

文章编号 1004-924X(2014)11-3145-07

用于半导体激光器的大电流 纳秒级窄脉冲驱动电路

陈彦超, 冯永革*, 张献兵

(北京大学 地球与空间科学学院 理论与应用地球物理所, 北京 100871)

摘要: 根据脉冲式半导体激光器对功率、脉宽、上升沿的要求, 同时考虑电脉冲的注入便于测试激光器的各种性能, 提出了一种以金属氧化物半导体场效应晶体(MOSFET)为开关器件, 以雪崩晶体管为驱动器, 可产生大电流、窄脉宽、陡上升沿脉冲的激光器驱动电路。讨论了预触发脉冲宽度和雪崩晶体管输出负载对 MOSFET 输出脉冲在幅度和波形上的影响以及如何通过调整耦合电阻来控制脉冲的“下冲”和振荡。实验结果表明: 在 0~200 V 供电电压下, 该电路在 1 Ω 电阻上产生了从 0 A 到 148 A, 具有陡上升/下降沿的 10 ns 级电脉冲。通过调整电路参数, 可输出脉冲宽度窄至 8.6 ns, 幅度达到 124 A 的电脉冲。该驱动电路满足了脉冲式半导体激光器的工作要求和对器件测试的要求。

关键词: 半导体激光器; 驱动电路; 大电流信号; 纳秒级脉冲

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.3145

Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser

CHEN Yan-chao, FENG Yong-ge*, ZHANG Xian-bing

(*Institute of Theoretical and Applied Geophysics,*

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

** Corresponding author, E-mail: wangagou@163.com*

Abstract: According to the requirements of pulse semiconductor lasers for peak powers, pulse widths and rising edges and considering the test behaviors of semiconductor lasers, a driving circuit for the semiconductor lasers with large current outputting, narrower widths and sharp edges was proposed. The circuit used a Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(MOSFET) as a switch device and a avalanche transistor as a driver to generate the large current pulse with sharp edge and narrow width. The effect of the pre-trigger pulse width and output load of the avalanche transistor on the amplitude and waveform of MOSFET output pulse was analyzed and how to adjust the coupling resistance to control the pulse “down” and oscillation was discussed. The experimental results show that the circuit generates electric pulses of 10 ns with continuously adjustable attitudes and sharp rising and falling edges, and the amplitude of pulse varies from 0 A to 148 A on a 1 Ω resistor. After adjusting electric parameters, a 124 A current pulse with a pulse width of 8.6 ns is obtained. The circuit meets the needs of driving high power semiconductor lasers as well as laser testing.

Key words: semiconductor laser; driver circuit; large current signal; nanosecond pulse

收稿日期: 2013-12-03; 修订日期: 2014-02-03.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2012CB417301)

1 引言

脉冲式半导体激光器可用于激光测距、激光引信、激光雷达、泵浦固体激光器、脉冲多普勒成像、3D 图像系统、光纤测温传感器等领域。高峰值功率、窄脉宽及陡上升沿的脉冲驱动可以增加激光器的作用距离并提高相关传感器的分辨率^[1-4]。对于脉冲激光测距,缩短激光脉冲的上升时间是提高精度最简单有效的方法^[5]。对于一些处于实验室阶段的新型半导体激光器,如 GaN 基蓝紫光激光器,电脉冲的直接注入可以测试激光器的各种性能,比如观测激光器的增益光开关产生的延迟、过冲及拖尾的过程,脉冲光谱的展宽等^[6]。脉冲式驱动还可以用于测量半导体激光器的温度特性和温升比等性能^[7-8]。不过,工作于高功率^[9-10]和窄脉宽的激光器需要驱动电路提供相应的性能,因此驱动电路对半导体激光器的应用和研究具有重要意义。

纳秒级窄脉冲在半导体激光器、高速摄影信号处理、探地雷达及激光雷达上有着广泛的应用,而产生纳秒级窄脉冲的方法有雪崩晶体管,全氧半场效晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET), 闸流管, 阶跃恢复二极管和数字电路等。其中,快速的 GaAs 闸流管仍然处于研究中,技术上还不成熟。一般的闸流管和数字电路以及阶跃恢复二极管难以产生大电流;用雪崩晶体管虽然可以产生几十安培的电流,但通常需要的供电电压大于 250 V,甚至 300~600 V^[11-13],这给实际使用带来了极大不便。大功率激光器的测试需要驱动电路提供从零起连续可调的大电流输出能力^[14]。用雪崩晶体管的方式产生窄脉冲,脉冲幅度只能从一个特定值开始,而用 MOSFET 的方式可产生从零起幅度连续可调的脉冲,因此后者的应用更为广泛。

国内在此领域已有一些出色的研究成果。李泉等用功率晶体管设计晶闸管电路的方式在 50 V 电压下产生了峰值电流为 12 A、脉宽为 8 ns 的电流脉冲^[15]。崔景霖等用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)作为开关器件得到了最大 40 A、最窄十几纳秒的电流脉冲^[16]。许会等用雪崩晶体管的方法在 50 Ω 负载上得到了脉宽在 2~50 ns,幅度在 20~180 V 的高压窄脉冲^[17]。杨金钢等用

阶跃恢复二极管在供电电压 12 V 的条件下产生了脉宽为 0.8 ns、幅度约 12 V、上升沿在亚纳秒级的窄脉冲^[18]。然而这些研究中使用的方法尚不能产生百安培、纳秒级的窄脉冲。

MOSFET 产生的脉冲由于宽度和幅度便于调节,因而多用于脉冲电源,也可以用于驱动半导体激光器^[19-20]。MOSFET 作为开关器件可以产生大幅度的电流脉冲^[21],但是考虑到它的器件特性,一般难以通过 MOSFET 得到脉宽窄的脉冲。要想得到纳秒级的窄脉冲,需要满足 MOSFET 对前级驱动的高要求。本文从 MOSFET 的模型出发分析了 MOSFET 对前级驱动的要求,并根据这些要求设计了一种新颖的驱动电路。该电路通过 MOSFET 输出了纳秒级、百安培的电流脉冲,完全满足大功率半导体激光器的工作和测试要求。

2 MOSFET 模型分析

MOSFET 是典型的电压控制器件,输入阻抗高,低频时几乎不需要驱动电流,但是作为高速开关时则必须考虑其本身的寄生参数,此时它对驱动电流有一定的要求。图 1 为考虑到这些寄生参数时 MOSFET 的等效电路。Driver 为前级驱动器, R_{dr} 为前级驱动器的输出内阻, R_{couple} 为连接驱动器和 MOSFET 的耦合电阻, R_L 为 MOSFET 的输出负载。 R_{gint} 为 MOSFET 的栅极本征电阻, $R_{DS(on)}$ 为导通电阻, C_{GD} , C_{GS} , C_{DS} 为 MOSFET 极间的寄生电容,电容在开关过程中会变化。MOSFET 的动态开关过程涉及到这些寄生电容的充放电。

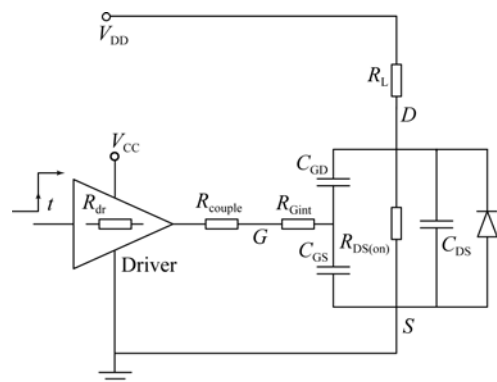


图 1 MOSFET 开关过程的等效电路
Fig. 1 Equivalent circuit of MOSFET

MOSFET 的开通延迟 $T_{d(on)}$ 、上升时间 T_r 、关断延迟 $T_{d(off)}$ 和下降时间 T_f 由以下公式决定:

$$T_{d(on)} = (R_{dr} + R_{couple} + R_{Gint}) \cdot (C_{GS} + C_{GDl}) \ln \left[1 - \frac{V_{GS(th)}}{V_P} \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$T_r = (R_{dr} + R_{couple} + R_{Gint}) \cdot (C_{GS} + C_{GDl}) \ln \left[1 - \frac{V_m - V_{GS(th)}}{V_P - V_{GS(th)}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$T_{d(off)} = (R_{dr} + R_{couple} + R_{Gint}) (C_{GS} + C_{GDh}) \ln \frac{V_P}{V_m}, \quad (3)$$

$$T_f = (R_{dr} + R_{couple} + R_{Gint}) (C_{GS} + C_{GDl}) \ln \frac{V_m}{V_{GS(th)}}, \quad (4)$$

其中: C_{GDh} 和 C_{GDl} 代表漏-源极间电压降在开关过程中变小和变大时的栅-漏极间电容对应的值, V_P 为驱动器产生的驱动脉冲幅度, 这个脉冲通过耦合电阻到达 MOSFET 的栅极, $V_{GS(th)}$ 为阈值电压, V_m 为米勒电压。

在 MOSFET 选定的情况下, C_{GS} , C_{GDh} , C_{GDl} 和 R_{Gint} 是无法改变的, 只能通过合理布线来减少所引进的分布参数, 但 R_{couple} 和 R_{dr} 是可以设计的。由于开关过程中需要对 MOSFET 的内部等效电

容充放电, 要想得脉宽窄、上升沿陡的脉冲输出, 一方面要求驱动 MOSFET 的电路能够提供足够大的电流来给 MOSFET 的极间电容充电; 另一方面, 式(1)~式(4)成立的前提是 MOSFET 驱动器输出的信号为理想的阶跃信号。要想 MOSFET 输出陡上升沿的脉冲, 需要驱动 MOSFET 的信号本身的上升沿足够陡。

3 驱动电路的设计和分析

3.1 驱动电路设计

图 2 中 U_1 为高速 MOSFET 驱动器, 型号为 TPS2812, 其典型的上升和下降时间为 15 ns。 $Q_1 \sim Q_3$ 为同型号的高速开关晶体管, 工作于雪崩状态。其基极开路下的 CE 间击穿电压 BV_{CEO} 标称为 40 V, 发射级开路下的 CB 间击穿电压 BV_{CBO} 标称为 75 V。晶体管处于雪崩工作状态时的供电电压介于这两个电压之间。 R_{couple} 为耦合电阻, R_{e1} 和 R_{e2} 为雪崩晶体管电路的输出负载。 R_L 为整个驱动电路的输出负载, 采用阻值为 1 Ω 的电阻。用于驱动激光器时 R_L 处接激光器。 U_2 为特定型号的高速 MOSFET。

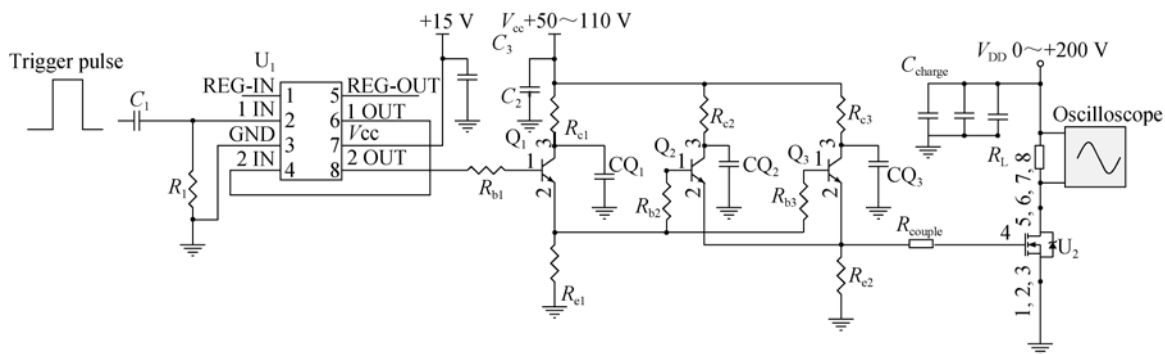


图 2 产生大电流纳秒级脉冲的电路

Fig. 2 Large current nanosecond pulse generating circuit

电路包括四级: 第一级包括 RC 微分电路和驱动器 U_1 。 U_1 的供电电压为 15 V。第一级把外来矩形波整形形成幅度为 15 V、脉宽不超过 80 ns 的脉冲。外界输入的矩形波由简单的多谐振荡器或微控制器 (MCU) 控制下的脉宽调制器 (PWM) 等方式提供, 用于调节后级脉冲的频率; 第二级是由雪崩晶体管 Q_1 组成的预触发级。由于预触发级的存在, 使得对第一级输出脉冲的幅度和宽度要求并不严格, 从而 U_1 可以换成其它

型号的驱动器。一个典型的用于产生窄脉冲的雪崩晶体管电路单元由电阻 R_{b1} , R_{e1} , R_{ce1} , 雪崩晶体管 Q_1 和储能电容 C_{Q1} 组成; 第三级由雪崩晶体管 $Q_2 \sim Q_3$ 并联组成。实际电路由 2~4 个雪崩晶体管并联, 目的是增大第三级输出的电流幅度。用雪崩晶体管产生窄脉冲, 其脉冲上升沿可以达到亚纳秒级, 从而满足 MOSFET 对驱动脉冲陡上升沿的要求。第二、三级供电电压由雪崩晶体管具体型号决定, 典型值为 50~110 V。第四级

为输出级,其中用 MOSFET 作为快速开关器件,充电电容 C_{charge} 作为储能元件。供电电压为 $0 \sim 200 \text{ V}$,最大供电电压由 MOSFET 器件决定。第三级和第四级通过耦合电阻 R_{couple} 连接。

3.2 雪崩晶体管并联运作出现的问题和解决方法

由前面对 MOSFET 模型的分析可知,要想得到上升沿陡的窄脉冲输出,MOSFET 的驱动脉冲信号要具有足够大的电流幅度。图 2 所示电路中,第三级采用多个雪崩晶体管并联的方式,其目的就是为了增大电流。但是当多个雪崩晶体管并联产生窄脉冲的时候,由于同型号不同晶体管之间的实际参数并非完全一致,从而导致它们在工作点被触发时存在着轻微的不同,即触发不同步,从而使得输出的波形被展宽。严重的时候会出现“分峰”现象,即单个脉冲变成多峰的脉冲。图 3 为多个雪崩晶体管并联运作时出现“分峰”现象的实测波形。由于本应该叠加在一起的脉冲交错开来,脉宽被展宽的同时也意味着幅度被限制,再用于驱动 MOSFET,会导致 MOSFET 输出的脉冲宽度被展宽,同时幅度会减小。

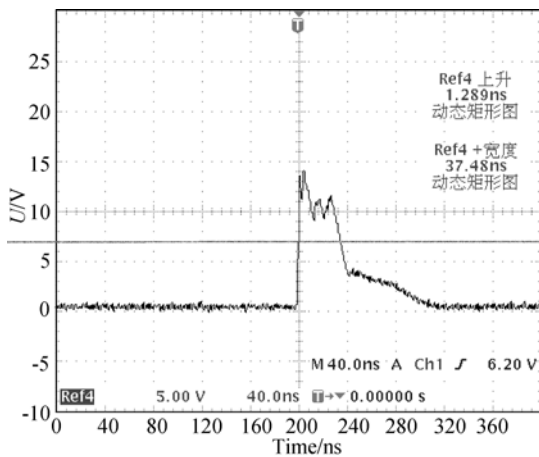


图 3 多个雪崩晶体管并联出现分峰现象时的实测波形

Fig. 3 Multiple peaks due to paralleling avalanche transistors

解决该问题的途径之一为严格挑选参数一致的晶体管,具体而言可从如下几个方面挑选:上升时间、起始工作电压、脉冲宽度、触发延迟的一致性,以及抖动小(即工作稳定);另一种途径为采用幅度更大、上升沿更陡的触发脉冲,这样不同雪崩晶体管被触发的时间差就被减小,从而不同雪崩晶体管输出的脉冲延迟也相应变小^[22-23]。本文

通过加入由单个雪崩晶体管构成的预触发级来得到大幅度且陡上升沿的脉冲,从而满足多个雪崩晶体管并联对输入脉冲的要求。

图 4 为有无预触发以及不同预触发下雪崩晶体管的输出对比图。其中“无预触发”的波形是由 TPS2812 产生的幅度为 15 V 、脉宽为 80 ns 的脉冲直接触发并联雪崩晶体管,在输出负载(即图 2 的 R_{e2})上得到的脉冲输出。由图可见,其下降沿比较缓,脉冲宽度较宽。“预触发 A”为加入预触发级,当预触发级的输出脉冲宽度略小于要得到的 MOSFET 触发级(即多雪崩晶体管并联级)输出脉冲宽度时得到的 MOSFET 触发级输出。与无预触发相比,幅度变大,脉冲宽度变小,下降沿明显变好。“预触发 B”为进一步减小预触发级产生脉冲宽度的情况下所对应的 MOSFET 触发级输出的脉冲波形。从图中可以看到,虽然其下降沿进一步改善,边沿更陡,但是幅度小于预触发 A。这是因为预触发级的脉冲幅度会随着脉冲宽度的减小而减小,幅度减小的预触发脉冲不利于 MOSFET 触发级产生大幅度的脉冲输出。所以实际应用中,要兼顾波形和幅度两方面的要求来决定预触发级的输出脉冲特性。

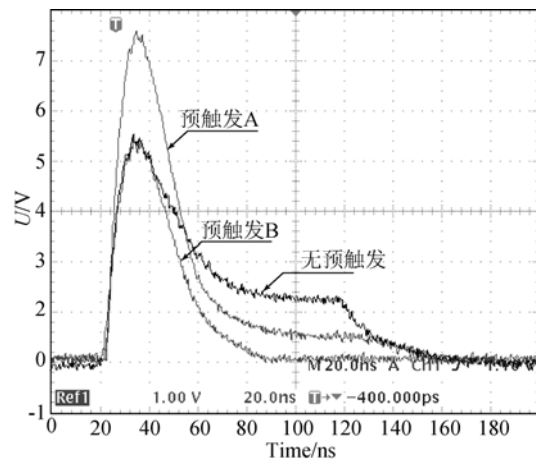


图 4 有无预触发雪崩晶体管的输出比较

Fig. 4 Comparison of avalanche transistor outputs with and without discarding pre-trigger

3.3 雪崩晶体管负载的选取

单管雪崩晶体管流过负载 R_L 的电流为:

$$I \approx (V_{\text{CC}} - BV_{\text{CEO}}) / R_L. \quad (5)$$

其中: V_{CC} 为雪崩晶体管的供电电压,负载 R_L 即为图 2 所示电路中预触发级的 R_{e1} 或后一级的

R_{e2} 。随着 R_L 的增大,输出电压增大而输出电流减小。因为要对 MOSFET 管极间电容充放电,所以一个大的触发电流可以保证这个过程快速完成,从而获得陡的输出波形。从这个角度需要选取小阻值的 R_{e2} 。另一方面从 MOSFET 的 $I-V$ 曲线可知,源-漏间导通电阻 $R_{DS(on)}$ 会随着触发脉冲幅度的加大而减少,从而使得 MOSFET 输出脉冲的电流幅度随着触发脉冲的增大而增大。因此增大 R_{e2} 可以增大触发脉冲幅度,从而增大 MOSFET 级输出的电流幅度。最终由于最后一级的脉冲输出在大幅度 and 窄宽度之间不可兼得,所以 R_{e2} 的选取要折中。

4 实验结果和分析

4.1 耦合电阻对“下冲”的影响

在对图 2 所示电路中的耦合电阻 R_{couple} 阻值进行选择时,不同的阻值会影响 MOSFET 输出脉冲的上升/下降时间,并影响振荡程度。

图 5 为在其它条件不变的情况下,只改变耦合电阻得到的 MOSFET 输出脉冲的波形比较图。表 1 为对应的具体参数。从图 5 和表 1 可知,小阻值耦合电阻可以得到更好的上升和下降沿,在同样 MOSFET 供电电压(图 2 中 V_{DD})下输出幅度也更大,但是下冲和振荡会更大。下冲正比于 $L(di/dt)$, di 为输出电流, dt 为下降时间, L 为寄生电感。从表中可知,通过增大 R_{couple} 可以控制输出振荡。这种控制提供了一种对电信号反冲敏感的激光器件的保护方式。

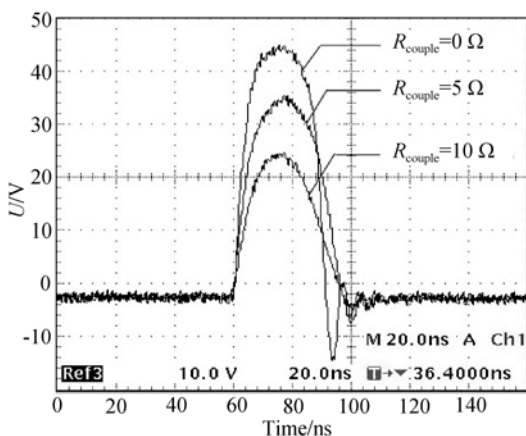


图 5 不同耦合电阻下的输出波形

Fig. 5 Waveforms with different couple resistances

表 1 不同耦合电阻下的输出波形参数

Tab. 1 Parameters of output with different couple resistances

R_{couple}/Ω	T_r/ns	T_f/ns	Output/A	Undershoot/V
0	6.2	7.2	48	-12
5	8.7	11.6	38	-5
10	8.8	13.1	28	<-2

4.2 百安培、纳秒级窄脉冲输出结果

在 $1\ \Omega$ 负载上得到了脉宽为 $13.6\ ns$, 上升和下降时间分别为 $4.5\ ns$ 和 $13.6\ ns$ 的窄脉冲。MOSFET 输出级的供电电压为 $0\sim 200\ V$, 得到的脉冲电流幅度为 $0\sim 148\ A$ 。图 6 为实测波形, 图 6 中显示了供电电压分别为 $10, 50, 100, 150$ 和 $200\ V$ 时所对应的输出脉冲波形。通过改变前级触发, 在 MOSFET 输出级供电电压为 $195\ V$ 的条件下, 得到了幅度为 $124\ A$ 、脉冲宽度为 $8.6\ ns$ 、上升和下降时间分别为 $4.4\ ns$ 和 $6.3\ ns$ 的窄脉冲。图 7 为实测波形。

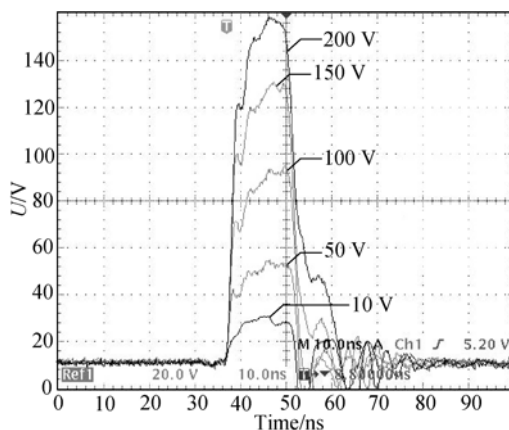


图 6 不同供电电压下的输出波形图

Fig. 6 Waveforms with different supply voltages

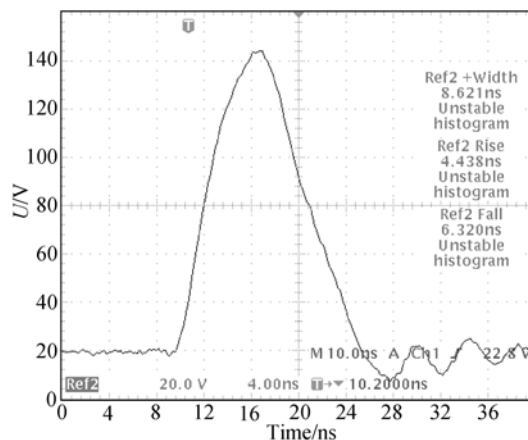


图 7 脉宽为 $8.6\ ns$ 、幅度为 $124\ A$ 的大电流脉冲波形

Fig. 7 Waveform of pulse with amplitude of $124\ A$ and pulse width of $8.6\ ns$

5 结 论

本文根据脉冲式半导体激光器对大功率、窄脉宽、陡上升沿的要求,以及新型半导体激光器件对脉冲工作方式下测试的要求,提出了一种以 MOSFET 为开关器件,以雪崩晶体管的输出驱动 MOSFET 产生大电流、窄脉宽、陡上升沿脉冲的激光器驱动电路。首先从 MOSFET 的模型出发分析了 MOSFET 对驱动的要求。为满足 MOSFET 驱动对陡上升沿的要求,采用了雪崩晶体管这种脉冲发生方式;为满足 MOSFET 驱动对大电流的要求,采用了多个雪崩晶体管脉冲发

生单元并联的方式,并通过加入预触发来解决多个雪崩晶体管并联使用所带来的脉冲被展宽问题。然后讨论了预触发脉冲宽度和雪崩晶体管输出负载对 MOSFET 输出脉冲在幅度和波形上的影响,以及如何通过调整耦合电阻来控制脉冲的“下冲”和振荡,这为对反向电压敏感的激光器件提供了一种保护方式。实验结果表明,在 0~200 V 供电电压下,该电路产生了幅度为 0~148 A,脉宽为 13.6 ns 的连续可调电脉冲;在 195 V 供电电压下可产生脉宽窄至 8.6 ns,幅度达到 124 A 的电脉冲,该电脉冲能够满足驱动大功率半导体激光器和测试激光器器件的要求。

参考文献:

- [1] 张在宣. 激光拉曼型分布式光纤温度传感器[J]. 光学学报, 1995, 15(11): 1585-1589.
ZHANG Z X. Laser Raman-type distributed optical fiber temperature sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(11): 1585-1589. (in Chinese)
- [2] 王金花, 姚洪宝, 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: 709-712.
WANG J H, YAO H B, XUE ZH J, *et al.*. Design of sending circuit for laser short range dynamic detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35: 709-712. (in Chinese)
- [3] 尧舜, 套格套, 路国光, 等. 68.5 W 连续输出 1 060 nm 波段半导体激光器阵列模块[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 8-11.
YAO SH, TAO G T, LU G G, *et al.*. 1 060 nm wavelength high power diode array module [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 8-11. (in Chinese)
- [4] 岱钦, 宋文武, 王希军. 高频半导体激光器的驱动设计及稳定性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 745-748.
DAI Q, SONG W W, WANG X J. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 745-748. (in Chinese)
- [5] 卜弘毅, 林盈侃, 孟昭华. 基于超窄脉宽激光器的厘米级测距技术研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 880-883.
BU H Y, LIN Y K, MENG ZH H. Research of centimeter-level ranging technology based on ultra-narrow pulsed laser [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(8): 880-883. (in Chinese)
- [6] 刘运涛. 高重复频率超短脉冲蓝紫光激光器[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
LIU Y T. *High Frequency Ultra Short Pulse Blue-violet Laser Diode*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [7] 马祥柱, 霍晋, 曲轶, 等. 808 nm 半导体激光器的温度特性[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1306-1309.
MA X ZH, HUO J, QU Y, *et al.*. Temperature characteristics of 808 nm semiconductor lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(12): 1306-1309. (in Chinese)
- [8] 汪丽杰, 佟存柱, 杨晔, 等. 布拉格反射波导激光器的光谱特性[J]. 发光学报, 2013, 34(9): 1227-1232.
WANG L J, TONG C ZH, YANG Y, *et al.*. Optical spectral characteristics of Bragg reflection waveguide lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(9): 1227-1232. (in Chinese)
- [9] 郝明明, 朱洪波, 秦莉, 等. 百瓦级高亮度光纤耦合半导体激光模块的研制[J]. 发光学报, 2012, 33(6): 651-659.
HAO M M, ZHU H B, QIN L, *et al.*. Research on high brightness fiber coupled diode laser module with hundred watts class output power[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(6): 651-659. (in Chinese)
- [10] 张祥伟, 宁永强, 秦莉, 等. 利用亚波长矩形金属光栅稳定 980 nm 高功率垂直腔面发射激光器偏振[J]. 发光学报, 2013, 34(9): 1188-1193.
ZHANG X W, NING Y Q, QIN L, *et al.*. Stable polarization control of 980 nm high-power vertical-cavity surface-emitting lasers using sub-wavelength

- rectangular-metal-gratings[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013,34(9): 1188-1193. (in Chinese)
- [11] MOLINA L L, MAR A, ZUTAVERN F J, *et al.*. Sub-nanosecond avalanche transistor drivers for low impedance pulsed power applications [J]. *Pulsed Power Plasma Science, IEEE Conference Record-Abstracts*, 2001:178-181.
- [12] VAINSHIN S N, KOSTAMOVARA J T, MYLLYLÄ R A, *et al.*. Automatic switching synchronization of serial and parallel avalanche transistor [J]. *Electronic Letters*, 1996,32(11):950-952.
- [13] VAINSHIN S N, KOSTAMOVARA J T, KILPELA A J, *et al.*. High speed, high current driver for operation with low ohmic load [J]. *Electronic Letters*, 1997,33(10):904-906.
- [14] 王鹏程, 邓永丽, 张立平, 等. 高亮度半导体激光阵列光纤耦合模块[J]. *发光学报*, 2012,33(12): 1335-1341.
- WANG P CH, DENG Y L, ZHANG L P, *et al.*. High brightness fiber coupled diode laser module [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012,33(12): 1335-1341. (in Chinese)
- [15] 李泉, 顾国华. 基于功率晶体管窄脉冲激光器驱动设计[J]. *激光与红外*, 2013,43(5):544-549.
- LI X, GU G G. Narrow pulse laser driver design based on power transistors [J]. *Laser & Infrared*, 2013,43(5):544-549. (in Chinese)
- [16] 崔景霖, 刘晓科, 耿志祥, 等. 一体化脉冲式半导体激光器驱动电路及其布局[J]. *探测与控制学报*, 2012,34(5):5-10.
- CUI J L, LIU X K, GENG ZH X, *et al.*. Integrative driving circuit and its layout of pulsed laser diode [J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(5):5-10. (in Chinese)
- [17] 许会, 牛长富, 李邦余, 等. 新型纳秒级探地雷达脉冲源设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(11): 2449-2454.
- XU H, NIU CH F, LI B Y, *et al.*. Design of a new nanosecond GPR pulse source [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011,32(11): 2449-2454. (in Chinese)
- [18] 杨金钢, 谢嘉, 李红英, 等. 晶体管驱动的阶跃二极管大幅度窄脉冲源[J]. *探测与控制学报*, 2012, 34(1):24-27.
- YANG J G, XIE J, LI H Y, *et al.*. Narrow pulse source of high-voltage based on step recovery diode driven by transistor[J]. *Journal of Detection & Control*, 2012,34(1):24-27. (in Chinese)
- [19] 陈彦超, 赵柏秦, 李伟. 用于纳秒级窄脉冲工作的大功率半导体激光器模块[J]. *光学精密工程*, 2009,17(4):695-699.
- CHEN Y CH, ZHAO B Q, LI W. High peak power semiconductor laser module for producing nanoseconds pulse[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):695-699. (in Chinese)
- [20] 党敬民, 翟冰, 高宗丽, 等. 纳秒级脉冲型群红外量子级联激光器驱动电源[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9):2209-2216.
- DANG J M, ZHAI B, GAO Z L, *et al.*. Nanosecond driver for multiple pulse-modulated infrared quantum cascade laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(9): 2209-2216. (in Chinese)
- [21] 李栋, 马家驹, 耿宏伟. 半导体激光器大电流脉冲恒流源的设计[J]. *测控技术*, 2012,31(8):5-8.
- LI D, MA J J, GENG H W. Research on high pulse constant current source for the semiconductor laser [J]. *Measurement & Control Technology*, 2012,31(8):5-8. (in Chinese)
- [22] PRINCE P R. Paralleling avalanche transistor[J]. *Proc. IEEE*, 1965,53:304.
- [23] HANSE J P, SCHMIDT W A. A fast risetime avalanche transistor pulse generator for driving injection lasers [J]. *Proc. IEEE*, 1967, 55(2): 216-217.

作者简介:



陈彦超(1983—),男,山西晋城人,博士,工程师,2009年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,研究方向为半导体激光器模块、嵌入式系统和应用物理。E-mail:cyc@semi.ac.cn

通讯作者:



冯永强(1966—),男,北京人,工程师,1993年于清华大学获得学士学位,研究方向为电子仪器及应用物理。E-mail:wangagou@163.com

(本栏目编辑:李自乐)