入主通道, 由 L_2 (反射物镜) 反射入气室中. 由于气体吸收特性, 气室输出的光束光强发生变化, 该光束与参考通道光束一同被探测器检测. 锁相放大器隔离出探测器信号中的一次谐波和二次谐波成分, 该谐波成分与气体光谱吸收特性相结合, 可获得待测气体的相关信息(如浓度、压力等)^[10].

QCL 的驱动电源系统(Mid-infrared quantum cascade laser driver)原理如图 1 中虚线框内所示, 该驱动电源系统主要由直接数字合成(Function generation)模块、恒流源(Constant current source)模块、电流检测和控制(Current detection and controlling)模块、显示(Display)模块、微处理器(Micro Control Unit, MCU)和温度控制(Temperature controlling)模块等构成. 线性稳压慢启动(Linear regulating and slow starting)模块不仅为驱动电源系统

中的激光器回路提供稳定的电源供应,而且可有效消除上电过程的浪涌冲击和尖峰干扰.微控制器(Micro Control Unit, MCU)控制直接数字合成(Function generation)模块产生叠加的驱动信号,该信号直接控制恒流源(Constant current source)模块以调谐激光器的电流,从而实现对激光器输出波长的调制.同时,温度控制(Temperature controlling)模块可以稳定地调节 QCL 的温度,使其达到预先设定的目标温度.实时电流检测控制(Current detection and controlling)模块对

QCL 的电流进行调理,并经模数转换器(Analog/Digital Converter, ADC)转换后送 MCU 进一步监测与控制,使 QCL 的电流更加稳定.过流保护(Over-current protection)模块根据激光器的工作电流与设定的最大电流的对比状态控制激光器的工作状况.当激光器的电流高于最大工作电流时,过流保护模块快速切断恒流源回路,从而保护激光器免受损坏.显示(Display)模块根据 MCU 调控的驱动电流参量和温度控制参量,实现对当前 QCL 电流和温度的实时显示.

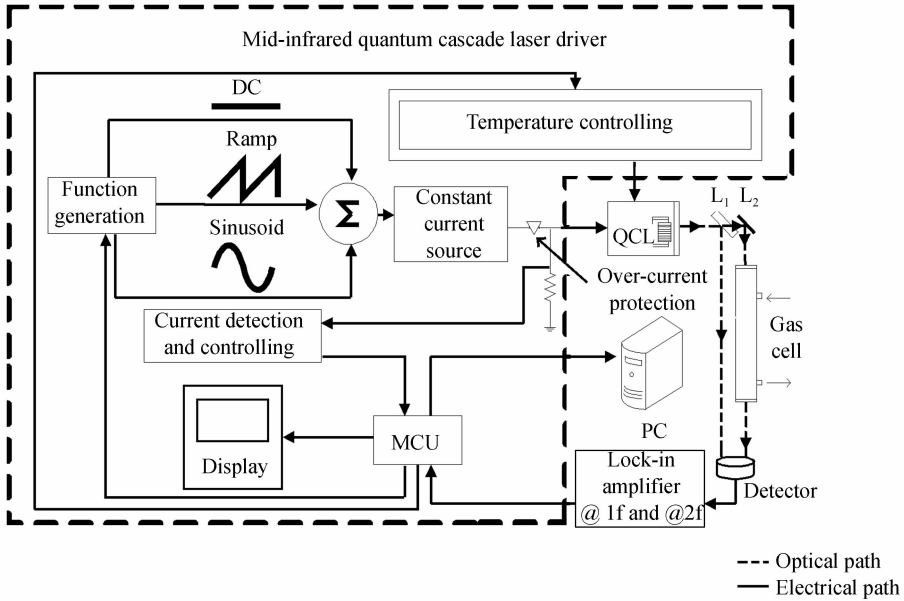


图 1 以中红外 QCL 为核心元件的气体检测系统原理图
Fig. 1 Schematic of the gas detection system using mid-infrared QCL

2 系统实现

2.1 线性稳压慢启动模块

线性稳压慢启动模块不仅为激光器回路提供稳定的电源供应,而且可防止上电过程中的瞬时电压突变和尖峰干扰,保护激光器免受致命性损坏,其原理如图 2(a).

220 V 交流电压首先通过变压器 T_1 处理和全波整流后,成为了脉动的直流电压.然后,经 C_0 、 C_1 电容滤波去除高频干扰成分,最后,由正向可调稳压器(Positive adjustable regulator)结合外电路进行稳压调节处理,可进一步减小纹波,获得稳定可调的直流电压.

为了防止上电过程中的浪涌冲击,保证电路安全稳定地运行,本模块引入了压敏电阻(R_0)^[11]、熔断器(F_1 、 F_2)、瞬态电压抑制器(Transient Voltage Suppressor, TVS)^[12]和慢启动单元^[13].压敏电阻和 TVS 能够迅速地吸收电路内部或外部的浪涌电压和电流,且 TVS 的响应速度极快(达到 10^{-12} s 量级),可以有效地保护电路免受浪涌的破坏. F_1 、 F_2 为电流型

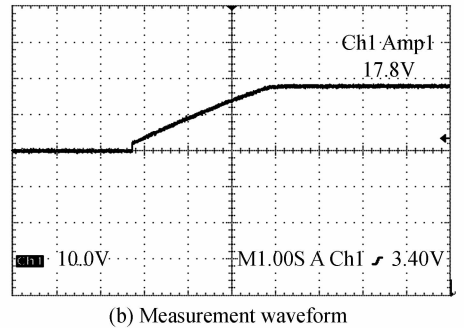
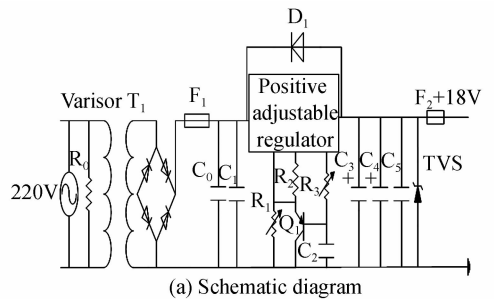


图 2 线性稳压慢启动模块原理图及其启动波形
Fig. 2 Schematic and measurement waveform of linear regulating and slow starting module

保护器件,当电路发生短路或过流时,其产生热量使自身熔断以保护后续的元器件.慢启动单元的具体工作原理为:最初,由于电容 C_2 的电压不能突变,故其初始电压为零,且电阻 R_2 两端存在一定的电压值,使三极管 Q_1 导通,稳压电路的初始输出电压约为 1.25V ;其次,随着时间的推移,电容 C_2 不断充电,三极管 Q_1 逐渐从饱和区退出,使稳压电路的输出电压不断增大,这段启动时间可由 C_2 和 R_3 的大小决定;最后,当 C_2 充电完毕, Q_1 则完全截止,稳压电路的输出电压趋于稳定,该电压值可由 R_1 的阻值决定.为了使恒流源中的金属-氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)散热良好,稳压电路的输出电压调整为 18V .上电后,慢启动单元的具体过程曲线如图 2(b)所示.

2.2 电流调谐模块

电流调谐模块主要由直接数字合成模块和恒流源模块组成,是驱动电源的重要组成部分,其原理如图 3.本模块采用 ATMEL 公司的高性能、低功耗的 8 位 AVR 微处理器 ATmega 16 作为 MCU 的主控芯片,其功能主要有:1)控制直接数字式频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)产生幅度、频率可调的正弦波,作为高频调制信号;2)控制数模转换器(Digital/Analog Converter, DAC)产生幅值、频率可调的锯齿波,作为慢扫描信号;3)控制另一数模转换器(Digital/Analog Converter, DAC)产生高稳定的直流电压信号.

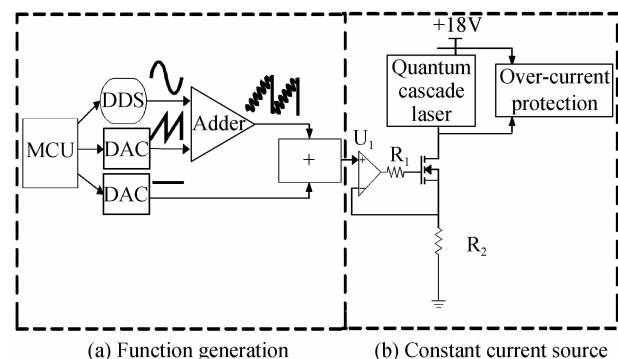


图 3 电流调谐模块原理图

Fig. 3 Schematic of the current tuning module

2.2.1 直接数字合成模块

直接数字合成模块由 MCU、DDS、高精度 DAC 和加法器(Adder)组成,具体原理如图 3(a)所示.一方面,根据 QCL 的驱动要求,MCU 控制 DDS 产生幅值、频率可调的高频正弦波信号,同时控制 DAC 产生幅值、频率可调的低频锯齿波信号.另一方面,MCU 控制另一 DAC 产生高稳定、低纹波的直流电压信号.三种波形信号经两个加法器叠加后形成叠加的驱动信号,供后续电路进行处理.

2.2.2 恒流源模块

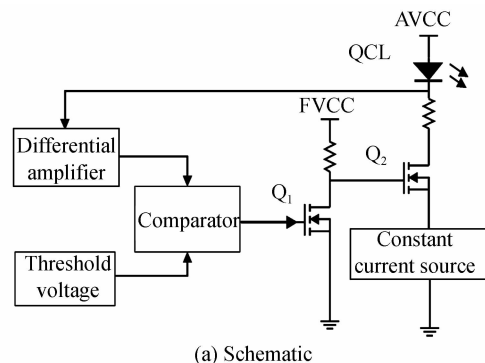
恒流源模块由运算放大器 U_1 、大功率 MOSFET 和

采样电阻 R_2 等组成,原理如图 3(b)所示.一方面,根据直接数字合成模块产生的叠加驱动信号,相应地调谐 QCL 的电流和输出波长.另一方面,通过闭环调控方式,使 QCL 的电流趋于恒定,达到预先设定的驱动电流值.其具体的工作过程为:采样电阻将激光器的电流转换为电压,该电压被输入到运算放大器 U_2 的反相端,与同相端的输入电压(叠加的驱动信号)进行比较,运算放大器 U_2 将两者的误差电压放大后对大功率 MOSFET 的栅极进行控制,进而调整 MOSFET 的内阻,实现对激光器电流和输出波长的调谐处理.根据电压深度负反馈原理,恒流源模块使激光器的电流调节处于动态平衡中,达到了闭环稳定控制和电流“恒定”的目的.

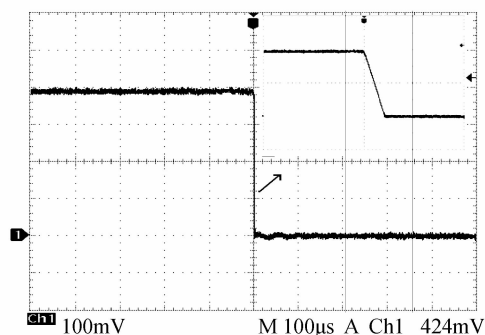
运算放大器 U_2 直接作用于 MOSFET 时,可能会出现尖峰或震荡,从而减小带宽,增加功耗.在 U_2 和 MOSFET 之间增加电阻 R_1 可显著改善电路的相关性能.实验中应合理选择电阻 R_1 的阻值,提高 MOSFET 的导通速度.并尽量缩短恒流源闭环回路的走线,降低寄生电容、电感的影响,使系统响应速度和稳定性达到最优^[14].

2.3 过流保护模块

中红外 QCL 对电流过击的承受能力较差.当激光器的电流大于最大工作电流时,激光器的温度会急剧升高^[15],QCL 会受到不同程度的破坏.故有必要设计高速过流保护电路保证激光器安全稳定地运行.过流保护模块的原理如图 4(a)所示.



(a) Schematic



(b) Measurement waveform

图 4 过流保护模块原理图及响应曲线

Fig. 4 Schematic of the over-current protection module and measurement waveform

激光器的电流经由过流采样电阻转换成电压,该电压通过差分放大器放大一定倍数后被输入到比较器中,根据设定的最大工作电压(最大工作电流经处理后转换成最大工作电压),比较器输出高电平(3.5 V)或低电平(0.2 V),该电平用于控制“浮地”驱动^[16]部分。“浮地”驱动部分由两个 MOSFET 组成,当激光器的电流低于或等于设定的最大工作电流时,比较器输出低电平, Q_1 截止, Q_2 导通,QCL 正常工作,当激光器的电流高于最大工作电流时,比较器输出高电平, Q_1 导通, Q_2 截止,过流保护模块快速关断激光器恒流源回路,从而保护激光器免受损坏。

依据中红外 QCL 的等效电路模型^[17]和激光器的伏安特性测量曲线,以 $9\ \Omega$ 功率电阻作为激光器在电路中的串联电阻(假负载),过流采样电阻为 $1\ \Omega$ 。实验中采用直流驱动信号单独作用于恒流源,设定 QCL 的最大工作电流为 400 mA,从 0 mA 开始逐渐增加恒流源的驱动电流幅值,对过流采样电阻电压进行测试,实验结果显示,当驱动电流幅值低于或等于 400 mA 时,恒流源的驱动电流与设定的电流基本一致,恒流源正常工作,当驱动电流幅值高于 400 mA 时,恒流源的驱动电流迅速降为 0 mA 左右,响应时间为 43.45 ns,可以有效地保护激光器免受过流损坏,具体过程如图 4(b) 所示。

2.4 高精度电流检测控制模块

电流检测控制模块由缓冲器、高精度运放模块和高精度 ADC 等组成,其信号处理过程如图 5。

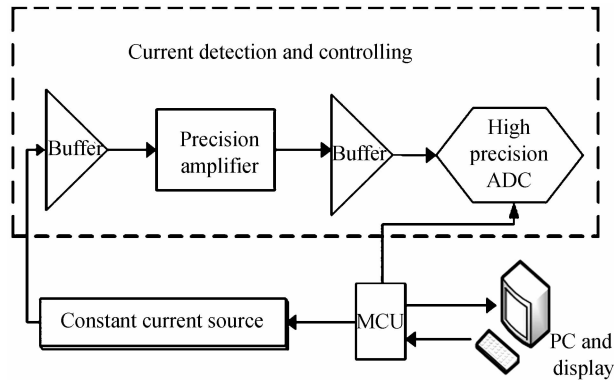


图 5 信号处理过程

Fig. 5 Schematic of signal processing

两个缓冲器起缓冲隔离作用,使前后级电路互不影响,同时消除互扰,增加采样和检测的准确度。恒流源中的采样电阻将电流信息转换成电压信号,该电压信号经缓冲器隔离后,被高精度运放模块放大,并经高精度 ADC 采集量化后由显示模块实时显示。另一方面,根据获得的电流信息,MCU 实时快速地调节恒流源的控制电压,使激光器的电流和设定的驱动电流趋于一致。

2.5 温度控制模块

温度变化可造成激光器中心波长的漂移、输出光功率波动等^[18],这不仅会导致激光器性能严重下降,而且会显著地降低系统的灵敏度和稳定性,因此设计完善的温度控制模块对于保证激光器的稳定运行和改善气体检测系统的性能指标是十分必要的,本驱动电源系统将数字比例-积分-微分(Proportional-Integral-Differential, PID)算法与模拟控制电路相结合,形成了完备的温度控制模块,该模块在极大地简化了电路结构的同时,有效地控制和稳定了激光器的工作温度,其具体的原理如图 6。

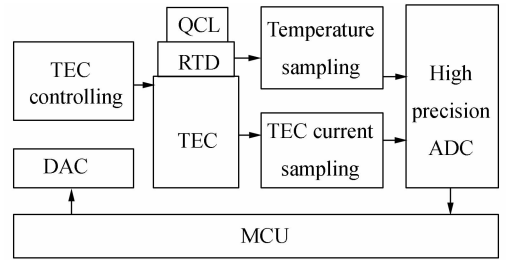


图 6 温度控制模块原理

Fig. 6 Schematic of the temperature controlling module

温度控制模块的工作过程为:温度采样单元和半导体制冷器(Thermo Electric Cooler, TEC)电流采样单元分别收集处理电阻温度探测器(Resistance Temperature Detector, RTD)上的电信号和 TEC 上的电流信号,并将两种信号送入高精度 ADC 进行采样量化,获得与 QCL 的温度和 TEC 的电流对应的数字信号,该数字信号被 MCU 进一步处理后,被转化成 QCL 的实时温度信息和流经 TEC 的电流信息,一方面,依据设定的温度和实时温度之间的差值,MCU 采用 PID 算法调控 DAC 的数字控制量,使 DAC 产生对应的控制电压信号,该电压信号调控 TEC 控制单元以相应地改变 TEC 电流的大小和方向,TEC 根据流经的电流信息对激光器进行相应的加热和制冷处理,并实时地调整控温的速率,从而使激光器的温度和设定的温度趋于一致,如图 6, QCL 的温度处于闭环的动态调节中,达到了实时稳定和控制的目的是。另一方面,当 TEC 的电流超过规定的最大电流时,MCU 迅速调控 DAC 的控制电压信号以关断 TEC 控制单元,从而有效地保护 TEC 和 QCL 免受损坏。

为了使 QCL 的激光波长与 CO 气体的吸收峰相对应,设定的激光器的目标温度为 $21.166\ ^\circ\text{C}$ 。图 7 为激光器的温度随时间变化的曲线,从图中可以看出,激光器初始温度为 $25\ ^\circ\text{C}$,温度控制模块的稳定时间较短,从 0 时刻启动到激光器的温度稳定所需的时间为 17 s,温度波动范围为 $0.01\ ^\circ\text{C}$,可得驱动电源的控温稳定性为 $0.01\ ^\circ\text{C}$,激光器的实时温度与设定的温度基本

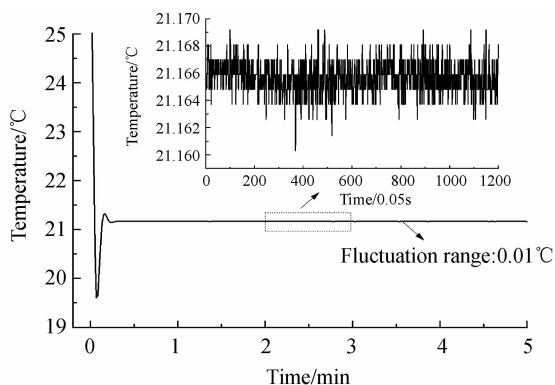


图7 QCL 的温度随时间的变化曲线

Fig. 7 Variation of the temperature of QCL with the increase of time

一致,满足了温度控制模块的设计要求。

3 系统测试

采用中科院半导体所研制的中心波长为 $4.76 \mu\text{m}$ 的中红外 QCL 对驱动电源系统进行测试. QCL 的主要性能参量如表 1, 驱动电源的驱动参量如表 2, 叠加的驱动信号的波形如图 8.

表 1 中红外量子级联激光器的主要性能参量

Table 1 Parameters of mid-infrared quantum cascade laser

Mid-infrared QCL parameters	Wave number / cm^{-1}	Threshold current/mA	Frequency of ramp scanning signal/Hz	Frequency of sinusoid modulation signal/kHz
Value	2100.8	300	10	5

表 2 中红外量子级联激光器的驱动参量

Table 2 Drive parameters of mid-infrared quantum cascade laser

Mid-infrared QCL drive parameters	Drive current /mA	Forward bias voltage/V	Frequency of ramp scanning signal/Hz	Frequency of sinusoid modulation signal/kHz
Value	0-370	18	10	5

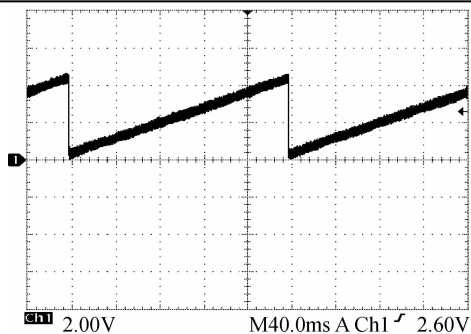


图 8 QCL 叠加驱动信号的波形

Fig. 8 The waveform of superimposed drive signal of QCL.

3.1 激光器光功率和伏安特性测量

在波长调制光谱技术中,激光器的发光功率与痕量气体的检测灵敏度密切相关^[5],故有必要测量激光器的光功率,以便衡量 QCL 的发光特性并改善痕量气体的检测灵敏度. QCL 的伏安特性反映了激光器的工作状

态,是激光器最基本的测量参量. 所测量的 QCL 的光功率和伏安特性测量曲线如图 9. 从图中可以看出,激光器的阈值电流为 315 mA,当驱动电流达到 370 mA 时,激光器的发光功率可达 32.5 mW. 当驱动电流在 315~370 mA 范围内时,驱动电流与激光器的光功率近似呈线性关系. 另外,由图中的伏安特性曲线可得,激光器的等效电阻约为 9Ω .

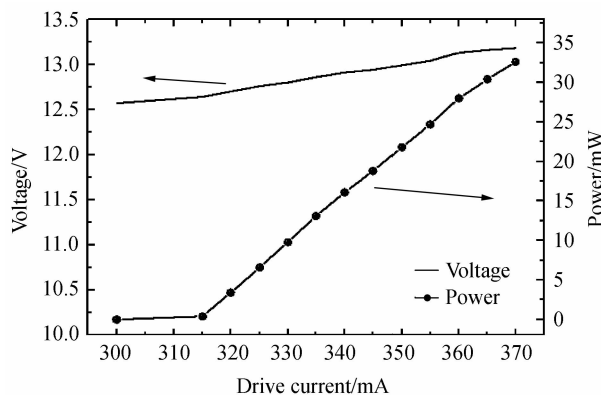


图 9 QCL 的光功率和伏安特性测量曲线

Fig. 9 Voltage versus drive current characteristic and Peak optical output power versus drive current

3.2 激光器发光光谱测量和峰值波长随时间漂移测量

在痕量气体检测技术中,当使用连续波长的激光扫描被测气体的吸收线时,气体将吸收特定波长的激光能量. 记录整个扫描过程中的激光光强变化即可得到气体的吸收光谱,从而获得气体的相关信息(如浓度、压力等)^[3],因此有必要测量激光器的发光光谱,使被测气体的吸收峰值与激光器的发光峰位(特定波数处)有效匹配. 针对 CO 痕量气体的检测,实验中采用驱动电源系统调节激光器的电流和温度,并结合傅里叶光谱仪测得 QCL 的发光光谱如图 10. 同时,保持 QCL 的驱动电流为 330 mA,温度为 21°C ,此时的峰值波长为 4763.493 nm ,实验测得的峰值波长随时间变化的曲线如图 11.

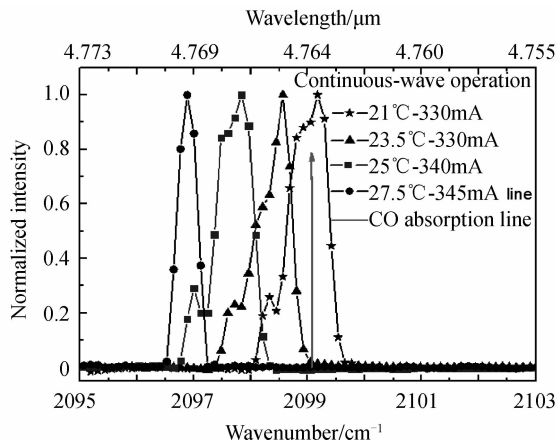


图 10 QCL 发光光谱图

Fig. 10 Emission spectra of QCL

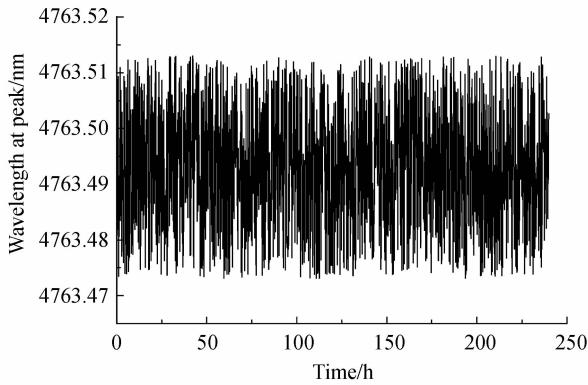


图 11 峰值波长随时间变化曲线

Fig. 11 Variation of wavelength at peak with the increase of time

随着驱动电流和温度的改变,激光器的发光峰位对应的波数在 $2\ 096.8\sim 2\ 099.4\ \text{cm}^{-1}$ 范围内变化.当驱动电流一定时,随着 QCL 温度的升高,激光器的发光峰位对应地红移.当驱动电流设定为 330 mA,温度设定为 $21\ ^\circ\text{C}$ 时,激光器的发光峰位与 CO 痕量气体吸收峰较为接近.此时,保持驱动电流不变,逐渐升高 QCL 的温度,可以发现,当温度设定为 $21.166\ ^\circ\text{C}$ 时,激光器的发光峰位与 CO 痕量气体吸收峰有效匹配.从图 12 可看出,当 QCL 驱动电流为 330 mA,温度为 $21\ ^\circ\text{C}$ 时,在 24 h 内峰值波长的漂移为 $\pm 0.02\ \text{nm}$.

3.3 驱动电源电流调节的线性度测量

在规定条件下,驱动电流测量的最大偏差和满量程输出的百分比称为线性度^[14],它是衡量驱动电源系统性能的一项关键指标.当设定恒流源的控制电压时,激光器的电流经采样电阻、高精度电流检测控制模块和 MCU 处理后,在 PC 机和显示模块上得以存储和显示.实验中,逐渐改变恒流源的控制电压,并观测相应的激光器的电流值.将两者进行比照,所得恒流源控制电压与驱动电流的关系曲线见图 12.

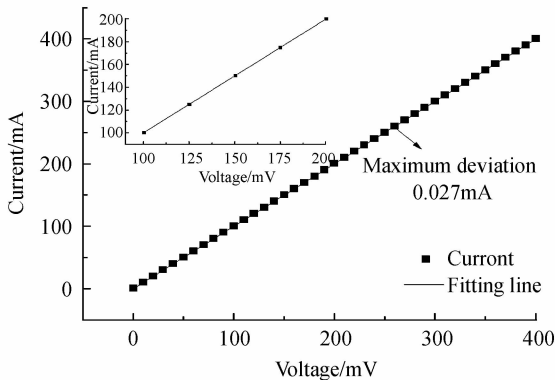


图 12 驱动电流随恒流源控制电压的变化曲线

Fig. 12 Variation of drive current with the increase of control voltage of the constant current source

实验表明,驱动电流在 $0\sim 400\ \text{mA}$ 时,电流测量曲线与拟合曲线的最大偏差为 $0.027\ \text{mA}$,可计算出驱

动电源电流调节的线性度为 0.0068% .

3.4 驱动电源长期电流稳定度测量和 QCL 光强稳定性测量

驱动电流值与校准电流值之间的偏差,和驱动电流平均值的比值称为驱动电流的稳定度.输出光强与校准值之间的偏差,和输出光强平均值的比值称为光强的稳定度^[20].

$9\ \Omega$ 功率电阻作为激光器的假负载,进行了系统长期的稳定度测量(240 h).实验中设定的驱动电流为 $200.04\ \text{mA}$,采样后的驱动电流数据经 PC 机存储处理,获得的电流稳定性结果如图 13.设定驱动电流为 $350.04\ \text{mA}$,温度为 $21.166\ ^\circ\text{C}$,采用光功率计测量 QCL 的光强,获得的光强稳定性结果如图 14.

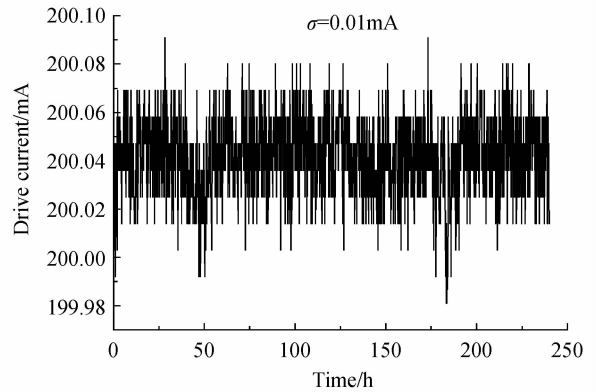


图 13 驱动电流的长期稳定性曲线

Fig. 13 Long-term stability of drive current

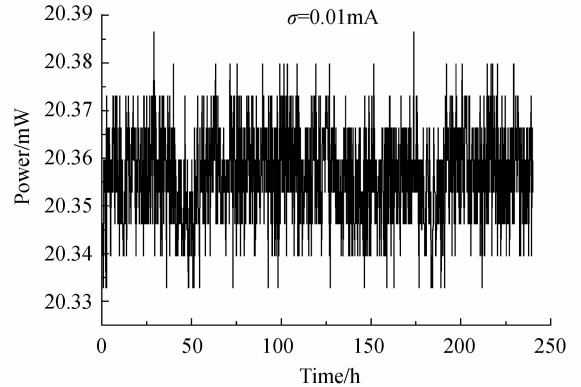


图 14 光强的长期稳定性曲线

Fig. 14 Long-term stability of light power

从驱动电流和 QCL 光强的数据中可以计算出,驱动电流的标准差为 $0.01\ \text{mA}$,平均值为 $200.041\ \text{mA}$,光强的标准差为 $0.01\ \text{mW}$,平均值为 $20.356\ \text{mW}$,从而可得出驱动电流长期稳定度为 4.99×10^{-5} ,QCL 光强的稳定度为 5.07×10^{-4} .

4 结论

本文依据波长调制光谱技术研制了一款室温连续中红外量子级联激光器驱动电源系统.实验表明,其产生的叠加驱动信号波形稳定,驱动电源电流调节的线

性度为 0.0068%，电流长期稳定度为 4.99×10^{-5} ，QCL 光强稳定度为 5.07×10^{-4} ，温度稳定时间为 17 s，控温稳定性为 0.01°C ，当 QCL 的驱动电流为 330 mA，温度为 21°C 时，在 240 h 内峰值波长的漂移为 $\pm 0.02 \text{ nm}$ ，满足波长调制光谱技术中 QCL 的驱动要求。驱动电源系统操作安全可靠，实用性强，且体积小，成本低，在便携式痕量气体检测系统中具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] KARP F A, RAO G N. Absorption and wavelength modulation spectroscopy of NO_2 using a tunable, external cavity continuous wave quantum cascade laser[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(2):408-413.
- [2] DUFFIN K, MCGETTRICK A J, JOHNSTONE W, *et al.* Tunable diode-laser spectroscopy with wavelength modulation: a calibration-free approach to the recovery of absolute gas absorption line shapes[J]. *Lightwave Technology*, 2007, **25**(10):3114-3125.
- [3] NELSON D D, SHORTER J H, MCMANUS J B, *et al.* Sub-part-per-billion detection of nitric oxide in air using a thermoelectrically cooled mid-infrared quantum cascade laser spectrometer[J]. *Applied Physics B*, 2002, **75**(2-3):343-350.
- [4] MOESKOPS B W M, CRISTESCU S M, HARREN F J M. Sub-part-per-billion monitoring of nitric oxide by use of wavelength modulation spectroscopy in combination with a thermoelectrically cooled, continuous-wave quantum cascade laser[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(6):823-825.
- [5] 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.
- [6] ZXYS Colorado [EB/OL]. [2015-7-10] <http://www.directedenergy.com/>
- [7] SUN K, CHAO X, SUR R, *et al.* Analysis of calibration-free wavelength-scanned wavelength modulation spectroscopy for practical gas sensing using tunable diode lasers [J]. *Measurement and Science and Technology*, 2013, **24**(12):1-12.
- [8] ZHAO Jian-hua, GAO Ming-liang, WU Xiu-juan. Design of laser controller for the technology of wavelength modulation spectroscopy[J]. *Laser&Infrared*, 2010, **40**(5):537-541.
赵建华, 高明亮, 武秀娟. 波长调制光谱技术中的激光控制器设计[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(5):537-541.
- [9] 李祥. 基于量子级联激光器微量气体检测系统的设计[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
- [10] RIEKER G B, JEFFRIES J B, HANSON R K. Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(29):5546-5560.
- [11] SU Yuan-bin, SUN Li-tan, YANG Zhi-jian, *et al.* Progress in research of low voltage varistor[J]. *Electronic Components and Materials*, 2010, **29**(6):74-78.
宿元斌, 孙丽昙, 杨志坚, 等. 低压压敏电阻的研究进展[J]. *电子元件与材料*, 2010, **29**(6):74-78.
- [12] YANG Chun-bin, 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):310-312.
- [13] WANG Jin-ding, LIU Hong-lin, WANG Yun-cai. Novel protective circuits of diode lasers[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(2):120-121.
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.
- [14] DANG Jing-min, FU Li, HE Qi-xin, *et al.* Development of pulse-mode driver for distributed-feedback quantum cascade laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2):0214001.
党敬民, 付丽, 何启欣, 等. 分布反馈量子级联激光器脉冲驱动电源的研制[J]. *光子学报*, 2015, **44**(2):0214001.
- [15] CURL R F, CAPASSO F, GMACHL C, *et al.* Quantum cascade lasers in chemical physics [J]. *Chemical Physics Letters*, 2010, **487**(1):7-9.
- [16] 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外量子级联激光器驱动电源[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(9):2209-2216.
- [17] LIU Tan-ping, WANG Zhao-ba. High-power semiconductor laser equivalent circuit model with parasitic parameter[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2014, **35**(6):750-756.
刘谈平, 王召巴. 包含寄生参量的大功率半导体激光器等效电路模型[J]. *中北大学学报:自然科学版*, 2014, **35**(6):750-756.
- [18] HUANG Jian-qiang, ZHAI Bing, HE Qi-xin, *et al.* A board-level temperature controller for near-infrared semiconductor laser used in humidity detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6):0614003.
黄渐强, 翟冰, 何启欣, 等. 用于水汽检测的近红外半导体激光器板级温控系统 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(6):0614003.
- [19] DU Bao-qiang. The linearity of an experimental curve[J]. *Instrumentation and Measurement*, 2004, **23**(9):72-80.
杜保强. 实验曲线的线性度研究[J]. *仪器仪表与检测技术*, 2014, **23**(9):72-80.
- [20] LU Kai, LIU Bai-yu, BAI Yong-lin, *et al.* High power laser diode drive power supply [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(10):2680-2684.
卢凯, 刘白玉, 白永林, 等. 大功率半导体激光器驱动电源的设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(10):2680-2684.
- [21] 卢凯. 大功率半导体激光器驱动电源设计[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2012.

Foundation item: The National Key Technology Research and Development Program of China (Nos. 2013BAK06B04, 2014BAD08B03), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 11404129, 61307124), the Science and Technology Development Plan of Jilin Province of China (No. 20140307014SF), the Science and Technology Development Plan of Changchun Bureau (Nos. 11GH01, 14KG022), and the Opened Fund of State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics (No. IOSKL2012ZZ12)