

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2009.01.004

亚稳态氪原子饱和吸收光谱无调制激光稳频

吴 屹, 蒋 蔚, 程存峰, 孙 羽, 成国胜, 胡水明

(合肥微尺度物质科学国家实验室, 中国科学技术大学化学物理系, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 利用亚稳态氪原子 $^2P_{3/2}5p[5/2]_3 - ^2P_{3/2}5s[3/2]_2$ 饱和吸收光谱, 分别使用光电调制器相位调制和声光调制器移频调制的方法, 结合相敏检测, 实现了钛宝石激光器相对于亚稳态氪原子的 811.5 nm 饱和吸收线的频率锁定。由获得的鉴频曲线以及误差信号估算, 激光频率漂移从稳频回路开路时的超过 8 MHz, 减小到回路闭合时的约 1 MHz, 并可实现对激光频率数小时的稳定。该稳频后的激光光源被成功地用于激光冷却亚稳态氪原子各个稳定同位素。

关键词: 激光技术; 激光锁频; 饱和吸收光谱; 频率调制; 氪原子; 冷原子

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2009)01-0023-05

Laser frequency locking based on the saturation absorption line of metastable krypton without frequency dither

WU Yi, JIANG Wei, CHENG Cun-feng,

SUN Yu, CHENG Guo-sheng, HU Shui-ming

(Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, Department of Chemical Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The saturation spectroscopy of the 811 nm $^2P_{3/2}5p[5/2]_3 - ^2P_{3/2}5s[3/2]_2$ line of metastable krypton atom was used to lock the frequency of a Ti:Sapphire laser. Two kinds of frequency modulation method were utilized, one using an electro-optic phase modulator, the other using an acoustic-optic frequency shifter. When the feed-back loop was closed the frequency drift was reduced to 1 MHz, while it was about 8 MHz when the loop was open. The laser can be frequency stabilized during hours-long measurements and it allows us to realize laser cooling and trapping of the different isotopes of krypton.

Key words: laser technique; laser frequency locking; saturation absorption spectroscopy; frequency modulation; krypton atom; cold atom

1 引 言

近年来, 用激光冷却原子及其相关应用一直是物理学研究热点。目前已经对包括碱金属、碱土金属、惰性元素原子在内的一大批元素都成功地实现了原子冷却, 并开展了各种应用研究。对于惰性元素原子,

基金项目: 科技部重大研究计划 (2006CB922001)、国家自然科学基金委 (10728408) 和中国科学院 (YZ200765) 共同资助项目。

作者简介: 吴 屹 (1983 -), 硕士研究生, 主要从事高分辨激光光谱研究。

导师简介: 胡水明 (1973 -), 教授, 主要从事分子光谱和原子冷却研究。E-mail: smhu@ustc.edu.cn。

收稿日期: 2008-04-11; **修改日期:** 2008-05-09

其第一激发态能级很高,无法直接进行激光冷却,需要先把其激发到亚稳态能级,再利用近红外或可见波段的激光将其冷却,如分别实现了对 He^[1]、Ne^[2]、Ar^[3]、Kr^[3]、Xe^[4] 等惰性元素的激光冷却。Kr 原子的放射性同位素 ⁸⁵Kr (半衰期 23 万年)、⁸¹Kr (半衰期 11 年) 可用来对空气或溶解了空气的水和冰样品进行年代测定^[5],因此我们计划实现高效率的亚稳态 Kr 原子的囚禁,以获得样品中放射性同位素的丰度数据,用以测定样品的年代。

冷原子的实验需要窄线宽输出的激光光源,且对激光频率的短期抖动和长期漂移也有较高的要求,因此必须对激光频率进行锁定。激光稳频的方法很多^[6],通常是锁定到法布里-珀罗标准具的某一纵模^[7],或者锁定到原子或分子的某一特定跃迁线上^[8~11]。使用原子或分子的吸收线作为参考频率受外界干扰小,但锁频范围往往受可选择的参考谱线的限制;而标准具由于存在大量的纵模可供选择,所以可使用的波段范围大,但是需要考虑标准具自身的稳定性影响。将以上两种方法结合起来,利用参考腔做桥梁的“频率链”技术,可弥补二者各自的不足^[12],但实现较复杂。锁频时一般需要利用调制光谱方法产生具有微分谱形的鉴频信号,被比例积分放大后形成负反馈控制回路,以对激光频率进行锁定。为了不对激光直接进行调制而影响实验用光束的质量,更倾向于使用激光外部调制来获得调制光谱,如使用电光相位调制^[13~14]和声光移频调制^[15]等,可实现无调制的激光锁频。

本文利用饱和和吸收技术获得氪原子 ²P_{3/2}5p[5/2]₃-²P_{3/2}5s[3/2]₂ 跃迁 (811.5 nm) 的精细结构跃迁谱线,利用调制光谱方法对钛宝石激光器进行锁频,最终使用该激光实现对亚稳态氪原子的冷却。

2 实验方法和装置

图 1 为氪原子的能级跃迁图,进行冷却时,需要首先将氪原子从基态 4p⁶(¹S₀) 激发到亚稳态 4p⁵5s[3/2]₂ (如通过射频放电方法),再利用 811 nm 激光对其进行激光冷却。

为了获得调制光谱信号,以将 811 nm 激光锁频到 ⁸⁴Kr 原子的饱和吸收线上,实验中我们采用了两种调制方法,其中一种使用电光调制器进行高速的相位调制,再利用相敏检波得到鉴频曲线,另一种则是利用对声光调制器移频率的调制来实现。以下分别介绍这两种方法。

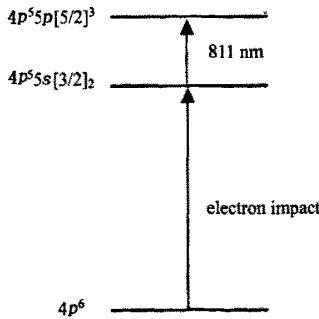


Fig.1 Schematic diagram of krypton energy level

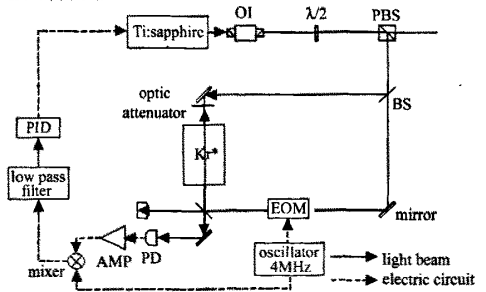


Fig.2 Schematic diagram of the experimental setup applied for frequency stabilization using an EOM.OI: optical isolator; λ/2: half-wave plate; PBS: polarizing beam splitter; BS: beam splitter; EOM: electro-optic modulator; PD: photodiode; AMP: amplifier

2.1 电光调制器 (EOM) 相位调制方法

实验装置如图 2 所示,带箭头的实线表示光路,带箭头的虚线表示电路连接。²P_{3/2}5p[5/2]₃-²P_{3/2}5s[3/2]₂ 亚稳态氪在一个氪气池中通过恒定的射频放电来产生,射频频率约 50 MHz,输出功率约 1 W。氪气池池长

约 10 cm, 其中氪气压力为 26.6 Pa, 大约有不到 10^{-7} 的氪原子被激发到亚稳态。实验时只需要维持约 2 cm 尺度的一小团放电区即可获得足够强的饱和吸收信号。钛宝石激光器 (Coherent 899) 输出经由 $\lambda/2$ 波片和偏振分光晶体 (PBS) 组成的可调分光系统, 分出一束光用以激光锁频, 再经一个 8% 反射、92% 透射的分束片分成两束光。其中光强较弱的一束光经过衰减片后通过氪池作为探测光束, 另外一束较强的光作为抽运光, 经由一个宽带电光调制器 (EOM, New Focus 4002) 进行相位调制后通过氪池。实验中探测光和抽运光的光强分别约为 0.2 mW 和 1.6 mW。通过信号发生器给 EOM 施加 4 MHz 的调制。

Table 1 Krypton isotopic shifts on $5s[3/2]_2 \rightarrow 5p[5/2]_3$ transition

氪同位素	丰度 (%)	核自旋	位移 (MHz)
78	0.35	0	-217
80	2.25	0	-138
82	11.60	0	-64
84	57.00	0	0
86	17.30	0	66
83	11.50	9/2	783*

* 注: ^{83}Kr 具有超精细结构, 这里只列出了对其激光冷却所用跃迁线的频率

表 1 列出了氪原子发生 $4p^5 5s[3/2]_2$ 到 $4p^5 5p[5/2]_3$ 能级跃迁时的同位素位移, 当激光频率进行扫描时, 可以分辨出各个同位素的饱和吸收峰。探测光信号经过放大、滤波后送入混频器 (minicircuits, ZMY-3), 与 EOM 驱动信号混频、并经过低通滤波后得到鉴频信号。图 3(a) 为未进行频率调制时得到的氪原子 811.5 nm 线的饱和吸收谱, 其中三个谱峰分别对应于 ^{82}Kr 、 ^{84}Kr 、 ^{86}Kr 同位素原子谱线。图 3(b) 为进行相位调制并通过混频器输出的微分鉴频信号。将该鉴频信号作为误差信号送入比例积分放大器 PID (SRS, SIM960), 并适当调节比例和积分参数, 将 PID 输出作为钛宝石激光器的 PZT 扫描控制信号, 即可将激光器的输出频率锁定在相应 Kr 同位素的跃迁线上。

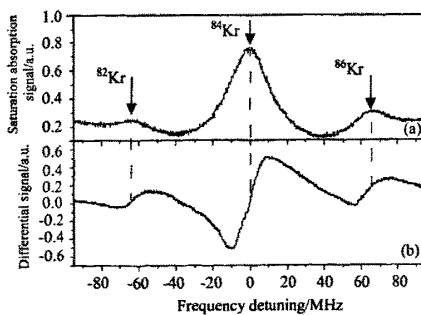


Fig.3 (a) Saturation absorption spectrum of the krypton near 811.5 nm, (b) EOM modulation spectrum used for frequency discrimination

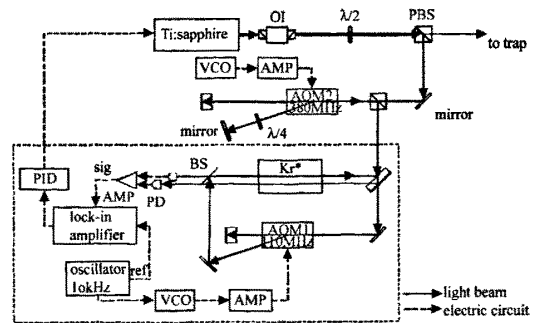


Fig.4 Schematic diagram of the experimental setup applied for frequency stabilization using an AOM. OI: optical isolator; $\lambda/2$: half-wave plate; $\lambda/4$: quarter-wave plate; PBS: polarizing beam splitter; BS: beam splitter; AOM: acoustic-optic modulator; VCO: voltage controlled oscillator; PD: photodiode; AMP: amplifier

2.1 声光偏频锁频方法

我们还尝试了利用声光调制器偏频调制方法来对钛宝石激光器进行锁频。实验装置如图 4 所示, 与电

光调制方法相比,不同的是在抽运光路中插入了一个工作频率为 110 MHz 的声光调制器 (AOM1), 以其一阶输出光 (频移 110 MHz) 作为抽运光激发氪原子。AOM 的驱动信号由压控振荡器 VCO 提供, 而 VCO 输出频率则被一个 10 kHz 信号源所调制, 使得 AOM1 移频频率有一个深度 100 kHz、速度 10 kHz 的调制。探测光信号被锁相放大器检测输出, 得到鉴频信号。为提高信噪比并压低饱和和吸收背景影响, 本实验中增加了一路对比探测信号进行差分测量。图 5(a) 为未进行频率调制时得到的氪原子 811.5 nm 线的饱和吸收谱, 图 5(b) 为进行声光偏频并通过相敏检波后得到的微分鉴频信号。注意到实验中饱和吸收光路中泵浦光和探测光频率相差 110 MHz, 因此实际锁频位置与探测光频率相差 55 MHz。

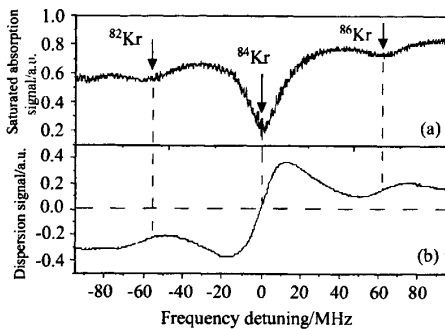


Fig.5 (a) Saturation absorption spectrum of the krypton near 811.5 nm. (b) AOM modulation spectrum for frequency discrimination

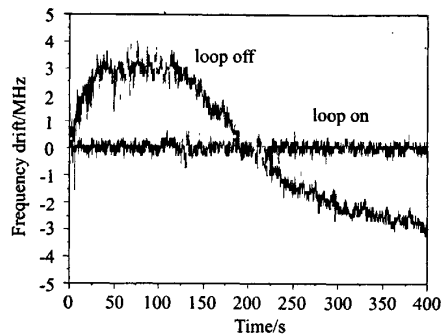


Fig.6 Typical error signal with the feedback loop on and off

可以看到, 利用以上两套实验方案, 都可以得到可用于锁频的鉴频信号。相对来说, 电光调制器 EOM 锁频方法可达到的工作带宽较大, 但 EOM 本身代价较高, 比较而言, 声光调制器 AOM 移频锁定的方法相对简单, 代价较低, 但工作带宽较低。对于我们的实验中所使用的钛宝石激光器而言, 由于激光器自身

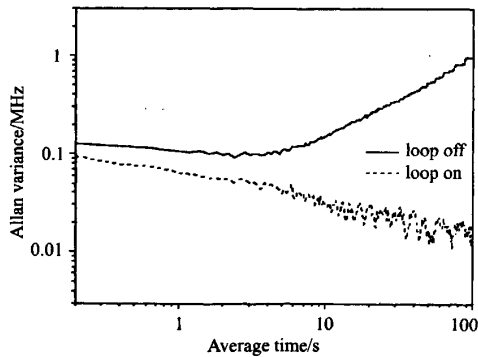


Fig.7 Square root of the Allan variance $\sigma(\tau)$ of the laser frequency drift when the feedback loop is on/off

就比较稳定, 实验中主要需要克服长时间尺度的漂移, 因此利用 AOM 锁频更简单些。我们目前原子冷却系统中即使用这套方案。通过对比鉴频信号过零点处的信号对扫描频率的斜率, 即可用稳频中误差信号幅度估算出激光的频率波动大小。图 6 中为使用 AOM 锁频方案后激光器自由运行和反馈环路闭合时所分别测到的激光频率漂移情况。可以看到, 激光器自由运转时, 在 400 s 内的典型频率漂移达 8 MHz; 闭环锁定后其典型频率波动仅约 1 MHz。图 7 为用阿伦方差的平方根描述的系统频率稳定性, 可以看到其长时间的频率漂移被明显抑制。经测试, 激光器可在此锁频回路闭合时稳定运行 10 h 而不失锁。

实验中, 如图 4 所示, 在激光束进入锁频部分之前, 我们增加了一只高带宽的声光调制器 AOM2, 光束两次通过, 产生可高达 800 MHz 的移频, 以使得用以进行激光冷却的光束和锁频激光频率间有一个可控制的移频, 和表 1 中所示的同位素位移相匹配, 使得当锁频部分的光束频率被稳定在 ^{84}Kr 饱和吸收线上时, 冷却激光的频率可与被冷却同位素原子共振。用这种方式, 我们成功地把氪原子的所有稳定同位素

实现了激光冷却并囚禁在磁光阱中^[16]。

3 结 论

本实验利用亚稳态氦原子的饱和吸收光谱, 分别采用两种不同的调制技术产生了微分鉴频信号, 经过反馈控制对钛宝石激光器进行频率锁定, 锁定后的激光频率漂移被明显抑制。本文所讨论的实验方法被实际应用来进行氦原子的激光冷却, 当然该方法也可以被直接应用于其他冷原子、特别是惰性元素原子冷却的实验中。

参考文献:

- [1] Tol P J J, Herschbach N, Hessels E A, *et al.* Large numbers of cold metastable helium atoms in a magneto-optical trap [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, 60(2): R761-R764.
- [2] Shimizu F, Shimizu K, Takuma H. A high intensity metastable neon trap [J]. *Chem. Phys.*, 1990, 145(2): 327-331.
- [3] Katori H, Shimizu F. Lifetime measurement of the 1s5 metastable state of argon and krypton with a magneto-optical trap [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70(23): 3545-3548.
- [4] Walhout M, Megens H J L, Witte A, *et al.* Magneto-optical trapping of metastable xenon: isotope-shift measurements [J]. *Phys. Rev. A*, 1993, 48(2): R879-R882.
- [5] Chen C Y, Li Y M, Bailey K, *et al.* Ultrasensitive isotope trace analysis with a magneto-optical trap [J]. *Science*, 1999, 286: 1139-1141.
- [6] Chen Yixiang, Xue Dajian, Cheng Botao, *et al.* Development of the stabilization of laser diode [J]. *Laser and Infrared (激光与红外)*, 2005, 35(1): 18-21 (in Chinese).
- [7] Drever R W P, Hall J L, *et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, 31(1): 97-105.
- [8] Liu Tao, Lei Hongxiang, Yan Shubin, *et al.* Third-harmonic locking of a diode laser to cesium saturation absorption D_2 line without frequency dither [J]. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2002, 22(10): 1181-1186 (in Chinese).
- [9] Yan Shubin, Wang Yanhua, Liu Tao, *et al.* Modulation-free laser frequency locking by AOM shifted cesium sub-Doppler spectra [J]. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2004, 24(10): 1335-1338 (in Chinese).
- [10] Jiang Kaijun, Li Ke, Wang Jin, *et al.* Frequency stabilization for Ti:sapphire laser with Doppler-broadened Zeeman spectra [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics (量子电子学报)*, 2005, 22(2): 177-180 (in Chinese).
- [11] Wang Jin, Liu Xiaojun, Li Jiaomei, *et al.* Frequency stabilization and detuning of diode laser in laser trapping of atoms [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics (量子电子学报)*, 2000, 17(1): 43-47 (in Chinese).
- [12] Du Zhijing, Zhang Yuchi, Wang Xiaoyong, *et al.* Locking multiple wavelength lasers to the transition of cesium atoms by using a Fabry-Perot transfer cavity [J]. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2006, 26(3): 452-457 (in Chinese).
- [13] Bjorklund G C. Frequency-modulation spectroscopy: a new method for measuring weak absorptions and dispersions [J]. *Optics Letters*, 1980, 5(1): 15-17.
- [14] Li Jian, Wu Lingang. Phase modulation locked optical resonator [J]. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1995, 15(12): 1641-1645 (in Chinese).
- [15] Sakai Y, Yokohama L, Kano G, *et al.* Frequency stabilized laser diode locked to acetylene gas absorption lines using fiber-pigtail-type acoustic optical modulator [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1992, 4(1): 96-98.
- [16] Jiang Wei, Sun Yu, Cheng Cunfeng, *et al.* Laser cooling and trapping of metastable krypton isotopes [J]. *J. Univ. Sci. and Tech. China (中国科学技术大学学报)*, 2008, in Press (in Chinese).