

文章编号: 1001-3806(2015)03-0316-04

可调谐半导体激光器的精密控制系统设计

曹延昌, 熊继军*, 侯庆志

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

摘要: 为了满足高精密度测量领域对半导体激光器高稳定度的要求,设计了一种高稳定度、低噪声的半导体激光器控制系统。该控制系统由电流驱动和温度控制两部分组成,电流控制部分采用负反馈控制保持电流稳定,温度控制部分采用高度集成的 MAX1978 作为主控芯片,驱动半导体制冷器进行温度补偿。经过实验验证,电流在 200mA 范围内连续可调,电流控制精度高达 $1\mu\text{A}$,在 3kHz ~ 100kHz 带宽内交流噪声有效值小于 300nA,长期温度漂移小于 $2\text{m}^\circ\text{C}$ 。结果表明,该系统可用于驱动分布式反馈外腔半导体激光器和分布式布拉格反射半导体激光器。

关键词: 光电子学; 控制系统; 高稳定度; 低噪声

中图分类号: TN248.4; TP273

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.007

Design of precision control systems for tunable semiconductor lasers

CAO Yanchang, XIONG Jijun, HOU Qingzhi

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high stability of semiconductor laser in high precision measurement field, a semiconductor laser control system with high stability and low noise was proposed. The control system consists of a current driver and temperature controller. A negative feedback was used to maintain the current stability. A highly integrated MAX1978, as main control chip, was used to drive the thermoelectric cooler for temperature compensation. After the experiment verification, current was adjustable in the range of 200mA, current control accuracy was less than $1\mu\text{A}$. The effective value of alternating current noise voltage within 3kHz ~ 100kHz bandwidth was less than 300nA and long-term temperature drift was less than $2\text{m}^\circ\text{C}$. The results show that the system can be used to drive distributed feedback external cavity LD lasers and distributed Bragg reflector LD lasers.

Key words: optoelectronics; control system; high stability; low noise

引言

半导体激光器作为一种可调谐单色光源,具有体积小、效率高、成本低、易调谐等优点,已经成为很多科研领域中不可缺少的部分^[1]。包括原子陀螺仪、原子磁强计^[2-3]等在内的高精密测量领域,需要利用激光对原子进行冷却、俘获和操控,对激光器的功率稳定性、线宽、频率稳定性都要求很高,在不加反馈控制的情况下,要求其频率抖动和漂移应在兆赫兹以内^[4-5]。半导体激光器的输出波长和功率主要由激光二极管的 PN 结注入电流和结温度决定,注入电流的变化会影响增益介质中载流子浓度、禁带宽度,而温度变化对谐振腔的腔长、介质折射率有直接影响,从而导致激光输出功率、中心频率的变化。因此,高精度的激光,需要低噪

声低漂移的电流驱动和稳定的温度控制系统。对于典型的砷化镓铝(GaAlAs)半导体激光器,注入电流对激光频率的影响约为 $3\text{MHz}/\mu\text{A}$,经过外部光栅反馈选模后电流对频率的影响可以降到 $0.3\text{MHz}/\mu\text{A}$ 左右。因此,对于具有外部光栅的外腔激光器,要得到 100kHz 的激光线宽,交流噪声有效值应该小于 300nA ^[1]。温度对半导体激光器的频率影响系数约为 $30\text{GHz}/^\circ\text{C}$,为了达到兆赫兹量级的线宽和频率稳定度,温度长期稳定度应优于 $2\text{m}^\circ\text{C}$ 。

1 系统设计

1.1 电流控制系统设计

整个电流控制系统主要由滤波稳压电路、参考电压电路、采样电路、比例-积分(proportion-integration, PI)控制电路几部分组成,结构框图如图 1 所示。系统采用 $\pm 10\text{V}$ 电压供电, $+10\text{V}$ 电压经过三端稳压芯片 LM317 后输出 $+5\text{V}$ 电压经过 π 型滤波器后为激光二极管供电。在此处, LM317 不仅是作为电压调整芯

作者简介:曹延昌(1990-),男,硕士研究生,现主要从事半导体激光器的控制系统和稳频研究。

* 通讯联系人。E-mail:cyeh.nuc@gmail.com

收稿日期:2014-05-20;收到修改稿日期:2014-08-14

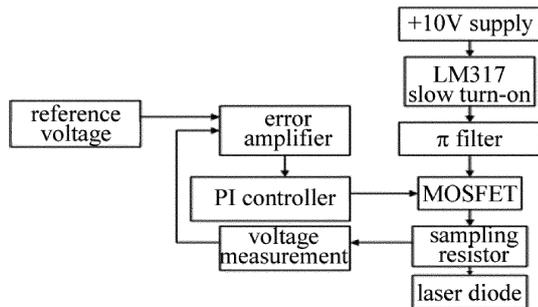


Fig. 1 Current control system

片,同时构成了一个慢启动电路,从而避免启动时瞬态电流过大而损坏激光管。

在电流驱动系统中,电流的稳定度与参考电压的稳定度直接相关,高稳定度、低漂移量是对参考电压的基本要求。为了得到 10^{-9} 量级的激光频率稳定度,电流稳定度应该在 $1\mu\text{A}$ 内。考虑到电流稳定度要达到微安级,选用 ADR4525 作为参考电压产生芯片,得到 $+2.5\text{V}$ 稳定参考电压。ADR4525 具有最大值仅为 $2 \times 10^6/^\circ\text{C}$ 的极低温度系数,在实验室条件下,电压漂移量小于 $10\mu\text{V}$,满足电流控制系统对参考电压稳定度的要求。

电流调节部分是电流控制系统的核心组成部分,包括采样电路、误差放大电路和 PI 控制器电路,如图 2 所示。电流调节部分采用典型的恒流源^[6]设计方式。测量采样电阻 R_s 两端的压降,与参考电压进行比较,误差信号经过误差放大器放大后,通过 PI 控制器调节场效应管 IRF7210 的栅级电压,改变场效应管的导通电阻值,从而改变流经采样电阻 R_s 的电流,当 R_s 两端压降与参考电压 V_{set} 相等时,系统达到稳定。经过分析,电路中的主要噪声来源是采样电阻和场效应管等效电阻的热噪声,而采样电阻的阻值不稳定将直接导致流经激光二极管的电流不稳定。为了降低电路中的噪声,采用 $1/2\text{W}$ 、温漂系数为 $5 \times 10^6/^\circ\text{C}$ 的精密采样电阻,采用具有极低导通电阻和栅极电流的场效应管 IRF7210。整个电路中采用具有极低噪声特性的运放 OPA227,在 $0.1\text{kHz} \sim 10\text{kHz}$ 带宽内电压噪声功率谱密度为 $3\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,运放均采用 $\pm 10\text{V}$ 电源供电,并在靠近运放处加 $0.1\mu\text{F}$ 去耦陶瓷电容。

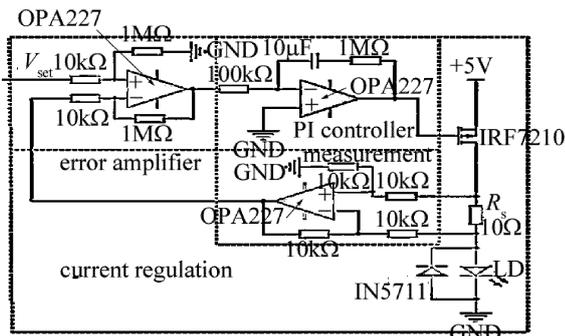


Fig. 2 Current regulating circuit

1.2 温控系统设计

为了设计结构简单、控温精度高的温度控制系统。采用 AD 公司的热电制冷微控制芯片 MAX1978,作为控温系统的主芯片。MAX1978 是用于热电冷却器 (thermoelectric cooler, TEC) 模块的最小、精度最高、最安全的温度控制微芯片,高度集成化,将控制环路和功率场效应晶体管 (field effect transistor, FET) 管集成到同一芯片上,尽可能减少外部配置电路,整个温控系统更加小型化。MAX1978 采用了独特的纹波消除方法,降低了电路噪声。同时,也对内部金属-氧化层半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 的开关速度进行了优化,降低了噪声和电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI),提高了工作效率。温控系统采用 $+5\text{V}$ 的单电源供电,能够为 TEC 提供双极性的 $\pm 3\text{A}$ 输出电流,能够实现温度的无“死区”控制,避免在低电流工作时的非线性问题。MAX1978 内部集成了一个超低漂移的斩波型运算放大器和一个积分放大器,通过外部配置元件可以构成比例-积分或者比例-积分-微分 (proportion-integration-differentiation, PID) 控制器,能够维持最优 $1\text{m}^\circ\text{C}$ 的温度稳定性。温控系统原理图如图 3 所示。图中 PWM (pulse width modulator) 为脉宽调制器。

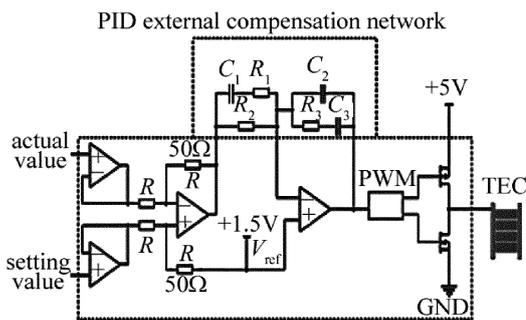


Fig. 3 Function of temperature control system

温控系统的控温精度和温度漂移量与系统的参考电压稳定性直接相关。MAX1978 内部集成了 $+1.5\text{V}$ 的高稳定性参考电压源 V_{ref} ,能够为系统提供温度设定所需的稳定参考电压。系统采用负温度系数 (negative temperature coefficient, NTC) 热敏电阻作为温度测量元件,为了消除参考电压随温度漂移对控温精度的影响,温度设定时采用平衡电桥的方式,电桥两臂连接到同一参考电压源上,参考电压 V_{ref} 中的噪声和电压漂移在电桥两臂完全抵消,降低了系统噪声、提高了温度控制精度。温度设定电路如图 4 所示。

通过调节电位器 R_{adj} 两端的电压值,设定不同的温度值。热敏电阻 R_{th} 两端电压 $V_{R_{\text{th}}}$ 与温度变化的关系约为 $10\text{mV}/^\circ\text{C}$,因此要达到 $2\text{m}^\circ\text{C}$ 的温度稳定度,热

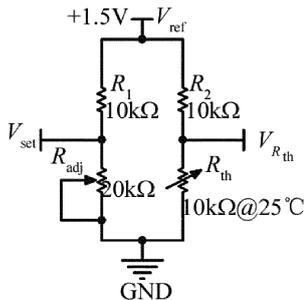


Fig. 4 Function of temperature setting

敏电阻两端电压波动应小于 $20\mu\text{V}$ 。

在整个温控系统中, PID 外部补偿网络是 TEC 控温最关键的部分。它直接影响温控系统的响应速度和控制精度,为了更好地解决调节速度和调节温度的矛盾,对 PID 参量进行了不断地优化。PID 调节器的方程如下式所示:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中, $e(t)$, $u(t)$ 分别为 PID 调节器的输入输出值; t 是时间; K_p , K_i 和 K_d 分别为比例、积分、微分增益系数,在取不同的增益系数的情况下可以得到不同的组合控制器。比例控制和积分控制环节都是只在出现了偏差时才进行调节,而微分控制器则是针对误差信号的变化速率进行调节的。通常,实现微分作用并非直接对误差信号进行微分操作,这样会引入很大的冲击,引起振荡,通常使用误差信号的速率传感器来避免对信号的直接微分^[7]。在本温控系统中,综合考虑响应速度和稳定性要求,只采用 P 环节和 I 环节组成 PI 控制器,原理图如图 5 所示。

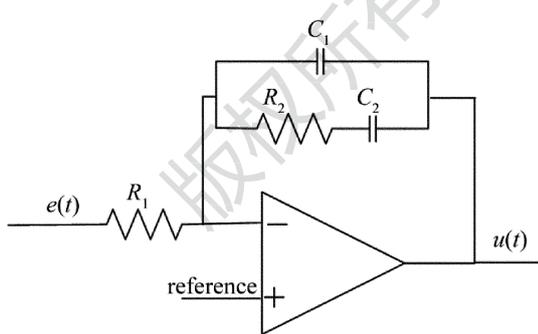


Fig. 5 PID controller

控制方程如下式所示:

$$u(t) = -\frac{R_2}{R_1} e(t) + \left(-\frac{1}{R_1 C_2}\right) \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

2 实验测试

2.1 电流测试

设定激光器电流为 100mA,用六位半数字万用表测试采样电阻 R_s 两端电压波动和交流噪声有效值。

采样时间间隔为 5min,连续测量 5h, R_s 两端电流稳定度如图 6 所示。

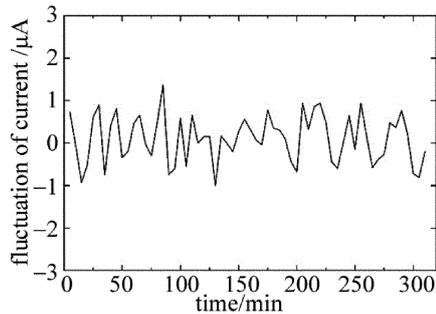


Fig. 6 Current stability

测试结果表明,在连续 5h 内,电流波动小于 $1\mu\text{A}$,满足控制精度达到 $1\mu\text{A}$ 的要求。将采样间隔设置为 2s,带宽 1Hz ~ 250Hz,对 R_s 两端交流 (alternating-current, AC) 噪声有效值连续测量 1h,测试结果如图 7 所示。

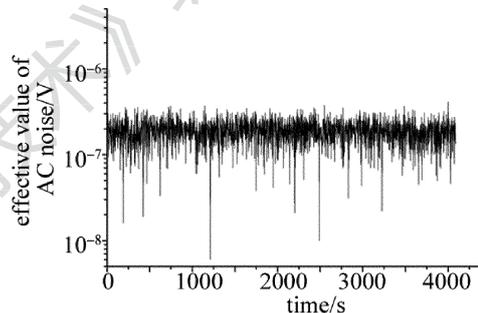


Fig. 7 Effective value of AC noise

在 1Hz ~ 250Hz 带宽内,交流噪声有效值小于 20nA,噪声对激光输出频率的影响可以忽略不计。

用频谱分析仪测试采样电阻 R_s 两端的交流电压噪声功率谱密度^[8-9],测试结果如图 8 所示。在 3kHz ~ 100kHz 带宽内交流噪声功率谱密度在 10^{-9} 量级,计算得到交流噪声有效值小于 300nA,由此导致的激光输出线宽展宽在 10^5Hz 量级。

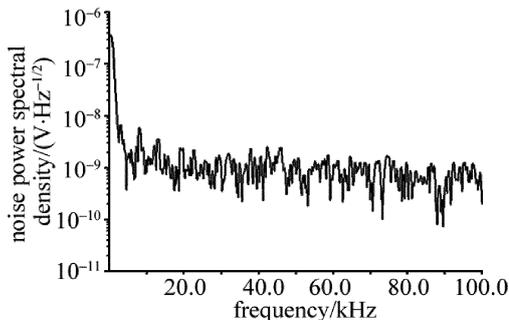


Fig. 8 Power spectral density of noise

2.2 温度稳定性

温控系统采用热敏电阻作为温度传感器,当温度变化时热敏电阻阻值发生变化,宏观表现为热敏电阻两端电压发生变化。通过测量热敏电阻两端电压的稳

定性,即可测得温控系统的温度稳定性。外界环境温度为 25℃时,设置温控系统温度为 22℃,用六位半数字万用表测量热敏电阻两端电压稳定性,转换为温度稳定性后,结果如图 9 所示。测试结果表明,温控系统的长期温度漂移量在 2m℃ 以内,标准差在小于 0.2m℃。因此,温度变化对激光器频率稳定性和线宽的影响均在 10⁵Hz 量级。

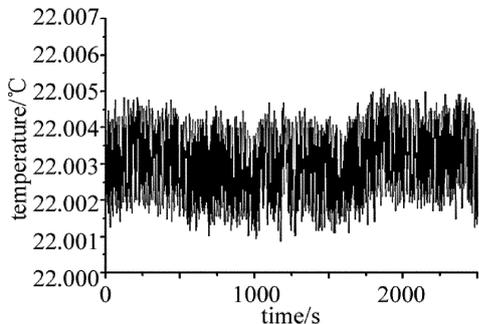


Fig. 9 Temperature stability

3 小 结

介绍了一种半导体激光器的控制系统,分别对电流驱动和温控系统电路进行了描述和分析,并通过实验测试验证了电流驱动和温控系统的良好性能。在无外界干扰时,该系统能够保证激光器的输出线宽和频率稳定度在 10⁵Hz 量级,利用碱金属原子的饱和吸收^[10]谱锁频后,能够满足原子分子物理和激光光谱学对高稳定度激光的要求。

参 考 文 献

- [1] LIBBRECHT K G, HALL J L. A low-noise high-speed diode laser current controller [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64 (8):2122-2135.
- [2] FANG J, QIN J, WAN S, *et al.* Atomic spin gyroscope based on (129) ~ Xe-Cs comagnetometer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1512-1515.
- [3] ZHU X S, GUAN Ch, ZHOU Q. A subminiature adjustable and measurable atomic clock based on coherent population trapping[C]// *Instrumentation and Measurement Technology Conference*. New York, USA: IEEE, 2011: 1-4.
- [4] ZHONG G Sh, MAO X J, BI G J, *et al.* Lasers with narrow pulse width and high beam quality [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6): 766-768 (in Chinese).
- [5] YUAN J, CHEN W L, QI X H, *et al.* Design for power supply and frequency stabilization of ECL [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 116-119 (in Chinese).
- [6] HOROWITZ P, HILL W. *The art of electronics* [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1989: 421-422.
- [7] GAO P D, ZHANG F Q. Design and implementation of high precision temperature control system for semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4): 271-273 (in Chinese).
- [8] ERICKSON C J, van ZIJLL M, DOERMANN G, *et al.* An ultrahigh stability, low-noise laser current driver with digital control [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(7): 073107.
- [9] WANG X Y. Implementation of wavelet denoising algorithm based on FPGA [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6): 787-790 (in Chinese).
- [10] MENG T F, WU Y L, JI Zh H, *et al.* Frequency stabilized diode laser based on cesium molecular saturated absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1182-1185 (in Chinese).