

引用格式: Tang Zhiping, Ma Yuxin, Song Changkun, et al. Design of precise driving circuit for dual-wavelength semiconductor lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0714002

唐治平,马雨心,宋长坤,等. 双波长半导体激光器驱动电路设计与实现[J]. 光子学报, 2026, 55(7):0714002

双波长半导体激光器驱动电路设计与实现

唐治平^{1,2,3}, 马雨心^{1,2,3}, 宋长坤^{1,2,3}, 高俊隼^{1,2,3}, 李璞^{1,2,3*}, 秦玉文^{1,2,3},
王云才^{1,2,3}

(1 1)先进光子技术研究院,信息工程学院,广东工业大学,广州,中国, 510006)

(2 2)通感融合光子技术教育部重点实验室,广东工业大学,广州,中国, 510006)

(3 3)广东省信息光子技术重点实验室,广东工业大学,广州,中国, 510006)

摘 要:为实现双波长半导体激光器对温度与电流的高精度稳定控制,设计了一种基于 AD8531 和 SLM8835 的驱动电路。本方案以 STM32 为主控单元,通过电压跟随器作为缓冲级抑制电压噪声,结合比例-积分-微分网络参数优化提升了同步控制驱动电流与温控的稳定度。测试结果表明,在 25 °C 室温条件下,针对驱动电流为 50 mA 的双波长激光器,本电路所提供的两路驱动电流在 120 分钟内的稳定度分别达到 0.013% 与 0.019%,对应激光器输出中心波长漂移小于 ± 0.006 nm。该电路有效确保了双波长半导体激光器的输出稳定性,为其在精密光学系统中的集成应用提供了高稳定度的驱动方案。

关键词:双波长半导体激光器;深度负反馈;恒流源模块;电流稳定度;PID 参数优化;温度控制模块;中心波长

中图分类号: TN248.4; TN710

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20265507.0714002

0 引言

双波长半导体激光器在激光雷达、微波光子学及光学传感等领域具有广泛应用^[1-7]。传统的双波长半导体激光器由两个独立激光器构成^[8],基于分立器件的系统易受温度波动和环境振动的影响,导致稳定性差、实用性受限^[9]。为克服上述问题,研究人员开发了单片集成的双波长半导体激光器。该类激光器具有结构紧凑、性能稳定的优点^[10-12]。然而,此类集成化双波长激光器通常采用砷化镓、磷化铟或硫化锌等作为增益介质,一方面,这些材料对温度极为敏感,温度变化会显著影响激光器的激射波长与阈值电流,进而改变激光输出特性^[13-14]。另一方面,电流的微小变化会导致输出光功率的显著波动,并引起载流子浓度与有源区温度的变化,进而造成激射波长漂移^[15-17]。并且电流与温度共同作用会进一步加剧激光器的波长漂移与跳模现象^[18],因此,实现高精度的温度控制与直流驱动控制对于双波长激光器的稳定输出至关重要。

传统激光器控制系统多采用商用的分立温控与驱动器件。这类方案虽易于实现,但分立器件的体积大、功耗高,与激光器系统向小型化、集成化发展的技术趋势存在显著矛盾。因此,针对半导体激光器的紧凑型、高稳定度驱动源与温控一体化电路的研究逐渐受到广泛关注。例如:田小建^[19]等实现了一种 980 nm 激光泵浦源控制系统,8 h 内输出光功率稳定度为 ± 0.05 dB,但其输出波长在 10 min 内的波动为 100 pm,波长稳定度有待提高;罗亮^[20]等研究的激光器驱动源,在 120 min 的测量时间内,使输出到激光器电流的稳定度保持在 0.02%,温度控制使 60 min 内的最大波长漂移量为 12 pm,然而该温度控制电路采用基于 MAX1978 的差分放大技术,无法同时实现对输出到半导体热电制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)端的

基金项目:国家重点研发计划(No.2024YFB2808400),国家自然科学基金(No.62322504, No.62531005),广东省重点领域研发计划(No.2024B0101030001)

第一作者:唐治平(2000—), tzp201130@163.com

通讯作者:李璞(1986—), lipu8603@126.com

收稿日期:2026-01-28; **录用日期:**2026-02-05

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

电压进行灵活调节;于小雨^[21]等对装配不同型号 TEC 光反馈半导体激光器的温度和驱动电流控制电路进行优化,输出电流稳定度在 0.02% 以内,输出波长波动稳定在 9 pm 以内;王兴^[22]等为光反馈半导体激光器所设计的电路 2 h 内温度最大波动为 0.17 °C,但在实际驱动与温控集成源样机调试过程中,驱动电流存在约 0.025 mA 的输出误差波动,电流稳定度 0.037%;此外,卫英泽^[23]等针对垂直腔面发射激光器 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) 设计了一种驱动控制电路,其驱动电流调节精度小于 0.04 mA, TEC 的温控精度小于 0.1 °C,激光器在 10 h 内波长漂移为 4 pm。需要注意的是,上述电路均是面向单段式半导体激光器需求的,且由于大部分系统采用数模转换器 (Digital-to-Analog Converter, DAC) 信号直接输入至电流源电路结构。这种结构在实际应用中易受到负载效应及噪声放大等因素影响,导致激光器驱动电流稳定度下降,难以满足双波长半导体激光器频率高稳定度的要求。

针对这一需求,本文通过运放的深度负反馈机制与比例-积分-微分 (Proportional-Integral-Derivative, PID) 网络参数优化设计了一种面向双波长激光器 (单片集成两段式结构) 的驱动电路,该电路由两个独立恒流源模块和一个温度控制模块组成,可实现对激光器驱动电流与工作温度的高精度协同调控。实验测试结果表明:(1) 所设计的两路恒流源电路均可在 0 ~ 250 mA 范围内实现稳定输出。在双波长半导体激光器驱动电流 50 mA 条件下,两路恒流源电路的稳定度分别达到 0.013% 和 0.019%。(2) 温度控制电路在 120 min 连续测试过程中,双波长半导体激光器中心波长的变化幅度在 ± 0.0060 nm 和 ± 0.0055 nm 以内,其对应标准偏差分别为 0.0015 nm 和 0.0014 nm。结果表明,该驱动电路在驱动电流稳定性和波长稳定性方面均实现了高精度控制,能够满足双波长半导体激光器对稳定输出的应用需求。

1 系统总体设计

系统整体设计方案如图 1 所示。系统核心为控制电路,主要由单片机 (STM32)、数模转换器、温度控制模块和电流驱动模块构成。单片机根据预设的目标电流与温度值输出数字信号,该信号经 SPI 总线传输至两路 DAC,分别转换为对应的模拟调谐电压。随后,这两路模拟电压并行输入至电流驱动模块与温度控制模块,分别生成用于驱动双波长激光器的电流信号,以及用于调节 TEC 的温控电压。同时,针对拍频或传感实验中对波形及频谱进行观测的需求,本系统还集成了光电信号转换与射频信号放大功能,可通过低噪声放大器-光电探测器 (Low-Noise Amplifier Photodetector, LNA-PD) 将输入光信号转换为射频信号,并通过可调衰减法兰实现输出射频信号幅值可调。需要指出,可调法兰通过轴向调节光纤端面距离来改变光功率耦合效率,其本质是调节空间耦合损耗。

2 电路设计

双波长半导体激光器的稳定输出受驱动电流与工作温度的双重制约,一方面,传统 DAC 直接驱动电流

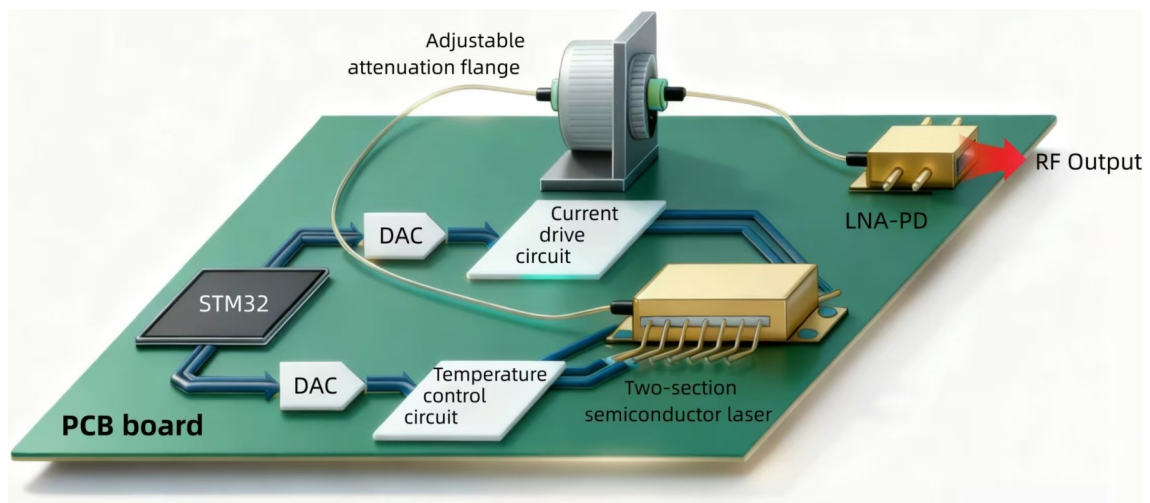


图 1 系统整体设计图 (DAC, 数模转换器; LNA-PD, 低噪声放大器-光电探测器)

Fig. 1 System overall design diagram. (DAC, digital-to-analog converter; LNA-PD, low-noise amplifier photodetector)

源的架构易受电路固有噪声影响,且DAC高输出阻抗与电流源输入阻抗失配会导致信号衰减,叠加运放对噪声的放大效应,引发输出电流波动;另一方面,半导体激光器增益介质具有显著的温度敏感性^[24](典型温漂系数0.1 nm/°C)。电流与温度波动均会造成双波长激光器波长间距非线性变化,进而严重制约器件的应用性能,例如,在雷达系统中会导致扫频精度下降;在光通信系统中易引发信道串扰;在太赫兹拍频测量中造成拍频信号带宽不稳定等问题。因此,针对上述问题,设计一种新的高精度电流驱动与温度控制一体化电路,为双波长半导体激光器稳定输出提供硬件支撑。

2.1 恒流源电路设计

为解决DAC直接驱动电流源带来的输出电流不稳定的问题,设计一种改进的恒流源电路,电路原理如图2所示。该电路在DAC与电流源之间引入电压跟随器作为缓冲级,结合运放的深度负反馈原理,有效降低信号源与负载之间的阻抗失配,实现高稳定度的电流输出。

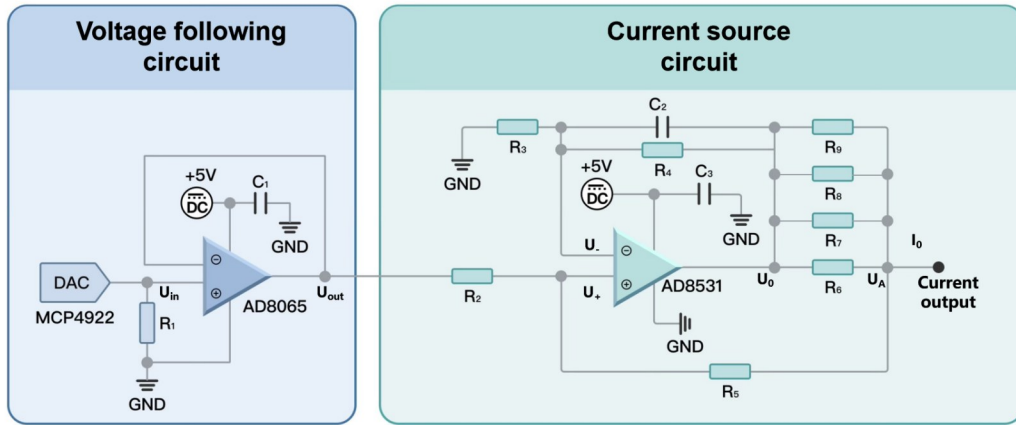


图2 恒流源电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the current source

传统电流源电路是直接将DAC信号输入到电流源电路,因其高输出阻抗与电流源输入阻抗失配会导致信号衰减,叠加运放对电路固有噪声的放大效应,会导致输出电流精度低。因此,本设计提出在DAC与电流源之间引入电压跟随器作为缓冲级,能够消除电压信号无法对应STM32预设电压编码值的误差。利用运算放大器的“虚断”特性,呈现极高的输入阻抗,通常能够提供MΩ量级的阻值,根据电路理论,从DAC输出注入到电压跟随器输入端的噪声电压 U_{noise} ,在如此高的输入阻抗上产生的噪声电流 $I_{noise} = U_{noise}/R$ 会被抑制。同时,电压跟随器的闭环输出阻抗为 $R_{out} = R_{in}/(1+A\beta)$,其中 β 为反馈系数,在电压跟随电路中的数值为1; A 为开环增益,实际电路中,运放的开环增益为 $10^5 \sim 10^9$ 。因此,电压跟随电路拥有极低的输出阻抗(mΩ量级),使得电压信号稳定地传递到电流源电路中,根据电压跟随电路利用运算放大器的“虚短”特性,由于反馈回路中没有负载的存在,电压跟随电路输出端电压 U_{out} 与输入端即DAC输出的电压值 U_{in} 相等,从而避免了DAC高输出阻抗导致的电压信号的衰减或失真。本研究采用的DAC为微芯科技(Microchip)公司生产的MCP4922芯片,该器件具有12位分辨率和轨到轨输出特性,转换建立时间为4.5 μs,并支持SPI通信协议进行数据传输,能够满足高精度、低噪声电流控制的应用需求。

随后,电压跟随电路输出的电压信号传输至电流源电路中,该电路选用亚德诺公司的AD8531芯片。AD8531为单通道、轨对轨运算放大器,可提供最大250 mA的输出电流。基于前端DAC的12位分辨率,该电流源对应的电流分辨率可达0.06 mA。根据电流源电路中运放“虚断”的特性,可知通过 R_2 和 R_5 的电流相等, R_3 和 R_4 电流相等,得出关系式:

$$\begin{cases} \frac{U_{out} - U_+}{R_2} = \frac{U_+ - U_A}{R_5} \\ \frac{U_-}{R_3} = \frac{U_0 - U_-}{R_4} \end{cases} \quad \#(1)$$

式中, U_{out} 为电压跟随电路输出端电压,即输入电流源电路的电压值; U_+ 、 U_- 和 U_0 分别为电流源电路中运算

放大器的同相输入端电压、反相输入端电压与输出端电压, U_A 为电流源电路输出端电压。根据电流源电路中运放“虚短”的特性, 可知 $U_+ = U_-$, 根据公式(1)可得:

$$U_0 = \frac{(U_{out} R_5 + U_A R_2)(R_3 + R_4)}{R_3(R_2 + R_5)} \quad \#(2)$$

根据公式(2)以及电流源运算放大器输出端电路原理, 设定 $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 100 \text{ k}\Omega$, 可知恒流源电路输出电流 I_0 的表达式如下:

$$I_0 = \frac{U_0 - U_A}{R_6 // R_7 // R_8 // R_9} = \frac{U_{in}}{R_6 // R_7 // R_8 // R_9} \quad \#(3)$$

由公式(3)可知, 电流源电路的输出电流值与激光器负载阻值无关, 仅与输入电压及四个并联电阻的等效阻值相关。采用四个电阻并联而非单一电阻的设计主要有两个作用: 一是将输出电流分散至各支路, 降低单个电阻的热耗散, 减少温度升高引起的性能漂移; 二是通过并联平均化各电阻的随机误差, 从而进一步提高输出的精度与稳定性。

2.2 温度控制电路设计

双波长半导体激光器温度控制是通过半导体制冷器的调节实现。温度控制电路原理如图3所示, 以 SLM8835 温控芯片为核心, 其最大输出电流达 3 A。温度控制电路主要包括温度设置反馈单元, 实现对激光器温度的设置及温度状态的反馈; PID 网络, 对激光器的温度设置与反馈电压的差分信号进行处理, 控制 TEC 温度的调节速度; TEC 电压控制电路, 控制输出到 TEC 的电压。

在调节过程中, 激光器热敏电阻值的变化导致 SLM8835 的 IN1N 引脚输入电压发生变化, IN1N 和 IN1P 引脚的 1.25 V 电压之间存在的电压差, 差分放大后从 OUT1 引脚输出反馈电压输入到 IN2N 引脚。

反馈电压 V_{OUT1} 是热敏电阻温度的函数, 其关系式为:

$$V_{OUT1} = \left(\frac{R_{14}}{R_{TH} + R_{12}} - \frac{R_{14}}{R_{13}} + 1 \right) \times \frac{V_{REF}}{2} \quad \#(4)$$

式中, R_{12} 为补偿电阻, R_{14} 为反馈电阻, R_{TH} 为热敏电阻。

经过与 IN2P 引脚输入的温度设定电压之间的差分电压放大后, PID 网络输出的 OUT2 电压也不断调整。输出电压 V_{OUT2} 可通过公式(5)计算:

$$V_{OUT2} = V_{TEMPSET} - \frac{Z_2}{Z_1} (V_{OUT1} - V_{TEMPSET}) \quad \#(5)$$

式中, $V_{TEMPSET}$ 为 IN2P 引脚的控制电压输入, Z_1 为 R_i 、 R_D 和 C_D 的组合, Z_2 为 R_p 、 C_i 和 C_F 的组合。

在 SLM8835 内部, V_{OUT2} 被输入控制器, 按照 V_{OUT2} 的大小不断调整内部的线性驱动和脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 驱动, 二者同时控制 TEC 两端电压的改变。当温度达到设定值时, 激光器内部热敏电阻阻值变化达到温度设定电阻的阻值, 此时 LDR 和 SFB 引脚电压的差值在 0 V 附近振荡, TEC 的电流流向不断微变, 制冷和制热不断切换, 最终使温度趋于稳定, 达到设定温度值。

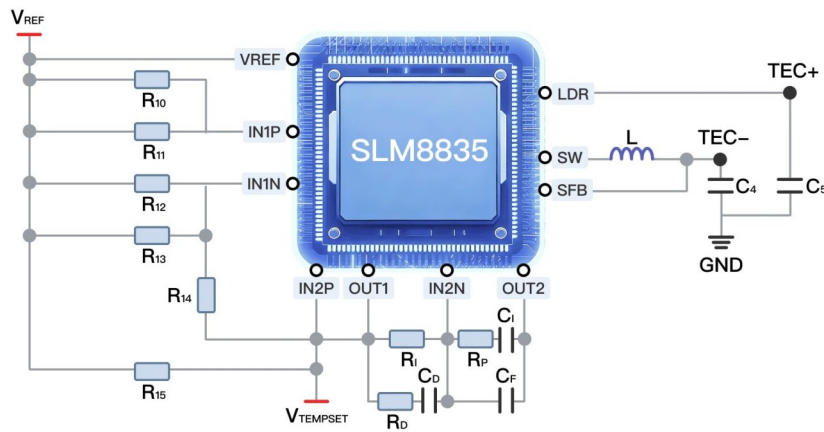


图3 温度控制电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature control circuit

因积分作用或系统惯性可能引起的快速上升趋势,导致激光器温度控制精度下降,因此优化设计了PID控制单元温度补偿网络。PID温度补偿网络电路原理如图4所示,其算法的数学模型为:

$$U = K_p \left(\lambda + \frac{1}{T_i} \int_0^t \lambda d\tau + T_d \frac{d\lambda}{d\tau} \right) \#(6)$$

式中, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数。PID控制单元温度补偿网络的控制参数会直接影响系统的控制效果,因此,根据最小建立时间,减小 R_p 、 R_i 、 R_d 的值,能够增强微分作用,预测并抑制因积分作用或系统惯性可能引起的快速上升趋势,从而消除输出电压过冲造成的温度调节时间长问题,同时,增加电容 C_F ,可以提高系统的稳定性,降低噪声的敏感性。本设计中,对于 Z_1 ,选取 $R_i=510 \text{ k}\Omega$, $R_d=1 \text{ M}\Omega$, $C_d=0.47 \text{ }\mu\text{F}$;对于 Z_2 ,选取 $R_p=510 \text{ k}\Omega$, $C_i=10 \text{ }\mu\text{F}$, $C_F=0.01 \text{ }\mu\text{F}$,最终实现温度调节时间小于 15 s,温度调节范围为 $15 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$,精度可达 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

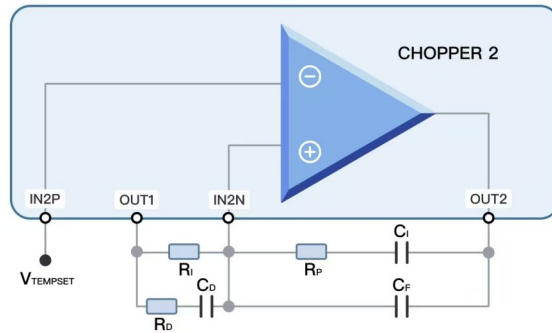


图4 PID温度补偿网络

Fig. 4 Network of PID temperature compensation

2.3 系统实现

驱动电路整体由电源模块、恒流源电路、温度控制电路及激光器接口四个部分组成,其尺寸为 $11 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽),实物如图5所示。其中,电路以STM32F103RCT6作为主控制器,负责向恒流源电路与温度控制电路下发控制码、响应外部复位指令,并实时接收温度控制电路的反馈信号。元件电源模块采用TPS562200DDCR、TPS73401DDC、LT8609AJDDMR和LM1117-3.3构成多路稳压架构,将外部输入的12 V直流电压信号转换为系统各单元所需的稳定电压,为所有元器件供电。激光器接口则为蝶形封装的双波长半导体激光器提供了焊接接口。将双波长激光器目标设置电流值与温度烧录到EEPROM中,上电后,由STM32读取EEPROM中设置的目标电流值,以数字信号的形式输入DAC芯片中进行数模转换,得到对应的电压信号输入到恒流源电路与温度控制电路,再由电流源电路将电压信号转化为对应的驱动电流输入激光器,温度控制电路则输出温控信号调节TEC,最终完成激光器的电流驱动与温度控制。同时,系统还需为LNA-PD(型号:逸致AMD0020)单独供电。该器件内部由放大器和光电二极管组成,需要分别施加5 V偏置电压。为此,将5 V电源分为两路独立输出,经专用端子引出后,通过直流电源线分别连接至LNA-PD的两个偏置通道。同时,LNA-PD金属外壳接地端也经由电源线与系统接地端子相连,从而构成稳定可靠的电气连接结构。

采用如图6所示的软件控制流程,系统上电或复位后进入初始化,根据公式(4)计算目标温度对应DAC编码值并输入到DAC中,通过温度控制电路设置温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。温度调控开启后对激光器驱动电流源使能,根据公式(3)计算出目标电流值 I_0 对应的输入电压 U_{in} ,并根据输入电压 U_{in} 计算出目标电流值对应DAC编码值输入DAC,DAC再输出模拟电压信号 U_{in} 至恒流源电路为激光器提供电流。考虑到实际应用中光电探测器在未加偏置电压条件下直接入射光信号可能导致器件性能劣化甚至损伤,在系统设计中采用软件方式实现延迟控制驱动电流方案。通过软件编程实现电流缓变控制,上电与掉电过程中,激光器驱动电流以每 0.5 s 变化 1 mA 的步进速率逐步增加或减小,从而实现对激光器与LNA-PD的有效保护。当激光器上电至目标电流值后,开始接收串口数据,当串口接收数据为指定值时,同样按照时间间隔 0.5 s 、电流值步进 1 mA 将激光器驱动电流值逐步降至 0 mA 。

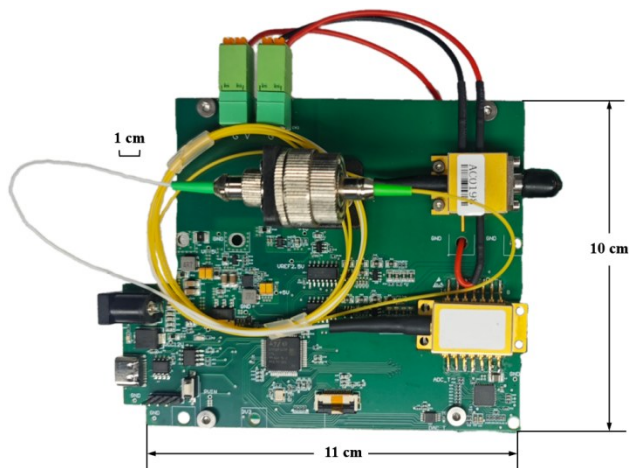


图5 驱动电路PCB板实物图

Fig. 5 Photo of driving circuit PCB board

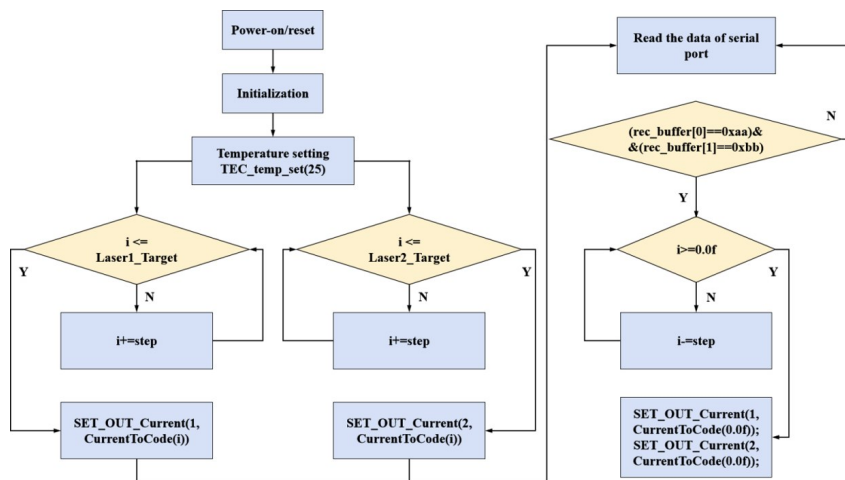


图6 软件程序流程图

Fig. 6 Flow chart of software program

3 实验结果

选用本课题组自研的单片集成双波长半导体激光器进行驱动电路性能验证。该双波长激光器通过单片集成技术,集成了两颗背靠背结构的分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB),其中靠近出光口的标记为DFB₁,远离出光口的标记为DFB₂。该激光器采用蝶形封装方案,工作温度为25℃,经测试,其阈值电流分别为11.9 mA和12.7 mA。

实验装置如图 7 所示,通过将电流驱动引脚与精密源表模块(是德科技 B2912B,测试精度 10 fA)连接测试驱动电流的稳定性,随后,将激光器焊接至驱动电路并供电,并通过控制激光器内部封装的 TEC(大和热磁 Ferrotec tz-005 200x-035-030m, 25 °C 下热电制冷器阻值 1.051 ~ 1.285 Ω , 温度控制精度 0.01 °C)进行的温度调控,将激光器的光功率通过可调法兰衰减至 1 mW,再输入到光谱仪(安立 MS9740B)中,以测试激光器稳定性能。这里指出,通过固定光谱仪的扫描范围为 5 nm,设置采样点数为 5001 点,分辨率可优化至 1 pm。

如图8为两路恒流源电路在0~250 mA范围内的补充测试结果。利用公式(7)可以计算电流源的线性度 $S_{Li}^{[23]}$:

$$S_{Li} = \frac{|\Delta I_{i,max}|}{I_{ES}} \# (7)$$

式中, $\Delta I_{i, \max}$ 为通道 i 电流源电路设定电流值与实际电流值的最大差值 ($i=1$ 或 2); I_{FS} 为两路电流源电路的最

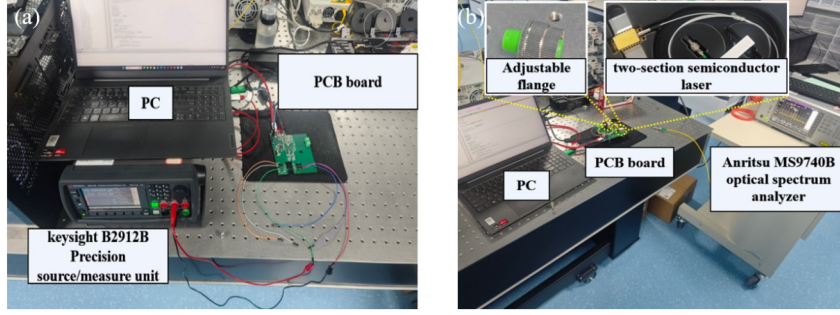


图7 实验装置图。(a)电流测试实验装置;(b)光谱测试实验装置
Fig. 7 Experiment setup of (a) Current testing; (b) Spectrum test

大电流设定值,均为 250 mA。经计算,两路电流源在 0 ~ 250 mA 范围内具有良好的线性度,输出线性度分别为 0.0013% 和 0.0019%。

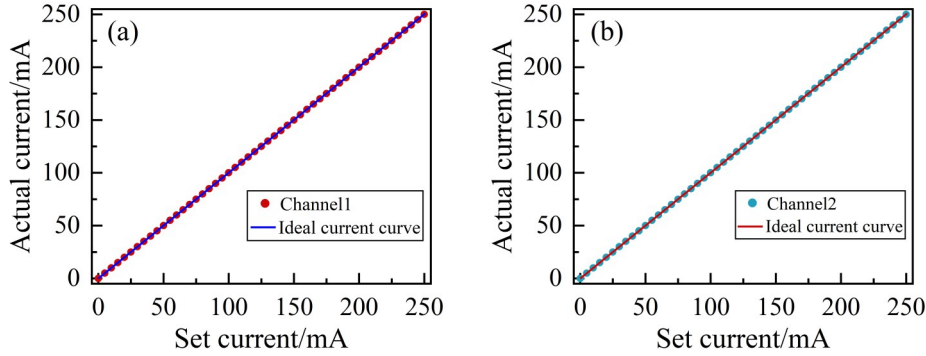


图8 驱动电流与实际电流的关系。(a)通道1设定电流与实际电流的关系图;(b)通道2设定电流与实际电流的关系图
Fig. 8 The relationship between the drive current and the actual current. (a) The relationship between the set current value and the actual current value of channel 1; (b) The relationship between the set current value and the actual current value of channel 2

为验证所设计驱动电路输出电流的稳定性,利用是德科技的 B2912B 精密源表在 120 min 内以 10 s 的采样间隔直接测量了驱动电路两个通道的实际输出电流值。这里,驱动电路两通道的电流值均设置为了 50 mA。由测试结果(图 9a 和 9b)可见,通道 1 与通道 2 的电流波动幅度分别为 0.0065 mA 和 0.0095 mA。利用公式(8)可以计算电流源的电流稳定度 $\gamma_i^{[20]}$:

$$\gamma_i = \frac{I_{i,max} - I_{i,min}}{I_0} \#(8)$$

式中 $I_{i,max}$ 和 $I_{i,min}$ 分别为通道 i 实际电流的最大值和最小值($i=1$ 或 2); I_0 为设定电流值,为 50 mA。经计算,两路电流源的电流稳定度分别为 0.013% 与 0.019%,均优于当前已报道大部分驱动电路的电流稳定度水平(表 1)。这表明本工作所设计驱动电路输出电流具有较高的稳定性。

通过量化分析激光器的激射波长变化,可表征驱动电路温度控制的稳定性。在 25 °C 温度及 50 mA 驱动电流条件下,分别点亮 DFB₁ 与 DFB₂ 激光器,并对其输出光信号的中心波长进行测试。测试结果如图 10 所示,在 120 min 连续测试过程中,DFB₁ 的中心波长变化范围为 1553.622 nm 至 1553.633 nm,DFB₂ 的变化范围为 1552.512 nm 至 1552.524 nm,波动幅度分别为 ± 0.0060 nm 和 ± 0.0055 nm。二者的中心波长标准偏差分别为 0.0015 nm 和 0.0014 nm,表明在所述驱动条件下,激光器输出波长具有较高的稳定性。

所设计的电路是针对单片集成双波长半导体激光器设计的驱动电路。截至目前,在公开发表的文献中,尚未见针对双波长半导体激光器的驱动电路设计方案。

这里,只能与单段式半导体激光器(单波长半导体激光器)的驱动电路进行对比。如表 1 所示,由于现有驱动电路的电流源是采用 DAC 信号直接输入至电流源电路结构,这种结构在实际应用中易受到负载效应及噪声放大等因素影响,导致激光器驱动电流稳定度不足,普遍高于 0.020%。尽管文献[22]中电流稳定度

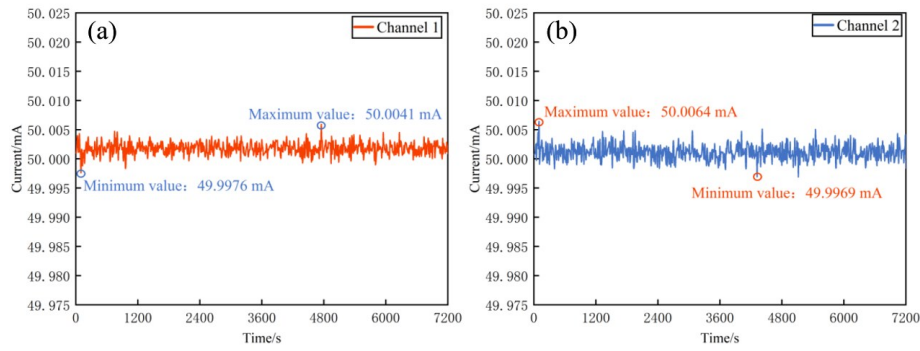


图9 驱动电流稳定性测试结果。120 min内(a)通道1驱动电流变化曲线;(b)通道2驱动电流变化曲线
Fig. 9 Test results of drive current stability. (a) The driving current change curve of channel 1 in 120 min; (b) The driving current change curve of channel 2 in 120 min

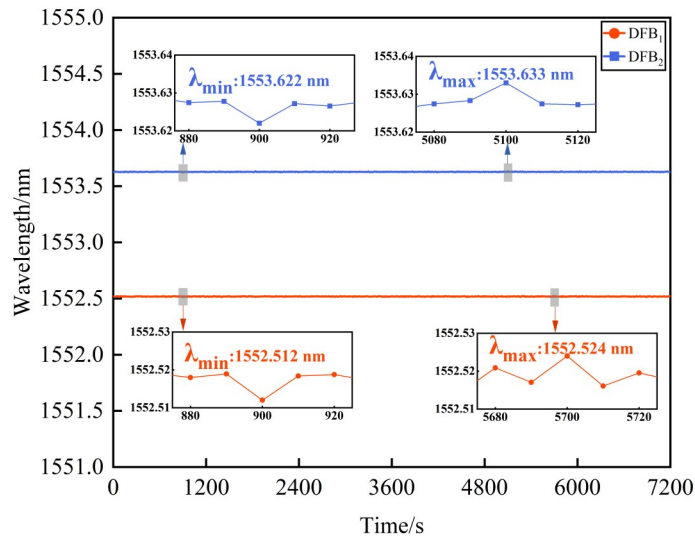


图10 120 min内两段DFB激光器中心波长变化曲线
Fig. 10 Central wavelength variation curve of two DFB lasers in two hours

较低(0.007%),但温度控制精度低导致其波长漂移范围却高达0.017 nm。换言之,现有驱动电路无法同时实现高精度的电流控制与温度控制。与之不同,本工作通过引入电压跟随电路作为缓冲级,并优化PID电路元件参数,设计了一种新型驱动电路,实现了0.019%的电流稳定性和低至0.006 nm的波长漂移范围。可见,即便与单段式激光器驱动电路相比,本工作所设计驱动电路在兼顾高精度的电流控制与温度控制方面亦具有明显优势。

为验证所设计电路能够驱动双波长半导体激光器稳定输出,测试其自由运行时的输出光谱。在25℃环境温度下,对双波长半导体激光器的两段增益单元同时施加50 mA驱动电流,测试光谱及波长变化曲线如图11所示。需要注意的是,两段激光器同时激射与单独激射的中心波长偏差,源于器件的结构特性与工作

表1 本研究与现有激光器驱动电路的指标对比

Table 1 Comparison of indicators between this work and existing laser driver circuits

Scheme	Current stability	Fluctuation range of wavelength	Reference
1	0.051%	0.100 nm	[19]
2	0.020%	0.012 nm	[20]
3	0.020%	0.009 nm	[21]
4	0.007%	0.017 nm	[22]
5	0.030%	0.004 nm	[23]
6	0.019%	0.006 nm	This work

机制。单片集成双波导DFB激光器采用两段式结构并共享衬底,两段增益区物理间距极小且共用谐振腔,部分共享的谐振腔会导致两模式间存在模式竞争,使得同时激励时的中心波长偏离单独激励状态^[25]。

如图11(a),双波长激光器自由运行光谱的边模抑制比(Side-Mode Suppression Ratio, SMSR)为37.81 dB,高于30 dB的常用阈值,表明该双波长激光器能够实现稳定的双波长激励^[9]。如图11(b)所示,在120 min连续测试过程中,双波长激光器最大波长漂移分别为0.002 nm和0.003 nm,未出现显著漂移。以上结果表明,所制备的驱动电路能满足双波长激光器系统对驱动电路和温度稳定性的要求。

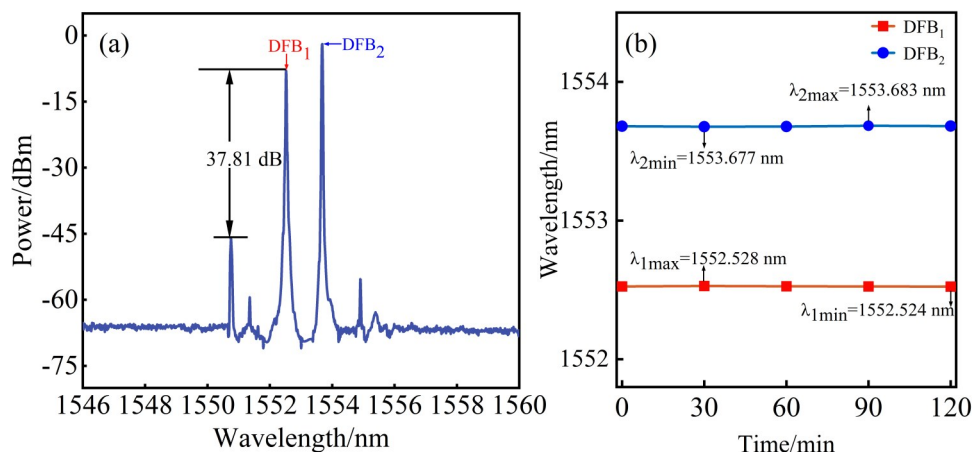


图11 双波长半导体激光器自由运行时的输出光谱。(a)激光器光谱图;(b)120 min内DFB₁和DFB₂中心波长的变化曲线
Fig. 11 Output spectrum of dual-wavelength semiconductor laser in free operation. (a) Laser spectrum; (b) Variation curves of the central wavelengths of DFB₁ and DFB₂ within 120 min

4 结论

本文设计并实现了一种基于运放的深度负反馈机制与PID网络参数优化的双波长半导体激光器驱动电路,满足双波长半导体激光器系统对工作温度与驱动电流的高精度控制要求。该电路可实现0~250 mA范围内驱动电流的线性调节(步进0.06 mA);当驱动电流设置为50 mA时,两通道在120 min内的电流稳定度分别达到0.013%与0.019%。同时,所设计的温控模块可保持激光器工作温度的长期稳定性:当温控模块设置为25℃时,分别点亮双波长激光器,在120 min连续运行过程中,两个中心波长的变化幅度仅为±0.0060 nm和±0.0055 nm,对应标准偏差分别为0.0015 nm和0.0014 nm。实验结果表明所设计驱动电路可同时为双波长半导体激光器提供高精度的驱动电流和温度控制,从而有效保证激光器的稳定输出,具有良好的实用价值和应用前景。

参考文献

- [1] JIANG Xing, KANG Bo, LI Xiaoming, et al. Microwave technology for brain activities detection of rats[C]. ISAPE, 2016, 918-920.
- [2] ALARIFI A, SALMAN A, ALSALEH M, et al. Ultra wideband indoor positioning technologies: analysis and recent advances[J]. Sensors, 2016, 16(5):E707.
- [3] DAI Yitang, YAO Jianping. Nonuniformly spaced photonic microwave delay-line filters and applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11):3279-3289.
- [4] HERRERA L E, RIBEIRO R M, JABULKA V B, et al. Photonic generation and transmission of linearly chirped microwave pulses with high TBWP by self-heterodyne technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19):4408-4415.
- [5] ZHOU Huimin, HU Miao, XIA Mengying, et al. Experimental study of Y-cavity dual-wavelength laser with wide tunable frequency separation range[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0714007. (in Chinese)
周慧敏, 胡淼, 夏梦莹, 等. 大范围频差可调谐Y型腔双波长激光器实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0714007.
- [6] RONG Yuhang, SHEN Xue, WANG Nanchao, et al. Design of dual-wavelength spectral discriminator for high-spectral-resolution lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0401001. (in Chinese)
戎宇航, 沈雪, 王南朝, 等. 双波长高光谱分辨率激光雷达光谱鉴频器设计[J]. 光学学报, 2021, 41(4):0401001.

- [7] LI Daojing, GAO Jinghan, CUI Anjing, et al. Research on space-borne dual-wavelength land-sea LiDAR system with 2 m diffractive aperture[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0310001. (in Chinese)
李道京, 高敬涵, 崔岸婧, 等. 2 m 衍射口径星载双波长陆海激光雷达系统研究[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0310001.
- [8] HAN L S, LIANG S, ZHOU D B, et al. Dual-wavelength distributed feedback laser for photonic microwave generation [C]. OGC, 2015, 1-3.
- [9] ZHANG Yunshan, ZHAO Tongfei, SHI Jianqin, et al. Monolithic integrated two-section dual-wavelength distributed feedback semiconductor laser[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 1014002. (in Chinese)
张云山, 赵同飞, 施建琴, 等. 单片集成两段式双波长分布反馈半导体激光器[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1014002.
- [10] SUN Jie, DAI Yitang, CHEN Xiangfei, et al. Stable dual-wavelength DFB fiber laser with separate resonant cavities and its application in tunable microwave generation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(24): 2587-2589.
- [11] LI Simin, LI Ruoming, LI Lianyan, et al. Dual-wavelength semiconductor laser based on reconstruction-equivalent-chirp technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(3): 299-302.
- [12] CAI Qiang, ZHANG Yunshan, ZHENG Jilin, et al. A monolithically integrated two-section laser for wideband and frequency-tunable photonic microwave generation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(2): 404-411.
- [13] YenhuaLO, WU Yuchang, HSU Shunchieh, et al. Tunable microwave generation of a monolithic dual-wavelength distributed feedback laser[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13125-13137.
- [14] JI Songkun, HONG Yanhua. Effect of bias current on complexity and time delay signature of chaos in semiconductor laser with time-delayed optical feedback[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1-6.
- [15] XIA Zhichang, YU Yongai, SHANG Jianhua. Research on stability of output power and operating temperature of semiconductor laser based on STM32[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8): 93-104. (in Chinese)
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): 93-104.
- [16] HE Chungui, ZHANG Yujun, LIU Guohua, et al. Design and experimental study of temperature control circuit for semiconductor laser[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(8): 27-31.
贺春贵, 张玉钧, 刘国华, 等. 半导体激光器温度控制电路设计及实验研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(8): 27-31.
- [17] SONG Yunfei, WANG Zhenfu, LI Te, et al. Mechanism study on temperature characteristics of electro-optical conversion efficiency of 808 nm semiconductor laser chip[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 112-117. (in Chinese)
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.
- [18] YAN Chenxi, REN Xuhu, QIU Xiaoran, et al. Design and development of rubidium-based 780 nm laser frequency stabilization system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(21): 2114015. (in Chinese)
闫臣熙, 任旭虎, 仇霄然, 等. 基于铷原子的 780 nm 激光稳频系统设计与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(21): 2114015.
- [19] TIAN Xiaojian, SHANG Zuguo, GAO Bo, et al. Control system for 980 nm high stability laser pump source[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(4): 982-987. (in Chinese)
田小建, 尚祖国, 高博, 等. 980 nm 高稳定度激光泵浦源控制系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 982-987.
- [20] LUO Liang, HU Jiacheng, WANG Chanyuan, et al. Design of high-precision driving power and temperature control circuit for semiconductor laser[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 200-204. (in Chinese)
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.
- [21] YU Xiaoyu, WANG Xing, ZHANG Jianzhong, et al. Design of driving circuit for chaotic lasers with different thermoelectric coolers[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2019, 36(5): 544-550. (in Chinese)
于小雨, 王兴, 张建忠, 等. 热电制冷器不同的混沌激光器驱动电路设计[J]. 深圳大学学报(理工版), 2019, 36(5): 544-550.
- [22] WANG Xing, XU Wenmin, ZHANG Jianzhong, et al. Design of chaotic laser driver and temperature control circuit based on ADN8810 and ADN8835[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2020, 37(4): 408-416. (in Chinese)
王兴, 续文敏, 张建忠, 等. 基于 ADN8810 和 ADN8835 的混沌激光器驱动及温控电路设计[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(4): 408-416.
- [23] WEI Yingze, LIAO Ying, ZHOU Jianbin, et al. Design of digital driving circuit for vertical-cavity surface-emitting laser [J]. Laser & Infrared, 2025, 55(1): 18-25. (in Chinese)
卫英泽, 廖英, 周建斌, 等. 垂直腔面发射激光器数字驱动电路设计[J]. 激光与红外, 2025, 55(1): 18-25.
- [24] DING Xiangmei, ZHONG Lehai, DONG Jingtin, et al. Development of analog temperature control and detection system for distributed feedback laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(11): 118-125. (in Chinese)
丁向美, 钟乐海, 董静霆, 等. 分布式反馈激光器模拟控温检测系统研制[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(11): 118-125.

- [25] WANG Zhuoying, ZHAO Jie, LI Zizhuo, et al. Compact monolithic dual-wavelength distributed feedback laser with tunable wavelength spacing based on REC technique[J]. Chinese Optics Letters, 2025, 23(3):031406.

Design of precise driving circuit for dual-wavelength semiconductor lasers

Tang Zhiping^{1,2,3}, Ma Yuxin^{1,2,3}, Song Changkun^{1,2,3}, Gao Junjian^{1,2,3}, Li Pu^{1,2,3*}, Qin Yuwen^{1,2,3},
Wang Yuncai^{1,2,3}

(1 1) *Institute of Advanced Photonics Technology, School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China*

(2 2) *Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education of China, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China*

(3 3) *Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China*

Abstract: Dual-wavelength semiconductor lasers are indispensable in critical fields such as radar, microwave photonics, and optical sensing, where stable spectral performance is paramount. Traditional dual-wavelength systems rely on two discrete laser devices, which suffer from poor stability due to temperature fluctuations and environmental vibrations, limiting their practicality in compact, high-precision applications. Monolithic integrated dual-wavelength semiconductor lasers address this drawback with a compact structure and enhanced operational stability, but their gain media are extremely temperature-sensitive. Even minor temperature variations can significantly alter lasing wavelength and threshold current, while subtle fluctuations in driving current lead to substantial output power changes and wavelength drift. Consequently, high-precision synchronous control of both operating temperature and driving current is critical for ensuring the reliable performance of dual-wavelength semiconductor lasers. Existing solutions predominantly use discrete commercial components, resulting in large volumes and high power consumption that conflict with the miniaturization and integration demands of modern laser systems. Moreover, most conventional circuits are designed for single-section lasers, failing to simultaneously meet the dual high-precision requirements of dual-wavelength devices, creating an urgent need for a dedicated integrated driving solution. This study designs a highly integrated driving circuit tailored for dual-wavelength semiconductor lasers, with the STM32F103RCT6 microcontroller as the core control unit. The system employs a Digital-to-Analog Converter (DAC) to independently regulate the driving current and Thermoelectric Cooler (TEC) voltage, realizing synchronous high-precision control in a unified architecture. Two identical current driving channels are adopted to power the monolithically integrated semiconductor lasers (DFB₁ and DFB₂), which have threshold currents of 11.9 mA and 12.7 mA respectively. The MCP4922 DAC chip features 12-bit resolution, 4.5 μ s settling time, and SPI communication—converts digital control signals from the STM32 into analog voltages, which are buffered by the AD8065 voltage follower to enhance load capacity and isolate inter-stage interference. The AD8531 operational amplifier forms the core of the current source, supporting a linear adjustable current range of 0 ~ 250 mA with a resolution of 0.06 mA; four parallel resistors are used to disperse current, reduce thermal dissipation, and improve resistance stability. For temperature control, the SLM8835 chip serves as the core, integrating linear and pulse width modulation power stages to drive the TEC with a maximum output current of 3 A. A closed-loop control system is formed with a negative temperature coefficient thermistor, and the built-in operational amplifiers of the SLM8835 handle weak temperature signal amplification and PID compensation, with optimized component parameters ($R_1=510\text{ k}\Omega$, $R_D=1\text{ M}\Omega$, $C_D=0.47\text{ }\mu\text{F}$, $R_P=510\text{ k}\Omega$, $C_1=10\text{ }\mu\text{F}$, $C_F=0.01\text{ }\mu\text{F}$) to ensure precise temperature regulation. The PCB adopts a four-layer structure (top signal, bottom signal, ground and power layers) with large-area copper cladding to suppress electromagnetic interference, and software-based delayed power-on/off control protects the laser and LNA-PD (model AMD0020) by adjusting current at a rate of 1 mA per 0.5 s, preventing damage from abrupt current changes or premature optical signal exposure. Experimental tests were conducted under standard operating conditions (25 °C temperature, 50 mA driving current) using professional equipment:

the Keysight B2912B precision source meter for current stability measurements and the Anritsu MS9740B optical spectrum analyzer for wavelength monitoring. Results show that the two current channels achieve stabilities of 0.013% and 0.019% over 120 minutes, with fluctuation amplitudes of 0.0065 mA and 0.0095 mA respectively—both outperforming the typical 0.020% stability threshold. For wavelength stability, the central wavelengths of DFB₁ and DFB₂ vary within 1553.622 ~ 1553.633 nm and 1552.512 ~ 1552.524 nm over 120 minutes, with drift amplitudes of ± 0.0060 nm and ± 0.0055 nm, and standard deviations of 0.0015 nm and 0.0014 nm. When both lasers are driven simultaneously, the output spectrum exhibits a Side-Mode Suppression Ratio (SMSR) of 37.81 dB, exceeding the commonly accepted 30 dB threshold for stable lasing. Throughout the continuous 120 minute test, the output spectrum remained stable without significant drift or degradation, confirming reliable dual-wavelength performance. This study presents a high-performance integrated driving circuit that effectively addresses the key challenges of dual-wavelength semiconductor laser control. The circuit achieves precise regulation of driving current and temperature, with exceptional stability in both parameters. Its compact integrated design overcomes the limitations of bulky discrete solutions, aligning with the miniaturization and integration demands of modern laser systems. By ensuring minimal wavelength drift and high SMSR, the circuit guarantees the stable operation of dual-wavelength lasers, which is critical for their integration into precision optical systems. This work advances high-precision laser driving technology, broadens the practical application prospects of dual-wavelength semiconductor lasers in cutting-edge fields such as radar and microwave photonics, and provides a reliable technical foundation for their wider adoption in high-performance optical systems. The compatibility with butterfly-packaged lasers and integrated photoelectric conversion functions further enhances its practical value, making it a versatile solution for diverse precision optical applications.

Key words: dual-wavelength semiconductor laser; strong negative feedback; current driver module; current stability; PID parameter optimization; temperature control module; central wavelength

OCIS Codes: 250.3140; 230.0250; 140.3460

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0714002