

锁频点连续可调的激光器稳频技术

刘 强^{1,2} 张军海¹ 曾宪金¹ 黄宗军¹ 孙伟民¹

(¹哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)
(²东北石油大学电子科学学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要 实现了利用铯原子圆二向色性激光稳频(DAVLL)技术保证频率的非共振锁定并连续可调。介绍了 DAVLL 技术用于稳定激光频率的基本原理,指出由于 Cs 原子复杂的能级结构,导致简单的 DAVLL 技术此处不再适用,并且发现稳频曲线的零点与磁场强度的大小有关;利用饱和吸收光谱测量磁场对 DAVLL 谱线鉴频零点的影响,发现激光频率在以 $F_g=4 \rightarrow F_e=5$ 跃迁红失谐 105 MHz 为中心 50 MHz 范围内线性可调,频率稳定度可达 3 MHz。

关键词 激光器;二向色性激光稳频;连续可调;塞曼效应;激光稳频;Cs 原子

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.101405

Continuously Tunable and Frequency-Stabilized Laser

Liu Qiang^{1,2} Zhang Junhai¹ Zeng Xianjin¹ Huang Zongjun¹ Sun Weimin¹

(¹College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
(²College of Electronic Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract The paper proves that dichroic atomic vapor laser lock (DAVLL) can ensure that the laser frequency be locked nonresonantly and adjusted continuously, because cesium magnetometer needs a detecting laser to be locked off-resonantly. The ordinary DAVLL theory is introduced and it is pointed out the simple stabilizing frequency method is not appropriate due to cesium complicated energy level construction of hyperfine transition. It's found out that the zero point of frequency discrimination is relative to the intensity of magnetic field. The dependence of zero crossing on the magnetic intensity experimentally measured by the saturated absorption spectrum. The results show that the laser frequency can be locked and adjusted continuously centered at red-detuning 105 MHz relative to the $F_g=4 \rightarrow F_e=5$ transition with a range of 50 MHz. The frequency stability is about 3 MHz.

Key words lasers; dichroic atomic vapor laser lock; continuous adjusting; Zeeman effect; laser frequency stabilization; Cs atom

OCIS codes 140.2020; 140.1340; 300.6210; 300.6260

1 引 言

由于半导体激光器具有体积小,质量轻,功耗低等优点,自 20 世纪 70 年代问世以来,得到了迅速的发展,其性能的不断提高,并在冷原子实验、相干布局囚禁、原子钟、原子磁力仪等领域得到广泛的应用,因而对其频率稳定性提出了更高的要求^[1~3]。在原子磁力仪、原子钟及激光冷却等领域需要对检测激光进行 D2 线非共振锁定^[4~6],一般分两步进行,首先将激光频率共振锁定,如采用饱和吸收谱技术、消多普勒极化谱技术和消多普勒 DAVLL 技术,将激光器的频率锁定在原子超精细共振线处^[7];然后再通过声光调制器(AOM)进行移频,此时不但需要搭建光谱,而且还需要微波信号对声光晶体进行折射率调制,光路复杂。

收稿日期: 2012-06-04; **收到修改稿日期**: 2012-07-06; **网络出版日期**: 2012-08-20

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2008DFR20420)和哈尔滨工程大学基础研究基金(HEUCF20101111)资助课题。

作者简介: 刘 强(1980—),男,博士研究生,讲师,主要从事半导体激光器、原子磁力仪等方面的研究。

E-mail: liuqiang38074517@126.com

导师简介: 孙伟民(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、弱磁检测等方面的研究。

E-mail: sunweimin@hrbeu.edu.cn

本文指出了在一些对激光线宽和激光频率稳定性要求不是特别高的场合,采用单纯的 DAVLL 技术反而更为方便灵活,可以保证激光频率锁定并在一定范围内连续可调,且具有结构简单的优点。首先介绍 DAVLL 技术用于激光稳频的基本原理,指出由于铯原子具有复杂的超精细能级结构,此处简单的 DAVLL 理论不再适用,理论分析显示稳频曲线零点与磁场强度大小相关;然后利用饱和吸收光谱测量了磁场对 DAVLL 谱线鉴频零点的影响,发现激光频率在以 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 5$ 跃迁红失谐 105 MHz 为中心 50 MHz 范围内线性可调。

2 原理

对 DAVLL 技术的解释一般采用 $F_g = 1 \rightarrow F_e = 0$ 跃迁的二能级模型,如图 1(a)所示。在磁场中原子基态能级因塞曼效应会产生分裂及移动,频移量为 $g\mu B$,其中 g 、 μ 和 B 分别为朗德因子、玻尔磁子和磁感应强度。由于塞曼效应,导致线偏振光的圆偏振成分 σ^+ 和 σ^- 所感受的共振频率不同,其透射谱 χ_+ 和 χ_- 如图 1(b)所示,其中横坐标 Δ 代表频率的相对失谐。与原子相互作用后,两圆偏振成分的吸收损耗不同,则其差值满足

$$\Delta I \propto \exp(-\kappa_+ L) - \exp(-\kappa_- L), \quad (1)$$

式中 κ_+ 和 κ_- 分别为表示左旋和右旋圆偏振光的吸收系数, L 为激光与原子相互作用的长度。 ΔI 随激光频率变化的值曲线具有类色散谱线的特点,如图 1(c)所示^[8]。因此利用该类色散谱线,不需要任何调制信号,就可以实现激光稳频^[9,10],而磁场强度的大小只会影响此色散曲线零点处的斜率,与零点处的频率无关。

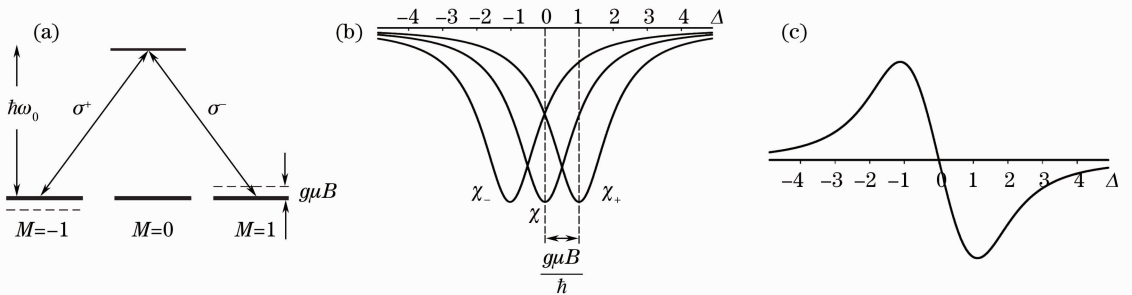


图 1 DAVLL 的基本原理。(a)二能级模型;(b)透射谱;(c)类色散谱

Fig. 1 Principle of DAVLL. (a) Two level model; (b) transmission spectrum; (c) types of dispersion spectrum

由于 Cs 原子具有复杂的能级结构,在常温下 D2 线 $F_g = 4$ 谱线的激发态是由 3 组不可分辨的超精细谱线叠加而成的,因此简单的 DAVLL 模型在此不再适用。考虑到与 Cs 原子 D2 线 $F_g = 4$ 跃迁相关的超精细能级在磁场中的塞曼效应,每个超精细能级将分裂成 $2F+1$ 个塞曼子能级,并且根据 Breit-Rabi 公式每个塞曼子能级会产生移动,左旋圆偏振光和右旋圆偏振光对应的共振频率不同,因此 Cs 原子从基态 F_g 到激发态 F_e 的跃迁,其左旋和右旋圆偏振光的吸收系数 $\chi_{F_g^\pm}^{F_e}$ 可表示成^[11]

$$\chi_{F_g^\pm}^{F_e}(\nu) = \sum_{m=-F_g}^{m=F_g} \epsilon_{F_g^\pm, m}^{F_e, m\pm 1} \cdot N \cdot \pi \cdot r \cdot c \cdot f \frac{2}{\Delta\nu_D} \cdot \left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{1/2} \cdot \exp\left[-\frac{4\ln 2 \cdot (\nu - \nu_{F_g^\pm, m\pm 1}^{F_e})^2}{\Delta\nu_D^2}\right], \quad (2)$$

式中,最后一项为多普勒加宽的线型, $\Delta\nu_D$ 为谱线的多普勒增宽, r 为电子半径, c 为光速, f 为 Cs 原子 D2 线振子强度, N 为 Cs 原子数密度, $\nu_{F_g^\pm, m}^{F_e, m\pm 1}$ 和 $\epsilon_{F_g^\pm, m}^{F_e, m\pm 1}$ 分别代表 $|F_g, m\rangle \rightarrow |F_e, m\pm 1\rangle$ 跃迁的共振跃迁频率和相对跃迁几率。由于激发态超精细结构的不可分辨性,原子对线偏振光的左旋和右旋圆偏振光总的吸收系数为

$$\chi_{\pm}(\nu) = \sum_{F_e=F_g-1, F_g, F_g+1} \chi_{F_g^\pm}^{F_e}(\nu). \quad (3)$$

把(3)式代入(1)式,即可得到差值信号随频率变化的曲线,即用于激光稳频的类色散线型光谱。图 2 为磁场强度在 1×10^{-2} T 时仿真得到的 DAVLL 光谱。可以看出发现此时鉴频谱线零点的位置是磁场强度的函数,在图 3 计算了在不同磁场强度情况下 DAVLL 谱线零点与磁场的关系曲线,以 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 5$ 为频率参考点。因此,可以通过改变磁场强度来调节激光器的锁频位置。

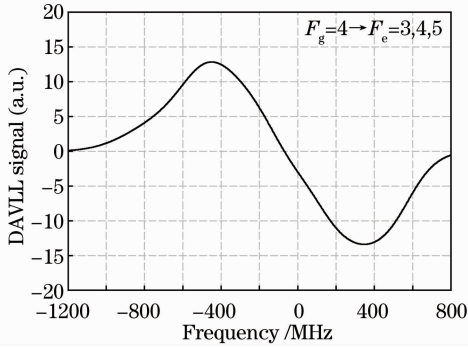


图2 DAVLL光谱

Fig. 2 DAVLL signal

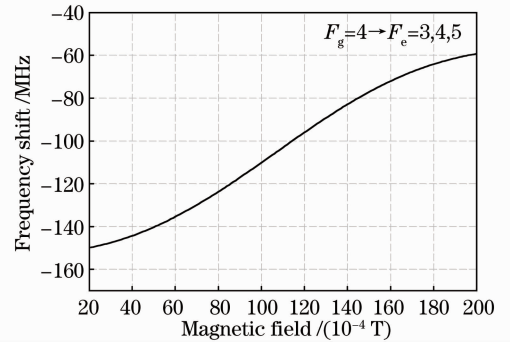


图3 鉴频曲线零点随磁场的变化曲线

Fig. 3 Zero point of distinguishing frequency as function of magnetic intensity

3 实验装置

为验证理论分析的准确性,实际搭建了如图4所示的实验系统。光源采用DFB852.3 nm 半导体激光器,线宽小于10 MHz,长为30 mm的Cs泡置于亥姆霍兹线圈的中心,通过调节线圈的电流改变气室周围磁场,利用毫特斯拉计监测磁场值。激光经准直透镜和小孔光阑后成为准直光束,被半透半反镜分成两束,一束用来搭建饱和吸收光谱作为频率参考;另一束经过偏振棱镜a和b照射Cs泡,两个偏振棱镜的作用是控制入射光的光强和偏振态,射入Cs泡的光强约为 $0.6 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。然后经 $\lambda/4$ 波片和偏振棱镜(PBS)分成两束,其中 $\lambda/4$ 波片的快轴和PBS夹角为 $\pi/4$,采用光电二极管将光信号转换成电信号,两路电信号直接做差后送入示波器,并与饱和吸收谱信号同步采集。

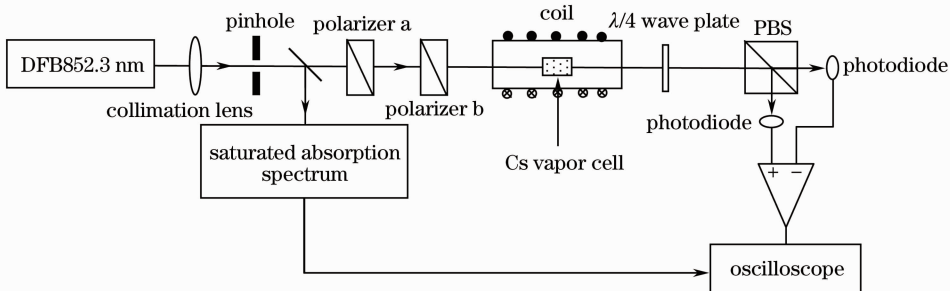


图4 实验装置图

Fig. 4 Experimental system

4 结果与讨论

在 $B=1 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的情况下测量了 $F_g=4$ 线跃迁的DAVLL光谱,如图5所示。图中同时给出了饱和吸

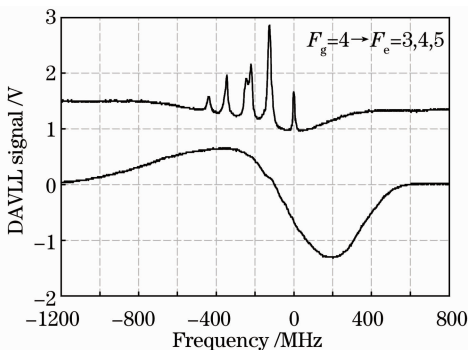


图5 实验测量得到的DAVLL谱线

Fig. 5 Experimental spectrums of DAVLL

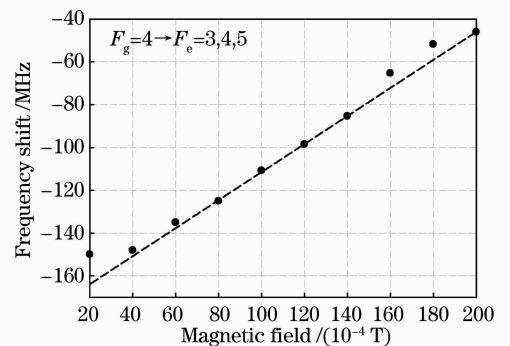


图6 零点失谐频率与磁场关系

Fig. 6 Relation between frequency shift and magnetic field

收谱,以便比较谱线零点的频率移动。实验结果表明,DAVLL 光谱具有非对称性,这是因为 $F_g=4$ 跃迁是由 3 组超精细跃迁叠加而成,并且每组超精细跃迁 DAVLL 光谱的零点位置与原子超精细能级结构有关,这样叠加以后形成了非对称性。

由于每个激发态能级的朗德因子不同,因此塞曼效应引起每个超精细跃迁零点处斜率不同,3 个跃迁叠加的结果导致色散曲线零点随磁场强度产生移动,进一步实验测量零点随磁场强度的变化关系,如图 6 所示。数据显示随着磁场的增加,鉴频零点向高频方向移动,且鉴频零点的移动与场强具有很好的线性关系,满足:

$$f_{\text{detuning}}(B) = -177 + 0.66 \times B, \quad 0.8 \times 10^{-2} \text{ T} \leq B \leq 1.4 \times 10^{-2} \text{ T}. \quad (4)$$

频率调谐范围为 $-150 \sim -40$ MHz,达到 110 MHz 带宽的频率锁定,在 $-130 \sim 80$ MHz 内与磁场基本成线性关系,即实现了锁定激光的频率在范围内线性可调。

为考察 DAVLL 技术可实现的激光频率稳定度,测量了不同磁场时色散曲线零点处的斜率,如图 7 所示。可知当磁场强度为 1.4×10^{-2} T 时,色散曲线零点处斜率的绝对值最大,为 0.0064 V/MHz,是稳频的最佳磁场。同时,如图 5 所示 DAVLL 光谱的时域噪声约为 0.02 V,因此在仅考虑 DAVLL 光谱时,激光器频率稳定度可达 3 MHz。

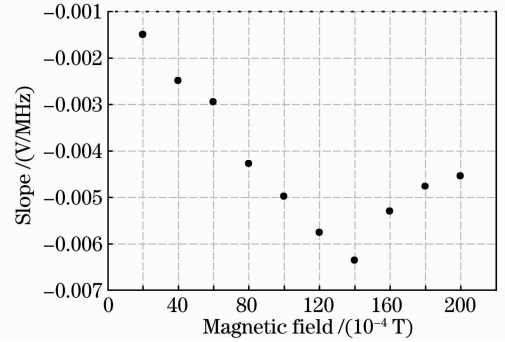


图 7 不同磁场下的色散曲线零点斜率

Fig. 7 Slope of zero crossing point at different magnetic field

5 结 论

指出了铯原子圆 DAVLL 技术可以保证频率的非共振锁定并连续可调。介绍了 DAVLL 锁频技术的基本原理,指出对具有复杂超精细结构的铯原子而言,简单的二能级模型不再适用,并根据铯原子超精细能级结构,计算 DAVLL 光谱,发现鉴频零点与所加磁场的大小有关。利用饱和吸收光谱实验测量了铯原子 D2 线所包含的 $F_g=4$ 跃迁光谱鉴频零点与磁场的变化关系,结果表明,激光频率在以 $F_g=4 \rightarrow F_e=5$ 跃迁红失谐 105 MHz 为中心 50 MHz 范围内线性可调,频率稳定度可达 3 MHz,所得结论将对研究半导体激光器在原子磁力仪上的应用提供。

参 考 文 献

- 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
- K. Deng, T. Guo, J. Su *et al.*. Full hyperfine frequency modulation in the implementation of coherent population trapping atomic clocks[J]. *Phys. Lett. A*, 2009, **373**(12): 1130~1132
- C. Hovde, B. Patton, E. Corsini *et al.*. Sensitive optical atomic magnetometer based on nonlinear magneto-optical rotation [C]. *SPIE*, 2010, **7693**: 769313
- J. M. Higbie, E. Corsini. Robust, high-speed, all-optical atomic magnetometer [J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2006, **77**(11): 113106
- P. D. Kunz, T. P. Heavner, S. R. Jefferts. A simplified laser and optical system for laser-cooled Rb fountain frequency standards[C]. 39th Annual precise time and time interval (PTTI) meeting, 2007. 291~295
- E. E. Mikhailov, T. Horrom, N. Belcher *et al.*. Performance of a prototype atomic clock based on lin || lin coherent population trapping resonances in Rb atomic vapor[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(3): 417~422
- M. L. Harris, S. L. Cornish, A. Tripathi *et al.*. Optimization of sub-Doppler DAVLL on the rubidium D2 line[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2008, **41**: 085401
- K. L. Corwin, Z. T. Lu, C. F. Hand *et al.*. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15): 3295~3298
- M. A. Clifford, G. P. T. Lancaster, R. S. Conroy *et al.*. Stabilization of an 852 nm extended cavity diode laser using the

- Zeeman effect[J]. *J. Mod. Opt.*, 2000, **47**(11): 1933~1940
- 10 V. V. Yashchuk, D. Budker, J. R. Davis. Laser frequency stabilization using linear magneto-optics[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2000, **71**(2): 341~346
- 11 S. I. Kanosky, A. Weis, J. Wurster *et al.*. Quantitative investigation of the resonant nonlinear Faraday effect under conditions of optical hyperfine pumping[J]. *Physics Review A*, 1993, **47**(2): 1220~1226