

^{87}Rb 原子干涉绝对重力仪激光系统设计

赵 阳 王少凯 庄 伟 房 芳 李天初

中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 北京 100013

摘要 设计了一套紧凑可靠的 ^{87}Rb 原子干涉重力仪激光系统。该激光系统仅采用两台包含锥形放大器的半导体激光器作为光源,通过简单、巧妙的设置,实现原子干涉仪中所需的9种频率的激光。系统中包含2个电学伺服系统,用于实现激光的频率稳定和一对拉曼光的获得,其他频率激光均在2束拉曼光的基础上通过声光调制器移频实现,满足对各束光的频率和功率的控制要求。整个系统设计紧凑,性能可靠。

关键词 原子与分子物理学;拉曼激光;原子重力仪;激光冷却和囚禁

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.091406

Design of Laser System for Absolute Gravimeter Based on ^{87}Rb Atom Interferometer

Zhao Yang Wang Shaokai Zhuang Wei Fang Fang Li Tianchu

Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

Abstract A laser system design is presented for an absolute gravimeter based on ^{87}Rb atom interferometer. By skillful design, lasers with 9 kinds of different frequency are based on two diode lasers including tapered amplifier. Two electrical feedback systems are used for laser frequency stabilization and generating the Raman lasers, respectively. All other lasers are based on two Raman lasers and realized with frequency shifting by acoustic optical modulators. This laser system not only has the compact and simple construction, but meets all the requirements for laser power and frequency controlling. It has the characteristic of reliability and integrity.

Key words atomic and molecular physics; Raman laser; atom gravimeter; laser cooling and trapping

OCIS codes 140.3425; 020.7010; 300.6210; 300.6450

1 引 言

原子的激光冷却与相干操控技术为精密测量科学提供了新的技术手段。冷原子干涉绝对重力仪利用原子的波动性对重力加速度进行精密测量,相比传统重力仪,新型的冷原子干涉重力仪采用自由下落的原子,测量周期仅需1 s左右,远快于传统光学干涉绝对重力仪,并具有更高的灵敏度^[1]。

近些年来,国外多家科研机构展开了相应的研究,包括斯坦福大学的朱棣文小组^[2-3]、法国BNM小组^[4-5]、意大利MAGIA小组^[6]、德国洪堡大学^[7]等多个小组已经实现或正在实现冷原子重力仪。国内研究单位如中国科学院武汉物理与数学研究所^[8-9]、华中科技大学^[10-12]、浙江大学^[13-14]等也展开了相关研究。

激光系统是冷原子重力仪的重要组成部分,是实现重力仪的前提和基础。它包括多种需要精确控制频率、功率、时序的激光,其频率稳定性和准确度很大程度上决定着整个重力仪系统的准确度和稳定性。同时由于重力测量的特殊性,重力仪必须实现可移动性,因此激光系统需要尽可能的简化和可靠。

目前 ^{87}Rb 原子重力干涉仪的激光系统主要有基于半导体激光器和基于光纤激光器这两种方案。其中基于光纤激光器的方案通常先利用窄线宽的1560 nm光纤激光器经过大功率光纤放大器后输出10 W量级的激光,然后再单次或者2~3次通过波导型周期性极化倍频晶体PPLN进行倍频,产生干涉仪所需的780 nm

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15; 网络出版日期: 2015-07-16

作者简介: 赵 阳(1982—),女,博士研究生,主要从事冷原子物理、稳频激光、窄线宽激光方面的研究。

E-mail: zhaoyang@nim.ac.cn

导师简介: 李天初(1945—),男,博士,研究员,主要从事时间频率基准、光电子计量、稳频激光和光干涉计量等方面的研究。E-mail: litch@nim.ac.cn

激光^[15]。由于通讯波段的激光器和光学器件技术已经非常成熟,因此该种方案较易获得大功率的780 nm激光,之后再通过移频器件得到重力仪所需的多种频率激光。拉曼激光的获得过程为:先通过对1560 nm激光采取移频或调相的方法获得频差为3.4 GHz的2束激光,再通过倍频方法获得频差为6.8 GHz的拉曼光。但在获得拉曼光的过程中,由于2个频率的激光共同通过非线性晶体,除产生各自的倍频光外,由于非线性效应还会产生和频光,很难滤除。该和频光在与原子相互作用时可能造成系统误差和偏差,对绝对重力测量产生影响。基于此原因,目前干涉仪的激光系统主要以半导体激光器方案为主。这种方法通过多台半导体激光器实现干涉仪所需的各种频率的激光。其中法国BNM小组基于5台自行研制的半导体激光器(包括3台外腔半导体激光器和2台锥形放大器),利用2 GHz跳频的方法实现一对拉曼光与其他光分时复用^[16]。该方案除了对电学伺服系统要求较高外,大范围跳频可能会破坏拉曼光的高相干性,对测量结果造成影响。德国洪堡大学采用自行研制的半导体激光器,将整个系统模块化后放置于标准19"仪器架中^[7],由于系统高度集成化,光路非常复杂。意大利MAGIA小组采用类似法国的方案,利用3台外腔半导体激光器和2台锥形放大器(TA)实现整个系统^[6],但是由于其使用激光器较多,造成可靠性降低。华中科技大学采用了5台商用半导体激光器实现原子重力仪激光系统^[12],但是目前尚未能达到搬运的要求。

本文设计了一套⁸⁷Rb原子干涉重力仪激光系统,方案中利用2台包括TA放大器的半导体激光器实现重力仪所需的9种频率激光,同时满足干涉仪所需要的对激光的功率、光谱纯度、控制等方面的要求。整个系统结构紧凑,功率损耗低。系统中仅加入2个电学伺服环路用于激光频率稳定和拉曼光的生成,利于长期稳定运转,并可实现可搬运。

2 干涉仪激光系统要求

原子干涉重力仪测量过程分为原子的俘获和冷却—后冷却—自由下落—一态制备—干涉—探测几个步骤,时序图如图1所示。各部分对激光的要求分别在以下几个小节中阐述。

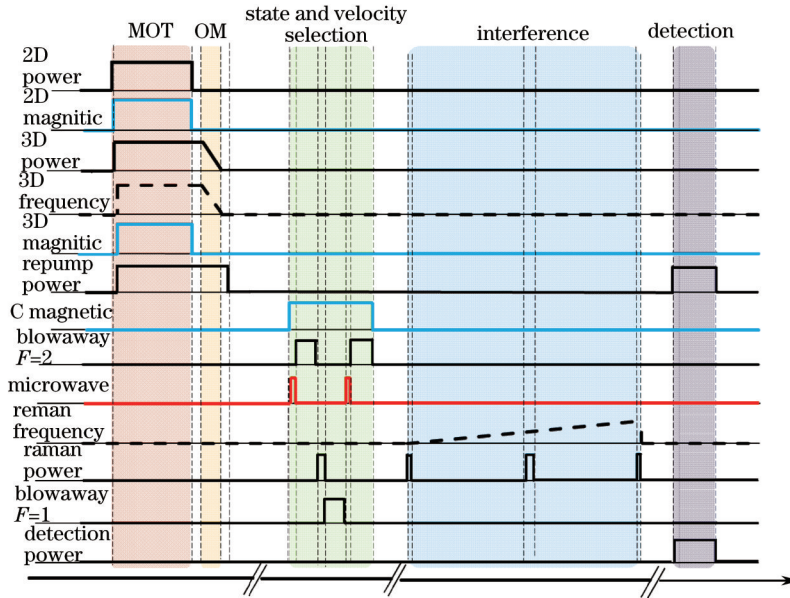


图1 原子干涉重力仪时序示意图

Fig.1 Sequence of ⁸⁷Rb atom interferometer

2.1 原子的俘获和冷却

Rb原子首先在2D磁光阱(MOT)中经过激光俘获/冷却,由1束光推入3D MOT进行激光俘获/冷却。

2D MOT处冷却光从2D方向相互垂直入射到磁光阱中,覆盖2D MOT长为100 mm的区域,共需要功率为120 mW,频率相对跃迁 $F=2 \rightarrow F'=3$ 红失谐20 MHz。2D MOT推光垂直于冷却光,功率为10 mW。

该干涉仪采用释放原子自由下落的方法,因此3D MOT的6束激光同频率,频率相对跃迁 $F=2 \rightarrow F'=3$ 红失谐20 MHz,单束功率约为38 mW。

冷却过程中为避免原子自发辐射衰落到暗态 $F=1$,需要利用重抽运激光把其重新抽运到跃迁几率高的

亮态 $F=2$, 保持冷却循环的持续进行。因此重抽运激光频率与 $F=1 \rightarrow F'=2$ 跃迁共振, 功率需求为毫瓦量级。

2.2 后冷却

MOT 冷却和俘获后关闭磁场, 利用光学黏胶(OM)实现原子偏振梯度冷却。该过程要求激光功率和频率同步进行大幅度调谐, 功率由 3D MOT 冷却时的 38 mW 下降到 0, 激光频率同步从相对 $F'=3$ 红失谐 20 MHz 至相对 $F'=3$ 红失谐 170 MHz, 频率调谐为 150 MHz。

2.3 态制备

态制备过程即将原子制备在已知的初态, 并清除其他态的原子, 为之后进行的原子干涉过程做准备。该过程利用微波和拉曼激光的共同作用将原子制备在 $F=1, m_F=0$, 即对磁场不敏感的态, 并清除其他非零磁子能级上的原子。因此, 在此过程中需要: 一对拉曼光, 其频率差对应 ^{87}Rb 原子基态的精细结构分裂, 拉曼光将在干涉部分进行详细说明; 两束清除光 $F=1$ 和 $F=2$, 频率分别和 $F=1 \rightarrow F'=0$ 跃迁以及 $F=2 \rightarrow F'=3$ 跃迁共振, 功率均为 10 mW。

2.4 干涉

干涉过程在原子下落进入干涉区后进行。干涉部分通过拉曼光 $\pi/2$ 脉冲— π 脉冲— $\pi/2$ 脉冲三组脉冲与原子相互作用, 利用双光子的受激拉曼跃迁原理实现原子干涉。因此拉曼光的相位噪声直接带入原子干涉重力测量中, 决定干涉信号噪声。其相位噪声对测量结果的影响可简单表示为^[7]:

$$\Delta g = \frac{\Delta \Phi_{\text{noise}}}{k_{\text{eff}} T^2}, \quad (1)$$

其中 Δg 为重力加速度的变化量, $\Delta \Phi_{\text{noise}}$ 为由于拉曼激光噪声引起的干涉仪的相位噪声, 可表示为 $\Delta \Phi_{\text{noise}}^2 = \int_0^\infty |H(2\pi f)|^2 S_\phi(f) df$, $S_\phi(f)$ 为拉曼光的相对相位噪声, $H(2\pi f)$ 为传递函数, 由干涉重力仪实验参数决定。

由此可见, 拉曼光的相位噪声直接影响重力测量的稳定性, 因此拉曼光为整个原子干涉仪的重点。若预期重力测量结果优于 $10^{-9}g$ 量级, 设原子自由演化时间 $T=70 \text{ ms}$, 作用时间 $\tau=50 \mu\text{s}$, 拉曼光相位噪声应优于 -90 dBc/Hz 。

拉曼光功率变化同样影响干涉信号。原子在与 3 个拉曼脉冲作用后, 由于光功率变化引入的相位差表示为^[8]:

$$\sigma_{\Delta\phi} = \frac{\sqrt{3}\pi}{2} \frac{\Delta\Omega}{\Omega} = \frac{\sqrt{3}\pi}{2} \frac{\Delta I}{I}. \quad (2)$$

因此在干涉测量中还需要对拉曼光功率进行控制。

两束拉曼光频率应分别符合 $F=1 \rightarrow F'=0$ 和 $F=2 \rightarrow F'=0$ 红失谐 1 GHz。采用大的频率失谐可以有效避免单束光引起的自发辐射影响。

由于干涉过程中原子自由下落, 其共振频率会产生多普勒频移, 因此在干涉过程中还需调谐两束拉曼光的频差, 以满足原子下落过程的频率变化。

2.5 探测

完成干涉后, 原子进入探测区进行探测, 得到处于 $F=2$ 的概率, 由此描画出原子的干涉条纹。探测光与 $F'=3$ 近共振, 红失谐 5 MHz, 所需功率为 30 mW。

2.6 绝对重力结果

原子干涉绝对重力可以表示为:

$$g = \alpha_0 / k_{\text{eff}}, \quad (3)$$

其中 α_0 为相位为 0 时拉曼光的扫描速率, k_{eff} 为拉曼光的有效波矢。由(3)式可以看出, 拉曼激光频率的稳定性和绝对值将直接带入到测量结果中。如果激光频率变化峰峰值小于 100 kHz, 当预期重力测量结果优于 10^{-9} 量级时, 即可忽略激光频率变化对结果的影响。同时激光频率绝对值偏差也应小于 50 kHz。

3 激光系统设计方案

在激光的频率要求方面, 从图 2 的 ^{87}Rb 能级图中可以看出, 激光频率主要分为 $S_{1/2}$ 的 $F=1$ 到 $P_{3/2}$ 各能级和 $S_{1/2}$ 的 $F=2$ 到 $P_{3/2}$ 两个部分, 其中 $P_{3/2}$ 各子能级频率间隔较小, 通过光学移频器件可以实现, 而 $S_{1/2}$ 两个子能级

频率间隔为 6.834 GHz,通过一般声光调制器和电光调制器移频或调制损耗较大,因此可采用另外一台激光器实现 $S_{1/2}$ 的 $F=1 \rightarrow P_{3/2}$ 各能级的激光。

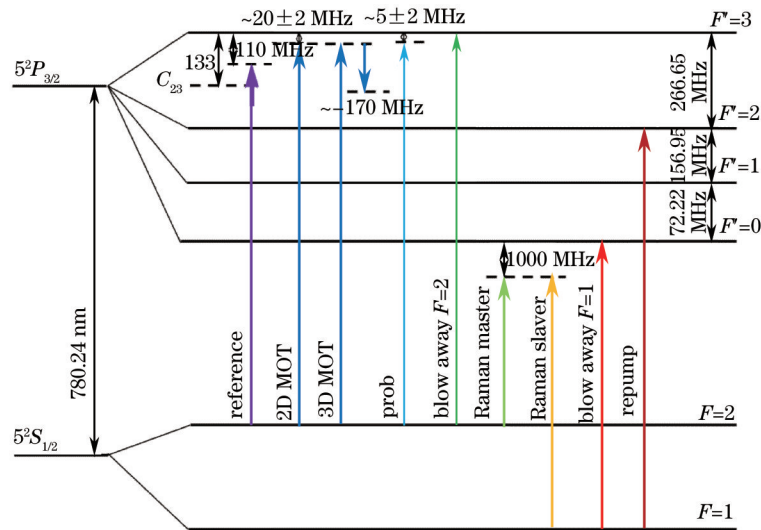


图 2 ^{87}Rb 能级示意图及干涉仪所需激光

Fig.2 Level scheme of ^{87}Rb and laser frequencies required in setup

功率要求方面冷却光需要过饱和,同时 3D MOT 光后冷却阶段的频率和功率要求大范围调谐,因此需要实现对激光频率和功率进行有效控制,并在光路中设置相应的控制器件。

综合考虑以上各方面要求,该激光方案采用两台包含锥形放大器的外腔半导体激光器(Toptica 公司的 TA pro 780 nm 激光器)作为光源,激光器 TA1 用来实现接近 $S_{1/2}$ 的 $F=1$ 到 $P_{3/2}$ 各能级跃迁的激光,激光器 TA2 用来实现接近 $S_{1/2}$ 的 $F=2$ 到 $P_{3/2}$ 各能级跃迁的激光。

这种方案比光纤激光器方案复杂,但是由于这种方案可以获得更好的光谱纯度,可有效减小系统误差。而相比其他半导体激光方案,该系统中仅采用两台激光器,两套电学锁定系统用于激光频率锁定和拉曼光相位锁定,因此系统更加简单紧凑,可靠性高,维护成本低。

前面提到的所需激光功率均为满足实验要求的最小功率,实际系统中还要考虑各种功率损耗,如声光调制损耗,光纤耦合损耗,光纤分束损耗等,如 3D MOT 光的实现需要功率为 $38\text{ mW} \times 6 = 228\text{ mW}$,但考虑到光学耦合效率、声光效率等损耗,共需功率约为 1.2 W。因此虽然单台激光器输出功率较大(隔离器后输出功率约为 2.5 W),但在激光系统设计时仍需要充分考虑。

3.1 参考激光

通过图 2 可以看出, $S_{1/2}$ 的 $F=2 \rightarrow P_{3/2}$ 的几个频率激光均接近 $F'=3$ 跃迁,由于 $F'=2$ 和 $F'=3$ 跃迁的交叉线具有最好的信噪比,可将参考激光锁定在该交叉线上,获得最佳的稳频效果。

为满足激光系统的频率漂移峰-峰值小于 100 kHz 的要求,方案中采用频率调制光谱的方法实现激光频率锁定,如图 3 所示。方案中利用激光器 TA1 的监测输出口(monitor)输出光(约 10 mW)经 1/2 波片(HWP),由偏振分光棱镜(PBS)将激光分为两束,分别作为探测光和抽运光。探测光经过格兰棱镜净化偏振态后入射到电光调制器中进行相位调制,调制频率为 20 MHz。再由扩束镜进行扩束后入射到 Rb 泡中,经过第二个扩束镜缩小光斑后,由第二个 PBS 反射到探测器上进行探测。抽运光则经过声光调制器进行 46 MHz 的移频(-1 级),使激光频率高于 $F'=2$ 和 $F'=3$ 跃迁的交叉线 23 MHz,最后激光频率稳定在与 $F'=3$ 跃迁红失谐 110 MHz 处,便于其他频率激光的生成。

在图 3 中 TA pro 为包含 TA 放大器的半导体激光器;HWP 为 1/2 波片,PBS 为偏振分光棱镜;Glan 为格兰棱镜;EOM 为电光调制器;M 为反射镜;expanders 为扩束镜;Rb cell 为 Rb 泡,lens 为透镜;PD 为探测器。

3.2 2D MOT 冷却光

2D MOT 光在参考激光频率的基础上,经声光调制器移频,激光频率上移 90 MHz,实现与 $F'=3$ 跃迁红失谐 20 MHz。

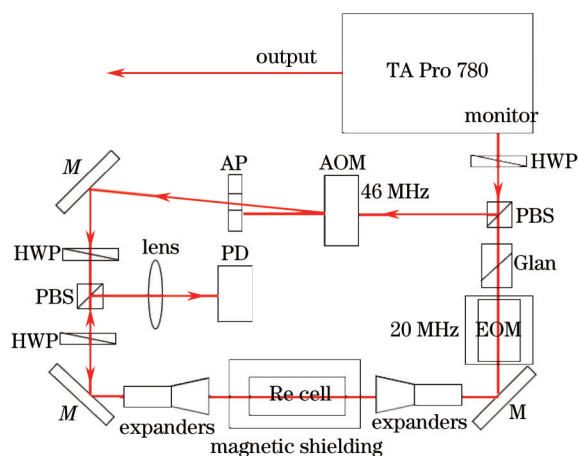


图3 参考激光稳频系统示意图

Fig.3 Scheme of reference laser frequency stabilization system

3.3 3D MOT冷却光

3D MOT光同样需在参考激光频率的基础上移频90 MHz,实现与 $F'=3$ 跃迁红失谐20 MHz。3D MOT在实现冷却和俘获后,需用光学黏胶进一步冷却原子。因此3D MOT光的频率需进一步大范围调谐到与 $F'=3$ 跃迁红失谐150 MHz,同时激光功率随频率的变化而相应衰减。

方案中利用两个频率分别为200 MHz和350 MHz的声光调制器实现。首先激光两次通过200 MHz声光调制器后再单次通过350 MHz声光调制器。在进行磁光阱冷却时,经过两个声光调制器移频使激光频率相对 $F'=3$ 跃迁红失谐20 MHz。进入光学黏胶阶段,配合时序控制,激光频率连续扫描150 MHz,至相对 $F'=3$ 跃迁红失谐170 MHz。同时通过控制声光调制器的压控衰减器实现激光功率的衰减。

3.4 清除光 $F=2$ 和探测光

其中一束清除光 $F=2$ 与 $F=2 \rightarrow F'=3$ 共振。探测光频率与 $F'=3$ 近共振,红失谐5 MHz,两束光频率相差5 MHz,所需功率都较小,并且非同时使用,因此可通过声光调制器跳频方式分时实现,并利用 $\lambda/2$ 液晶波片分时改变激光偏振态,通过偏振分光棱镜将清除光 $F=2$ 和探测光时分分开。具体过程如下:当态制备时,声光调制器移频110 MHz,经过液晶波片,使激光成为s光,由PBS反射,作为清除光。当探测时,声光调制器移频105 MHz,经过液晶波片调整为p光,经PBS透射,耦合进入对应光纤,作为探测光。

3.5 拉曼光(主从激光)

如前面所说,拉曼光噪声将直接影响重力加速度的测量结果。为获得高相干性的拉曼光,目前通常采用的方法有移频法,相位调制法和电学锁定法三种。移频法利用声光调制器将激光移频,获得频差为6.8 GHz的相干光后同时对两束光进行功率放大^[17]。但是在合束过程中光路的抖动将引入非共模噪声,破坏其相干性。此外,由于增益介质对入射光功率放大为非线性关系,这种方案无法对拉曼光输出功率进行精确控制。相位调制法利用电光调制器调制出相位边带,再放大得到频差为6.8 GHz的拉曼光^[18]。但是这种方法无法完全滤除电光调制器产生的其他边带,与原子相互作用时可能引入额外的系统误差。相比前两种方法,电学锁定法可偏频锁定两束激光相位^[3,12,16]。该方法虽然在电学系统部分要求较高,但可保证拉曼激光无其他频率成分存在,有利于减小系统误差。

为实现原子干涉的最佳效果,减小重力测量的系统误差,本方案最终采用光学锁定环的方法将两台半导体激光器的相位锁定,频率差与基态超精细分裂频差相同。

拉曼主激光采用TA1中直接输出,从激光由另一台半导体激光器TA2输出产生。首先主激光经过一调制频率为40 MHz的声光调制器用来实现对其频率和功率的控制,之后与TA2输出光合束,共同经过大频移声光调制器AOM移频1.4 GHz,从而实现两束光与 $F'=0$ 红失谐1 GHz,有效避免自发辐射。合束光由高频响应探测器探测,经过快速伺服系统的快慢两个环路将误差信号分别反馈到激光器控制电流和压电陶瓷上,实现拉曼主从激光相位锁定。

在拉曼光频率控制方面,可通过对偏频锁定的信号进行调制,改变拉曼光频差,从而补偿由于原子自由

下落产生的多普勒频率。在功率控制方面,两束拉曼光可分别通过各自的声光调制器进行功率稳定。

3.6 重抽运激光和清除光 $F=1$

在实现了拉曼从激光的锁相后,TA2输出光也实现了频率稳定,其频率为与 $F=1 \rightarrow F=2'$ 红失谐 86 MHz。在此基础上,重抽运光通过声光调制器将激光频率上移 86 MHz,满足频率与跃迁 $F=1 \rightarrow F=2'$ 共振的要求。清除光 $F=1$ 则在重抽运光频率的基础上,两次通过声光调制器使频率下移 229 MHz 实现。

综上可以得到干涉仪激光系统示意图,如图 4 所示。

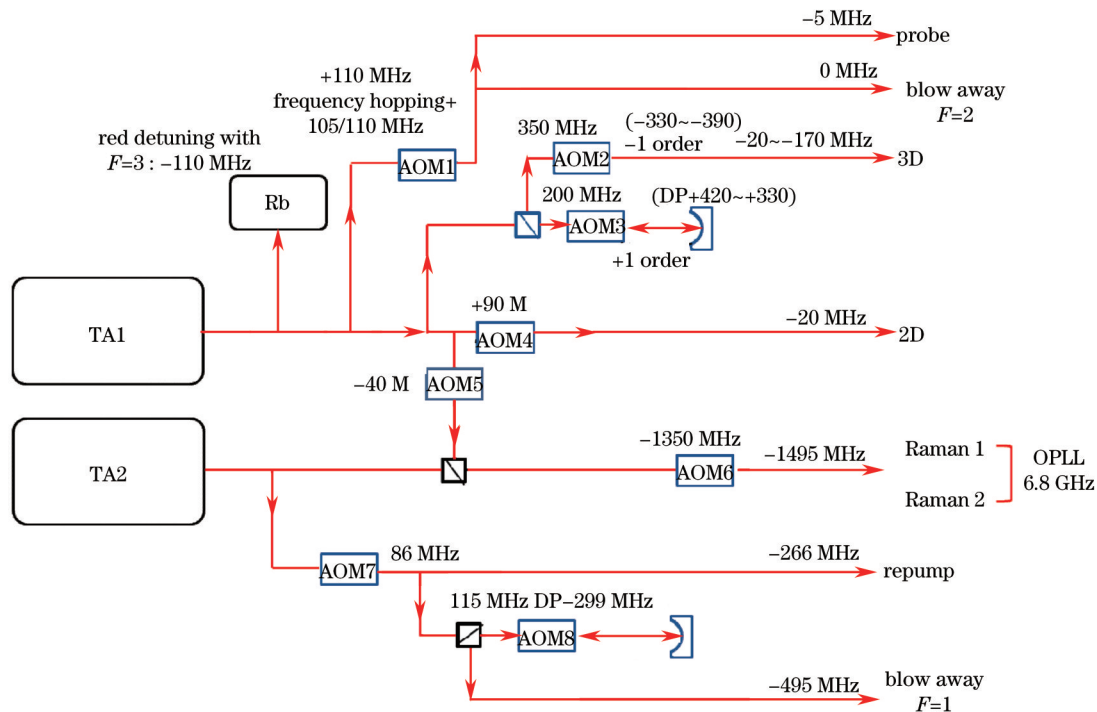


图 4 ^{87}Rb 原子干涉仪光学系统方案图

Fig.4 Laser system setup of ^{87}Rb atom interferometer

为了进一步减小激光功率的损失,方案采用空间合束再耦合光纤的方法,在空间光路中实现各物理过程中所需的不同频率光的合束,减小由于光纤合束器件带来的插入损耗。

激光系统各光束均采用光纤-准直光筒与物理系统连接,保证光学系统与物理系统的独立性和可移动性。

4 结 论

该原子干涉仪激光系统方案采用两台包含 TA 放大器的半导体激光器作为激光光源,其中一台 TA1 作为参考激光,实现频率锁定,并实现 2D MOT 光、3D MOT 光、探测光和清除光 $F=2$;另外一台 TA2 偏频 6.834 GHz 锁定在 TA1 上,实现拉曼从激光、重抽运光和清除光 $F=1$,共 9 种频率的激光。系统中包括 2 个电学伺服系统,用于实现激光频率稳定和拉曼激光的获得,其他激光均通过声光调制器实现。相比目前其他激光方案,系统更加紧凑简单,在保证输出激光性能的前提下,降低激光器使用数量,增加系统稳定并降低维护成本。

参 考 文 献

- 1 S Merlet, Q Bodart, N Malossi, *et al.*. Comparison between two mobile absolute gravimeters: optical versus atomic interferometers[J]. Metrologia, 2010, 47(4): L9-L11.
- 2 M Kasevich, S Chu. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(2): 181-184.
- 3 A Peters, K Chung, S Chu, High-precision gravity measurements using atom interferometry[J]. Metrologia, 2001, 38(1): 25-61.
- 4 N Malossi, Q Bodart, S Merlet, *et al.*. Double diffraction in an atomic gravimeter[J]. Phys Rev A, 2010, 81: 013617.
- 5 Sébastien MERLET. Détermination Absolue De G Dans Le Cadre De l'Expérience De La Balance Du Watt[D]. Paris:

THÈSE DE DOCTORAT DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS, 2010.

- 6 Giacomo Lamporesi. Determination of the Gravitational Constant by Atom Interferometry[D]. Fisica: Dissertation in Physics Ricerca in Fisica, 2006.
- 7 Malte Schmidt. A Mobile High-Precision Gravimeter Based on Atom Interferometry[D]. Berlin: Dissertation Humboldt-Universität zu Berlin 2011.
- 8 Zhou Lin, Xiong Zongyuan, Yang Wei, *et al.*. Measurement of local gravity via a cold atom interferometer[J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(1): 013701.
- 9 L Zhou, Z Y Xiong, W Yang, *et al.*. Development of an atom gravimeter and status of the 10-meter atom interferometer for precision gravity measurement[J]. Gen Relat Gravit, 2011, 43(7): 1931-1942.
- 10 Hu Zhongkun, Sun Buliang, Duan Xiaochun, *et al.*. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter[J]. Physical Review A, 2013, 88: 043610.
- 11 Zhou Minkang, Hu Zhongkun, Duan Xiaochun, *et al.*. Performance of a cold-atom gravimeter with an active vibration isolator[J]. Physical Review A, 2012, 86: 043630.
- 12 Zhou Minkang. Experimented Demonstration of an Atom Interferometry Gravimeter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- 13 Wang Z, Chen T, Wang X, *et al.*. A precision analysis and determination of the technical requirements of an atom interferometer for gravity measurement[J]. Front Phys China, 2009, 4(2): 174-178.
- 14 X Wang, B Cheng, B Wu, *et al.*. A simplified cold atom source for 3-D MOT Loading[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28 (5): 053701.
- 15 S S Sane, S Bennetts, J E Debs, *et al.*. 11 W narrow linewidth laser source at 780 nm for laser cooling and manipulation of Rubidium[J]. Opt Express, 20(8): 8915-8919.
- 16 P Cheinet, F Pereira Dos Santos, T Petelski, *et al.*. Compact laser system for atom interferometry[J]. Applied Physics B, 2006, 84(4): 643-646.
- 17 A Lenef, T D Hammond, E T Smith, *et al.*. Rotation sensing with an atom interferometer[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(5): 760.-763.
- 18 Xue H B, Feng Y Y, Wang X J, *et al.*. Generation of Raman laser beams based on a sideband injection-locking technique using a fiber electro-optical modulator[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84 (4): 046104.

栏目编辑: 韩 峰