基于 LDMOS 的可调窄脉冲半导体激光器驱动源研究

李 涛,祝连庆,刘 锋,张荫民

(北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心,
光电测试技术北京市重点实验室,北京 100192)

摘 要:介绍了一种利用横向双扩散金属氧化物半导体(LDMOS)作为开关器件驱动激光半导体的设计方法。通过对半导体激光器驱动电路原理的分析,并结合 PSPICE 建立射频功率晶体管的电路模型,经过理论分析和计算从而获得更优化的驱动电路;采用高速电流反馈型运算放大器构成电流串联负反馈电路从而得到稳定的输出电流,有效地提高了窄脉冲信号的转换速率和频响特性。实验结果表明,半导体激光器输出电流脉宽 20 ns-CW 可调,上升和下降时间小于 10 ns,幅度最高可达 2 A,重复频率为 0~10 MHz。实验结果验证了设计思路的可行性,进一步提高了半导体激光器的输出指标。

关键词:窄脉冲半导体激光器; LD 驱动电源; SPICE 模型; LDMOS; 电流反馈运放
中图分类号:TN248.4 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0105003

Research on adjustable narrow pulse driver of laser diode with LDMOS

Li Tao, Zhu Lianqing, Liu Feng, Zhang Yinmin

(Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In this paper a research about adjustable narrow-width pulsed laser diode driver was introduced which is based on the Lateral Double-diffused MOS(LDMOS). Through the analysis of the semiconductor laser driving circuit theory, circuit-level model of RF power transistor was established by using PSPICE simulation software to gain more optimized drive circuit with theoretical calculations. High-speed current-feedback operational amplifier effectively improved the slew rate and the narrow pulse signal frequency response characteristic. The experimental results show that the laser diode driver can generate 2 A current and the pulse width is adjustable from 20 ns to CW, the rise time and fall time are below 10 ns, the pulse repetition frequency is adjustable from 0 to 10 MHz, which demonstrates the feasibility of the design idea to further improve the output performance of semiconductor laser.

Key words: narrow pulse laser diode; LD driver; SPICE model; LDMOS; CFOA

收稿日期:2015-05-11; **修订日期**:2015-06-13
基金项目:北京市重大科技计划(PXM2013_014224_000077,PXM2012_014224_000019);
光电信息与仪器北京市工程研究中心开放课题(GD20130006)
作者简介:李涛(1988-),男,硕士生,主要从事半导体激光器驱动电源方面的研究。Email:litao_little@126.com
导师简介:祝连庆(1963-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光纤传感和光纤激光器、光电检测技术方面的研究。
Email:zhulianqing@sina.com

0 引 言

随着光电信息技术的发展，纳秒量级脉冲半导体激光器(Laser Diode,LD)由于具有高效率、结构简单、体积小、质量轻、调制效率高等优点,在光纤通信、激光雷达、激光雕刻和材料加工中有着广泛的应用[1]。在光纤通信中,抗干扰能力、系统带宽和低功耗都取决于发射激光脉冲的质量;在激光雷达中,激光脉冲的上升时间、峰值功率、脉冲宽度都与测量精度、测距能力、信噪比密切相关。如今这些领域主要被 Q 开关的固体激光器和准分子激光器所占据,但这些激光器输出光脉冲的参数调整较为困难[2];而在国内大部分所研究的电脉冲直接调制 LD 的驱动电源，其采用的是电容作为储能元件对 LD 充放电来获得窄脉冲的方法,虽然能获得较窄脉冲但只能产生近似于高斯形的脉冲，并且很难实现脉冲宽度连续可调[3]。因此研制出快速上升、下降时间,连续可调窄脉冲半导体激光器驱动电源有着重要的实际意义。

在实际脉冲驱动电路中，脉冲的上升时间和脉宽主要受开关器件速度和电路寄生参数的限制[4]。文中在充分考虑 LD 的脉冲工作原理的基础上,对影响驱动脉冲宽度、上升时间以及引起脉冲振荡的主要因素进行探讨分析,并通过 PSPICE 软件进行仿真验证,采用横向双扩散功率晶体管(Lateral Double-diffused MOSFET,LDMOSFET) 实现了高速开关电路，并采用电流反馈运算放大器 (Current Feedback Operational Amplifier,CFOA)实现了电流自动控制的方案。设计了一款调制线性度好、响应时间快的半导体激光器脉冲驱动电源。

1 总体方案设计

半导体激光器发射出来的光脉冲是经激光电源产生的电脉冲直接调制得到的，注入电流的质量对激光器的输出有着直接且明显的影响。因此，要求 LD 的电源是一个恒流源,并且具有很高的电流稳定度和很小的纹波系数，否则激光器的工作状态就会受到很大的影响，所以 LD 脉冲驱动电源的设计是激光应用中的一项关键技术。

文中设计的脉冲半导体种子源驱动电路的核心部件由脉冲发生器、高速开关模块以及一些外围电路组成,其原理框图如图 1 所示。脉冲发生器采用现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA),主要实现包括幅度控制、脉冲参数设置、LD 电流监控及系统配置等逻辑功能。高速开关模块采用 LDMOS 管作为开关器件，采样电阻信号反馈到高速电流型运算放大器实现电流自动控制电路。ATC(Automatic Temperature control,ATC)模块实现 LD 内部温度的采集和半导体制冷片的控制，使 LD 工作在稳定的状态下,同时也起到保护 LD 的作用。文中依据上述设计原理,通过模型分析和电路仿真,设计相应的驱动电路,实现窄脉冲的大功率驱动。

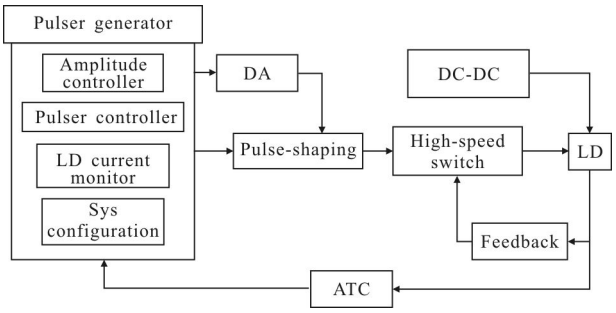

图 1 窄脉冲 LD 驱动源原理框图

Fig.1 Schematic diagram of LD driving source

2 高速开关电路设计

高速开关器件是目前制约调制型半导体脉冲激光器驱动技术发展的瓶颈之一。文中采用 LDMOS 作为高速开关器件,LDMOS 采用横向双扩散技术,在工艺上易于实现亚微米的沟道长度[5],故跨导、漏极电流、最高工作频率和速度都比一般 MOSFET 有很大的提高;漏源、栅漏之间的寄生电容更小[6],更有利于提高频率特性。下面通过建立简化小信号器件模型[7],设计 SPICE 仿真电路,并对 LDMOS 的高频特性进行分析,从而得出制约 MOSFET 开关速度的影响因素,以优化驱动电路。

2.1 LDMOS 管的模型分析

如图 2 所示,是 LDMOS 高频等效电路。由图 2 可知,M1A 是 MOS LEVEL 3 MOSFET 模型，代表 LDMOS 的沟道区。J1 是 JFET 用以模拟漂移区的特性。L_g、L_d 和 L_s 代表的功率 LDMOS 各个电极的寄生电感，C_{ds}、C_{gs} 和 C_{gd} 表示各电极之间的寄生电容,R_g 为栅极电阻,VD1 为漏极和源极之间的寄生二极管。其中,R_g 和输入电容是影响 MOSFET 开关速度的主要因素,而 C_{gd} 则是形成米勒效应影响晶体管输入电

容的主要因素[8]。

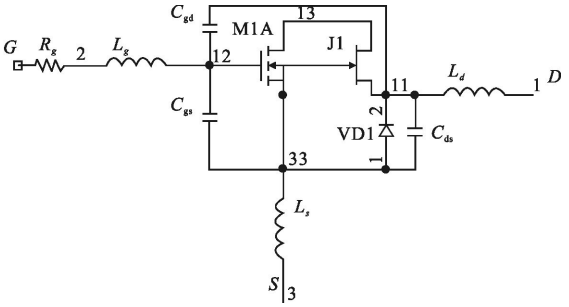

图 2 LDMOS 高频等效电路图

Fig.2 Diagram of LDMOS high-frequency equivalent circuit

2.2 带负载 LD 的小信号等效模型

在高速开关驱动电路中,LDMOS 器件主要工作在开关状态，同时半导体激光器在阀值电流以上其阻抗可近似等效为并联的电阻电容。图 3 建立了带负载 LD 的小信号等效模型,并考虑栅漏电容 C_{gd} 的米勒效应对输入电容的影响。

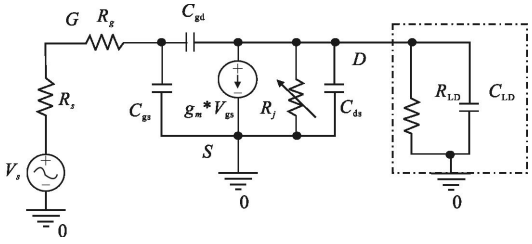

图 3 带负载 LD 的小信号等效模型

Fig.3 Small signal equivalent model with LD

设开关管阈值电压为V_T,栅极驱动电压为 V_{gg}。

根据图 3 可列 KCL 方程,计算出等效模型的开路电压增益 A_v,即:

$$A_{v0}=\frac{V_o}{V_i}=-g_m(R_{LD}//R_j)\approx -g_mR_L' \tag{1}$$

式中:V_i、V_o 为输入输出端电压;g_m 为 LDMOS 的跨导;R_j 为 LDMOS 漂移区的等效可变电阻;R_{LD} 为半导体激光器本征等效电阻。为了简化对米勒效应的讨论,可近似表示输入电容为:

$$C_{in}=C_{gs}+C_{miller}=C_{gs}+(1-A_{v0})C_{gd}=C_{gs}+(1+g_mR_L')C_{gd} \tag{2}$$

根据串联 RC 充电公式，得出开关管的开通时间为:

$$t_{on}=-C_{in}R_g\ln\left(1-\frac{V_{gs}}{V_{gg}}\right)\approx 2C_{in}R_g=2R_g[C_{gs}+(1+g_mR_L')C_{gd}] \tag{3}$$

根据公式(3),可得出影响导通时间的因素。功率 MOSFET 的栅极输入端在高频时相当于一个容性网络,导通时间与寄生电容、栅极串联电阻 R_g、带负载 LD 阻容 R_L'的大小有关。

图 4 是栅极串联电阻分别为 1 Ω,5 Ω,10 Ω,20 Ω 的仿真波形图，可以看出阻值过小时易与寄生电感作用引起大的电压尖峰,过大时电容充放电时间就会加长。

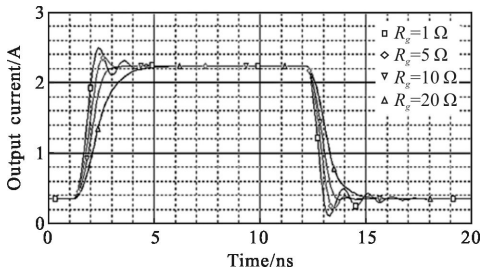

图 4 不同 R_g 电阻值时的输出电流仿真图

Fig.4 Output current vs different R_g

通过建立带负载 LD 等效模型的传递函数,得出半导体激光器寄生电容与开关 MOS 管参数的匹配关系,从而提高系统的上限频率。根据图 3 等效模型,得出等效模型的电压增益为:

$$A_v=A_{v0}\frac{1-s(C_{dg}/g_m)}{as^2+bs+1}$$

$$a=R_sR_L'[C_{gs}C_{gd}+C_{ds}(C_{gs}+C_{gd})]$$

$$b=R_L'(C_{LD}+C_{ds})+R_s(C_{gs}+C_{miller}) \tag{4}$$

由公式(4)可知该电路为两极点一零点系统。由于两极点相差较大，所以在考虑通频带时只采用较小极点作为主极点,可将其转化为单极点系统分析。因此,系统的上限频率就仅取决于主极点。求解二次多项式,得出主极点 f_h 为:

$$f_h=1/2\pi b=\frac{1}{2\pi R_L'C_h}\cdot\frac{1}{1+C_{LD}/C_h} \tag{5}$$

式中:$C_h=C_{ds}+C_{in}R_s/R_L'$为寄生电容 C_{LD} 起作用的临界点。

由公式(5)可知半导体激光器寄生电容 C_{LD} 与上限频率的关系。放大器的主极点随 C_{LD} 的增加左移,从而使系统上限频率 f_h 随之减小,如图 5 所示。

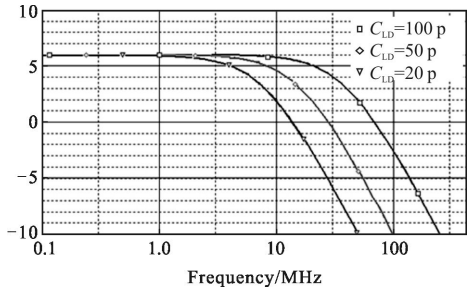

图 5 不同负载电容时的开关电路增益曲线

Fig.5 Gain of the circuit with different C_{LD}

3 脉冲驱动电路设计

在驱动电路设计中，采用负反馈控制方法得到稳定的输出电流。由于 LD 是电流驱动型器件，用取样电阻将电流量转换为电压量与输入信号共同构成一个电流串联负反馈网络。文中采用电流反馈运算放大器，它具有极佳的带宽性能和较高的转化速率，并且增益几乎与带宽独立[9]，在高速信号处理方面远优于电压反馈运算放大器。

如图 6 所示，U2 为电流反馈运算放大器，CFOA 通过威尔逊精密电流镜[10]把输入信号以电流形式线性传输到输出端，因此也是其获得超高速特性的根本原因。运放输出电压是输入电流 I_x 乘以 Z 端节点的等效阻抗 $R_t/(1+jwR_tC_t)$。R_t 为低频互阻增益，其值很大，通常为 MΩ；C_t 较小，一般为 2~5 pF。由于 CFOA 的互阻增益 Z 很高，输入级的电流微小变化即可引起输出电压的变化[11]。

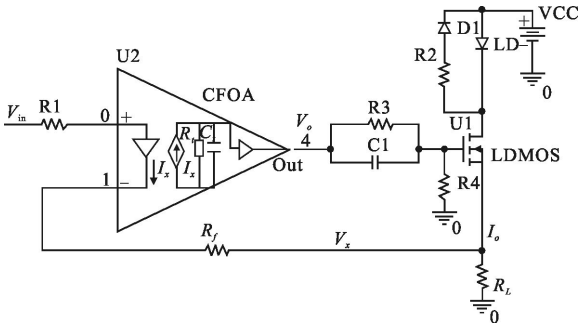

图 6 LD 驱动电路的 SPICE 仿真图

Fig.6 SPICE simulation of LD driving circuit

由图 7 可列出下面的方程组

$$I_o=(V_o-V_{th})g_m \tag{6}$$

$$I_x=\frac{V_{in}-V_x}{R_f}=\frac{V_o}{Z} \tag{7}$$

$$V_x=I_oR_L \tag{8}$$

由公式(6)、(7)、(8)可得：

$$V_o=\frac{V_{in}+V_{th}g_mR_L}{(R_f(1+jwR_tC_t)/R_t)+g_mR_L} \tag{9}$$

式中：V_{th} 为 LDMOS 管的阈值电压；g_m 为 MOS 管的跨导；w 为信号频域角速度。栅极驱动电压 V_o 不仅与输入电压和各个参量有关外，还与信号的频率有关。图 7 所示为在不同输入电压下 LD 输出电流的带宽波形图。在低于 80 MHz 的频率范围内，LD 驱动电路的跨导增益基本不随频率的变化而改变，其 3 dB 带宽接近 100 MHz，满足系统频率要求。

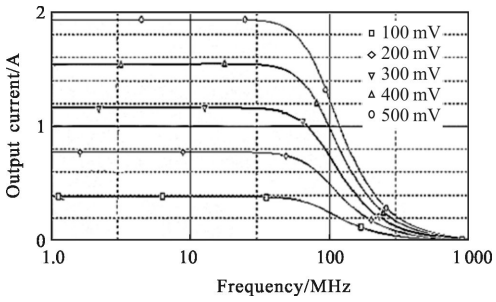

图 7 LD 驱动电路的带宽波形图

Fig.7 Bandwidth waveform of LD driver circuit

根据带宽与脉冲信号上升时间的关系[12]，驱动电路的上升时间为：

$$t_{rise}=\frac{0.35}{BW}>3.5\ ns \tag{10}$$

4 实验结果

根据图 1 所示的半导体激光器驱动电路模型，设计并半导体激光器驱动源的实际电路。在实际电路中，LDMOS 管选用 POLYFET 公司的功率为 50 W 的 LC821，其 C_{iss} 为 33 pF，C_{rss} 为 2 pF。电流反馈运放选用 TI 公司的 OPA695，其转换速率为 2 500 V/μs。通过实验，对最终输出的电流进行测量，得到脉宽为 20 ns，上升和下降时间小于 10 ns 的脉冲电流。图 8 所示为 LD 输出端探测的电压值，其脉宽为 20 ns，上升时间约为 8 ns，重复频率 1 kHz，驱动电流接近 2 A。由于半导体激光器寄生电容 C_{LD} 的存在，增加了放电时间，因此脉冲下降沿出现拖尾现象。同时可以实现脉宽可调，图 9 为脉宽 200 ns，上升时间约为 10 ns 的波形图。

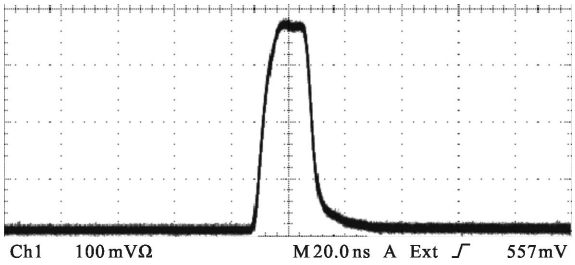

图 8 测得的实际输出波形

Fig.8 Actual output waveform

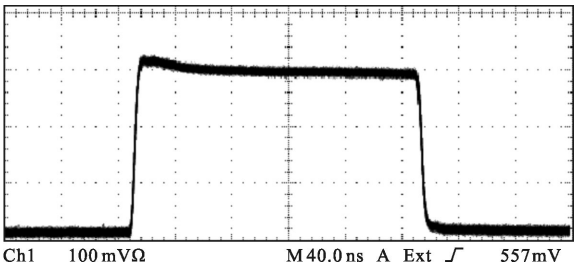

图 9 脉宽为 200 ns 的输出波形

Fig.9 Output waveform of 200 ns pulse width

5 结束语

文中设计并制作了高速可调窄脉冲 LD 驱动电路，选取性能更加优越的射频功率 LDMOS 管和电流反馈运算放大器作为驱动 LD 的关键器件。着重建立并分析了它们的 SPICE 等效电路模型，并通过实验验证了模型及分析过程的正确性。较传统驱动电路,脉冲上升时间和宽度得到了显著的改善。文中所设计的半导体激光器驱动电路具有结构紧凑、脉宽、幅值可调、可靠性和稳定度高等优点,可以提供安全和快速的半导体激光器脉冲驱动电源。

参考文献：

[1] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situations of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(2): 0189-0194. (in Chinese)
马骁宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 0189-0194.

[2] Smolski O V, O'Daniel J K, Johnson E G. Compact vertically stacked master oscillator power amplifier based on grating coupled laser diode [J]. ***IEEE Photonics Technology Letters***, 2006, 18(18): 1931-1933.

[3] Lu Kai, Liu Baiyu, Bai Yonglin, et al. High power laser diode drive power supply [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(10): 2680-2684. (in Chinese)
卢凯, 刘百玉, 白永林, 等. 大功率半导体激光器驱动电源的设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2680-2684.

[4] Lin Ping, Liu Baiyu, Gou Yongsheng, et al. Laser pulse shaping technology based on semiconductor laser [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(1): 0103-0107. (in Chinese)
林平, 刘百玉, 缑永胜, 等. 基于半导体激光器的脉冲整形技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 0103-0107.

[5] Bagger R, Andersson P, Shin C D. 20-Watt LDMOS power amplifier IC for linear driver application [C]//Microwave Symposium, IEEE/MTT-S International, 2007: 1075-1078.

[6] Aarts A, D'Halleweyn N, van Langevelde R. A surface-potential-based high-voltage compact LDMOS transistor model [J]. ***Electron Devices, IEEE Transactions on***, 2005, 52(5): 999-1007.

[7] Jeonghu Han, Changkun Park, Donghyun Baek, et al. A large-signal model of RF LDMOS with skin effects of power combining structures[C]//Radio Frequency integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2005: 149-152.

[8] Richard Chi-His Li. RF Circuit Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 382-386.

[9] Liu Luncai, Huang Wengang. Optimization of operational amplifiers for high speed and wide bandwidth [J]. ***Microelectronics***, 2005, 35(4): 0409-0411. (in Chinese)
刘伦才, 黄文刚. 运算放大器的速度/带宽优化设计[J]. 微电子学, 2005, 35(4): 0409-0411.

[10] Pu Lin, Zou Wei, Bao Xingrun. Study on test techniques for transfer impedance of current feedback operational amplifier [J]. ***Microelectronics***, 2010, 40(5): 735-737. (in Chinese)
蒲林, 邹伟, 保兴润. 电流型运算放大器传输阻抗测试技术研究[J]. 微电子学, 2010, 40(5): 735-737.

[11] Mita R, Palumbo G, Pennisi S. Low-voltage high-drive CMOS current feedback Op-Amp [J]. ***IEEE Transactions on Circuits and Systems***, 2005, 52(6): 317-321.

[12] Zhao Kejia, Liu Mingliang, Yu Yuehua. Research on the conversion factors between rise time and bandwidth of broadband sampling oscilloscope [J]. ***Acta Metrologica Sinica***, 2006, 27(2): 160-163. (in Chinese)
赵科佳, 刘明亮, 郁月华. 宽带取样示波器上升时间与带宽的转换系数的研究[J]. 计量学报, 2006, 27(2): 160-163.