

# 激光与光电子学进展

## 面向混沌半导体激光器的高稳定控制系统设计

续文敏<sup>1</sup>, 杨强<sup>1</sup>, 王兴<sup>1</sup>, 柴萌萌<sup>2</sup>, 张明江<sup>1,2\*</sup>, 张建忠<sup>1</sup>, 乔丽君<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 高少华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

<sup>2</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

**摘要** 针对混沌半导体激光器输出波长和功率的稳定性问题, 设计了一套面向混沌半导体激光器的高稳定控制系统。利用深度负反馈电路实现对激光器驱动电流的高稳定高精度恒流控制; 采用模糊自适应比例-积分-微分算法以及 H 桥驱动电路设计的温度控制器实现了对激光器温度的稳定控制。结果表明, 所设计的双通道电流源输出电流范围分别为 0.00~40.00 mA 和 0.00~100.00 mA, 在室温 25.0 °C 环境下稳定度分别优于 0.002% 和 0.004%, 调节精度均可达 0.01 mA; 驱动电流为 20.00 mA 时, 混沌半导体激光器连续工作 120 min 的输出光功率漂移量分别仅为 0.0066 dBm 和 0.0072 dBm; 温度控制电路的温度控制范围为 18.0~40.0 °C, 激光器在 25.0 °C 下工作 120 min 的中心波长漂移量仅为 0.007 nm。该控制系统在环境温度为 10.0~40.0 °C 范围内可稳定工作。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 混沌半导体激光器; 恒流源; 温度控制系统; 高精度; 高稳定

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714008

## Design of High Stability Control System for Chaotic Semiconductor Lasers

Xu Wenmin<sup>1</sup>, Yang Qiang<sup>1</sup>, Wang Xing<sup>1</sup>, Chai Mengmeng<sup>2</sup>, Zhang Mingjiang<sup>1,2\*</sup>,  
Zhang Jianzhong<sup>1</sup>, Qiao Lijun<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>1</sup>, Gao Shaohua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** Aiming at the stability of output wavelength and power of chaotic semiconductor lasers, a high stability control system for chaotic semiconductor lasers is designed. The deep negative feedback circuit is used to realize high stability and high precision constant current control. The high stability control of laser temperature is realized by using fuzzy adaptive proportional-integral-differentiation algorithm and H bridge drive circuit. The results show that the output current range of the designed dual-channel current source is 0.00–40.00 mA and 0.00–100.00 mA, and the stability at room temperature of 25.0 °C is better than 0.002% and 0.004%, respectively. The adjustment accuracy can reach 0.01 mA. When the driving current is 20.00 mA, the output optical power drift of the chaotic semiconductor laser works continuously for 120 min is only 0.0066 dBm and 0.0072 dBm, respectively. The temperature control range of the temperature control circuit is 18.0–40.0 °C, and the central wavelength shift of the laser working at 25.0 °C for 120 min is only 0.007 nm. The control system can work stably at the ambient

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-09-10; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61527819, 61875146)、山西省高等学校科技成果转化培育项目、山西省“三晋学者”特聘教授(专家)支持计划(201617)、山西省重点研发计划(201803D121064, 201903D121177)、山西省回国留学人员科研资助项目(2017-052)、山西省面上青年基金(201801D221187)

\*E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

temperature of 10.0–40.0 °C.

**Key words** lasers; semiconductor laser; chaotic semiconductor laser; constant current source; temperature control system; high precision; high stability

**OCIS codes** 140.5960; 140.5965; 140.2020

## 1 引言

混沌激光是激光器的一种特殊输出形式,具有内在随机性、初值敏感性、宽频谱等特性,在混沌保密通信<sup>[1]</sup>、高速物理随机数(密钥)产生<sup>[2]</sup>、高精度光网络故障检测<sup>[3]</sup>、反告警雷达<sup>[4]</sup>、超宽带技术<sup>[5]</sup>和分布式光纤传感<sup>[6]</sup>等领域具有重要应用,而混沌光源则是其在各领域应用的核心器件。混沌半导体激光器采用温度敏感型材料作为增益介质,如砷化镓、磷化铟等,温度的改变会影响混沌半导体激光器输出的波长和阈值电流,最终将导致输出混沌状态不稳定<sup>[7-8]</sup>。此外,由于混沌半导体激光器对于工作参数的变化十分敏感,微小的驱动电流变化就可使其输出特性发生改变,对其应用产生不利影响。例如在混沌保密通信中,发射机和接收机的两个混沌半导体激光器的驱动电流的微小差异会降低它们之间的同步系数,恶化其同步性,进而增大传输信息的误码率<sup>[9-11]</sup>。由此可见,精确控制混沌半导体激光器的驱动电流和工作温度至关重要,研制高精度和高稳定的电流驱动和温度控制系统对于混沌半导体激光器的稳定输出和实际应用具有重要意义。

目前,国内外的许多厂商、研究机构都推出了高精度高稳定的激光器电流驱动与温度控制设备。对于激光器电流驱动源相关的研究,如美国 Wavelength 公司的 PLD200 激光器电流源的输出电流稳定度小于 0.01%,最小调节精度为 0.1 mA; ILX Lightwave 公司的 LDX-3412 激光器电流源的输出电流稳定度为 0.005%,最小调节精度为 0.1 mA。在国内,中国计量科学研究院崔文超等<sup>[12]</sup>利用 LDTC0520 芯片得到了激光器输出电流为 80 mA 时,40 min 内电流稳定度约为 0.4% 的结果;兰州大学李永定等<sup>[13]</sup>采用 TMS320LF2812 芯片设计实现了驱动电流稳定度在 48 h 内优于 0.08%。对于激光器温度控制相关的研究,吉林大学 Chen 等<sup>[14]</sup>以数字信号处理(DSP)器件 TMS320LF2407 作为中央处理器,设计了一种基于数字信号处理的半导体激光器高精度温度控制系统,实现了精度 0.1 °C 的温度控制效果;中国计量大学罗亮等<sup>[15]</sup>采

用集成温度控制芯片 MAX1978 控制半导体制冷片工作,实现了 1 h 内光波长的最大漂移量为 0.012 nm。

本课题组前期设计的面向混沌半导体激光器的温度控制和电流驱动系统<sup>[16]</sup>,在 100 min 内,电流稳定度在 0.020% 以内。然而该驱动系统所选用的芯片 ADN2830,其输出电流精度校准需依赖调节外接电阻阻值以及对外部参考电压分压处理,而分压电路所得参考电压因热噪声等影响,长时间工作后稳定性会下降。此外,温度控制系统采用 ADN8830 芯片外接比例-积分-微分(PID)电路实现,而通常温度控制系统具有高度非线性、时变不确定性和纯滞后等特点,过程参数甚至可能会随着时间和工作环境的变化而变化<sup>[17]</sup>,PID 电路参数固定,无法自适应调整。

本文设计了一种基于运算放大器等分立式元件的混沌半导体激光器高稳定高精度电流驱动和温度控制系统。该系统设计了基于深度负反馈电路的双通道驱动电流源,实现了不同范围的高稳定高精度恒流输出。同时温度控制部分利用模糊自适应 PID 算法,实现过程参数的自适应调节,达到了对激光器温度的快速高稳定控制效果。

## 2 硬件电路设计

硬件电路包括具有不同电流输出能力的电流源电路和温度控制电路。系统中央处理器(CPU)选择 32 位 STM32F407ZGT6 芯片,用于驱动本系统中所需数模转换器(DAC)、模数转换器(ADC)工作,输出脉冲宽度调制(PWM)波,以及运行模糊自适应 PID 算法等。

### 2.1 电流源电路设计及工作原理

电流源的实质是利用器件对电流进行反馈,动态调节设备的供电状态,使得输出电流趋于恒定,从而建立恒流源。本系统分别采用集成运算放大器和工作于输出电流饱和状态的场效应管,设计了具有两种不同电流输出能力的电流源。

电流源 1 电路如图 1 所示,该电流源采用电流并联负反馈电路将输入的电压信号转换成满足一定关系的电流信号,输出电流能够保持稳定且不会随负载的变化而变化,从而达到恒流输出的效果。

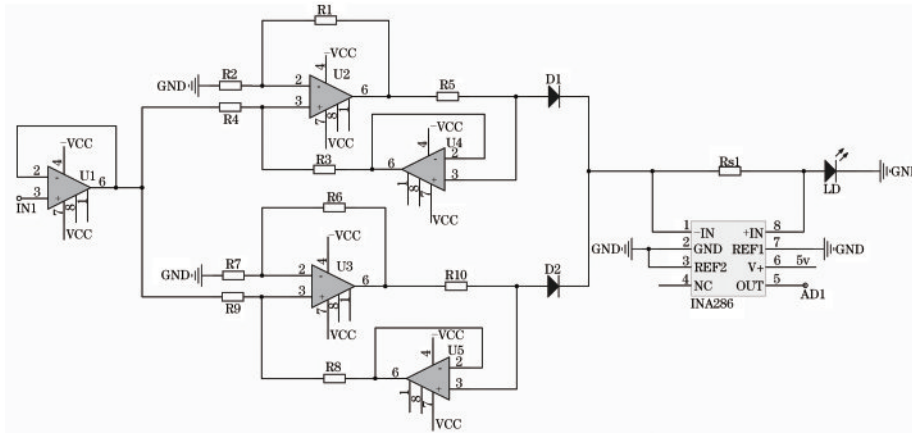


图 1 电流源 1 原理图

Fig. 1 Schematic of current source 1

因集成运算放大器电流输出能力有限,因此需采用并联结构达到更大电流输出的效果。

图 1 中 IN1 为电流源 1 的驱动电压输入端,该点电压  $V_{SET1}$  由 STM32 内部 12 位 DAC 提供,用于调节激光器驱动电流大小。图中运算放大器型号均为 OP07CD,运算放大器 U1 作为电压跟随器,用于降低 DAC 的输出阻抗。驱动电流产生电路由两路基于运算放大器的电流并联负反馈电路并联得到<sup>[18]</sup>。并联的两路负反馈电路采用具有抗干扰性强、低噪声、低失调电压的运算放大器作为转换器件,可有效利用反馈来达到稳定输出的效果。两路电路各参数对应相等,确保电路的对称性,以保证输出电流的稳定性。考虑到运算放大器输出电流能力有限,两路并联输出可降低单路运算放大器输出功率,保证电路工作的稳定性,同时可增大输出电流范围<sup>[19-20]</sup>。图中各运算放大器均采用 ±12 V 双电源对称供电,以保证输出电流的线性效果。

当  $R_1=R_2, R_3=R_4$  时,单路输出电流  $I_1$  与各电阻的关系为

$$I_1 = \frac{V_{SET1}}{R_5}, \quad (1)$$

$$V_{SET1} = V_{REF1} \frac{N_1}{4096}, \quad (2)$$

式中:  $N_1$  为 12 位 DAC 的数字控制码;  $V_{REF1}$  为 DAC 的参考电压,电压值为 3.3 V。为保证运算放大器工作在安全输出功率范围,单路输出电流最大为 20.00 mA。电流源 1 整体输出电流  $I_{L1}$  为

$$I_{L1} = 2I_1. \quad (3)$$

因此,电流源 1 整体最大输出电流为 40.00 mA,

最小调节步进为 0.01 mA。图中 INA286 芯片是内部增益为 100 V/V 的电流监视器,用于实时反馈当前输出电流值。图中  $R_{s1}$  是精度为 0.1% 的电流采样电阻,阻值为 1 Ω。芯片 INA286 输出端电压值为采样电阻  $R_{s1}$  两端电压的 100 倍,用于 ADC 采样并反馈当前电压给 CPU,从而得到当前电流源的实时输出电流大小。ADC 选择 ADS1256,该芯片为 24 位极低噪声高精度模数转换器,拥有 8 个数据采集通道。通道 0 用于采集上述 INA286 的输出电压,并将模数转换结果反馈到 CPU 用于电流监测。

因基于运算放大器的电流源输出电流能力有限,因此可利用场效应管(MOS)特性,实现更大恒流输出。电流源 2 电路如图 2 所示,该电流源利用 MOS 管在漏极电压一定时,源极电压和漏极电流呈线性效果的特性,实现对输出电流的线性调控。利用运算放大器同相端和反相端电压差,实现对 MOS 管源极电压的调控。

图 2 中  $V_{SET2}$  由 16 位数模转换器 DAC8551 提供,用于调节电流源输出电流。U6 为电压跟随器,用于降低 DAC 的输出阻抗。U7 为反相比例电路,能够将输入电压反相输出,为后端电路提供负驱动电压。电阻  $R_{17}, R_{18}, R_{19}$  和  $R_{20}$  的阻值均相等,用于提高共模抑制比,抑制零漂,从而提高放大电路的输出性能,放大器 U8 用于放大电压,具有抗干扰性强、低噪声、低失调电压等特性,能够保证输出电压的稳定性<sup>[21]</sup>。放大器 U8 的输出电压用于驱动 MOS 管 Q1,电路输出电阻较小,采用具有饱和输出电流的伏安特性的 MOS 管作为输出级的器件,以保证电路的输出稳定性以及激光器的稳定工作<sup>[22]</sup>。对该电路进行分析,得到输出电流  $I_{L2}$  为

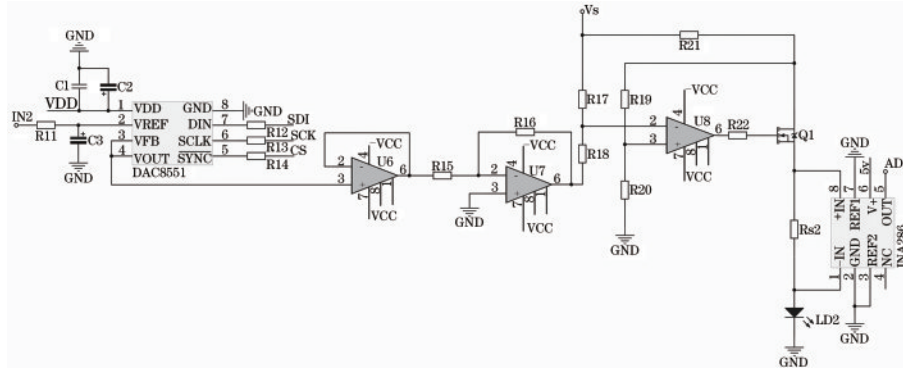


图 2 电流源 2 原理图

Fig. 2 Schematic of current source 2

$$I_{L,2} = \frac{-V_{SET2}}{R_{21}} \frac{R_{19} + R_{20}}{R_{19} + R_{20} + R_L}, \quad (4)$$

$$V_{SET2} = V_{REF2} \frac{N_2}{65536}, \quad (5)$$

式中： $N_2$  为 16 位 DAC 的数字控制码； $V_{REF2}$  为 DAC 的参考电压，电压值为 2.5 V。

当电阻  $R_{19}$ 、 $R_{20}$  的阻值远大于激光器内阻  $R_L$  时，输出电流  $I_{L,2}$  不再受激光器内阻  $R_L$  的影响，从而达到恒流输出的效果。图中  $R_{s2}$  是精度为 0.1% 的电流采样电阻，阻值为 0.5  $\Omega$ 。芯片 INA286 输出端电压值为采样电阻  $R_{s2}$  两端电压的 100 倍，用于 ADC 采样并反馈当前电压到 CPU，从而得到当前电流源的实时输出电流大小。ADS1256 的通道 1 用于采集上述 INA286 的输出电压，并将模数转换结果反馈到 CPU 用于电流监测。

电流源 2 的输出电流大小为

$$I_{L,2} = \frac{-V_{SET2}}{R_{21}}. \quad (6)$$

### 2.2 温度控制电路设计及工作原理

本温度控制系统采用 H 桥驱动半导体制冷器 (TEC) 工作，通过 PWM 波驱动 H 桥中场效应管 (MOS) 通断改变驱动 TEC 的电流方向，从而实现

TEC 制冷或制热。通过调节 PWM 波占空比改变 MOS 管的导通程度，从而控制 TEC 的工作电流。

混沌半导体激光器可通过调节其内部的热敏电阻和 TEC 实现温度控制。图 3(a) 为 H 桥驱动电路，通过控制 MOS 管的通断，驱动 TEC 制冷或制热。图 3(a) 中用于驱动 H 桥的两路 PWM 波由微控制器内部两个不同的 16 位定时器产生，通过改变 PWM 波输出的占空比来调节用于驱动 MOS 管通断的电压大小，控制 MOS 管缓慢导通，保证 TEC 工作电流的稳定性和可靠性。图 3(a) 中 U1 和 U2 为互补输出型 FDW2520 芯片，其内部分别集成了 P 沟道 MOS 管和 N 沟道 MOS 管，当图中 B1 点输入为高电平，B2 为低电平时，三极管 Q2 和 Q4 处于导通状态，Q1 和 Q3 处于截止状态，此时，U1 中 P 沟道 MOS 管与 U2 中 N 沟道 MOS 管导通，U1 中 N 沟道 MOS 管与 U2 中 P 沟道 MOS 管截止，电流从 TEC+ 流向 TEC-，TEC 制冷<sup>[23]</sup>；当图中 B1 点输入为低电平，B2 为高电平时，三极管 Q2 和 Q4 处于截止状态，Q1 和 Q3 处于导通状态，此时，U1 中 P 沟道 MOS 管与 U2 中 N 沟道 MOS 管截止，U1 中 N 沟道 MOS 管与 U2 中 P 沟道 MOS 管导通，电流从

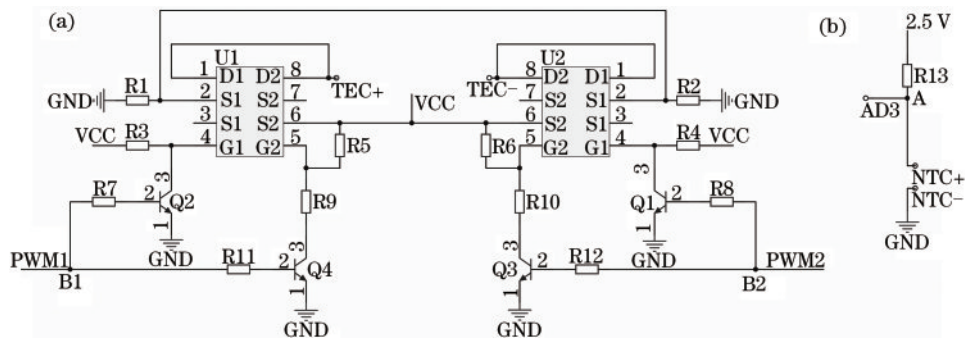


图 3 温度控制电路。(a) H 桥驱动电路；(b) 温度采集电路

Fig. 3 Temperature control circuit. (a) H bridge drive circuit; (b) temperature acquisition circuit

TEC—流向 TEC+, TEC 制热<sup>[24]</sup>。图 3(b)为温度反馈电路。激光器温度的变化会引起热敏电阻阻值的变化, ADC 对 A 点电压进行采集并传输给 STM32, STM32 通过模糊 PID 算法程序, 调节 B1 和 B2 两点电压, 达到对激光器温度的闭环控制效果。ADS1256 的通道 2 用于采集 A 点电压。为减少热噪声对反馈点电压的影响,  $R_{13}$  选用阻值为 10 k 的高精度线绕电阻。图中 NTC+ 与 NTC- 为热敏电阻接口, 该热敏电阻为半导体激光器内部集成的负温度系数热敏电阻, 标称阻值(25 °C)为 10 k。经电路分析, 得到 A 点电压值  $V_A$  与电阻  $R_{13}$  和热敏电阻  $R_{TH}$  的关系为

$$V_A = \frac{2.5 \times R_{TH}}{R_{13} + R_{TH}} \quad (7)$$

### 3 温度控制系统算法设计

温度控制系统算法采用 PID 算法, 该算法将当前温度与目标温度差值进行算法调节, 算法输出值用于调节 PWM 波占空比。混沌半导体激光器的温度控制系统算法选用模糊自适应 PID 算法。模糊

自适应 PID 控制不仅具有智能控制的自学习、自适应、自组织的能力, 能够自动辨识被控过程参数、适应被控过程参数的变化, 而且又具有常规 PID 控制器结构简单、鲁棒性强、可靠性强的特点<sup>[17]</sup>。若温度发生突变或温度调节跨度较大, 该算法可实现对 3 个控制参数  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  的自动修正, 使温度迅速调节到预设温度,  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  分别表示比例系数、积分系数和微分系数<sup>[25]</sup>。

采用模糊 PID 参数自整定控制方式, 首先要找出  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  三个参数与控制偏差  $E$  和当前偏差与上次偏差的变化  $E_c$  之间的模糊关系, 在运行中通过不断检测  $E$  和  $E_c$ , 根据模糊控制原理来对三个参数进行修改, 以满足不同  $E$  和  $E_c$  对控制参数的不同要求, 从而使被控对象有良好的动静态性能, 保证温度控制系统的稳定性<sup>[26]</sup>。 $E$  和  $E_c$  作为模糊控制器的输入,  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  三个参数作为输出的系统结构图如图 4 所示。本系统中,  $E$  代表预设温度与实际温度的偏差,  $E_c$  代表当前偏差与上次偏差的差值。图中 input 值为预设温度值, output 值为算法输出值, 用于调节 PWM 占空比, 控制 H 桥中 MOS 管开断, 从而控制 TEC 的工作电流。

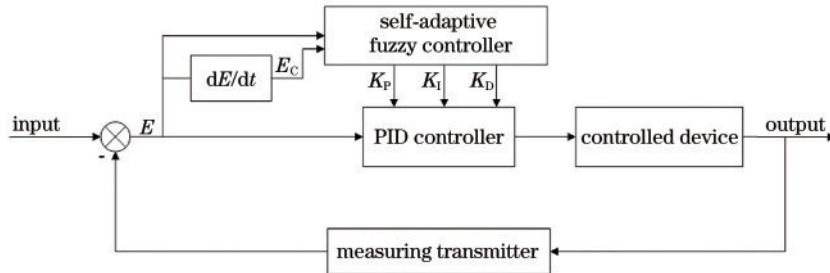


图 4 模糊自适应 PID 系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of fuzzy adaptive PID system

本系统选择  $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$  作为  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  的修订值, 即  $K_P = K_P' + \Delta K_P$ ,  $K_I = K_I' + \Delta K_I$ ,  $K_D = K_D' + \Delta K_D$ , 其中  $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$  为上述系统的输出值,  $K_P'$ 、 $K_I'$  和  $K_D'$  为预整定值。

PID 参数  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$  的论域需实验整定得出。本系统选择增量式 PID 算法进行参数整定。增量式 PID 算法的公式为

$$\Delta u = K_P [e(k) - e(k-1)] + K_I \times e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k+2)], \quad (8)$$

式中:  $e(k)$  为第  $k$  次采样当前值和设定值的差。经实验得出, 系统仅需整定  $K_P$  和  $K_I$  即可得到预设效果, 实验设定  $K_P'$  和  $K_I'$  分别为 50 和 8, 选定  $\Delta K_P$  的论域为  $(-10, 10)$ ,  $\Delta K_I$  的论域为  $(-5, 5)$ ,  $E$  和  $E_c$  的论

域为  $(-16, 16)$ 。

本系统温度控制分为模糊控制区和直接控制区, 控制温度接近目标温度达到一定误差限度 ( $-1.6\text{ °C} \leq \Delta T \leq 1.6\text{ °C}$ ) 时, 启动模糊 PID 控制算法, 使温度稳定在目标温度附近。当温度超过上述误差限度时, 采用直接控制。这样既保证了系统的稳定性又提高了系统的快速性<sup>[27]</sup>。

温度控制系统算法具体流程如下: 数据采集电路将图 3(b) 中 A 点电压的模数转换结果反馈到 CPU, CPU 将这一数值做  $N$  倍衰减后与温度设定目标值取差值, 若差值结果在模糊控制区内, 则执行模糊自适应 PID 算法。若在模糊控制区之外, 则执行直接控制算法, 即当  $\Delta T > 1.6\text{ °C}$  时, PWM1 的占空比为 100%, PWM2 的占空比为 0%; 当  $\Delta T < -1.6\text{ °C}$  时,

PWM1 的占空比为 0%, PWM2 的占空比为 100%。如目标温度为 20.0 °C 时, 由 (7) 式可得, B 点电压值为 1368.72 mV, 经模数转换后得到的数字值为 4592652, 超出算法可处理范围, 因此需对模数转换后的数字值进行衰减, 再传递到 CPU 用于算法控制。经实验调整, 选择衰减倍数为 7852.8, 此时经衰减后的一个数字值对应温度为 0.1 °C。

温度控制系统算法基于 MDK-ARM 软件开发环境完成, 该软件将算法程序编译生成可执行文件, CPU 执行该文件并进行算法计算。

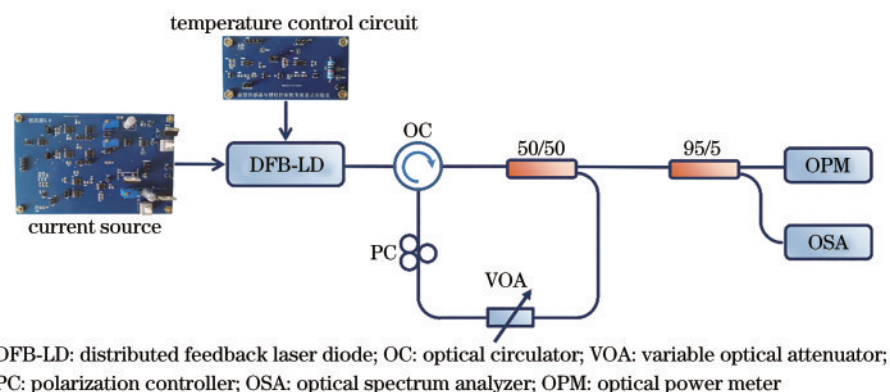


图 5 混沌半导体激光器输出性能测试实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of chaotic semiconductor laser output performance test

电流源的输出电流驱动 DFB 激光器出射激光, 激光经过光环行器 (OC) 后, 被分光比为 50/50 的光耦合器分为两路, 一路通过光环行器反馈回激光器产生混沌激光, 反馈路中的可调光衰减器 (VOA) 用于控制反馈强度, 偏振控制器 (PC) 用于调节偏振状态; 另一路用于输出混沌激光, 经过分光比为 95/5 的光耦合器后, 95% 的一路接入光功率计进行功率稳定性测试, 5% 的一路接入光谱分析仪进行光谱监测。

混沌的最大特征之一就是对初值的敏感性, 只有在合适的反馈强度以及驱动电流下, 才会输出混沌状态, 而极其微小的初值条件的变化, 如反馈强度、工作电流或工作温度的变化, 仅会引起混沌态的改变, 甚至无法形成混沌态。因此混沌半导体激光器相比于普通半导体激光器, 对外部环境和工作条件的变化极其敏感, 在控制上要求更高。综上可知, 对混沌半导体激光器进行高精度和高稳定性的控制对于混沌激光的产生和应用是十分重要的。

图 6 为混沌半导体激光器在特定条件下的输出特性图, 此时激光器的驱动电流为 20.00 mA, 工作温度为 25.0 °C。图 6(a) 为混沌激光的光谱图, 与一

## 4 实验结果

### 4.1 实验装置

混沌激光是激光器输出的一种特殊形式, 具有大幅度、类噪声和宽频谱特性, 其产生方式主要有光反馈、光注入和光电反馈三种典型方法。目前, 绝大部分混沌激光器是利用外部分立器件扰动半导体激光器实现的, 本实验所用的混沌半导体激光器是由普通商用分布式反馈 (DFB) 半导体激光器外接光反馈装置构成, 实验装置图如图 5 所示。

般连续激光相比, 混沌激光表现出较宽的光谱特性, 具有较低的相干性; 在频域上对应的功率谱具有平坦、宽带的特性, 如图 6(b) 所示; 时序上表现为类噪声的随机变化, 电压峰峰值达 50 mV, 如图 6(c) 所示; 图 6(d) 为自相关函数 (ACF), 呈现类似  $\delta$  函数的线形。

混沌激光的带宽和时间延迟特征是表征混沌激光特性最为重要的两个指标, 图 7 为混沌半导体激光器的输出特性随驱动电流和温度变化的动态分布图, 图 7(a) 为带宽分布, 图 7(b) 为时间延迟特征分布, 此时反馈强度为 2.1%。在激光器输出为混沌状态时, 驱动电流和温度对混沌激光的输出状态也有影响。如图 7(a) 所示, 在混沌区域随着驱动电流和温度的增加, 混沌激光的带宽整体趋向于增大。如图 7(b) 所示, 反馈时间延迟处的自相关系数也越来越大, 即时延特征越来越明显。当驱动电流和温度继续增大时, 激光器输出将进入周期振荡, 而不再是混沌状态。图 7 中激光器工作温度为 20.0 °C 时, 驱动电流从 13.5 mA 变化到 14.0 mA, 激光器的输出状态从混沌状态变化为单倍周期状态, 在整个 20.0~25.0 °C 温度范围内, 驱动电流为

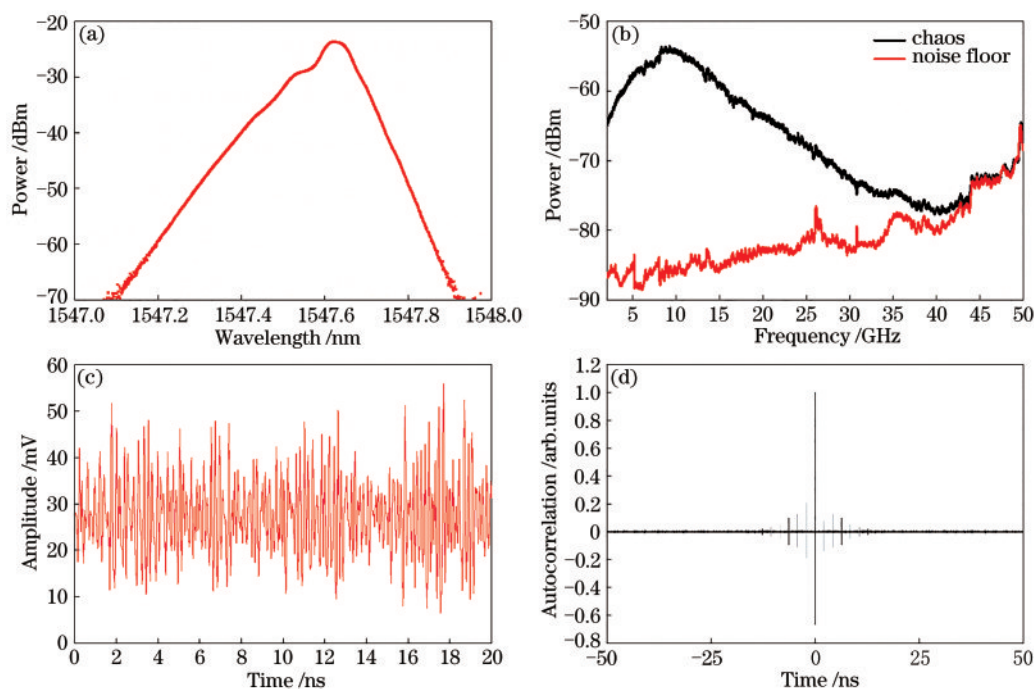


图 6 混沌半导体激光器的输出特性图。(a)光谱;(b)频谱;(c)时序;(d)自相关函数

Fig. 6 Output characteristics of chaotic semiconductor laser. (a) Optical spectrum; (b) frequency spectrum; (c) time series; (d) ACF

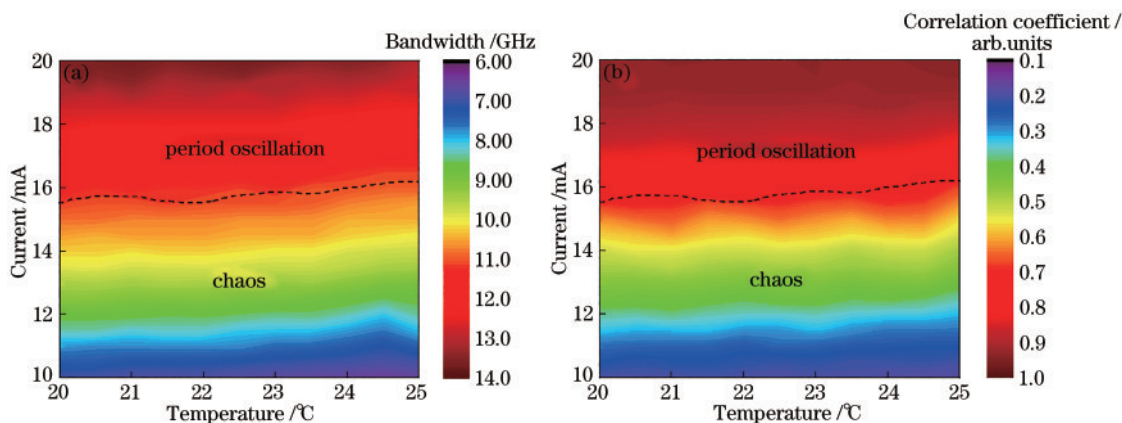


图 7 混沌半导体激光器的输出特性随电流和温度变化的动态分布图。(a)带宽;(b)时间延迟特征分布

Fig. 7 Dynamic distributions of output characteristics of chaotic semiconductor lasers change with current and temperature.

(a) Bandwidth; (b) time delay characteristic distribution

0.5 mA 的波动会决定激光器输出的动力学状态。同理,在图 7(a)和图 7(b)中,当偏置电流固定为 15.0 mA 时,工作温度为 20.0 °C 条件下,激光器输出状态为单倍周期;工作温度为 20.5 °C 条件下,混沌激光器输出的状态为混沌激光。可见,电流和温度的变化深刻影响着混沌半导体激光器的输出特性。

在后文中将具体展示所设计电流源和温度控制电路的输出特性,以及在特定驱动和温度控制条件下所对应的混沌半导体激光器的输出特性分析结果。

#### 4.2 电流源输出特性

图 8 为双通道电流源电路模块实物图。图中①为电流源 1 的驱动电压输入端,②为 DAC8551 的驱动信号输入端,③为电流源 1 电流输出端,此处接激光器 LD+ 和 LD-,④为电流源 2 电流输出端,此处接激光器 LD+ 和 LD,⑤为外部电源接口,分别接 12 V、-12 V、5 V 和 GND。

图 9 为电流源 1 在室温 25.0 °C 下的输出电流稳定度测试结果。电流测试中所用仪器为安捷伦 34410A 型 6.5 位数字万用表,每 2 s 自动记录 1 次,

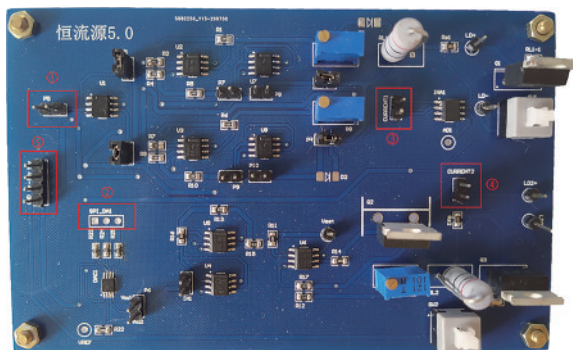


图 8 电流源电路模块

Fig. 8 Current source circuit module

记录时长为 120 min。电流稳定度定义为电流均方差与电流平均值的百分比。图 9(a)、(b)分别为电流源 1 在输出电流为 20.00 mA 和 40.00 mA 时,工作 120 min 的稳定度测试结果。对应的电流稳定度为 0.0011% 和 0.0017%,均在小于 0.0020% 范围内。

图 10 为电流源 2 在室温 25.0 °C 下的输出电流稳定度测试结果,其中,图 10(a)~(d)分别为电流源 2 在输出电流为 20.00、40.00、60.00、100.00 mA 时,工作 120 min 的稳定度测试结果。所对应的电流稳定度为 0.0029%、0.0019%、0.0028%、0.0036%,均在 0.0040% 范围内。

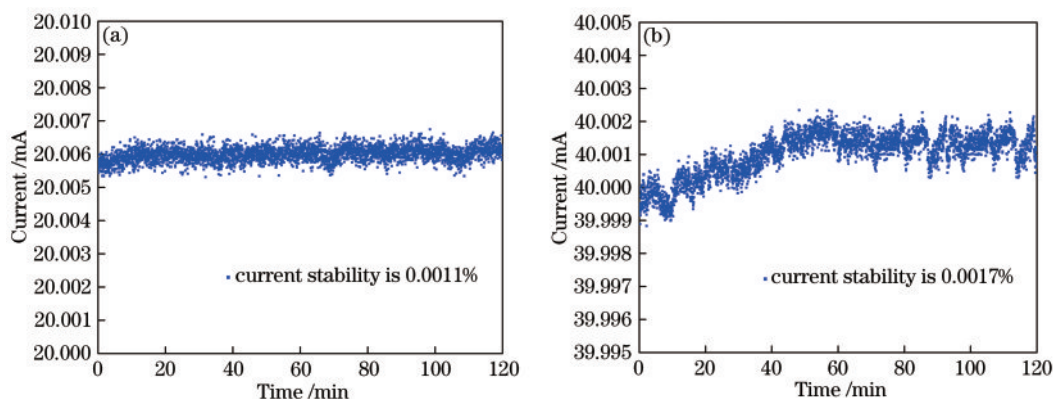


图 9 电流源 1 输出电流稳定度。(a)输出电流 20.00 mA;(b)输出电流 40.00 mA

Fig. 9 Output current stability of current source 1. (a) Output current is 20.00 mA; (b) output current is 40.00 mA

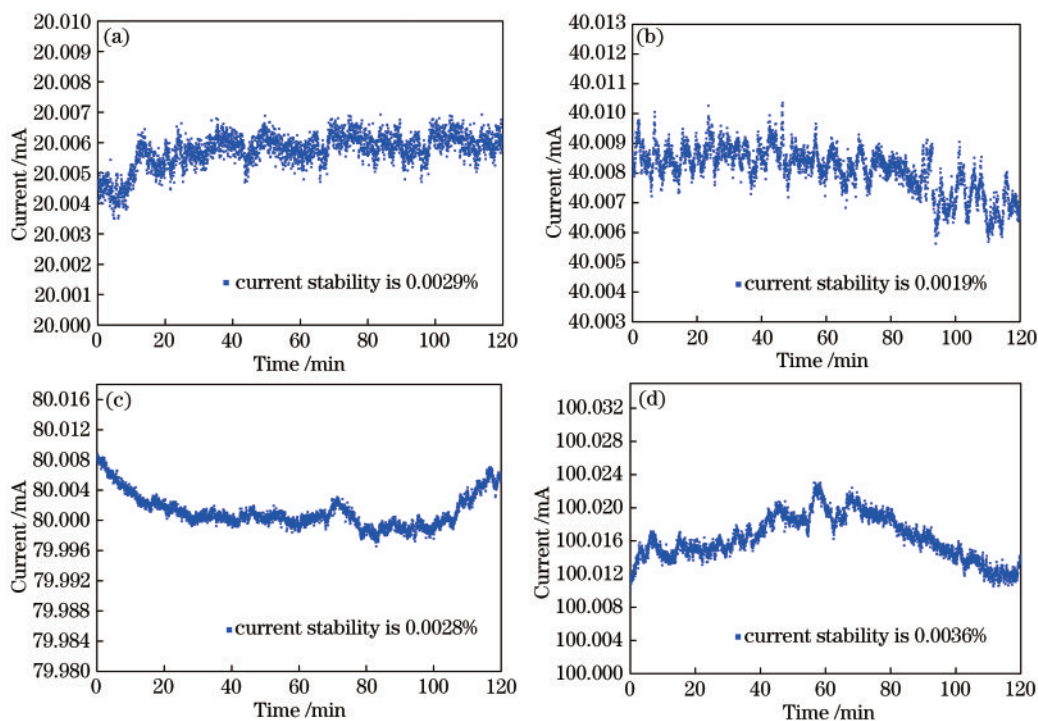


图 10 电流源 2 输出电流稳定度。(a)输出电流 20.00 mA;(b)输出电流 40.00 mA;(c)输出电流 80.00 mA;(d)输出电流 100.00 mA

Fig. 10 Output current stability of current source 2. (a) Output current is 20.00 mA; (b) output current is 40.00 mA; (c) output current is 80.00 mA; (d) output current is 100.00 mA



目前商用半导体激光器电流源工作环境温度绝大部分为 10.0~40.0 °C。为验证环境温度对电流源输出特性的影响,测试了电流源半量程输出时分别在 10.0、20.0、30.0、40.0 °C 下工作 120 min 的输出电流稳定情况。将电路板放置于半导体恒温箱 BH8001 内,通过调节恒温箱内温度,达到调节电路板恒温工作环境的效果。

图 11 为电流源 1 输出电流为 20.00 mA 时,分

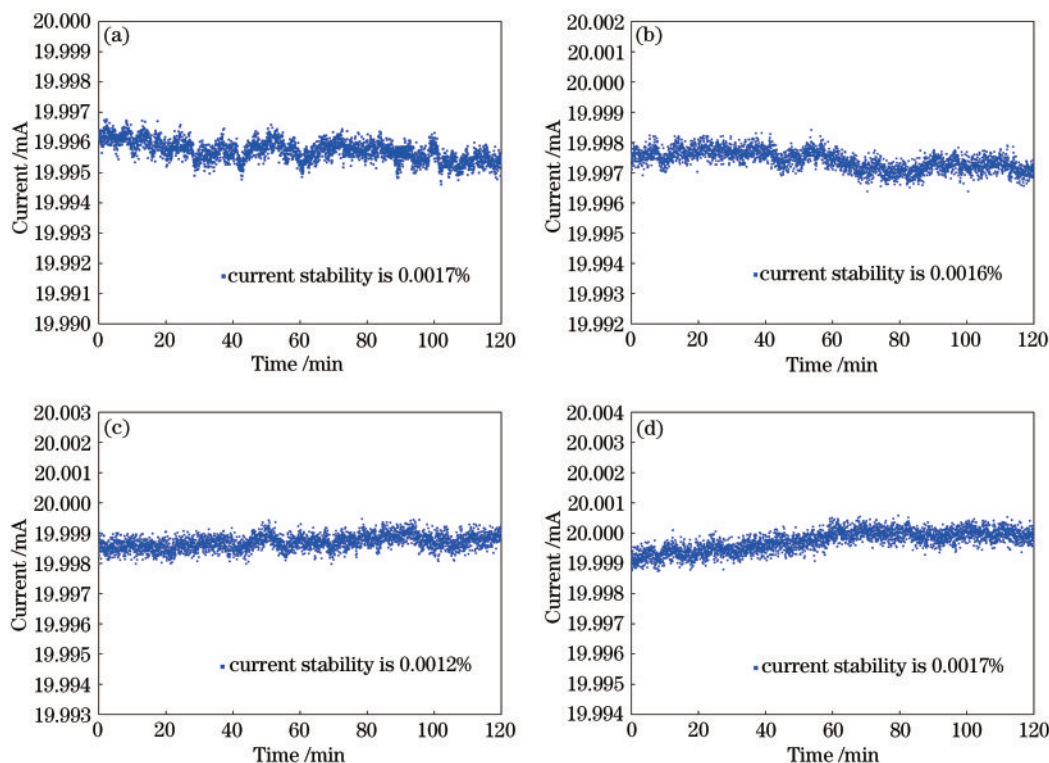


图 11 不同环境温度下电流源 1 输出稳定度。(a)环境温度 10.0 °C;(b)环境温度 20.0 °C;(c)环境温度 30.0 °C;(d)环境温度 40.0 °C  
Fig. 11 Output stability of current source 1 at different ambient temperatures. (a) Ambient temperature is 10.0 °C; (b) ambient temperature is 20.0 °C; (c) ambient temperature is 30.0 °C; (d) ambient temperature is 40.0 °C

图 12 为电流源 2 输出电流为 50.00 mA 时,分别在 10.0、20.0、30.0、40.0 °C 下的输出电流稳定度测试结果,所对应的电流稳定度为 0.0026%、0.0029%、0.0038%、0.0031%,均在 0.0040% 范围内。因所选 MOS 管 IRF540N 漏极电流受温度影响,温度每提高 10.0 °C,电流源 2 输出电流减少量约为 0.07 mA。由实验结果可得,在环境温度为 10.0~40.0 °C 范围内,电流源 2 稳定性良好,若保持温度电流源工作环境温度恒定,则可保证电流源 2 稳定工作。

图 13 为电流源 1 和 2 的输出电流线性度测试结果,图中虚线为标准曲线,实线为实验结果拟合曲线。其中图 13(a)为电流源 1 的输出电流线性度,其电

流源 1 稳定性良好,基本不受环境温度影响。别在 10.0、20.0、30.0、40.0 °C 下的输出电流稳定度测试结果,所对应的电流稳定度为 0.0017%、0.0016%、0.0012%、0.0017%,均在 0.0020% 范围内。因设计方案所选运算放大器 OP07CD 为低温漂芯片,温漂系数仅为 1.3  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ,温度每提高 10.0 °C,输出电流增加量仅为 0.001 mA。由实验结果可得,在环境温度为 10.0~40.0 °C 范围内,电流源 1 稳定性良好,基本不受环境温度影响。

调节步进为 0.01 mA,最大输出电流为 40.00 mA,最大误差为 0.092 mA,线性度为 0.23%,结果表明,设定电压和输出电流具有良好的线性度。图 13(b)为电流源 2 的输出电流线性度,其电流调节步进为 0.01 mA,最大输出电流为 100.00 mA,最大误差为 0.148 mA,线性度为 0.15%。结果表明,设定电压和输出电流具有良好的线性关系。上述线性度定义为全量程范围内最大电流偏差与满量程输出电流的百分比。

为验证所设计电流源对混沌半导体激光器的实际驱动效果,测试了电流源 1 和电流源 2 分别在 20.00 mA 输出电流下工作 120 min,所对应的混沌半导体激光器输出光功率波动情况,结果如图 14 所

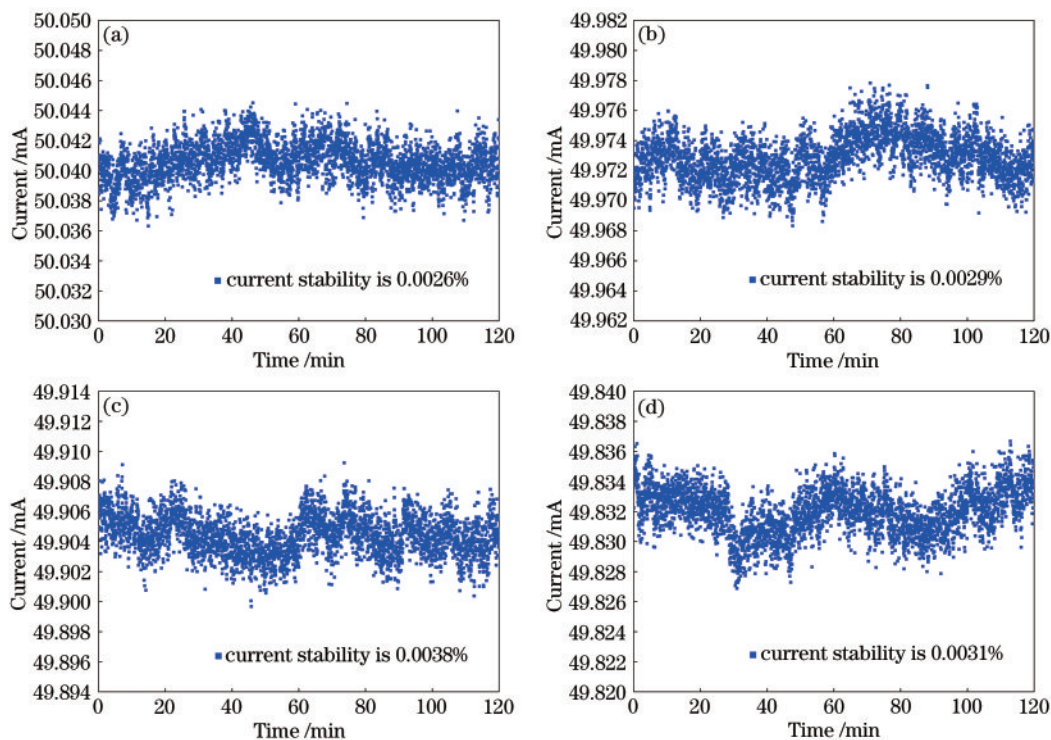


图 12 不同环境温度下电流源 2 输出稳度。(a)环境温度 10.0 °C;(b)环境温度 20.0 °C;(c)环境温度 30.0 °C;(d)环境温度 40.0 °C  
 Fig. 12 Output stability of current source 2 at different ambient temperatures. (a) Ambient temperature is 10.0 °C; (b) ambient temperature is 20.0 °C; (c) ambient temperature is 30.0 °C; (d) ambient temperature is 40.0 °C

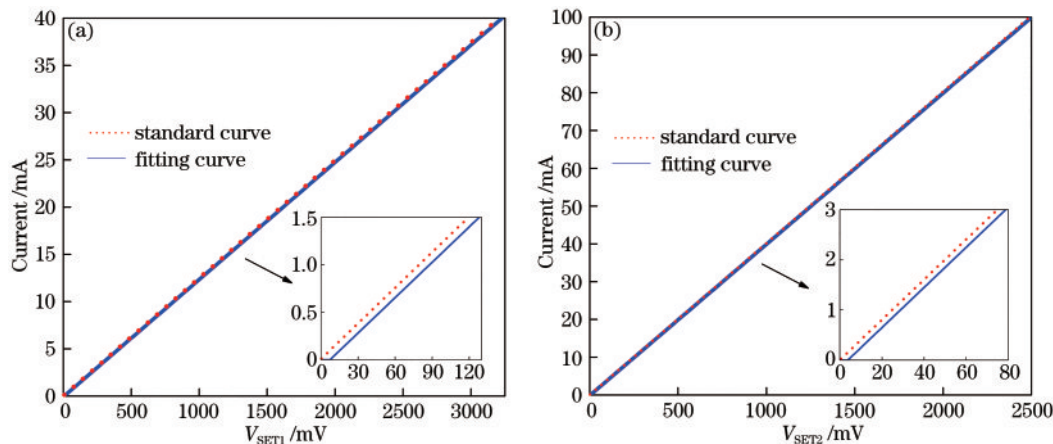


图 13 电流源 1 和 2 输出电流线性度。(a)电流源 1 输出电流线性度;(b)电流源 2 输出电流线性度  
 Fig. 13 Output current linearity of current source 1 and 2. (a) Output current linearity of current source 1; (b) output current linearity of current source 2

示。其中图 14(a)为电流源 1 驱动混沌半导体激光器工作时的输出光功率波动情况,图 14(b)为电流源 2 驱动混沌半导体激光器工作时的输出光功率波动情况。光功率稳定度定义为光功率均方差与平均值的百分比。由图中可以看出,电流源 1 输出电流为 20.00 mA 时,光功率在 120 min 内波动量为 0.0066 dBm(0.3187  $\mu$ W),计算所得光功率稳定度为 0.019%。电流源 2 输出电流为 20.00 mA 时,光功

率在 120 min 内波动量为 0.0072 dBm(0.3476  $\mu$ W),计算所得光功率稳定度为 0.026%。

上述结果表明,混沌半导体激光器在所设计电流源 1 和电流源 2 的驱动下,可获得稳定的光功率输出。

目前商用半导体激光器温控源工作环境温度绝大部分为 10.0~40.0 °C。为验证电流源输出电流可实现对混沌半导体激光器输出波长精准控制,本文进一步研究了不同驱动电流下混沌激光的输

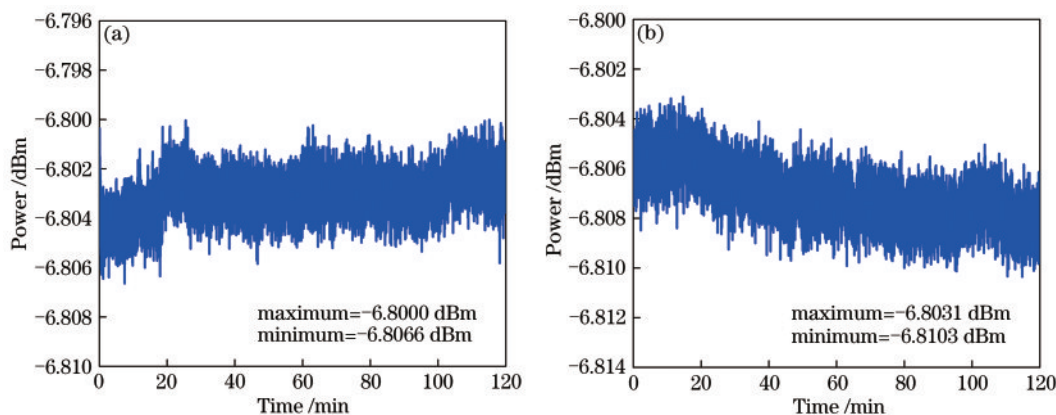


图 14 混沌半导体激光器输出光功率稳定度。(a)电流源1驱动测试结果;(b)电流源2驱动测试结果

Fig. 14 Output optical power stability of the chaotic semiconductor laser. (a) Test results driven by current source 1; (b) test results driven by current source 2

出波长情况。混沌半导体激光器工作电流选择 1.3 倍阈值电流,即 10.00 mA。如图 15 所示,电流每增加 0.05 mA,记录一次光谱。图 15(a)为电流源 1 驱动混沌半导体激光器时的输出光谱图,当工作电流分别为 10.00、10.05、10.10、10.15、10.20 mA 时,对应的输出中心波长分别为 1547.5120、1547.5125、1547.5131、1547.5137、1547.5143 nm,对应的中心波长处的功率分别为 -34.708 dBm、-34.662 dBm、-34.606 dBm、-34.532 dBm、-34.470 dBm。

图 15(b)为电流源 2 驱动混沌半导体激光器时的输出光谱图,当工作电流分别为 10.00、10.05、10.10、10.15、10.20 mA 时,对应的输出中心波长分别为 1547.5121、1547.5126、1547.5132、1547.5137、1547.5143 nm,对应的中心波长处的功率分别为 -34.625 dBm、-34.562 dBm、-34.502 dBm、-34.437 dBm、-34.387 dBm。实验结果表明,所设计的驱动电流源可以实现稳定的电流输出,并能精准地控制混沌半导体激光器的输出波长。

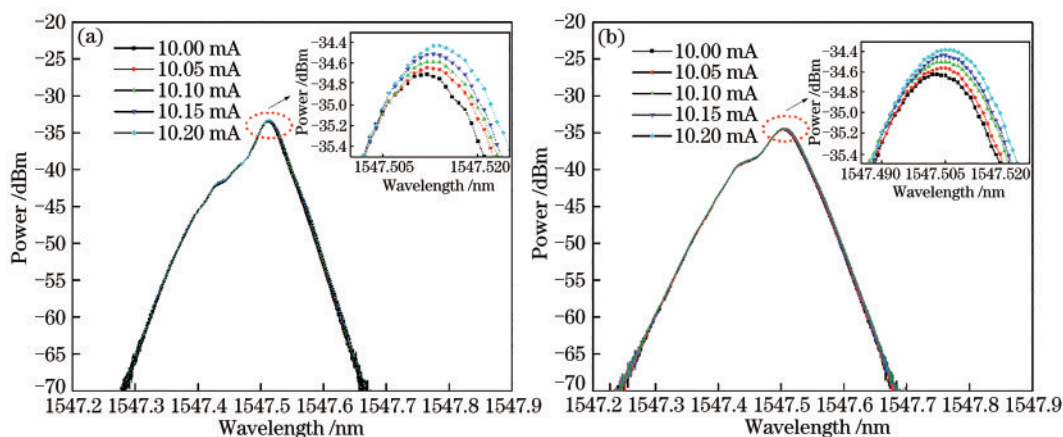


图 15 所研制电流源驱动混沌半导体激光器输出光谱图。(a)电流源1驱动测试结果;(b)电流源2驱动测试结果

Fig. 15 Output optical spectrum of chaotic semiconductor laser driven by developed current source. (a) Test results driven by current source 1; (b) test results driven by current source 2

### 4.3 温度控制实验结果

图 16 为温度控制电路模块实物图。图中①为 TEC 接口,②为 PWM 波输入口,③为热敏电阻接口,④为温度信息采集点,⑤为外部电源接口,分别接 3.3 V、2.5 V 和 GND。

图 17 为设置混沌半导体激光器工作温度分别为

18.0、20.0、22.0、24.0、26.0、28.0、30.0、32.0、34.0、36.0、38.0、40.0 °C 时,混沌半导体激光器输出波长调谐的光谱图。可以看出,随着工作温度的不断升高,混沌半导体激光器输出的光谱不断红移。

图 18 为设定温度区间为 24.0~25.0 °C,每调节 0.1 °C 记录一次光谱,可以看出,温度每上升 0.1 °C,混

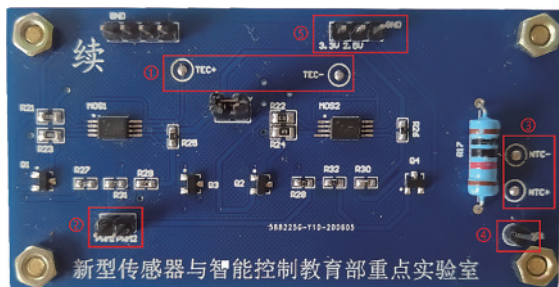


图 16 温度控制电路模块

Fig. 16 Temperature control circuit module

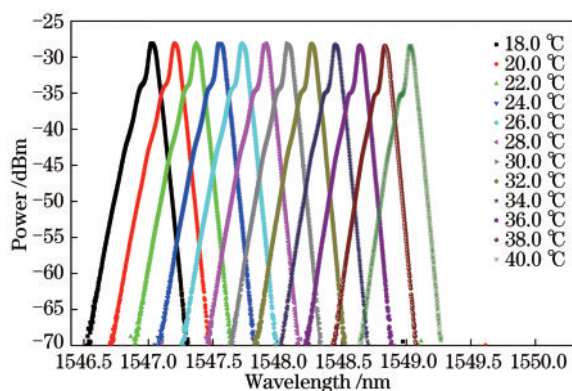


图 17 18.0~40.0 °C混沌半导体激光器输出波长调谐

Fig. 17 Output wavelength tuning of chaotic laser from 18.0 °C to 40.0 °C

混沌半导体激光器输出光谱中心波长可调谐0.009 nm。

图 19(a)为环境温度为室温 25.0 °C 时,激光器温度稳定在 25.0 °C,连续工作 120 min 的温度波动情况,从图中可以看出,120 min 内激光器温度波动范围为 ±0.1 °C。图 19(b)为混沌半导体激光器在

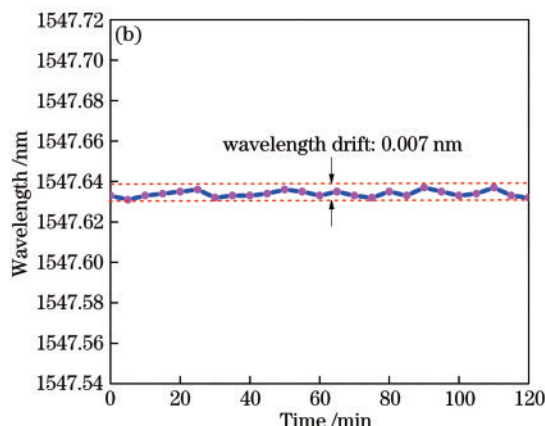
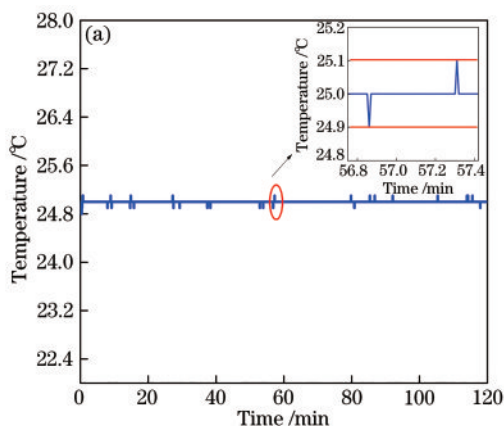


图 19 25.0 °C下激光器温度波动及中心波长漂移。(a)温度波动情况;(b)中心波长漂移情况

Fig. 19 Laser temperature fluctuation and central wavelength drift at 25.0 °C. (a) Temperature fluctuation; (b) central wavelength drift

图 21 为基于模糊自适应 PID 算法温度快速调节结果,图 21(a)和图 21(b)分别为将激光器温度从

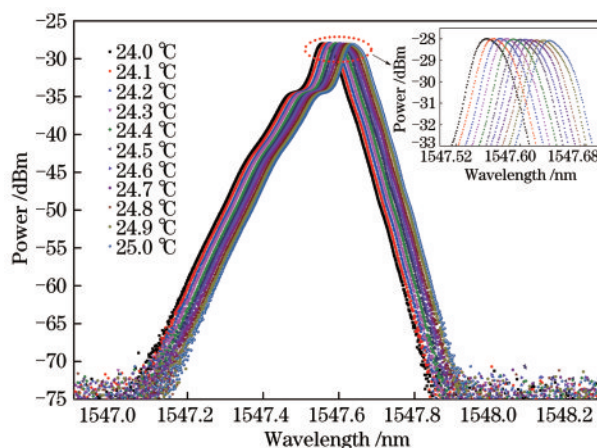


图 18 24.0~25.0 °C混沌半导体激光器输出波长调谐

Fig. 18 Output wavelength tuning of chaotic laser from 24.0 °C to 25.0 °C

电流为 20.00 mA,温度为 25.0 °C 下工作 120 min 的中心波长漂移情况,每 5 min 记录一次中心波长值,从图中可以看出,混沌激光在 120 min 内中心波长漂移量仅为 0.007 nm。

为验证环境温度对电流源输出特性的影响,测试了温度控制电路板在环境温度为 10.0、20.0、30.0、40.0 °C 下工作 120 min 对混沌半导体激光器的温度控制效果。图 20 为温度控制电路分别在环境温度为 10.0、20.0、30.0、40.0 °C 下对激光器温度的控制情况,激光器目标温度均为 25.0 °C。从图中可以看出,环境温度在 10.0~40.0 °C 内,激光器温度波动范围为 ±0.1 °C,稳定性良好,基本不受环境温度影响。

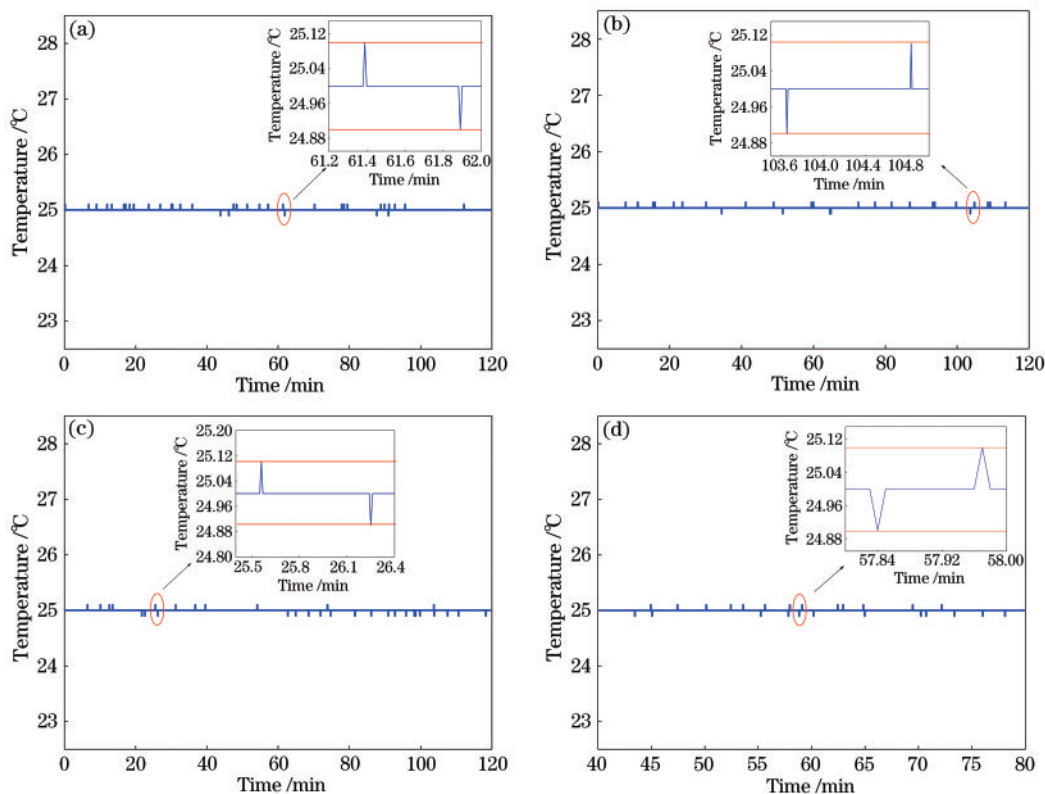


图 20 不同环境温度下激光器温度波动情况。(a)环境温度 10.0 °C;(b)环境温度 20.0 °C;(c)环境温度 30.0 °C;(d)环境温度 40.0 °C  
 Fig. 20 Laser temperature fluctuation at different ambient temperatures. (a) Ambient temperature is 10.0 °C ; (b) ambient temperature is 20.0 °C ; (c) ambient temperature is 30.0 °C ; (d) ambient temperature is 40.0 °C

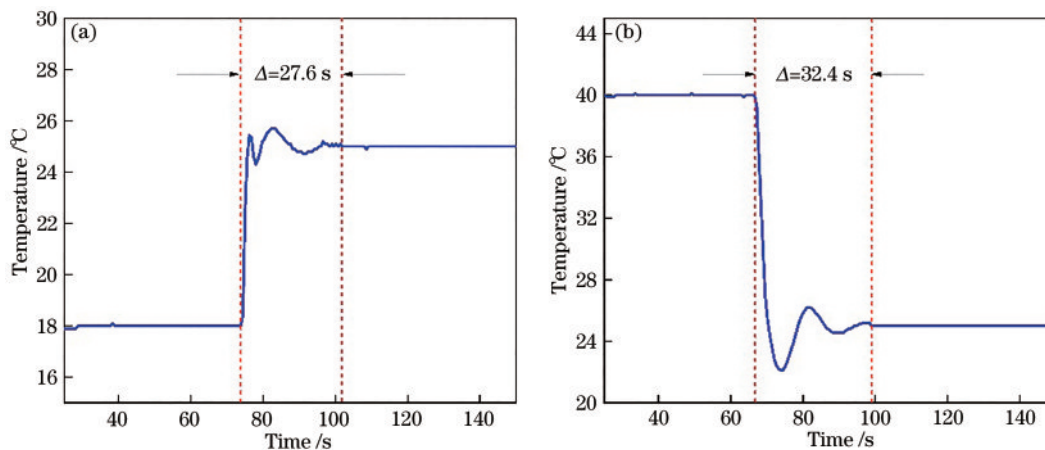


图 21 基于模糊自适应PID算法温度快速调节结果。(a)18.0~25.0 °C温度快速调节结果;(b)40.0~25.0 °C温度快速调节结果  
 Fig. 21 Rapid temperature regulation results based on fuzzy adaptive PID algorithm. (a) Rapid adjustment result of temperature from 18.0 °C to 25.0 °C ; (b) rapid adjustment result of temperature from 40.0 °C to 25.0 °C

25.0 °C所用时长为 27.6 s,从 40.0 °C降低到 25.0 °C所用时长为 32.4 s。由此可得,采用模糊自适应PID算法可实现对激光器温度的快速调控。

### 5 结 论

本文设计了一种面向混沌半导体激光器的高稳

定控制系统。系统采用深度负反馈电路,实现了两路电流源输出电流范围分别为 0.00~40.00 mA 和 0.00~100.00 mA,在室温 25.0 °C下输出电流稳定度分别优于 0.0020% 和 0.0040%。混沌半导体激光器在 20.00 mA 电流下连续工作 120 min,输出光功率的波动量分别为 0.0066 dBm(0.3187 μW)和

0.0072 dBm (0.3476  $\mu$ W), 最高调节精度均可达 0.01 mA。所设计驱动电流源可以实现稳定的电流输出从而保证混沌半导体激光器的输出特性, 并能精准地控制混沌半导体激光器的输出波长。温度控制电路的温度调节范围为 18.0~40.0  $^{\circ}$ C, 温度调节精度为 0.1  $^{\circ}$ C。激光器在 25.0  $^{\circ}$ C 下连续工作 120 min 的温度波动范围为  $\pm 0.1$   $^{\circ}$ C, 中心波长漂移量小于 0.007 nm。采用模糊自适应 PID 算法, 激光器温度从 40.0  $^{\circ}$ C 和 18.0  $^{\circ}$ C 调节到目标温度 25.0  $^{\circ}$ C 所用时间分别为 27.6 s 和 32.4 s, 实现了激光器温度的快速调控。本控制系统在环境温度为 10.0~40.0  $^{\circ}$ C 范围内可稳定工作。实验结果表明, 本文所设计的控制系统实现了对混沌半导体激光器的高精度和高稳定调节与控制, 有利于混沌半导体激光器的实用化。

### 参 考 文 献

- [1] Syvridis D, Argyris A, Bogris A. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6353: 63531K.
- [2] Uchida A, Amano K, Inoue M, et al. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers [J]. Nature Photonics, 2008, 2(12): 728-732.
- [3] Wang Y C, Wang B J, Wang A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [4] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 815-820.
- [5] Zhang M J, Liu T G, Wang A B, et al. Photonic ultrawideband signal generator using an optically injected chaotic semiconductor laser [J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 1008-1010.
- [6] Zhang J, Wang Y, Zhang M, et al. Time-gated chaotic Brillouin optical correlation domain analysis [J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17597-17607.
- [7] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development 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.
- [8] Zhang Y N, Xu A S, Feng Y L, et al. Chaos characteristics of the output from a semiconductor laser subject to optoelectronic feedback [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1214001.  
张依宁, 徐艾诗, 冯玉玲, 等. 光电反馈半导体激光器输出光的混沌特性 [J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1214001.
- [9] Li Q L, Lu S S, Bao Q, et al. Bidirectional signal transmission based on two coupled chaotic semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506001.  
李齐良, 卢珊珊, 包琪, 等. 基于耦合混沌半导体激光器之间双向信号传输的研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506001.
- [10] Sun W Y, Hu B J, Wang H. Chaos synchronization communication based on dual-path mutual coupling semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 211404.  
孙巍阳, 胡宝洁, 王航. 双光互注入半导体激光器混沌同步通信研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 211404.
- [11] Jiang X, Fang N, Wang L T. Ultra-broadband microwave frequency comb generated from cascaded optically injected semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 121403.  
蒋鑫, 方捻, 王陆唐. 级联光注入半导体激光器产生超宽带微波频率梳 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121403.
- [12] Cui W C, Guo R M, Wang D F, et al. Study on temperature and current control of distributed feedback laser diodes [J]. Laser Technology, 2019, 43(4): 437-441.  
崔文超, 郭瑞民, 王德发, 等. 分布反馈激光器温度与电流控制研究 [J]. 激光技术, 2019, 43(4): 437-441.
- [13] Li Y D, Yan Y Z, Wei W W, et al. A study and design of high-stability drive power for lasers [J]. Laser Journal, 2016, 37(2): 9-11.  
李永定, 闫玉洲, 尉卫卫, 等. 一种高稳定激光器驱动电路的研究与设计 [J]. 激光杂志, 2016, 37(2): 9-11.
- [14] Chen C, Li L, Dong C J, et al. Semiconductor laser high-precision temperature control system basing on digital signal processing [C]//2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, June 25-27, 2010, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2010: 1880-1883.
- [15] Luo L, Hu J C, Wang C Y, et al. Design of high-precision driving power and temperature control circuit for semiconductor laser [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.
- [16] Yu X Y, Wang X, Zhang J Z, 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.  
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.
- [17] Hao S J, Fang K L. Research of temperature control system based on parameter self-tuning of fuzzy PID [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(7): 196-198, 204.  
郝少杰, 方康玲. 基于模糊PID参数自整定的温度控制系统的研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(7): 196-198, 204.
- [18] Tong S B, Hua C Y. Analog electronics technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 438-439.  
童诗白, 华成英. 模拟电子技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 438-439.
- [19] Zhang L, Chen J S, Gao J, et al. Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1005003.  
张龙, 陈建生, 高静, 等. 大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1005003.
- [20] Mei J C, Ye Q, Tian J G. Design of driving circuit of multi-channel semiconductor laser [J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 245-248.  
梅剑春, 叶青, 田建国. 多路半导体激光器驱动电路设计[J]. 激光技术, 2018, 42(2): 245-248.
- [21] Wu T, Pang T, Tang Y Q, et al. Frequency compensation based pump laser drive circuit with high stability [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0801010.  
吴涛, 庞涛, 汤玉泉, 等. 基于频率补偿的高稳定抽运激光器驱动电路[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0801010.
- [22] Ma T X, Tian X J. Laser diode driver circuit design and improvement based on the MOSFET [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(s1): s116001.  
马天翔, 田小建. 基于MOSFET的半导体激光器驱动电路设计及其改进[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s116001.
- [23] Li J L, Shi Y B, Zhao P F, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1745-1749.  
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.
- [24] Guo F L, Xu G P, Huang B K. Constant temperature control systems for semiconductor lasers based on DRV595 [J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 734-737.  
郭凤玲, 徐广平, 黄宝库. 基于DRV595的激光器恒温控制系统[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 734-737.
- [25] Zuo S, He T, Yao S Y. Temperature control system for semiconductor laser based on fuzzy PID [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1): 94-97.  
左帅, 和婷, 尧思远. 基于模糊PID控制的半导体激光器温控系统[J]. 激光与红外, 2014, 44(1): 94-97.
- [26] Fan Z Y. The research of fuzzy control on asynchronous motors speed regulation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006: 9-18.  
范志宇. 模糊控制在电动机调速中的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006: 9-18.
- [27] Xia J B, Liu Z J, Zhang S S, et al. Design of semiconductor laser quick temperature control system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 1991-1995.  
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.