

全固态单频绿光激光器高精度数字温度控制系统的研究

靳晓丽 苏 静* 靳丕钰 王文哲 彭堃堃

山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西太原 030006

摘要 研制开发了一种基于TMS320F28069嵌入式DSP控制模板的高精度数字温度控制系统,该系统结合变速积分PID控制算法,利用高分辨率脉宽调制(HRPWM)技术,控制热电制冷器(TEC)的驱动电流。针对热敏电阻在高温和低温时温度系数的区别,采用了不同方式的温度检测电路。该系统同时含有三路独立的常温控温模块,在10℃~40℃温控精度为 ± 0.0045 ℃,一路高温控温模块,在120℃~160℃温控精度为 ± 0.005 ℃。将该系统用于控制全固态连续单频绿光激光器,在输出功率高达11.07W时功率波动仅为 $\pm 0.33\%$ 。

关键词 激光器;单频激光器;温度控制;高分辨率脉宽调制;变速积分PID

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0902010

Study on A High-Precision Digital Temperature-Control System for All-Solid-State Single-Frequency Green Laser

Jin Xiaoli Su Jing* Jin Pixian Wang Wenzhe Peng Kunchi

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract A high-precision digital temperature-control system (HPDTCS) based on TMS320F28069 for all-solid-state single-frequency green laser is designed and built. The speed-change integral PID control algorithm and the high-resolution pulse width modulation (HRPWM) technology are utilized in this system to control the drive current of the thermoelectric cooler (TEC). Depending on the difference of the temperature efficient of the thermistor under higher and lower temperature, the different temperature detection circuits are applied. The HPDTCS consists of three lower (10℃ to 40℃) and a higher (120℃ to 160℃) temperature-control modules with precisions of ± 0.0045 ℃ and ± 0.005 ℃, respectively. Applying the HPDTCS to control an all-solid-state single-frequency green laser, the power fluctuation of $\pm 0.33\%$ is achieved at the output power of 11.07 W.

Key words lasers; single-frequency laser; temperature controller; high-resolution pulse width modulator; speed-change integral PID

OCIS codes 140.3515; 140.3570; 140.3580

1 引 言

以激光二极管(LD)为抽运源的全固态连续单频绿光激光器被广泛应用于抽运钛宝石激光器、激光光谱实验、光学精密测量、全息光学存储等领域,随着全固态单频绿光激光器应用范围的不断扩大,对其输出功率稳定性提出了更高的要求。为了获得高功率、单频以及理想光束质量的激光输出,应对全固态连续单频绿光激光器的谐振腔、Nd:YVO₄晶体、LD和倍频晶体LBO进行恒温控制,使其在最佳温度条件下运转,保证

收稿日期:2015-03-05;收到修改稿日期:2015-05-22

基金项目:国家自然科学基金(11174188,61405107)、山西省青年科技研究基金(2014021011-3)、山西省高校科技创新项目(2013104)

作者简介:靳晓丽(1984—),女,博士研究生,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: jinxiaoli@sxu.edu.cn

导师简介:彭堃堃(1936—),男,教授,主要从事激光技术及量子信息方面的研究。E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: jingsu@sxu.edu.cn

激光器的长期稳定单频运转^[1-2]。增益介质 Nd:YVO₄晶体因温度分布不均匀及热应变光弹性引起的热透镜效应及断面效应将使谐振腔的结构发生变化,进而使谐振频率发生漂移,输出功率发生变化^[2],随着增益介质 Nd:YVO₄的边界温度逐渐升高,激光器最大输出功率逐渐降低^[3];LD的运行和工作温度密切相关,温度的起伏会引起光功率的变化,影响输出波长的准确性以及功率的稳定性^[4];倍频晶体 LBO 采用 I类非临界相位匹配(NCPM)以及温度调谐,因此温度的起伏直接影响倍频效率。可以看出激光器各主要部分的工作性能都随温度变化而变化,因此温度控制系统的控制能力以及控温精度是影响全固态连续单频绿光激光器输出稳定性的重要因素。

目前激光器温控系统的研究热点主要集中在常温部分(10℃~45℃),控温精度也普遍不高^[4-5],而对于倍频晶体 LBO 所需的高温温控部分(大于 150℃)的研究相对较少,2006年,一项关于高温温度控制仪的专利的控温精度为±0.025℃^[6]。为了提高温度控制系统的控温精度,尤其是高温部分的控温精度,从而提高全固态连续单频绿光激光器的输出功率稳定性,设计了一种基于 TMS320F28069 嵌入式 DSP 控制模板、利用高分辨率脉宽调制(HRPWM)技术的全固态连续单频绿光激光器数字温度控制系统,该系统同时含有三路独立的常温控温模块,采用恒流源电路作为温度检测电路,在 10℃~40℃温控精度为±0.0045℃;一路高温控温模块,采用恒压源电路作为温度检测电路,在 120℃~160℃温控精度为±0.005℃,能够为全固态连续单频绿光激光器提供稳定的温度环境。

2 温度控制对全固态单频绿光激光器的影响

由于增益介质 Nd:YVO₄晶体对抽运光的吸收过程伴随着热量的产生。尤其在端面抽运激光器中,由于晶体内以及晶体端面处抽运光功率密度较大,从而沿着晶体轴向形成较大的温度分布梯度,出现热致应力变化、热致折射率变化、热膨胀和弹光效应等现象^[7],这些现象均会导致晶体出现热透镜效应。

由热传导率与温度的关系式^[8]

$$K(T) = K_0 \frac{T_0}{T}, \quad (1)$$

式中 K_0 为温度 T_0 时的热传导率,可以看出,晶体的温度变化直接影响热传导率,从而导致热透镜焦距值发生变化,影响激光器的输出特性。因此要想得到高功率稳定的激光输出,则需设计高精度的温度控制系统,尽量减少激光晶体的温度变化对激光器系统稳定性的影响。同时,采用晶体材料作为增益介质的全固态高功率激光器,在高功率抽运的条件下,激光晶体在产生激光的过程中,伴随着量子亏损、弛豫振荡、激发态的吸收、能量传输上转换等物理过程,导致激活粒子在激光能级与其他能级之间通过无辐射跃迁产生大量的热。这会形成严重的热透镜效应,导致激光器工作稳区变窄,从而限制了激光器输出功率、稳定性和光束质量的提高。因此本文的晶体控温系统不仅要有较高的控温精度而且要有较强的控温能力,使激光晶体产生的热量被迅速带走不会积攒,为此通过采用脉宽调制技术,利用双路全桥驱动器 DRV8432,设计了一种能够为热电制冷器(TEC)提供最大 14 A 电流的控制电路。

在本文的全固态单频绿光激光系统中,为了克服高功率下倍频晶体的走离效应对倍频效率的影响从而提高绿光的输出功率,选取了 I类非临界相位匹配 LBO 晶体作为全固态绿光激光系统中的倍频晶体。根据 Kato 修改后的 sellemier 方程^[9]和 I类非临界相位匹配条件,得出 LBO 晶体的倍频效率^[10]

$$\eta \propto \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right), \quad (2)$$

式中 $\Delta k = \frac{4\pi}{\lambda}[n_2(2\omega, T) - n_1(\omega, T)]$ 为失谐量, l 为晶体的长度, $n_1(\omega, T)$ 和 $n_2(2\omega, T)$ 分别为慢光和快光的折射率。根据以上公式,得到其倍频效率和温度的关系如图 1 实线所示,与实验中所测得的绿光输出功率随 LBO 晶体温度的变化曲线(如图 1 点线所示)在 150℃~154℃基本一致。从图中可以看出,当 LBO 晶体的温度为 152.82℃时,在 1064 nm 波段处的倍频效率最高,绿光的输出功率达到最大值,并且,随着 LBO 晶体实际温度与最佳匹配温度的偏离量的增加,其倍频效率呈指数降低。因此设计一个能够将 LBO 晶体升温至 152.82℃,并且保证 LBO 晶体的温度在 8 h 的控温精度尽量高的高温控温模块,从而保证激光器的输出功率和稳定性是必要的。

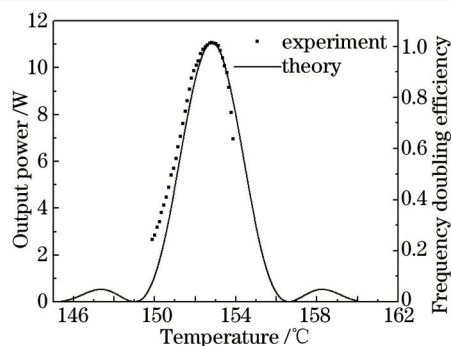


图1 实线是LBO晶体倍频效率和温度的理论曲线,点线是实验上绿光输出功率随温度的变化曲线

Fig.1 Solid line is the theoretical curve of the LBO frequency doubling efficiency and temperature, dotted line is the experimental curve of output power and temperature

3 全固态单频绿光激光器数字温度控制系统的设计

全固态连续单频绿光激光器数字温度控制系统由三路常温温控模块(LD、谐振腔和增益介质 Nd:YVO₄)和一路高温温控模块(LBO晶体)组成。各路温控模块的结构框图如图2所示。

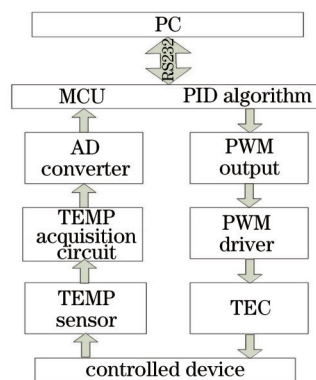


图2 各路温控模块结构框图

Fig.2 Structure diagram of temperature control module

首先,由温度传感器从被控对象处测得的实际温度值通过温度检测电路转换为电压信号,并经模数转换芯片(AD)转换成数字信号后送入微控制器(MCU);然后,由PC机设定好目标温度以及相应的PID参数通过串口发送到微控制器,在微控制器内基于变速积分PID算法进行数据处理,输出具有一定占空比的PWM信号。再用PWM信号驱动双路全桥脉宽调制驱动器,产生驱动电流控制热电制冷器TEC的电流大小及方向,从而达到对被控对象的加热及制冷。

由于全固态单频绿光激光器各部分的控温精度直接影响激光器的输出稳定性,因此在选取温度控制系统中各主要硬件及对其进行电路设计时,首要考虑的应是如何提高温度控制系统在常温和高温部分的控制能力以及控温精度。

3.1 微控制器

在脉宽调制技术中,PWM的操作频率越高,对于后序PWM功率放大器驱动热电致冷器的驱动电流纹波干扰也越小,从而提高温度控制的精度。同时,PWM的分辨率也是提高控温精度的一个重要参数,分辨率越高,为TEC提供驱动电流越精确。从下文(3)式^[11]和(4)式^[11]可以看出,在系统频率一定的情况下,PWM的操作频率随着时基周期寄存器时基周期(TBPRD, T_B)的增加而减小,而PWM分辨率则随时基周期的增加而增加。因此不能简单的通过调节时基周期的参数来达到既提高PWM的操作频率又提高PWM的分辨率的目的。

$$F_{PWM} = F_{SYSCLK} / T_B, \quad (3)$$

$$R_{PWM} = \log_2(F_{SYSCLK} / F_{PWM}), \quad (4)$$

式中 F_{PWM} 为 PWM 的操作频率, F_{SYSCLK} 为系统频率, T_B 为时基周期, R_{PWM} 为 PWM 的分辨率。

基于以上分析选取了一种带有微边沿定位器(MEP)^[12]的芯片作为数字温度控制系统的中央微控制器(MCU)。TI公司近期推出的系统频率为80 MHz的TMS320F28069芯片^[11]可支持8个高分辨率脉宽调制(HRPWM)。它内含微边沿定位器(MEP),可大大提高PWM的分辨率,MEP的逻辑是将一个边沿的时钟周期非常精细地按照MEP的步长分为 N 份。普通PWM和HRPWM的区别如图3所示,在系统中设置时基周期寄存器的周期 $T_b=200$,对于普通PWM,放入比较寄存器(CMPA)中的比较值只能是 $0\sim T_b$ 之间的一个整数,即占空比(PWM duty)乘以 T_b 的整数。而对于HRPWM,可以是 $0\sim T_b$ 之间的一个浮点数,除了将比较值的整数部分放入比较寄存器(CMPA)中,还需将比较值的小数部分乘以MEP比例因子(MEP Scale Factor)的形式放入到CMPAHR寄存器^[11]中。对于TMS320F28069的MEP步长典型值为150 ps,即将一个时钟周期分为83.33份,通过(4)式计算得到普通PWM的分辨率为7.64位,而HRPWM的分辨率为14.02位。

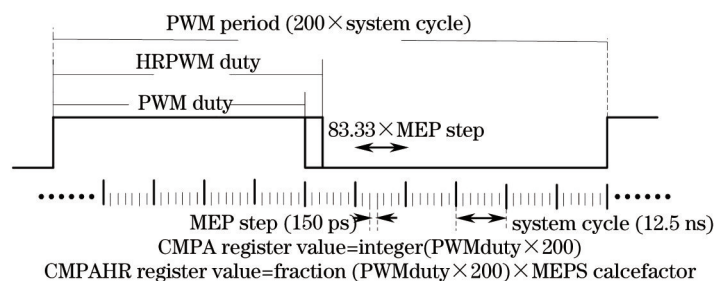


图3 PWM和HRPWM区别

Fig.3 Distinction of PWM and HRPWM

3.2 温度检测电路

由于温度控制系统分为常温和高温两部分,而热敏电阻在常温段和高温段的阻值灵敏度不尽相同,为了尽量提高温度检测的灵敏度,分别采用了阻值为10 k Ω (25 $^{\circ}$ C)的负温度系数(NTC)热敏电阻和阻值为100 k Ω (25 $^{\circ}$ C)的负温度系数(NTC)热敏电阻作为常温和高温部分的温度传感器。

常温控制部分的温度检测电路采用恒流源电路,如图4(a)所示,该电路可以为NTC热敏电阻提供恒定的100 μ A参考电流。通过测量热敏电阻两端电压,就可得到当前热敏电阻阻值,进而根据热敏电阻出厂时所附温度-阻值对应表确定当前温度值。但是由于倍频晶体LBO工作温度在150 $^{\circ}$ C左右,从图5的点线可以看出当工作温度越高时,热敏电阻的阻值变化率越小,因此温度灵敏度也越低。为了弥补热敏电阻在高温时温度灵敏度低的缺点本文设计了恒压源电路作为温度检测电路如图4(b)所示,即基准电压通过热敏电阻与一标准电阻(2 k Ω)串联分压的方式,通过测量热敏电阻两端电压 V_1 ,可知热敏电阻阻值: $R_1 = (2 \times V_1) / (2.048 - V_1)$,其中2.048 V为MAX6162提供的基准电压。图5对比了两种温度检测电路在高温时的灵敏度,从图中可以看出,当LBO温度从常温升至65 $^{\circ}$ C时,若使用100 μ A恒流源时热敏电阻两端电压高于模数转换芯片ADS1248内部自带参考电压2.048 V,使其不能正常工作甚至损坏,当LBO工作温度高于140 $^{\circ}$ C时,热敏电阻的温度灵敏度非常差,恒压源方式使高温时温度灵敏度差的状态大大改善。

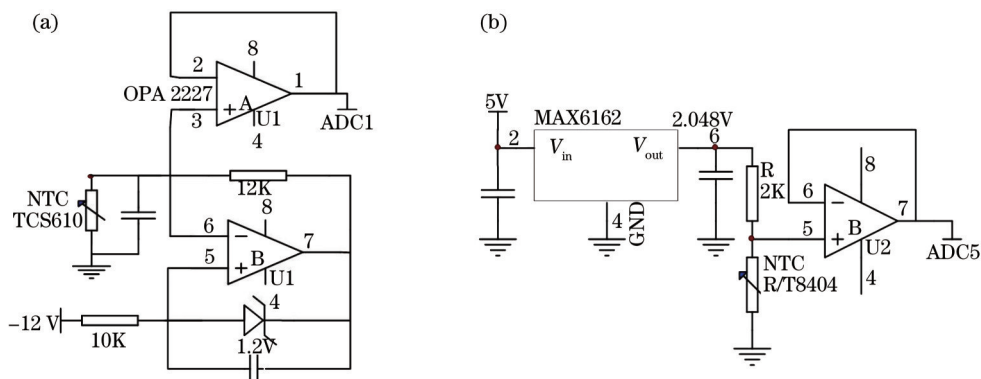


图4 (a) 100 μ A恒流源电路; (b) 恒压源电路

Fig.4 (a) 100 μ A constant current source circuit; (b) constant voltage source circuit

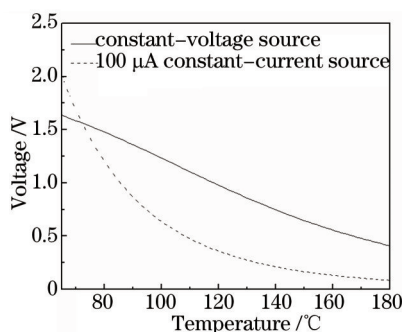


图5 100 μA恒流源电路和恒压源电路在高温时热敏电阻灵敏度比较

Fig.5 Comparison of thermistor sensitivity of 100 μA constant current source circuit and constant voltage source circuit under high temperature

3.3 PWM功率驱动电路

本系统采用数字式PWM功率放大器驱动半导体TEC,与其他类型功率放大器比较,具有可靠性高、热功耗小及电源效率高等优点,选用双路全桥PWM驱动器DRV8432作为PWM功率放大器,内部集成有8个MOSFET,导通电阻仅为110 mΩ,DRV8432功耗低,效率高达97%,允许PWM操作频率高达500 KHz,内部集成了自我保护功能,支持短路保护、过压保护、过温保护,可以提供双路全桥工作模式和并联全桥工作模式,双路全桥模式能够提供独立两路高达7 A的连续电流,并联全桥可提供一路14 A的连续电流,从而增强控温能力,通过调整驱动器输入PWM信号的占空比,可以调节其输出电流的大小。

3.4 变速积分PID算法

PID控制是基于反馈的控制方法。系统通过传感器测量被控变量的值,将测量值与设定值进行比较得出偏差函数,按照偏差函数的比例、积分和微分进行控制。数字式PID的误差项,积分项,微分项以及PID输出项表达式分别为,

$$\begin{aligned}
 R_{error} &= g_{SetValules}[n] - g_{CurrentVals}[n], \\
 g_{Integrations}[n] &= g_{Integrations}[n] + R_{error} \cdot dt, \\
 d_{Derivative} &= (R_{error} - g_{PreErrors}[n])/dt, \\
 P_{output} &= K_p[n] \cdot R_{error} + K_i[n] \cdot g_{Integrations}[n] + K_d[n] \cdot d_{derivative},
 \end{aligned} \tag{5}$$

式中 $g_{SetValules}[n]$ 为多路温控的第 n 路的目标温度值, $g_{CurrentVals}[n]$ 为第 n 路的实测温度值, $g_{PreErrors}[n]$ 为第 n 路之前一次误差值, dt 为采样周期, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分常数。

在普通的PID算法中,积分常数 K_i 为常数。但在实际的PID控制系统中,系统对积分的要求是偏差大时,积分作用应减弱甚至全无,否则会产生超调,甚至出现积分饱和现象;而在偏差小时积分作用应加强。因此引进变速积分PID控制算法从而避免积分饱和现象出现。为此引入一个与偏差量 R_{error} 有关的函数 $f[R_{error}]$,当 R_{error} 增大时, $f[R_{error}]$ 减小;反之则增大,表达式如下:

$$f[R_{error}] = \begin{cases} 1, & |R_{error}| \leq B \\ \frac{A - |R_{error}| + B}{A}, & B < |R_{error}| < A + B, \\ 0, & |R_{error}| \geq A + B \end{cases} \tag{6}$$

从而将表达(5)式的积分项改为

$$g_{Integrations}[n] = g_{Integrations}[n] + f[R_{error}] \cdot R_{error} \cdot dt. \tag{7}$$

4 实验结果分析

图6所示为全固态连续单频Nd:YVO₄/LBO激光器^[13-14]的装置图。LD输出的抽运光经过焦距分别为30 mm和80 mm的平凸透镜组成的望远系统进行整形后输入激光器中,该激光器采用“8”字形谐振腔结构,由两面平面镜M₁(S₁:AR808 nm;S₂:HT808 nm,HR1064 nm)、M₂(S₁:HR1064 nm)和两面曲率半径为100 mm

的平凹镜 M_3 (凹面 S_1 : HR1064 nm)、 M_4 (凹面 S_1 : HT532 nm, HR1064 nm; 平面 S_2 : AR532/1064 nm)组成,增益介质采用 a 轴切割的 Nd:YVO₄复合晶体(S_1, S_2 : AR808/1064 nm),掺杂原子数分数为 0.3%,尺寸为 3 mm×3 mm×(5+15) mm。腔内插入了光学单向器(由 $\lambda/2$ 波片和放置于永磁铁中的 TGG 旋光晶体组成),迫使基频光在腔内单向运转,获得稳定的单频激光输出,倍频晶体选取了 I 类非临界相位匹配 LBO 晶体。其中将增益介质与倍频晶体置于被控温炉子中,同时,考虑到激光器的稳定性以及可实用化,所有光学元件全部集成在经过退火处理的整体腔中。

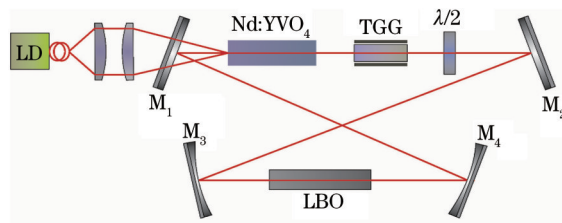


图 6 全固态单频绿光激光器实验装置

Fig.6 Experimental setup of all-solid-state single-frequency green laser

实验中首先采用的是普通脉宽调制控制程序, PWM 频率为 400 kHz,分辨率为 7.64 位的 PWM 信号驱动双路全桥驱动器 DRV8432,并采用 100 μ A 恒流源电路作为温度检测电路,得到的温度控制系统中常温部分的控制精度为 ± 0.02 $^{\circ}$ C,高温部分的控制精度为 ± 0.08 $^{\circ}$ C,如图 7(a)和(b)的上半部分所示。将该控制系统应用在图 6 所示的全固态单频绿光激光器中,得到的绿光输出稳定度为 $\pm 1.9\%$,可以看出无论是控温精度还是最终激光器的功率稳定性都达不到预定的要求。因此加入了高分辨率 PWM 控制程序,使微处理器输出 HRPWM 信号,这时 PWM 频率同样为 400 kHz, PWM 的分辨率提高到 14.02 位,同时将高温控制部分(LBO 晶体)的温度检测电路改为恒压源方式,从而提高温度检测电路的灵敏度。图 7(a)和(b)下半部分即为改进后的常温和高温部分的控温波动图,可以看到,控温精度分别为 ± 0.0045 $^{\circ}$ C 和 ± 0.005 $^{\circ}$ C。将这一控温系统应用到全固态单频绿光激光系统中,绿光的输出功率稳定性如图 7(c)所示,仅为 $\pm 0.33\%$ 。

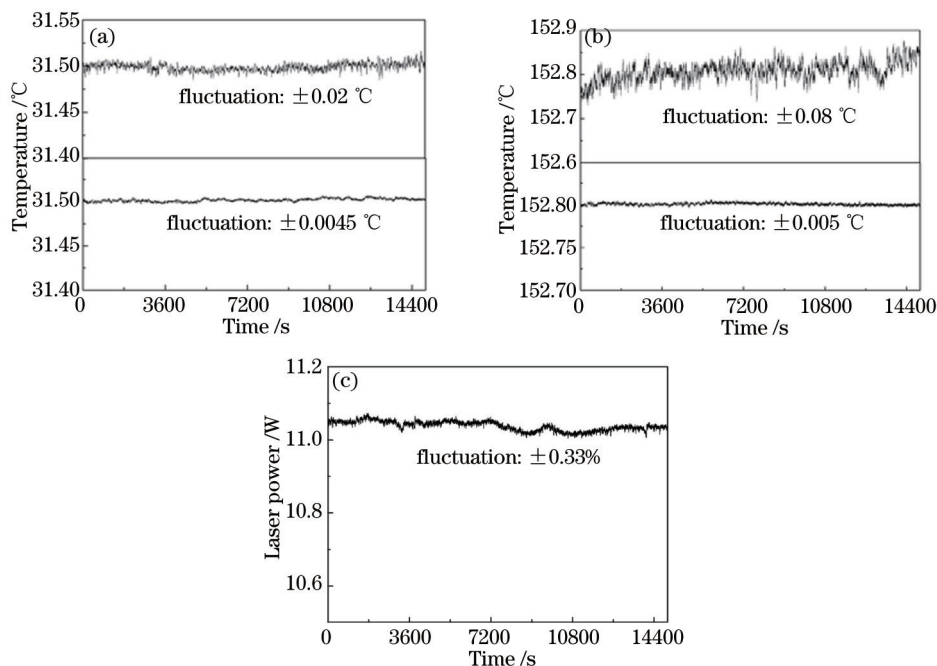


图 7 (a) 分别采用 PWM 和 HRPWM 技术, Nd:YVO₄ 4 h 温度监测比较图; (b) 分别采用 PWM 技术、利用恒流源作为温度检测电路与采用 HRPWM 技术、利用恒压源作为温度检测电路, LBO 4 h 温度监测比较图; (c) 4 h 激光器输出功率监测图

Fig.7 (a) Nd:YVO₄ temperature fluctuation (4 h) comparison diagram of using PWM and HRPWM technology; (b) LBO temperature fluctuation (4 h) comparison diagram, the upper half part is using PWM technology and utilizing constant current source as the temperature detection circuit, the lower half part is using HRPWM technology and utilizing constant voltage source as the temperature detection circuit; (c) the fluctuation diagram of laser output power (4 h)

5 结 论

针对温度控制对全固态单频绿光激光器输出特性的影响,以及传统全固态单频绿光激光器模拟温度控制系统体积大、噪音大且精度有限等缺点,研制开发了高精度数字温度控制系统。结合变速积分PID控制算法,利用分辨率达14位的HRPWM技术,对系统中的常温温度控制和高温温度控制分别采用恒流源和恒压源方式作为温度检测电路,提高了温度控制系统的控温精度,同时,通过采用并联双路全桥驱动器,可为TEC提供最大14 A的电流,提高了温度控制系统的控制能力。最终解决了激光器控温精度差、功率稳定性差的问题,实现了小体积、低噪音和低功耗。

参 考 文 献

- 1 Shen Yuan, Deng Qilin. Optimization research of temperature controlling performance for green LD end-pumped solid-state laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0902004.
沈 渊, 邓琦林. 端面抽运绿色固体激光器控温性能优化的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902004.
- 2 Zheng Yaohui, Li Fengqin, Zhang Kuanshou, *et al.*. Progress of all-solid-state single-frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1635-1642.
郑耀辉, 李凤琴, 张宽收, 等. 全固态单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1635-1642.
- 3 Wang Y J, Yang W H, Zhou H J, *et al.*. Temperature dependence of the fractional thermal load of Nd:YVO₄ at 1064 nm lasing and its influence on laser performance[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 18068-18078.
- 4 Zhang Shaofei, Guo Qiang, Wang Huijuan, *et al.*. Design of temperature control system of diode laser based on ARM[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 995-998.
张少飞, 郭 强, 王会娟, 等. 基于ARM的半导体激光精确控温系统的研制[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 995-998.
- 5 Zhou Yu, Ding Yongkui, Ni Wenjun, *et al.*. High accuracy temperature controller for laser diodes[J]. Chinese J Quantum Electronics, 2003, 20(4): 431-434.
周 瑜, 丁永奎, 倪文俊, 等. 半导体激光器的高精度温控仪[J]. 量子电子学报, 2003, 20(4): 431-434.
- 6 郑耀辉, 卢华东, 彭堃焯, 等. 一种用于控制非线性晶体温度的高温温度控制仪: 中国, CN2006100112830[P]. 2008-01-23.
- 7 Koehler W. Solid-State Laser Engineering[M]. America: Springer Press, 2006: 423-486.
- 8 Hardman P J, Clarkson W A, Friel G J, *et al.*. Energy-transfer upconversion and thermal lensing in high-power end-pumped Nd:YLF laser crystals[J]. IEEE J Quantum Electron, 1999, 35(4): 647-655.
- 9 Kato K. Temperature-tuned 90° phase-matching properties of LiB₃O₅[J]. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(12): 2950-2952.
- 10 He Jingliang, Wang Jianming, Hou Wei, *et al.*. LD pumped Nd:YVO₄/LBO intracavity frequency doubling over 1 W-green output laser[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(7): 862-865.
何京良, 王建明, 侯 玮, 等. 激光二极管泵浦Nd:YVO₄/LBO腔内倍频瓦级连续波绿光激光器[J]. 光学学报, 1998, 18(7): 862-865.
- 11 Instruments T. TMS320x2806x piccolo technical reference manual[J]. Preliminary Texas Instrument, 2011, 4: 367-398.
- 12 Cao Shenghua, Jin Long. Control based on high-precision PWM technology for ultrasonic motor[J]. Drive and Control, 2012, 40(11): 46-49.
曹胜华, 金 龙. 基于高精度PWM技术的超声波电动机控制[J]. 驱动与控制, 2012, 40(11): 46-49.
- 13 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng kunchi. Single-end pumping, single-frequency Nd:YVO₄/LBO laser with output power of 21.5 W [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602011.
郑耀辉, 王雅君, 彭堃焯. 输出功率为21.5 W的单端抽运Nd:YVO₄/LBO单频激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602011.
- 14 Yang Wenhai, Wang Yajun, Li Zhixiu, *et al.*. Compact and low-noise intracavity frequency-doubled single-frequency Nd:YAP/KTP laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502002.
杨文海, 王雅君, 李志秀, 等. 小型化、低噪声内腔倍频Nd:YAP/KTP单频激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502002.

栏目编辑: 张浩佳