

doi:10.3788/gzxb20144310.1014002

激光引信高速窄脉冲互补驱动电源设计

甘霖, 张合, 张祥金

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘 要: 针对激光近炸引信探测系统对激光脉冲前沿速率、激光脉宽和功率的需求, 通过 RLC 放电回路理论分析, 采用双晶体三极管互补驱动高速金属氧化物半导体场效应晶体管作为高速开关, 应用微处理器 C8051FXXX 产生脉冲触发信号, 设计出激光近炸引信高速窄脉冲大功率驱动电源. 通过 PSPICE 软件分析与实验验证, 结果表明该电源脉冲前沿上升时间约为 4 ns, 脉宽 10 ns 左右, 激光峰值电流可以达到 50 A. 该研究有效提高了系统探测距离与抗云烟尘干扰的能力.

关键词: 激光近炸引信; 高速开关; 窄脉冲; 场效应晶体管; 大功率电源

中图分类号: TJ43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1014002-6

Design of Narrow Pulse-width High Speed and Complementary Drive Module for Laser Fuze

GAN lin, ZHANG he, ZHANG Xiang-jin

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to satisfy the needs of the rate of fuze pulse front edge, laser pulse width and power in the detection system of laser proximity fuze, by the theory analysis of RLC discharge circuit, double transistors driving high-speed metal-oxide semiconductor field-effect transistor was used as the high-speed switching, and Microprocessor C8051FXXX was adopted to produce pulse trigger signal, a drive power of laser proximity fuze with high-power high-speed and narrow pulse was designed. Through PSPICE software analysis and experimental verification, the drive power can realize that pulse front edge is about 4 ns, pulse width is about 10 ns, and peak current of the laser can reach 50 A. The research effectively improved the ability of system detection range and anti-cloud and dust interference.

Key words: Laser proximity fuze; High-speed switch; Narrow pulse; Field-effect transistor; High power supply

OCIS Codes: 140.0140; 140.3538; 140.3540

0 引言

激光引信由于方向性好, 距离分辨率高, 抗干扰能力强等优点, 已成为武器系统的重要组成部分. 但是, 与无线电引信和声探测引信相比, 激光引信的主要缺点是穿透大气能力不够, 抗烟尘, 云雾, 雨雪等的干扰能力不强^[1].

在实际的激光引信系统中许多性能, 如目标的识别能力、定距准确度、抗干扰和低功耗等, 都取决于半导体激光器发射的激光脉冲质量, 而半导体激光器发

射的光脉冲是由激光电源产生的电脉冲直接调制得到的, 即激光脉冲质量的决定因素在于脉冲电源调制的质量^[2]. 因此, 激光脉冲电源的设计是激光探测和目标识别中的一项极其关键的技术.

激光探测系统的动态测距准确度与激光脉冲前沿密切相关, 激光脉冲前沿越陡, 测距准确度越高. 因此, 在探测系统发射电路设计过程中, 激光脉冲发射前沿是非常重要的指标^[3]. 大功率激光可以有效提高探测系统作用距离, 采用窄发射脉冲, 可以有效减小云烟对探测系统的干扰, 增加探测系统测量准确度^[4].

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 60908037)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No. CXZZ12_0213)资助

第一作者: 甘霖(1987—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为激光探测与目标识别. Email: kg568605@163.com

导 师: 张合(1957—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为探测制导与控制. Email: hezhang@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2014-01-22; **录用日期:** 2014-05-20

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

杨燕等采用高速金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)作为开关,设计出包括驱动电路和温控电路的激光驱动电源,脉冲前沿达到4.9 ns^[5];陈伟等设计出脉冲激光窄脉冲驱动电源,脉冲前沿小于10 ns,脉宽为15~100 ns,幅度为0~50 A连续可调^[6].光纤激光器能够将种子激光信号放大,获得百瓦级别的脉冲激光输出^[10-11].

国内外现有采用MOSFET作为驱动的脉冲激光驱动电源,其输出脉宽都大于15 ns^[7-9].本文通过对脉冲激光驱动电路的模型建立以及理论分析,设计出一种适合激光引信用的小型高速窄脉冲大功率驱动电源.

1 激光驱动电路数学建模及理论分析

脉冲激光驱动电源是一个电能到光能的转换装置,脉冲激光驱动电路原理如图1,电路由直流电源、充电原件与储能原件等组成.在弹载条件下,直流电源只能是电池等化学电源或涡轮发电机等物理电源,它们的共同特点是可提供的能量和瞬时功率都是有限的.由于驱动电流的质量直接关系到激光器发出的光脉冲质量,为获得高速大功率窄脉冲驱动电流,可采用能量压缩技术,即在一段时间内储能器件平稳地积累能量,然后通过负载瞬时快速地释放能量,负载上可得到峰值电流很大、脉宽很窄的电脉冲^[12].

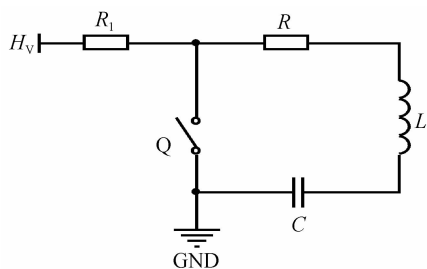


图1 脉冲激光驱动电路原理

Fig. 1 Principle diagram of pulsed laser drive circuit

假设在开关Q未闭合前,电路中电流为零,而电容C上已充有电压 U_0 ,当 $t=0$ 时,Q闭合后,电容上的电压 U_0 便通过R与L放电.

在 $t>0$ 时,根据基尔霍夫电压定律可得电路方程为

$$u_L + u_R + u_C = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_R = Ri \\ i = C \frac{du_C}{dt} \\ u_L = L \frac{di}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)可化为一个二阶常系数齐次线性微分方程

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0, t > 0 \quad (3)$$

在 $t>0$ 放电情况下,电路工作在欠阻尼状态,即

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

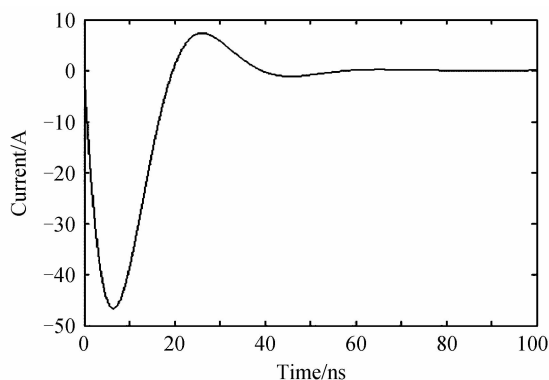
式(1)的解为

$$i = C \frac{du_C}{dt} = Ae^{-\delta t} \sin \omega t, t > 0 \quad (5)$$

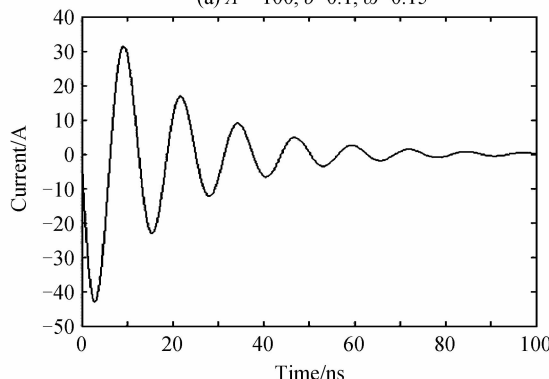
式中, A, δ, ω 分别表示放电电流的幅度、正弦波衰减快慢和周期,即

$$\begin{cases} A = -\frac{U_0}{\omega L} \\ \delta = \frac{R}{2L} \\ \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

图2为电流*i*的仿真波形.



(a) $A=-100, \delta=0.1, \omega=0.15$



(b) $A=-50, \delta=0.1, \omega=0.15$

图2 RLC放电回路电流仿真波形

Fig. 2 Current simulation waveform graph of RLC discharge circuit

由理论分析和波形可知,电路的放电电流是衰减的正弦曲线.在脉冲激光电源中,只利用第一个正弦波得到脉冲激励电流,所以, A 的幅值应较大,以得到较高的电流脉冲幅度; δ 值应较大即有较快的衰减速度,以免后续电流脉冲对激光器造成冲击损坏; ω 值应尽量小,这意味着第一个正弦波有较快的上升时间和较窄的脉宽^[2].

2 开关电路理论分析与加速方法的实现

2.1 开关电路工作过程理论分析

由分析可得

$$i = Ae^{-\delta t} \sin \omega t, t > 0 \quad (7)$$

可见放电电流衰减过程与时间常量 δ 有关,若在放电过程开始后的适当时间内 ($t \leq 1/\delta$),将开关闭合,则可获得第一个正弦波脉冲激励电流,在该过程中,开关起着至关重要的作用,开关速度直接影响放电脉冲前沿速度. 可用作这种非线性开关的器件有可控硅、雪崩三极管等,但采用这样的开关所产生的电脉冲功率不够,对于高准确度的测距系统而言,仍不能满足要求. 随着高速、大功率 MOSFET 研制技术的不断进步,用它作为开关产生高速、大电流脉冲逐渐成为不错的选择.

理想的 MOS 管作为电流开关时,其漏极电流应能瞬时直接响应于其栅源间的电压变化,但实际上 MOS 管和自身电容组合在一起^[13],使得漏极电流不能理想地瞬时响应于栅源间电压变化. MOS 管的实际开关导通作用过程为:当 MOS 管的 V_{gs} (栅源电压) 达到 V_{th} (导通门限电压) 之前, MOS 管处于截止状态,当 V_{gs} 上升到大于 V_{th} 却小于 $V_{gs-miller}$ (米勒电压) 之后, MOS 导通, I_d (漏极电流) 正比于 V_{gs} ,呈直线上升, V_{gs} 上升到大于 $V_{gs-miller}$ 之后, I_d 基本保持不变^[12]. 截止过程是导通过程的逆过程. 而栅源电压 V_{gs} 由电容 C_{gs} 提供,由于 MOS 管的栅源电容 C_{gs} 有一定的充放电时间,所以 MOS 管本身存在一定的导通与关断时间延迟,并且存在一定的上升下降沿,这些特性直接影响激光脉冲宽度与前沿上升速度.

应用 ORCAD 软件建立 PSPICE 仿真模型,不采用加速措施的 MOS 管驱动电路模型如图 3,电路参量为: MOS 管选择 IRFR9024,栅源电压上升至导通门限电压所需的导通延迟时间 ($t_d(on)$) 为 13 ns,栅源电压降低至关断门限电压所需时间即关断延迟时间 ($t_d(off)$) 为 15 ns,上升沿 (t_r) 为 68 ns,下降沿 (t_f) 为 29 ns,触发信号为脉冲电压信号,低电平为 12 V,高电平为 18 V,低电平持续时间为 135 ns,上升电压 H_1 为 10 V. 相应输入输出对比波形如图 4.

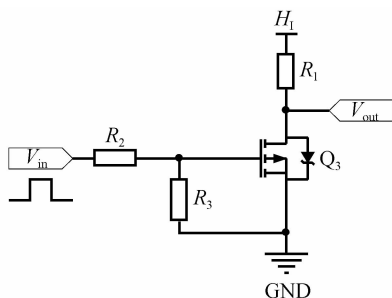


图 3 无加速措施的 MOS 管驱动电路

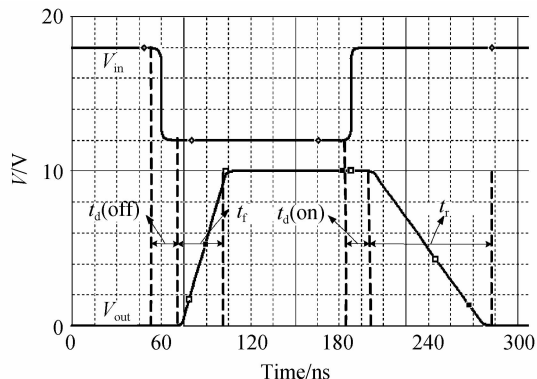


图 4 输入输出对比波形

Fig. 4 Comparison chart of input and output waveforms

由仿真结果可见,当输入信号由高电平变为低电平时, MOS 管经历一定的时间延迟 ($t_d(off)$) 之后,由导通状态进入截止状态,当栅源电压达到 V_{th} 之后, MOS 管经过 t_f 使其彻底关闭,同理可分析导通状态. 在该过程中,栅源电容 C_{gs} 充放电时间起着至关重要的作用,直接影响到调制出的激光脉冲宽度和激光前沿上升速度.

2.2 MOS 管加速方法的实现

由 2.1 节分析可知, MOS 管作为非线性开关时,应为其栅极电容提供快速的充放电回路,即开通时以低电阻为栅极电容充电,关断时为栅极提供低电阻放电回路,以提高其开关速率. 本文采用双三极管互补驱动电路来驱动 MOS 管,可为 MOS 管栅极电容提供快速充放电回路,加速 MOS 管的开关速率. 同样应用 ORCAD 软件建立 PSPICE 仿真模型,电路参量与电路仿真模型一致,电路图及相应的输入输出对比波形分别如图 5、6.

由仿真结果可见,当输入信号发生变化时,能够得到输出信号的快速响应,输入输出延迟时间得到有效减小,上升下降沿和 MOS 管的开关速率都得到了加快. 该电路原理为:当触发信号为高电平时,三极管 Q_1 导通, Q_2 截止,为 Q_3 栅极电容提供快速低电阻充电回路, Q_3 迅速导通;当触发信号由高电平变为低电平时, Q_2 导通, Q_1 截止, Q_3 的栅极电容通过 Q_2 提供的快速

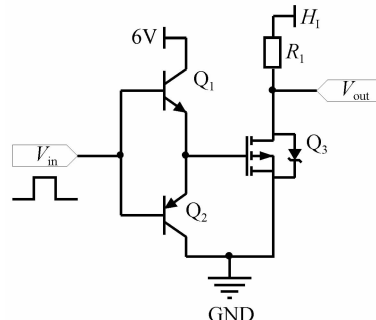


图 5 采用双晶体管驱动 MOS 管的驱动电路

Fig. 5 MOSFET drive circuit driven by double transistor

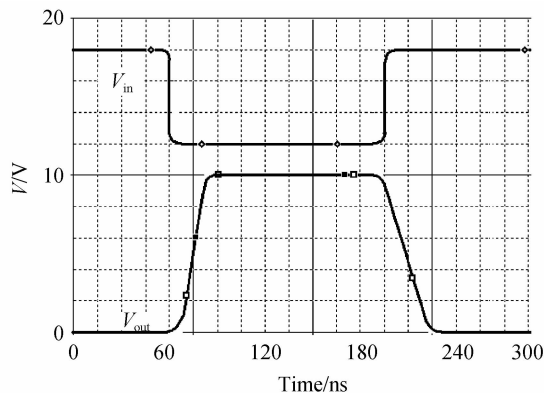


图 6 输入输出对比波形

Fig. 6 Comparison chart of input and output waveforms

放电回路迅速放电,从而实现 Q_3 的快速关断,减小了 Q_3 输入输出响应延迟.

3 实验与分析

采用双三极管互补驱动电路来驱动场效应管,结构简单,满足激光引信小型化要求,同时大大提高了 MOS 管开关速率,图 7 是采用双晶体管互补驱动 MOS 管作为高速开关的激光近炸引信驱动电源原理图.

能量压缩电路为 R_1, C_1 构成的 RC 充电回路,充电电压为 50 V,由小型 DC/DC 转换电路获得,电路面积约为 0.25 cm^2 ^[14],激光二极管 D_1 接入到放电回路,

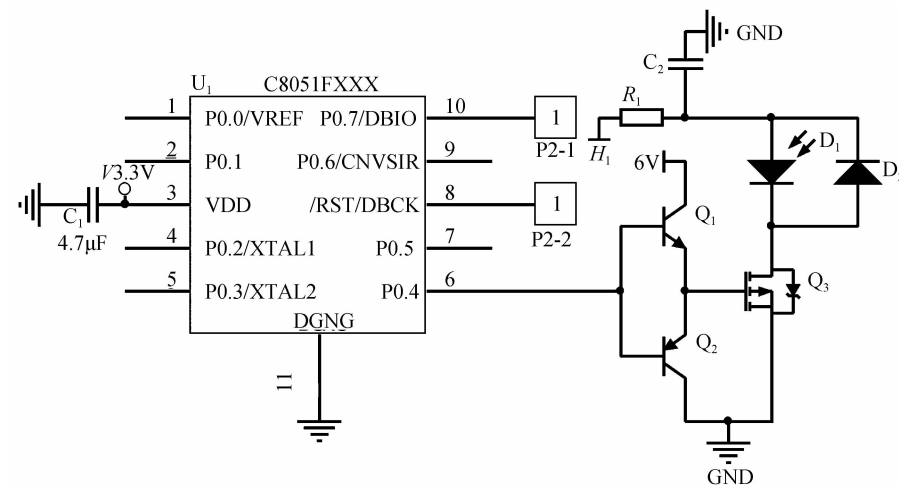


图 7 激光近炸引信驱动电源原理图

Fig. 7 Principle diagram of power supply of the laser proximity fuze

D_2 为起保护作用的二极管,可以防止反冲电压,保护激光二极管.开关脉冲触发信号可以采用 555 定时电路、DDS 技术 FPGA 电路或者单片机 (MCU) 实现,由于 555 外围电路设计相对复杂,尺寸相对庞大;FPGA 功能强大,芯片尺寸较单片机较大;而脉冲激光触发信号是较单一的方波信号,采用 MCU 不仅可以满足电路需求,而且结构简单,抗干扰能力强,微功耗,有利于系统小型化的实现,本文采用 MCU C8051FXXX(芯片尺寸 0.04 cm^2) 调制提供触发信号,得到脉宽为 10 ns、频率为 10 kHz 的窄脉冲触发信号.当触发信号为高电平时,储能电容 C_1 上存储的电荷通过 D_1, Q_3 迅速释放,瞬间产生大电流窄脉冲,驱动激光器受激发光.根据设计制作激光发射模块分别如图 8、9,脉冲半导体激光器两端电流仿真波形如图 10,由信号图可见,激光器两端的电流幅值约为 50A,激光脉冲上升沿 t_r 约为 4 ns,脉宽为 10 ns,满足激光近炸引信驱动电源大功率窄脉冲快上升沿的要求;相对应的电路实测信号波形如图 11,由于实际电路激光器两端电流无法直接监测,只能间接通过测量激光器两端电压信号.经过计算得出相应电流值,由实测电路信号波形图 11 可以明

显看到,激光器两端电压幅值为 58 V 左右,脉宽 14 ns 左右,上升沿 t_r 约为 4 ns,可以计算出电流值为 50A 左右,与理论模型仿真基本吻合.实验激光器光脉宽比仿真光脉宽大,这是由于在实际电路制作中,RC 电路放电脉冲宽度的影响因素除了触发脉冲宽度和 MOS 管开关速率以外,还与电路的杂散电阻与杂散电感有关,所以在实际电路板的布线制作中,放电回路的走线除适当加宽外,应尽量做到短且平直,尽量减少过孔,这样可以有效减少杂散电阻和杂散电感对放电回路的影响^[15].

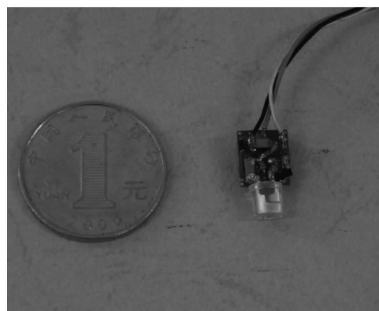


图 8 激光器硬件电路板

Fig. 8 Laser hardware circuit board

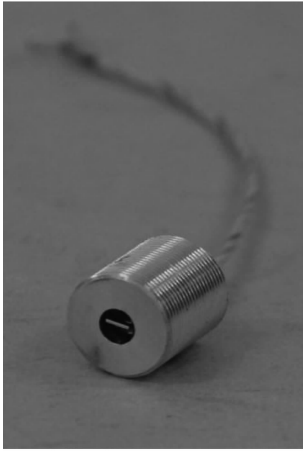


图9 激光发射模块
Fig.9 Laser transmitter module

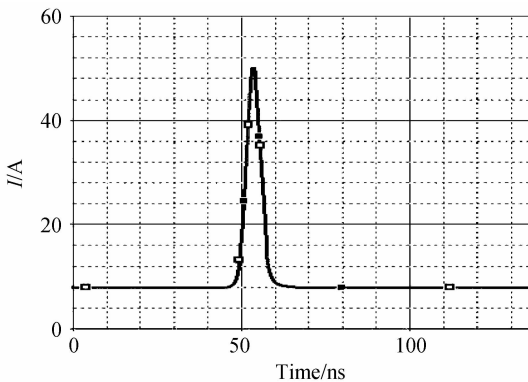


图10 激光器两端电流仿真波形
Fig.10 Current simulation waveform graph of laser

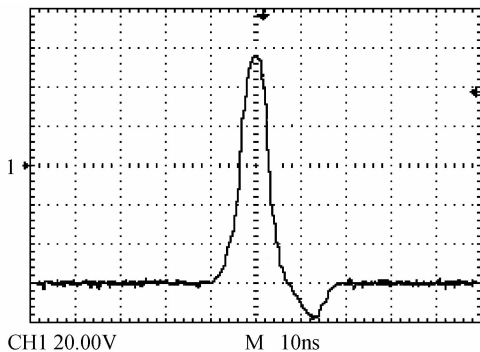


图11 电路实测激光器两端放电电压波形
Fig.11 Measured discharge voltage waveform graph of laser circuit

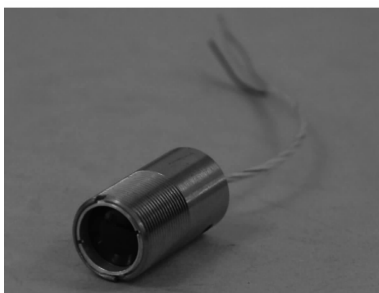


图12 APD接收模块
Fig.12 APD receiver module

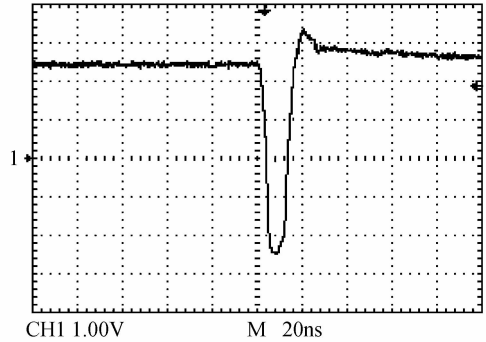


图13 距离10 m目标回波信号
Fig.13 Target echo signal when distance is 10 m

为验证激光发射模块性能,进行目标回波探测实验,将样弹模拟目标置于10 m处,利用红外观测仪调整激光发射模块光斑位置,使发射光斑位于模拟目标几何中心位置,调整APD接收系统接收视场角,保证接收视场与发射视场空间匹配. APD接收模块如图12,实验回波信号如图13,可见,当目标距离为10 m时,回波信号的幅值达到5 V,脉宽约为10 ns,脉冲前沿陡峭,为4 ns,与驱动电源理论仿真结果相吻合,验证了高速窄脉宽驱动电源的优异性能.

4 结论

由于激光近炸引信探测系统对激光脉冲有一定的要求,本文通过对激光驱动电路的建模与理论分析,采用晶体三极管互补电路驱动场效应管作为高速开关,应用ORCAD软件建立了PSPICE仿真模型并制作了电路板进行实验,设计出激光脉冲脉宽为10 ns,上升沿为4 ns,峰值电流为50 A左右的高速大功率窄脉冲激光驱动电源,在提高激光近炸引信的定距准确度的同时,有效增加了系统作用距离与抗云雾烟尘干扰能力. 该电源同样可应用于激光通讯等领域,具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Research on new optical large field receiving technology in laser fuze[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1514-1518.
甘霖,张合,张祥金. 激光引信新型光学大视场接收技术研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1514-1518.
- [2] JING Xiao-hua, CHEN Bing-lin, ZHANG He, *et al.* Study on the PFM and PWM driver circuit of LD for laser fuze[J]. *High Power Laser and Partide Beams*, 2004, **16**(11): 1450-1452.
江小华,陈炳林,张河,等. 脉冲激光引信用PFM和PWM式LD[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(11): 1450-1452.
- [3] WANG Jin-hua, YAO Hong-bao, XUE Zheng-jun, *et al.* Design of sending circuit for laser short range dynamic detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(6): 710-712.
王金花,姚宏宝,薛正君,等. 激光近距离动态探测系统发射电路设计研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(6): 710-712.
- [4] HU Jun-xiong, ZHANG Yan. The antijamming technology summarization of laser fuze[J]. *Guidance&Fuze*, 2009, **30**

- (4): 7-13.
胡俊雄, 张艳. 激光引信抗干扰技术综述[J]. 制导与引信, 2009, **30**(4): 7-13.
- [5] YANG Yan, YU Dun-he, WU Yao-fang, *et al.* Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(2): 24-29.
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): 24-29.
- [6] SIGO S. High-power MOSFETS and fast-switching thyristors utilized as opening switches for inductive storage systems[J]. *IEEE Transactions on Magnetic*, 2003, **39**(1): 437-441.
- [7] CHEN Wei, MIAO Qi-mei, 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): 1223-1227.
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): 1223-1227.
- [8] ZHANG Shou-qi, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, *et al.* Design of drive circuit for continuously adjustable ns pulse LD[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 396-398.
张寿棋, 楼祺洪, 周军, 等. 连续可调纳秒脉冲 LD 驱动电源的研制[J]. 激光技术, 2008, **32**(4): 396-398.
- [9] YAN Bing. Analysis of pulsed laser diode driver circuit[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(4): 1-4.
严兵. 脉冲半导体激光器电源电路分析[J]. 光学与光电技术, 2008, **6**(4): 1-4.
- [10] DUAN Yun-feng, HUANG Bang-cai, ZHANG Peng, *et al.* All fiber laser pulse amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(10): 1379-1382.
段云锋, 黄榜才, 张鹏, 等. 全光纤结构的脉冲光纤放大器[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1379-1382.
- [11] LI Yao, ZHU Chen, WANG Xiong-fei, *et al.* Experimental study on hundred-watt output power high repetition rate narrow pulse duration fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(2): 281-284.
李尧, 朱辰, 王雄飞, 等. 百瓦级高重复频率窄脉宽光纤激光器实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 281-284.
- [12] YAN De-ke, SUN Chuan-dong, FENG Li, *et al.* Design of driving system for high power and narrow pulse-width semiconductor laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(1): 166-169.
阎得科, 孙传东, 冯莉, 等. 高功率窄脉宽半导体激光激励器设计[J]. 应用光学, 2011, **32**(1): 166-169.
- [13] LIU Shu-shu, SHAN Wen-tao. A practical high power laser diode driver[J]. *Laser & Infrared*, 1998, **28**(3): 154-155.
刘舒书, 单文涛. 一种实用的大功率激光二极管驱动电源[J]. 激光与红外, 1998, **28**(3): 154-155.
- [14] CHEN Bing-lin, ZHANG He, SUN Quan-yi. Design on minitype high peak and narrow width pulsed power supply circuit of LD[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **25**(4): 492-493.
陈炳林, 张河, 孙全意. 微型大电流窄脉宽半导体激光器电源的研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, **25**(4): 492-493.
- [15] WANG Jin-hua, YAO Hong-bao, LIU Zi-xing. Analysis of laser emitting circuit with high-power and short-pulse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(6): 1050-1054.
王金华, 姚宏宝, 刘子星. 高功率窄脉冲激光发射电路分析[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(6): 1050-1054.