

文章编号: 0258-7025(2010)01-0082-05

冷原子实验用的半导体激光器稳频系统

江晓 张晨 蔡文奇 金革

(中国科学技术大学近代物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要 基于冷原子实验对激光器的频率稳定性有很高的要求,设计了一套基于原子蒸气饱和吸收法的激光稳频系统。该激光稳频系统有较高的集成度,射频(RF)调制信号的产生、放大、滤波、混频以及误差信号的检出电路被集成到了一块3U的插件上,用于寻找光谱的扫描电路和锁频控制器(PI)集成到了另一块3U插件上。专门设计了一个14槽,19英寸(482.6 mm)宽的3U机箱来安放这些插件。这种高集成度的方式,不仅具有占用空间少、易于管理和维护等优点,其抗干扰能力也大大提高。采用高达21.4 MHz的调制信号,避开了低频的干扰,并使误差信号能反应出激光管更快速的相位抖动。

关键词 激光器;半导体激光稳频;饱和吸收;冷原子

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103701.0082

Frequency Stabilization System of Diode Laser for Cold Atom Experiment

Jiang Xiao Zhang Chen Cai Wenqi Jin Ge

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract Lasers with high stability of frequency are required on ultra-cold atom experiment. A compact frequency stabilization system of diode laser is proposed, which is based on the principle of saturated absorption of atom vapor. The generation, amplification, filtering, mixing of radio frequency (RF) modulation signal, as well as the error signal detection, are integrated into a 3U plug-in module. The scan circuit for finding the spectroscopy and PI controller for frequency locking are also integrated into another 3U plug-in module. For holding those modules, a 3U rack of 14-slot and 19 inches (482.6 mm) width is designed. Experiments show that the high level of integration means not only take up less space, easy to manage and maintain, but its anti-interference ability also greatly enhanced. In order to detect the faster phase jitter of the laser diode, and to avoid the noisy low frequency, a modulation frequency as high as 21.4 MHz is adopted.

Key words lasers; frequency stabilization of diode laser; saturated absorption; cold atom

1 引言

2001年度的诺贝尔物理学奖授予了美国物理学家埃里克·康奈尔(E. A. Cornell)、卡尔·维曼(C. E. Wineman)、德国物理学家沃尔夫冈·克特勒(W. Ketterle),以表彰他们于1995年在稀薄碱金属原子蒸气中成功实现了爱因斯坦于1924~1925年间预言的玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein Condensation, BEC)以及在凝聚体性质方面的早期

基础性研究。此后,在不到十几年的时间里,一个新兴的物理领域——冷原子物理蓬勃发展起来,产生了原子光学等新的学科。超冷原子的德布罗意波长和原子间距相当甚至超过原子间距,原子间具有非常强的相干性,表现出很好的量子特性,可以说是物质的另一种形态。在超冷原子上,可以展开非常多的基础研究以及各种应用研究。例如原子干涉仪能测出重力的微小变化;冷原子钟能将人类的计时精

收稿日期:2008-12-11;收到修改稿日期:2009-04-21

基金项目:国家973计划(2006CB921900)和国家自然科学基金(60625401)资助项目。

作者简介:江晓(1979—),男,博士研究生,主要从事物理电子学、量子光学及其应用的研究。

E-mail: jiangx@mail.ustc.edu.cn

导师简介:金革(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事物理电子学的研究。

E-mail: goldjin@ustc.edu.cn(通信联系人)

度再度提高;对冷原子的量子态操控可能会使量子计算及量子通信等领域有突破性进展。目前,对冷原子进行研究的机构遍布全球。

冷原子实验爆炸式地发展,得益于激光冷却技术和捕陷中性原子技术的进步。美国斯坦福大学的朱棣文(Steven Zhu)、法国巴黎高等师范学院的克罗德·科恩-塔努吉(Claude Cohen-Tannoudji)和美国国家标准和技术研究所的威廉·菲利普斯(William D. Phillips)正是由于在这方面做出了杰出的贡献而获得了1997年的诺贝尔物理学奖。除了冷却激光,冷原子实验还需要探测光、抽运光、推送光等,这些激光频率、用途都不太一样,但有一个共同的特点就是对频率稳定性的要求高。目前国内报道的几种激光稳频系统集成度都不太高,抗干扰

性能不够好,占用空间大,给连接和使用都带来一定的麻烦。针对这些问题,本文试图提高目前半导体激光稳频系统的集成度。

2 实验装置及铷原子饱和吸收激光稳频原理

本实验稳频的对象是外延腔型半导体激光器。它的输出频率受温度和腔长影响很大,很容易受到各种干扰。在做冷原子实验的时候,激光器的频率要锁定在原子的某两条超精细能级之间的跃迁线上。关于调制稳频的详细原理介绍,可以参考文献[1],这里只结合本实验做简单介绍。

锁频部分的光路图如图1所示。

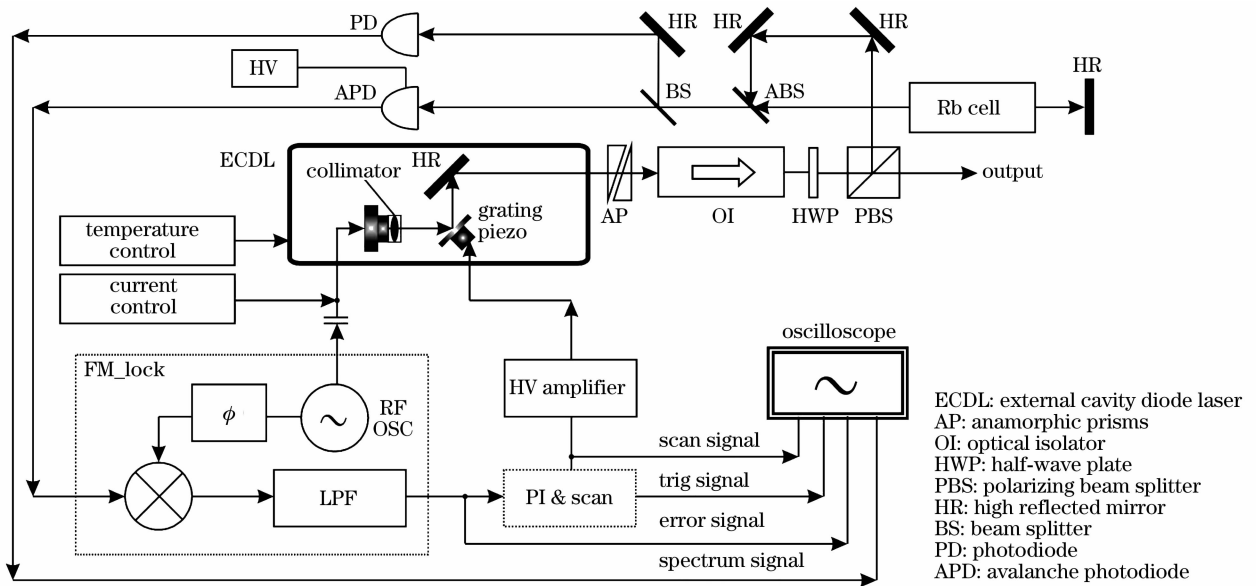


图1 半导体激光器 Rb 原子饱和吸收法锁频实验装置图

Fig.1 Setup of frequency locking experiment of diode laser, using saturated absorption of rubidium vapor

由于外延腔半导体激光器(ECDL)有结构紧凑、运行稳定、操作方便、价格便宜等优点^[2,3],本文的激光抽运源就采用 ECDL。ECDL 出来的光斑不是圆的,先经过整形棱镜(AP)整形成圆斑。因为光反馈容易引起半导体激光器发生跳模、频率不稳,所以在光路上加了光隔离器(OI)。半波片(HWP)的作用是调节偏振分束器(PBS)分出的两束光的比例。光最后从相反的方向先后两次经过 Rb 蒸气池,当激光的频率和 Rb 原子跃迁线共振时,第一次经过 Rb 蒸气时就对纵向速度为零的原子全都激发了,第二次再经过时已经没有零速原子来吸收光子,从而产生饱和吸收现象。由于两束光的方向是相对的,所以纵向速度不为零的原子不会有饱和吸收现

象。光电二极管(PD)和雪崩光电二极管(APD)都是用来探测被 Rb 蒸气吸收了两次后的光强的。其中 PD 响应比较慢,用来看吸收谱;APD 响应很快,用作射频调制锁频。

在原子的饱和吸收光谱中,由于多普勒展宽,除了原子超精细跃迁线本身的饱和吸收峰外,还会出现特有的交叉共振饱和吸收峰。它们出现在同一个多普勒吸收峰里的两条跃迁线的正中间。它们出现的机理可以像下面这样形象地解释:假设某个多普勒吸收峰里的两条超精细跃迁线对应激光的频率分别为 ν_1, ν_2 , 当激光频率扫描到 $(\nu_1 + \nu_2)/2$ 时,抽运光(第一次穿过原子蒸气的光)会把沿抽运光相反方向运动,并且动能为 $h(\nu_2 - \nu_1)/2$ 的原子几乎都激

发到激发态上。而这些原子对于反射回来的激光来说,也是共振的,只不过是另一个能级的了。但是这些原子已经被抽运光基本上都激发了,所以也就产生了饱和吸收的效果。当要把激光频率锁到某根原子跃迁线时,要避免锁到交叉吸收峰上。

扫描电路的作用是在锁频之前把激光的频率设在跃迁线附近(也就是在自动锁频的范围内)。当扫描电路工作时,调频式误差检出(FM_lock)模块检测出来的误差信号不反馈到压电陶瓷(PZT)上。当在 Rb 原子 D_2 线附近扫描时,从 PD 得到的饱和吸收光谱如图 2 所示^[4]。

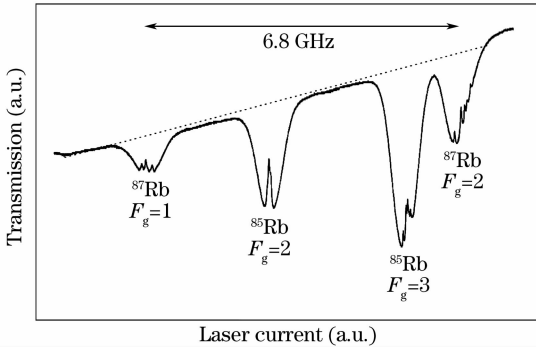


图 2 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 的 D_2 线饱和吸收谱

Fig. 2 Saturated absorption spectroscopy of ^{87}Rb and ^{85}Rb

图 2 中 4 个向下凹的峰就是 Rb 原子热运动造成的多普勒展宽后的吸收峰,而谷底的小尖峰就是饱和吸收峰。由于激光频率是要锁定到饱和吸收峰的峰顶处,为了能检测出频率误差,需要对激光频率进行调制。假设调制后激光的输出频率为 $\omega' = \omega + A\sin(\Omega t)$,对应的吸收光谱线型函数为 $G(\omega')$ 。假设调制比较小,可以在 ω 处对光谱线型函数 $G(\omega')$ 作泰勒展开

$$G(\omega') = G(\omega) + G^{(1)}(\omega)A\sin(\Omega t) + \frac{1}{2!}G^{(2)}(\omega)A^2\sin^2(\Omega t) +$$

$$\frac{1}{3!}G^{(3)}(\omega)A^3\sin^3(\Omega t)\dots \quad (1)$$

原调制信号混频过后,光谱线型函数的一阶微分项被检测出来。在饱和吸收峰处一阶微分为 0,峰的左侧和右侧一阶微分的符号相反。具有这样性质的信号就可以当作误差信号来送入比例-积分(PI)控制器进行反馈控制,从而将半导体激光器频率锁定到某个饱和吸收峰上。

上面的分析只是一个便于理解的工程近似,精确的分析要把激光的输出光场用贝塞耳函数展开^[5]。并且 Rb 原子蒸气对通过的激光除了有吸收作用,还会有色散作用。对 PD 来说,色散和吸收产生的效应是正交的。在检测误差信号的时候,需要精细调整本振信号和光电管信号之间的相位差,使色散效应被平均掉,只提取出吸收效应。

3 稳频电路的实现

稳频电路主要包括两大块:检测频率误差信号的 FM_lock 模块和根据误差信号纠正激光器频率的 PI 控制器模块。

半导体激光锁频多数都用了一个商用的锁相放大器来做频率误差信号的检测^[6]。这种锁相放大器虽然技术成熟,但是它主要用于极微弱信号检测,体积大而且昂贵,不利于系统集成,用在半导体激光稳频上太浪费。由于商用锁相放大器一般工作频率都很低,容易受低频噪声的干扰,也无法抑制激光管的高频相位噪声。本文采用的是一种全模拟的射频调制方法,电路原理框图如图 3 所示。

目前国内报道的半导体激光稳频系统^[7,8]都是用低频调制,这样的系统无法检测出激光频率的快速变化部分,只能解决长期稳定性问题。参考了文献^[9]的工作,本文采用 21.4 MHz 的射频来作调制信号,并且直接在 FM_lock 模块上实现了一个晶体

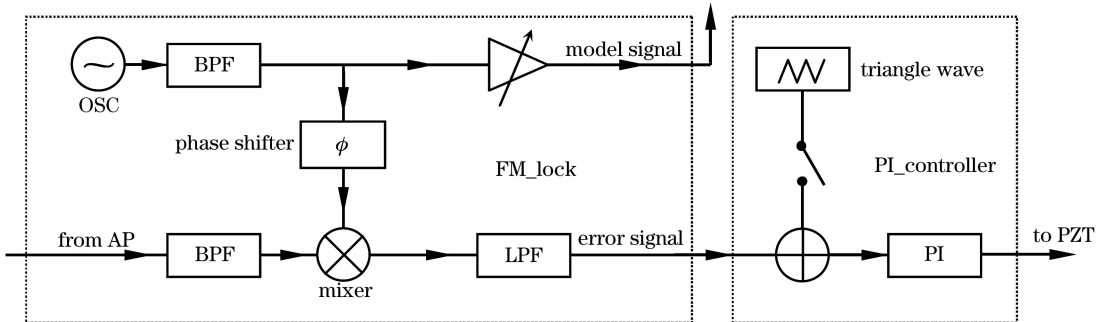


图 3 RM_lock 和 PI_controller 模块的原理框图

Fig. 3 Schematic of FM_lock and PI_controller modules

振荡器, 抛弃了外置商用信号源的做法。该振荡器电路为典型的电容三点式晶体振荡器, 如图 4 所示。带通滤波器 (BPF) 将不需要的谐波去除, phase shifter 由两个最大相移为 180° 的压控移相器组成, 为美国 Mini-circuits 公司的产品, 型号为 JSPHS-26。这样就可以在 360° 范围内连续地调整本振信号和光强信号之间的相位差, 使得它们经过 mixer 混频之后得到的误差信号幅度最大, 并且色散效应最小。mixer 采用的是一种具有 DC 中频输出的双平衡二极管混频器。低通滤波器 (LPF) 滤除由混频器产生的高次谐波, 得到干净的误差信号。采用 21.4 MHz 射频调制的好处是避开了低频的强噪声, 同时也提高了误差信号的检测带宽, 利于稳频。

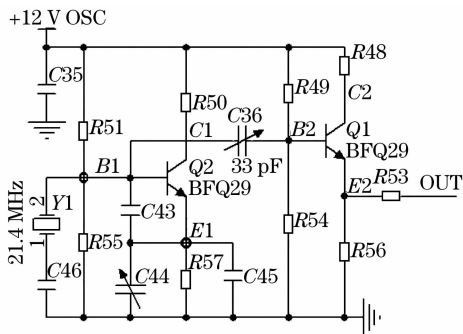


图 4 晶体振荡器电路

Fig. 4 Schematic of the RF oscillator

PI 控制器是一个功能较完整的模块, 在其他场合也会经常用到, 没有集成到误差检测模块 FM_lock 中。

这样, 除了高压放大和光电探测器之外, 锁频所需要的电子学部分就全都集成到了 FM_lock 和 PI 两个 $10\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ 大的模块上。为了进行电磁干扰屏蔽, 并且便于安装和使用, 专门设计了一个 3U 的电子学机箱来安放这些锁频模块。一个机箱有 14 个槽, 可以安装 7 套这样的锁频系统, 对 7 台外延腔半导体激光器进行稳频。图 5 是 3U 机箱和模块的实物图。

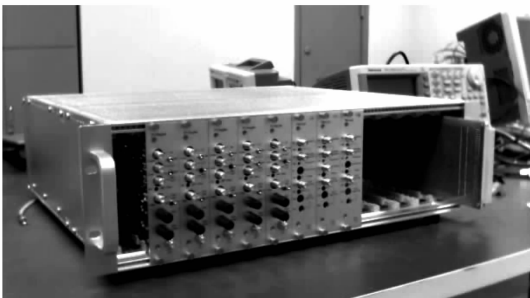


图 5 锁频系统实物图

Fig. 5 Picture of frequency locking system

4 实验结果

将 PI 反馈关闭, 启动扫描电路并把扫描电压调到最大, 慢慢调整光栅转角, 直到示波器上出现若干多普勒展宽的吸收峰。选其中 $F_g = 2$ 的吸收峰, 减小扫描电压范围, 直到出现明显的饱和吸收峰。结果如图 6 所示 (从示波器拷屏得到)。在图 6 中, 最上面的信号是经过 Rb 饱和吸收池后的光强信号 (饱和吸收谱), 中间是 FM_lock 给出的误差信号, 最下面是 PZT 的扫描电压信号 (三角波)。由图 6 可以看出, 6 条饱和吸收峰的误差信号清晰可见。

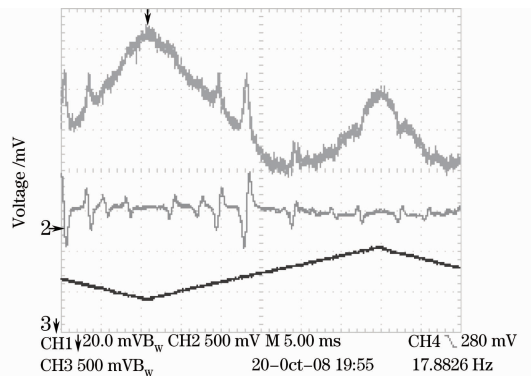


图 6 Rb 原子饱和吸收光谱

Fig. 6 Saturated absorption spectroscopy of rubidium atoms

图 7 显示的是系统处于锁定状态时, 受到一个外界的强干扰后的情况。上方的直线还是经过铷饱和和吸收过后的光强信号。光强是一条直线表明激光的频率被锁到了某个频率上, 在本系统中是锁在某个饱和吸收峰上。图 7 下方显示的是处于锁定状态的误差信号。可以看到当系统受到一个强干扰时, 误差信号有很大的波动。但干扰消失后系统仍能锁在设定的频率上。

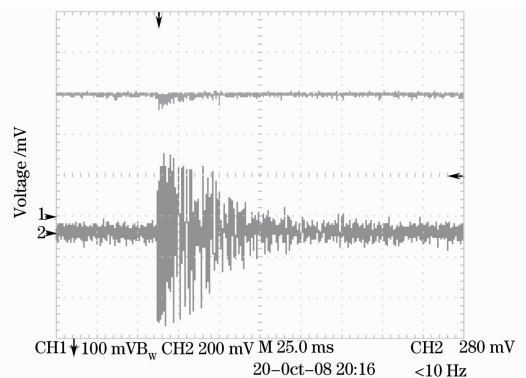


图 7 频率锁定情况下系统对强干扰的恢复能力

Fig. 7 Recover performance of the locking system against a strong interference

5 结 论

21.4 MHz 射频调制信号的使用,提高了系统的锁频性能。嵌入调制信号源的设计,提高了系统集成度,降低了成本。由于采用了集中安装、集中供电、集中屏蔽的做法,各个部分之间的信号连接保持了很好的信号完整性以及很好的抗干扰能力,得到了很好的效果,可应用于较复杂的冷原子实验。

在数字电路和模数混合电路全面发展的今天,如果把数字技术引入到激光稳频系统中,其灵活性和通用性会大大增加,且有望实现自动寻谱、锁频、报警、远程控制,实验过程中的各种参数和状态都可以很方便地采集和保存,利于以后分析之用。

致谢 感谢海德堡大学的陈帅博士以及合肥微尺度物质科学国家实验室的金贤敏博士对本文提供的至关重要的帮助。

参 考 文 献

- 1 E. D. Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(1):79~87
- 2 Guan Hua, Huang Guilong, Huang Xueren *et al.*. Construction of the tunable diode laser based on Littrow configuration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):33~36
管 桦,黄贵龙,黄学人等. 基于 Littrow 结构的可调谐半导体激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):33~36
- 3 Chen Wenlan, Yuan Jie, Qi Xianghui *et al.*. Design of 780 nm external cavity semiconductor laser and higher harmonic frequency stabilization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):895~900
陈文兰,袁 杰,齐向晖等. 外腔半导体激光器设计与高次谐波稳频[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):895~900
- 4 S. Kraft, A. Deninger, C. Truck *et al.*. Rubidium spectroscopy at 778~780 nm with a distributed feedback laser diode [J]. *Laser Physics Letters*, 2005, **2**(2):71~76
- 5 G. C. Bjorklund, M. D. Levenson, W. Lenth *et al.*. Frequency modulation (FM) spectroscopy: theory of line shapes and signal-to-noise analysis [J]. *Appl. Phys. B: Photophys. Laser Chem.*, 1983, **32**:145~152
- 6 Dong Lei, Ma Weiguang, Yin Wangbao *et al.*. Frequency stabilization of an external cavity diode laser based on LabVIEW [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(3):255~258
董 磊,马维光,尹王保等. 基于 LabVIEW 的外腔二极管激光器稳频实验[J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(3):255~258
- 7 Zhou Shuyu, Zhou Shanyu, Wang Yuzhu. Computer sampling error signal control output voltage to stabilize frequency of the Ti:sapphire laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):9~11
周蜀渝,周善钰,王育竹. 计算机采样-输出实现钛宝石激光器稳频[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):9~11
- 8 Zhang Jing, Tao Hua, Wei Dong *et al.*. A laser diode system stabilized on the saturated absorption lines of rubidium atoms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2):197~201
张 靖,陶 桦,卫 栋等. Rb 原子饱和吸收稳频半导体激光器系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2):197~201
- 9 Zhao Jianming, Yin Wangbao, Zhao Yanting *et al.*. Frequency locking of a semiconductor laser via radio-frequency modulation spectrum [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):935~938
赵建明,尹王保,赵延霆等. 采用射频频率调制光谱实现半导体激光器的稳频[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):935~938