

文章编号:1001-5078(2025)01-0018-08

· 激光器技术 ·

## 垂直腔面发射激光器数字驱动电路设计

卫英泽<sup>1,3,4,5</sup>, 廖英<sup>2,3,4,5</sup>, 周建斌<sup>1,2</sup>, 童欣<sup>3,4,5</sup>, 叶凡<sup>3,4,5</sup>, 李松松<sup>3,4,5</sup>, 罗朋奎<sup>4</sup>, 黎荣锋<sup>3,4,5,6</sup>

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学机电工程学院, 四川 成都 610059;  
3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 4. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803;  
5. 广东省极端条件重点实验室, 广东 东莞 523803; 6. 东莞理工学院机械工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:**垂直腔面发射激光器(VCSEL)是原子磁强计和原子钟等光学量子仪器的核心部件,其输出激光的稳定性将直接影响仪器的测量精度和灵敏度等关键参数。本文介绍了一种以ZYNQ7010为控制核心的VCSEL数字驱动电路,该电路使用XTR111芯片提供VCSEL所需的高稳定电流,并通过MAX1978芯片控制VCSEL内部集成的半导体制冷器(TEC)实现高精度温控。实验结果表明,本文设计的驱动电路可输出0~2 mA的线性可调电流,调节精度优于0.04 mA,TEC的温控精度优于0.1 °C;最终在1.325 mA的驱动电流和63 °C的工作温度下,VCSEL的最大输出功率漂移和波长漂移分别为0.001 mW和0.004 nm。该数字驱动电路可满足原子磁强计等高精度测量仪器对光源驱动的需求。

**关键词:**光电子学;驱动电路;MAX1978;温度控制;XTR111;恒流驱动

**中图分类号:**TN248.4;TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.003

## Design of digital drive circuit for vertical cavity surface emitting lasers

WEI Ying-ze<sup>1,3,4,5</sup>, LIAO Ying<sup>2,3,4,5</sup>, ZHOU Jian-bin<sup>1,2</sup>, TONG Xin<sup>3,4,5</sup>,

YE Fan<sup>3,4,5</sup>, LI Song-song<sup>3,4,5</sup>, LUO Peng-kui<sup>4</sup>, LI Rong-feng<sup>3,4,5,6</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;  
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;  
3. The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
4. China Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;  
5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Extreme Conditions, Dongguan 523803, China;  
6. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

**Abstract:** Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) is the critical component of optical quantum instruments including atomic magnetometers and atomic clocks. The stability of the VCSEL's output laser significantly impacts key parameters, such as the measurement accuracy and sensitivity of these instruments. This paper introduces a VCSEL digital drive circuit with ZYNQ7010 FPGA as a controller, which uses the XTR111 chip to supply the high-stability current required by the VCSEL, and controls the semiconductor cooler (TEC) integrated inside the VCSEL to realize high-precision temperature control through the MAX1978 chip. The experimental result shows that the designed drive

**基金项目:**国家重点研发计划项目(No. 2022YFA1604104);广东省自然科学基金杰出青年项目(No. 2021B1515020101);广东省极端条件重点实验室项目(No. 2023B1212010002)资助。

**作者简介:**卫英泽(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为精密仪器测量。E-mail:18435921346@163.com

**通讯作者:**周建斌(1971-),男,博士,教授,主要研究方向为核分析方法、核辐射探测、核仪器设备研发。

E-mail:2022736355@qq.com

**收稿日期:**2024-04-16

circuit can output linearly adjustable current range from 0 mA to 2 mA, with an adjustment accuracy better than 0.04 mA. Additionally, the temperature control accuracy of the TEC is better than 0.1 °C. Finally, at a driving current of 1.325 mA and an operating temperature of 63 °C, the VCSEL exhibits minimal drift, with the maximum output power and wavelength drifts measuring 0.001 mW and 0.004 nm, respectively. This digital drive circuit meets the requirements of light source driving for high-precision measuring instruments such as atomic magnetometers.

**Keywords:** optoelectronics; drive circuit; MAX1978; temperature control; XTR111; constant current drive

## 1 引言

垂直腔面发射激光器<sup>[1]</sup> (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 以其体积小, 功耗低, 激光频率调制等独特优势<sup>[2]</sup>, 在原子传感器<sup>[3]</sup> 领域得到广泛应用。原子磁强计<sup>[4-5]</sup> 的磁场测量依赖于输出激光足够稳定的高精度激光器, 而激光器的驱动电流和工作温度一直是影响其输出性能的关键因素<sup>[6]</sup>, 因此激光器控制系统的研究非常重要。黄斐等<sup>[7]</sup> 为半导体蝶形激光器所设计的电路长时间温度偏差控制在  $\pm 0.1$  °C 内, 输出光功率最大偏差为 0.7 mW, 峰值波长偏差不超过 0.08 nm。王兴等<sup>[8]</sup> 为混沌激光器所设计的电路驱动电流稳定度优于 0.007%, 2 h 内温度最大波动为 0.17 °C。高彦伟等<sup>[9]</sup> 在可调谐半导体激光器的恒流恒温控制实验中, 输出波长的标准偏差为 0.0002。

VIXAR 公司的 794.047 nm 垂直腔面发射激光器, 该激光器具有极窄的线宽<sup>[10]</sup> ( $< 100$  MHz,  $\pm 0.5$  nm), 非常适用于磁强计应用, 其波长对电流的增益系数为 0.2 nm/mA, 对温度的增益系数为 0.0567 nm/°C, 此激光器理论上能够提供高稳定的输出。为实现高精度温度控制和电流控制, 本文利用 XTR111 和 MAX1978 芯片, 以 ZYNQ7010 为控制核心, 设计了一套小型原子磁强计专用的 VCSEL 控制系统, 该系统包括驱动电路和温度控制电路, 可以确保 VCSEL 激光器在不同工作条件下能够保持稳定的输出光功率<sup>[11]</sup>, 从而为磁强计提供可靠的光源。

## 2 系统总体设计

激光器在运行时, 输入的电流大小会对激光器自身的温度产生影响<sup>[12-15]</sup>。为确保激光器输出稳定, 必须最小化温度和电流对其性能的影响。因此, 本文选用 ZYNQ7010 作为 VCSEL 驱动电路的控制核心, 设计了一套驱动电路, 全面考虑温度和电流的因素, 能够在维持温度稳定性的同时调整激光器所需的电流大小, 从而保障激光器的稳定运行。系统整体框图如图 1 所示。

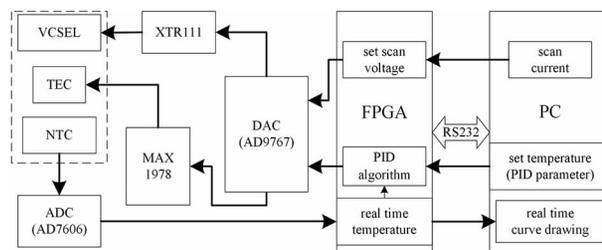


图 1 系统整体框图

Fig. 1 Overall system block diagram

激光器控制系统主要包括上位机调试模块、FPGA 主控模块、温度控制模块、驱动电流模块<sup>[16]</sup>。上位机调试模块采用 PyQt 开发, 通过 RS232 与 FPGA 主控模块进行通信, 主要功能包括接收热敏电阻的实时电压曲线并转换为温度数据, 可以设置目标温度以及 PID 参数; 此外, 还可设定激光器的电流大小并调整扫描范围。

FPGA 主控模块接收上位机指令和发送电压数据。在接收到模数转换器 (Analogue to Digital Converter, ADC) AD7606 的采集电压数据后会发送给上位机; 此外, 主控模块在收到上位机指令后会对数模转换器 (Digital to Analogue Converter, DAC) AD9767 发送施加电压数据和扫描电压数据, 其中, 施加电压为 PID 软件控制算法处理后的电压信号, 扫描电压则为驱动电流模块所需的电压信号。

温度控制模块根据实时温度和设定温度的比较, 结合 MAX1978 芯片内置的 PID 补偿网络和软件部分的 PID 控制算法, 实现 TEC 的制冷和制热。电流驱动模块接收到 DAC 模块的电压数据, 通过 XTR111 芯片转换为电流, 实现对激光器进行精确的驱动电流设定或扫描。

## 3 温控模块设计

### 3.1 激光器温控结构

VCSEL 激光器的温控结构涵盖了三个核心部分: VCSEL 激光器本身、半导体热电制冷片 (TEC) 以及负温度系数 (NTC) 热敏电阻。TEC 用来维持激光器的工作温度, 而实时监测工作温度则通过一

个额定阻值为 10 kΩ 的热敏电阻来实现。

### 3.2 温控电路设计

温度控制电路如图 2 所示,电路以 MAX1978 芯片为核心,实时温度采集部分通过将激光器内热敏电阻接入 FB - 引脚,并监测热敏电阻反馈的电压信号来测量激光器的实时温度;目标温度设置部分通过 FB + 引脚接收设定温度所需要的电压信号;TEC 电压和电流控制部分,将二者电压进行比较,通过 CS 和 OS2 引脚分别与 TEC 正负两端相连,用来检测 TEC 的电流,利用外围温控电路控制流过 TEC 电流的大小和方向,实现 TEC 制冷和制热,自动调节激光器的工作温度<sup>[17]</sup>。

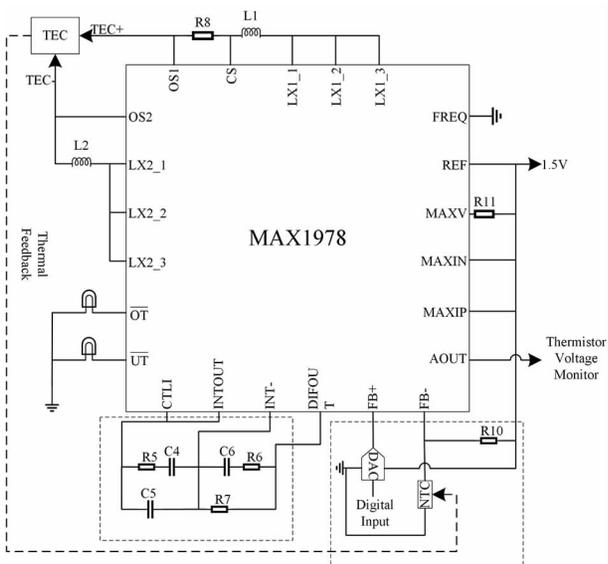


图 2 MAX1978 温控电路

Fig. 2 Temperature control circuit

下面根据 TEC 和 MAX1978 的固定参数计算 TEC 的控制电流范围。设置 TEC 上的最大电压限制为  $\pm(4 \times V_{MAXV})$  :

$$|V_{OS1} - V_{OS2}| = 4 \times V_{MAXV} \quad (1)$$

其中,  $V_{MAXV}$  由 REF 引脚输出的 1.5V 参考电压。通过设置  $V_{MAXIP}$  和  $V_{MAXIN}$  来限制最大正、负 TEC 电流,  $I_{TEC}$  与  $V_{MAXIP}$  和  $V_{MAXIN}$  关系式如下:

$$I_{TECP(MAX)} = \frac{V_{MAXIP}}{10 \times R_8} \quad (2)$$

$$I_{TECN(MAX)} = \frac{V_{MAXIN}}{10 \times R_8} \quad (3)$$

其中,  $I_{TECP(MAX)}$  为最大正 TEC 电流;  $I_{TECN(MAX)}$  为最大负 TEC 电流,均连接 REF 引脚,故默认电流限制为  $\pm 150 \text{ mV}/R_8$ ;微电阻  $R_8$  阻值为 0.5 Ω,连接在

CS 和 OS1 之间,  $I_{TEC}$  与二者的关系为:

$$I_{TEC} = \frac{(V_{OS1} - V_{CS})}{R_8} \quad (4)$$

当  $V_{CS}$  小于  $V_{OS1}$  时,出现正 TEC 电流,即  $I_{TEC} > 0$ 。

图 2 中, C4、C5、C6、R5、R6、R7 分别设置为 10 μF、0.047 μF、0.47 μF、100 kΩ、20 kΩ、1 MΩ,结合芯片内部集成的积分放大器共同构建为 PID 控制回路<sup>[18]</sup>。INTOUT 引脚为积分放大器输出,连接 CTLI 引脚,调节其电压可以直接设置 TEC 电流。INT - 引脚为积分放大器反相输入,通过热补偿网络连接到 DIFOUT 引脚,为仪表放大器<sup>[19]</sup>输出,仪表放大器产生误差信号,误差信号由设定点 FB + 和热敏电阻 FB - 之间的电压差产生,差分增益为  $50 \times (FB + - FB -)$ ,其中设定点 FB + 的电压由 DAC 模块产生。

### 3.3 软件算法设计

单独使用硬件电路中的 PID 补偿网络并不能确保温度足够稳定,为实现更精确的温控,本文在 FPGA 主控部分加入了额外的 PID 控制算法<sup>[20-21]</sup>。ADC 模块 AD7606 采集到当前温度所对应的 16 位电压值,上位机接收到电压数据由公式(5)转换为实时电压后进行绘图。公式(6)为设定温度与设定电压对应关系。由于 DAC 模块 AD9767 接收的是 14 位数字信号,且 FPGA 处理浮点数较为繁琐,故下位机接收到 ADC 模块 AD7606 的 16 位电压数据和设定电压参数都需要先根据公式(7)转换为放大后的 32 位电压值,再根据公式(8)、(9)计算得到 14 位数字信号  $V_{FB+}$ 。

$$V_{real} = \frac{V_{current}}{32768} \times 5 \quad (5)$$

$$V_{desired} = k_T \times T_{desired} \quad (6)$$

$$V_{32bit} = V_{16bit} \times 10000 \quad (7)$$

其中,  $V_{current}$  为 AD7606 采集的 16 位电压值;  $V_{real}$  为实时电压;  $T_{desired}$  与  $V_{desired}$  分别为设定温度和设定电压;  $k_T$  表示由设定温度决定的系数值;  $V_{16bit}$  为下位机接收到的 16 位电压数据(包括  $V_{current}$  与  $V_{desired}$ );  $V_{32bit}$  为放大后的 32 位电压数据。

激光器内的  $V_{TEC}$  为 TEC + 与 TEC - 之间的电压,MAX1978 对 TEC 电压的控制是通过 FB + 引脚和 FB - 引脚的控制实现的。调节目标温度并设定 PID 参数后,  $V_{FB+}$  与  $V_{pid}$  符合以下关系式(8)、(9):

$$V_{FB+} = \left( \frac{V_{pid}}{50000} + 1 \right) \times 8192 \quad (8)$$

$$V_{pid} = \frac{k_p}{Z_1} \times e(n) + \frac{k_i}{Z_2} \times \sum_{k=0}^n e(k) + \frac{k_d}{Z_3} \times (e(n) - e(n-1)) \quad (9)$$

其中,  $V_{FB+}$  为通过 DAC 模块设定 FB+ 引脚的电压;  $V_{pid}$  为 PID 控制算法的输出电压;  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  分别为对应的增益系数,  $e(n)$  即  $V_{err}$ , 为 32 位目标值 ( $V_{desired}$ ) 与当前值 ( $V_{current}$ ) 的电压差, 该电压差为正时为制热模式, 减小到负值时为制冷模式; 算法加入  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  分别作为  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的比例系数, 结合式(7)对其值进行缩放, 可达到 FPGA 处理 PID 算法更精确的效果。

在激光器温度调节过程中, 热敏电阻值的变化导致 MAX1978 的 FB- 引脚输入电压发生变化, ADC 采集的实际电压和设定目标电压值之间存在电压差, PID 网络输出的  $V_{FB+}$  电压不断调整, 当温度达到设定值时, 激光器内热敏电阻阻值变化达到温度设定电阻的阻值, 此时  $V_{desired}$  和  $V_{current}$  的差值在 0V 附近震荡, TEC 的电流流向不断改变, 制冷和制热不断切换, 最终温度趋于稳定, 达到设定温度值。

### 3.4 硬件电路误差测试

根据热敏电阻温度与电压的对应关系可得出, 各温度对应的理论电压值  $V_s$ , 与经过未加入软件算法的温控系统后实际温度的最小电压值  $V_{min}$  和最大电压值  $V_{max}$ , 以及实际最小温度  $T_{min}$  和最大温度  $T_{max}$  对比结果如表 1 所示。

表 1 硬件电路误差测试

Tab. 1 Hardware circuit error testing

参数	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
$V_s/V$	3.31	3.55	3.67	3.79
$V_{min}/V$	3.306	3.543	3.665	3.786
$V_{max}/V$	3.314	3.553	3.672	3.795
$V_{add}/V$	0.3	0.228	0.208	0.185
$T_{min}/^{\circ}C$	59.931	69.717	79.761	89.522
$T_{max}/^{\circ}C$	60.345	70.208	80.454	90.286

其中,  $V_{add}$  表示为各理论温度对应的施加电压。从表 1 可知, 在 60~90 °C 的各温度段, 连续 100 min 内电压最大波动分别为  $\pm 0.004$  V、 $\pm 0.0039$  V、 $\pm 0.004$  V、 $\pm 0.0046$  V, 温度最大波动分别为  $\pm 0.207$  °C、 $\pm 0.246$  °C、 $\pm 0.347$  °C、 $\pm 0.382$  °C。

### 3.5 工作温度控制测试

设定 VCSEL 工作温度为 70 °C, 由式(6)可得, 热敏电阻的理论电压值为 3.55 V。测试方法为间隔 10 s 采集一次热敏电阻实际电压, 连续 100 min。单独使用硬件电路中的模拟 PID 网络进行测试, 施加电压为 0.228 V, 温度曲线如图 3 所示。其中温度最大波动为  $\pm 0.246$  °C, 标准偏差为 0.115 °C。

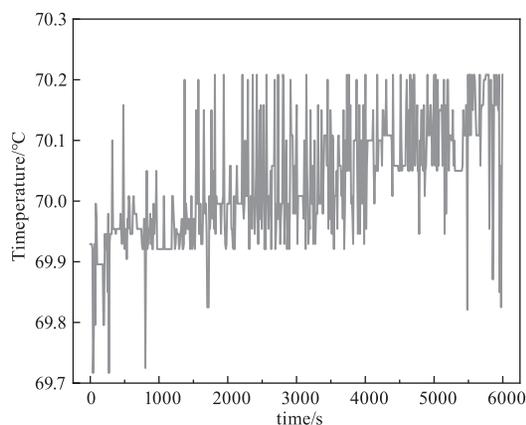


图 3 未加入软件算法温度曲线图

Fig. 3 No software algorithm temperature graph

同等环境下采用相同方法, 加入软件部分 PID 控制算法后进行测试, 设置调试好的 PID 参数 ( $k_p$  值为 10,  $k_i$  值为 180,  $k_d$  值为 255), 温度的变化曲线如图 4 所示。可以看出加入软件 PID 算法后的测试结果误差范围更小, 且足够稳定基本不受外界环境影响, 温度最大波动为  $\pm 0.094$  °C, 标准偏差为 0.05 °C。

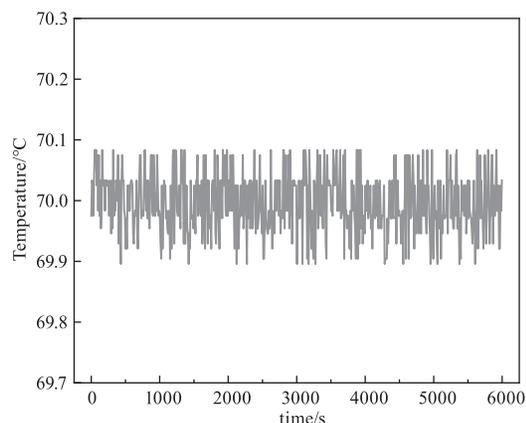


图 4 加入软件算法温度曲线图

Fig. 4 Software algorithm temperature graph

## 4 驱动电流模块设计

激光器输出光功率受驱动电流稳定性的影响, 而原子磁强计所需激光器驱动电流扫描范围为 0~2 mA, 故本文选用 TI 公司的精密电压电流转换芯片

XTR111 提供 VCSEL 所需驱动电流。XTR111 是针对 0 ~ 20 mA 或 4 ~ 20 mA 模拟信号专用的电流转化芯片,具有 0.002 % 的非线性度、1  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  低失调电压漂移、0.015 % 的高精确度以及 7 ~ 44 V 宽供电范围等特点。本文利用 FPGA 主控模块和 DAC 模块控制 XTR111 为激光提供驱动电流,并对输出电流大小进行设置。驱动电流电路如图 5 所示。

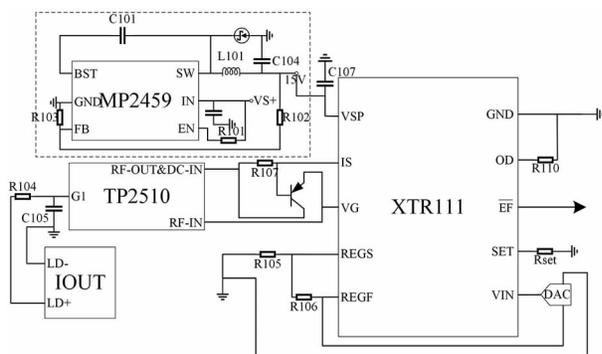


图 5 驱动电流电路

Fig. 5 Drive current circuit

图 5 所示的驱动电路由 XTR111 芯片及其外围电路组成。VSP 引脚最大支持 44 V 电源电压,本设计采用 15 V 电压,由 MP2459 芯片及其外围电路给出。EN 引脚连接 100 k $\Omega$  电阻 R101 到 IN 引脚设置为自动启用设备,IN 引脚输入电源电压,SW 引脚为电压输出,通过 FB 引脚设置输出电压,理论输出电压设置满足如下关系:

$$V_{\text{SW}} = \left( \frac{R_{102}}{R_{103}} + 1 \right) \times 0.812 \quad (10)$$

其中,  $R_{102}$  和  $R_{103}$  分别设置为 51 k $\Omega$ 、3 k $\Omega$ 。

驱动电路输出电流通过 TP2510 稳流芯片到 IOUT 接口输出,其大小与 VIN 引脚的控制电压和 SET 引脚的控制电阻的设置有关,关系式如式:

$$I_{\text{OUT}} = \left( \frac{V_{\text{IN}}}{R_{\text{set}}} \right) \times 10 \quad (11)$$

其中,  $V_{\text{IN}}$  为 DAC 模块产生的控制电压值;  $R_{\text{set}}$  为控制电阻值。

本文激光器所需电流范围为 0 ~ 2 mA,由于 DAC 模块 AD9767 最高 14 位输出,则理论输出电压为 0 ~ 5 V,经测试实际输出电压为 0 ~ 4.8 V,则  $V_{\text{IN}}$  输入范围为 0 ~ 4.8 V,为保证激光器正常工作,电流电压比值由外部电阻  $R_{\text{set}}$  决定,其值需设置为 24 k $\Omega$ 。

FPGA 主控模块接收上位机的扫描电流指令,通过 DAC 模块 AD9767 传输 14 位电压值到 VIN 引

脚,从 0 V 开始扫描,至 4.8 V 为止,设定电压步进为 0.1 V,激光器接收的输出驱动电流  $I_{\text{OUT}}$  相应地从 0 mA 扫描到 2 mA 为止,输出电流  $I_{\text{OUT}}$  调节的最小步进理论值约为 0.0417 mA。

实际测量驱动电流值与设定电压值的线性关系如图 6 所示。与理论驱动电流值比较,最大误差为 0.01 mA,由式 (12) 可得线性度<sup>[16]</sup> 为 0.005 %,效果较好。

$$S_L = \frac{|I_{\text{max}}|}{I_{\text{FS}}} \times 100 \% \quad (12)$$

其中,为线性度;  $I_{\text{max}}$  为最大误差;  $I_{\text{FS}}$  为满量程输出电流值。

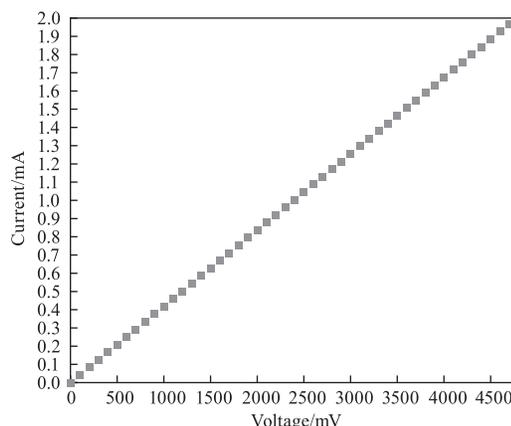


图 6 电流值与电压值的线性关系图

Fig. 6 Linear relationship graph between current value and voltage value

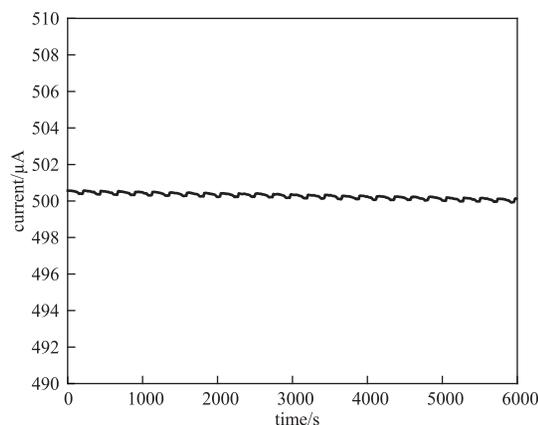


图 7 电流稳定性

Fig. 7 Current stability

图 7 为输出电流稳定性测试结果。设定  $V_{\text{IN}}$  理论值为 1.2 V,对应的理论输出电流值为 500  $\mu\text{A}$ ,选用 Tektronix 公司的 Keithley 2000 系列 6<sup>1/2</sup> 位高精度万用表,对其实际输出电流值连续测试 100 min,间隔 10 s 采集一次实际电流值。因  $V_{\text{IN}}$  实际值是由 FPGA 控制 DAC 模块 AD9767 产生,其存在  $\pm 2$  mV

的波动,故实际电流值存在  $\pm 0.328 \mu\text{A}$  的波动,其标准偏差为  $0.152 \mu\text{A}$ 。

## 5 激光器特性测试

激光器在驱动电路的控制下得到较强的吸收信号,这是原子磁强计测出磁场的必要条件。该激光器工作温度为  $62 \sim 64 \text{ }^\circ\text{C}$  范围时结合电流扫描可以得到较好的吸收信号,为了验证驱动电路对激光器光功率稳定性的控制效果,控制激光器温度为  $63 \text{ }^\circ\text{C}$ ,设定驱动电流为  $1.325 \text{ mA}$ ,对光电探测器接收到激光后输出的光电信号进行测试。连续测试  $100 \text{ min}$ ,间隔  $10 \text{ s}$  采集一次实际电压值。光功率稳定性曲线如图 8 所示。输出光功率在  $100 \text{ min}$  内的最大波动为  $\pm 0.001 \text{ mW}$ ,标准偏差为  $0.0003 \text{ mW}$ 。

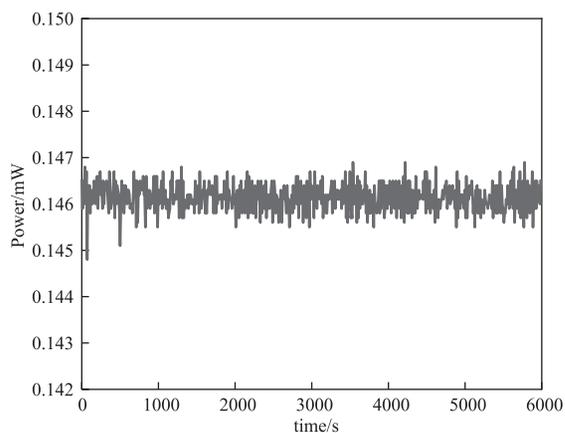


图 8 功率稳定性  
Fig. 8 Power stability

激光波长稳定性的测试结果如图 9 所示。固定激光器的驱动电流和工作温度在同等条件下,利用 Ocean Insight 公司的 ST-NIR-25 微型光谱仪进行测试,间隔  $0.5 \text{ h}$  记录一次波长数据,连续测量  $10 \text{ h}$ ,其中最大波动为  $\pm 0.004 \text{ nm}$ ,标准偏差为  $0.0027 \text{ nm}$ 。

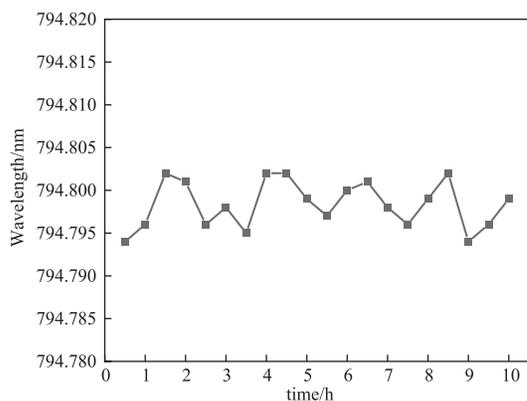


图 9 波长稳定性  
Fig. 9 Wavelength stability

在上述温度条件下,激光通过控制在一定温度条件下的原子气室时,控制驱动电流从  $1.5 \text{ mA}$  扫描到  $1 \text{ mA}$ ,可以测得较强的激光与原子相互作用后的光电信号如图 10 所示。

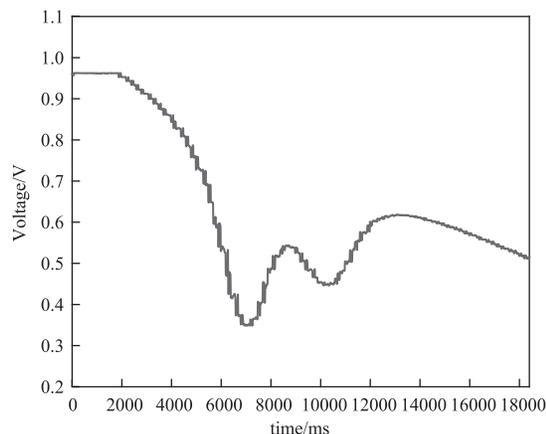


图 10 光电信号

Fig. 10 Optoelectronic signal

## 6 结论

本文设计了一款以 ZYNQ7010 为控制核心的 VCSEL 数字驱动电路。该驱动电路的温控部分融合了软件 PID 算法,温度最大波动为  $\pm 0.094 \text{ }^\circ\text{C}$ ,标准偏差为  $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ ,误差相比较仅采用硬件 PID 网络方法有明显提升。驱动电流部分在控制电压为  $0.1 \text{ V}$  步进条件下,调节精度可达  $0.0417 \text{ mA}$ ,线性度可达  $0.005 \%$ ,输出驱动电流标准偏差最优为  $0.152 \mu\text{A}$ ,较于现在多数采用的 AD8810 方案,在电流控制稳定性上,提升效果显著。实验结果表明,使用该驱动电路的 VCSEL 输出光功率的标准偏差为  $0.0003 \text{ mW}$ ,波长标准偏差为  $0.0027 \text{ nm}$ 。该数字驱动电路性能较好,可以满足原子磁强计中对于 VCSEL 激光器的实际应用需求。

## 参考文献:

- [1] Zhang Xing, Zhang Jianwei, Zhou Yinli, et al. Narrow line width and magnetism-free vertical-cavity surface-emitting lasers for quantum sensing [J]. Chinese Optics, 2022, 15 (5): 1038 - 1044. (in Chinese)  
张星, 张建伟, 周寅利, 等. 用于量子传感的窄线宽无磁垂直腔面发射激光器 [J]. 中国光学 (中英文), 2022, 15 (5): 1038 - 1044.
- [2] Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, et al. Development and future of vertical cavity surface emitting lasers operated at high temperatures (Invited) [J]. Acta Photon-

- ca Sinica, 2022, 51(2): 11–30. (in Chinese)
- 张建伟, 宁永强, 张星, 等. 高温工作垂直腔面发射半导体激光器现状与未来(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(2): 11–30.
- [3] Zhang Xing, Zhang Jianwei, Zhang Jian, et al. Progress on vertical-cavity surface-emitting laser for atomic sensing applications[J]. Navigation and Control, 2020, 19(1): 116–124. (in Chinese)
- 张星, 张建伟, 张建, 等. 原子传感用垂直腔面发射激光器研究进展[J]. 导航与控制, 2020, 19(1): 116–124.
- [4] Wu Lizhen, Zhu Xiaojie, Jiang Shuanghui, et al. Cell temperature control using atomic absorption spectrum[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(13): 1301003. (in Chinese)
- 吴丽珍, 祝孝杰, 蒋双辉, 等. 利用原子吸收谱线实现气室温控[J]. 中国激光, 2023, 50(13): 1301003.
- [5] Zhang Lulu, Bai Lele, Yang Yulin, et al. Improving the sensitivity of an optically pumped rubidium atomic magnetometer by using of a repumping laser beam[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(23): 186–196. (in Chinese)
- 张露露, 白乐乐, 杨煜林, 等. 采用反抽运光改善光泵铷原子磁强计的灵敏度[J]. 物理学报, 2021, 70(23): 186–196.
- [6] Han Tian, Zhang Yulin, Miao Cunxiao, et al. Anti-interference temperature control for VCSEL laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 117–126. (in Chinese)
- 韩天, 张雨霖, 缪存孝, 等. VCSEL 激光器抗干扰温度控制[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 117–126.
- [7] Huang Fei, Zhou Zheng, Guo Hanming. Design of driver circuit for semiconductor laser based on STM32[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(1): 7–11. (in Chinese)
- 黄斐, 周郑, 郭汉明. 基于 STM32 的半导体激光器驱动电路设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(1): 7–11.
- [8] Wang Xing, Xü 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.
- [9] Gao Yanwei, Zhang Yujun, Liu Haiqiu, et al. Design and experiment of semiconductor laser drive control circuit [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2023, 40(5): 684–693. (in Chinese)
- 高彦伟, 张玉钧, 刘海秋, 等. 半导体激光器驱动电路设计及实验研究[J]. 量子电子学报, 2023, 40(5): 684–693.
- [10] Gao Jing, Jiao Dongdong, Liu Jie, et al. Laser linewidth measurement based on recirculating self-heterodyne method with short fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0712002. (in Chinese)
- 高静, 焦东东, 刘杰, 等. 基于短光纤循环自外差法的激光线宽测量[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0712002.
- [11] Lei Ting, Lü Weiming, Lü Wenxing, et al. Photogating effect in two-dimensional photodetectors[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(2): 263–273. (in Chinese)
- 雷挺, 吕伟明, 吕文星, 等. 光栅局域调控二维光电探测器[J]. 物理学报, 2021, 70(2): 263–273.
- [12] Liu Yingjie, Kong Shiwei, Ren Qianyu, et al. Design of driver and temperature control circuit for DBR laser[J]. Video Engineering, 2021, 45(1): 61–66, 72. (in Chinese)
- 刘英杰, 孔市委, 任乾钰, 等. DBR 激光器驱动及温控电路设计[J]. 电视技术, 2021, 45(1): 61–66, 72.
- [13] Xia Zhichang, Yü Yongai, Shang Jianhua. Output power and temperature stability 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.
- [14] He Chungui, Zhang Yujun, Liu Guohua, et al. Design and experimental study on temperature control circuit of semiconductor laser[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(8): 27–31, 41. (in Chinese)
- 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, 41.
- [15] 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. (in Chinese)
- 宋云菲, 王贞福, 李特, 等. 808nm 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.
- [16] Wang Shuo, Wang Guochen, Gao Wei. Design of all digital drive circuit of semiconductor lasers for fiber optical cur-

- rent transformer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(5): 711 - 716. (in Chinese)
- 王硕, 王国臣, 高伟. 光纤电流互感器用半导体激光器数字驱动电路设计[J]. *半导体光电*, 2020, 41(5): 711 - 716.
- [17] Cheng Qian, Deng Huaqiu. Design of driving circuit and temperature control system for semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2019, 42(5): 1185 - 1189. (in Chinese)
- 程前, 邓华秋. 半导体激光器驱动电路及温控系统设计[J]. *电子器件*, 2019, 42(5): 1185 - 1189.
- [18] Åström K, Hägglund T. The future of PID control [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(11): 1163 - 1175.
- [19] Chen Jiu, Wang Xiaosong, Zhang Haiying, et al. Design of a low power and low noise instrument amplifier [J]. *Microelectronics*, 2017, 47(5): 593 - 596. (in Chinese)
- 陈就, 王小松, 张海英, 等. 一种低功耗低噪声仪表放大器的设计[J]. *微电子学*, 2017, 47(5): 593 - 596.
- [20] Zhou Liying, Zhao Guoshu. Application of fuzzy-PID control algorithm in uniform velocity temperature control system of resistance furnace [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(2): 405 - 409. (in Chinese)
- 周黎英, 赵国树. 模糊 PID 控制算法在恒速升温系统中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(2): 405 - 409.
- [21] Du Jingqing, Gao Shiqiao, Luo Chuang, et al. Control method with control quantum varying in the form of arbitrary function based on PID algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(6): 1317 - 1323. (in Chinese)
- 杜井庆, 高世桥, 罗创, 等. 基于 PID 算法的控制量按任意函数变化的一种控制方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 1317 - 1323.