

· 电路与控制 ·

大功率光纤激光器泵浦源 LD 驱动电源设计

张悦玲, 周冠军

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要:根据大功率、低噪声半导体泵浦光纤激光器对于激光电源的要求,通过LD工作原理和输出特性分析,设计一种以ADuc842高速单片机为主控芯片的LD驱动控制电路。设计采用自动电流控制(ACC)和自动温度控制(ATC)的方式,实现LD的恒流源驱动和恒温控制。设计还引用了双限流电路、浪涌吸收电路及慢启动电路等一系列保护电路,提高了LD的抗冲击能力和工作稳定性。实验结果表明,电流输出稳定度优于0.5%,温度稳定度达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

关键词:laser diode(LD); 光纤激光器; 自动电流控制; 自动温度控制; proportion integral derivative(PID)

中图分类号: TN248.4; TN710.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-02-0070-05

Design of Laser Diode Driving Power Supply for High Power Fiber Laser Pumping Source

ZHANG Yue-ling, ZHOU Guan-jun

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: According to the laser power supply requirements of semiconductor pumping fiber lasers with high power and low noise, as well as the analysis of laser diode (LD) operation function and output characteristics, a LD driving control circuit with high speed micro-computer unit ADuc842 as the main control chip is designed. Automatic current control (ACC) and automatic temperature control (ATC) are used in the design to realize constant current source driving and constant temperature control of LD. Protection circuits such as double current-limiting circuit, surge absorbing circuit and low speed starting circuit are adopted in the design so as to improve the anti-interference ability and operation stability. Experimental results show that output current stability error is better than 0.5% and temperature stability error is $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Key words: laser diode (LD); fiber laser; automatic current control (ACC); automatic temperature control (ATC)

近年来,随着高功率半导体激光器泵浦技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率水平快速提升,单根光纤的输出已经从最初的几百毫瓦上升到了千瓦级水平^[1],与其他种类的激光器以及常规固体激光器相比,光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、抗电磁干扰能力强、安全可靠等优点,在工业和国防等领域具有广泛的应用前景。

光纤激光器的泵浦源,一般采用单色性好、体积小、质量小、结构简单的半导体激光器。其中PN

结注入式半导体激光器,即激光二极管(LD),是目前技术最成熟、应用最广泛的器件^[2],设计即采用LD作为光纤激光器的泵浦源。LD的激励方法多采用电流注入方式,要得到稳定的输出功率,就必须使注入电流稳定,即要采用恒流源。针对大功率LD的恒流源设计,需要利用大功率场效应管的电压控制电流的特性,经电流采样形成深度负反馈,从而实现输出电流的恒定。采用PID控制算法,利用PWM脉宽调制,控制热电制冷器的驱动电流,为LD提供恒

定的、能够精密调整的恒温控制。同时,半导体激光二极管作为一种结型器件,对于电流冲击的承受能力很差,稍有电流冲击就会对其造成损坏。因此,半导体激光器的电源电路中必须具有特殊的抗电冲击措施和过流保护电路。文中采用电流慢启动、上电冲击保护、双限流电路、浪涌强制吸收或隔离保护等一系列保护电路,提高了LD的抗冲击能力和工作稳定性。

1 LD工作原理及特性分析

1.1 LD发光机理分析

LD的基本结构为:垂直于PN结面的一对平行平面构成法布里-珀罗谐振腔,它们可以是半导体晶体的解理面,也可以是经过抛光的平面。其余两侧面则相对粗糙,用以消除主方向外其他方向的激光作用。当半导体的PN结加有正向电压时,会削弱PN结势垒,迫使电子从N区经PN结注入P区,空穴从P区经过PN结注入N区,这些注入PN结附近的非平衡电子和空穴将会发生复合,从而发射出波长为 λ 的光子,其公式为

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (1)$$

式中, h 为普朗克常数; c 为光速; E_g 为半导体的禁带宽度。如果注入电流足够大,则会形成和热平衡状态相反的载流子分布,称为粒子数反转。有源层内的载流子在大量反转时,少量的自发辐射产生的光子,由于谐振腔两端面往复反射而产生感应辐射,造成选频谐振正反馈,或者说对某一频率具有增益。当增益大于吸收损耗时,就可以从PN结发出相干性强、亮度高、方向性好、频带窄的激光。LD除了具备一般激光的相干性好、方向性强、发散角小、能量高度集中外,还具有光电转换效率高、输出功率大、体积小、结构简单、抗震性强等特点^[3]。

1.2 LD输出特性分析

图1是一种典型的大功率LD模块的PIV特性曲线,LD输出功率与正向驱动电流的关系曲线。由图1可以看出,当驱动电流低于阈值时,激光器只能发射出荧光,而当驱动电流大于激光器的阈值电流时,激光器才能正常发出激光。因此,要使LD发射激光,就要供给LD略大阈值电流的工作电流。而

且,LD的阈值电流受温度影响,温度越高,相应的阈值电流越大。在某一温度下,当驱动电流高于阈值时,输出激光,光输出功率随着驱动电流的增加而迅速增加,并近似呈线性上升。

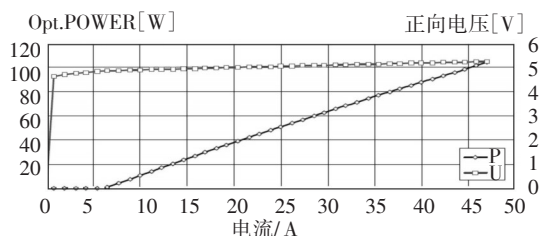


图1 LD模块的PIV特性曲线

2 LD驱动电源设计

采用以ADuc842高速单片机为主控芯片,恒流源采用带有电流深度负反馈的自动电流控制来实现LD的高稳定恒流输出。恒温控制采用对温度传感器采样,结合PWM脉宽调制,控制热电制冷器的驱动电流来实现。保护电路包括双限流电路、浪涌强制吸收及电流慢启动等一系列保护电路。驱动电源设计原理如图2所示。

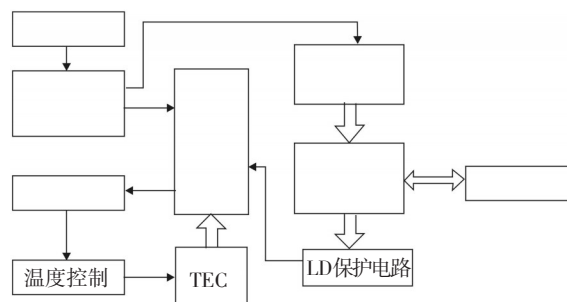


图2 驱动电源设计原理框图

2.1 恒流源原理与设计

恒流驱动电路主要由电压基准电路、电压电流转换器、功放电路、显示电路和保护电路组成。用电流负反馈原理来实现高稳定和 low 纹波系数的驱动电流源。采用自动电流控制(ACC)方式^[4],可以获得合适的输出电流,如图3所示。基准电压 V_r 送入运放 A_1 的同相输入端,该运放控制跨导放大器的导通程度,并由此获得相应的输出电流,输出电流在采样电阻上产生采样电压,该采样电压放大后作为反馈电压反馈回电压放大器的反相输入端,并与

基准电压比较,对输出电压进行调整,使整个闭环反馈系统处于动态平衡中,从而达到稳定输出电流的目的。通过公式可以直观地找到输出电流 I_o 和控制电压 V_f 的关系。

$$V_f = F \cdot I_o \quad (2)$$

$$F = \frac{V_f}{I_o} = \frac{A_f \cdot I_o \cdot R_s}{I_o} = A_f \cdot R_s = R' \quad (3)$$

式中, F 是反馈系数; I_o 是输出电流; V_f 是 A_2 的输出电压; A_f 是反馈网络放大倍数。

$$A_f = \frac{1}{F} \quad (4)$$

$$A_f = \frac{1}{R'} \quad (5)$$

如果取 $R_s = 0.1 \Omega$, $A_f = 20$, 则 $R' = 2 \Omega$, 即 $A_f = \frac{1}{F} = \frac{1}{2} = 0.5$, 则输出电流 I_o 表达式为

$$I_o = A_f \cdot V_f \quad (6)$$

式中, A_f 是 A_1 闭环放大倍数。因此,假设需要 2.5 A 的电流,给定电压就需要 5 V。

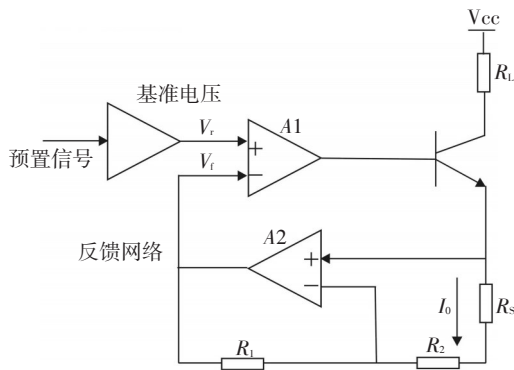


图3 恒流源设计原理图

2.2 自动温度控制原理与设计

设计采用了热电效应比较显著、热电致冷功率比较高的热电制冷器(TEC)作为制冷元件,实现系统的恒温控制。温度传感器将测得温度转变为数字信号,送入 ADuc842 进行数据处理,将传感器检测到的 LD 工作温度信号与设定温度值相比,当检测信号小于设定温度值时,单片机发出制热温控信号,当检测信号大于设定温度值时,单片机发出制冷温控信号。控制信号的大小通过软件来控制,实现自动温度控制(ATC)功能^[5]。

温度检测传感器采用 DS18B20,特别适合与微处理芯片构成温度测控系统,该芯片测温范

围 $-55 \text{ }^\circ\text{C} \sim +125 \text{ }^\circ\text{C}$,分辨率为 9~12 位,与传统的热敏电阻相比,它能够直接读出被测温度,并且可根据实际要求通过简单的编程来实现 9~12 位的数值读取方式。传感器将温度信号传给 ADuc842 进行数据处理,经过 PWM 脉宽调制输出,控制热电制冷器的驱动电流来实现恒温控制。

根据前面叙述,为了使系统具有良好的瞬态响应、控制精度和较强的抗干扰能力,用 DS18B20 读取温度采样值,采用数字 PID 控制^[6],其控制原理框图如图 4 所示。

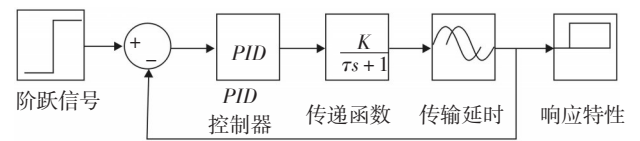


图4 PID控制原理框图

在温度控制过程中,数字温度传感器 DS18B20 和 TEC 都具有一定的热惯性,可以用一阶惯性环节来描述,温控系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{(K_p + \frac{1}{\tau_1 s})}{1 + (K_p + \frac{1}{\tau_1 s}) \cdot \frac{1}{\tau_2 s}} = \frac{K_p \tau_1 \tau_2 s^2 + (K_p \tau_1 + \tau_2) s + 1}{\tau_1 \tau_2 s^2 + \tau_1 (K_p + 1) s + 1} \quad (7)$$

其中, K_p 表示温度控制的比例系数; τ_1 表示 PI 环节的积分时间常数; τ_2 表示惯性时间常数。令 $\xi = \frac{K_p + 1}{2} \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}}$, ξ 为阻尼比,在这里, $\tau_1 = 1 \text{ s}$, 根据温度传感器和 TEC 的特性参数 τ_2 约为 25 s, 调节 K_p 即可改变阻尼比 ξ 。 ξ 太大或者太小都会影响系统的稳定性。实验发现, ξ 在 0.6~0.8 之间时,系统的响应在最短时间内趋于稳定。

采取直接测量的方法^[5],先设定在某时刻 $t = t_0$ 驱动 TEC 对激光器制冷,即对模型施加阶跃信号,测量激光器温度响应即得到该系统的阶跃响应特性。多次测量拟合得到结果平均后作为最终结果,参与仿真。选择合适的 PID 参数进行实际控温试验,最终整定 PID 参数。

3 大功率 LD 驱动电源的保护电路

LD 是昂贵而易损的半导体器件,其安全问题将影响应用系统的可靠性,因此驱动电源能否有效保

证LD的安全必须考虑。如在恶劣条件下工作时,大功率LD模块最易发生的是浪涌击穿,因此在LD驱动电源的设计上主要应考虑:(1)激光器必须工作在限制电流以内,一个安全可靠的限流电路是不可缺少的。(2)为了防止驱动电源浪涌冲击,必须有比较强的浪涌吸收电路。(3)由于激光器是一种敏感的电流元件,所以驱动电流不能直接加在激光器两端,慢启动电路对激光器的防护也是必须的^[8]。

3.1 限流保护电路

对于大功率LD的驱动电源,必须限制其输出电流的大小,使它不超过半导体激光器所允许的最大注入电流。设计采用双限流电路,两个限流电路确保通过LD电流不会超过设定值。具体工作原理如图5所示。

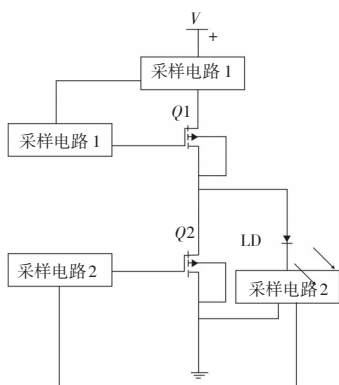


图5 限流保护电路图

通过Q1的电流经采样电路1转变成电压信号,与基准电压相比较,经负反馈电路1使流过Q1的电流恒定。通过半导体激光器LD的电流经过采样电路2转变为电压信号,与电流调节端的电压相比较,如果流过半导体激光器的电流超过设定值,经过负反馈电路2调节使得通过Q2的电流增加,从而使通过LD的电流减小;流过LD的电流太小,经过采样电路2和负反馈电路2调节,可使得流过Q2的电流变小,从而使流过LD的电流变大。如此反复,通过负反馈电路的控制可使得流过半导体激光器的电流恒定。

3.2 浪涌吸收电路及慢启动电路

浪涌多发生在功率器件开通和关断的瞬间,因为这个瞬间电路会有很大电流流过或者电路中某个器件两端会有很大的电压^[8]。图6为浪涌吸收及慢

启动电路原理图。

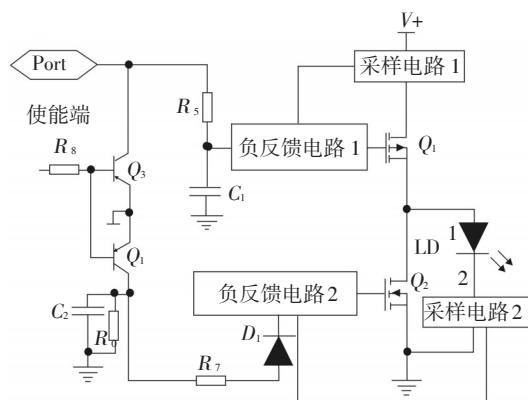


图6 浪涌吸收电路和慢启动电路原理图

这种电路是利用功率器件的开通或关断来强制吸收或隔离浪涌对器件的冲击。这个电路作用分三个阶段:第一阶段在使能端电压为低电平时。使能端电压为低电平, Q_3 导通,通过负反馈电路1的控制, Q_1 断开,强制隔离电源 V_+ 对半导体激光器LD的冲击;使能端为低电平, Q_4 导通,通过负反馈电路2控制,使 Q_2 导通,这样即使有浪涌冲击,也会被 Q_2 强制吸收,不会影响半导体激光器LD。第二阶段使能端从低电平到高电平。 Q_3 、 Q_4 断开,设 C_1 上的电压从 V_+ 降到基准电压值所要的时间为 t_1 , C_2 从 V_+ 降到调节端设定电压值的时间为 t_2 ,调节 R_5 、 C_1 和 R_6 、 C_2 的值,可以使得 t_2 远大于 t_1 。这样在 t_1 阶段,通过负反馈电路1的控制使得 Q_1 慢慢导通,流过 Q_1 电流从零直到恒定,这时由于 t_2 远大于 t_1 , C_2 上还有电压,通过负反馈电路2的控制使得 Q_2 处于导通状态,这样流过 Q_1 的电流以及由于 Q_1 开通产生的浪涌电流全部由 Q_2 吸收,然后随着时间的增加 C_2 电压慢慢降为零,流过 Q_2 的电流慢慢减小,LD上电流慢慢增加直到达到设定值。第三阶段使能端从高电平到低电平。使能端为低电平 Q_3 、 Q_4 导通。 C_1 由于 R_5 存在,电压从基准电压慢慢升至 V_+ ,通过负反馈电路1的控制使得 Q_1 慢慢关断; Q_4 导通, V_+ 直接给 C_2 充电,电压迅速升为 V_+ ,通过负反馈电路2的控制使得 Q_2 迅速导通,这样由于 Q_1 关断产生的浪涌将会被 Q_2 强制吸收。

4 实验结果与分析

设计在室温环境下,在超净实验室室温环境下,

对LD驱动电源进行测试,得到实验结果,并用Matlab软件绘制设定电流与实际电流的特性曲线如图7所示。为了便于观察,测试图中加入与设定值相等的理想值作为参考线;在温度18~32℃范围内,调整温度设定值,得到实验结果,同样用Matlab软件绘制设定温度与实际温度的特性曲线如图8所示。实验结果表明,电流输出稳定度优于0.5%。温度稳定度达到 ± 0.1 ℃,达到设计要求。

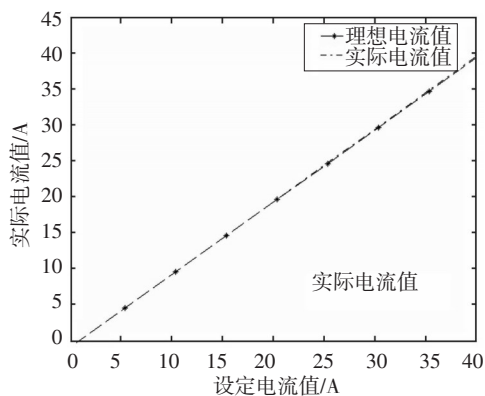


图7 LD设定电流与实际电流的测量结果

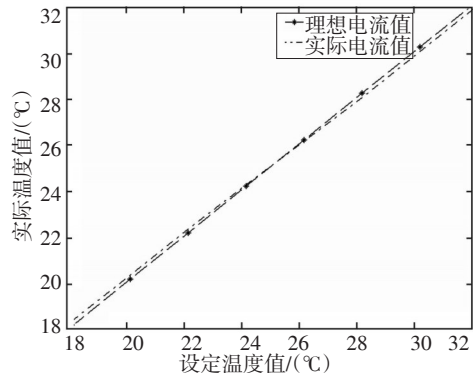


图8 LD设定温度与实际温度的测量结果

5 结论

所采用的LD驱动电源设计方法,对于大功率LD的驱动切实可行,输出电流在0~40 A连续可调,驱动电流和光功率稳定性良好。同时具有较高的温度稳定性和较小的温度波动。该电源采取双限流电路、浪涌吸收和慢启动电路等一系列保护电路,保证LD的稳定工作,延长了使用寿命。设计的大功率LD驱动电源不仅可以作为光纤激光器的泵浦源,也可以广泛应用到其他领域,具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] JEONC Y, SAHU J K, PAYNE D N, et al. Ytterbium-doped large core fiber laser with 1 kW of continuous-wave output power [J]. Electronics Letters, 2004, 40(8): 470.
- [2] 楼棋洪,周军,朱健强,等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135-138.
- [3] 春艳,胡新宁,赵尚武,等. 一种光纤传感器光源驱动电路的设计[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 98-100.
- [4] 张国雄,黄春晖. 一种高稳定连续可调半导体激光器驱动源[J]. 激光与红外, 2011, 41(2): 160-163.
- [5] 张悦玲,杨绍岩,张晓娟. 基于MSP430F449的半导体激光器温控系统设计[J]. 光电技术应用, 2012, 27(3): 10-14.
- [6] 江文杰,蔡建乐,林业风,等. 基于ADuc812的半导体激光器智能温控及驱动电源设计[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(10): 2221-2224.
- [7] 崔玮,徐根林. DSP和DS18B20的温度测量系统[J]. 微计算机信息, 2007, 23(14): 166-168.
- [8] 陈伟,蔡迎波,孙峰. 大功率半导体激光器驱动电源保护电路设计[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(6): 68-74.

(上接第69页)

参考文献

- [1] 王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 78-98.
- [2] 田泽. 嵌入式系统开发与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 2-10.
- [3] 杜伟宁,王冕,蔡印,等. 基于MSP430的线阵CCD数据采集系统[J]. 吉林大学学报(理学版)2012, 50(5): 1003-1006.
- [4] 马愈昭. 便携式测量系统中彩色线阵CCD数据采集电路的设计[J]. 光电工程, 2012, 39(5): 30-33.
- [5] 谭露雯,李景镇,陆小微,等. 基于CPLD工作模式可调的线阵CCD驱动电路设计[J]. 光子学报, 2010, 39(3): 436-439.
- [6] 周根荣,姜平. 一种基于高速超微型单片机的CCD驱动电路设计[J]. 电子技术应用, 2006(3): 105-107.
- [7] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社.
- [8] 张德军,张俊俊,刘自红. 基于USB2.0的线阵CCD数据采集系统驱动电路设计[J]. 机床与液压, 2011, 39(12): 95-97.
- [9] 袁宝红,付奎,张德祥. 基于FPGA和LabVIEW的USB数据采集与传输系统[J]. 仪表技术与传感器, 2013(9): 24-26.