

文章编号: 1001-3806(2012)06-0771-05

基于半导体激光器高精度恒温系统设计

廖志焯¹ 邓洪峰¹ 吴凌华² 张恩华¹ 张宇¹

(1. 西南技术物理研究所 成都 610041; 2. 海军驻成都地区航空军事代表室 成都 610041)

摘要: 为了在宽温环境中保证半导体激光器能够稳定地输出功率和波长,针对半导体激光器体积小、重量轻及对温度稳定性要求高等特点,在采用负温度系数热敏电阻作为温度传感器并对其输出信号进行处理的基础上,设计了基于微控制单元的半导体激光器温度控制系统,并在软件上采用了直接比例积分微分算法等方法。通过微控制单元调整输出调制信号脉宽和幅值,从而改变半导体致冷器的驱动电流的大小和方向,并进行了相应理论分析和实验验证,可知半导体激光器工作温度稳定在25℃左右,且温度稳定精度为±0.1℃。结果表明,该高精度温度控制系统在宽温环境中控制精度高、响应速率快,优于其它同类产品。

关键词: 光电子学; 温度控制; MOSFET H桥; PID算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.015

Design of high precision constant temperature control systems based on laser diodes

LIAO Zhi-ye¹, DENG Hong-feng¹, WU Ling-hua², ZHANG En-hua¹, ZHANG Yu¹

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. Aviation Military Representative Office of Navy in Chengdu, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to obtain stable output power and wavelength from a semiconductor laser in a large range of temperature, according to the characteristics of small volume, light weight and the high requirement of temperature stability of a semiconductor laser, with a negative-coefficient heat-sensitive resistance as a temperature sensor, a temperature control system was designed based on a micro control unit (MCU) and direct proportion-integration-differentiation (PID) algorithm. Changing the width and amplitude of the pulse width modulation signal output from the MCU to adjust the driving current and direction of the thermoelectric cooler, the temperature of the semiconductor laser was controlled at about 25℃ ± 0.1℃. Experimental results show that the temperature control system is with high precision and fast responsibility in a large range of temperature, it is better than other similar products.

Key words: optoelectronics; temperature control; MOSFET H bridge; PID algorithm

引言

半导体激光器(laser diode, LD)具有体积小、寿命长、容易调制、结构简单、采用电流注入的方式抽运、转换效率高等优点,被广泛应用于激光通讯、激光打印、测距、激光雷达和激光干扰等方面^[1]。因LD需在不同的环境温度下工作及工作时产生的热量,会使LD小环境内的温度在短时间内发生急剧地变化导致输出功率下降^[2-3]。因而高精度、实时的温度控制系统对于LD而言是必不可少的。在已出现的激光器温度控制产品中,国外做得领先的是WAVELENGTH公司,可以使LD在

-99℃ ~ +150℃的宽温环境内进行工作,且温度控制精度可以到达±0.001℃。而国内产品通常在0℃ ~ +50℃窄温环境下工作,温度控制精度在±0.5℃ ~ ±1℃。

本文中结合了硬件与软件相结合的补偿方法,在对温度传感器-热敏电阻输出的电信号进行硬件的线性化处理的基础上,在软件上进行分段的内插值法线性化处理^[4-6]。微控制单元(micro control unit, MCU)采用直接的比例积分微分(proportion-integration-differentiation, PID)算法控制半导体致冷器(thermoelectric cooler, TEC)的驱动电流的大小。在对半导体激光器的发热进行分析的基础之上对LD器件进行合理布局。通过上述方法,在不增加硬件费用的基础上,能够使温度控制精度、时间响应度和工作温度范围得到大幅提高,并且温度的稳定度也得到较好地改善。

作者简介: 廖志焯(1978-)男,硕士,工程师,主要研究方向为电子与控制。

E-mail: nuaalzy@163.com

收稿日期: 2012-03-12; 收到修改稿日期: 2012-04-26

1 温度控制原理

LD 温度控制原理基本框图如图 1 所示,和 LD 模块封装在一起的温度传感器——热敏电阻随着 LD 的环境和工作温度的变化而阻值产生变化。把热敏电阻的阻值变化经过线性化处理转变成电压信号变化,经过信号处理之后输入到 A/D 转换器中。MCU 读取 A/D 转换器数值与设定的工作温度数值进行比较,将二者数值差经过 PID 运算调整后,输出脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)波形到相应的 4 路控制端口,经过 MOSFET H 桥式驱动电路来对 TEC 进行加热或制冷的控制,从而达到控制 LD 的工作温度目的。

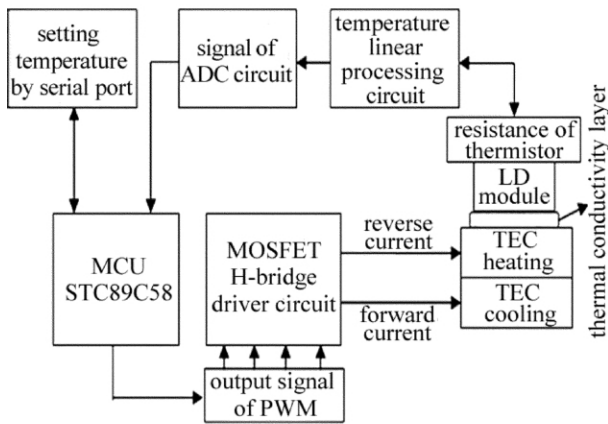


Fig. 1 Schematic diagram of LD temperature control

TEC 是利用珀耳帖效应进行工作,通过改变流经 TEC 电流的方向达到加热或制冷的目的^[7]。因其具有体积小、重量轻、控制方式灵活及精度高、控温范围大等特点^[8]在半导体激光器的温度控制系统中得到广泛使用。但在实际应用中,由于 TEC 热惯性会导致 LD 在工作时温度过冲,导致 LD 的输出功率不稳定。以往的 LD 控制器本身设计不合理,电源效率低和温度控制精度低,并且控制器本身体积大,还需要增加较大体积的散热模块才能正常工作,往往不能充分发挥 TEC 的特点,甚至掩盖了利用 TEC 进行温度控制的优点。在本设计中采取了一种新的结构方式,如图 2 所示。其设计的特点是将 LD、热敏电阻和 TEC 封装在一个模块中,而在确保 LD、铜热沉和 TEC 之间接触面光滑、平整的前提下,均匀地涂抹一层导热硅脂,使其几者之间有良好的热传导性。将热敏电阻用导热硅脂封装在 LD 英箔下层的中央处,可以实时反映 LD 当前的环境或工作温度,从而进行精确的温度控制。对于 TEC 进行堆叠布局在铜热沉之上、英箔层之下。通过上述设计,可以使得 LD 在宽温环境中快速地达到理想的工作温度。

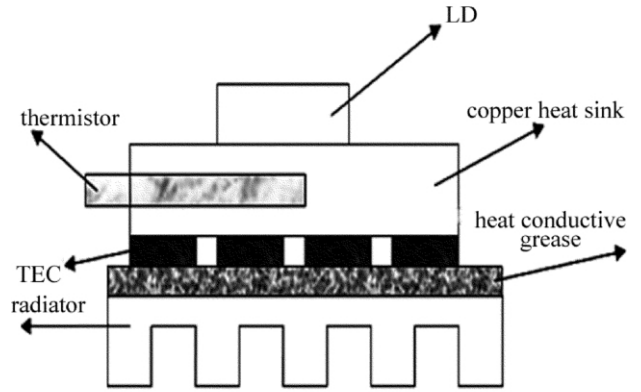


Fig. 2 Heat conduction structure diagram of LD

TEC 从热端所散发出的总功率为^[9]:

$$Q_n = Q_c + I_{TEC} \times V = Q_c \left(1 + \frac{1}{E} \right) \quad (1)$$

式中 Q_n 为 TEC 在热端总的热功率, Q_c 为 TEC 冷端抽运的热功率, V 和 I_{TEC} 分别为加载在 TEC 上的电压和电流 E 表示 TEC 的性能参量。

2 硬件控制系统设计

2.1 温度采样及线性化处理电路

热敏电阻按照温度系数的不同分为正温度系数(positive temperature coefficient, PTC)热敏电阻和负温度系数(negative temperature coefficient, NTC)热敏电阻。本项目中采用的是 NTC 热敏电阻作为激光半导体器件的温度传感器,其特性为电阻值随热敏电阻温度的升高而按指数曲线减小,反之温度降低而阻值变大。NTC 热敏电阻的阻值 R_T 与温度 T 的关系为^[10]:

$$R_T = R_{T_0} \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (2)$$

式中 R_T , R_{T_0} 分别为温度在 T , T_0 时的电阻值; B 为材料常数。陶瓷晶粒本身由于温度变化而使电阻率发生变化。因考虑产品实际工作环境,而铂电阻具有其它温度传感器不可比拟的优势,包括其高精度、稳定性好、不易受干扰等特点。在设计中采用它作为产品的温度传感器。鉴于铂电阻的阻值与温度呈非线性的关系,导致输出电压值和温度值也呈现非线性关系,需要对其进行线性补偿。而以往的方式是采用单一的桥式电路或放大器电路来检测温度传感器因电阻发生的变化而输出电压值发生变化,从而来判断当前温度值。上述测温电路虽然可以通过数据的近似处理得到温度的变化与输出电压变化呈线性变化,但是在实际使用中其测量误差较大,并且温度与电压的线性度不理想,导致后面的 MCU 处理的数据偏差较大,从而导致温度控制的精度不高。使用电桥电路、单放大器电路和负反馈电路,其电路示意图如图 3 所示,可以让温度传感

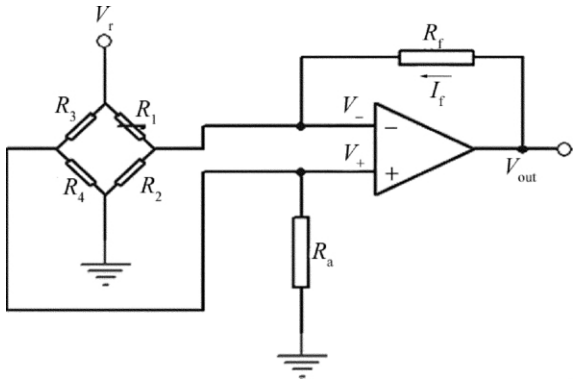


Fig. 3 Principle diagram of linear compensation

器的阻值变化转换成为其输出电压的线性变化。

$$V_+ = V_r \frac{R_4 R_a}{R_3 R_4 + R_3 R_a + R_4 R_a} \quad (3)$$

$$V_{out} = V_- + I_f R_f \quad (4)$$

$$I_f = \frac{V_- - V_r - V_-}{R_2 - R_1} \quad (5)$$

式中, V_+ , V_- , V_{out} 和 V_r 分别表示放大器的正向、负向、输出端的电压值和参考电压, I_f 为放大器的反馈电流, R_1 和 $R_2 \sim R_4$ 分别为热敏电阻和电桥匹配电阻, R_f 和 R_a 分别为反馈电阻和正端下拉电阻。利用放大器的虚地特性, $V_- = V_+$, 将 (3) 式和 (5) 式带入 (4) 式中得到:

$$V_{out} = V_r \frac{R_1 R_2 R_a R_f - R_2 R_3 R_4 R_f - R_2 R_3 R_a R_f + R_1 R_2 R_4 R_f}{R_1 R_2 (R_3 R_4 + R_3 R_a + R_4 R_a)} \quad (6)$$

若 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 则(6)式简化为:

$$V_{out} = V_r \frac{R_a - R_f}{R + 2R_a} \quad (7)$$

当温度发生变化时, 则热敏电阻 R_1 的阻值发生变化 $R_1 = R + \Delta R$, 其中 ΔR 为热敏电阻相对于设定温度阻值的变化量, 而电桥电路的其它电阻并没有发生变化, 即 $R_2 = R_3 = R_4 = R$, 带入(6)式, 其温度变化后所对应的电压输出为:

$$V_{out}' = V_r \left[\frac{(RR_f + R_a R_f) \Delta R}{R(R^2 + 2RR_a)} + \frac{R_a - R_f}{R + 2R_a} \right] = K\Delta R + V_{out} \quad (8)$$

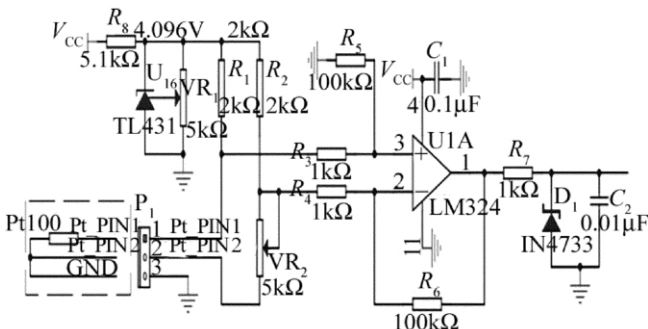


Fig. 4 Three-wire bridge circuit for temperature measurement

式中, K 为一常数, 这样通过上电路转换, 将热敏电阻的阻值变化成功地转化为输出端电压的线性变化。

在实际使用中除了采取上述的方法对其线性化处理之外, 在连接铂电阻时采用三线连接方式消除了连接导线电阻引起的测量误差。如图 4 所示。

2.2 TEC 功率驱动电路

通过改变 TEC 的电流方向而实现其加热或制冷功能, 同时调节 TEC 电流值可以改变加热或制冷量的大小, 从而达到可以精确控制 LD 温度。为了实现驱动 TEC 电流是双向的, 选择 MOSFET H 桥功率驱动电路作为 TEC 的驱动电路, 如图 5 所示。

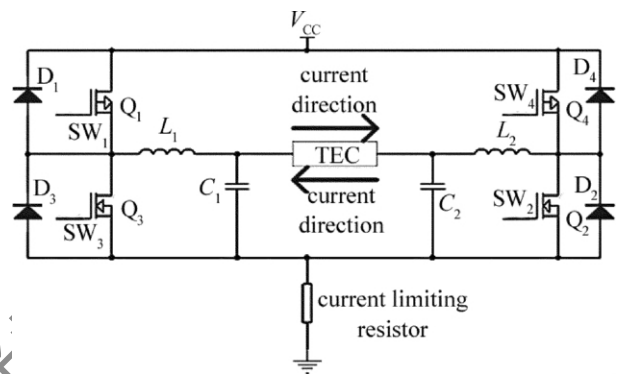


Fig. 5 MOSFET H bridge driving circuit of TEC

由图 5 可知, 其工作原理是通过改变 H 桥式 TEC 驱动电路的 4 个控制端口 $SW_1 \sim SW_4$ 电平即可改变流经 TEC 的电流方向。其中 SW_1 与 SW_2 电平关系相反, SW_3 与 SW_4 电平关系相反, 电感和电容组成 LC 滤波电路, 电阻为限流电阻, 防止流经 TEC 的电流过大。当 SW_1 和 SW_4 处于高电平而 SW_2 和 SW_3 为低电平时, 场效应晶体管 $Q_1 \sim Q_4$ 截止, TEC 无电流流过; 当 SW_1, SW_4 为低电平、 SW_2, SW_3 为高电平时, Q_1, Q_2 导通, Q_3, Q_4 截止, 电流流经 TEC 的方向是从左向右, 为制冷状态。而当 SW_1, SW_3 为高电平、 SW_2, SW_4 为低电平时, Q_1, Q_2 截止, Q_3, Q_4 导通, 电流流经 TEC 的方向是从右向左, 为加热状态。

对于通常使用的 TEC 驱动电路, 如图 6 所示, 存在以下问题: 由于是单一的控制端口且场效应管自身的阈值电压, 因而驱动电路存在死区问题, 特别是在温度平衡点附近出现明显的振荡现象。而采用图 5 所示的电路, 4 个控制端口可实现双极性工作方式, 避免死区温度控制和轻载电流非线性问题。在控制口输入脉宽调制波形, 通过调整脉宽大小控制加热或制冷的时间而不是以往简单的开关电路, 从而减少电流噪声干扰, 并减缓了 TEC 热惯性导致温度系统振荡问题。

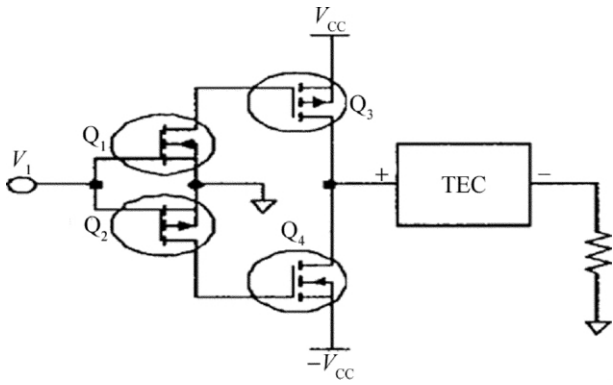


Fig. 6 General driving circuit of TEC

3 系统软件设计

根据 LD 的工作温度特性知道 LD 的最佳工作温度在 24℃ ~ 26℃ ,因而在算法设计中不是对全温度范围内采用 PID 算法 ,只是针对环境温度在 20℃ ~ 30℃ 时采用 在其它温度范围内则采用类似于开关信号对 TEC 进行全速的加热或制冷 流程图如图 7 所示。

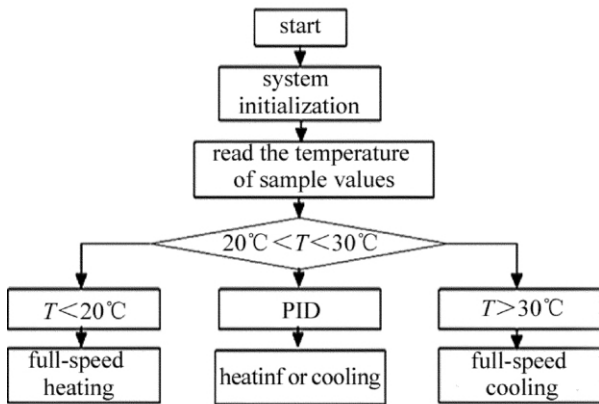


Fig. 7 Temperature control flow chart of TEC

在算法设计中 ,对于环境温度处于 20℃ ~ 30℃ 之间采用直接式 PID 算法。输出的控制量是由基本偏差、累积偏差和 t 相邻俩时刻之间的相对偏差直接算出。PID 算法分为 3 个区间进行 其具体使用函数为^[11-12]：

$$P_{out} = \begin{cases} k_p \times e(t) + k_i \times \sum e(t) + k_d \times [e(t-1) - e(t-2)] & (-a < e(t) < a) \\ 255 & (e(t) > a) \\ 0 & (e(t) < -a) \end{cases} \quad (9)$$

式中 P_{out} 为输出脉宽的控制量 $e(t)$ 为温度的基本偏差量 $e(t-1)$ 和 $e(t-2)$ 分别为与 t 相两时刻的偏差量 , $\sum e(t)$ 为累积偏差量表示 $e(t)$ 从 1 ~ t 的全部总和; a 为超出设定温度范围的最大绝对值 温度偏差超过 a 则为全脉宽; k_p 为比例系数用于控制温度调节的大小 k_i 为积分系数使温度接近设定温度 k_d 为微分

系数降低温度的突变而影响输出量。这样通过直接 PID 算法 ,是 MCU 产生 4 路占空比可变的 PWM 波形来控制温度 执行部件 TEC 的电流大小和方向从而达到控制 LD 工作温度。

4 实验结果

在外面环境为 -40℃ 通过串口由上位机设定 LD 理想的工作温度为 25℃ 激光器的输出功率为 10W 左右时的温度控制曲线如图 8 所示。同理外围环境温度为 60℃ 时 ,LD 理想工作温度还是 25℃ 输出功率为 10W 左右的温度控制曲线如图 9 所示。待到温度稳定后 ,LD 连续工作 2h ,以 4min 为一个时间循环自动输出给上位机的温度值 其温度表值如表 1 所示。

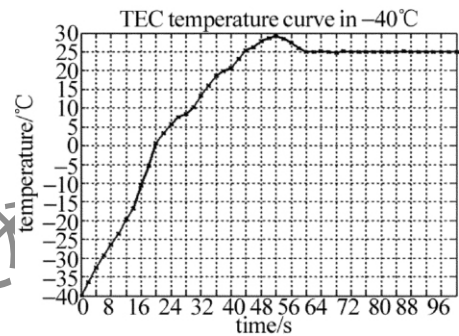


Fig. 8 LD temperature curve at low-temperature

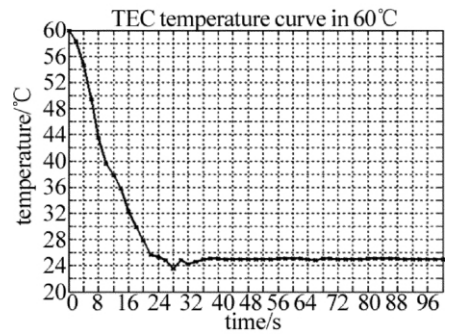


Fig. 9 LD temperature curve at high-temperature

Table 1 Laser temperature variation after 2h of continuous work

work-time/min	tempera- ture/°C	work-time/min	tempera- ture/°C	work-time/min	tempera- ture/°C
0	25.00	44	24.93	88	24.93
4	24.94	48	25.00	92	24.93
8	24.94	52	25.00	96	24.94
12	25.00	56	25.07	100	25.00
16	25.05	60	25.06	104	25.02
20	25.06	64	25.07	108	25.02
24	25.00	68	25.07	112	25.07
28	25.00	72	25.03	116	25.06
32	25.00	76	25.02	120	25.05
36	24.93	80	25.03		
40	24.93	84	24.92		

从图8和图9可知,LD的温度控制系统的响应速率快,在低温环境中,LD的温度稳定时间在60s内,而在高温环境中,LD的温度稳定时间小于40s。由表1可知,对于40W的LD模块,激光功率10W左右,温度达到稳定之后连续工作2h的温度稳定在 $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 左右,激光功率稳定。

5 小结

本温度控制系统体积小、稳定性高、控制简单可靠。LD工作温度响应速率快且稳定精度高能够满足半导体激光器对温度控制体积和稳定性要求,减少了LD在工作中随温度而输出功率波动因数,在实际运用中取得良好的结果。

参考文献

- [1] SHI Zh W, ZHU Y, CHENG Y T. Temperature testing in temperature control system for laser diode [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(9): 168-170 (in Chinese).
- [2] CAO S S. Review of high power semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(4): 203-206 (in Chinese).
- [3] WELCH D F. A brief history of high-power semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1470-1477.
- [4] ZHAO Y Zh, LI Z W, GAO Sh Q, et al. Ultra-trace analysis of biological molecules in water by means of the resonance Raman spectra in liquid-core optical fiber [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 491-493 (in Chinese).
- [5] MIZUNO M, TAHARA T. Novel resonance Raman enhancement of local structure around solvated electrons in water [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 2001, 105(39): 8823-8826.
- [6] XU Y M. Raman spectroscopy in application of structure biology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 11-150 (in Chinese).
- [7] GEHRING F K. Peltier cooling of superconducting current leads [J]. *Cryogenics*, 2001, 76(41): 521-528.
- [8] HUANG Y B, WANG Y J. Numerical analysis of the scaling law about focused beam spreading induced by the atmosphere [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 87(55): 6715-6719 (in Chinese).
- [9] FRIEDENBERG A, GOLDBIATT I. Non uniformity two-point linear correction errors in infrared focal plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(4): 1251-1253.
- [10] LIU R. High-accuracy current and temperature control for laser diode using MCS-51 microcontroller [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3): 225-227 (in Chinese).
- [11] LIU K F, QING Sh H, LI J, et al. Fault analysis and strategy of high pulsed power supply for high power laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6): 717-720 (in Chinese).
- [12] WU H X, SHEN Sh P. Basic of theory and applications on PID control [J]. *Control Engineering of China*, 2003, 27(2): 37-42 (in Chinese).