

用于全内腔微片激光器稳频的温度控制系统

张亦男, 谈宜东, 张书练

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 温度控制是实现全内腔半导体泵浦 Nd:YAG 微片激光器稳频的行之有效的的手段之一。研究了如何为 Nd:YAG 微片激光器的稳频提供有效的温控方式。估算出所需要的控温精度——波动范围在 $\pm 0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。依据这一设计目标,介绍了各重要环节的设计过程。通过频域分析法,对温控系统的特性进行分析与调整。通过理论计算将系统改造成了二阶系统最优模型并用实验验证了理论分析。研制了一套用于全内腔半导体泵浦 Nd:YAG 微片激光器的温控系统,并在两种条件下对系统进行了测试。在室温 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的条件下,可以给微片提供 $18\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的任意温度环境,温度波动范围在 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内;当环境温度在 $18\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间任意改变时,系统能将晶片温度稳定在 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动范围在 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

关键词: 温度控制; 稳频; 全内腔微片激光器; PID

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0101-06

Temperature control system for frequency stabilization of total internal cavity microchip laser

Zhang Yinan, Tan Yidong, Zhang Shulian

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Temperature control is an effective way to realize the total internal cavity diode-pumped Nd:YAG microchip laser. How to provide effective means of temperature control for Nd:YAG microchip laser was studied. The temperature control accuracy needed was within the fluctuation range of $\pm 0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$. Based on this designed goal, the design process of each key link was presented. By means of frequency domain analysis, the characteristics of the temperature control system was analyzed and adjusted. By theoretical calculation, the system was remolded into an optimal model for second-order system and the theoretical analysis was verified by experiments. The temperature control system was designed for the total internal cavity diode-pumped Nd:YAG microchip laser, which guaranteed the temperature of the microchip can be set arbitrarily between $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ within the fluctuation range of $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ under normal condition (around $26\text{ }^{\circ}\text{C}$). The system can also guarantees the temperature of the microchip can be set at $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, within the fluctuation range of $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, under arbitrarily temperature condition between $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: temperature control; frequency stabilization; total internal cavity microchip laser; PID

收稿日期:2011-05-22; 修订日期:2011-06-29

基金项目:国家高技术研究发展计划(2008AA042409)

作者简介:张亦男(1986-),男,硕士生,研究方向为 Nd:YAG 固体激光器、激光回馈。Email:zhangyinan.dionysus@gmail.com

导师简介:张书练(1945-),男,教授,博士生导师,主要从事正交偏振激光器及其在精密测量中应用方面的研究。

Email:zsl-dpi@tsinghua.edu.cn

0 引言

准共路微片激光器回馈干涉仪以 Nd:YAG 微片激光器作为光源,应用准共路激光回馈干涉测量的原理,对待测目标的位移进行测量,并最终将测量得到的数据溯源到光源的光波长上。即这套测量系统实现精准测量的基础取决于光源输出波长的准确和稳定程度。

Nd:YAG 微片激光器回馈纳米测量技术中纳米分辨和溯源的实现,必须依靠稳频,这是此项研究的目的^[1]。

LD 端面泵浦 Nd:YAG 微片激光器的热很大一部分产生于 LD 向微片发射的功率。由于是端面泵浦,这种激光器有着自己独特的温度分布、应力分布以及热透镜效应^[2-3],对此很多文献都有过论述。笔者注意到,当温度和应力发生变化时,增益介质 Nd:YAG 晶体的折射率、形状、体积都会发生变化。这给 Nd:YAG 微片激光器的输出波长带来了极大的不稳定因素^[4]。因为恰巧微片激光器的谐振腔反射镜就是 Nd:YAG 晶体的两个表面,而通过给晶体微片镀膜形成的谐振腔光程长度又完全取决于晶体微片的尺寸和折射率。

采用尽量窄的 LD 发光频率提高增益介质的吸收效率,尽可能地降低多余热量的产生是一个很有用的方法。然而,热量的产生还是无法避免,且环境的温度波动也会对激光器温度造成影响。折射率与尺寸是晶体的固有性质,很难改变,所以控制晶体温度就成了关键。

文中介绍了通过温度控制合理设计激光器的机械结构、反馈控制参数等方法,实现了对激光器输出波长的稳定作用,并达到了设计要求。

1 设计目标要求

整套系统已经选定用半导体泵浦 Nd:YAG 全内腔微片激光器作为光源。所谓全内腔实际上是在 Nd:YAG 的两个端面上镀膜,作为两个腔镜。这种全内腔的激光器具有较高的稳定性,异地使用也基本不用调节。但是由于两个腔镜的距离无法主动调节,且 Nd:YAG 晶体与零膨胀微晶玻璃相比,热稳定性比较差,温度的变化会引起 Nd:YAG 晶体产生热膨

胀、内应力等变化,从而影响了谐振腔的腔长,导致激光器输出频率的变化。测量系统光源的波长不稳定性直接影响测量仪的测量精度,造成测量系统整体精度下降且无法从定义溯源。然而在一定范围内,微片输出波长的变化又与其温度成一定的线性关系,这就使得通过温度来控制 Nd:YAG 微片激光器出光波长的方案成为可能^[5]。

根据要求,Nd:YAG 微片激光器回馈纳米干涉测量仪的精度要达到 50 nm,量程为 50 mm,从而要求微片激光器的输出激光波长稳定,即:

$$\therefore \delta = L \times \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 50 \text{ nm}$$

$$\therefore \Delta \lambda = \lambda \frac{\delta}{L} = 1.06 \times 10^{-6} \times \frac{50 \times 10^{-9}}{50 \times 10^{-3}} (\text{m}) =$$

$$1.06 \times 10^{-12} \text{ m} = 1.06 \times 10^{-3} \text{ nm}$$

所以波长应该在上述范围内波动。而波长的不稳定主要是由温度的变化引起谐振腔光程变化造成的。半导体固体微片激光器温度变化对输出频率的影响约为 3.1 GHz/°C^[6],可以推导出温度变化对波长的影响为:

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta c} = \lambda \frac{\Delta \nu}{\nu} = \lambda^2 \times \frac{3.1 \times 10^9 \text{ Hz}}{c} =$$

$$1.06 \times 1.06 \times 10^{-12} \times \frac{3.1 \times 10^9}{3 \times 10^8} \text{ m/}^\circ\text{C} =$$

$$1.06 \times 10^{-11} \text{ m/}^\circ\text{C} = 1.06 \times 10^{-2} \text{ nm/}^\circ\text{C}$$

即 0.011 6 nm/°C。根据上面推导的设计要求:

$$\therefore \Delta \lambda = \Delta c \times \frac{\Delta \lambda}{\Delta c} \leq 1.06 \times 10^{-12} \text{ m}$$

$$\therefore \Delta c \leq 1.06 \times 10^{-12} \times \frac{\Delta c}{\Delta \lambda} = \frac{1.06 \times 10^{-12} \text{ m}}{1.06 \times 10^{-11} \text{ m/}^\circ\text{C}} = 0.091 \text{ }^\circ\text{C}$$

所以如果把激光器谐振腔的温度变动范围控制在 0.09 °C 以内,应该可以实现稳定频率的效果。

2 系统设计方案

2.1 系统整体设计方案图

系统搭建方案如图 1 所示,分为 3 部分:半导体泵浦 Nd:YAG 微片激光器、实时数字 PID 补偿监控系统、精密温度控制系统。其中,除实时数字 PID 补偿监控系统之外,各个环节的特性都已经确定,无法调节,所以只能通过这一环节来调控整个系统的特性。但

是,这些环节并不是所有都可以用数学模型描述^[7]。

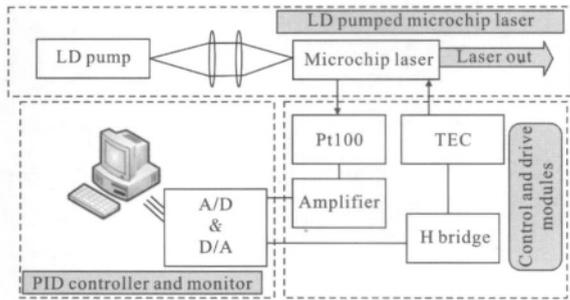


图 1 系统整体设计方案图

Fig.1 Schematic of overall system design plan

2.2 各个环节的选型、设计及实现

(1) 温度信号的获取 用于 Nd:YAG 微片的控温系统需要把温度控制在 $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 所以温度测量范围可以定在 $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内。对于温度传感器, 这个范围属于常温范围, 测温范围比较小, 所以大部分传感器可以满足要求, 但是文中系统关心的是需要保证传感器在这一温度范围内有一定的线性度和足够大的温度系数以及比较高的精度, 并且保证传感器应能尽量真实地测到 Nd:YAG 晶片的温度。系统选定陶瓷封装的 Pt100 作为测温探头, 用面积为 $1.5\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的陶瓷平面与晶片表面接触, 实现对晶体的温度测量。然后选用温度变送器获取温度信号, 其主要功效在于, 以一套成熟的装置精确测量 Pt100 的阻值, 并进行线性化处理, 以电流或电压的形式传出变送器。所传出的电信号是经过标定的与温度成严格线性关系的信号。

(2) 执行环节 制冷元件一般采用 TEC——半导体热电制冷器, 利用半导体材料的珀尔帖效应制成。TEC 包括一些 P 型和 N 型对(组), 它们通过电极连在一起, 并且夹在两个陶瓷电极之间; 当有电流从 TEC 流过时, 电流产生的热量会从 TEC 的一侧传到另一侧, 在 TEC 上产生“热”侧和“冷”侧, 这就是 TEC 的加热与制冷原理。可见, 当 TEC 工作时, 有一个制热面, 一个制冷面, 两个表面存在一定的温度差。当流过 TEC 的电流方向改变时, 制热面变成制冷面, 制冷面开始制热。利用电流的大小控制 TEC 的制冷功率和上下表面的温差。所以, 驱动 TEC 的电路应该能够提供一定的功率, 并且可以提供正负连续变化的电流输出。

(3) TEC 的驱动 MAX1978 是一种专门用于温度控制的芯片, 集成度非常高。内部集成了 50 倍的斩波放大器、PWM 脉宽调制器和 H 桥驱动电路。其功率输出端最大可提供 $5\text{ V}, \pm 3\text{ A}$ 的电压和电流来驱动 TEC 制冷片。虽然芯片采用了脉宽调制, 但是最终输出的是连续变化的模拟电流量, 与控制端输入的电压信号成线性关系^[8]。

(4) 激光器及温控系统机械结构 如图 2 所示, Nd:YAG 晶片外形尺寸为 $\Phi 5\times 1$ 。为了保证其快速散

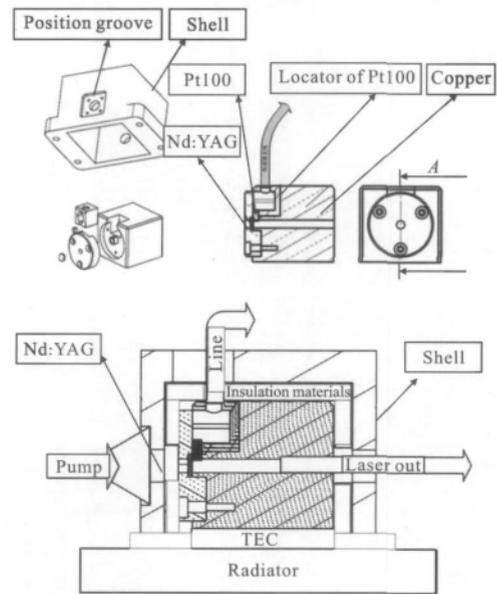


图 2 机械结构示意图

Fig.2 Diagram of mechanical structure

热, 应使其与紫铜热沉尽量多地接触, 但同时又应保证一定的通光口径。经过实验, 最终通光口径设为 $\Phi 3.5$ 。机械结构外有一个用于保温的外壳, 可以用于固定泵浦源的光纤探头。而外壳与紫铜机构之间的空隙约为 5 mm , 填充上毛毡, 保证弹性空间。在隔热的同时可以保证有足够的弹性空间可供调整泵浦光源焦点聚焦在晶片上^[9]。

(5) 数字 PID 补偿监控系统 采用基于虚拟仪器技术的数字 PID 补偿监控系统。该程序的开发平台是 labview8.2, 硬件由 NI 公司的数据采集卡 USB-6211(2 路 D/A, 8 路 A/D, 16 位, 250 kHz) 与安装有 windows 系统的计算机组成。数字 PID 补偿监控系统可从温度变送器中获取温度差信号并把控制信号输出到驱动电路控制端^[10]。程序可以通过界面设定温度值, 实时调节 PID 参数, 监控制冷/制热

电流、晶体温度^[11]。

2.3 PID 补偿网络参数整定

为了达到最终的控温目的,特别要关注的是系统的稳定性和稳态误差。为了能够能用数学方法调整系统的参数,必须对其进行数学建模。搭建的模型如图 3 所示。在这套系统中,50 倍的斩波放大器、PWM 调节与 H 桥串联可以看作是一个已知的比例环节。然而还有很多环节必须通过实验来测定。为了测量系统的开环幅频特性,首先应选择切断环路的断点^[12-13]。测得系统的开环幅频特性曲线如图 4 所示。

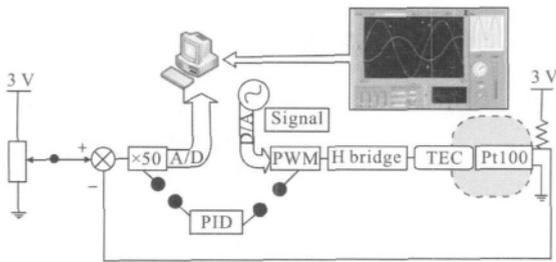


图 3 系统模型

Fig.3 Model of system

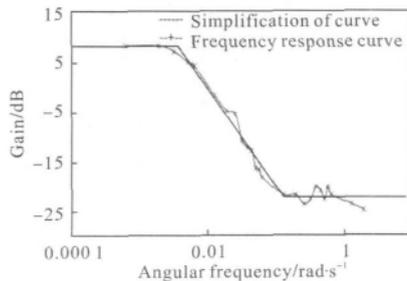


图 4 开环幅频特性曲线

Fig.4 Curves of open-loop amplitude-frequency characteristic

从简化曲线中可以看出,这段折线分为 3 段。从低频到高频斜率依次为 0 dB、20 dB、0 dB。这是一个 0 型一阶系统,从两个转角和低频增益可得到一个近似的传递函数。极点和零点分别为 0.003 5 rad/s 和 0.12 rad/s。

$$G(s) = \frac{2.66(8.33s-1)}{285.714s+1}$$

设定 PI 环节的传递函数为:

$$G_1 = \frac{14.3s+0.1}{s}$$

与原传递函数相乘得到 PI 调整后的传递函数:

$$G(s) = \frac{20 \times 2.66(8.33s+1)(286+1)}{s(285.714s+1)}$$

此时,对于阶跃函数的稳态误差可以消除,但是高频增益仍然居高不下。这会造成系统对高频扰动过于敏感,所以应降低系统对高频的响应。二阶开环最优模型是一种比较简单而行之有效的优化模型。且对于现在的系统,也非常容易改造。二阶最优模型是 1 型系统,从低频段到穿越频率都是 20 dB,高频段变为 40 dB,极点与增益的调整使系统达到最佳阻尼比 0.707。

为了实现这一最优模型,需要添加环节,首先消去系统的零点,然后再添加极点使系统高频段达到 40 dB。一阶低通滤波器能够完成这项功能,其传递函数为:

$$G = \frac{G_0 \omega_c}{s + \omega_c}$$

式中: G_0 为零频增益; ω_c 为截止角频率。

第一级低频滤波器用于消除极点,零频增益为 1,截止角频率为 0.12 rad/s,即 0.02 Hz。于是传递函数为:

$$G = \frac{0.12}{s+0.12}$$

与原传递函数串联得到:

$$G = \frac{316.9s^2+40.25s+0.266}{285.7s^2+s}$$

最后一级滤波器,从物理意义上出发,设定 1 Hz 以上的频率都为无效的干扰信号,所以截止频率设为 1 Hz,即 6.283 rad/s。则传递函数为:

$$G = \frac{6.28}{s+6.28}$$

与原传递函数串联得到:

$$G = \frac{3238.8s^2+30.34s+0.2005}{285.7s^4+1830s^3+221.7s^2+0.7536s}$$

用 sisotool 对现有模型进行分析,发现根轨迹图中所有的极点都在左半平面,说明系统稳定。为达到最佳阻尼比,调整系统增益,使得根轨迹图系统复数极点落在与负实轴成 $\pm 45^\circ$ 的夹角线上,以实现二阶系统最优模型,如图 5 所示。

通过理论分析得到了最终的传递函数:

$$G = \frac{27.5795(s+0.12)(s+0.006993)}{s(s+6.28)(s+0.12)(s+0.005)}$$

从而也得到了两个低通滤波器的设计参数和 PI 调节的两个参数。

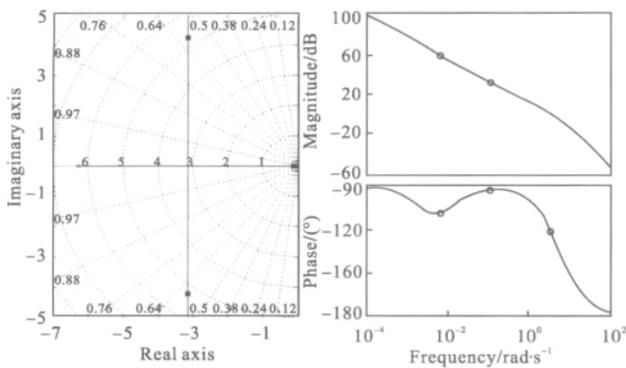


图 5 整定后系统特性曲线

Fig.5 System characteristic curves (after setting)

3 实验结果

3.1 同一室温环境,控制晶体在不同温度上的实验

在同一室温条件下($T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$),通过对温控系统的设置,将晶体温度稳定在从 $18\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内的不同工作点上。为了说明方便,分别测量了晶体温度为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的实验结果,图 6 为室温 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、实验 30 min 的晶体温度变化情况。

为了达到良好的控温效果,在下面几组数据测量前调整了系统参数,将其调整为二阶最优模型。各项参数的确定过程为:(1)第一级滤波器截止频率设为 0.02 Hz ,以抵消零点,PI 环节参数设为 $K_p=14.3$, $K_i=0.1$,以抵消极点。(2)经过开环幅频特性测试,找到 0 dB 增益点约为 0.05 Hz ,所以设第二级滤波器截止频率为 0.1 Hz 以保证最佳阻尼比。

对比其他几组数据,这组数据显示控温系统的控温效果虽然达到了设计要求,但控温效果并不相同。尽管晶片的温度波动范围都小于 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,但可以看出:当晶体温度稳定在 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时(见图 6(a))。震荡波形上下摆动并不对称,说明由于与外界环境的温度差,制热与制冷的速度不一样,系统已经不是一个线性系统。此时系统整定的 PID 参数已经不太适用。

从图 6(b)可以看出:信号在 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下摆动的对称性很好,控温效果进一步得到提升。虽然可以看出系统仍然在进行震荡,但是处于趋于稳定的态势。说明此时系统线性较好,参数也比较有效。

从图 6(c)可以看出:系统在 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 已经达到稳定,而且控温效果非常好,说明这套参数对此温度点非常适用。

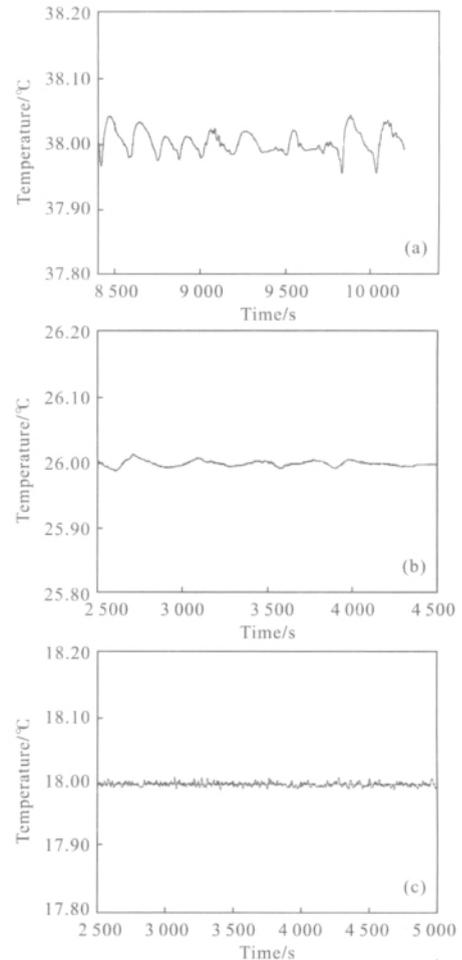


图 6 实验结果 1

Fig.6 Results 1

3.2 不同室温环境,稳定晶体在同一温度的实验

理论上,温度控制的效果主要与环境温度设定的晶体温度差有关。但为了证明系统在不同环境温度下仍能正常工作,进行了以下室温变化的实验。在 $18\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间改变室温环境,设定控温系统,使其保持控制晶体温度在 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳定不动,如图 7 所示。

从实验数据可以得出以下结论:

(1) 系统对于晶体的控温效果比较明显。系统可以在较长的时间内将晶体温度稳定在设定温度附近,且温度波动不超过 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 由于在实验中进行了随机的开关激光器的检验,无论激光器处于开机、关机状态,或在系统稳定时开关机,都不会使晶片温度波动超出 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到了设计目标 $\pm 0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 相对于室温,系统在各个温度段的控温效果不一致,最高可达 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

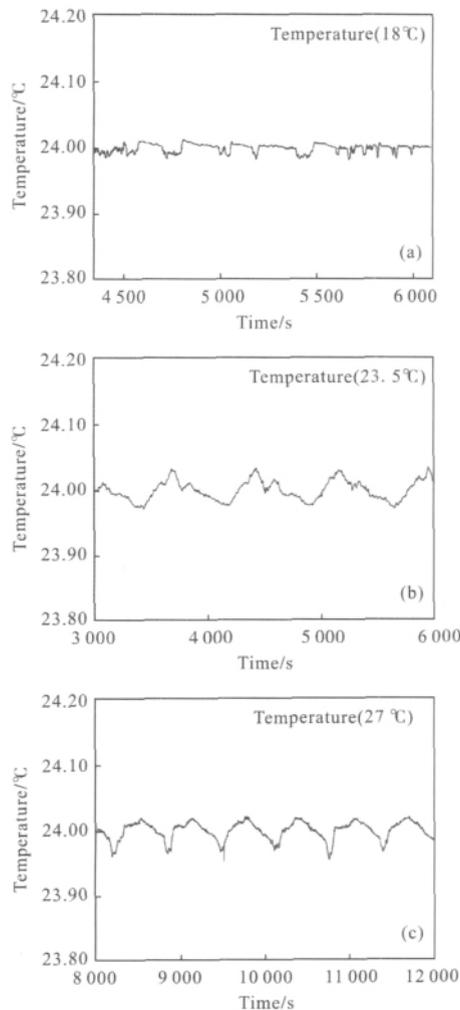


图 7 实验结果 2

Fig.7 Results 2

4 结 论

研究了如何为 Nd:YAG 微片激光器的稳频提供有效的温控方式。根据波长稳定度的指标要求,估算出了所需要的控温精度——波动范围在 $\pm 0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。依据这一设计目标,介绍了各重要环节的设计过程,以及 PID 补偿网络参数的整定过程。理论分析与实验相结合,研制了一套用于全内腔半导体泵浦 Nd:YAG 微片激光器的温控系统,并在两种条件下对系统进行了测试。(1)当室温约为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可以给微片提供 $18\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间任意温度环境,温度波动范围在 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。(2)当环境温度在 $18\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间任意改变时,系统能将晶片温度稳定在 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度波动范围在 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。证明用文中介绍的方法可以在一定范围内有效控制激光器温度。但这仅仅是阶

段性成果,至于激光频率是否能够很好地稳定在要求范围之内,需要进一步的对拍实验。

参考文献:

- [1] Ren Zhou, Tan Yidong, Wan Xinjun, et al. Microchip laser feedback interferometer with an optical path multiplier [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(11): 3995-3998.
- [2] Tetsuhiko Ikegami, Shoichi Sudo, Yoshihiso Sakai. Frequency Stabilization of Semiconductor Laser Diodes [M]. Boston: Artech House, 1995.
- [3] Koehner W. Solid-state Laser Engineering[M]. Translated by Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [4] Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, et al. Laser diode-pumped laser thermal lensing studies [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, A27(9): 777-781. (in Chinese)
- [5] Zhang Shulian. Principle of Orthogonal Polarized Laser [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [6] Zhou B, Kane T J, Dixon G J, et al. Efficient, frequency-stable laser-diode-pumped Nd:YAG laser [J]. *Opt Lett*, 1985, 10(2): 62-64.
- [7] Fan Songbo, Li Qinghui, Lin Hong. Uncooled focal plane array thermal imager temperature control design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 499-502. (in Chinese)
- [8] Yang Mingwei, Xu Wenhai, Tang Wenyan. Modeling and analysis of thermoelectric cooler by equivalent circuit method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 281-285. (in Chinese)
- [9] Zhao Hongming, Zhao Shengzhi, Chen Lei. Thermal focal length and optimal pumping position of Nd: NaY(WO₄)₂ crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 18-20, 46. (in Chinese)
- [10] Zhang Lina. LabVIEW-based temperature and humidity control system [D]. Huhehaote: Inner Mongolia University, 2006. (in Chinese)
- [11] Yin Zhenhong. PID controller stability analysis and the application of the temperature controller[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [12] Zayhowski J J, Keszenheimer J A. Frequency tuning of microchip lasers using pump-power modulation [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(4): 118-1122.
- [13] Li Ke. Temperature control system of intelligent PID control algorithm research [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)