

# 基于电光调制的注入锁定拉曼激光相位噪声实验研究

黄敏<sup>1</sup>, 章显<sup>2</sup>, 黄凯凯<sup>1</sup>, 陆璇辉<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>浙江大学物理学系, 浙江 杭州 310027;

<sup>2</sup>浙江大学先进技术研究院, 浙江 杭州 310027

**摘要** 利用光学注入锁定制备的拉曼激光可以用于原子干涉仪。为解决原子干涉条纹的相位受相位噪声的极大影响的问题,研究了不同实验条件下的拉曼激光相位噪声。采用光纤电光调制(EOM)和注入锁定相结合的方法得到两束频差为 6.834 GHz 的相位锁定拉曼激光,将主激光通过光纤 EOM 移频 6.834 GHz 后作为种子光注入到外腔半导体激光器,调节从激光器,获得-1 级移频光的初步放大激光。结果显示,拉曼激光的拍频线宽不大于 3 Hz,频率可调范围为 300 MHz,主激光锁频下相位噪声在 10 Hz~100 kHz 范围内低于-60 dBc/Hz。

**关键词** 激光器;电光调制;外腔半导体激光器;注入锁定;拉曼激光;相位噪声

中图分类号 O431

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.212202

## Experimental Study on Raman Laser Phase Noise of Injection Locking Based on Electro-Optic Modulation

Huang Min<sup>1</sup>, Zhang Xian<sup>2</sup>, Huang Kaikai<sup>1</sup>, Lu Xuanhui<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

<sup>2</sup>Institute of Advanced Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Raman lasers generated by optical injection locking can be used in atom interferometers. However, phase noise significantly affects the phase of atom interference fringe; thus, we experimentally study the phase noise of the Raman laser under varying conditions. Two phase-locked Raman lasers exhibiting a frequency difference of 6.834 GHz are obtained by modulation of optical fiber electro-optic modulation (EOM) and injection locking. In the experimental system, the master laser is modulated using a 6.834-GHz fiber EOM, and its output is emitted as seed light. By adjusting the slave laser, the first amplification output beam of -1 level frequency-shifted laser can be obtained. The result demonstrates that the Raman laser beat linewidth is not wider than 3 Hz, the frequency is adjustable to 300 MHz, and the phase noise is less than -60 dBc/Hz from 10 Hz to 100 kHz when the master laser is frequency-locked.

**Key words** lasers; electro-optic modulation; external cavity diode laser; injection locking; Raman lasers; phase noise

**OCIS codes** 220.2740; 140.2020; 140.3520; 120.5050

## 1 引言

自 1991 年脉冲式原子干涉仪实现以来<sup>[1]</sup>,原子干涉仪在基础物理研究和精密测量领域获得了广泛应用。在基础物理理论方面,原子干涉仪可以用于等效原理的验证<sup>[2-5]</sup>;在精密测量领域,原子干涉仪

被普遍应用于重力加速度<sup>[6]</sup>和重力梯度的测量<sup>[7]</sup>,以及陀螺仪有关参数<sup>[8-10]</sup>、牛顿引力常量<sup>[11-14]</sup>和精细结构常数的确定<sup>[15]</sup>。采用拉曼型喷泉式原子干涉仪测量重力加速度时,通常使用脉冲时长为  $\frac{\pi}{2}-\pi-\frac{\pi}{2}$  的具有高相干性的拉曼激光脉冲序列对原子波包

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-05-09; 录用日期: 2019-05-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0304202)、国家自然科学基金(11474254, 11804298)、中央高校基本科研业务费专项资金(2016XZZX004-01)

\* E-mail: xhlu@zju.edu.cn

进行相干操纵,得到原子分布的干涉条纹,从中解析出相位差,进而获得重力加速度。由此可以看出,拉曼激光的相位噪声对干涉条纹的相位以及重力加速度会有极大的影响,研究拉曼激光的相位噪声变化规律对减小拉曼激光附加噪声的影响及重力加速度的测量具有重要意义。

常见的用于制备相位相干光束的方法主要有光学注入锁定(OIL)法<sup>[16-17]</sup>、光学锁相环路(OPLL)法<sup>[18-21]</sup>、声光调制(AOM)法<sup>[22-23]</sup>和电光调制(EOM)法<sup>[24-25]</sup>等。采用OPLL方法制备拉曼激光的思路是将尚未锁相的两台激光器拍频信号与标准参考信号进行鉴相对比,得到误差信号后将其反馈给两台激光器中的任意一台,从而获得相位稳定的频差信号。OPLL方法的效果在很大程度上依赖于锁相电路的性能和电学参数,且系统复杂,对电路的要求较高,技术实现难度较大。目前国内学者基于锁相环的激光陀螺抖动机构谐振频率跟踪技术,给出了锁相环频率跟踪精度、同步范围等性能指标与抖动控制参数的一般关系<sup>[26]</sup>。AOM移频方法通过采用标准微波信号直接调制激光束,使其产生两个频差稳定的边带,制造两束频差稳定、相干度高的拉曼激光,但拉曼激光频率的改变会显著影响AOM衍射效率,导致拉曼激光功率不稳定,不适用于原子干涉实验。Qu等<sup>[27]</sup>将AOM声光移频器应用到光锁相环路中,实现了锁相环路快速精密调谐,并且着重分析了驱动器功率变化以及移频过程中频率变化对插入损耗的影响。EOM方法与AOM方法类似,利用电光调制器产生边带,获得特定频差的两束光,但在调制过程中会损失大量功率,且会引入次级边带,该两束光与原子相互作用时,所引入的斯塔克频移<sup>[28]</sup>还会带来额外的相位噪声。OIL方法不需要冗繁的电学器件,只需主、从两台激光器,模式匹配后主激光的一部分作为种子光注入从激光器,待从激光输出频率、功率稳定,则可实现两束激光的相位锁定。在原子干涉仪中,两束频差为6.834 GHz的激光需配合其他条件才能应用于OIL方法。

本文使用光纤EOM和注入锁定相结合的方式,利用EOM对部分主激光移频6.834 GHz后,将0.7 mW功率的种子光注入到另一台作为从激光器的外腔半导体激光器(ECDL)中,即可获得用于<sup>87</sup>Rb原子干涉仪的拉曼激光。所提方法不仅能够解决EOM输出功率损失较大,不能直接用于干涉的问题,还能够有效利用从激光器的外腔选频

功能,在输出所需要的一级移频光之前对0级和更高级次移频光的调制频率进行筛除,实现功率的初步放大。另外,本文还研究了利用所提方法产生的拉曼主激光在不同实验条件下的相位噪声变化规律。

## 2 实验装置

在喷泉式原子干涉重力仪中,利用相干拉曼激光脉冲操纵<sup>87</sup>Rb原子的波包,实现频率差为6.834682610 GHz的基态精细能级 $5^2S_{1/2}$ (基态总量子数 $F=1$ )、 $5^2S_{1/2}$ ( $F=2$ )间的原子跃迁,达到干涉目的,即将设定的脉冲序列作用于原子,使原子在上述两能级间重新分布。

本实验采用EOM和注入锁定相结合的方法,可实现频差为6.834 GHz的锁相并制备具有一定调谐范围的拉曼激光,实验原理如图1所示。主激光器采用Toptica公司生产的型号为DL Pro的外腔半导体激光器(Master ECDL),其工作波长范围为778.5~789.4 nm,在780 nm波长处最大输出功率为90 mW,电流噪声小于10  $\mu$ A,长期温控稳定度为0.01  $^{\circ}$ C,自由运转时激光线宽小于1 MHz,绝大部分主激光经二向色性原子蒸气激光频率锁定(DAVLL)稳频以及激光功率放大器(TA)放大后与从激光合束形成最终的拉曼激光对。另一部分输出的主激光经过标准微波信号源输出的6.834 GHz驱动的林姆调制后,输出约0.7 mW的种子光,该种子光被注入到一台自制的外腔半导体激光器,即从激光器(Slave ECDL)。将具有Littrow结构,光栅刻线密度为1800 lp/mm、线宽为300 kHz的外腔半导体激光器作为从激光器,以满足冷原子干涉对激光线宽的需求。注入锁定后,从激光器输出激光的功率经TA放大后,通过声光调制器AOM1实现80 MHz移频,并通过偏振分束器(PBS)与部分主激光合束,利用拉曼激光的光开关,即图1所示的声光调制器AOM2配合自制的射频开关,即可观测拍频,且该合束激光可应用于原子干涉。

在注入锁定的调节过程中,种子光功率过高会导致所输出的从激光调制频率中存在除一级以外的级次,会对拉曼激光的功率稳定性带来不利影响;种子光功率过低却会导致注入难度增大或注入频率的稳定性大幅下降。经过多次实验优化,发现当注入种子光功率为0.7 mW时可产生功率和频率都相对稳定的拉曼激光。在注入锁定的整个调节过程中,需要对从激光的频率进行实时监测,利用波长计

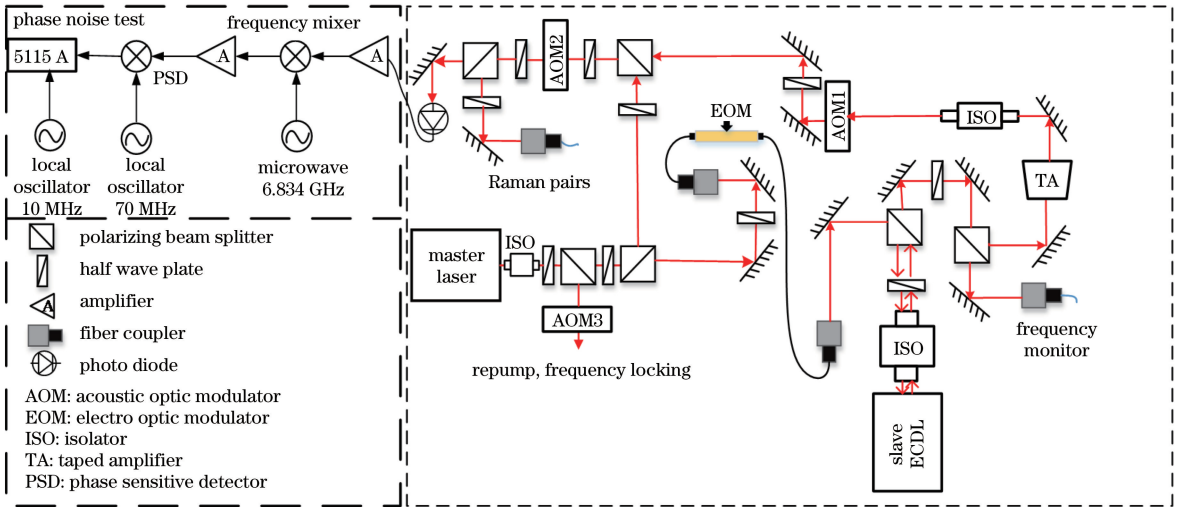


图 1 拉曼激光系统和相位噪声测量实验原理图

Fig. 1 Raman laser system and phase noise measurement principle

监测频率。主激光和从激光合束后,在频谱仪上可观测到快速光电管产生的拍频信号,精细调节从激光器的电流和温度,本实验中利用-1级移频光(即相对主激光移频-6.834 GHz)将波长计读数调至稳定后,拍频信号的频率为6.834 GHz,并且功率稳定,频率无跳动,此时发现从激光频率依赖于主激光频率,所输出的功率为从激光的输出功率。调节时,首先将主激光频率锁定在<sup>87</sup>Rb的5<sup>2</sup>S<sub>1/2</sub>(F=1)→5<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>(F'=2)的跃迁峰,这也是原子干涉中重泵浦光的频率锁定位置。

在拉曼激光相位噪声的研究中,频率和功率稳定的拉曼激光拍频信号和标准微波源信号经混频器混频后得到80 MHz频率的混频信号,经过功率放大器后与70 MHz本振频率的信号匹配,通过相敏检测器得到功率、频率均稳定的10 MHz差频信号,将差频信号放大后与10 MHz本振频率信号同步输入到相位噪声测量仪,进一步研究不同实验条件下的相位噪声变化规律。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 拉曼激光拍频信号

测量注入锁定的拍频信号时,先采用DAVLL稳频法将主激光频率锁定在<sup>87</sup>Rb的5S<sub>1/2</sub>(F=1)→5P<sub>3/2</sub>(F'=2)跃迁峰上,部分主激光经EOM移频6.834 GHz后作为种子光注入从激光器,参考波长计和频谱仪测到的拍频信号,调节从激光器的电流和压电陶瓷换能器(PZT),最终得到功率和频率均稳定的拉曼激光拍频信号。合束激光经快速光电管

转化为电信号,将其接入频谱仪,如图2所示,可以看出,当频谱仪的分辨率带宽(RBW)为300 kHz,测量范围为160 MHz,中心频率为6.834 GHz时,拉曼激光的拍频信号信噪比优于45 dB,图2的插图为本RBW设为1 Hz,测量范围设为100 Hz时的拍频信号,可以看出其半峰全宽(FWHM)不超过3 Hz,完全满足冷原子干涉对拉曼激光频率线宽的要求。

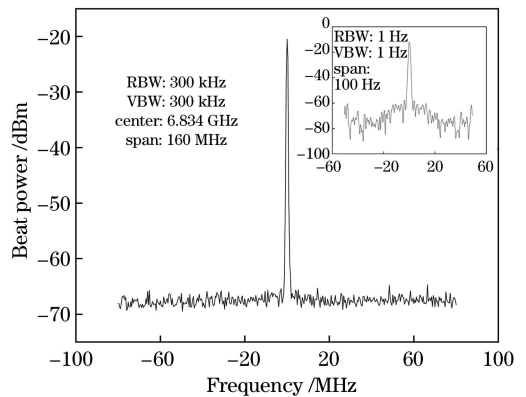


图 2 不同分辨率和测量范围内的拉曼激光拍频信号  
Fig. 2 Raman laser beat signals at different resolutions and measurement ranges

#### 3.2 主激光锁频时的拉曼激光相位噪声

图3所示为主激光频率锁定的状态下,按图1所示的相位噪声测量原理测得的拉曼激光相位噪声。受限于测量电路和功率放大器,频率偏移范围为40~50 Hz时出现一个较窄的突起,而在100~500 Hz时出现一段明显的噪声峰。此外,当测量频率在10 Hz~100 kHz时,拉曼激光的相位噪声平均低于-60 dBc/Hz。

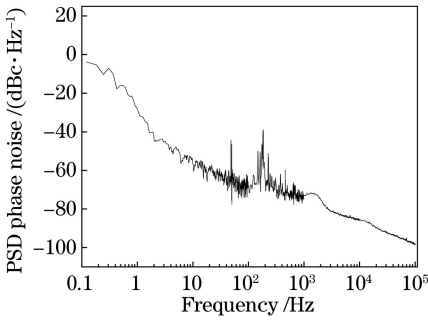


图3 主激光频率锁定时注入锁定拉曼激光的相位噪声

Fig. 3 Phase noise of injection-locked Raman laser under master laser frequency locking

### 3.3 主激光不同扫描频率范围下的拉曼激光相位噪声

由于拉曼激光的相位噪声最终将显著影响干

涉条纹的相位,而对于注入锁定,注入光与从激光器出射光之间的相移也会随着注入光频率的变化而变化,因此,为研究注入锁定过程中种子光与输出从激光的相移带来的附加相位噪声,对主激光频率按照不同的频率范围进行四组扫描,扫描范围分别为 10、50、100 和 200 MHz,以比较相位噪声的变化规律。频率扫描方式为主激光 PZT 扫描,其中 PZT 扫描频率固定为 10 kHz。图 4 所示的相位噪声变化规律显示,除 10 kHz 处 PZT 扫描频率引入的噪声信号外,主激光频率扫描范围越大,10 kHz 附近的噪声信号毛刺越密集。根据文献[29],注入锁定中种子光相位与锁定后的从激光相位关系可表示为

$$\phi(\omega_1) = \arcsin\left(\frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_m}\right), \quad (1)$$

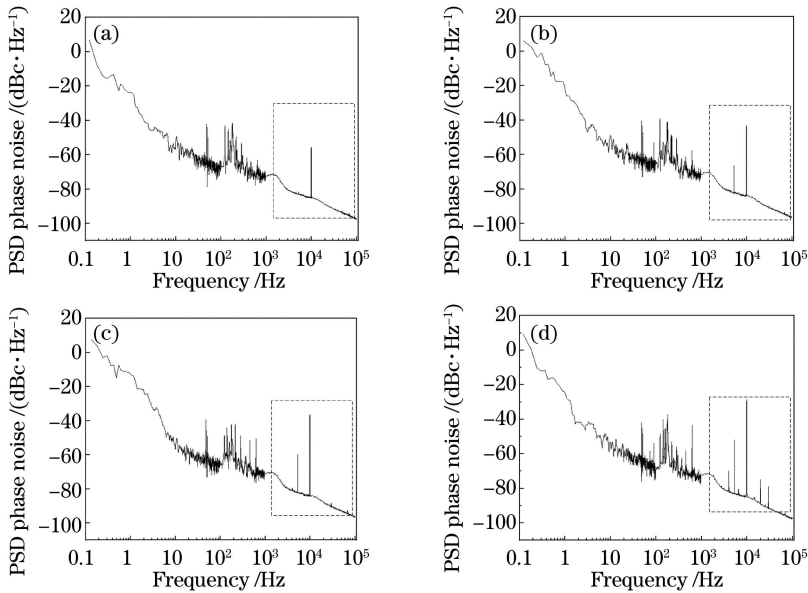


图4 不同主激光扫描频率范围的注入锁定拉曼激光相位噪声。(a) 10 MHz;(b) 50 MHz;(c) 100 MHz;(d) 200 MHz  
Fig. 4 Phase noise of injection-locked Raman laser at different scanning frequency ranges of master laser. (a) 10 MHz; (b) 50 MHz; (c)100 MHz; (d) 200 MHz

式中  $\phi(\omega_1)$  为注入后从激光的稳定相位; $\omega_1$  为注入的种子光频率,受主激光和 EOM 控制; $\omega_0$  为从激光未注入锁定时的初始相位; $\omega_m$  为从激光最大可注入锁定的频率范围的一半,本实验的最大可调谐范围为 300 MHz。在扫描主激光频率(即扫描注入的种子光频率)过程中,从激光会根据主激光频率变化不断建立新的稳定相位,在新的稳定相位重新建立过程中引入了新的相位噪声,由于频率范围变化越大,建立振荡的次数越多,因此随着主激光频率扫描范围的增大,新的噪声信号逐渐密集、增多。由于干涉过程中拉曼激光需要通过频率扫描来弥补多普勒

频移,而频率扫描的思路是只扫描主激光或者从激光中的一束,因此上述研究规律为拉曼激光用于干涉时的频率扫描改进提供了参考,即干涉实验中拉曼激光的频率扫描既要在尽可能小的频率范围内进行,还需只对从激光频率进行扫描,避免对主激光或者种子光频率的扫描,因为一旦对注入锁定前的种子光频率进行扫描,注入锁定过程会因为不断重新建立振荡而引入附加的相位噪声。在原子干涉重力仪实验中,拉曼激光的跳频范围在 10 MHz 以内,并且主激光频率锁定,如图 4(a)所示,扫描范围为 10 MHz 时相位噪声无明显毛刺,其影响几乎可以忽略。



### 3.4 主激光不同 PZT 频率下的拉曼激光相位噪声

在固定主激光扫描频率范围的条件下,可以研究不同 PZT 频率导致的拉曼激光相位噪声变化规律。主激光扫描频率范围固定为 100 MHz,改变 PZT 频率时测得的相位噪声变化规律如图 5 所示。

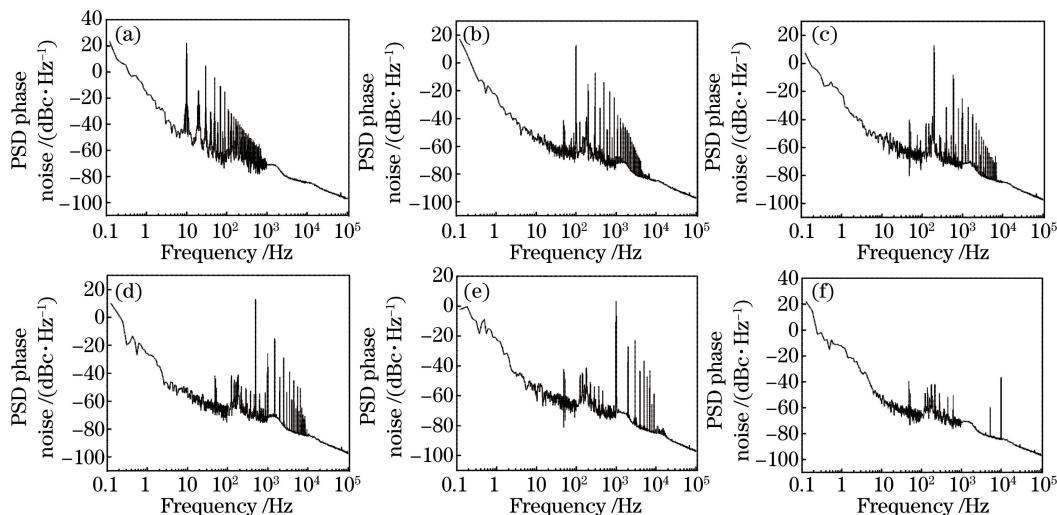


图 5 不同主激光 PZT 频率的注入锁定拉曼激光相位噪声。

(a) 10 Hz; (b) 100 Hz; (c) 200 Hz; (d) 500 Hz; (e) 1 kHz; (f) 10 kHz

Fig. 5 Phase noise of injection-locked Raman laser at different PZT frequencies of master laser. (a) 10 Hz;

(b) 100 Hz; (c) 200 Hz; (d) 500 Hz; (e) 1 kHz; (f) 10 kHz

对于原子干涉仪来说,选择合适的 PZT 频率对产生频率稳定的拉曼激光也至关重要,这主要是因为过大的 PZT 频率会导致注入锁定的频率和功率均产生较大波动,从而出现无法注入的现象,这时需要增大种子光功率,而一旦增大种子光功率,EOM 带来的非-1 级移频光功率也会随之增大,在模式竞争中就会产生较大的附加噪声,这对干涉条纹的相位解析非常不利,所以必须选择合适的 PZT 扫描频率和种子光功率,以减少拉曼激光的频率不稳定性。本实验通过多次优化,控制 PZT 频率为 10 Hz,种子光功率为 0.7 mW,可以得到频率稳定几十个小时的拉曼激光。

## 4 结 论

利用光纤 EOM 移频方法结合外腔半导体激光器的注入锁定技术,得到频率稳定几十个小时、从激光功率经 TA 放大后可用于喷泉式原子干涉重力仪的拉曼激光。通过优化 PZT 频率和种子光功率,得到的主、从激光的拍频线宽不超过 3 Hz;在主激光频率锁定的状态下,测得相位噪声在 10 Hz ~ 100 kHz 频率范围内全面低于 -60 dBc/Hz;研究了不同主激光扫描频率范围的相位噪声变化规律,随

可以看出,不同 PZT 频率会带来以该 PZT 频率为主噪声峰且附带不同密集范围的次级噪声峰。随着 PZT 频率的逐步增大,主噪声峰向 PZT 频率增加的方向移动,而随着 PZT 频率的增大,其附带的次级噪声峰密集程度降低。

着扫描频率范围的增大,次级噪声密集程度增大,因此建议扫描范围切勿过大,干涉时应从激光器注入锁定后的出射光频率进行扫描,这可为选择合适的拉曼激光频率扫描方法来减小拉曼激光相位噪声对干涉条纹相位的影响提供有意义的参考。

## 参 考 文 献

- [1] Kasevich M, Chu S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions [J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(2): 181-184.
- [2] Audretsch J, Bleyer U, Lämmerzahl C. Testing Lorentz invariance with atomic-beam interferometry [J]. *Physical Review A*, 1993, 47(6): 4632-4640.
- [3] Viola L, Onofrio R. Testing the equivalence principle through freely falling quantum objects [J]. *Physical Review D*, 1997, 55(2): 455-462.
- [4] Fray S, Diez C A, Hänsch T W, *et al.* Atomic interferometer with amplitude gratings of light and its applications to atom based tests of the equivalence principle [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(24): 240404.
- [5] Dimopoulos S, Graham P W, Hogan J M, *et al.* Testing general relativity with atom interferometry

- [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98 (11): 111102.
- [6] Peters A, Chung K Y, Chu S. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms [J]. *Nature*, 1999, 400(6747): 849-852.
- [7] Snadden M J, McGuirk J M, Bouyer P, *et al.* Measurement of the Earth's gravity gradient with an atom interferometer-based gravity gradiometer [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(5): 971-974.
- [8] Gustavson T L, Bouyer P, Kasevich M A. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78 (11): 2046-2049.
- [9] Lenef A, Hammond T D, Smith E T, *et al.* Rotation sensing with an atom interferometer [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(5): 760-763.
- [10] Clauser J F. Ultra-high sensitivity accelerometers and gyroscopes using neutral atom matter-wave interferometry [J]. *Physica B+C*, 1988, 151(1/2): 262-272.
- [11] Fattori M, Lamporesi G, Petelski T, *et al.* Towards an atom interferometric determination of the Newtonian gravitational constant [J]. *Physics Letters A*, 2003, 318(3): 184-191.
- [12] Schwarz J P, Robertson D S, Niebauer T M, *et al.* A free-fall determination of the Newtonian constant of gravity [J]. *Science*, 1998, 282 (5397): 2230-2234.
- [13] Bertoldi A, Lamporesi G, Cacciapuoli L, *et al.* Atom interferometry gravity-gradiometer for the determination of the Newtonian gravitational constant G [J]. *The European Physical Journal D*, 2006, 40 (2): 271-279.
- [14] 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.
- [15] Weiss D S, Young B C, Chu S. Precision measurement of  $\hbar/m$  Cs based on photon recoil using laser-cooled atoms and atomic interferometry [J]. *Applied Physics B*, 1994, 59(3): 217-256.
- [16] Bouyer P, Gustavson T L, Haritos K G, *et al.* Microwave signal generation with optical injection locking [J]. *Optics Letters*, 1996, 21 (18): 1502-1504.
- [17] Chen W L, Qi X H, Yi L, *et al.* Optical phase locking with a large and tunable frequency difference based on a vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 357-359.
- [18] Marino A M, Stroud C R, Jr. Phase-locked laser system for use in atomic coherence experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79 (1): 013104.
- [19] Yim S H, Lee S B, Kwon T Y, *et al.* Optical phase locking of two extended-cavity diode lasers with ultra-low phase noise for atom interferometry [J]. *Applied Physics B*, 2014, 115(4): 491-495.
- [20] Appel J, MacRae A, Lvovsky A I. A versatile digital GHz phase lock for external cavity diode lasers [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(5): 055302.
- [21] Schmidt M, Prevedelli M, Giorgini A, *et al.* A portable laser system for high-precision atom interferometry experiments [J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 11-18.
- [22] Wang P, Li R B, Yan H, *et al.* Demonstration of a Sagnac-type cold atom interferometer with stimulated Raman transitions [J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(1): 27-30.
- [23] Wang K, Yao Z W, Li R B, *et al.* Hybrid wide-band, low-phase-noise scheme for Raman lasers in atom interferometry by integrating an acousto-optic modulator and a feedback loop [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(5): 989-992.
- [24] Shahriar M S, Turukhin A V, Liptay T, *et al.* Demonstration of injection locking a diode laser using a filtered electro-optic modulator sideband [J]. *Optics Communications*, 2000, 184(5/6): 457-462.
- [25] Xue H B, Feng Y Y, Wang X J, *et al.* Note: 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.
- [26] Ma J J, Xie Q, Tian Z A, *et al.* Frequency tracking technology for dither mechanism of laser gyros based on phase locked loop [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101401.  
马家君, 谢泉, 田泽安, 等. 基于锁相环的激光陀螺抖动机构频率跟踪技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101401.
- [27] Qu Z, Zhang L, Tong S F, *et al.* Insertion loss characteristics of acousto-optic frequency shifter in optical phase-locked loop and its optimization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100609.  
曲正, 张磊, 佟首峰, 等. 光锁相环路中声光移频器

- 插入损耗特性研究及优化[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100609.
- [28] Li R B, Zhou L, Wang J, *et al.* Measurement of the quadratic Zeeman shift of  $^{85}\text{Rb}$  hyperfine sublevels using stimulated Raman transitions [J]. Optics Communications, 2009, 282(7): 1340-1344.
- [29] Siegman A E. Lasers [M]. California: Oxford University Press, 1986: 1144.