

光纤耦合激光器驱动与控制技术研究

李桂英 岳宇博 李睿*

(长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 针对一种将多个半导体激光器(LD)芯片串联驱动,通过光纤耦合进行功率合成,构成光纤耦合高功率输出激光模块的特殊驱动要求,研发了小型化高效率激光电流源组件和小型化高效率半导体制冷(TEC)LD模块温度控制组件。组件工作温度范围为 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$,实验证明达到了设计性能指标要求。建立了LD模块驱动电流源电路的数学模型,提出了LD模块电流源控制电路的数字化实现方法,并利用ADuC831单片机实现了数字化设计。给出了一种基于TEC的LD模块温度控制组件的结构,建立了简化、实用的温度控制系统数学模型,对TEC的性能系数 ξ 、控制端的热量 Q_c 和TEC的工作电流 I 进行了寻优控制,减小了激光器输出波长随温度的漂移。

关键词 激光器;光纤耦合激光器;激光电流源;半导体制冷温度控制;数字控制技术

中图分类号 TN248.1; TN245 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0402005

Research on Electronic Control Technology of Fiber Coupled Laser-Diode

Li Guiying Yue Yubo Li Rui

(College of Electronic Information and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract For the special power requirements of the laser module, which is consist of the multiple laser diode (LD) chips series driven and the power of synthetic by combining the fiber, a small high-efficiency laser current source component is designed and developed, and a small high-efficiency semiconductor cooling thermal electrical cooler (TEC) fiber-coupled laser module temperature controlling component is presented as well. The component operating temperature range is from $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the result that the design can meet the performance requirements has been proved in the experiment. The mathematical model of LD module driving current source circuit is established. The digital design method of a laser current source controlling circuit is presented, and achieved using ADuC831. The temperature controlling component structure of a LD module based on the TEC is introduced, a simplified mathematical model of the temperature control component is established, and the coefficient of performance of the TEC ξ , the controlling side of the heat Q_c and the operating current I of TEC are optimized to solve the problem of laser output wavelength drifting with temperature.

Key words lasers; fiber coupling laser; laser current source; thermal electrical cooler temperature control; digital control technology

OCIS codes 140.2010; 140.2020; 140.3480; 140.3510

1 引 言

作为一种新型的光源,半导体激光器(LD)因具有转换效率高、体积小、重量轻、可靠性高、能直接调制及与其他半导体器件集成的能力强等特点,已经得到广泛的应用,其电源驱动以及散热问题一直是

人们关注的焦点之一。光纤耦合输出的高功率激光二极管模块具有体积小、光束质量好、亮度高等特点,可替代现有的YAG固体激光器直接用于激光驾束制导、医疗、激光加工、光电检测、激光雷达等领域^[1]。但是,半导体激光器波长随温度漂移大,要求

收稿日期: 2011-08-26; 收到修改稿日期: 2011-12-19

基金项目: 总装项目(ZLY2008300-4)资助课题。

作者简介: 李桂英(1952—),女,副教授,主要从事光电信号检测与处理技术等方面的研究。

E-mail: liguiying0929@126.com

* 通信联系人。E-mail: liruinuaa521@126.com

驱动电源具有很高的电流稳定度。为避免过热或过功耗损坏激光器,要求电源无上电和开关机电流冲击。传统电流源电路的功率部分一般采用功放管和激光器相串联的电路形式。这种电路形式的优点是电路简单,但是为使功放管具有恒流特性,其必须工作在放大区,尤其是当要求电流源输出电流变化范围较大时,会在功放管上产生较大的功耗,产生过多的热量,将降低电源效率,也降低系统的可靠性^[2]。多管芯串联激励光纤耦合输出半导体激光器可以输出很高的连续激光功率^[3~5],由于激光器的效率只有 35%~45%,对于十几瓦连续激光输出时,为了提高半导体激光器电流源的效率,必须采用具有效率高、功耗低的脉冲宽度调制(PWM)型 DC/DC 变换电路作为激光器的驱动电流源,并且解决 DC/DC 变换电路的控制及上电冲击问题。本文针对光纤耦合激光器的应用要求,研制了 LD 模块驱动电流源和温度控制电路系统。

2 光纤耦合输出 LD 基本原理

多管芯串联激励光纤耦合输出半导体激光器模块原理框图^[6]如图 1 所示。LD₁~LD₆ 为激光二极管单元。LD 发出的光束首先经微圆柱透镜准直,准直后的光束可认为是在 y 方向上有一定发散角的线光源,其理想光斑图形如图 1 中的①所示,准直后的 LD₁~LD₆ 的输出光束分别经反射镜 1 和反射镜 2 两次反射,光束的传播方向旋转了 180°,并形成了一组复合光束,其截面光斑图案如图 1 中的②所示,可看成是一组平行的线光源,每个线光源在 x, y 方向上都有一定的发散角(分别对应激光二极管的慢轴发散角和快轴准直后的发散角),利用两只垂直放置的柱透镜 1 和透镜 2 可将这样的复合光束聚焦耦合进光纤,进行功率合成,合成光束如图中的③和

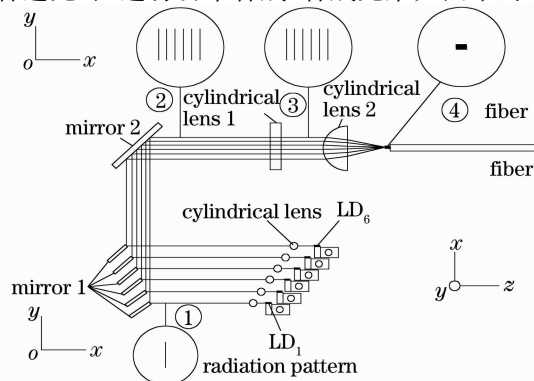


图 1 半导体激光器模块原理框图

Fig. 1 Block diagram of the semiconductor LD module

④所示。激光器驱动电流源的主要技术指标有: 1) 输出电流 0~4 A 连续可调节; 2) 输出电压变化范围 8~17 V; 3) 电流源输出电流相对稳定度优于 0.5%; 4) 无电流冲击; 5) LD 模块工作环境温度范围 -45 °C~50 °C; 6) 为了避免 LD 模块输出激光波长随温度漂移过大^[7], LD 管芯工作周围温度控制在 -5 °C~20 °C 之间。

3 LD 驱动电流源电路模型

驱动电流源电路模型如图 2 所示。图中 $H_1(s)$ 、 $H_2(s)$ 为控制电路的传输函数, $H_3(s)$ 为 DC/DC 变换电路的传输函数。DC/DC 变换电路由电压控制 PWM 型高效开关电源组成, 其输出电压也就是 LD 模块驱动电流源的输出 V_0 和控制电压 V_c 的关系近似为

$$V_0 = 5V_c + 6, \quad (1)$$

式中 $0 \leq V_c \leq 2$ 。

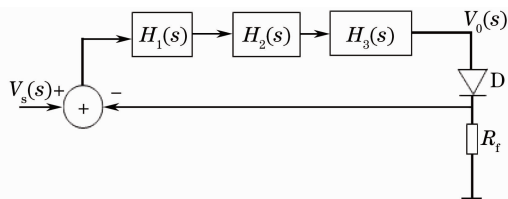


图 2 LD 模块驱动电流源电路模型

Fig. 2 Circuit model of LD drive source

激光二极管属于非线性器件^[3], 其伏安特性近似于二极管特性, 若将其在工作点附近等效为线性电阻 R_D ($R_D = V_D / I_D$), V_D 和 I_D 分别是 LD 模块的工作电压和工作电流, 则图 2 所示电流源电路的线性化模型的传输函数可表示为

$$I(s) = H_0(s)V_s(s) / [R_D + R_t + R_t H_0(s)], \quad (2)$$

式中 $H_0(s) = H_1(s)H_2(s)H_3(s)$ 。

若在电路设计上满足 $|R_t H_0(s)| \gg R_D + R_t$, 则激光电源输出的稳态电流为

$$I(s) = V_s(s) / R_t. \quad (3)$$

(3) 式说明当 $H_0(s)$ 的取值足够大时, 在 DC/DC 变换电路的线性区, 输出稳态电流与 LD 模块的等效电阻 R_D 无关, 即 DC/DC 模块具有恒流输出特性。 R_t 一般取阻值为 0.01~0.10 Ω 温度稳定性好的精密电阻作为电流检测取样电阻, 只要改变 $V_s(s)$ 就可以调整 LD 模块的稳态工作电流。

3.1 LD 模块电流源的频率响应特性

避免产生冲击电流是激光电源的关键技术之一, 产生电流冲击的主要原因有: 1) 电压控制 DC/DC 变换电路存在上电冲击; 2) 控制电路系统欠阻

尼,上电时瞬态响应产生的电流冲击。对 DC/DC 变换电路可以采用电磁兼容设计、上电软启动等技术克服上电冲击。而对于控制系统欠阻尼产生的冲击,需要从电路系统设计方面解决。从抑制电流冲击的角度考虑,希望 DC/DC 变换电路的带宽越窄越好,但是从电流源的动态性能角度考虑则带宽越大动态响应越快;通过实际测量,在线性区 DC/DC 变换电路的传输函数近似为

$$H_3(s) = 5/[1 + (s/\omega_3)], \quad (4)$$

一阶近似转折角频率 $\omega_3 = 6\pi \times 10^3$ rad/s,图 2 中 $H_1(s)$ 、 $H_2(s)$ 分别由低漂移运放组成,其闭环传输函数分别为

$$H_1(s) = K_1/[1 + (s/\omega_1)], \quad (5)$$

$$H_2(s) = K_2/[1 + (s/\omega_2)]. \quad (6)$$

由(4)~(6)式可得 LD 模块驱动电流源的闭环传输函数为

$$H(s) = H_1(s)H_2(s)H_3(s)/[1 + K_f H_1(s)H_2(s)H_3(s)]. \quad (7)$$

为分析方便,在系统设计上满足 $\omega_1 < 10\omega_3$, $\omega_2 < 10\omega_3$,可以将三阶系统作二阶近似,忽略 ω_3 的影响,将(4)~(6)式代入(7)式并整理得

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (8)$$

式中 $\omega_n = (\omega_1 + \omega_2)/2$, $\omega_n^2 = 5K_1K_2\omega_1\omega_2$,为避免电路系统瞬态响应出现冲击,工程设计需要取阻尼系数 $\xi > 0.707$,文中取 $\xi = 1$,系统工作在过阻尼状态。根据(8)式确定 ω_1 和 ω_2 以及电路的直流增益 K_1 和 K_2 ,取 $K_1K_2 = 1000$,令 $\omega_1 = a\omega_2$,设 $\omega_1 = 10$ 则 $\omega_2 = 2 \times 10^5$,可得 LD 模块驱动电流源的传输函数为

$$H(s) = \frac{10^{10}}{s^2 + 200010s + 10^{10}}. \quad (9)$$

3.2 LD 模块电流源的电流相对稳定特性

电流相对稳定度的定义为输出电流在规定时间内最大变化量相对于电流平均值之比,即 $\Delta I/I$ 。用 $dI(s)$ 近似表示 ΔI ,由(2)式,若前向通路电路参数变化导致前向通路传输函数产生 $dH_0(s)$ 变化,则引起驱动电流源电流的相对变化为

$$dI(s)/I(s) = dH_0(s)/\{[1 + K_f H_0(s)]H_0(s)\}, \quad (10)$$

式中 $K_f = R_f/(R_f + R_D)$ 。

若激光二极管模块受温度等影响其等效电阻产生 dR_D ($dR_D = \Delta V_D/\Delta I_D$) 瞬时变化时,激光电源产生的相对瞬时电流变化为

$$dI'(s)/I(s) = -dR_D/[R_D + R_f + R_f H_0(s)]. \quad (11)$$

$dH_0 = 0$ 点的坐标对应 $H_0(s)$ 的直流增益 $H_0 = K_1K_2K_3 = 5000$, $K_3 = 5$ 是 DC/DC 变换电路(电压控制电流源)的直流电压增益(DC/DC 变换电路的输出电压与控制端输入电压值比),设 $dH_0/H_0 = \pm 4\%$,实测 LD 的工作电流 $I_D = 4$ A 时,LD 的等效直流电阻 $R_D = 2.6 \Omega$,由 LD 工作特性曲线可得其动态电阻 dR_D 很小,一般小于 0.1Ω ,在 R_D 变化 $\pm 0.2 \Omega$ 的情况下,根据(10)式和(11)式得到的 LD 驱动电流源的相对稳定特性曲面如图 3 所示,其纵坐标的绝对值表示电流的相对稳定度。实际测量中电流相对稳定度优于 0.3% 。

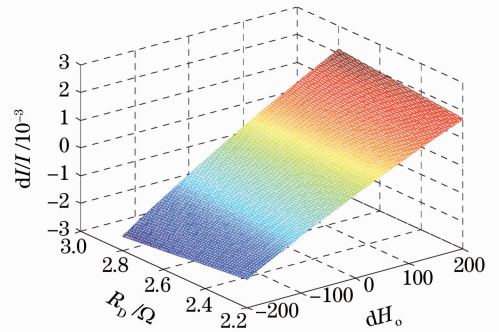


图 3 电流相对稳定度仿真曲面图

Fig. 3 Simulation graph of the relative stability of the current

对于利用模拟技术设计实现 $H_1(s)$ 和 $H_2(s)$ 的情况, $H_1(s)$ 和 $H_2(s)$ 由具有深度负反馈的模拟运算放大器综合而成,可以得到很高的增益稳定度,即 dH_0 很小。对于利用全数字技术实现的情况,由于将 $H_1(s)$ 和 $H_2(s)$ 转换为 $H(z)$,由程序完成控制,相当于 $dH_0 = 0$,所以可以获得更高的电流相对稳定度。

3.3 基于 ADuC831 的数字控制 LD 模块驱动电流源实现技术

尽管由模拟运算放大器综合得到的 $H_1(s)$ 和 $H_2(s)$ 系统函数稳定性很好,但是也存在传统模拟电路存在的温度稳定性、抗干扰性以及可靠性差等缺点。图 2 中设 DC/DC 变换器的控制信号为 $V_c(s)$,在输入 $V_s(s)$ 作用下,LD 模块驱动电流源控制回路传输函数为

$$H_d(s) = V_c(s)/V_s(s) = H_1(s)H_2(s)/[1 + KH_1(s)H_2(s)] = A/(s^2 + Bs + C), \quad (12)$$

式中 $A = K_1K_2\omega_1\omega_2$, $B = \omega_1 + \omega_2$, $C = (1 + K_1K_2K_3K_f)\omega_1\omega_2$, $K = K_3K_f$ 。

令(12)式中 $s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$, 取采样时间 $T =$

100 μ s, 可得数字控制系统传输函数为

$$H(z) = \frac{1.786 + 3.57z^{-1} + 1.786z^{-2}}{1 + 3.714z^{-1} + 2.07z^{-2}}. \quad (13)$$

由(13)式可得数字控制器信号流图如图4所示。

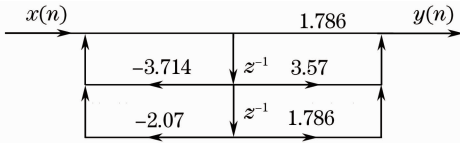


图4 数字控制器信号流图

Fig. 4 Signal flow graph of digital controller

在硬件电路设计上,选用片内具有8路采样率为247 kS/s 12 bit ADC和两路12 bit +D/A的ADuC831单片机作为控制器,实现了全数字化设计,硬件电路如图5所示。

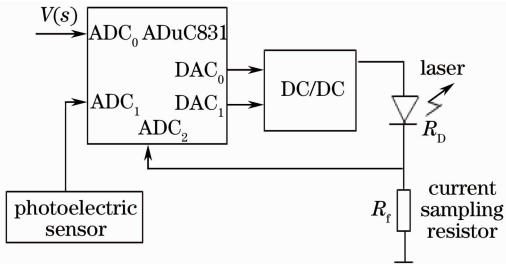


图5 数字控制电流源原理框图

Fig. 5 Block diagram of digital control current source

单片机的ADC₀通道作为参考电压V(s)输入端,通过调节V(s)可以改变光纤耦合激光器电流源输出电流的大小,也可以通过键盘调节激光电源的输出电流。若ADC₀参考电压V_R取1.5 V,电流取样电阻R_f取0.1 Ω ,则电流设定误差为 ± 3 mA,同理ADC₂通道电流检测误差也为 ± 3 mA。对于不需要调节激光器工作电流的应用场合,还可以通过编程直接设定电流源的输出电流。采用数字化方法设计电流源不存在系统函数随温度变化的问题,可以进一步提高电流源的稳定性。

单片机的ADC₂通道作为电流取样输入端,ADC₁接PIN光电传感器作为LD模块工作状态检测输入端。DAC₀输出控制电压,用于稳定DC/DC电路的输出电流,DAC₁输出控制电压作为电路故障保护控制信号。根据图4通过编程实现了LD模块驱动的数字控制。光纤耦合LD模块驱动电流源和温控模块实物图如图6所示。图7是在-40 $^{\circ}$ C环境条件下,系统上电瞬间半导体激光电源电流的取样波形图。可见半导体激光器驱动电路无

上电冲击。

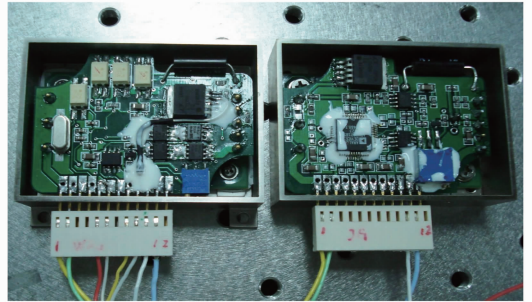


图6 半导体激光电源模块和温控模块实物图

Fig. 6 Semiconductor laser power and temperature control module

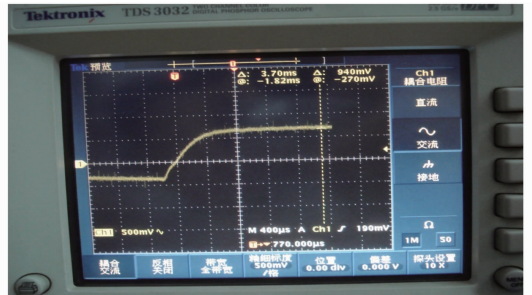


图7 激光电源电流瞬态响应取样波形图

Fig. 7 Transient response sampling waveform of laser power supply current

4 光纤耦合LD模块温度控制技术

根据不同使用条件,LD模块温度控制可以采用水冷、风冷等冷却方式。文中采用半导体制冷(TEC)温度控制工作方式,具有体积小、功耗低等优点。图8是LD驱动模块及TEC控制结构示意图^[8]。主要由LD芯片组、芯片载体、PIN背向监视光电二极管、TEC热电器件、NTC铂电阻温度传感器、LD驱动激光电流源模块、TEC温度控制电流源模块等组成,Pwr. line filter是电磁兼容滤波器。

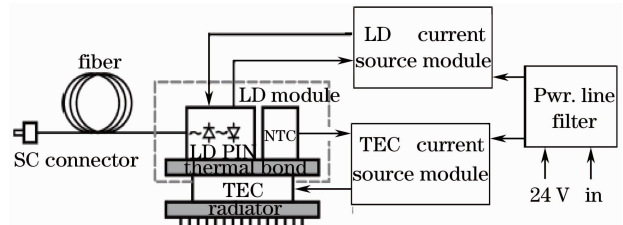


图8 LD模块驱动及TEC控制结构示意图

Fig. 8 Schematic of LD and TEC control module

图8中的LD模块TEC温度控制电路原理框图如图9所示,具有正温度系数的铂电阻R_t贴在芯片载体表面,由CCS 4 mA恒流源为铂电阻测温提供直流偏置,该恒流源是由运算放大器组成的小电

流恒流源,通过检测铂电阻两端的直流电压,计算出 LD 模块的温度、温度变化率等,以确定在不同环境条件下采用不同的 TEC 驱动电流,达到优化(或接近最佳)控温的目的。

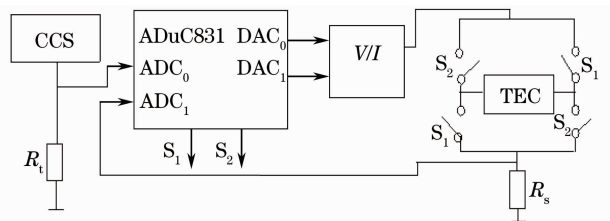


图 9 LD 模块 TEC 温度检测与控制电路原理框图

Fig. 9 Temperature measurement and control circuit

由 DC/DC 变换等构成的 V/I 转换电路,其输出电流和控制电压成正比,为 TEC 提供驱动电流,其输出电流由 ADuC831 单片机的 DAC₀ 端口输出的直流电压控制,电流在 0~5 A 连续可控。DAC₁ 端口输出的直流电压用于控制 V/I 转换电路的开启与关断,完成电源保护功能。换流桥式电路中的开关 S₁、S₂ 由导通电阻极低的 MOS 场效应管组成无触点开关,单片机的两个 I/O 端口控制开关 S₁、S₂ 的导通与关断,为避免同时导通,在电路设计上使 S₁ 和 S₂ 具有互锁功能。通过改变流过 TEC 的电流方向变换制冷或加热工作方式。图中 R_s 是 TEC 工作电流检测取样电阻,通过检测其两端的电压计算出流过 TEC 的工作电流。

4.1 TEC 工作电流的优化

应用环境条件要求 TEC 温度控制系统有尽可能快的响应速度和高效率。在完成 TEC 器件选型及激光器模块散热结构设计后,TEC 的性能系数 ξ 可表示为^[9]

$$\xi = f(I, T_{cs}, \Delta T), \quad (14)$$

式中控制端温度 T_{cs} 为预设的温度值,因此工作电流 I 、温差 ΔT 是影响性能系数的主要因素。TEC 的控制端热量 Q_c 、性能系数 ξ 与 TEC 的工作电流 I 的关系曲线如图 10 所示。

可见,性能系数 ξ 最大时, Q_c 达不到最大, Q_c 达到最大时,性能系数将减小。因此,制冷器的最佳工作区域为

$$I_{opt} \leq I \leq I_{max}. \quad (15)$$

在最佳的工作区域内,当 I 增大时,控制端热量增大而工作效率减小。

4.2 光纤耦合 LD 模块温度控制方法

光纤耦合 LD 模块外部环境温度变化范围宽,为了控制其输出激光的波长,避免波长漂移过

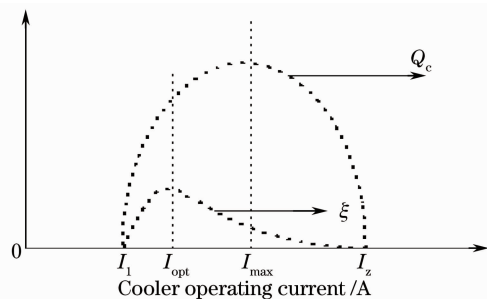


图 10 制冷模式时性能系数 ξ 与 Q_c 随 I 的变化曲线

Fig. 10 Coefficient of performance ξ and Q_c

changing with I in cooling mode

大^[10],以及结温升高时发射效率降低,要求将 LD 模块周围的温度控制在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如图 10 所示,当 TEC 的驱动电流在 I_{opt} 和 I_{max} 之间时,虽然控制端热量 Q_c 随驱动电流增加而增加,但是热量的变化率 dQ_c/dt 却明显减小,甚至当 $I > I_{max}$ 时 dQ_c/dt 为负值。如图 11 所示,系统采用模糊控制与传统的 PID 控制相结合的方法,当温度超出设定温度范围时,采用模糊控制算法^[11],根据检测到的控制端热量 Q_c 及其变化率 dQ_c/dt 确定控制电流 I 及其变化率的大小,通过算法寻找到 I_{max} ,从而逼近 I_{opt} ,当温度进入设定温度范围时,则切换为 PID 控制算法。

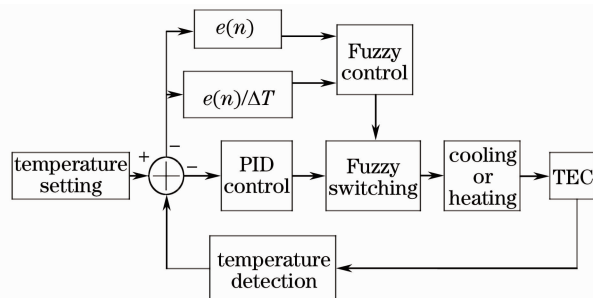


图 11 温度控制算法原理框图

Fig. 11 Block diagram of temperature control algorithm

图 12 为 LD 模块在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境条件下,TEC 加热控制实测的芯片载体周围的温升曲线。图 13 为 LD 模块在 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境条件下,TEC 降温控制实测的芯片载体周围的降温曲线。可以看出,温度控制系统稳态温度变化曲线具有较大的波动(超调),这是由于 LD 模块发射激光,产生了超过 30 W 的热量损耗,导致芯片载体周围温度不断升高所引起的。

5 结 论

在给出了光纤耦合 LD 模块驱动电流源电路模型的基础上,建立了基于 PWM DC/DC 变换技术的高效率电流源系统数学模型,提出了避免电流源上

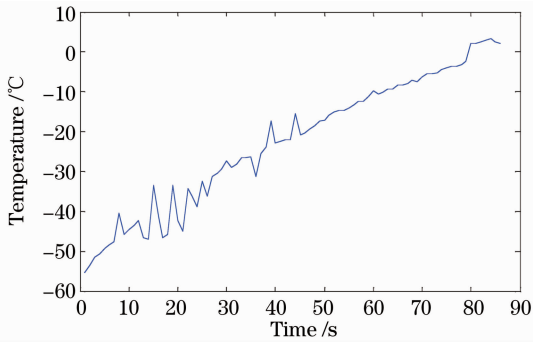


图 12 温度控制系统升温曲线

Fig. 12 Curve of heating temperature control system

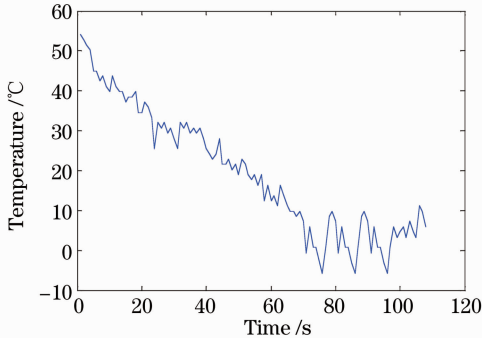


图 13 温度控制系统稳态温度变化曲线

Fig. 13 Temperature curve in steady-state of temperature control system

电产生电流冲击的设计方法,分析了影响电流源精度和稳定性的主要因素。通过建立优化的电流源等效二阶模拟系统数学模型,并将模拟系统变换为数字系统,实现了 LD 模块电流源控制电路的数字化设计,从而成功研制了基于 ADuC831 单片机的 LD 模块驱动电流源组件,提高了电流源系统的稳定性和可靠性。

由于激光器芯片结温升高将导致其输出光功率下降和波长漂移。提出了一种基于 TEC 的 LD 模块温度控制器结构模型,建立了适用性强的温度控制器的数学模型,对 TEC 的性能系数 ξ 、控制端的热量 Q_c 和 TEC 的工作电流 I 提出了寻优化设计方法,利用 ADuC831 单片机通过检测温度、温度变化率自适应调节 TEC 的工作电流 I ,使系统温度控制具有响应时间较快,稳态超调量较小的特点。光纤耦合 LD 模块驱动电流源组件和激光器模块温度控制组件的机械尺寸均为 $64\text{ mm} \times 48\text{ mm} \times 22\text{ mm}$,

输出电功率大于 50 W ,电流源效率达 85% 以上,输出电流在 $0 \sim 5\text{ A}$ 连续可调,输出电流稳定度优于 0.5% 。经环境试验证明达到了设计指标要求。

参 考 文 献

- 1 Yao Shun, Pang Xiaolin, Dai Jingjing *et al.*. Analysis of fiber coupled laser diode's beam quality with bending fiber approach [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1730~1733
尧 舜, 庞晓林, 代京京 等. 绕纤法分析光纤耦合输出半导体激光器的光束质量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1730~1733
- 2 J. H. Han, S. W. Park. Theoretical and experimental study on junction temperature of packaged Fabry-Perot laser diode [J]. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, 2004, **4**(2): 292~294
- 3 Yu Ben, Sun Changzheng, Xue Song *et al.*. Nonlinearity in power-current characteristics of narrow-pulse-driven AlGaInP laser diodes [J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 2004, **40**(4): 349~353
- 4 Yong Wang, Changqing Xu, Hong Po. Thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. *IEEE Trans. Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 63~65
- 5 Yang Yan, Yu Dunhe, Wu Yaofang *et al.*. Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202003
杨 燕, 俞敦和, 吴姚芳 等. 新型窄脉冲半导体激光器驱动电源的研制 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202003
- 6 Ma Xiaohui, Shi Quanlin, Xu Li *et al.*. High-power laser diode fiber-coupled module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 674~678
马晓辉, 史全林, 徐 莉 等. 高功率半导体激光器光纤耦合模块 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 674~678
- 7 L. Kirkup, W. Kalceff, G. McCredie. Effect of injection current on the repeatability of laser diode junction voltage-temperature measurements [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(2): 023118
- 8 Shen Yuan, Deng Qilin. Optimization research of temperature controlling performance for green LD end-pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0902004
沈 渊, 邓琦林. 端面抽运绿色固体激光器控温性能优化的研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0902004
- 9 Yang Mingwei. Research of Heat Transfer and Thermoelectric Control Technique of Laser Diode Module [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. 11
杨明伟. 半导体激光器组件的传热特性与热电控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. 11
- 10 Li Chengren, Song Changlie, Li Shufeng *et al.*. Experimental investigation of the change of semiconductor laser output wavelength corresponding to operation current [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 144~147
李成仁, 宋昌烈, 李淑凤 等. 半导体激光器输出波长随工作电流变化的实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(2): 144~147
- 11 Yang Jiuru, Ye Hong'an, Liu Chunyu. Stabilize the output power of superfluorescent source by using hybrid controller [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1520~1524
杨九如, 叶红安, 柳春郁. 采用混合控制器稳定超荧光光源的输出功率 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1520~1524

栏目编辑: 谢 婧