

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2012.01.005

用于冷原子干涉仪的拉曼激光的注入锁定

王 玲^{1,2,3}, 姚战伟^{1,2,3}, 熊宗元^{1,2,3}, 李润兵^{1,2}, 王 谨^{1,2}, 詹明生^{1,2}

(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, 湖北 武汉 430071 ;

2 中国科学院冷原子物理中心, 湖北 武汉 430071 ;

3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 原子干涉仪通常采取拉曼脉冲序列对原子波包进行相干操作, 高功率的拉曼光让更多的原子参与速度敏感型受激拉曼跃迁, 有利于实现信噪比高的原子干涉仪条纹。研制高功率的拉曼激光器对冷原子干涉仪的实验研究具有重要意义, 报道了基于注入锁定技术实现的高功率拉曼激光器的实验结果。主激光器经过 1.5 GHz 声光调制器产生 ± 1 级衍射光作为拉曼光的种子光, 注入到两个从激光器后锁定, 并实现功率放大。两个拉曼光的频率相差 3.0 GHz, 频率调谐范围为 200 MHz。

关键词: 激光技术; 拉曼激光; 注入锁定; 原子干涉

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2012)01-0027-05

Injection locking of Raman laser beams in cold atom interferometers

WANG Ling^{1,2,3}, YAO Zhan-wei^{1,2,3}, XIONG Zong-yuan^{1,2,3},

LI Run-bing^{1,2}, WANG Jin^{1,2}, ZHAN Ming-sheng^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China ;

2 Center for Cold Atom Physics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China ;

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Raman pulse sequences are generally used to coherently manipulate the atomic wave packet in an atom interferometer. High power Raman beams allow more atoms join in the velocity-sensitive stimulated Raman transition, and that will be helpful for obtaining high signal to noise ratio in atom interferometer fringe. Development of high power Raman laser is important for cold atom interferometer experiments. The experimental realization of high power Raman lasers are demonstrated based on injection locking technique. Master laser is modulated by a 1.5 GHz acousto-optical modulator, and the ± 1 order diffraction lights are used as seeding Raman lasers. The seeding lasers are injection locked to two slave lasers which are further amplified as Raman beams. The frequency difference of Raman beams is 3.0 GHz, and the detuning range is about 200 MHz.

基金项目: 国家自然科学基金 (11074281, 11004227)、国家基础研究发展规划 (2010CB832805) 资助项目

作者简介: 王 玲 (1985 -), 湖北人, 研究生, 主要从事冷原子物理实验研究工作。E-mail: jackrwang@wipm.ac.cn

导师简介: 王 谨 (1970 -), 甘肃人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事原子干涉仪, 量子信息等方面的研究。

E-mail: wangjin@wipm.ac.cn

收稿日期: 2011-04-02; 修改日期: 2011-04-29

Key words: laser technology; Raman laser; injection locking; atom interferometer

1 引言

原子干涉仪可以精确地测量重力加速度和重力梯度^[1,2]、牛顿引力常数^[3~5]、地球自转速率和旋转速率^[6~8]以及精细结构常数^[9]，在导航、资源勘探、地震监测、大地测量及环境监控等方面具有重要应用前景^[10,11]。原子干涉仪通常采取三对拉曼光脉冲序列($\pi/2$ - π - $\pi/2$)对原子波包进行相干操作^[12]，高功率的拉曼光可让更多的原子参与速度敏感型受激拉曼跃迁，有利于实现信噪比高的原子干涉仪条纹。研制高功率的拉曼激光器对冷原子干涉仪的实验研究具有重要意义。

注入锁定技术是提高激光功率同时保持注入光相干性的有效方法^[13]。半导体激光器注入锁定时，需将主激光器的输出光注入到从激光器中，主激光器一般选用窄线宽、单纵模的激光器，从激光器选取功率较大的半导体激光器，当主、从激光器的频率、偏振匹配时，从激光器可被注入锁定，此时从激光器的频率、相位和偏振与主激光器同步，主激光器的输出功率被从激光器有效地放大。注入锁定技术的实验研究已有大量报道，最早实现注入锁定的是氦氖激光器^[14]，后来注入锁定被应用于二氧化碳激光器^[15,16]。近年来，半导体激光器的应用范围越来越广，其注入锁定技术也有了很大的发展^[17]。2000年北京大学王晓辉等利用半导体激光器速率方程的两模式场模型描述了从激光器的注入锁定理论^[18]，2008年实现了垂直腔面发射半导体激光器的注入锁定^[19]。经过高频声光调制器移频后的两个激光场能保持很好的相干性，并避免了注入锁定过程中的模式竞争，频率和相位相对稳定，可作为拉曼光用于原子干涉仪。高频声光调制器的衍射效率往往较低，调制产生的拉曼光不能满足原子干涉仪对激光功率的需求。如前所述，注入锁定技术可实现激光功率的放大，因此将声光调制技术与注入锁定技术结合起来是实现高功率拉曼光的新思路。

我们基于声光调制与注入锁定技术，开展了用于冷原子干涉仪的拉曼光注入锁定的实验研究，实现了高功率的拉曼光。主激光器经过 1.5 GHz 高频声光晶体移频后得到功率分别 3 mW 和 4 mW 的 ± 1 级光，分别注入两个输出功率为 80 mW 的半导体激光管，实现了两个从激光器的注入锁定。两个从激光器的频差为 3.0 GHz，在 200 MHz 频率范围内频差线性变化，功率稳定，满足冷原子干涉仪的实验要求。

2 实验装置

实验原理如图 1 所示，主激光器用外腔反馈半导体激光器 (Toptica, DL110)，激光波长为 780 nm，输出功率为 36 mW，主激光通过一个直径为 50 mm 的大透镜聚焦到 1.5 GHz 的高频声光调制器 (Brimrose, GPF-1500-200-780)，经过往返两次调制后的衍射效率可以达到 20%。主激光通过声光移频后得到 ± 1 级衍射光，将 70% 透过的零级光用全反镜反射后原路返回，重新通过声光移频得到 -1 级衍射光。微波源 (Agilent, E8257C-PSG) 驱动声光调制器，驱动频率为 1.5 GHz，因此， ± 1 级衍射光的频率差为 3.0 GHz。我们将 ± 1 级衍射光 (注入光) 分别注入两台从激光器，从激光器采用自制的半导体激光器，用自主研发的电流控制电路和温度控制电路控制半导体激光管^[20]，用非球面镜 (Thorlabs, C230TME-B) 对激光管 (Thorlabs, DL7410-20S) 输出的激光束进行准直。

在注入锁定过程中，先把注入光与从激光器的输出光调重合，用波长计观测从激光器的波长，通过调节从激光器的驱动电流和温度控制，使从激光器的输出波长在 780 nm 附近，用三角波扫描主激光器，同时观察主激光器和从激光器的吸收谱线，通过微调从激光器的电流，将从激光器调节到最佳模式，实现两个

从激光器和两个注入光的激光模式完全匹配, 此时, 两个从激光器的频率完全依赖于主激光器, 功率为从激光器自身输出功率, 实现了拉曼光激光功率的有效放大。完成注入锁定后, 将两个从激光器输出的激光通过偏振分束镜耦合到保偏光纤, 送到原子干涉区。拉曼光的相对光强可以通过 $\lambda/2$ 波片调节, 以消除 ac Stark 频移^[21]。在冷原子干涉实验过程中, 采用偏振光谱稳频技术, 将主激光器锁定在 ^{85}Rb 原子的 $5^2\text{S}_{1/2}\text{F} = 3 \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}\text{F}' = 2, 3$ 的交叉峰上。

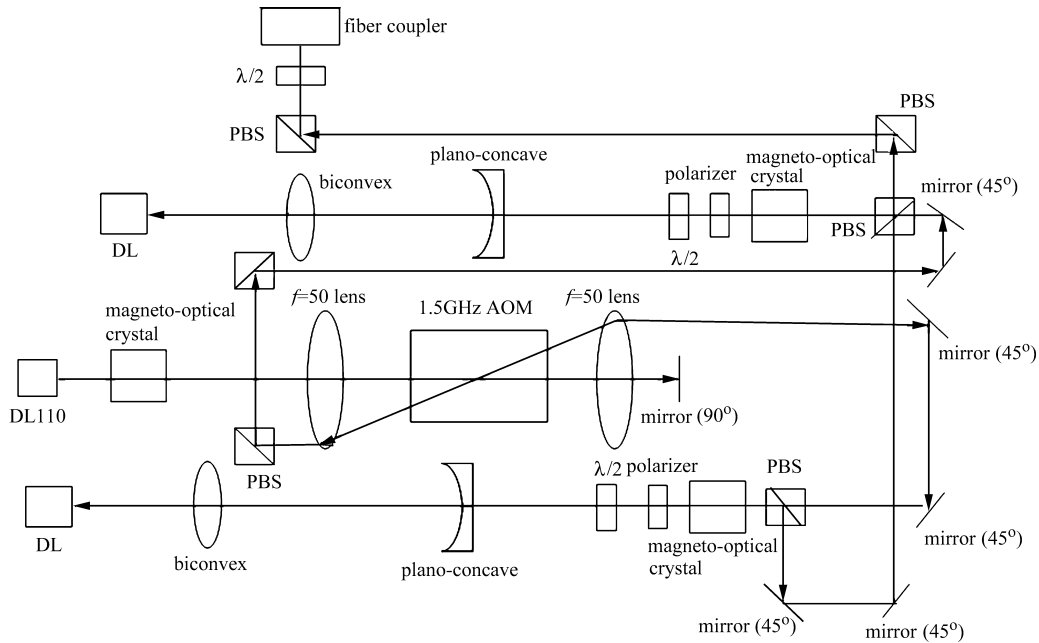


Fig.1 Diagram of optical arrangement

PBS:polarization beam splitter, AOM:acousto-optical modulator, $\lambda/2$:wave plate, DL:diode laser

3 实验结果

当从激光器被注入锁定后, 利用三角波对主激光器进行外腔扫描, 可以得到 Rb 原子的吸收谱线, 两台从激光器被主激光器经过 1.5 GHz 声光调制器移频后的 ± 1 级光分别注入锁定, 主激光器 (master laser 箭头标示位置) 和 ± 1 级光被注入锁定后的两个从激光器 (slaver laser 1 和 slaver laser 2 箭头标示位置) 的吸收谱线如图 2 所示, 可以看出, 主激光器与从激光器被注入锁定后的吸收谱线 (^{85}Rb 原子 $5^2\text{S}_{1/2}, \text{F} = 3 \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}, \text{F}'$ 跃迁) 的形状一致, 两台从激光器被主激光器经过 1.5 GHz 声光调制器移频后分别注入锁定, 从激光器相对于主激光器的频率分别左、右失谐 1.5 GHz, 由此可以看出两个从激光器被完全注入锁定。两个从激光器的频率完全依赖于主激光器, 频率相差 3.0 GHz, 为 ^{85}Rb 原子超精细结构基态能级的微波跃迁频率, 相位保持相对稳定, 同时两个从激光器相对 ^{85}Rb 原子的 D2 线负失谐 1.5 GHz, 实现了大失谐的拉曼光激光系统, 可以实现原子干

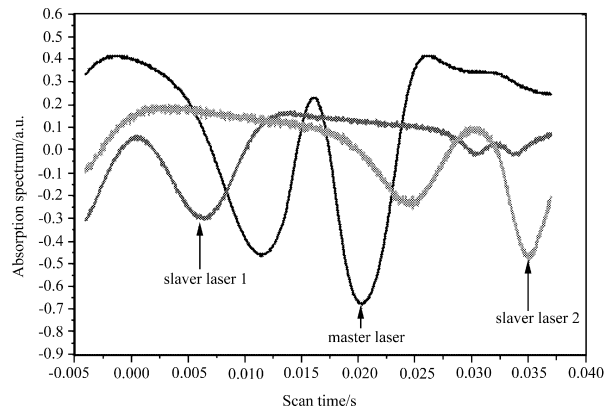


Fig.2 Absorption spectrum of master laser and slave lasers after injection locking

涉仪中波包的相干操作。我们将两个从激光器的输出激光进行拍频,用 25 GHz 快速响应光电二极管 (New-focus 1434-25G) 进行探测,用频谱仪观察到的拍频信号如图 3 所示,在 3.035 GHz 附近的拍频峰半高宽约为 17 kHz,信噪比优于 55 dB。

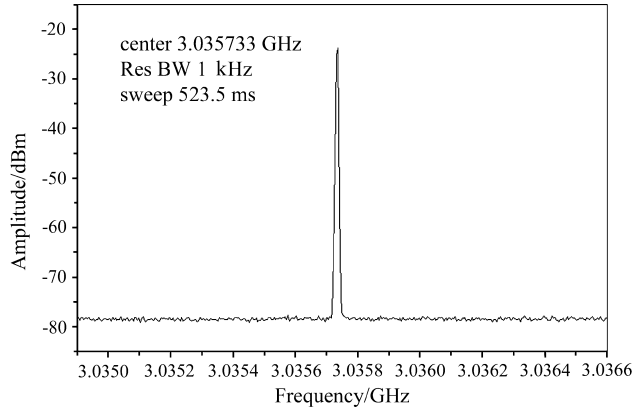


Fig.3 Beat signal of Raman beams

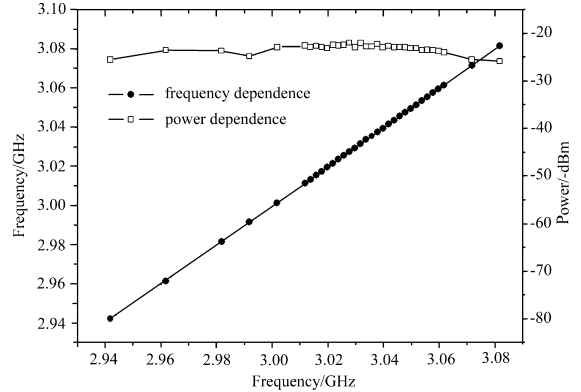


Fig.4 Dependence of beat signals on microwave frequency

在主激光器的功率为 39.0 mW 的情况下,拉曼光经过光纤耦合后总的输出功率为 46.8 mW,其中 +1 级光输出功率为 36.0 mW, -1 级光为 10.8 mW,两束拉曼光的光强比例为 1:3.5^[21]。用微波源对拍频信号进行扫描,拍频信号的频率随着微波源的扫描频率线性变化,如图 4 所示,实心圆点曲线为拍频信号中心频率变化,中空方块曲线为拍频信号的功率随着微波源扫描频率的变化关系,可以看出在 200 MHz 的频率扫描范围内,拍频信号的功率保持相对稳定。由于主激光器被正负移频后注入从激光器,因此拉曼光拍频信号的频率是微波源扫描频率的两倍,通过拍频信号的强度可以判断从激光器是否被完全锁定。我们用频谱分析仪实时监测拍频信号的频率和功率,两个从激光器被完全注入锁定长达几十个小时。

4 结 论

我们利用注入锁定技术实现了拉曼光的功率放大,克服了用高频声光调制器产生的拉曼光功率较低的问题,在原子干涉仪实验中,使更多的原子参与到波包相干操作过程中,提高了冷原子干涉仪的条纹对比度,为冷原子干涉仪在精密测量领域中的应用奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] Peters A, Chung K Y, Chu S. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms [J]. *Nature*, 1999, 400(6747): 849-852.
- [2] McGuirk J M, Foster G T, *et al.* Sensitive absolute-gravity gradiometry using atom interferometry [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, 65(3): 33608.
- [3] Fixler J B, Foster G T, McGuirk J M, *et al.* Atom interferometer measurement of the Newtonian constant of gravity [J]. *Science*, 2007, 315(5808): 74-77.
- [4] Bertoldi A, Lamporesi G, Cacciapuoti L, *et al.* Atom interferometry gravity- gradiometer for the determination of the Newtonian gravitational constant G [J]. *Euro. Phys. J. D.*, 2006, 40(2): 271-279.
- [5] Lamporesi G, Bertoldi A, Cacciapuoti L, *et al.* Determination of the Newtonian gravitational constant using atom interferometry [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100(5): 050801.

- [6] Gustavson T L, Landragin A, *et al.* Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope [J]. *Class. Quantum Grav.*, 2000, 17(12): 2385-2398.
- [7] Canuel B, Leduc F, Holleville D, *et al.* Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97(1): 010402.
- [8] Durfee D S, Shaham Y K, Kasevich M A. Long-term stability of an area-reversible atom-interferometer sagnac gyroscope [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97(24): 240801.
- [9] Weiss D S, Young B C, Chu S. Precision-measurement of $h/m(cs)$ based on photon recoil using laser-cooled atoms and atomic interferometry [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, 59(3): 217-256.
- [10] Kasevich M A, Chu S. Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer [J]. *Appl. Phys. B*, 1992, 54(5): 321-332.
- [11] Arlt J, Birkel G, Rasel E, *et al.* Atom optics, guided atoms, and atom interferometry [J]. *Adv. At. Mol. Opt. Phys.*, 2005, 50: 55-89.
- [12] Bouyer P, Gustavson T L, *et al.* Microwave signal generation with optical injection locking [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21 (18): 1502-1504.
- [13] Kasevich M A, Chu S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67(2): 181-184.
- [14] Stover H L, Steier W H. Locking of laser oscillators by light injection [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, 8: 91-93.
- [15] Girard A. The effects of the insertion of a CW, low-pressure CO₂ laser into a TEA CO₂ laser cavity [J]. *Opt. Commun.*, 1974, 11(4): 346-351.
- [16] Lachambre J L, Lavigne P, Otis G, *et al.* Injection locking and mode selection in TEA-CO₂ laser oscillators [J]. *IEEE Electron.*, 1976, 12(12): 756-764.
- [17] Lang R. Injection locking properties of a semiconductor laser [J]. *IEEE J. Quan. Electr.*, 1982, 18(6): 976-983.
- [18] Wang X, Chen X, *et al.* Theoretic and experiment study on large frequency different side-mode injection locking of high power semiconductor lasers for laser cooling [J]. *Chin. Phys. Soc.*(物理学报), 2000, 49(1): 86-92(in Chinese).
- [19] Chen W, Qi X, *et al.* Optical phase locking with a large and tunable frequency difference based on a vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(4): 357-359.
- [20] Chen L, Xiong Z, *et al.* Tapered amplified diode laser injected by distributed feedback laser [J]. *Chin. J. of Quan. Electr.*(量子电子学报), 2010, 27(1): 15-20(in Chinese).
- [21] Li R, Zhou L, *et al.* Measurement of the quadratic Zeeman shift of ⁸⁵Rb hyperfine sublevels using stimulated Raman transitions [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(7): 1340-1344.