



分布式反馈激光器模拟控温检测系统研制*

丁向美¹, 钟乐海¹, 董静霆¹, 杨江²

(1. 绵阳职业技术学院 电子与信息学院, 四川 绵阳 621000; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 温度对分布式反馈 (DFB) 激光器的性能指标和工作寿命有着重要影响。针对宽温度范围下的激光器应用, 分析了激光器温控系统的研究现状及趋势, 给出了温控系统的设计原理, 采用线性驱动与 PID 闭环控制方法, 应用模拟器件, 研制了一种 DFB 激光器的模拟控温检测系统, 并利用该系统对 1550 nm 的 DFB 激光器进行了试验验证。结果表明, 系统在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的全温度范围下, 保持长时间工作 ($\geq 2\text{ h}$), 激光器的工作状态稳定, 中心波长未出现漂移。系统的温度控制精度随着工作环境温度的范围不同而有所差异, 在室温环境下可达到 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在全温范围内控制精度在 $\pm 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 跟踪误差小于 $\pm 0.5\text{ dB}$ 。与传统的激光器温控系统相比, 本系统工作温度范围宽、控制精度高, 且体积小、成本低、简单可靠, 对于温度环境要求较为严苛的 DFB 激光器应用场景, 具有重要的工程实践意义。

关键词: TEC 驱动; PID 补偿; 分布式反馈激光器; 运算功率放大器

中图分类号: TP29

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210381

Development of analog temperature control and detection system for distributed feedback laser

Ding Xiangmei¹, Zhong Lehai¹, Dong Jingting¹, Yang Jiang²

(1. School of Electronics and Information, Mianyang Polytechnic, Mianyang 621000, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Temperature has an important influence on the performance index and working life of distributed feedback (DFB) laser. Aiming at the laser application in a wide temperature range, the research status and trend of laser temperature control system are analyzed, and the design principle is given. A simulated temperature control and detection system of DFB laser is developed by using linear drive and PID closed-loop control method and simulator, and the system is used to verify the 1550 nm DFB laser. The results show that the system could work for a long time ($\geq 2\text{ h}$) in the full temperature range of $-55\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, the working state of the laser was stable, and the central wavelength did not drift. The temperature control precision of the system varies with the temperature range of the working environment. It can reach $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ at room temperature within $\pm 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the full temperature range, and the tracking error is less than $\pm 0.5\text{ dB}$. Compared with the traditional laser temperature control system, the system has wider working temperature range, higher control precision, smaller volume, and lower cost, being simple and reliable. For the application of DFB laser with strict temperature environment requirements, it has important engineering practical significance.

Key words: TEC driver; PID compensation; distributed feedback laser; operational power amplifier

半导体激光器(LD)作为光纤通信中最常用的光源之一,具有耦合效率高、响应速度快、可进行直接调制、相干性好且尺寸小等优点,在越来越多的领域得到了非常广泛的应用,尤其是在军事、航空、航天及环境条件较为恶劣的领域,呈现逐年递增趋势,如温度骤变情况下的激光器工作系统的稳定性和可靠性,乃至低温冷启动或高温热启动的情况,都对激光器控制系统的稳定性提出了更高的要求。

LD 工作温度的稳定性严重影响其出光性能^[1-3]。只要温度发生漂移,LD 的波长就会改变,进而降低转换效

* 收稿日期:2021-08-29; 修订日期:2021-11-08
联系方式:丁向美, dxm68344162@163.com。
通信作者:钟乐海, lzhong@mypt.edu.cn。

率。对于特定的半导体激光器,其器件结构和半导体材料一定,工作环境温度对其阈值特性的影响最为明显。温度升高,阈值电流随之增大,进而输出波长随之增大。温度每升高 25 °C,阈值电流几乎增大一倍,输出波长随温度变化的典型值为 0.3~0.4 nm/°C^[4]。因此,精准的温度控制对半导体激光器的正常使用至关重要。

为了稳定分布式反馈 (DFB) 激光器的输出中心波长,保证激光器工作的可靠性和稳定性,对 DFB 激光器的工作温度采取精准的控制措施势在必行。国内外研究机构对 DFB 激光器温度控制系统已进行了广泛及深入的研究,其温度控制范围通常为几十 °C,且多采用数字温度控制系统。陈晨、夏金宝等采用 DSP、单片机等处理器实现了不同应用场景中对激光器高精度的温度控制^[4-6],穆叶、胡杨等采用集成帕尔贴制冷器 (TEC) 控制器研制了 DFB 激光器的温控系统^[7-9]。以上文献主要基于 DFB 激光器的常规应用场合,最大温度控制范围在 -40 °C~50 °C,控制精度能达到 ±0.1 °C,在 +5 °C~60 °C 温控范围内,精度能达到 ±0.05 °C。但对于环境条件较为恶劣的更宽温度范围的应用领域的研究,目前尚无。

同时,相关研究^[4-8]已表明同一个温控系统在不同的温度控制范围内所能达到的控制精度并不相同,温度控制范围越宽,温控精度的实现难度就越大。数字控温方式通常采用脉冲宽度调制 (PWM) 技术,PWM 开关时钟沿包含很宽的频谱,会在 TEC 端产生电压纹波,并且在整个系统中产生噪声,对激光器的脉宽调制产生的光波杂散信号耦合到射频链路中最终会引起射频杂散抑制指标的恶化。随着光电通信技术的快速发展,DFB 激光器的应用场景中,可靠性要求越来越高,温度环境要求也越来越严苛,对恶劣环境下高精度的激光器温控系统的研究将会越来越多。

本文基于线性驱动与 PID (Proportion Integration Differentiation) 闭环控制方法研制了一种适应 -55 °C~70 °C 的宽温度范围工作,温控精度高,且具有温度、电流检测功能的 DFB 激光器自动温度模拟控制系统,应用于带宽高达 18 GHz 射频信号的高速电光转换链路中,排除了数字控温方式对射频光链路中杂散抑制指标的影响。试验结果表明,系统在 -55 °C~70 °C 的全温度范围下,控制精度在 ±0.8 °C 内,跟踪误差 (TE) 小于 ±0.5 dB,激光器的工作状态稳定,中心波长未出现漂移。

1 系统组成

温度自动控制采用模拟控温方式,提高温度控制精度及高频抗干扰能力,延长 TEC 使用寿命。模拟控温检测系统如图 1 所示,主要由温度检测电路,误差放大电路,PID 补偿电路,TEC 驱动电路等组成。

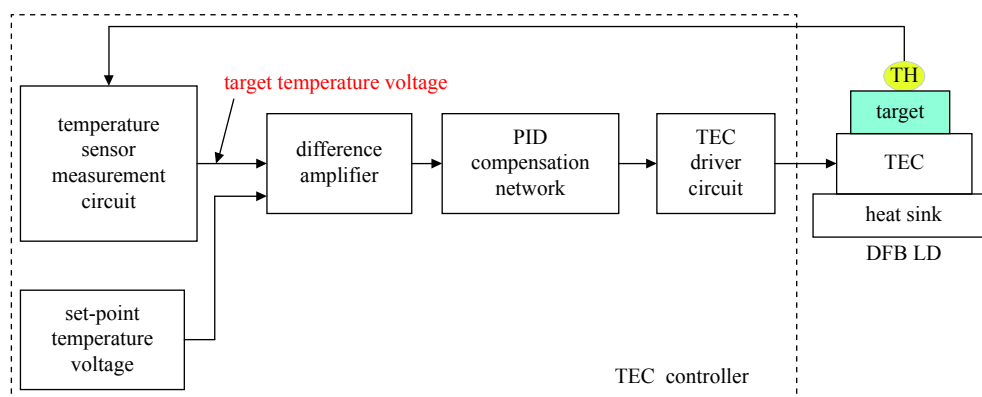


Fig. 1 Block diagram of temperature control system

图 1 模拟控温检测系统框图

温度检测电路将激光器内部热敏电阻的阻值变化转化为代表激光器实际温度的电压信号。设置温度电压是一个外部参考电压值,代表目标温度。实际温度电压信号与设置温度电压信号送入误差放大电路后进行比较放大得到误差电压信号,再通过 PID 补偿电路进行调节,补偿电路的输出控制 TEC 驱动电路实现制冷或制热。

TEC 利用固体的热电效应,改变热流方向,将热量输送到另一端,在一个 TEC 上控制制冷片实现制冷或者制热。半导体制冷片相当于一个热传递工具,当热端(被冷却物体)的温度高于某温度,TEC 开始发挥释放出多余能量的作用,使得冷热两端的温度逐渐均衡,从而实现制冷效果。相反,当冷端(被加热物体)的温度低于某温度,TEC 便开始发挥吸收能量的作用,使得冷热两端的温度逐渐均衡,从而实现制热。

调节 TEC 对 DFB 激光器进行制冷或制热以及制冷、制热的速率,可通过改变流过 TEC 的电流方向和大小来实现。当系统达到平衡后,TEC 的工作电流和方向也趋于稳定,LD 的工作温度也趋于设定的目标温度值。值得注

意的是, TEC 制冷功率和目标散热功率之间须良好匹配, 才能达到预期的制冷效果或避免耗能成倍增加。

本系统采用的激光器为 XGT9015 系列的 1550 nm DFB 激光模组为蝶形封装器件, 带宽高, 线性度好, 稳定性好, 输出功率范围为 10~20 mW, 适用于模拟射频链接。该激光器内部集成了热电制冷器 TEC 和温度敏感元件 TH。

内置的 TH 是负温度系数 (NTC) 热敏电阻, 用于检测激光器工作温度。当温度升高时, 电阻降低。NTC 热敏电阻灵敏度高, 温度分辨率高, 其温度和电阻的关系, 通常采用热敏指数“ β ”的指数公式

$$R_T = R_0 \times e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

式中: R_T 是温度为 T 时 NTC 热敏电阻的阻值; R_0 是温度为 T_0 时 NTC 热敏电阻的阻值, 单位 Ω ; T 和 T_0 是 NTC 变化前后的绝对温度值, 单位为 K。通常 T_0 取 298.15 K, 即 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

根据式(1), 已知阻值 R_T , 可得其对应温度 T 的公式

$$T = \frac{1}{\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{R_T}{R_0} \right) + \frac{1}{T_0}} \quad (2)$$

式(2)表明, 对激光器温度的检测, 可通过检测激光器内部热敏电阻的阻值来实现。

2 系统设计

2.1 温度检测电路

温度检测电路如图 2 所示, 将激光器内部热敏电阻的阻值转化为代表激光器实际温度的电压信号。通过一个惠更斯电桥实现电阻-电压的转换, 电桥后接运算放大器, 完成电阻-电压信号的放大和阻抗变换。 V_{ref} 由基准电压源产生, 专为电桥提供一个稳定的 2.5 V 参考电压。

采用的运算放大器为 OPA4188, 该芯片是一个 4 通道的 0.03 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 漂移、低噪声、轨到轨输出、零漂移运算放大器, 其 4 个通道将分别用于温度检测电路, 误差放大电路及 PID 补偿电路, 简化电路设计, 也便于 PCB 布局。

电桥电阻采用高精度低温飘的精密电阻。令 V_{th} (V) 为 NTC 热敏电阻 R_{th} (k Ω) 两端的实时电压, R' 为电桥 R_{40} 上端的等效电阻。根据运放电路特点, 有

$$V_{\text{sig}} = V_{\text{th}} - \frac{V_{\text{ref}}}{2} \quad (3)$$

$$V_{\text{th}} = 2.5 \times \frac{R'}{10 + R'} \quad (4)$$

$$R' = \frac{R_{\text{th}} \times (R_{39} + R_{42})}{R_{\text{th}} + R_{39} + R_{42}} \quad (5)$$

根据以上公式, 计算得热敏电阻

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{\left(\frac{2.5}{V_{\text{th}}} - 1 \right) \times \frac{1}{10} - \frac{1}{R_{39} + R_{42}}} \quad (6)$$

由此, 通过测得电压 V_{th} 求取热敏电阻阻值 R_{th} , 结合式(1)~(2)便可计算出对应的温度值。

2.2 误差放大电路

误差放大电路如图 3 所示, 将目标温度设定信号和温度检测信号 V_{sig} 进行比较后放大得到误差信号 V_{err} , 该误差信号代表激光器实际温度和设定温度相差的程度。

温度设定信号的电压由一个电阻分压网络来调节, 根据图 2 所示温度检测电路, 将 25 $^{\circ}\text{C}$ 时激光器热敏电阻对应的电阻值 R_{th} , 代入电路计算出温度检测信号电压 V_{sig} , 作为误差放大电路的反相输入, 调整温度设定信号的电压, 当 PID 补偿电路输出电压与 TEC 驱动电路的参考电压相等时的设置电压即为所需的温度设定电压。

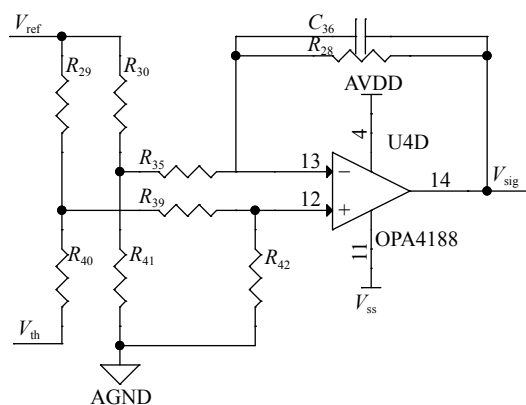


Fig. 2 Temperature detection circuit
图 2 温度检测电路

根据运放电路特点,可得误差信号

$$V_{err} = \frac{V_{ref}}{2} - V_{sig} \quad (7)$$

2.3 PID 补偿电路

本系统采用运算放大器设计了一个PID补偿电路,如图4所示。该电路对误差信号 V_{err} 进行补偿,以调节整个温度控制系统的响应时间和温度控制稳定性。其中比例、积分、微分常数已经过反复验证后确定。

2.4 TEC 驱动电路

TEC 驱动电路为激光器内部 TEC 提供驱动电压,同时控制驱动电压的大小和方向,如图5所示。驱动芯片采用轨至轨运算放大器 OPA569,该器件采用 SO-20 封装,2.7~5.0 V 供电,最大输出电流为 2 A,输出摆动为 150 mA@2 A,具有热保护、可调节限制电流、电流检测、自动关断功能、电流及温度预警等功能。

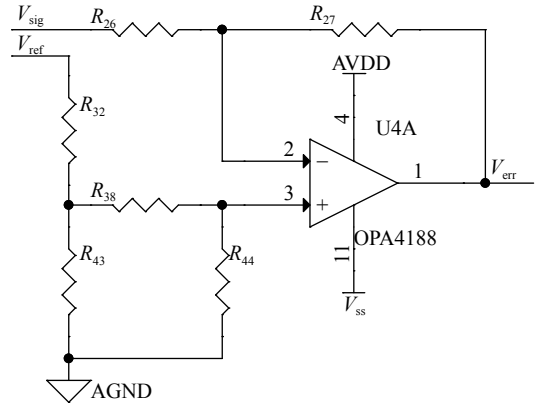


Fig. 3 Error amplifying circuit

图 3 误差放大电路

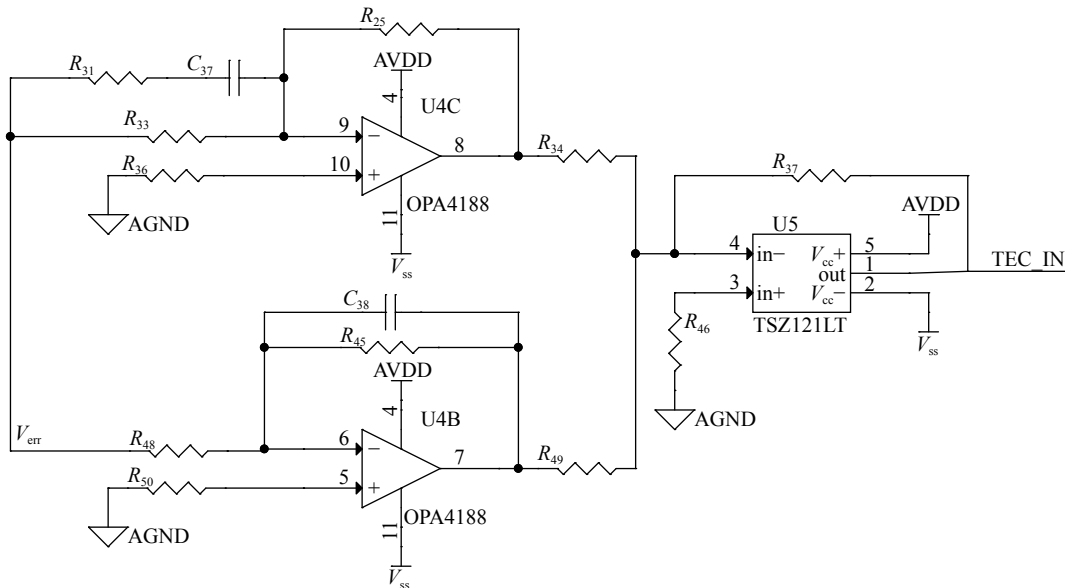


Fig. 4 PID compensation circuit

图 4 PID 补偿电路

假设 TEC 负载为 2 Ω,应用 Multisim 软件建立仿真电路并进行验证,如图6所示。

TEC 两端的电压 V_{TEC} 与经过 PID 补偿后的信号电压 V_{TEC_IN} 以及 TEC 驱动电路参考电压 V_{REF_TEC} 满足如下关系

$$V_{TEC} = 2(V_{TEC_IN} - V_{REF_TEC}) \quad (8)$$

根据 TEC 驱动电路原理,其工作结果如下:

负载温度等于 25 ℃ 时,电路处于热平衡状态, $V_{TEC+} = V_{TEC-}$, $V_{TEC} = 0$;

负载温度大于 25 ℃ 时,电路处于制冷状态, $V_{TEC+} > V_{TEC-}$, $V_{TEC} > 0$;

负载温度小于 25 ℃ 时,电路处于制热状态, $V_{TEC+} < V_{TEC-}$, $V_{TEC} < 0$ 。

根据图6仿真结果,同上述描述一致。

2.5 LD 温度检测电路

如图7所示,应用同相比例放大器,接电阻分压网络使 $V_T = 2V_{th}/1.15$, V_{th} 为输入端信号: 1.25 V@25 ℃ (对应激光器热敏电阻为 10 kΩ@25 ℃),默认 $R_{60} = 2.2$ kΩ,根据实际可调整阻值改变放大增益,实现 $V_T = 1.15$ V@25 ℃ 的检测功能。

此外,还可结合 OPA569 的电流检测引脚,搭建电路预留 TEC 电流检测功能。

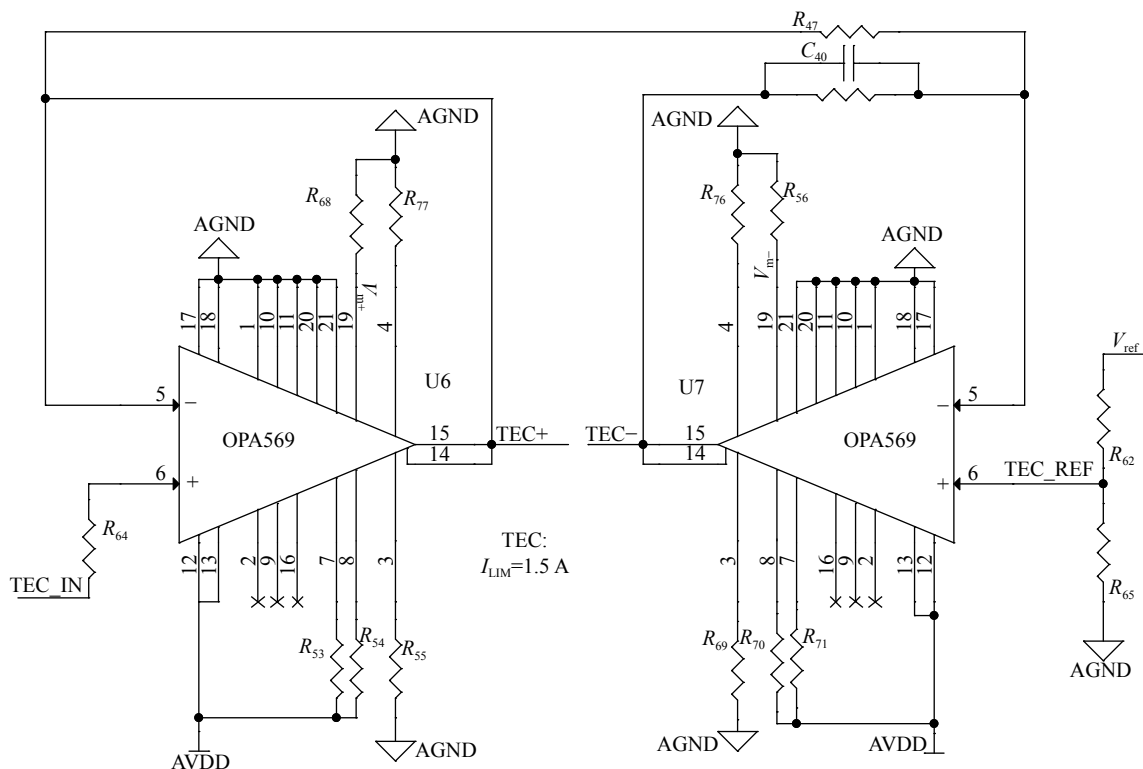


Fig. 5 TEC drive circuit diagram

图 5 TEC 驱动电路图

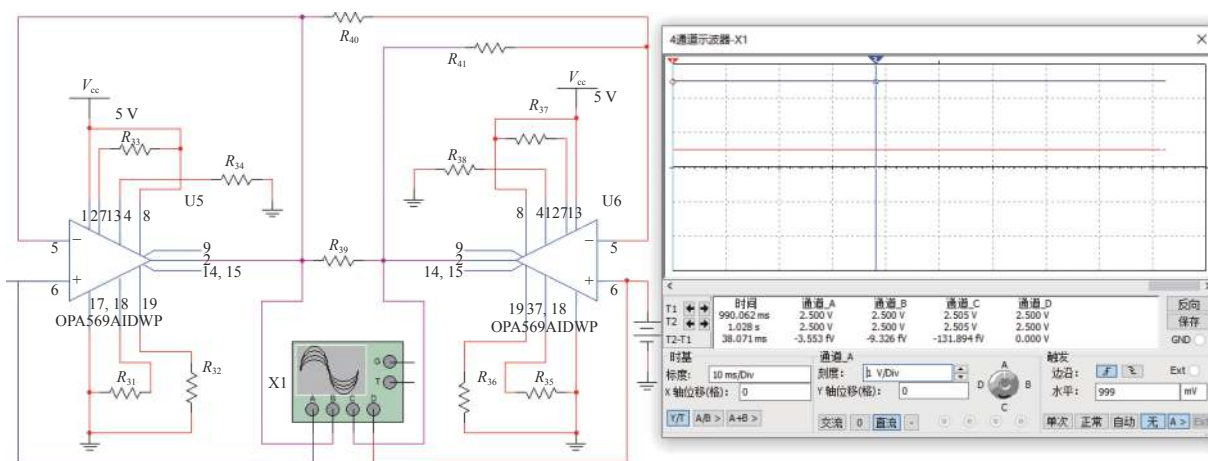


Fig. 6 TEC drive simulation circuit diagram

图 6 TEC 驱动仿真电路图

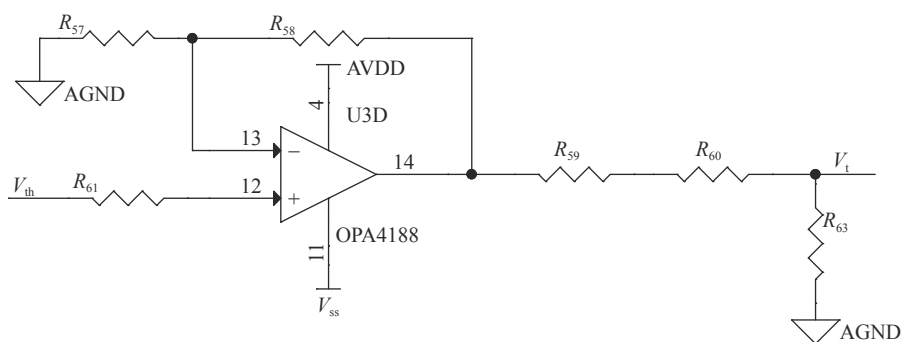


Fig. 7 LD temperature monitoring circuit diagram

图 7 LD 温度监视电路图

3 试验验证

为验证上述温度控制系统的性能,对中心波长为 1550 nm 的 DFB 激光器进行了温度控制试验,试验框图及实物图如图 8 和图 9 所示。根据项目需求,激光器的目标控制温度为 25 ℃,温控范围-55 ℃~70 ℃,试件温度稳定后,温度保持 120 min 以上。

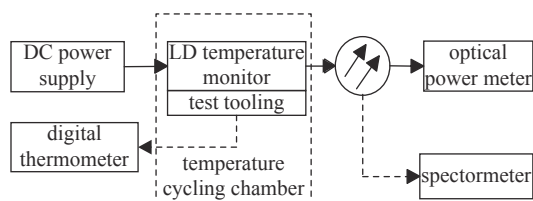


Fig. 8 Test block diagram of DFB laser temperature control system

图 8 DFB 激光器温度控制试验框图



Fig. 9 Photo of temperature test verification platform

图 9 温度试验验证平台实物图

试验中,温度循环箱使用 TH-408EH 恒温恒湿箱,其温度范围-60 ℃~150 ℃,升温时间约 4.0 ℃/min,降温约 1.0 ℃/min。波长测试使用 AQ6370C 光谱仪,输出光功率测量使用光功率计,满足测试环境要求。同时为了标定温度稳定,应用数字温度计与高温探头相结合的方式测试 LD 及工装铝板的温度,作为被测件温度稳定的判决依据。

试验按照试验前检测、试验运行、恢复处理、试验后检测的顺序进行。以高温试验为例,按照规定的高温工作条件,以 ≤ 10 ℃/min 温度变化速率将试验箱内温度升至 70 ℃ 后并保持一定时间,直到被试品达到温度稳定(温度计读数稳定 30 min 以上),再启动被试模块工作,对其进行功能及性能检测,并记录,直到模块工作达到稳态并保持 2 h,然后模块停止工作。

为保证试验效果,试验过程中还须注意以下事项:(1) LD 为静电敏感器件,试验过程中必须佩戴防静电手环;(2) 操作时佩戴乳胶指套或防静电手套,保护 LD 控制系统表面外观不被划伤;(3) 所用设备均在校准有效期内,且直流电源、恒温箱及光谱仪等试验前须预热 30 min 以上;(4) 在被测件与试验工装之间,正确涂覆适当的导热硅脂,增强散热效果,确保试验有效性。

使用研制的控制系统搭载 5 只 DFB 激光器,在常温环境、低温环境及高温环境下,分别验证控制系统的适应性、控制精度和稳定性,并使用 LD 的跟踪误差 TE 作为辅助测量指标^[10]。经过多次重复试验测试,均获得较好的试验效果,其中一组数据记录如表 1、表 2 所示。

表 1 中, T_e , I_{atc} , V_{th} , P_{out} , λ 依次为试验所测环境温度、温控电流、热敏电阻两端实时电压、LD 输出功率、中心波长。 R_{th} , T , ΔT 分别为据实测电压 V_{th} 及 2.1 所述公式换算所得热敏电阻实际阻值、LD 实际温度、实际温度与目标温度的偏差值。

从表 1 可见,常温连续工作 2 h 后,5 只激光器的各参数均无明显变化,温控精度 ΔT 在 0.02 ℃ 以内。

表 1 5 只 LD 的常温测试数据表
Table 1 Test data table of 5 LDs at 25 ℃

No.	condition	$T_e/^\circ\text{C}$	I_{atc}/mA	V_{th}/V	P_{out}/dBm	λ/nm	$R_{th}/\text{k}\Omega$	$T/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$
1	initial state	25	80	0.847	9.66	1547.63	10	25	/
	after 2 h	25	79	0.847	9.66	1547.63	10.00788	24.98201	-0.01789
2	initial state	25	60	0.847	11.69	1548.04	10	25	/
	after 2 h	25	62	0.847	11.68	1548.04	10.00788	24.98201	-0.01789
3	initial state	25	60	0.848	10.0	1548.71	10	25	/
	after 2 h	25	62	0.848	9.99	1548.71	10.00654	24.98507	-0.01493
4	initial state	25	59	0.847	10.29	1547.93	10	25	/
	after 2 h	25	60	0.847	10.29	1547.93	10.00788	24.98201	-0.01789
5	initial state	25	77	0.848	9.85	1548.54	10	25	/
	after 2 h	25	78	0.848	9.85	1548.54	10.00654	24.98507	-0.01493

表 2 5 只 LD 的三温环境测试数据表

Table 2 Three-temperature environment test data table of 5 LDs

No.	$T_e/^\circ\text{C}$	I_{atc}/mA	V_{th}/V	$P_{\text{out}}/\text{dBm}$	λ/nm	$R_{\text{th}}/\text{k}\Omega$	$T/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	TE/dB
1	+25	80	0.847	9.66	1547.63	10	25	/	/
	-55	790	0.851	9.31	1547.63	10.148 79	24.663 05	-0.336 95	0.35
	+70	640	0.841	9.62	1547.62	9.801 321	25.459 06	0.459 06	/
2	+25	60	0.847	11.69	1548.04	10	25	/	/
	-55	753	0.851	11.59	1548.03	10.148 79	24.663 05	-0.336 95	/
	+70	636	0.842	11.35	1548.03	9.835 354	25.379 66	0.379 66	0.34
3	+25	60	0.848	10.0	1548.71	10	25	/	/
	-55	740	0.852	9.68	1548.7	10.147 07	24.666 89	-0.333 1	0.48
	+70	580	0.838	10.16	1548.7	9.666 254	25.777 31	0.777 31	/
4	+25	59	0.847	10.29	1547.93	10	25	/	/
	-55	745	0.849	9.99	1547.92	10.078 01	24.822 63	-0.177 37	0.37
	+70	627	0.839	10.36	1547.92	9.733 716	25.617 71	0.617 71	/
5	+25	77	0.848	9.85	1548.54	10	25	/	/
	-55	779	0.85	9.6	1548.56	10.076 48	24.826 08	-0.173 91	0.32
	+70	599	0.843	9.92	1548.55	9.834 462	25.381 742	0.381 74	/

据所测 V_{th} 及式(6)换算 R_{th} , 求得对应的激光器实际温度, 并统计如图 10、图 11 所示。

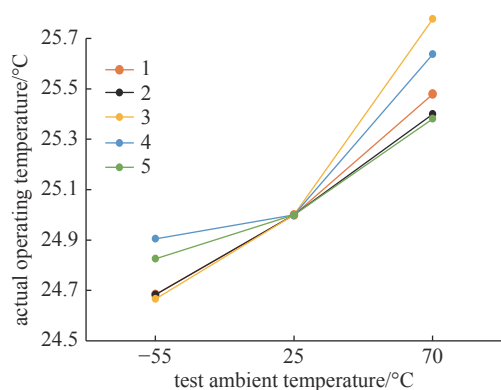


Fig. 10 Three-temperature data curve of 5 LDs

图 10 5 只 LD 的三温数据曲线

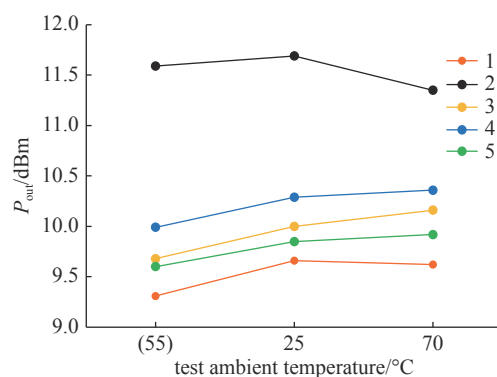


Fig. 11 Three-temperature optical power curve of 5 LDs

图 11 5 只 LD 的三温光功率曲线

从表 2、图 10 及图 11 可见, 5 只 DFB 激光器在 -55°C 到 70°C 的全温工作环境下的波长均无明显变化, 实际工作温度稳定度均保持半小时以上, 温控精度 ΔT 在 0.8°C 以内, 整体温控电流 I_{atc} 在 800 mA 以内。全温范围内, 5 只 LD 的跟踪误差 (TE) 分别为 $0.35, 0.34, 0.48, 0.37, 0.32\text{ dB}$, 均小于 0.5 dB 。

4 结论

本文研制的 DFB 激光器温控系统的温度控制范围 $-55^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$, 控制精度在 $\pm 0.8^\circ\text{C}$ 内。控制精度随着工作环境温度的范围而不同, 在室温环境下可达到 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 。全温范围内跟踪误差 (TE) 小于 0.5 dB , 且系统尺寸仅为 $66\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 16\text{ mm}$, 成本低, 简单可靠, 易于实现, 可大批量生产; 使用标准的 DB9 检测接口, 便于集成应用于多种激光器的控制系统中, 在军事、航空、航天及民用杂散指标、温度要求较高的应用领域中, 对实现产品化的研制生产具有重大的工程实践价值。

参考文献:

- [1] 穆叶, 胡天立, 陈晨, 等. 采用模拟 PID 控制的 DFB 激光器温度控制系统研制[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48: 0405001. (Mu Ye, Hu Tianli, Chen Chen, et al. Development of temperature control system of DFB laser using analog PID control[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48: 0405001)
- [2] 胡杨, 张亚军, 于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路设计[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(5): 839-842. (Hu Yang, Zhang Yajun, Yu Jinquan. Design of temperature control circuit for laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 839-842)

- [3] 杨鹏, 胡业荣, 王贵山, 等. 温度对半导体激光器退化的影响[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 45-50. (Yang Peng, Hu Yerong, Wang Guishan, et al. Impact of temperature on degradations of laser diode[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(1): 45-50)
- [4] 陈晨, 党敬民, 黄渐强, 等. 高稳定、强鲁棒性DFB激光器温度控制系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4): 1004-1010. (Chen Chen, Dang Jingmin, Huang Jianqiang, et al. DFB laser temperature control system with high stability and strong robustness[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(4): 1004-1010)
- [5] 李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC的高精度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1745-1749. (Li Jianglan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1745-1749)
- [6] 夏金宝, 刘兆军, 张飒飒, 等. 快速半导体激光器温度控制系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 1991-1995. (Xia Jinbao, Liu Zhaojun, Zhang Sasa, et al. Design of semiconductor laser quick temperature control system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 1991-1995)
- [7] 鲍梦. 模糊理论和神经网络的激光器温控系统[J]. 激光杂志, 2017, 38(10): 123-126. (Bao Meng. Laser temperature control system based on fuzzy theory and neural network[J]. *Laser Journal*, 2017, 38(10): 123-126)
- [8] 刘熙明, 魏旭, 窦立刚. 激光系统中半导体激光器温度稳定系统研究与设计[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 021002. (Liu Ximing, Wei Xu, Dou Ligang. Research and design of semiconductor laser temperature stabilization system in laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 021002)
- [9] 刘云芳, 张晓, 李建伟. 模拟PID电路参数自整定温控系统设计[J]. 低温工程, 2013(2): 68-72. (Liu Yunfang, Zhang Xiao, Li Jianwei. Design of analog PID circuit system with parameter auto-tuning[J]. *Cryogenics*, 2013(2): 68-72)
- [10] GB/T 21548-2008, 光通信用高速直接调制半导体激光器的测量方法[S] (GB/T 21548-2008, 光通信用高速直接调制半导体激光器的测量方法[S]. (GB/T 21548-2008, Methods of measurement of the high speed semiconductor lasers directly modulated for optical fiber communication systems[S])