

高稳定度半导体激光器电源

侯庆志, 熊继军, 曹延昌
(中北大学电子测试国家重点实验室, 太原 030051)

摘要: 设计并实现了一个高精度的半导体激光器驱动系统, 该系统包括温度控制和电流控制两部分。温度的控制范围为室温下 $\pm 1.50 \times 10^1$ K, 控温精度优于 1.81 mK, 标准差小于 0.20 mK。电流的调节范围为 $0 \sim 2.00 \times 10^2$ mA, 纹波小于 1.00×10^2 nA。该系统驱动外腔半导体激光器时可以保证激光器输出的频率稳定度在 10 s 内达到 1.00×10^{-9} , 满足原子分子物理和激光光谱学等领域对高精度激光器的需求。

关键词: 半导体激光器; 驱动电路; 电流控制; 温度控制

中图分类号: V271.4; TN242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0086-04

A High-Stability Power Supply for Semiconductor Lasers

HOU Qing-zhi, XIONG Ji-jun, CAO Yan-chang

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

Abstract: A high-precision driving circuit was designed and realized for semiconductor lasers, which has two parts of temperature control and current control. The temperature is controlled in the range of $\pm 1.50 \times 10^1$ K at room temperature, the temperature control precision is better than 1.81 mK, and the standard deviation is less than 0.20 mK. The current adjusting range is 0 to 2.00×10^2 mA and the ripple is less than 1.00×10^2 nA. When used for driving a semiconductor laser, the system can make the output frequency of the laser diode reach 1.00×10^{-9} within 10 s, which can meet the requirements of atom molecule physics, laser spectroscopy, and other fields to high-precision lasers.

Key words: semiconductor laser; drive circuit; current control; temperature control

0 引言

随着激光器技术的不断发展, 高精度激光器在高精密测量和基础研究中广泛应用。在高精密测量中, 原子陀螺^[1-2]、原子磁强计^[3-5]使用高精度激光器进行原子的态制备以及原子信号的检测; 冷原子^[6-7]领域中激光器用来冷却和囚禁原子。在基础物理学中, 离子阱光钟中和光晶格光钟中高精度激光器不仅用来制冷原子, 而且可以获得线宽超窄且频率极稳定的跃迁谱线, 并用该跃迁谱线对本阵激光频率实现精密锁定, 从而建成高稳定度和高精度的光学频率标准^[8]。

目前应用比较多的激光器有气体激光器(He-Ne激光器)、固体激光器(蓝宝石激光器)、液体激光器(染料激光器)和半导体激光器等。同气体激光器相比, 半导体激光器寿命长、价格低廉、易于调制; 同固体

激光器相比, 半导体激光器线宽窄、结构简单; 同液体激光器相比, 半导体激光器稳定。因此, 半导体激光器应用前景非常广阔。

本文做了面向冷原子干涉陀螺的高精度半导体激光器的相关研究。由于半导体激光器中外腔激光器具有价格相对较低、线宽窄、频率稳定度较高等优点, 根据冷原子对激光器的技术要求, 提出一种高精度外腔半导体激光器的系统设计。首先, 设计一套外腔半导体激光器的温度和电流控制系统; 然后, 搭建实验系统测试温度以及电流的稳定度; 最后, 测试了激光频率的变化并做了讨论。在冷原子干涉陀螺中, 使用高精度外腔半导体激光器冷却和囚禁原子, 以及检测陀螺信号。它要求激光器的频率准确度达到 1.00 MHz, 频率稳定度达到 1.00×10^{-9} , 线宽小于 1.00 MHz。影响半导体激光器输出频率的主要因素包括: 电流的稳定度、温度的变化等。首先, 电流直接影响激光器的增益介质, 如载流子浓度、导带禁带宽度; 同时, 还对腔内纵模、激光器的频率以及功率有影响; 其次, 外界温度的变化以及激光管工作发热, 都会影响激光器腔长和外腔腔长, 导致频率变化, 还

收稿日期: 2014-01-06

修回日期: 2014-01-25

作者简介: 侯庆志(1989—), 男, 山东泰安人, 硕士生, 研究方向为半导体激光器。

对激光器的介质折射率、阈值电流、中心频率等有很大影响^[9],可以直接控制激光器的驱动电流和温度,从而控制以上因素。根据常见的激光器种类,统计得到电流以及温度分别对不同激光器频率的影响,如表 1 所示。

表 1 温度和电流对不同激光器的影响

Table 1 The influence of temperature and electric current on different lasers

影响因素	分 类		
	FP(法布里-珀罗激光二极管)	DFB(分布式反馈式激光二极管)	DBR(分布式布拉格反射激光二极管)
温度,1°C	3.80×10^1 GHz	2.94×10^1 GHz	2.48×10^1 GHz
电流,1mA	3.00 GHz	2.49 GHz	1.00 GHz

表 1 中的数据可以看到,激光频率与温度的关系约为 3.00×10^1 GHz/K,与电流的关系约为 2.00 GHz/mA,根据冷原子的需要,激光器的频率线宽应该达到兆赫兹量级,所以温度均方根应小于 1.00 mK,电流的均方根应小于 1.00 μ A。

1 驱动电路的理论分析

1.1 温度控制系统的理论分析

本文使用 DFB 外腔半导体激光器,温度对于激光器频率的调谐率为 2.94×10^1 GHz/K。在冷原子研究中,激光器的频率长期稳定度要求优于兆赫兹,因此要求温度的标准差达到 0.10 mK。通常使用热敏电阻测量温度的变化,根据热敏电阻的分压控制温度。本实验中温度与热敏电阻电压的关系为 0.10 V/K,因此要求热敏电阻电压的稳定度小于 1.00×10^1 μ V。为了满足激光器温度的要求,首先要保证稳压电源的稳定度,而稳压电源的稳定度基于基准电压的稳定度,因此,基准电压的稳定度对稳压电源的稳定度是至关重要的。为了满足基准电压的要求,选用 LM399,其电压温漂系数的典型值为 1.00×10^{-6} /K,实验室条件下温度变化一般为 5.00 K,由此引起的电压漂移的最大值为 5.00 μ V,满足热敏电阻对电压的要求。另外,LM399 的基准电压由隐埋齐纳管提供,这种新型稳压管是采用次表面隐埋技术制成的。普通稳压管在半导体表面产生齐纳击穿,因此噪声高、稳定性差;次表面隐埋技术则在半导体内部产生击穿,可使噪声电压显著降低,稳定性大幅提高^[10]。

根据外界温度 (T) 与时间 (t) 的变化趋势(见图 1),使用多项式拟合得到温度表征

$$T = 26.71 + 5.47 \times 10^{-6}t - 6.46 \times 10^{-8}t^2 + 1.52 \times 10^{-11}t^3 \quad (1)$$

式中: T 为实际的温度; t 为时间。

根据式(1)可知,对温度的影响主要是常数项和一次项,其他幂次项的系数均比一次项至少小两个量级,可以忽略不计。因此在反馈环路中使用 PII²(P 为比例控制;I 为一次积分;I² 为二次积分)控制,通过一次积分

减小常数项的影响,二次积分减小一次项的影响,从而保证激光管温度的稳定。图 2 为温度控制系统。

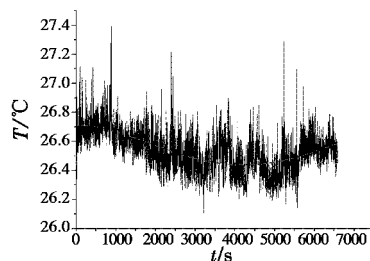


图 1 外界温度的变化曲线

Fig. 1 The change of ambient temperature

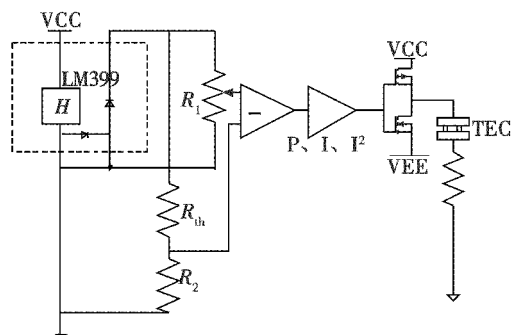


图 2 温度控制系统

Fig. 2 Temperature control system

首先使用 LM399 作为电压基准,然后利用热敏电阻 R_{th} 搭建桥式温度采样,利用闭环负反馈 PII²,从而控制 TEC(半导体制冷器)加热或者制冷,保证激光器的温度稳定。

1.2 电流控制系统的理论分析

根据 DFB 外腔半导体激光器电流与频率的关系,1 mA 电流对应的频率变化约为 2.49 GHz,要达到冷原子的技术要求,激光器的频率带宽要达到兆赫兹,则电流的纹波要小于 1 μ A。同时,频率的稳定度要小于 10^{-9} ,因此电流的长期稳定度要小于 1 μ A。另外,负反馈系统(PID,其中:P 为比例控制;I 为积分控制;D 为微分控制)中激光管作为半导体材料,不能采样其两端的电压,因此需要引入采样电阻,要求采样电阻的阻值精度高、温漂小。为了满足以上技术要求,首先选择交流噪声小、稳定度高的电压参考,这里同样使用 LM399,由于其稳定度好,并且在频率为 10 Hz ~ 10 kHz 的范围内纹波的典型值只有 7.00 μ V,由此引起的电流纹波只有 7.00×10^2 nA;温漂系数为 5.00 ppm,外界温度变化 1.00 K,温漂引起的电流最大起伏只有 5.00×10^1 nA,由此导致的电流纹波完全可以满足激光器对电流纹波的要求。电阻的阻值为 1.0×10^1 Ω ,温漂系数为 1.00×10^{-5} /K,由此引起的频率变化小于 1.00×10^2 kHz。根据以上的影响因素,设计了激光器的电流控制系统,如图 3 所示。

使用 LM399 作为电压基准, 电位器设定电流值, 通过采样电阻 R_4 负反馈控制达林顿功率管的电流, 从而达到控制通过激光器电流的目的。

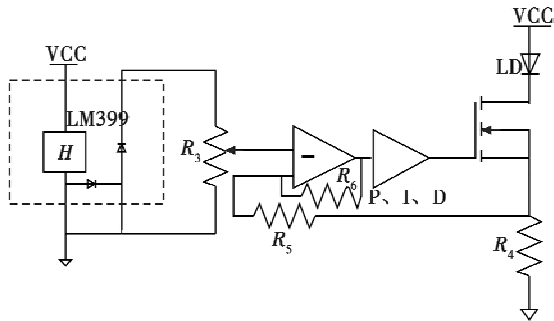


图3 电流控制系统

Fig.3 Current control system

2 系统仿真

在温控系统中, 给热敏电阻的采样电压加入一个 1.00×10^2 mV 的初始偏差, 系统约在 5 min 之内稳定, 然后再加入一个线性度为 1.00×10^1 mV, 时间为 10 s 的一阶干扰。两次结果温度起伏均不大于 2.00 mK, 标准差小于 0.20 mK。在电流系统中, 加入一个电流峰值为 1.00×10^1 μ A、频率为 $1.00 \times 10^1 \sim 1.00 \times 10^2$ Hz 的正弦波, 最终采样电阻的电压均方根变化小于 1.00 μ V。

3 数据分析

3.1 温度试验数据分析

采集热敏电阻两端的电压值, 图4为热敏电阻采样的温度值以及外界温度的变化, 测量时间间隔为 0.10 s, 测量时间 1 h。

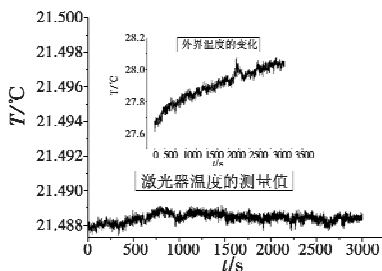


图4 激光器温度以及外界温度的测量值

Fig.4 The measured value of the laser temperature and ambient temperature

从图中可以得知, 温度采样电压的最大漂移为 1.81 μ V, 对应温度变化为 1.81 mK, 对应频率变化为 53.61 MHz; 标准差为 2.00×10^1 μ V, 对应温度变化为 0.20 mK, 对应频率变化 4.71 MHz。同时测量外界温度的变化为 0.47 K, 可见温度受到外界温度变化影响较小。以上温控的仿真结果一致。

通过测量设定的电压值和外界温度的变化, 计算设定值与测量值的相关系数为 0.93, 外界温度与激光

器温度变化的相关度为 -0.31, 可见实际值与设定值基本一致。因此, 在后续的改进中主要考虑图1中电位器的温漂以及后续处理中元件的影响。

3.2 电流试验数据分析

测量激光电流功率谱密度(1 Hz ~ 300 kHz)见图5。

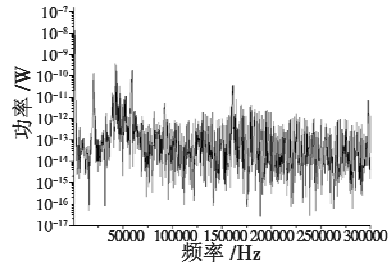


图5 电流的功率谱密度

Fig.5 The power spectral density of current

通过计算电流的功率谱密度可以得到激光器的电流纹波约为 1.30×10^2 nA, 此数据与文献中的数据基本在一个量级^[11], 同时使用六位半万用表测得电流的纹波小于 1.00×10^2 nA, 两者测量数据一致, 因此由电流纹波导致的线宽增宽为 1.50×10^2 kHz。另外, 根据激光器饱和和吸收^[12]的锁频要求, 碱金属原子的饱和吸收谱的线宽约等于 6.00 MHz, 所以可以保证激光器的锁定。

4 总结

根据以上的实验结果, 可以对比温度以及电流对于激光器输出频率的影响, 如图6所示。

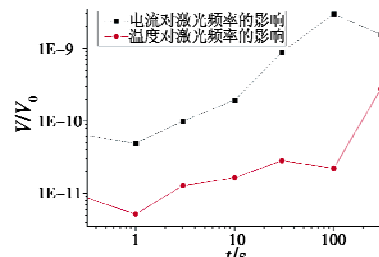


图6 温度和电流的阿伦方差对频率稳定度的影响

Fig.6 Effect of Allan variance of temperature and current on frequency stability

可见二者对于阿伦方差在 1.00×10^2 s 内的激光器频率稳定度均小于 1.00×10^{-8} , 然后实际测量 DFB 外腔激光器频率的变化并计算其稳定度, 如图7所示。

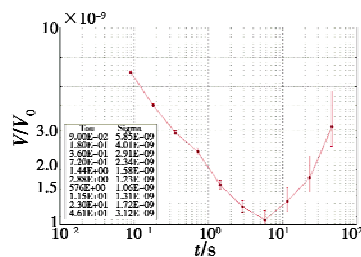


图7 实际测量频率稳定度

Fig.7 The actual measurement of frequency stability

从图6中可知,激光器在10 s以内的频率稳定度越来越好,并且在约10 s处达到最好,频率稳定度为 1.00×10^{-9} ,10 s以后频率稳定度开始上升。

比较图6、图7可知,实际测得的数据与根据温度和电流预算的数据有一定的差距:10 s以内由于外界机械振动会引起外腔的支架振动,因而使谐振腔的光学长度发生变化,导致实际测量值与理论值的差别;10 s以后基本一致,外腔的机械振动长时间被平均,但是温度的长漂不仅会影响激光管的频率,也会影响外腔的腔长。同时,外腔的机械结构的应力释放等效应会引起激光频率的长期漂移,所以,最终激光器频率的长期漂移会大于温度漂移引起的激光频率漂移。

本文设计的高精度激光器驱动系统中温控电路测试结果表明,温控稳定度可以达到 1.00×10^{-5} ,对激光器相对频率的影响小于 1.00×10^{-9} 。电流测试表明电流稳定度可以达到 $1.00 \mu\text{A}$,电流的纹波小于 $1.00 \times 10^2 \text{ nA}$,对激光器相对频率的影响小于 1.00×10^{-8} ,实际测量激光频率的稳定度约为 1.00×10^{-9} ,经过后期锁频之后的频率稳定度基本与He-Ne激光器^[9]相当,但是半导体激光器具有比He-Ne激光器更容易调谐和调制的优势,因此半导体激光器更有发展前景。实验结果表明,本文设计的激光器控制系统可以广泛应用在基础研究和高精密度测量技术研究领域中。

参考文献

- [1] FANG J C, QIN J, WAN S, et al. Atomic spin gyroscope based on 129Xe-Cs comagnetometer[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13):1512-1515.
 - [2] GUAN C, ZHU X, ZHOU Q. Analysis and design of high-performance coherent population trapping passive atomic clock system based on vertical-cavity surface-emitting laser[C]//Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO), IEEE, 2011:1-5.
 - [3] MADISON K, WANG Y, REY A M. Annual review of cold atoms and molecule[M]. Orlando:World Scientific, 2013.
 - [4] WANG Y Q. Principle of quantum frequency standard[M]. Beijing:Science Press, 1986.
 - [5] ROWLEY W R C, WILSON D C. Wave-length stabilization of an optical maser[J]. Nature, 1963, 200:745-747.
 - [6] SMITH S P, ZARINETCHI F, EZEKIEL S. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications[J]. Optics letters, 1991, 16(6):393-395.
 - [7] ALLRED J C, LYMAN R N, KORNACK T W, et al. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation[J]. Physical review letters, 2002, 89(13):130801.1-130801.4.
 - [8] 蒋燕义. 超窄线宽激光及其在光钟中的应用[D]. 上海:华东师范大学,2012.
JIANG Y Y. The ultra narrow linewidth laser and its application in optical clock[D]. Shanghai:East China Normal University, 2012.
 - [9] 邢乐. He-Ne 激光器频率稳定度测量技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
XING L. The stability measurement technology research of He-Ne laser frequency[D]. Xi'an:Xidian University, 2011.
 - [10] 陈太洪. 基于LM399的高精密度稳压电源[J]. 工矿自动化,2006,2:42-44.
CHEN T H. High-precision voltage regulator based on LM399 power supply[J]. Industry and Mine Automation, 2006, 2:42-44.
 - [11] TROXEL D L, ERICKSON C J, DURFEE D S. Note: Updates to an ultra-low noise laser current driver[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(9):96-101.
 - [12] CORWIN K L, LU Z T, HAND C F, et al. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor[J]. Applied Optics, 1998, 37(15):3295-3298.
-
- (上接第40页)
- based on 3DSAS[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(7):1527-1533.
- [8] 胡志忠,徐克虎,沈春林. 低空突防用数字地形的平滑处理[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(5):493-498.
HU Z Z, XU K H, SHEN C L. Smoothing approach to digital terrain for low altitude penetration[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000, 32(5):493-498.
 - [9] 张大巧,鲜勇,许立军,等. 基于改进A*算法的三维航迹快速规划方法[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(5):59-62.
ZHANG D Q, XIAN Y, XU L J, et al. Fast 3D path planning based on an advanced A* algorithm[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(5):59-62.
 - [10] DROZDEK A. 数据结构与算法——C++版[M]. 3版. 郑岩,战晓苏,译. 北京:清华大学出版社,2006:175-220.
DROZDEK A. Data structure and algorithms in C++ [M]. 3rd ed. Translated by ZHENG Y, ZHAN X S. Beijing:Tsinghua University Press, 2006:175-220.