

大电流、高稳定脉冲激光器驱动电路设计与数学分析

冉建,曹飞,姜俊,张兴

(中国电子科技集团公司第四十四研究所,重庆 400060)

摘要: 激光器技术是激光测距系统中的关键技术。高性能测距应用中对激光器的要求主要包括峰值功率高,稳定性好。为了实现远距离激光测距,设计了一种大电流、高稳定脉冲激光器驱动电路。建立了该电路的数学模型,使用 Matlab 仿真软件,分析了各关键参数对脉冲恒流源的影响。仿真结果显示了开环运放的压摆率,后级电路时间常数以及电路噪声对输出电流平均值,上升时间,稳定度的影响。最后测试结果表明,该电路模块能产生 20 A 的脉冲电流,稳定度约 99%,能够驱动脉冲激光器正常工作,达到测距系统要求。

关键词: 激光测距; 激光器; 脉冲恒流源; 大电流

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200184

Design and mathematic analysis of large current and high stability driving circuit for pulse laser

Ran Jian, Cao Fei, Jiang Jun, Zhang Xing

(The 44th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Laser technology is the key technology in laser ranging system. In the application of high performance ranging, the requirements of laser include high peak power and good stability. In order to achieve far away laser ranging, a large current and high stability driving circuit for pulse laser was designed. The mathematical model of the circuit was established, and the influence of the key parameters on the pulse constant current source was analyzed by using Matlab simulation software. The simulation results show that the voltage swing rate of the open-loop operational amplifier, the time constant of the later stage circuit and the circuit noise have an effect on the average value of the output current, the rise time and the stability. Finally, the test results show that the circuit module can generate 20 A pulse constant current, the stability is about 99%, and it can drive the pulse laser to work, which meets the requirements of ranging system.

Key words: laser ranging; laser; pulse constant current; large current

收稿日期:2020-05-11; 修订日期:2020-06-21

作者简介:冉建(1988-),男,工程师,硕士,主要从事光电探测器组件及应用系统方面的研究。Email: ranjian_cetc44.qq.com

0 引言

激光测距具有速度快、距离远、精度高以及抗干扰能力强等优点,在军事、航空航天等领域应用十分广泛^[1-3]。激光技术作为激光测距系统中的关键技术,是一项重要的研究工作。

自 1960 年第一台激光器诞生以来,人们在激光器技术上做了大量研究,取得了许多重大成果^[4]。机理上,认识到激光器是通过外部激励使工作物质中的激活粒子跃迁而产生光子,光子再经过谐振腔振荡而辐射出高质量激光束;材料上,按工作物质的不同,分为固体激光器,气体激光器,液体激光器以及半导体激光器;工作状态上,分为连续激光器和脉冲激光器。目前,半导体激光器和固体激光器应用比较广泛。半导体激光器,体积小,成本低,能工作在连续态和脉冲态,但是光学性能差,功率普遍不高;固体激光器体积大,成本高,主要工作在脉冲态,但是光学性能较好,功率能够达到很高。由于脉冲激光能量集中,峰值功率高,因此,千米以上的激光测距系统主要使用脉冲激光器。

激光器的工作主要包括内部辐射和外部驱动两部分。内部辐射主要跟工作物质、结构以及制作工艺有关;外部驱动主要是以电流输入为主。激光驱动电路的设计要求主要包括^[5]:(1) 达到激光器的阈值电流;(2) 电流稳定性好;(3) 电流变化速度快;(4) 使用安全可靠。目前,恒流电路是提供外部驱动的主要方法^[6]。

文中利用差分结构设计了一种安全的大电流、高稳定性脉冲激光器驱动电路,并对此电路建立了数学模型,通过 MATLAB 仿真分析了其中的关键参数对输出电流的影响。

1 工作原理及电路结构

恒流控制电路的基本原理是通过电流进行采样,然后与设置的基准电压进行比较,利用负反馈调节使场效应管工作在恒流区,从而得到恒定电流。如果设置的基准电压变成一个受控制的脉冲电压,就可以输出脉冲恒定电流。由于一般的电源很难直接输出大电流,因此常常需要设计充电电路,利用电容放电充当电流源。文中设计的脉冲恒流源由充电控

制电路和脉冲恒流放电控制电路组成,电路原理图如图 1 所示。

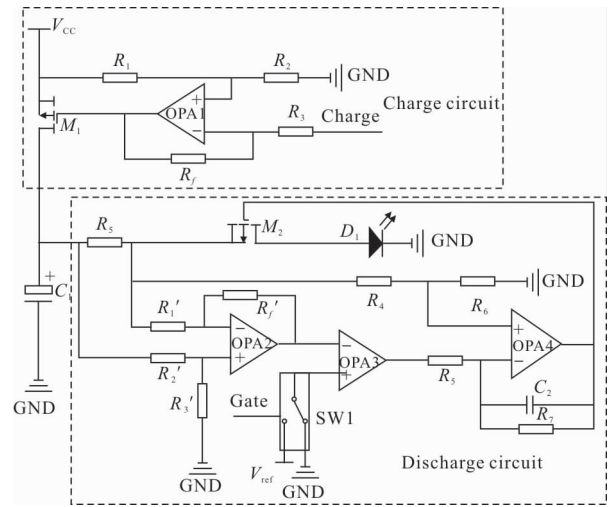
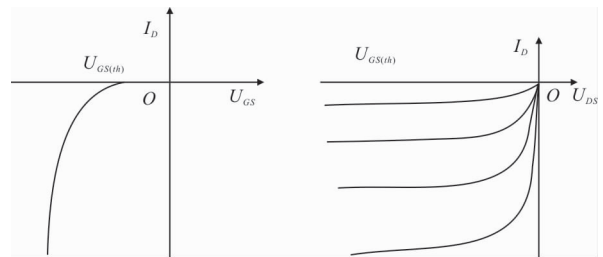


图 1 脉冲恒流源电路原理图

Fig.1 Circuit diagram of pulse constant current source

1.1 充电控制电路

充电控制电路的结构如图 1 上半部分所示,其主要由电源(V_{CC})、P 沟道场效应管(M_1)、运放(OPA1)以及电阻(R_1, R_2, R_3, R_f)以及电容(C_1)构成。通过运放与电阻构成的减法电路,控制场效应管的电流从而实现给电容充电。此电路中关键元件是场效应管。场效应管是一种通过控制栅-源极电压(U_{GS}),实现控制漏-源极(I_{DS})电流的半导体器件。其特性转移曲线和输出特性曲线^[7]如图 2 所示。



(a) 转移特性曲线

(b) 输出特性曲线

(a) Transfer characteristic curve (b) Output characteristic curve

图 2 P 沟道 MOSFET 特性曲线图

Fig.2 Characteristic curve of P-channel MOSFET

电流方程为:

$$I_D = I_{DSS} \left(\frac{U_{GS}}{U_{GSth}} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

式中: U_{GSth} 为阈值开启电压; I_{DSS} 为 $U_{GS} = 2U_{GSth}$ 的电

流。

当电路中 $R_1 // R_2 = R_3 // R_f$, $R_1 = R_f$ 时, 根据减法电路公式可得:

$$U_{GS} = -\frac{R_f}{R_3} U_{charge} \quad (2)$$

设电容 (C_1) t 时刻电压为 $U_C(t)$, M_1 工作在恒流区, 则有:

$$U_C(t) = I_D \cdot \frac{t}{C_1} = I_{DSS} \left(\frac{R_f}{R_3} \cdot \frac{U_{charge}}{|U_{GSth}|} - 1 \right)^2 \cdot \frac{t}{C_1} \quad (3)$$

因此, 当充电控制信号 U_{charge} 通过控制器输出 3.3 V 时, 电路配置适当的电阻, 可以得到合适的 U_{GS} 使场效应管工作在恒流区, 从而实现给电容恒流充电。

1.2 脉冲恒流放电控制电路

脉冲恒流放电控制电路如图 1 下半部分所示, 其主要由电容 (C_1), 取样电阻 (R_s), P 沟道场效应管 (M_2), 运放 (OPA2, OPA3, OPA4), 模拟开关 (SW1), 激光器 (D_1), 电容 (C_2) 及若干电阻组成。这些元件分别构成了电流取样与差分放大电路, 开环放大电路, 负反馈恒流电路。下面介绍各部分电路的组成及数学原理。

1.2.1 电流取样与差分放大电路

在图 1 中, 电流取样与差分放大电路由 R_s , OPA2, R_1' , R_2' , R_3' , R_f' 构成。设 t 时刻流过取样电阻 R_s 的电流为 $I_D(t)$, OPA2 输出电压为 $U_2(t)$, 当 $R_1' // R_f' = R_2' // R_3'$, $R_1' = R_2'$, 根据差分负反馈放大原理, 则有:

$$U_2(t) = \alpha \cdot I_D(t) \cdot R_s \quad (4)$$

式中: $\alpha = \frac{R_f'}{R_1'}$ 。

1.2.2 开环放大电路

在图 1 中, 开环放大电路由 OPA3, SW1 构成, 参考电源 U_{Ref} 。设 OPA3 开环增益为 β , t 时刻输出电压为 $U_3(t)$, 则有:

$$U_3(t) = \begin{cases} \beta(U_{Ref}(t) - U_2(t)) & \text{Gate=high} \\ 0 & \text{Gate=low} \end{cases} \quad (5)$$

通过后级负反馈电路控制, 电流取样的电压会稳定在参考电压处, 理论稳定的脉冲电流大小为:

$$I_D' = \frac{U_{Ref}}{\alpha \cdot R_s} \quad (6)$$

1.2.3 负反馈恒流电路

负反馈恒流电路由 OPA4, R_4 , R_5 , R_6 , R_7 , C_2 , M_2 构成。设 t 时刻 M_2 源极电压为 $U_S(t)$, 栅极电压为 $U_G(t)$, $R_4 = R_5 = R_6 = R_7$, 由根据负反馈原理, 恒流控制等效电路如图 3 所示。

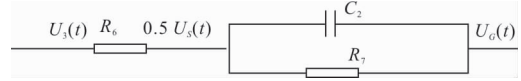


图 3 恒流反馈控制等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of constant current feedback control

根据 RC 充放电公式有:

$$U_G(t) = U_G(t-1) + [-U_3(t) + U_S(t) - U_G(t-1)] \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{R_6 C_2}} \right) \quad (7)$$

$$U_S(t) = U - I_D(t) \cdot t / C_1 \quad (8)$$

式中: U 为电容 (C_1) 初始电压。

由公式 (7)~(8) 得:

$$U_{GS}(t) = U_G(t) - U_S(t) = U_G(t-1) + [-U_3(t) + U_S(t) - U_G(t-1)] \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}} \right) - U + I_D(t) \cdot t / C_1 \quad (9)$$

式中: $\tau = R_6 C_2$ 。

2 电路仿真与测试

该节将在 Matlab 平台上利用上节建立的数学模型编写 M 语言程序^[8], 对电路的工作过程进行仿真, 分析关键参数对电路的影响, 然后选择最优参数对实际电路进行测试。

2.1 充电电路仿真与分析

通过 1.1 节的分析可知, 配置电阻可以控制充电电路的电流。反之, 根据所需电流求解电阻配置。根据公式 (1)~(2) 得到:

$$\frac{R_f}{R_3} = \left(\sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} + 1 \right) \cdot \frac{|U_{GSth}|}{U_{charge}} \quad (10)$$

仿真过程中, 设充电电流 $I_D = 500$ mA, $I_{DSS} = 1$ A, $U_{charge} = 3.3$ V, $U_{GSth} = 0.5$ V, 代入公式 (10) 得电阻配置为:

$$\frac{R_f}{R_3} = 0.363$$

设 $C_1 = 5$ mF, 代入公式 (3) 得充电时间函数为:

$$U_C(t) = I_D \cdot \frac{t}{C_1} = 100 t \quad (11)$$

当 $V_{CC}=12\text{ V}$ 时,电容的充电电压变化如图 4 所示。随着电容电压 U_C 的增加,场效应管 U_{DS} 减小,当 U_{DS} 减小到使场效应管工作在可变电阻区后,电流急剧降低,几乎不再充电,因此电容电压略小于 V_{CC} 。

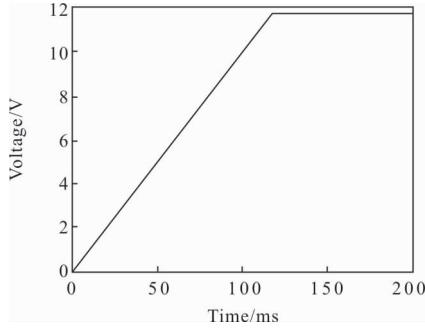


图 4 恒流充电电压变化曲线图

Fig.4 Voltage change curve of constant current charging

2.2 恒流放电控制电路仿真与分析

根据公式(1)、(9)可仿真输出脉冲恒流源,需要设置的参数如表 1 所示。

表 1 关键参数设置表

Tab.1 Key parameter setting table

Number	Name	Symbol	Parameters	Value
1	Capacitance	C_1	Capacity value/F	5×10^{-3}
2	Resistance	R_s	Resistance value/ Ω	0.01
3	FET(M2)	U_{GSth}	Threshold voltage/V	0.5
4		I_{DSS}	Drain current/A	1
5	OPA2	α	Magnification	10
6	OPA3	β	Open loop gain	10^6
7		SR	Slewing rate/ $V \cdot \mu s^{-1}$	1 000
8	RC circuit	τ	Time constant/s	10^{-4}
9	Reference	V_{ref}	Voltage/V	2

根据表 1 设置的参数,仿真结果如图 5 所示。图中分别显示了触发信号为 $2\text{ V}, 2\text{ ms}$ 电压脉冲;恒流场效应管的源极和栅极的电压变化,及它们之间的差值始终保持不变来维持电流的恒定;输出脉冲电流为 20 A 。

通过数学模型分析,影响输出脉冲电流的参数主要包括开环工作运放 OPA3 压摆率,时间常数以及电路噪声。下面分别进行仿真与分析。

(1) 运放 OPA3 压摆率对电流平均值、不稳定性及上升时间的影响仿真

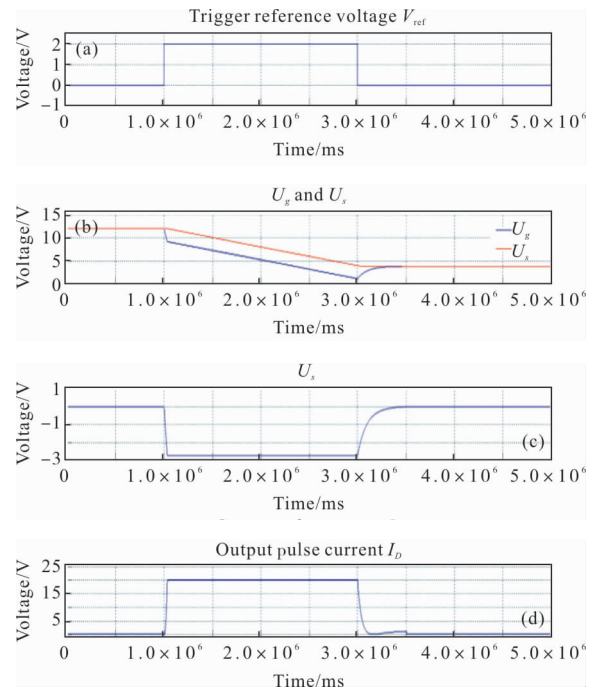
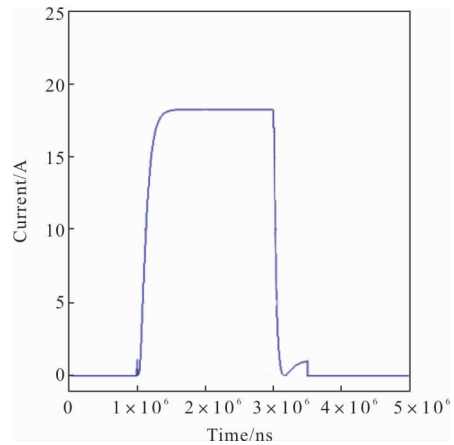


图 5 脉冲电流仿真结果

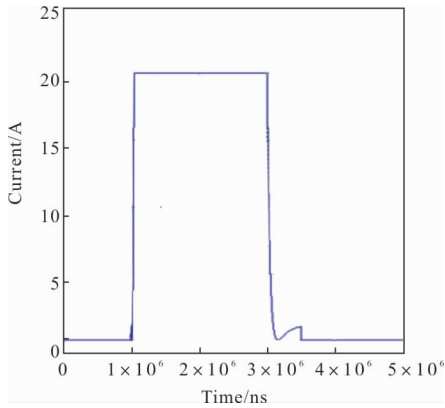
Fig.5 Simulation results of pulse current

图 6(a)显示了压摆率 $SR=300$ 时,脉冲电流的平均值为 18 A ;图 6(b)显示 $SR=1\text{ 000}$ 时,脉冲电流平均值为 20 A ;图 6(c)显示了压摆率过低使输出电流减小;图 6(d)显示了随着压摆率增大电流的不稳定度开始明显减小,最后基本不变;图 6(e)显示了压摆率增大电流上升时间开始明显减小,最后基本不变。



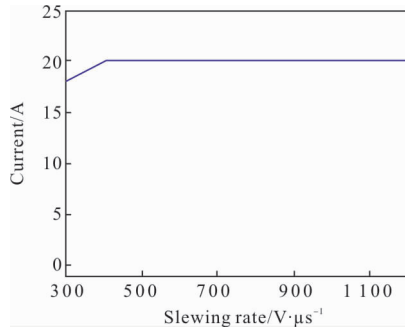
(a) $SR=300$ 输出脉冲电流

(a) $SR=300$ output pulse current



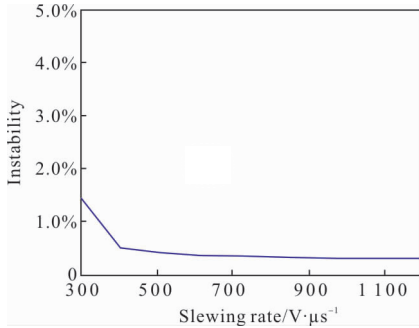
(b) SR=1 000 输出脉冲电流

(b) SR=1 000 output pulse current



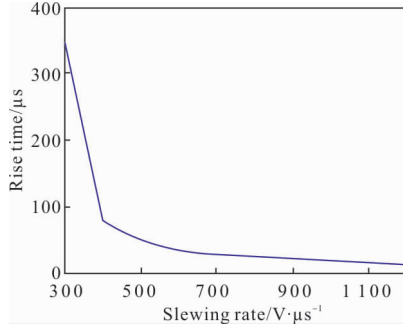
(c) 电流平均值随 SR 变化

(c) Current average varies with SR



(d) 电流不稳定性随 SR 变化

(d) Current instability varies with SR



(e) 电流上升时间随 SR 变化

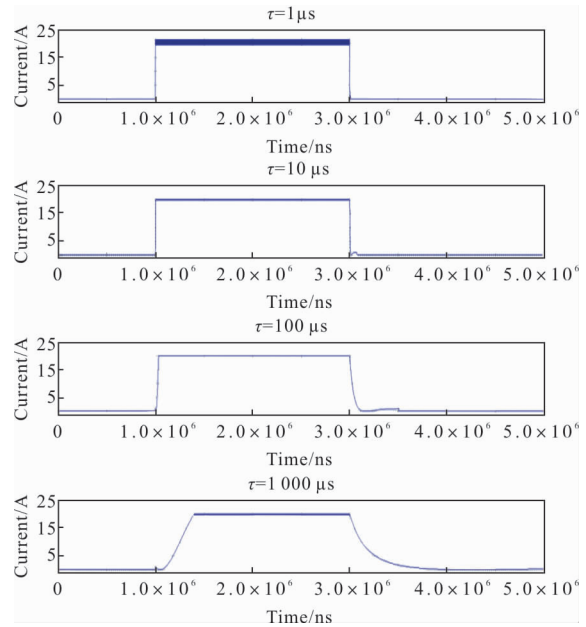
(e) Current rise time varies with SR

图 6 SR 对脉冲电流影响仿真结果

Fig.6 Simulation results of the effect of SR on pulse current

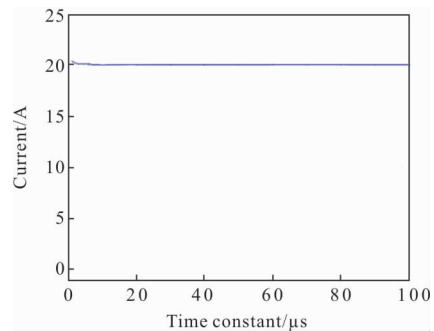
(2) 时间常数对电流平均值、不稳定性和上升时间的影响仿真

图 7(a)显示了时间常数分别为 1、10、100、1 000 μs 时的脉冲电流波形，时间常数影响脉冲电流的稳定度和上升下降时间；图 7(b)显示了随着时间常数增大，



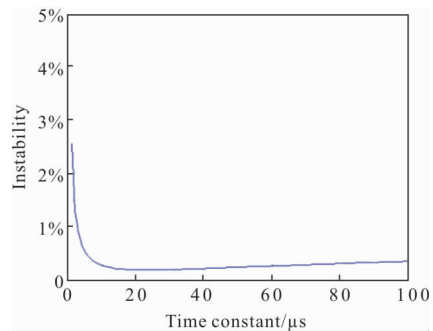
(a) 不同时间常数输出的脉冲电流

(a) Output pulse current with different time constant



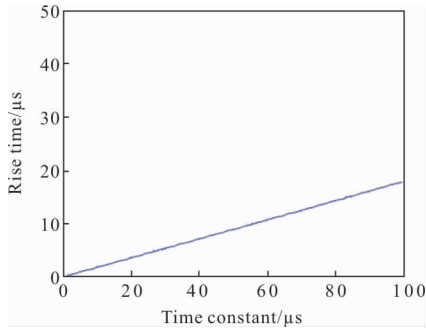
(b) 电流平均值随时间常数变化

(b) Average value of current varies with time constant



(c) 电流不稳定性随时间常数变化

(c) Current instability varies with time constant



(d) 电流上升时间随时间常数变化

(d) Current rise time varies with time constant

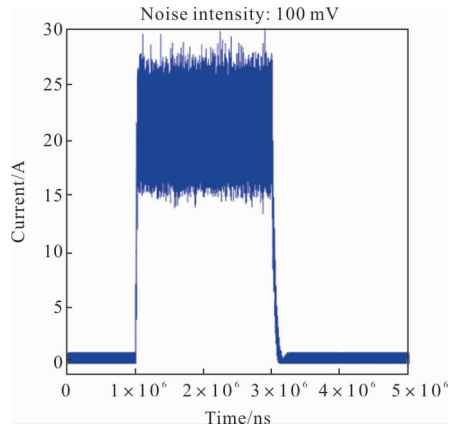
图 7 时间常数对脉冲电流影响仿真结果

Fig.7 Simulation results of the effect of time constant on pulse current

脉冲电流平均值基本不变;图 7(c)~(d)显示了随着时间常数增大,电流的不稳定度降低,但是电流的上升时间增大。

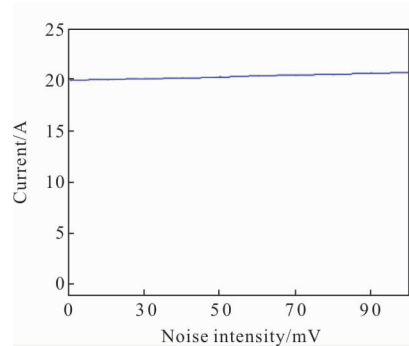
(3) 噪声对脉冲电流的影响

图 8(a)~(c)显示了噪声分别为 10、50、100 mV 时



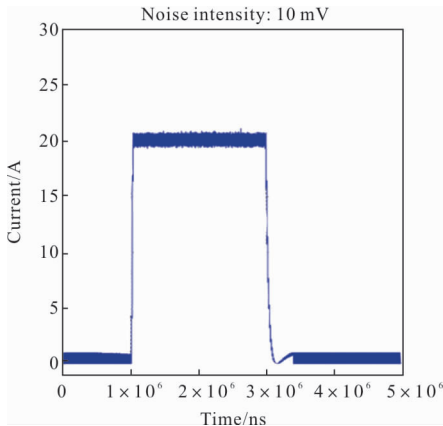
(c) 噪声为 100 mV 时的脉冲电流

(c) Pulse current when noise is 100 mV



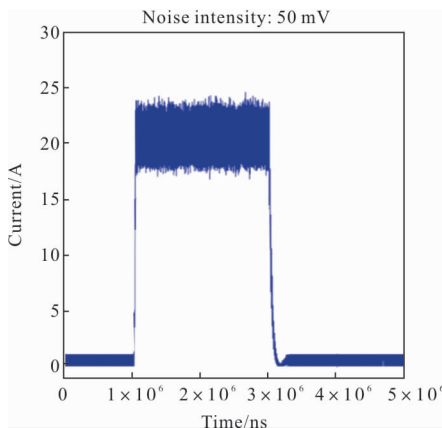
(d) 电流平均值随噪声强度变化

(d) Average value of current varies with the noise intensity



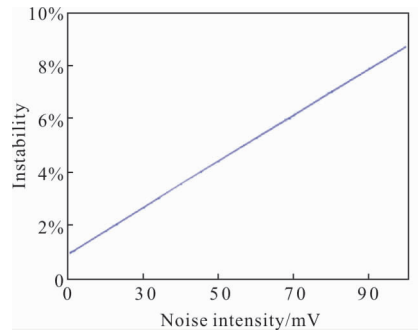
(a) 噪声为 10 mV 时的脉冲电流

(a) Pulse current when noise is 10 mV



(b) 噪声为 50 mV 时的脉冲电流

(b) Pulse current when noise is 50 mV



(e) 电流不稳定度随噪声强度变化

(e) Variation of current instability with noise intensity

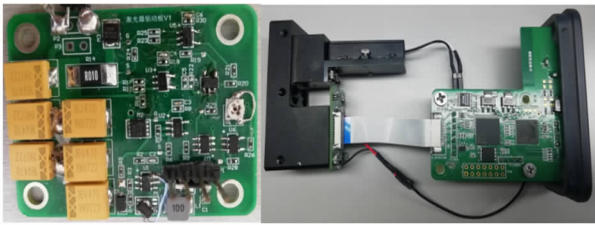
图 8 噪声对脉冲电流影响仿真结果

Fig.8 Simulation results of noise effect on pulse current

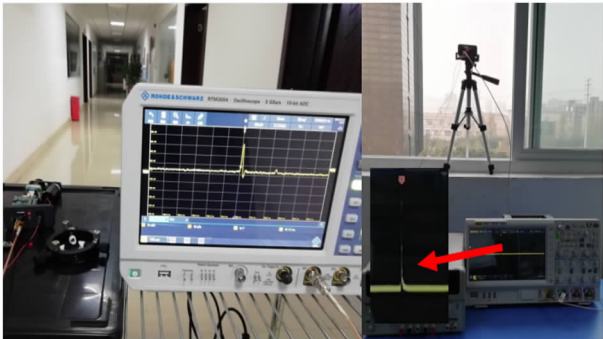
的脉冲电流;图 8(d)显示了随着噪声增大,电流平均值略微增大;图 8(e)显示了随着噪声增大,电流不稳定度逐渐增大。

2.3 电路测试

根据设计制作激光驱动电路与测试系统样机如图 9 所示。



(a) 激光驱动电路板 (b) 激光测距系统
(a) Laser drive circuit board (b) Laser ranging system



(c) 室内试验 (d) 室外试验
(c) Indoor test (d) Outdoor test

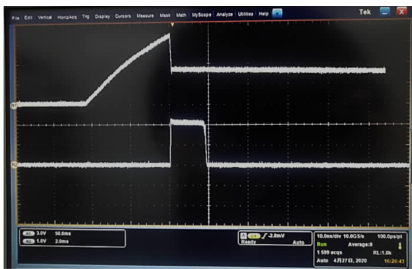
图 9 激光驱动与测距试验

Fig.9 Laser driving and laser ranging system

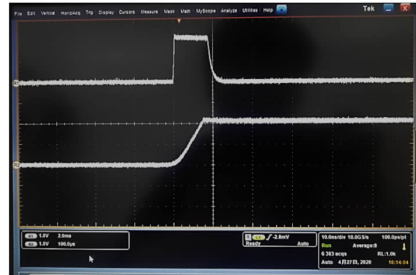
图 9(c)显示了室内测距试验回波探测信号,表明激光器正常发射激光;图 9(d)显示了探测到目标约为 2 km 的建筑物的回波信号。

为了进一步研究驱动电路的性能,电流通过 0.1 Ω 取样电阻转化为脉冲电压信号,输出脉冲用示波器观察波形,如图 10(a)~(d)所示。

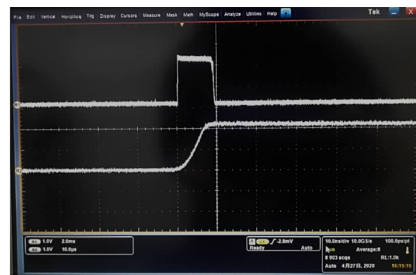
图 10(a)显示了充电电容在充电和放电过程的变化,以及对应输出的脉冲电压。图 10(b)和(c)分别显示了时间常数为 1 000 μs 和 100 μs 下的脉冲电压以及其上升时间。图 10(d)显示了时间常数分别为 1、10、100、1 000 μs 下的波形。可以看出测试结果和仿真结果基本一致,随着时间常数增大,上升时间增大,同时电流的稳定度提高。



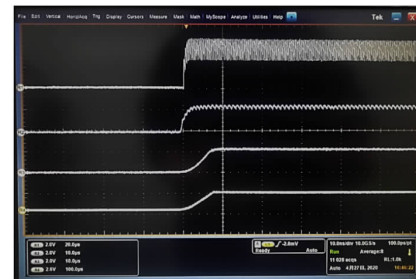
(a) 充电电容电压和输出脉冲电压
(a) Charging capacitance voltage and output pulse voltage



(b) $\tau=1\ 000\ \mu\text{s}$, 输出脉冲电压及上升时间
(b) $\tau=1\ 000\ \mu\text{s}$, output pulse voltage and rise time



(c) $\tau=100\ \mu\text{s}$, 输出脉冲电压及上升时间
(c) $\tau=100\ \mu\text{s}$, output pulse voltage and rise time



(d) 不同时间常数下的输出脉冲电压对比
(d) Comparison of output pulse voltage under different time constants

图 10 电路测试结果

Fig.10 Circuit test results

3 结论与展望

为了驱动阈值电流为 18 A 的固体脉冲激光器,文中设计了一种大电流、高稳定性脉冲恒流电路。通过构建该电路的数学模型,仿真分析了各元件参数对恒流源性能的影响,从而选择最佳的元器件参数。经过测试验证,该模型的仿真结果与电路测试结果基本一致,该电路最大能够输出 20 A,脉宽为 2 ms 的脉冲电流,稳定度约 99%,上升时间为 4 μs。该电路应用于脉冲激光测距系统中,驱动激光器发射激光,达到使用要求。

参考文献:

- [1] Yu Yanmei. Laser rangefinder and its development trend [J]. *Intelligence Command and Control System and Simulation Technology*, 2002(8): 19–21. (in Chinese)
- [2] Men Tao, Shen Zhao, Xu Rong, et al. Development status and trend of space target laser ranging technology [J]. *Laser and Infrared*, 2018, 48(12): 1451–1457. (in Chinese)
- [3] Zhang He, Qiao Chuan, Kuang Haipeng. Target location of airborne photoelectric imaging system based on laser ranging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27 (1): 8–16. (in Chinese)
- [4] Yu Kuanxin, Jiang Tieliang, Zhao Qida. Laser Principle and Laser Technology [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1998: 12–23. (in Chinese)
- [5] Liu Feng. Development and application of pulse semiconductor laser rangefinder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(2): 10–14. (in Chinese)
- [6] Li Dong, Ma Jiaju, Geng Hongwei. Design of high current pulse constant current source of semiconductor laser [J]. *Measurement and Control Technology*, 2012, 31(8): 5–8. (in Chinese)
- [7] Hua Chengying, Tong Shibai. Fundamentals of Analog Electronic Technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 71. (in Chinese)
- [8] Chen Yongchun. Matlab M Language Advanced Programming [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)