文章编号:1001-5078(2015)04-0373-05 ·激光器技术·

双通道半导体激光电源控制技术

金文东,李迎新,杨基春,穆志明,王 晗
(中国医学科学院北京协和医学院生物医学工程研究所,天津 300192)

摘 要:研制了一种808 nm/635 nm双通道半导体激光器驱动电源,主要由恒流源驱动和温控电路两部分组成。通过12位DA的输出电压对两个通道的驱动电流进行控制,808 nm和635 nm通道的电流驱动范围分别为0~3 A和0~1 A,控制精度分别为0.73 mA和0.24 mA。温控电路由温度传感器、差分放大电路、比例积分微分(PID)控制电路和半导体制冷器(TEC)驱动电路组成,采集的温度信号与设定的温度值进行差分放大后通过硬件PID控制驱动TEC进行制冷制热,实现温度控制以保证输出功率和波长的稳定。在室温23 ℃下进行应用测试(设定工作温度为25 ℃),10 min内,808 nm通道在2.2A驱动时,功率不稳定度为1.805%;635 nm通道在640 mA驱动时功率不稳定度为1.233%。两个通道的P/I特性曲线线性拟合结果的校正决定系数(Adj. R-Square)都大于0.998。

关键词:双通道半导体激光器;驱动电源;PID控制;TEC温度控制
中图分类号:TN86;TN248.4 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2015.04.007

Power control technology of dual-channel semiconductor laser

JIN Wen-dong, LI Ying-xin, YANG Ji-chun, MU Zhi-ming, WANG Han
(Institute of Biomedical Engineering, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Tianjin 300192, China)

Abstract: A driver power of 808 nm/635 nm dual-channel semiconductor laser was developed, which is mainly composed of a constant current source and a temperature control circuit. The drive current of two channels is controlled by the output voltage of 12 bit DA. The current range of 808 nm and 635 nm channel are 0~3 A and 0~1 A respectively, and the control accuracy are respectively 0.73 mA and 0.24 mA. Temperature control circuit consists of temperature sensor, differential amplifier circuit, control circuit of proportion integration differentiation (PID) and drive circuit of semiconductor cooler (TEC). After amplifying temperature difference signal, TEC is driven and controlled to cool or heat through PID in order to ensure the stability of output power and wavelength. Application test was carried out at room temperature 23 ℃ (set working temperature at 25 ℃). Within 10 min, its power instability degree is 1.805% when drive current of 808 nm channel is 2.2 A; its power instability degree is 1.233% when drive current of 635 nm channel is 640 mA. The adjusted determination coefficients (Adj. R-Square) of linear fitting results are greater than 0.998 for two channels' P/I characteristic curve.

Key words: dual-channel semiconductor laser; driver power; PID control; TEC temperature control

基金项目:国家自然科学基金青年项目(No. 81201819)资助。
作者简介:金文东(1991-),男,硕士研究生,主要从事激光医学方面的研究。E-mail:jinwendong1991@yeah.net
收稿日期:2014-09-26

1 引 言

激光技术的发展促进了半导体激光器在光纤通信、高速打印、自由空间光通信、固体激光泵浦源、激光指示及各种医疗应用等领域的应用。在激光医学的应用中,单一波段的激光已不能满足需求,有时需要多波段激光进行联合治疗。例如,635 nm 激光具有镇痛、抑制破骨细胞吸收和促进伤口愈合的作用[1-2];808 nm 弱激光具有抑制细胞增生,促进伤口愈合的作用[3-4];而 635 nm/808 nm双波长联合治疗能更有效地促进伤口的愈合[5]。

激光的输出参数如激光波长、功率大小和照射时间直接影响治疗效果[6]。半导体激光器的诸多输出参数都与温度和驱动电流有关[7-8]。如输出功率不仅取决于驱动电流的大小,而且受温度的影响;其输出波长和驱动电流及温度有关,对多数半导体激光器来说,其波长随注入电流的增加而增加,变化的典型值为 0.025 nm/mA[9],此外,当半导体激光器内部温度增加时,输出波长也随之增加[10],其变化的典型值为 0.3 ~ 0.4 nm/ ℃[11]。为了得到稳定的输出功率和波长,需对驱动电流进行精确控制,而环境温度的变化以及器件运行时发热都会导致激光器的温度变化,其中,808 nm 半导体激光器的制造技术已经成熟,只需要用散热片和风冷就行,而 635 nm 激光器因为在工艺上的问题,对温度非常敏感,要求将温度稳定性控制在 1 ℃以内。因此,本文提出采用高精度 AD 和 DA 转换模块控制恒流源驱动电路,在温度控制方面,则采用专家智能硬件 PID 控制方式控制半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC),达到对其温度的准确控制。

2 系统结构

系统总体结构框图如图 1 所示,控制部分主要由恒流驱动控制模块和温度控制模块组成,并由交互界面(Interaction Interface)通过单片机(Single Chip Microcomputer, MCS)进行控制及数据显示。交互界面通过 RS232 串口控制单片机发送控制指令,以及接收从单片机发过来的数据,对激光器电流、功率和温度等信号进行控制及实时显示。单片机根据接收到的上位机指令通过 DA 控制激光器的驱动电流,恒流驱动电路通过 AD 将电流值反馈给单片机。温度传感器实时反馈激光器的温度信息,以此判断 TEC 进行制冷或是制热,来实现激光器的恒温控制。

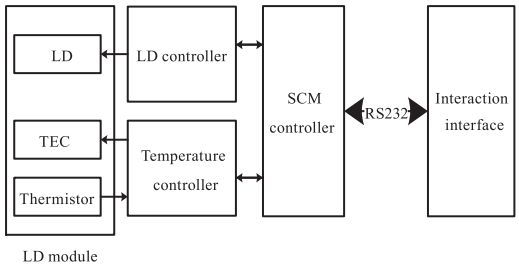


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of the system

3 恒流源驱动控制

激光器需由电流源进行驱动,808 nm 和 635 nm 通道恒流源驱动由钥匙开关和单片机控制继电器与三级管使能驱动,驱动电流的大小由单片机进行控制。808 nm 通道电流驱动电路如图 2 所示。单片机 AT89S4051 控制 12 位 DA 输出控制电压 VOUTA,VOUTA 通过运放 U7B 比例放大,与运放 U7A、精密电阻 U8 和稳压器 U9 构成负反馈控制电路,实现对 808 nm 通道激光的电流大小的闭环控制。此外,精密电阻 U8 作为采样电阻将电流信号转换为电压信号,经电压跟随器 U7D 和运放 U7C 比例放大得到电压 VCH0。VCH0 通过 12 位 AD,向单片机实时反馈 808 nm 通道的驱动电流值。其中控制电压 VOUTA 和反馈电压 VCH0,都与驱动电流呈线性关系。635 nm 通道采用的电流驱动电路的原理与 808 nm 通道相同。

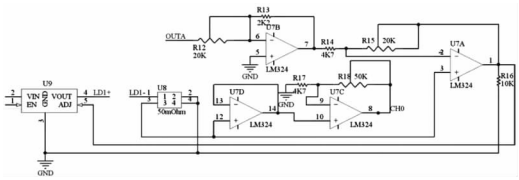


图 2 808 nm 恒流驱动电路原理图

Fig. 2 Constant current drive circuit principle diagram of 808nm

驱动电路的电流调节范围由电位器 R12 和 R15 的阻值大小控制,当调节电流驱动电路中的电位器使得 808 nm 和 635 nm 通道的电流调节范围分别为 0 ~ 3 A 和 0 ~ 1 A 时,808 nm 和 635 nm 通道电流分辨率分别为 0.73 mA 和 0.24 mA。

4 温度控制系统

常用的温度传感器有双金属片热电偶、热敏电阻器、铂电阻、感温铁氧体等,其中负温度系数(Negative Temperature Coefficient, NTC)热敏电阻具有价格低廉、精度较高、可靠性好的优点[12],故采用 NTC 热敏电阻(10 K@25 ℃)作为温度传感器对温度信号进行采集。

半导体激光器采用热敏电阻作为传感器,一般多采用电桥法和电压源法进行温度采集。桥式电路采用的电阻较多,且可调电阻的精度和温度系数指

标较低,因此温度控制精度不高;电压源法由于电压源常常容易受到噪声的干扰,导致电压源自身的电压不准,从而造成温度采样电压不准,对温度的计算带来误差[13]。如图 3 所示,本系统将 DA 和 AD 的参考电压 VREF 作为电压源法的电压源,通过将热敏电阻的分压值 VCH2 经过 AD 转化,实时显示激光器温度,有效解决了电压源采样电压不准的问题。此外,上述温度采样电路的采样电压 VCH2 与 VOUTC 经精密仪表放大器 U15 差分放大,构成了以参考电压 VREF 作为电压源的 H 桥测温电路[14]。差分放大后的信号低通滤波后,经运放 U16B 进一步放大后进入比例积分微分(Proportion Integration Differentiation,PID)补偿电路。其中 VOUTC 由单片机控制 12 位 DA 输出控制,用于设置激光器工作温度。与传统的 H 桥测温电路相比,VOUTC 由单片机控制,代替传统桥式测温电路中桥臂上两个固定电阻的分压值,不仅使得工作温度的设置更加简便,而且结构简单,具有较高的温控精度。

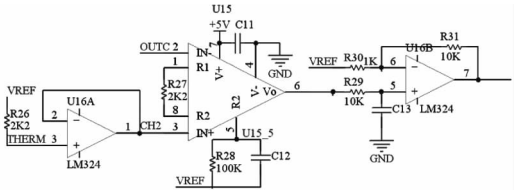


图 3　温度采样电路

Fig. 3　Temperature sampling circuit

PID 调节是自动控制系统中常见而典型的控制策略,其中模拟式 PID 是基本的实现手段与方式。本系统采用专家智能硬件 PID 调节电路控制 TEC 对激光器进行温度调节,控制电路如图 4 所示。PID 控制由积分环节、比例环节和微分环节三个部分组成,通过对积分、比例和微分参数的合理选择,可以达到最佳的综合控制效果。其中,R34 和 C14 控制积分时间常数;R37 和 R38 控制比例系数;C15、R42 和 R43 控制微分时间常数;R36、R39、R44、R45 和 U17D 组成加法器将积分、比例和微分环节的作用叠加起来以实现 PID 控制,通过稳压器 U18 来实现 TEC 对激光器进行制冷或制热;C16 能增加控制电路的稳定性。

如图 3 和图 4 所示,该电路利用温差作为调节参考点,即热敏电阻分压值与温度设定电压值差值 ΔU(即 VCH2 - VOUTC)大于 0.0025 V 或小于 -0.0075 V 时,运算放大器 U16B 运放饱和,消除了 PID 控制器的微分环节的作用,此时对激光器温度进行 PI 控制;当 ΔU 大于 -0.0075 V 且小于 0.0025 V 时,运算放大器 U16B 正常工作,对激光器温度则进行 PID 控制。利用这种调节手段,使得系统硬件 PID 控制在两种工作方式下自动转换,即温差约大于 0.5 ℃时,对系统进行 PI 调节,以消除稳态误差;当温差调节到 0.5 ℃以内时,转化成 PID 补偿回路对系统进行温度控制,以防止过冲或超调。系统温控精度可达到 0.1 ℃。

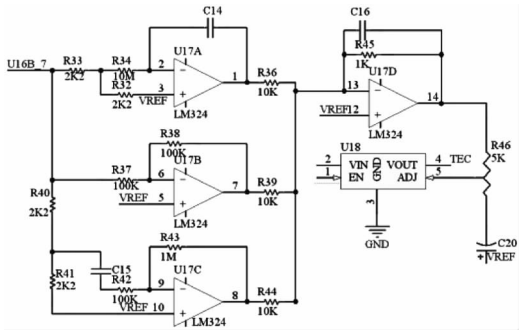


图 4　PID 控制电路

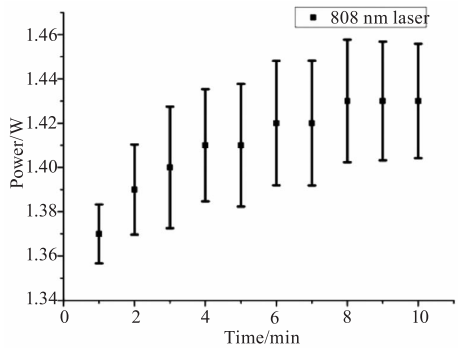
Fig. 4　PID control circuit

5　应用测试

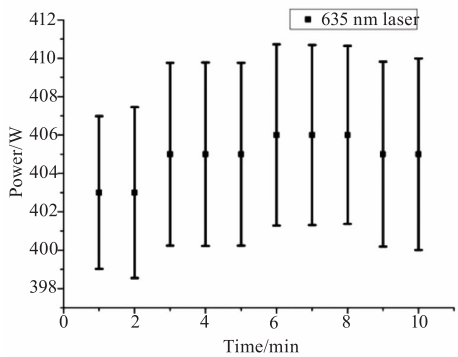
为检测上述双通道半导体激光器电源控制系统的性能,用某公司生产的双波长激光模块对其进行检测。检测环境温度为室温 23 ℃,激光模块工作温度设置为 25 ℃。

5.1　激光功率稳定度

分别设定 808 nm 通道和 635 nm 通道的电流值为 2200 mA 和 640 mA,用功率计对 10 min 内的激光功率进行测量,测量数据分别如图 5(a)和 5(b)所示。



(a)



(b)

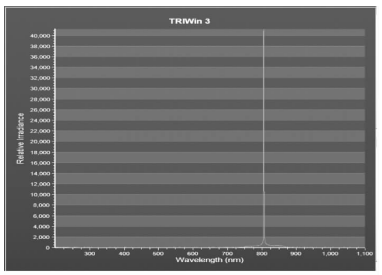
图 5　808 nm 和 635 nm 激光功率随时间变化曲线

Fig. 5　Power curves of 808 nm and 635 nm laser

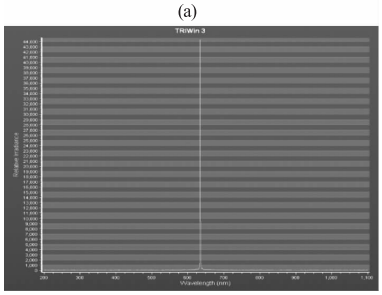
808 nm 激光 0 ~ 6 min 在风冷的作用下达到工作温度,激光功率缓慢增大;6 ~ 10 min 温度趋于稳定,激光功率也趋于稳定。635 nm 激光 0 ~ 3 min 在 TEC 的作用下达到工作温度,激光功率缓慢增大;3 ~ 10 min 温度趋于稳定,激光功率也趋于稳定。此外,在 10 min 的持续测量时间内,808 nm 通道的功率最大值和最小值分别为 1.45 W 和 1.35 W,功率不稳定度为 1.805%;635 nm 通道的功率最大值和最小值分别为 413 mW 和 388 mW,功率不稳定度为 1.233%。

5.2 激光波长及 P/I 特性曲线

用光谱仪对 808 nm 通道(设定驱动电流为 500 mA 时)和 635 nm 通道(设定驱动电流为 550 mA 时)的激光波长光谱进行测量,分别得到如图 6(a)和 6(b)所示的光谱图,测得中心波长分别为806.7 nm 和 634.3 nm。用光谱仪测量不同驱动电流(100 ~ 600 mA)下 635 nm 通道的激光波长,结果如图 7 所示,不同驱动电流下激光峰值波长变化小于等于 2 nm,即激光波长随驱动电流的变化很小。



(a)



(b)

图 6 808 nm 和 635 nm 通道的光谱图

Fig. 6 Spectrum of 808 nm and 635 nm channel

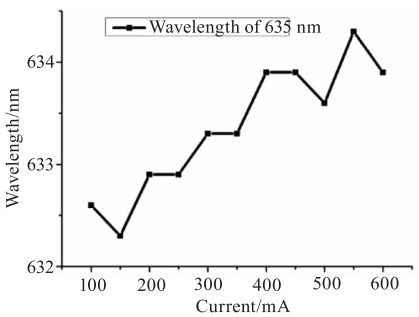
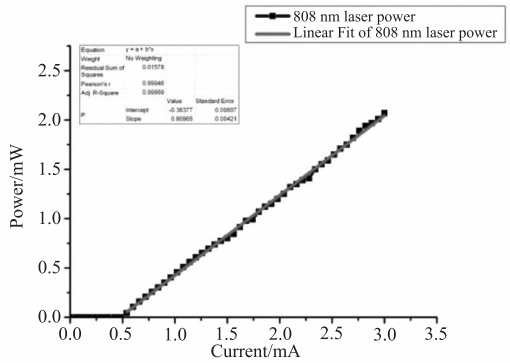


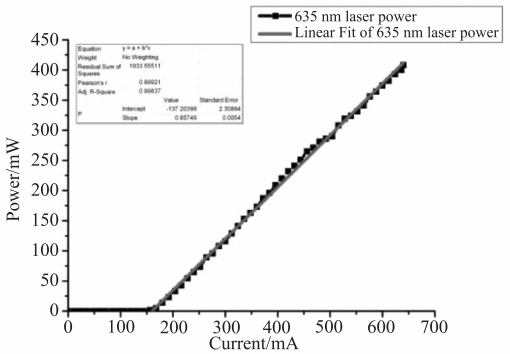
图 7 635 nm 通道峰值波长随驱动电流的变化

Fig. 7 Peak wavelength of 635 nm channel along with the change of drive current

用功率计分别对 808 nm 通道和 635 nm 通道在不同设定驱动电流下的功率进行测量,并对其进行线性拟合,得到 P/I 特性曲线如图 8 所示,两个通道线性拟合的 Adj. R-Square 值都大于 0.998。



(a)



(b)

图 8 808 nm 和 635 nm 激光的功率电流特性曲线及其线性拟合曲线

Fig. 8 Power current characteristic curve and linear curve fitting of 808 nm and 635 nm

6 结 论

本文研制的 808 nm/635 nm 双通道半导体激光器的驱动电源,主要由恒流源驱动和温控电路两部分组成。恒流驱动由运算放大器、精密电阻及稳压器等形成闭环控制,实现高稳定和低纹波系数的电流源。驱动电流与控制电压呈线性关系,通过改变驱动电路中的电阻参数可以控制驱动电流的范围。温控电路采用硬件智能 PID 精确控制 TEC 进行制冷制热,该方式与数字 PID 相比具有响应速度快、不受采样精度影响的优点,适合实时性要求高的场合。实验结果表明,该驱动电源下的激光器不仅输出功率和波长稳定性好,而且功率 - 电流特征曲线的线性拟合度也很高,其输出参数达到医学实验要求。

参考文献:

[1] Nikele Nadur-Andrade, Stella R Zamuner, Elaine F Toniolo, et al. Analgesic effect of Light-Emitting Diode (LED) therapy at wavelengths of 635 and 945 nm on bothrops-

moojeni venom-induced hyperalgesia[J]. Photochemistry and Photobiology,2014,90:207 – 213.

[2] Hyun-Ju Lim, Man-Seok Bang, Hye-Min Jung, et al. A 635 nm Light-Emitting Diode (LED) therapy inhibits bone resorptive osteoclast formation by regulating the actin cytoskeleton[J]. Lasers Med Sci,2014,29:659 – 670.

[3] Hideyuki Murayama, Kei Sadakane, Banri Yamanoha, et al. Low-power 808 nm laser orradiation inhibits cell proliferation of a human-derived glioblastoma cell line in vitro [J]. Lasers Med Sci,2012,27:87 – 93.

[4] Metin Gungormus, Utkan Akyol. The effect of gallium-aluminum-arsenide 808 nm low-level laser therapy on healing of skin incisions made using a diode laser[J]. Photomedicine and Laser Surgery,2009,27(6):895 – 899.

[5] YANG Jichun, LI Yingxin, LIU Tiegen, et al. Effects of low intensity laser irradiation with combination of 635 and 808 nanometers on surgery wound healing[J]. Opto-Electronic Engineering,2012,39(4):121 – 124.

[6] PAN Zhenhua, LI Yingxin, WANG Xing, et al. Effects of low level laser therapy on cutaneous wound healings with three doses[J]. Chinese J. Lasers,2010,37(2):599 – 603. (in Chinese)
潘振华,李迎新,王兴,等. 3 种剂量弱激光对大鼠皮肤创伤愈合的影响[J]. 中国激光,2010,37(2):599 – 603.

[7] ZHANG Guoxiong, HUANG Chunhui. Continously adjustable semiconductor laser diode driver with high stability [J]. Laser & Infrared,2011,41(2):160 – 163. (in Chinese)
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.

[8] LI Jianglan, LAN Xuyang, CHEN Haiyang, et al. Design of current supply for high power laser diode [J]. Laser &Infrared,2014,44(3):309 – 312. (in Chinese)
李江澜,兰旭阳,陈海洋,等. 大功率半导体激光器用电流源设计[J]. 激光与红外,2014,44(3):309 – 312.

[9] Jason Z G. Rainbow three-dimensional camera: new concept of high-speed three-dimensional vision systems[J]. Optical Engineering,1996,35(2):376 – 383.

[10] LI Jianglan, SHI Yunbo, ZHAO Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering,2014,43(6):599 – 603. (in Chinese)
李江澜,石云波,赵鹏飞,等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程,2014,43(6):1745 – 1749.

[11] YU Fusheng, SHEN Xiaoqin, LENG Changlin, et al. Finite element analysis of laser-diode heat emission and design of PI fuzzy cooling system[C]//SPIE,2005,5628. 189 – 195.

[12] WANG Enxin, JING Yulan. Status quo and trend of NTC thermistors[J]. Electron Compon Mater, 1997, 16(4): 1 – 9. (in Chinese)
王恩信,荆玉兰. NTC 热敏电阻器的现状与发展趋势[J]. 电子元件与材料,1997,16(4):1 – 9.

[13] WU Zhong. Optimization design for auto temperature control system of semiconductor laser diode[J]. Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology,2011,10(3):8 – 11. (in Chinese)
吴仲. 半导体激光器自动温度控制系统优化设计[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报,2011,10(3):8 – 11.

[14] HU Yang, ZHANG Yajun, YU Jinquan. Design of temperature control circuit for laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering,2010,39(5):839 – 842. (in Chinese)
胡杨,张亚军,于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路设计[J]. 红外与激光工程,2010,39(5):839 – 842.