

文章编号: 0253-2239(2009)02-0425-06

# 采用偏振光谱对外腔半导体激光器 稳频时反馈环路带宽的影响

王 婧 杨保东 何 军 赵江艳 张天才 王军民

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西, 太原 030006)

**摘要** 在采用磁光阱实现单个铯原子俘获的实验中, 运用无调制偏振光谱方法将光栅外腔半导体激光器(提供冷却/俘获光)的频率锁定在铯原子  $6S_{1/2}F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}F' = 5$  的超精细跃迁线上。采用偏振光谱技术得到的类色散曲线作为鉴频信号, 并同时对外腔半导体激光器的电流调制端口和光栅外腔的压电陶瓷电压调制端口进行反馈, 以拓展反馈环路的带宽, 实现激光器的频率锁定。与通常的饱和吸收光谱稳频技术相比, 激光频率锁定之后的频率稳定度得到了明显改善。在取样时间  $\tau = 300$  s 时, 阿仑方差  $\sigma_y(\tau) = 4.6 \times 10^{-12}$ 。

**关键词** 外腔半导体激光器; 偏振光谱; 稳频; 反馈环路带宽; 单原子磁光阱

**中图分类号** TN248.4; TN249; O433.5<sup>+</sup>2; O526.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0425

## Influence of the Bandwidth of Feedback Loop in Frequency Stabilization of External-Cavity Diode Laser by Polarization Spectroscopy

Wang Jing Yang Baodong He Jun Zhao Jiangyan Zhang Tiancai Wang Junmin

(State Key Laboratory of Quantum optics and Quantum Optics Devices, and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** Based on the experiment of trapping single cesium atoms in magneto-optical trap (MOT), a grating-external-cavity diode laser, which provides the cooling/trapping beams of MOT is locked to cesium  $6S_{1/2}F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}F' = 5$  cycling transition by modulation-free polarization spectroscopy. This frequency locking method uses the dispersion-like curve generated from polarization spectroscopy as frequency-discriminating signal. The error signal is feedback to both current modulation port of diode laser and voltage modulation port of piezoelectric transducer (PZT) in grating external cavity. The locking technique of modulation-free polarization spectroscopy can clearly improve the frequency stability compared with conventional saturation absorption spectroscopic technique. The minimum value of Allan variance is  $\sigma_y(\tau) = 4.6 \times 10^{-12}$  at average time of  $\tau = 300$  s.

**Key words** external-cavity diode laser (ECDL); polarization spectroscopy; laser frequency stabilization; bandwidth of feedback loop; single-atom magneto-optical trap

## 1 引 言

频率稳定的半导体激光器是激光光谱、原子分子物理、量子光学等领域的实验工作中不可缺少的光源。通常选择参考腔的共振频率或原子分子的跃迁频率作为标准进行频率锁定。传统的饱和吸收谱

技术, 需要对激光器引入频率调制, 并通过相敏探测产生类色散型的鉴频曲线, 这种频率调制会给激光器的频率和强度引入额外的噪声。1976 年 Wieman 和 Hansch 提出了偏振光谱这种亚多普勒光谱方法<sup>[1]</sup>。1988 年 Kim 等运用偏振光谱技术在

**收稿日期**: 2008-03-21; **收到修改稿日期**: 2008-09-16

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(60578018, 10434080, 60821004)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0524)、国家重大研究计划课题(2006CB921102)、高等学校博士点专项(20070108003)、山西省自然科学基金项目(2007011003)以及山西省回国留学人员基金资助课题。

**作者简介**: 王 婧(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事量子光学与冷原子物理方面的实验研究。E-mail: jing1031@gmail.com

**导师简介**: 王军民(1967-), 男, 博士, 教授, 主要从事量子光学和冷原子物理方面的研究工作。

E-mail: wwjmm@sxu.edu.cn(通信联系人)

抽运光强度相对较弱的情形下得到类色散型信号,用此来实现对钠原子超精细结构  $D_1$  线激光频率的锁定<sup>[2]</sup>。相比于饱和吸收光谱,偏振光谱可以消除由于线性吸收引起的多普勒背景展宽,也不需要激光频率进行扰动,因而无需进行相敏探测,因而已被较为广泛地应用于激光频率锁定<sup>[3~9]</sup>。

为了开展单原子量子态相干操控方面的研究<sup>[10]</sup>,运用激光冷却和俘获技术在磁光阱中制备单个铯原子<sup>[11]</sup>。在原子数极少的情况下,即使采用近共振光激发,原子自发辐射的荧光信号依然很弱,因而提高信噪比成为关键问题;由于冷却俘获光以及反抽运光始终存在,而此时真空气室中的背景铯原子将激光频率起伏转换成了荧光信号强度的起伏,最终同单原子荧光信号一起进入了探测器,降低了信噪比。为提高信噪比,要求用作单原子磁光阱冷却/俘获光源的激光器须具有较高的稳定性。采用自制的光栅外腔半导体激光器用作冷却/俘获光源,前期实验中,先采用饱和吸收光谱结合调制相敏探测方案,借助于光栅外腔压电陶瓷进行锁定。锁定后单原子荧光记数信号的信噪比仍不理想。为了解决这一问题,运用无调制偏振光谱的方法进行稳频,并将偏振光谱得到的纠偏信号分成两路,一方面经过电子学负反馈回路加在激光器光栅外腔压电陶瓷的电压调制端口上对近 2 kHz 量级以下的噪声起到抑制的作用,另一方面直接加在激光器的电流调制端口以抑制高频(近 200 kHz 量级)噪声,拓展了反馈环路的带宽。利用无调制偏振光谱技术结合快慢反馈通道稳频后,阿仑方差较之调制相敏探测的饱和吸收谱方法得到了显著改善,使单原子磁光阱中单原子荧光记数信号的信噪比得到了明显提高。

## 2 实验原理及实验装置

铯原子偏振光谱装置中,一束较弱的线偏振探测光穿过铯原子气室,另一束较强的圆偏振抽运光与探测光重叠反向穿过气室,二者来自于同一台激光器。设探测光传播方向为  $z$  轴。若无圆偏振抽运光时,铯原子将均匀地布居在基态不同的 Zeeman 态。若圆偏振抽运光穿过气室时,由于不同 Zeeman 态之间的 Clebsch-Gordan(CG)系数不同(如图 1),圆偏振抽运光将使得基态各个 Zeeman 态上铯原子的布居数不再对称,这就是所谓的 Zeeman 态光抽运过程。从图 1 可知铯原子  $6S_{1/2} F = 4, m_F = -4 \rightarrow 6P_{3/2} F' = 5, m_{F'} = -5$  跃迁和  $6S_{1/2} F = 4, m_F = +4 \rightarrow 6P_{3/2} F' = 5, m_{F'} = +5$  跃迁的 CG 系数最大,即跃迁几率最大。如果抽运光为  $\sigma^+$  圆偏振,则经过一定作用时间后,铯原子会被  $\sigma^+$  圆偏振的抽运光抽运到  $F = 4, m_F = +4$  态上。原子在基态 Zeeman 态上布居数的不对称,将导致原子介质的各向异性,表现为处于不同 Zeeman 态上的原子对于  $\sigma^+$  圆偏振光和  $\sigma^-$  圆偏振光的吸收不同<sup>[12~14]</sup>。线偏振探测光可理解为一个  $\sigma^+$  圆偏振光和一个  $\sigma^-$  圆偏振光按固定相位差的叠加,当线偏振探测光穿过铯原子气室,由于  $\sigma^+$  圆偏振抽运光的 Zeeman 态光抽运效应,探测光中  $\sigma^-$  圆偏振光分量的吸收较  $\sigma^+$  圆偏振光分量的吸收要弱。两者在铯原子气室中传播的速度也不同,导致两个圆偏振光分量的相位差发生变化,最终使探测光的偏振发生旋转。这样线偏振光在经过铯原子气室后,通过  $\lambda/2$  波片和偏振分光棱镜(PBS)将探测光分解到两个相互垂直的偏振方向上,通过差分探测器对两路光进行探测,所得到的类色散信号(偏振光谱)即可作为激光器稳频的鉴频曲线。

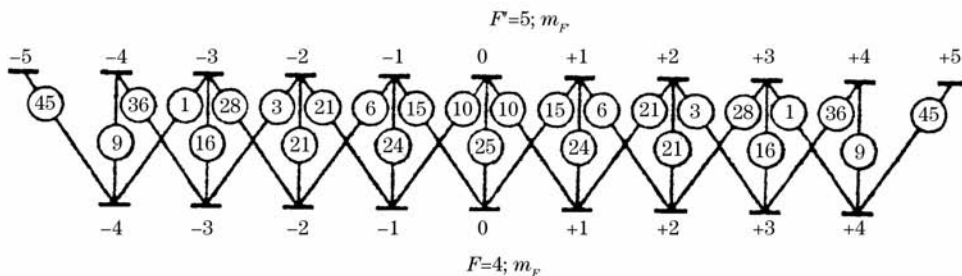


图 1 铯原子  $6S_{1/2} F = 4$  和  $6P_{3/2} F' = 5$  的各 Zeeman 态之间的 CG 系数

Fig. 1 CG coefficients among Zeeman sublevel of cesium  $6S_{1/2} F = 4 \rightarrow 6P_{3/2} F' = 5$  transition

实验装置如图 2 所示其中 ECDL 为光栅外腔半导体激光器, OI 为光隔离器, PBS 为偏振分光棱镜, BS 为 50/50 分束片, DPD 为差分光电探测器,

PI 为比例积分放大器, P 为比例放大器, PZT 为压电陶瓷, HV 为高压放大器, IMOD 为电流调制端口。图中实线表示光路部分, 点线表示电路部分。

使用的激光器为自制的光栅外腔半导体激光器 (Grating external-cavity diode laser, ECDL)。其中所用的激光二极管为 JDSU 公司生产的 5411-G1 型 GaAlAs 量子阱激光二极管, 标称输出功率为 100 mW@120 mA。采用 Newport 公司生产的 325 型控温仪将激光二极管和外腔底座的温度控制在室温附近, 精度为 5 mK。采用自制的电流可在 0~200 mA 调节的低噪声恒流源驱动, 电流噪声约 20  $\mu$ A。恒流源设有电流调制端口, 测得其带宽约直流到 200 kHz。采用 1800 line/mm、衍射效率为 12% 的全息型闪耀光栅作为外腔反馈元件, 工作在 Littrow 方式, 使用柱状压电陶瓷经低噪声高压直流放大器 (Thorlabs MDT-694) 驱动来调节光栅外腔以连续调节激光频率。光栅外腔的压电陶瓷本身的响应带宽约为直流到 10 kHz, 但由于光栅及其机械调节机构的影响, 光栅外腔的整体带宽约为直流到 2 kHz。ECDL 输出 852 nm 的激光首先经过

整形棱镜对 (未在图 1 中画出) 整为接近圆光斑, 之后经过 40 dB 的光学隔离器抑制光反馈的影响, 绝大部分功率的光束经适当的频率变换用作单原子磁光阱的冷却/俘获光, 分出一部分用作偏振光谱。 $\lambda/2$  波片和 PBS 组成的功率调节系统中, 可以通过旋转  $\lambda/2$  波片, 来调整 PBS 后  $s$  偏振和  $p$  偏振光的功率比例。将透射出 PBS 的线偏振光作为探测光通过直径为 20 mm、长度为 30 mm 的铯泡; 反射出的  $s$  偏振光通过一个  $\lambda/4$  波片变换为圆偏振光作为抽运光。抽运光通过 50/50 分束片反射进入铯泡, 与探测光重合。探测光透射出 BS 的部分进入探测系统。分别将透射及反射出的线偏振光输入差分探测器中, 转化为电信号并作减法运算。输出的差分信号可作为鉴频曲线。将纠偏信号一分为二, 一路通过比例积分放大器加在控制激光器光栅外腔的压电陶瓷的高压放大器上; 另一路通过比例放大器加在激光器的电流调制端口。

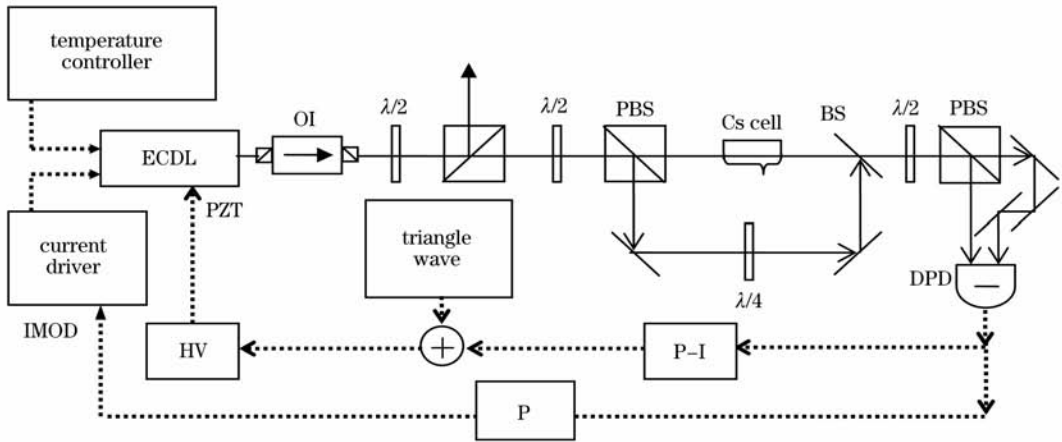


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

### 3 实验结果及讨论

图 3 为铯原子  $D_2$  线  $6S_{1/2} F = 4 \rightarrow 6P_{3/2} F' = 3$ 、4、5 跃迁的饱和吸收谱以及相对应的偏振光谱。实验中选取  $6S_{1/2} F = 4 \rightarrow 6P_{3/2} F' = 5$  超精细跃迁作为参考频率。 $F = 4 \rightarrow F' = 5$  超精细跃迁处, 偏振光谱方法得到的类色散信号斜率为 1.47 MHz/V, 信噪比为 22, 作为稳频的鉴频曲线。较高信噪比的鉴频曲线有助于获得更好的稳频结果。调节直流偏置使频率锁定在鉴频曲线过零点处, 通过旋转偏振探测系统中的  $\lambda/2$  波片调节鉴频曲线的位相, 使锁频回路中产生负反馈。将扫描激光器光栅外腔压电陶瓷的三角波信号的幅度逐渐减小, 直至彻底关闭,

将纠偏信号的一路通过比例积分电路, 加到控制激光器光栅外腔压电陶瓷的高压放大器上; 另一路纠偏信号通过比例放大器加到激光器电流调制端口。

实验中采用阿仑方差来评价激光器锁频的效果。依次测量了激光器在自由运转时的阿仑方差 (图 4 中的方块点)、采用饱和吸收光谱锁频的阿仑方差 (图 4 中圆点), 以及采用无调制偏振光谱仅有电压调制端口有反馈的情况和电压及电流调制端口均有反馈的情况下锁频结果的阿仑方差 (图 4 中倒三角形点和正三角形点)。实验结果表明, 光栅外腔半导体激光器自由运转时, 取样时间  $\tau = 3$  s 时阿仑方差达到最小值  $\sigma_y(\tau) = 5.0 \times 10^{-10}$ , 随着取样时间的加长, 阿仑方差明显变大, 表明激光器自

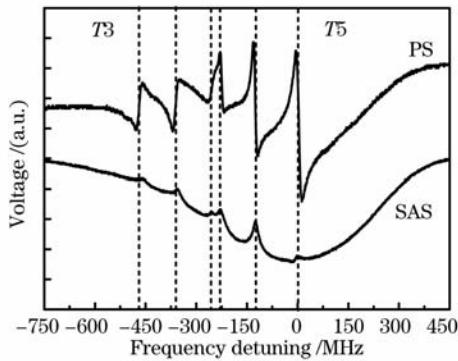


图3 铯原子  $6S_{1/2}F=4 \rightarrow 6P_{3/2}F'=3,4,5$  跃迁带有 Doppler 背景的饱和吸收谱 (SAS) 及由偏振光谱 (PS) 得到的相应跃迁线的鉴频曲线。图中虚线依次对应铯原子 T3, C34, T4, C35, C45, T5 的频率。选择  $F=4 \rightarrow F'=5$  超精细跃迁 T5 作为参考频率

Fig. 3 Saturated absorption spectrum (SAS) of cesium  $6S_{1/2}F=4 \rightarrow 6P_{3/2}F'=3, 4, 5$  hyperfine transition with Doppler background and corresponding frequency-discriminating signal obtained from polarization spectra (PS). The dot lines correspond to the frequency of T3, C34, T4, C35, C45, and T5 transitions. We indicates the T5 ( $F=4 \rightarrow F'=5$ ) hyperfine transition as the reference frequency

由运转时激光频率的漂移较严重。采用常规的饱和吸收光谱结合调制相敏探测锁频时(图1中未画出饱和吸收装置和相敏探测所使用的锁相放大器部分),在取样时间  $\tau=300$  s 时,阿仑方差最小值为  $\sigma_y(\tau)=1.35 \times 10^{-11}$ 。与饱和吸收谱调制锁频的方法相比,无调制偏振光谱锁频的方法可以彻底消除频率调制对激光器带来的干扰,可提高激光器的频率稳定度,偏振光谱还可消除由于线性吸收引起的多普勒背景,可提高了信号的信噪比,同时具有更高的灵敏度。将偏振光谱所得的纠偏信号仅反馈到激光器的光栅外腔压电陶瓷的电压调制端口时,阿仑方差在取样时间  $\tau=100$  s 达到最小值  $\sigma_y(\tau)=7.5 \times 10^{-12}$ 。更进一步,测量了同时对电压和电流调制端口双环路反馈的锁频结果,阿仑方差进一步降低。取样时间  $\tau=300$  s 时,阿仑方差值最小值为  $\sigma_y(\tau)=4.6 \times 10^{-12}$ ,表明此时激光器的频率稳定度得到了显著的改善。这是由于压电陶瓷端口的响应频率范围在直流到 2 kHz,对于 2 kHz 以上的噪声没有抑制能力;而恒流源的电流调制端口的响应范围则在直流到 200 kHz 左右,带宽较宽,对频率较高的噪声仍有较好的抑制能力。

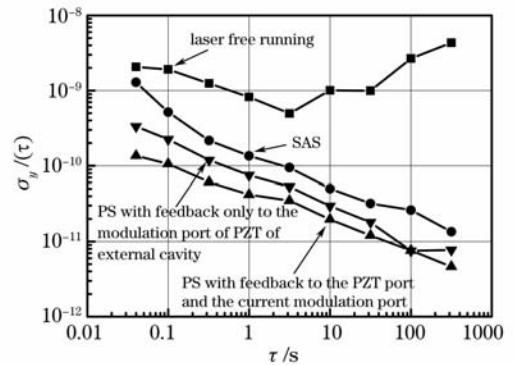


图4 激光器自由运转、饱和吸收光谱稳频以及偏振光谱稳频的阿仑方差

Fig. 4 Allan variances for free-running and frequency locked ECDL

#### 4 双环路反馈无调制偏振光谱稳频外腔半导体激光器在单原子磁光阱中的应用

利用磁光阱制备冷原子样品已成为很多原子分子物理以及量子光学实验工作的前提。借助于激光冷却与俘获技术来制备少数原子乃至单原子,可使其热运动降到极低水平,并可使原子几乎完全孤立(没有固体表面对原子所形成的复杂势场),可获得较长的相干控制时间,更利于在单原子水平上开展研究工作<sup>[10]</sup>。在实验中为了开展单原子量子态相干操控方面的研究,我们运用激光冷却和俘获的技术,在磁光阱中俘获并观测单个铯原子的荧光信号。在传统的气室磁光阱基础上,通过进一步提高背景真空度、缩小冷却与俘获激光束直径、加大轴向磁场梯度等措施,使磁光阱对原子的俘获率显著降低,从而可以实现少数原子乃至单原子在磁光阱中的冷却与俘获。

在单原子磁光阱实验中<sup>[11]</sup>,采用自制的光栅外腔半导体激光器用作冷却/俘获光源。典型的实验参数为:真空度约  $1 \times 10^{-8}$  Pa,磁光阱的四极磁场轴向磁场梯度  $dB/dz=29$  mT/cm,冷却/俘获光和反抽运光的光斑大小约为 2 mm,冷却/俘获光总光强约  $I \sim 80$  mW/cm<sup>2</sup>,冷却/俘获光相对于铯原子  $6S_{1/2}F=4 \rightarrow 6P_{3/2}F'=5$  超精细跃迁的失谐量  $\Delta=2\pi \times (-10)$  MHz。通过荧光收集系统以及单光子探测器观测磁光阱中单个铯原子的荧光信号。激光频率起伏会在很大程度上影响单原子荧光信号的信噪比。原子对于光场的散射率  $R_{sc}$  可表示为

$$R_{sc} = \frac{\Gamma}{2} \cdot \frac{I/I_s}{1 + I/I_s + 4(\Delta/\Gamma)^2},$$

式中  $\Gamma$  为原子上能态的自发辐射衰减率,  $I$  为激光强度,  $I_s$  为原子的饱和光强,  $\Delta$  为频率失谐。冷却/俘获激光的频率随时间的起伏, 可等效于冷却/俘获光的失谐量随时间在变化, 即使在光强不变的情况下也使原子对光场的散射率发生变化, 从而造成磁光阱中单原子荧光信号的起伏。另一方面, 磁光阱区域附近的背景铯原子对于冷却/俘获光也会有散射。尽管在探测系统的荧光收集透镜组中设置了合适的针孔光阑, 以滤除背景散射光, 但仍有部分背景散射光与单原子的荧光信号一同进入探测器, 造成了单原子荧光信号信噪比的降低。

在前期实验中, 先是采用常规的饱和吸收光谱结合调制相敏探测方案, 借助于光栅外腔压电陶瓷通道对激光频率进行锁定。一方面由于对机激光二极管的直接调制不可避免地带来了额外的激光频率起伏, 另一方面由于光栅外腔压电陶瓷通道的带宽仅为 2 kHz, 对更高频率的扰动所造成的频率起伏没有纠正能力, 因而 ECDL 激光频率锁定后, 频率的剩余起伏还是不够小, 导致单原子荧光记数信号的信噪比很差。锁定后平均时间为 300 s 时典型的阿仑方差为  $1.35 \times 10^{-11}$ , 参见图四中的圆点。而采用第三部分中所述的双环路反馈无调制偏振光谱稳频方案, 对 ECDL 激光系统进行稳频, 可以解决前述两方面的问题。因为无须引入对激光二极管的直接调制, 所以也就没有额外的频率起伏; 也因为光栅外腔压电陶瓷通道和恒流源的电流调制端口这样的双环路反馈, 所以使得整个稳频系统的带宽明显加大, 从而可纠正较高频率的扰动所造成的频率起伏。这一点从图四的实验数据对比中可得到证实。

实验中, 冷却/俘获光总光强约  $I \sim 80 \text{ mW/cm}^2$ , 激光频率相对于  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  超精细跃迁失谐量等于  $2\pi \times (-10) \text{ MHz}$  时, 单个铯原子对冷却/俘获光的散射率约为  $1.35 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 。采用饱和吸收光谱调制锁频方法将激光频率起伏稳定到 1 MHz 左右时, 光强保持不变的情况下, 对应的散射率起伏为  $5.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ , 起伏约为 4.1%。当采用偏振光谱无调制锁频方法将激光频率起伏稳定到 100 kHz 以下时, 光强保持不变的情况下, 引起的光子散射率起伏的上限值约为  $4.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ , 起伏上限约为 0.3%。显然, 若将激光器的典型剩余频率起伏约 1 MHz 改善到小于 100 kHz, 则单原子荧光信号的

信噪比预计可改善 12 倍左右。相关的实验工作正在进行中。

## 5 结论与讨论

基于磁光阱俘获单原子的实验, 为了进一步提高单原子荧光信号的信噪比, 采用偏振光谱无调制锁频方法, 对磁光阱的冷却俘获激光频率进行锁定。并且将鉴频信号分别反馈到激光器的电流调制端口和光栅外腔的压电陶瓷电压调制端口, 使激光器的频率起伏在更宽的频率范围内得到了较好的抑制。频率锁定后, 在取样时间  $\tau = 300 \text{ s}$  时, 阿仑方差最小值为  $\sigma_y(\tau) = 4.6 \times 10^{-12}$ 。这样的结果有利于提高单原子荧光信号的信噪比。进一步稳定激光器的频率起伏, 还需要从压窄激光器的线宽入手, 我们采用拍频方法测得激光器在 50 ms 时间尺度的线宽约为 500 kHz。相对于激光器锁定后的中心频率起伏小于 100 kHz, 激光器的线宽此时已成为制约单原子荧光信号的信噪比提高的主要因素。而将激光耦合到一个稳定的高精度度法布里-珀罗腔中, 应用快速反馈回路实现对激光频率的锁定, 可有效地压窄激光线宽。

## 参 考 文 献

- 1 C. Wieman, T. W. Hanch. Doppler-free laser polarization spectroscopy [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **36**(20): 1170~1173
- 2 J. B. Kim, H. J. Kong, S. S. Lee. Dye laser frequency locking to the hyperfine structure ( $3S_{1/2}F = 2 - 3P_{1/2}F = 2$ ) of sodium  $D_1$  line by using polarization spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(6): 417~419
- 3 M. Kozuma, M. Kourogi, M. Ohtsu *et al.*. Frequency stabilization, linewidth reduction and fine detuning of a semiconductor laser by using velocity-selective optical pumping of atomic resonance line [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(16): 1895~1897
- 4 G. P. T. Lancaster, R. S. Conroy, M. A. Clifford *et al.*. A polarization spectrometer locked diode laser for trapping cold atoms [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **170**(1): 79~84
- 5 Lu H B, Wang X C, Yan H M *et al.*. Frequency stabilization of a Ti:S laser using polarization spectrum line of  $^{85}\text{Rb}$  [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(6): 573~575  
卢洪斌, 王向朝, 鄢和明 等.  $^{85}\text{Rb}$  原子偏振光谱线稳频钛宝石激光器 [J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(6): 573~575
- 6 Ma J, Zhao Y T, Zhao J M *et al.*. Frequency stabilization of an external-cavity diode laser using polarization spectroscopy without frequency modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1605~1608  
马 杰, 赵延霆, 赵建明 等. 利用偏振光谱对外腔式半导体激光器实现无调制锁频 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1605~1608
- 7 Zhou S Y, Zhou S Y, Wang Y Z. 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 M. L. Harris, C. S. Adams, S. L. Cornish *et al.*. Polarization

- spectroscopy in rubidium and cesium [J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **73**(6): 062509
- 9 Wang J M, Yan S B, Wang Y H *et al.*. Modulation-free frequency stabilization of a grating-external-cavity diode laser by magnetically induced sub-Doppler dichroism in cesium vapor cell [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(3): 1168~1171
- 10 Wang J, He J, Zhang T C *et al.*. Preparation and optical manipulation of single atoms based on atom cooling and trapping [J]. *Physics*, 2008, **37**(2): 103~110  
王 婧, 何 军, 张天才等. 单原子冷却及光学操控的实验进展 [J]. *物理*, 2008, **37**(2): 103~110
- 11 Wang J, He J, Qiu Y *et al.*. Observation of single neutral atoms in a large-magnetic-gradient vapor-cell magneto-optical trap [J]. *Chinese Phys. B*, 2008, **17**(6): 2062~2065
- 12 C. P. Pearman, C. S. Adams, S. G. Cox *et al.*. Polarization spectroscopy of a closed atomic transition; applications to laser frequency locking [J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2002, **35**(24): 5141~5151
- 13 Jiang K J, Wang J, Tu X H *et al.*. Polarization spectra of Rb atoms and their application in laser frequency stabilization [J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 377~379
- 14 Yutaka Yoshikawa, Takeshi Umeki, Takuro Mukae *et al.*. Frequency stabilization of a laser diode with use of light-induced birefringence in an atomic vapor [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(33): 6645~6649