

文章编号 1004-924X(2018)07-1604-08

## 高精度大范围的光学晶体温度控制系统

朱均超<sup>1</sup>, 豆梓文<sup>1\*</sup>, 李嘉强<sup>2</sup>, 徐晓明<sup>2</sup>

- (1. 天津理工大学电气电子工程学院 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384;  
2. 核工业理化工程研究院, 天津 300180)

**摘要:**为解决固体激光器工作时光学晶体产生的热沉积问题, 保证其工作性能稳定, 提出了一种基于半导体制冷器 (TEC) 的高控温精度、大控温范围光学晶体温度控制方案。分析了 TEC 的工作特性和光学晶体的热效应与传热机理, 将 TEC 工作过程中自身温度变化引起的电气特性改变与光学晶体温度的变化同时纳入控制环节, 建立了温度-电流双闭环温度控制模型, 设计并完成了一套高精控温精度、大控温范围的光学晶体温度控制系统。实验结果表明: 本系统在  $-15\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度控制范围内, 可以迅速稳定在任一设定的温度点, 其控温精度优于  $\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 当设定温度和实际温度之间的偏差在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内时, 其收敛稳定时间小于  $60\text{ s}$ , 可以满足固体激光器中光学晶体对控温范围与精度的要求。

**关键词:** 光学晶体; 温度控制; 双闭环; 高精度; 大范围

中图分类号: TN244 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182607.1604

## High-precision and wide-range optical crystal temperature control system

ZHU Jun-cao<sup>1</sup>, DOU Zi-wen<sup>1\*</sup>, LI Jia-qiang<sup>2</sup>, XU Xiao-ming<sup>2</sup>

- (1. School of Electrical and Electronic Engineering,  
Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications  
in Complicated System, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;  
2. Research Institute of Physical and Chemical Engineering  
of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)  
\* Corresponding author, E-mail: douziwentjut@163.com

**Abstract:** To address the problem of heat accumulation of optical crystals in solid-state lasers and ensure the stability of its work performance, a temperature-control method with high temperature control accuracy and large temperature control range, based on a semiconductor Thermoelectric Cooler (TEC), was proposed. Based on the operating characteristics of the TEC, the heat effect and the heat transfer mechanism of the optical crystal, a temperature-current double closed-loop temperature control model was established. The proposed model controls both the electrical characteristic variations of the working TEC and the temperature variations of the optical crystal. A high-precision and wide-range optical crystal thermostat control system was designed and implemented. Experimental results demonstrate that the overall temperature control accuracy of the proposed system

收稿日期: 2017-12-11; 修订日期: 2018-01-18.

基金项目: 国家重大仪器设备专项资助项目 (No. 2012YQ250003)

is better than  $\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the system can quickly stabilize at any set point temperature in a wide temperature range of  $-15\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , when the set temperature and the actual temperature deviate  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a stable convergence time of less than 60 s, which meets the requirements of solid-state laser optical crystal for temperature range and accuracy.

**Key words:** optical crystal; temperature control; double closed loop; high precision; wide range

## 1 引 言

固体激光器在信息技术、工业、医疗和国防等领域具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。在对固体激光器中光学晶体进行温度调节的基础上配合角度调谐是固体激光器实现稳定工作的一种有效方法<sup>[2]</sup>,但光学晶体工作时容易产生热沉积、引起自身温度变化,进而导致激光器输出激光的光谱、功率产生漂移<sup>[3]</sup>,严重影响激光器的性能。故对光学晶体的工作温度进行大范围、高精度控制,使其工作在最佳温度区域下,对于提高激光器性能和可靠性具有重要意义。

目前,光学系统中的温度控制模块多使用脉宽调制技术(Pulse Width Modulation, PWM)控制半导体制冷芯片(Thermoelectric Cooler, TEC)的工作电流,从而间接地稳定光学晶体温度,构造恒温环境。该温控方案由温度采集、自动控制算法、TEC 控制器等环节组成,体积小、安装使用方便、控制精度较高。这种温控系统多以被控光学晶体的温度作为单一的反馈参数进行控制,而 TEC 工作时,由于温度变化会引起自身电气特性的变化,不同温度、不同温差下具备不同的电气特性和工作效率,进而影响温度控制系统的精度和控温范围,现有半导体温度控制系统的控温精度多介于  $0.1\sim 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,控温范围在  $20\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[4-6]</sup>。在固体激光器工作时,为使激光器实现较宽的波长调谐范围并且保持输出激光稳定,需要大范围和高精度的温度控制系统。

本文将 TEC 的工作特性与光学晶体中热量传递规律相结合,将被控温度和 TEC 的自身电气特性变化因素同时纳入控制环节中,建立了温度-电流双闭环温度控制模型,设计并研制了高精度、大控温范围的光学晶体温度控制系统,可满足固体激光器中光学晶体温度的控制要求。该控温方法也可应用于类似大范围、高精度的控温场合。

## 2 温度控制原理

### 2.1 TEC 工作原理及温度控制模型

TEC 是一种根据珀耳帖效应工作的半导体功率器件,是一对由 P 型半导体与 N 型半导体组成的热电偶。当电流通过两种不同导体构成的回路时,两种材料中的电子和空穴在跨越节点时通过吸热或放热来改变自身的势能(珀耳帖效应)<sup>[7]</sup>,使节点两端分别表现出制冷和加热的效果,从而在 TEC 中产生冷端与热端。当电流的方向反转时,制冷与加热的两端相应发生反转<sup>[8]</sup>。改变电流大小即可调制冷或加热量。

图 1 为 TEC 组成示意图, A, B 分别为 TEC 的冷热两端。设冷端温度为  $T_c$ ,从外界吸收热量为  $Q_c$ (制冷量)。设 B 处温度为  $T_h$ ,热端向外界散出的热量为  $Q_h$ (散热量)。U 为加载在 TEC 两端的电压, I 为电路中电流。

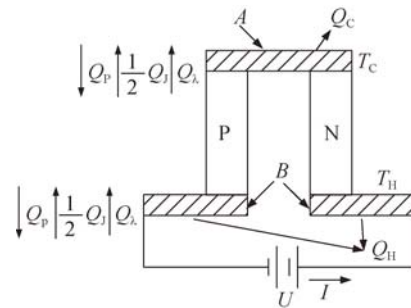


图 1 TEC 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Thermoelectric Cooler(TEC)

当 TEC 工作在制冷模式时,由于焦耳热和热传导热的存在,回路中要有一部分热量流入冷端。根据热力学第一定律,冷端的制冷量应该为珀耳帖热、焦耳热和热传导热之和,公式如下<sup>[9]</sup>:

$$Q_c = Q_p - \frac{1}{2} Q_j - Q_k, \quad (1)$$

式中:  $Q_p = \alpha I T_c$ , 为珀耳帖热,其中  $\alpha$  为珀耳帖系数;  $Q_k = K \Delta T$ , 为通过电偶臂的热传导热,其中  $K$

为一对热电偶的单位传热量;  $\Delta T = T_h - T_c$ , 为冷端与热端的温度差;  $Q_J$  为焦耳热, 假设电偶臂 P、N 侧面是绝热的, 则流到热端和冷端的焦耳热是相等的, 各为总焦耳热的一半, 即  $\frac{1}{2} Q_J = \frac{1}{2} I^2 R$ 。R 为一对热电偶等效电阻, 当半导体材料的性质与几何尺寸一定时, R 可视为定值<sup>[10]</sup>, 可表示为:

$$R = R_p + R_n = \frac{\rho_p}{\gamma_p} + \frac{\rho_n}{\gamma_n}, \quad (2)$$

式中:  $\rho_p, \rho_n$  分别为 P 型半导体、N 型半导体的电阻率;  $\gamma_p, \gamma_n$  分别为 P 型半导体、N 型半导体的面积比,  $\gamma_p = \frac{A_p}{L}, \gamma_n = \frac{A_n}{L}$ 。

故式(1)可转换为 TEC 冷端制冷量的一般表达式, 即:

$$Q_c = \alpha I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T. \quad (3)$$

同理, 可得 TEC 热端制热量的一般表达式:

$$Q_h = \alpha I T_c + \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T. \quad (4)$$

图 1 中加载在热电偶两端的电压为 V, 该电压分为两部分: 一部分用来克服帕尔帖效应产生的温差电动势  $V_{PN} = \alpha \Delta T$ ; 另一部分驱动 TEC 工作, 其大小为  $V_R = RI$ 。故有:

$$V = V_R + V_{PN} = RI + \alpha \Delta T, \quad (5)$$

$$V_R = V - V_{PN} = V - \alpha \Delta T. \quad (6)$$

由式(6)可知, TEC 中的有效工作电压等于电源电压和温差电动势之差。当 TEC 工作时,  $\Delta T$  会发生变化, 温差电动势  $V_{PN}$  随之改变。不考虑电路中的导线电阻, 工作电流 I 为:

$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{V - \alpha \Delta T}{R}. \quad (7)$$

即在 TEC 两端所施加的工作电压一定时, TEC 的实际工作电流 I 不是定值, 而是随着  $\Delta T$  的变化而发生改变。

理想情况下, P、N 型半导体材料侧面都是绝热的, 并且其热电系数都是与温度无关的常数, 因此可忽略热端与冷端的焦耳热和热传导热的影响, TEC 主要工作在珀耳帖效应下, 故式(3)、式(4)简化为:

$$Q_c = \alpha T_c I = K_2 I, \quad (8)$$

$$Q_h = \alpha T_h I = K_1 I, \quad (9)$$

式中  $K_1 = \alpha T_h, K_2 = \alpha T_c$ 。

由式(8)和式(9)可知, 当 TEC 的工作温度、

几何尺寸和半导体材料一定时, 其制冷量与制热量只与电流有关, 即制冷量和制热量同 TEC 的工作电流近似成正比<sup>[11]</sup>。

设  $Q_0$  为光学晶体向周围散发的热量; 晶体内积热为  $Q_i$ , 当激光器的光功率恒定时, 其单位时间的积热变化量可视为定值<sup>[12]</sup>。TEC 工作过程中, 同光学晶体之间交换的热量为  $Q_{TEC}$ , 则  $Q_{TEC} = K_1 I$ 。根据热力学定律, 光学晶体温度 T 的变化取决于光学晶体内部热量的变化, 故<sup>[13]</sup>:

$$CM dT_i(t) = Q_{TEC} + Q_i - Q_0, \quad (10)$$

$$CM \frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{dQ_{TEC}}{dt} - \frac{dQ_0}{dt}. \quad (11)$$

且晶体周围的散热速率  $dQ_0$  与晶体温度 T 之间满足:  $dQ_0 = \frac{T(t)}{R_m}$ ,  $R_m$  为晶体热阻。

设  $CMR_m = T_0$  (其中  $T_0$  是  $T_i(t)$  变化的时间常数),  $K_1 R_m = K_{TEC}$ , 那么式(11)可写成光学晶体温度  $T(t)$  与流过半导体制冷器的电流  $I(t)$  的动态微分方程形式:

$$T_0 \frac{dT_i(t)}{dt} + T(t) = K_{TEC} I(t). \quad (12)$$

可得其传递函数方程为:

$$G_{TEC} = \frac{K_{TEC}}{T_0 s + 1}, \quad (13)$$

式中  $K_{TEC}$  为 TEC 的比例系数, 由 TEC 的半导体材料和几何尺寸决定。

## 2.2 控制方法模型分析

TEC 驱动电路中常通过 PWM 调节加载在 TEC 两端的电压, 其有效电压由 PWM 的占空比决定<sup>[14]</sup>。理想情况下, 通过控制算法计算出 PWM 信号的占空比, 控制 TEC 驱动电路输出的有效电压, 在 TEC 中产生工作电流, 该电流值决定了 TEC 工作时的制冷或者制热量。通过改变 PWM 的占空比调节驱动电路输出的有效电压, 控制 TEC 工作电流的大小, 便可实现对 TEC 制冷或加热量的调节<sup>[15]</sup>。但是 TEC 工作时会在冷热两端产生温度差  $\Delta T$ , 从而在 TEC 中产生温差电动势, 该电动势的值随温度发生变化。该反向电势的存在影响实际加载在 TEC 两端的有效工作电压, 从而影响 TEC 中的实际工作电流, 致使 TEC 实际的制冷或者加热量与预期值产生偏差, 严重影响系统的控制精度。因此根据温度差  $\Delta T$  的变化对加载在 TEC 两端的控制电压 V 进行补偿, 可以有效提高系统的控制精度。

### 2.3 温度-电流双闭环控制算法模型

影响 TEC 两端温差的因素较多,难以精确建模分析。本系统在经典的温度控制系统的基础上,构建出温度-电流双闭环控制系统,把 TEC 的实际工作电流和被控晶体温度同时作为控制参数进行实时调节,可有效提高系统的控制精度。

温度-电流双闭环算法框图如图 2 所示,内环是电流反馈环,惯性小,调整快,采用 PI 控制。外环是温度反馈环,采用 PID 控制。

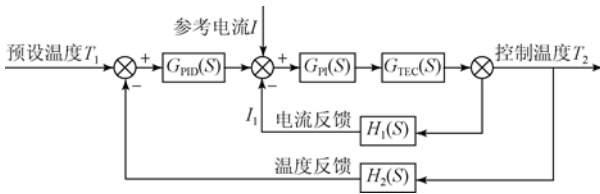


图 2 温度-电流双闭环算法框图

Fig. 2 Block diagram of temperature-current double closed-loop algorithm

温度反馈环中,  $e(t)$  为设定温度与 TEC 控制温度的偏差,  $e(t) = T_1 - T_2$  为 PID 控制器的输入信号。通过 PID 运算处理后计算出 PWM 控制信号的占空比  $\delta(t)$  为:

$$\delta(t) = K_{p_i} e(t) + K_{i_i} \int_0^t e(t) dt + K_{d_i} \frac{de(t)}{dt}, \quad (14)$$

$$V = \delta M, \quad (15)$$

式中:  $M$  为驱动电压的幅值,  $\delta$  为 PWM 信号的占空比。PID 控制器的传递函数  $G_{PID}(s)$  为:

$$G_{PID} = K_{P_i} + \frac{K_{I_i}}{T_i s} + K_{D_i} s, \quad (16)$$

式中:  $K_{P_i}$ ,  $K_{I_i}$ ,  $K_{D_i}$  分别为 PID 控制的比例系数、

$$G(s) = \frac{G_{PID}(s) G_{PI}(s) G_{TEC}(s)}{1 - G_{PI}(s) G_{TEC}(s) H_1(s)} = \frac{G_{PID}(s) G_{PI}(s) G_{TEC}(s)}{1 + G_{PI}(s) G_{TEC}(s) H_1(s) + G_{PID}(s) G_{PI}(s) G_{TEC}(s) H_2(s)} =$$

$$\frac{K_{TEC} (T_1 s + 1) (K_{P_i} T_i s + K_{I_i}) (K_{D_i} T_i s^2 + K_{P_i} T_i s + K_{I_i})}{T_i T_1 s^2 (T_0 s + 1) (T_1 s + 1) + T_i K_{P_i} K_{TEC} s (T_1 s + 1) (K_{P_i} T_i s + K_{I_i}) + K_{TEC} K_r (K_{P_i} T_i s + K_{I_i}) (K_{D_i} T_i s^2 + K_{P_i} T_i s + K_{I_i})}, \quad (21)$$

式中:  $T_1$ ,  $T_0$ ,  $T_i$ ,  $T_i$  分别为温度反馈环节、TEC、PID 控制环节、PI 控制环节的时间常数,由各个环节电路的物理结构特性所决定;  $K_{TEC}$ ,  $K_r$ ,  $K_{P_i}$ ,  $K_{P_i}$ ,  $K_{P_i}$  分别为 TEC、温度反馈环节、电流反馈环节、PID 控制环节、PI 控制环节的比例系数;  $K_{I_i}$ ,  $K_{I_i}$  分别为 PID 控制环节、PI 控制环节的积分系

积分系数、微分系数,  $T_i$  为积分时间常数。

电流反馈环中,  $e_i(t)$  为电流偏差,  $e_i(t) = I - I_1$  为 PI 控制器的输入信号。通过 PI 控制器的运算处理后计算得出控制增量  $\Delta V$ :

$$\Delta V = K_{p_i} e_i(t) + K_{i_i} \int_0^t e_i(t) dt, \quad (17)$$

$$V_{TEC} = V + \Delta V, \quad (18)$$

式中  $V_{TEC}$  为补偿后加载到 TEC 两端的实际电压。PI 控制器的传递函数  $G_{PI}(s)$  为:

$$G_{PI} = K_{P_i} + \frac{K_{I_i}}{T_i s}, \quad (19)$$

式中:  $K_{P_i}$ ,  $K_{I_i}$  分别为 PI 控制的比例系数、积分系数,  $T_i$  为积分时间常数。

通过电流反馈环对 TEC 控制电压  $V$  进行补偿,可有效抑制  $\Delta T$  的变化对 TEC 控制造成的偏差,使 TEC 的工作电流恰好可以满足预期的制热或制冷量,实现温度的稳定增长,避免额外的产热或制冷,温度控制更为精准。

$G_{TEC}(s)$  为 TEC 的传递函数,由于  $G_{TEC} = \frac{K_{TEC}}{T_0 s + 1}$ ,其输入为 TEC 工作电流,TEC 可根据该电流的大小和方向,产生相应的发热或制冷量,使控制温度  $T_2$  达到预设值。  $H_1(s)$  为电流检测电路的传递函数,由于电流反馈与温度反馈相比要快很多,因此可将电流反馈传递函数  $H_1(s)$  视为比例环节,即:  $H_1(s) = K_{p_r}$ 。温度反馈传递函数  $H_2(s)$  可视为惯性环节,其传递函数可写为:

$$H_2(s) = \frac{K_r}{T_1 s + 1}, \quad (20)$$

式中:  $K_r$  为该环节的比例系数,  $T_1$  为时间常数。

故系统的传递函数  $G(s)$  为:

数;  $K_{D_i}$  为 PID 控制环节的微分系数。

基于以上分析,本系统的温度-电流双闭环控制框图如图 3 所示。系统由控制器、TEC 驱动电路、半导体制冷器、温度反馈模块、电流反馈模块组成,内环为电流反馈环,外环为温度反馈环,共同构成整个温度控制系统。

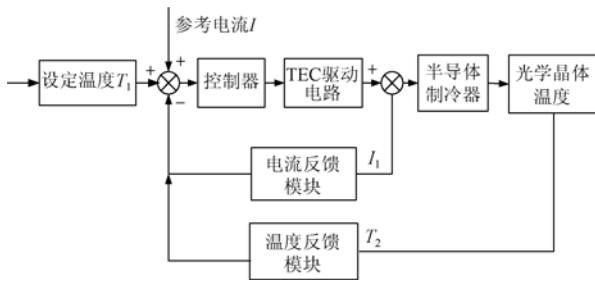


图 3 温度-电流双闭环控制框图

Fig. 3 Block diagram of temperature-current double closed-loop control

### 3 系统设计与实现

系统的硬件框图如图 4 所示,采用 STM32F103 单片机作为处理器(MCU),MOS 管构成 H 桥驱动 TEC 模块;TEC 驱动电流信号的测量使用霍尔传感器。温度传感器采用稳定性和线性度较高的 A 级铂电阻 PT100,4 线制连接补偿方式,采用高精度恒流源驱动后进入 24 位高精度 A/D 中,同高精度参考电阻比较后得到被测温度值。被控光学晶体的理想温度值由人机交互界面(HMI)输入系统,HMI 同 MCU 之间采用 RS485 工业总线进行通讯。

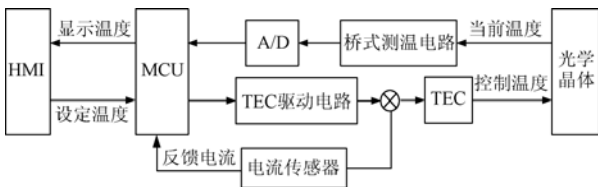


图 4 温度-电流双闭环控制系统硬件框图

Fig. 4 Hardware diagram of temperature-current double closed-loop control system

系统工作时,设定光学晶体的理想温度后,系统使用 PT100 采集光学晶体当前的实际温度,经过 A/D 变换后进入 MCU 中作为双闭环控制系统中的外环控制反馈值,经过运算后得到 TEC 的控制量,转换为 PWM 控制信号后,采用 MCU 的定时器输出到 TEC 驱动电路,驱动 TEC 工作,实现外环控制;同时再根据霍尔传感器返回的实际 TEC 工作电流值,经过内环 PI 控制算法对 TEC 的 PWM 控制信号进行调节和修正,使 TEC 工作

在预期电流值下,调节被控光学晶体的温度稳定在设定值。

设计并完成了硬件电路板的调试,同时又集成了嵌入式触摸屏作为人机交互接口,并采用 RS485 通信总线作为通信接口,以上共同构成的高精度大范围温度控制系统如图 5 所示。

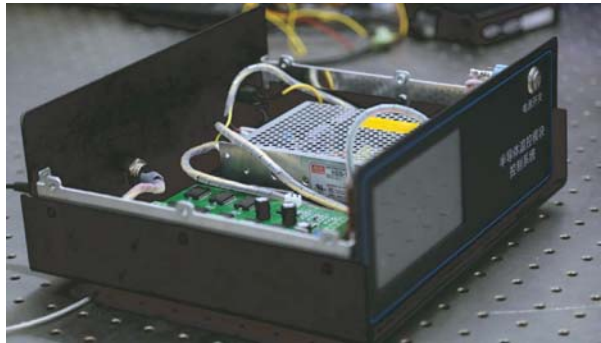


图 5 高精度大范围温度控制系统

Fig. 5 Photo of high-precision and wide-range temperature control system

### 4 温度控制实验与结果分析

#### 4.1 大范围连续控温实验

TEC 与光学晶体安置示意图如图 6 所示,把光学晶体和温度传感器固定安装在紫铜基座上,通过控制基座的温度来间接控制光学晶体温度。TEC 模块控温面同紫铜基座保持良好热接触,另一端连接通有循环水的散热片,携带走控温过程中产生的多余热量。实验装置如图 7 所示,实验之前采用 Fluke 高精度恒温水槽 7008 与标准温度计 5699 标定控温系统。

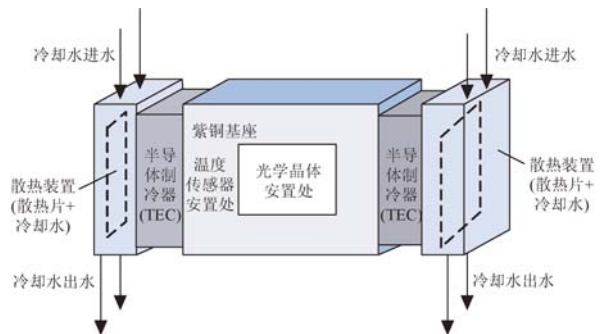


图 6 TEC 与光学晶体安置示意图

Fig. 6 Installation of TEC and optical crystal



图 7 温度控制系统实验装置图

Fig. 7 Experimental devices of temperature control system

在室内温度环境下(14.8 °C),在-15~120 °C 的控温范围对光学晶体进行恒温控制实验。先从室温把系统调节到-15 °C,然后每隔 20 °C 设置一个控温点进行测试,直到系统最高可控温度值 120 °C,每次设定温度至下次设定温度间的时间间隔为 100 s。所获得的大范围连续温度控制曲线如图 8 所示,曲线即为被控光学晶体基座的实际温度变化曲线。从中可见,每设置一个温度后,经过较短时间的调节和超调后,迅速收敛到设定温度值。

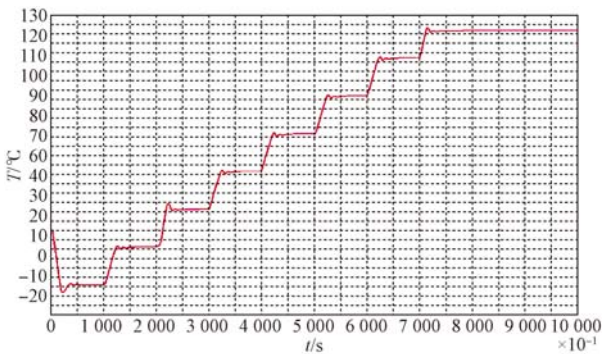


图 8 大范围连续温度控制曲线

Fig. 8 Curve of wide-range continuous temperature control

具体控温实验数据结果如表 1 所示,表 1 中  $T_1$  为设定温度,  $T_2$  为系统稳定后(温度偏差稳定在  $\pm 0.002$  °C 以内时,视为温度稳定状态)该控温点下的温度变化范围,  $t$  为从设定温度开始到系统达到稳定所需的时长,  $\delta$  为该控温点下的最大温度偏差。由表 1 可见:(1)每个控温测试点,光学晶体的实际温度  $T_2$  与设置温度  $T_1$  之间的偏差  $\delta$  较小,最小约为 0.001 °C,最大约为 0.002 °C,平均偏差为 0.001 6 °C,系统控制稳定性较好;(2)每次设置控制温度后(各控温点之间

的温度间隔为 20 °C),系统约 60 s 即可达到稳定状态,响应速度较快且超调量小。

表 2 为多控温节点的长时间温度控制实验数据(实验条件与上文相同),每个节点的控温时间为稳定后两个小时。其中  $T_1$  为设定温度,  $T_2$  为系统稳定后两个小时内实测温度的变化范围,  $T_3$  为系统稳定后该控温点下的平均温度,  $\Delta T$  为该控温点下的温度浮动范围。由表 2 可见:在两个小时的控温时间内,各个控温点下温度浮动最大为 0.003 6 °C,最小为 0.002 2 °C,温度浮动在预期范围内,系统控温稳定性较好。

表 1 大范围温度控制实验数据表

Tab. 1 Data of wide-range temperature control experiment

设定温度 $T_1$ /°C	光学晶体温度 $T_2$ /°C	稳定时间 $t$ /s	最大偏差 $\delta$ /°C
-15	-14.998 7~-15.001 6	52	0.001 6
5	4.998 3~5.001 9	50	0.001 9
25	25.000 9~25.001 4	49	0.001 4
45	44.998 2~45.001 3	51	0.001 8
65	64.999 1~64.998 0	53	0.002 0
85	84.998 9~85.001 6	53	0.001 6
105	104.998 8~105.000 8	55	0.001 2
120	119.998 9~120.001 5	56	0.001 5

表 2 长时间温度控制实验数据表

Tab. 2 Data of long-time temperature control experiment (°C)

设定温度 $T_1$	光学晶体温度 $T_2$	平均温度 $T_3$	浮动范围 $\Delta T$
-15	-14.998 6~-15.001 5	-14.998 7	0.002 9
5	4.998 4~5.001 2	5.000 6	0.002 8
25	24.998 1~25.001 6	24.999 1	0.003 5
45	44.998 9~45.001 1	44.999 6	0.002 2
65	64.998 8~65.001 3	65.001 7	0.002 5
85	84.998 6~85.001 4	85.001 3	0.002 8
105	104.998 6~105.001 9	104.999 7	0.003 3
120	119.998 2~120.001 8	120.001 2	0.003 6

实验证明,大范围温度控制区域(-15~120 °C)内,连续设定控制温度,系统在每一个温度段中都能够控温稳定且动态响应速度快、超调量小。

#### 4.2 负载能力与环境散热异常实验

控温性能主要包括负载能力和外界环境影

响。当负载热功率较高时其控温性能会有所改变,同时激光器实际运行中会遇到各种环境散热异常情况,其中以冷却循环水突然断水或者循环不畅造成的温度异常升高最为严重,水温过高会严重影响系统散热,导致环境温度升高,影响系统的控温效果。为模拟冷水循环水温度异常升高的情况,在室内温度环境(14.8 °C)下进行实验,首先调整光学晶体温度为 10 °C,在温度控制稳定后,启动激光器(激光功率为 350 W),当被控温度达到稳定后,将冷却循环水温度从室温(14.8 °C)提升至约 50 °C,所获得的控温曲线如图 9 所示,曲线即为实际采集的温度变化曲线。

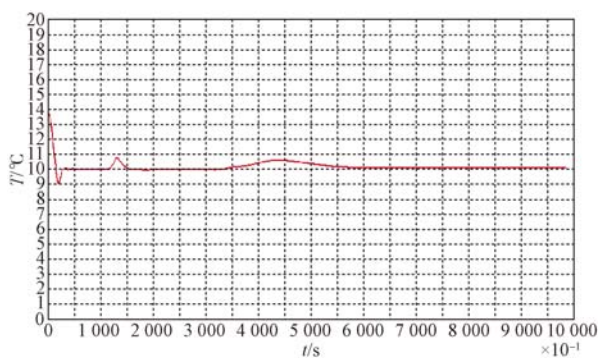


图 9 负载能力与环境散热异常控温曲线

Fig. 9 Load capacity and abnormal temperature control curve of environmental heat dissipation

#### 参考文献:

- [1] 李国玉,杨康,贾素梅,等. 基于压电陶瓷闭环控制的线性可调谐环形腔光纤激光器 [J]. 光学学报, 2015, 36(6): 180-184.  
LI G Y, YANG K, JIA S M, *et al.*. Linear tunable fiber ring laser based on closed-loop piezoelectric ceramics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 36(6): 180-184. (in Chinese)
- [2] 张连平,殷国玲,李凤琴,等. 900 nm 波段的全固态高功率单频可调谐钛宝石激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1201002. (in Chinese)  
ZHANG L P, YIN G L, LI F Q, *et al.*. High-power all-solid-state single-frequency Ti: sapphire laser with the board tunability in 900 nm wave band [J]. *Chinese J. Lasers*, 2017, 44(12): 1201002. (in Chinese)
- [3] 苏瑞峰,陈晓娟,朱明智,等. KDP 晶体支撑系统工作姿态确定 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 632-640

从该曲线可见,启动激光器后,系统负载功率增加,其温度升高至 10.81 °C,经过约 50 s 的温度调节后,系统温度重新收敛稳定,PWM 输出在 15% 左右。迅速提高冷却循环水温度后,被控温度产生波动,缓升至 10.73 °C,又经过约 150 s 的温度调节后,重新收敛稳定至 10 °C 附近,PWM 输出在 63% 左右。实验表明,系统在负载热功率增加后,控温性能良好,并对异常环境干扰具有较好的鲁棒性。

## 5 结 论

本文分析了 TEC 的工作特性和光学晶体的热量传递规律,建立了温度-电流双闭环控温模型,研制了一套高精度、大范围光学晶体恒温控制系统。实验表明,本系统在 -15 ~ 120 °C 的控温稳定度优于  $\pm 0.002$  °C,动态响应速度快,超调量小,并对异常环境干扰具有较好的鲁棒性,系统控温性能良好,满足固体激光器中光学晶体对温度控制的要求,在大范围温度调节的基础上配合角度调谐,可使固体激光器实现较宽的波长调谐范围且保持输出光功率稳定。同时,基于温度-电流双闭环控制的温度控制方法也可以应用于其他高精度温度控制场合。

- SU R F, CHEN X J, ZHU M ZH, *et al.*. Ascertainment of operating posture of KDP crystal supporting system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 632-640. (in Chinese)
- [4] 李金华,杨苏辉,赵长明,等. 31.5 W 太阳光抽运 Nd: YAG 固体激光 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1114001.  
LI J H, YANG S H, ZHAO CH M, *et al.*. A 31.5 W solar-pumped Nd: YAG solid-state laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1114001. (in Chinese)
- [5] 王选择,曾志祥,钟毓宁,等. 基于相差识别的半导体激光器温度精密测量与控制 [J]. 光电子·激光, 2013(2): 239-245.  
WANG X Z, ZENG ZH X, ZHONG Y N, *et al.*. Precise measurement and control of temperature in semiconductor laser based on phase recognition [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013(2): 239-245. (in Chinese)
- [6] 何启欣,刘慧芳,李彬,等. 多通道半导体激光器温

- 控系统 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1114002.
- HE Q X, LIU H F, LI B, *et al.*. A multi-channel semiconductor laser temperature control system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1114002. (in Chinese)
- [7] 李立京, 王颖, 杨慧, 等. 超荧光光源温度动态特性的分析及控制 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 539-546.
- LI L J, WANG Y, YANG H, *et al.*. Control of temperature dynamic characteristics of SFS light source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 539-546. (in Chinese)
- [8] ZHAO T, FAN Z, XIAO H, *et al.*. Temperature-stable pumping realization through the optimization the pump-laser spectral distribution in optical amplifiers [J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 551-556.
- [9] PEARSON M R, LENTS C E. Optimization of a thermoelectric cooler for time-varying heat load and sink temperature [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2016, 138(4): 041010.
- [10] 田小建, 尚祖国, 高博, 等. 980 nm 高稳定度激光泵浦源控制系统 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 982-987
- TIAN X J, SHANG Z G, GAO B, *et al.*. Control system for 980 nm high stability laser pump source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 982-987. (in Chinese)
- [11] GAO H, TENG B, WANG Z, *et al.*. Room temperature noncritical phase matching fourth harmonic generation properties of ADP, DADP, and DKDP crystals [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(11): 4050.
- [12] DEBNATH R, KUMARI P, SAHA A. Electro-optically tuned non-critically phase matched second harmonic generation of Nd:YAG laser in LiNbO<sub>3</sub> crystal [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 132: 232-235.
- [13] GAO Y W, LV H, WANG X D, *et al.*. Enhanced Peltier cooling of two-stage thermoelectric cooler via pulse currents [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 656-663.
- [14] 谢海鹤, 邹文栋, 黄长辉, 等. 基于 PWM 比较放大的 LD 温控系统 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1530-1534.
- XIE H H, ZOU W D, HUANG CH H, *et al.*. LD temperature control system based on PWM comparison amplifier [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(7): 1530-1534. (in Chinese)
- [15] 刘东晓, 李运泽, 李运华. 纳卫星等效空间热沉的 PWM 控制及其在地面模拟试验中的应用研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 148-155.
- LIU D X, LI Y Z, LI Y H. PWM control and application research on ground simulation experiment of equivalent space heat sink for nano-satellite [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(16): 148-155. (in Chinese)

## 作者简介:



朱均超(1972—),男,河南开封人,博士,副教授,2007年于天津大学获得博士学位,主要从事光电检测与控制方面的研究。E-mail: zhujunchao\_tjut@163.com

## 通讯作者:



豆梓文(1995—),女,河南商丘人,2016年于河南理工大学获得学士学位,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: douziwentjut@163.com