

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003297

# 原子干涉重力仪集成光源系统综述

吕梦洁<sup>1,2</sup> 王光明<sup>1</sup> 颜树华<sup>1,2</sup> 王国超<sup>1,2,3</sup> 朱凌晓<sup>1,2</sup> 王亚宁<sup>1,2</sup> 贾爱爱<sup>1,2</sup> 张旭<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 智能科学学院 长沙 410073; 2. 国防科技大学 交叉学院 长沙 410073;

3. 火箭军工程大学 西安 710025)

**摘要:**高精度重力测量是进行惯性导航、大地测量、空间科学、海洋探测、基础物理研究的重要观测手段,高精度的重力仪一直是科学研究追求的目标。原子干涉重力仪能够提供  $\mu\text{Gal}$  量级的绝对重力加速度值,是获取高精度重力信息的重要仪器之一,其集成光源系统的设计及实现对其实用化和商业化具有重要意义。首先介绍原子干涉重力仪激光系统的输出需求,然后对国内外典型集成光源系统的相关研究发展进行综述,分别介绍了基于自由空间和光纤传输的两种光源系统的实现方案和发展现状,重点阐述了其稳频、跳频、稳功率等关键技术。最后,对原子干涉重力仪集成光源系统的进行了总结与展望。

**关键词:** 原子干涉;重力仪;激光系统;集成化

**中图分类号:** TH744; TN249

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 420.1020

## Review of compact laser system for atom interferometry gravimeter

Lv Mengjie<sup>1,2</sup> Wang Guangming<sup>1</sup> Yan Shuhua<sup>1,2</sup> Wang Guochao<sup>1,2,3</sup>Zhu Lingxiao<sup>1,2</sup> Wang Yaning<sup>1,2</sup> Jia Aiai<sup>1,2</sup> Zhang Xu<sup>1,2</sup>

(1. College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Interdisciplinary Center for Quantum Information, National University of Defense Technology,

Changsha 410073, China; 3. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** High-precision gravity measurement is an important observation method for inertial navigation, geodesy, space science, ocean exploration, and basic physics research. High-precision gravimeter has always been the goal pursued by scientific research. Atom interferometry gravimeter can provide absolute gravity acceleration of  $\mu\text{Gal}$  magnitude. It is one of the most significant instruments to obtain high precision gravity information. The design and implementation of its compact laser system is of great significance for its practicality and commercialization. Firstly, the output requirements of atom interferometry gravimeter laser system are introduced, and then the related research and development of compact laser system at home and abroad are reviewed, and the implementation schemes and development status of two kinds of light source systems based on free space and optical fiber transmission are introduced respectively, with emphasis on its key technologies such as frequency stabilization, frequency hopping, power stabilization and so on. Finally, the compact laser system of atom interferometry gravimeter is summarized and prospected.

**Keywords:** atomic interference; gravimeter; laser system; miniaturization

## 0 引言

重力测量广泛应用于现代导航、地球物理、地质勘探、基础物理研究<sup>[1-5]</sup>等领域,随着这些领域的迅速发展,

人们对重力仪的精度要求也日益提高。基于原子干涉<sup>[6,7]</sup>的新型重力测量系统具有高测量精度、高灵敏度<sup>[8-10]</sup>等特点,能够提供  $\mu\text{Gal}$  ( $1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$ ) 量级的绝对重力加速度测量,可广泛应用于重力测量、资源勘测、远程长航自主导航、全球重力图谱测量、地震预

报<sup>[11-13]</sup>等领域,具有突出的研究价值。虽然冷原子干涉重力仪领域已有较大突破,但仍处于实验研究和探索阶段,面临着从实验室走向实用化和商品化的改进需求<sup>[14-15]</sup>。在各种恶劣的室外环境中工作,要求原子重力仪系统紧凑、稳定,这对子系统,尤其是激光部分提出了严格的要求<sup>[15]</sup>。现有的实验室激光光源系统分布在光学平台上,无法实现可搬运和实用化。近年来,为了实现简单紧凑的激光系统,多个冷原子重力仪小组对其展开了研究。目前,集成光源系统主要分为两种方案,光纤光源系统和自由空间集成光源系统,二者均实现了在冷原子干涉重力仪上的应用,在光源系统的简单、紧凑上取得了一定的成果,在实现重力仪实用化和商品化上取得了一定进展。

本文在前人工作的基础上,对原子干涉激光光源的频率和功率进行了分析,综述了光纤光源系统、自由空间集成光源系统两种典型集成光源系统的实现方案、关键技术和发展现状,探讨了集成光源系统的发展方向。

## 1 冷原子干涉重力仪

原子干涉重力测量利用原子的波动性和相干性,操作原子与光相互作用,将原子团进行分束、反射、合束,最终获得干涉条纹并提取出相关的重力场信息。冷原子干涉测量过程如图 1 所示,包括原子冷却、初态制备、原子干涉、原子末态探测<sup>[16]</sup> 4 个步骤,对应冷却光、回泵光、吹散光、拉曼光、探测光等多个不同频率、功率的激光输出,而这些激光都由集成光源系统产生。因此,激光系统的模型建立需要首先对原子干涉激光光源输出需求进行分析。

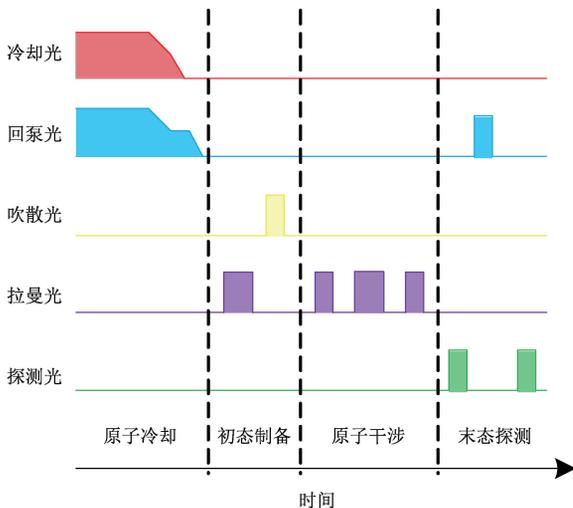


图 1 原子干涉重力测量过程

Fig. 1 Measurement process of gravimeter based on atomic interferometer

在相同情况下,相比于<sup>133</sup>Cs,<sup>87</sup>Rb 在冷却阶段能够获得更多的冷原子数,并且冷原子的碰撞频率比冷原子小了 30~50 倍,能够获得更高精度的干涉结果。因此,在冷原子干涉重力仪系统中,一般选用碱金属作为整个物理过程中的实验原子,将其线作为激光系统参与原子跃迁能级线,跃迁对应的激光波长为 780 nm。<sup>87</sup>RbD2 线的能级及原子干涉系统激光频率示意图如图 2 所示。

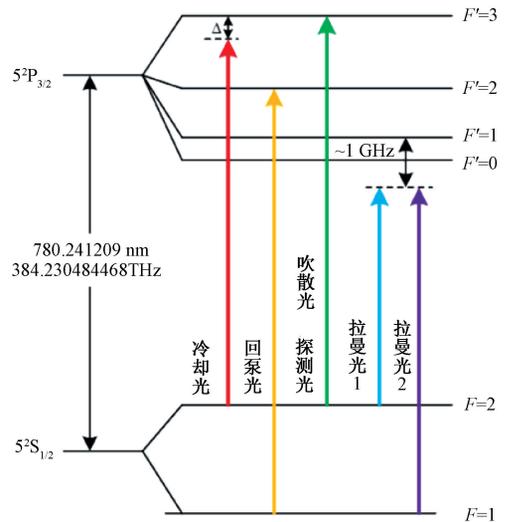


图 2 <sup>87</sup>RbD2 线能级及系统激光频率示意图

Fig. 2 The hyperfine structure of <sup>87</sup>RbD2 translation and laser frequency diagram of the system

### 1.1 原子冷却激光频率分析

将背景原子蒸气或原子电极喷射出的热原子束冷却到低温的原子团或原子束的过程称为原子冷却<sup>[17]</sup>。原子在室温环境下进行各向同性运动,在下落过程中易与真空腔壁发生碰撞,导致原子干涉重力仪的信噪比降低,无法获取重力值信息,因此需要对原子进行激光冷却。典型的冷原子干涉实验需要原子团温度达到  $\mu\text{K}$  量级,一般采用磁光阱 (MOT) 和偏振梯度 (PGC) 冷却相结合实现。

冷却光和回泵光是磁光阱中用于原子冷却的两束激光<sup>[18]</sup>。如图 2 所示,一般将冷却光频率设定在距离  $15^2S_{1/2}, F=2 \rightarrow 15^2S_{3/2}, F'=3$  红失谐  $2\Gamma \sim 6\Gamma$  处(其中  $\Gamma$  为自然线宽,频率约为 6 MHz)。由于部分  $|F=2\rangle$  原子在冷却光的作用下跃迁至  $|F'=2\rangle$  能级从而跃迁回  $|F'=1\rangle$  的“暗态”,于是增加  $15^2S_{1/2}, F=1 \rightarrow 15^2S_{3/2}, F'=2$  共振回泵光,将暗态原子重新泵浦到  $|F'=2\rangle$  态,构成完备的冷却循环。

磁光阱技术所能达到的温度在  $10 \mu\text{K}$  水平,在 MOT 阶段结束后施加偏振梯度冷却,使原子温度冷却至  $\mu\text{K}$  水平。这一阶段所需激光为冷却光与回泵光,激光频率

设定在 $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=3\rangle$  红失谐 $>10F$  处和 $|5^2S_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=2\rangle$  共振跃迁频率处。

## 1.2 初态制备激光频率分析

初态制备<sup>[18]</sup>是对原子的超精细能级进行选择,在原子制备过程中,吹走部分能态为 $|5^2S_{1/2}, F=2, m_F \neq 0\rangle$  的原子,获得更加纯态的原子团。如图2所示,利用一对频率差为6.834 GHz 的拉曼光,使得 $F=2$  态的原子发生 $|F=2, m_F=0\rangle \rightarrow |F=1, m_F=0\rangle$  的跃迁,拉曼光频率设定在 $|5^2S_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=1\rangle$  和 $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=1\rangle$  红失谐 $\sim 1$  GHz 处。紧接着利用一束 $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=3\rangle$  的吹散光将残留到 $F=2$  的原子全部吹走,仅留下 $|F=1, m_F=0\rangle$  的原子参与之后的干涉。

## 1.3 原子干涉与末态制备激光频率分析

原子干涉序列由 $\pi/2-\pi-\pi/2$  拉曼脉冲构成,拉曼光与原子相互作用实现双光子受激跃迁,其频率与选态的拉曼光相同,线宽要求在100 kHz 以内,且相位差需锁定在恒定值。原子探测光与吹散光的频率相同,只不过在使用过程中,吹散光为行波,探测光为驻波。

## 1.4 激光光源功率分析

功率需求上,为了提高MOT 装载率,冷却光总功率一般设定在200 mW 以上。回泵光、吹散光、探测光对功率要求较低,一般设置为10 mW。初态制备阶段的拉曼光对光功率的要求较低,一般设置为100 mW,原子干涉阶段的拉曼光对其功率有严格要求,需要单独设计功率稳定模块,总光功率输出一般设置为200 mW。

# 2 光纤光源系统

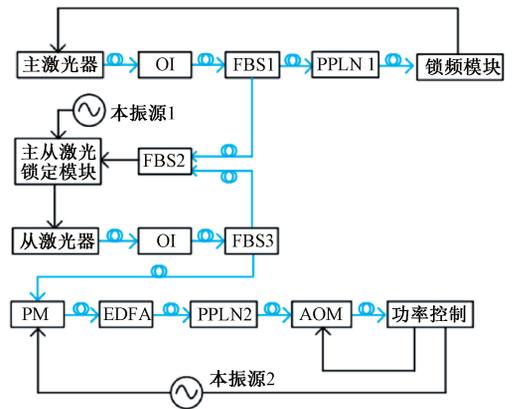
光纤光源系统是利用光纤器件对环境温度和振动的低敏感度,设计适用于野外测量的集成激光系统,为原子干涉绝对重力仪提供激光光源输出。相比于自由空间光学器件,光纤器件无需光学对准,易于更换,具有极高的光学和电学性能,能够适应更加恶劣的工作环境。随着光通信技术的发展,1.5  $\mu\text{m}$  的光纤器件已经成熟,因此,光纤光源系统一般采用1560 nm 激光器作为种子光,通过倍频晶体(PPLN)获得与Rb 原子跃迁相匹配的激光频率。目前,光纤光源系统可以分为单激光器光纤光源系统和双激光器光纤光源系统。

## 2.1 双激光器光纤光源系统实现方案

### 1) 系统设计

双激光器光纤光源系统方案设计如图3所示,一般采用主从激光单元的模式,采用两个波长为1560 nm 的光纤激光器作为种子光源。

主激光单元关键器件包括主激光器(1560 nm 光纤



OI: 光隔离器; FBS: 光纤分束器; PM: 相位调制器; PPLN: 倍频晶体; EDFA: 光功率放大器; AOM: 声光调制器

图3 双激光器光纤光源系统方案

Fig.3 Scheme diagram of the double-laser fiber laser system

激光器)、光纤分束器(FBS1)、PPLN 倍频晶体(PPLN 1)和稳频模块。主激光器输出经过光纤分束器分为两路,一路利用PPLN 晶体进行倍频获得780 nm 激光,并通过稳频模块将频率锁定到<sup>85</sup>Rb 原子D2 线3-4 交叉峰上,作为参考光,另一路用于从激光器频率锁定。

从激光单元关键器件包括从激光器(1560 nm 光纤激光器)、光纤分束器(FBS2、FBS3)、主从激光锁定模块、相位调制器(PM)、光功率放大器(EDFA)、声光调制器(AOM)、PPLN 倍频晶体(PPLN 2)以及功率控制模块。从激光输出首先经过光纤分束器分为两路,其中第1 路通过主从激光器锁定模块将从激光的相位锁定在主激光上,调节本振源1 的频率,可以改变从激光器锁定频率,获得冷却光、吹散光以及探测光。从激光器的另一路输出经过相位调制器,是激光系统中最重要部件之一,通过调节本振源2 的频率,可以产生回泵光和拉曼光。

原子冷却阶段需要产生冷却光和回泵光,调节本振源1 的频率,将从激光的频率锁定在 $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=3\rangle$  频率处,并调节本振源2,产生6.57 GHz 的边带频率,即可获得所需的冷却光与回泵光。

初态制备阶段需要产生拉曼光和吹散光。调节主从锁定模块的本振源1 频率,使从激光器跳频约1.2 GHz,维持1 ms,获得拉曼光1,并通过调节本振源2,产生6.834 GHz 的边带频率,获得拉曼光2 所需的频率。在1 ms 后,从激光的频率重新锁定在 $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=3\rangle$  频率处,再利用AOM 开关移频,获得吹散光。

原子干涉阶段需要产生稳定功率及功率比的拉曼光。拉曼光产生方式与初态制备阶段相同,同时通过功率控制模块稳定输出拉曼光的功率及功率比。

原子末态探测阶段需要产生探测光和回泵光。通过

改变本振源 1, 将从激光的频率重新锁定在  $15^2S_{1/2}, F=2 \rightarrow 15^2S_{3/2}, F'=3$  频率处, 利用相位调制器产生回泵光, 通过控制施加在相位调制器上的本振源 2 的电压, 控制探测光和回泵光的光强和光强比。

通过该方案可以产生各个实验阶段所需的激光频率, 并利用 AOM 控制光强和开断, 实现激光频率和功率的调节、开关操作以及光束分配等功能, 为冷原子干涉重力提供冷却光、回泵光、吹散光、拉曼光、探测光等多种激光束, 并耦合进入单模保偏光纤导入传感头。

2) 关键技术

(1) 稳频技术

激光系统稳频技术<sup>[20]</sup> 目前主要采用基于原子吸收谱的稳频方法, 包括饱和吸收谱 (SAS)、磁致二色性 (DAVLL) 和调制转移谱 (MTS) 稳频技术。

饱和吸收谱的基本思想是对激光频率进行调制, 并将调制后的吸收谱解调获得鉴频信号。其基本原理如图 4 所示, 激光器输出的激光被分束成探测光与泵浦光, 在铷池内反向对射, 发生饱和吸收效应, 由光电探测器 (PD) 测得的饱和吸收信号经混频、低通滤波后解调, 即可得到目标鉴频信号, 利用 PID 反馈, 达到对系统稳频的作用。

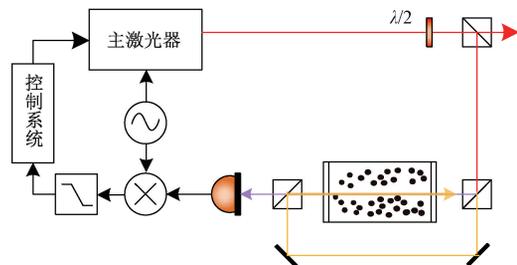


图 4 饱和吸收谱稳频技术方案

Fig. 4 Scheme diagram of saturated absorption frequency stabilization

饱和吸收谱法简单实用, 效果良好, 但是由于需要对激光器输出频率进行调制, 会存在调制残余误差, 影响稳频性能。磁致二色性法<sup>[20-21]</sup> 是无调制的鉴频技术, 可以有效消除残余幅度误差的影响。其基本原理为在外磁场作用下, 原子跃迁能级因塞曼效应发生分裂和移动, 导致组成线偏振光的左旋圆偏振成分  $\sigma^+$  与右旋圆偏振成分  $\sigma^-$  所感受的共振频率不同。通过原子后, 两圆偏振成分的透射谱的差值曲线具有类色散谱线的特点, 可以直接作为鉴频信号。

其典型实验结构如图 5 所示, 线偏振探测光可以分解为左右旋圆偏振光, 在均匀外磁场  $B$  作用下的气体吸收池内被原子吸收, 再经 1/4 波片将被吸收后的  $\sigma^+$  与  $\sigma^-$  光转换为两正交的线偏振光, 用偏振分束器将两线偏振光在空间上分开, 分别由两个光电探测器进行探测, 最后

将两探测信号差分放大即得鉴频信号利用 PID 反馈, 达到对系统稳频的作用。

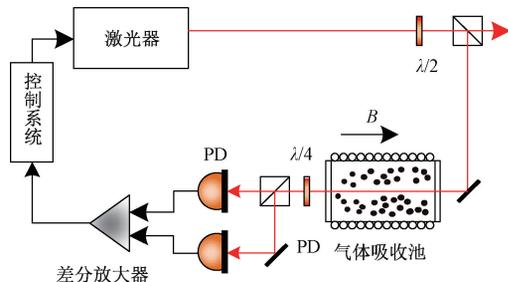


图 5 磁致二色性稳频技术方案

Fig. 5 Scheme diagram of dichroic atomic vapor laser lock

采用 MTS<sup>[22]</sup> 可以有效降低调制残余误差, 并且调制转移法中获取的鉴频信号斜率更陡, 因而有利于稳频性能的提升。其基本原理如图 6 所示, 激光器输出的激光被分束成探测光与泵浦光, 通过光电调制器对泵浦光进行相位调制, 当探测光与泵浦光同时照射到介质上时, 由于非线性四波混频效应, 泵浦光的载波  $\omega$  和边带  $\omega \pm n\omega_m$  与探测光载波  $\omega$  在介质内非线性混频, 在探测光上产生另一个边带  $\omega \pm n\omega_m$ , 二者进行拍频后被光电探测器探测, 得到饱和吸收谱。对饱和吸收谱进行进一步解调, 解调过程为将光电探测器的输出信号与移项的调制信号混频, 再经过低通滤波器, 即可得到目标鉴频信号, 利用 PID 反馈, 达到对系统稳频的作用。

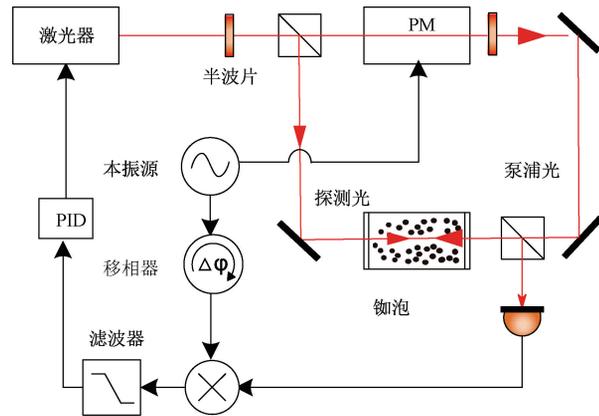


图 6 调制转移谱技术方案

Fig. 6 Scheme diagram of modulation transfer spectrum

(2) 主从激光锁定技术

主从激光锁定主要采用光学锁相环 (OPLL) 技术<sup>[23]</sup>, 调节锁相环参考信号频率使得两台激光器输出频差在 1 GHz 附近, 以满足不同实验阶段对从激光频率的要求。锁相环方案设计如图 7 所示, 两束激光拍频后首先经过宽带 PD 转化为高频电信号, 该信号经过放大器和滤波器作为拍频信号输入到锁相环芯片中, 芯片的输

出信号即为两个分频信号的误差信号,经过环路滤波器和信号放大电路输入到从激光的 PZT 控制端中,形成 PID 反馈控制系统,得到的从激光频率为主激光频率及本振源频率之和。

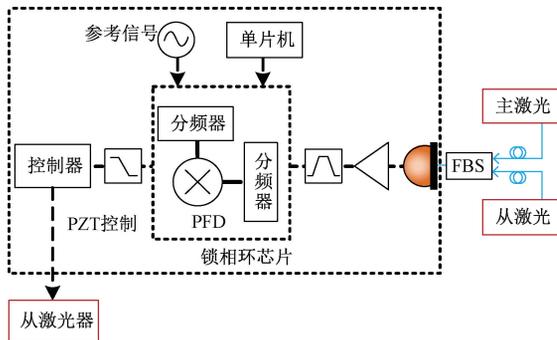


图7 主从激光锁定技术方案

Fig. 7 Scheme diagram of master-slave laser locking technology

### (3) 功率稳定技术

由于激光系统的机械变形、光纤器件的消光比不理想、光纤连接器的对准误差、环境的振动和温度波动等因素,使得输出的激光功率随时间而变化,功率的漂移会引起交流斯塔克频移,降低条纹对比度,进而增加测量误差。激光功率稳定<sup>[24-25]</sup>一般采用基于 AOM 的闭环功率稳定系统,其实现方案如图 8 所示。当输入激光经过声光调制器时,产生空间分离的衍射光斑,衍射角度与驱动频率有关,衍射效率在一定范围内与射频功率呈正相关。驱动源功率由外部模拟衰减器控制,因此可以通过调节模拟衰减器电压来控制衍射效率,实现光功率稳定。通过 PD 测得激光功率,比较其与设定功率之间的误差,并根据误差信号调节模拟衰减器电压,实现对激光功率的闭环反馈控制,达到激光功率闭环稳定的目的。

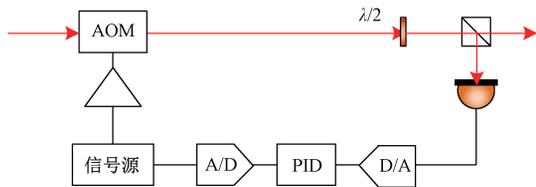


图8 功率稳定技术方案

Fig. 8 Scheme diagram of power stabilization

### (4) 拉曼光制备技术

在初态制备、原子干涉阶段通常使用一对拉曼光,在铷原子的两个超精细能级之间诱导相干拉曼跃迁来操纵原子团。目前主要采用 OPLL、光学注入锁定(OIL)、相位调制(PM)和相位反馈(PFS)4种方案,其中 OPLL 与主从激光锁定方案相似,OIL 对温度变化非常敏感,一般不用于集成光源系统,因此主要对相位调制和相位反馈两种方案进行介绍。

相位调制包括声光调制和电光调制。声光调制器的衍射效率随拉曼激光相差频率的增大而减小,在 1 560 nm 激光光源系统中,需要产生频率相差 6.8 GHz 的拉曼光,因此主要采用电光调制进行原子干涉过程中的拉曼光制备。电光调制利用晶体的电光效应,当对晶体施加调制电压时,介质折射率发生周期性变化。此时,当激光入射到该晶体中,出射激光将产生一系列边带。边带频率等于调制电压频率,边带功率与调制电压幅值有关。各级边带相对功率与调制深度的关系如图 9 所示,调制深度与调制电压成正比。电光调制方法简单实用,效果良好,但在调制产生所需边带的同时将产生一系列不需要的边带,这些不需要的边带与原子相互作用时产生的交流斯塔克频移将在原子干涉仪中引入相位噪声。

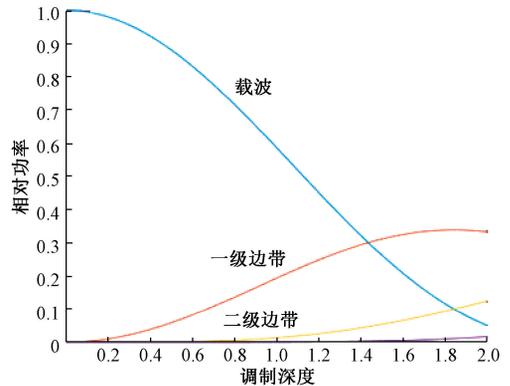


图9 相对功率随调制深度变化

Fig. 9 Diagram of relative power with modulation depth

PFS 技术<sup>[26]</sup>是在相位调制的基础上去除不必要的边带,可以称为是改进的相位调制技术。它是在电光调制器后放置 Fabry-Perot 标准具(FP 腔)作为滤光片,利用 FP 腔的滤波作用,将不需要的边带滤除,获得目标正一级边带,进而降低激光系统的相位噪声。北京航空航天大学利用此种方法进行了拉曼光的制备<sup>[26]</sup>,得到的结果如表 1 所示。

表 1 载波及主要边带调制效率、透过率、输出功率比  
Table 1 Modulation efficiencies, transmittances and extrapolated power ratios of carrier and major sidebands

	调制效率/%	透过率/dB	输出功率比/dB
$f_{+2}$	0.4	-33	-47.4
$f_{+1}$	11.1	0	0
$f_0$	77.2	-33	-24.6
$f_{-1}$	10.9	-31	-31.1
$f_{-2}$	0.38	-26	-40.7

仅经过电光调制时,目标一级边带占比为 11.1%;

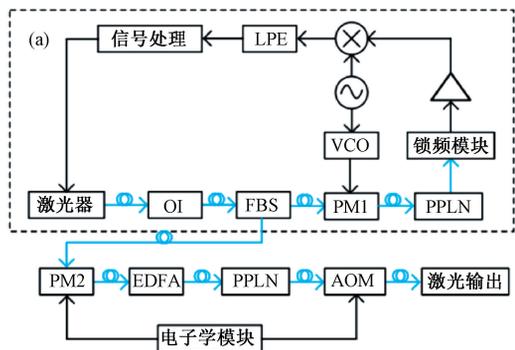
FP 腔的转换效率, 即当相同功率, 频率分别为  $f_{-2} \sqrt{f_{-1} f_0}$ 、 $f_{-1} \sqrt{f_{-2} f_0}$  的激光同时射入 F-P 腔时, 输出激光的功率比; 由 EOM 输出的边带经 F-P 腔后输出的功率比可见, 相位反馈技术能够将不必要的边带滤除, 降低激光系统的噪声, 提高原子干涉重力系统的精度。

### 2.2 单激光器光纤光源系统实现方案

#### 1) 系统设计

与双激光器光纤光源相比, 单激光器光纤光源系统仅通过一个激光器实现了系统的锁频与跳频, 能够进一步减小激光光源系统的体积, 减少由于激光源击穿而导致的系统故障风险, 降低耗电量, 但结构复杂, 对激光系统控制电路部分提出了更高的要求。

单激光器光纤光源系统工作原理如图 10 所示, 关键器件包括 1 560 nm 光纤激光器、FBS、PPLN 倍频晶体、锁频模块以及信号处理模块。系统种子光通过光纤分束器分为两路, 其中第 1 路用于激光器锁频及跳频, 另一路用于产生原子干涉重力系统所需的所有激光。



OI: 光隔离器; FBS: 光纤分束器; PM: 相位调制器; PPLN: 倍频晶体; VCO: 压控振荡器; EDFA: 光功率放大器; AOM: 声光调制器

图 10 单激光器光纤光源系统原理

Fig. 10 Diagram of the single-laser fiber laser system

与双激光器光纤光源系统锁频不同, 单激光器系统先通过 PM1 产生边带, 然后将激光器边带锁定在  $^{85}\text{Rb}$  原子 D2 线 3-4 交叉峰上, 此时激光器的频率锁定在  $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=3\rangle$  频率处, 通过 PM2 和 AOM 可以获得冷却光、回泵光、吹散光和探测光。为了获得拉曼光, 改变压控振荡器 (VCO) 的频率, 令激光系统跳频  $\sim 1.2\text{ GHz}$ , 利用信号处理系统和稳频模块快速稳频, 通过 PM2 产生  $6.834\text{ GHz}$  边带, 可以获得目标拉曼光。

#### 2) 关键技术

##### (1) 稳频、跳频技术

单激光器光纤光源系统仅通过一个激光器实现了系统的锁频与跳频<sup>[17, 27-28]</sup>, 其实现原理如图 10 (a) 所示。

利用 FBS 将激光束分成两部分, 通过光纤相位 PM 模块产生边带, 然后通过锁频模块稳定和控制频率。为了得到频谱的解调信号, 需要对激光器的频率进行调制。通过 VCO 添加  $6.25\text{ MHz}$  的正弦信号来调制图 10PM1 的驱动电压, 利用这种方法使得边带的频率被锁定在原子 D2 线 3-4 交叉峰上, 但是载波不受影响。

如图 11 所示, 通过改变 VCO 的输出频率, 可以改变载波和边带的频率差, 进而改变激光器的输出频率, 实现锁频和跳频的功能。

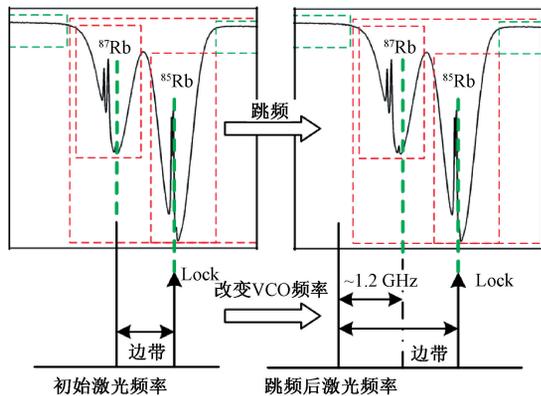


图 11 边带锁频示意图

Fig. 11 Schematic diagram of sideband frequency locking

##### (2) 快速调谐技术

为了提高锁定系统在频率阶跃期间的稳定性并缩短响应时间, 单激光器光纤光源系统需要在几毫秒内快速调谐超过  $1\text{ GHz}$  的激光频率, 快速调谐原理<sup>[27]</sup> 如图 12 所示。在  $1\text{ GHz}$  的最大频率步长期间, 与锁定范围相比, 频率偏差太大, 激光器无法保持锁定。因此, 将锁定开关放置在积分反馈控制系统的前方, 在跳频后  $1\text{ ms}$  期间打开锁定开关, 在此期间内, 激光频率能够快速靠近目标频率。关闭开关后, 利用第 2 级积分器, 使激光频率稳定到目标频率, 实现在几毫秒内快速调谐。

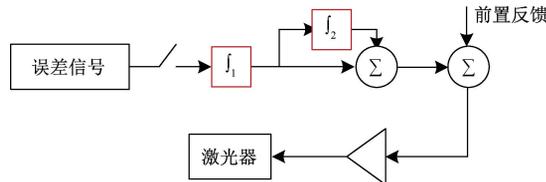


图 12 快速调谐示意图

Fig. 12 Schematic diagram of fast tuning

### 2.3 发展现状

目前, 光纤激光系统主要研究机构有法国宇航局、国防科技大学、华中科技大学、武汉物数所和浙江工业大学等, 均已取得一定成果。其中, 华中科技大学、武汉物数所和浙江工业大学已经将集成光源系统应用于冷原子干

涉重力仪上,实现了系统小型化、可移动的目标。

法国宇航局 Fabien Theron 小组<sup>[27]</sup>的集成光源系统是基于 1 560 nm 波长的单激光系统,通过动态改变激光频率和使用相位调制器产生边带输出原子干涉测量所需的不同激光,实现了单个光源在几毫秒内快速调谐超过 1 GHz,提供了低于 2.5 kHz 谱线宽度的激光输出。

武汉物数所集成光源系统<sup>[28]</sup>仅包含一个 780 nm 的种子激光器,不使用传统的倍频模块,可以进一步减小系统的体积,降低功耗,然而 780 nm 的光纤器件尚不成熟,会引入较大的噪声,相比于 1 560 nm 光纤光源系统,其灵敏度较低。将该系统应用于原子干涉重力仪,获得了  $230 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$  的最佳重力测量灵敏度。同时进行了一天以上的重力测量,重力仪的长期稳定性为  $5.5 \mu\text{Gal}$ 。

华中科技大学集成光源系统<sup>[17]</sup>是基于 1 560 nm 波长的单激光系统,可以产生不同的激光频率,以满足典型的原子干涉仪的要求。包括激光系统在内的控制单元已经集成到一个体积为  $1.5 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$  的箱体中,重量仅为 150 kg。使用这种紧凑的光学方案,在 3 000 s 的积分时间内获得了  $53 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$  的灵敏度和优于  $1 \mu\text{Gal}$  的分辨率。

国防科技大学集成光源系统是基于 1 560 nm 波长的双激光系统,采用稳频模块、稳功率模块实现了激光的稳定输出,能够满足原子干涉重力仪的激光输出需求。其激光系统集成在 5U 标准机箱 ( $50 \text{ cm} \times 48.3 \text{ cm} \times 22.2 \text{ cm}$ ) 中,集控温、隔震于一体,能够满足车载运输的要求,在恶劣环境下维持系统正常工作。

浙江工业大学集成光源系统<sup>[24]</sup>是基于 1 560 nm 波长的双激光系统,利用该激光系统,在磁光阱中获得了温度为  $5 \mu\text{K}$  的  $^{87}\text{Rb}$  原子团,在 200 s 积分时间内重力分辨率达到  $1.0 \times 10^{-8} \text{ g}$ 。

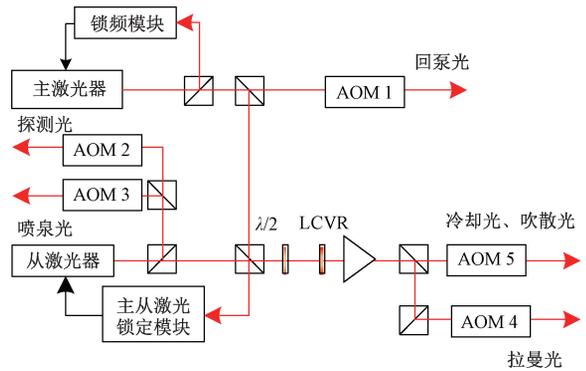
### 3 自由空间集成光源系统

自由空间集成光源系统是将光学器件设计并集成在一个稳定的光学模块中,原子干涉重力仪所需的所有激光光源都由该模块提供。系统通常采用集成光学元件,并将其牢牢固定在底板上,能够保证在野外测量过程中的稳定可靠<sup>[29]</sup>。

#### 3.1 系统实现方案

自由空间集成光源系统方案设计如图 13 所示,与双激光器光纤激光系统相似,采用主从激光单元的模式,一般采用两个波长为 780 nm 的激光器作为种子光源。

主激光器通过分光棱镜分为 3 束,第 1 束用于频率锁定,锁定在  $|5^2S_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=2\rangle$  处;第 2 束经过 AOM1 作为回泵光,AOM1 用于移频和开关;第 3 束与



LCVR:液晶可变延迟器; AOM:声光调制器

图 13 自由空间集成光源系统方案

Fig. 13 Scheme of free space integrated light source system

从激光器进行拍频,将从激光器锁定在  $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2S_{3/2}, F'=3\rangle$  处。从激光器的输出光束被分成 3 部分,1) 经过分光棱镜分为两束,分别经过 AOM2、AOM3,作为探测光和喷泉光;2) 用于频率锁定;3) 与主激光器进行拍频,经过液晶可变延迟器(LCVR),用于动态控制输入偏振,从而控制两束光束之间的平衡,再经过光功率放大器(TA)进行功率放大,并通过分光棱镜分为两部分,1) 作为拉曼光束的种子激光,经过 AOM4 后同时偏移了  $\pm 1.5 \text{ GHz}$ ,作为拉曼光输出;2) 通过调节 AOM5,输出冷却光和吹散光。

#### 3.2 发展现状

随着集成技术和小型化光学器件的快速发展,自由空间集成光源系统发展迅速,目前已有多个小组将其应用于可移动冷原子干涉重力测量。德国柏林洪堡大学的 Schkolnik 小组<sup>[30-31]</sup>所研制的激光系统已经能够用于空间测量。其集成光源系统实物如图 14 所示,总质量为 27 kg,体积为  $340 \text{ mm} \times 274 \text{ mm} \times 227 \text{ mm}$ ,该系统的目标为能够在太空环境下提供原子干涉测量所需的激光输出,在火箭发射助推阶段,能够承受  $13 \text{ g}$  的加速度和  $1.8 \text{ g RMS}$  的振动负载。目前该激光系统已经接受了振动验收测试,成功通过了  $8.1 \text{ g RMS}$  的振动负载测试,整个激光系统具有极高的稳定性。

除了德国柏林洪堡大学的 Schkolnik 小组,自由空间集成光源系统研究单位还有法国巴黎天文台 Pereira Dos Santos 小组<sup>[32]</sup>、武汉物数所<sup>[33]</sup>、浙江大学<sup>[34]</sup>和北京航空航天大学<sup>[26]</sup>等。

法国巴黎天文台 Pereira Dos Santos 小组研制的集成自由空间集成光源系统已经应用到冷原子干涉重力仪中,得到了 22% 的对比度干涉条纹,可以在 1 s 内达到  $6 \times 10^{-8} \text{ g}$  的灵敏度,接近最先进重力仪的性能水平。

武汉物数所研制的集成自由空间集成光源系统如图 15 所示,体积为  $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ ,具有 13 个光纤输

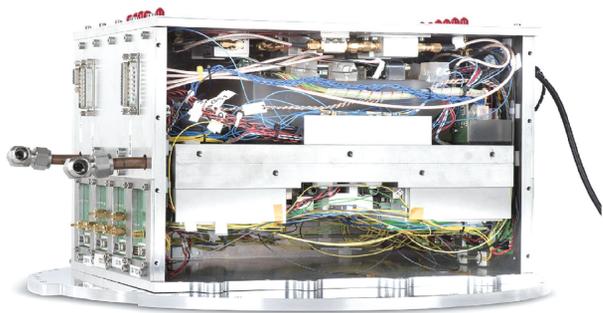


图 14 洪堡大学集成光源系统实物

Fig. 14 Physical diagram of miniaturized laser system in Humboldt University

出端口,可用于磁光阱、原子喷泉、拉曼跃迁和末态探测。为实现高集成度和稳定性,设计了无需运动调整的双面光学结构和支架。该激光系统已经应用于移动式原子干涉重力仪,达到  $28 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$  的灵敏度,并且在经过 1 200 km 的卡车运输后,激光系统仍可以在不重新对准的情况下恢复到良好的工作状态。

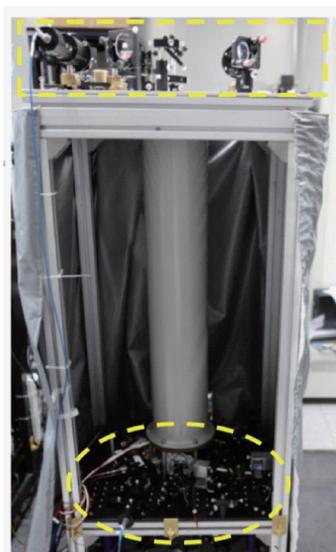


图 16 浙江大学集成光源系统实物

Fig. 16 Physical diagram of miniaturized laser system in Zhejiang University



图 15 武汉物数所集成光源系统实物

Fig. 15 Physical diagram of miniaturized laser system in Wuhan Institute of Physics and Mathematics

浙江大学所研制的集成自由空间集成光源系统如图 16 所示,将激光系统分布在重力仪传感头的两端,制成可移动冷原子干涉重力仪,测得局域重力为  $9.791\ 589 \text{ m/s}^2$ ,在 320 s 内的绝对不确定度达到了  $\Delta g/g = 2.9 \times 10^{-7}$ 。

### 4 结论与展望

随着光纤通信领域和集成化光学器件的快速发展,集成光源系统发展迅速,尤其在最近几年,对原子干涉重力仪的野外测量的需求不断增加,光源系统从最初的实验室光学平台搭建发展为现在的可移动、集成化、高稳定性系统模块。目前国内外已有多个实验室成功搭建了集

成光源系统,并将其用于实际重力测量中,测量结果取得了较好的精度和灵敏度。但在集成光源系统的研究中,依然有若干重要问题等待研究学者去研究和挑战。

1) 目前集成光源系统仍不成熟。自由空间光学系统中大多数光学器件需要人为调试、对准,这会导致仪器中随机误差增大,且难以更换器件;光纤激光系统中没有成熟的 780 nm 光纤激光源,需要采用 1 560 nm 的光纤激光源进行倍频,增加了激光系统的体积和功耗,且对光纤器件的保偏性和消光比有极高的要求。

2) 集成光源系统小型化仍有待提高。目前集成光源系统已经能够安装到标准机箱或自制容器中,但仍需要两人或多人进行搬运,在野外环境中难以便携地使用。

除重力仪外,集成光源系统的设计也可以为原子干涉陀螺仪、重力梯度仪等多个方面的应用提供激光系统借鉴方案。我国在集成光源系统领域已取得了较为优异的成绩,国防科技大学、华中科技大学、武汉物数所、浙江大学、浙江工业大学、北京航空航天大学等单位都陆续开展了对集成光源系统的研究工作,但与国际顶级研究机构相比仍存在较大差距。因此,应大力发展集成光源系统,为原子干涉重力仪走向实用化和产业化做基础,为我国导航、资源勘探及基础物理研究提供有力的技术支撑。

### 参考文献

[ 1 ] 奔粤阳, 杨晓龙, 李倩, 等. 重力辅助阻尼捷联惯性导航系统 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 ( 7 ): 1482-1488.  
 BEN Y Y, YANG X L, LI Q, et al. Damping strapdown inertial navigation system aided by gravity [J]. Chinese

- Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 ( 7 ): 1482-1488.
- [ 2 ] SCHLIPPERT D, HARTWIG J, ALBERS H, et al. Quantum test of the universality of free fall[J]. Physical Review Letters, 2014,112(20): 203002.
- [ 3 ] TARALLO M G, MAZZONI T, POLI N, et al. Test of einstein equivalence principle for 0-spin and half-integer-spin atoms; search for spin-gravity coupling effects[J]. Physical Review Letters, 2014,113(2): 023005.
- [ 4 ] DUAN X C, DENG X B, ZHOU M K, et al. Test of the universality of free fall with atoms in different spin Orientations [ J ]. Physical Review Letters, 2016, 117(2):023001.
- [ 5 ] ZHOU L, LONG S, TANG B, et al. Test of Equivalence principle at  $10^{-8}$  level by a dual species double diffraction Raman atom interferometer[J]. Physical Review Letters, 2015, 115(1):013004.
- [ 6 ] MCGUINNESS H J, RAKHOLIA A V, BIEDERMANN G W. High data-rate atom interferometer for measuring acceleration [ J ]. Applied Physics Letters, 2012, 100(1): 011106.
- [ 7 ] ZHOU M K, DUAN X C, CHEN L L, et al. Micro-Gal level gravity measurements with cold atom interferometry[J]. Chinese Physics B, 2015, 24 ( 5 ): 32-43.
- [ 8 ] LOUCHET-CHAUVET A, FARAH T, BODART Q, et al. The influence of transverse motion within an atomic gravimeter [ J ]. New Journal of Physics, 2011, 13(6): 065025.
- [ 9 ] HU Z K, SUN B L, DUAN X C, et al. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter [ J ]. Physical Review A, 2013, 88(4): 043610.
- [ 10 ] 章欢开,颜树华,朱凌晓,等.冷原子干涉绝对重力精密测量与系统误差[J].仪器仪表学报,2020,41(8): 1-12.
- ZHANG H K, YAN SH H, ZHU L X, et al. Precision measurement of absolute gravity by cold atom interference and the system errors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8):1-12.
- [ 11 ] FREIER C, HAUTH M, SCHKOLNIK V, et al. Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability [J]. Journal of Physics Conference Series, 2015, 723(1): 012050.
- [ 12 ] MERLET S, BODART Q, MALOSSI N, et al. Comparison between two mobile absolute gravimeters; optical versus atomic interferometers [J]. Metrologia, 2010, 47(4): 9-11.
- [ 13 ] GILLOT P, FRANCIS O, LANDRAGIN A, et al. Stability comparison of two absolute gravimeters: optical versus atomic interferometers [ J ]. Physics, 2014, 51(5): 9-11.
- [ 14 ] BIDEI Y, CARRAZ O, CHARRIE? RE R E, et al. Compact cold atom gravimeter for field applications [J]. Applied Physics Letters,2013, 102(14): 144107.
- [ 15 ] FANG B, DUTTA I, GILLOT P, et al. Metrology with Atom Interferometry: Inertial Sensors from Laboratory to Field Applications [ J ]. Journal of Physics Conference Series,2016,723(1): 012049.
- [ 16 ] 张旭,颜树华,朱凌晓,等.冷原子干涉型量子传感器在导航应用中的研究现状[C].第十届中国卫星导航年会,2019.
- ZHANG X, YAN SH H, ZHU L X, et al. Research status of cold atom interferometric quantum sensors in applications of navigation[ C ]. China Satellite Navigation Conference,2019.
- [ 17 ] LUO Q,ZHANG H,ZHANG K, et al. A compact laser system for a portable atom interferometry gravimeter [J]. Review of Scientific Instruments, 2019,90,043104.
- [ 18 ] VETSCH E, REITZ D, SAGUÉ G, et al. Optical interface created by laser-cooled atoms trapped in the evanescent field surrounding an optical nanofiber [ J ]. Physical review letters, 2010, 104(20): 203603.
- [ 19 ] 罗玉昆.冷原子干涉精密重力测量系统关键技术研究 [ D ].长沙:国防科技大学,2017.
- LUO Y K. Research on key technologies of precision gravity measurement system based on cold atom interferometry [ D ]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [ 20 ] 李期学.面向原子干涉仪的智能化激光自动稳频技术研究 [ D ].长沙:国防科技大学,2018.
- LI Q X. Research on intelligent technology of laser frequency automatic stabilization for atomic interferometer [ D ]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [ 21 ] 刘强,卓艳男,刘超,等.基于 DAVLL 技术的半导体激光器稳频装置设计[J].光学仪器,2014, 36(6): 551-554.
- LIU Q, ZHUO Y N, LIU CH, et al. Frequency stabilization system of diode laser based on DAVLL [J]. Optical Instruments,2014, 36(6): 551-554.
- [ 22 ] LI Q X, ZHANG X, ZHU L X, et al. Intelligent and automatic laser frequency locking system using pattern recognition technology [ J ]. Optics and Lasers in Engineering,2020, 126:105881.
- [ 23 ] CAO F, ZHANG R. Discussion on the effect of an optical

- phase-locked loop on the coherence properties of a laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(5): 910-914.
- [24] WANG Q, WANG Z, FU Z, et al. A compact laser system for the cold atom gravimeter [J]. *Optics Communications*, 2016, 358: 82-87.
- [25] LI Q X, YAN S H, WANG E, et al. High-precision and fast-response laser power stabilization system for cold atom experiments [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(9): 095221.
- [26] LI W, PAN X, SONG N, et al. A phase-locked laser system based on double direct modulation technique for atom interferometry [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(2): 1-8.
- [27] THERON F, CARRAZ O, RENON G, et al. Narrow linewidth single laser source system for onboard atom interferometry [J]. *Applied Physics B, Lasers and Optics*, 2015, 118(1): 1-5.
- [28] JIE F, JIANGONG H, XI C, et al. Realization of a compact one-seed laser system for atom interferometer-based gravimeters [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1596-1596.
- [29] REN W, SUN Y, WANG B, et al. Highly reliable optical system for a rubidium space cold atom clock [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3607-3614.
- [30] SCHKOLNIK V, HELLMIG O, WENSLAWSKI A, et al. A compact diode laser system for atom interferometry on a sounding rocket [C]. *Proceedings of the DPG Tagung*, 2017.
- [31] PAHL J, DINKELAKER A N, GRZESCHIK C, et al. Compact and robust diode laser system technology for dual-species ultracold atom experiments with rubidium and potassium in microgravity [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5456-5464.
- [32] MERLET S, VOLODIMER L, LOURS M, et al. A simple laser system for atom interferometry [J]. *Applied Physics B, Lasers and Optics*, 2014, 117(2): 749-754.
- [33] XIAOWEI Z, JIAQI Z, BIAO T, et al. Compact portable laser system for mobile cold atom gravimeters [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6545.
- [34] ZI F, ZHANG X, HUANG M, et al. A compact atom interferometer for field gravity measurements [J]. *Laser Physics*, 2019, 29(3): 035504.

### 作者简介



吕梦洁, 2018 年于清华大学获得学士学位, 现为国防科技大学硕士研究生, 主要研究方向为量子精密测量技术。

E-mail: 1788833164@163.com

**Lv Mengjie** received her B. Sc. degree from Tsinghua university in 2018. Now she is a M. Sc. candidate at National University of Defense Technology. Her main research interest includes Quantum precision measurement technology.



王光明 (通信作者), 1996 年于国防科技大学获得学士学位, 2008 年于国防科技大学获得博士学位, 2011 年赴英国兰卡斯特大学访问学者, 现为国防科技大学副教授, 主要研究方向为测控技术和仪器的研究。

E-mail: abc@123.com

**Wang Guangming** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 1996 and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2008, visiting scholar at Lancaster University in the UK in 2011. Now he is an associate professor at National University of Defense Technology. His main research interests include measurement and control technology and instrument.