

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.04.10

基于移动光晶格布洛赫振荡的原子干涉重力仪

彭鹏, 董翔宇, 殷国玲, 毛德凯, 熊炜, 周小计*

(北京大学 电子学院, 北京 100871)

摘要: 针对目前传统的原子干涉重力仪—马赫-曾德尔型原子重力仪存在体积较大, 影响设备便携性的问题, 北京大学实现了国内首个基于移动光晶格的布洛赫振荡原理的小型化原子干涉重力仪。本实验系统的采样率达到 0.9 Hz, 能够满足长期实时测量的需求, 且实验系统中原子的竖直位移约为 3 cm, 灵敏度达到 $4.6 \times 10^2 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 在 2 800 s 积分时间内, 分辨率可以达到 6.5(0.7) μGal 。实验成果为原子干涉重力仪的小型化与实用化指明了未来的发展方向。

关键词: 原子干涉重力仪; 拉姆塞-伯德原子干涉仪; 布洛赫振荡; 移动光晶格

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2023) 04-0119-09

Compact atomic interference gravimeter based on Bloch oscillations of moving optical lattice

PENG Peng, DONG Xiangyu, YIN Guoling, MAO Dekai, XIONG Wei, ZHOU Xiaoji*

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The traditional atomic interference gravimeter, Mach-Zehnder type atomic gravimeter, has the problem of large volume, which affects the portability of the equipment. Peking University realizes the first compact atomic interference gravimeter based on the Bloch oscillation principle of moving optical lattice in China which is different from the conventional Mach-Zehnder atomic gravimeter. The sampling rate of the experimental system reaches 0.9 Hz, which can meet the needs of long-term real-time measurement, and the vertical displacement of atoms in the experimental system is about 3 cm. The sensitivity measured by the system reaches $4.6 \times 10^2 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. The resolution can reach 6.5(0.7) μGal in 2 800 s integration time. The experimental results point the future development direction for miniaturization and application of atomic interference gravimeter.

Key words: Atomic interference gravimeter; Ramsey-Bordé atomic interferometer; Bloch oscillations; moving optical lattice

0 引言

重力加速度 g 是描述地球重力场的关键参数之一, 实时实地精确测量重力加速度 g 具有重要科学意义和应用价值。在基础物理研究领域, 高精度

的重力测量不仅可以验证暗物质、引力波^[1]和等效性原理^[2-3], 还可以对质量^[4]、压力、扭矩、硬度等物理量进行计量溯源。在地质勘探应用方面, 高精度的重力测量既可以对煤炭、石油、钢铁等矿产资源进行勘探, 又能针对火山^[5]、地震^[6]、

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-05-30

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(61727819)

引用格式: 彭鹏, 董翔宇, 殷国玲, 等. 基于移动光晶格布洛赫振荡的原子干涉重力仪[J]. 计测技术, 2023, 43 (4): 119-127.

Citation: PENG P, DONG X Y, YIN G L, et al. Compact atomic interference gravimeter based on Bloch oscillations of moving optical lattice[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 119-127.



海啸等自然灾害提供预警信息。在国防安全领域,高精度的重力测量能够对弹道导弹的轨迹实现修正、对重力辅助惯性导航^[7]以及水中的隐身单位进行探测。

绝对重力测量依赖于高精度的绝对重力仪。自由落体型角锥重力仪是当前采用的重力测量基准之一,但角反射棱镜的机械运动成为限制其应用潜力的主要因素^[8]。以冷原子为基础的基于马赫-曾德尔干涉原理的原子重力仪,因其更高的采样率受到广泛关注且发展迅速。

1992年,Stanford大学的朱棣文实验小组,最先实现了冷原子干涉重力仪。他们利用钠原子的光学粘团(Molasses)与三束拉曼光脉冲组成了马赫-曾德尔型的冷原子干涉重力仪^[9-10],其灵敏度可达到 $1.3 \mu\text{Gal}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 。通过对系统进一步优化,铯原子干涉重力仪^[11]的灵敏度达到 $23 \mu\text{Gal}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 。德国柏林洪堡大学的Peter实验小组实现了可搬运原子干涉重力仪^[12-13],其灵敏度为 $9.6 \mu\text{Gal}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 。除此以外,意大利佛罗伦萨大学Tino实验小组^[14]、英国伯明翰大学实验小组^[15]等也相继发表了原子干涉重力仪的高精度重力测量结果。

国内也有众多实验小组利用原子干涉仪对重力进行高精度测量。浙江大学^[16-17]研制的自由下落式原子干涉重力仪的重力测量灵敏度可以达到 $100 \mu\text{Gal}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,经过1 000 s的积分后分辨率可以达到 $5.7 \mu\text{Gal}$ 。华中科技大学的原子喷泉式马赫-曾德尔型原子干涉重力仪的灵敏度达到 $55 \mu\text{Gal}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[23]。随后对系统进行优化,将重力仪的灵敏度提高到 $4.2 \mu\text{Gal}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[18]。除此以外,中国科学院武汉数学物理研究所^[19-20]、中国计量科学研究院^[22]、中国科学技术大学^[23-24]、浙江工业大学^[25]等实验小组也在不断推进基于原子干涉仪的高精

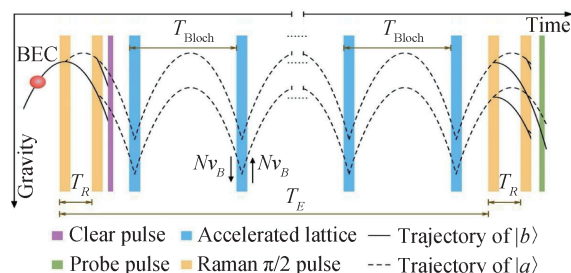
度重力测量。

原子在马赫-曾德尔型重力仪的运行轨迹为自由落体形式,提高测量精度需要增加干涉时长,该类型重力仪的物理体积通常为米量级,较大的体积会对设备便携性产生影响。因此,实现物理体积小型化的冷原子重力仪具备非常重要的意义。使用布洛赫振荡可以向原子传递高反冲动量,补偿自由落体效应,使原子的运动轨迹接近悬浮。应用移动光晶格布洛赫振荡原理的拉姆塞-伯德原子重力仪可以将原子的竖直位移限制在厘米量级,物理体积显著减小,对外场的空间均匀性要求大幅降低,具备极高的小型化潜力。这种重力测量方案同样使用原子干涉技术,能够达到的灵敏度指标与马赫-曾德尔型原子重力仪处于同一量级^[26-28]。本文对应用移动光晶格布洛赫振荡原理的冷原子重力测量方案进行了研究,分析讨论原子团在移动光晶格中的大动量转移过程,并给出仪器的性能指标。

1 基于移动光晶格布洛赫振荡原理的原子干涉重力仪

1.1 原子干涉重力仪

基于移动光晶格布洛赫振荡原理的原子干涉重力仪结构如图1所示,其结合了拉姆塞-伯德干涉仪与移动光晶格布洛赫振荡技术。本原子干涉重力仪使用了反向拉曼光构型的拉姆塞-伯德干涉仪(黄色)作为差分速度传感器,并在前后两对 $\pi/2$ 脉冲之间插入若干移动光晶格脉冲(蓝色)用于布洛赫振荡,在重力加速度 $\vec{g}$ 相反的方向加速原子。图1中共绘制了 $M \geq 4$ 个移动光晶格脉冲,每个移动光晶格脉冲能够发生 N 个布洛赫振荡。因此,原子能够在持续时间为 T_E 的拉姆塞-伯德干涉仪内反复做自由落体运动。控制好各个布洛赫振荡的脉



注: 图为原子运动位移在时间轴上的展开, 纵轴为竖直位移, 横轴为时间。

图1 基于移动光晶格布洛赫振荡原理的原子干涉重力仪结构

Fig.1 Atomic interference gravimeter structure based on the principle of Bloch oscillation in moving optical lattice

冲参数,就能获得近似悬浮的效果。

第一对 $\pi/2$ 脉冲后,波包分裂为4条演化路径。使用一束与激发态能级共振的清除光脉冲(紫色),选择其中2条路径作为干涉臂(另外2条路径也能作为干涉臂)。施加第二对 $\pi/2$ 脉冲后,现存的2条路径分裂为6条路径,其中只有2条路径能够闭合,剩余路径作为背景降低了干涉条纹的对比度。

该重力加速度测量方案使用荧光法进行探测,荧光法可以对布居在不同超精细能级上 $|b\rangle$ 和 $|a\rangle$ 的原子进行探测,使用光频有所区别。为了简便表示,图1中仅绘制一个探测脉冲(绿色)。荧光探测法输出信号为原子在各个能级上的布居比例(跃迁概率 $P_{|a\rangle}$ 和 $P_{|b\rangle}$),与干涉仪的输出相位之间的关系 $P_{|a, b\rangle}$ 为

$$P_{|a, b\rangle} = \frac{1}{2} [1 \pm C_{RB} \cos \delta\phi_g] \quad (1)$$

式中: C_{RB} 为拉姆塞-伯德原子干涉仪中实际的拉曼光跃迁效率。

在重力场的影响下,该方案中拉姆塞-伯德干涉仪的输出相位 $\delta\phi_g$ 表达式为

$$\delta\phi_g = k_{\text{eff}} T_R \left(MN \frac{2\hbar k_B}{m} - g T_E \right) + [\delta\omega^{(CD)} - \delta\omega^{(AB)}] T_R \quad (2)$$

式中: k_{eff} 为拉曼光的有效波矢, M 为图1方案中移动光晶格脉冲的照射次数, N 为单个移动光晶格脉冲所发生的布洛赫振荡的次数, $\hbar$ 为约化普朗克常数, k_B 为布洛赫光的波矢, m 为 ^{87}Rb 原子质量, T_E 为两对拉曼脉冲之间的时间间隔。 $\delta\omega^{(AB)}$ 和 $\delta\omega^{(CD)}$ 分别对应于前后两对 $\pi/2$ 脉冲所使用的拉曼光相对失谐, T_R 为拉曼光脉冲对之间的时间间隔。

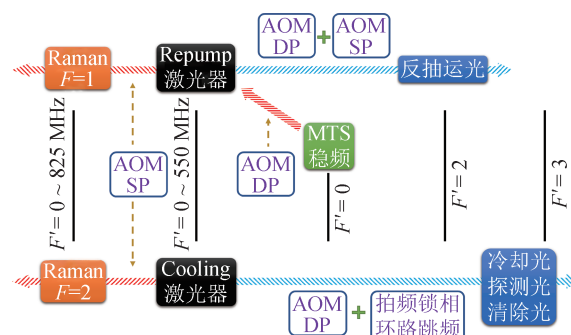
通过调制 T_R 得到多组干涉条纹,可以确定中心条纹所对应的扫频斜率 δ

$$g = \frac{1}{T_E} \left(MN \frac{2\hbar k_B}{m} - \frac{\delta}{k_{\text{eff}}} \right) \quad (3)$$

1.2 频率控制系统

制备 ^{87}Rb 原子的磁光阱需要两种频率的激光:一种是冷却光,其频率设置为与 $F = 2 \rightarrow F' = 3$ 能级跃迁线相对红失谐 $\Delta f_c(t)$,实现循环跃迁条件下的多普勒冷却;另一种是反抽运光,其频率设置为与 $F = 1 \rightarrow F' = 2$ 能级跃迁线共振,实现对基态 $|F = 1\rangle$ 的光抽运效果,保证全部原子能够参与循环跃迁。具体的频率控制系统如图2所示,图中未标出基态能级而只绘制了激发态能级,红色箭头

为红失谐,频率减小;蓝色箭头为蓝失谐,频率增加;实线框表示移频所用的技术手段,获得拉曼光时,两台激光器输出的光频合束后通过了同一个 AOM,因此,使用同一个实线框引出的两个黄色虚线箭头将两个频率关联。



注: DP 和 SP 分别为声光调制器 (Acousto-Optic Modulator, AOM) 的双向衍射和单向衍射; MTS (Modulation Transfer Spectroscopy) 为调制转移光谱。

图2 原子干涉仪频率控制系统

Fig.2 Atomic interferometer frequency control system

反抽运光和冷却光之间的频差为 $6\,568.0\text{ MHz} + \Delta f_c(t)$ 。 $\Delta f_c(t)$ 为可变的红失谐量,其值从 0 Hz 变化到 150 MHz ,满足后续的偏振梯度冷却过程、探测和清除过程中对冷却光的频率要求。反抽运激光器作为参考光,使用 MTS 方式锁定在 ^{87}Rb 原子的激发态能级循环跃迁线 $F = 1 \rightarrow F' = 0$ 上。冷却激光器通过拍频锁相 (Phase Lock) 方式锁定到反抽运激光器。

反抽运激光器与稳频环路之间设置一个正向移频的 AOM 双向衍射结构, AOM 的驱动频率为 $f_A = 275\text{ MHz}$ 。因此,反抽运激光器出射光频为相对 $F = 1 \rightarrow F' = 0$ 跃迁线蓝失谐 550 MHz 。为了获得反抽运光 ($F = 1 \rightarrow F' = 2$),激光器的出射光束在分光后,通过一个驱动频率为 f_A 的 AOM 双向衍射正向移频,再串联一个驱动频率为 229 MHz 的 AOM 单向衍射正向移频。单向衍射光路中的透射光频率与 $F = 1 \rightarrow F' = 0$ 共振,可以用作超精细能级基态 $F = 1$ 的清除光。

考虑到两台激光器还需要同时实现拉曼光,因此,冷却光频率设置相对复杂。拉曼光时,两台激光器频差 $6\,834\text{ MHz}$,冷却激光器输出光频率是 $F = 2 \rightarrow F' = 0 - 2f_A$;与冷却阶段的冷却光频率 $F = 2 \rightarrow F' = 3 - \Delta f_c(t)$ 频差超过 1 GHz 。实验计划通过一个 AOM 双向衍射正向移频结构结合激

光器跳频技术补偿两个阶段的激光频差。该AOM的驱动频率也设置为 f_A ，AOM的衍射光频率与 $F = 2 \rightarrow F' = 0$ 禁忌跃迁线共振。将光频调整到 $F = 2 \rightarrow F' = 3$ 附近还需要跳频 $495.8 \text{ MHz} - \Delta f_c(t)$ 。所以，冷却阶段拍频锁相环路的参考频率应当设置为 $6\,338.9 \text{ MHz} + \Delta f_c(t)$ 。

1.3 光路系统

原子干涉仪与移动光晶格的总体光路设计如图3所示，图中示意性绘制了探测光以及偏置磁场（红棕色），绿色虚线框为该部分光学元件放置在被动隔振平台上面，黄棕色虚线框为该部分结构放置于简易磁屏蔽内部。拉曼光以及清除光都从上保偏光纤（PM fiber）准直扩束器（Collimator）出射。自上而下传播的布洛赫光 $\omega_b^\downarrow$ 在光纤前与拉曼光合束，合束方式使用AOM的单向衍射结构，拉曼光经过AOM衍射后注入光纤，布洛赫在AOM位置处透射。AOM型号为法国AA Opto Electronic公司的MT250-A0.5-800，能够允许正交偏振的拉曼光具备较高的衍射效率，此设计可以确保动量转移、速度测量与重力方向三者共线，尽量消除速

度投影，降低系统效应影响。

使用AOM单向衍射结构进行合束不会出现功率损失。传统的偏振分光棱镜（Polarization Beamsplitter, PBS）需要考虑偏振态的影响，在如图3复杂的偏振态环境下，存在显著的功率损失。这些损失对于布洛赫光不可接受。自下而上传播的布洛赫光 $\omega_b^\uparrow$ 使用单独的光纤从真空底部出射。根据激光干涉条件， $\omega_b^\downarrow$ 和 $\omega_b^\uparrow$ 的线偏振态应当一致。

图4为布洛赫光扫频使用的光电环路示意图。AOM的驱动信号分别来自两台双通道信号发生器，AOM双向衍射结构便于实现激光扫频。光束在AOM双向衍射结构中发生了两次衍射，AOM驱动信号扫频时，出射光的指向性变化可以通过结构内部的凸透镜消除。在小的扫频范围内，出射光的光纤耦合效率变化很小，能够确保移动光晶格的阱深稳定性。实验也加入了功率反馈电路以稳定出射光功率。另外该结构是二倍频结构，能够降低对信号发生器的扫频性能要求。为了尽可能避免自发辐射放大（Amplification of Spontaneous Emission, ASE）效应对原子团产生的加热现象，光路中加入铷泡吸收共振光。

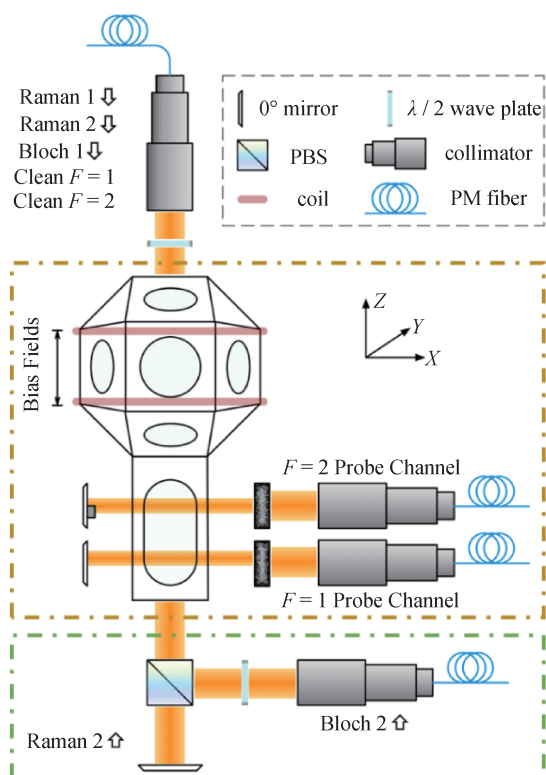
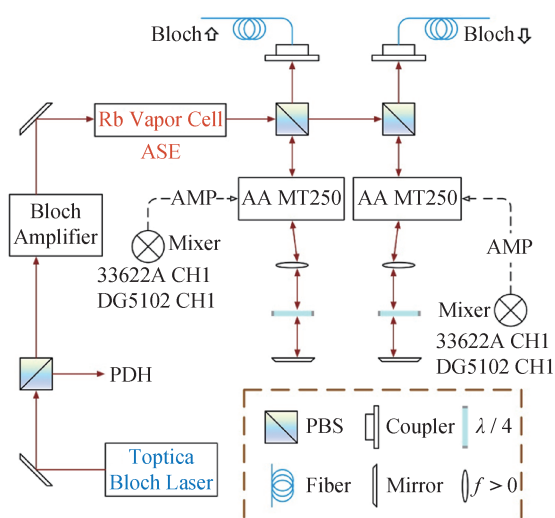


图3 原子干涉仪在真空位置处的总体光路设计
Fig.3 Overall optical path design of atomic interferometer at vacuum position



注：带有箭头的红色实线为光束传播方向，带有箭头的黑色虚线为电学信号的传播方向。

图4 布洛赫光扫频使用的光电环路

Fig.4 Optoelectronic loop used for Bloch light sweeping

图4中使用两个AOM双向衍射结构分别对构成移动光晶格的两束布洛赫光进行扫频，其相位表达式分别为

$$\begin{cases} \phi_B^\downarrow = -\left[k_B + \frac{\delta\omega(t)}{c}\right]z - (\omega_B + \delta\omega)t + \phi_{B_0}^\downarrow \\ \phi_B^\uparrow = +\left[k_B - \frac{\delta\omega(t)}{c}\right]z - (\omega_B - \delta\omega)t + \phi_{B_0}^\uparrow \end{cases} \quad (4)$$

因此,构成匀加速光晶格的布洛赫光其波矢的变化量能够相互抵消,不会对测量重力加速度值产生影响。

2 移动光晶格大动量转移

移动光晶格中布洛赫振荡^[29-30]是仪器重力测

量方案的核心内容。布洛赫振荡也是受激辐射效应下的过程,该方法的优势在于能够在不改变原子内态布居的情况下实现原子速度反转,缩短干涉区间,规避布洛赫光散斑噪声。布洛赫光设计的首要目的是提高布洛赫振荡的效率,布洛赫振荡效率直接影响两个干涉臂上的原子数,进而影响干涉时长、信噪比等因素。

布洛赫光扫频时存在两种扫频斜率。由于信号发生器的性能限制,实验使用两台双通道信号

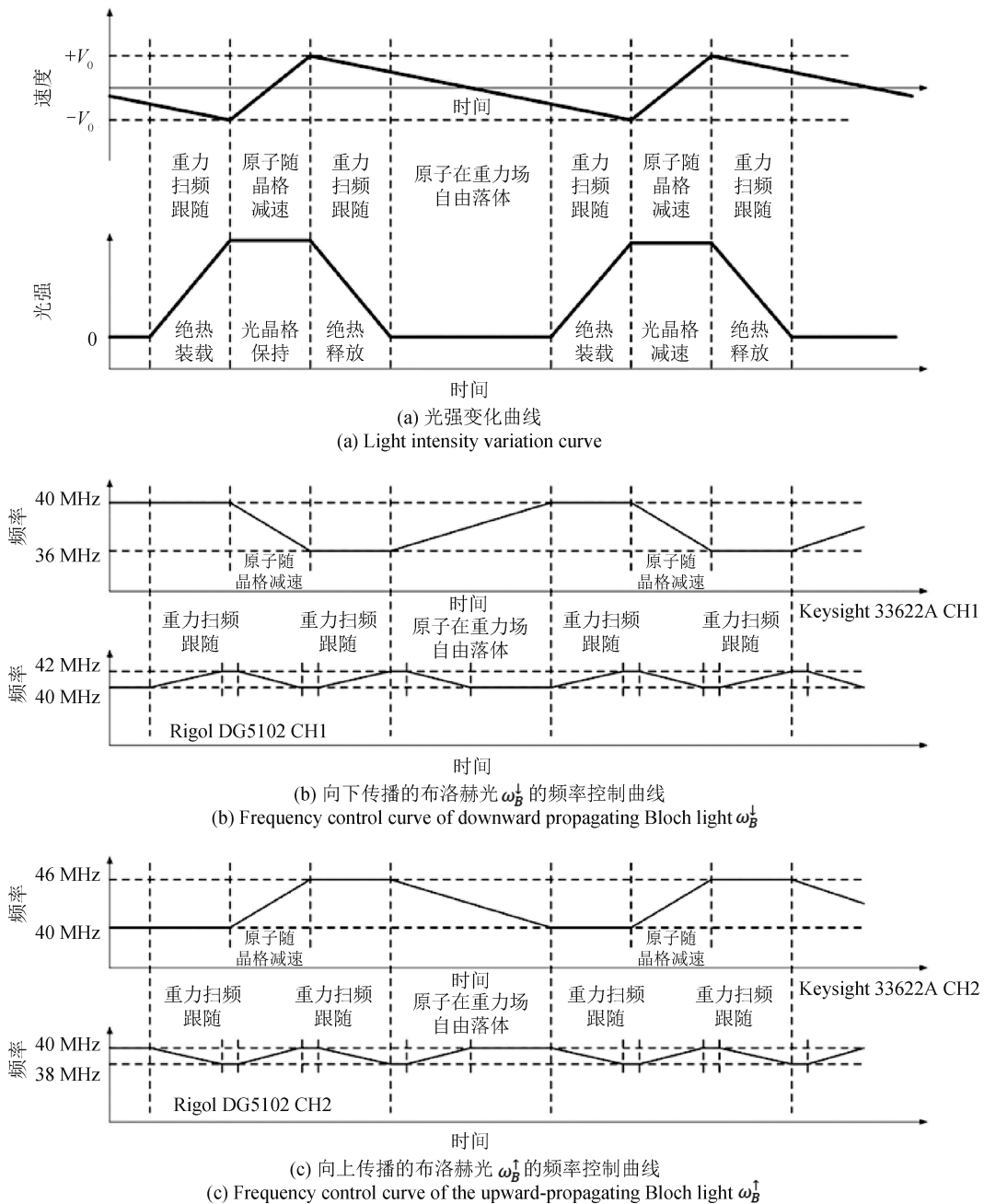


图5 移动光晶格脉冲中布洛赫光的光强和频率变化曲线

Fig.5 Light intensity and frequency variation curve of Bloch light in moving optical lattice pulse

发生器(33622A和DG5102)实现移动光晶格脉冲过程中的布洛赫扫频。每台双通道信号发生器的CH1通道进行混频作为 ω_b^1 的输入,CH2通道进行混频作为 ω_b^2 的输入。DG5102工作在装载阶段 T_{load} 和能带映射阶段 T_{map} ,33622A工作在扫频阶段 T_{swp} 。按照相应时序依次触发各个信号发生器可实现移动光晶格脉冲中的布洛赫振荡,补偿自由落体效应的影响,这是缩短原子纵向位移的核心环节。

移动光晶格脉冲过程中布洛赫光的光强和频率变化曲线如图5所示,图中每束布洛赫光的频率都由两个独立的信号发生器通道混频而成,需要两台信号发生器共计4个频率输出通道,图5中的频率纵坐标仅作为示意。

在一个布洛赫脉冲作用过程中,布洛赫光光强和频率的变化过程如下:

1) 原子以绝热的方式装载移动光晶格,期间布洛赫光光强线性上升,总共用时 T_{load} 为1 ms。该阶段, $\delta\omega$ 的值相应增加 $2\pi \times 12.6$ kHz。该扫频过程可以使晶格速度跟随原子速度变化,装载过程中无准动量变化。

2) 扫频过程中移动光晶格光强保持不变,扫频前后, $\delta\omega$ 的值大小一致,符号相反,使原子实现速度反向,该过程中的原子速度跟随晶格速度变化。

3) 能带映射阶段,布洛赫光光强线性下降,用时 T_{map} 为1 ms。该阶段, $\delta\omega$ 的值相应减少 $2\pi \times 12.6$ kHz(注意符号为负)。扫频同样使晶格速度跟随原子速度变化,不引入额外的准动量。

为了提高装载性能,减少退相干效应的影响,实验以绝热方式装载移动光晶格。基带装载过程中,晶格势能线性提高的时间 T_{load} 受到绝热定理的限制,紧束缚条件^[31-32]下为

$$T_{\text{load}} \gg \frac{1}{16\sqrt{2}} \frac{\hbar}{E_r} \left(\frac{V_0}{E_r} \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: V_0 为光晶格阱深, E_r 为晶格光的单光子反冲能量。

移动光晶格使用的阱深为 $40 E_r$, T_{load} 设置为1 ms即可满足上式条件。我们也尝试使用e指数形式进行装载,当前测量分辨率下,并未看到明显改善。

而对于移动光晶格中的布洛赫振荡阶段 T_{swp} ,需要确定晶格加速度值。图6为原子经过移动光晶格的布洛赫振荡后,获得反冲速度的原子的TOF

信号。获取该信号使用的时序为 π -清除光-布洛赫脉冲,选速态后原子布居在 $|F=1\rangle$ 能级,布洛赫振荡过程为相干过程,不会改变原子内态能级布居。此时,实验中晶格加速度设置为每毫秒大约发生28次布洛赫振荡。一次移动光晶格脉冲在 $T_{\text{swp}} = 5$ ms中发生约138次的布洛赫振荡。

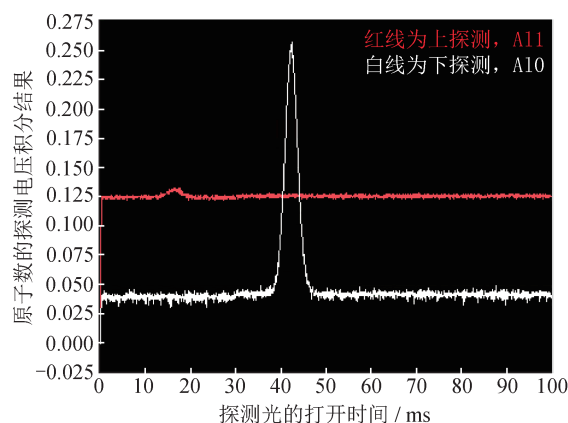


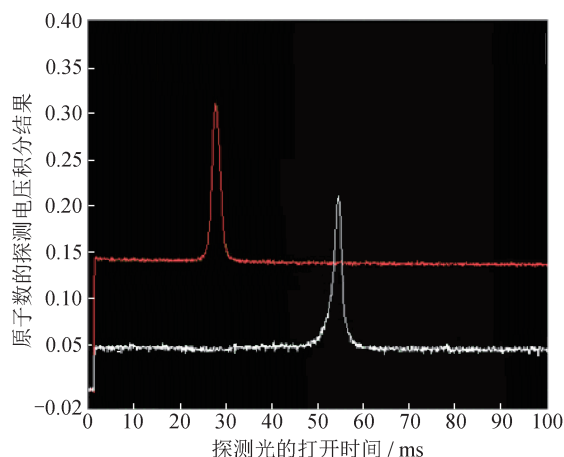
图6 实现大动量转移的 $|F=1\rangle$ 原子的TOF信号

Fig.6 TOF signal of $|F=1\rangle$ atoms after large momentum transfer

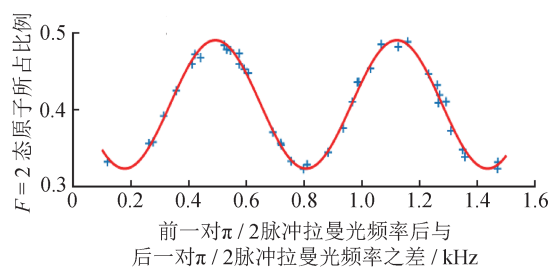
图7为 $T_R = 12$ ms, $T_E = 171$ ms,并进行138次布洛赫振荡条件下的原子干涉测量结果。图7(a)中,红线为 $|F=2\rangle$ 的原子的TOF信号,白线为 $|F=1\rangle$ 的原子的TOF信号。积分得到原子数后,归一化得到原子布居数的干涉条纹。此时,原子在空间中的竖直位移约为3 cm。图7(b)展示了干涉条纹的两个周期,红色实线为依据余弦函数的最小二乘拟合结果。干涉条纹中每个周期由20个测量结果组成,每次测量的时长约为1.1 s。

3 仪器性能

地球的重力加速度是一个含时变化量,通常以潮汐效应笼统指代重力加速度的含时变化^[33]。作者所在科研团队使用小型化原子干涉重力仪对地球重力加速度进行长时间的监测,并与理论潮汐模型进行比对。测量结果如图8所示,图中红棕色实线为潮汐模型ETERNA34给出的预测值,绿色圆圈是实验测得的重力加速度相对值,每个数据点为50组干涉条纹拟合得到的平均结果,标准差作为误差棒展示在图中。自2022年7月3日中午12时开始,至2022年7月5日凌晨3时结束,进行了一组大约40 h的连续重力观测。图8中实验数据



(a) 荧光探测系统得到的原子数
(a) Atomic number obtained by fluorescence detection system



(b) 归一化后的干涉条纹
(b) Normalized interference fringes

图7 大动量转移后的原子干涉重力仪测量结果

Fig.7 Measurement results of atomic interference gravimeter after large momentum transfer

点均通过拟合干涉条纹的初相位获得, 并使用公式(2)转换为重力加速度相对值。测量一组干涉条纹需要的时间约22.2 s, 50组干涉条纹的拟合平均值构成了图中的单一数据点, 其标准差以误差棒的形式展示。

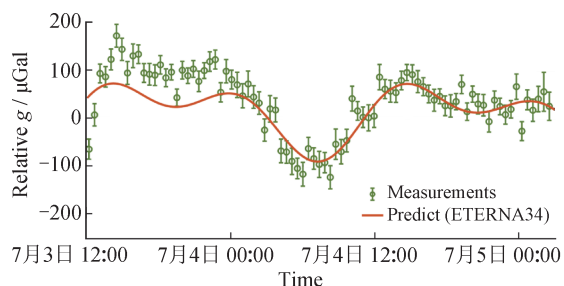


图8 重力加速度随时间变化数据

Fig.8 Gravity acceleration over time data

出于参考和对比的需要, 图8中也给出了同一时段的地球重力加速度变化数据, 该数据取自 ETERNA34 潮汐预测模型^[34]。根据预测结果, 7月4日0时-15时, 重力加速度变化最为明显, 该时段内受潮汐影响约有160 μGal (1 μGal = 10⁻⁸ m/s²)

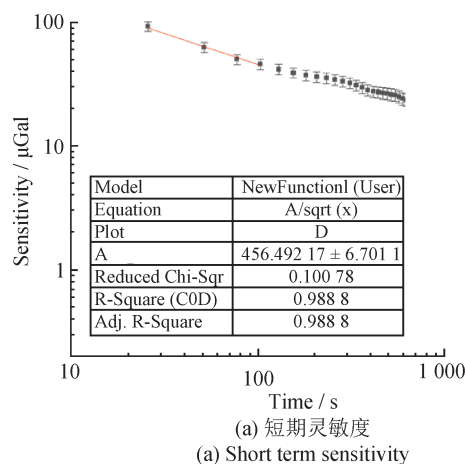
的变化幅度。实验数据与模型预测值的整体走势趋于一致, 较好地观测到了这一变化。

在 $T_R = 12$ ms, $T_E = 171$ ms, 及138次布洛赫振荡条件下, 对重力加速度进行了短期和长期测量。在精密测量领域通常利用阿伦方差来分析仪器的短期灵敏度和测量分辨率, 主要思路是将测量数据点分为 m/N 组 (m 为总测量次数, N 为每一组的测量次数), 计算相邻两组测量数据平均值差的方差。不同测量时间对应的阿伦方差可以表示为

$$\sigma_{g,2}^2(\bar{\tau}) = \frac{1}{2} \left[(\bar{g}_{k+1} - \bar{g}_k)^2 \right]$$

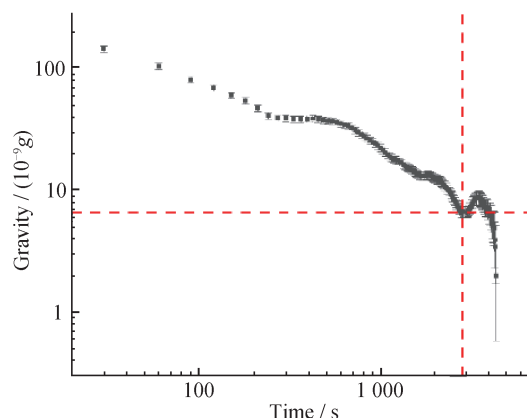
$$= \frac{1}{2} \lim_{m/N \rightarrow \infty} \frac{1}{m/N} \sum_{k=1}^{m/N} (\bar{g}_{k+1} - \bar{g}_k)^2 \quad (6)$$

通过对实验结果进行阿伦方差分析, 由图9可以得出, 小型化原子干涉重力仪的测量短期灵敏度可以达到 $4.6 \times 10^2 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。该结果比国际同行最高值 $7.4 \times 10^2 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 提高了约1倍^[35]。使



(a) 短期灵敏度

(a) Short term sensitivity



(b) 2800 s内分辨率的测量结果

(b) Measurement results with resolution within 2800 s

图9 基于移动光晶格布洛赫振荡的原子干涉重力仪性能展示

Fig.9 Performance demonstration of atomic interference gravimeter based on Bloch oscillation in moving optical lattice

用实验系统进行长时间的测量,在2 800 s积分时间内,系统分辨率可以达到 $6.5(0.7)\mu\text{Gal}$,与传统的自由落体型重力仪处于同一量级。导致2 800 s分辨率结果上翘的部分原因是测量实验受到了实验室的空调控制系统和附近地铁的影响,更换更好的磁屏蔽系统和提高系统对于温度的稳定性有助于进一步提高系统的分辨率。

4 总结

文章主要介绍了国内首个基于移动光晶格的布洛赫振荡原理的小型化原子干涉重力仪。本系统具有采样率高(0.9 Hz)和物理体积小(3 cm),可以实现对重力加速度的长期实时测量。此系统测量的灵敏度可以达到 $4.6 \times 10^2 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,比相同实验方案的国外实验小组的测量结果 $7.4 \times 10^2 \mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 提高了接近1倍。此外,还可以通过提高移动光晶格动量转移效率和增加光晶格脉冲数量的方法,在保证干涉仪物理体积不增大的情况下进一步提升系统性能指标。本文的研究成果为原子干涉重力仪由实验室原理样机发展为可移动的高精度测量仪器积累了宝贵的经验,大大减小了原子干涉重力仪的物理体积,加速了原子干涉重力仪小型化、便携化,进一步促进了原子干涉重力仪在资源勘探以及导航定位等方面的应用。

参考文献

- [1] LEPOUTRE S, JELASSI H, TRÉNEC G, et al. Atom interferometry as a detector of rotation and gravitational waves: comparison of various diffraction processes [J]. *General Relativity and Gravitation*, 2011, 43(7): 2011–2025.
- [2] LUO J, NIE Y X, ZHANG Y Z. Null result for violation of the equivalence principle with free-fall rotating gyroscopes [J]. *Physical Review D*, 2002, 65: 42005.
- [3] ROSI G, AMICO G D, CACCIAPUOTI L. Quantum test of the equivalence principle for atoms in coherent superposition of internal energy states [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1–6.
- [4] EICHENBERGER A, JECKELMANN B, RICHARD P. Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical method [J]. *Metrologia*, 2005, 40: 356.
- [5] CURRENTI G, NAPOLI R, NEGRO C D. Toward a realistic deformation model of the 2008 magmatic intrusion at Etna from combined DInSAR and GPS observations [J]. *Earth and Planetary Science Letters: A Letter Journal Devoted to the Development in Time of the Earth and Planetary System*, 2011, 312(1a2): 22–27.
- [6] MONTAGNER J, JUHEL K, BARSUGLIA M. Prompt gravity signal induced by the 2011 tohoku-oki earthquake [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13349–13349.
- [7] KWON J H, JEKEIL C. Gravity requirements for compensation of ultra-precise inertial navigation [J]. *Journal of navigation*, 2005, 58(3): 479–492.
- [8] WANG S, ZHAO Y, ZHUANG W, et al. Shift evaluation of the atomic gravimeter NIM-AGRB-1 and its comparison with FG5X [J]. *Metrologia*, 2018, 55: 360–365.
- [9] CHU S. Nobel Lecture: The manipulation of neutral particles [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70: 685–706.
- [10] KASEVICH M, CHU S. Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1992, 54: 321–332.
- [11] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms [J]. *Nature*, 1999, 400: 849–852.
- [12] FREIER C, HAUTH M, SCHKOLNIK V, et al. Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability [J]. *Journal of Physics, Conference Series*, 2016, 723(1): 012050.
- [13] HAUTH M, FREIER C, SCHKOLNIK V. First gravity measurements using the mobile atom interferometer gain [J]. *Applied Physics B*, 2013, 113: 49–55.
- [14] POLI N, WANG F Y, TARALLO M G. Precision measurement of gravity with cold atoms in an optical lattice and comparison with a classical gravimeter [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(3): 038501.
- [15] HINTON A, PEREA-ORTIZ M, WINCH J. A portable magneto-optical trap with prospects for atom interferometer in civil engineering [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017.
- [16] WU B, WANG Z, CHENG B, et al. The investigation of a μGal -level cold atom gravimeter for field applications [J]. *Metrologia*, 2014, 51: 452–458.
- [17] FU Z, WU B, CHENG B, et al. A new type of compact gravimeter for long-term absolute gravity monitoring [J]. *Metrologia*, 2019, 56: 025001.

- [18] HU Z, SUN B, DUAN X. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom - interferometry absolute gravimeter [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 043610.
- [19] ZHOU L, XIONG Z Y, YANG W, et al. Development of an atom gravimeter and status of the 10-meter atom interferometer for precision gravity measurement [J]. *General Relativity and Gravitation*, 2011, 43: 1931–1942. .
- [20] REN L, LIN Z, LI R. Dependence of sensitivity of an atom interferometer gravimeters on the Raman laser pulse sequences [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 12(58): 8230–8235.
- [21] ZHOU M K, HU Z K, DUAN X C, et al. Performance of a cold-atom gravimeter with an active vibration isolator [J]. *Physical Review A*, 2012(4 Pt. 2): 043630–1–043630–5.
- [22] WANG S, ZHAO Y, ZHUANG W, et al. Shift evaluation of the atomic gravimeter NIM-AGRB-1 and its comparison with FG5X [J]. *Metrologia*, 2018, 55: 360–365.
- [23] XIE H T, CHEN B, LONG J B, et al. Calibration of a compact absolute atomic gravimeter [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(9): 84–91.
- [24] CHEN B, LONG J, XIE H, et al. Portable atomic gravimeter operating in noisy urban environments [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(9): 8–13.
- [25] WU B, ZHU D, CHENG B, et al. Dependence of the sensitivity on the orientation for a free-fall atom gravimeter [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11252.
- [26] HU Z, SUN B, DUAN X C. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom - interferometry absolute gravimeter [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 043610.
- [27] ZHOU L, XIONG Z Y, YANG W, et al. Development of an atom gravimeter and status of the 10-meter atom interferometer for precision gravity measurement [J]. *General Relativity and Gravitation*, 2011, 43(7): 1931–1942.
- [28] REN L, LIN Z, LI R. Dependence of sensitivity of an atom interferometer gravimeters on the Raman laser pulse sequences [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8230–8235.
- [29] FELDMANN J, LEO K, SHAH J, et al. Optical investigation of Bloch oscillations in a semiconductor superlattice [J]. *Physical Review B*, 1992, 46: 7252–7255.
- [30] DAHAN M B, PEIK E, REICHEL J, et al. Bloch oscillations of atoms in an optical potential [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(24): 4508–4511.
- [31] CADORET M. Application des oscillations de Bloch d'atomes ultra-froids et de l'interférométrie atomique à la mesure de h/m et à la détermination de la constante de structure fine [D]. Université Pierre et Marie Curie, 2008.
- [32] BEN - DAHAN M. Transport et relaxation d'atomes de césium: oscillations de Bloch et résonance de diffusion [D]. Université Pierre et Marie Curie, 1997.
- [33] FALLER J E. Thirth years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances [J]. *Metrologia*, 2002, 39: 425.
- [34] SCHUELLER K. Theoretical basis for Earth tide analysis with the new ETERNA34-ANA-V4.0 program [S]. https://www.eas.slu.edu/GGP/BIM_Recent_Issues/bim149-2015/schuller_theoretical_basis_Eterna-ANA_v4_BIM149.pdf.
- [35] ANDIA M, JANNIN R, NEZ F, et al. Compact atomic gravimeter based on a pulsed and accelerated optical lattice [J]. *Physical Review A*, 2013, 88: 031605.

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 彭鹏(1994—), 男, 山西晋城人, 博士研究生, 主要研究方向为冷原子与精密测量。2016年毕业于南昌大学光信息科学与技术专业, 获得学士学位, 2019年毕业于北京大学电子与通信工程专业, 获得硕士学位, 2019年至今于北京大学电子学院量子电子所, 攻读量子电子学博士学位。



通讯作者: 周小计(1971—), 男, 山西晋城人, 近年来主要从事玻色—爱因斯坦凝聚操控的研究, 包括光晶格中的高能带操控和动力学研究, 光晶格中的输运现象研究以及光晶格中的精密测量等。山西大学物理系学士学位, 华中科技大学物理系硕士学位, 北京大学电子学系博士学位。原山西大学副校长(挂职), 现任北京大学信息科学技术学院教授, 博士生导师, 山西大学先进功能材料与器件研究院院长。