

基于温度电流双反馈的半导体激光驱动器设计

肖毅恒, 杜功志, 候华毅

武汉工程大学光电信息与能源工程学院、数理学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年1月1日; 录用日期: 2026年1月27日; 发布日期: 2026年2月4日

摘要

近年来半导体激光驱动技术日益成熟, 激光器已在特定领域, 例如光电传感、量子探测等行业中均有良好运用。现有恒功率控制主要通过调节电流或者温度分别实现, 但由于缺乏协同分析, 稳定能力有限, 可能导致输出功率、光束质量等发生变化。为提升半导体激光器的稳定性, 本文设计了一种电流与温度双反馈控制的驱动系统。该系统采用ADN2830芯片实现精密电流控制, 结合MAX1978芯片构建温度调节回路, 并通过STM32F103主控进行协同管理。测试结果表明, 工作温度波动控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内, 输出光功率稳定性变化不超过1%, 为小功率半导体激光器提供了高可靠性驱动解决方案。

关键词

半导体激光器, 恒温控制, 温度电流双反馈

Design of Semiconductor Laser Driver Based on Temperature Current Dual Feedback

Yiheng Xiao, Gongzhi Du, Huayi Hou

School of Optical Information and Energy Engineering, School of Mathematics and Physics, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: January 1, 2026; accepted: January 27, 2026; published: February 4, 2026

Abstract

In recent years, semiconductor laser driving technology has become increasingly mature, and lasers have been well applied in specific fields such as optoelectronic sensing, quantum detection, and

文章引用: 肖毅恒, 杜功志, 候华毅. 基于温度电流双反馈的半导体激光驱动器设计[J]. 应用物理, 2026, 16(2): 81-92.
DOI: [10.12677/app.2026.162008](https://doi.org/10.12677/app.2026.162008)

other industries. The existing constant power control is mainly achieved by adjusting the current or temperature separately, but due to the lack of collaborative analysis, its stability is limited, which may lead to changes in output power and beam quality. To improve the stability of semiconductor lasers, this paper designs a driving system with dual feedback control of current and temperature. The system uses ADN2830 chip to achieve precision current control, combined with MAX1978 chip to construct a temperature regulation circuit, and coordinated management through STM32F103 main control. The test results show that the operating temperature fluctuation is controlled within $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, and the stability of the output optical power does not change by more than 1%, providing a highly reliable driving solution for low-power semiconductor lasers.

Keywords

Semiconductor Laser, Constant Temperature Control, Temperature Current Dual Feedback

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光器由于与其他电子器件的高度兼容性和集成应用性等特点而逐渐成为当前信息电子技术的发展关键[1] [2]，其中，半导体激光器的制造工艺和驱动技术起着十分重要的作用[3] [4]。在当代应用中，半导体激光器的覆盖波长范围广，从几百纳米到上千纳米的波长覆盖，涉及紫外、可见光、红外、微波等波段，因而半导体激光器在诸多领域被广泛应用[5] [6]。

最初的激光器为同质结注入型半导体激光器，在第一阶段的发展可以追溯于上世纪 60 年代[7]，1962 年，海尔制成世界上第一台半导体激光器[8]，尽管该型半导体激光器存在诸多缺点，甚至连正常的工作也必须在超低温环境下，但是它对后世其他半导体激光器的发展提供了坚实的理论基础[9] [10]，往后发展至第二阶段单质结注入型激光器，到第三阶段双异质结注入型激光器，直到如今的已包含了体积小、寿命长、效率高及成本低等显著优势，广泛应用于光通信[11] [12]、传感[13] [14]、医疗与工业计量领域，但是激光器却具有显著的温度敏感性，属于温度敏感器件，当温度发生变化的时候，激光器的阈值电流也会发生变化，电流的变化会导致激光器的功率也同样发生变化，导致输出产生变化，甚至会影响器件的寿命[15]。

传统的 LD 驱动电路在温度环境产生变化的情况下，为了保证在宽温度范围内激光器输出功率的稳定性，本文所设计的驱动电路采用芯片 ADN2830 和 MAX1978 为关键器件，设计温度反馈控制系统，再经过比例 - 积分 - 微分控制[16]补偿电路通过生成控制信号，精准调控半导体制冷驱动电流的大小与方向，从而提升了输出功率的稳定性与激光器的使用寿命。

2. 半导体激光驱动器系统设计框架

本项目旨在研发一种集驱动、温控与智能监控于一体的高精度半导体激光器控制系统，以解决因电流与温度波动导致的激光输出不稳定性问题。如图 1 所示，系统基于高性能嵌入式处理器构建硬件平台，通过双闭环控制逻辑实现精确调控：一是采用高精度数模转换与恒流源电路稳定注入电流；二是通过温度传感器反馈与先进控制算法动态调节半导体制冷器功率，将工作温度稳定在极窄区间。最终打造出一个性能优异的高稳定性激光驱动器原型。

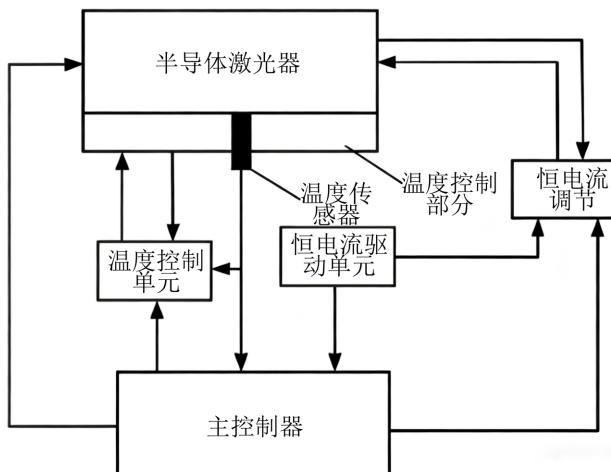


Figure 1. Schematic diagram of semiconductor laser driver system based on temperature and current dual feedback
图 1. 基于温度及电流双反馈的半导体激光驱动器系统示意图

3. 系统组成以及驱动器的电路设计

本项目设计并实现了一种以 STM32 微控制器为核心的高精度、智能化半导体激光器驱动与温度控制系统。该系统集成了高稳定恒流源、数字 PID 温度控制、多通道状态监测以及远程人机交互等功能，旨在为半导体激光器提供纯净、稳定的工作环境，确保其输出光功率的长期可靠性。

3.1. 硬件选型

基于温度电流双反馈的激光驱动器的硬件部分由多种模块共同构成，系统的整体硬件架构使用规范化设计，采用 4 层 PCB 板以实现优异的信号完整性与电源完整性。以下将围绕实现上述功能的硬件选型以及电路设计进行阐述和分析。

(1) 主控选型：本项目核心需求包括稳定的控制效果、多路模拟量的实时采集，以及支持串口屏和上位机的人机交互，初步计划从对 STM32、ESP32、STC 系列及瑞芯微系列选择，下表 1 列举了各个主控之间的优缺点：

Table 1. Advantages and disadvantages of different main controller types
表 1. 不同主控选型的优缺点

| 主控选择 | 主控优点 | 主控缺点 |
|--------|---|--------------------------------|
| ESP32 | 优点在于集成 Wi-Fi 和蓝牙，便于直接实现物联网功能，双核处理器，主频高。 | 主要缺点是 ADC 精度和线性度较低，可能影响采样精度。 |
| STC 系列 | 具有极低的成本，在价格敏感型应用中有巨大优势，并且简单易用。 | STC 系列的性能较弱，并且缺乏高精度 ADC 等关键外设。 |
| 瑞芯微系列 | 具有极致的性能，可以运行高级操作系统，可处理极其复杂的应用。 | 运行非实时操作系统，其性能对项目的需求来说严重溢出。 |

STM32 系列性能均衡，该芯片有较高的主频与较强的计算能力，能高效运行各种算法，能够很好的满足匹配数据采集，传输与处理的功能，中断响应快，适合硬实时控制任务，故选择 STM32F103C8T6 作为项目主控。

(2) 电流驱动选型：本项目核心目标之一是为半导体激光器提供高稳定度、低噪声的注入电流。电流

的稳定性直接决定了激光器输出光功率的稳定性，对于集成控制芯片方案，这种选择的劣势是成本相对较高，电路的功能主要由芯片决定[17]，定制化空间小于分立方案，但是集成芯片内部有专门的功率控制电路和精确的反馈监控电路，可以提供极低的电流噪声和极高的电源抑制比，从根源上保证了电流的稳定性和纯净[18]，故选用 ADN2830 芯片。

(3) 温度控制驱动选型：为稳定激光器外部影响因素，温度控制回路必不可少，实现这一高精度温控的核心执行机构是半导体制冷器(Thermoelectric cooler, TEC)，而 TEC 驱动方式的性能直接决定了温控环路的速度、精度和效率。高性能集成 TEC 控制器 MAX1978 的核心优势在于高度集成，它单芯片集成了 H 桥驱动器、PID 补偿器、高精度 ADC，并提供强大的驱动能力，足以满足 TEC 的电流需求。此外，其内置的电流保护与监控功能进一步增强了系统的可靠性，本项目最终选用 MAX1978 芯片实现温度控制。

(4) 硬件外设选型：测温模块方面选用 NTC 电阻，该电阻有超高灵敏度，在窄温区(如 0~50°C)内，其电阻变化率远高于 RTD 和热电偶，易于测量微小的温度变化，同时元件本身及配套电路成本极低，封装形式多样，易于与激光器热沉实现良好热耦合，NTC 电阻实物如下图 2 所示：

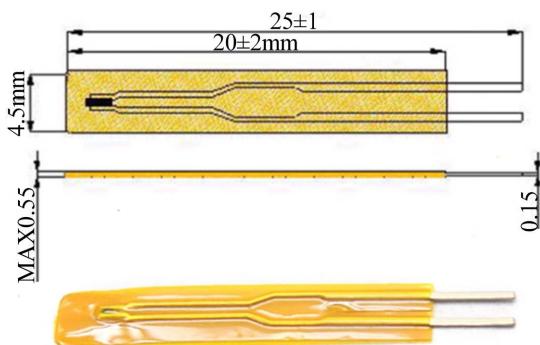


Figure 2. Physical picture of NTC resistor
图 2. NTC 电阻实物图

激光器方面选用索尼的 SLD231VL，是一款铝镓砷量子阱结构的高功率激光二极管，封装于 5.6 mm 的标准组件内，并集成了一只用于光功率监控的 PIN 光电二极管，典型输出光功率为 35 mW，波长为 790 nm，输出功率属于中等功率水平，这一功率大小既可以避免低功率激光器信号微弱的问题，也避免了高功率激光器带来的过高的散热，综上所述适合本项目，激光二级管实物图如图 3 所示：



Figure 3. Physical picture of laser diode
图 3. 激光二级管实物图

温度调控模块：选用 TEC 制冷片有着精密双向控温的能力，可以通过改变电流方向实现制冷或者加热，精确度更高，噪声小，寿命长，片状的外型可以直接贴合散热设备，有利于提升散热效率。散热模块

使用全金属散热底座，全面贴合激光器的外型，将激光器的散热面积扩大数倍。

3.2. 供电电路设计

供电电路设计基于效率与噪声的权衡，采用了叠加低压差线性稳压器的方案，为模拟与数字电路分别提供洁净的电源轨。

主电源负责将外部输入的宽范围直流电压(12~20 V)进行降压，转换为一个中间电压 5 V。此阶段追求高效率以处理 TEC 控制等大电流负载带来的总功耗，并减少系统发热。本阶段使用的芯片为 LM1084S-5.0 这款正电压输出线性稳压电路，满足 TEC 驱动芯片的电流以及电压要求，LM1084 芯片内部有过热保护和限流电路，原理图电路如图 4 所示：

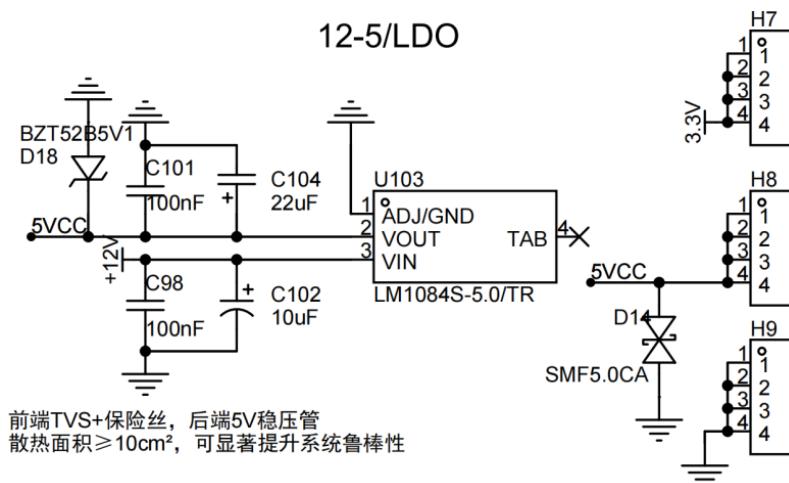


Figure 4. 12 V to 5 V LDO level conversion circuit
图 4. 12 V 转 5 V LDO 电平转换电路

二级电源部分负责将上级输出的 5 V 电压进行降压，获取更低的电压适配单片机和激光驱动芯片，此部分使用的芯片为 AMS1117，设计目标是提供高达 1 A 的输出电流，且能在输入输出压差低至 1 V 的条件下工作，电路的原理图如图 5 所示：

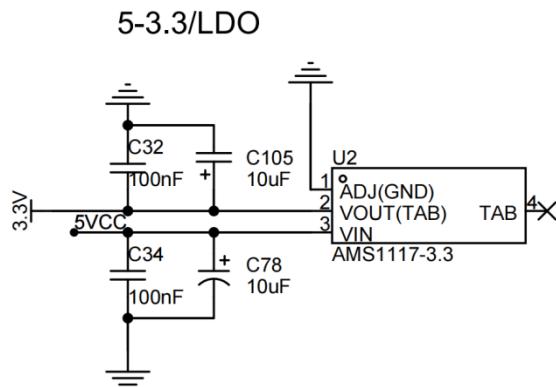


Figure 5. 5 V to 3.3 V level conversion circuit
图 5. 5 V 转 3.3 V 电平转换电路

输入网络从前级引入电源至 VIN 引脚，紧贴 VIN 引脚使用电容并联的方式，大电容缓冲电压波动，

小电容滤除高频噪声。芯片的 VOUT 引脚输出稳定的 3.3 V 电压，并联钽电容到地，以进一步优化负载瞬态响应并降低输出纹波。

3.3. 电流驱动电路设计

ADN2830 主要引脚有电源以及地引脚，激光偏置引脚、电流调节引脚、监控二极管引脚、故障标志引脚，使能控制引脚等。原理图绘制如下图 6：

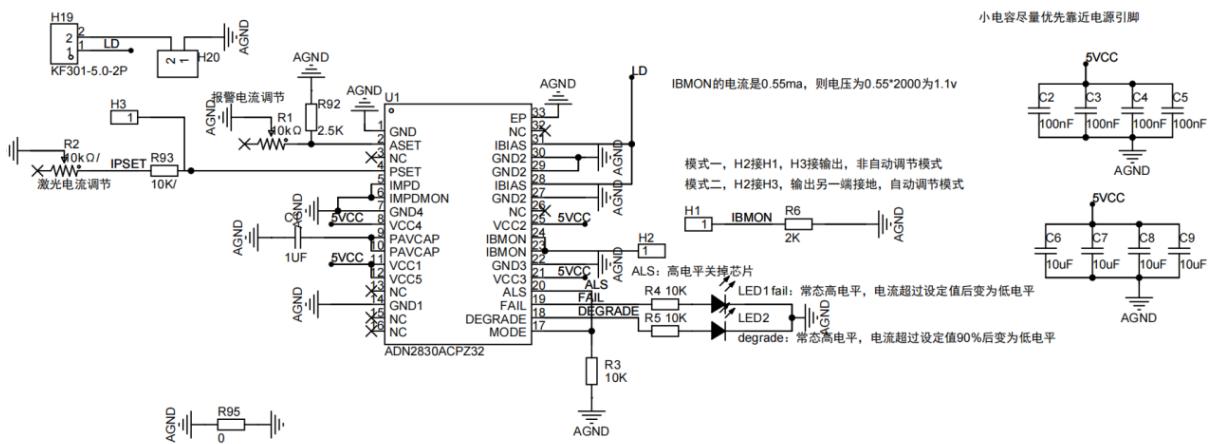


Figure 6. ADN2830 laser driver module circuit

图 6. ADN2830 激光驱动模块电路

模式一的情况下使用非自动调节模式，LD 端输出一个固定的电流值，此时 PD 端直接接地，模式二的情况下使用自动调节模式，此时芯片会根据 PD 端的返回值来调节 LD 端的输出值，此时 PD 端的输出连接到 IBMON 引脚。

电流调节引脚用来设定最后输出的电流值，需要外接一个精密电位器，偏置电流计算公式为

$$R_{PSET} = \frac{1.23V}{I_{AV}}.$$

最终的输出电流跟外接电位器的阻值反相关，并且为外接电阻预留焊盘，以获得更高的调控空间，同时串联额外限流电阻用来限定输出电流的大小。

监控二极管引脚 IBMON 是激光二级管 PD 端的输入引脚，在模式一非自动调节模式下直接与输出监测引脚 PSET 相连接，成为系统内反馈，在模式二自动调节模式下，与外部激光器 PD 引脚连接，检测激光器的反馈电流，由此调节输出端的输出电流。

3.4. 温度控制电路设计

温度控制芯片选用 MAX1978，主要引脚有 TEC 控制引脚，温度采样引脚，PID 补偿引脚，电流检测引脚等，电路原理图如图 7 所示。

为承受大电流，TEC 驱动引脚的 PCB 走线采用了加宽铺铜的设计，关键输出口使用双面走线，增大电流承受能力，同时使用开尔文连接法连接采样电阻，读取输出的电流值。温度采样引脚采用电压分压的方式，获取当前温度与设定温度的差值[19]。REF 引脚连接了 TEC 限流网络，可以控制 TEC 的最大电流值，根据实际情况将电流限制在了 1.5 A。

比例 - 积分 - 微分控制(Proportional Integral Differential, PID)控制是一种传统的控制方法，MAX1978 所使用的 PID 补偿电路如图 8 所示。

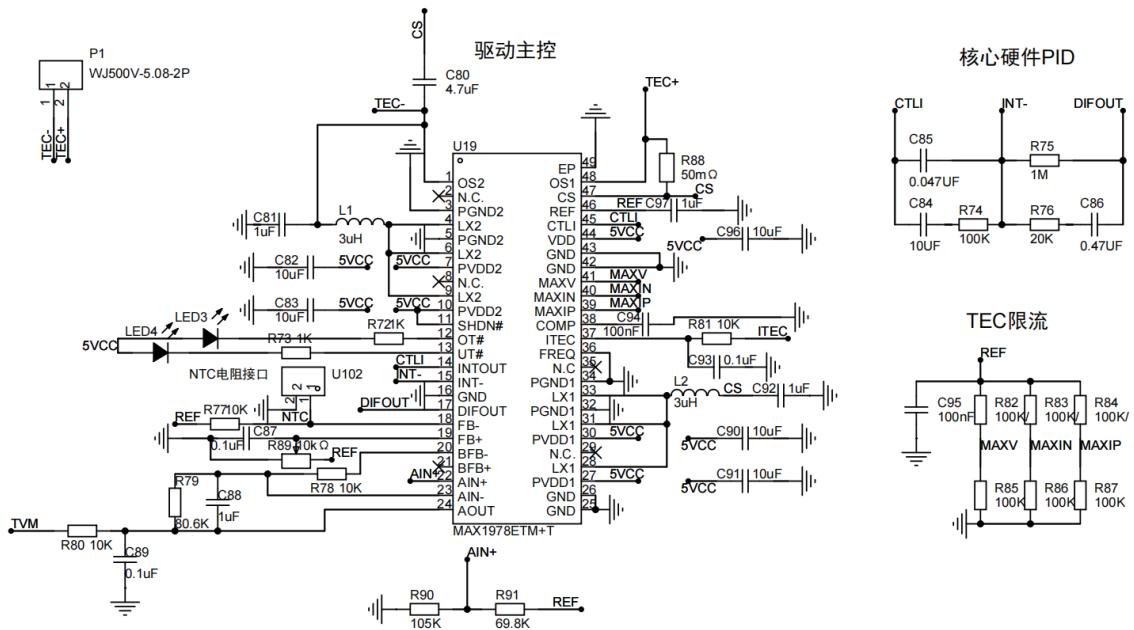


Figure 7. MAX1978 temperature control module circuit
图 7. MAX1978 温度控制模块电路

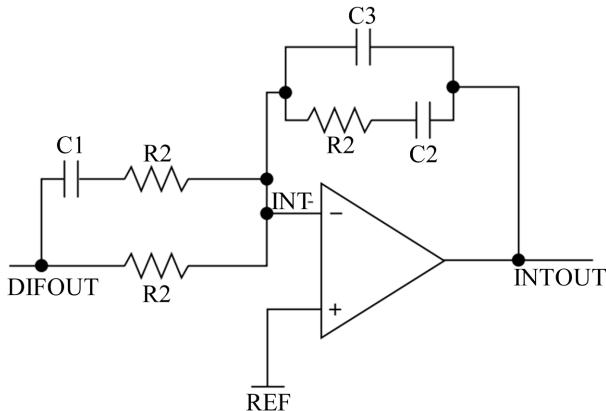


Figure 8. MAX1978 Chip PID compensation circuit
图 8. MAX1978 芯片 PID 补偿电路

这种电路叫做三型补偿网络,该控制电路与标准PID控制电路有所不同,增添了一个额外的电阻R1,起到限制电流的效果,同时增添一个额外的电容C3用于补偿相位,两者相互作用提升PID算法的可靠性。同时电路原本PID参数由的电阻电容的比例来进行确定,其中C1、C2、R2、R3是确定系数的关键元器件,其中比例增益系数(K_p),积分增益系数(K_i),微分增益系数(K_d)如下:

$$K_p = \frac{R3}{R2} + \frac{C1}{C2}$$

$$K_i = \frac{1}{R2 \cdot C2}$$

$$K_d = R3 \cdot C1$$

由此进行推导可得PID温度补偿电路的传递函数如下:

$$G(s) = \frac{R1+R2}{R1 \cdot R2 \cdot C3} \cdot \frac{(S+z1)(S+z2)}{S \cdot (S+p1)(S+p2)}$$

其中零点 $z1$ 、 $z2$ 与极点 $p1$ 、 $p2$ 的关系为:

$$z1 = \frac{1}{R3 \cdot C2}$$

$$z2 = \frac{1}{(R1+R2) \cdot C1}$$

$$p1 = \frac{1}{R1 \cdot C1}$$

$$p2 = \frac{C2+C3}{R3 \cdot C2 \cdot C3}$$

这样此类传递函数有两个负实零点、两个负实极点和一个位于原点的绩点, PID 补偿电路从控制效果上讲, 增加的零点引入了超前相位, 相当于增加了微分作用, 增加的绩点引入了滞后相位, 相当于增加了积分作用[20]。

PID 补偿引脚是最为关键的部分, 该芯片的 PID 补偿电路内部集成了一个精密的运算放大电路, 与 INTOUT 引脚、INT-引脚、DIFOUT 引脚组成了一个运算控制网络, 利用其中的电阻与电容的数值来模拟比例、积分、微分的设定, 具体方法如下:

- 1、短路 $C2$, 开路 $C1$, 电阻 $R2$ 和 $R3$ 构成比例网络, 增加 $R3$ 和 $R2$ 的比例, 从而增加增益至 TEC 两端的电压出现振荡, 然后将 $R3$ 和 $R2$ 的比例减小至原来的一半;
- 2、串入 $C2$ 电容, 并逐渐下调电容容值直至 TEC 两端的电压出现振荡, 然后将 $C2$ 的电容值增加 1 倍;
- 3、短路电阻 $R1$ 并增加电容 $C1$ 的容值直至 TEC 两端的电压出现振荡, 重新接入 $R1$, 并增加 $R1$ 阻值直至 TEC 两端的电压稳定;
- 4、调节温度设定的电压值改变 TEC 两端电压的稳定时间, 最后接入反馈电容 $C3$, 反馈电容 $C3$ 在不增加稳定时间的前提下可以提高系统的稳定性能, 常规 TEC 的伯德图如图 9 所示。

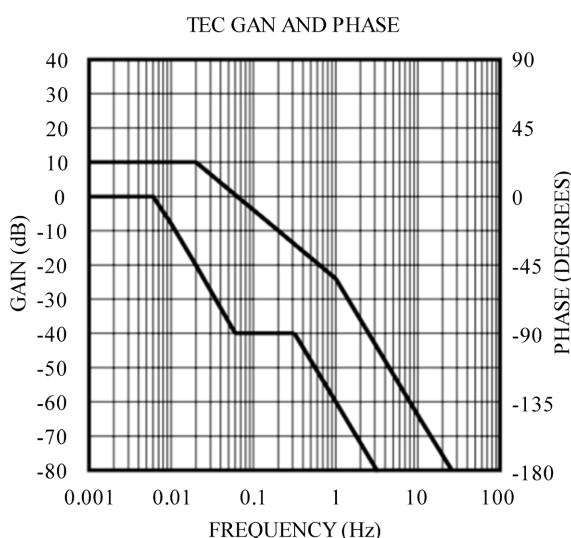


Figure 9. Bode plot of a generic TEC module

图 9. 常规 TEC 伯德图

根据伯德图确定的极点以及实际的测试结果和手上有相对应的元件规格的情况选择最终合适的元件数值为 $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ 、 $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ 、 $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ 、 $C_1 = 0.47 \text{ }\mu\text{F}$ 、 $C_2 = 10 \text{ }\mu\text{F}$ 、 $C_3 = 0.047 \text{ }\mu\text{F}$ 。

3.5. 主控电路设计

核心控制部分，使用 STM32 作为主控通过精密 ADC 实时采集激光器工作温度、驱动电流等数据，其原理图如图 10 所示：

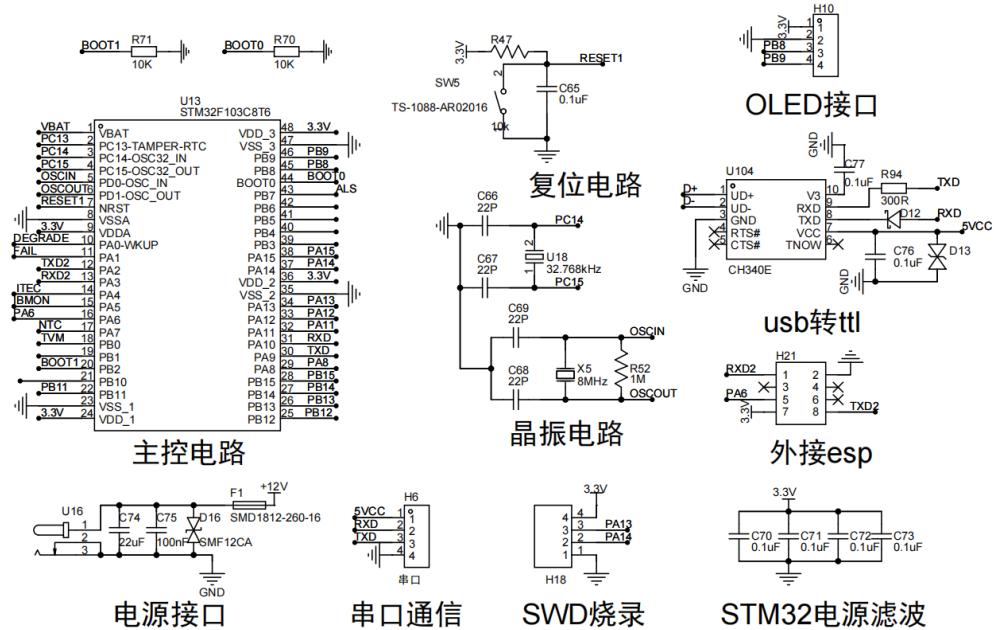


Figure 10. STM32F103C8T6 and its peripheral circuits

图 10. STM32F103C8T6 及其外围电路

本系统中选用 STM32F103RCT6 芯片作为主控制器，该芯片及其外围电路包括时钟电路、复位电路和 BOOT 启动电路。该芯片的高速外部时钟可以使用一个 4~16 MHz 的晶体或者陶瓷谐振器构成的振荡器产生，本系统选用 8 MHz 的无源晶振，其负载电容 C_L 为 20 pF，杂散电容 C_{stray} 为 3 pF，通常旁路电容 C_{L1} 与 C_{L2} 具有相同的参数。现在有如下公式：

$$C_L = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_{stray}$$

通过计算确定两个旁路电容为 22 pF。该芯片电源引脚处并联电容以滤除高频噪声，确保微控制器获得稳定的电源供应，复位电路采样硬件式复位。

4. 系统的构建与测试

完成系统的硬件设计及软件设计后，搭建基于温度电流双反馈的激光驱动器硬件系统，电路板焊接实物图如图 11 所示。

首先进行静态安全检查，检查 PCB 是否短路，断路或者虚焊，使用万用表电阻测试端测量电源输入端的阻抗，检测的电阻阻值是否处于合理数值，表明不存在短路。

第二项测试为电源与激光电流驱动输出测试，对于静态电流与电压测试，不接激光负载，将电流设定为 35 mA，使用万用表的 200 mA 电流档位进行测量，输出结果误差不超过 1%。连接一个 50 Ω 电阻

作为模拟负载，串联测试电路，其误差同样不超过 1%，验证了电流输出精度。



Figure 11. Physical picture of circuit board soldering
图 11. 电路板焊接实物图

第三项测试为电流设定精度测试，分别设置电流为 10~70 mA 等多个点。使用电流表持续一小时测量负载电阻两端的电压，最终实际电流误差都不超过 1%，测量结果如表 2 所示：

Table 2. Actual output current values at different current settings
表 2. 不同设定电流时的实际输出电流值表

| 设定电流/mA | 电流平均/mA | 电流最小/mA | 电流最大/mA | 变化幅值/mA |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10.00 | 10.02 | 9.91 | 10.10 | 0.10 |
| 20.00 | 20.08 | 19.02 | 20.11 | 0.11 |
| 30.00 | 30.11 | 29.83 | 30.28 | 0.28 |
| 40.00 | 40.21 | 39.81 | 40.29 | 0.29 |
| 50.00 | 50.23 | 49.71 | 50.36 | 0.36 |
| 60.00 | 60.36 | 59.67 | 60.42 | 0.42 |
| 70.00 | 70.41 | 69.59 | 70.55 | 0.55 |

基于表 2 所示的系统化测试数据，本电流驱动系统在所有设定点均展现出优异的输出精度与稳定性，圆满达成了预设的测试目标。在 10~70 mA 的关键测试范围内，实际输出电流的平均值与设定值高度吻合，最大绝对偏差仅为 0.41 mA，其相对误差远低于 1% 的技术指标，具备卓越的抗干扰能力和闭环控制精度。

第四项将进行实际的温度调控测试，初始室温为 25°C，将目标温度设定为 30°C，分别观察一定时间有温度控制的系统与无温度控制的系统温度的变化，变化的结果如图 12 所示。

测试结果显示，在无温度调节的情况下，系统温度持续单调上升，当温度上升到超过限定温度的 1°C 后，触发单片机温度锁定控制效果，直接切断激光器的工作电流，温度此时缓缓下降，直至温度到达设定温度为止，在启用温度调节后，由于 TEC 也同时拥有制热特性，温度在初期因发热和制热的同时作用，上升的更快，但是系统持续对温度进行调节，但在达到约 30.5°C 的峰值后，系统存在短时间的过冲现象，随后稳定下来，将温度稳定在 30°C 附近。两条曲线对比证实，温度调节系统能够有效克服系统自发产热

带来的温漂，保证了设备的长期稳定运行。

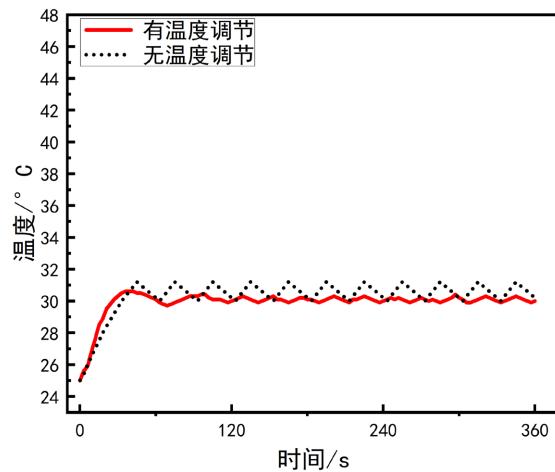


Figure 12. Temperature change curves with and without temperature regulation

图 12. 有无温度调节温度变化曲线

最后进行温度与光功率联动测试，同时启用光功率测量与温度调节模块，检测系统在有无温度调节的情况下功率变化情况：将目标温度设定为 25°C，使用光功率测试仪对有温度调节激光器的输出功率进行测量，记录功率数据，随后关闭系统，待其冷却至初始状态后，使用光功率计测量未启用温度控制条件下的激光器输出功率，记录功率数据，最终获得的数据如下图 13 所示：

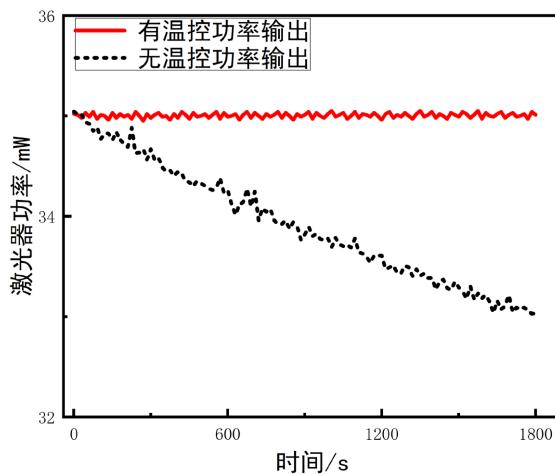


Figure 13. The variation curves of power output with and without temperature control

图 13. 有无温控功率输出变化曲线

在启用温度调节时，激光器输出功率在整个 1800 秒的测试周期内表现出极高的稳定性，波动极小，始终维持在约 35.1 W 的水平。相比之下，未启用温度控制时，输出功率随工作时间呈现显著的单调衰减趋势，从初始的 35.2 W 下降至约 33.8 W，衰减幅度达 1.4 W。结果表明，本系统所采用的温度控制能够有效控制温度变化，为实现激光器的高稳定性、长寿命工作提供了关键保障。

5. 总结与展望

本项目成功设计并实现了一套基于 STM32 的高精度、高稳定性半导体激光驱动器系统。在硬件设计

上, 本项目采用了高度集成的方案, 以 ADN2830 作为激光驱动核心, 实现了低噪声、高稳定度的恒流输出, 以 MAX1978 作为温度控制核心, 构建了快速响应的 PID 温控环路。主控单元 STM32 系列微处理器负责统筹管理, 形成了完整的闭环控制系统。在电流驱动性能上, 激光器注入电流稳定度误差不超过设定值的 1%, 温度控制性能上, 激光器工作温度的控制精度达到 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 光功率稳定性上, 在电流与温度双重精密控制的保障下, 输出光功率的稳定性误差不超过 1%。综上所述, 本项目成功解决了一定量的激光器驱动中的核心稳定性难题, 所研制的驱动器不仅性能优异, 更具备良好的可扩展性和可维护性, 为实际运用提供了可靠的硬件基础。

基金项目

安徽省生物医学光学仪器工程技术研究中心开放课题基金项目(2023BMP01)。

参考文献

- [1] 陈益航, 杨成奥, 王天放, 等. 中红外锑化物半导体激光器及异质集成技术研究进展[J]. 中国激光, 2025, 52(5): 175-188.
- [2] 胡怡然. 高功率低噪声半导体激光器驱动系统设计[D]: [硕士学位论文]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2024.
- [3] 卢志豪, 王国政, 樊书瑞, 等. 基于 FPGA 的半导体激光器驱动系统设计[J]. 光电子技术, 2025, 45(3): 233-237.
- [4] 李向前. 半导体激光器高频驱动特性研究[D]: [硕士学位论文]. 济宁: 曲阜师范大学, 2025.
- [5] 史杨, 董重, 胡尊浩, 等. 变形正方形双模微腔激光器及其应用[J/OL]. 中国激光: 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/31.1339.TN.20250526.1113.022>, 2025-12-02.
- [6] 盛超, 陈爔, 王明建, 等. 空间应用的高重复频率小型化轻量化 532nm 激光器[J]. 中国激光, 2025, 52(1): 15-22.
- [7] Basov, N.G., Krokkin, O.N., et al. (1961) Obtainment of the Negative Temperature State in the p-n Junctions of Degenerate Semiconductors. *Zhur Eksper I Teoret Fiz*, **40**, 1879-1880.
- [8] Hall, R.N., Fenner, G.E., Kingsley, J.D., Soltys, T.J. and Carlson, R.O. (1962) Coherent Light Emission from Gaas Junctions. *Physical Review Letters*, **9**, 366-368. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.9.366>
- [9] Guo, X.Y. (1987) Development of Semiconductor Laser. *Laser Technology*, 1-7.
- [10] Bachmann, F., Poprawe, R. and Loosen, P. (2007) *High Power Diode Lasers: Technology and Applications*. Springer, 3888 p.
- [11] Argyris, A., Syvridis, D., Larger, L., Annovazzi-Lodi, V., Colet, P., Fischer, I., et al. (2005) Chaos-Based Communications at High Bit Rates Using Commercial Fibre-Optic Links. *Nature*, **438**, 343-346. <https://doi.org/10.1038/nature04275>
- [12] Ning Jiang, Wei Pan, Lianshan Yan, Bin Luo, Shuiying Xiang, Lei Yang, et al. (2011) Chaos Synchronization and Communication in Multiple Time-Delayed Coupling Semiconductor Lasers Driven by a Third Laser. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **17**, 1220-1227. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2011.2110638>
- [13] Wu, J., Wu, Z., Xia, G., Deng, T., Lin, X., Tang, X., et al. (2011) Isochronous Synchronization between Chaotic Semiconductor Lasers over 40-Km Fiber Links. *IEEE Photonics Technology Letters*, **23**, 1854-1856. <https://doi.org/10.1109/lpt.2011.2170212>
- [14] Zhao, Q. and Yin, H. (2013) Performance Analysis of Orthogonal Optical Chaotic Division Multiplexing Utilizing Semiconductor Lasers. *Optics & Laser Technology*, **47**, 208-213. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.08.018>
- [15] 栖原敏明. 半导体激光器基础[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [16] 李松松, 张厚博, 崔璐, 等. 基于单片机和 PID 电路的半导体激光器恒温控制系统[J]. 电子制作, 2025, 33(12): 69-72.
- [17] 张一凡, 李宇鹏, 张延月, 等. 高精度半导体激光器控制系统设计[J]. 激光杂志, 2025, 46(10): 13-19.
- [18] 程洪德, 汪众, 刘新宇, 等. 基于温度调谐的半导体激光器线性调频驱动电路设计[J]. 应用激光, 2025, 45(9): 159-166.
- [19] 郑贵森. 面向激光器冷却的异形扰流柱微通道散热器制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [20] 贺驰光. 非制冷红外焦平面温控电路设计[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2013.