文章编号：2095-4980(2015)03-0454-05

大功率激光二极管驱动电源研制

李　涛，胡和平，杨　洪，黎　明，甘孔银

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所，四川 绵阳 621999)

摘　要：介绍了一种大功率激光二极管阵列驱动电源的设计方法。对电源的组成、工作原理和电流上升前沿影响因素进行了详细分析，对输出线结构和反馈电路进行优化，有效地解决了大电流、长距离传输条件下电流脉冲前沿缓慢的问题。测试结果验证了设计思路的可行性，驱动电源实现了 0~300 A 连续可调、稳定度优于 0.3%的输出，在 300 A,40 m 输出时脉冲前沿 24.7 μs，为同类型的大功率激光二极管阵列驱动电源的工程化应用奠定了基础。

关键词：激光二极管阵列；恒流源；L-C 串联谐振；脉冲上升沿

中图分类号：TN248.4　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201503.0454

Development of high-power laser diode power supply

LI Tao, HU Heping, YANG Hong, LI Ming, GAN Kongyin

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A design method for a high-power laser diode array power supply is introduced. The structure, component and working principle of the proposed power supply are analyzed as well as the influencing factors on the output current pulse rise time. The structure of output cable and the sampling circuit are optimized. The output current pulse rise time is greatly shortened under the high-current and long-distance conditions. The testing results verify the feasiblity of the power design idea. The high-power laser diode array power supply features a continuous adjustable laser dirving current of 0–300 A, and the stability of output current achieves 0.3%. The output current pulse rise time is 24.7 μs given the current of 300 A and the output cable length of 40 m. It provides reference for the same type of designs and a basis for engineering applications.

Key words: laser diode array; constant current source; L-C series resonance; pulse rise time

激光二极管泵浦固体激光器(Diode Pumped Solid-State Laser, DPSSL)具有半导体激光器和固体激光器的双重优点，具有体积小、效率高、可靠性好、工作寿命长和可全固体等特性，在国防、科研、医疗、加工等领域有着广泛的应用，是当前固体激光器的一个重要发展方向[1-3]。

激光二极管阵列(Laser Diode Arrays, LDA)的工作模式有3种：直流驱动下的连续工作方式；在脉冲状态下工作，具有低占空比的脉冲方式；在脉冲状态下工作，具有高占空比的脉冲工作方式，又称为准连续工作方式。DPSSL针对不同的应用需求其工作模式要求也各不相同，相应的二极管阵列驱动电源系统的结构也相差很大。如果把激光二极管阵列驱动电源的几种工作模式的驱动电路都集中在同一个系统中，通过跳线来选择实际工作时的运行方式，研制这样的DPSSL驱动电源系统成本很高。在实际应用中，DPSSL的运行模式单一，可以针对特定的工作模式，设计相应的结构简单、控制方便的驱动控制电源系统[3-4]。

虽然国内外对半导体激光器的驱动电源进行了深入的研究，已有一系列产品。但国内研制的激光器驱动电源功率较小，体积大，稳定度低，不能满足大功率半导体激光器的使用要求[5]。国外的大功率激光二极管阵列驱动电源价格昂贵，技术指标也不能完全满足某实际应用的需求。根据实际应用需求，采用单片机和复杂可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Devices, CPLD)控制技术，研制了一种基于串联谐振直流源和线性恒流技术的大功率激光二极管阵列脉冲驱动电源。该电源主要技术指标：输出电压300 V，输出脉冲电流0~300 A可调，电流稳定度为±0.3%，顶降及过冲小于2%，脉冲宽度50 μs~500 μs可调，脉冲频率10 Hz~1 000 Hz可调，300 A输出时最大占空比12.5%，300 A,40 m长距离输出时脉冲上升时间小于30 μs，下降时间小于15 μs。

收稿日期：2014-06-04；**修回日期：**2014-08-28

1　驱动电源结构及工作原理

激光器驱动电源由直流充电电源、储能电容、脉冲恒流调制电路和控制系统等组成，其原理框图如图1所示。电源工作原理是：直流充电电源为储能电容提供直流电压，通过脉冲调制电路进行调制，形成满足频率、幅值等要求的脉冲电流波形输出到负载上。电源控制系统根据设定工作参数，输出相应的信号到充电电源和脉冲调制电路，在每个脉冲周期内对绝缘栅双极型晶体管(Isolated Gate Bipolar Transistor，IGBT)开关两端电压进行检测，据此判断充电电压是否达到要求，如不满足要求则在充电时序内调节充电电压基准，对直流充电电源输出电压值进行自动调节，实现驱动电源输出电压的负载自适应，并根据电流采样反馈电路动态调整工作在线性区的IGBT管压降实现脉冲恒流输出。

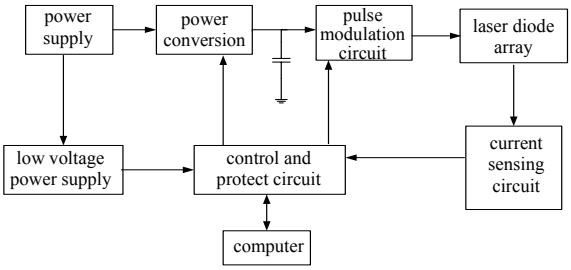


Fig.1 Block diagram of laser diode driver
图 1　激光二极管驱动电源框图

2　直流充电部分分析

2.1　电路拓扑结构选择

直流充电部分主要是为储能电容充电，电容器最佳充电过程应该是充电电流为一恒定直流，充电电压线性增长[6]。串联谐振电路在电流断续工作方式下具有电流源的特性，并且具有自动过载保护功能[7]。因此直流部分采用L-C串联谐振拓扑结构电路。

L-C 串联谐振逆变恒流充电电源中的功率开关管采用零电流(Zero Current Switching，ZCS)谐振软开关技术，回路电流接近于正弦波，可显著降低电磁干扰，使得整个充电电源具有可靠性高、稳定度高、耐负载短路、打火能力强等特点。L-C 串联谐振恒流充电拓扑结构电路示意图如图 2 所示。

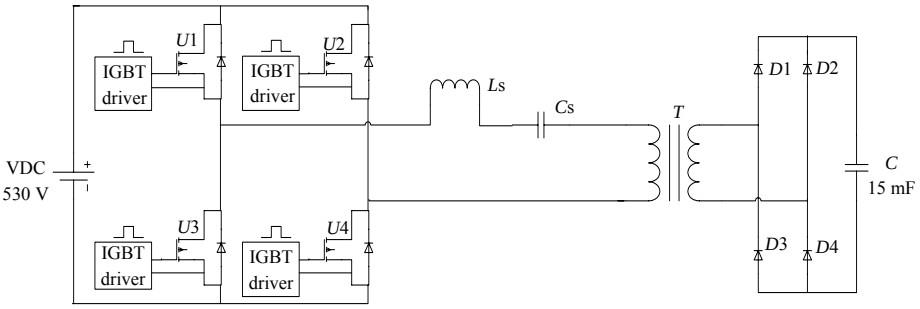


Fig.2 Diagram of L-C series resonant circuit
图 2 L-C 串联谐振电路示意图

2.2　工作模式分析

由于激光二极管阵列的动态阻抗很小，即使输出电压有较小的波动，也会使通过激光二极管阵列的电流发生较大变化，如果脉冲调制电路响应来不及，则会对激光二极管造成损伤。因此在线性恒流输出时，储能电容上不能有过大的高频电压纹波。在大功率情况下，L-C谐振变换工作频率一般为20 kHz，储能电容上的电压有较大的高频纹波。如果不对电源工作模式进行特殊处理，在脉冲放电期间恒流调制部分很难快速响应，消除如此大的高频纹波对输出电流波形的影响。图3为普通工作模式下L-C谐振充电时的脉冲电流输出波形。从图中可以看出，高频电压纹波使输出的电流波形顶部出现较大毛刺，会对激光二极管阵列负载造成损害。

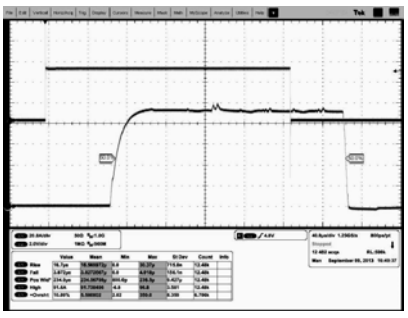


Fig.3 Current waveform of drive power
图 3 L-C 谐振充电时输出电流波形

为了解决L-C串联谐振充电对输出电流波形的影响，采用充电和恒

流放电脉冲在时间上不重叠方案(如图4所示)。恒流输出时，L-C谐振直流充电部分停止工作，依靠储能电容上存储的能量维持恒流放电。因为储能电容容量较大，电压降落较缓慢，电压纹波较小，恒流调制电路能够响应，不会影响负载电流的稳定性。恒流放电结束后，充电部分重新开始工作，对储能电容进行能量补充，此时恒流调制部分停止工作，避免了充电时高频电流信号对恒流控制系统的干扰。该工作模式会使充电部分工作在脉冲状态下，增加充电峰值功率，使充电电流增加。

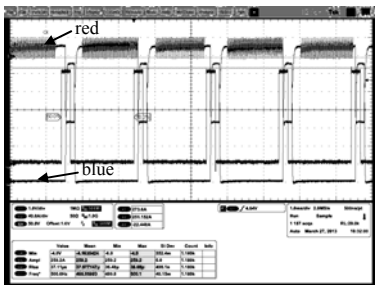


Fig.4 Work timing diagram of laser diode driver(bule:discharge, red:charge)
图 4 工作时间序列图(蓝色:放电；红色:充电)

3 脉冲恒流调制部分

根据IGBT的转移特性曲线图，当栅极和发射极之间的电压小于开启电压$U_{GE(th)}$时，IGBT处于关断状态。在IGBT导通后的大部分集电极电流范围内，I_C 与U_{GE}成线性关系。因此，通过调节U_{GE}就能调节IGBT的输出电流，从而达到稳流输出的目的。通过控制脉冲电压U_{GE}的频率、脉宽、幅值来实现频率、脉宽、幅值可调的大脉冲电流。脉冲成形电路选用IGBT作调整管，脉冲恒流工作时，调整管工作于线性调整状态，以保证脉冲顶部的平坦，输出受控于脉冲顶部电流取样电路的反馈信号，用以控制脉冲电流和提供过流保护。调整管的供电电压由脉冲顶部电压决定，保证供电电压与顶部电压有一个稳定的压差，使调整管在脉冲顶部工作于线性区。过渡阶段工作于开关状态。为保证脉冲大电流供电，采用储能电容。脉冲恒流调制原理图如图5所示。

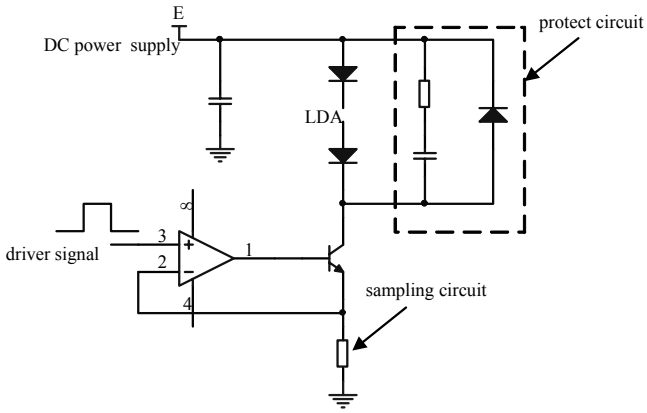


Fig.5 Schematic diagram of pulse constant current source
图 5 脉冲恒流工作原理示意图

4 脉冲电流上升时间优化

根据实际应用需求，在300 A,40 m长距离输出时要求脉冲恒流驱动电源输出前沿小于30 μs，采用传统的传输方式难以满足需要。图6为12 m双绞线输出条件下，恒流驱动电源在80只DSEI60-02二极管模拟负载上的电流波形，电流为150 A时，上升前沿为46.6 μs。脉冲上升前沿由下列公式计算[8]：

$$t_r \approx 2.3L/R \tag{1}$$

式中：t_r是脉冲上升前沿；L是回路电感；R是激光二极管阵列的动态电阻。

由于激光二极管阵列的动态阻抗比较小，因此可以通过增加动态阻抗方式或者降低回路电感来陡化上升前沿。由于激光二极管阵列的动态阻抗与串联数量呈正比，因此增加串联数量能够陡化激光二极管阵列的驱动电流上升沿。但在实际使用过程中，串联激光二极管数量是固定的，因此陡化激光二极管阵列驱动上升沿的有效方法是降低回路电感。

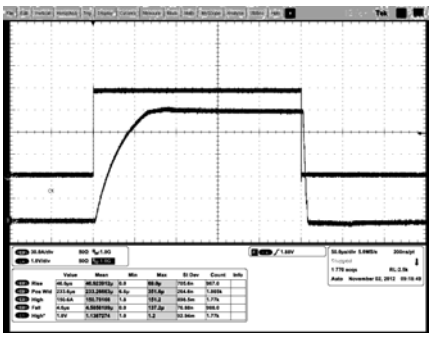


Fig.6 Current waveform when using normal cable
图 6 12 m 双绞线输出时电流波形

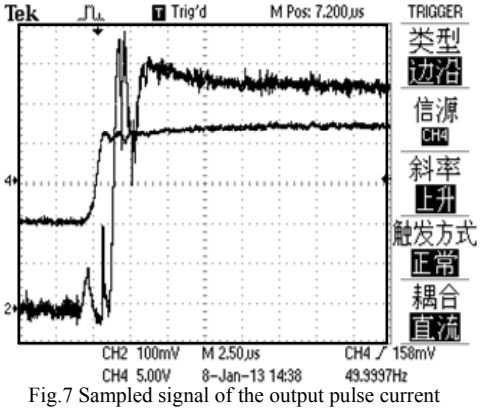
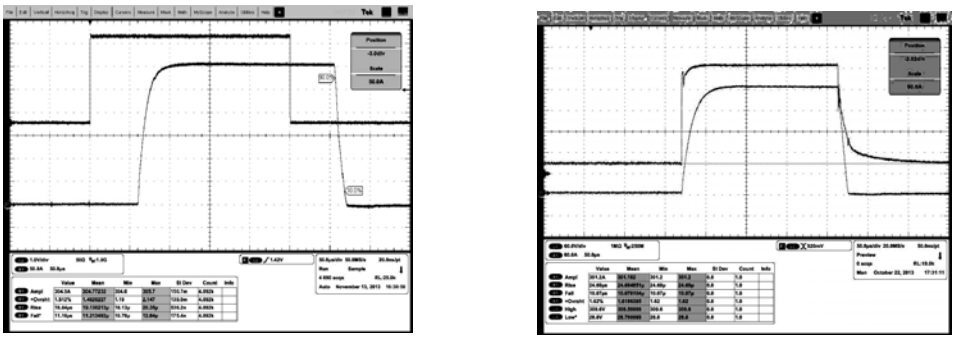


Fig.7 Sampled signal of the output pulse current
图 7 脉冲电流差分取样信号

取样回路同样对脉冲上升前沿有较大影响，在双绞线输出条件下，测试取样信号，如图 7 所示，CH2 为脉冲电流差分取样信号，CH4 为 IGBT 恒流开关驱动信号，从图中可以看到，由于取样回路的影响，在脉冲上升阶段有较大的过冲和振荡，经过差分电路反馈送到控制系统中会造成驱动信号的失真从而影响脉冲电流上升前沿。

根据上述分析，采用多组并联的RVVSP电缆线作为输出线，降低回路电感；同时对采用低电感采样电阻和带自举电源的差分放大电路进行反馈，增加匹配电路以减小采样失真带来的影响。采用改进方案在300 A条件下，输出线为18 m和40 m时电流上升时间分别为18.6 μs和24.7 μs，如图8所示。



(a) output line of 18 m　　(b) output line of 40 m

Fig.8 300 A current waveform
图 8 脉冲电流为 300 A 的电流波形

5　结论

采用L-C串联谐振拓扑结构直流充电电源和线性恒流技术，研制了一种大功率半导体激光二极管阵列驱动电源，对直流充电和脉冲放电工作模式进行了优化，使两部分工作在时间序列上相互隔离，有效解决了充电部分的高频大电流对恒流脉冲部分的影响；同时分析了影响脉冲上升沿因素，采用多组屏蔽双绞结构的输出线和对取样回路进行参数匹配，有效解决了大电流、长距离传输时脉冲电流上升前沿问题，实现了300 A输出时，40 m输出条件下脉冲上升前沿24.7 μs，小于要求的30 μs技术指标。经过500 Hz,250 μs,300 A条件下长时间烤机工作，电源运行稳定、可靠，技术指标满足大功率二极管阵列负载的需求，已经成功用于某激光二极管阵列负载。

参考文献:

[1] Shuichi Fujikawa,Keisuke Furuta. High efficient and high-quality beam generation of a diode-stacks pumped Nd:YAG rod laser[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington:[s.n.], 2001:185-188.

[2] 李季,陈结详,张毅,等. 大功率半导体激光器驱动电源[J]. 量子电子学报, 2003,20(1):30-34. (LI Ji,CHEN Jiexiang, ZHANG Yi,et al. Power supply of high-power diode laser[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003,20(1):30-34.)

[3] 姚东明. 激光二极管阵列泵浦固体激光器驱动电源及谐振腔的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2004. (YAO Dongming. Study on laser diode arrays pumped solid state laser's power supply and resonator[D]. Wuhan,China:Huazhong University of Science and Technology, 2004.)

[4] 刘广文. 脉冲半导体激光器供电电源的研制[D]. 长春:长春理工大学, 2002. (LIU Guangwen. Development of pulse semicondutor laser power supply[D]. Changchun,Jilin,China:University of Science and Technology, 2002.)

[5] 张立帮. 高功率脉冲半导体激光电源的研制[J]. 电子设计应用, 2009(8):93-95. (ZHANG Libang. Development of high-power pulse semicondutor laser power supply[J]. Electronic Design & Application, 2009(8):93-95.)

[6] 梁国忠,梁作亮. 激光电源电路[M]. 北京:兵器工业出版社, 1995. (LIANG Guozhong,LIANG Zuoliang. Laser Power Supply Circuit[M]. Beijing:Weapon Industry Press, 1995.)

[7] 阮新波,严仰光. 直流开关电源的软开关技术[M]. 北京:科学出版社, 2000. (RUAN Xinbo,YAN Yangguang. Soft Switching Technology of DC Switch Power Supply[M]. Beijing:Science Press, 2000.)

[8] Pai S T,ZHANG Qi. Introduction to High Power Pulse Technology[M]. USA:World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1995.

(下转第 472 页)