

文章编号: 1001-3806(2016)05-0701-05

基于数字滤波的半导体激光器温控系统设计

方刘海^{1,2}, 文继国^{1*}, 江月成², 潘冬², 帅欣²

(1. 成都信息工程大学 电子工程学院, 成都 610225; 2. 成都欧飞凌通讯技术有限公司, 成都 610225)

摘要: 为了使光收发模块发射光波长稳定, 突破现有半导体激光器温控系统大都采用模拟器件实现的常规设计, 提出了一种基于数字滤波方式的控制方案, 采用数字信号处理方式, 以固件形式实现了半导体激光器温度控制。通过理论分析和实验验证, 取得了采用该方案的光收发模块在应用温度范围内的发射波长变化数据。结果表明, 该系统性能稳定, 温度控制精度达 $\pm 0.053^\circ\text{C}$ 。

关键词: 光电子学; 温度控制; 数字滤波; 半导体激光器

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.017

Design of a temperature control system for semiconductor laser based on digital filtering

FANG Lihai^{1,2}, WEN Jiguo¹, JIANG Yuecheng², PAN Dong², SHUAI Xin²

(1. School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chengdu Ophylink Communication Technology Co. Ltd., Chengdu 610225, China)

Abstract: To maintain the stability of emission wavelength of an optical transceiver and break through the routine design that the existing semiconductor laser temperature control systems were mostly implemented by analog devices, a semiconductor laser temperature control system based on digital filtering was proposed. By using digital signal processing in the form of firmware, temperature control of semiconductors was implemented. This system was applied to an optical transceiver module. Through theoretical analysis and experimental verification, the dependence of emission wavelength on the temperature was obtained. The test results show that the system achieves stable performance and good temperature control precision of $\pm 0.053^\circ\text{C}$.

Key words: optoelectronics; temperature control; digital filtering; semiconductor laser

引言

在光纤通信中, 光模块发射波长与半导体激光管芯的温度密切相关, 温度升高将导致波长变长(约为 $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$)。波长偏差过大, 将严重影响通信, 特别是密集型波分复用^[1](dense wavelength division multiplexing, DWDM)光模块, 其通道间的波长间隔非常小, 如 C 波段的 32 波系统, 波长间隔约 0.8nm , 一个 0.4nm 的波长变化即导致信道偏移, DWDM 的波长典型容差值只有 $\pm 0.1\text{nm}$ ^[2]。因此, 对半导体激光器进行温度控制非常关键。

热电制冷器(thermoelectric cooler, TEC)是一种基于帕尔帖效应的半导体器件, 通过控制流过其中的电流流向和大小来调控其温度, 且 TEC 没有移动部件或工作流体, 可极小型化^[3]。在半导体激光器温度调控

系统中, 常将激光器、TEC、热敏电阻^[4]集成到一个单一的单元中, 通过 TEC 电流实现对激光器温度的调控。

现有的半导体激光器 TEC 温控系统大都使用 TEC 控制器/驱动器和运算放大器(运放)等模拟器件来实现^[5]。以 MAX1968 或 MAX8521 搭载运放等模拟方案为例, 在关键集成电路芯片的基础上用到大量外围组件, 元器件较多, 将占用较大印制电路板(printed circuit board, PCB)空间, 潜在故障率提升, 为确保高精度, 对元器件公差要求严格, 导致成本上升。此外, 硬件方案不利于系统升级和更新。鉴于此, 本文中设计了基于数字滤波方式的半导体激光器温控系统, 整个方案仅用到 4 个场效应管加几个电阻电容, 并应用到 DWDM 光模块中, 获得了满意的测试效果。

1 双闭环 TEC 温度控制系统

带制冷的光发射组件(transmitter optical sub-assembly, TOSA)将激光器、热敏电阻等组件安装在子热沉上, 再固定到 TEC 制冷器上构成热模型^[6], 如图 1

作者简介: 方刘海(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光收发模块及射频电路的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wen@cuit.edu.cn

收稿日期: 2015-06-18; 收到修改稿日期: 2015-06-30

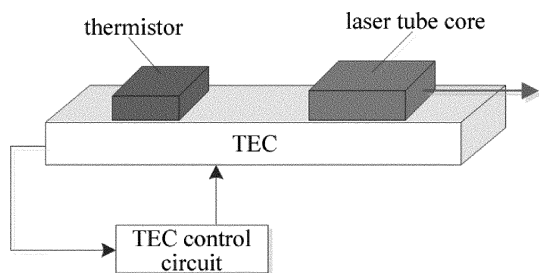


Fig. 1 Thermal model diagram of TOSA

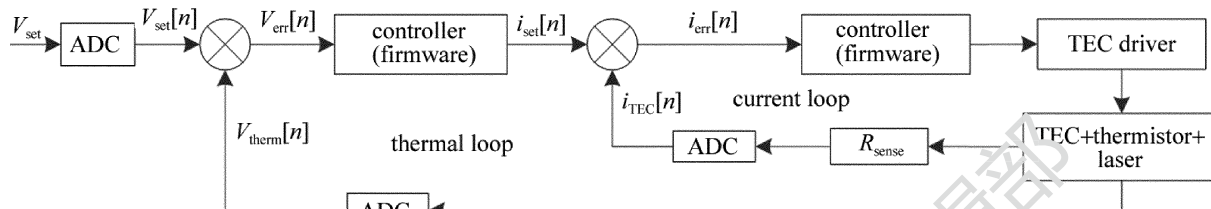


Fig. 2 Dual closed-loop TEC temperature control system

图2中, $V_{set}[n]$ 为设定的目标温度, $V_{therm}[n]$ 为热敏电阻反馈温度。同理, $i_{set}[n]$ 与 $i_{TEC}[n]$ 分别为目标电流和 TEC 反馈电流, $V_{err}[n]$ 和 $i_{err}[n]$ 为差值信号。外部热闭环中, 热敏电阻将测量到的 TEC 实际温度与设定温度进行比较, 得出差值信号, 并送入比例-积分-微分 (proportion-integration-differentiation, PID) 控制器^[7-8], 最终输出一个 TEC 目标电流给内部电流闭环, 再与电流检测器件 (R_{sense} 为电流探测电阻) 测量到的实际 TEC 电流比较, 得出差值信号, 并送入电流环路的比例-积分 (proportion-integration, PI) 控制器, 最终驱动 TEC 生成补偿电流, 以保持实际 TEC 电流接近目标值。

本设计以 DS4830 为主控芯片, 采用数字信号处理方式, 以固件形式实现半导体激光器 TEC 温度控制。DS4830 是一款 16 位微控制器^[9], 可为 TEC 数字控制提供必要的资源。

1.1 基于数字滤波的 PID 控制器功能实现

热闭环中, 现有的控制策略大都采用运算放大器实现 PID 功能^[10], 输出一个 TEC 目标电流给内部电流闭环。本设计通过计算出一种模拟 PID 控制器电路 (如图3所示) 的连续时间传递函数, 并将其转换到数

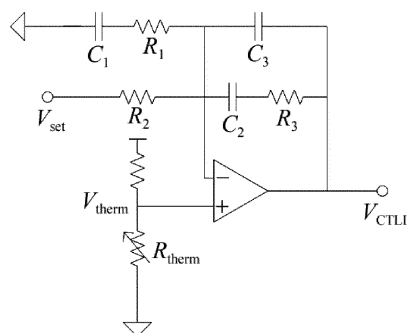


Fig. 3 An analog PID controller circuit

所示。当温控电路工作时, 子热沉设定在某一特定温度, 热敏电阻用于监控管芯温度, 采样 TEC 温度并转换为电压。当给 TEC 致冷器加载不同极性的电流时, 分别实现致冷或致热, 子热沉的存在使得温控过程是渐变的。

整个系统采用如图2框图所示的双闭环 TEC 控制方案, 外部热闭环嵌套内部电流闭环。其中, 温度转换为电压形式, 且所有模拟量均转换为数字量。

字域, 最终以数字滤波器^[11]设计方式实现 PID 控制功能。

V_{CTLI} 为 TEC 目标电压, 可由设定电压 V_{set} 和热敏电阻反馈电压 $V_{T_{c,m}}$ 表示, 利用 $s = j\omega$ (s 为 S 域复频率, ω 为频率) 在 S 域中, 频域 $V_{CTLI}(s)$ 可表示为:

$$V_{CTLI}(s) = G_c(s)V_{err}(s) + G_f(s)V_{set}(s) \quad (1)$$

式中, $V_{err}(s) = V_{set}(s) - V_{therm}(s)$, $G_c(s)$ 与 $G_f(s)$ 为设置的两个传递函数, 且:

$$G_c(s) = \frac{(1 + sR_3C_2)(1 + sR_2C_1 + sR_1C_1)}{s(C_2 + C_3)(1 + sR_3C_3)R_2(1 + sR_1C_1)} - 1 \quad (2)$$

$$G_f(s) = \frac{(1 + sR_3C_2)C_1}{(C_2 + C_3)(1 + sR_3C_3)(1 + sR_1C_1)} + 1 \quad (3)$$

令 $V_1(s) = G_c(s)V_{err}(s)$, $V_2(s) = G_f(s)V_{set}(s)$ 。最终, $V_{CTLI}(s)$ 可视为两个单输入单输出系统的输出累加。经双线性变换法 $s = \frac{2z-1}{Tz+1}$ (复频率 s 和离散 z 分别为 S 域和 Z 域的关键因子, T 为周期), 将 $G_c(s)$ 与 $G_f(s)$ 这两个模拟传递函数转换成 $G_c(z)$ 与 $G_f(z)$, 再逆变换到离散域得出无限冲击响应形式的 $V_1[n]$ 与 $V_2[n]$:

$$V_1[n] = - \sum_{i=1}^3 A_i V_1[n-i] + \sum_{j=0}^3 B_j V_{err}[n-j] \quad (4)$$

$$V_2[n] = - \sum_{k=1}^2 C_k V_2[n-k] + \sum_{l=0}^2 D_l V_{set}[n-l] \quad (5)$$

A_i, B_j, C_k 和 D_l 为系数, 可由 PID 控制电路中的电阻电容值得出。由于这是一个线性系统, 故时域 $V_{CTLI}[n]$ 可表示为:

$$V_{CTLI}[n] = V_1[n] + V_2[n] \quad (6)$$

由此, 模拟 PID 控制器功能可通过数字信号处理转换成无限脉冲响应 (infinite impulse response, IIR) 滤

波器设计方式,且以固件形式实现。TEC 目标电流 $i_{set}[n]$ 可由 $V_{CTLI}[n]$ 线性得出:

$$i_{set}[n] = \frac{V_{CTLI}[n] - V_{ref}}{10 \times R_{sense}} \quad (7)$$

式中, R_{sense} 为电流探测电阻, V_{ref} 为参考电压。

1.2 基于 DS4830 的 TEC H 桥驱动设计

在电流环路中,采用 H 桥将单电源转换成双电源驱动 TEC(两个有着互补驱动的同步降压电路)^[12]。如图 4 所示, H 桥由 4 个场效应管构成 ($Q_{A,h}$, $Q_{A,l}$, $Q_{B,h}$, $Q_{B,l}$), 且分别受 DS4830 的 4 个脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 信号独立控制。 $Q_{A,h}$ 与 $Q_{A,l}$ 及 $Q_{B,h}$ 与 $Q_{B,l}$ 协同外围元件构成两个同步降压转换器, 且以补偿模式工作。波长稳定时, TEC 中无电流, 两端的压降均为 1.65V (3.3V 供电), 当 TEC 电流需补偿时, 一端压降从 1.65V 降低, 另一端压降从 1.65V 升高, 生成补偿电流。因此, 通过控制每个降压转换器的工作周期 (具体见第 1.3 节), 可实现 TEC 电流控制。

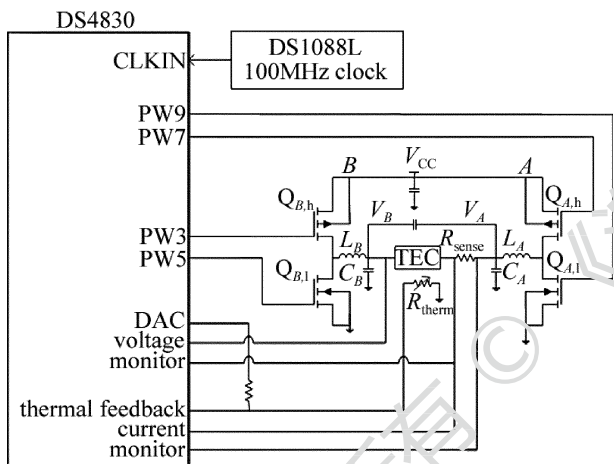


Fig. 4 DS4830 TEC H-bridge driving circuit

1.3 基于数字滤波方式的电流环路控制器功能实现

电流闭环中, 现有控制策略大都采用如 MAX8521 等 TEC 功率驱动器实现。本设计采用数字滤波方式实现电流闭环控制器 (PI 控制器) 功能。电流差值信号 $i_{err}[n]$ 经数字信号处理, 输出 PI 控制器信号 $e_{pi}[n]$ 控制降压转换器的工作周期。与第 1.1 节中的方法一样, 最终得出无限冲击响应形式的 $e_{pi}[n]$:

$$e_{pi}[n] = -ae_{pi}[n-1] + bi_{err}[n] + ci_{err}[n-1] \quad (8)$$

式中, a, b, c 为系数, 同样可由 PI 控制器电路中的电阻电容值确定。此外, TEC 两端分别为 A 和 B, 则 A 端电压为:

$$V_A = \frac{T_{Q_{A,h}}}{T_s} V_{CC} \quad (9)$$

式中, T_s 表示场效应管 $Q_{A,h}$ 的开关周期, $T_{Q_{A,h}}$ 为 $Q_{A,h}$ 的

工作时段, 同理:

$$V_B = \frac{T_{Q_{B,h}}}{T_s} V_{CC} \quad (10)$$

TEC 两端压降为 $V_A - V_B - V_{R_{sense}}$, TEC 的压降直接受其两端场效应管的工作周期控制, 4 个 PWM 与对应场效应管工作周期的控制关系详见表 1。

Table 1 PWM signals used for TEC driving

MOSFET	position	type	signal name	duty cycle	on-time/period
$Q_{A,h}$	side A high	P channel	PW7	$D_{A,h}$	$1 - D_{A,h}$
$Q_{A,l}$	side A low	N channel	PW9	$D_{A,l}$	$D_{A,l}$
$Q_{B,h}$	side B high	P channel	PW3	$D_{B,h}$	$1 - D_{B,h}$
$Q_{B,l}$	side B low	N channel	PW5	$D_{B,l}$	$D_{B,l}$

而 4 个场效应管的工作周期都可由 $Q_{A,h}$ 的工作周期 $D_{A,h}$ 表示:

$$\begin{cases} D_{A,l} = D_{A,h} - 2D_t \\ D_{B,h} = 1 - D_{A,h} \\ D_{B,l} = D_{B,h} - 2D_t = 1 - D_{A,h} - 2D_t \end{cases} \quad (11)$$

D_t 为避免“直通”而插入的一个短暂“死区”^[13]。由 $D_{A,h}$ 即可求出其它 3 个的工作周期。而 $T_{Q_{A,h}}$ 即 $D_{A,h}$ 的“on”时段, 其与中间变量 $e_{pi}[n]$ 存在下述线性关系:

$$T_{Q_{A,h}} = \frac{e_{pi}[n] - e_{min}}{e_{max} - e_{min}} (T_{max} - T_{min}) + T_{min} \quad (12)$$

式中, e_{max}, e_{min} 分别为变量 $e_{pi}[n]$ 的最大值与最小值; T_{max}, T_{min} 分别为 $T_{Q_{A,h}}$ 的最大值与最小值。

综上所述, 假使电流从 A 到 B 为正向, 则当 $i_{set}[n] > i_{TEC}[n]$, 将产生一个正的 $i_{err}[n]$, 驱使 $e_{pi}[n]$ 上升, 同时得出一个更久的 $T_{Q_{A,h}}$, 因此 PWM 信号调控 $D_{A,h}$ 增加, $D_{B,h}$ 减小 (同步补偿模式), 使得 V_A 增加, V_B 减小, 最终 $i_{TEC}[n]$ 接近 $i_{set}[n]$ 。

2 顶层固件流程设计

如图 5 所示的流程设计中, 需合理分配热闭环与电流闭环的更新周期。电流闭环内嵌于热闭环, 故热闭环需更久的更新周期。本设计中将热闭环更新周期设为 10ms, 电流闭环更新周期为 1ms。

将 DS4830 的计时器 1 设置为 1ms 监督电流闭环更新周期, 每中断一次即电流闭环更新一次; 设置电流环路计数器监督热闭环更新周期, 每计数到 10 次, 热闭环更新一次。

此外, 将电流闭环更新周期的 1ms 分成 10 个编码片, 每个编码片为 100μs, 电流闭环更新周期中, 前 5 个编码片用于自身更新, 后 500μs 用于处理其它任务。本设计中, 将热闭环分成四部分并在后 4 个编码片进

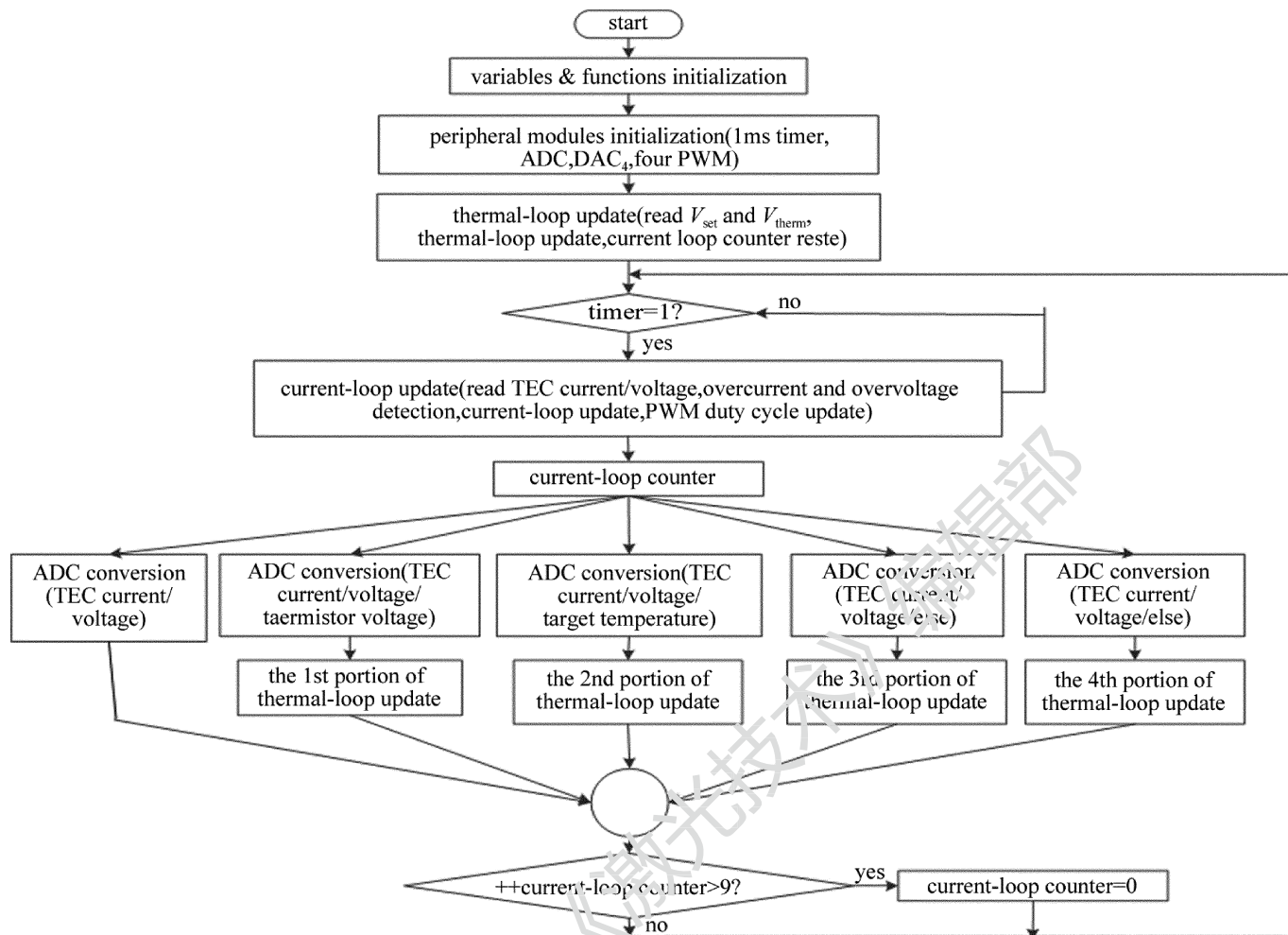


Fig. 5 Flowchart of firmware

行更新。由此,热闭环拥有充足的时间更新,而电流闭环也能很好地工作,在程序调测试中效果良好。

3 应用测试与分析

采用住友公司 10Gbit/s DWDM 带制冷电吸收调制 TOSA^[14] 55 通道(中心波长 1533.468nm)作为光发射组件,将本设计应用到设计的 DWDM 小型可热插拔 10Gbit (small form-factor pluggable, SFP+) 光模块^[15] 中,如图 6 所示。分别进行了温度连续变化波长测试和特定温度点长时间波长测试两组实验,验证了温度稳定度。

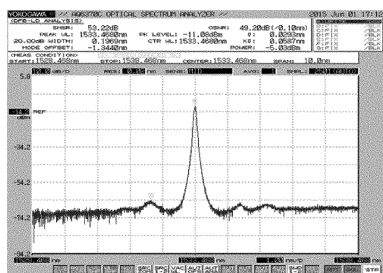


Fig. 6 Emission wavelength of DWDM SFP+ channel 55

表 2 所示为光模块结构体温度在 0℃ ~ 80℃ 之间

Table 2 Module temperature change vs. emission wavelength

temperature/℃	wavelength/nm	temperature/℃	wavelength/nm
1.3	1533.4668	50.12	1533.4630
8.7	1533.4670	52.8	1533.4676
14	1533.4671	56.87	1533.4680
21	1533.4673	59.5	1533.4681
26	1533.4662	64.21	1533.4730
29.56	1533.4678	68	1533.4709
31.5	1533.4694	71	1533.4733
37	1533.4680	77.56	1533.4713
41.56	1533.4669	79	1533.4726
45.38	1533.4661		

连续变化时,该模块波长的变化。由数据可知,整个测试温度范围内,波长与中心值最大偏移量不大于 ±0.0053nm,换算成温度变化不大于 ±0.053℃。

此外,对该模块进行了环境温度分别为 -5℃, 25℃ 和 65℃ 3 个温度点各 6h 的波长稳定度测试,波长最大偏移量为 ±0.0047nm。

4 结论

本设计为半导体激光器自动温度控制提供了一个

软件化实现方案,主要的创新点包括:(1)软件化方式实现。通过数字滤波器设计方式,以固件形式实现了双闭环 TEC 控制系统的热闭环 PID 控制器功能与电流闭环 PI 控制器功能;(2)提供了一种以 DS4830 为主控芯片,通过 4 个 PWM 控制 H 桥驱动 TEC 的方案,控制精准;(3)将该方案成功应用到 DWDM SFP + 模块中。实验结果表明,该设计控制精准,半导体激光器温度偏移幅度不大于 $\pm 0.053^{\circ}\text{C}$ 。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Zh, CHEN Zh, MA W D. Technologies for high-rate DWDM transmission systems and their recent advances [J]. Study on Optical Communications, 2015, 41(1):5-8 (in Chinese).
- [2] GE J J. The research and design of 4.25Gbps DWDM SFP optical transceiver [D]. Wuhan: Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, 2011:16-37 (in Chinese).
- [3] TAYLOR R A, SOLBREKKEN G L. Comprehensive system-level optimization of thermoelectric devices for electronic cooling applications [J/OL]. (2008-03-03)[2013-10-08]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4358522>.
- [4] LIAO Zh Y, DENG H F, WU L H, et al. Design of high precision constant temperature control systems based on laser diodes [J]. Laser Technology, 2012, 36(6):771-775 (in Chinese).
- [5] GAO P D, ZHANG F Q. Design and implementation of high precision temperature control system for semiconductor lasers [J]. Laser Technology, 2014, 38(2):270-273 (in Chinese).
- [6] ZHAO J. Design of semiconductor laser diode auto temperature control circuit [J]. Electronics World, 2013(17):128-129 (in Chinese).
- [7] LI J, CHEN Ch, XUE D, et al. The design of temperature control for laser based on PIDr [J]. Laser Journal, 2015, 36(4):38-41 (in Chinese).
- [8] CHEN W, YANG Zh, ZHANG W. Design of high precision laser temperature control circuit [J]. Laser Technology, 2014, 38(5):669-674 (in Chinese).
- [9] PRODUCTS M I. DS4830 optical microcontroller user's guide [EB/OL]. (2012-08-17)[2014-02-26]. <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/UG5484.pdf>, 2012.
- [10] WANG Z Q, DUANG J, ZENG X Y. Research of precise temperature control systems of high-power semiconductor laser [J]. Laser Technology, 2015, 39(3):353-356 (in Chinese).
- [11] XIE X J, FENG Y H, HE G D, et al. Comparison of two main digital methods for IIR digital filter designing [J]. Shanxi Electronic Technology, 2013(1):26-28 (in Chinese).
- [12] HU L L, ZHANG P B, HUA D X, et al. Design of DFB laser's high performance temperature controller by TLM FBG sensing array [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 15(7):921-925 (in Chinese).
- [13] XIE H H, ZOU W D, HUANG Ch H, et al. LD temperature control system based on PWM comparison amplifier [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7):1530-1534 (in Chinese).
- [14] DING G Q, CHEN L Y, LIU R, et al. 10Gb/s EML TOSA and its application in the long-distance communication [J]. Optical Communication Technology, 2012, 36(2):4-7 (in Chinese).
- [15] ZHANG L, XIA Zh Zh, QIN Y, et al. Temperature compensation technology for 10Gbit/s SFP + short-range optical modules [J]. Study on Optical Communications, 2015, 41(1):31-34 (in Chinese).