

激光与光电子学进展

一种脉宽可调的窄脉冲激光器驱动电路设计

张瑞峰*, 崔佳敏

天津大学微电子学院, 天津 300072

摘要 针对半导体激光器中纳秒级脉宽的驱动电路脉冲宽度范围小、无法调节的问题,提出一种脉宽可调的窄脉冲激光器驱动电路设计方案。根据现场可编程逻辑门阵列(FPGA)技术和半导体激光的工作原理,搭建了半导体激光驱动电路的一般模型,并进行了仿真与实验分析。以FPGA开发板为控制核心,使用高速金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)驱动芯片DE375作为开关,实现驱动电源及半导体激光器的精密控制。该电路输出的脉冲电流幅值可达40 A,脉冲宽度为5~200 ns,重复频率为0~50 kHz,上升沿宽度小于5 ns,有效增强了半导体激光器驱动电路的功能。

关键词 激光器; 半导体激光器; 脉冲宽度调制; 驱动电源; 高速金属氧化物半导体场效应晶体管

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114001

Design of a Narrow Pulse Laser Drive Circuit with Adjustable Pulse Width

Zhang Ruifeng*, Cui Jiamin

School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Aiming at the problem that the pulse width range of the driving circuit with nanosecond pulse width in semiconductor lasers is small and cannot be adjusted, a design scheme of a narrow pulse laser driving circuit with adjustable pulse width is proposed. According to the field programmable logic gate array (FPGA) technology and the working principle of the semiconductor laser, a general model of the semiconductor laser drive circuit is built, and simulation and experimental analysis are performed. Taking FPGA development board as the control core, using high-speed metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) drive chip DE375 as a switch to achieve precise control of the drive power and semiconductor laser. The output pulse current amplitude of the circuit can reach 40 A, pulse width is 5–200 ns, repetition frequency is 0–50 kHz, and rising edge width is less than 5 ns, which effectively improves the function of the semiconductor laser drive circuit.

Key words lasers; semiconductor laser; pulse width modulation; drive power; high-speed metal oxide semiconductor field effect transistor

OCIS codes 140.5960; 140.3460; 320.5550

1 引言

半导体激光由于具备高分辨率、高功率密度等

优点,被广泛应用在军事、医学等领域^[1-3],尤其是激光通信、激光测距等应用^[4],对于社会发展与国家建设具有深远意义。在激光探测领域,通常需要改变

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-02-27; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”重点专项(8YFF01013203)

通信作者: *zhangruifeng@tju.edu.cn

频率、脉冲宽度得到不同的激光信号以适应不同场合,而半导体激光器的驱动电源性能对激光脉冲的脉冲精度、作用距离、功耗、抗干扰能力等具有重要影响^[5-7]。因此,脉宽可调的窄脉冲驱动电源是实现窄脉冲激光的关键之一。

国外对半导体激光器的快速驱动研究早、投入大,技术指标处于国际领先水平。2020年,Balearic Islands 大学 Blasco 等^[8]开发出一种内部带有锁相环(PLL)的集成 CMOS 脉冲激光驱动器。在国家的大力支持下,近年来国内该领域也取得了一些成果。华中光电技术研究所陈伟等^[9]研制出脉冲宽度不可调但幅度连续可调的驱动模块,该模块驱动电流上升时间小于 10 ns,脉宽范围为 15~100 ns,幅度为 0~50 A。中国科学院杨燕等^[10]对窄脉冲半导体激光器驱动做出了进一步研究,使其能够产生上升时间为 2.2~4.9 ns、脉宽范围为 4.6~12.1 ns、幅度为 0~72.2 A 的输出电流。上述电源设计在上升时间和脉冲宽度上都做到了纳秒级,但是仍存在脉宽调节难以调节的问题,并且在灵活性上稍显欠缺。

本文设计了一种脉宽可调的窄脉冲激光器驱动电路,通过脉宽调制技术^[11-12]在现场可编程逻辑

门阵列(FPGA)中产生一个可通过数字方式调节频率和脉宽的脉冲信号,后经过金属氧化物半导体效应管(MOSFET)转换为一个上升沿迅速、大电流信号,用以驱动激光二极管(LD),最终输出上升时间小于 5 ns、脉宽 5~200 ns 内连续可调、幅度为 0~40 A、重复频率 0~50 kHz 的脉冲信号,解决了半导体激光驱动电路中脉宽配置与调节中的关键问题,调节步长为 500 ps。本文分别从理论分析、仿真、实验等方面验证了该方案的可行性。

2 基本原理

系统框图如图 1 所示,电路主要分为两部分。第一部分为脉冲产生电路,FPGA 的特定程序实现。在晶振的驱动下,FPGA 开发板可输出具有确定幅值、周期和脉宽的矩形电流脉冲,且周期与脉宽可通过改变输入脉冲信号参数来进行调节。第二部分为激光驱动电路,FPGA 开发板输出的电流经 MOSFET 驱动芯片转换为上升沿迅速、驱动电流大的脉冲驱动信号,驱动高速 MOSFET 的栅极从而打开电路开关。电流反向导通后,依次经过储能电容(C)、电阻(R)、二极管,进而点亮 LD。

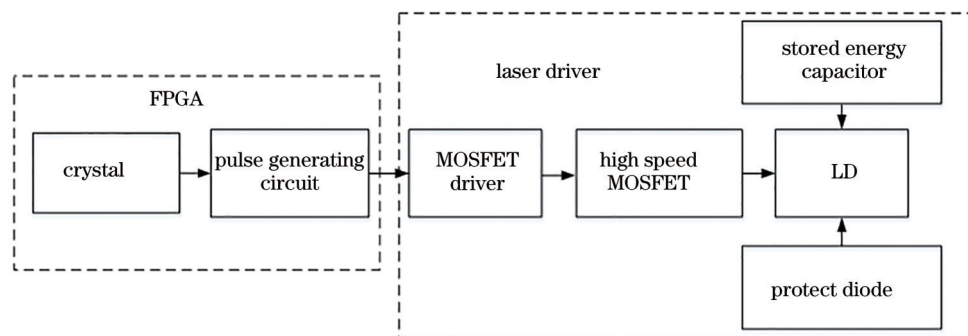


图 1 系统框图

Fig. 1 System block diagram

2.1 脉冲产生电路

脉宽调制是激光脉冲电源设计的关键,本文采用锁相倍频和相位配置技术产生精调脉宽,再与计数器生成的宽范围脉冲进行频率合成。晶振时钟(CLK)经过锁相环输出频率相同、初始相位依次相差 90°的 4 路时钟信号 CLK0、CLK1、CLK2、CLK3,计数器对 CLK0 从 0 到 $N_{\text{counter}} - 1$ 循环计数,当计数至 0 和 N_{thick} 时分别产生脉冲信号 SETD 和 CLRD。SETD 经由 D 触发器生成信号 SET,并通过多路选择器选择 CLRD 的 D 触发器触发时钟后生成 RESET 信号。SET 和 RESET 分别输入 RS 触发器

的 S 端和 R 端,合成输出脉冲 PULSE。通过改变输入参数可以实现对该脉冲的控制,时钟周期(T_{out})和脉冲宽度(W_{pulse})分别为

$$T_{\text{out}} = T_{\text{width}} \times N_{\text{counter}}, \quad (1)$$

$$W_{\text{pulse}} = T_{\text{width}} \times N_{\text{thick}} + \Delta T \times N_{\text{thin}}, \quad (2)$$

式中: T_{width} 为计数时钟周期; N_{counter} 为计数器的模; N_{thick} 为粗调脉宽参数; ΔT 为精调脉宽步长; N_{thin} 为细调脉宽参数。脉冲产生电路和时序图分别如图 2~3 所示。

2.2 激光驱动电路

脉冲 PULSE 经 MOSFET 驱动芯片转换为高

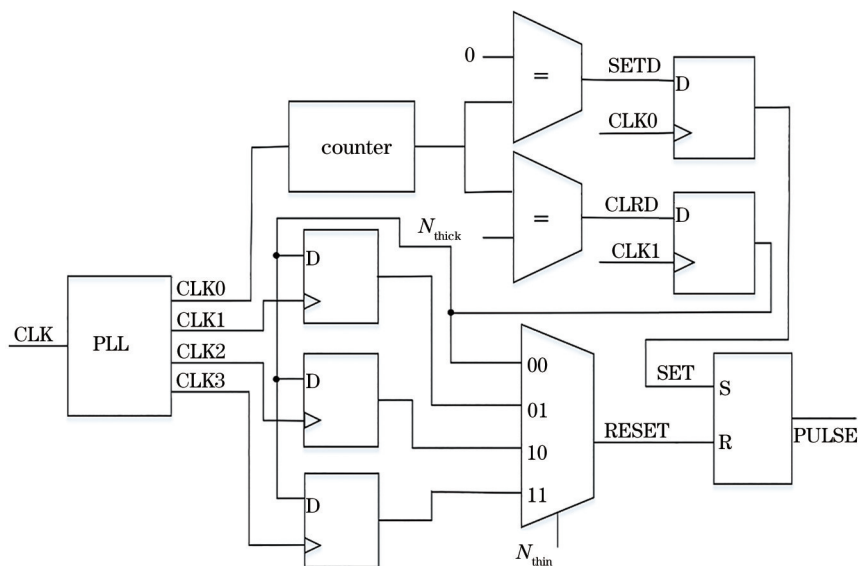


图 2 脉冲产生电路

Fig. 2 Circuit of pulse generating

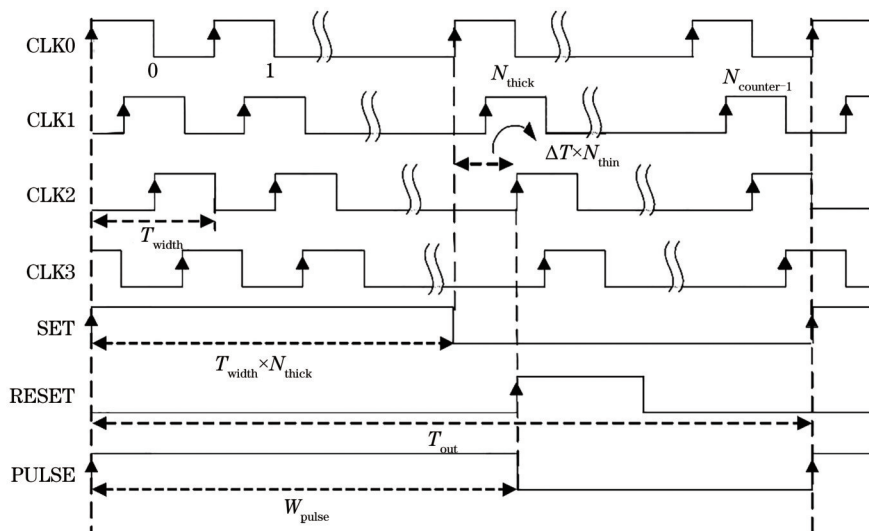


图 3 脉冲产生时序图

Fig. 3 Time sequence diagram of pulse generation

电平触发脉冲信号 TRIGGER, 在激光驱动电路中通过控制 MOSFET 的栅源电压来控制漏极电流, 从而驱动 LD。激光驱动电路主回路如图 4 所示, R_2 为充电限流电阻, R_3 是脉冲限流电阻, R_4 为采样电阻, 通过采样电流 SAMPLING 监测 LD 的电流工作情况, 限制电阻 R_5 限制电压源 V_2 提供的偏置电流, 平滑激光输出脉冲波形, C 为放电回路提供稳定的工作电压, D_1 是钳位二极管, 使激光器不被反向电压损坏。 R_2 、C、 R_3 、二极管 D_1 和地构成充电回路, C、MOSFET 管 Q、地、 R_4 、LD 和 R_3 构成放电回路。触发脉冲 TRIGGER 经电阻 R_1 后输入到 MOSFET

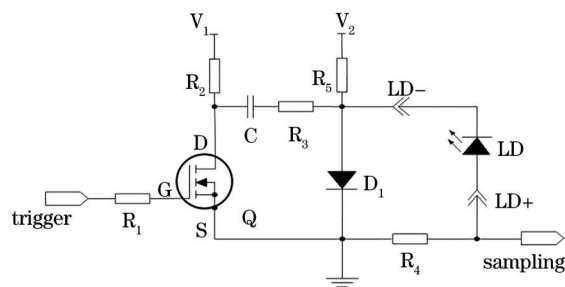


图 4 激光驱动电路主回路

Fig. 4 Main circuit of laser driver

Q 的栅极, 当 MOSFET Q 的栅极在低电平时截止, 电压源 V_1 通过充电回路为 C 充电, 最高充电电压为

V_1 。栅极为高电平时 MOSFET 导通, C 上的储能通过放电回路迅速释放, 在 LD 两端产生一个快速的电压跳变, 在电荷释放的瞬间, 输出脉冲激光。

假设电容充电至最高电压(U), 回路的放电过程可以视为零输入响应的串联 RLC 电路, 其微分方程为

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = 0, \quad (3)$$

式中: L 表示 LD 电感; i 表示流经 LD 的电流。微分后, 得到一个二阶常系数齐次线性微分方程为

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0, \quad (4)$$

式中: t 表示电容由 U 降至 0 所用时间。电路放电时, $R^2 - 4L/C < 0$, 电路处于欠阻尼的振荡状态。(3) 式的解为

$$i(t) = A \exp(-\delta t) \sin(\omega t), \quad (5)$$

式中: A 代表电流的幅度; δ 表示电流的衰减速度; ω 表示电流的周期。 $\delta = R/2L$; $\omega = \sqrt{1/LC - (R/2L)^2}$; $A = \frac{U}{L\sqrt{1/LC - (R/2L)^2}}$ 。

通过(5)式可知, 流经 LD 的电流波形是一条衰减的正弦曲线。在激光驱动电路中, 要求 A 和 δ 值较大, 保证电路有较高的脉冲幅度和较快的衰减速度, 还要求 ω 值较小, 保证电路有较窄的脉冲宽度和较短的上升时间。数理分析可知, C 越大时, ω 越

小, A 越大, 电路越不容易发生振荡。

3 实验方案与结果分析

3.1 驱动信号

脉冲产生电路选择 Altera 公司低成本芯片 cyclone IV EP4CE6F17C8N, 该款 FPGA 速度等级为 8, 采用细间距球栅阵列封装 (FBGA), 有 2 个可重配置的锁相环, 最大输入时钟频率是 472.5 MHz, 锁相环中的压控振荡器最大工作频率为 1300 MHz, 256 个引脚, 6272 个逻辑单元, 满足整个设计逻辑资源的需要并留有一定扩展空间。

FPGA 开发板上晶振 CLK 频率为 50 MHz, 锁相环倍频参数设置为 10, 因此 ΔT 为 500 ps。当 $N_{\text{counter}} = 2, N_{\text{thick}} = 1, N_{\text{thin}} = 0$ 时, 由(1)、(2)式得 T_{out} 为 4 ns, W_{pulse} 为 2 ns; 当 $N_{\text{counter}} = 200, N_{\text{thick}} = 150, N_{\text{thin}} = 0$ 时, 由(1)、(2)式得 T_{out} 为 400 ns, W_{pulse} 为 300 ns。脉冲波形如图 5 所示。

由图 5 的波形可以看出, 在 FPGA 输出脉冲中, 脉宽越大, 上升时间在脉宽中占比越小, 波形就越接近理想方波。该脉冲的宽度范围远超激光驱动电路可以承受的最大脉宽, 且可以在该范围内配置一定占空比并以最小步长进行调节。设置 $N_{\text{counter}} = 50, N_{\text{thick}} = 8, N_{\text{thin}}$ 分别为 0、1、2、3 时, 测量结果如表 1 所示, 与理论值误差极小, 基本可以忽略不计。

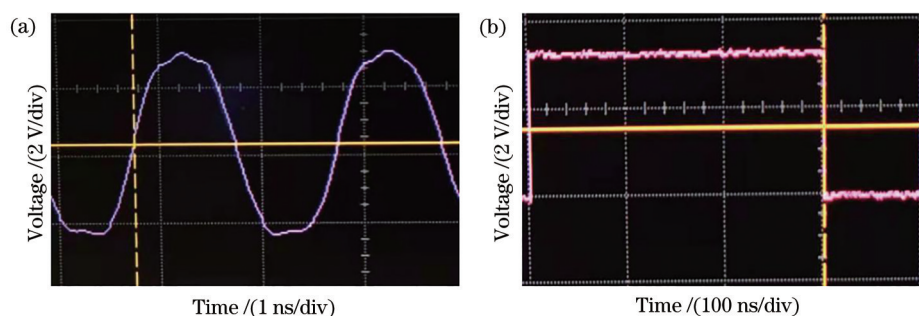


图 5 脉冲波形图。(a) $T_{\text{out}} = 4 \text{ ns}, W_{\text{pulse}} = 2 \text{ ns}$; (b) $T_{\text{out}} = 400 \text{ ns}, W_{\text{pulse}} = 300 \text{ ns}$

Fig. 5 Graphs of pulse waveform. (a) $T_{\text{out}} = 4 \text{ ns}, W_{\text{pulse}} = 2 \text{ ns}$; (b) $T_{\text{out}} = 400 \text{ ns}, W_{\text{pulse}} = 300 \text{ ns}$

表 1 实验测量数据

Table 1 Experimental measurement data

N_{thin}	$T_{\text{out}} / \text{ns}$		$W_{\text{pulse}} / \text{ns}$		Error rate / %	
	Theoretical	Measured	Theoretical	Measured	T_{out}	W_{pulse}
0	100.0000	99.9675	16.0000	16.0078	0.0325	0.0488
1	100.0000	99.9840	16.5000	16.4723	0.0160	0.1679
2	100.0000	99.9805	17.0000	16.9954	0.0195	0.0271
3	100.0000	99.9776	17.5000	15.5002	0.0224	0.0011

3.2 采样电流仿真

对图 4 的电路模型进行仿真, C 为 1 nF、3 nF、5 nF 时的采样电流波形如图 6 所示。在图 6(a)、(b) 中 $R^2 - 4L/C < 0$, 存在振荡现象, 且 $C=3$ nF 时明显比 $C=1$ nF 时振荡幅度小, 幅值明显增大,

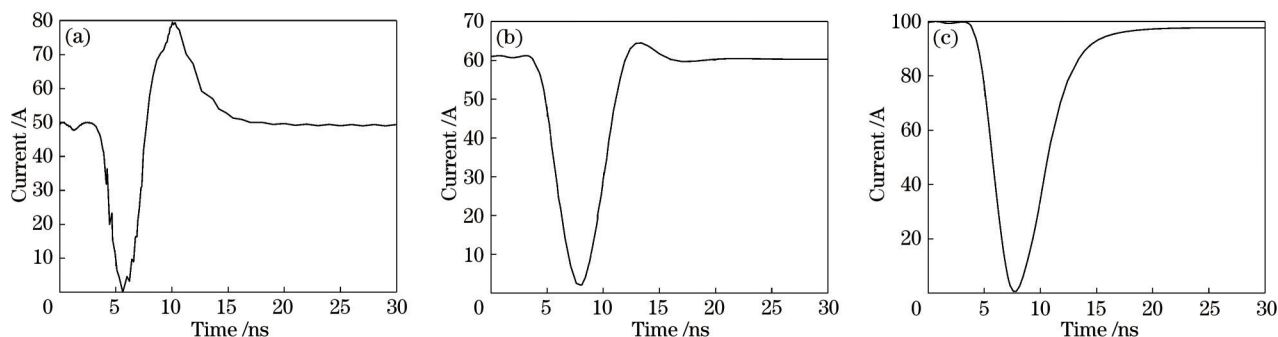


图 6 采样电流仿真波形图。(a) $C=1$ nF; (b) $C=3$ nF; (c) $C=5$ nF

Fig. 6 Sampling current simulation waveforms. (a) $C=1$ nF; (b) $C=3$ nF; (c) $C=5$ nF

3.3 激光脉冲电流

输出电流的脉冲宽度和峰值受开关的接通时间和最大电流限制, 高速 MOSFET 管是开关控制的关键, 现选用 IXYS 公司的 DE375, 它内阻小 [$R_{DS(on)} = 0.35 \Omega$], 开关速度快 ($T_{on} = 3$ ns, $T_{off} = 8$ ns), I_D 最大值为 25 A, V_{DSS} 最大值为 500 V。LD 选择型号 905D4S16X, 5.6 mm, 采用 CD 封装, 它最大脉宽为 200 ns, 工作电流为 40 A, 寄生电感为 5 nH。寄生电感是影响脉冲质量的主要因素^[13], 寄生电容与分布电感忽略不计。

参考 MOSFET 管和 LD 的工作参数, 脉冲产生电路选用的工作参数为 $N_{counter} = 10000$, $N_{thick} = 3$, $N_{thin} = 3$, 代入 (1)、(2) 式可得, 脉冲周期为 20 μ s, 即重复频率为 50 kHz, 脉宽为 7.5 ns。为了保证最大脉冲电流能达到 40 A, 激光驱动电路中 V_1 取 200 V, C 取 3 nF, R_3 取 2 Ω 左右, R_4 取 0.1 Ω 。电路放电时, 激光脉冲电流波形如图 7 所示, 峰值电压为

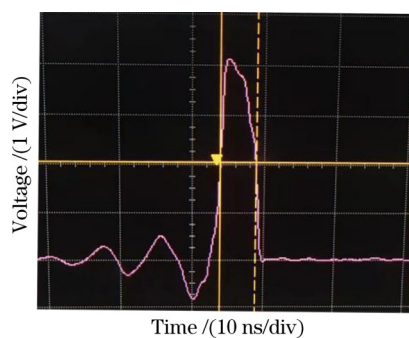


图 7 激光脉冲波形图

Fig. 7 Laser pulse waveform diagram

波形更加平滑稳定。图 6(c) 满足条件 $R^2 - 4L/C = 0$, 电路处于临界状态, 不振荡。由图 6 可知, 在其他数值固定的情况下, 电容越大, 电流的幅值越大, 电路越不容易振荡。与 2.2 节中的理论分析结论一致。

4 V, 上升沿 3 ns, 脉宽 7 ns 左右, 波形平滑稳定无过冲。根据电压电阻关系计算得峰值电流为 40 A。上述参数均与理论结果相一致, 符合设计要求。

4 结 论

脉宽可调的窄脉冲激光器驱动电路以 FPGA 开发板为控制核心, 利用高速 MOSFET 驱动芯片 DE375 精密控制驱动脉冲和发射半导体激光, 并获得重复频率高 (0~50 kHz)、上升时间快 (小于 5 ns)、脉宽窄 (5~200 ns)、脉冲幅度大 (0~40 A) 的脉冲信号, 脉宽实现可调且脉宽范围有了显著增大。在该驱动电路中, 可通过改变 V_1 和 $N_{counter}$ 、 N_{thick} 、 N_{thin} 等参数方便地调整输出脉冲激光的峰值、脉冲宽度和重复频率, 以满足不同场景下的应用要求。该激光器驱动电路结构简单、紧凑, 理论分析、仿真结果与实验结果较为吻合, 各项指标符合设计要求, 可以作为窄脉宽半导体激光器的理想驱动。

参 考 文 献

[1] Zeng P, Ni Y, Gao P, et al. A methane gas sensor system based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 123001.
曾盼, 倪屹, 高攀, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的甲烷传感系统[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 123001.

[2] Liu X, Liu J Y, Yang F, et al. High-voltage pulse generation with MOSFET[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(12): 2109-2112.

- 刘鑫, 刘进元, 杨方, 等. 基于场效应晶体管的高压电脉冲产生技术[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 2109-2112.
- [3] le Garrec B. Challenges of high power diode-pumped lasers for fusion energy[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2014, 2: e28.
- [4] Tang X X, Qiu J S, Fan Z W, et al. Diode-pumped medium-aperture-size square Nd, Y:CaF₂ rod amplifier for Inertial Confinement Fusion laser drivers [J]. Optical Materials, 2016, 58: 445-448.
- [5] Tian Y L, Li C S, Zhang Z Y. High-accuracy and high-stability constant current power for semiconductor lasers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(3): 1-5.
田亚玲, 李创社, 张朝阳. 高精度和高稳定性半导体激光器恒流驱动电源[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(3): 1-5.
- [6] Zhang L, Chen J S, Gao J, et al. Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 102-108.
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): 102-108.
- [7] Sun D G, Tang H F. Study on the PWM driver circuit of LD for laser fuze[J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 217-219.
孙德刚, 唐海峰. 脉冲式激光引信用连续可调 LD 驱动电路的研究[J]. 激光技术, 2007, 31(2): 217-219.
- [8] Blasco G, Dörich D, Isern E, et al. An 80 A, 2 to 25 ns configurable pulse-width integrated CMOS pulsed laser driver with on-chip mounted laser diode [C]//2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), October 12-14, 2020, Seville, Spain. New York: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [9] Chen W, Miao Q M, Sun F, 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.
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.
- [10] Yang Y, Yu D H, Wu Y F, et al. Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 0202003.
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(2): 0202003.
- [11] Wu Y X, Shang J, Wang X H, et al. A light emitting diode driver based on pulse width modulation and pulse amplitude modulation diming [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922003.
吴玉香, 尚俊, 王孝洪, 等. 一种基于脉冲宽度调制和脉冲幅度调制的发光二极管驱动器[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922003.
- [12] Zhang J S, Wang X C, Li G Y, et al. High precision laser pulse synchronous measurement technology based on time to digital conversion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 081401.
张吉生, 汪小超, 李国扬, 等. 基于时间数字转换的高精度激光脉冲同步测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 081401.
- [13] Feng Z H, Yue Y J, Liu E H, et al. Fast and high current short pulse laser diode driver based on DE150 [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(5): 489-492.
冯志辉, 岳永坚, 刘恩海, 等. 基于 DE150 的高速大电流窄脉宽半导体激光电源[J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 489-492.