

# 新一代惯性导航技术:冷原子陀螺仪

李润兵, 王 谨, 詹明生

(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)

**摘要:** 本文介绍了冷原子陀螺仪的实验研究进展, 通过直接数字频率综合电路精确控制原子的运动轨迹, 形成双向对抛的冷原子束, 利用拉曼激光脉冲相干操作双向对抛的冷原子, 实现了双环路冷原子干涉条纹, 该构型将消除拉曼激光相位等不确定因素引起的共模噪声, 同时消除重力加速度等初始相位对绝对转动速率测量的影响, 以提高冷原子陀螺仪的灵敏度和测量精度, 冷原子陀螺仪将在新一代惯性导航技术中开辟全新的技术途径。

**关键词:** 冷原子; 原子干涉; 冷原子陀螺仪; 惯性导航

**中图分类号:** TN 96    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1008-9268(2010)04-0001-05

## 0 引言

物质波的干涉特性在精密测量中有着潜在的应用<sup>[1]</sup>, 自从 1991 年斯坦福大学朱棣文小组实现脉冲式原子干涉仪以来<sup>[2]</sup>, 原子干涉仪在重力加速度测量<sup>[3-4]</sup>, 牛顿引力常数测量<sup>[5-8]</sup>, 精细结构常数测量<sup>[9]</sup>, 旋转速率测量和地球自转速率测量<sup>[10-12]</sup>等方面得到了广泛的应用, 目前国际上热原子干涉仪测量转动的灵敏度达到了  $6.0 \times 10^{-10} \text{ rad/s}^{[10-11]}$ , 冷原子干涉仪测量转动的灵敏度达到了  $1.4 \times 10^{-7} \text{ rad/s}^{[12-13]}$ 。在实际应用中, 冷原子较热原子具有更小的速度及其速度分布, 利用冷原子实现的冷原子陀螺仪在小型集成化及其惯性导航领域的应用中更具有优势, 因此, 冷原子陀螺仪的实验研究有着重要的意义。

介绍了原子干涉仪的基本物理原理、冷原子陀螺仪的物理装置、小型化集成光路、主要电路系统及其冷原子陀螺仪的实验进展, 将分布反馈半导体激光器(Distributed Feedback, DFB)注入锥形放大半导体激光芯片(Tampered Amplified, TA), 研制出输出功率为 1 W 的分布反馈注入放大半导体激光器, 其频率稳定性在 1 MHz 以内, 该激光器用于原子的激光冷却和囚禁, 研制出直接数字频率综合器(Direct Digital System, DDS), 其频率分辨率在 1  $\mu\text{Hz}$ , 用 DDS 射频电路控制声光调制器(A-

coustor-Optic Modulator, AOM) 的频率来精确控制囚禁光束的频率失谐, 通过调节直接数字频率综合器和冷却光的相关参数, 精确地控制冷原子的轨迹, 实现了冷原子的双向对抛, 其温度小于 30  $\mu\text{K}$ , 利用拉曼光相干操作冷原子实现了双环路的冷原子干涉条纹, 其干涉条纹对比度分别为 37% 和 22%。通过消除共模噪声和重力加速度等初始相位对绝对转动速率测量的影响, 我们将实现冷原子陀螺仪。

## 1 原子干涉仪

拉曼型原子干涉仪通常采用  $\pi/2 - \pi - \pi/2$  构型<sup>[14-19]</sup>, 第一个  $\pi/2$  拉曼脉冲和原子相互作用时原子相干分束,  $\pi$  拉曼脉冲和原子相互作用时, 两个态的原子发生布居数互换的同时都获得了双光子反冲动量, 原子相干反射, 第二个  $\pi/2$  拉曼脉冲和原子相互作用时, 原子合束发生干涉。在原子干涉过程中, 初始态的原子经过第一个拉曼脉冲实现分束时, 原子有一半的几率继续呆在初态, 有一半的几率发生跃迁而呆在激发态, 在激发态的原子同时获得激光的相位  $\phi_1$ , 形成一个相干叠加态, 当原子与第二个拉曼光脉冲作用时, 原子正好感受到一个  $\pi$  的跃迁, 原子布居数发生交换的同时均获得激光的相位  $\phi_2$ , 当原子与第三个拉曼光脉冲作用时, 初态的原子有一半的几率继续呆在初态, 有一半

收稿日期: 2010-07-06

基金项目: 国家基础研究发展规划(课题号: 2005CB724505) 和国家自然科学基金(项目编号: 10774160, 11004227) 资助的课题

的几率发生跃迁而呆在激发态, 同样, 激发态的原子有一半的几率继续呆在激发态, 有一半的几率发生跃迁而呆在初态, 他们均获得激光的相位  $\phi_3$ , 因此, 原子经过三个拉曼脉冲作用后原子内态为初态和激发态的相干叠加态, 原子在初态或激发态的几率为

$$p = [1 \pm \cos(\phi_1 - \phi_2 \phi_2 + \phi_3)] / 2 \quad (1)$$

从公式(1)可以看出, 拉曼光的相位参与到原子内态的布居数变化上, 当扫描任意一个拉曼光相位时, 可以得到原子干涉条纹。

## 2 冷原子陀螺仪

类似于光学陀螺仪中的萨格奈克效应, 在原子干涉仪环路中, 原子感受到科里奥利加速度, 旋转引起的相移和旋转速度的关系表示成

$$\phi_{\Omega} = 2k_{eff} \cdot (\Omega \times v) \frac{L^2}{v^2} \quad (2)$$

在这里  $k_{eff}$  为拉曼光的有效波矢;  $v$  为原子的速度;  $L$  为拉曼光脉冲间隔。从式(2)可以看出, 当原子的速度相反时, 旋转引起的相移也相反, 因此, 原子速度方向相反的双原子干涉环路陀螺仪可以消除重力加速度等因素对旋转测量的影响。

冷原子陀螺仪的原理示意图如图 1 所示, 囚禁在两个磁光阱中的冷原子团以相反方向沿着相同的抛物线轨迹形成冷原子束, 经过态制备后的原子在其中一个基态作为初始态, 用受激拉曼激光形成  $\pi/2 - \pi - \pi/2$  的拉曼脉冲形成 M-Z 干涉环路, 通过扫描其中一个拉曼脉冲的激光相位, 用激光诱导荧光测量另一个基态的布居数分布可以得到两个原子干涉条纹。

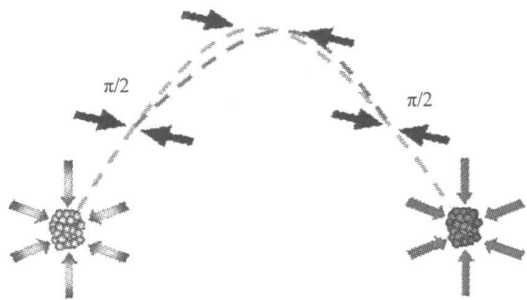


图 1 冷原子陀螺仪原理示意图

从式(1)可知, 对于双环路原子干涉陀螺仪, 每一路原子干涉条纹信号可分别写成

$$p_1 = [1 - \cos(\phi_L + \phi_R + \phi_0)] / 2$$

$$p_2 = [1 - \cos(\phi_L - \phi_R + \phi_0)] / 2$$

式中:  $\phi_L$  为拉曼激光与原子相互作用相位;  $\phi_R$  为旋转速率引起的相位;  $\phi_0$  为所有共模因素引起的相位, 作为原子干涉初相位处理, 双环路原子干涉相移差的一半即为旋转速率引起的相移, 利用式(2)可以提取旋转速率。冷原子陀螺仪的实现包括以下几个技术途径: 物理系统, 光学系统, 电路系统。

### 2.1 物理装置

冷原子陀螺仪的物理装置采用两个正十面体用于磁光阱来囚禁冷原子, 两对长方形的玻璃窗口用于冷原子初态的制备, 一对长方体窗口用于冷原子的激光诱导荧光探测, 一对圆形窗口用于拉曼脉冲对冷原子的相干操作。铷原子经过加热后进入磁光阱, 分别用一对反赫姆核磁线圈和六对正交的激光束对原子进行冷却, 将原子分别囚禁在两个磁光阱中, 用移动光学黏胶技术控制冷却光的上下失谐上抛原子, 形成两个沿着方向相反、轨迹相同的抛物线轨迹, 拉曼操作可形成两个干涉环路。

### 2.2 光学系统

冷原子陀螺仪的光路系统采用自主研发的分布反馈注入放大半导体激光器作为光源<sup>[20]</sup>, 经过三级声光调制器后作为冷却囚禁光, 第一级声光调制器将激光频率上调, 第二级声光调制器经过两次移频后将频率下调, 前两级声光调制器由模拟射频电路控制, 对其激光的频率和强度进行扫描作偏振梯度冷却以降低原子的温度, 第三级声光调制器经过两次移频后将激光频率上调, 用直接数字频率综合器射频电路控制原子上抛速度。

分布反馈注入放大 (DFB) 半导体激光器的主激光器采用商品激光管, 电流温度控制所需的电路都是自主研发, 电流控制电路最大输出 250 mA 的恒定电流, 电流噪声小于 1  $\mu$ A。温度控制电路是基于比例积分微分 (PID: Proportional Integral Derivative) 反馈调节的、温度灵敏度优于 0.1 mK。DFB 激光器和锥形放大芯片 (TA) 激光器均采用这套温度控制电路。TA 放大芯片在 780 nm 波长处的最大输出功率为 1 W, 输出波长及线宽与注入激光一致。自制的 TA 激光器电流控制电路最大输出恒定电流 2.5 A, 电流噪声小于 1  $\mu$ A, 具有保护激光管的慢启动功能。激光器系统中分光系统, 饱和吸收探测系统, 隔离器, 反射镜等所需的调整架都是按照 25 mm 高的低光路规格自主设计和制作的小型化光学调整架, 提高了光路的稳定性, 以利于光路的小型化集成。

TA 芯片加电后, 在没有种子光注入自由运转时, 自发辐射输出较为均匀的发散荧光, 荧光功率随电流增加缓慢增大。输入的种子光功率为 25 mW 时, 放大功率在经过大约 500 mA 的阈值电流后, 随电流增加迅速增大。当电流升高到 2 A 时, 输出功率达到 1000 mW。

### 2.3 电路系统

本实验中所采用的电路系统均为自主研制, 直接数字频率综合器 (Directed Digital System, DDS) 的频率分辨率达到  $1 \mu\text{Hz}$ , 主要分为 5 个部分: 参考时钟、相位累加器、相位到幅度转换表、数模转换器、和低通滤波器。参考时钟提供一个稳定的参考时钟, 用它来同步整个 DDS 的各个部分, 它的稳定度直接决定了最终输出信号的稳定度, 因此在要求 DDS 具有高稳定射频输出, 最好使用高稳定的晶振。相位累加器在系统时钟的控制下以频率控制字 M 作累加。相位累加器输出的二进制代码作为地址对相位到幅度转换器(相位到幅度转换器中存入的是正弦信号的幅度信息)进行寻址, 从而得到含幅度信息的二进制码, 再经过高速的 DA 转换器得到阶梯波, 最后经过低通滤波器输出平滑的合成信号波形。

## 3 实验结果

对铷源加热使其中的铷原子扩散到 MOT 的真空腔中, 然后将 TA 稳频到  $5S_{1/2}, F=3 \leftarrow 5P_{3/2}, F=2, 3, 4$  跃迁的交叉峰  $C_{o}[3, 2-4]$  上, 将 DL100 稳频到  $5S_{1/2}, F=2 \leftarrow 5P_{3/2}, F=1, 2, 3$  跃迁的共振峰  $P[2, 3]$  上, 打开四极磁场后通过磁光阱囚禁原子, 用 CCD 观察到的磁光阱如图 2 所示。



图 2 CCD 观测到的磁光阱中的冷原子

在 MOT 制备完毕后, 用两个 DDS 分别控制垂直方向的上面两束光束(两个 MOT 各有两束)负失谐 2.2 MHz, 下面两束光束(两个 MOT 各有两束)正失谐 2.2 MHz, 以补偿运动光学黏胶中由

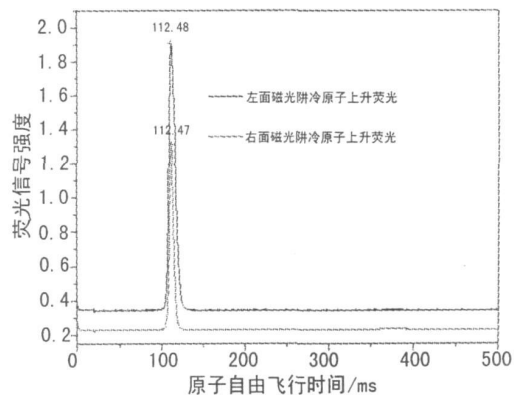


图 3 原子上升 TOF 信号

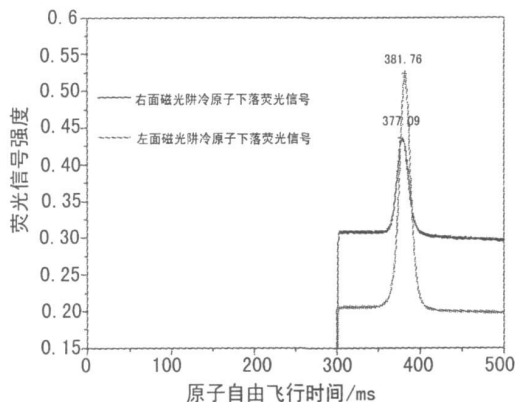


图 4 原子下落 TOF 信号

于速度引起的多普勒频移。用移动光学黏胶将原子加速到  $2.5 \text{ m/s}$ , 与水平方向成  $76^\circ$  的初速度进行抛物线运动。

冷原子上升时的荧光探测信号如图 3 所示, 深色为左面磁光阱冷原子的飞行时间探测信号 (Time of flight, TOF), 浅色为右面磁光阱冷原子的飞行时间探测信号, 两个信号强度的差别的主要原因是铷源与磁光阱真空腔不等距, 使扩散到腔中的铷原子密度不相等, 两个 MOT 冷却的原子数目不同, 同时探测光准直性不太好, 经过较长距离后, 作用在原子上单位面积的光强会减小。原子下落时的荧光探测信号如图 4 所示, 其中浅色为左面磁光阱冷原子的飞行时间探测信号, 深色为右面磁光阱冷原子的飞行时间探测信号, 同样两个信号强度有差别, 但是信号强度的绝对大小并不影响冷原子陀螺仪对旋转的测量。

通过测量飞行时间的方法来判断原子上抛的轨迹和速度特性, 用激光照射改变原子运动路径的方法来判断原子轨迹, 原子在上抛的过程中, 由于自身的热速度, 原子团会逐渐扩散变大, 当原子运

动到抛物线轨迹的顶点时(即原子速度最小),用一束直径 2 mm 的准直光斑照射原子团,当光打到原子团中心位置时,TOF 信号会在峰值处出现一个凹陷,如图 5 所示。通过凹陷的位置来判断原子的轨迹,然后调整激光器的失谐和上抛角度,使原子沿着预定轨道进行上抛。图 5 为将激光频率调整后,将 2 mm 光斑照在预定轨迹顶点时得到的 TOF 信号,从图中可以看到,左右两峰基本等大,表明原子团中心经过预定轨迹。

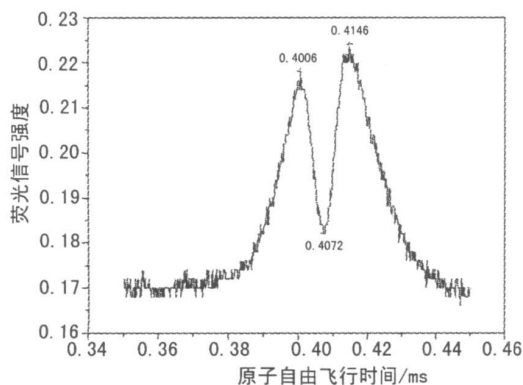


图 5 通过 TOF 信号判断原子轨迹

原子热运动会使原子团扩散,表现在 TOF 信号上就是高斯半宽变宽,通过一些近似,可以计算得到我们冷却达到的温度。实验中测得原子对面抛过来的 TOF 信号的半宽来估算原子的温度,在图 4,5 中,通过计算得到原子团的温度为  $T = 28.4 \mu\text{K}$  和  $25.8 \mu\text{K}$ 。采用拉曼光对沿着抛物线轨迹的两束冷原子进行相干操作,实现了双环路的冷原子 Ramsey 干涉条纹,如图 6 所示,其中深色为左面磁光阱冷原子的 Ramsey 干涉条纹,浅色为右面磁光阱冷原子的 Ramsey 干涉条纹,其干涉条纹对比度分别为 37% 和 22%。

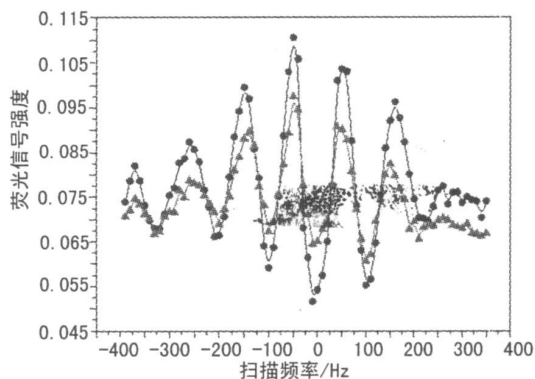


图 6 双环路冷原子 Ramsey 干涉条纹

## 4 结 论

本文介绍了冷原子陀螺仪及其实验进展,实现了冷原子的激光冷却、冷原子的双向对抛和对其轨迹的精确控制,对双环路冷原子进行拉曼光相干操作,实现了双环路冷原子干涉条纹,为冷原子陀螺仪走向实际应用奠定基础。

### 参考文献

- [1] LI R B, WANG J, ZHAN M S. Cold atom interferometer and their applications in space[J]. Phys., 2008, 37(9): 652-657.
- [2] KASEVICH M, CHU S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions[J]. Phys. Rev. Lett., 1991, 67(2): 181-184.
- [3] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. Measurement of Gravitational Acceleration by Dropping Atoms[J]. Nature, 1999(400): 849-852.
- [4] MCGUIRK J M, FOSTER G T, FIXLER J B, et al. Sensitive absolute gravity gradiometry using atom interferometry[J]. Phys. Rev. A, 2002, 65(3): 3608-3622.
- [5] 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.
- [6] BERTOLDI A, LAMPORRESI 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.
- [7] LAMPORRESI G, BERTOLDI A, CACCIAPUOTI L, et al. Determination of the Newtonian Gravitational Constant Using Atom Interferometry[J]. Phys. Rev. Lett., 2008, 100(5): 801-805.
- [8] MULLER H, CHIOU S, HERRMANN S, et al. Atom interferometry tests of the isotropy of post newtonian gravity[J]. Phys. Rev. Lett., 2008, 100(3): 1101-1105.
- [9] WEISS D S, YOUNG B C, CHU S. Precision measurement of the photon recoil of an atom using atomic interferometry[J]. Phys. Rev. Lett. 1993, 70(18): 2706-2709.
- [10] GUSTAVSON T L, LANDRAGIN A, KASEVICH M A. Rotation sensing with a dual atom interferometer Sagnac gyroscope[J]. Class. Quantum Grav., 2000, 17(12): 2385-2398.

- [ 11] DERFEE D S, SHAHAM Y K, KASECICH M A. Long term stability of an area reversible atom interferometer Sagnac gyroscope[J]. Phys. Rev. Lett., 2006(97): 801-805
- [ 12] CANUEL B, LEDUC F, HOLLEVILLE D, et al. Six axis inertial sensor using cold atom interferometry[J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 97(1): 402-406
- [ 13] GAUGUET A, CANUEL B, LEVEQUEL T, CHAIBI W, LANDRAGIN A. Characterization and limits of a cold atom Sagnac interferometer[J]. Phys. Rev. A, 2009, 80(6): 3604-3616.
- [ 14] LI R B, WANG P, YAN H, WANG J, ZHAN M S. Magnetic field dependence of coherent population transfer by the stimulated Raman transition[J]. Phys. Rev. A, 2008, 77(03): 3425-3429.
- [ 15] LI R B, ZHOU L, WANG J, ZHAN M. S. Measurement of the quadratic Zeeman shift of  $85\text{Rb}$  hyperfine sublevels using stimulated Raman transitions[J]. Opt. Commun., 2009, 282(7): 1340-1344
- [ 16] WANG P, LI R B, Yan H, WANG J, ZHAN M S, Demonstration of a Sagnac Type Cold Atom Interferometer with Stimulated Raman Transitions[J]. Chin. Phys. Lett., 2007, 24(1): 27-30
- [ 17] WANG J, ZHOU L, LI R B, LIU M, ZHAN M S, Cold atom interferometers and their applications in precision measurements[J]. Front. Phys. Chin., 2009, 4(2): 179-189
- [ 18] HE L C, ZHOU L, LI R B, LIU M, WANG J, ZHAN M S. Dependence of Atom Gravimeter on Raman Laser Pulses[J]. Acta Phys Sinica, 2009, 58(12): 8230-8235.
- [ 19] ZHAN M S, LI K, WANG P, KONG L, et al. Cold atom interferometry[J]. J. Phys.: Conf. Ser., 2007, 80(1): 2047-2065.
- [ 20] CHEN L, XIONG Z Y, WANG L, LI R B, WANG J, ZHAN M S. Tapered amplified diode laser injected by distributed feedback laser[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(1): 15-20.

### 作者简介

**李润兵** (1978-), 男, 甘肃天水人, 中国科学院武汉物理与数学研究所助理研究员, 主要从事冷原子物理实验研究, 已发表 SCI 论文 6 篇, 已授权国家发明专利 3 项。E-mail: rbli@wipm.ac.cn

**王 谨** (1970-), 男, 甘肃天水人, 中国科学院武汉物理与数学研究所研究员, 博士生导师, 主要从事冷原子物理实验研究。

E-mail: wangjin@wipm.ac.cn

## New Generation Inertial Navigation Technology: Cold Atom Gyroscope

**LI Run-bing, WANG Jin, ZHAN Ming-sheng**

(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics,

Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Wuhan Hubei 430071, China)

**Abstract:** In this paper, we described the progress of cold atom gyroscope. We launched the atoms along the same trajectory accurately and the opposite direction by controlling the frequency of directed digital system circuit. Using stimulated Raman beams, we operated the cold atoms and realized the atom interferometer fringes. With this configuration, it will greatly eliminate the common mode noise caused by uncertainty factor, such as the phase of the Raman laser beams, the gravity acceleration. It will significantly improve the precision in our experiment. The atom gyroscope will give a new way for the inertial navigation technology in the future.

**Key words:** Cold atom; atom interferometer; cold atom gyroscope; inertial navigation