

激光与光电子学进展

窄脉宽大电流半导体激光器驱动电路研究

杜建艳, 赵毅强*, 叶茂, 林元琦, 郑肖肖

天津大学微电子学院, 天津 300072

摘要 激光雷达被广泛应用在无人驾驶、测量测绘等领域, 为降低功耗、成本和体积, 脉冲式半导体激光器成为激光驱动电路的首选。在此背景下, 以电感为储能元件对一种窄脉宽大电流半导体激光驱动电路进行了优化设计。在详细介绍驱动电路的工作原理的基础上, 重点研究了储能电感值大小与电路功耗的影响关系。运用 ORCAD PSPICE 仿真软件建立了驱动电路仿真模型, 总结出影响脉冲电流的脉宽、峰值和波形振荡的主要因素。测试表明, 在电路重复频率为 10 kHz 的条件下, 储能电感功率损耗为 59 mW, 驱动电路的脉宽为 3.8 ns, 上升沿为 3.5 ns, 下降沿为 3.7 ns, 峰值电流为 132 A, 激光器输出峰值光功率约为 326 W。

关键词 激光光学; 窄脉宽; 大电流; 半导体激光器; 驱动电路; 储能电感

中图分类号 P228.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114008

Study on Driving Circuit of Narrow Pulse Width and Large Current Semiconductor Laser

Du Jianyan, Zhao Yiqiang*, Ye Mao, Lin Yuanqi, Zheng Xiaoxiao

School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Laser radar is widely used in unmanned driving, surveying, and mapping, etc. In order to reduce power consumption, cost, and volume, pulsed semiconductor laser has become the first choice of laser drive circuit. Under this background, an optimal design of narrow pulse and large current semiconductor laser drive circuit is completed with inductor as energy storage element. Based on the working principle of the driving circuit in detail, the influence relationship between the value of the energy storage inductor and the power consumption of the circuit is emphatically studied. The driving circuit simulation model was established by using ORCAD PSPICE simulation software, and the main factors affecting the pulse width, peak value, and wave oscillation of the pulse current were summarized. The test results show that the power loss of the energy storage inductor is 59 mW, the pulse width of the driving circuit is 3.8 ns, the rising edge is 3.5 ns, the falling edge is 3.7 ns, the peak current is 132 A, and the peak optical power of the laser output is about 326 W at 10 kHz.

Key words laser optics; narrow pulse width; large current; semiconductor laser; drive circuit; energy storage inductor

1 引言

半导体激光器因具有体积小、成本低、转换效

率高、可靠性高等优点, 被广泛应用于激光通信、激光测距和激光引信等领域。现如今激光雷达技术在无人驾驶汽车、测量测绘等领域也逐渐兴起^[1]。

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-04-22

基金项目: 广西创新驱动发展专项(18118038)

通信作者: *yq_zhao@tju.edu.cn

因此,近年来,以半导体激光器为发射光源的激光雷达探测系统逐渐成为了科研人员的研究热点。在实际的激光雷达探测系统中,测量精度、测量距离、抗干扰能力和低功耗等性能都取决于半导体激光器发射的激光脉冲质量。其激光脉冲的上升时间与下降时间决定系统测量精度,特别是上升时间越短越有利于提高测量精度。激光脉冲的峰值功率决定了最大可测量的范围,输出峰值功率越高测量范围越大。脉冲宽度决定接收信号的信噪比,脉冲宽度越窄,信噪比越高^[2]。而半导体激光器发射的激光脉冲是由激光驱动电路产生的电脉冲直接调制得到的,即半导体激光器脉冲性能取决于激光驱动电路调制的电脉冲质量,因此,设计一款窄脉冲大电流陡上升沿的激光驱动电路是激光雷达应用中的一项极其关键的技术。

多年前国外相关技术的研究中脉冲驱动电流已达几十到上百安培,脉冲宽度达纳秒量级^[3]。不仅提前实现了商业变现,而且在最新研究方面,Glaser等^[4]设计出一种采用氮化镓功率晶体管为开关器件的高功率纳秒脉冲激光驱动电路,使得发射出的激光脉冲宽度小于4 ns。Vainshtein等^[5]也于2019年设计出一种由优化的雪崩晶体管、电容器和晶体管芯片组成的微型高功率纳秒激光二极管发射器,将激光输出的峰值功率提高到180 W。相比之下,国内在此研究领域起步比较晚,大多数驱动电流只有几安培到几十安培,脉宽大多在10 ns左右,峰值功率在几十瓦量级,并且很少到达上百瓦^[6-8]。另一方面,对于驱动电路结构设计来说,设计人员通常采用独立的高压供电模块,如高压芯片、高压电源、变压器等单元,它们的引入不仅会增加电路的体积和成本,还会引发电路功耗等方面的问题^[9]。

基于上述分析,本文紧密围绕实现高功率窄脉

宽的激光脉冲输出的关键技术展开研究^[10-11]。在研究过程中,利用电感元件的储能特性设计了升压电路,同时利用电容储能特性实现能量压缩技术,最终半导体激光器驱动电路发射的激光脉冲具有功率高、脉宽窄、上升沿陡的特点。

2 驱动电路的系统架构

半导体激光器发射的光脉冲是由驱动电路产生的电脉冲直接调制得到的,其驱动电路的主体结构主要包括信号发生电路、开关电路、升压电路、储能电路、保护电路以及供电电源,如图1所示。其信号产生电路由现场可编程门阵列(FPGA)提供,根据探测系统对激光发射频率的要求,产生一定的脉冲信号,此信号经过开关电路,同时升压电路在一定时间内获取能量并对后级储能电路蓄能,然后经过一段时间内储能电路平稳地积累能量,最后信号产生模块FPGA产生所需的放电使能信号使开关电路导通,储能电路开始放电,使得能量通过开关电路和半导体激光器负载瞬时快速释放而产生激光脉冲。保护电路用来保护半导体激光器,防止被过冲电流击穿而损坏。根据脉冲式激光雷达探测系统对探测距离、精度等方面的要求,激光探测系统驱动电路设计指标包含的内容主要为脉冲峰值电流、脉冲峰值功率、脉冲宽度、重复频率、脉冲上升沿时间和下降沿时间。

3 驱动电路结构设计

3.1 驱动电路原理分析

激光驱动电路利用电感和电容的特性实现了磁能与电能之间的转换,其电感根据电磁感应原理,即当电感线圈有电流通过时,周围会产生磁场,当电流发生变化,其磁场也相应的变化,此变化的

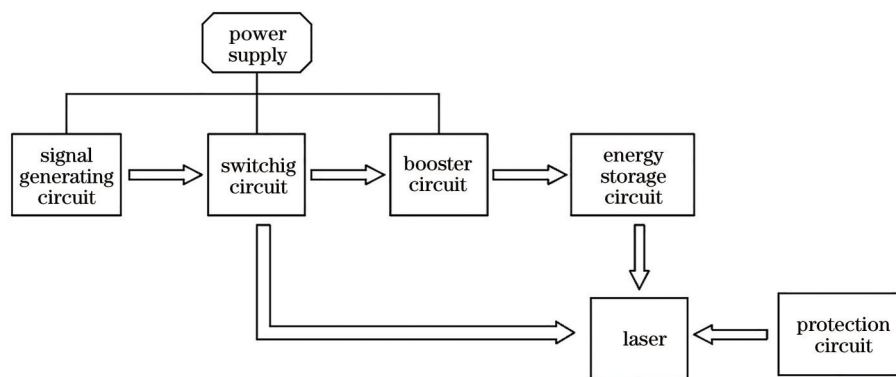


图1 驱动电路系统框图

Fig. 1 System block diagram of drive circuit

磁场使得电感线圈产生感应电动势(V'_{L_1})。图 2 为驱动电路原理结构图。 V_{cc} 为直流电源, M_1 、 M_2 是功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)开关, L_1 为储能电感, C_1 为储能电容, R_1 为取样电阻, 通过测量 R_1 两端的电压峰值, 可计算出流过激光器的电流脉冲峰值大小。 D_1 、 D_2 均为二极管。 D_1 作用是防止电流回流, 也称为续流二极管。 D_2 作用是消除激光器两端的反向过冲, 保护半导体激光器。 U_1 为开关驱动芯片, 用来提高 M_2 的开启速度。在电路设计优化中, 本文采用 FPGA 为开关触发信号产生器件, 运用 Verilog 语言描述触发信号计数器模块, 通过外部编码开关来调整触发信号的频率控制单元以实现激光脉冲重复频率连续可调的特点。其产生的触发信号有 Pulse_1 和 Pulse_2, 均为两个独立的高低电平, 当输入高电平时开关导通, 当输入低电平时开关断开。在电路通电后, 触发 Pulse_1 输入高电平, Pulse_2 则输入低电平, 相对应的 M_1 导通, M_2 断开, 形成回路(a→b→c), 此时通过电感的电流是从零逐渐增大的过程, 从而电感两端电压方向与原来方向相同, 在电路工作为理想状态下, 由基尔霍夫电压定律方程可知,

$$V_{L_1} = V_{cc}, \quad (1)$$

式中: V_{L_1} 为电感电压; V_{cc} 为直流电源电压。即 V_{L_1}

大小等于 V_{cc} 。经过一段时间后, 触发信号 Pulse_1、Pulse_2 均输入低电平, 相对应的 M_1 、 M_2 均断开, 形成新的回路(a→b→d→e→f), 在这瞬间变化的过程中, 通过电感电流开始从大到小变化, 从而电感两端产生一定的 V'_{L_1} , 用公式可表示为

$$V'_{L_1} = L_1 \frac{\Delta i_{L_1}}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中: $\frac{\Delta i_{L_1}}{\Delta t}$ 为电路中电感电流变化率; Δi_{L_1} 为电感电流变化量; Δt 为工作时间变化量。 V'_{L_1} 大小与 M_1 导通时间有关, 且 V'_{L_1} 方向与原 V_{L_1} 方向相反, 对该回路应用基尔霍夫定律方程, 得

$$V_C = V_{cc} + V'_{L_1} = V_{cc} + L_1 \frac{\Delta i_{L_1}}{\Delta t}, \quad (3)$$

可知, 电容两端电压(V_C)大小相当于是电感产生的 V'_{L_1} 与 V_{cc} 叠加的结果, 即在 a→b→d→e→f 回路中, 相当于电感产生的高压通过 D_1 对 C_1 蓄能, 使得电容电压由 0 到 V_C 变大。再经过一段时间, 触发信号 Pulse_1 输入低电平, Pulse_2 输入高电平, 相对应的 M_1 开关断开, M_2 开关导通, 形成新的回路(e→d→g→h→f), 此时储能电容开始放电, 瞬间产生激光脉冲。其中箭头代表回路电流方向, 电路经过三个阶段变化过程后, 完成单周期循环。

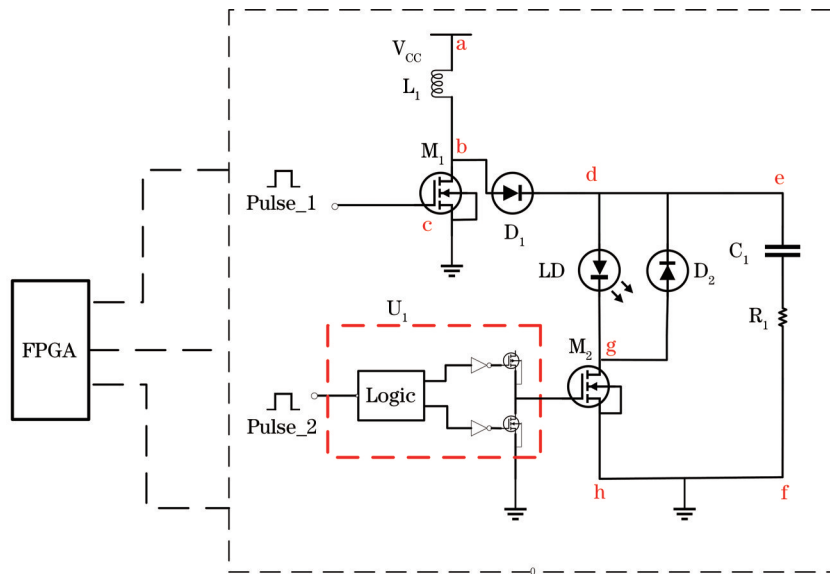


图 2 驱动电路原理结构

Fig. 2 Principle structure of driving circuit

通过上述分析可知, 在整个电路工作过程中, 电感蓄能与电容放电是不同步的, 即在单周期内, 电感电流处于非连续工作模式, 如图 3 所示, $0 \sim t_1$ 为

电感蓄能阶段 (t_{on}), $t_1 \sim t_2$ 为电感释放能量阶段 (t_{off}), $t_2 \sim T_s$ 是储能电容放电阶段, T_s 指整个电路周期。根据电感的伏秒平衡原理, 即经过电感电流的

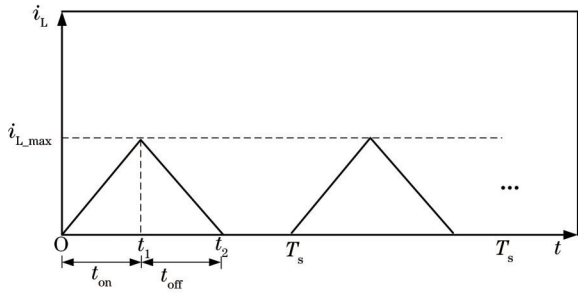


图 3 电感电流非连续工作模式

Fig. 3 Inductance current discontinuous operation mode

增量与电感电流的减少量相等,推导出驱动电路的升压关系,

$$V_c = V_{cc} \times \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}}\right). \quad (4)$$

可以看出,电容两端电压 V_c 由直流电源和电感蓄放能的时间决定,而电感的蓄放能时间的大小与电感电流、电感量大小有关。因此为获取高能量激光脉冲,应尽可能提高电容两端的电压。但电容两端电压不能任意大,需考虑 D_1 和 MOSFET 开关管漏源端反向耐压值的大小,因此在保证电路元器件的正常使用寿命下,应合理控制电容两端电压大小,

3.2 驱动电路储能电感器件的关键性分析

储能电感是该驱动电路结构的能源元件也是电路的核心器件,其性能特性将直接影响电路的性能指标。实际的电感器件存在着直流电阻,因此便成为增加电路功耗的主体部分。现如今,低功耗设计是电路设计的重要方面。为了实现驱动电路功耗最小化,对电感器件进行关键性分析。基于上述

分析,电感工作在非连续模式,在 $a \rightarrow b \rightarrow c$ 中,电感电流可表示为

$$i_{L_1}(t) = \frac{V_{cc}}{R'} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{on}}{\tau}\right)\right], \tau = \frac{L_1}{R'}, \quad (5)$$

$$t_{on} = -\frac{L_1}{R'} \ln\left(1 - \frac{i_{L_1} \times R'}{V_{cc}}\right), \quad (6)$$

式中: R' 为电感回路总电阻。则电感能量 (W) 为

$$W = \frac{1}{2} L_1 i_{L_1}^2(t) = \frac{1}{2} L_1 \left\{ \frac{V_{cc}}{R'} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{on}}{\tau}\right)\right] \right\}^2, \quad (7)$$

式中: τ 为时间常数。基于上式数学模型,仿真分析如图 4(a) 所示,清楚地可以看出电感量大小与电感蓄能时间以及回路电流三者的关系。一方面,当流过电感电流一定时,为了使电感获得高能量,则需要使电感量值尽量大,而此时电感需要的蓄能时间就越长。另一方面,当电感量一定时,为了使电感获得高能量,则需通过增加电感的蓄能时间使流过电感电流增大。其中蓄能时间就是 M_1 的导通时间,流过电感的电流就是 M_1 的漏极电流。本文结合开关损耗模型分析^[12-14],仿真出 MOSFET 开关功耗与漏极电流和开启时间的变化关系如图 4(b) 所示,可以看出开关损耗与导通时间和漏极电流密切相关。因此,电感电流和开关导通时间的变大将会增大 M_1 导通损耗,且漏极电流的增大相比导通时间的增大对电路功耗的影响更严重些。同时该电感支路电流太大很可能出现电感磁饱和现象,而失去电感储能特性,影响电路的正常工作。因此为了延长电路元器件的寿命且降低电路功率的损耗,需控制电感电流的大小。

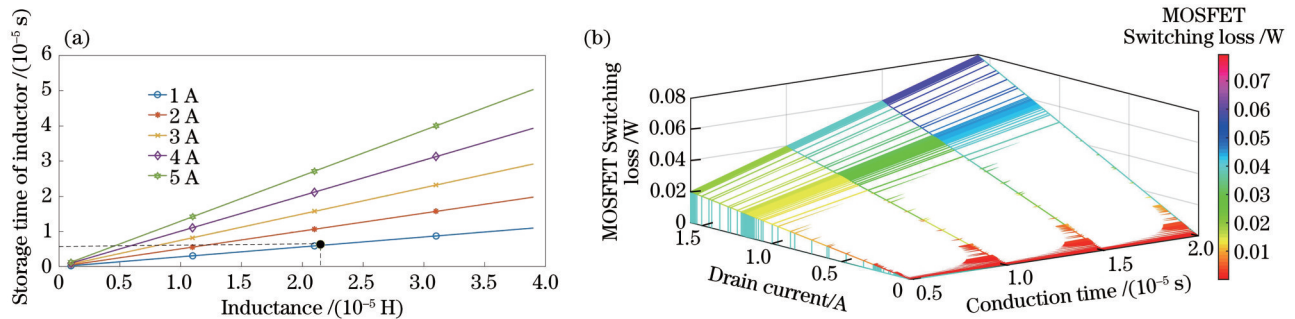


图 4 电感值分析。(a) 电感充电时间与电感量的关系; (b) 开关功耗与漏极电流和导通时间的关系

Fig. 4 Inductance analysis. (a) Relationship between inductance charging time and inductance; (b) relationship between switching power consumption and drain current and conduction time

此外,电感量可表征储存磁能能力的大小,电感量越大,获得的磁能越高。结合电容两端获取的高

压与电感量大小的(3)式,可得仿真分析结果如图 5 所示,可以看出,在电流一定时,电感量越大,感应

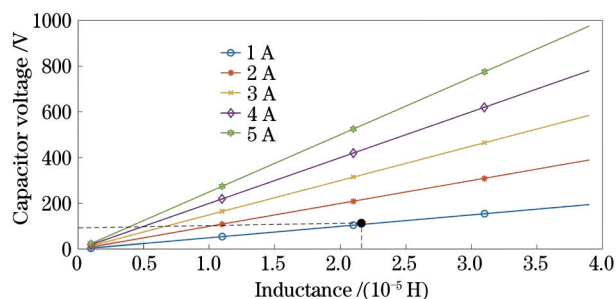


图 5 电感量与感应电动势关系

Fig. 5 Relationship between inductance and induced electromotive force

电动势越高,储能电容获取的能量也越高。但结合电感设计角度分析,一般情况下,随着电感量的增加,直流电阻和体积也随之增大,而额定电流随之减小。因此综合考虑电路效率、电路小型化以及

器件寿命问题,需要对储能电感量大小、蓄能时间以及流过电感电流大小做出折中选择。

因此,根据上述分析,为了使该驱动电路具有较大的探测距离能力和较小的电路功耗,电感电流被控制在 1 A,电容电压被控制为 100 V 左右,此时电感蓄能时间约为 6 μs,且开关损耗相对较低,而电感量在 22 nH 为宜。另外,对电感选型时除了选直流电阻尽量小,还需考虑电感的铁损大小,即电感在磁化过程中的损耗与磁芯材料有关。不同磁芯材质分类对比如表 1 所示,铁氧体材料铁损最小且磁导率较高,具有较强的磁化能力。综上,基于对储能电感器件的关键性分析,本文设计采用一款功率电感,整体结构是由铁氧体粉末压铸而成的一体化电感,该电感直流电阻较小,额定电流较大,有良好的磁屏蔽特性(表 2)。

表 1 根据不同电感铁芯进行分类对比

Table 1 Classification and comparison according to different inductance cores

Magnetic core type	Ferrite	Silicon steel sheet	Iron powder core	Fe-nickel-molybdenum alloy	High flux powder core
Iron loss	Minimum	High	High	Low	Low
Magnetic permeability / (H·m ⁻¹)	250–15000	4000	22–99	14–250	14–160
Temperature characteristic	Medium	Small	Small	Good	Small
Cost	Low	Low	Low	High	High

表 2 功率电感具体参数

Table 2 Specific parameters of power inductor

Package	Winding form	Magnetic core shape	Framework material	Direct current resistance /Ω	Rated current /A
Chip inductor	Single layer winding	I-shape	Ferrite	0.137	2.5

4 驱动电路模型的建立与仿真分析

在实际电路中由于印制电路板布局布线等设计存在一些寄生电感、电阻和外围电路的杂散参

数。因此当 M₂ 开关接通,则半导体激光器放电回路可看成是零输入响应的 RLC 电路。在满足回路为欠阻尼条件下,回路电流为

$$i(t) = \frac{V_c}{\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} \times \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \sin\left[\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{LC}\right)^2}t\right], \quad (8)$$

式中:L为放电回路总寄生电感;R为放电回路总电阻;C为放电回路总电容。根据电路实际模型,运用 ORCAD PSPICE 软件进行电路仿真分析。V_c=100 V,R=0.1 Ω,L=5 nH,改变 C 的大小,得到图 6(a)所示的仿真结果,可知储能电容容值越小,脉冲的上升时间和脉宽越小,但电流峰值较低,波形振荡越严重。当 C=4 nF,L=5 nF 时,改变 R 的大小,得到图 6(b)所示的仿真结果,可知阻值越小,

得到的电流峰值越大,但同时脉冲振荡也越严重。当 C=4 nF,R=0.1 Ω 时,改变 L 的大小,得到如图 6(c)所示的仿真结果,可知寄生电感值越小,得到的电流脉冲上升沿越陡,脉冲振荡也越小。

通过仿真分析可以看出,为了获得窄脉宽脉冲,在脉冲激光驱动电路中,只利用第一个正弦波得到的脉冲电流,其余电流越小越好,即减小脉冲振荡,需减小回路中 L 大小,可通过在电路板

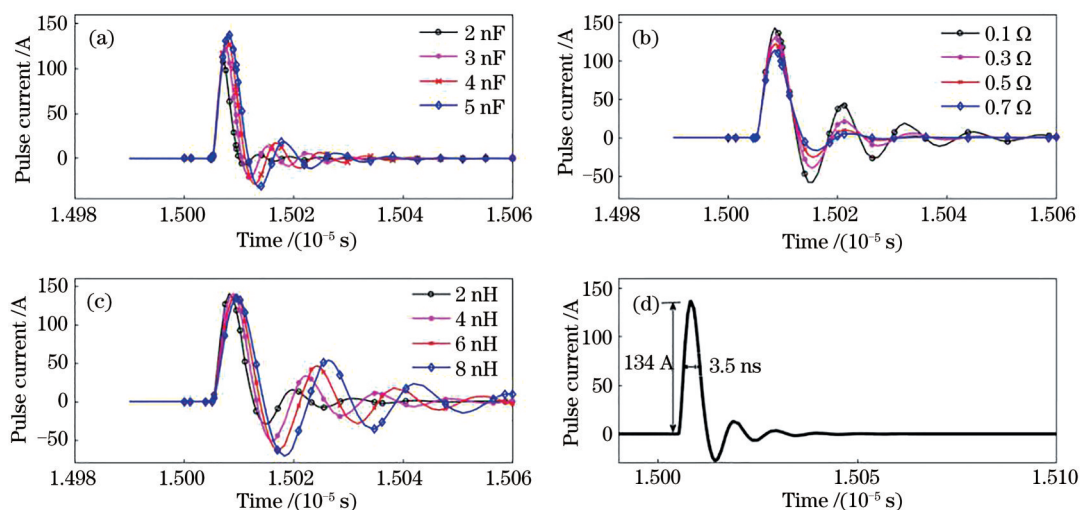


图 6 放电回路仿真中不同条件下的输出电流脉冲。(a)不同电容下;(b)不同负载电阻下;(c)不同寄生电感下;(d)放电回路电流脉冲

Fig. 6 Discharge circuit simulation under different conditions of output current pulse. (a) Under different capacitances; (b) under different load resistances; (c) under different parasitic inductors; (d) current pulse of discharge circuit

设计时,布线尽量短、宽且平直及布局时尽量减少过孔数量。为了获得输出高峰值电流脉冲,尽量降低放电回路的 R ,可选择负载电阻小的激光器。为了获得陡上升沿脉冲,应要求 C 不能太大。以上分析为脉冲激光驱动电路设计选择元器件参数提供很好的理论依据。结合电路实际情况,在电路仿真模型中,取放电回路 L 为 5 nH , C 为 4 nF ,电阻 R 为 $0.1\ \Omega$, L_1 为 22 nH ,得到如图6(d)的放电回路电流脉冲。运用软件自带的游标卡尺测出其仿真结果为脉冲宽度约为 3.5 ns ,脉冲上升沿为 3 ns ,脉冲下降沿为 3.3 ns ,电流峰值为 134 A 。

5 实验与分析

实验中使用的仪器有:示波器 Tektronix MSO 2024 16CH MSO,频率为 200 MHz ,采样率为 1 GS/s ;电流表笔 Tektronix c026709;电压表笔。其中电路重复频率可通过FPGA外部的编码开关来控制,在测试中设置工作频率为 10 kHz 。根据前面理论与仿真分析,接入半导体激光器,取 V_{cc} 为 5 V ,电感的蓄能时间为 $6\ \mu\text{s}$, L_1 为 $22\ \mu\text{H}$, C_1 为 3.9 nF (约为 4 nF 的高耐压值电容), R_1 为 $0.1\ \Omega$,选择 D_1 耐压值为 100 V 。从图7可以清楚地看到,在开关断开瞬间电感产生高压对电容两端蓄能,形

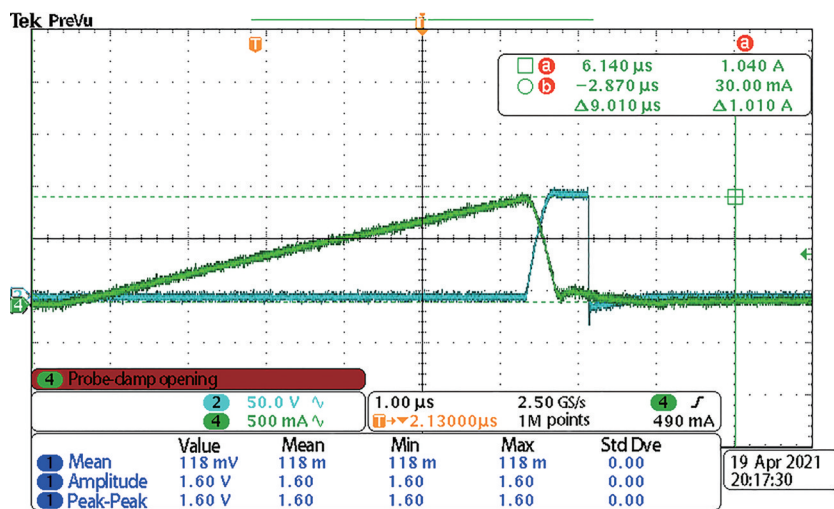


图 7 电感电流与电容高压波形

Fig. 7 Inductive current and capacitance high voltage waveform

成约 100 V 高压, 与理论分析吻合。此时 $i_{L,max}$ 为 1.01 A, 估算储能电感工作一个周期内平均损耗 ($P_{L,loss}$) 为

$$I_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{3}} \times i_{L,max} = 0.58 \text{ A}, \quad (9)$$

$$P_{L,loss} = I_{L,rms}^2 \times R_{dc} \times K = 0.059 \text{ W}, \quad (10)$$

式中: R_{dc} 为电感直流电阻 (0.137Ω); K 为温度系数, 经验值为 1.3。 $I_{L,rms}$ 为电感的均方根电流, $i_{L,max}$ 为电感的最大电流。因此选择电感时尽量选择串联直流电阻小的, 较小功率损耗。

该电路设计采用功率 MOSFET 开关, 具有输入阻抗高、驱动电流小、工作频率高等优点, 且栅极

驱动芯片的增加, 提高了开关开启速度, 如图 8 所示, 放电回路开关开启速度比较快, 从图 8(b) 可以看到对应的上升沿放大信号, 即驱动信号上升沿在 3.3 ns 左右, 与理论分析相吻合。经测试表明脉冲宽度为 3.8 ns, 上升沿为 3.5 ns, 下降沿为 3.7 ns, 输出峰值电流为 132 A, 该实验测试结果如图 9 所示。并用标准的光功率计测量光脉冲的平均功率 (P_a) 为 12.37 mW, 根据脉冲的平均功率与峰值功率的转换公式, 可得输出峰值光功率 (P_p) 约达 326 W。式中 t 为脉冲宽度, f_s 为工作频率。在误差的允许范围内, 仿真与实验基本一致, 对比结果如表 3 所示。

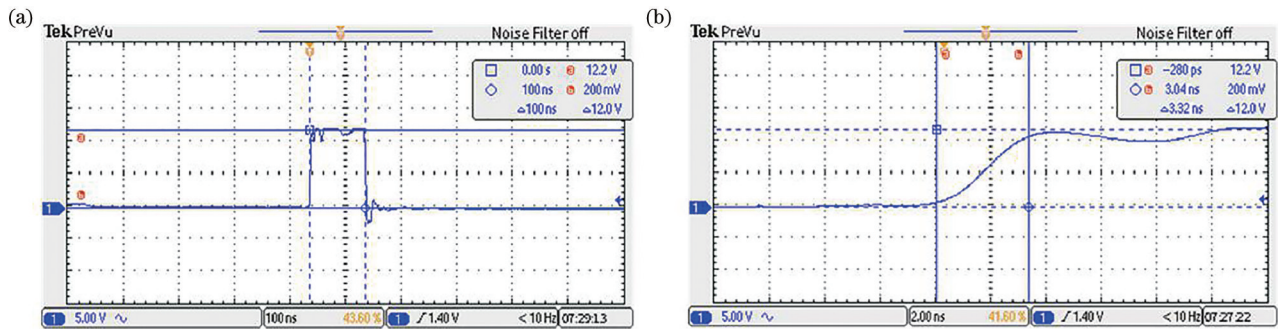


图 8 驱动信号实验结果。(a) 驱动信号; (b) 信号上升沿

Fig. 8 Experimental results of driving signals. (a) Drive signal; (b) signal rising edge

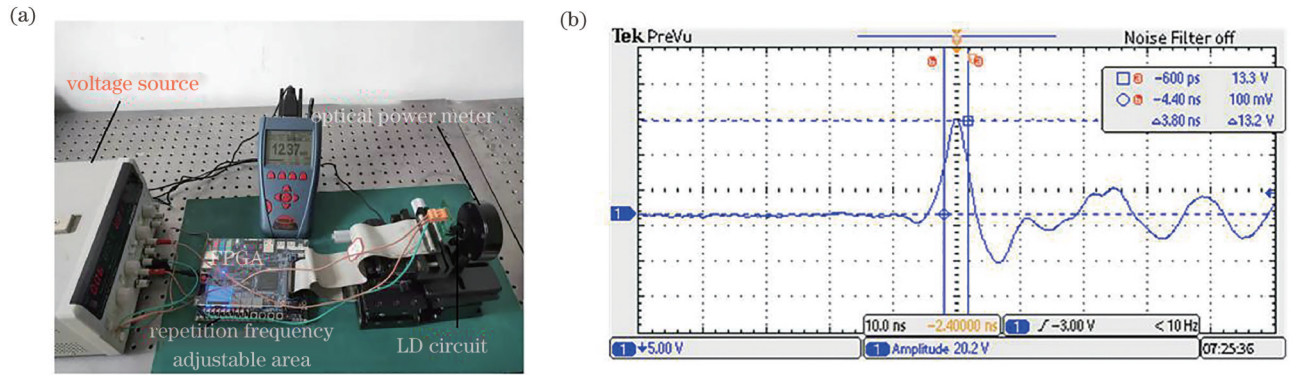


图 9 实验测试。(a) 测试平台; (b) 半导体激光器输出脉冲波形

Fig. 9 Experimental test. (a) Test platform; (b) output pulse waveform of semiconductor laser

表 3 仿真与实验对比结果

Table 3 Simulation and experimental comparison results

Parameter	Simulation result	Experimental result
Pulse width /ns	3.5	3.8
Rising edge /ns	3.0	3.5
Falling edge /ns	3.3	3.7
Peak current /A	134	132

$$P_p = \frac{P_a}{t \times f_s} \approx 326 \text{ W}. \quad (11)$$

最终对激光驱动电路进行了长达 3 h 的工作, 每隔 10 min 测试一次输出峰值电流的大小, 并进行了记录。图 10 为驱动电路工作 3 h 下输出峰值电流的变化情况。从图中可以看出, 输出峰值电流较为稳定, 即表明激光驱动电路发射出的激光脉冲也较为稳定。

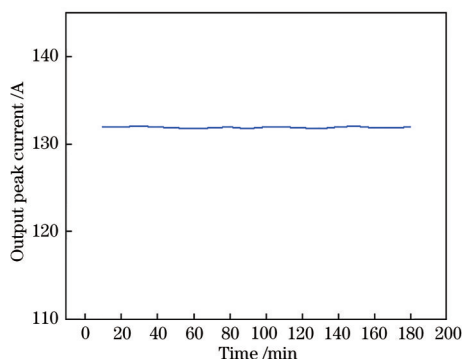


图 10 驱动电路工作 3 h 下,输出峰值电流随时间的变化关系

Fig. 10 Relationship between output peak current and time when driving circuit works for 3 h

6 结 论

在脉冲式激光雷达探测系统中,半导体激光器驱动电路是影响激光脉冲性能的重要部分,针对脉冲式半导体激光驱动电路的指标需求,以电感为储能元件完成了一种脉冲激光驱动电路的优化设计。在深入分析驱动电路工作原理的基础上,推导出储能电路与升压电路的原理关系式。同时为了获得电路功耗最小化,重点研究了基于该种电路结构方式中储能电感器件对电路功耗的影响关系和具体指标要求,并计算出储能电感消耗功率为 59 mW。通过建立电路仿真模型,总结出影响脉冲电流的脉宽、幅度和波形振荡的主要因素。经过测试验证,得到理论分析和仿真模拟与实验结果相吻合的结论。该激光驱动电路具有脉宽窄、电流大、功耗低、体积小、稳定性高等特点,可应用于激光雷达探测系统中,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Li N, Han S K, Zhao W, et al. Design of high current nanosecond pulsed driving circuit for LD[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 121-124.
李楠, 韩绍坤, 赵文, 等. 大电流纳秒级脉宽激光二极管驱动电路的设计[J]. *光学技术*, 2012, 38(1): 121-124.
- [2] Chen B, Jia S, Wang J, et al. Optical short pulse with dual wavelength and high stability based on optoelectronic oscillator and soliton compression[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0519002.
陈斌, 贾石, 王菊, 等. 基于光电振荡器和孤子压缩的双波长、高稳光窄脉冲[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0519002.
- [3] Efanov V M, Kardo-Sysoev A F, Yarin P M. Semiconductor generator of high voltage rectangular pulses with controlled duration[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 1997: 479-480.
- [4] Glaser J. High power nanosecond pulse laser driver using an GaN FET[C]//PCIM Europe 2018: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, June 5-7, 2018, Nuremberg, Germany. New York: VDE, 2018: 1-8.
- [5] Vainshtein S, Zemlyakov V, Egorkin V, et al. Miniature high-power nanosecond laser diode transmitters using the simplest possible avalanche drivers[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(4): 3689-3699.
- [6] Li X, Duan F J, Ma L, et al. Laser diode drive method with narrow-width and high-peak current for multi-line LIDAR[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2019, 10(3): 246-253.
李旭, 段发阶, 马凌, 等. 用于多线激光雷达的窄脉宽高峰电流激光二极管驱动方法[J]. *测量科学与仪器学报*, 2019, 10(3): 246-253.
- [7] Yan D K, Sun C D, Feng L, et al. Design of driving system for high power and narrow pulse-width semiconductor laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(1): 165-169.
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): 165-169.
- [8] Chen S S, Zhang H, Xu X B. Design of narrow pulse light source driving circuit of laser fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(S1): 24-30.
陈杉杉, 张合, 徐孝彬. 激光引信窄脉冲光源驱动电路设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(S1): 24-30.
- [9] Yue F Y, Mao F, Wang H, et al. Infrared defect emission and thermal effect in high power diode lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110001.
越方禹, 毛峰, 王涵, 等. 高功率半导体激光器红外缺陷发射与热效应[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110001.
- [10] Wang X Q. Research on narrow pulse seed source of semiconductor laser[D]. Jinan: Shandong university, 2018: 7-14.
王晓倩. 半导体激光器窄脉冲种子源研究[D]. 济南: 山东大学, 2018: 7-14.
- [11] Wen S C, Wang M, Xie J, et al. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser diode[J]. *Microwave and Optical*

- Technology Letters, 2019, 61(4): 867-872.
- [12] Ahmed M R, Todd R, Forsyth A J. Predicting SiC MOSFET behavior under hard-switching, soft-switching, and false turn-on conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 9001-9011.
- [13] Yang S D, Yin D J, Gan Z B, et al. Thermal effect of high energy repetition rate Nd:glass laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0901004.
- 杨思达, 印定军, 甘泽彪, 等. 高能量重复频率钕玻璃激光器的热效应实验研究[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0901004.
- [14] Ma T X, Tian X J. Laser diode driver circuit design and improvement based on the MOSFET[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(s1): s116001.
- 马天翔, 田小建. 基于 MOSFET 的半导体激光器驱动电路设计及其改进[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s116001.