

TEC 的高精度半导体激光器温控设计

李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 高文宏, 陈海洋, 杜彬彬

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 热电制冷器(TEC)作为半导体激光器(LD)的制冷方案,具有体积小、易于控制等优点。但基于 TEC 的制冷方案中 TEC 的制冷功率和目标散热功率之间需要有良好的匹配关系,否则将会导致制冷不足或者导致功耗过大。根据 LD 组件热负载匹配 TEC 制冷功率,并通过比例-积分-微分(PID)控制方法实现温控参数的优化设计,实现了基于 TEC 的 LD 温度控制系统。经实验验证:该系统能够对 LD 的工作温度实现控制范围为 5℃~41℃、稳态误差小、控制精度为±0.05℃的高精度、高稳定性控制,并在高精度的波长测试中得到了很好的应用。

关键词: 温度控制; 热电制冷器; 半导体激光器; 比例积分微分; 中心波长

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1745-05

High precision thermostat system with TEC for laser diode

Li Jianglan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, Gao Wenhong, Chen Haiyang, Du Binbin

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Thermoelectric cooler (TEC) had an extensive prospect for the application of refrigeration system for laser diode (LD) for its advantage such as small in size, easy to control and so on. But it was necessary to ensure the match between the cooling power of TEC and the thermal power of the target; otherwise it would lead inadequate cooling or excessive power dissipation. In this paper, a high precision thermostat system with TEC for laser diode was designed. In this system, the cooling power of TEC was determined by the thermal load of LD, proportional-integral-derivative (PID) control method was used to optimize the parameters of the thermostat system. An experiment was executed to verify the design. The experimental results showed that the work temperature of LD could be controlled between 5℃ and 41℃ with a control accuracy of ±0.05℃ and the steady state error was small. The system could be a good solution for the high-precision wavelength testing.

Key words: temperature control; TEC; LD; PID; center wavelength

收稿日期:2013-10-10; 修订日期:2013-11-25

基金项目:国家自然科学基金(61078036)

作者简介:李江澜(1987-),男,硕士生,主要从事半导体激光器驱动电源、半导体激光器温控系统的研究。Email:ljl214214@126.com

导师简介:陈旭远(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事微电子机械传感器件及系统的研发、半导体材料与器件的表征与技术等方面的研究。Email:chenxy@online.no

0 引言

半导体激光器(Laser Diode, LD)作为高效的电子光子转换器件,不可避免地存在各种非辐射复合损耗、自由载流子吸收等损耗机制,这就意味着相当部分的注入电功率将转化为热量,引起 LD 温度的升高^[1]。升温会导致 LD 的输出功率下降、阈值电流增大、波长漂移(0.2~0.3 nm/°C)^[2]。为了保证 LD 工作的稳定性,精准控温是十分必要的,并且在高精度的波长测试中,温度应控制在 0.05°C 以内^[3]。

传统的水冷方式一般应用于半导体激光器温控,设计制作难度大,结构复杂,而且其控制精度不高,难以实现小型化^[4-5]。热电制冷器(Thermo-Electric Cooler, TEC)作为一种新型的制冷方案,具有体积小、易于控制等特点,在 LD 控温领域展现优良的应用前景^[6]。

但是由于 TEC 基于珀耳帖效应(Peltier effect)的散热原理,其制冷功率和目标散热功率之间需要有良好的匹配关系,否则达不到制冷效果或者耗能成倍增加。另外,传统的 TEC 温控设计中温控精度不高^[7-8]。文中研究了与 LD 组件热负载相匹配的 TEC 选型方法,加之优化的 PID 程序设计,完成了高精度 LD 温控系统设计,提高了 TEC 的制冷效率。

1 TEC 温控分析

1.1 TEC 工作原理

TEC 按照珀耳帖效应的原理工作:当电流流过热电致冷器时,热量便会由热电致冷器的一侧传送到另一侧,表现为其一端制冷另一端加热;如果电流的方向反转则制冷与加热的两端也会反转,即原来加热的一端变为制冷,原来制冷的一端变为加热。图 1 为一种典型的 TEC 温控系统。

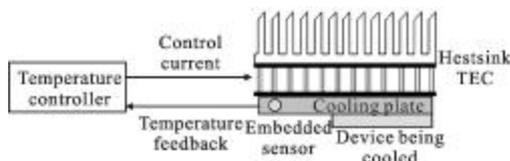


图 1 典型的 TEC 温控系统

Fig.1 Typical thermoelectric control system

1.2 TEC 选型方法

LD 组件热负载(P_c)决定着所使用到的 TEC 的

制冷功率。 P_c 等于 LD 本身产生的热功率 P_{active} 和其他热组件影响到制冷面的热功率 $P_{passive}$ 之和:

$$P_c = P_{active} + P_{passive} \quad (1)$$

其中

$$P_{active} = U \times I \times (1 - \eta) \quad (2)$$

式中: U 、 I 、 η 分别为 LD 的驱动电压、驱动电流以及电光转换效率。 $P_{passive}$ 包括辐射热功率 P_{rad} 、对流热功率 P_{conv} 和传导热 P_{cond} ^[9]。一般情况下,通过测温传感器(体积很小)连接和制冷块安装进行的传导热功率忽略不计。

$$P_{passive} = P_{rad} + P_{conv} + P_{cond} \quad (3)$$

$$P_{rad} = F \varepsilon \sigma A (T_H^4 - T_C^4) \quad (4)$$

式中: F 为形状系数,这里由于 TEC 厚度较小, F 值近似为 1; ε 为辐射系数,这里其值近似为 1^[9]; σ 为斯特藩玻耳兹曼常数(Stefan-Boltzman constant), $5.667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$; A 为被冷却物的底面积,这里即为传导铝块的底面积; T_H 为 TEC 热面所能达到的温度最大值,其由系统所使用到的最大环境温度值(T_A)和系统所配有的散热器的散热能力和效率所决定。在足够的散热和 TEC 热冷面温差较小条件下:

$$T_H = T_A + 5 \quad (5)$$

而在散热条件差或者 TEC 热冷面温差较大的情况下:

$$T_H = T_A + 15 \quad (6)$$

T_C 为制冷面所能达到的温度最低值,由环境温度差与 TEC 制冷面位置决定。在热负载较小的情况下 T_C 可以近似的认为等于系统最小的制冷温度。在热负载较大或者被冷却物与 TEC 制冷面较远时, T_C 等于系统最小的制冷温度减去 5°C。

$$P_{conv} = hA(T_H - T_C) \quad (7)$$

式中: h 为对流换热系数,当散热片采用自然对流换热时,散热片与周围空气之间的对流换热系数为 3.5~6.0 W/m²,当采用强迫对流散热时,换热系数大约可以提高 10 倍,达到 35~60 W/m²^[12]。这里采用强迫风冷散热。

由以上公式可得 P_c , 见公式(8),这里所求到的 P_c 值为 TEC 制冷面在使用环境相对较差情况下转移的热功率,实际中的 P_c 值要小一些。

$$P_c = U \times I \times (1 - \eta) + F \varepsilon \sigma A (T_H^4 - T_C^4) + hA(T_H - T_C) \quad (8)$$

得到 P_c 值以后,就可以通过 TEC 厂商提供的

TEC 的参数资料中查找到最适合的 TEC。特别注意,所选的 TEC 最大制冷量 Q_{cmax} 要大于 Q_{max} , Q_{max} 的表达式如下^[10]:

$$Q_{max} = P_c \times \Delta T_{max} / (\Delta T_{max} - \Delta T) \quad (9)$$

式中: ΔT_{max} 为 TEC 器件能达到的最大热冷温差, ΔT 为控温设计最大温差。为了保证 TEC 的工作寿命,其正常工作电压不应大于极限电压的 78%。需要注意的是 TEC 需要使用导热硅胶紧密黏粘在传热铝块与热沉之间,这样就使 TEC 能够与它们充分接触,利于传热。

2 系统设计

2.1 TEC 选型

文中采用的 LD 为三菱公司生产,型号为 ML501P73,其额定电压电流分别为 2.2 V、0.65 A,电光转换效率 30%。设 T_A 为 25℃, T_C 为 5℃,铝块底面积为 31.4 cm²,对流换热系数 45。经过计算得, $T_H = 40℃$, $P_{active} \approx 1 W$, $P_{passive} \approx 5.7 W$, $P_c = 6.7 W$ 。

文中采用 TEC 型号为 TEC1-07104,最大温差 69℃,极限作电压电流分别为 8.6 V 和 4.5 A,其最大制冷功率为 20W。计算 $Q_{max} = 16.37 W$,满足 Q_{cmax} 要大于 Q_{max} 的要求。根据此 TEC 热面温度分别为 27℃与 50℃时不同电流下温差与制冷量以及温差与电压之间的对应关系曲线所制成的制冷量为 6.7 W 情况下,各重要参数关系见表 1。

表 1 制冷量为 6.7 W 情况下,各重要参数关系

Tab.1 Relations among some important parameters under cooling capacity is 6.7 W

$T_H/℃$	$T_H - T_C/℃$	I/A	U/V
	35	2.5	4.5
27	40	2.8	5.1
	45	3.3	6.2
	35	2	4.15
50	40	2.3	4.65
	45	2.6	5.2

从表中可以对比得出,TEC 热面最大温度在 45℃时,温差为 40℃的情况下,达到所需要的制冷量驱动电压与电流分别约为:4.8 V,2.6 A。这里选择 5 V 的驱动电压即可实现所要求,并且 5 V 小于极限电

压的 78%。

2.2 系统结构与说明

系统基本结构图如图 2 所示。

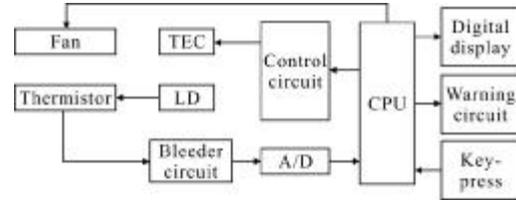


图 2 系统基本结构图

Fig.2 Basic configuration of system

AD 芯片选用 12 位开关电容逐次逼近 A/D 转换器 TLC2543。控制电路由大电流驱动芯片 ULN2003 与 H 桥组成,通过单片机处理比例积分微分(PID)程序生成相应的 PWM 信号驱动其工作,控制 TEC 降温或加热。

温度传感器对温度控制的精准度起着重要作用,其选择至少应该参考 4 个因素:线性度、温度范围、灵敏度以及外形尺寸。表 2 为几种 LD 温控系统常见的温度传感器各因素评估表^[9]。通过评估表以及本设计的要求,选择 10 K 的负温度系数,型号为 PR103J2 的热敏电阻作为温度传感器,其精度可以达到 $\pm 0.05℃$ 。

表 2 常见温度传感器各因素评估表

Tab.2 Common temperature sensor types with relative ratings

Sensor type	Linearity	Range/℃	Sensitivity	Size
Thermistor	Poor	-80 to 150	Best	Best
RTD	Good	-80 to 150	Poor	Good
LM335	Best	-80 to 150	Good	Poor
AD592	Best	-80 to 150	Good	Poor

2.3 软件设计

在 TEC 选择合适的情况下,优化的 PID 控制程序能够有效的提高系统控温精度,该设计中采用位置式 PID 控制算法。其数学模型如下:

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) + K_d (e(n) - e(n-1)) \quad (10)$$

式中: $u(n)$ 为输出控制量; K_p 为比例放大系数; K_i 为积分放大系数; K_d 为微分放大系数; $e(n)$ 、 $e(n-1)$ 分别为此刻、前一刻的差值信号。对于加热或降温的

控制可以采用调节电压的方法或者调节供电时间比例的方法。这里选择调节时间比例的方法，图 3 为 PID 控制流程图。

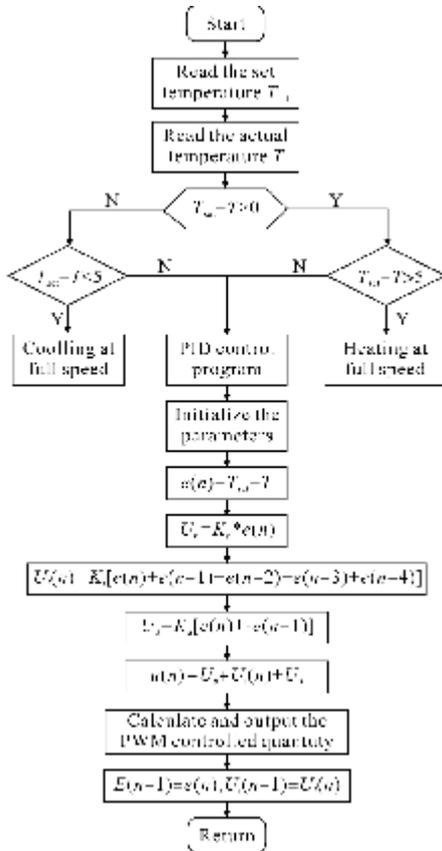


图 3 PID 控制流程图

Fig.3 Flow chart of PID control

3 实验结果与应用

3.1 稳定误差测试

根据热敏电阻温度与电阻关系表，从采样电路中得到各温度对应的理想电压值 V_s ，待经过精密恒温槽温度稳定后测量代表实际温度的电压值 V_t ，测量结果如表 3 所示。

表 3 稳态误差测试数据

Tab.3 Test data of steady-state error

	5℃	15℃	25℃	30℃	40℃
V_s/mV	4 405.8	4 105.5	3 724.6	3 508.7	3 043.3
V_t/mV	4 405.6	4 104.8	3 724.7	3 509.1	3 043.5

从表 3 可知，在 5℃~40℃ 的范围内，温度误差很小。误差最大点 15℃ 处为 0.7 mV，折合温度误差为 $0.0206^{\circ}C < 0.05^{\circ}C$ ，满足精度要求。在完成此项工作

后利用精密恒温槽完成温度显示的标度，此过程需要程序的优化。

3.2 LD 工作温度控制测试

环境温度 23℃，LD 工作温度设定温度分别为 20℃、25℃、30℃ 的条件下，对该系统的温度控制能力进行检验。图 4 给出了基于该系统，LD 工作温度的测试曲线，可以看出三组数据超跳量均不大于 0.4℃，稳定时间小于 80 s，误差在 $\pm 0.02^{\circ}C$ 之间。

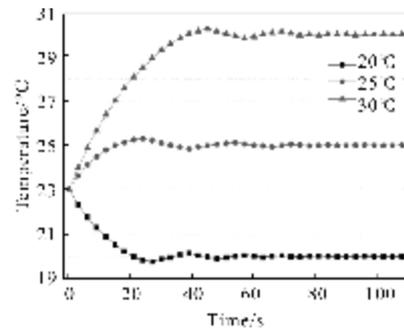


图 4 基于该系统，LD 工作温度的测试曲线

Fig.4 Test curve of LD working temperature based on this system

在后续测试中，该温控系统控制 LD 工作温度范围为 5℃~41℃，与预计的温控范围近似一致，说明系统充分利用了 TEC 的制冷效率。图 5 为不同的控制温度下温控误差变化情况。可以看出，在 5℃~41℃ 的控温范围内，控温误差在 $\pm 0.03^{\circ}C$ 之间，满足了高精度波长测试的温度控制要求。

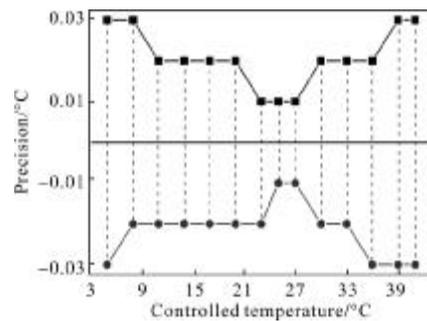


图 5 不同的控制温度下温控误差变化情况

Fig.5 Change of control error at different controlled temperatures

3.3 波长测试

波长测试装置及其组成如图 6 所示，其组成主要包括本设计温控系统、LD(638 nm)、衰减片、探头、光纤、光谱仪以及计算机等。光谱仪采用 AVANTES 公司生产的 AvaSpec-3648 型高分辨率光纤光谱仪，其最小分辨率可以达到 0.025 nm。图 7 为利用该系

统控温下所测的温度与中心波长的关系。测试过程中发现,在恒定温度控制下,LD中心波长很稳定,说明该系统能够很好的用于高精度波长测试实验。

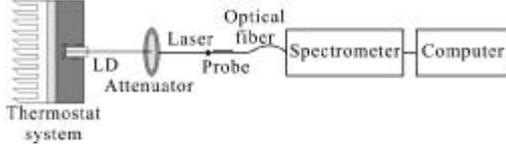


图6 波长测试装置及其组成

Fig.6 Wavelength test device and its components

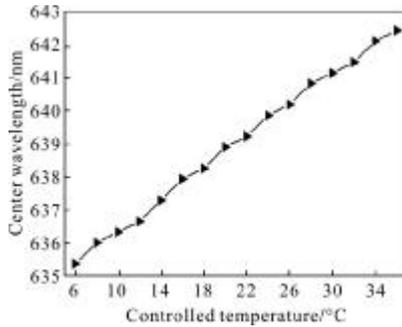


图7 利用该系统控温下温度与波长的对应关系

Fig.7 Relationship between temperature and center wavelength

4 结论

文中利用基于LD组件热负载的TEC选型方法,结合优化的PID控制程序,完成了LD温度控制系统。实验测得其温控范围和精度达到了预期的目标,很好的完成了LD中心波长在温度变化下的高精度测试实验。结果说明,运用文中TEC选型方法能够有效的提高温控系统的整体效率,对于LD温控设计具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Dai Qin, Song Wenwu, Wang Xijun. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14 (5): 475-478. (in Chinese)
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): 475-478.
- [2] Huang Yuewei, Cui Ruizhen, Gohh Mali, et al. TEC based thermostat system for high-power semiconductor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 143-147. (in Chinese)
- [3] Tang Wenyan, Sun Xiaoming, Zhou Yanzhou, et al. Design of the system for accurately controlling temperature of the laser diode [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1994, 26(4): 10-12. (in Chinese)
唐文彦, 孙晓明, 周延周, 等. 半导体激光器高精度温度控制系统的设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994, 26(4): 10-12.
- [4] Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng Yi. 1.34 μm Nd:YVO laser end-pumped by a diode-laser[J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 31(1): 19-21. (in Chinese)
张红瑞, 高明义, 郑义. 大功率激光二极管端面抽运的Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 19-21.
- [5] Chen Guoxiang, Zhang Haimei, Wang Jinjiang, et al. MCU-based temperature control system for laser diode [J]. Process Automation Instrumentation, 2007, 28(2): 53-57. (in Chinese)
陈国相, 张海明, 王晋疆, 等. 基于单片机的激光二极管温控系统[J]. 自动化仪表, 2007, 28(2): 53-57.
- [6] Jiao Mingxing, Xing Junhong, Liu Yun. Design of temperature control system for semiconductor laser diode [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(4): 261-264. (in Chinese)
焦明星, 邢俊红, 刘芸, 等. 半导体激光器温度控制系统的设计[J]. 激光与红外, 2006, 36(4): 261-264.
- [7] Zhang Hongwu, Zhang Liang, Li Kun, et al. Temperature control system of high power semiconductor laser [J]. Journal of University, 2005, 43(5): 642-644. (in Chinese)
张洪武, 张亮, 李坤, 等. 大功率半导体激光器恒温系统[J]. 吉林大学学报, 2005, 43(5): 642-644.
- [8] Zhang Xiaojie, Yu Hang, Zhao Baoqi. Design of high-precision temperature control system for semiconductor laser [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17 (9): 82-85. (in Chinese)
- [9] Wavelength Electronics. Optimizing thermoelectric temperature control systems[OL]. www.teamwavelength.com, 2005, 10.
- [10] Sctb Nord. Choosing of thermoelectric module meeting customer requirements [OL]. http://sctbnord.com/article_19.html.