

低功耗、小型化稳频激光系统的设计与实现

于 齐 熊 炜* 张 胤 陈徐宗 段晓辉

北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

摘要 设计并实现了一种低功耗、小型化、可长期稳定运行的自动稳频激光系统。通过设计并实现高效率、低纹波的电压源,较大幅度地降低了整个系统的功耗和体积;通过设计并实现高性能温度控制电路、电流控制电路和稳频电路,得到了线宽较窄、频率稳定度较高的输出激光。该系统能够自动长期稳频,输出激光线宽约为 1 MHz,稳定度指标为秒稳定度 1.43×10^{-10} ,十秒稳定度 3.90×10^{-11} ,百秒稳定度 1.28×10^{-11} ,千秒稳定度 2.25×10^{-11} 。在稳定度略优于商用外腔半导体激光器的前提下,该激光系统电源体积缩小了约 85%,整机功耗降低了约 90%,为实现半导体稳频激光系统的低功耗和小型化提供了一种新的方案。

关键词 激光器; 频率稳定度; 饱和吸收谱; 低功耗; 小型化

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0801010

Design and Implementation of Miniaturized Frequency-Stabilized Laser System with Low Power Consumption

Yu Qi Xiong Wei Zhang Yin Chen Xuzong Duan Xiaohui

School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract We designed and realized a compact laser system of which the frequency can be automatically stabilized. The laser system can operate with low power consumption and long-term stability. The power consumption and the volume of the system are reduced through our designed voltage source with high efficiency and low ripple. With the high-performance temperature controller, current controller and automatic frequency stabilization modules, a laser with narrow linewidth and high frequency stability is realized. The linewidth is about 1 MHz, and the frequency stabilities at 1, 10, 100, 1000 s are 1.43×10^{-10} , 3.90×10^{-11} , 1.28×10^{-11} , 2.25×10^{-11} , respectively. Compared with the commercial external-cavity diode lasers, the designed system has better long-term frequency stability. The volume of the power supply for the system is reduced by 85%, and the power consumption is reduced by 90%. The system is a new scheme for realizing low power consumption and miniaturization of the frequency-stabilized semiconductor laser system.

Key words lasers; frequency stability; saturated absorption spectrum; low power consumption; miniaturization

OCIS codes 140.2020; 140.3425; 300.1030

1 引 言

激光具有良好的单色性和相干性,它的出现极大地促进了原子(分子)动量操控^[1]的实验研究以及原子(分子)相关的精密测量。在激光冷却原子气体^[2]以及原子(分子)相关的频率标准^[3]、磁强计^[4]、重力仪^[5]、陀螺仪^[6]等前沿基础和应用研究领域,激光都发挥了不可替代的作用。这些应用对激光频率的线宽和稳定性有非常高的要求。实用化的原子(分子)精密测量设备需要激光频率的稳定度在几小时到几年内都保持在

收稿日期: 2016-03-31; **收到修改稿日期:** 2016-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(91336103)

作者简介: 于 齐(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光技术、量子频标、冷原子等方面的研究。

E-mail: yuqi.pku@foxmail.com

导师简介: 段晓辉(1968—),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: duan@pku.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: aaxiongwei@163.com

一定水平以上^[7-9]。在基于原子(分子)的可搬运精密仪器中^[10],激光器还需要满足低功耗、小型化和高可靠性的要求^[11]。半导体激光器因具有体积小、效率高、价格便宜、结构简单以及便于调谐等优点,在上述领域中得到广泛应用^[12-13]。目前国内外稳频激光器的研究主要集中于如何获得超窄线宽和高短稳激光输出^[14-15],对于小型化且可长期自动稳频的激光器的研究报道较少。

本文设计了一套基于半导体激光器的稳频激光系统,该系统具有功耗低、体积小和稳定性高的特点。相比于现有的商用激光器,该系统具备开机即可自动频率锁定的功能,最主要的是配备了高效率、小型化、低噪声的新型电源,在保证激光器频率指标的前提下,减小了系统的体积和功耗。由于采用了分布反馈式(DFB)半导体激光器,该系统不需要外腔压窄线宽,稳定度预期比商用外腔半导体激光器更好。实验测量了该系统的体积、功耗、输出激光频率的线宽和稳定度。与商用外腔半导体激光器相比,设计的激光系统电源体积缩小了约85%,整机功耗降低了约90%,稳定度略有提高。此激光器的性能完全满足小型化超冷原子实验平台、原子重力仪、陀螺仪和频率标准等设备的要求。

2 半导体稳频激光系统的设计

稳频激光系统采用DFB半导体激光器(型号:EYP-DFB-0780-00150-1500-TOC03-000x),其特性参数为:尺寸为38.9 mm×25.4 mm×9.3 mm;输出激光功率最高可达100 mW;中心波长为780 nm,线宽为2 MHz;频率的温调率为24.8 GHz/K,电调率为1.23 GHz/mA。

激光系统电源的设计外观如图1(a)所示。整机尺寸为150 mm×80 mm×150 mm(体积约为1.8 L),功耗约为15 W。现有的商用外腔激光器的驱动电源一般是19-inch 3U标准机箱(1 inch=2.54 cm),其尺寸为482.6 mm×132 mm×185 mm(体积约为11.8 L),功耗一般为150 W。与其相比,设计的激光系统驱动电源体积缩小了约85%,功耗降低了约90%。

设计激光系统的原理如图1(b)所示,系统分为电压源模块、控温模块、控流模块、光学模块和主控模块。(1)为电压源模块,将110~220 V交流电或80~120 V高压直流电转化为稳定直流电,为激光系统供电。(2)为控温模块,用于控制激光器的温度。(3)为控流模块,用于控制激光器的注入电流。(4)为光学模块,用于产生饱和吸收光谱(SAS),为激光频率锁定产生误差信号。(5)为主控模块,通过单片机整体控制温度、电流和误差信号,用于自动稳频。

要获得高稳定度的输出激光频率,最关键的三个部分为低漂移的控温、控流和稳频电路。

对激光管输出频率影响最大的两个因素是管芯工作温度和注入电流,因此要获得高稳定度的激光频率,首先需要稳定控制激光管的工作温度和注入电流^[16]。设计了小型化、高性能的控温电路以提高温度的稳定性,降低温度对激光频率的影响;同时,还设计了低功耗、低纹波的控流电路,降低激光电流对激光频率的影响。电路分别将温度和电流采样信号与各自的高稳定度基准源进行比较得到误差信号,误差信号再经过比例-积分-微分(PID)电路处理后调整激光器的温度和电流,从而减小输出激光的线宽和频率漂移。

在高精密设备应用中需要频率稳定度优于 10^{-10} 的激光器,为了实现这一目标,将激光锁定在一个更稳定的参考源上,该系统使用碱金属原子的饱和吸收光谱作为参考源。通过消多普勒背景的光路可减小光谱透射峰的多普勒增宽,谱线线宽主要由上能级寿命决定,由此可以获得线宽比吸收光谱窄约100倍的光谱,有利于激光频率锁定^[17]。图1(c)为产生饱和吸收光谱的光路。由DFB激光器产生780 nm激光,分出三束光,其中两束弱光作为探测光,一束强光作为抽运光。一束探测光和一束抽运光经过吸收池后产生带多普勒本底的饱和吸收谱;另一束探测光只产生多普勒增宽的吸收谱。两路信号差分后得到无多普勒本底的饱和吸收谱^[18]。图1(d)为实验得到的⁸⁷Rb的D₂线^[19]饱和吸收谱。

上述控温、控流和稳频电路都需要电压为5 V、低纹波、高稳定度的电源。设计的激光系统适用于110~220 V交流供电的实验室环境或者80~120 V高压直流供电的小型化原子实验平台等场合。因此需要电源模块将交流电或者高压直流电高效地转化为低压直流电。该激光系统要求电源的纹波在100 μV以下。现有的商用激光器一般使用线性电源供电。其特点是纹波噪声低,一般为20 μV左右,但电源效率低、功耗大、体积大。通常线性电源的效率不会超过45%。设计的系统满足了激光系统对电源提出的纹波指标要求,并且具有低功耗和小型化特点。

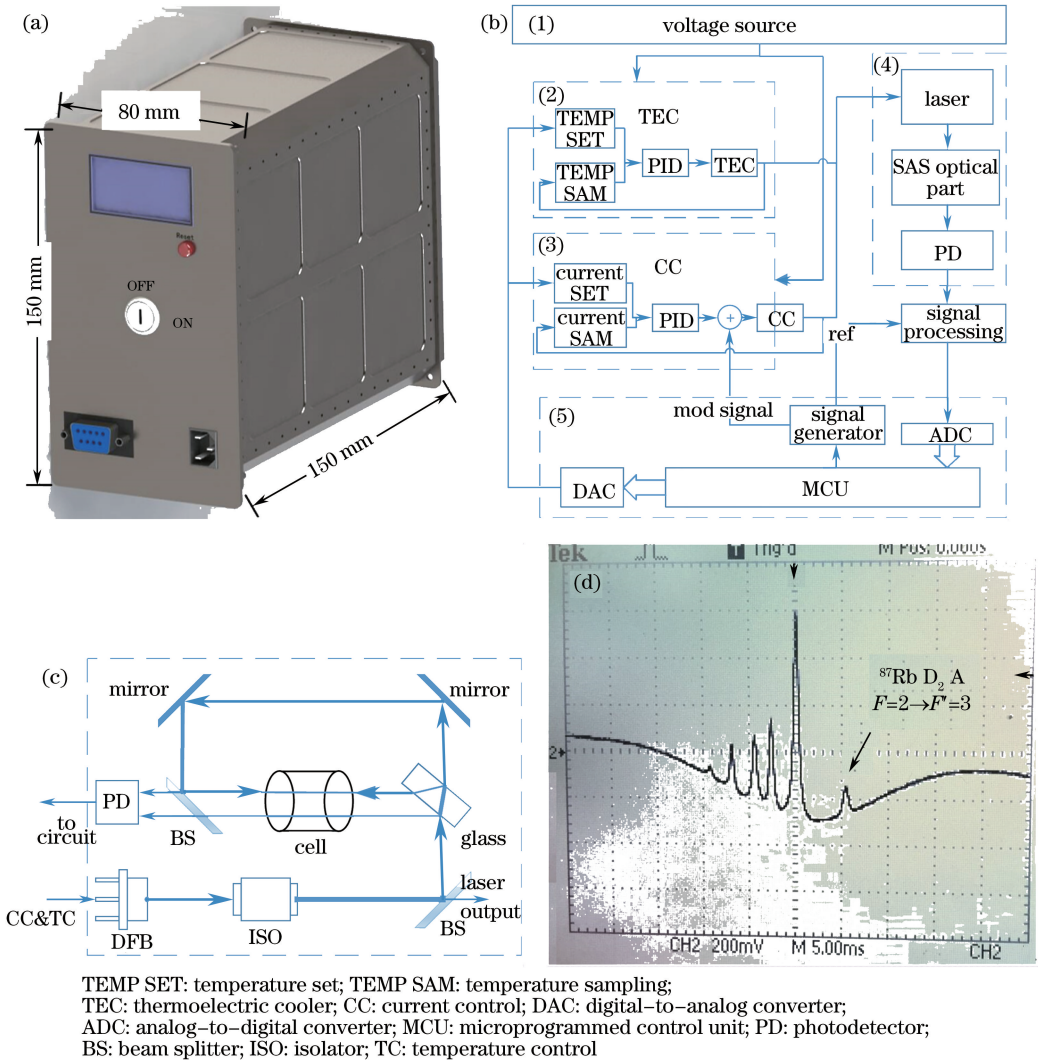


图 1 (a) 激光系统电源设计; (b) 激光系统原理框图; (c) 产生饱和吸收光谱的光路图; (d) ^{87}Rb 的 D_2 跃迁饱和吸收谱
 Fig. 1 (a) Design of power supply for laser system; (b) block diagram of laser system;
 (c) optical path for generating saturated absorption spectra; (d) saturated absorption spectrum of ^{87}Rb D_2 transition

设计电源的原理框图如图 2(a) 所示。通过高效率的交流-直流/直流-直流 (AC-DC/DC-DC) 开关电源模块^[20] 将 110~220 V 交流电或高压直流电转化为低压直流电。再经过自制的超微晶功率电感抑制高频纹波。最后利用低压降线性稳压器, 获得低纹波、高稳定度的输出电压。

电源的功率变换部分采用开关电源, 其调压原理是用快速通断的晶体管将输入电压斩波得到高频方波脉冲, 再通过高频变压器降压整流滤波后得到直流电压。通过控制晶体管通断占空比可以控制输出直流电压值^[21]。由于开关电源中的晶体管工作在截止区和饱和区, 在晶体管上消耗的热量较低, 因此开关电源功率变换的效率可以达到很高; 并且不需要大体积的散热模块, 较大幅度地缩小了电源的体积。另一方面, 开关电源的功率传递使用高频变压器, 其能量密度很高、体积很小, 不需要大体积的工频变压器。该电源由于具有上述特点, 所以可以实现高效率、小型化。此模块的效率一般可以达到 85% 以上。但是开关电源引入了高频纹波, 使模块输出的电压纹波一般为 50~100 mV。纹波传递到激光器中会使输出频率产生增宽, 因此需要抑制电源的纹波。首先采用共模电感与大电容配合形成低通滤波器以抑制高频纹波, 该共模电感以超微晶材料作为磁芯, 由两个尺寸相同、匝数相同的线圈对称地绕制在同一磁芯上, 超微晶材料对高频纹波有很好的抑制作用。共模电流在磁环中产生的磁通相互叠加, 感量大, 可有效抑制高频纹波。经过此模块后电压纹波一般可以降低到 1 mV 左右。为进一步抑制纹波并提高电压稳定度, 后级再经过低压差线性稳压 (LDO) 模块。该模块输入电压为 -20~60 V, 输入输出电压差小于 500 mV, 在输出电压为 5 V 时, 电源损

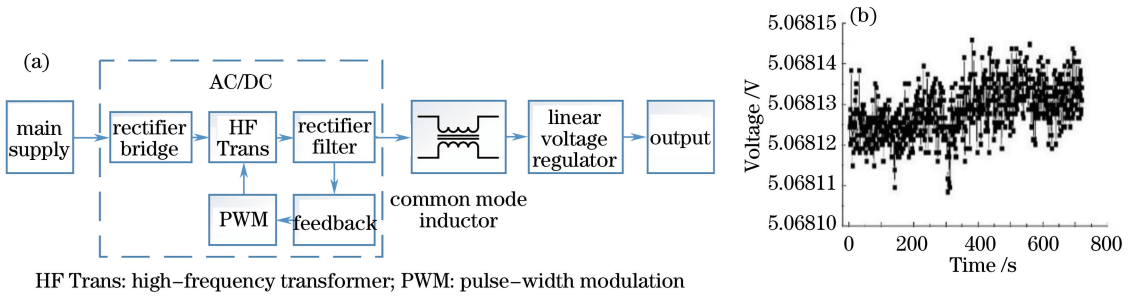


图 2 (a) 电压源框图; (b) 短期稳定性测试

Fig. 2 (a) Diagram of voltage source; (b) short-term stability test

耗小于 10%，输出电流可达 5 A，输出电压的温漂系数为 $\Delta V_0/\Delta T = 20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。经过该模块后，输出电压纹波一般可以降低至 50 μV 左右。

控温模块使用 LM399 精密参考源产生基准电压，其长期稳定度为 $8 \times 10^{-6} \text{ kh}^{-1/2}$ ，温漂系数为 $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，电压噪声有效值最大为 20 μV 。由激光管集成的 10 k Ω 热敏电阻采样实时温度。采样电压与基准电压通过差分放大电路得到误差信号，误差信号经过 PID 自动控制电路产生控制信号，控制达林顿管构成的功率放大电路输出正负电流驱动制冷硅对激光管的温度进行调整，从而实现温度稳定。

控流模块也使用 LM399 精密参考源作为基准源，由 $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 的低温漂电阻作为采样电阻。采样电阻上的电压经过放大之后与基准电压进行比较得到误差信号，误差信号经过 PID 电路产生控制信号，通过控制金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)的电压来调整注入激光管的电流，从而实现电流稳定。控温和控流稳定度的详细测试结果见第 3 节。

激光系统的自动稳频在 主控模块中由软件实现。光电探测器探测到的光谱信号经过低通滤波后通过模数转换进入单片机进行一系列计算后得到控制信号，产生的数字信号经过数模转换后调整激光器的电流，实现频率稳定。主控模块负责实现光谱信号的分析 and 计算，产生误差信号，并且实时监控锁定状态，失锁后可自动重新锁定。

3 实验结果

对电压源的各种性能进行了测试。测试仪器使用六位半多路数据采集器 Agilent 34970A，测量电源空载和满载的输出直流电压起伏与交流噪声。空载时电源输出直流值为 5.069 V；电源噪声有效值为 1.78 μV 。该电源的电流输出能力为 5 A，因此满载时采用 1 Ω 电阻作为负载。测得电源输出直流值为 5.068 V，负载调整率为 0.02%；噪声有效值为 32.3 μV ，输出直流电压的起伏如图 2(b)所示，可以看到电压起伏在 35 μV 以内。另外该电源的纹波参数和线性电源基本在一个量级上，满足激光系统对电源纹波的要求。同时，测试得到该电源的转换效率为 75%，有利于实现系统的低功耗。

在自动稳频过程中，一次扫谱耗时约为 1 s，在这段时间内，激光频率的漂移量不能超过电路的捕捉带（约为 20 MHz），否则无法实现稳频。根据该激光管的温调率，计算可得工作温度的秒稳定度必须在毫开尔文量级以下，才能实现激光稳频。对新型电源激励的控温电路进行测试。利用激光器中集成的 10 k Ω 热敏电阻测试控温参数，测量热敏电阻两端分压获得其电阻值，继而通过查表得到温度参数。持续测试 6.5 h，每 0.5 s 采集一个数据，温漂测试结果用阿伦方差描述，如图 3(a)所示。秒级稳定度为 0.08 mK，对应频率为 1.984 MHz；测量过程中最大温度漂移为 7 mK，对应频率漂移为 173.6 MHz，此频率漂移在该稳频系统的跟踪带内，可以通过积分电路予以补偿。测试结果显示该控温电路满足系统对控温稳定度的要求。

将激光频率锁定在 ^{87}Rb 的超精细跃迁谱线上。 ^{87}Rb D_2 谱线的自然线宽约为 6.07 MHz，由于饱和增宽，测量的线宽在 10 MHz 左右。通常要求电流纹波引入的增宽不能超过光谱的自然线宽，根据激光管的电调率计算可得电流的纹波应该控制在 4.9 μA 以下。同时，根据上述对激光频率稳定度的要求，注入电流的秒稳定度必须低于 16.3 μA ，才能实现激光稳频。对控流电路进行测试，使用 10 Ω / 0.01% / $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 的低温漂电阻作为电流源负载，在 100 mA 输出电流情况下测试电流纹波和稳定度。实验测得电流的纹波噪声

有效值为 $0.53 \mu\text{A}$,对激光器线宽的增宽为 $0.53 \mu\text{A} \times 1.23 \text{ GHz}/\text{mA} = 0.615 \text{ MHz}$,远小于光谱的自然线宽 (6.07 MHz)。电流的稳定度测试持续 6.5 h ,每 0.5 s 采集一个数据,测试结果用阿伦方差描述,如图 3(b)所示。秒级稳定度为 $0.125 \mu\text{A}$,对应频率漂移为 0.153 MHz ,测量过程中最大电流漂移为 $5.6 \mu\text{A}$,对应频率漂移为 6.9 MHz ,此频率漂移在该稳频系统的跟踪带内,可以通过积分电路予以补偿。测试结果表明该控流电路满足系统对控流稳定度的要求。另外,从图 3(b)可以看出,平均时间超过 100 s 后,电流的稳定度会逐渐变差,当时间为 1000 s 时电流稳定度为 $0.3 \mu\text{A}$,对应频率漂移为 0.369 MHz ,仍然满足系统的要求。稳定度变差可能是由于测量时间较长时,作为电流源负载的电阻受到环境温度的影响,其阻值发生变化进而导致电流测量值的漂移。

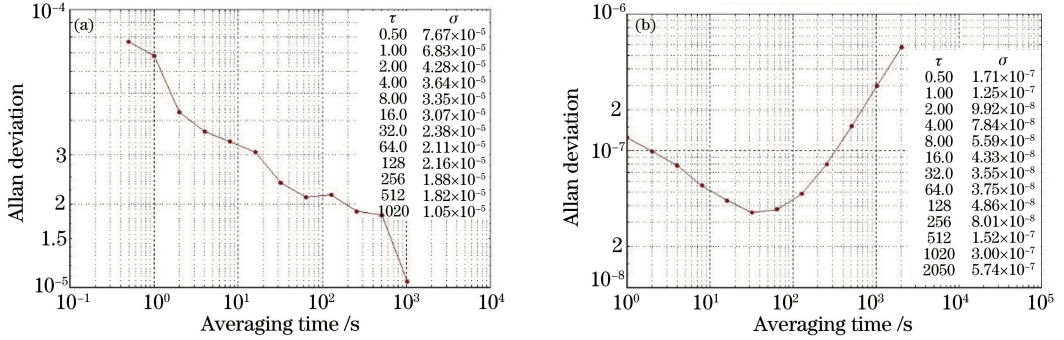


图 3 (a) 温度稳定度; (b) 电流稳定度

Fig. 3 (a) Temperature stability; (b) current stability

用两台相同的稳频激光器输出的激光进行拍频,实验光路如图 4(a)所示。稳频激光器 A 锁定在 ^{87}Rb 原子的 $F=2 \rightarrow F'=2$ 谱线上,激光器 B 锁定在 ^{87}Rb 原子的 $F=2 \rightarrow F'=3$ 和 $F'=2$ 的交叉线上。两台激光器的频率差约为 133 MHz ,拍频信号通过雪崩光电二极管(APD)接收。用频谱仪测量拍频信号的线宽约为 1 MHz ,如图 4(b)所示。

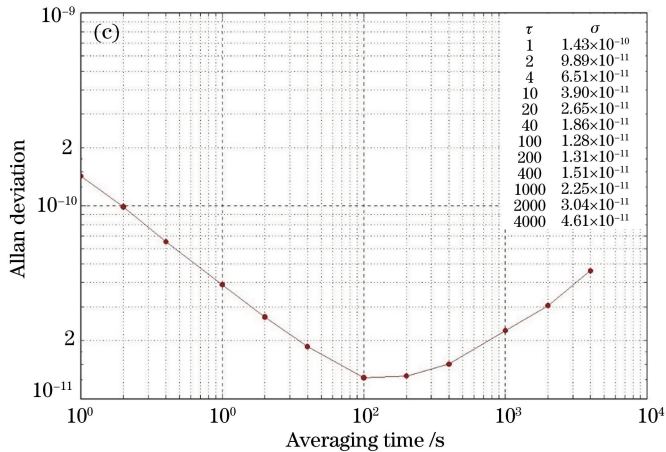
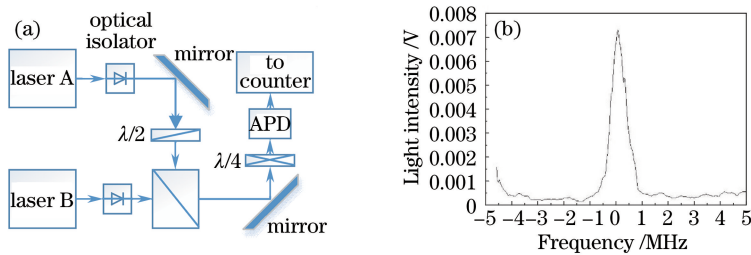


图 4 (a) 频率稳定度测量装置示意图; (b) 激光器线宽测量结果; (c) 稳频激光器频率稳定度测量结果

Fig. 4 (a) Schematic of frequency stability measurement facility; (b) measurement result of laser linewidth; (c) measurement result of laser frequency stability

使用频率计数器(Agilent 53132A)测量拍频信号的稳定度,以此来评估激光器的频率稳定度。频率计数器的单次测量时间为1 s,连续采集43831个数据(约12 h)后,拍频信号的稳定度如图4(c)所示,秒级稳定度为 1.43×10^{-10} ;当平均时间 $\tau=10$ s时,稳定度为 3.90×10^{-11} ;当平均时间 $\tau=100$ s时,稳定度为 1.28×10^{-11} ;当平均时间 $\tau=1000$ s时,稳定度为 2.25×10^{-11} 。

4 分析与讨论

频率稳定度可以利用以下公式进行评估:

$$\sigma_y(\tau) = a \frac{1}{\tau} + b \frac{1}{\sqrt{\tau}} + c + d\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

式中 a, b, c, d 为常数, τ 为平均时间。其中各项分别代表不同类型的噪声引入的频率不稳定度,第一项为白相位噪声,第二项为白频率噪声,第三项为闪变频率噪声,第四项为无规行走噪声。

以上测得激光频率的稳定度在百秒稳定度之前基本符合(1)式中第二项 $1/\sqrt{\tau}$ 的规律,说明短期稳定度主要由白频率噪声决定。在百秒稳定度之后,频率稳定度曲线上翘,这说明长期稳定度主要受无规行走噪声的影响。以上测得的激光频率稳定度与估算值一致。设计系统的频率稳定度和商用外腔半导体激光器基本在一个量级上,在百秒稳定度之后性能还要略好一些。

与外腔半导体激光器相比,设计的激光系统具有功耗低、体积小、可靠性高的优点,同时由于没有外腔的影响,激光频率的长期稳定性更好。缺点是激光线宽相对较宽,所以短期稳定度不及外腔半导体激光器,外腔半导体激光器的线宽通常在十万赫兹以内^[15]。

影响激光器长期稳定度的因素主要有环境温度无规则漂移引起的各种参数的漂移,如管芯温度的漂移、电路反馈环路参数的漂移,还有外磁场变化引起的跃迁频率等的漂移。可以考虑用数字电路代替模拟控制环路以降低积分的漂移,对整个激光头进行进一步隔热或多级控温,从而进一步提高激光频率的稳定度。

5 结 论

设计实现了新型电压源及低功耗、小型化、高稳定度且可以自动稳频的半导体稳频激光系统。设计的系统电源整机尺寸为 $150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ (体积约为1.8 L),功耗约为15 W,与同指标的商用外腔激光器驱动电源相比,体积缩小了85%,功耗降低了近90%。激光频率线宽约为1 MHz;稳定度指标为秒稳定度 1.43×10^{-10} ,十秒稳定度 3.90×10^{-11} ,百秒稳定度 1.28×10^{-11} ,千秒稳定度 2.25×10^{-11} 。此设备已成功用于激光冷却与陷阱、原子(分子)内态制备等物理实验,为实现稳频半导体激光器的低功耗和小型化提供了一种新的方案。

参 考 文 献

- 1 Wright K C, Leslie L S, Bigelow N P. Optical control of the internal and external angular momentum of a Bose-Einstein condensate[J]. *Physical Review A*, 2008, 77(4): 041601.
- 2 Zheng Gongjue, Dai Dapeng, Fang Yinfei, *et al.* Locking of optical transfer cavity based on PDH technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121401.
郑公爵, 戴大鹏, 方银飞, 等. 基于PDH技术的光学传递腔的锁定[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121401.
- 3 Niering M, Holzwarth R, Reichert J, *et al.* Measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(24): 5496-5499.
- 4 Patton B, Zhivun E, Hovde D C, *et al.* All-optical vector atomic magnetometer[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(1): 013001.
- 5 Bodart Q, Merlet S, Malossi N, *et al.* A cold atom pyramidal gravimeter with a single laser beam[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(13): 134101.
- 6 Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M, *et al.* The ring laser gyro[J]. *Review of Modern Physics*, 1985, 57(1): 61-104.
- 7 Jiang Xiao, Zhang Chen, Cai Wenqi, *et al.* Frequency stabilization system of diode laser for cold atom experiment[J].

Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 82-86.

江 晓, 张 晨, 蔡文奇, 等. 冷原子实验用的半导体激光器稳频系统[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 82-86.

- 8 Han Yashuai, Wen Xin, Bai Jiandong, *et al.* Laser frequency stabilization of 1560 nm laser after frequency doubling to 780 nm with a waveguide: Radio-frequency frequency-modulation spectroscopy versus modulation transfer spectroscopy with Rb atoms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0530002.

韩亚帅, 温 馨, 白建东, 等. 采用铷原子射频频率调制光谱与调制转移光谱对 1560 nm 激光经波导倍频至 780 nm 进行稳频的比较[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530002.

- 9 Han Shunli, Wu Xin, Lin Qiang. Frequency stabilization technologies of semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1189-1193.

韩顺利, 仵 欣, 林 强. 半导体激光器稳频技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1189-1193.

- 10 van Zoest T, Gaaloul N, Singh Y, *et al.* Bose-Einstein condensation in microgravity[J]. Science, 2010, 328(5985): 1540-1543.

- 11 Qu Qiuzhi, Xia Wenbing, Wang Bin, *et al.* Integrating design of a compact optical system for space laser cooling application[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0602003.

屈求智, 夏文兵, 汪 斌, 等. 空间激光冷却原子集成光学平台设计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0602003.

- 12 Ma Xiuquan, Chen Wenlan, Chen Shuai, *et al.* Experimental study of diode laser frequency stabilization by Zeeman modulation[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2005, 11(4): 171-175.

马修泉, 陈文兰, 陈 帅, 等. 半导体激光器塞曼调制稳频的实验对比研究[J]. 量子光学学报, 2005, 11(4): 171-175.

- 13 Yuan Jie, Chen Xuzong, Chen Wenlan, *et al.* Structure design and third-harmonic frequency stabilization of the external cavity semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 152-154.

袁 杰, 陈徐宗, 陈文兰, 等. 外腔半导体激光器的设计与高次谐波稳频[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 152-154.

- 14 Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai, *et al.* Research of laser frequency stabilization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081401.

苑丹丹, 胡姝玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081401.

- 15 Bayrakli I. Actively frequency-stabilized external cavity diode laser with a linewidth of 2.9 kHz[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48: 29.

- 16 Yuan Jie, Chen Wenlan, Qi Xianghui, *et al.* Design for power supply and frequency stabilization of ECL[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(z3): 115-119.

袁 杰, 陈文兰, 齐向辉, 等. 可调谐半导体激光器的高精密驱动电源与稳频设计[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(z3): 115-119.

- 17 Haroche S, Hartmann F. Theory of saturated-absorption line shapes[J]. Physical Review A, 1972, 6(4): 1280-1300.

- 18 Zhang Yin, Wang Qing. Research of automatic frequency stability diode laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602001.

张 胤, 王 青. 自动稳频半导体激光器研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602001.

- 19 Ye J, Swartz S, Jungner P, *et al.* Hyperfine structure and absolute frequency of the ^{87}Rb $5P_{3/2}$ state[J]. Optics Letters, 1996, 21(16): 1280-1282.

- 20 Maniktala S. Switching power supplies A to Z (2nd edition) [M]. Wang Jianqiang, *et al.* Transl. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014.

Maniktala S. 精通开关电源设计(二版) [M]. 王健强, 等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2014.

- 21 Pressman A I. Switching power supply design (2nd edition) [M]. Wang Zhiqiang, *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.

Pressman A I. 开关电源设计(二版) [M]. 王志强, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.