

引用格式: XIA Zhichang, YU Yongai, SHANG Jianhua. Output Power and Temperature Stability of Semiconductor Laser Based on STM32[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0814002

夏志昌, 于永爱, 尚建华. 基于 STM32 的半导体激光器输出功率和工作温度稳定性研究[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0814002

# 基于 STM32 的半导体激光器输出功率和工作温度稳定性研究

夏志昌<sup>1</sup>, 于永爱<sup>2</sup>, 尚建华<sup>1</sup>

(1 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

(2 上海如海光电科技有限公司, 上海 201206)

**摘 要:** 半导体激光器的中心波长及输出功率极易受到驱动电流和工作温度的影响, 为了获得精确稳定可靠的检测结果, 设计了一种基于 STM32 的中低功率半导体激光器驱动电源和温控系统。所设计驱动电源采用深度负反馈电路, 与比例积分微分算法构成双闭环功率控制。采用 H 桥驱动芯片控制半导体制冷片对半导体激光器温度进行精确控制。实验结果表明, 所设计的驱动电流稳定性极好, 稳定度在 0.3% 左右, 精度为 0.86%; 温度调节速度快, 长时工作温度控制精度为  $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ , 稳定度可达 0.18%; 激光器的输出功率稳定性在  $\pm 2\text{ mW}$  内; 激光器的中心波长波动范围为 0.007 5 nm, 能满足激光器的工作要求。

**关键词:** 半导体激光器; 功率控制; 温度控制; PID; STM32

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20235208.0814002

## 0 引言

半导体激光器也称激光二极管, 是用半导体材料制成的激光器, 其激励方式有电注入、电子束激励和光泵浦三种。因其体积小、效率高、成本低等特点, 半导体激光器已被广泛应用于激光雷达、遥感探测、工业加工等领域。

然而, 半导体激光器的中心波长及输出功率极易受到驱动电流和工作温度的影响。由于非辐射复合损耗、自由载流子吸收等损耗机制, 半导体激光器在电光转换过程中, 一部分注入电流会转换成热量。半导体激光器的工作温度每变化  $1^{\circ}\text{C}$ , 其中心波长将漂移  $0.01\text{ nm}$ <sup>[1]</sup>。另外, 激光器工作温度的升高会导致激光器的阈值电流升高, 激光器的输出功率也会随之波动。半导体激光器的主要激励方式是电注入式, 这种激励方式是直接把驱动电流转换成输出光功率, 即使是驱动电流微小的波动也会导致输出功率产生波动。因此, 针对半导体激光器的驱动电流和工作温度进行精确控制, 是有效控制半导体激光器中心波长和输出光功率稳定性的重要手段<sup>[2-4]</sup>。

在半导体激光器输出功率和工作温度的稳定性控制研究方面, 郭倩<sup>[5]</sup>等借助半导体制冷片 (Thermoelectric Cooler, TEC) 获得了  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  的控温精度, 并依据光电反馈原理设计实现了功率自动控制电路, 激光器的功率稳定性优于 0.74%。为了避免人工搭建驱动电路的不稳定性, 薛萌<sup>[6]</sup>等采用恒流芯片为激光器提供稳定的恒流源, 并借助 MAX1978 对温度进行控制, 有效解决了半导体激光器功率和波长的稳定性控制问题。为了消除温度和电流波动对功率和波长的影响, 罗亮<sup>[7]</sup>等设计了深度负反馈积分电路与限流电路结合的方式来控制电流, 同时采用温度控制芯片 MAX1978 实现高精度温度控制。为了解决阈值电流随

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52173219)

第一作者: 夏志昌, 2816513615@qq.com

通讯作者: 尚建华, jhshang@dhu.edu.cn

收稿日期: 2023-01-17; 录用日期: 2023-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

温度变化而导致的功率损失,范桂东<sup>[8]</sup>等借助光电探测器和恒流源组成自动功率控制电路,保障了激光器输出光功率稳定。

以上半导体激光器功率控制方式是根据光电反馈原理,借助光电探测器构成自动功率控制电路。然而由于光电探测器自身温度漂移严重以及灵敏性较差等原因,此种功率控制方式效果欠佳。本文的功率控制方式是通过对驱动电流进行监测并不断调节来实现功率的稳定,相比之下具备更好的功率稳定性。为了给半导体激光器提供温度稳定的工作环境,以上的温度控制方式大多采用集成的温度控制芯片,这种温度控制方式虽然稳定性好,但是调节时间较长,且电路复杂度高。针对这些缺陷,本文采用比例积分微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制算法,利用H桥驱动芯片实现激光器的工作温度控制,达到了控制精度高、调节迅速、成本低的设计要求。

## 1 工作特性及整体方案

### 1.1 工作特性

半导体激光器的注入电流和工作温度的稳定性是决定激光器工作性能的重要因素。当半导体激光器的注入电流达到阈值电流 $I_{th}$ 时,激光器出射激光且输出光功率与注入电流成线性关系。然而,受激光器工作温度的影响,激光器的阈值电流会随工作温度的升高而增大。因此,在相同注入电流的情况下,工作温度的升高将会导致激光器输出光功率减小。

对于线性度较好的半导体激光器,其输出光功率 $P_0$ 可表示为

$$P_0 = \frac{\eta_D h \nu}{e_0} (I - I_{th}) \quad (1)$$

式中, $\eta_D$ 是外微分量子效率, $h$ 是普朗克常数, $\nu$ 是光频率, $e_0$ 是电子, $I$ 是注入电流, $I_{th}$ 是阈值电流。由式(1)可知,激光器工作温度升高时,外微分量子效率的降低和阈值电流的增大将会导致激光器输出功率减小。

此外,激光器的工作温度也会影响其中心波长的稳定性。图1是环境温度为20℃~30℃时所用785 nm蝶形封装半导体激光器的中心波长监测结果,由图可知,环境温度每升高1℃,激光器的中心波长将漂移0.01 nm,中心波长随工作温度的变化而变化。

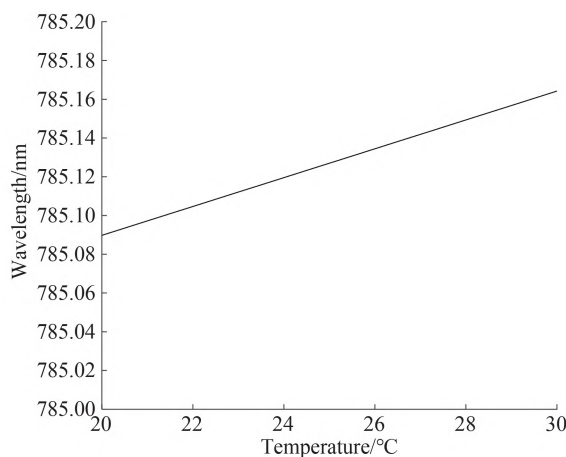


图1 不同温度下半导体激光器的中心波长

Fig. 1 Effect of temperature on wavelength of semiconductor laser

### 1.2 整体方案

如图2,半导体激光器的驱动控制系统包括STM32、激光器驱动电路和工作温度控制电路。其中,STM32是驱动控制系统的控制器,激光器驱动电路包括开关电路、采样电路和恒流源电路,工作温度控制电路由测温电路和TEC驱动电路两部分组成。工作时,上位机通过串口RS232与STM32进行通讯进而实现激光器的开关控制、输出功率设置、激光器工作温度显示等。

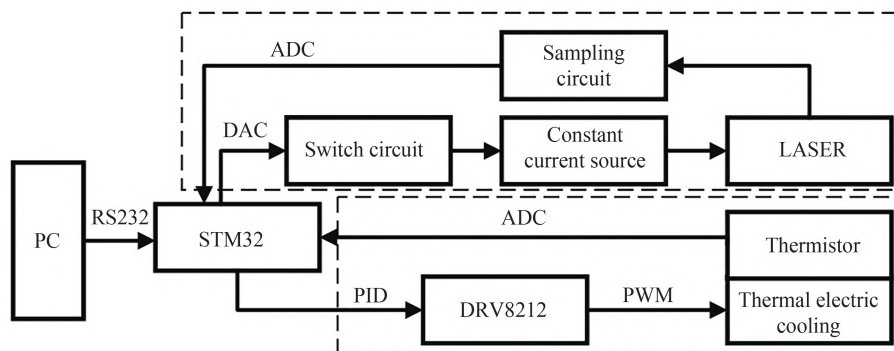


图2 半导体激光器的驱动控制系统结构

Fig. 2 Structure of drive and control system for semiconductor lasers

## 2 电路设计

### 2.1 驱动电路

图3为激光器驱动电路的工作原理,当STM32向开关电路发出使能信号并输出足够大的电压时,开关电路会给恒流源电路提供相应的工作电压,此时激光器开始工作。恒流源电路中,改变STM32的输出电压可改变激光器的驱动电流。为了监测激光器的工作电流情况,采样电路负责采集激光器的工作电流,并经电流-电压转换及放大后得到对应的电压信号,便于后续进行功率稳定性控制。

#### 2.1.1 恒流源电路

由于半导体激光器的激励方式是电流注入式的,为了稳定激光器的工作电流,在激光器驱动电路中采用恒流源电路。

图4所示恒流源电路中,当采样电阻 $R_s$ 中的电流 $I_s$ 增大时,运放 $U_2$ 的输出电压 $U_f$ 增大,而运放 $U_1$ 则放大同向输入端电压 $U_{IN}$ 与反向输入端电压 $U_f$ 的差。由于反向输入端电压 $U_f$ 增大,因此运放 $U_1$ 的输出电压将变小,金氧场效应晶体管(Metal-oxide-semiconductor Field-effect Transistor, MOSFET)的栅极电压也变小,进而使输出电流 $I_s$ 反方向变小,最终达到输出电流 $I_s$ 稳定的状态;反之,当电流 $I_s$ 变小时,运放 $U_1$ 的输出电压变大,进而使输出电流 $I_s$ 反方向变大,达到输出电流稳定的目的。综上所述,借助恒流源电路可使电流保持恒定不变。

具体设计时,运放 $U_1$ 的正向输入端电压 $U_{IN}$ 由单片机STM32输出,反向输入端电压 $U_f$ 由运放 $U_2$ 及 $R_1$ 、 $R_2$ 构成的电阻网络提供。 $U_1$ 放大 $U_{IN}$ 和 $U_f$ 的差值进而驱动MOSFET导通并完成电压-电流的变换,实现对激光器驱动电流的恒定调节控制。驱动电路中,串联的采样电阻 $R_s$ 用以实现电流-电压变换,并作为运放 $U_2$ 的正向输入端电压,因此采样电阻 $R_s$ 要求阻值低、精度高、温漂小,本文中采样电阻 $R_s$ 的阻值为 $0.2\ \Omega$ 。

根据集成运算放大电路的“虚短”和“虚断”分析依据可得

$$U_{IN} = U_f \quad (2)$$

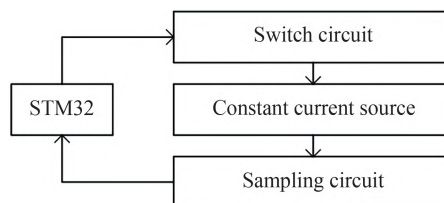


图3 激光器驱动电路原理

Fig. 3 Principle of laser drive circuit

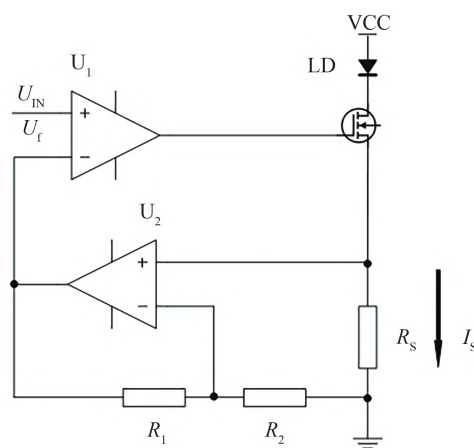


图4 恒流源电路

Fig. 4 Constant current source circuit

$$U_f = R_s \times I_s \times \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \quad (3)$$

因此,当恒流源电路驱动激光器工作时,电流 $I_s$ 即激光器的驱动电流,与STM32的输出电压 $U_{IN}$ 的关系为

$$I_s = \frac{U_{IN}}{R_s} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

由式(4)可知,当各电阻阻值固定时,激光器的驱动电流 $I_s$ 仅由STM32的输出电压 $U_{IN}$ 决定。

为了提高驱动电流 $I_s$ 的稳定性与准确性,除了采用硬件负反馈电路以外,还借助了软件编程实现闭环PID控制算法,以进一步提升驱动电流的性能。此时,电压 $U_f$ 不仅是运放 $U_1$ 的输入信号,同时还经过采样电路在STM32上与预设电压做闭环PID运算,进而调整STM32的输出电压 $U_{IN}$ ,最终达到激光器的理想驱动电流值<sup>[9-12]</sup>。

### 2.1.2 开关电路

为了控制激光器的开关状态与设置输入电压,在恒流源电路和STM32之间设计开关电路。开关电路的核心器件是单刀双掷模拟开关芯片。单刀双掷模拟开关的原理如图5,引脚IN接高电平时,引脚COM连接至NO;引脚IN接低电平时,引脚COM连接至NC。因此,通过控制引脚IN的电平高低即可决定激光器的开启与关闭,即半导体激光器的驱动控制系统工作时,引脚NO连接至STM32的输出电压 $U_{IN}$ ,引脚NC接地。

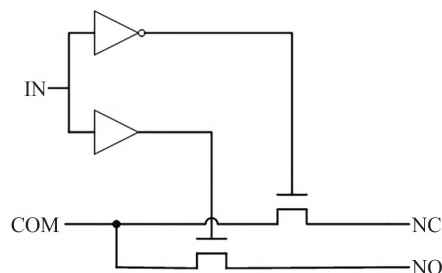


图5 模拟开关原理

Fig. 5 Schematic of analog switch

## 2.2 温度控制电路

针对半导体激光器工作温度不稳定的问题,半导体激光器制造厂商在产品内部集成了半导体制冷片TEC。TEC是一种无运动部件的简易制冷器件,其驱动电流方向决定工作状态是制冷还是制热,驱动电流的大小决定制冷或制热量。因此,对TEC进行精确的驱动控制即可实现对半导体激光器的工作温度控制<sup>[13-18]</sup>。

半导体激光器工作温度控制电路包括温度采集电路和基于H桥驱动芯片的TEC驱动电路两部分。

### 2.2.1 温度采集电路

因激光器内部集成了负温度系数的热敏电阻,所以只需在外部增加一个电阻与热敏电阻构成串联分压电路,即可在激光器内部温度变化时,通过检测热敏电阻的电压进而确定热敏电阻的阻值。

为了防止外部干扰导致的信号波动,使用独立的基准电压芯片作为AD采样的基准电压。由于电压跟随器具有良好的隔离缓冲和阻抗匹配作用,因此温度-电压信号经电压跟随器作用后由STM32进行模数转换,可以把电压模拟量转换成相应的数字量;然后,借助激光器自带的热敏电阻 $B$ 值计算得到温度值,作为闭环PID控制算法的输入信号。

### 2.2.2 TEC驱动电路

H桥式驱动芯片DRV8212P是TEC的驱动器,其工作状态包括以下三种情况:一是当DRV8212P的IN1为高电平、IN2为低电平时,正向输出,TEC制冷;二是当DRV8212P的IN1为低电平、IN2为高电平时,反向输出,TEC制热;三是当DRV8212P的IN1和IN2都为低电平时,芯片停止输出,TEC不工作。

当STM32得到输入的温度信号后,将其与设定的温度值进行PID运算,然后生成相应的脉冲宽度调制波(Pulse Width Modulation, PWM)控制H桥驱动芯片,进而驱动TEC工作,最终实现激光器的高精度温度控制。

### 2.2.3 增量式PID算法

PID是比例、积分、微分三种控制环节合一的闭环控制算法,是工业领域常见的较为成熟的控制算法。常见的PID算法分为位置式PID和增量式PID。位置式PID由于积分环节的不断累加,除了对输出进行限幅之外,还需要解决积分饱和问题。而增量式PID仅仅与最近三次偏差有关,没有偏差累积的现象,运算量



与超调量较小。增量式PID算法的离散化表达式为

$$\Delta U(k) = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (5)$$

式中,  $e(k)$  为本次偏差,  $e(k-1)$  为上次偏差,  $e(k-2)$  为上上次偏差,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,  $K_d$  为微分系数。

PID算法的实现与应用已经非常成熟,难点主要在于参数的整定。积分系数直接与偏差相乘,因此系统的调节时间主要由积分系数来决定,整定顺序也是先从积分系数开始。首先置零比例系数与微分系数,从小到大调整积分系数,直至系统震荡。然后是比例系数的整定,比例系数与前两次偏差之差相乘,相当于积分系数的刹车。引入比例环节可以减小系统的超调量和稳态误差。比例系数的具体整定过程为逐步增大比例系数,此时系统不再震荡,曲线由等幅振荡逐渐变成衰减震荡,系统的调节时间大幅减少,甚至可以达到无明显超调。积分系数和比例系数确定下来以后,此时控制系统的性能指标已经能满足设计要求,微分环节的引入只是锦上添花。最终逐步增大微分系数,通过对比控制曲线来确立合适的微分系数。由于半导体制冷片制冷制热效率不完全相同,因此制冷的PID参数并不完全适用于制热。制冷PID参数初步确立后,还需制热测试并做出微调,得到制冷与制热都适用的PID参数。

### 3 驱动控制系统工作流程

半导体激光器驱动控制系统上电后,通过串口与上位机进行通信。图6为系统的工作流程,在接收到开启激光器的命令之前,STM32首先对激光器的温度进行监测并驱动TEC进行温度调节,直到达到合理工作温度区间。然后,STM32输出设定的电压值,打开激光器,实时监测激光器的驱动电流值,并与激光器驱动电流和光功率关系表进行对比,反复修改STM32的输出电压进而调节输出功率,直至激光器输出功率达到稳定状态。

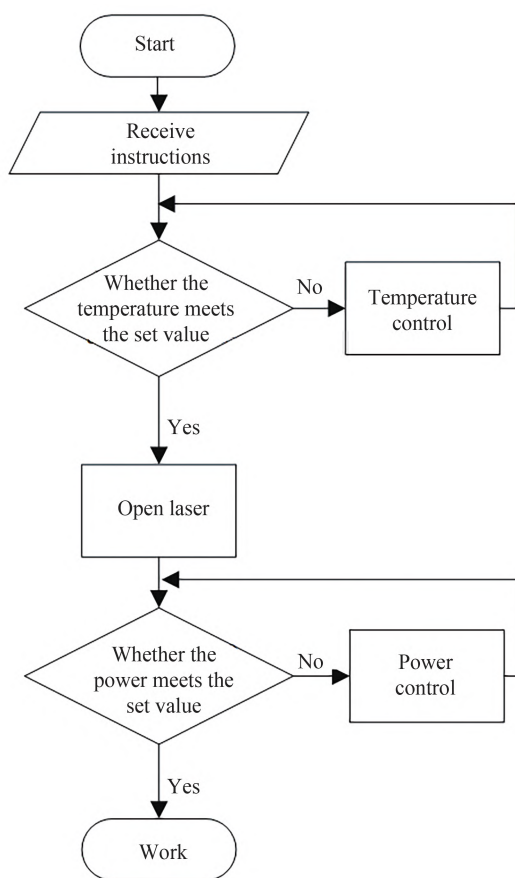


图6 主程序流程

Fig. 6 Main program flow

## 4 实验结果及分析

图7为半导体激光器驱动控制系统的封装实物图,为了确定该系统输出功率的稳定性和工作温度的控制情况,在实验室环境下,借助温箱、光功率计、光谱仪等实验设备开展实验研究。

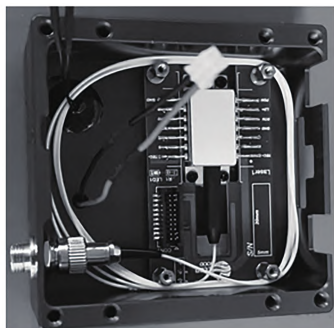


图7 半导体激光器驱动控制系统

Fig. 7 Semiconductor laser drive control system

### 4.1 半导体激光器驱动电流的分析

如图4,根据恒流源电路的工作原理可知,半导体激光器的驱动电流经采样电阻及放大电路作用后被转换成电压信号,因此,对该电压信号进行采集即可对激光器驱动电流进行监测,进而判断其稳定性。

首先开启激光器,并将STM32的输出电压设为1 V。初始状态设置完毕,使激光器连续工作1 h,同时,STM32将恒流源电路中采样电阻两端的电压信号转换成数字信号并上传至电脑。为了提高上述电压信号的采样精度,STM32通过直接内存访问(Direct Memory Access,DMA)方式每次采样采集50次并做均值滤波,所得结果作为当前的采样电压信号值。

激光器连续工作1 h,驱动电流随时间的变化情况如图8,从图8可知,激光器驱动电流在长时间连续工作时能够保持稳定,稳定度约为0.3%。

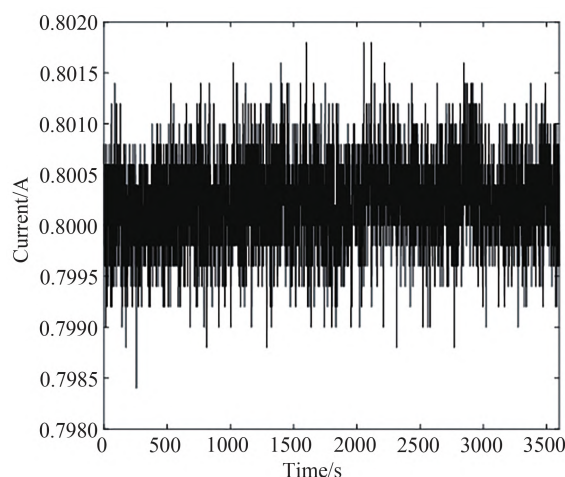


图8 半导体激光器驱动电流的稳定性

Fig. 8 Stability of driving current in semiconductor lasers

由式(4)可知,半导体激光器的驱动电流和单片机STM32的设定电压具有线性关系。因此,在分析半导体激光器驱动电流的精度时,通过测量反馈电压进而得到激光器驱动电流的变化情况。当单片机的设定电压从0到1 500 mV之间变化时,设定电压每变化50 mV测量一次反馈电压的情况,然后利用式(4)求得对应的驱动电流值,最终得到半导体激光器驱动电流的精度。图9为半导体激光器驱动电流的变化情况。根据精度计算式(6)可得半导体激光器驱动电流的精度为0.86%,表明单片机的设定电压与激光器的驱动电流具有良好的线性关系。

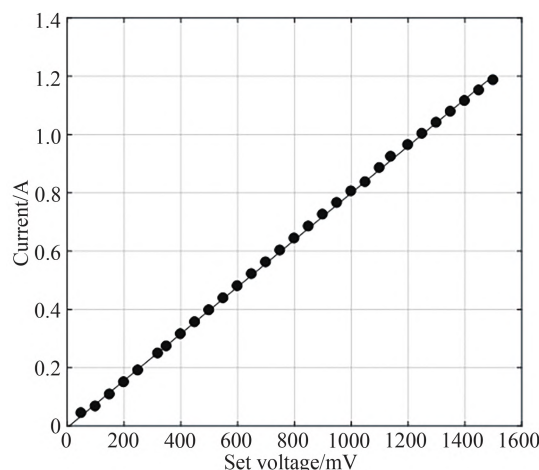


图9 半导体激光器驱动电流的变化情况

Fig. 9 Linearity of driving current of semiconductor laser

$$\delta = \frac{|\Delta I_{\text{MAX}}|}{I_{\text{MAX}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $\Delta I_{\text{MAX}}$  为驱动电流实际测量值与其拟合值的最大偏差,  $I_{\text{MAX}}$  为驱动电流实测最大值。

#### 4.2 半导体激光器工作温度控制分析

本文中的半导体激光器的工作温度范围在  $20^{\circ}\text{C}$  到  $30^{\circ}\text{C}$  之间, 因此, 利用半导体激光器的温度控制电路将激光器的工作温度控制在  $25^{\circ}\text{C}$  附近。为了验证半导体激光器的温度控制效果, 分别在室内环境和温箱环境进行测试。

首先, 将激光器的输出功率设为  $500\text{ mW}$ , 然后将其放入温箱并将温箱温度分别设为  $0^{\circ}\text{C}$  和  $40^{\circ}\text{C}$ , 待温箱温度稳定后, 分别测试激光器的工作温度情况。

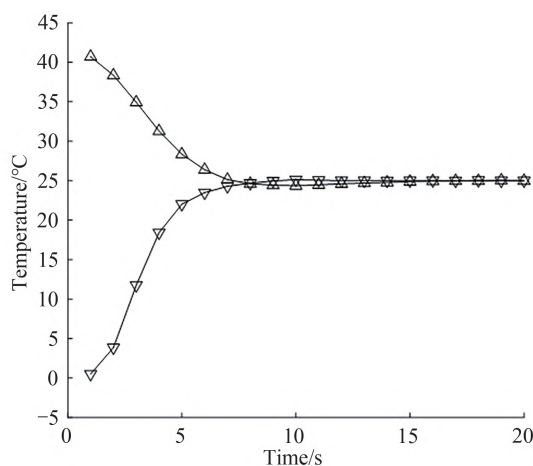


图10 激光器工作温度的调节时间

Fig. 10 Adjustment time of laser operating temperature

由图可知, 无论激光器的工作环境温度(温箱温度)是  $0^{\circ}\text{C}$  还是  $40^{\circ}\text{C}$ , 激光器的工作温度都能在  $10\text{ s}$  左右到达设定的工作温度  $25^{\circ}\text{C}$  并保持稳定, 因此半导体制冷片 TEC 具备双向控温的能力, 且半导体激光器的工作温度能够快速到达设定的工作温度。

实际应用中, 半导体激光器搭载的系统的工作时间往往较长, 因此, 为了评价温度控制的稳定性, 在室温环境下, 将半导体激光器的输出光功率设为  $500\text{ mW}$  并连续工作  $2\text{ h}$ 。图 11 为激光器连续工作  $2\text{ h}$  内每  $10\text{ min}$  的温度变化情况。当激光器的工作温度设定为  $20^{\circ}\text{C}$  和  $30^{\circ}\text{C}$  时, 激光器的工作温度精度可达  $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ , 如图 11(a) 和 11(c)。如图 11(b), 当激光器的工作温度设定为  $25^{\circ}\text{C}$  时,  $2\text{ h}$  内激光器的温度控制精

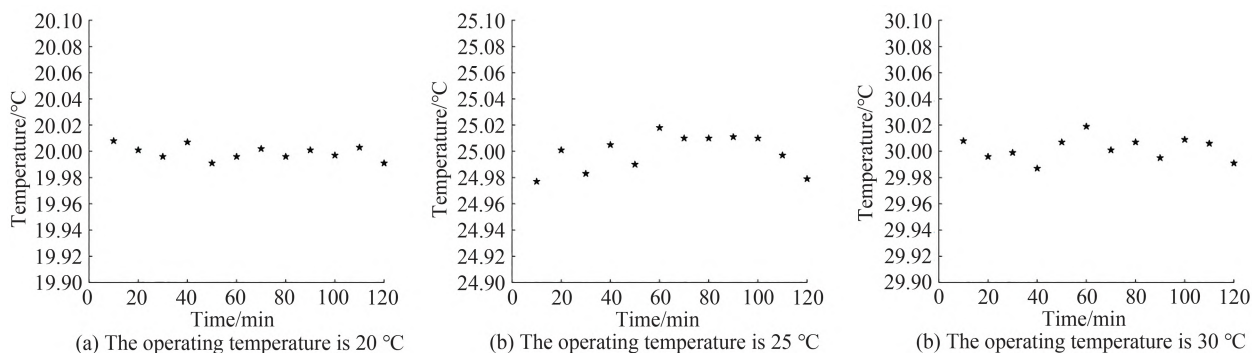


图 11 激光器的工作温度情况  
Fig. 11 Operating temperature of laser

度可达 $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,由式(7)可知温度的长期稳定度为0.18%。

$$\gamma = \frac{T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}}}{\bar{T}} \times 100\% = \frac{25.029 - 24.983}{25.00} \times 100\% = 0.18\% \quad (7)$$

式中, $T_{\text{MAX}}$ 和 $T_{\text{MIN}}$ 分别是实际测量温度的最大值和最小值, $\bar{T}$ 为实际测量温度的平均值。

综上所述,利用半导体激光器的温度控制可使激光器的实际工作温度达到预期的工作温度要求,并且能够进行双向快速控温。在激光器的最佳工作温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处,温度控制的精度为 $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,稳定度可达0.18%,具有较好的控制精度和稳定度。

#### 4.3 半导体激光器输出功率的稳定性分析

采用恒定电压功率控制方式可使半导体激光器的注入电流保持稳定,进而达到稳定输出功率的目的。为了确定该控制方式下半导体激光器输出功率的稳定性,分别在温箱环境和室内环境进行测试。

首先,将半导体激光器及其驱动控制系统放入温箱内进行测试,利用光功率计实时测量激光器的输出功率情况。

当温箱的温度分别为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种恒温情况时,半导体激光器输出功率分别设定为 $20\text{ mW}$ 和 $500\text{ mW}$ ,连续工作 $1\text{ h}$ 的实际输出光功率情况如图12。由图12可知,温箱环境温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,激光器的输出功率在 $20\text{ mW} \pm 0.5\text{ mW}$ 的范围内波动;当温箱环境温度升至 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,激光器的输出功率在 $505\text{ mW}$ 至 $506\text{ mW}$ 之间。

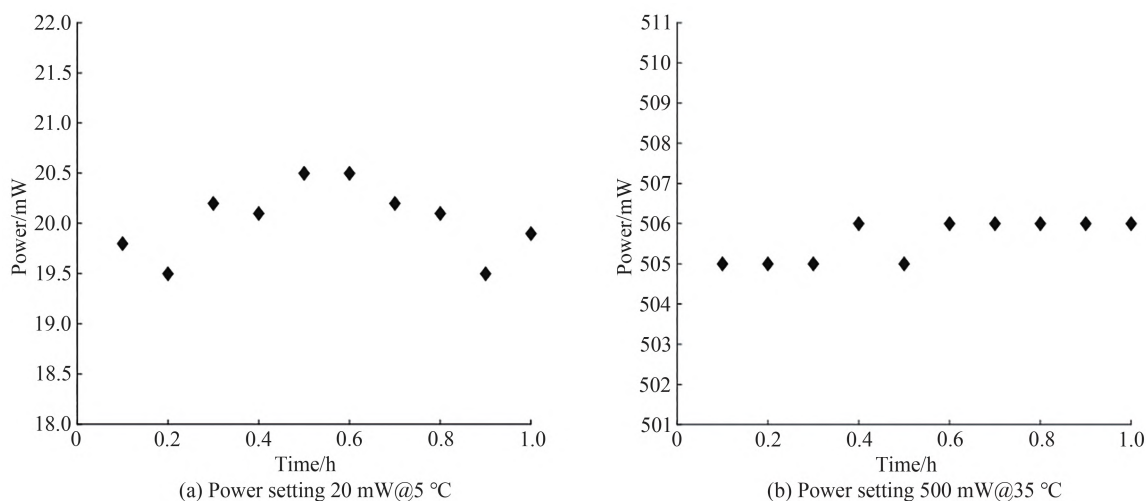


图 12 半导体激光器输出功率的稳定性  
Fig. 12 Stability of output power of semiconductor lasers

其次,为确定半导体激光器及其驱动控制系统在不同温度情况下的功率稳定性,将半导体激光器的输出功率设定为 $250\text{ mW}$ ,并将温箱的温度分别设为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三种恒温情况,当激光器工作稳定后监测激光器的实际输出光功率情况。图13为激光器连续工作 $1\text{ h}$ 的输出光功率情况。由图13可知,温箱温度



恒定在 20 ℃ 时,激光器实际输出光功率为  $250 \text{ mW} \pm 1 \text{ mW}$ ;当温箱温度恒定在 5 ℃ 和 35 ℃ 时,激光器的实际输出功率会偏离设定功率值约 4 mW,但光功率的波动范围依然在  $\pm 1 \text{ mW}$  以内。

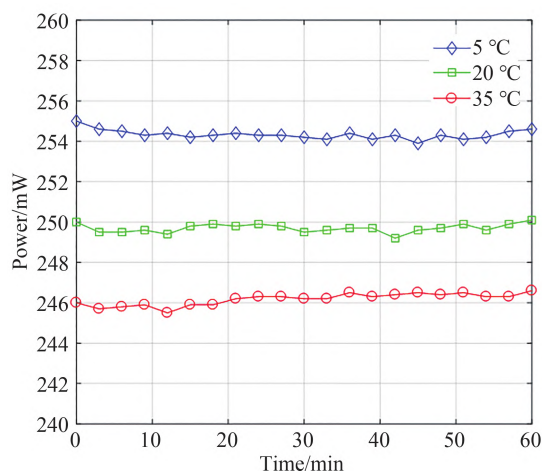


图 13 5 ℃、20 ℃ 和 35 ℃ 时半导体激光器输出光功率

Fig. 13 Output power of semiconductor laser at 5 ℃, 20 ℃ and 35 ℃

半导体激光器的功率控制方式包括定电压控制方式和定功率控制方式两种,半导体激光器原有的功率稳定性控制是采用定功率方式进行的,为了进一步提高该激光器输出功率的稳定性,采用定电压控制方式通过增量式 PID 算法加以控制。在室内环境下,将半导体激光器的功率稳定性控制方式分别设为定电压控制方式和定功率控制方式,依次设定激光器的输出功率为 20 mW、250 mW 和 500 mW,并用光功率计实时监测其输出功率情况。图 14 是两种控制方式下的半导体激光器输出功率情况,当设定功率为 20 mW、250 mW 和 500 mW 时,较原有的定功率控制方式而言,采用定电压控制方式可获得稳定性更高的输出功率特性,激光器 1 h 内的输出功率波动均小于  $\pm 2 \text{ mW}$ 。在对半导体激光器输出功率进行控制时,定功率控制方式是借助光电探测器对激光器进行实时探测进而实现对激光器输出功率稳定性的反馈控制。然而,光电探测器是温度敏感性元件,其工作特性随工作环境温度发生变化。因此,在激光器功率稳定性控制方面,定功率控制方式存在不足。

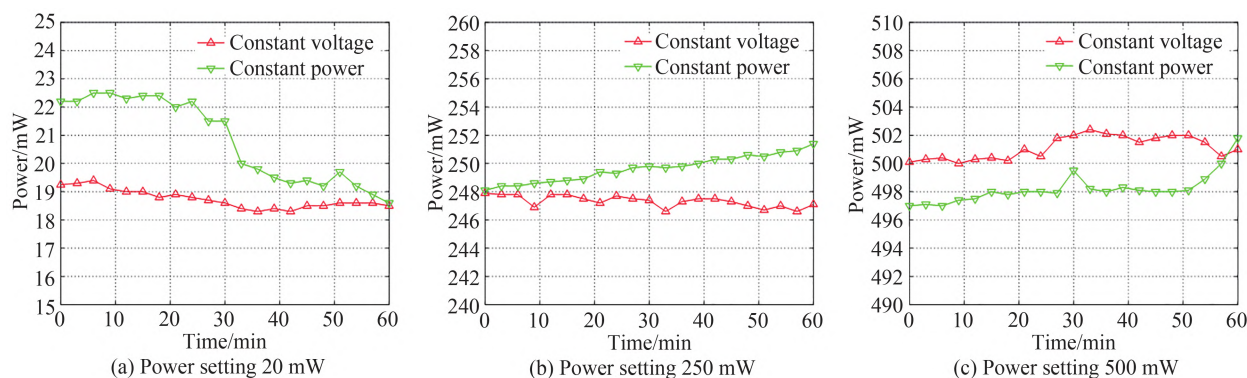


图 14 定电压控制方式和定功率控制方式下的半导体激光器输出光功率

Fig. 14 Output power under the constant voltage control mode and the constant power control mode

#### 4.4 半导体激光器中心波长的稳定性分析

激光器的腔长、工作温度、注入电流等因素会直接影响半导体激光器的中心波长,通过控制激光器的工作温度和注入电流的稳定性可在一定程度上稳定中心波长,有利于半导体激光器的可靠应用。

在对半导体激光器进行工作温度控制和输出功率控制之后,将激光器的输出功率设定为 200 mW、工作温度设定为 25 ℃,然后将其输出端连接至光谱仪。在激光器连续工作的 2 h 内,每隔 5 min 测量一次激光器的中心波长。图 15(a)为采用定电压控制方式得到的半导体激光器中心波长漂移情况,2 h 内激光中心波长的

在 785.122 5 nm 到 785.13 nm 之间漂移,波动范围约为 0.007 5 nm;图 15(b)为原有的定功率控制方式下的激光中心波长漂移情况,2 h 内中心波长的波动范围约为 0.01 nm。因此,采用定电压控制方式不仅能够获得较好的激光输出功率稳定性,同时,在激光中心波长控制方面也具有较好的效果。

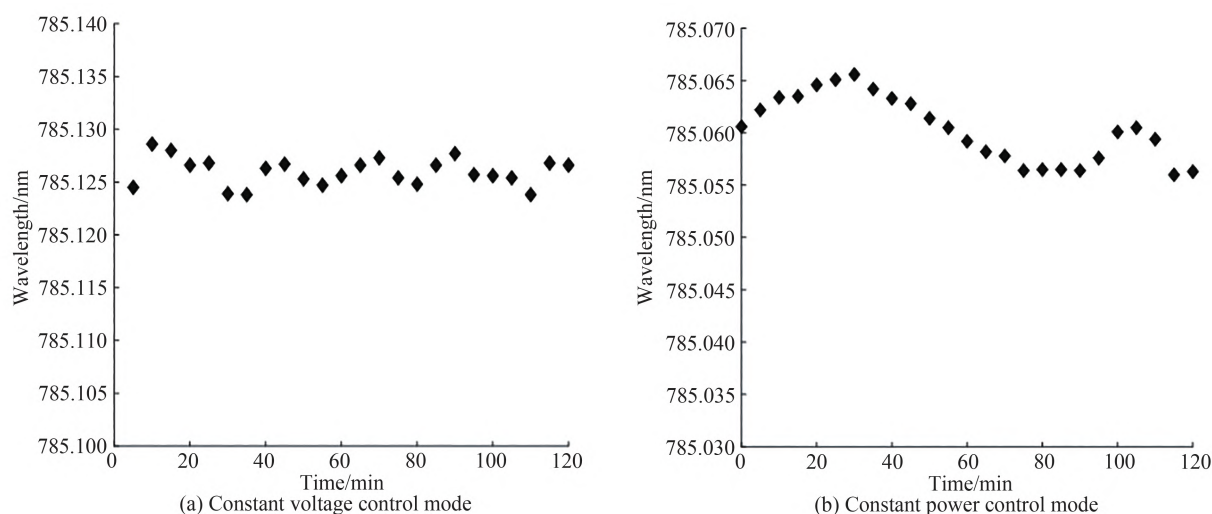


图 15 定电压控制方式和定功率控制方式的激光中心波长  
Fig. 15 Center wavelength under constant voltage control mode and constant power control mode

## 5 结论

本文采用 STM32 控制器设计实现了小功率半导体激光器温度和功率稳定性控制。当工作环境温度为  $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$  时,基于 PID 算法设计的 H 桥芯片驱动 TEC 温控模块,能够让激光器在 10 s 左右达到最佳工作温度 ( $25^{\circ}\text{C}$ ),2 h 连续工作情况下激光器的工作温度控制精度在  $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ 。在功率稳定性方面,采用定电压的功率控制方式,通过恒流源和 PID 算法校正双环控制功率,激光器输出光功率都能稳定在  $\pm 2\text{ mW}$  内。本文经过理论和实验研究,实现了对激光器温度和功率的快速、稳定控制,并减少了外围器件的使用,节约了设计空间和实现成本,具有较强的工程应用前景。

## 参考文献

- [1] CHEN Lianghui, YANG Guowen, LIU Yuxian. Research progress of semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.  
陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.
- [2] SONG Yunfei, WANG Zhenfu, LI Te, et al. Efficiency analysis of 808 nm laser diode array under different operating temperatures [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66 (10): 112-117.  
宋云菲, 王贞福, 李特, 等. 808 nm 半导体激光芯片电光转换效率的温度特性机理研究[J]. 物理学报, 2017, 66 (10): 112-117.
- [3] ZHANG Shuhong, YUN Enxue, YANG Tao, et al. Study on power stability of semiconductor laser for atomic clock [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9): 0914002.  
张树宏, 云恩学, 杨涛, 等. 用于原子钟的半导体激光器功率稳定研究[J]. 光子学报, 2021, 50(9): 0914002.
- [4] HUANG Jiayao, SHANG Lin, MA Shufang, et al. Research progress of factors affecting the output power of semiconductor lasers [J]. Materials China, 2021, 40(3): 218-224.  
黄佳瑶, 尚林, 马淑芳, 等. 半导体激光器输出功率影响因素的研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(3): 218-224.
- [5] GUO Qian, ZHU Yaolin, ZHU Lei, et al. Research on power control system of semiconductor laser [J]. Modern Electronic Technology, 2018, 41(18): 147-149.  
郭倩, 朱耀麟, 朱磊, 等. 半导体激光器功率控制系统的研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(18): 147-149.
- [6] XUE Meng, HUANG Fei, JIA Shida, et al. Design of high stability semiconductor laser driver system based on STM32 [J]. Software Guide, 2020, 19(9): 105-109.  
薛萌, 黄斐, 贾仕达, 等. 基于 STM32 的高稳定性半导体激光器驱动系统设计[J]. 软件导刊, 2020, 19(9): 105-109.
- [7] LUO Liang, HU Jiacheng, WANG Chanyuan, et al. Design of high precision semiconductor laser driver and temperature control circuit [J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 200-204.

- 罗亮,胡佳成,王婵媛,等.高精度半导体激光器驱动电源及温控电路设计[J].激光技术,2017,41(2):200-204.
- [8] 范桂东.半导体激光器功率控制系统研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [9] WANG X, WENMIN X U, ZHANG J, et al. Design of chaotic laser driver and temperature control circuit based on ADN8810 and ADN8835[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 37(4): 408-416.
- [10] DU Jianyan, ZHAO Yiqiang, YE Mao, et al. Research on the driving circuit of narrow pulse and large current semiconductor laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(1): 0114008.
- 杜建艳,赵毅强,叶茂,等.窄脉宽大电流半导体激光器驱动电路研究[J].激光与光电子学进展,2022,59(1):0114008.
- [11] MA Xiaoming, ZHANG Zhili, LIU Chunping, et al. Design of semiconductor laser driver circuit [J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(7): 1-4.
- 马晓明,张志利,刘春平,等.半导体激光器驱动电路的设计[J].光通信技术,2021,45(7):1-4.
- [12] YUAN Linchen, JIANG Shubo, SONG Xianglong, et al. Research and design of semiconductor laser driver circuit [J]. Journal of Electron Devices, 2015, 38(6): 1287-1291.
- 袁林成,蒋书波,宋相龙,等.半导体激光器驱动电路的研究与设计[J].电子器件,2015,38(6):1287-1291.
- [13] LIU Lifei, LV Weixing, WU Chao, et al. Constant temperature control system for TEC and PID [J]. Computer Measurement and Control, 2022, 30(2): 137-144.
- 刘丽飞,吕卫星,武超,等.于TEC和PID的恒温控制系统[J].计算机测量与控制,2022,30(2):137-144.
- [14] 周根弟.高稳定度激光光源温度控制算法研究和实现[D].北京:北京邮电大学,2019.
- [15] ZHANG Andi, ZHANG Yanrong, LI Tao. Application of fuzzy PID control with variable universe in semiconductor laser temperature control system [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214003.
- 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.
- [16] 胡晚屏.半导体制冷器温控系统的设计[D].武汉:武汉科技大学,2019.
- [17] JIA F X, DING Z L. Temperature control system supplied by pulse-drive current for laser range finder[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2128-2135.
- [18] SONG L J, MAZUMDER J. Feedback control of melt pool temperature during laser cladding process [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(6): 1349-1356.

## Output Power and Temperature Stability of Semiconductor Laser Based on STM32

XIA Zhichang<sup>1</sup>, YU Yongai<sup>2</sup>, SHANG Jianhua<sup>1</sup>

(1 School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(2 Shanghai Oceanhood Opto-electronics Tech Co. Ltd, Shanghai 201206, China)

**Abstract:** With the continuous development of laser technology, semiconductor lasers have made rapid progress in many aspects, such as electro-optical conversion efficiency and output optical power. Because of their small size, high efficiency, low cost, and easy integration with related devices, they are widely used in laser radar, optical sensor detection, beauty, industrial processing and other fields. The central wavelength and output power of semiconductor lasers are easily affected by the driving current and operating temperature. Because the excitation mode of semiconductor laser is direct electrical injection, the stability of injection current directly affects the central wavelength and output power of semiconductor laser. In the process of electro-optical conversion, due to non-radiative composite loss, free carrier absorption and other loss mechanisms, a part of the injected current is inevitably converted into heat. When the working temperature of the laser increases, the reduction of the external differential quantum efficiency and the increase of the threshold current can lead to the reduction of the output power of the semiconductor laser. Temperature rise can also lead to changes in the refractive index and band gap of the semiconductor laser material, thus changing the size of the resonator, and finally the central wavelength of the semiconductor laser will shift red. In addition, the service life of semiconductor laser will be greatly reduced if it works in a high temperature environment for a long time. Excessive temperature rise may reduce the service life by an order of magnitude. In order to solve the problem of driving current and working

temperature stability, and to obtain accurate, stable and reliable detection results, a STM32 based medium and low power semiconductor laser driving power supply and temperature control system is designed. The traditional laser power control method is the constant power control based on the photoelectric feedback principle. Due to the serious temperature drift of the photoelectric detector, the power control effect is poor. Traditional laser temperature control uses an integrated semiconductor cooling chip to drive the chip. The circuit is complex and the adjustment time is long. The power control of this design adopts constant voltage control mode. The driving power supply uses a deep negative feedback circuit, and forms a double closed-loop power control with software PID, avoiding the use of photoelectric detectors, which has better power stability in comparison. An H-bridge driving chip and PID algorithm are used to control the temperature of the semiconductor laser. The experimental results show that the driving current stability of this design is excellent, with a stability of about 0.3%, and an accuracy of 0.86%; the temperature adjustment speed is fast, the control accuracy of long-term working temperature is  $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the stability can reach 0.18%; the output power of the laser is stable within  $\pm 2\text{ mW}$ ; the fluctuation range of the central wavelength of the laser is 0.007 5 nm. The power and wavelength under the constant power control mode are also tested. The experimental results show that the power and wavelength under the constant voltage control mode are more stable than that under the constant power control mode. The drive system integrates power control and temperature control, which can meet the working requirements of the laser and can be applied to the same type of semiconductor lasers.

**Key words:** Semiconductor laser; Power control; Temperature control; Proportion integration differentiation; STM32

**OCIS Codes:** 140.3320; 140.3425; 280.6780