

用于激光原子囚禁的二极管激光器的 稳频和移频 *

王 谨^{1,2} 柳晓军^{1,2} 李交美¹ 江开军¹ 詹明生¹

(1 中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理
国家重点实验室 武汉 430071)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所激光光谱学开放实验室 合肥 230031)

摘 要 用饱和吸收光谱法对二极管激光器进行了稳频,使得激光器的等效线宽小于 1 MHz,并利用声光调制器使激光的频移量得到控制,能满足激光冷却与囚禁原子对激光频率稳定性和频移量的要求,实现了 Rb 原子的激光囚禁.

关键词 饱和吸收光谱, 二极管激光器稳频, 激光囚禁原子

1 引 言

激光冷却与囚禁原子不但对激光器的频率稳定性要求很高,而且要求激光频率相对于原子共振频率有一定的失谐。目前,原子的激光冷却与囚禁大多采用二极管激光器。所以,二极管激光器的稳频和频率失谐量的控制成为激光冷却与囚禁原子实验中非常关键的技术。自由运转的二极管激光器的频率稳定性很差,在采取了温度、电流稳定控制后,其等效线宽为 100 MHz 左右。光栅外腔反馈可使二极管激光器的等效线宽压窄到 10 MHz 的量级,仍不能满足要求,需要采取更进一步的稳频措施。Wieman^[1]用饱和吸收光谱法对光栅外腔反馈式二极管激光器进行了稳频和频移,但误差信号只选在饱和吸收峰的一侧,容易造成正反馈。我们结合饱和吸收和声光调制,使激光器的等效线宽小于 1 MHz,激光的频移量可以控制,满足激光冷却与囚禁原子对激光频率稳定性和频移量的要求,实现了 Rb 原子稳定的激光冷却与囚禁^[2]。

2 实验装置

稳频实验装置如图 1 所示。光栅外腔反馈式二极管激光器 DL(德国 TUI 公司 DL100 型二极管激光系统,采用日立 HL7851G98 型激光器,带有温度和电流控制系统)输出的 780 nm 准直激光束,经薄平面镜 P1 后分成两束,其中透射光束 B1 作为囚禁光,反射光束 B2 用于稳频。B2 经过声光调制器 AOM 后在空间上分开成 0 级光 B3 和 -1 级光 B4(也可为 +1 级光,取决于光的入射方向),若入射光的频率为 f_0 ,则 0 级光的频率保持不变,而 -1 级光的频率为 $f_{-1} = f_0 - \Omega$ ^[3](对于 +1 级光, $f_{+1} = f_0 + \Omega$), Ω 为声光调制器的射频驱动频率。当 -1 级光被锁定在原子的共振吸收峰时,改变 Ω 即可控制囚禁光的频移。-1 级光再经薄平面镜 P2、P3 分成三束。经 P2、P3 表面反射的弱探测光 B5、B6 通过 Rb 样品池后分别入射到

* 国家自然科学基金资助的课题 (19774069, 19734006)。

收稿日期: 1999-03-09; 修改日期: 1999-05-05

光电二极管 PD1、PD2 上。透过的 B7 经反射镜 M1、M2 反射，与 B6 小角度交叉，反向通过样品池，提供饱和吸收条件。样品池的温度用电路控制，以消除环境温度起伏造成的影响。PD1、PD2 的光电流信号经电流 - 电压转换电路 (I/V) 转换为电压信号，分别输入到放大器 A1 的反相端和同相端。A1 输出的差分信号送入锁相放大器。信号发生器 SG1 的输出信号对激光器的电流进行调制，同时也给锁相放大器提供参考信号。信号发生器 SG2 的信号输出到激光器的 PZT 以控制光栅的角度。开环时，调节 SG2 的信号幅度可对激光频率进行扫描。闭环时，SG2 的信号与来自锁相放大器的误差信号叠加，通过负反馈，将激光频率锁定在原子吸收谱线峰值频率上。

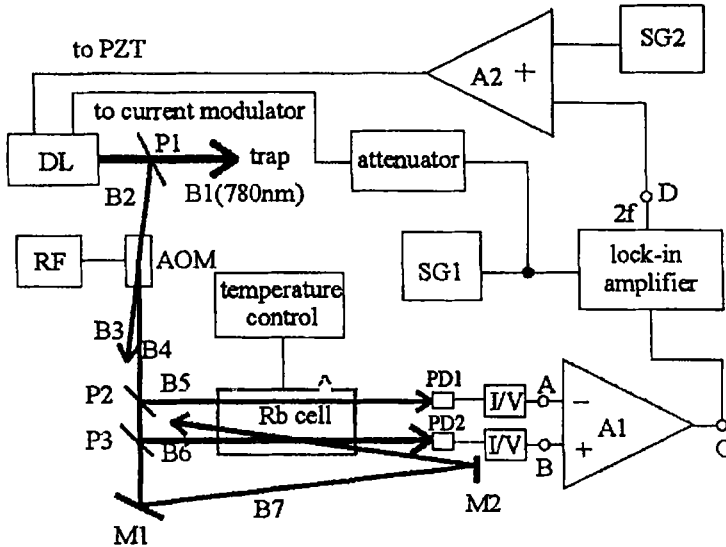


Fig.1 Setup of frequency stabilization of laser

3 实验结果

3.1 Rb 原子的饱和吸收光谱

Rb 原子有两种同位素，其能级的超精细结构如图 2 所示。 ^{85}Rb 的激光囚禁要求将囚禁光的频率调谐在 ^{85}Rb : $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F'=4$ 的跃迁频率附近，等效线宽小于 1 MHz。常温时，Rb 原子 D_2 线的多普勒加宽约为 500 MHz， ^{85}Rb : $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F'=4$ 的吸收峰淹没在多普勒加宽的背景之中。要达到实验要求，必须用饱和吸收法得到无多普勒饱和吸收光谱，用以锁定激光的频率。

调节激光器的温度和电流，使激光的波长与 ^{85}Rb 精细结构跃迁 $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ (780.245 nm) 共振。将声光调制器驱动信号的频率调至 80 MHz，按图 1 调好光路，用示波器监视 A、B 点的电压。将 SG2 产生的幅度为 15 V、频率为 30 Hz 的斜波电压信号加到激光器的 PZT 上对激光频率扫描。适当调节激光器的电流及扫描斜波电压的幅度和偏置，可得到 ^{85}Rb : $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ 的吸收峰，如图 3。图 3 中 (a)、(b) 分别为 A、B 点的信号，(a) 为一个多普勒加宽的吸收背景，(b) 为基于背景之上的多个无多普勒饱和吸收峰。C 点的信号为去除背景的去多普勒饱和吸收峰，见图 4。

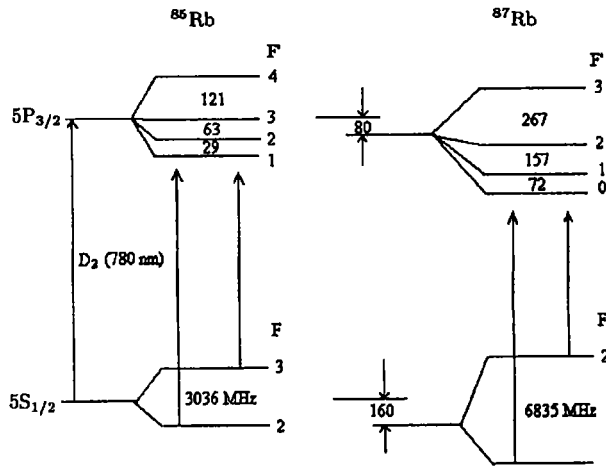


Fig.2 Hyperfine level of Rb atoms

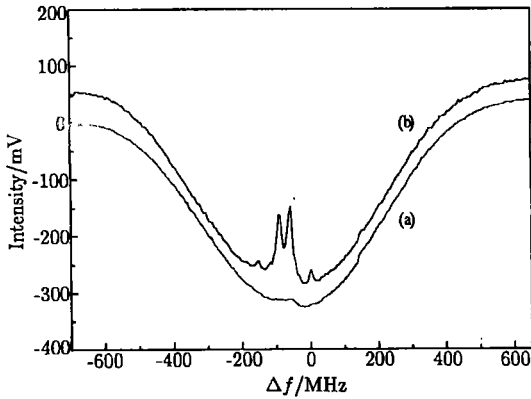


Fig.3 Doppler free saturated absorption peaks of ⁸⁵Rb: 5S_{1/2}, F = 3 → 5P_{3/2}, F'. (a) Doppler broaden absorption peak, (b) Doppler free saturated absorption peaks

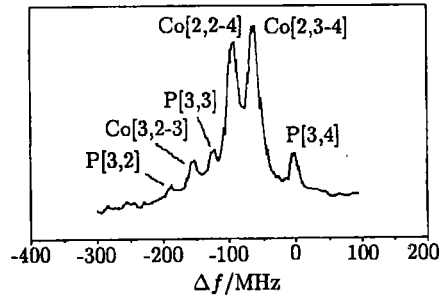


Fig.4 Doppler free saturated absorption spectrum of ⁸⁵Rb: 5S_{1/2}, F = 3 → 5P_{3/2}, F'

值得注意的是吸收谱中除了有 $F = 3 \rightarrow F' = 2, 3, 4$ 的无多普勒饱和吸收峰 $P[3,2]$ 、 $P[3,3]$ 及 $P[3,4]$ 外，还有 $F=3$ 到 F' 能级间较强的交叉峰^[4](Crossover peaks) $Co[3,2-3]$ 、 $Co[3,2-4]$ 和 $Co[3,3-4]$ 。将激光的波长分别调谐在 ⁸⁵Rb: 5S_{1/2}, F = 2 → 5P_{3/2}, F' (780.239 nm)，⁸⁷Rb: 5S_{1/2}, F = 2 → 5P_{3/2}, F' (780.247 nm) 和 ⁸⁷Rb: 5S_{1/2}, F = 1 → 5P_{3/2}, F' (780.235 nm) 跃迁波长上，按上述步骤可得到相应跃迁的无多普勒饱和吸收谱线。

3.2 激光的稳频和移频

用信号发生器 SG1 输出一个 10 kHz、4V 的正弦信号，将信号分作两路，一路作为锁相放大器的参考信号，另一路经可调衰减器后加到激光器的电流调制输入端。将放大器 A1 的输出信号送入锁相放大器，用示波器监视 D 点输出的 2f 误差信号和 C 点的无多普勒光谱信号。逐渐减小 SG2 斜波电压的幅度，同时调节其直流偏置，将激光的频率移到想要锁定的峰附近，调节激光器电流调制电压的幅度，使峰上的调制度小于峰的半宽 (6 MHz)，在 D 点可观

察到这个峰的分误差信号, 见图 5。将斜波电压的幅度减小到零, 调节斜波电压的偏置量, 选择合适的误差信号的幅度、相位, 使系统工作在负反馈稳频状态。频率锁定后, C 点的信号为一条直线, 直线上伴有起伏不定的小幅度噪声, 直线的位置稳定。这时, 在一定范围内调节斜波电压的偏置量, C 点直线信号的位置不再变化, 但 D 点的误差信号直线的位置却随之反向变化, 从而补偿斜波电压的偏置量引起的频率漂移, 使激光频率锁定。将激光频率锁定在 $^{85}\text{Rb}: 5S_{1/2}, F = 3 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$ 的 $\text{Co}[3,2-4]$ 峰上后, 激光的等效线宽小于 1 MHz 。实际达到稳频后, 可连续工作 2 小时以上。

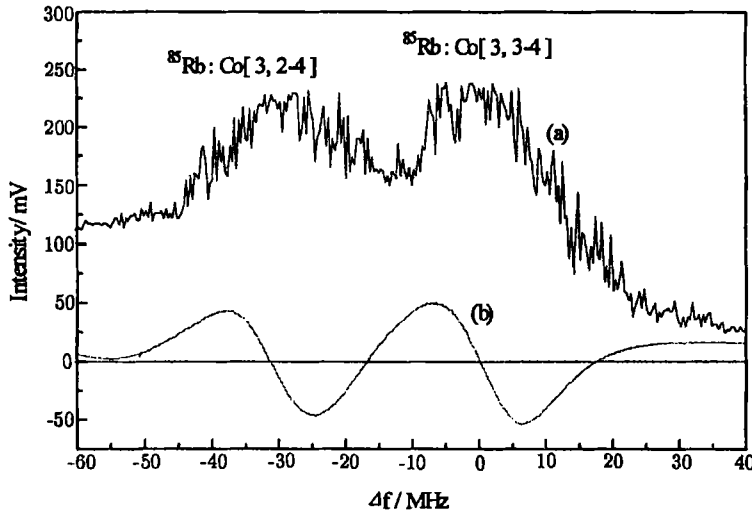


Fig.5 Modulated crossover peaks $^{85}\text{Rb}: \text{Co}[3, 2-4]$; $^{85}\text{Rb}: \text{Co}[3,3-4]$ (a) and error signals (b)

对于 ^{85}Rb 而言, 要求囚禁光 B1 的频率低于 $^{85}\text{Rb}: 5S_{1/2}, F = 3 \rightarrow 5P_{3/2}, F' = 4$ 跃迁频率 $1 \sim 3$ 个自然线宽, 即囚禁光的频率应相对于 $^{85}\text{Rb}: P[3,4]$ 红移 $6 \sim 18 \text{ MHz}$ 。B1 的频率 f_0 与 -1 级光 B4 的频率 f_{-1} 的关系为: $f_0 = f_{-1} + \Omega$, 只要将 f_{-1} 锁定在图 4 中 $P[3,4]$ 左边的某个峰, 选择合适的声光调制频率 Ω , 即可实现囚禁光频率的红移。我们将 f_{-1} 锁在了 $\text{Co}[3,2-4]$ 峰上, Ω 为 80 MHz , 囚禁光频率相对于 $P[3,4]$ 峰红移了 12 MHz , 实现了符合实验要求的激光频移量的控制。

4 结 论

用无多普勒饱和和吸收光谱和声光调制的办法, 实现了二极管激光器的稳频与移频, 使激光频率相对于 $^{85}\text{Rb}: 5S_{1/2}, F = 3 \rightarrow 5P_{3/2}, F' = 4$ 红移了 12 MHz , 在激光器的等效线宽小于 1 MHz 的条件下可连续工作 2 小时以上, 解决了激光冷却与囚禁 Rb 原子中的一个关键问题, 实现了 ^{85}Rb 的激光囚禁。

致谢: 本工作得到了刘堂昆、王继锁、赵宏太、曹俊文及赵志同志的帮助, 特此感谢。

参 考 文 献

- 1 MacAdam K B, Steinbach A, Wieman C. A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb. *Am. J. Phys.*, 1992, 60(12): 1098~1111
- 2 王 瑾, 柳晓军, 李交美等. Rb 原子的激光囚禁. *光学学报*, 1999, 20(5): 将发表
- 3 Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation*. New York: John Wiley & Sons, 1981. 329~333
- 4 Demtroder W. *Laser Spectroscopy: Basic Concepts and Instrumentation*. Berlin, Heideberg, New York: Spring-Verlag, 1981. 488~495

Frequency Stabilization and Detuning of Diode Laser in Laser Trapping of Atoms

Wang Jin^{1,2} Liu Xiaojun^{1,2} Li Jiaomei¹
Jiang Kaijun¹ Zhan Mingsheng¹

(1 Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Academic Sinica Wuhan 430071)

(2 Laser Spectroscopy Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academic Sinica Hefei 230031)

Abstract Frequency of diode laser is stabilized by using saturated absorption spectroscopy, the linewidth of laser frequency is less than 1 MHz, and the offset of laser frequency can be controlled by using acousto-optical modulator. It satisfied the requirement of laser cooling and trapping of atoms, and thus has been used to the realization of laser cooling and trapping of rubidium atoms.

Key words saturated absorption spectroscopy, frequency stabilization of diode laser, laser trapping of atoms

王 瑾 男, 29 岁. 1993 年毕业于西北师范大学物理系, 同年进入中国科学院安徽光学精密机械研究所, 在詹明生研究员指导下攻读硕士学位, 现为中国科学院安徽光机所在读博士生, 主要从事半导体激光器稳频和激光囚禁原子方面的工作.