

文章编号: 1000-7032(2021)04-0510-08

## RLC 振荡的脉冲激光器驱动特性

李泽安<sup>1,2</sup>, 王玉冰<sup>1\*</sup>, 秦 莉<sup>1</sup>, 宁永强<sup>1</sup>, 王立军<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049; 3. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 在飞行时间测距(TOF)的脉冲激光雷达(lidar)中,激光器驱动十分重要,其性能直接影响激光雷达系统的作用距离、信噪比和虚警率等指标,是激光雷达的关键组成部分。本文在目前常见的激光器驱动电路模型基础上进行创新,在储能电容的充电电路中引入适当电感,形成电阻电感电容(RLC)二阶微分振荡电路,可以大幅度提高脉冲激光器的驱动电压,从而提高驱动电流,驱动激光器产生大功率、窄脉宽的激光。经过理论计算、软件仿真和实验验证,引入适当的电感可以将脉冲激光器的驱动电流提高85%以上,输出功率提高114%以上。

**关键词:** 激光雷达; 大功率; 窄脉宽; 微分振荡电路

中图分类号: TN952; TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200378

## On the Characteristics of Pulsed Laser Driver Based on RLC Oscillation

LI Ze-an<sup>1,2</sup>, WANG Yu-bing<sup>1\*</sup>, QIN Li<sup>1</sup>, NING Yong-qiang<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1,3</sup>(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China)

\* Corresponding Author, E-mail: wangyubing@ciomp.ac.cn

**Abstract:** The laser driver circuit is very important in time-of-flight lidar. Its performance directly affects many key system parameters such as detection range, signal-to-noise ratio and false alarm rate. This article innovatively introduces appropriate inductance in charging circuit, forming resistance, inductance and capacitance (RLC) second-order differential oscillation circuit, which can greatly increase the driving voltage of the pulse laser and thereby increasing the driving current that drives the laser to produce high-power, narrow-pulsewidth laser. Theoretical calculations, numerical simulations and experimental verification show that driving current of pulse laser can be increased for over 85%, and the output power is increased for over 114% as an appropriate inductor is introduced into the system.

**Key words:** lidar; high power; narrow pulse width; differential oscillator circuit

收稿日期: 2020-12-10; 修订日期: 2020-12-31

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104400); 国家自然科学基金(61934003); 吉林省科技发展计划(20200501007GX, 20200501008GX)资助项目

Supported by National Key R&D Program of China(2017YFB1104400); National Natural Science Foundation of China(61934003); Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan(20200501007GX, 20200501008GX)

## 1 引言

激光雷达是利用激光束对目标进行测量的一种遥感设备,在军事<sup>[1-2]</sup>、商用<sup>[3]</sup>和民用<sup>[4-5]</sup>等领域有着广阔的应用前景。特别是激光雷达作为遥感系统的重要传感器,在车辆自动驾驶系统中得到了广泛应用<sup>[4-5]</sup>。远距离测距的激光雷达主要采用飞行时间(TOF)测距原理。TOF是双向测距技术,脉冲激光器向目标发射连续脉冲,同时触发内部计时电路,计时器测量激光脉冲到达目标并返回接收器的时间,从而获得目标距离<sup>[6]</sup>。这就对激光器发射的脉冲信号有很高的要求:脉冲峰值功率尽可能大,从而实现更远的探测距离;脉冲宽度尽可能窄,从而实现更高的探测精度。发射机由驱动电路和激光器共同组成,驱动电路输出的脉冲电流驱动激光器产生脉冲激光。驱动电路的性能决定了激光脉冲的各项参数,例如,激光脉冲的峰值功率取决于脉冲峰值电流大小,激光脉冲的宽度取决于脉冲电流的宽度。驱动电路的性能直接影响着激光雷达系统的参数,是激光雷达系统的重要组成部分。脉冲激光器驱动电路形式多样,应用最广泛的是谐振电容放电激光器驱动电路。Glaser等<sup>[7]</sup>使用Ga<sub>N</sub>效应管产生峰值电流大于35 A、脉冲宽度小于4 ns的电流脉冲。张厚博等<sup>[8]</sup>利用MOSFET开关器件驱动激光器产生峰值功率80 W、脉冲宽度3.7 ns的激光。

虽然目前脉冲激光器的驱动电路性能优越,但是对电源电压要求高,通常脉冲激光器的驱动电压要数十伏<sup>[9-10]</sup>。在一些激光雷达系统中,电源电压难以达到驱动激光器的要求,最普遍的做法是利用变压电路升压<sup>[11-12]</sup>。变压器虽然能够提高电压,但是无疑增加了系统的体积和重量,增加了元器件成本,降低了激光雷达的便携性,且变压器在工作过程中会产生很强的电磁辐射,对附近的电子器件产生很大的电磁干扰。

本文对现有的脉冲激光器驱动电路模型<sup>[7,13-14]</sup>做出创新,在储能电容充电端串联适当电感,形成RLC二阶微分振荡电路,电容电压随时间振荡,选取合适的电感,使电容在电压振荡的最高点处放电,理论上能够将激光器的驱动电压翻倍,从而使驱动电流翻倍。Tina-ti软件仿真结果与理论计算结果基本吻合。最终进行实验测量,引入充电电感后,脉冲激光器的驱动电压提高

了87%,驱动电流提高了85%,输出功率提高了114%。本文提出的是一种提高脉冲激光器驱动电压的思想,不仅限于特定电路,在很多激光雷达系统中,可以通过这种方法设计驱动电路,提高脉冲激光器的输出功率。

## 2 激光器及驱动电路简介

激光器是利用受激辐射原理使光在增益介质中振荡发射激光的器件,具有体积小、重量轻、能量转换效率高的优点<sup>[15]</sup>。常见的激光器有普通半导体激光器、外腔半导体激光器、分布反馈半导体激光器和垂直腔面发射半导体激光器<sup>[16]</sup>等。激光器常见的封装类型有直插式封装<sup>[17-18]</sup>和蝶形封装<sup>[19-20]</sup>等,其中直插型封装会引入杂散电感<sup>[9]</sup>。杂散电感会降低驱动电流的峰值,增大脉宽,导致输出光功率下降、脉冲宽度大<sup>[9]</sup>。在封装过程中应尽量降低杂散电感引入量。

实验使用的激光器由滨松公司提供,如图1所示。该器件为直插封装类型,发射激光波长为905 nm。电流-功率关系如图2,典型脉冲电流35 A,脉冲功率100 W,激光发光面积为360 μm × 10 μm,主要用于激光雷达、危险检测系统。



图1 TO封装的激光器外形图

Fig. 1 Photograph of TO packaged laser

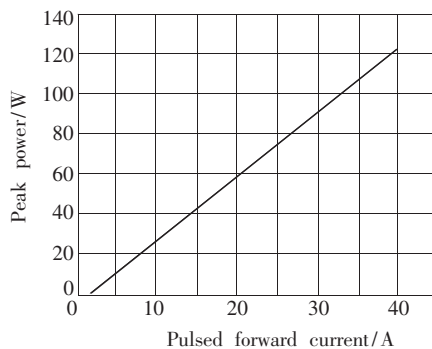


图2 激光器的I-P曲线

Fig. 2 I-P curve of laser

目前,常用的脉冲激光器驱动电路的简化模型<sup>[21]</sup>如图 3 所示,其中左侧回路是电路的充电回路,右侧回路是电路的放电回路。 $U$  是电源电压, $R$  是充电电路电阻, $C$  是储能电容,LD 是激光器, $L'$  是放电回路电感, $R'$  是放电回路电阻,SW 为高速开关。电路在充电时,SW 断开,储能电容充电;放电时 SW 闭合,储能电容储存的电荷完全释放,驱动激光器产生脉冲激光。

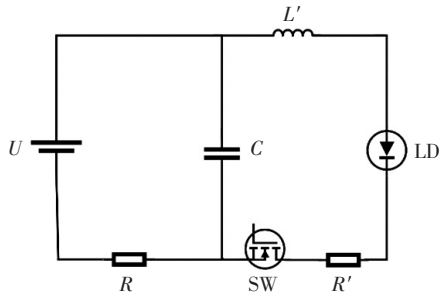


图 3 常见的脉冲激光器驱动电路模型

Fig. 3 Common drive circuit model of pulse laser

本文在传统驱动电路<sup>[22-24]</sup>的基础上做出创新,如图 4 所示,在驱动电路的充电端增加一只电感,这样在充电电路中有电阻、电容和电感,形成 RLC 二阶微分振荡电路。选取合适的电感  $L$  (下文称之为充电电感) 使得每次电容电压振荡的最高点处恰好 SW 开关闭合,理论上可以使脉冲激光器的驱动电压翻倍。与原电路相比只增加了一只电感,几乎不增重量,却能极大地提高激光器的输出功率。

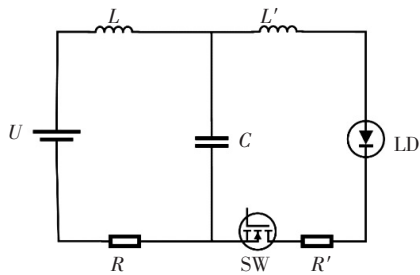


图 4 新型的脉冲激光器驱动电路模型

Fig. 4 Novel pulsed laser drive circuit model

### 3 理论分析

储能电容充电时的等效电路如图 5 所示,根据基尔霍夫定律,有

$$U = u_L(t) + u_R(t) + u_C(t), \quad (1)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}, \quad (2)$$

$$u_R(t) = i(t)R, \quad (3)$$

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}, \quad (4)$$

可以得到

$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = U, \quad (5)$$

这是一个关于  $u_C(t)$  的二阶常系数微分方程,通解为

$$u_C(t) = \exp\left(-\frac{a}{2}t\right) \left[ -\frac{c}{b} \cos\left(\frac{\sqrt{4b-a^2}}{2}t\right) + \frac{ac}{b\sqrt{4b-a^2}} \sin\left(\frac{\sqrt{4b-a^2}}{2}t\right) \right] + \frac{c}{b}, \quad (6)$$

其中,  $a = \frac{R}{L}$ ,  $b = \frac{1}{LC}$ ,  $c = \frac{1}{LC}U$ ,  $U$ ,  $u_L(t)$ ,  $u_R(t)$  和  $u_C(t)$  分别代表电源、电感  $L$ 、电阻  $R$  和电容  $C$  的电压。可以看出  $u_C(t)$  随时间振荡。令  $\frac{du_C(t)}{dt} =$

0, 得到  $t = \frac{2\pi}{\sqrt{4b-a^2}}$ , 为电容电压最高点的时刻,

此时  $u_C(t)$  在最大值。开关闭合的时刻为  $T$ , 令电容电压在振荡的最高点处恰好开关闭合, 即  $t = T$ , 根据  $R$ 、 $C$  可以计算出对应的  $L$ 。计算得

$$L \approx \frac{T^2}{\pi^2 C}, \quad (7)$$

$$u_{C_{\max}} = U \left\{ 1 + \exp\left[ -\frac{\pi \frac{R}{L}}{\sqrt{\frac{4}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2}} \right] \right\} \approx 2U, \quad (8)$$

$u_{C_{\max}}$  为电容两端的最大电压, 在  $\frac{R}{L}$  较小的情况下, 可以使激光器驱动电压从  $U$  提高到将近  $2U$ , 激光器的驱动电流和输出功率也近似翻倍。

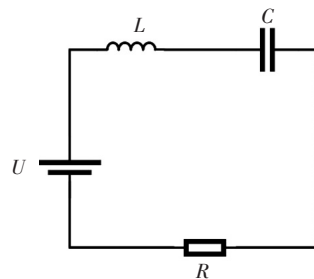


图 5 充电电路的等效模型

Fig. 5 Equivalent model of charging circuit

### 4 软件仿真

采用 Tina-ti 软件对电路进行仿真, Tina-ti 软

件是一个强大的仿真工具,它提供了 SPICE 的所有传统直流、瞬态和频率分析,具有广泛的后处理功能,适用于模拟电路和开关模式的电源电路的仿真,可以在最短的时间内启动并运行,能够轻松处理复杂的电路。

仿真电路如图 6,其中  $U$  是电源电压, $R$  是供电导线的电阻, $L$  是实验引入的电感, $L_x$  是驱动激光器的储能电感, $C$  是储能电容, $C_p$  是激光器封装引起的浮动电容, $L_{p+}$  是激光器封装引起的正极电感, $L_{w+}$  为键合线引入的电感, $L_{p-}$  为激光器封装引起的负极电感, $C_j$  为激光器的结电容, $R_d$  为激光器的串联电感, $R_1$  为限流电阻,SW 为 GaN 高速开关。

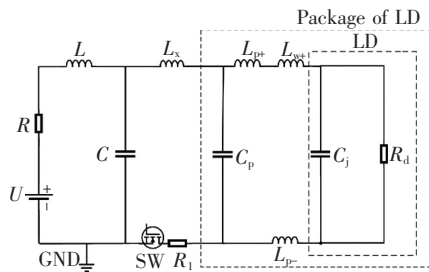


图 6 Tina-ti 软件仿真电路图

Fig. 6 Circuit diagram of Tina-ti simulation

### 4.1 充电电感对激光器脉冲电流的影响

取  $U=40\text{ V}$ ,  $R=1\ \Omega$ ,  $C=1\ \text{nF}$ ,  $L_x=3\ \text{nH}$ ,  $R_1=2\ \Omega$ ,  $C_p=600\ \text{fF}$ ,  $L_{p+}=4\ \text{nH}$ ,  $L_{w+}=300\ \text{pH}$ ,  $L_{p-}=6\ \text{nH}$ ,  $C_j=23\ \text{pF}$ ,  $R_d=200\ \text{m}\Omega$ , 脉冲重复频率为  $100\ \text{kHz}$ 。根据公式  $L \approx \frac{T^2}{\pi^2 C}$ , 理论上  $L$  选用  $10.1\ \text{mH}$  的电感可以使激光器的驱动电压最高,驱动电流最大。分别对  $U=40\ \text{V}$ ,  $L=0$ ,  $U=40\ \text{V}$ ,  $L=10.1\ \text{mH}$  和  $U=80\ \text{V}$ ,  $L=0$  三种情况进行仿真,结果如图 7。

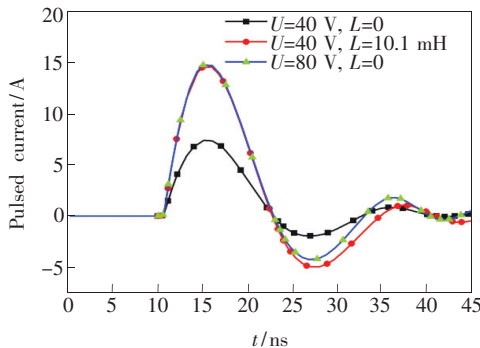


图 7 引入充电电感前后的电流仿真波形图

Fig. 7 Simulation waveform of current before and after introducing charging inductor

可以看出,  $U=40\ \text{V}$ ,  $L=10.1\ \text{mH}$  曲线与  $U=80\ \text{V}$ ,  $L=0$  曲线重合,电流峰值是  $U=40\ \text{V}$ ,  $L=0$  曲线的 2 倍,即在  $40\ \text{V}$  电压时引入适当电感,可以使脉冲电流翻倍,等效于原  $80\ \text{V}$  驱动电压的效果,与理论计算值吻合。

实际上,引入比计算值略大的电感同样能够起到很好的作用。图 8 展示了分别引入  $10.1\sim 15\ \text{mH}$  的电感,与原电路相比都能起到很好地提高脉冲电流的作用。根据公式 (7),电感的大小与电路的振荡周期并不是线性关系,振荡周期与电容的初始电压也并非线性关系,所以电感的选取可以比理论计算值大一些,这就为实际电路的设计提供了很大的选择空间。另外,在图中可以看出,供电电路中电感的引入并不会增大脉冲电流的脉宽,不会产生副作用。

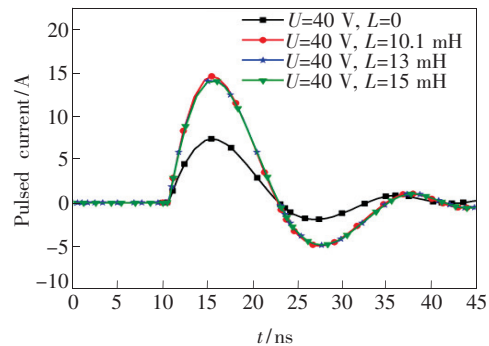


图 8 引入不同充电电感的电流仿真波形图

Fig. 8 Current simulation waveforms of introducing different charging inductances

### 4.2 封装电感不同的激光器引入充电电感后的影响

对于不同类型的激光器,以及同种类型但封装技术不同的激光器,杂散电感的值通常不同,杂散电感越大,脉冲电流的峰值越小,脉宽越大<sup>[9]</sup>。为了探究供电电感对不同封装类型的激光器驱动电流的提升效果,针对不同封装电感的激光器进行仿真,结果如图 9,其中  $L' = L_{p+} + L_{p-} + L_{w+} + L_x$ , 为放电回路的总电感。可以看出,激光器封装电感会对脉冲电流峰值产生很大影响,随着封装电感的增大,脉冲电流峰值急剧下降,且脉宽增大,二次振荡现象愈发明显,对激光雷达的探测距离和精度产生很大影响。在应用中应尽量降低封装电感的引入,使用小封装电感的激光器。电流脉冲宽度与回路总电感的值有关,与充电电感无关。且对于不同封装电感的激光器,引入充

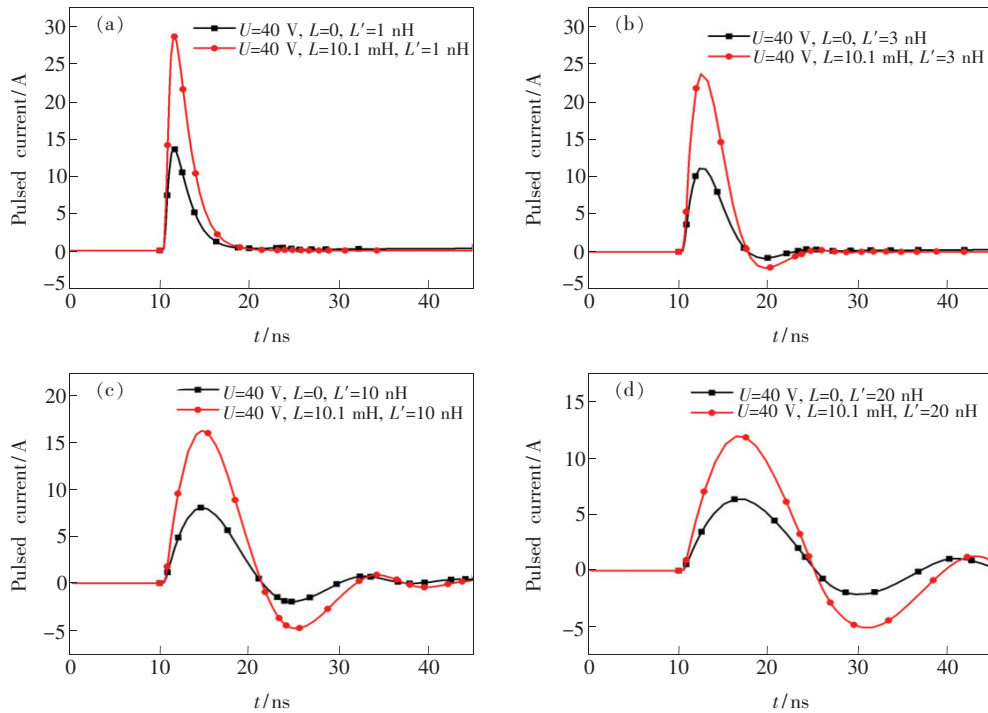


图 9  $L'$ 取不同值时引入电感前后的电流仿真波形图。(a) $L' = 1$  nH;(b) $L' = 3$  nH;(c) $L' = 10$  nH;(d) $L' = 20$  nH。  
 Fig. 9 Current simulation waveforms before and after introducing inductance when  $L'$  takes different values. (a) $L' = 1$  nH. (b) $L' = 3$  nH. (c) $L' = 10$  nH. (d) $L' = 20$  nH.

表 1 不同封装电感的激光器电路中引入充电电感后电流的放大效率

Tab.1 Current amplification efficiency of laser circuits with different package inductances after introducing charging inductance

放电回路电感 $L'/\text{nH}$	未引入充电电感的峰值 电流 $I/\text{A}$	引入充电电感后的峰值 电流 $I'/\text{A}$	电流放大效率
1	13.62	28.69	111%
3	11.05	23.30	111%
10	7.91	16.21	105%
20	6.48	11.97	85%

电电感后均能起到很好的提升脉冲电流的效果。

虽然充电电感对于不同封装电感的激光器都有放大驱动电流的效果,但是放大效率却并不相同,如表 1 所示。可以看出随着放电回路电感的增大,充电电感对于脉冲电流的提升效率会下降。在应用中尽量选取封装电感较小的激光器,充电电感对于脉冲电流的放大效率更高。

### 4.3 不同结电容的激光器在引入充电电感后的影响

对于不同类型的激光器,结电容的值通常不同,为了探究引入的电感对不同类型脉冲激光器驱动电流的提升效果,针对不同大小结电容的脉冲激光器进行仿真,结果如图 10。可以看出,对于不同结电容的激光器,其仿真曲线几乎重合,在充电电路中引入的电感都能大幅度提高激光器的驱动电流。

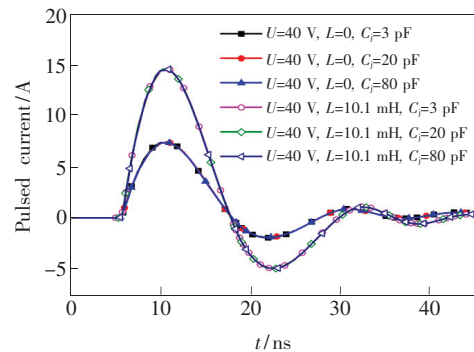


图 10 不同结电容的激光器驱动电路引入充电电感前后仿真波形图

Fig. 10 Simulation waveforms of laser driving circuit with different junction capacitance before and after introducing charging inductor



#### 4.4 充电电感的内阻对激光器输出功率的影响

在实际应用中,电感除了表现出感性之外,自身存在内阻,尤其对于感值大、封装体积小的电感来说,其内阻是不可忽略的重要参数。为了探究不同电感的内阻对于激光器的影响,针对不同内阻大小的电感的供电电路进行仿真,结果如图 11 所示,其中  $R_L$  是充电电感的内阻。可以看出,只要电感的感值恰当,不同内阻的仿真曲线重合,基本不会影响激光器的输出功率。

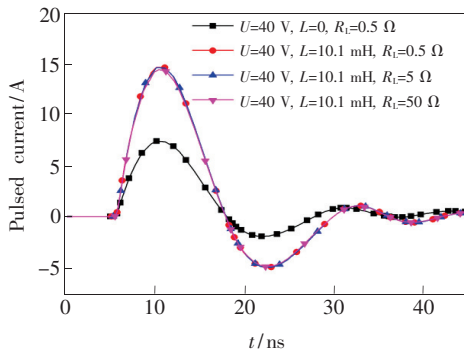


图 11 充电电感的内阻对脉冲电流的影响

Fig. 11 Influence of internal resistance of the charging inductor on the pulse current

### 5 实验结果

根据仿真的电路图制作激光器的驱动电路,分别在不同电源电压下引入 10.1 mH 的充电电感后测量激光器的输出功率。实验测量出在该功率下不加电感时所需的电源电压,计算出引入电感后的放大效率。结果如表 2,可以看出,引入的电感能够将取得电压提高 87% 以上。

表 2 不同电源电压下引入充电电感后电压的放大效率

Tab. 2 Voltage amplification efficiency after introducing charging inductor under different power supply voltages

电源电压 $U/V$	引入适当电 感后激光器 功率 $P'/W$	不加电感 所需电源 电压 $U'/V$	电压 放大效率
25.0	13.57	46.8	87.2%
30.0	17.62	56.5	88.3%
35.0	21.07	66.0	88.6%
40.0	23.69	75.0	87.5%

表 3 为在 40 V 驱动电压下,充电电路引入不同的充电电感后的脉冲电流测试结果。可以看

出,引入 10.1 ~ 15 mH 充电电感均能起到很好的提升脉冲电流和脉冲功率的效果,对电感感值精度要求不高,在实际应用中可以有很大的选择空间。

表 3 引入不同充电电感后脉冲电流和功率的放大效率

Tab. 3 Amplification efficiency of pulse current and power after introducing different charging inductances

充电电感 $L/mH$	峰值电流 $I'/A$	电流放大 效率	峰值功率 $P'/W$	功率放大 效率
0	4.69	0	11.1	0
10.1	8.71	85.7%	23.8	114.4%
13	8.67	84.9%	23.6	112.6%
15	8.64	84.2%	23.3	110.0%

对比图 8 的仿真结果与表 3 的实验结果可以看出,实验中激光器的峰值电流约为仿真结果的 60%。造成这种结果的主要原因有两个:首先, Tina-Ti 软件是在理想条件下对电路仿真,未考虑激光器封装过程中的杂散电阻,而杂散电阻的存在会对脉冲峰值电流产生很大影响<sup>[9]</sup>;其次,在仿真电路中各元器件的参数是理想恒定值,而实际各元器件在高电压和大电流的作用下,属性参数值都会发生改变,因此实验测量与仿真结果相比产生较大偏差。

由于激光器自身的属性,每个激光器都有阈值电流。只有驱动电流大于阈值电流时才会发光,因此激光器的输出功率与驱动电流并非严格的线性关系,引入电感后的激光器功率放大效率总是大于电流放大效率。

在电源电压 40 V 时,采用光电探测器和示波器测量引入充电电感前后的脉冲波形,结果如图 12。可以看出,引入电感后,激光脉冲的波形基本

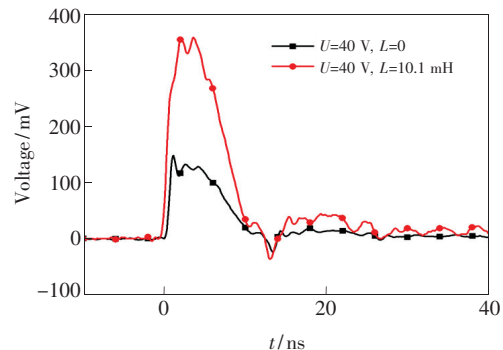


图 12 引入充电电感前后的脉冲波形图

Fig. 12 Waveform of laser pulse before and after introducing charging inductor

未发生变化,没有产生新的毛刺或杂波,脉冲的宽度也未展宽。充电电感的引入只是提升脉冲的功率,并不会对脉冲波形产生不良影响。图 12 为仅用光电探测器测量的脉冲波形,手持光电探测器不能准确测量脉冲功率,图中脉冲的峰值不具有参考价值,脉冲功率用功率计测量。

## 6 结 论

本文在传统的脉冲激光器驱动电路模型上做出创新,在充电电路中引入适当电感,在充电端形成微分振荡电路,能够将脉冲激光器的驱动电流

提高 85%,输出功率提高 114%。理论计算、软件仿真与实验测量结果基本吻合。实现过程简单,成本低廉,且对引入的电感精度要求低(引入 10.1 ~ 15 mH 的电感都能起到很好的提高脉冲电流的效果),在很大程度上能够解决供电电源达不到激光器所需电压的问题。供电端电感的取值不受激光器封装类型的影响,鲁棒性好,适用于不同的激光器。本文提出的是一种思想,不仅限于特定电路。对于一些成型的电路也能外加电感,提高激光器的输出功率,在脉冲激光雷达领域有着广阔的应用前景。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] ZIMMERMANN M, GESTWA M, KÖNIG C, *et al.*. First results of LiDAR-aided helicopter approaches during NATO DVE-mitigation trials [J]. *CEAS Aeronaut. J.*, 2019, 10(3):859-874.
- [ 2 ] KECHAGIAS-STAMATIS O, AOUF N, RICHARDSON M A. 3D automatic target recognition for future LIDAR missiles [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2016, 52(6):2662-2675.
- [ 3 ] TRAN A, JUANG J. Lidar stereo fusion live action 3D model video reconstruction for six degrees of freedom 360° volumetric virtual reality video:US,9369689 [P]. 2016-06-14.
- [ 4 ] LIN T C, TAN D S, TANG H L, *et al.*. Pedestrian detection from lidar data via cooperative deep and hand-crafted features [C]. *Proceedings of the 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing, Athens*, 2018:1922-1926.
- [ 5 ] HECHT J. Lidar for self-driving cars [J]. *Opt. Photonics News*, 2018, 29(1):26-33.
- [ 6 ] LIU J Y, SUN Q, FAN Z, *et al.*. TOF lidar development in autonomous vehicle [C]. *Proceedings of the 2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference, Shenzhen*, 2018:185-190.
- [ 7 ] GLASER J. High power nanosecond pulse laser driver using an GaN FET [C]. *Proceedings of the PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg*, 2018:1-8.
- [ 8 ] 张厚博, 王晓燕, 崔璐, 等. 面向车载激光雷达光源应用的窄脉冲驱动技术 [J]. *电子测试*, 2020(9):8-11.  
ZHANG H B, WANG X Y, CUI L, *et al.*. The short pulse driving technology for vehicle lidar light source application [J]. *Electron. Test*, 2020(9):8-11. (in Chinese)
- [ 9 ] 颜颖颖, 陈志文, 邱剑, 等. 封装对大功率 VCSEL 窄脉冲发光特性的影响 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8):0814001-1-8.  
YAN Y Y, CHEN Z W, QIU J, *et al.*. Effect of package on luminescence characteristics of high-power VCSEL with narrow pulse [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2020, 40(8):0814001-1-8. (in Chinese)
- [ 10 ] 赵双全. 可调谐皮秒染料激光器的腔倒空器驱动器 [J]. *光学精密工程*, 1996, 4(1):15-20.  
ZHAO S Q. Design or driver or cavity dumper for tunable picoseconde pulsed dye laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(1):15-20. (in Chinese)
- [ 11 ] 张哲亮. 大功率半导体激光器驱动电源的研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2018.  
ZHANG Z L. *Research on High-power Semiconductor Laser Driving Supply* [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [ 12 ] WANG H Y, HONG J, HE A F, *et al.*. Research on laser detonation pulse circuit with low-power based on super capacitor [C]. *Proceedings of 10710, 2017 Young Scientists Forum, Shanghai*, 2018:1071042.
- [ 13 ] LIERO A, KLEHR A, HOFFMANN T, *et al.*. GaN laser driver switching 30 A in the sub-nanosecond range [C]. *Proceedings of the 2016 46th European Microwave Conference, London*, 2016:460-463.
- [ 14 ] 陈彦超, 冯永革, 张缺兵. 用于半导体激光器的大电流纳秒级窄脉冲驱动电路 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11):

- 3145-3151.
- CHEN Y C, FENG Y G, ZHANG X B. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11):3145-3151. (in Chinese)
- [15] 丛梦龙, 李黎, 崔艳松, 等. 控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1629-1636.
- CONG M L, LI L, CUI Y S, *et al.*. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1629-1636. (in Chinese)
- [16] 李志永, 谭荣清, 柯常军, 等. 碱金属激光器在 SERF 原子磁力计泵浦领域的应用前景 [J]. *科技导报*, 2016, 34(23):99-105.
- LI Z Y, TAN R Q, KE C J, *et al.*. Prospects of diode pumped alkali lasers' application to the pumping of atomic magnetometer [J]. *Sci. Technol. Rev.*, 2016, 34(23):99-105. (in Chinese)
- [17] WACLAWIK B. Multi-wavelength laser diode package arrangement; US, 20170040768 [P]. 2017-02-09.
- [18] SCHRENK B, KARINOU F. A coherent homodyne TO-Can transceiver as simple as an EML [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2019, 37(2):555-561.
- [19] YANG H, YANG M Q, ZHAO Y, *et al.*. Butterfly packaged ultra-narrow linewidth single frequency teardrop laser diode [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2017, 29(18):1537-1539.
- [20] MAHMOOD B, GARRY S, MATHIEU F, *et al.*. High-power Distributed Feedback Semiconductor Lasers Operating at 2.05  $\mu\text{m}$  Range [R]. NASA: Microdevices Laboratory, 2016.
- [21] 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)
- [22] HALLMAN L, HUIKARI J, KOSTAMOVAARA J. A high-speed/power laser transmitter for single photon imaging applications [C]. *Proceedings of the 2014 IEEE SENSORS, Valencia*, 2014:1157-1160.
- [23] WEN S C, WANG M, XIE J, *et al.*. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser diode [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2019, 61(4):867-872.
- [24] GLASER J S. Kilowatt laser driver with 120 A, sub-10 nanosecond pulses in < 3 cm using an GaN FET [C]. *Proceeding of the 2018 International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Shanghai, China*, 2018:1-6.



李泽安(1996 -),男,河北衡水人,硕士研究生,2018年于东南大学获得学士学位,主要从事激光雷达的研究。

E-mail: 2477278117@qq.com



王玉冰(1989 -),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2017年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事激光雷达的研究。

E-mail: wangyubing@ciomp.ac.cn