

## 980 nm 半导体激光器温度控制方案设计

刘静<sup>1</sup>, 张丽<sup>1,2\*</sup>, 邓霄<sup>1,2</sup>, 赵明哲<sup>1</sup>, 胡冰冰<sup>1</sup>, 杜超<sup>1,2</sup>, 崔丽琴<sup>1,2</sup><sup>1</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;<sup>2</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

**摘要** 980 nm 半导体激光器作为掺铒光纤放大器的最佳泵浦源,其温度会影响激光器功率稳定性和放大器输出光谱漂移。提出将现场可编程门阵列(FPGA)作为核心控制元件,以半导体制冷器为执行元件、热敏电阻为温度传感器,利用 FPGA 自动切换内部状态机、控制流入半导体制冷器电流的方向和大小,实现 980 nm 半导体激光器内部的温度控制,并通过搭建基于 FPGA 的掺铒光纤放大器系统实验装置,验证所提方法的可行性。实验结果表明:所提出的温度控制方法能有效地实现 980 nm 半导体激光器的温度控制,使其功率-电流曲线的线性拟合度提高了 23.07%,掺铒光纤放大器的输出光谱波长偏移减小了 62.5%,保证了激光器输出功率及放大器输出波长的稳定性。该方法的结构简单且实时性高,对推进半导体激光器温度控制的发展及应用具有非常重要的意义。

**关键词** 激光器; 980 nm 半导体激光器; 温度控制; 现场可编程门阵列; 状态转换机

**中图分类号** TN29; TH811

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221687

## 1 引言

980 nm 半导体激光器作为光纤通信的重要光电子器件,具有波长范围宽、易调制及效率高等优点<sup>[1]</sup>,并能将基态铒离子激发到亚稳态,为受激辐射创造条件<sup>[2]</sup>,是掺铒光纤放大器(EDFA)的最佳泵浦源<sup>[3]</sup>。但温度作为影响 980 nm 半导体激光器功率稳定性以及光谱漂移的重要因素<sup>[4]</sup>,会影响掺铒光纤放大器输出波长的稳定性。因此,实现 980 nm 半导体激光器温度控制对提高 EDFA 输出性能和保护激光器有着十分重要的意义。

现已有多种半导体激光器的温度控制方法被提出。张安迪等<sup>[5]</sup>以单片机为控制器,采用比例积分-微分(PID)算法实现半导体激光器的恒流驱动与温度控制;Cong<sup>[6]</sup>结合 STM32H743 控制器与模糊 PID 控制算法设计出具有鲁棒性好及成本较低的温度控制器,并引入电容触摸屏,实现了实验数据的可视化和人机交互的直观性;缪存孝等<sup>[7]</sup>利用 STM32 通过模糊自适应 PID 控制算法进行半导体激光器的高精度温度控制;续文敏等<sup>[8]</sup>采用基于模糊自适应 PID 算法以及 H 桥驱动电路设计的温度控制器,实现对混沌半导体激光器温度的稳定控制;但是此 PID 控制方法存在控制器数据处理能力弱的问题。Oo 等<sup>[9]</sup>提出通过模糊逻

辑调节半导体激光器温度的方法,并证明该控制方法的性能优于 PID 控制方式;Zhai 等<sup>[10]</sup>提出基于遗传优化算法的半导体激光器温度控制系统,通过仿真优化及调整 PID 参数,验证该温度控制系统的性能;Li 等<sup>[11]</sup>提出利用平均冲击值量子粒子群优化智能算法优化激光温控系统的热等效电路模型参数,提高了整定效率并改善了温度控制效果。上述优化算法提高了控制半导体激光器温度的能力,但控制程序更加繁杂。因此,硬件控制方式被提出以实现半导体激光器的温度控制。Hang<sup>[12]</sup>采用硬件比例-积分温控电路结合恒流驱动控制半导体制冷机的工作电流,实现对激光器工作温度的精确控制;吕宗璟等<sup>[13]</sup>采用以 MAX1978 芯片为核心的硬件温度控制电路来保证激光器的稳定性;Zhen<sup>[14]</sup>利用 ADN8831 芯片结合经典 PID 算法为半导体激光器提供恒温控制。硬件控制温度的方法具有稳定性高及成本低的优点,但温度设置不够灵活。Vetrovec 等<sup>[15]</sup>采用液态金属在微型密封流动回路内高速流动的对流换热特性实现对高功率激光二极管温度的精确控制;陈昊等<sup>[16]</sup>采用风冷和水冷方式辅助半导体激光器实现恒温控制;Xie 等<sup>[17]</sup>提出采用非冷却热解决方案代替半导体制冷器来冷却和维持激光二极管的温度;何启欣等<sup>[18]</sup>提出基于多通道半导体激光器的温度控制系统,实现对多个半导体激光器温度的控制。

收稿日期: 2022-09-07; 修回日期: 2022-10-21; 录用日期: 2022-10-31; 网络首发日期: 2022-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(52009088, 51641904)、山西省青年科技研究基金(201901D211073, 201901D211111)、中国博士后科学基金(2019M661063)、山西省高等学校科技创新项目(2019L0198)

通信作者: \*zhangli06@tyut.edu.cn

此类方法存在控制器的运算速度慢、硬件电路控制过程繁琐的缺点。因此,探究简捷有效及稳定的温度实时控制方法对推进半导体激光器的应用具有重要的实践意义。

现场可编程门阵列(FPGA)利用可编程的通用逻辑器件去搭建各种具有一定功能的逻辑电路的器件<sup>[19]</sup>,具有处理速度快、灵活性高、功耗低等优点,在重复执行的数据传输和处理操作方面具有更大优势。因此,本文通过研究 980 nm 半导体激光器的性能,提出利用 FPGA 作为主控制器实时切换内部状态机的方式实现对 980 nm 半导体激光器的温度进行自动控制的方法,以稳定激光器的输出功率,并将其应用于掺铒光纤放大器系统,通过研究光纤放大器的输出波长特性,证明该方法的可行性。

NTCR: negative temperature coefficient resistance;

FPGA: field programmable gate array;

DFB: distributed feedback laser;

TEC: thermoelectric cooler

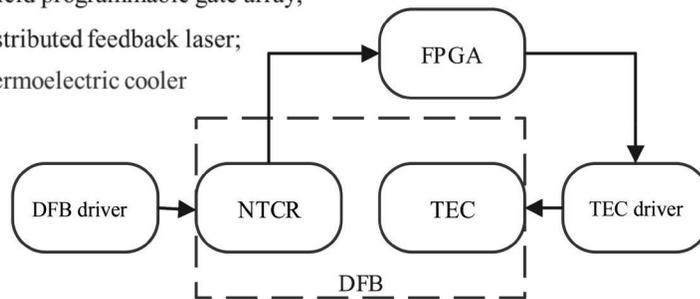


图 1 基于 FPGA 的 980 nm 半导体激光器温度控制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature control of 980 nm semiconductor laser based on FPGA

## 2.1 温度测量原理

温度采集是利用 980 nm 半导体激光器内部封装的热敏电阻<sup>[20]</sup>进行的,热敏电阻阻值随温度的升高呈指数降低,其非线性关系<sup>[21]</sup>如下:

$$R_1 = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right], \quad (1)$$

式中:  $T_1$  和  $T_2$  是开尔文温度;  $R_1$  是热敏电阻在温度为  $T_1$  的阻值;  $R_0$  是热敏电阻在温度为  $T_2$  (常温 25 °C) 时的标称阻值;  $B$  是热敏电阻的材料常数。热敏电阻阻值与温度值为对应关系。因此,通过测量热敏电阻两端的电压值可获得 980 nm 半导体激光器的内部温度值。

热敏电阻测量方法采用结构简单、灵敏度较高的恒流源测电阻法,与 kΩ 级热敏电阻相比,引线电阻的阻值很小,可忽略不计,但同样由于热敏电阻的阻值较大,向热敏电阻通入的电流必须非常小,否则,长时间工作的热敏电阻产生的热量也会影响半导体激光器内部温度。

本文采用的 ADC 芯片型号为 ADC128S022,该芯片为德州仪器公司所生产的逐次逼近型的低功耗数模转换芯片,共有 8 个模拟输入通道,采样精度为 12 bit,时钟频率为 1~3.2 MHz。其电路图如图 2 所示。图

## 2 基本原理

基于 FPGA 的 980 nm 半导体激光器温度控制方法示意图如图 1 所示,由 FPGA 控制器、980 nm 半导体激光器、激光器驱动电路及半导体制冷器(TEC)驱动电路组成。980 nm 半导体激光器为 14 引脚的蝶形泵浦激光器,内部封装了负温度系数(NTCR)的热敏电阻和半导体制冷器。该系统的工作原理为:将热敏电阻测得的激光器温度转换为电压值,通过模/数(A/D)转换模块将其输入主控制器 FPGA,采用输出占空比合适的脉冲宽度调制(PWM)信号和电压信号,驱动 TEC 工作。当激光器温度高于设定温度时,利用 TEC 制冷;当激光器温度低于设定温度时,利用 TEC 加热。

中 C90 表示电容的编号, R44 表示电阻的编号, 22R 表示电阻值为 22 Ω,其他类似的形式含义同理。

ADC128S022 数模转换芯片的模拟输入电压范围为 0~3.3 V,而热敏电阻两端的电压值在 1 V 左右,所以采用图 3 所示的同相电压放大电路对热敏电阻两端电压进行放大,以满足数模转换芯片的输入电压。根据“虚短”“虚断”原理可推得输出电压  $U_0$  与输入电压  $U_1$  满足:

$$U_0 = \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) U_1, \quad (2)$$

$R_1$  和  $R_2$  在图 3 中标注。

## 2.2 温度控制原理

温度控制的执行元件为激光器内部封装的 TEC,TEC 是利用半导体的热电效应制取冷量的器件,其工作原理为帕尔贴效应,根据载流子在不同材料中的逸出功不同,当电流从不同方向通过并焊接两种金属的接头时,会分别产生吸热和放热现象<sup>[22]</sup>。

半导体制冷原理如图 4 所示,将 P 型半导体和 N 型半导体连接形成 PN 结,当向 PN 结通正向电流时:P 型半导体的 a 端和 N 型半导体的 b 端会吸收能量,导致环境温度降低;P 型半导体的 d 端和 N 型半导体的 c 端则会释放能量,使环境温度升高。当向 PN 结通入反

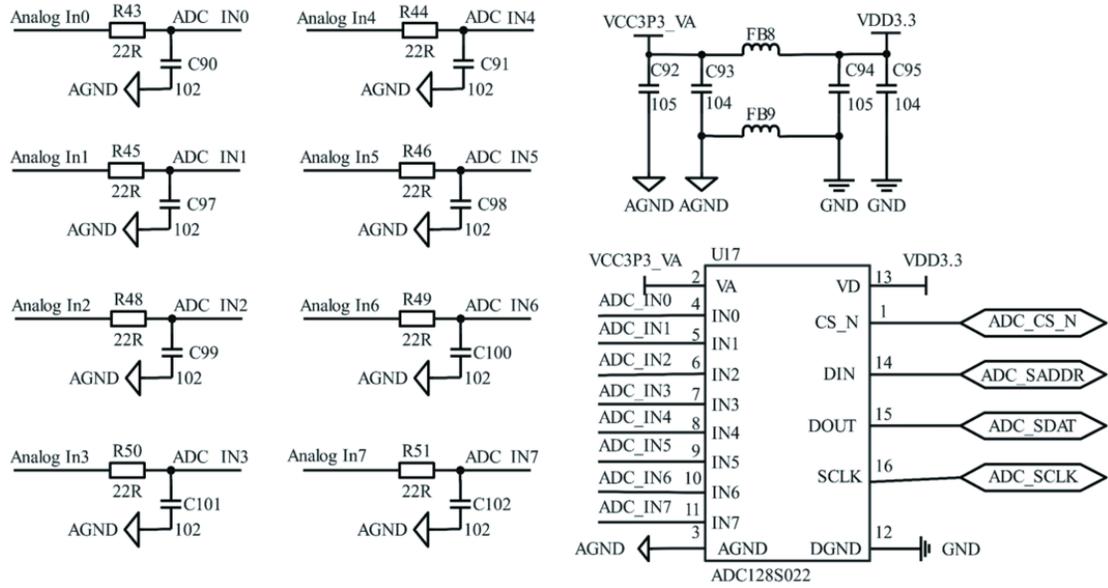


图 2 ADC128S022 接口电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of interface circuit of ADC128S022

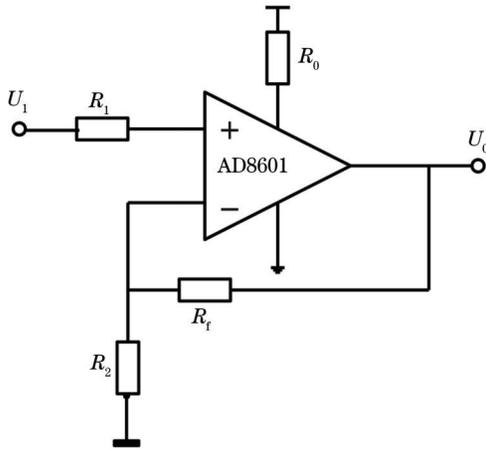


图 3 输入电压放大电路

Fig. 3 Amplification circuit of input voltage

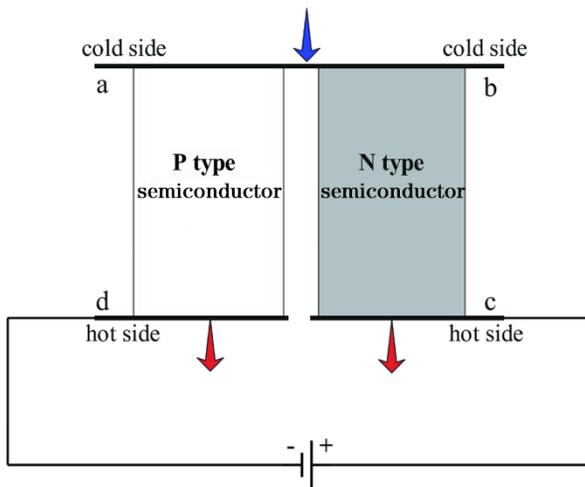


图 4 半导体制冷原理

Fig. 4 Principle of semiconductor refrigeration

向电流时,上述过程相反。吸收和放出的热量大小  $Q_1$ 、 $Q_2$ <sup>[22]</sup> 分别为

$$Q_1 = \pi I - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_c - T_h), \quad (3)$$

$$Q_2 = \pi I + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_c - T_h), \quad (4)$$

式中:  $\pi$  为帕尔贴系数;  $I$  为流入半导体制冷器的电流大小;  $R$  为半导体制冷器的电阻值;  $K$  为半导体制冷器的导热率;  $T_h$  和  $T_c$  分别为半导体制冷器热端和冷端的温度值。式(3)、(4)表明输入半导体制冷器的电流值不同,吸收和放出的热量也不同。因此,可通过脉冲宽度调制的方式改变输入半导体制冷器的电流大小,实现激光器的温度控制。

### 3 温度控制方案设计

980 nm 半导体激光器温度控制方案是依托于 Quartus II 平台通过 Verilog HDL 硬件描述语言实现,其工作流程如图 5 所示,该控制过程主要分为定时触发模块、ADC 驱动模块、FIFO 缓存模块、状态机(FSM)转换模块、DAC 驱动模块和 PWM 模块。定时触发模块的作用是为 ADC 驱动模块提供使能信号; ADC 驱动模块的作用是控制 ADC 芯片实现信号采集, FIFO 缓存模块将会对采集到的 ADC 芯片的电压信号进行缓存; 状态机转换模块根据采集到的电压大小控制 DAC 驱动模块和 PWM 模块的输出状态,进而控制流入半导体激光器内部 TEC 电流的方向和大小,实现对半导体激光器内部温度的控制。

ADC 驱动模块接口如图 6(a) 所示, Clk 和 Rst\_n 分别为时钟信号和系统复位信号; Adc\_en 是 ADC 驱动模块的使能端口,由定时触发模块控制; Data\_out 是由 ADC128S022 采集到的电压信号值; Adc\_done 为每

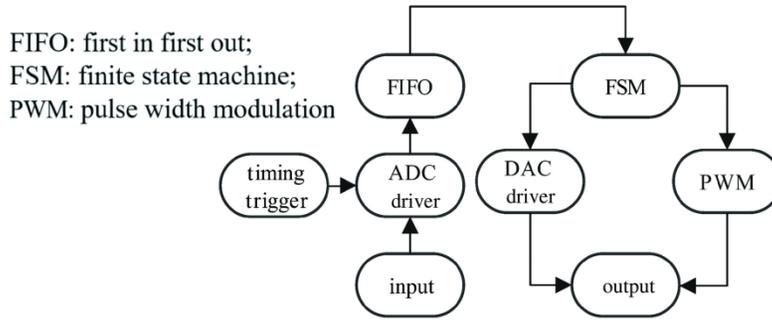


图 5 FPGA 温度自动控制流程图

Fig. 5 Flow diagram of FPGA control module

次电压采集完成的标志信号,CS为ADC芯片的片选端。状态机模块如图6(b)所示,q为前述程序中实时采集到的热敏电阻两端的电压值,Duty和Period分别

为PWM模块的频率和占空比的设置值,Dac\_en和Dac\_Data\_in为DAC驱动模块的使能端和输出电压设置端口。

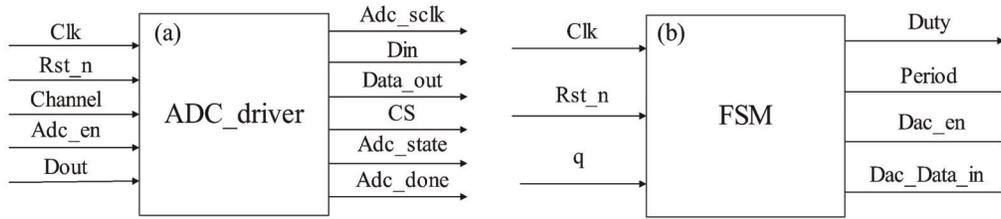


图 6 接口示意图。(a) ADC 驱动模块;(b) 状态机切换模块

Fig. 6 Interface diagrams. (a) ADC driving module; (b) state machine switching module

状态机切换模块根据q接口的实时变化值来切换状态机的状态,实现980nm半导体激光器的温度控制,其工作原理如图7所示。

状态JUD:采集温度值 $T_2$ ,设置合适的固定值 $T$ ,将温度值 $T_2$ 与设定值 $T_s$ 进行比较。当温度值 $T_2$ 大于设定值 $T_s$ 加固定值 $T$ 时,状态机跳转到状态GTR1;当温度值 $T_2$ 小于设定值 $T_s$ 减固定值 $T$ 时,状态机跳转到状态LTR1;否则,状态机跳转到状态JUD2。

状态START:采集温度值 $T_1$ ,并与设定值进行比较,当 $T_1$ 与设定值 $T_s$ 差值的绝对值小于阈值 $T_{th}$ 时,状态机跳转到状态START,否则状态机跳转到状态JUD。

状态GTR1: DAC驱动模块输出高电压值以及PWM模块输出脉冲宽度为A的PWM电压信号,同时

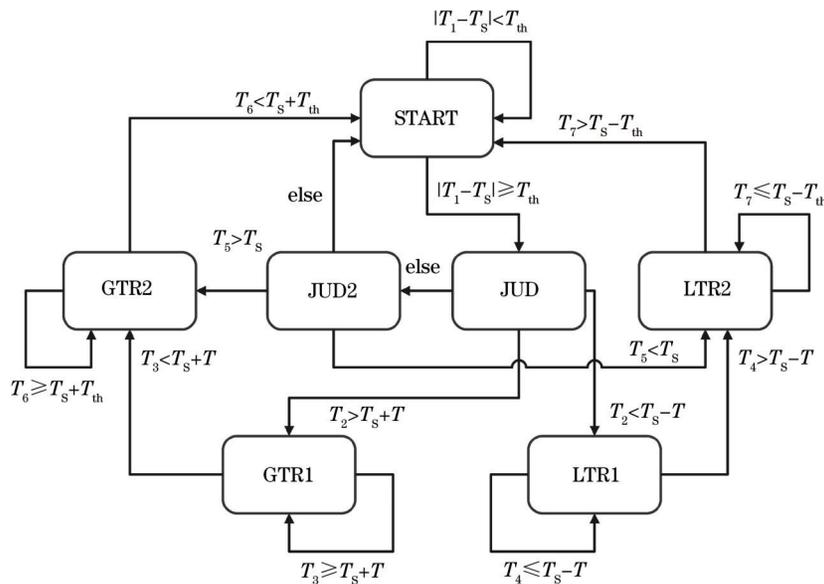


图 7 状态机切换流程图

Fig. 7 Flowchart of switching of state machine

采集温度值  $T_3$  并将其与设定值  $T_s$  进行比较。当温度值  $T_3$  小于设定值  $T_s$  加固定值  $T$  时,状态机跳转到状态 GTR2;否则,状态机跳转到状态 GTR1。

状态 LTR1: DAC 驱动模块输出低电压值以及 PWM 模块输出脉冲宽度为  $A$  的 PWM 电压信号,同时采集温度值  $T_4$  并将其与设定值  $T_s$  进行比较。当温度值  $T_4$  大于设定值  $T_s$  减固定值  $T$  时,状态机跳转到状态 LTR2;否则,状态机跳转到状态 LTR1。

状态 JUD2: 采集温度值  $T_5$ , 并与设定值  $T_s$  进行比较。当温度值  $T_5$  大于设定值  $T_s$  时,状态机跳转到状态 GTR2;当温度值  $T_5$  小于设定值  $T_s$  时,状态机跳转到状态 LTR2;否则,状态机跳转到状态 START。

状态 GTR2: DAC 驱动模块输出高电压值以及 PWM 模块输出脉冲宽度为  $B$  的 PWM 电压信号,同时采集温度值  $T_6$  并将其与设定值  $T_s$  进行比较。当温度值  $T_6$  小于设定值  $T_s$  加阈值  $T_{th}$  时,状态机跳转到状态

START;否则,状态机跳转到状态 GTR2。

状态 LTR2: DAC 驱动模块输出低电压值以及 PWM 模块输出脉冲宽度为  $B$  的 PWM 电压信号,同时采集温度值  $T_7$  并将其与设定值  $T_s$  进行比较。当温度值  $T_7$  大于设定值  $T_s$  减阈值  $T_{th}$  时,状态机跳转到状态 START;否则,状态机跳转到状态 LTR2。

状态机输出将改变 DAC 驱动与 PWM 模块的输入信号。其中, DAC 驱动模块接口如图 8(a) 所示。Dac\_en 为模块使能信号,由状态机模块信号控制; Dac\_Data\_in 用于设置输出端口信号与输出电压大小; Dac\_down 为电压输出完成标志信号; CS 为 DAC 芯片选端。PWM 模块接口如图 8(b) 所示,其中, Period 端口是为了控制 PWM 频率设置的步进值; Duty 端口是为了控制 PWM 占空比设置的阈值; Pwm\_out 为 PWM 的信号输出端口。

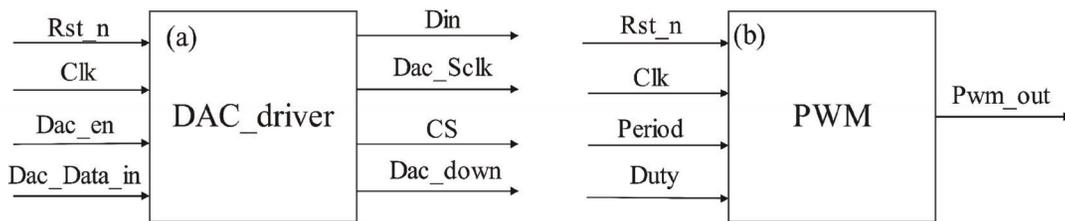


图 8 接口示意图。(a) DAC 驱动模块; (b) PWM 模块

Fig. 8 Interface diagrams. (a) DAC driving module; (b) PWM module

温度控制的实现以 FPGA 为核心控制器,比较采集的半导体激光器内部温度值与设定值,根据差值实时切换状态机的状态,控制 PWM 的输出波形占空比以及数模转换模块输出值,通过改变输入半导体制冷器的电流大小和方向,实现半导体激光器的温度控制。其中设计指标参数如表 1 所示。

表 1 设计指标参数

Table 1 Design index parameters

Parameter	Value
Temperature threshold / $^{\circ}\text{C}$	0.2
Pulsewidth /%	0-100
Impulse frequency /kHz	$>10$
D/A output voltage /V	0-4
A/D input voltage /V	0-3.3

## 4 实验结果与分析

根据上述原理,搭建了基于 FPGA 的 EDFA 系统实验装置如图 9 所示,以验证上述提出的 980 nm 半导体激光器温度控制方法的可行性、提高掺铒光纤放大器系统输出波长的稳定性。该实验装置包括 FPGA 控制器、EDFA、DFB 驱动模块及 DFB 温度控制模块。EDFA 由光纤隔离器 (ISO)、980 nm 半导体激光器、两个波分复用器 (WDM) 和掺铒光纤 (EDF) 组成,利用

功率测试计测量激光器输出功率,利用光谱测量仪 (AQ6370) 测量波长。

利用图 9 所示的实验装置,将初始的 980 nm 半导体激光器的工作温度设置为  $25^{\circ}\text{C}$ ,将输入电流  $I$  从 100 mA 连续增加到 700 mA,获得系统未安装温度控制模块和安装温度控制模块时,激光器输出的功率-电流 (PI) 曲线分别如图 10(a) 和 (b) 所示,其中,横轴表示输入电流,纵轴表示激光器对应的输出功率,直线表示对 PI 的线性拟合。在未安装温度控制模块时,图 10(a) 所示的 DFB 激光器在工作时长为 5 min 时 PI 曲线的拟合度为 0.9870,激光器工作时长为 60 min 时 PI 曲线的拟合度下降为 0.9584。在安装温度控制模块后,图 10(b) 所示的 DFB 激光器在工作时长为 5 min 时 PI 曲线的拟合度为 0.9850,激光器工作时长为 60 min 时 PI 曲线的拟合度为 0.9784。

理论上,本文提出方法中状态机的温度阈值可以无限接近理想温度设定值,但考虑硬件电路的非理想化、热敏电阻精度和 AD/DA 模块转换精度,本文将状态机的阈值温度设定为  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。图 11 表示温度值基本稳定在  $25^{\circ}\text{C}$  后,1 h 内的激光器温度变化情况。图 11 横坐标表示时间,纵坐标表示温度,右上角为局部放大图,从图中可以看出,激光器的温度可以基本稳定在  $25^{\circ}\text{C}$ ,最大误差为  $-0.4^{\circ}\text{C}$ ,虽然实际温度变化与目

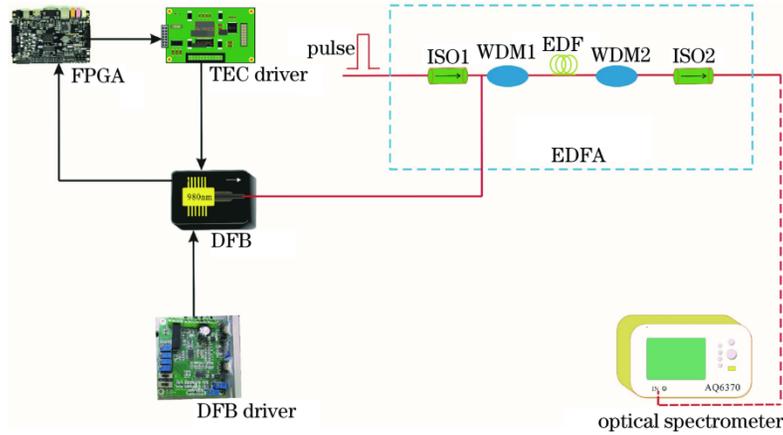


图 9 实验装置示意图

Fig. 9 Experimental device diagram

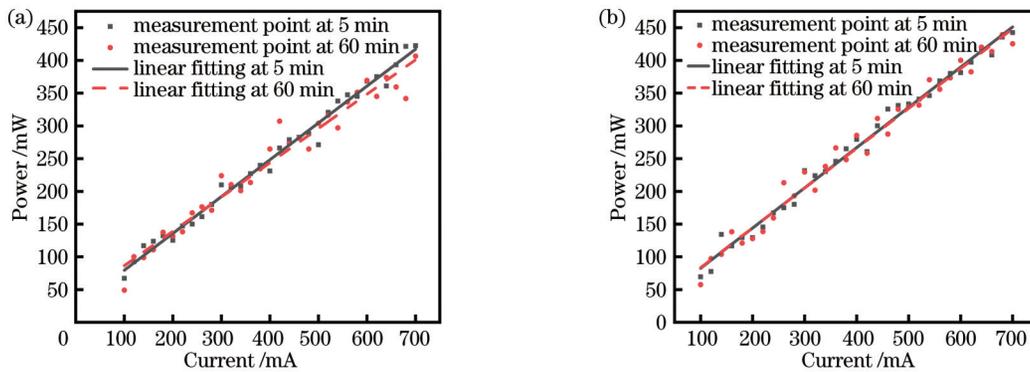


图 10 980 nm 激光器 PI 曲线。(a) 未设置温度控制模块的 PI 曲线；(b) 设置温度控制模块的 PI 曲线

Fig. 10 PI curves of 980 nm laser. (a) PI curves without setting temperature control module; (b) PI curves of setting temperature control module

标控制精度存在一定差距,但基本可以控制在 $(25 \pm 0.4)^\circ\text{C}$ 内。

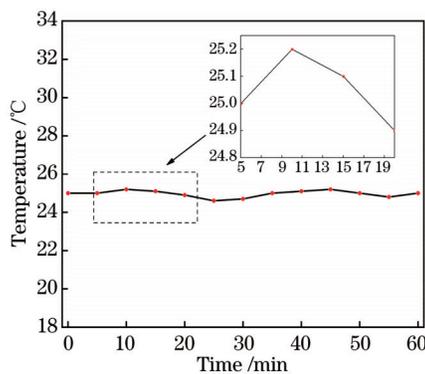


图 11 激光器温度变化情况

Fig. 11 Temperature variation of laser

为验证所提方法可改善 EDFA 输出光谱中心波长的稳定性,根据图 9 所示的实验装置,利用 AQ6370 光谱仪进行测量,获得采用该温度控制方法前后不同时间的光谱偏移特性如图 12、13 所示。

图 12 为在未进行温度控制的情况下,EDFA 输出光谱中心波长在 0、10、20、30、40、50、60 min 内的动态

变化曲线。图 12(a) 横轴表示光谱的波长,纵轴表示放大后的光脉冲信号功率;图 12(b) 表示 EDFA 输出光谱中心波长随时间的变化关系,虚线表示该时间段内中心波长的平均值为 1551.759 nm,中心波长在该段时间的最大漂移量达到 40 pm,方差值达到 14.4 pm。因此,EDFA 系统未进行温度控制时,EDFA 输出光谱的中心波长随着时间的推移向右漂移。

图 13 所示为将 980 nm 半导体激光器的温度控制在  $25^\circ\text{C}$ ,EDFA 输出光谱的中心波长在 0、10、20、30、40、50、60 min 内的动态变化曲线。图 13(a) 横轴表示光谱的波长范围,纵轴表示放大后的光脉冲信号功率。图 13(b) 表示输出光谱中心波长随时间的变化情况,虚线表示该时间段内中心波长的平均值为 1551.741 nm,中心波长在该段时间的最大漂移量为 14 pm,方差值为 5.4 pm。经实验对比可知,在对 980 nm 激光器进行温度控制的情况下,EDFA 的输出光谱中心波长在 60 min 内的偏移量减小了 65%,方差减小了 62.5%,并且与文献[8]中结果相比,温度也具有保持稳定时间更长的优点。因此,本文的方案可以

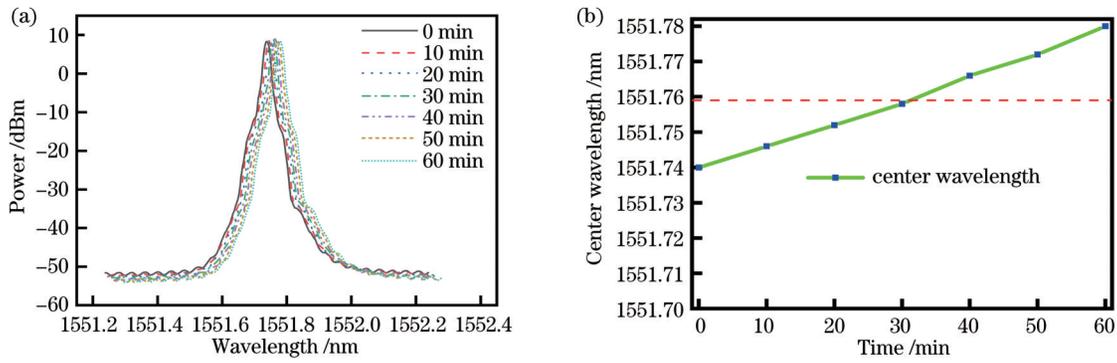


图 12 未安装温度控制模块时 EDFA 输出光谱以及中心波长变化。(a) EDFA 输出光谱;(b) 中心波长变化情况

Fig. 12 Output pulse spectrum of EDFA without temperature control module. (a) Output spectrum of EDFA; (b) center wavelength change

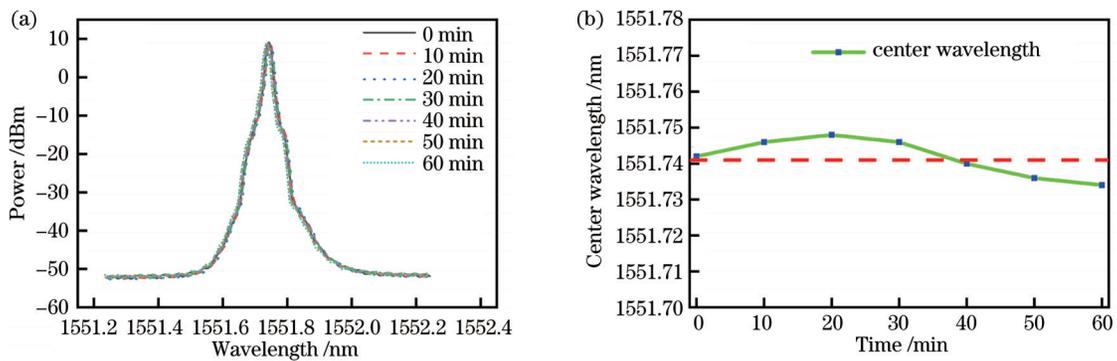


图 13 安装温度控制模块时 EDFA 输出脉冲光谱以及中心波长变化。(a) EDFA 输出光谱;(b) 中心波长变化情况

Fig. 13 Output pulse spectrum of EDFA when temperature control module is installed. (a) Output spectrum of EDFA; (b) center wavelength change

有效地稳定 980 nm 激光器的输出功率,减少 EDFA 输出光谱的漂移现象。

## 5 结 论

针对现有半导体激光器的温度控制方法主要存在的控制器传输速度慢与结构较为复杂的问题,提出了一种基于 FPGA 的 980 nm 半导体激光器温度实时控制方法。该方法以 FPGA 为主控制器,通过测量热敏电阻电压实现半导体激光器内部温度的实时采集;状态机将根据采集到的温度值实时切换状态机状态,进而控制流入半导体激光器内部 TEC 电流的方向和大小,实现对半导体激光器内部的温度控制。搭建基于 FPGA 的掺铒光纤放大器系统实验装置,分析了温度为 25 °C、工作时长为 60 min 时, FPGA 自动切换内部状态机的温度控制方法效果。在状态机的阈值温度设定为 0.2 °C 时,激光器的温度基本控制在 0.4 °C; 980 nm 半导体激光器 PI 曲线的线性拟合度由 0.9584 提高到 0.9784; EDFA 的输出波长的最大漂移量和方差值由原来的 40 pm、14.4 pm 分别减小到 14 pm 和 5.4 pm,波长偏移减小了 65%,方差减小了 62.5%。利用结构简单的恒流源结合半导体内部器件实现温度采集和制冷,通过 FPGA 控制内部状态机程序实现温

度控制,该方法结构简单及速度快,对推进半导体激光器温度控制的发展及应用具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Lee H J, Yoon J S, Kim C J. Numerical analysis on the cooling of a laser diode package with a thermoelectric cooler[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2001, 30(5): 357-370.
- [2] Pradhan D D, Mandloi A. Design optimization of EDFA for 16×10 Gbps data rate DWDM system using different pumping configurations[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 106(4): 2079-2086.
- [3] 曹驰, 王博, 褚应波, 等. 国产高性能抗辐照掺铒光纤[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2015001.  
Cao C, Wang B, Chu Y B, et al. Domestic high quality radiation-resistant erbium-doped fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2015001.
- [4] Horiguchi M, Shimizu M, Yamada M, et al. Highly efficient Erbium-doped fibre amplifiers pumped in 660 nm band[J]. Electronics Letters, 1991, 27(25): 2319-2320.
- [5] 张安迪, 张艳荣, 李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214003.  
Zhang A D, Zhang Y R, Li T. Application of variable domain fuzzy PID control in semiconductor laser temperature control system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214003.
- [6] Cong M L. Design of a laser temperature controller and its application in absorption spectral based gas sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11567: 115671Y.
- [7] 缪存孝, 邢国柱, 刘建丰, 等. 高精度激光器电流驱动与交流

- 温控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 0905004.
- Miao C X, Xing G Z, Liu J F, et al. Design of current drive and alternating current temperature control system for high-precision laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(9): 0905004.
- [8] 续文敏, 杨强, 王兴, 等. 面向混沌半导体激光器的高稳定控制系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0714008.
- Xu W M, Yang Q, Wang X, et al. Design of high stability control system for chaotic semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0714008.
- [9] Oo H L, Anatolii S, Ye K Z. Analysis and evaluation of the efficiency of laser temperature control system[C]//2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, January 28-31, 2019, Saint Petersburg and Moscow, Russia. New York: IEEE Press, 2019: 2180-2182.
- [10] Zhai G Y, Chai G R. High-precision temperature control for semi-conductor laser based on genetic algorithm[J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2018, 13(9): 1349-1354.
- [11] Li X F, Wang Z, Chen W, et al. Double-loop control and intelligent parameter tuning for the temperature control system of a DBR semiconductor laser[J]. Applied Optics, 2021, 60(2): 326-332.
- [12] Hang Z. Semiconductor laser drive power semiconductor laser temperature control system design[J]. Scientific Journal of Intelligent Systems Research, 2020, 2(12): 36-43.
- [13] 吕宗璟, 盛亮, 张雁霞, 等. 脉冲辐射探测信号模拟光纤传输系统[J]. 光电子·激光, 2019, 30(9): 906-911.
- Lü Z J, Sheng L, Zhang Y X, et al. Analog optical fiber transmission system applied in pulsed radiation detection[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30(9): 906-911.
- [14] Zhen L. Design of a temperature control circuit for a semiconductor laser[C]//Energy Science and Applied Technology, June 25-26, 2016, Wuhan, China. South Holland: ESAT, 2016: 303-305.
- [15] Vetrovec J, Copeland D A, Feeler R, et al. Testing of active heat sink for advanced high-power laser diodes[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7918: 79180G.
- [16] 陈昊, 鞠昱, 韩立, 等. TDLAS痕量气体检测中激光器管壳温度对背景信号的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(6): 1670-1674.
- Chen H, Ju Y, Han L, et al. Effects of temperature of laser shell on background signals for trace gas detection in TDLAS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(6): 1670-1674.
- [17] Xie L, Pinjala D, Sudharsanam K, et al. A new low cost optical transmitter package with uncooled thermal solution and J-down assembly[C]//53rd Electronic Components and Technology Conference, May 27-30, 2003, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2003: 1669-1673.
- [18] 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. Multi-channel semiconductor laser temperature control system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1114002.
- [19] Ruan Y Z, Yu J H, Xiao T J. Design and implementation of video image processing system based on ZYNQ-7000[J]. Software Guide, 2018, 17(9): 152-156.
- [20] Altenburg H, Mrooz O, Plewa J, et al. Semiconductor ceramics for NTC thermistors: the reliability aspects[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(10/11): 1787-1791.
- [21] 沙占友, 王彦朋, 杜之涛. NTC热敏电阻的线性化及其应用[J]. 自动化仪表, 2004, 25(9): 28-30.
- Sha Z Y, Wang Y P, Du Z T. Linearization and application of NTC thermistor[J]. Process Automation Instrumentation, 2004, 25(9): 28-30.
- [22] Peng E, Li L. Camera calibration using one-dimensional information and its applications in both controlled and uncontrolled environments[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(3): 1188-1198.

## Temperature Control Scheme for 980 nm Semiconductor Laser

Liu Jing<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>1,2\*</sup>, Deng Xiao<sup>1,2</sup>, Zhao Mingzhe<sup>1</sup>, Hu Bingbing<sup>1</sup>, Du Chao<sup>1,2</sup>, Cui Liqin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

### Abstract

**Objective** As an important optoelectronic device for optical fiber communication, the 980 nm semiconductor laser has the advantages of a wide wavelength range, easy modulation, and high efficiency. It can excite ground-state erbium ions to a metastable state, thereby paving the way for stimulated radiation. It is thus an optimal pumping source for the erbium-doped fiber amplifier (EDFA). However, as an important factor influencing the power stability and spectral shift of the 980 nm semiconductor laser, temperature affects the stability of the output wavelength of the EDFA. The traditional control methods, mainly using the microcontroller unit (MCU) to implement the proportional-integral-derivative (PID) algorithm, have the weaknesses of cumbersome hardware circuits and control processes. In this paper, the field programmable gate array (FPGA) with high speed and flexibility is used as the main controller to switch the internal finite state machine (FSM), thereby achieving the automatic temperature control of the 980 nm semiconductor laser and stabilizing the output power of the laser. Then, the above method is applied to an EDFA system, and the results show that it reduces the shift and improves the stability of the output spectrum. The proposed temperature control method is expected to promote the development and application of the temperature control of semiconductor lasers.

**Methods** The structure and properties of the 980 nm semiconductor laser are investigated, and the analysis shows that

the thermoelectric cooler (TEC) and the thermistor can respectively be used as the actuating element and the temperature sensor. Besides, the FPGA, as a core control component, is utilized to control the analog-to-digital chip (ADC) collecting the voltage of the thermistor and further to obtain the internal temperature of the semiconductor laser. In addition, the FSM is adjusted and switched to different states in real time to control the magnitude and direction of the current flowing into the TEC. The above measures are taken to achieve automatic temperature control. An FPGA-based experimental device with an EDFA system is built to verify the feasibility of the proposed method. For this purpose, an experiment is conducted under different temperatures by analyzing the variations of output power-current (PI) curves of the 980 nm semiconductor laser and the output spectra of the EDFA with time and temperature. The results prove the feasibility of the proposed method.

**Results and Discussions** This paper proposes a real-time temperature control method for the 980 nm semiconductor laser that uses the FPGA to automatically switch the internal FSM (Fig. 7). An FPGA-based experimental device with an EDFA system is built (Fig. 9) to verify the feasibility of the proposed method. The experimental results show that when the threshold temperature of the FSM is set to  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the temperature of the laser within 60 min largely remains stable, with a maximum temperature difference of smaller than  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Fig. 11). When the temperature of the 980 nm semiconductor laser stabilizes at  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the proposed temperature control method increases the goodness of linear fit of the PI curve by 23.07% and reduces the wavelength shift of the EDFA by 62.5% within 60 min (Fig. 13). The application of the proposed temperature control method effectively ensures the stability of the output power of the semiconductor laser and that of the output wavelength of the amplifier.

**Conclusions** As the current temperature control methods for semiconductor lasers are faced with the slow transmission speed and complex structure of the controller, an FPGA-based real-time temperature control method for the 980 nm semiconductor laser is presented in this paper. The method uses the FPGA as the main controller to obtain the internal temperature of the semiconductor laser in real time by measuring the voltage of the thermistor. The FSM state could be switched in real time according to the collected temperature, thereby controlling the direction and magnitude of the current flowing into the TEC in the semiconductor laser. In this way, the internal temperature control of the semiconductor laser is achieved. An FPGA-based experimental device with an EDFA system is built to analyze the temperature control effectiveness of automatic switching of the internal FSM by the FPGA when the temperature is  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  and the working time is 60 min. When the threshold temperature of the FSM is set to  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the temperature of the semiconductor laser is generally  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  under control. The goodness of linear fit of the PI curve of the 980 nm semiconductor laser is improved by 23.07% from 0.9584 to 0.9784. The maximum shift and variance of the output wavelength of the EDFA are respectively reduced from 40 pm to 14 pm and from 14.4 pm to 5.4 pm. The wavelength shift and variance are thus respectively reduced by 65% and 62.5%. The simple constant current source is combined with devices inside the semiconductor for temperature acquisition and cooling, and the internal FSM program is controlled by the FPGA to achieve temperature control. The proposed method, with a simple structure and fast speed, is of great significance for promoting the development and application of the temperature control of semiconductor lasers.

**Key words** lasers; 980 nm semiconductor laser; temperature control; field programmable gate array; state transition machine