

文章编号 1004-924X(2010)07-1629-08

控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计

丛梦龙, 李 黎, 崔艳松, 张真骞, 王一丁

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012)

摘要:以 TMS320F28335 为控制核心,设计了一种用于驱动半导体激光器的数控电流源。电源的外围电路包括指示灯模块、语音模块、LCD 模块以及键盘控制模块。语音与指示灯模块负责系统工作状态提示,LCD 负责显示实际电流以及目标电流,键盘模块负责电源的启动、关闭、电流设置、电流步进等操作。电路设计中利用深度负反馈原理来提高系统的稳定度,设计了双 MOS 管进一步减小漏电流引起的偏差(小于 0.5%),优化了电压—电流量线性度;软件设计中采用了 PID 算法缩短了系统的动态平衡时间;系统具有完备的保护措施,如防上电/断电冲击保护电路、延时软启动电路、过流保护电路以及纹波抑制电路,保证了激光器稳定可靠地工作。在激光器的驱动测试过程中,激光器工作状态稳定,中心波长未出现漂移,驱动电流无毛刺出现。

关键词:半导体激光器;驱动电源;负反馈;恒流源;电流补偿;保护电路

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1629

Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser

CONG Meng-long, LI Li, CUI Yan-song, ZHANG Zhen-qian, WANG Yi-ding

(*State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

Abstract: A digital control current supply is designed for driving semiconductor lasers by taking the TMS320F28335 as a control center, which consists of a guiding light module, a phonetic module, a liquid-crystal display (LCD) module and a keyboard module. The phonetic module and light module are responsible for prompting the working condition of the system, the LCD is used to show the actual current and setting current, and the keyboard module is taken to control the start-up, turn-off, current setting and current adjustment. In circuit design, the deep feedback theory is researched to greatly enhance the stability and two MOS-FET are designed to neutralize their own leakage current, decrease the current deviation (less than 0.5%) and optimize the linear dependence between voltage and current. In software design, the PID algorithm is employed to shorten the time to establish dynamic equilibrium for the system. The system can provide complete protective measures, such as surge-prevent, power on/off-prevent, time delay soft start, over current protection for ensuring the LD to work stably and reliably. During the driving test, the LD can work in a steady state without center wavelength drifting and driving current fluctuation.

Key words: semiconductor laser; driving circuit; negative feedback; constant-current source; current compensation; protection circuit

收稿日期: 2009-09-08; **修订日期:** 2009-09-30.

基金项目: 国家 863 高新技术研究与发展计划资助项目 (No. 2009AA03Z442); 吉林省科技厅基金资助项目 (No. 20090422)

1 引言

半导体激光器不仅具有体积小、重量轻、能量转换效率高、耗电省、便于光波长调制等优点^[1-2],而且其制造工艺能与半导体电子器件和集成电路的生产工艺兼容,便于与其他器件实现单片光电子集成^[3],在以光电子和微电子为核心的通讯和网络高技术领域起到了举足轻重的作用^[4]。但是半导体激光器的模式不好、寿命短、波长长且不可见等缺点限制了它的应用范围。近年来,随着半导体光电子器件的研究与开发,一些可以实现单模输出,寿命长达 1×10^5 h 以上,工作于可见光波段的半导体激光器已不断面世,并在美、日等国开始了大规模商业化生产,应用领域迅速扩展^[5]。在正常条件下使用的半导体激光器有很长的工作寿命,然而,半导体激光器的电冲击承受能力很差,如果驱动电流超过额定电流,很短的时间内(如几纳秒)就可能烧毁半导体激光器^[6]。造成这种损坏除了器件本身的性能因素外,与其配套的驱动电源不稳定也是重要原因之一。因此,有必要为激光器设计高精度、高稳定度的驱动电源^[7]。

目前,在商业化产品方面国内厂商主要以深圳市南方联合实业有限公司、湖北光通、上海科联、深圳泰德等公司为代表(都未实现数字化及远程控制),其中以深圳市南方联合实业有限公司产品性能最好。以 JD-200T 型为例,其短期(1 h)稳定度为 1×10^5 。国外生产半导体激光器的驱支电源厂商比较多,产品综合性能指标也普遍优于国内,如 Wavelength、Thorlabs、ILXlight、Alpha-las、Mindspeed Technologies 等。在这些公司中,性能指标最好的当属 Wavelength 公司。以 MPL2500 型为例,其电流为 $0 \sim 2.5$ A,短期(1 h)稳定度为 3×10^{-5} ,长期(24 h)稳定度为 7.5×10^{-5} ^[8]。考虑国内外需求及发展现状,本文设计了一种用于驱动半导体激光器的电流源,本项设计力求数字化智能控制,并在性能指标上追赶甚至超越国外同类产品。

2 系统总体设计

本文设计的激光器驱动源以美国 TI 公司生产的 DSP 芯片 TMS320F28335 为微控制器,用

于实现激光器的恒流驱动、电流显示、键盘控制以及指示灯与智能语音提示等。其中,恒流源模块负责为激光器提供稳定电流;键盘模块负责系统上电断电;激光器限制电流与预置电流设定、电流步进;显示模块主要负责电流显示;指示灯和语音模块用来指示系统当前工作状态与指导操作;ADC 和 DAC 模块负责把外部电路的信息反馈回主机以及把主机的命令传达给外部设备^[9]。系统总体框图如图 1 所示。

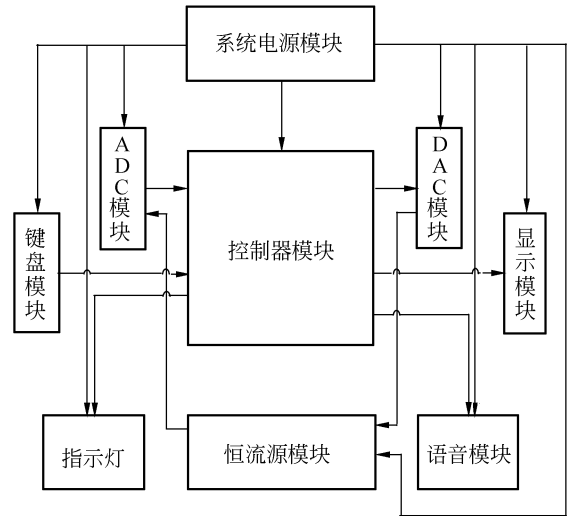


图 1 系统框图

Fig. 1 System block diagram

3 恒流源模块设计

恒流源模块作为激光器驱动系统的核心部分,具有完备的保护电路,如防上电/断电冲击保护电路、限流保护电路、延时软启动、纹波调节电路。模块总体设计如图 2 所示。设定的激光器工作电流值通过 DAC_1 转换为模拟量送入 U_1 同相输入端,恒流源输出的电流经过取样电阻 R_s 转换为电压,经过 U_2 以及 R_4 、 R_5 、 R_7 组成的反馈网络放大后送入 U_1 的反相输入端, U_1 放大二者差值使功率 MOS 管的栅极电压改变进而实现 MOS 管电流的调整,反馈环路使这种非线性的调整线性化^[10-12]。与此同时,反馈电压经过 ADC_1 的转换送入系统与预设电压比较,系统通过内部的 PID 算法子程序以及电流慢调子程序来调整预设电压,改变功率管栅极电压。这种外部和内部的双重反馈的方式可以使电流的稳定度、准确

度最大程度提高。普通的恒流源设计中只有 Q_2 , 这样由于 MOS 管漏极与栅极漏电流的存在会使流过激光器(LD)的电流与流过取样电阻 R_5 的电流有差异,而 Q_1 的漏电流可以弥补这个差异,通过适当选取 Q_1 、 Q_2 和 R_3 ,甚至可以完全消除这种影响。 C_4 为大容值的电解电容,用于防止加在激光器 PN 结上电压的突变, C_5 为小容值的陶瓷电容,用于消除大电解电容的电感效应,二极管 D_2 用于吸收激光器上的反向电流, D_3 为瞬态抑制二极管,用于抑制浪涌电压^[13]。 L_1 、 C_2 、 C_3 构成了一个 Π 型滤波网络以滤除主线路的交流信号。

C_1 为防振荡电容,其最佳值由理论计算、软件仿真与实验验证结合获得, R_4 与 R_1 、 R_6 的作用使运放阻抗匹配, R_2 为缓冲电阻。定义 I_S 为流过采样电阻 R_5 的电流,流过激光器的电流为 I_{LD} , I_{G_2} 为 Q_2 的漏电流, I_{G_1} 为 Q_1 的漏电流, V_{GS_2} 为 Q_2 的栅源电压,取 $R_5 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 16 \text{ k}\Omega$, $R_S = 1 \Omega$, 根据运放的虚短虚断原理有

$$I_S = V_{ref} \frac{R_5}{(R_5 + R_7)R_S}, \quad (1)$$

$$I_{LD} = I_S + I_{G_2} \approx I_S, \quad (2)$$

$$I_S = 1/5 V_{ref}. \quad (3)$$

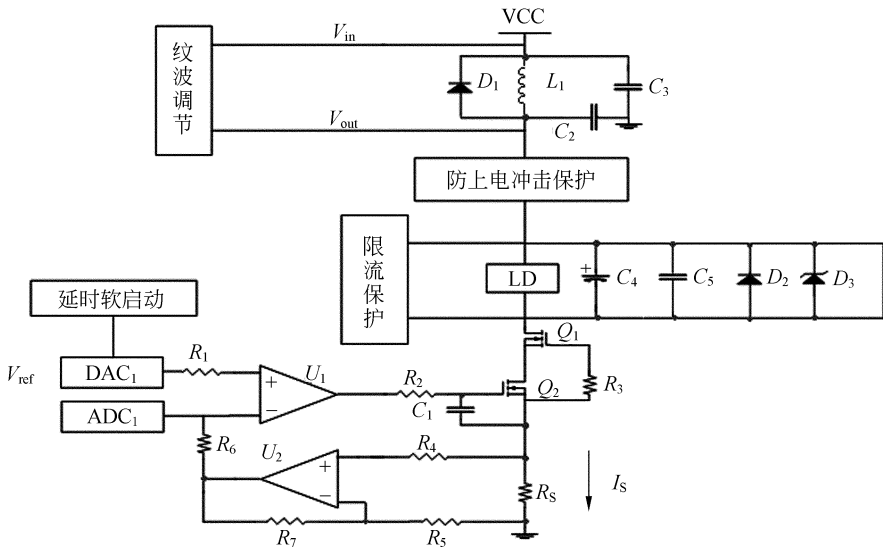


图 2 恒流源模块

Fig. 2 Constant-current source module

3.1 PID 控制原理及参数整定方式

起步于 20 世纪初的比例-积分-微分(PID)控制,在自动化控制领域具有悠久的历史,该方法具有原理简单,物理意义明确、直观,易于实现,鲁棒性能好等一系列优点,是一种具有代表性的工业生产控制方式,结构如图 3 所示,公式 4 给出了 PID 的理论数学表达式。其中 $u(t)$ 、 $e(t)$ 、 K_p 、 T_i 、 T_d 分别代表控制器的输出量、输入量以及比例系数、积分时间、微分时间。比例-积分可以消除系统的调节误差,提供系统调节延迟角;比例-微分提供超前角,提高系统的反应速度^[14]。

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) \cdot dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (4)$$

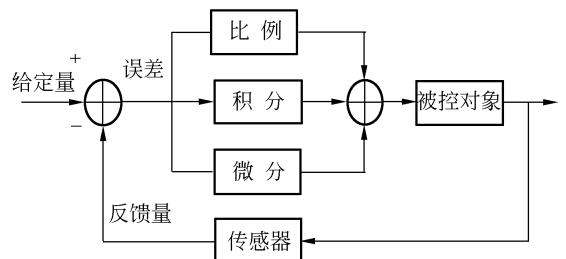


图 3 PID 控制器结构图

Fig. 3 Structure diagram of PID controller

早期的 PID 控制系统主要由模拟电路(含比例、积分、微分电路)搭建而成,其结构复杂,抗干扰能力弱且成本高,由于近年来数字控制技术的飞速发展和各种软件包以及程序库的日益完善,数字 PID 控制器已经逐步取代传统模拟电路。

本次设计中采用 DSP 结合软件程序实现数字 PID 控制,实际电流流过采样电阻转变为电压量,经过放大以及模数转换后变为数字量送入 DSP 中,通过数字滤波后与预置电流相比较得到偏差量,将偏差按比例、积分和微分通过线性组合计算出控制量来调整基准电压,控制 MOS 的导通程度进而实现实际电流与预置电流偏差的不断缩小。实际工作中,数据在 DSP 中的计算和处理,不论是积分还是微分,只能用数值计算去逼近,即用求和代替积分,用差商代替微分,将式(4)中的 $u(t)$ 等模拟连续变量离散化,用式(5)来代替式(4)进行建模。

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] \quad (5)$$

PID 控制器的参数整定是 PID 控制系统设计的关键。参数整定的方法很多,如 Ziegler - Nichols 整定法、临界比例度法、衰减曲线法等,本文所使用的正是临界比例度法。临界比例度法是一种 PID 参数的工程整定方法,利用它可以比较迅速地找到合适的控制器参数。具体如下:

首先,取 $T_i = \infty, T_d = 0$,比例度取较大数值,系统按纯比例运行稳定后,逐步地减小比例度,在外界输入作用(给定或干扰的变化)下,观察系统输出量的变化情况,直到系统出现等幅振荡为止^[15]。然后记下此时比例度 δ_K 和振荡周期 T_K 。它们分别称为临界比例度和临界振荡周期。第二

步,根据 δ_K 和 T_K ,按表 1 中所列的经验算式,分别求出 3 种不同情况下的控制器最佳参数值,然后根据其性能好坏选择使用。

表 1 临界比例度法整定参数的经验公式表

调节规律	调节参数		
	比例度 δ	积分时间 T_i	微分时间 T_d
P	$2\delta_K$	∞	0
PI	$2.2\delta_K$	$0.85T_K$	0
PID	$1.7\delta_K$	$0.5T_K$	$0.125T_K$

3.2 防上电/断电冲击保护电路

防上电/断电冲击保护电路的设计如图 4 所示,DSP 通过 GPIO 口以及 DAC 模块接至 Q_5 栅极。上电过程中,当无使能信号到来时, Q_5 的栅极电压为 0, Q_5 不导通, J_1 闭合,此时即使电网中存在浪涌也不会通过激光器;当系统收到外部使能信号后,调用上电子程序使栅极电压缓慢上升,经过时间 t_1 后, J_1 电流达到阈值, J_1 断开,电流流过激光器。通过多次实验调整上电延时子程序,使 $t_1 = 2$ s;断电过程中,DSP 接收到关闭指令然后调用内部断电子程序使栅极电压缓慢减小,流过激光器电流也逐渐减小直至为 0,调整断电延时子程序使断电时间常数 t_2 也等于 2 s。

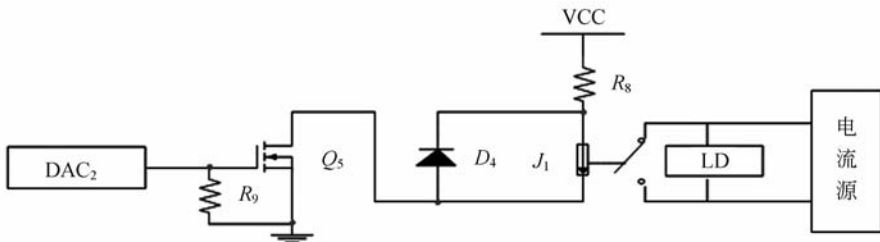


图 4 防上电/断电冲击保护电路

Fig. 4 Power on/off-prevent circuit

3.3 延时软启动

以往激光器驱动中的延时软启动主要是模拟电路,其原理是利用电容充放电原理使预置基准电压 V_{ref} 缓慢变化,延迟时间以及电压缓升时间由电阻与电容值决定,这种方式定时不准确且电路易受外界干扰。本次设计的延时软启动采用软

件控制,延时设定为 $t_3 = 2.5$ s, t_3 比 t_1 略大,目的是避开上电/断电冲击,软启动时间设置为 $t_4 = 2$ s,整个过程需 4.5 s。此时若无调整命令,则 V_{ref} 将保持不变。当预置基准电压设定为 0.2 V 时,延时软启动测试结果如图 5。

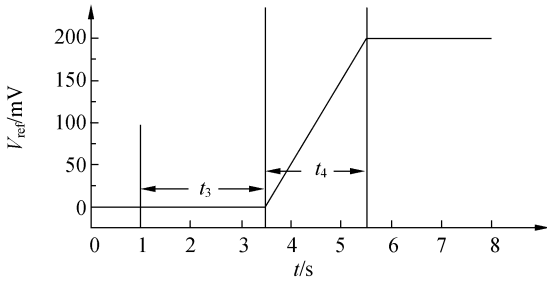


图 5 延时软启动测试

Fig. 5 Time delay soft start test

3.4 过流保护电路

过流保护电路如图 6 所示。U₁、Q₁、Q₂、C₁₀、R₁₂、反馈网络 F 以及取样电阻 R_S 构成了串联负反馈恒流电路,其稳流原理前面已经做过介绍;同理,U₄、Q₃、Q₄、C₉、R₁₁、反馈网络 F 以及取样电阻 R_S 也构成了恒流电路。它们与激光器相互串联,因此流过激光器的电流由限制电流和预置电流二者最小值决定。其中 V_L 为限制电压,和反馈网络 F 以及取样电阻一起决定限制电流 I_L。V_{ref} 为预置参考电压,它与和反馈网络 F 以及取样电阻一起决定预置电流 I_S。

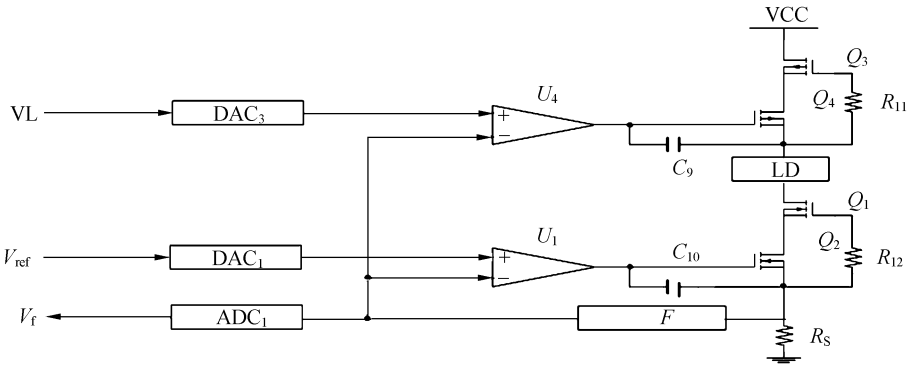


图 6 过流保护电路

Fig. 6 Over current protection circuit

3.5 纹波调节电路

纹波就是一个直流电压中的交流成分。直流电压本来应该是一个固定的值,但是很多时候它是通过交流电压整流、滤波后得来的,由于滤波不干净,就会有剩余的交流成分,纹波的存在严重影响了激光器的正常工作并且会缩短它的工作寿命。纹波调节电路如图 7 所示,系统电源模块输出的直流电压 VCC 中的纹波通过 C₁₁ 耦合到 U₅ 的反相输入端,经过放大输入 MOS 栅极,这样通过调整 R₁₂ 来改变 MOS 的导通状态,从而极大地减小了纹波电压^[16]。此电路中 MOS 管的选

择十分重要,应该尽量选择运算精度较高且输入阻抗高的 FET 输入型运放。

4 性能指标测试

4.1 系统稳定性测试

本文设计的激光器驱动电源可产生 0~1 A 的恒定电流。在稳定性测试中,用铝屏蔽盒将系统与外部环境隔离,尽可能消除电磁干扰,测试电流分别设定为 50 mA 和 1 A,开机后,在 8 h 的测试时间内每 30 min 读取一次电流值,电流采集设备为美国安捷伦公司的 34401A 型台式数字万用表。预置电流为 50 mA 条件下实际电流最大偏差为 0.027 7 mA,电流偏差小于 5×10⁻⁴,17 个采样值求和平均结果为 50.027 4 mA,与均值相差最大点为 50.027 mA,二者做差,比较得电流稳定度优于 8×10⁻⁶。同理得到预置电流为 1 A 时电流偏差小于 5×10⁻³,电流稳定度优于 3×10⁻⁵。恒流源稳定度测试结果如图 8 和图 9,从图中可以看到,开机瞬间以及其后的 8 h 中,电流曲线平滑无毛刺。

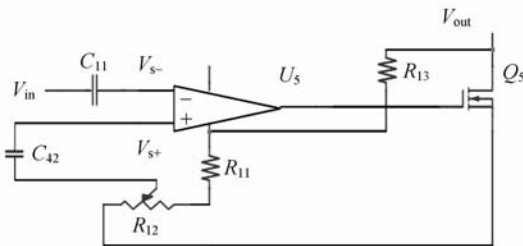


图 7 纹波调节电路

Fig. 7 Ripple regulation circuit

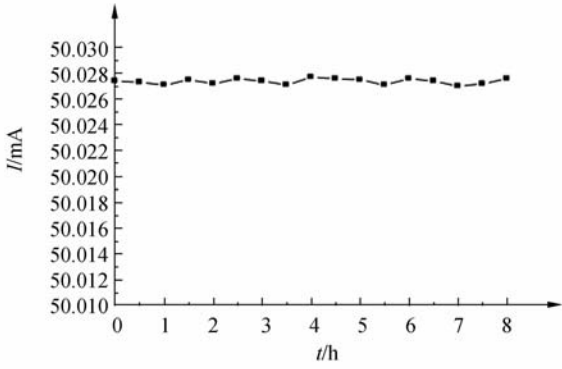


图 8 电流—时间关系曲线(预置电流 50 mA)

Fig. 8 Current-time relation curve(preset current 50 mA)

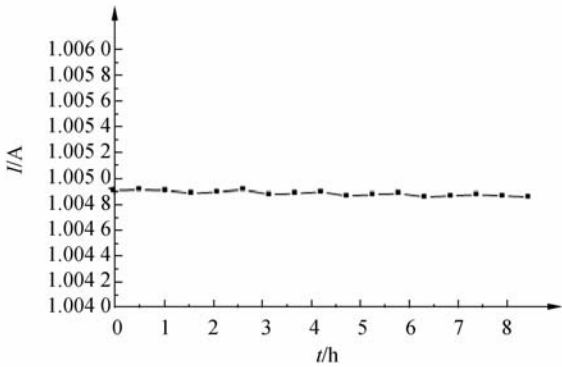


图 9 电流—时间关系曲线(预置电流 1 A)

Fig. 9 Current-time relation curve(preset current 1 A)

4.2 基准电压—电流关系

实验中通过改变基准电压得到的电流—预置基准电压关系如图 10 所示。

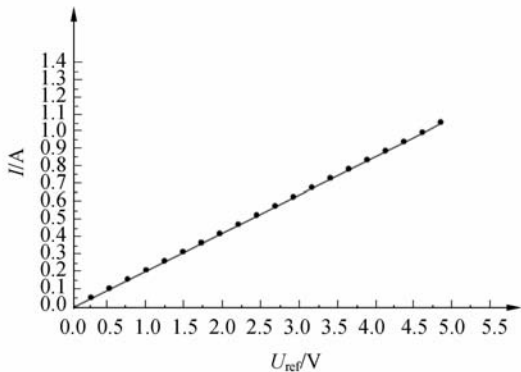


图 10 电流—基准电压关系曲线

Fig. 10 Current-preset reference voltage relation curve

4.3 激光器驱动测试

本次实验所选用的激光器是中国科学院半导

体所研究设计的标称中心波长为 1 665 nm 的分布反馈半导体激光器 DFB-18, 14 引脚 DIP 封装, 其结构与引脚如图 11 与表 2 所示。

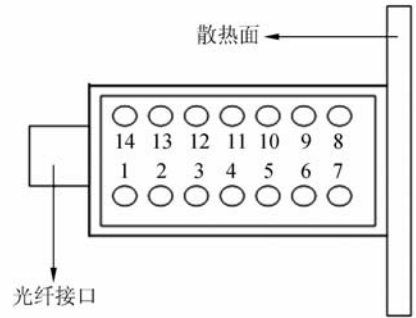


图 11 激光器结构图

Fig. 11 Structure diagram of the laser

表 2 引脚说明

Tab. 2 Pin description

1	2	3	4	5	6	7
TC+	NC	NC	NC	LD+	NC	Pd-
8	9	10	11	12	13	14
PD+	LD-	GND	Rt+	Rt-	NC	TC-

测试中逐渐加大驱动电流, 当电流为 40 mA 时激光器开始发光, 用傅里叶光谱仪测得其谱线如图 12。

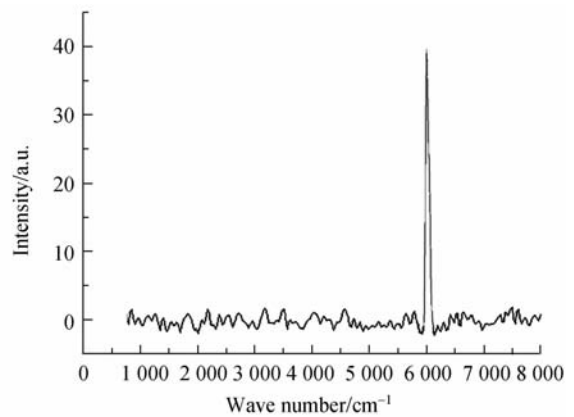


图 12 激光光谱

Fig. 12 Laser spectrum

5 结 论

本次设计的激光器驱动系统无论启动或者

关闭瞬间还是工作过程中,都具有完备严密的保护措施。由于双电流调整 MOS 管结构,进一步减小了单调整管的漏电流影响,使驱动系统的电压—电流线性度得到了最大程度的优化;内部的 PID 算法与外部的电流串联反馈相结合的双反馈环设计,具有极高的稳定度(低于 0.01%)与极小

的电流偏差(不超过 0.5%)。而软启动与防上电/断电冲击保护以及电流步进调整部分由于引入了数字化控制,使设备操作更加安全、准确。此驱动系统目前已经成功应用于可调谐二极管激光吸收光谱法检测 HCL 气体的光源驱动部分,效果良好。

参考文献:

- [1] 侯立周,强锡富,孙晓明.一种高精度半导体激光器温控调频系统[J].光学精密工程,1999,7(3):28-32.
HOU L ZH, QIANG X F, SUN X M. A high precision semiconductor laser temperature control and frequency modulation system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(3):28-32. (in Chinese)
- [2] 岱钦,宋文武,王希军.高频半导体激光器的驱动设计及稳定性分析[J].光学精密工程,2006,14(5):745-748.
DAI Q, SONG W W, WANG X J. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):745-748. (in Chinese)
- [3] 陈彦超,赵柏秦,李伟.用于纳秒级窄脉冲工作的大功率半导体激光器模块[J].光学精密工程,2009,17(4):695-700.
CHEN Y CH, ZHAO B Q, LI W. High peak power semiconductor laser module for producing nanosecond pulse[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):695-700. (in Chinese)
- [4] 郜峰利.半导体激光器低频电噪声的特性及其检测技术研究[D].长春:吉林大学,2008.
GAO F L. *Research on characteristics and detection of low-frequency electrical noise in semiconductor laser diodes* [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [5] 黄德修.半导体激光器及其应用[M].北京:国防工业出版社,1995.
HUANG D X. *Semiconductor Laser and Their Applications* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [6] 史全林,辛德胜,张剑家,等.连续半导体激光器驱动电源[J].长春光学精密机械学院学报,2001,24(1):12-15.
SHI Q L, XIN D SH, ZHANG J J, et al.. Continuous semiconductor laser driver [J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 2001,24(1):12-15. (in Chinese)
- [7] 李适民,黄维玲.激光器件原理与设计[M].北京:国防工业出版社,2005.
LI SH M, HUANG W L. *Theory and Design of Laser Devices* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 单江东.大功率半导体激光器控制器的研究与设计[D].长春:吉林大学,2008.
SHAN J D. *Research and design of high power semiconductor laser driver* [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [9] 于占海,许凤明,陈方.单片机控制的 Fizeau 激光数字波长计[J].光学精密工程,1999,7(2):77-100.
YU ZH H, XU F M, CHEN F. Fizeau laser digital wavemeter of 8098 microcontroller controlling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(2):77-100. (in Chinese)
- [10] 邓军.半导体激光器驱动模式与可靠性分析[D].长春:吉林大学,2008.
DENG J. *Study of Drive Modes and Reliability on Semiconductor Laser* [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [11] THOMPSON M T, SCHLECHT M F. High power laser diode driver based on power converter technology[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 1997,12(1):46-52.
- [12] SACKINGER E, OTA Y, GABARA T, et al.. A 15 mW, 155Mb/s CMOS burst-mode laser driver with automatic power control and end-of-life detection[J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1999, 34:1944-1950.
- [13] 朴德慧,郭玉彬,王天枢.大功率半导体激光器驱动电路及防护[J].激光与红外,2007,37(3):230-233.
PIAO D H, GUO Y B, WANG T SH. High power semiconductor laser drive and protect circuit[J]. *Laser & Infrared*, 2007,37(3):230-233.
- [14] 袁杰,陈文兰,齐向辉,等.可调谐半导体激光器的

高精度驱动电源与稳频设计[J]. 红外与激光工程, 2006,35:115-119.

YUAN J, CHEN W L, QI X H, *et al.*. Design of high precision driver and stabilized frequency for tunable semiconductor laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006,35:115-119. (in Chinese)

- [15] 伏燕军, 邹文栋, 肖慧荣, 等. 半导体激光器驱动电路的光功率控制的研究[J]. 红外与激光工程, 2005,34(5):626-630.

FU Y J, ZOU W D, XIAO H R, *et al.*. Research

of the optical power control for semiconductor laser driver [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005,34(5):626-630. (in Chinese)

- [16] 毛海涛, 林咏海, 张锦龙, 等. 慢启动半导体激光器驱动电源的设计[J]. 新乡师范高等专科学校学报, 2005,19(5):21-23.

MAO H T, LIN Y H, ZHANG J L, *et al.*. Design of soft-start semiconductor laser driver [J]. *Journal of Xinxiang Teachers College*, 2005,19(5):21-23. (in Chinese)

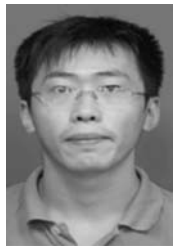
作者简介:



丛梦龙(1983—),男,内蒙古通辽人,博士研究生,2008年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光电检测、发光二极管以及嵌入式系统方面的研究。E-mail: flarry@eyou.com



李黎(1979—),女,吉林长春人,博士研究生,主要研究方向为光电气体传感器。E-mail: lili06@mails.jlu.edu.cn



崔艳松(1986—),男,北京人,硕士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电检测、发光二极管以及嵌入式系统方面的研究。E-mail: luoye.qiutian@163.com



张真寰(1986—),男,吉林大学物理系学生,主要从事光学和凝聚态方面的研究。E-mail: zhangzhenqian@163.com

通讯作者:



王一丁(1956—),男,辽宁新民人,教授,博士生导师,1982年、1991年于吉林大学分别获学士、硕士学位,主要从事光电检测、中红外半导体激光器和发光二极管等方面的研究。E-mail: wangyiding47@yahoo.com.cn

(本栏目编辑:李树军)