

文章编号: 1001-3806(2014)05-0669-06

一种高精度激光器温控电路的设计

陈 威¹, 杨 铸^{1*}, 张 为²

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 光联通讯技术有限公司, 武汉 430074)

摘要: 为了保持光收发模块发射光波长的稳定, 采用半导体热电制冷器对模块中激光器温度进行控制的方法, 设计了以热电制冷器为核心的具有高采样精度和快速响应速度的温度控制电路, 并进行了理论分析和实验验证, 取得了使用本电路的样品模块在应用温度范围内的发射波长变化数据。结果表明, 优化后的热电制冷器温控电路具有良好的性能, 能够快速准确地控制激光器温度, 将发射光波长的变化精确锁定在 20pm 范围之内。设计完全满足实际应用要求。

关键词: 光电子学; 激光器温度控制; 采样精度; 控制算法; 直流转换器控制回路

中图分类号: TP271

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.020

Design of high precision laser temperature control circuit

CHEN Wei¹, YANG Zhu¹, ZHANG Wei²

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China; 2. Oplink Communications Inc., Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to maintain the stability of the emission wavelength of an optical transceiver, a thermoelectric cooler was adopted to control the temperature in the transceiver. A temperature control circuit was designed with high sampling precision and fast response speed. Through theoretical analysis and experimental verification, the dependence of emission wavelength on the temperature was obtained in the application temperature range. The results show that the optimized temperature control circuit of thermoelectric cooler has good performance, which can control the temperature of the laser accurately and quickly and lock the emission wavelength within 20pm change range. The design meets the requirements of practical applications fully.

Key words: optoelectronics; laser temperature control; sampling accuracy; control algorithm; DC converter control loop

引 言

随着现代社会信息交互的日益加深和通信技术的快速发展, 信息量呈现几何级的高速增长, 海量信息的传播需要大容量高速率的传输系统来承载^[1]。传输系统物理层的数据流量很大, 一般使用激光作为信号载波通过光纤进行传输, 发射光载波的是光收发模块(以下简称光模块), 主要起光电转换作用, 内部配有半导体激光器。

为了进一步加大传输速率, 在通信领域使用复用技术, 波分复用(wavelength division multiplexing,

WDM)实际上就是一种频分复用技术^[2], 它使不同波长的光在同一个信道内传输从而大大提高系统的承载能力。密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)是 WDM 的升级, 它的频率间隔更窄, 能容纳的通道数更多, 信息的容量更大, 对于 C 波段 12.5GHz 的频率间隔, 相邻通道间光载波的中心波长相差仅约 100pm^[3]。由于半导体激光器的发光性能受温度的影响很大, 温度变化带来的波长漂移很可能导致通道间的干扰, 造成通信失效, 为此需在 DWDM 光模块中设计一定的温度控制电路。半导体热电制冷器(thermoelectric cooler, TEC)由于体积小和性能稳定^[4]被广泛用于 DWDM 光模块的温控电路中控制激光器温度。

TEC 温控电路有效控制的条件是保证精确采样和快速响应(可参考本文中第 1.3 节中说明)。一

作者简介: 陈 威(1989-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光收发模块的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yangz@wri.com.cn

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2014-01-20

般的 TEC 设计使用微控制单元 (micro control unit, MCU) 直接采样, 存在精度低和参考电压波动的缺陷, 本文中的设计针对这两点做了改进: 将温度采样与监控分开, 使用专门的高采样位数芯片直接改善采样精度, 通过采样参考电位跟踪消除电压波动的影响提升采样准确度; TEC 的响应部分由闭环控制中广泛使用的比例-积分-微分^[5] (proportion-integral-derivative, PID) 方法来实现。

1 相关原理和设计思路

1.1 温度稳频原理

由于相邻通道间隔很小, DWDM 光模块必须使用波长线宽极窄的单模激光器, 下面以目前常用的分布反馈式激光器 (distributed feedback laser diode, DFB-LD) 为例说明温度变化和波长漂移的关系。DFB-LD 的腔结构相当于法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 腔和布喇格光栅的叠加^[6], 如图 1 所示。

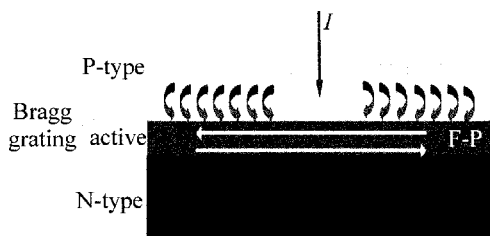


Fig. 1 Internal structure of DFB-LD

图 1 中中间区域是 F-P 有源区, 注入合适的抽运电流 I 后, 有源区自发辐射形成的光在谐振腔的选频作用下会有若干频率间隔相等的纵模发生谐振, 谐振频率应满足^[7]:

$$2nL = q\lambda, (q = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中, L , n 和 λ 分别表示 F-P 腔的腔长、折射率和谐振光的波长, q 为正整数。这些波长的光通过布喇格光栅的反射再次进行选频^[8]:

$$\lambda = 2n_{\text{avg}}s \quad (2)$$

式中, n_{avg} 是光栅平均折射率, s 是光栅周期, 谐振腔频率和光栅频率的重叠部分对应输出光波长。由 (1) 式和 (2) 式可知发射光波长受 F-P 腔长、有源区和光栅区折射率、光栅周期的影响, 温度的变化会改变材料粒子间隔从而改变腔长, 同时也会改变粒子的状态和分布从而使折射率和光栅周期发生变化; 反之, 温度的稳定能消除这些变化因素, 保持波长的稳定。

1.2 TEC 原理和应用结构

半导体 TEC 利用珀尔帖原理, 即当电流跨过不

同材料流动时在接触面上发生吸热或放热的现象, 如图 2 所示。本设计中的 TEC 集成在光发射次模块 (transmitter optical subassembly, TOSA) 中, 图 3 为 TOSA 内部 TEC 结构, 其中 R_{th} 为热敏电阻, V_{ref} 为采样参考电压, THERM out 作为温度指示信号输出, TEC + 和 TEC - 为控制 TEC 电流的两极, 使用单极控制, TEC + 接固定电平 V_{CC} 。

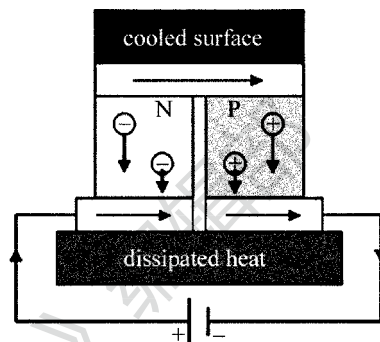


Fig. 2 Semiconductor thermoelectric cooler

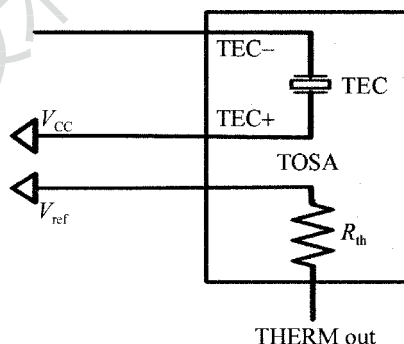


Fig. 3 Internal structure of TOSA

1.3 设计思路

图 4 是 TEC 控制回路的功能图, 分为采样、监控、计算和控制 4 步, 工作过程如下: 首先对激光器

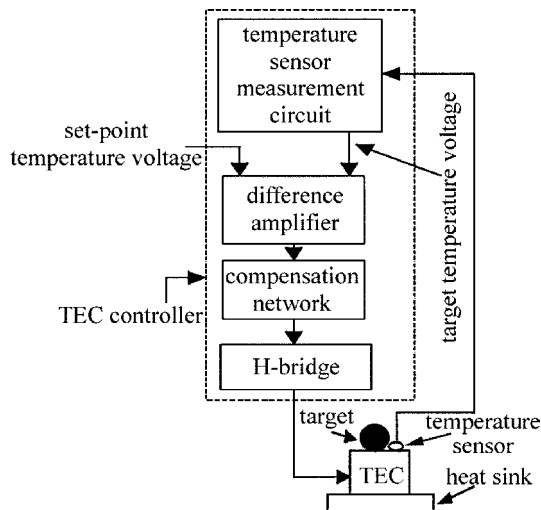


Fig. 4 TEC control loop

当前温度采样,将采样电压与设置值比较并经放大器输出差值信号,再由相关算法控制电路对差值进行运算(图中未画出),输出控制信号(TEC controller)给补偿网络并驱动一个控制器控制 TEC 电流方向实现制热或制冷,保证激光器工作在最佳温度点。

1.4 控制参量的分析和确定

进行具体设计之前,需明确实际电路可控的波长漂移范围,若应用要求规定波长漂移的上限为 $\Delta\lambda$,所用激光器发射中心波长自身变化的范围为 $\Delta\lambda_1$,则电路设计可控范围为 $\Delta\lambda - \Delta\lambda_1$ 。DWDM 光模块说明书规定波长偏移最大值 100pm,DFB 激光器发射光中心波长变化范围为 0pm ~ 60pm,则实际需要控制的波长范围是 100pm - 60pm = 40pm。

通常,光模块中引起波长变化的因素有:激光器固有的波长漂移、热敏电阻监控与激光器实际温度的偏差、电路元件老化和随温度变化引起的偏差、由模/数转换(analog-to-digital converter, ADC) bit 偏差或参考电压波动引起的采样误差等,即 TEC 的控制精度主要取决于器件选择和电路设计。在受限于制作工艺及实际开发条件等因素所用器件选定的条件下,前 3 个因素难以改善,而采样部分则可从硬件电路设计上着手优化。响应速度主要根据算法调节 PID 的相关系数来实现。

2 温控电路分析和计算

整个温控电路由内部集成 TEC 的电吸收调制 TOSA^[9]、温度采样电路 ADC、MCU 监控和直流转换(DC converter)组成,如图 5 所示,SCL 和 SDA 分别为串行时钟(serial clock, SCL)和串行数据(serial data, SDA)信号,TEC set 由 MCU 输出控制 DC converter,TEC out 由 DC converter 输出控制 TEC。

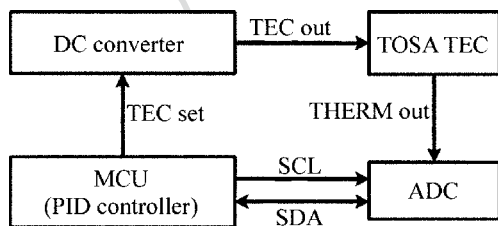


Fig. 5 Whole circuit design of TEC

2.1 温度采样电路设计

常用 MCU 的 ADC 为 12bit, 采样精度较低, 且参考电压由外部提供, 存在波动风险, 可能增大采样误差而降低控制精度。设计采用 24bit 高精度 ADC, 采样电路示意图如图 6 所示。其中虚线圆部

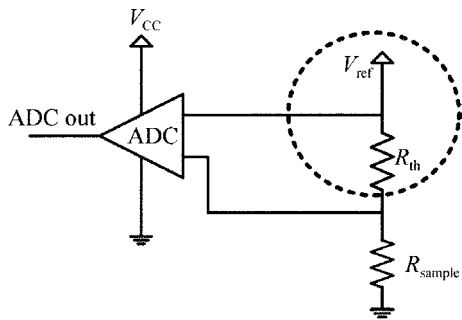


Fig. 6 Design of sample circuit

分在 TOSA 内部(见图 3), R_{sample} 为采样电阻, ADC 内部参考电压实时跟踪外部 V_{ref} 。

2.1.1 消除采样参考电压波动影响 图6中热敏电阻两端电压差信号输入ADC进行采样,设采样输出的数值为 $V_{\text{ADC out}}$,采样最大值为 N ,可得采样输出和参考电压之间的关系为:

$$\frac{V_{\text{ADC out}}}{N} V_{\text{ref}} = \frac{R_{\text{th}}}{R_{\text{th}} + R_{\text{sample}}} V_{\text{ref}} = C V_{\text{ref}} \quad (3)$$

一定温度下, C 为与两个电阻有关的常数, V_{ref} 可略去, 参考电压波动不会影响 ADC 的采样输出 $V_{\text{ADC out}}$, 从而对下级电路的处理不产生影响。

2.1.2 提高 ADC 采样精度 根据负温度系数 (negative temperature coefficient, NTC) 热敏电阻温度特性^[10],有:

$$\ln R_{\text{th}} - \ln R_0 = B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4)$$

式中, B 与 NTC 材料相关, 典型值为 3900, R_0 为 NTC 常温阻值, T 为实际温度, T_0 为常温温度。

根据(4)式取点描出 NTC 温度特性曲线,如图 7 所示。可见,NTC 电阻在低温时随温度变化很大,常温和高温变化缓慢,需根据实际应用中 NTC 阻值大小和变化范围选择合适的 R_{sample} 。

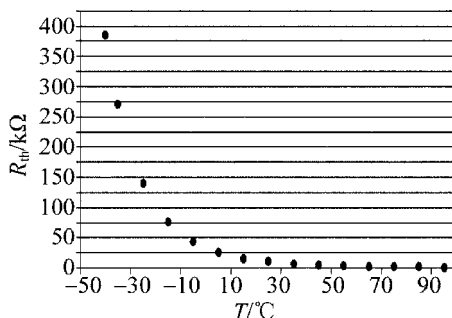


Fig. 7 Temperature characteristics of thermistor

TOSA 说明书规定正常工作温度范围是 $38^{\circ}\text{C} \sim 48^{\circ}\text{C}$, 取 43°C 计算, 根据 (4) 式 $R_{\text{th}} \approx 4.75\text{k}\Omega$ 。温度信息为电压采样, R_{sample} 值应与 R_{th} 同级, 具体可根据

图 7 依照以下原则取值:低温时, $V_{\text{ADC out}} = V_{\text{ref}}$; 常温时, $V_{\text{ADC out}} = 0.5V_{\text{ref}}$; 高温时, $V_{\text{ADC out}} = 0$, 联合 (3) 式可选 $R_{\text{sample}} = 10\text{k}\Omega$ 。

TEC 稳定后, 温度变化较小, (4) 式两边分别对 R_{th} 和 T 微分并整理得:

$$\Delta R_{\text{th}} = \frac{BR_{\text{th}}}{T^2} \Delta T \quad (5)$$

若 $R_{\text{sample}} = 10\text{k}\Omega$ 不变, 参考电压 $V_{\text{ref}} = 3.3\text{V}$ 不变, 电路是线性的, 根据 (3) 式和 (5) 式可算出由 0.1°C 引起的采样电压变化量为约为 0.00415V , 反推 0.1V 电压变化会引起 2.411°C 温度变化, TOSA 说明书规定 0.1°C 波长温漂上限为 13pm , 则 0.1V 电压变化最多引起波长变化 313.4pm 。ADC 1bit 对应电压变化为 $2^{-24}V_{\text{ref}}$, 可算出由 bit 偏差造成的发射光波长漂移不超过 0.001pm , 可忽略不计, 若采用 12bit ADC, 1bit 波长采样偏差约为 2.5pm , 对于 DWDM 系统已经不能忽略了。

2.2 TEC 控制电路设计

采用图 8 所示 TEC 电流控制功能电路。参照图 3, 根据 TOSA TEC 部分规格说明, 当电流由 TEC + 流向 TEC - 时制冷, 反之则加热。TEC 正负压差范围为 1.5V , 若 $V_{\text{TEC out}}$ 为 TEC - 的输入电压, 则需满足 $-1.5\text{V} < V_{\text{TEC out}} - V_{\text{CC}} < 1.5\text{V}$, 得出 $1.8\text{V} < V_{\text{TEC out}} < 4.8\text{V}$ 。

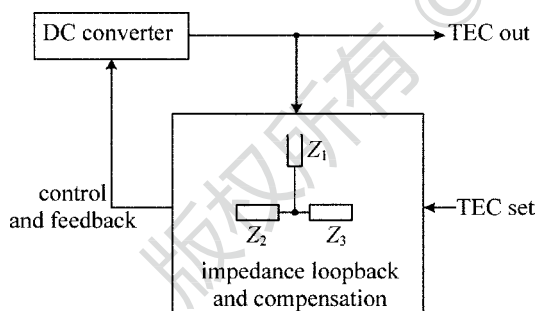


Fig. 8 TEC current control circuit

DC converter 输出可调范围为 $1.8\text{V} \sim 5.5\text{V}$, 满足 TEC - 电压要求。TEC set 为 MCU 控制输出 (见图 5), 与 TEC out 一起通过一个由阻抗构成的三端网络对直流转换器进行反馈控制和补偿, 根据电路的叠加原理, 设 TEC set 输入电压为 $V_{\text{TEC set}}$, 则存在线性关系:

$$AV_{\text{TEC out}} + BV_{\text{TEC set}} = V_{\text{const}} \quad (6)$$

式中, V_{const} 为固定值, A 和 B 为由 Z_1, Z_2 和 Z_3 决定的网络系数, 具体取值可根据输入输出要求由电路知识计算确定。本次设计经过计算分别取 $Z_1 =$

$500\text{k}\Omega, Z_2 = 50\text{k}\Omega$ 和 $Z_3 = 220\text{k}\Omega$, 再由三者连接关系确定 A 和 B , 得:

$$V_{\text{TEC out}} = 6.67 - 2.28V_{\text{TEC set}} \quad (7)$$

由于 $1.8\text{V} < V_{\text{TEC out}} < 4.8\text{V}$, 可算出 $V_{\text{TEC set}}$ 在 $0.82\text{V} \sim 2.13\text{V}$ 之间, 满足 MCU 输出压值范围 $0\text{V} \sim 2.5\text{V}$, 所选阻值符合要求。容易得出, 温度稳定时 $V_{\text{TEC out}}$ 应在 1.48V 附近, TEC 温控过程可定性分析如下: (1) 温度低于理想值时, TEC set 应控制在 $0.82\text{V} \sim 1.48\text{V}$ 之间, 电流由 TEC + 到 TEC -, 开始阶段 TEC set 输出偏低, 电流较大, 加快制热速度, 随着温度的升高, TEC set 随之调整增大输出值, 制热变慢, 最后趋于稳定; (2) 温度高于理想值时, TEC set 输入应控制在 $1.48\text{V} \sim 2.13\text{V}$ 之间, 后面过程同 (1) 的分析; (3) 温度稳定时, TEC set 输入应该维持在 1.48V 附近。

3 PID 控制

为了提高 TEC 响应的性能, 需使用 PID 算法, 控制回路如图 9 所示, $U(0)$ 为目标值, $U(t)$ 为被控对象输出, control 为输出控制值。

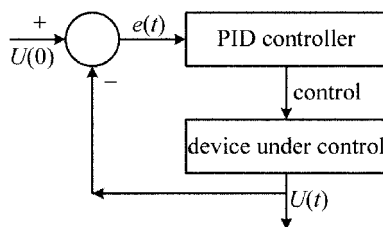


Fig. 9 PID close loop control circuit

$U(t)$ 与 $e(t)$ 间关系为^[11]:

$$U(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right] + U(0) \quad (8)$$

式中, $e(t)$ 是 $U(0)$ 和 $U(t)$ 的差值, K_p, K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分系数, t 为时间。设计中使用增量式 PID, 将算法相关代码烧入 MCU 中, MCU 将采样电压值转化为温度, 与设置最佳点进行比较得到温差 ΔT , ΔT 经过比例、微分和积分作用后输出 control 信号控制相关器件。根据第 1.3 节中的说明, 容易看出激光器最佳工作温度点对应 $U(0)$, 温差 ΔT 对应上式 $e(t)$, 激光器实际温度对应 $U(t)$, 关键在于 K_p, K_i 和 K_d 值的选取。PID 存在如下控制规律: (1) 比例即时响应系统偏差, K_p 越大, 响应速度越快, 稳态误差越小, 但会降低系统的稳定性; (2) 积分能消除稳态误差, 提高系统的控制精度, K_i 越小

响应时间越短,但会降低系统稳定性;(3)微分能及时地反映偏差量的变化趋势和变化率,缩短调节时间, K_d 太大容易造成系统不稳定。

3 种调节方式应根据实际系统的特性灵活进行选择 and 组合,由于整个 TEC 温控电路部分的外围器件仅使用了电阻,一般来说 K_p 和 K_i 的改变对 TEC 响应的影响比较明显。本设计中调试时应遵循比例-积分-微分的先后顺序,具体步骤如下:(1)将 K_i 和 K_d 置 0,逐渐增大 K_p 至控制量出现振荡,然后减小 K_p 至振荡消失,将此时 K_p 的 60% ~ 70% 确定为 K_p ;(2)设定一个较大的积分时间常数 K_i 的初值,然后逐渐减小 K_i ,直至系统出现振荡,然后加大 K_i 至振荡消失,设定 PID 的 K_i 为当前值的 150% ~ 180%;(3)微分系数 K_d 对本设计影响较小,调节方法与(1)类似,可取无振荡值时的 30%;(4)根据实际情况对 3 个系数进行微调,优化响应曲线。

3 个参量选择的合适情况下 TEC 温度控制仅有一上一下两个微小起伏振荡且在几秒时间内达到稳定,如图 10 所示。

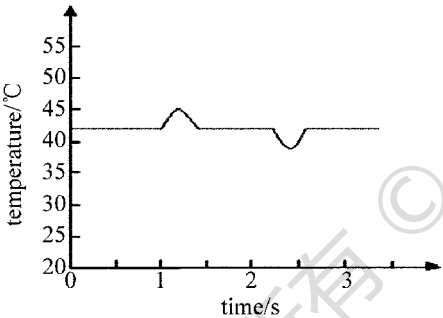


Fig. 10 PID temperature control curve

4 实验结果与分析

对采用本 TEC 温控设计的 191.6THz (对应波长 1564.68nm)通道光模块样品在 -40℃ ~ 85℃ 内分别取低温 -40℃ (low temperature, LT)、常温 25℃ (random temperature, RT)和高温 85℃ (high temperature, HT)进行了测试验证,如表 1 所示。

表 1 是光模块样品在 TEC 稳定后 3 个不同温度状态下 20 次波长测试的数据及最大值和最小值,由于通道标准波长为 1564.68nm,根据第 1.4 节中的分析,波动范围应控制在 40pm 内,容易得出波长上限为 1564.70nm,波长下限为 1564.66nm。从表 1 可以看出,样品模块在 TEC 稳定后常温、低温和高温波长的变化范围分别是 1564.683nm ~ 1564.685nm, 1564.681nm ~ 1564.683nm 和 1564.677nm ~

1564.679nm,全温范围内波长波动仅在 1564.675nm ~ 1564.685nm 的 10pm 之间。后续又经过多次测试验证,大量数据统计结果显示,采用本设计的 DWDM 光模块产品的发射光中心波长在 -40℃ ~ 85℃ 温度范围内的漂移可控制在 20pm 以内,完全满足控制目标要求。

Table 1 Wavelength test data under TEC stabilization

test times	wavelength/nm				
	RT	LT	HT	maximum spec	minimum spec
1	1564.683	1564.681	1564.678	1564.70	1564.66
2	1564.683	1564.682	1564.678	1564.70	1564.66
3	1564.683	1564.682	1564.678	1564.70	1564.66
4	1564.683	1564.682	1564.678	1564.70	1564.66
5	1564.685	1564.683	1564.678	1564.70	1564.66
6	1564.683	1564.682	1564.678	1564.70	1564.66
7	1564.683	1564.681	1564.677	1564.70	1564.66
8	1564.684	1564.682	1564.679	1564.70	1564.66
9	1564.684	1564.682	1564.679	1564.70	1564.66
10	1564.684	1564.681	1564.679	1564.70	1564.66
11	1564.684	1564.681	1564.677	1564.70	1564.66
12	1564.683	1564.681	1564.677	1564.70	1564.66
13	1564.685	1564.681	1564.679	1564.70	1564.66
14	1564.683	1564.681	1564.679	1564.70	1564.66
15	1564.683	1564.681	1564.678	1564.70	1564.66
16	1564.685	1564.682	1564.678	1564.70	1564.66
17	1564.685	1564.682	1564.678	1564.70	1564.66
18	1564.683	1564.682	1564.678	1564.70	1564.66
19	1564.684	1564.681	1564.678	1564.70	1564.66
20	1564.683	1564.681	1564.678	1564.70	1564.66
maximum data	1564.685	1564.683	1564.679		
minimum data	1564.683	1564.681	1564.677		

5 结 论

在器件选型确定的情况下,通过对采样电路的优化和控制算法的有效使用设计出的 TEC 电路能够快速响应和补偿温度的变化,使激光器始终工作在最佳温度点。电路整体设计结构简单,样品的大量实测结果表明,本方案 TEC 电路能够将光模块发射波长精确锁定在应用要求范围之内,充分证明了设计的可靠性、有效性和一定的实用价值。

参 考 文 献

[1] YAO J, MAO X R. Modern communication network [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010:14-16 (in Chinese).

- [2] FAN C X, CAO L N. The principles of communication[M]. 6th ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2006:6-8 (in Chinese).
- [3] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). ITU-T G. 694. 1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid[S]. Geneva, Switzerland: Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2012.
- [4] 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/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4358522>.
- [5] KANG G H, CHEN D Q, ZHANG L. Fundamentals of electronic technology-analog part[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006:41-42 (in Chinese).
- [6] LIU D M, SUN J Q, LU P, *et al.* Fiber optics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2008:145-148 (in Chinese).
- [7] MA Y W, WANG J H, BAO C F, *et al.* Optoelectronics[M]. 2nd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006:28-30 (in Chinese).
- [8] ZHU Z M. Physical optics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009:146-155 (in Chinese).
- [9] DING G Q, CHEN L Y, LIU R, *et al.* 10Gb/s EML-TOSA and its application in the long-distance optical communication [J]. Optical Communication Technology, 2012, 36 (2): 4-7 (in Chinese).
- [10] LI J S. NTC Thermistor and application analysis[J]. Journal of Jingmen Technical College, 2007, 22 (6): 43-45 (in Chinese).
- [11] SHI S G, SHI X. The temperature control system based on digital PID and potentiometer[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2005, 3 (1): 31-34 (in Chinese).