

半导体激光器驱动电路设计及环路噪声抑制分析

吴 涛^{1,2}, 庞 涛^{1*}, 汤玉泉^{1,3}, 孙鹏帅¹, 张志荣^{1,4}, 徐启铭⁵

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026;
3. 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东广州 510610;
4. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031;
5. 台湾云林科技大学 环境安全工程系, 台湾云林 64002)

摘 要: 为了防止驱动电流的波动会影响半导体激光器激励波长及发光功率,设计了一款具有较强抗干扰能力的半导体激光器驱动电路。该驱动电路以深度负反馈架构为核心,通过 STM32 控制器调节输出电流直流信号的大小以及调制波信号的频率与幅值。对整个环路进行一阶人工分析,并且结合 Tina-TI 仿真引入参数可调的噪声抑制网络,保证目标设置频率下环路响应能力的同时具有较强的抗干扰能力。实验表明,该激光器电流驱动电路对目标频率 10 倍频程以上环路噪声的抑制可达到 20 dB 以上,并且对目标频率的调制波响应良好,频率的输出值与设定值最大偏差为 0.001 Hz,控制线性度为 0.999 9,直流偏置下驱动电流 2 h 短期稳定度优于 0.005 6%,63 h 长期稳定度优于 0.011%,激光器功率控制线性度为 0.999 4,标准误差为 0.092 87。

关键词: 半导体激光器; 噪声抑制网络; 多种波形调制; 一阶人工分析; Tina-TI 仿真
中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190386

Design of semiconductor laser driver circuit and analysis of loop noise -suppression

Wu Tao^{1,2}, Pang Tao^{1*}, Tang Yuquan^{1,3}, Sun Pengshuai¹, Zhang Zhirong^{1,4}, Xu Qiming⁵

- (1. Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Reliability Physics and Application Technology of Electronic Component Laboratory, Guangzhou 510610, China;
4. Key Lab of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
5. Department of Safety Health and Environmental Engineering, Yunlin University of Science and Technology, Yunlin 64002, China)

收稿日期:2020-03-01; 修订日期:2020-04-15

基金项目:国家自然科学基金(11874364,41877311,41775128);中国科学院对外合作重点项目支持(GJHZ1726);安徽省重点研究与开发计划项目(201904c03020005);安徽省科技重大专项(18030901054);中国科学院科技网络服务计划(KFJ-STC-SCYD-123);电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室开放基金课题(ZHD201706);国家重点研发计划(2017YFC0805004)

作者简介:吴涛(1996-),男,硕士生,主要从事电子线路技术及高灵敏激光吸收光谱技术方面的研究。Email: wutaos@mail.ustc.edu.cn

导师简介:张志荣(1981-),男,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事高灵敏激光吸收光谱技术、光纤传感技术及其应用、环境光学监测技术等方面的研究。Email: zhangzr@aiofm.ac.cn

Abstract: In order to prevent the fluctuation of driving current from affecting the laser excitation wavelength and luminous power, a sinusoidal modulation driving circuit of semiconductor laser with strong anti-interference ability was designed. The driving circuit takes the deep negative feedback architecture as the core, and sends control instructions by serial port. Through STM32 controller, the magnitude of dc signal in the setting voltage as well as the frequency and amplitude of sinusoidal signal were adjusted. First-order manual analysis of the whole loop was carried out, and a noise suppression network with automatically adjustable parameters was introduced by Tina-TI simulation. Experimental results show that the current driving circuit of the laser can suppress the loop noise of more than 10 times the target frequency by more than 20 dB. The maximum deviation between the output value of the frequency and the set value is 0.001 Hz, and the control linearity is 0.999 9. The short-term stability of the 2 hour driving current under dc bias is better than 0.005 6%, and the long-term stability is up to 0.011% at 63 hours. The control linearity of the laser power is 0.999 4, and the standard error is 0.092 87.

Key words: semiconductor laser; noise-suppressing network; multiwaveform modulation; first-order manual analysis; Tina-TI simulation

0 引言

半导体激光器在通信、医疗、信息处理、污染监测等诸多领域有着举足轻重的作用,因此除了对半导体激光器本身的要求外,激光器驱动电路的稳定性也至关重要^[1-5]。激光器应用场合具有多样性以及复杂性的特点,因此对激光器的电流驱动系统以及保护系统提出了更高的要求^[6-8]。为了半导体激光器优异的输出性能,既要保证其直流偏置的稳定性,又要抑制驱动电路噪声对调制波的影响,因此,对半导体激光器驱动电路噪声抑制分析及设计的研究有着十分重要的意义^[9]。

目前国外许多公司、高校以及研究所对激光器驱动的商品化研究开展较多,例如 Wavelength、ILXlight、Sarnoff、Thorlabs、Oclaro 以及 Toptica 等公司,其长时间稳定度优于 1×10^{-4} ,但大多为通用性仪器,体积较大,价格昂贵,国内研制 DFB 激光器驱动的研究院所以中科院半导体所为代表,其研制的驱动器长时间稳定度优于 7.5×10^{-4} ,但主要用于高校的科学实验以及军事用途,尚未形成商品化,国内生产驱动电源的厂商以深圳市南方联合实业有限公司为代表,长时间稳定度在仅 10^{-3} 量级,在性能上与国际主流激光器驱动仍有较大差距^[10-13]。

因此,文中将理论推导分析与 Tina-TI 仿真相结合,设计了一款成本低、安全性高、稳定性好的板级激光器驱动器,该驱动器可根据输出调制波的目标频率进行多点噪声抑制,在保证响应度的同时具有较强

的抗干扰能力,并且具有极高的直流偏置稳定度。以正弦调制为例,从理论分析、软件仿真和实验三个方面给出了调制激光器驱动电路的优化方法及依据。

1 硬件设计

1.1 系统概述

系统整体框图如图 1 所示,采用高性能的 STM32F103 为核心控制器,以 SPI 总线为通信接口,由 DAC8830 型号的 16 位高精度,低噪声数字-模拟转换器 (Digital-to-Analog Converter, DAC) 产生设置电压的直流信号,由高度集成的直接数字式频率合成器 (Direct Digital Synthesizer, DDS)AD9834 产生设置电压的调制信号,两路信号分别进行滤波后,通过加法单元进行叠加,作为自动电流控制 (Automatic Current Control, ACC) 模块的设置电压,从而使 ACC 模块输出直流叠加调制波的电流信号,驱动分布式反馈 (Distributed Feed Back, DFB) 半导体激光器,当交流分量无输出时,驱动模块工作于直流驱动模式。温度调节由实验室自行设计的温控模块实现。其中,上位机可通过 USB 转串口向下位机发送控制指令,调节 ACC 模块输出电流直流分量的大小,以及交流分量的波形、幅值和频率,并且可根据设置电压交流分量的频率自动调节噪声抑制网络的参数,从而调节环路的频率响应度。同时,模拟-数字转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 对采样电阻两端的电压进行采样,再经过核心控制器计算出恒流源支路的实际输

出电流值,并在上位机进行显示。为了保证激光器运行的安全性,设计了慢启动单元,对 ACC 模块进行延时上电,并且在激光二极管 (Laser Diode, LD) 两端反向并联肖特基二极管,防止电路产生反向电流对 LD 造成破坏。该电路采用电源分组提供,PCB 数字模拟地分布局单点接地的方式减小相互干扰。

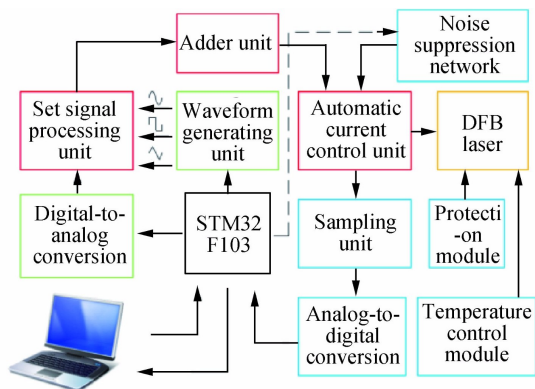


图 1 整体框图

Fig.1 Overall block diagram

1.2 自动电流控制模块

自动电流控制模块以运放和 MOSFET 为核心构成深度负反馈系统,如图 2 所示,通过采样电阻 R_{sample} 将电流值转换为电压值,该电压值作为运放 U_1 的负输入端,设置电压作为 U_1 的正输入端,通过比较器 U_1 改变 MOS 管 Q_1 的基极电压来控制 MOS 管的导通程度,从而使输出电流稳定在设定值上。其中, R_g 为 Q_1 基极的限流电阻, R_g 的存在不仅有利于后面环路的分析,也为噪声抑制网络的引入提供了接口。其中,由于设置电压的交流分量较小,而直流分量由 DAC 提供,在 0~3.3 V 之间,为了保证在 0~110 mA 内的控制精度,选用 30 Ω ,精度为 0.1%,温漂系数为 25 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 的高精度采样电阻。首先对整个环路建立小信号简化模型,如图 3 所示。

频率调节范围的设计目标为 0~50 kHz,采用带宽较宽的运放将会增加噪声抑制网络的复杂性,因此在这里采用型号为 OP07CDR 的运放,该款运放单位增益带宽为 600 kHz,压摆率为 0.3 V/ μs ,满足使用要求, MOS 管 Q_1 选取 IRF540^[14-15]。根据 OP07 的数据手册,其低频主极点 f_{pL} 为 1 Hz,高频主极点 f_{pH} 为

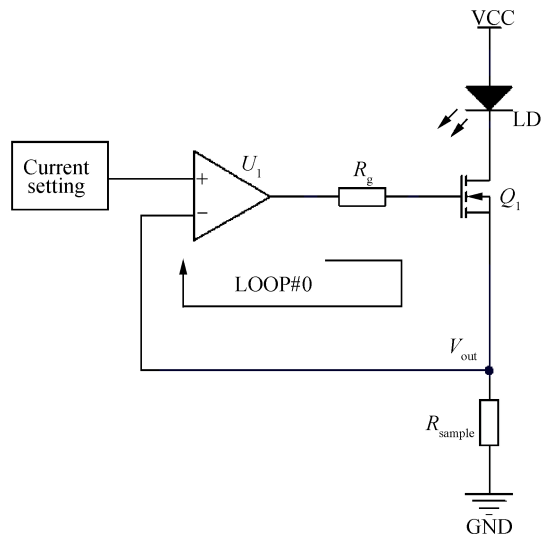


图 2 自动电流控制模块原理图

Fig.2 Schematic diagram of automatic current control module

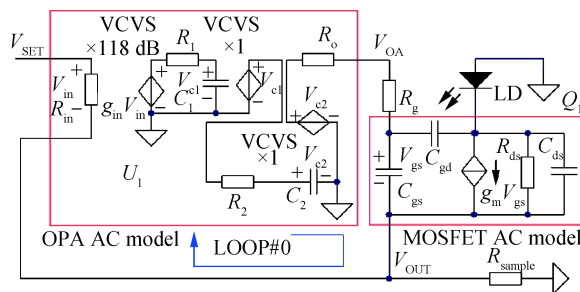


图 3 自动电流控制模块环路小信号模型

Fig.3 Loop model of automatic current control module

4 MHz 左右,开环输出电阻 R_o 为 60 Ω ,以此为 U_1 的建模依据进行建模。图 3 中, R_{in} 为运放 U_1 的输入电阻,VCVS 为电压控制电压源, C_{gs} 、 C_{gd} 、 C_{ds} 以及 R_{ds} 分别为 MOS 管 Q_1 的栅源极间电容、栅漏极间电容、漏源极间电容以及漏源极导通电阻, R_1 、 C_1 构成运放 U_1 的低频主极点 f_{pL} , R_2 、 C_2 构成 U_1 的高频主极点 f_{pH} 。由下式可得:

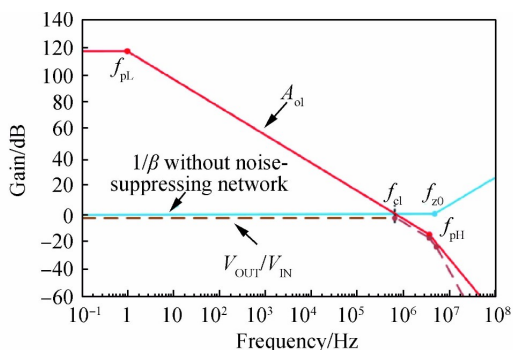
$$f_{pL} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (1)$$

$$f_{pH} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2} \quad (2)$$

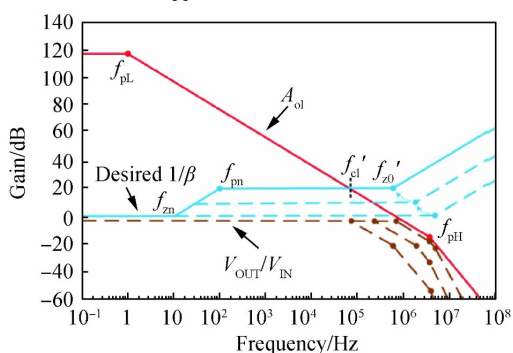
对环路 LOOP#0 进行一阶人工分析,如图 4(a)、(b) 所示。在该模块恒流源支路输出电流为几十个毫安时, Q_1 的低频互导 g_m 可取 1 s, C_{gd} 和 C_{ds} 值较小,产生的高频零极点可不考虑,因此由 MOS 管的输入电容 C_{gs} 与电阻 R_g 以及运放 U_1 的开环输出电阻 R_o 在 $1/\beta$

(环路的交流小信号闭环增益)上产生了一个高频零点(即在环路 LOOP#0 上产生了一个高频极点)。当频率小于该极点时, $1/\beta$ 大约为 0 dB(即 $\log_{10}1\text{dB}$)。当频率大于该极点时, $1/\beta$ 以 +20 dB/decade 的速度上升, 该极点根据公式 (3) 估算, 可计算出零点大约在 5 MHz。

$$f_{z0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (R_g + R_o) \cdot C_{gs}} \quad (3)$$



(a) 引入噪声抑制网络前的一阶人工分析
(a) First-order manual analysis before introducing noise suppression network



(b) 引入噪声抑制网络后的一阶人工分析
(b) First-order manual analysis after introducing noise suppression network

图 4 LOOP#0 环路一阶人工分析

Fig.4 First-order manual analysis of LOOP#0

为了增加环路的稳定性, 在环路中引入噪声抑制网络, 采用“10 倍频程经验法”在 $1/\beta$ 上引入一对零极点 f_{zn} 和 f_{pn} 。对 V_{OUT}/V_{IN} 进行推导分析得出:

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{A_{ol} \cdot \beta}{1 + A_{ol} \cdot \beta} \quad (4)$$

式中: V_{IN} 为设置电压; V_{OUT} 为采样电阻两端电压。由该式可知, 在截至频率 f_{cl} 之前, V_{OUT}/V_{IN} 为 0 dB, 经过截至频率时, 由于没有 $A_{ol}\beta$ 来纠正误差, V_{OUT}/V_{IN} 开始跟随 A_{ol} 曲线, 开始以 -20 dB/decade 的速度下降,

此后, 每经过一个 $1/\beta$ 的零点(即环路上的极点), 便增加 -20 dB/decade 的下降速度, 这也有利于加快环路对输入端高频噪声的衰减速度。固定 f_{zn} 位置不变, 根据设置电压交流分量的设置频率从而调节 f_{pn} 的位置即可调节环路 V_{OUT}/V_{IN} 的带宽, 抑制环路正向输入端高频噪声对 V_{OUT} 的影响。又由于通过该对零极点的引入可使高频段 $1/\beta$ 的值升高, 因此可同时抑制运放输出端 PCB 的寄生电容或自身因素产生的高频噪声对 V_{OUT} 的影响, 从而提高了整个环路的干扰能力。采用 Tina-TI 获取元器件的 Tina SPICE 进行仿真, 仿真图如图 5 所示, 采用传统环路增益法进行仿真测试, 大电容 C_1 保证交流信号源与直流隔开, 大电感 L_1 使交流信号在该点断开, 直流信号在该点闭合。其中, 引入的零点 f_{zn} 和 f_{pn} 分别由公式 (5)、(6) 计算。

$$f_{zn} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (R_o + R_1 + R_2) \cdot C_2} \quad (5)$$

$$f_{pn} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2} \quad (6)$$

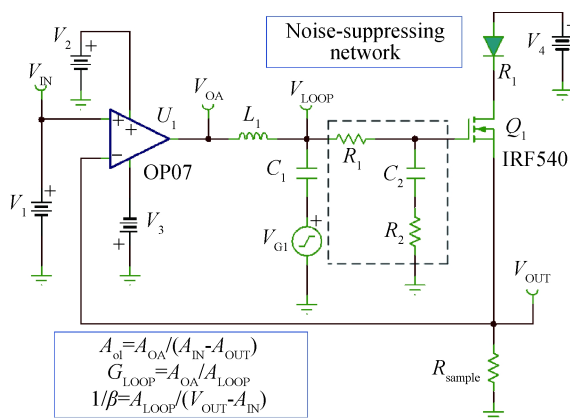


图 5 Tina-TI 仿真图

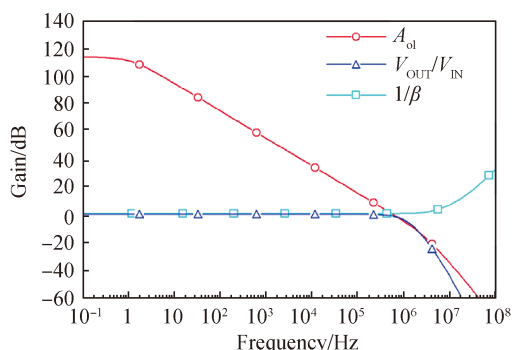
Fig.5 Tina-TI simulation diagram

当 $R_1 + R_o = 10R_2$ 时, 由于此时 $R_1 \gg R_o$, 因此可近似看成 $R_1 = 10R_2$, 此时引入的零极点保持 10 倍频程。由于 $R_2 \gg R_o$, 因此当 R_1 为 0 Ω 时, 引入的零极点几乎重合, 此时环路 V_{OUT}/V_{IN} 的带宽最大, 引入噪声抑制网络后的 f'_{z0} 由公式 (7) 可得:

$$f'_{z0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot [(R_o + R_1) // R_2] \cdot C_{gs}} \quad (7)$$

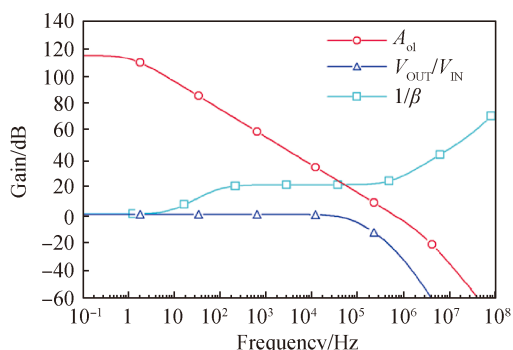
图 6(a)、(b) 分别为引入噪声抑制网络之前和噪声抑制网络之后的 Tina-TI 仿真结果, 仿真结果与一

阶人工分析与仿真结果具有较高的相关性,也验证了一阶人工分析的正确性。



(a) 引入噪声抑制网络前的仿真结果

(a) Simulation results before noise suppression network is introduced



(b) 引入噪声抑制网络后的仿真结果

(b) Simulation results after noise suppression network is introduced

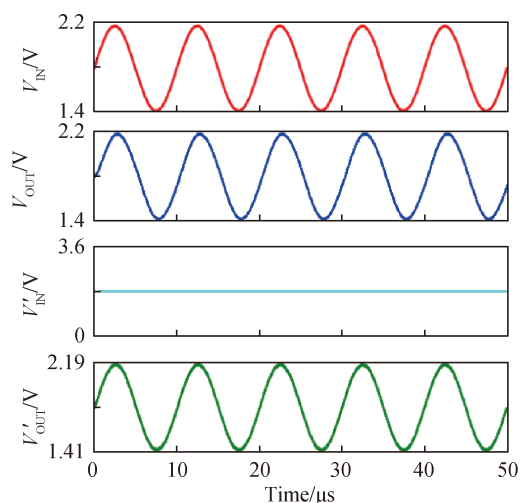
图 6 LOOP#0 仿真结果

Fig.6 LOOP#0 simulation results

直流偏置设置为 1.8 V, 采用频率为 100 kHz, 幅值为 400 mV 的正弦波, 对引入噪声抑制网络前和引入噪声网络后的环路分别进行噪抗干扰能力测试, 引入噪声抑制网络前抗干扰能力测试结果和引入网络后抗干扰能力测试结果分别如图 7(a)、(b) 所示, 图 7(a) 中, V_{IN} 和 V'_{IN} 分别表示引入噪声抑制网络前从输入端和运放输出端引入模拟噪声时, 输入端的电压波形, V_{OUT} 和 V'_{OUT} 分别表示引入噪声抑制网络前从输入端和运放输出端引入模拟噪声时的电压测试仿真输出波形, 图 7(b) 中, V_{IN} 和 V'_{IN} 分别表示引入噪声抑制网络后从输入端和运放输出端引入模拟噪声时, 输入端的电压波形, V_{OUT} 和 V'_{OUT} 分别表示引入噪声抑制网络后从输入端和运放输出端引入模拟噪声时的电压测试仿真输出波形。

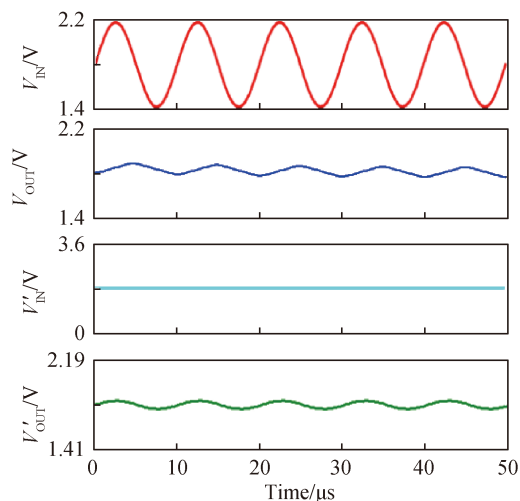
采用 5 kHz, 幅值为 400 mV 的正弦波进行引入噪

声抑制网络后环路的响应度测试, 测试结果如图 8 所示, 结果表明, 输出对输入信号的响应度良好, 其中, V_{IN} 、 V_{OUT} 、 V_G 、 V_{OA} 分别为输入信号电压、输出信号的电压、运放输出端电压以及 MOSFET 栅极电压波形。综上所述, 该环路在引入噪声抑制网络后, 具有合适的工作带宽, 对于正相输入端以及环路中间点的噪声均具备较强的抑制作用。并且该网络可根据目标设置频率进行参数自调节, 在调节范围内, 可保证对任意目标频率的输入信号具有较高响应度的同时, 对环路噪声实现较好的抑制。



(a) 噪声抑制网络引入前的抗干扰能力测试仿真

(a) Anti-interference ability test simulation before noise suppression network is introduced



(b) 噪声抑制网络引入后的抗干扰能力测试仿真

(b) Anti-interference ability test simulation after noise suppression network is introduced

图 7 ACC 模块抗干扰能力测试仿真

Fig.7 ACC module anti-interference ability test simulation

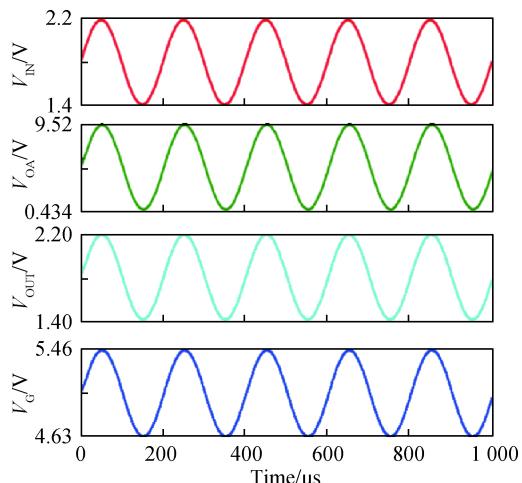
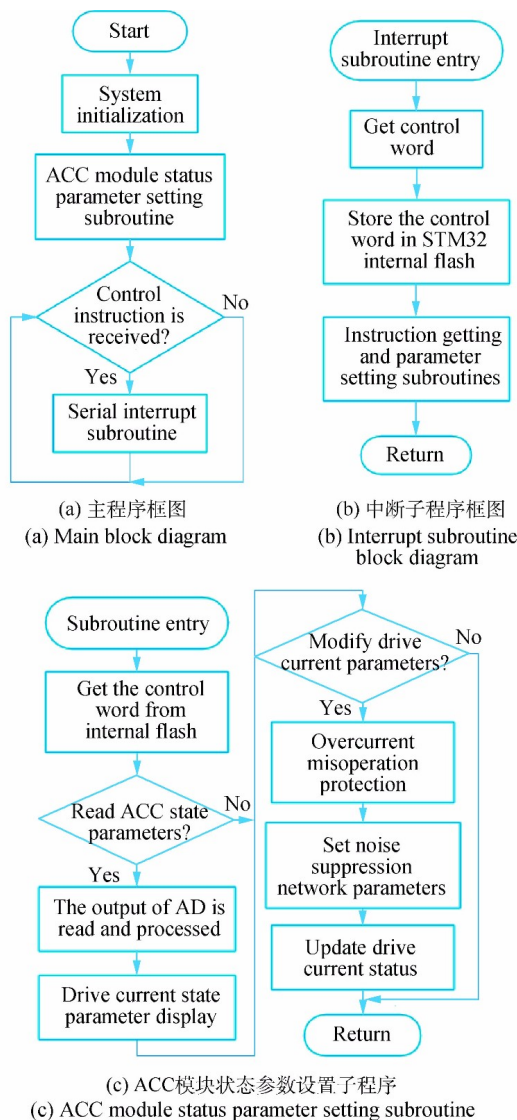


图 8 ACC 模块引入噪声抑制网络后响应度测试仿真

Fig.8 ACC module after the introduction of noise suppression network responsiveness test simulation

2 软件设计

在 DFB 激光器驱动器上电后,核心控制器 STM32F103RCT6 首先完成各模块的初始化工作,然后从内部 Flash 中读取上次关机掉电保存的控制命令字,并对命令字进行处理,使 ACC 模块恢复上次关机时的工作状态。当需要改变驱动电流的直流偏置,调制波波形、频率等参数时,通过 USB 转串口从上位机给下位机发送控制字,触发串口中断函数,从队列中读取控制字,并且根据指令要求判断是否将当前电流状态参数传送给上位机以及是否需要修改 DFB 驱动器工作状态,若只读取当前驱动电流状态,则控制器会通过 ADC 读取当前电流值大小,并将当前电流值的大小、调制波波形以及调制波频率发送给上位机,显示给用户。若需要修改当前驱动器的工作状态,则会对新的控制字进行存储,根据指令要求设置驱动电流的状态。并且根据调制波的设置目标来改变噪声抑制网络的参数,从而在保证 ACC 环路响应度的同时,提高其抗干扰能力。为了防止当输入指令错误导致驱动电流输出过大,从而损坏激光器的现象发生,在软件上加入了保护,当用户误操作设置电流大于激光器承受的最大电流时时,控制器将会使驱动电流自动限制在安全阈值范围内,这保证了激光器的安全运行。主程序框图、中断子程序框图以及 ACC 模块状态参数设置子程序框图分别如图 9(a)~(c)所示。



(c) ACC模块状态参数设置了程序
(c) ACC module status parameter setting subroutine

图 9 软件程序框图

Fig.9 Software block diagram

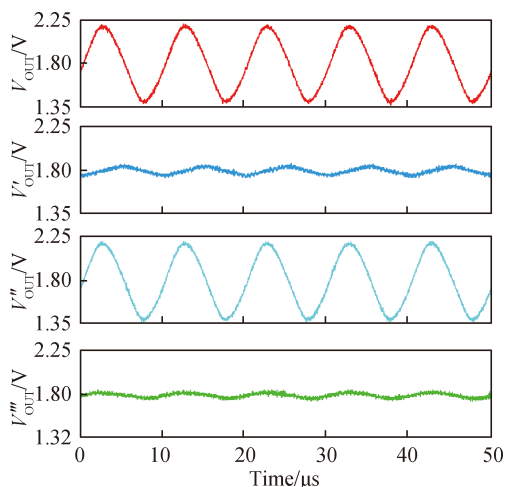
3 DFB 激光器驱动性能测试

3.1 DFB 激光器驱动抗干扰能力及响应度测试

DFB 激光器驱动电路的噪声会影响激光器的输出,从而影响光学测量等应用场合的分析结果。因此在保证响应度的同时,对激光器驱动的抗干扰能力也有较高的要求。在调制波目标频率设置为 5 kHz 时,进行环路噪声抑制以及响应度测试,采用 Agilent DSO9404A 型号的示波器进行波形测试,该示波器具有最大 4 GHz 的采样带宽以及 20 GSa/s 的采样率。以正弦波为例,首先采用频率为 100 kHz,幅值为 400 mV 的正弦波模拟高频噪声分别叠加在环路输入端以及运放输出端,然后观察 V_{OUT} 的波形,测试引入噪声抑

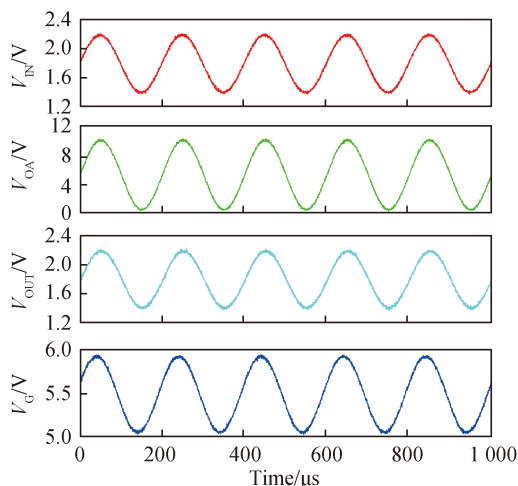
制网络前后环路的抗干扰能力,如图 10(a)所示, V_{OUT} 和 V_{OUT}' 分别表示引入噪声抑制网络前从输入端和运放输出端引入模拟噪声时的输出波形, V_{OUT}'' 以及 V_{OUT}''' 分别为引入噪声抑制网络后从输入端和运放输出端引入模拟噪声时的输出波形。测试结果表明,在引入噪声抑制网络前模拟噪声会对输出产生较大的干扰。而在引入噪声抑制网络后,ACC 环路对噪声有很好的抑制作用,目标频率设置为 5 kHz 时,对于 100 kHz 高频噪声的抑制达 20 dB 以上。

采用目标频率为 5 kHz 的正弦波作为输入,产生目标频率的调制波,测试 ACC 环路响应度,测试结果如图 10(b)所示,实验结果表明,该 DFB 驱动电路具



(a) 噪声抑制网络引入后的抗干扰能力测试

(a) Anti-interference ability test after introducing noise suppression network



(b) 噪声抑制网络引入后的响应度测试仿真

(b) Responsiveness test after noise suppression network is introduced

图 10 ACC 模块抗干扰能力测试

Fig.10 ACC module anti-interference ability test

有良好的响应度。综上所述,在引入噪声抑制网络对整个环路具有很好的噪声抑制作用,并且在目标频率下具有较高的响应度。实验结果与一阶人工分析以及 Tina-TI 仿真结果具有很好的一致性。

3.2 DFB 激光器驱动频率控制线性度测试

激光器的输出会受到调制波的频率影响,因此要保证目标频率控制的精确度。进行调制波频率控制精度的测试,采用示波器作为测量仪器进行频率的读值,测量结果如图 11 所示。对设置频率和输出频率进行最小二乘线性拟合,由下式:

$$Y = B + A \cdot X \quad (8)$$

式中: Y 在这里代表测量频率; X 代表设定频率; 其中, $A = 1.000\ 02$, $B = -3.253 \times 10^{-4}$ 。校正决定系数 (adjust coefficient of determination, adj.COD) 为 0.999 9。测量值与设定值最大偏差为 0.001 Hz,由测试结果可知,该驱动电路有着较高的频率控制精度与较好的线性度。

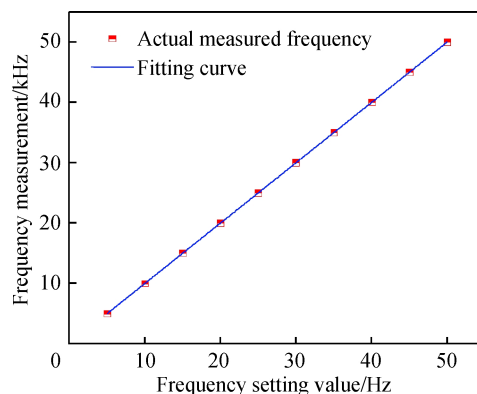


图 11 频率控制线性度及精度测试

Fig.11 Frequency control linearity and accuracy test

3.3 DFB 激光器功率控制精度以及电流稳定度测试

激光器驱动电流的稳定度对激光器的影响很大,同时也会影响激光器的工作安全性以及使用寿命。采用武汉六九公司的 DFB 半导体激光器进行电流的短期稳定性测试和长期稳定性测试。首先在环境温度下进行激光器 2 h 的短期稳定性测试,每隔两分钟对采样电阻两端的电压进行一次测量,然后转换成电流值,短期稳定度达 0.005 6%,然后在不同温度下进行 63 h 的长期稳定性测试,采用天津宏诺公司的 101-0S 型号的恒温箱模拟环境温度变化,实验装置图如图 12 所示。

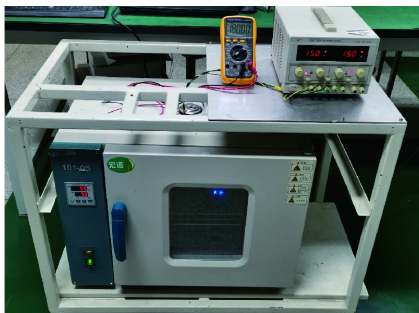


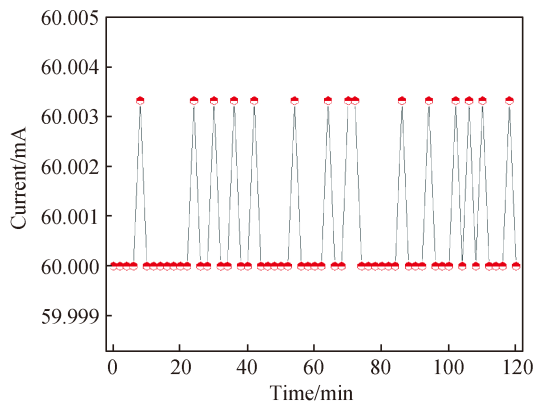
图 12 实验装置图

Fig.12 Diagram of experimental device

分别在 30 ℃、55 ℃ 以及 65 ℃ 温度下进行电流稳定性测试, 在 30 ℃ 环境下, 所测电流的均值为 60.002 222 mA, 与在 55 ℃ 环境下, 所测电流的均值为 60.001 111 mA, 在 65 ℃ 环境下, 所测电流的均值为 59.999 556 mA, 在模拟环境温度变化的情况下, 63 h 内所测电流均值为 60.000 962 8, 长期稳定性达 0.011%。短期电流稳定度测试结果如图 13(a) 所示, 长期电流稳定度测试结果如图 13(b) 所示。实验结果表明, 输出电流的短期稳定性及长期稳定性较高, 具有良好的驱动性能。其中, 从低温环境到高温环境, 测试的电流均值有略微降低的现象, 这是因为温度升高会导致选用的低温漂采样电阻值略微增大, 此时设置电压不变, 采样电阻两端的电压不变, 则驱动电流会减小。

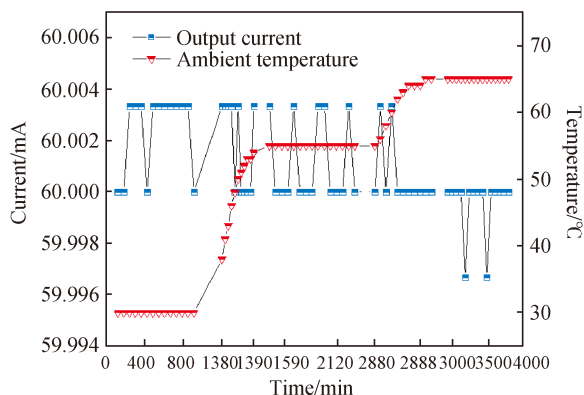
为了便于精确控制激光器的输出功率, 进行激光器功率控制线性度及精度测试。测试结果如图 14 所示。同样采用最小二乘法进行线性拟合, 见公式 (8), 式中的 Y 代表 DFB 半导体激光器的输出功率, X 代表设置电压。其中, $A=9.225\ 87$, $B=-2.248\ 82$ 。校正决定系数为 0.999 4, 标准误差为 0.092 87, 实验结果表明, 激光器输出功率控制线性度以及控制精度良好。

目前, 也有很多其他研究人员对激光器驱动电路的设计优化进行了研究。例如, 在参考文献 [16] 中, 采用恒流驱动器 QX7136 直接驱动 MOS 管, QX7136 具有欠压保护、软起动等功能^[16], 在提高安全性的同时也使电路更加集成化, 但这也增加了环路建模的复杂性。由于没有对环路进行补偿分析, 该驱动器的响应度和抗干扰能力均不能得到很好的保证。在 MOS 管选取不当的情况下, 甚至可能会导致环路振荡。参考文献 [17] 中, 采用数模混合控制的方法提高输出电流



(a) 短期稳定性测试

(a) Short-term stability test



(b) 长期稳定性测试

(b) Long-term stability test

图 13 驱动电流稳定性测试

Fig.13 Drive current stability test

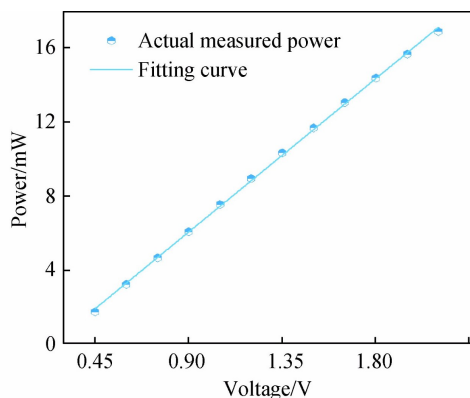


图 14 激光器输出功率控制线性度及精度测试

Fig.14 Control linearity and precision test of laser output power

的稳定性, 并在 MOS 管的栅极和源极之间并联电容的方式来避免环路出现自激振荡, 电容值的选取是通过实验来确定的^[17], 这也是目前电路设计中比较常用的消除自激振荡且提高电路稳定性的方法, 但该种频率补偿方法相对不精确, 且不能根据环路的参数特性

实现调制波目标频率下的环路噪声抑制。在 MOS 管串联的基极电阻较小, 电流支路采样电阻较大时, 会导致引入的零极点对的抵消, 这种情况下, 改变电容的值不能提高环路的稳定性。在参考文献 [18] 中, 通过采用 AD 转换采集激光器支路电压信号的方式, 降低输出带宽, 对于低频的调制波采用双闭环的方式来抑制噪声提高驱动电流的稳定性, 对于高频的调制波, 则采用模拟负反馈单闭环的方式来提高输出稳定性 [18]。采用 AD 转换器采集支路电压信号的方式来限制的输出带宽是由 AD 转换器的响应带宽决定的, 对高频噪声有一定的抑制作用, 但不能自由调节选择最合适的带宽; 在调制波目标频率较高时, 采用模拟负反馈的单闭环结构, 能一定程度的提高电路的响应度, 但不能很好地抑制输出电流中调制波目标频率以外的高频噪声, 因此参考文献 [18] 中驱动电路的两种工作方式均不能在目标频率下保证响应度的同时实现最优噪声抑制。文中所提出的针对驱动电路的设计优化以及噪声抑制网络的引入, 可以很好的避免电路中自激振荡现象的出现, 并且可以使环路在目标频率下保证响应度的同时实现最优噪声抑制。

4 结 论

文中设计了一套具有多波形调制功能的 DFB 半导体激光器驱动电路, 通过一阶人工分析与 Tina-TI 仿真相结合对驱动电路进行设计, 引入噪声抑制网络, 并通过实验进行验证。该驱动可根据上位机设置的调制波目标频率调整噪声抑制网络的参数, 在目标频率下保证响应度的同时具有较强的抗干扰能力, 提高了激光器工作的可靠性。该驱动电路可通过上位机对直流偏置的大小、调制波的频率、幅值等电流特性进行在线调节, 使用方便。并且在硬件和软件上均对激光器的运行做了保护, 保证了激光器工作的安全性。测试结果表明, 该激光器电流驱动电路对目标频率十倍频程以上的环路噪声的抑制可达到 20 dB 以上, 并且对目标频率的调制波响应良好, 频率的输出值与设定值最大偏差仅为 0.001 Hz, 且控制线性度为 0.999 9, 驱动电流 2 h 短期稳定度优于 0.005 6%, 在不同环境温度下, 63 h 长期稳定度高达 0.011%, 激光器功率控制线性度为 0.999 4, 标准误差为 0.092 87。ACC 模块的测试结果与一阶人工分析以及 Tina-TI 仿

真具有较高的相关性。该研究为高性能 DFB 半导体激光器电流驱动电路的设计提供了指导。在下一步研究中, 可采用更低精度和更低温漂的采样电阻, 从而进一步提高驱动电路在环境温度变化较大时的稳定度, 并且可采用带宽更宽的高性能运放, 引入两路噪声抑制网络, 进行更大范围目标输出频率的最优带宽调节。

参考文献:

- [1] Mei Jianchun, Ye Qing, Tian Jianguo. Design of driving circuit of multi-channel semiconductor laser [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(2): 245-248. (in Chinese)
梅剑春, 叶青, 田建国. 多路半导体激光器驱动电路设计[J]. *激光技术*, 2018, 42(2): 245-248.
- [2] Wang Dongning, Zhang Lin, Hua Baocheng, et al. Design of laser diode driving circuit used in space vision measurement subsystem [J]. *Aerospace Control and Application*, 2016, 42(2): 49-52, 62. (in Chinese)
王东宁, 张琳, 华宝成, 等. 一种空间视觉测量量子系统用半导体激光器驱动电路设计[J]. *空间控制技术与应用*, 2016, 42(2): 49-52, 62.
- [3] Chen Xiao, Sui Qingmei, Miao Fei, et al. High sensitivity acetylene detection system based on cavity enhanced absorption technique [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 9-16. (in Chinese)
陈霄, 隋青美, 苗飞, 等. 高灵敏增强吸收式乙炔气体检测系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 9-16.
- [4] Wang Pinyi, Wan Fu, Wang Jianxin, et al. Trace gas detection using cavity-enhanced Raman spectroscopy with injection locking [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1917-1924. (in Chinese)
王品一, 万福, 王建新, 等. 注入锁定腔增强拉曼光谱微量气体检测技术[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1917-1924.
- [5] Zhu Xiaorui, Lu Weiye, Rao Yuzhou, et al. Selection of baseline method in TDLAS direct absorption CO₂ measurement [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(4): 455-461. (in Chinese)
朱晓睿, 卢伟业, 饶雨舟, 等. TDLAS直接吸收法测量CO₂的基线选择方法[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 455-461.
- [6] Zhang Long, Cheng Jiansheng, Gao Jing, et al. Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1005003. (in Chinese)
张龙, 陈建生, 高静, 等. 大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1005003.

- [7] Yan Wanhong, Zhou Yanwen, Xu Di, et al. Temperature control system of semiconductor device and application for infrared Gas detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 113–122. (in Chinese)
闫万红, 周言文, 余迪, 等. 面向红外气体检测的半导体器件温控系统及应用[J]. *光子学报*, 2019, 48(3): 113–122.
- [8] Pan Ping, Zheng Li, Chen Liangyi, et al. A method of optical fiber hydrophone modulated laser [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(2): 18–21. (in Chinese)
潘平, 郑黎, 陈良益, 等. 干涉型光纤水听器调制光源的一种实现方法[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(2): 18–21.
- [9] Xing Suxia, Wang Rui, Guo Ruimin, et al. Design and implementation of constant current drive for butterfly semiconductor lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(5): 553–558. (in Chinese)
邢素霞, 王睿, 郭瑞民, 等. 蝶形半导体激光器恒流驱动设计与实现[J]. *激光与红外*, 2019, 49(5): 553–558.
- [10] Zhang Wei. Design of DFB laser driving system based on genetic algorithm [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2018, 40(5): 552–557. (in Chinese)
张炜. 基于遗传算法的DFB激光器驱动系统设计[J]. *沈阳工业大学学报*, 2018, 40(5): 552–557.
- [11] Zhang Guoxiong, Huang Chunhui. Continuously adjustable semiconductor laser diode driver with high stability [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(2): 160–163. (in Chinese)
张国雄, 黄春晖. 一种高稳定连续可调半导体激光器驱动源[J]. *激光与红外*, 2011, 41(2): 160–163.
- [12] Zhan Juntong, Fu Qiang, Duan Jin, et al. Stability improvement of DFB laser driving power using digital position PID algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1757–1761. (in Chinese)
战俊彤, 付强, 段锦, 等. 利用位置式数字PID算法提高DFB激光器驱动电源稳定性[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1757–1761.
- [13] Wang Xueli, Liu Feng, Lou Xiaoping, et al. The design of driving circuit for pumping fiber laser diode [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2014, 36(5): 825–827. (in Chinese)
王雪丽, 刘锋, 娄小平, 等. 光纤激光器泵浦源驱动电路的设计[J]. *压电与声光*, 2014, 36(5): 825–827.
- [14] Casteliazzia, Gerstenmaier Y C, Kraus R, et al. Reliability analysis and modeling of power MOSFETs in the 42-V-PowerNet [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21(3): 603–612.
- [15] Ma Tianxiang, Tian Xiaojian. Laser diode driver circuit design and improvement based on the MOSFET [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 450–453. (in Chinese)
马天翔, 田小建. 基于MOSFET的半导体激光器驱动电路设计及其改进[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 450–453.
- [16] Zheng Jiafeng, Chen Wei. Study on small semiconductor laser driving power supply [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(6): 18–21. (in Chinese)
郑家凤, 陈伟. 一种小型半导体激光器驱动电源研究[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(6): 18–21.
- [17] Qu Shimin, Wang Ming, Li Nan. DFB laser driving power using hybrid digital-analog closed loop [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1105007. (in Chinese)
曲世敏, 王明, 李楠. 采用数模混合双闭环方法的DFB激光器驱动电源[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 1105007.
- [18] Jiang Rongqiu, Deng Weifen, Wang Qianqian, et al. High stability DFB laser driving power supply utilized in infrared gas detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0505004. (in Chinese)
蒋荣秋, 邓伟芬, 汪倩倩, 等. 用于红外气体检测的高稳定性DFB激光器驱动电源[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0505004.