



全砖激光驱动电源模块的研制*

黎 陈, 谭志远, 刘 平, 李 涛, 于 婷, 王 挺

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 随着半导体制造工艺的进步以及半导体激光器应用领域的拓展, 目前半导体激光器对大功率, 小型化驱动电源的需求越来越迫切, 推动着驱动电源朝着更高功率密度、模块化的方向发展。基于 BUCK 电路设计了一款全砖激光驱动电源模块, 电源模块整机尺寸为 116.8 mm×61 mm×12.7 mm, 最大输出电流 12 A, 最大自适应输出电压为 50 V, 电流纹波峰值小于 35 mA, 电流稳定度达到了 0.067%。同时驱动电源模块设计有过流保护电路, 保证了激光器负载可靠安全工作, 目前也已在某项目中成功应用。

关键词: 半导体激光器; 驱动电源; BUCK 电路; 全砖; 过流保护电路

中图分类号: TM461.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220106

Development of all-brick laser drive power module

Li Chen, Tan Zhiyuan, Liu Ping, Li Tao, Yu Ting, Wang Ting

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: With the progress of semiconductor manufacturing technology and the expansion of semiconductor laser applications, the demand of semiconductor laser for high power and miniaturized driving power becomes more and more urgent. It drives power supply towards the direction of higher power density and modular. This paper introduces the design of an all-brick drive power module based on BUCK circuit. The overall size of the power module is 116.8 mm×61 mm×12.7 mm, and the maximum output current is 12 A, the maximum adaptive output voltage is 50 V. The current ripple is less than 35 mA and the current stability reaches 0.67%. At the same time, the power module is designed with overvoltage comparator and overcurrent protection circuit to ensure the reliability and the safe operation of laser load. The all-brick drive power module has been applied successfully in a project.

Key words: semiconductor laser, drive power supply, BUCK circuit, all-brick, overcurrent protection circuit

半导体激光器是向半导体 PN 结直接注入电流, 实现粒子数反转而产生受激辐射, 再利用谐振腔进行正反馈, 实现光放大而产生激光振荡的^[1-3], 已被广泛应用于激光武器、激光制导、激光测距、工业焊接和切割等军事和工业领域^[4-8]。半导体激光器通常正常工作时电压为自适应特性, 由串联的 LD 负载所决定, 而注入电流的稳定性直接决定着输出光功率的稳定性^[9]。半导体激光器工作时的 $V-I$ 曲线和 $P-I$ 曲线进一步表明激光器的工作状态极易受到驱动电源输出电流波动的影响, 甚至很小的电流尖峰就有可能造成激光器的损坏^[10-11], 缩短其使用寿命。所以通常要求激光驱动电源整机输出为恒流输出, 同时具有较高的电流稳定度以及较小的纹波系数。为了适应半导体激光器在各个领域的发展^[12-15], 目前国内外针对大功率半导体激光驱动电源进行了大量的研究^[16-20], 国内外也有很多较为成熟的驱动电源产品, 国外的高档驱动电源生产厂家主要有 Wavelength 公司、Martek Power 公司等, 但价格较为高昂且周期较长。国内的生产厂家主要有西安炬光科技有限公司、上海技驰电子科技有限公司等, 输出电流可在 0~20 A 连续可调, 但体积较大, 涉及标准砖式半导体激光驱动电源的产品还比较少, 因而本文基于 BUCK 变换器设计了一款连续输出的全砖激光驱动电源模块。

* 收稿日期: 2022-04-13; 修订日期: 2022-06-13

联系方式: 黎 陈, 1334361728@qq.com。

通信作者: 谭志远, 249965173@qq.com。

1 主电路拓扑

1.1 电路结构

全砖激光驱动电源模块基于 BUCK 降压电路设计, 电源主电路如图 1 所示, 主要包含以下几个部分: (1) 输入滤波电路。在输入端通过共模电感用于滤除共模干扰, 选用 π 型滤波电路用于降低输入电压纹波; (2) 开关管。同传统 BUCK 整流电路中不同的是, 驱动电源模块采用了同步整流的方式。通常快恢复二极管的导通压降约为 0.4 V, 当电流为 12 A 时, 二极管导通状态消耗的功率约为 0.48 W。

本文采用的英飞凌公司生产的 BSC117N08NS5 系列金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET), 等效导通电阻只有 11.7 m Ω , 流过相同电流情况下消耗的功率约为 0.14 W。因而采用同步整流, 将主电路中的续流二极管替换为通态电阻更低的 MOSFET, 在高频工作状态下可以有效降低驱动电源模块的整机损耗; (3) 闭环控制与故障保护。驱动电源模块的恒流闭环控制电路基于专用的 LED 驱动芯片设计, 驱动芯片采用平均电流模式对 BUCK 电路进行恒流控制, 通过更改驱动芯片 CTRL 脚给定电平以调节输出脉冲宽度调制(PWM)波占空比, 进而达到调节输出电流的目的; (4) 过流保护。驱动电源模块通过专用的霍尔电流传感器芯片检测输出电流, 并转化为电压信号同设置值比较, 当输出过流时, 比较器输出低电平关闭驱动芯片使能; (5) 欠压保护。控制板中的集中控制器通过电压采样电路检测输入电压, 当输入电压低于额定值时, 关闭驱动芯片控制使能, 两个开关管及时关断。

1.2 输出电容选型分析

高频状态下输出电容可以等效为理想电容 C , 等效电阻 R 以及等效电感 L 的串联, 本文的全砖激光驱动电源模块的工作频率较高, 输出电容等效电感可以忽略不计。稳态工作时, 输出电流基本不变, 电容流过的电流近似为电感纹波电流 ΔI_L , 稳态工作时电容的纹波电压

$$\Delta V_C = \frac{\Delta Q_C}{C} = \frac{1}{C} \int_{\frac{t_{on}}{2}}^{t_{on}} \frac{\Delta I_L}{t_{on}} (t - \frac{t_{on}}{2}) dt + \frac{1}{C} \int_{t_{on}}^{t_{on} + \frac{t_{off}}{2}} \frac{\Delta I_L}{t_{off}} (t_{on} + \frac{t_{off}}{2} - t) dt = \frac{\Delta I_L}{8fC} \quad (1)$$

式中: ΔQ_C 为电荷变化量, t_{on} 为开关导通时间, t_{off} 为开关关断时间, f 为开关频率。

稳态工作时, 等效电阻的纹波电压

$$\Delta V_R = \Delta I_L \times R \quad (2)$$

电源总的输出纹波电压

$$\Delta V_O = \sqrt{\Delta V_C^2 + \Delta V_R^2} = \Delta I_L \sqrt{\frac{1}{(8fC)^2} + R^2} \quad (3)$$

由式(3)可知, 虽然增加模块的工作频率和电感的感值可以减小最终的输出电压纹波, 但是付出的代价是电感的体积变大, 整机的开关损耗显著增加, 综合评估了电感体积和开关损耗后, 本文全砖激光驱动电源模块的工作频率最终设置为 350 kHz。而电容的寄生参数同其介质材料、封装方式等密切相关, 虽然通常陶瓷电容的容量较小, 但是由于其等效电阻和体积上的优势被广泛应用于对体积和纹波有较高要求的低压输出场合。因而综合考虑过后, 本文于全砖激光驱动电源模块的输出端采用 TDK 公司生产的 CKG 系列陶瓷电容, 同时通过多个陶瓷电容并联的方式来减小等效串联电阻, 最终达到减小输出电压纹波的目的。

1.3 控制系统设计

全砖激光驱动电源模块控制系统设计方案如图 2 所示, 其主控制板基于 ARM 公司生产 STM32F405 系列芯片设计, 该款芯片的浮点单元(FPU)支持 ARM 公司所有的单精度数据处理指令和数据类型。主控板通过 CAN 通讯接收上位机电流设置指令, 通过更改下发给电源控制芯片外部模拟电平达到调节全砖激光驱动电源模块输出电流的目的。同时将采样的输出电流、输出电压等值通过 A/D 转换后上传给上位机, 因而全砖激光驱动电源模块的工作状态可在上位机实时显示。

控制系统的工作流程如图 3 所示, 整个流程为: 全砖激光驱动电源模块上电, 辅助电源工作, 主控制板上位机建立通信连接, 此时主控制板单片机使能信号输出低电平禁止驱动芯片输出 PWM 波。通过上位机下发设置电

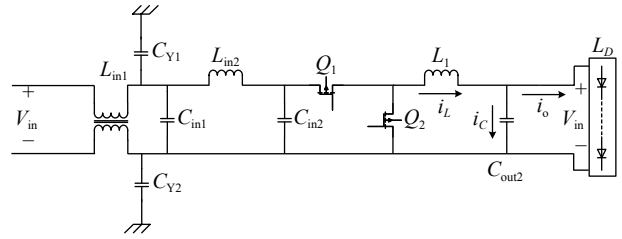


Fig. 1 Power module main circuit

图 1 电源模块主电路

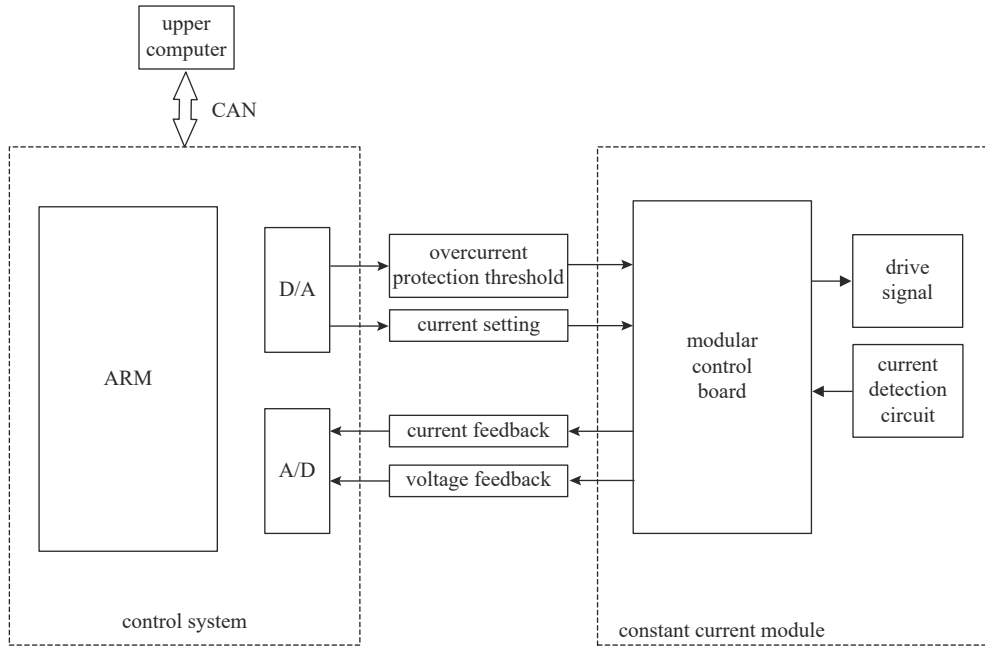


Fig. 2 Control system design

图 2 控制系统设计方案

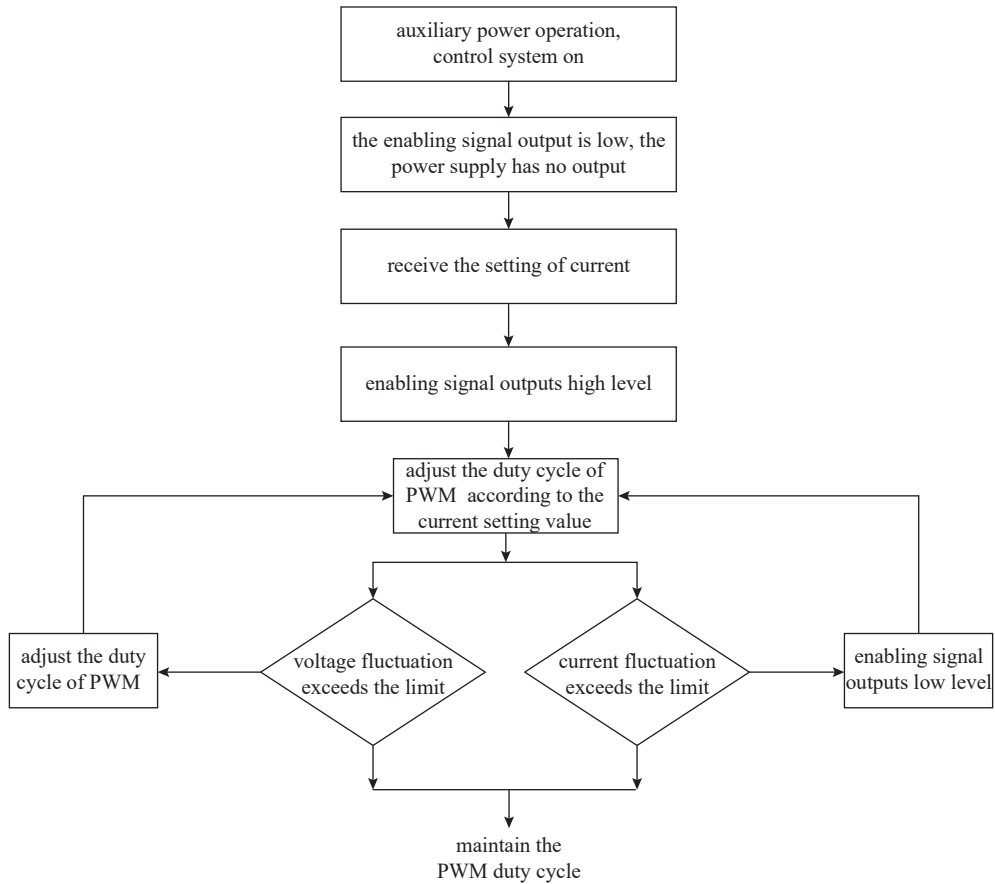


Fig. 3 Control system workflow

图 3 控制系统工作流程

流值以及电流电压保护阈值给主控制板,主控制板通过 D/A 转换输出模拟电压更改驱动芯片 CTRL 脚设置电平,驱动芯片自动调节驱动 PWM 波占空比达到调整输出电流目的。在电流输出过程中,实时采样输出电压电流值,当采样电流超过上位机设置阈值时,则认为出现过流故障,主控制板单片机立即拉低驱动芯片使能电平,即时关断电源输出电流,驱动电源过流保护时间为 300~400 μs 。

1.4 电流保护电路设计

驱动电源输出电流的波动对半导体激光器的工作状态会产生巨大影响,为了避免半导体激光器因为电流突升而损坏,除了控制系统设计有软件过流保护功能,硬件部分同样设计有电流保护电路。本文设计的全砖激光驱动电源模块可以根据不同的使用需求,根据上位机实时设置电流保护阈值,并下发给模块的集中控制板。电流保护电路通过霍尔传感器实时监测驱动电源模块的输出电流滤波转换后送入比较器的反相输入端,当比较器判断过流发生时立即输出低电平信号关断驱动器的使能即时关断 PWM 波,进而达到关闭电流输出保护激光器的目的,电流保护电路原理如图 4 所示。

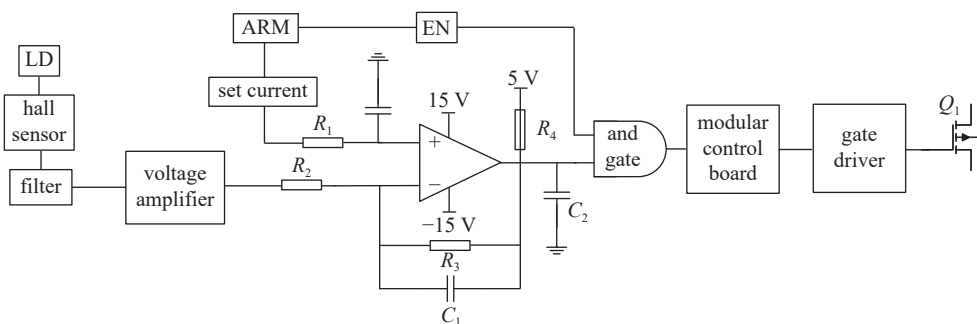


Fig. 4 Overcurrent protection circuit
图 4 过流保护电路

2 实 验

大功率半导体激光器价格昂贵,且脆弱易损,在驱动电源的研制及测试过程中,通常采用能够模拟大功率半导体激光器电气特性的等效负载,虽然二极管的制造工艺同激光器有所不同,但两者的电压电流特性比较接近,本文采用大功率二极管串联阵列作为等效负载。由于大功率二极管阵列将输入电功率全部转换为热量,因而需要较好的散热措施,本文对其采用循环水冷散热。研制的全砖激光驱动电源模块如图 5 所示,使用大功率二极管模拟激光二极管的工况对其进行了详细测试,测试波形如图 6 所示,当电源输出电流 12 A 的时候,纹波电流在 32.4 mA 左右,输出电流的上升沿在 286 μ s 左右。

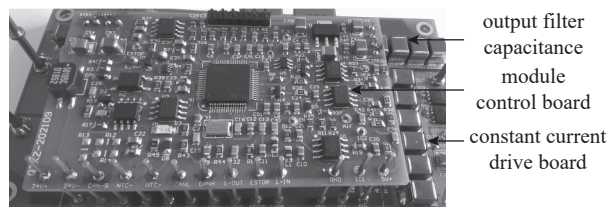


Fig. 5 Power supply picture
图 5 电源实物图片

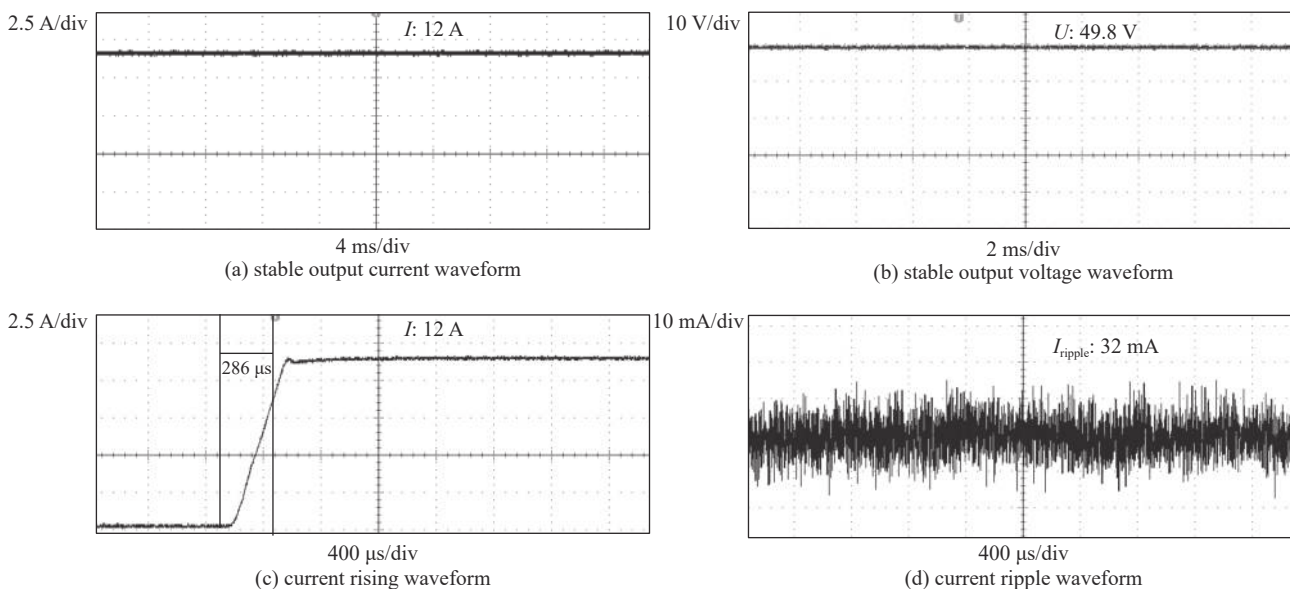


Fig. 6 Test waveform
图 6 测试波形

考虑到半导体激光器的实际工况以及常见的故障状况,全砖激光驱动电源模块在输出过程中通过固态开关旁路部分二极管负载用于模拟半导体激光器短路情况验证电源的过流保护功能。驱动电源模块过流保护点可以根据实际需求更改,本次试验的保护点设置在 21 A,短路发生时电源输出电流波形如图 7 所示。可以看到当半导体激光器工作异常导致输出电流突然增大时,过流保护电路可以及时关断驱动电源模块的最终输出,同时故障状态也及时反馈给上级控制系统,并在上位机界面实时显示,如图 8 所示。

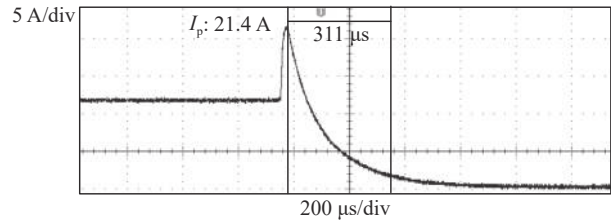


Fig. 7 Overcurrent protection waveform
图 7 过流保护波形



Fig. 8 Display interface of upper computer
图 8 上位机显示界面

半导体激光器对电流的稳定度要求较高,驱动电源在工作过程中,电流不能出现较大的电流波动以及尖峰,本文间隔 10 min 多次测量全砖激光驱动电源模块在 2 h 内的连续输出条件下的电流值,如表 1 所示,计算出输出电流平均值为 12.008 A,标准值为 12 A,计算出驱动电源模块输出电流稳定度为 0.067%。

3 结 论

本文详细介绍了全砖激光驱动电源模块的设计及研制,模块基于 BUCK 降压电路以及同步整流实现了最大 12 A 的电流输出,最大自适应输出电压 50 V。输出采用多个陶瓷电容并联方式用以减小电流纹波,当输出电流为 12 A 时的纹波在 32.4 mA 左右,纹波率为 0.27%,电流稳定度为 0.067%。模块内部集成了通讯及反馈系统,针对不同的应用场合,可以通过上位机实时更改模块输出电流值,电源输出状态也可以实时显示在上位机界面。为了避免输出电流超过半导体激光器所能承受的安全范围,驱动电源模块同时设计了过流保护电路。各项测试表明全砖激光驱动电源模块具有高稳定度、低纹波等特点,满足半导体激光器的使用需求。

参考文献:

- [1] Fujikawa S, Furuta K, Yasui K. Highly efficient and high-quality beam generation of a diode-stacks-pumped Nd: YAG rod laser[C]//Proceedings of the Technical Digest. Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Technical Digest. 2001: 185-188.
- [2] Li H X, Chyr I, Jin X, et al. >700 W continuous-wave output power from single laser diode bar[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(1): 27-29.
- [3] Zhang Xin, Gao Shoufei, Wang Yingying, et al. Design of large mode area all-solid anti-resonant fiber for high-power lasers[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e23.
- [4] Kalisky Y Y, Kalisky O. The status of high-power lasers and their applications in the battlefield[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49: 091003.
- [5] Bachmann F G. High-power diode laser technology and applications[C]//Proceedings of SPIE 3888. 2000: 394-403.
- [6] 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: 0505004. (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: 0505004)
- [7] Cho H C, Choi H Y, Kwon W B, et al. A 25-A peak current and 7.4-ns pulse-width laser driver using an avalanche transistor and switches for lidar applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(11): 2540-2543.

表 1 电源稳定度测试数据

Table 1 Results of experiments

No.	time/min	output current/A
1	10	11.8
4	40	11.9
5	50	12.0
6	60	12.2
7	70	12.1
8	80	12.0
9	90	12.0
10	100	12.2
11	110	12.0
12	120	11.8

- [8] Ye Weilin, Zheng Chuantao, Yu Xin, et al. Design of quantum cascade laser driver in infrared detection system[C]//Proceedings of 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics. IEEE, 2010: 1-2.
- [9] 廖先炳. 激光二极管电源及其对器件性能的影响[J]. 半导体光电, 1994, 15(3): 229-232. (Liao Xianbing. Laser-diode power supplies and its influence on device performances[J]. Semiconductor Optoelectronics, 1994, 15(3): 229-232)
- [10] Odon A, Stryla Z. Fast overcurrent protection system in the cw laser diode driver[C]//Proceedings of SPIE 4237, Laser Technology VI: Progress in Lasers. 1999: 123-125.
- [11] Erickson C J, Van Zijll M, Doermann G, et al. An ultrahigh stability, low-noise laser current driver with digital control[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79: 073107.
- [12] 赵清林, 曹茹茹, 王德玉, 等. 大功率半导体激光泵浦固体激光器脉冲电源设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 115001. (Zhao Qinglin, Cao Ruru, Wang Deyu, et al. Design of pulse power supply for diode pumped solid state laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 115001)
- [13] 赵慧元, 孙鲁, 苏秉华. 半导体激光管驱动电源设计与实现[J]. *电子设计工程*, 2010, 18(4): 149-151. (Zhao Huiyuan, Sun Lu, Su Binghua. Design and realization of laser semiconductor driver[J]. *Electronic Design Engineering*, 2010, 18(4): 149-151)
- [14] 杨燕, 俞敦和, 吴姚芳, 等. 新型窄脉冲半导体激光器驱动电源的研制[J]. *中国激光*, 2011, 38: 0202003. (Yang Yan, Yu Dunhe, Wu Yaofang, et al. Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38: 0202003)
- [15] Zhou Ping, Ma Xiao, Shen Huaibo, et al. Designs of Q -switching laser power supply with high voltage narrow pulse[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1748: 052012.
- [16] 曹茹茹, 王德玉, 赵清林, 等. 宽输出电压的半导体激光器驱动电源研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 091002. (Cao Ruru, Wang Deyu, Zhao Qinglin, et al. Wide range voltage of diode laser driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 091002)
- [17] 赵涛, 陈玉敏. 激光二极管驱动电源的设计[J]. *现代电子技术*, 2015, 38(24): 159-162. (Zhao Tao, Chen Yumin. Design of driving power for laser diode[J]. *Modern Electronics Technique*, 2015, 38(24): 159-162)
- [18] Tian Xiaojian, Zhang Dapeng, Joseph M, et al. Research and implementation of 100 A pulsed current source pulse edge compression[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2016, 23(2): 73-78.
- [19] Song Zhiyuan, Feng Li, Zhu Shaolan, et al. A digital pulse drive circuit for continuously modulated semiconductor laser[C]//Proceedings of 2010 Second International Conference on Information Technology and Computer Science. 2010: 244-246.
- [20] 陈伟, 苗琪媚, 孙峰, 等. 脉冲激光器大电流窄脉冲驱动设计[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(6): 1223-1228. (Chen Wei, Miao Qimei, Sun Feng, et al. Design of high current narrow width pulsed power supply of laser diode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(6): 1223-1228)