【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

基于 ADN8810 和 ADN8835 的混沌激光器驱动及温控电路设计

王 兴^{1,2}, 续文敏^{1,2}, 张建忠^{1,2}, 张明江^{1,2}, 乔丽君^{1,2}, 王 涛^{1,2}

1) 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; 2) 太原理工大学物理与光电工程学院, 光电工程研究所, 山西太原 030024

摘 要: 为获得对混沌激光器的高稳定性驱动电流, 实现对混沌激光器驱动电流与温度的高精度调节, 基于 ADN8810 和 ADN8835 芯片设计一种混沌激光器驱动及温控电路. 电路可输出驱动电流 0 ~ 80 mA, 满足最小调节精度 0.01 mA 线性可调的驱动能力; 可在 0.5 ~ 4.5 V 调节半导体制冷器 (thermoelectric cooler, TEC) 端最大电压值以适应具有不同 TEC 的激光器; 在 0.5 ~ 4.3 A 调节 TEC 最大电流值以保护激光器. 实验结果证明, 本电路输出的驱动电流稳定度优于 0.007%, 2 h 内激光器的温度最大波动为 0.17 °C. 能够满足混沌激光器的需求.

关键词: 非线性光学; 混沌激光器; 电流稳定度; ADN8810 芯片; ADN8835 芯片; 温度控制

中图分类号: TH83

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.04408

Design of chaotic laser driver and temperature control circuit based on ADN8810 and ADN8835

WANG Xing^{1,2}, XU Wenmin^{1,2}, ZHANG Jianzhong^{1,2},
ZHANG Mingjiang^{1,2}, QIAO Lijun^{1,2}, and WANG Tao^{1,2}

1) Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, P. R. China

2) College of Physics and Optoelectronics, Institute of Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, P. R. China

Abstract: In order to obtain high stability driving current for chaotic laser and achieve high precision adjustment of chaotic laser driving current and temperature, based on the ADN8810 and ADN8835 chips, we design a chaotic laser drive and temperature control circuit for the chaotic laser. The driving current can be output from 0 to 80 mA, which satisfies the minimum regulation accuracy of 0.01 mA and a linearly adjustable drive capability. The maximum voltage value of the thermoelectric cooler (TEC) terminal can be adjusted internally in the range from 0.5 to 4.5 V to adapt to lasers with different TECs. The maximum current value of the TEC can be adjusted in the range from 0.5 to 4.3 A to protect the laser. The experimental results prove that the stability of the driving current for the circuit output is better than 0.007%, and the maximum fluctuation of the laser temperature is 0.17 °C within

Received: 2019-11-22; **Accepted:** 2020-03-20

Foundation: National Natural Science Foundation of China (61875146, 61527819); Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of Shanxi Province (2016-036, 2017-052); Key R & D Program of Shanxi Province (201803D121064); Transformation of Scientific and Technological Achievements Programs of Higher Education Institutions of Shanxi Province

Corresponding author: Professor ZHANG Jianzhong. E-mail: zhangjianzhong@tyut.edu.cn

Citation: 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)

2 hours, which can meet the needs of chaotic lasers.

Key words: nonlinear optics; chaotic laser; current stability; ADN8810 chip; ADN8835 chip; temperature control

混沌激光在高速真随机码产生^[1-2]、分布式光纤传感^[3]、保密通信^[4-5]及雷达^[6]等领域具有重要应用. 光子集成混沌激光器作为一种体积小, 易与其他系统集成, 不易受环境影响, 且稳定可靠的宽带混沌激光光源, 已经受到广泛关注^[7-8]. 本课题组设计了一种封装在商用蝶形外壳中, 具有短腔光反馈的混合集成混沌半导体激光器^[9], 经测试驱动该混沌半导体激光器所需的电流值为 0 ~ 80 mA. 混沌激光器所使用的砷化镓、磷化铟及硫化锌等增益介质材料对温度敏感^[10], 温度变化会对激光器的激射波长和阈值电流产生影响, 进而影响激光器输出的混沌状态. 驱动电流对激光器进入混沌的路径, 以及输出混沌光状态均有重要影响^[11], 因此, 对混沌激光器进行高精度的温度和直流驱动控制十分重要. 为提高激光器的驱动性能, 黄斐等^[12]采用 FP7103 芯片制作了恒流源, 在 30 min 内实现了 0.023% 的光功率稳定度; 李永定等^[13]采用 TMS320LF2812 芯片实现 48 h 驱动电流稳定度优于 0.08%; 袁林成等^[14]利用 LM2596 芯片得到 200 ~ 400 kilo-count/s 的激光器输出强度波动; 于小雨等^[15]设计一种面向不同半导体热电制冷器

(thermoelectric cooler, TEC) 混沌激光器的驱动电路, 实现对具有不同型号 TEC 混沌激光器的温度及驱动电流的有效控制, 输出到 TEC 端的最大电压调节范围为 0 ~ 3.3 V, 输出电流稳定度为 0.02%, 测试激光器输出波长的波动稳定在 9 pm 以内. 然而, 文献[15]的驱动电路设计在驱动电流输出的全量程范围内, 不能提供稳定的线性调节以及全量程范围内保持最小步进 0.01 mA 的调节能力.

本研究设计一种基于亚德诺半导体技术公司 ADN8810 和 ADN8835 芯片的混沌激光器驱动及温控电路, 实现了驱动电流 0 ~ 80 mA, 全量程范围最小步进 0.01 mA 线性可调的驱动能力. 实验结果表明, 本研究设计的混沌激光器驱动及温控电路的输出电流稳定度优于 0.007%, 2 h 内激光器输出光中心波长最大漂移 17 pm, 激光器温度最大波动 0.17 °C.

1 系统总体设计

图 1 为驱动及温控电路的印制电路板 (printed circuit board, PCB) 图, 图 2 为驱动及温控电路实物图. 驱动及温控电路系统包括电源电路、驱动电流

图 1 驱动电路 PCB 版图

Fig. 1 (Color online) PCB layout of driving circuit

图 2 驱动电路实物图

Fig. 2 (Color online) Driving circuit physical diagram

电路、温度控制电路以及激光器接口。使用 STM32F407 最小系统板实现数据处理^[16]、对驱动电流电路控制芯片 ADN8810 输入控制码 code、接收按键信息、接收驱动电流电路和温度控制电路返回信号的功能；电源电路主要包括 L7805、NSP2951T 及 ADR4540 三种稳压器件，将输入的 7.5 V 直流电滤波转换为 5.000、3.300 及 4.096 V 直流电，提供驱动电路中全部所需电压。激光器温度控制电路包括阻值编程可控的 AD5173 构成的分压电路，3 组滑动变阻器构成的备用分压电路用来调节温控芯片 ADN8835 的 VLIM、ILIM、IN2P 引脚的输入电压值，实现调节 TEC 两端最大工作电压、TEC 两端最大工作电流以及设定激光器目标温度的功能，以适应具有不同型号 TEC 激光器的需要。驱动电流电路以 ADN8810 芯片为核心，根据接收到的 code 值为激光器提供全量程线性可调的驱动电流。激光器接口提供一种可以直接焊接蝶形封装激光器的接口，同时提供一种可以焊接标准商用 9 针接头的过孔，以方便使用激光器夹具来驱动激光器。

在设计中将控制和显示部分分离，在单片机控制部分 STM32F407 最小系统板上加入控制按键和显示屏，基于 STM32F407 控制芯片编写控制程序，实用性和可操作性强。将微控制单元（microcon-

troller unit, MCU）部分分离出来的设计方案增强了设计的应用范围，方便根据需要改变控制所使用的 MCU 器件，使系统功能具有继续扩展的空间。

PCB 设计采用 4 层结构：顶层和底层为电源层和数据信号的走线层，这两层焊接电子元器件以及接口插件，并使用铺铜消除电源电路对驱动芯片和温控芯片可能产生的电磁干扰；中间两层为数字接地层和模拟接地层，将数字地和模拟地分开，减少数字电路噪声对模拟电路系统的干扰，提高系统的整体控制效果。

2 驱动电流电路设计

图 3 为驱动电流电路原理图。其中，驱动电流电路由 2 块 ADN8810 芯片及其外围电路构成。单个 ADN8810 芯片输出驱动电流的满量程值 I_{FS} 为

$$I_{FS} \approx \frac{U_{REF}}{10 \times R_{SN}} \quad (1)$$

其中， U_{REF} 为 ADR4540 稳压元件产生的参考电压，理论值为 4.096 V，该参考电压输入 ADN8810 芯片的 VREF 引脚； R_{SN} 为电路中参考电阻阻值，本设计中采用 10 Ω 的高精度低温漂金属膜电阻^[17]作为 R_{SN} 。ADN8810 芯片输出驱动电流 I_{OUT} 为

图3 驱动电流电路原理图

Fig. 3 (Color online) Schematic diagram of driving current circuit

$$I_{OUT} = \text{code} \times \frac{U_{REF}}{4\,096} \times \frac{1}{R_{SN}} \times \left(\frac{R_{SN}}{15\,000} + 0.1 \right) \quad (2)$$

其中, code 为 STM32 向 ADN8810 芯片输入的控制码数值, 其取值范围为 0 ~ 4 095.

由式(1)可得, 单个 ADN8810 满量程输出约为 40 mA. code 值每增加 1, ADN8810 芯片对应接收到 I_{OUT} 理论上增加 0.010 07 mA, 与 0.01 mA 的期望值相差 0.000 07 mA. 随着 code 值的不断增加, 0.000 07 mA 累积的系统误差会超过 0.01 mA, 甚至达到最大约 0.28 mA.

为了消除系统误差, 令 $I_{OUT} = 0.01$ mA, $R_{SN} = 10 \Omega$, code = 1, 计算可得所需的 U_{REF} 为 4.069 V. 因此, 设计中采用一个阻值为 1 k Ω 与一个阻值为 6.8 Ω 电阻构成分压电路的办法, 使 ADN8810 芯片的 VREF 引脚的实际输入电压为 4.069 V. code 值每增加 1, 对应驱动电流理论增加值为 0.01 mA, 理论上消除了系统误差. 为了提供更大的驱动能力, 驱动电流电路采用两块 ADN8810 芯片输出串联的设计方式, 满量程驱动电流值为 80 mA. 此时, 驱动电流电路输出的驱动电流值 I 为

$$I = I_{OUT1} + I_{OUT2} \quad (3)$$

式(3)仅在两个 ADN8810 模块的输出驱动电流值相差不大的情况下成立, 若两个输出电流值相差较大, 会出现互相损耗的现象, I 将明显小于 I_{OUT1} 与 I_{OUT2} 之和. 使用 STM32 的 1 个串行外设接口 (serial peripheral interface, SPI) 同时向两块 ADN8810 输入相同的控制码 code 值时, 得到的驱动电流值与 code 值的线性关系如图 4. 可见, 线性度为

0.005%, 效果良好. 测试结果由安捷伦公司 34410A 型六位半数字万用表测得.

采用上述输入控制码 code 值方式, 驱动电流电路调节的最小步进为 0.02 mA. 为实现最小 0.01 mA 的驱动电流调节最小步进, 并同时规避互相损耗发生, 采用如图 5 的控制流程. 系统开始工作时默认对电流进行控制. 首先, 进行按键扫描, 若 SWITCH 键未按下, 表示当前对驱动电流值进行控制; 接下来判断按下的是 up 还是 down 键, 来完成对驱动电流值的增加或减少控制. 在调节驱动电流值时, 先进行 BUF₂ 值判断, 通过判断结果确定当前电流值的变化应该在 ADN8810 模块 1 还是模块 2 上实现. code₁ 和 code₂ 分别指输入到第 1 和第 2 块 ADN8810 芯片中的控制码数值. STM32 最小系统板增减驱动电流时采用依次增减 code₁ 和 code₂ 值的方式, 保持两块 ADN8810 芯片接收到的控制码值相

图4 驱动电流值与 code 值的关系图

Fig. 4 Diagram of the corresponding relation between the value of driving current and the value of code

图 5 驱动电流调节控制流程图

Fig. 5 Control flow chart of driving current

差不超过 1.

图 6 为输出驱动电流的稳定性测试图. 实验在 60 min 内, 每 10 s 自动记录驱动电路的输出驱动电流值. 测试激光器为武汉电信器件有限公司生产的分布式反馈 (distributed feedback, DFB) 激光器, 工作电流为 0 ~ 120 mA. 电流测试仪器为安捷伦 34410A 型数字万用表. 实验分别测量驱动电流理论输出为 20、40、60 及 80 mA 时的实际驱动电流值, 其稳定度^[18]分别为 0.000 5%、0.000 1%、0.003 3% 及 0.006 5%. 可见, 输出驱动电流的稳定度优于 0.007%.

3 温度控制电路设计

图 7 为温度控制电路原理图. 将激光器内热敏电阻接入 H 桥电路^[19-20]测量激光器的实时温度, 并通过调节激光器内 TEC 实现对激光器的温度控制. 其中, ADN8835 芯片上的 OUT1 引脚电压 U_{OUT1} 反映了当前激光器的实时温度. 温度控制电路以

ADN8835 芯片为控制核心, 包括温度设置部分, 实现对激光器目标温度的设置; TEC 电压和电流控制部分, 可以分别控制制冷和制热模式下输出到 TEC 两端的电压最大值以及流经 TEC 的最大电流值, 达到保护激光器的目的^[21]. 比例-积分-微分 (proportion integration differentiation, PID) 控制部分, 将激光器目标温度的设置电压与激光器内热敏电阻的反馈电压进行比较, 产生差分信号调节激光器内 TEC 的温度.

输出到 TEC 两端的最大直流电压可以根据制冷和制热模式分为 $U_{TEC_MAX_COOLING}$ 和 $U_{TEC_MAX_HEATING}$, 其与 VLIM 引脚电压的关系为

$$U_{VLIMC} = U_{REF} \times \frac{R_{V2}}{R_{V1} + R_{V2}} \quad (4)$$

$$U_{VLIMH} = U_{VLIMC} - I_{LIMH} \times \frac{R_{V2} \times R_{V1}}{R_{V1} + R_{V2}} \quad (5)$$

$$U_{TEC_MAX_COOLING} = U_{VLIMC} \times A_{VLIM} \quad (6)$$

$$U_{TEC_MAX_HEATING} = U_{VLIMH} \times A_{VLIM} \quad (7)$$

图6 输出驱动电流稳定性测试图

Fig. 6 Stability test chart of output driving current

图7 温度控制电路原理图

Fig. 7 (Color online) Schematic diagram of temperature control circuit

其中, U_{REF} 是 ADN8835 上 VREF 引脚输出的参考电压, $U_{REF} = 2.5 \text{ V}$; I_{LIMH} 是 ADN8835 内部改变电压制冷制热模式的开关电流, 根据芯片手册有 $I_{LIMH} = 10 \mu\text{A}$; A_{VLIM} 是由 ADN8835 内部电路设计决定的一个值, 根据手册有 $A_{VLIM} = 2 \text{ V/V}$; U_{VLIMC} 和 U_{VLIMH} 分别为制冷和制热模式下 VLIM 引脚的输入电压. 制冷模式下的最大电压永远大于制热模式下的最大电压, 因此, 只需使 $U_{TEC_MAX_COOLING}$ 符合要求即可. 按照制冷模式计算, U_{VLIMC} 的范围为 $0.2 \sim 2.2 \text{ V}$. 由式(4)和式(6)可得

$$U_{TEC_MAX_COOLING} = 2U_{REF} \times \frac{R_{V2}}{R_{V1} + R_{V2}} \quad (8)$$

设计中 R_{V1} 采用阻值为 $10 \text{ k}\Omega$ 的电阻, R_{V2} 接入的是 $100 \text{ k}\Omega$ 阻值 AD5173 的一个通道. 因此, $U_{TEC_MAX_COOLING}$ 的实际范围为 $0.5 \sim 4.5 \text{ V}$.

通过 TEC 的最大电流根据制冷和制热两种模式分为 $I_{TEC_MAX_COOLING}$ 和 $I_{TEC_MAX_HEATING}$, 其与 ILIM 引脚的输入电压关系为

$$U_{ILIMH} = U_{REF} \times \frac{R_{C2}}{R_{C1} + R_{C2}} \quad (9)$$

$$U_{ILIMC} = U_{VLIMC} + I_{LIMC} \times \frac{R_{C2} \times R_{C1}}{R_{C1} + R_{C2}} \quad (10)$$

$$I_{TEC_MAX_COOLING} = \frac{U_{ILIMC} - 1.25}{R_{CS}} \quad (11)$$

$$I_{TEC_MAX_HEATING} = \frac{1.25 - U_{ILIMH}}{R_{CS}} \quad (12)$$

其中, $U_{REF} = 2.5 \text{ V}$; I_{LIMC} 是 ADN8835 内改变电流制冷加热模式的开关电流, 根据手册 $I_{LIMC} = 40 \mu\text{A}$; R_{CS} 是由 ADN8835 内部电路设计决定的一个电阻值, 根据手册 $R_{CS} = 0.285 \text{ V/A}$; $U_{ILIMH} \leq 1.2 \text{ V}$; $U_{ILIMC} \geq 1.3 \text{ V}$; $R_{C1} = 10 \text{ k}\Omega$; 制热时 R_{C2} 阻值为 $0 \sim 8 \text{ k}\Omega$; 制冷时 R_{C2} 为 $10 \sim 100 \text{ k}\Omega$; 制热模式下 TEC 最大电流可调范围为 $0.5 \sim 3.6 \text{ A}$; 制冷模式下 TEC 最大电流可调范围为 $0.7 \sim 4.3 \text{ A}$.

激光器内的 U_{TEC} 即为 TEC_+ 与 TEC_- 之间的电压, 而 TEC_+ 和 TEC_- 直接与 AND8835 的 LDR 和 SFB 引脚相连. 因此, ADN8835 对 TEC 电压的控制最终是通过 LDR 和 SFB 电压的控制实现的. LDR 和 SFB 引脚的电压 U_{LDR} 和 U_{SFB} 为

$$U_{LDR} = U_B - 40(U_{OUT2} - 1.25) \quad (13)$$

$$U_{SFB} = U_{LDR} + 5(U_{OUT2} - 1.25) \quad (14)$$

其中, U_{OUT2} 为 PID 控制网络的输出电压; $U_B = 2.5 \text{ V}$.

定义 $U_{TEC} = U_{LDR} - U_{SFB}$, 则

$$U_{TEC} = -5(U_{OUT2} - 1.25) \quad (15)$$

可见, 随着 U_{OUT2} 的增大, 其差值的幅值呈现先减小再增大的趋势; $U_{OUT2} = 1.25 \text{ V}$ 处是临界点, 电压差的幅值在该点发生反转, 对应的电流方向、TEC 的制冷制热也随之变化. U_{OUT2} 符合以下关系

$$U_{OUT2} = U_{TEMPSET} - \frac{Z_2}{Z_1}(U_{OUT1} - U_{TEMPSET}) \quad (16)$$

其中, Z_1/Z_2 是 PID 控制网络中 OUT2 对 OUT1 的比例关系, 由 PID 控制网络中电阻值与电容值共同决定; $U_{TEMPSET}$ 是温度设定电压, 即 IN1N 引脚的输入电压. 激光器温度的调节是一个典型的 PID 控制过程, 在调节过程中, 激光器热敏电阻值的变化导致 ADN8835 的 IN1N 脚输入电压发生变化, IN1N 脚和 IN1P 脚的 1.25 V 电压之间存在的电压差, 经过差分放大后从 OUT1 引脚输出反馈电压. 将 OUT1 脚的反馈电压输入到 IN2N 引脚, 经过与温度设定 IN2P 引脚输入电压之间差分电压的放大, PID 网络输出的 OUT2 电压也不断调整. 在 ADN8835 内部, OUT2 输出的电压被输入控制器, 按照 OUT2 输出电压的大小, 不断调整内部的线性驱动和 PWN 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 的差值在 0 V 震荡, 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.

OUT1 引脚的电压 U_{OUT1} 为

$$U_{OUT1} = \left(\frac{R_{FB}}{R_{TH} + R_X} - \frac{R_{FB}}{R} + 1 \right) \times \frac{U_{REF}}{2} \quad (17)$$

其中, R_{FB} 是 PID 控制网络中的反馈电阻阻值; R_{TH} 是热敏电阻阻值; R_X 是补偿电阻阻值, 本设计中 $R_X = 7.68 \text{ k}\Omega$; R 为 25°C 时的热敏电阻与补偿电阻的阻值之和, $R = R_X + R_{TH25}$.

在本温度控制电路设计中, 参考电压源于 ADN8810 芯片 VREF 引脚产生的 2.5 V 参考电压, 因此, U_{OUT1} 不可能大于 2.5 V , 也不可能小于 0 V . 通过 U_{OUT1} 可得到激光器的实时温度值.

使用 WTD 公司的 DFB 激光器对温控电路的工作效果进行测试. 该 DFB 激光器的工作电流范围为 $0 \sim 120 \text{ mA}$, TEC 端的电压范围为 $0 \sim 3.3 \text{ V}$. 使用

APEX AP2041B 高分辨率光谱仪检测测试激光器的输出光中心波长. 将激光器温度设定为 25 ℃, 光谱仪分辨率设定为 1.12 pm, 每隔 10 s 记录 1 次激光器输出光中心波长, 结果如图 8. 可见, 激光器输出光中心波长在 120 min 内的最大波动为 17 pm. 设定激光器温度为 25 ℃, 待温控电路工作 30 min 后, 使用安捷伦 34410A 型数字万用表每 10 s 自动记录温控电路中的 U_{OUT1} , 结果如图 9. 可见, 在 120 min 内 U_{OUT1} 的最大变化值为 24 mV, 换算可得激光器的温度波动最大为 0.17 ℃.

图 8 激光器输出光中心波长随时间的波动

Fig. 8 The fluctuation of the center wavelength of the laser output light with time

图 9 OUT1 引脚电压测量图

Fig. 9 OUT1 voltage measurement chart

结 语

为了对混沌激光器进行更好控制, 根据实际需要设计一种基于 ADN8810 和 ADN8835 的驱动及温

控电路. 本设计具备全量程范围内 0.01 mA 的驱动电流调节精度, 连续线性可调. 电路可调节激光器内 TEC 端的最大电压和最大电流, 输出到 TEC 端的最大电压调节范围为 0.5 ~ 4.5 V, 通过 TEC 两端的最大电流调节范围为 0.5 ~ 4.3 A. 实验结果表明, 本研究设计的驱动及温控电路输出电流稳定度优于 0.007%. 2 h 内激光器输出光中心波长最大波动为 17 pm, 激光器温度最大波动为 0.17 ℃, 能够满足实际需要.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61875146, 61527819); 山西省留学回国人员科研基金资助项目 (2016-036, 2017-052); 山西省重点研发计划资助项目 (201803D121064); 山西省高等学校科技成果转化培育资助项目

作者简介: 王 兴 (1994—), 太原理工大学硕士研究生. 研究方向: 光子集成混沌激光器. E-mail: 867224407@qq.com

引 文: 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.

参考文献 / References:

- [1] ZHANG Jianzhong, WANG Yuncai, LIU Ming, et al. A robust random number generator based on differential comparison of chaotic laser signals [J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7496-7506.
- [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] ZHANG Jianzhong, ZHANG Mingtao, ZHANG Mingjiang, et al. Chaotic Brillouin optical correlation- domain analysis [J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1722-1725.
- [4] ARGYRIS A, SYVRIDIS D, LARGER L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links [J]. Nature, 2005, 38(7066): 343-346.
- [5] KRISHNA M, THOMAS B A, BILLY R R, et al. High-precision ranging using a chaotic laser pulse train [J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(11): 1496-1498.
- [6] LIN Fanyi, LIU Jiaming. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 815-820.
- [7] ARGYRIS A, HAMACHER M, CHLOUVERAKIS K E, et al. Photonic integrated device for chaos applications in communications [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(19): 194101.
- [8] SUNADA S, HARAYAMA T, ARAI K, et al. Chaos laser chips with delayed optical feedback using a passive ring wave guide [J]. Optics Express, 2011, 19(7):

- 5713-5724.
- [9] ZHANG Mingjiang, XU Yuhang, ZHAO Tong, et al. A hybrid integrated short external cavity chaotic semiconductor laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(21): 1911-1914.
- [10] YEN Hualo, YU Changwu, SHUN C, et al. Tunable microwave generation of a monolithic dual-length distributed feedback laser [J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13125-13137.
- [11] SONG Kunji, YAN Huahong. Effect of bias current on complexity and time delay signature of chaos in semiconductor laser with time-delayed optical feedback [J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1-6.
- [12] 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.
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)
- [13] 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.
LI Yongding, YAN Yuzhou, WEI Weiwei, et al. A study and design of high-stability drive power for lasers [J]. Lasers Journal, 2016, 37(2): 9-11. (in Chinese)
- [14] 袁林成, 蒋书波, 宋相龙, 等. 半导体激光器驱动电路的研究与设计[J]. 电子器件, 2015, 38(6): 1287-1291.
YUAN Lincheng, JIANG Shubo, SONG Xianglong, et al. Research and design of driving circuit for semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2015, 38(6): 1287-1291. (in Chinese)
- [15] 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.
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, 2018, 36(5): 544-550. (in Chinese)
- [16] 鹿洪飞, 王彪, 范兴龙, 等. TDLAS 氨气检测系统 VCSEL 激光器驱动电路设计[J]. 激光杂志, 2019, 40(1): 22-25.
LU Hongfei, WANG Biao, FAN Xinglong, et al. Design of driving circuit for VCSEL laser of NH_3 gas detector based on TDLAS technology [J]. Lasers Journal, 2019, 40(1): 22-25. (in Chinese)
- [17] 梅剑春, 叶青, 田健国. 多路半导体激光器驱动电路设计[J]. 激光技术, 2018, 42(2): 245-248.
MEI Jianchun, YE Qing, TIAN Jianguo. Design of driving circuit of multi-channel semiconductor laser [J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 245-248. (in Chinese)
- [18] 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.
GUO Fengling, XU Guangping, HUANG Baoku. Constant temperature control systems for semiconductor lasers based on DRV595 [J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 734-737. (in Chinese)
- [19] 靳晓丽, 苏静, 靳丕钰, 等. 全固态单频绿光激光器高精度数字温度控制系统的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 80-86.
JIN Xiaoli, SU Jing, JIN Pixian, et al. Study on a high-precision digital temperature-control system for all-solid-state single-frequency green laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 80-86. (in Chinese)
- [20] 王聪, 王畅, 蒋向北, 等. 新型大功率级联式二极管 H 桥整流器[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 829-836.
WANG Cong, WANG Chang, JIANG Xiangbei, et al. A novel cascaded diode H-bridge multi-level rectifier [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 829-836. (in Chinese)
- [21] 王冬, 吕勇. 调制型半导体激光器恒流驱动电路设计[J]. 现代电子技术, 2010, 7: 92-94.
WANG Dong, LÜ Yong. Design of modulation constant current driving circuit for laser diode [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 7: 92-94. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 溯心】