光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.009

半导体激光器温度调谐波长扫描技术

柯文雄，江 毅*

（北京理工大学 光电学院，北京 100081）

摘 要： 低成本、小型化的波长扫描半导体激光器在光纤传感系统中有着重要作用。设计了一种可进行温度调谐的半导体激光光源驱动电路。该电路系统以ARM单片机作为控制中心，利用热敏电阻采样激光工作温度，并通过半导体制冷器（TEC）进行温度调节，使得激光器能够根据温度调谐实现波长扫描；同时通过背向光探测器（PD）采样激光输出功率，并通过改变半导体激光驱动电流实现对激光输出功率的控制，使得激光器在温度变化时输出光功率保持稳定。实验结果表明，该电路能够长时间可靠地工作，激光器能够实现的最大波长调谐范围为5 nm，且输出光功率在整个波长扫描过程中保持稳定。

关键词： 半导体激光器；驱动电路；温度调谐；波长扫描；半导体制冷器

中图分类号： TP212 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0500－05

Temperature-tuning Based Wavelength Scanning Technology for Semiconductor Lasers

KE Wenxiong, JIANG Yi

(School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN)

Abstract: Low-cost and miniaturized semiconductor lasers play an important role in optical fiber-sensing system. In this paper, a design of semiconductor laser driving circuit for temperature tuning is experimentally presented. Using the ARM chip as the core controller, the design applies a thermistor to collect the temperature signal, and uses the thermoelectric cooler (TEC) to control the temperature, thus the wavelength scanning of the laser can be achieved by temperature-controlled tuning. Then the output power is collected by a photo diode (PD), and the optic power of the laser is controlled by electric current, so that the optic power can keep stable with the changing temperature. Experiments results show that the circuit can work reliably for a long time, the max temperature tuning range reaches 5 nm, and the output optical power remains stable during the whole wavelength scanning process.

Key words: semiconductor laser; driving circuit; thermal tuning; wavelength scanning; thermoelectric cooler

0 引言

半导体激光器以其单色性好、体积小、成本低、转换率高、易调谐等优点，广泛应用于光纤传感系统[1-2]。根据半导体激光器的温度特性——温度变化能够引起激光中心波长漂移，可以通过对温度的连续改变，使得半导体激光器输出波长在一定范围内进行扫描。然而半导体激光器输出光功率容易受温度、电流等变化的影响而产生波动，光功率的波动影响了激光器工作的稳定性，同时，半导体激光器存在容易被静电、电网冲击和浪涌电流破坏等问题。因此，半导体激光器需要配套相应的驱动电路，以保证激光器工作准确、稳定和可靠。

收稿日期：2020－03－23.

基金项目：国家自然科学基金项目(61775020,61575021)；国家“863”计划项目(2015AA043504).

* **通信作者：**江 毅 **E-mail:** bitjy@bit.edu.cn

本文设计了一种半导体激光波长扫描驱动电路，该电路能通过温度调谐实现波长扫描，且激光输出光功率在波长扫描过程中保持稳定。该设计通过对激光器的工作温度进行周期调谐，实现对激光器输出波长的周期扫描。同时，通过调整激光器的驱动电流大小，补偿半导体激光器输出功率随温度变化而产生的波动，使得激光器输出功率保持稳定。

1　硬件电路设计

蝶形 DFB 激光器性能稳定、价格低廉，在光学实验室中被广泛使用。本设计选用中心波长为 1 550.1 nm 的 14 针蝶形 DFB 激光器，如图 1 所示，该封装内部集成了激光二极管（LD）、背光检测器（PD）、半导体制冷器（TEC）和热敏电阻（TH）4 个主要模块。

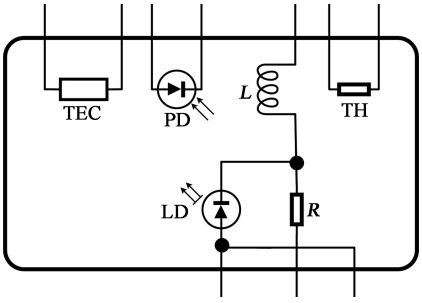


图 1　蝶形 DFB 激光器示意图

系统主要框图如图 2 所示，整个系统以 ARM 作为控制核心，主要分为温度采样电路、温度控制电路、功率采样电路和功率控制电路 4 个主要部分。ARM 选用 STM32F103 嵌入式处理器，通过 ARM 自带的 ADC 对热敏电阻采样的温度信号和背光检测器采样的功率信号进行模数转换。同时，ARM 通过控制 TEC 的电流方向实现加热或制冷，从而控制激光器的工作温度；采用数字电位器对激光器驱动电流进行控制，以控制激光器的输出光功率。

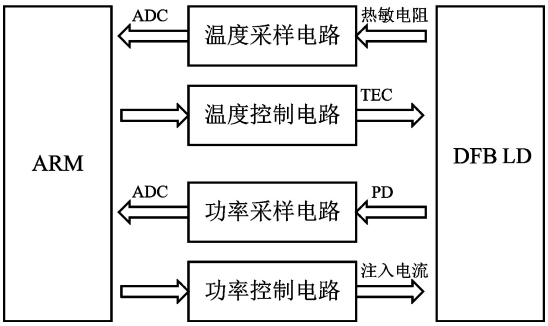


图 2　系统整体构成框图

1.1　ARM 芯片选择

STM32F103RG 是一款基于 ARM Cortex-M3 架构内核的 32 位处理器，其时钟频率最高可达到 72 MHz，芯片内置 128 kB 的 FLASH、20 kB 的 SRAM、2 个 SPI 通信接口、2 个 ADC 以及多个定时器等资源。其中内置的 ADC 为 12 bit、1 μs AD 转换时间，最高拥有 17 个采样通道，支持双采样、数据保持以及同步采样等功能[3]。

1.2　温度采样电路

半导体激光器集成的热敏电阻是负温度系数电阻，该电阻阻值随温度升高而减小，在 25 ℃时阻值为 10 kΩ。通过检测热敏电阻的阻值可以测出激光器内部温度[4-5]。

如图 3 所示，本设计采用惠斯通平衡电桥结构测量热敏电阻阻值，热敏电阻 R_t 上的电压信号能反映半导体激光器的工作温度。取电阻 $R_1=R_3$，电阻 R_2 和热敏电阻 R_t 的电压偏差为

$$\Delta U=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}-\frac{R_t}{R_t+R_3}\right)\cdot V_{DD} \tag{1}$$

当激光器工作温度为 0 ℃时，电阻 R_2 和热敏电阻 R_t 的电压偏差 $\Delta U=0$。

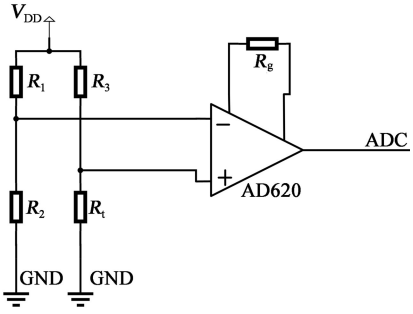


图 3　温度采样电路

电压偏差 ΔU 通过仪表放大器 AD620 进行隔离放大。AD620 是一种低成本、高精度的仪表放大器，其放大系数 G 由增益电阻 R_g 决定，计算公式为

$$G=\frac{49.4\ \text{k}\Omega}{R_g}+1 \tag{2}$$

放大后的电压偏差量 ΔU 输出到 STM32 片内集成的 ADC，通过数模数转换后进行采样。

1.3　温度控制电路

半导体激光器的工作温度会影响激光器内部的光栅周期，进而使输出激光波长发生漂移。当温度升高时，输出光波长会随之增大，发生红移；反之则发生蓝移。激光器的温度调谐系数为 1 nm/10 ℃，当激光器的温度连续变化时，半导体激光器的输出

光波长会进行相应扫描[6-7]。

本设计通过半导体制冷器(TEC)对激光器进行制冷或加热。如图 4 所示,本设计通过 2 个 N 沟道 MOS 管和 2 个 P 沟道 MOS 管组成 H 桥结构对 TEC 电流进行控制。MOS 管能通过 5 A 以上的大电流,功耗损失小、开关反应迅速,适合用于对 TEC 进行开关控制。ARM 通过 GPIO 管脚发出逻辑电平信号 A_1~A_4,该电平信号经过非门进行隔离,同时将 ARM 输出的高电平+3.3 V 转换为+5 V,用于驱动 MOS 管的开关。当 Q_1,Q_4 导通,Q_2,Q_3 不导通时,电流正向流过 TEC,此时 TEC 进行制冷;当 Q_2,Q_3 导通,Q_1,Q_4 不导通时,电流反向流过,此时 TEC 进行加热。在加热和制冷的过程中,激光器芯片工作温度连续改变,此时输出光波长连续扫描。此外,电阻 R_4 为限流电阻,改变 R_4 大小可以改变通过 TEC 的电流大小,因此针对实验中对波长扫描周期的要求,需要改变所使用 R_4 的阻值。

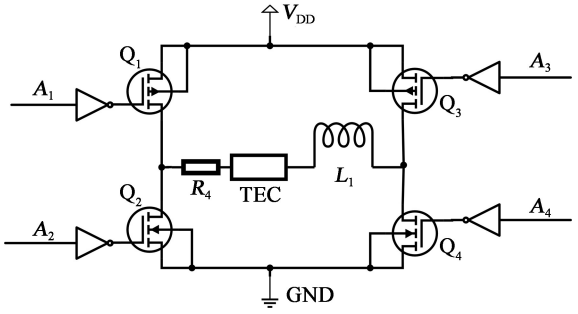


图 4 温度控制电路

1.4 功率采样电路

DFB 激光器有两个输出面:主光输出面输出的光是供用户使用的输出光,次光输出面输出的光是背向光。背向光功率与输出光功率成正比,因此可以用来检测激光器的光功率。激光器内部集成的背向光电二极管用来检测激光器的输出光功率[8]。

如图 5 所示,光电二极管 PD 通过光电转换得到光电流信号,电流信号经过由运放 OPA37 组成的电流电压转换电路转换为电压信号,其中 C_1 是滤波电容,R_5 是反馈电阻,电压信号 U 和电流 I 的转换公式为

$$U = I \cdot R_5 \tag{3}$$

电压信号 U 输出到 STM32 片内集成的 ADC,经过模数转换后进行采样。

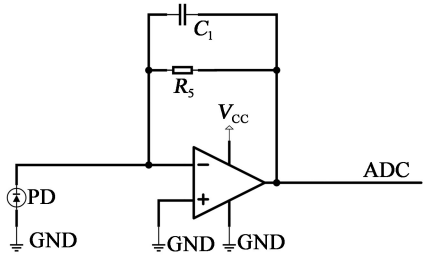


图 5 功率采样电路

1.5 功率控制电路

激光器工作温度会影响其输出光功率。当激光器温度上升时,激光器的热阻会增加,导致激光器的输出光功率减少;反之,当激光器温度降低时,激光器的热阻会减少,输出光功率增加。因此对激光器进行温度调谐时,激光器输出光功率会随着激光器的工作温度变化而产生波动。为了使激光器输出光功率保持稳定,需要增加或减少激光器的驱动电流,对输出光功率进行补偿[9-10]。

如图 6 所示,当电阻 R_8 增大时,该电阻分压变大,因此运放 OPA37 的输入电压增大,其输出端电压会随之增大,即场效应管 Q_5 的栅极电压增大。于是从 Q_5 漏极流向源极的电流增大,此电流即激光器的驱动电流。同理,当电阻 R_8 减小时,激光器的驱动电流会减少。在本设计中,电阻 R_8 选用有 256 个阶梯的数字电位器,其最大阻值为 10 kΩ,ARM 通过 SPI 接口可以实时调整电阻 R_8 的大小,进而实现对激光器驱动电流的控制。

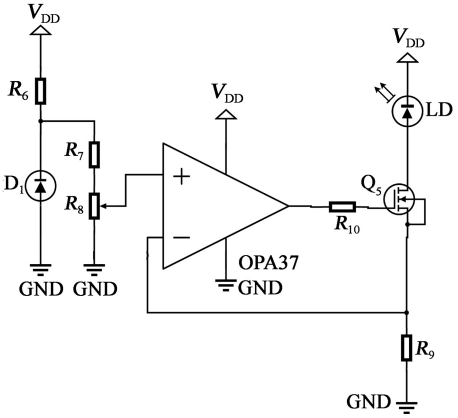


图 6 功率控制电路

2 嵌入式程序设计

在完成硬件电路的设计后,需要对 ARM 进行编程才能完成激光器控制功能。本设计程序采用 C 语言编写,在 Keil5 上进行开发编译。软件能够完成对激光器温度调谐范围、激光器功率稳定值的设定等功能,程序框图如图 7 所示。

主要程序部分包括:

(1)系统初始化。初始化 ARM 的系统资源，主要包括 ARM 的时钟、中断、ADC 等资源的初始化。

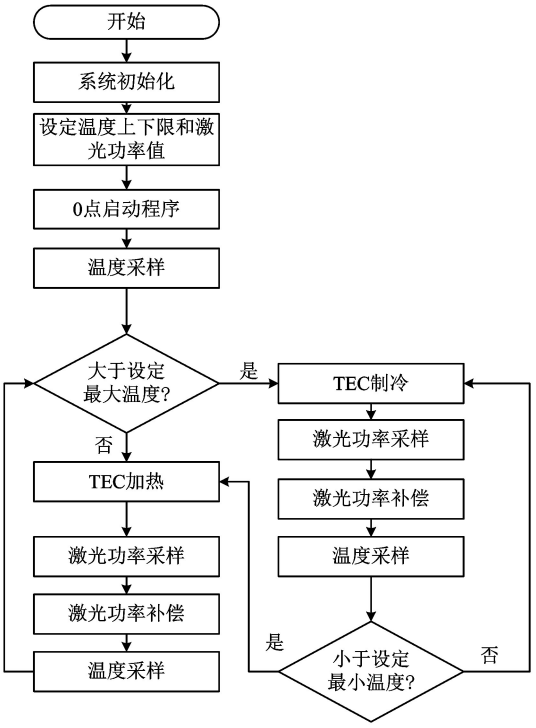


图 7　程序流程框图

(2)设定温度上下限和激光功率值。根据调谐范围和激光输出功率的实际需求，设定激光器调谐范围的上下限温度 T_1，T_2 和激光器输出光功率 P 的具体数值，温度将在 $T_1 \sim T_2$ 之间变化，同时激光输出光功率将稳定在 P 附近。

(3)0 点启动程序。刚上电时，将激光器的驱动电流设置为 0，即激光器不输出光。将电阻 R_8 的阻值设置为 0，此时激光器的驱动电流为 0。然后逐步增大电阻，激光器工作电流随着电阻增加而增大，此时激光器的输出光功率也会随之增大。当采样的激光器输出光功率等于预设的功率值时，停止增加电阻值。0 点启动程序能够有效防止激光器因为上电过程中瞬间产生过大的冲击电流而损坏，延长激光器的使用寿命[11]。

(4)功率补偿程序。在温度变化的过程中，通过改变激光器驱动电流对激光器输出光功率进行补偿，使得激光器输出光功率在温度变化时保持稳定。当采样的输出光功率大于设定值时，减小 R_8 的电阻值，激光器驱动电流会随之减小，使得激光器的输出光功率减小；反之，若采样的输出光功率小于设定值，则增大 R_8 的电阻值，激光器的驱动电流随之增大，使得激光器的输出光功率增大。

(5)温度调谐程序。通过热敏电阻采样激光器的温度，通过改变 TEC 的电流方向，使激光器加热或制冷。首先使激光器加热，当采样的激光器工作温度大于或等于设定的最高温度时，停止加热；然后进行制冷，当采样的激光器工作温度小于或等于设定的最小温度时，停止制冷。不断重复加热和制冷过程，使激光器在设定温度范围内周期性变化，此时激光器的输出波长会随着温度变化进行扫描。

3　实验结果

在室温环境(约 25 ℃)下，通过嵌入式程序设定激光器的最高温度为 50 ℃，最低温度为 5 ℃，同时将激光输出功率设定为 14 mW。

当激光器稳定扫描后，通过示波器采集驱动电路输入到 ARM 的 ADC 中的功率电压信号和温度电压信号，分别如图 8 和 9 所示。通过光波长计可以看到激光器的波长随着温度变化而发生相应漂移：大约每 10 ℃的温度变化能够带来 1 nm 的波长移动。同时，当温度在 60 ℃附近时，过高的温度使得激光器无法稳定工作。因此最大温度调谐范围设定为 0～50 ℃，此时波长调谐范围为 5 nm。

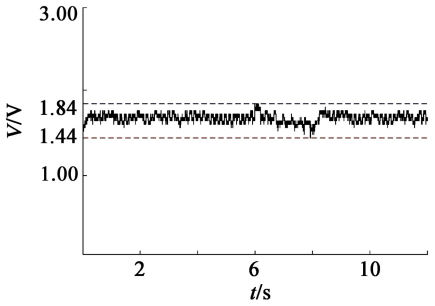


图 8　功率电压信号图

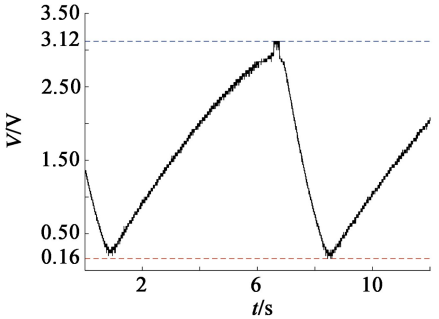


图 9　温度电压信号图

实验结果表明，该激光器驱动电路能够对激光器进行温度调谐，同时激光器输出光功率保持相对稳定，符合设计要求。

4 总结

本文设计的半导体激光驱动电路以STM32F103RG系列ARM芯片作为主控芯片，实现了半导体激光器温度调谐，其中温度调谐范围为0～50 ℃，波长调谐范围为5 nm，在温度改变过程中激光器的输出光功率能够保持稳定。通过嵌入式程序能够调整激光器的温度变化范围和输出光功率稳定值。同时，通过引入0点启动程序，减少了因激光器上电时的冲击电流而产生的损坏，可有效延长激光器的工作寿命。实验证明，本设计电路正确有效，能够保证激光器长时间稳定地工作。

参考文献：

[1] 孙 安，陈嘉琳，李国扬，等. 基于高频微波技术的分布式光纤传感器布里渊散射信号检测[J]. 中国激光，2007，34(4)：503-506.
Sun An，Chen Jialin，Li Guoyang，et al. Detection of spontaneous Brillouin backscattered power in distributed optical fiber sensor system based on high frequency microwave technology[J]. Chinese J. of Lasers，2007，34(4)：503-506.

[2] 陈学岗，万 雄，朱泉水. LD温度控制系统在光纤磁场传感器中的应用[J]. 传感器技术，2004，23(3)：51-53.
Chen Xuegang，Wan Xiong，Zhu Quanshui. Application of LD temperature control system in optical fiber magnetic field sensors[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2004，23(3)：51-53.

[3] 崔春艳，胡新宁，赵尚武，等. 一种光纤传感器光源驱动电路的设计[J]. 传感器与微系统，2007，26(9)：98-100.
Cui Chunyan，Hu Xinning，Zhao Shangwu，et al. Design of driving circuit for fiber-optic sensor light source[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2007，26(9)：98-100.

[4] STMicroelectronics Corporation. STM32F103xx Datasheet [H]. ST Microelectronics Corporation，2015.

[5] Chen C. Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors[J]. Measurement，2009，42(7)：1103-1111.

[6] 李金义，杜振辉. 利用热敏电阻精确测量DFB激光器动态结温度[J]. 仪器仪表学报，2012，33(9)：2088-2093.
Li Jinyi，Du Zhenhu. High precision dynamic junction temperature estimation for DFB laser using thermistor[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2012，33(9)：2088-2093.

[7] 邱选兵，李 宁，孙冬远，等. 小型化高稳定半导体激光驱动电路研究[J]. 激光与红外，2018，48(4)：469-475.
Qiu Xuanbing，Li Ning，Sun Dongyuan，et al. Research on driving circuit for miniaturized high stable semiconductor laser [J]. Laser & Infrared，2018，48(4)：469-475.

[8] Chen K，Lin G T. Optimization of multiple-module thermoelectric coolers using artificial-intelligence techniques [J]. Inter. J. of Energy Research，2002，26(14)：1269-1283.

[9] 伏燕军，邹文栋，肖慧荣，等. 半导体激光器驱动电路的光功率控制的研究[J]. 红外与激光工程，2005，34(5)：626-630.
Fu Yanjun，Zou Wendong，Xiao Huirong，et al. Optic power control of LD drive circuit[J]. Infrared and Laser Engin.，2005，34(5)：626-630.

[10] 李成仁，宋昌烈，李淑凤，等. 半导体激光器输出波长随工作电流变化的实验研究[J]. 红外与激光工程，2003，32(2)：144-147.
Li Chengren，Song Changlie，Li Shufeng，et al. Experimental investigation of the change of semiconductor laser output wavelength corresponding to operation current[J]. Infrared and Laser Engin.，2003，32(2)：144-147.

[11] 梁 迅，姚 琼. 高稳定高集成度半导体激光光源驱动器[J]. 半导体光电，2007，28(3)：427-429.
Liang Xun，Yao Qiong. High stability and highly integrated laser diode driver[J]. Semiconductor Optoelectronics，2007，28(3)：427-429.

作者简介：

柯文雄(1994—)，男，福建人，硕士，主要研究方向为光纤传感系统；

江 毅(1967—)，男，博士，教授，主要研究方向为光纤传感器。

(上接第499页)

[16] Chander S，Purohit A，Nehra A，et al. A study on spectral response and external quantum efficiency of mono-crystalline silicon solar cell [J]. Inter. J. of Renewable Energy Research，2014，5(1)：41-44.

[17] Bett A W，Baur C，Dimroth F，et al. FLATCON/spl trade/-modules：technology and characterisation[C]// Proc. World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. IEEE，2003，1：634-637.

[18] 陈 帅，杨瑞霞，吴亚美. Ⅲ-Ⅴ多结太阳电池隧道结模型的研究进展[J]. 微纳电子技术，2015，52(9)：6-14.
Chen Shuai，Yang Ruixia，Wu Yamei. Research process of tunnel junction models in Ⅲ-Ⅴ multi-junction solar cells[J]. Micronanoelectronic Technology，2015，52(9)：6-14.

[19] Steiner M，Guter W，Peharz G，et al. A validated SPICE network simulation study on improving tunnel diodes by introducing lateral conduction layers [J]. Progress in Photovol. Research and Appl.，2012，20(3)：274-283.

作者简介：

江景祥(1994—)，男，广东江门人，硕士生，研究方向为聚光光伏技术；

舒碧芬(1966—)，女，博士，教授，主要从事太阳能利用、节能技术，以及纳米能源材料方面的研究。