文章编号:1001-5078(2018)06-0702-05

· 激光器技术 ·

用于量子密钥分发的半导体激光器温控系统

秦继伟¹,洪占勇¹,刘建宏²,余 刚² (1. 合肥工业大学工业与装备技术研究院,安徽合肥 230009; 2.科大国盾量子技术股份有限公司,安徽 合肥 230088)

摘 要:由于量子密钥分发(quantum key distribution,QKD)系统对光源的稳定性要求极高,尤 其是激光器发出光的波长和光强的稳定性,直接影响了系统的成码率。由此,针对分布反馈式 (distributed feedback,DFB)激光器的温度特性,设计一种有效的温度控制系统。系统以 FPGA 为控制核心,采用增量式 PID 算法,对 DFB 激光器的工作温度进行实时监控。采用热电制冷 控制芯片 MAX8520 作为半导体制冷器(thermoelectric cooler,TEC)的驱动芯片。利用集成于 DFB 激光器内部的负温度系数(negative temperature coefficient,NTC)热敏电阻构成温度采集 模块,组成闭环负反馈结构。通过实验测试,温度控制精度可达 ±0.03 ℃,波长漂移可控制在 0.01 nm 以内。该温控系统具有电路体积小、效率高和可靠性高等特点,可为激光器提供稳定 的温度控制,以保证 QKD 系统的光源波长的稳定性。

关键词:分布反馈式激光器;增量式 PID 算法;温度控制;控制精度;稳定性 中图分类号:TN248.4 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.06.007

Temperature control system of semiconductor laser for quantum key distribution

QIN Ji-wei¹, HONG Zhan-yong¹, LIU Jian-hong², YU Gang²

(1. Institute of Industry & Equipment Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
 2. QuantumCTek Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: The QKD system has a rigorous demand on the stability of the optical source, especially the stability of the wavelength and the intensity of the laser, which directly affect the system's bit rate. To meet this requirement and consider the temperature characteristics of DFB Laser, an effective temperature control system was designed. The system uses FPGA as the controller, along with the incremental PID algorithm to monitor the working temperature of DFB laser in real time and uses thermoelectric refrigeration control chip MAX8520 as the TEC driver. The NTC thermistor, which is integrated into the DFB laser, constitutes a temperature acquisition module and a closed – loop negative feedback structure. The experimental results show that the temperature control accuracy is above ± 0.03 °C, and the wavelength drift can be controlled within 0.01 nm. The temperature control system has the characteristics of small size, high efficiency and high reliability. It can provide a stable temperature control for the laser to ensure the stability of the optical source wavelength of the QKD system.

Key words: DFB laser; incremental PID algorithm; temperature control; control accuracy; stability

收稿日期:2017-11-06;修订日期:2017-03-06

作者简介:秦继伟(1990-),男,在读硕士,主要研究方向为量子密钥分发系统中光源的制备与调控技术。E-mail:jiweiq @ mail.hfut.edu.cn

703

1 引 言

近年来,量子通信得到了迅速发展,其基本思想 主要包括 QKD 和量子态隐形传输。QKD 系统需要 采用单光子作为传输载体,实际上理想的单光子源 是难以产生的,一般用与单光子源具有近似性质的 弱相干态光源代替。通常采用分布反馈式激光器及 特殊光路结构组成量子光源,要求其具有高调制速 率、高稳定性、高峰值特性等特点^[1-3]。通过对 DFB 激光器特性的研究,可知温度对 DFB 激光器的正常 工作有着重要的影响。其影响主要包括:阈值电流、 *V-I*关系、输出波长、*P-I*关系等。首先,温度升高使 出射光波长发生漂移,漂移量为(0.2~0.4)nm/℃。其 次,DFB 激光器阈值电流随温度的升高而升高,在 驱动电流恒定的情况下,出光功率随温度的升高而 降低,这主要是由于 DFB 激光器温度升高所引起的 阈值电流增大和斜率效率减小所造成的^[4-5]。出射 光波长的漂移和出光功率的不稳定,直接影响了 QKD 系统中探测器的探测效率,进而影响系统的成 码率,所以 QKD 系统对于 DFB 激光器的温度控制 提出了较高的要求^[2-3]。针对此情况,文中介绍了 一种基于 FPGA 的温控电路。该设计处理速度快, 并达到了较高的温控精度和稳定度,使得激光器的 波长漂移变化受温度影响较低。

2 系统原理

本文设计了一种基于 FPGA 的 DFB 激光器温 控单元,用于 QKD 系统。由于在 QKD 系统中缺少 理想的单光子源,通常采用调制 DFB 激光器产生相 位随机的弱相干光脉冲作为光源,而且在 QKD 系统 攻击演示和量子随机数产生时,DFB 激光器也常作 为光源^[6]。本设计采用内部集成了 NTC 热敏电阻 和 TEC 的 DFB 激光器。

温控单元系统组成如图 1 所示,上位机下发目标温度值 *t*_s给 FPGA, FPGA 通过 AD5665 (16 位 DAC,100 kHz/400 kHz/3.4 MHz)把相应的 *V*_{TEC}值下发给 MAX8520,从而控制 TEC 工作电流的流向和大小。





将 DFB 激光器工作时腔体温度所对应的 NTC 热 敏电阻电压值 V_{Thermistor},通过 ADS8328(16 位 ADC, 500 kHz 采样率)上传至 FPGA,用作温度控制的反馈 值;同时 MAX8520,也通过 ADC 上传 I_{TEC}给 FPGA,作 为监控 TEC 电流的反馈值,避免 TEC 因工作电流过 高而损伤。系统采用增量式 PID 算法控制,省去了 PID 补偿电路。FPGA 通过调节 PID 参数,进行反馈 调节 V_{TEC}的值,从而形成对激光器工作温度的闭环负 反馈控制,使其工作温度稳定在设定值。

TEC 是系统的关键部件之一,它用两种不同半 导体材料(P型和N型)组成PN结,当PN结中有直 流电流通过时,由于两种材料中的电子和空穴在跨 越PN结移动过程中产生吸热或放热效应(帕尔帖 效应),就会使PN结表现出制冷或制热的效果,改 变电流方向即可实现TEC 加热或制冷,调节电流大 小即可控制加热或制冷量的输出^[7-8]。

3 硬件设计

3.1 温度检测电路

利用集成于 DFB 激光器内部的 NTC 热敏电阻对 其工作温度进行检测,避免了外加测温电路引入的环 境误差。主要通过精密电阻和热敏电阻组成的分压 网路进行温度采样,但是由于电压源常常容易受到噪 声的干扰,导致电压源自身的电压不准,从而造成温 度采样电压不准,对温度的计算带来误差^[9]。针对此 种情况,采用低噪声、低温漂、精确的电压转换芯片 REF5040ID(3 ppm/℃~8 ppm/℃,0.05%~0.1%), 提供稳定的4.096 V 的参考电压。应用 NTC 电阻阻 值和温度值关系公式,通过 FPGA 逻辑处理,读取当 前温度检测值。克服了线性化电路复杂的硬件结构 和公式计算带来的问题。具体设计如图 2 所示。







3.2 TEC 驱动电路

MAX8520 是专用于光学器件的 TEC 的高度集成驱动芯片。其内置了 PWM 控制器和线性放大器,并集成了金属氧化物半导体场效应晶体管

)

(5)

(MOSFET) 组成的 H 桥驱动电路,如图 3 所示。当 $V_{\text{TEC}} > 1.5$ V 时,电流从 OS₂流向 OS₁,即 TEC – 流向 TEC +;反之,当 $V_{\text{TEC}} < 1.5$ V 时,电流从 OS₁流向 OS₂,即 TEC + 流向 TEC – ,从而实现 TEC 对 DFB 激 光器的制冷和加热。流过 TEC 电流的大小决定加 热或致冷的速率,其值大小由 V_{TEC} 所决定。





4 温度控制增量式 PID 算法

主控芯片 FPGA 采用 EP4CE55F23I7,通过上位 机软件下发激光器 t_s 以及 PID 参数,通过串口模块 传至 FPGA。用 ADG704BRM(多路器)将 Thermistor _ $V(V_{\text{Thermistor}})$ 和 I_{TEC} 的电压信号进行合束,合束信号 输出给 ADC 采样后,传给 FPGA,进行闭环控制。

PID 模拟控制器的一般算式如式(1)所示:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) d_t + T_D \frac{d_{e(t)}}{d_t} \right] \quad (1)$$

式中,u(t) 为控制器的输出;e(t) 为控制器的输入,是 设定值与反馈值的差值; K_p 为控制器的比例系数; T_1 为控制器的积分时间常数; T_D 为控制器的微分时间 常数。通过调节 K_p , T_1 , T_D 三个参数使系统达到稳定。

在使用处理器后,需要对模拟信号进行离散化 处理。设处理器的取样时间为*T*,以一系列取样时刻 点*kT*代替连续时间*t*(*k*取0,1,2,3,…),以数字形 式的差分方程代替连续系统的微分方程。

用增量代替微分项:

$$\frac{d_{e(t)}}{d_t} \approx \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{\Delta t}$$
$$= \frac{E(k) - E(k-1)}{T}$$
(2)

式中, $\Delta t = T$ 为采样周期,必须使 T 足够小,以保证 系统的精度。为了方便 e(kT) 简化表示成 E(k),为 第 k 次采样时的偏差值。

用和式代替积分项:

$$\int_{0}^{t} e(t) d_{t} \approx \sum_{j=0}^{k} e(jT) \Delta t = T \sum_{j=0}^{k} E(j)$$
(3)

 $\Re \mathfrak{T}(2) \Re \mathfrak{T}(3) \mathfrak{C} \mathfrak{T}(1) \mathfrak{C} \mathfrak{T}(1)$

$$u(kT) = K_p \left\{ E(K) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^{k} E(j) + \frac{T_D}{T} [E(k) - E(k-1)] \right\}$$

= $K_p E(K) + K_I \sum_{j=0}^{k} E(j) + K_D [E(k) - E(k-1)]$
(4)

式中, K₁是积分系数,其值为(K_P•T)/T₁;K_D是微分 系数,其值为(K_P•T_D)/T;u(kT)为控制器第 k 次的 输出值,为了方便可简化表示成 U(k)。此种为位置 型 PID 控制算法,但因为偏差 E(k)的累积,需要占 用较多的存储单元。可以进行如下优化处理:

 $\Delta U(k) = U(k) - U(k - 1)$ = $K_p[E(k) - E(k - 1)] + K_IE(k) + K_D[E(k) - 2E(k - 1) + E(E - 2)]$ = $K_p\Delta E(k) + K_IE(k) + K_D[\Delta E(k) - \Delta E(k - 1)]$

式中, $\Delta U(k)$ 第 k 次相对于第(k = 1) 次的控制量的 增量。

此种为增量式 PID 控制算法^[10-11]。在其控制 过程中,输出的控制值只是控制的增量,使被控对象 的参数变化幅度变小,控制系统相对稳定并且减少 硬件资源的占用。

另外进行 PID 控制,首先要确定 PID 控制器的 参数。其整定方法有很多,可归结为理论计算法和 工程整定法 2 种。实际中,由于被控系统结构复杂, 数学模型逼真度不高,与真实系统存在较大差异,往 往采用工程整定方法。这种方法最大的优点就是整 定参数时不依赖对象的数学模型,采用经验公式,实 现对控制参数 P、I 和 D 的确定。本系统采用此种整 定方法,具体参数由实验调试时进行调整,从而实现 对控制参数的确定^[11]。

5 实验测试与结果分析

实验测试,选用中心谱线波长为 1550 nm 的 DFB 激光器,其驱动采用压控电流源硬件电路设计,偏置 可调。据激光器数据手册以及实验反复测量,确定测 量条件为:信号态偏置电压 3.05 V;激光器工作偏置 电压值 4.00 V;激光器工作电源电压值 4.90 V;光谱 仪为 AQ6370C,其测量范围为 600 ~ 1700 nm;环境温 度为 26 ℃。用 t_0 表示起始温度值, λ_c 表示中心波长, t_r 表示激光器实际工作温度值。

激光器温度设定值与其发出光中心波长关系及 温控精度测试:由于器件本身的差别,每个激光器的 温漂特性略有不同。为了保证系统的成码率,使用 前需对其进行标定。选取15℃至45℃为调控目标 范围,以15℃为起点,以1℃为步进,不断改变*t*_s, 每设定一个*t*_s后,每隔5s读取一次激光器输出波长 值和实际温度值,每组读10次。算出各组平均值, 绘制出图4。





分别对激光器温控精度测试的每组数据做求取 最大偏差值处理,得到结果均小于 0.03 ℃,可得温 控精度可达 ±0.03 ℃。

另外,据激光器工作温度平均值和发出光中心 波长平均值关系的测试数据,可拟合^[12]:

y = 0.1012x + 1547

 $R^2 = 0.9999$

根据拟合结果,此条件下, t_s 为29.64 ℃时, λ_c 最 接近1550 nm,漂移量最小。

激光器的温控和波长的稳定性测试:起始工作 温度分别为 15 °C和 45 °C, t_s = 29.64 °C,测试时间 为 120 s,每隔 1 s 记录一次实际温度值和激光器发 出光的波长值。结果如图 5 、6 所示。





at the initial temperature t_0 of 15 $^\circ\!\! \mathbb C$ and 45 $^\circ\!\! \mathbb C$ respectively

由测试结果可知,从温控系统开始工作到基本 稳定,均在5s左右。并且,此后激光器工作温度保 持在(29.64±0.03)℃内浮动;激光器发出光的波 长值从起始到稳定在(1550±0.01) nm 以内,仅需 8s左右即可,由此可判断该系统响应快,稳定性好。

6 结 论

通过集成度更高的硬件电路设计,包括选用内 部集成 NTC 热敏电阻和 TEC 的 DFB 激光器、TEC 驱动电路的设计以及采用增量式 PID 控制算法代替 PID 补偿电路,实现了精度为±0.03 ℃的激光器温 度控制,并且激光器发出光的波长漂移小于 0.01 nm,可克服 QKD 系统中,由温度变化而引起的 信号光波长变化,从而减弱 QKD 系统成码率因激光 器工作温度变化而呈现的不稳定性。另外,温控的 精度及稳定性只是影响 DFB 激光器正常工作的重 要因素之一,设计时还需对其他因素和指标进行综 合考虑。

参考文献:

- [1] WU Hua, WANG Xiangbin, PAN Jianwei. Quantum communication; status and prospects [J]. Science China; Information Science, 2014, 44(3):296-311. (in Chinese) 吴华, 王向斌, 潘建伟. 量子通信现状与展望[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(3):296-311.
- [2] LIU Yang. The experimental study of long range Quantum key distribution system[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2012. (in Chinese)
 刘洋. 远距离量子密钥分发系统的相关研究[D]. 合肥:中国科技大学,2012.
- [3] TANG Yanlin. Experimental study of security inpractical

quantum key distribution system[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2015. (in Chinese) 汤艳琳. 实际量子密钥分发系统安全性的实验研究 [D]. 合肥:中国科技大学,2015.

- [4] CHI Zeying, CHEN Jianwen, LI Wusen. Fiber Optics, Theories and Applications[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese) 迟泽英,陈文建,李武森. 光纤光学与光纤应用技术 [M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2014.
- [5] Klehr A, Wenzel H, Brox O, et al. High power DFB lasers for D1 and D2 rubidium absorption spectroscopy and atomic clocks[C]. Proc SPIE Novel In-Plane Semiconductor Lasers VIII, 2009:7230.
- [6] WANG Kaidi, HONG Zhanyong, DAI Yunqi. Adjustable bias drive for DFB laser in QKD system[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2):164 165. (in Chinese)
 王凯迪,洪占勇,代云启. QKD 系统中 DFB 激光器的可调偏置驱动[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 164 165.
- [7] HU Yang, ZHANG Yajun, YU Jinquan. Design of temperature control circuit for laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5):839-844. (in Chinese) 胡杨, 张亚军, 于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路 设计[J]. 红外与激光工程 2010, 39(5):839-844.
- [8] HUO Jiahao, LI Hongzuo. Design of temperature control circuit for semiconductor laser [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(20):153 - 155. (in Chinese)

霍佳皓,李洪祚.半导体激光器温度控制电路设计 [J].现代电子技术,2013,36(20):153-155.

[9] CUI Guodong, LV Weiqiang, ZHENG Yi. Design of temperature control system of high power semiconductor laser [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(5):568 - 570. (in Chinese)

崔国栋,吕伟强,郑毅.大功率半导体激光器温度控制 系统的设计[J].激光与红外,2015,45(5):568-570.

- [10] CAO Xiangrong. The Design of Adaptive PID Controller base on FPGA[D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese) 曹祥荣. 基于 FPGA 的自适应 PID 控制器的设计[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
- [11] LIN Haibo, WANG Xiaoxi, LIU Shixi. A kind of intelligent temperature controller based on incremental digital PID algorithm [J]. Changchun Inst. Tech.: Nat. Sci. Edi., 2011,12(3):86-89. (in Chinese)
 林海波,王晓曦,刘奭昕. 一种基于增量式数字 PID 算法的智能温度控制器[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2011,12(3):86-89.
- [12] HU Liaolin, ZHANG Pengbo, HUA Dengxin, GONG Xin. Design of DFB laser's high performance temperature controller in TDM FBG Sensing Array[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(7):921-925. (in Chinese) 胡辽林,章鹏博,华灯鑫,等. 时分复用光纤光栅传感 阵列中 DFB 激光器的高精度温控设计[J]. 传感技术 学报, 2012, 25(7):921-925.