

基于 Cr 空心阴极放电的偏振光谱稳频技术

殷 聪¹ 钱 进¹ 张小平¹ 石春英¹ 王捍平¹ 黄声野²

(¹中国计量科学研究院, 北京 100013)
(²中国兵器装备研究院, 北京 100089)

摘要 在 Cr 原子沉积研究中, 为了实现 Cr 原子的激光冷却与汇聚, 必须将激光频率锁定在⁵²Cr 的 425.55 nm $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ 跃迁谱线上。鉴于 Cr 是高熔点金属, 实验中设计并制造了一种通孔型的 Cr-氦空心阴极放电装置, 采用放电溅射的方式制备了 Cr 原子蒸气, 并应用偏振光谱稳频技术实现了激光稳频。该技术简化了实验装置, 提高了实验效率。在不需要任何调制器件和锁相放大器的条件下, 实验得到了高信号背景比的色散型信号。该信号被用作误差信号, 将一台倍频钛宝石激光器的频率锁定在⁵²Cr 的 $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ 跃迁谱线上。锁定时间大于 1 h, 激光的频率波动小于 ± 295 kHz。实验表明, 该技术适用于高熔点金属的稳频。

关键词 激光技术; 稳频; 空心阴极放电; 偏振光谱

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1015001

Frequency Stabilization by Polarization Spectroscopy Based on Cr Hollow Cathode Discharge

Yin Cong¹ Qian Jin¹ Zhang Xiaoping¹ Shi Chunying¹ Wang Hanping¹ Huang Shengye²

(¹National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)
(²China South Industry Academy, Beijing 100089, China)

Abstract To cool and focus the Cr atoms, the laser frequency must be locked to the 425.55 nm $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ transition of ⁵²Cr in the research of Cr atom deposition. A see-through Cr-He hollow cathode discharge cell is designed and fabricated to sputter the atom vapor of Cr. Polarization spectroscopy is applied to lock the laser frequency. This technique not only simplifies the experimental equipment but also increases the efficiency. A high signal-to-background ratio dispersion signal is obtained without any modulation device or lock-in amplifier. This signal is used as error signal to lock a frequency-doubled Ti:sapphire laser to the $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ transition of ⁵²Cr. A frequency fluctuation of ± 295 kHz for more than one hour is achieved. The experimental results show that this technique is feasible to lock laser frequency to transitions of metals with high melting point.

Key words laser technique; frequency stabilization; hollow cathode discharge; polarization spectroscopy

OCIS codes 140.3425; 140.3590; 300.6210; 120.3940; 230.0250; 120.4640

1 引 言

激光稳频技术在计量测试、激光频标、光通信等传统领域都起着重要作用, 并有着广泛应用。而刚刚发展起来的原子光学又为稳频技术提供了一个新的应用领域^[1~3]。其中, Cr 原子沉积被认为是非常适于制造纳米尺度线间距标准的技术^[4,5]。在 Cr 原子沉积研究中, 要对原子束进行横向一维激光冷却, 压缩 Cr 原子束的发散角。再用激光驻波场对原

子束进行汇聚, 在基片上沉积出间距为 1/2 波长的条纹结构。要实现这一目的, 需要将激光频率锁定在⁵²Cr 的 425.55 nm $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ 跃迁谱线上。

采用消多普勒光谱稳频技术可以将激光频率锁定在一个狭窄的频率范围内。最常见的消多普勒稳频技术为饱和吸收稳频和偏振光谱稳频。这两种稳频技术在结构上比较相似。但是饱和吸收光谱是测量探测光束强度的变化, 而偏振光谱则是测量探测

收稿日期: 2011-05-23; 收到修改稿日期: 2011-06-09

作者简介: 殷 聪(1977—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光、光电子和冷原子物理等方面的研究。

E-mail: yincong@nim.ac.cn

光偏振态的变化,这可以使灵敏度提高 2~3 个数量级。此外,饱和吸收稳频需要对频率进行调制和相敏检波,而偏振光谱技术则是直接输出色散型信号,该信号可直接应用于激光频率的锁定,而且实验装置中不需要任何调制器件和锁相放大器^[6]。

偏振光谱技术由 Wieman 等^[7]首先提出,随后即被应用于激光稳频中^[8]。目前该技术已经被成功应用在基于性质活泼的碱金属稳频中,如钠^[9]、铷^[10,11]和铯^[12]。这类金属元素的熔点相对较低,对其略微加热即可获得足够的原子蒸气。但是对于熔点高达 2130 K 的 Cr 来说,加热获得原子蒸气的方式有两个弊端:1) 加热时间长,实验效率低;2) 原子炉体积大,结构复杂,价格昂贵。

针对上述问题,Drodofsky^[13]提出了用 Cr 空心阴极放电溅射制备原子蒸气的方法,并通过偏振光谱技术实现了基于 Cr 原子跃迁谱线的稳频技术,在 Jürgens^[14]的论文中也对其实验进行了介绍。与 Cr 空心阴极相似的结构同样被用在基于铁原子的稳频技术中^[15]。在该实验装置中,为了获得高信号背景比的色散型信号,抽运光被调制,并加入了锁相放大器。此外,这两种空心阴极均采用两端放电结构,充入的均为氩气。

延续上述思路,本文介绍一种基于 Cr 空心阴极放电溅射的偏振光谱稳频技术。所用空心阴极为单端放电结构,阴极内所充气体为氩气。在不需要任何调制元件和锁相放大器的条件下,实验获得了高信号背景比的色散型信号。该信号被用作稳频误差信号直接输入到钛宝石(Ti:S)激光器的伺服系统,

将激光频率锁定在⁵²Cr 的 425.55 nm $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ 跃迁谱线上。激光频率波动被控制在 ± 295 kHz 以内,锁定时间大于 1 h。

2 实验装置与原理

偏振光谱稳频技术的实验装置如图 1 所示。实验所用激光器为相干公司的频率可调单频激光器,由三部分组成。最前端为激光二极管(LD)抽运固体激光器(Coherent Verdi-10),输出波长为 532 nm。以该光束为抽运光,抽运 Ti:S 激光器(Coherent MBR-110),输出波长为 851 nm。851 nm 激光束经一个内置 LBO 晶体的倍频腔(Coherent MBD-200)倍频后,输出波长为 425.5 nm 的激光束。实验中,用一片 $\lambda/2$ 波片和一片偏振分光棱镜(PBS1)将一束弱光束从主光束中分离出来,用于稳频实验。分离出来的激光束再被一片 $\lambda/2$ 波片和一片偏振分光棱镜(PBS2)分离成两束线偏振光,其中一束为探测光,另一束为抽运光。探测光穿过 Cr 原子吸收室和一片 $\lambda/2$ 波片后,进入一个由偏振分光棱镜(PBS3)和两个输出特性相同的光电探测器(PD1 和 PD2)组成的平衡偏振探测器。PD1 和 PD2 的输出信号相减并放大(放大倍数为 14)之后,作为稳频的误差信号输入到 Ti:S 激光器的伺服系统,实现激光器的频率锁定。另一方面,线偏振的抽运光经过一片 $\lambda/4$ 波片后变为圆偏振光。圆偏振光经反射,沿着探测光路反向穿过 Cr 原子吸收室。Cr 原子吸收室用电工纯铁包裹,进行隔磁处理。阴极内磁感应强度小于 3×10^{-5} T。

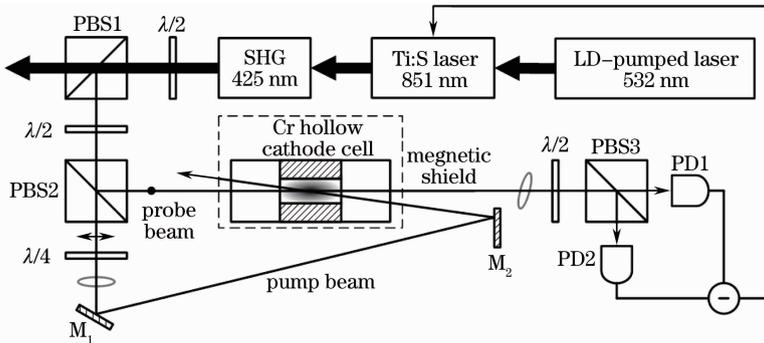


图 1 偏振光谱稳频实验装置示意图

Fig. 1 Schematic experimental setup of the laser frequency stabilization using polarization spectroscopy

接下来对偏振光谱稳频技术原理做简要介绍^[16]。圆偏振抽运光穿过 Cr 原子蒸气后,导致 Cr 原子样本产生了非均匀饱和效应,使原子样本变为各向异性介质。对于探测光而言,其在正交方向上的吸收系数和折射率都发生了变化。结果是当探测

光穿过这种各向异性介质后产生了双折射效应。探测光由线偏振光变为椭圆偏振光,而且其主轴还相对于原来的偏振方向有了微小的转动,如图 1 所示。当 PBS3 前面的 $\lambda/2$ 波片的快(慢)轴相对探测光原来的偏振面旋转 45° 时,PD1 和 PD2 输出信号的差

可表示为

$$\Delta I = \frac{1}{2} I_0 \exp(-\alpha L) \Delta \alpha_0 L \frac{x}{1-x^2}, \quad (1)$$

式中 I_0 为探测光的入射光强, L 为吸收长度。线偏振的探测光可以被视为两个旋向相反的圆偏振光的组合。定义 $\alpha = (\alpha_+ + \alpha_-)/2$, 其中 α_+ 和 α_- 为两个旋向偏振光所对应的吸收系数。 $\Delta \alpha_0$ 是当 $\omega = \omega_0$ 时, α_+ 与 α_- 的差的 $1/2$, 即 $\Delta \alpha_0 = (\alpha_+ - \alpha_-)/2$ 。 $x = 2\delta/\Gamma$, 其中 δ 为频率偏移量, Γ 为原子线宽。由(1)式可以看出 ΔI 是一个适用于激光稳频的色散型信号。

空心阴极放电溅射是目前制备难熔金属原子蒸气最简单可行的方法。基于这项技术研制的 Cr 原子吸收室结构如图 2 所示。长 30 mm, 内径 5 mm 的 Cr 空心阴极被包裹在紫铜通水热沉中。阴极的两端各有一个玻璃罩。玻璃罩与热沉之间用 O 圈压紧的方式进行密封。其中一侧的玻璃罩上接有钨质的环形阳极。环形阳极距离阴极的一端为 5 mm。为了避免阳极与紫铜热沉表面放电, 在该侧热沉表面上附有一层绝缘塑料薄膜。空心阴极放电装置由一个电流源驱动, 电路中串联 10 k Ω 限流电阻。放电装置内充有 350 Pa 氦气。氦原子的质量很轻, 可以抑制 Cr 原子的扩散运动。阴极两侧的玻璃罩上各留有一个气孔, 分别用于进气和排气。为了使放电装置内保持清洁, 氦气处于低速流动状态。

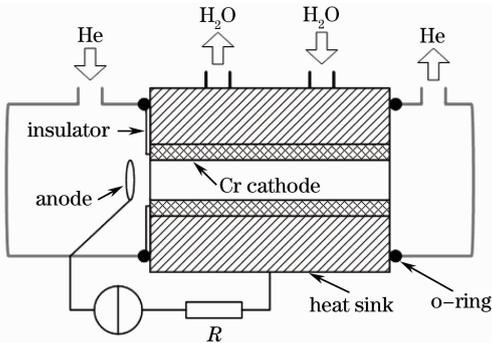


图 2 Cr 原子吸收室结构示意图

Fig. 2 Scheme of the Cr atom absorption cell

Cr 原子吸收室真空制备系统的结构如图 3 所示。自吸收室向左分别为排气针阀和机械泵。自吸收室向右分别为真空度计、进气针阀、减压阀和高压氦气。进气针阀和排气针阀用于控制吸收室中氦气的流速。

3 实验结果

在图 1 所示实验装置中, 探测光的功率为 0.8 mW, 直径为 1.5 mm, 抽运光的功率为 4 mW,

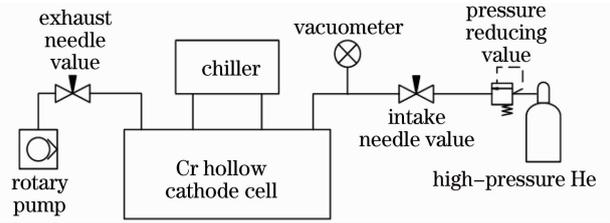


图 3 Cr 原子吸收室真空制备系统结构示意图

Fig. 3 Scheme of vacuum system for the Cr atom absorption cell

直径为 1.8 mm。两束光线之间的夹角为 0.4° 。当驱动电流为 160 mA 时, 可得到高信号背景比的色散型信号。此时对应的空心阴极的极间电压为 750 V。图 4 为示波器记录的 Cr 原子跃迁谱线处的偏振光谱(下)和与之对应的饱和吸收光谱(上)。从波形上观察, 偏振光谱为线性很好的色散型信号, 其过零点处与饱和吸收谱线的中心点重合。

图 4 所示的原子谱线是在 MBR-110 的频率内部自扫描模式下获得的。扫描范围设定为以 851.1092 nm 为中心的 3 GHz。对于倍频后的 425 nm 激光, 扫描范围为 6 GHz。频率单向扫描一次的时间为 3 s。图 4 中为往复三次扫过跃迁谱线所获得的信号。通过示波器可以读出偏振光谱谱线最大值与最小值之间的典型宽度值为 18.8 ms, 对应的扫描频率范围为 37.6 MHz。其峰峰值为 5.6 V。当阴极内氦气气压从 200 Pa 变化到 400 Pa 时, 对原子谱线没有明显的影响。过高或过低的气压均导致阴极放电困难。

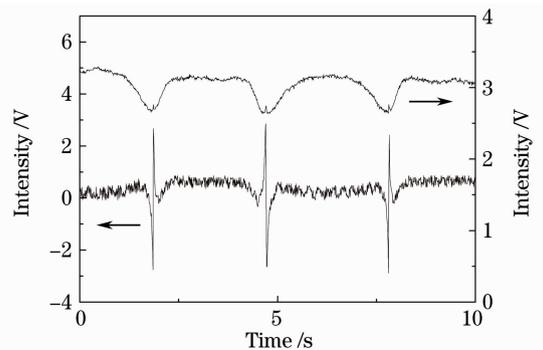


图 4 $^{52}\text{Cr } 7S_3 \rightarrow 7P_4$ 跃迁谱线的饱和吸收光谱(上)和偏振吸收光谱(下)

Fig. 4 Saturated absorption spectrum (upper) and polarization spectrum (lower) of $^{52}\text{Cr } 7S_3 \rightarrow 7P_4$ transition

图 5 所示为激光频率锁定后, 输入到 Ti:S 激光伺服系统的误差信号。其峰峰值减小为 88 mV。由此可得出激光频率的波动范围为 ± 295 kHz。频率的锁定时间大于 1 h。

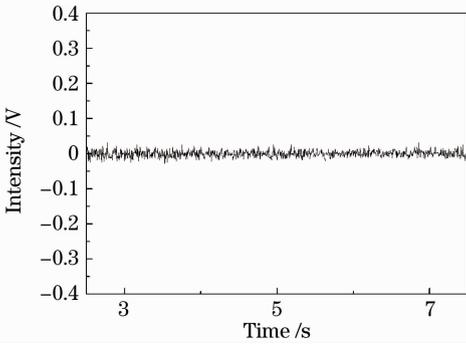


图 5 频率锁定后的差分信号

Fig. 5 Difference signal when the laser is frequency locked

4 结 论

介绍了一种基于 Cr 原子空心阴极放电溅射的偏振光谱稳频系统。该系统以自制的 Cr-He 空心阴极放电装置为 Cr 原子吸收室,利用偏振光谱稳频技术,实现了对 Ti:S 激光器的频率锁定。实验给出了⁵²Cr 在 425.55 nm $^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$ 跃迁谱线上的偏振光谱谱线和饱和吸收谱线。偏振光谱谱线的过零点和饱和吸收谱线的中心点吻合得很好。锁定后的激光频率起伏小于 ± 295 kHz,锁定时间大于 1 h。实验表明,该技术非常适合基于难熔金属跃迁谱线的稳频。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Lü Liqiang, Du Runchang, Liu Chaoyang *et al.*. Laser frequency stabilization of coherent population trapping atomic frequency standard realized with digital servo[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1411~1415
吕利强, 杜润昌, 刘朝阳等. 数字伺服实现相干布局囚禁原子频标的激光稳频[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1411~1415

- 3 Wang Jing, Yang Baodong, He Jun *et al.*. Influence of the bandwidth of feedback loop in frequency stabilization of external-cavity diode laser by polarization spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 425~430
王 婧, 杨保东, 何 军等. 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[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 425~430
- 4 J. J. McClelland, R. E. Scholten, E. C. Palm *et al.*. Laser-focused atomic deposition [J]. *Science*, 1993, **262** (5135): 877~880
- 5 J. J. McClelland, W. R. Anderson, C. C. Bradley *et al.*. Accuracy of nanoscale pitch standards fabricated by laser-focused atomic deposition [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2003, **108**(2): 99~113
- 6 W. Demtröder. *Laser Spectroscopy Vol. 2 Experimental Techniques* (4th edition)[M]. Berlin: Springer, 2008. 104~117
- 7 C. Wieman, T. W. Hänsch. Doppler-free laser polarization spectroscopy[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **36**(20): 1170~1173
- 8 T. W. Hänsch, B. Couillaud. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity[J]. *Opt. Commun.*, 1980, **35**(3): 441~444
- 9 H. S. Moon, D.-Y. Jeong, K.-H. Ko *et al.*. Laser-induced birefringence by using a linearly polarized field in Na D1 line and its application to laser frequency stabilization [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(1-3): 133~138
- 10 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
- 11 Y. Yoshikawa, T. Umeki, T. 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
- 12 Ma Jie, Zhao Yanting, Zhao Jianming *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
- 13 U. Drodofsky. *Atomlithographie mit Lichtkräften* [D]. Konstanz: Universität Konstanz, 1997
- 14 D. Jürgens. *Quantum Effects in Atomic Nanofabrication Using Light Forces*[D]. Konstanz: Universität Konstanz, 2004
- 15 B. Smeets, R. C. M. Bosch, P. Van Der Straten *et al.*. Laser frequency stabilization using an Fe-Ar hollow cathode discharge cell[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2003, **76**(8): 815~819
- 16 R. C. M. Bosch. *Ferromagnetic Nanostructures by Laser Manipulation* [D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002