

基于冷原子技术的导航传感器现状与发展

李攀 李俊 刘元正 雷兴 王继良

(西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘要 激光冷却原子样品以其探询时间长、能消除多普勒频移和碰撞引起的频移、与探测光场弱耦合等优点显著改善了原子光谱的精密测量能力,其多种优良特性也引起了导航领域研究者的极大兴趣。回顾了基于冷原子技术的导航传感器的发展历程,并跟踪了国际上的最新研究动态。将冷原子导航传感器根据其结构分为冷原子钟、冷原子干涉仪和原子芯片三个领域,并从物理效应、工作原理、性能参数、应用方向等多个方面分别进行了阐述。最后分析了冷原子导航传感器的发展前景,并指出高动态环境和系统的集成与封装将成为冷原子导航传感器实际应用面临的主要困难。

关键词 原子与分子物理; 导航传感器; 冷原子; 精密测量; 原子光谱

中图分类号 U666.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110005

Current Status and Development of Navigation Sensors Based on Cold Atoms

Li Pan Li Jun Liu Yuanzheng Lei Xing Wang Jiliang

(Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract The sample of laser cooled atoms significantly improves precision measurements of atom spectrum due to its advantages such as longer interrogation time, elimination of Doppler and collision-induced shifts, weak coupling to the interrogating fields and so on. The benefits of cold atoms have attracted large interest in navigation field. The development history of navigation sensors based on cold atom is reviewed and the recent research status of cold atom navigation sensors is introduced. The navigation sensors are classified into three types according to their different structures, and the physical effects, operation principles, performance parameters and application fields are described respectively. Finally, the development tendency is prospected. It is pointed out that the high- g dynamic environment and the integration and package of the system will be the main challenges for the practical application of cold atom navigation sensors.

Key words atomic and molecular physics; navigation sensor; cold atom; precision measurement; atomic spectroscopy

OCIS codes 020.1335; 020.1670; 020.3320; 020.7010

1 引言

对不同物理参量直接进行精密测量的能力往往有所不同。到目前为止,直接测量频率的能力往往超过其他参量。因此,大量国际度量单位制新标准开始与频率测量有关。米的定义是一个众所周知的例子:新标准通过光速定义,而不是标准米尺。类似地,电子标准现在与 Josephson 频率即电压比率 $2e/h$ (e 为电子电量, h 为普朗克常数) 的频率测量相关。最终,多数物理参量的精密测量可以通过频率测量的形式进行。

实现频率的精密测量往往基于原子光谱。例如,利用原子的微波跃迁谱可以实现 10^{-15} 的精度,作为频率基准用于定义时间。由于多种物理现象可以影响原子结构从而改变光谱信号,使得原子传感器成为可能。

而激光冷却的原子样品相对于室温蒸气或热原子束有诸多优势,最显而易见的是可以实现长得多的探询时间。虽然频率测量的准确度通常被其他因素限制,但其根本限制是重力。对于通常的设备尺寸,原子冷却到亚多普勒温度可以使探询时间提高到 1 s,转化为 1 Hz 的带宽。其他优势包括消除多普勒频移和碰撞引起的频移、与探测光场弱耦合等。

收稿日期: 2013-06-18; 收到修改稿日期: 2013-08-14; 网络出版日期: 2013-10-14

基金项目: 总装十二五航空支撑项目(61901060301)

作者简介: 李攀(1983—),男,工程师,主要从事原子传感器方面的研究。E-mail: lp_forever5281@sina.com

利用冷原子进行精密测量的优良特性引起了导航领域研究者的极大兴趣,可以满足战略轰炸机远程导航、战略级导弹精确制导、潜艇水下导航、地底结构探测、重力图谱绘制等诸多军用领域的迫切需求。目前已经出现了多种基于冷原子技术的导航传感器,其精度远远超过其他原理的传感器。随着冷原子技术的飞速发展,冷原子导航传感器有望在5~10年内得到实际应用^[1]。本文从技术发展和应用角度综述了20年来基于冷原子技术的导航传感器的研究进展,并分析和展望了其研究和发展前景。

2 冷原子钟

使用减速原子进行精密频率测量的优势直接来自于测不准原理。在改善原子频标的最初提议中,Zacharias 建议使用向上传播的热原子束,仅探测速度6 m/s 或更慢的原子^[2]。可惜的是,Zacharias 的喷泉无法工作,因为高速运动原子的存在会不断撞击慢速原子,导致原子束流中慢速原子比重减少。

尽管最初的实验失败了,然而这个构想得以幸存,而碰撞的问题在1989年第一次实现的基于激光冷却原子的原子喷泉中得以解决^[3]。该方案通过冷却和囚禁Na原子样品,然后以2~3 m/s 的速度抛射原子形成喷泉的方式解决了原子碰撞问题,并提供了大量可供探测的慢原子。

冷原子钟的基本想法如图1(a)所示^[4],在垂直的真空装置中充有工作物质(铷或铯)饱和蒸气,通过激光冷却陷俘原子,在激光作用下上抛原子。原子在上抛和下落过程中只受重力作用,两次穿过微波腔,与时间上的分离振荡场作用,产生钟跃迁,随后通过探测不同能级的原子,获得与Ramsey钟跃迁相应的荧光信号,如图1(b)所示^[4]。利用该荧光信号即可对实用频标的频率进行锁定。

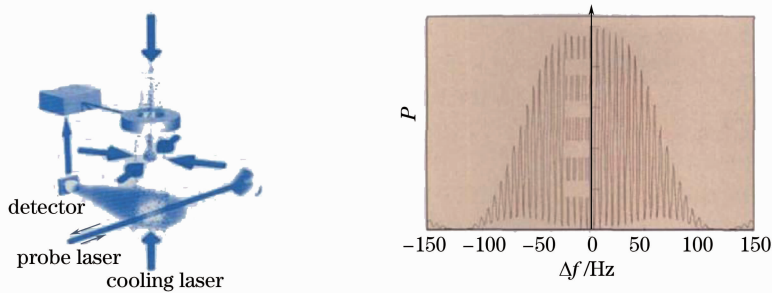


图1 (a) 冷原子钟示意图及(b) Ramsey 图像^[4]

Fig. 1 (a) Scheme of cold atomic clock and (b) Ramsey graph^[4]

基于上述思想,法国国家计量局(BNM-SYRTE)实现了世界上第一个冷铷原子喷泉钟^[5]。由于冷原子钟的高准确度和高稳定性,很多国家都已经或者正在用其代替传统的铯束原子钟作为新一代的国家频率基准,其相对不确定度最低可达 4×10^{-16} ^[6]。

但是,由于冷原子钟在地面运行时存在重力作用,导致原子和微波腔两次作用时间间隔一般在1 s左右,鉴频谱线宽度限制在1 Hz左右,准确度和稳定度很难进一步提高,因此出现了空间冷原子钟的概念。在空间微重力条件下,超冷原子和微波腔作用时间可增大一个数量级,相应地,原子钟的精度也将得到提高。目前空间冷原子钟设计精度能达 10^{-17} 量级。欧洲空间局(ESA)^[7]和美国航空航天局(NASA)^[8]相继开展了空间冷原子钟研究项目。较为确定的空间冷原子钟项目为欧洲空间局的ACES(Atomic Clock Ensemble in Space)项目,计划2015年将系统发射到国际空间站。

除了工作在微波波段的冷原子钟以外,工作在光学波段的冷原子钟(即光钟)也是研究的热点。根据理论估计,由于工作频率存在几个数量级的提高,光钟的短期稳定性将比微波钟高几个数量级。具有代表性的中性原子光钟是美国国家标准技术研究院(NIST)^[9]和德国联邦物理技术研究院(PTB)^[10]制造的冷钙原子喷泉光钟,其不确定性分别达到了 4.3×10^{-14} 和 1.2×10^{-14} ,稳定度达到了 10^{-16} 量级。

为了克服喷泉方案的多普勒频移问题,降低中性原子之间的相互作用,日本东京大学的Katori^[11]提出了采用光晶格光钟的方案,并且他们在2005年制成了第一台实际工作的光晶格光钟,其信号线宽比现有的其他中性原子光钟窄了一个数量级^[12]。美国天体物理联合实验室(JILA)在该领域也有突出的贡献,尤其是锶原子光钟,其不确定度达到了 1×10^{-16} 以下^[13]。

3 冷原子干涉仪

光和原子波性质之间的相似性使许多经典光学技术可以扩展到原子,比如原子干涉仪。1991年,四个研究小组采用不同方法独立完成了四种不同原理的原子干涉仪——杨氏双缝干涉仪、机械光栅干涉仪、激光驻波场干涉仪和拉曼干涉仪^[14]。其中在导航领域得到最广泛应用的是拉曼干涉仪。如图2(a)所示,在基态超精细能级 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 之间引入双光子拉曼跃迁,使用两束频率间隔超精细能级劈裂 ω_{hfs} 的激光并调整到低于激发态 $|e\rangle$ 以防止自发辐射。如果最初处于 $|1\rangle$ 态的原子被 $\pi/2$ 拉曼脉冲激发,则输出是 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 的相干叠加。如果两束光反向传播,激发的超精细分量受到约 $2\hbar k$ 的动量反冲。因此, $\pi/2$ 脉冲扮演了50:50分束器的角色,如图2(b)所示。对于 π 脉冲,原子从 $|1\rangle$ 传输到 $|2\rangle$ 或从 $|2\rangle$ 传输到 $|1\rangle$,同时传输动量,模拟一个掠入射反射镜[图2(c)]。由此可以得出,通过 $\pi/2-\pi-\pi/2$ 脉冲序列可以组成一个马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪,如图2(d)所示。输出(即 $|1\rangle$ 或 $|2\rangle$)取决于干涉波包和 $\pi/2$ 拉曼脉冲的相对相位。

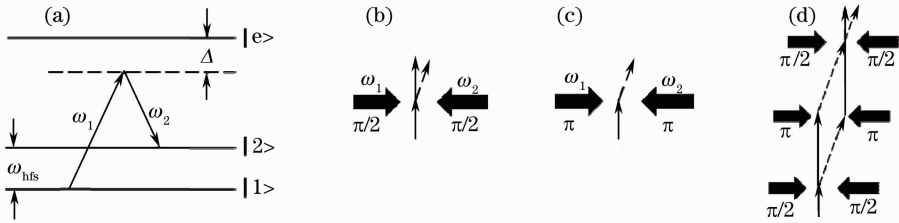


图2 基于受激拉曼跃迁的原子干涉仪原理图。(a) 受激拉曼跃迁;

(b) $\pi/2$ 脉冲作为50:50分束器;(c) π 脉冲作为反射镜;(d)通过 $\pi/2-\pi-\pi/2$ 脉冲序列组成M-Z干涉仪

Fig.2 Schematic diagram illustrating the principle of an atom interferometer based on stimulated Raman transitions. (a) Simulated Raman transition; (b) $\pi/2$ pulse acting as a 50:50 beam splitter; (c) π pulse acting as a mirror; (d) a M-Z interferometer is formed by the $\pi/2-\pi-\pi/2$ pulse sequence

如果沿重力矢量的反方向施加受激拉曼光束,M-Z干涉仪可以用于测量重力加速度 g 。测量原理如图3所示。由于重力加速度表达式 $x = gt^2/2 + vt$ 有三个未知数,必须对原子进行三次测量,三次测量的时间间隔均为 T 。三次测量的表达式为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{2}gt_1^2 + v_x t_1 + x_0 \\ x_2 = \frac{1}{2}g(t_1 + T)^2 + v_x(t_1 + T) + x_0 \\ x_3 = \frac{1}{2}g(t_1 + 2T)^2 + v_x(t_1 + 2T) + x_0 \end{cases} \quad (1)$$

从上式中可以得到重力加速度 g :

$$x_1 - 2x_2 + x_3 = gT^2. \quad (2)$$

由于激光相位由位置产生 $\phi = kx$,在(2)式左右同乘以拉曼跃迁的有效波矢量 k_{eff} 的大小,则有

$$\Delta\Phi = \phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3 = k_{\text{eff}}gT^2. \quad (3)$$

在积分时间 t 内,重力加速度 g 引起的相位移动 $\Delta\Phi$ 导致原子布居数变化,从中可以确定重力加速度 g 。

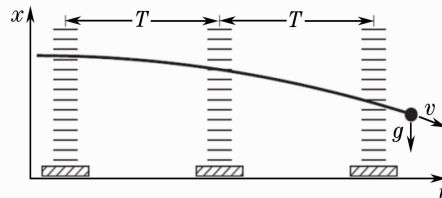


图3 测量加速度原理图

Fig.3 Schematic diagram for acceleration measurement

当施加拉曼光束的方向与原子的初速度方向垂直时,图2(d)所示的M-Z干涉仪会包围一定的面积 A 。此时,干涉仪对绕干涉仪中心的旋转敏感。

旋转 Ω 引起的 Sagnac 相位移动可以表示为^[15]

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Omega \cdot A}{\lambda v}, \quad (4)$$

式中 λ 代表波长。对于光波,(4)式可以表示为

$$\Delta\phi_{\text{photon}} = \frac{4\pi\Omega \cdot A}{\lambda_0 c}, \quad (5)$$

式中 λ_0 是真空中光波的波长, c 是真空中光速。如果用原子的德布罗意波长 $\lambda_{\text{dB}} = h/mv_a$ 代替 λ ,用原子的群速度 v_a 代替 v ,就可以得到物质波的 Sagnac 相移公式为

$$\Delta\phi_{\text{atom}} = \frac{4\pi\Omega \cdot A}{\lambda_{\text{dB}} v_a} = \frac{2m\Omega \cdot A}{\hbar}. \quad (6)$$

由于原子的德布罗意波长比光波长小四个量级以上,因此冷原子干涉仪的相位分辨能力或频率分辨能力比光干涉仪高得多。根据 Sagnac 公式,在同样的包络面积下,冷原子干涉仪的旋转灵敏度较光干涉仪高 $\lambda_0 c/\lambda_{\text{dB}} v_a \approx 10^{11}$ 倍。如此巨大的优势极大地弥补了实际应用中冷原子干涉仪在包络面积和粒子通量上的劣势,使得冷原子陀螺仪和冷原子重力仪成为了下一代导航传感器的重要发展方向。

第一台原子陀螺仪诞生于 1991 年,Riehle 等^[16]使用 Ramsey-Bordé 干涉仪实现了 Sagnac 效应;到 2000 年,斯坦福大学和耶鲁大学联合研制的原子陀螺仪[图 4(a)]^[17]精度已经超过了当时最好的陀螺。而利用原子干涉仪进行重力测量开始于 1992 年^[18];到 1998 年斯坦福大学用两个距离 1 m 的拉曼干涉仪组成世界上第一台冷原子重力梯度仪[图 4(b)]^[19]。



图 4 早期的冷原子导航传感器。(a) 原子陀螺仪^[17]; (b) 冷原子重力梯度仪^[19]

Fig. 4 Initial cold atom navigation sensors. (a) Atom gyroscope^[17]; (b) cold atom gravity gradiometer^[19]

虽然早期原子导航传感器的精度已经超过了其他器件,但由于冷原子源技术还不成熟,早期的冷原子导航传感器体积庞大(一个方向的尺寸往往接近 2 m),而且由于拉曼激光的传输稳定性和强度稳定性均达不到要求,无法实现长期稳定工作。

冷原子导航传感器的超高精度引起了欧美发达国家的广泛兴趣。2000 年,ESA 开始了 HYPER(Hyper Precision Cold Atom Interferometry in Space)计划^[20]的可行性研究,希望利用原子惯性技术进行结构拖曳效应和精细结构常数的测量以验证爱因斯坦的广义相对论,同时也利用原子惯性技术进行空间飞行器的导航。2003 年,美国国防部先进计划研究署(DARPA)启动了 PINS(Precision Inertial Navigation System)计划^[21],将冷原子导航传感器技术视为下一代主导惯性导航技术,追求实现定位精度在 5 m/h 的不依靠全球定位系统(GPS)的高精度军用惯性导航系统。这两项计划为原子导航传感器的发展提供了巨大的推动力,原子导航传感器得到了飞速的发展,欧美的研究机构开始逐步突破影响实际应用的关键技术。

首先是长期稳定性。2006 年,美国斯坦福大学通过对原子陀螺的输入轴进行了精确的电光逆转,首次实现了冷原子陀螺的短时高精度和长时稳定性的统一,零偏稳定性优于 6×10^{-5} ($^\circ$)/h,刻度系数稳定性优于 5×10^{-6} ,随机游走误差在 3×10^{-6} ($^\circ$)/h^{1/2} 量级^[22]。冷原子导航传感器已经向实际应用迈出了重要的一步。

其次是高集成度。冷原子导航传感器是一种高集成的传感器,通过合理的设计,一般可以同时实现多个惯性参数的测量。2006 年,法国巴黎天文台(LNE-SYRTE)研制的六轴惯性敏感器可以同时敏感三轴角速度和加速度,显示了冷原子导航传感器的巨大潜力^[23]。

最后是小形化技术。从 2007 年开始,国外研究机构将研究方向转向了小型化技术,希望能攻克影响冷

原子导航传感器实际使用的关键难题。在美国,2007年斯坦福大学利用微晶玻璃真空腔减小了设备体积,实现了紧凑型重力梯度仪[图5(a)]^[24],其微分灵敏度达到 $4.2 \times 10^{-9} \text{ g/Hz}^{1/2}$,与2001年时的水平相当,但真空腔尺寸缩短到了几十厘米;2008年,斯坦福大学利用四脉冲序列增加了旋转灵敏度,缩小了传感器体积,实现了可测量转动、加速度和重力梯度的混合传感器[图5(b)]^[25],旋转的零偏稳定性优于 $6.6 \times 10^{-3} (\text{°})/\text{h}$,随机游走 $8.1 \times 10^{-3} (\text{°})/\text{h}^{1/2}$,加速度的随机游走 $2.2 \times 10^{-8} \text{ g/Hz}^{1/2}$ 。

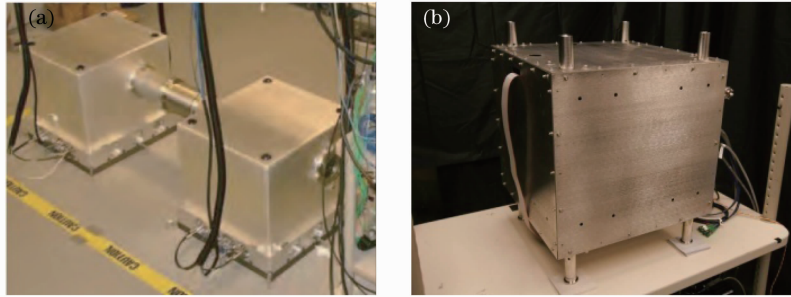


图5 小型化原子导航传感器。(a) 紧凑型重力梯度仪^[24]; (b) 混合传感器^[25]

Fig. 5 Miniaturized cold atom navigation sensors. (a) Compact gravity gradiometer^[24]; (b) hybrid sensor^[25]

在欧洲,2008年,德国汉诺威大学实现了紧凑型铷原子陀螺[图6(a)]^[26],主体尺寸小于1000 mm(不含电子箱),但精度较低;2009年,法国巴黎天文台实现了紧凑型铯原子陀螺[图6(b)]^[27],主体尺寸达到了 $300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ (不含电子箱),旋转的零偏稳定性约为 $10^{-3} (\text{°})/\text{h}$,随机游走 $8.3 \times 10^{-4} (\text{°})/\text{h}^{1/2}$,加速度的随机游走 $5.6 \times 10^{-8} \text{ g/Hz}^{1/2}$,与美国类似器件的水平相当。

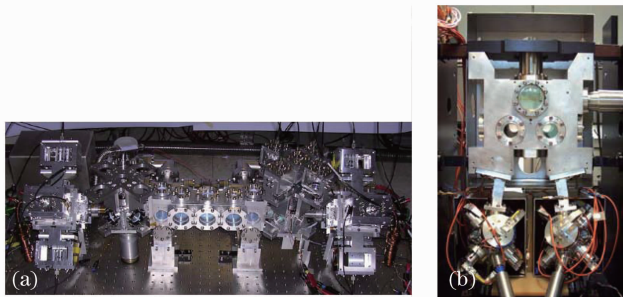


图6 紧凑型冷原子陀螺。(a) 铷原子陀螺^[26]; (b) 铯原子陀螺^[27]

Fig. 6 Compact cold atom gyroscopes. (a) Rubidium atom gyroscope^[26]; (b) cesium atom gyroscope^[27]

4 原子芯片

随着原子冷却技术的不断成熟,冷原子导航传感器的体积正在不断缩小。而微机电系统(MEMS)技术的高速发展进一步加速了这个过程。通过MEMS技术可以将电场、磁场和光场集成在一小块芯片上,实现冷原子陷俘和操控等功能——这就是原子芯片^[28]。原子芯片的出现为原子器件的进一步小型化创造了条件。同时,原子芯片通过表面微结构产生的电场、磁场和光场,在很低的功耗下,可完成对原子的强束缚以及微米尺寸区域内灵活的操控。结合蒸发冷却等技术,能够获得温度更低的原子,使量子效应占据主导地位,为基于中性原子操控的新型量子器件应用创造了可能。

到目前为止,原子芯片已经应用于原子内部量子相干(如微型原子钟^[29])和原子相互之间量子相干[如玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)^[30]]等诸多研究领域。利用电场、磁场和光场操控更复杂原子行为的技术的飞速发展,将更好地完善原子芯片的功能,范围从量子测量到量子信息存储和处理,形成超紧凑、低功耗、高效率的各类小型化原子器件。

为实现导航传感器的小型化和集成化,同时延长原子相互作用时间、提高信噪比,近些年也提出了一些利用原子芯片操控冷原子实现惯性信号的高精度测量的方案。

在原子芯片原子陀螺仪研究领域,具有代表性的是美国科罗拉多大学研究小组。他们利用平行导线分

束合束原理,制备了用于原子陀螺仪的原子芯片^[31],其实物如图7(a)^[31]所示。结合图7(b)^[31]的光学系统,构成了原子芯片陀螺仪的主体结构。

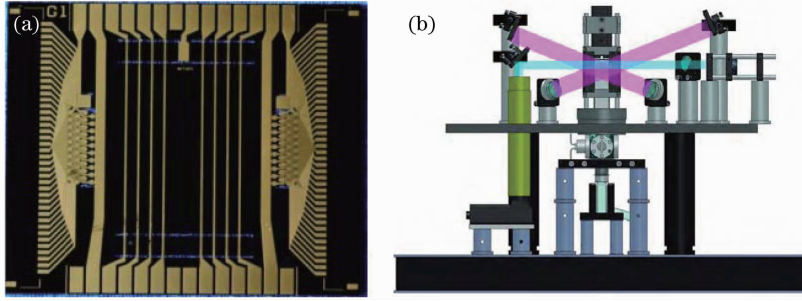


图7 原子陀螺芯片(a)构造及其(b)光学系统示意图^[31]

Fig. 7 (a) Scheme of gyroscope chip and (b) optical system^[31]

2008年,法国泰利斯公司基于2005年海德堡大学在原子芯片上实现原子干涉仪的原理^[32],提出了原子芯片传感器(包括陀螺仪和加速度计)的实现方案。

芯片表面的闭合原子干涉回路如图8^[32]所示,其中30为主导线,通入直流电流 I_{DC} ;31和32为两边对称的两条交流导线, $I_{RF}^A = I_0 \cos(\omega_{RF}t)$ 和 $I_{RF}^B = I_0 \cos(\omega_{RF}t)$,为原子操控提供射频(RF)场;3为原子芯片表面;10为陷俘的原子团; h 为陷俘原子团的平衡位置。结合此原子芯片结构,若系统存在旋转时,由Sagnac效应引起的相移可表示为^[32]

$$\Delta\phi_{\text{Sagnac}} = \frac{4Am\dot{\theta}}{\hbar} \approx \frac{m\delta\mu_0(I_{DC}^2 - I_{DC}^1)\dot{\theta}}{2\pi\hbar B_0} \quad (7)$$

同时,在分离过程中若存在重力或加速度场也能产生附加相移:

$$\Delta\phi_{\text{grav}} = \frac{mg_x}{\hbar} \delta T, \quad (8)$$

式中 T 为原子波包分离的时间,也就是从图8(b)阶段开始到图8(d)阶段结束之间的时间。

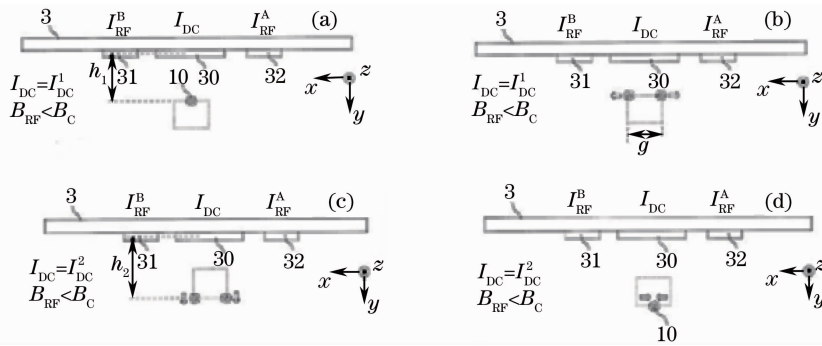


图8 原子芯片实现闭合干涉环路的示意图。(a)~(d)为不同阶段

Fig. 8 Scheme of atom chip interferometry. (a)~(d) correspond to different steps of the method

为分别获得转速和加速度相位信息,可以采用双闭合干涉环路结构,如图9所示^[32]。芯片上每个闭合环路都包含原子云的分束、导引和合束操作,由此得到的两组干涉相位信息,经过相加和相减操作,就能分别获得系统的转速以及加速度信息。

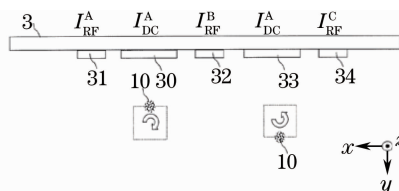


图9 双闭合环路结构可实现原子陀螺仪和加速度计信号的分别输出^[32]

Fig. 9 Scheme of a chip for a sensor comprising two atom traps allowing measurements of speed of rotation and acceleration^[32]

虽然早在 2004 年就已经在原子芯片上实现了原子干涉仪^[33],但是由于芯片上冷原子团制备时间、寿命以及连续性等因素的制约,到目前还未见陀螺效应的实现。随着激光器小型化、电源和控制系统的快速发展,结合原子芯片结构的优化设计,在不久的将来必定会在芯片上实现高精度小型化原子导航传感器。

5 结束语

美国空军在“2010~2030 年技术地平线”报告中指出^[34],在无 GPS 环境下的精密导航和授时领域,基于冷原子技术的惯性导航系统是其最优先发展的核心技术之一。冷原子惯性导航系统将在高速穿透巡航导弹、下一代高宽带安全通信、持久临近空间中继、高海拔长耐久性 ISR(情报、监视、侦查)飞船、直接前锋空中运输和再补给、常规武器增强地下攻击等领域发挥重要作用。

随着冷原子技术的逐渐成熟,困扰冷原子导航传感器实际应用的稳定性、体积和功耗问题正在逐步得到解决。在欧美大型国家计划的支持下,冷原子导航传感器已经开始从实验室走向工程化。2010 年,法国进行了世界上首次冷原子重力仪的航空试验^[35];2011 年,美国 AOSense 公司发布了全球首款原子光学传感器商品^[36]——商用冷原子重力梯度仪,噪声小于 $1 \times 10^{-6} \text{ g/Hz}^{1/2}$;美国 DARPA 实验室在 2010 年已经完成了 5 m/h 单轴冷原子导航系统的实验室验证^[37],并将于 2013 年完成冷原子惯性导航系统装机试飞工作,系统总体积(包含电子箱)将小于 20 L^[38]。这些进展意味着冷原子导航传感器已向实际应用迈出了一大步。

然而,阻碍冷原子导航传感器实际应用的问题并没有完全解决。目前面临的困难主要有两个。第一是机载或弹载平台的高动态环境,其瞬时加速度往往超过 10 g。工作在该环境下的惯导系统需要更高的采样频率,意味着短得多的积分时间。此外,还必须研究高加速环境下原子的激光冷却行为如何变化。第二是冷原子导航传感器集成与封装。其工程挑战主要包括微型光学平台的制造,小型、高效和高质量的半导体激光器,高度集成化的控制电路,高加速环境下光路(主要是反射镜)的稳定性,超高真空的维持,冲击和振动环境下系统的对准等。

在国内,目前开展冷原子导航传感器技术研究的单位还不多,主要包括中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院武汉物理与数学研究所、中国计量科学研究院、山西大学、浙江大学、清华大学、北京大学、北京航空航天大学、中航工业西安飞行自动控制研究所等^[39-46],但还处于对欧美成熟方案的仿制阶段,精度大致还处于欧美 20 世纪 90 年代中期,发展力度还有所欠缺。我国应加大冷原子导航传感器的研究力度,紧跟国际先进研究方向,尽快赶上其研究步伐。

参 考 文 献

- 1 M Boshier, D Berkeland, T R Govindan, *et al.*. Quantum Technology and Its Applications[R]. Los Alamos; Los Alamos National Laboratory, 2010. 8-10.
- 2 A Clairon, C Salomon, S Guellati, *et al.*. Ramsey resonance in a Zacharias fountain[J]. Europhys Lett, 1991, 16(2): 165-170.
- 3 M Kasevich, E Riis, S Chu, *et al.*. RF spectroscopy in an atomic fountain[J]. Phys Rev Lett, 1989, 63(6): 612-615.
- 4 Zhai Zaoheng, Yang Peihong. Novel atomic clock and its development in China[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(3): 21-31.
- 5 翟造成, 杨佩红. 新型原子钟及其在我国的发展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(3): 21-31.
- 6 A Clairon, P Laurent, G Santarelli, *et al.*. A cesium fountain frequency standard; preliminary results[J]. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 1995, 44(2): 128-131.
- 7 S A Diddams, J C Bergquist, S R Jefferts, *et al.*. Standards of time and frequency at the outset of 21st century[J]. Science, 2004, 306(5700): 1318-1324.
- 8 Ch Salomon, N Dimarcq, M Abgrall, *et al.*. Cold atoms in space and atomic clocks: ACES[J]. Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Iv Physique Astrophysique, 2001, 2(9): 1313-1330.
- 9 T P Heavner, L W Hollberg, S R Jefferts, *et al.*. Characterization of a cold cesium source for PARCS: primary atomic reference clock in space[J]. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 2001, 50(2): 500-502.
- 10 H Schnatz, B Lipphardt, C Degenhardt, *et al.*. Optical frequency measurements using fs-comb generators[J]. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 2005, 54(2): 750-753.
- 11 L Hollberg, C W Oates, G Wilpers, *et al.*. Optical frequency/wavelength references[J]. J Phys B, 2005, 38(9): S469-S495.

- 11 H Katori. Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement[C]// Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology, 2002. 323–330.
- 12 M Takamoto, F L Hong, R Higashi, *et al.*. An optical lattice clock[J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 321–324.
- 13 A D Ludlow, T Zelevinsky, G K Campbell, *et al.*. Sr lattice clock at 1×10^{-16} fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock[J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1805–1808.
- 14 P R Berman. Atom Interferometry[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- 15 E J Post. Sagnac effect[J]. *Rev Mod Phys*, 1967, 39(2): 475–493.
- 16 F Riehle, Th Kisters, A Witte, *et al.*. Optical Ramsey spectroscopy in a rotating frame; Sagnac effect in a matter-wave interferometer[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 67(2): 177–180.
- 17 T L Gustavson, A Landrangin, M A Kasevich. Rotation sensing with dual atom-interferometer Sagnac gyroscope[J]. *Classical Quantum Gravity*, 2000, 17(12): 2385–2398.
- 18 M A Kasevich. Atom Interferometry in an Atomic Fountain[D]. Stanford: Stanford University, 1992.
- 19 A Peters, K Y Chung, S Chu. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms[J]. *Nature*, 1999, 400(6747): 849–852.
- 20 G M Tino, L Cacciapuoti, K Bong, *et al.*. Atom interferometers and optical atomic clocks; new quantum sensors for fundamental physics experiments in space [C]. Proceedings of the Third International Conference on Particle and Fundamental Physics in Space, 2006. 159–165.
- 21 Committee on Universal Radio Frequency System for Special Operations Forces, Standing Committee on Research, Development, Acquisition Options for U. S. Special Operations Command, National Research Council. Toward a Universal Radio Frequency System for Special Operations Forces[M]. Washington: National Academies Press, 2009.
- 22 D S Durfee, Y K Shaham, M A Kasevich. Long-term stability of an area-reversible atom-interferometer Sagnac gyroscope [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(24): 240801.
- 23 B Canuel, F Leduc, D Holleville, *et al.*. Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(1): 010402.
- 24 B Biedermann. Gravity Tests, Differential Accelerometry and Interleaved Clocks with Cold Atom Interferometers[D]. Stanford: Stanford University, 2007.
- 25 K Takase. Precision Rotation Rate Measurements with a Mobile Atom Interferometer[D]. Stanford: Stanford University, 2008.
- 26 T Müller, M Gilowski, M Zaiser, *et al.*. A compact dual atom interferometer gyroscope based on laser-cooled rubidium[J]. *Eur Phys J D*, 2009, 53(3): 273–281.
- 27 A Gauguier, B Canuel, T Lévêque, *et al.*. Characterization and limits of a cold-atom Sagnac interferometer[J]. *Phys Rev A*, 2009, 80(6): 063604.
- 28 R Folman, P Krüger, D Cassettari, *et al.*. Controlling cold atoms using nanofabricated surfaces; atom chips[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(20): 4749–4752.
- 29 S Knappe, P D D Schwindt, V Shah, *et al.*. A chip-scale atomic clock based on ^{87}Rb with improved frequency stability[J]. *Opt Express*, 2005, 13(4): 1249–1253.
- 30 H Ott, F Fortagh, G Schlotterbeck, *et al.*. Bose-Einstein condensation in a surface microtrap[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 87(23): 230401.
- 31 S R Segal. Progress Towards an Ultracold Atomic Sagnac Gyroscope[D]. Boulder: University of Colorado at Boulder, 2010.
- 32 T Schumm, S Hofferberth, L M Andersson, *et al.*. Matter-wave interferometry in a double well on an atom chip[J]. *Nature Physics*, 2005, 57(1): 57–62.
- 33 P Treutlein, P Hommelhoff, T Steinmetz, *et al.*. Coherence in microchip traps[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(20): 3005–3008.
- 34 United States Air Force Chief Scientist (AF/ST). Report on Technology Horizons: a Vision for Air Force Science & Technology during 2010~2030[R]. United States Air Force, 2010. 79–90.
- 35 G Stern, B Battelier, R Geiger, *et al.*. Light-pulse atom interferometry in microgravity[J]. *Eur Phys J D*, 2009, 53(3): 353–357.
- 36 AOSense. Accelerometer for Space Applications Based on Light-Pulse Atom Interferometry[EB/OL]. (2011-09-08) [2013-02-02] https://ehb8.gsfc.nasa.gov/sbir/docs/public/recent_elections/SBIR_11_P1/SBIR_11_P1_115522/briefchart.pdf.
- 37 L C Suriano. Robust Technology to Augment or Replace the US Reliance on the Global Positioning System [R]. Montgomery: Air War College, Air University, 2011. 11.
- 38 DARPA. Precision Inertial Navigation Systems (PINS) [EB/OL]. (2010-12-30) [2013-02-02] [http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Precision_Inertial_Navigation_Systems_\(PINS\).asp](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Precision_Inertial_Navigation_Systems_(PINS).asp).
- 39 Qu Qiuzhi, Zhou Zichao, Wan Jinyin, *et al.*. Raman atomic fountain clock[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1390–1394.

屈承智, 周子超, 万金银, 等. 拉曼喷泉原子钟[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1390–1394.

- 40 Li Runbing, Wang Jin, Zhan Mingsheng. New generation inertial navigation technology: cold atom gyroscope[J]. Gns World of China, 2010, 35(4): 1-5.
李润兵, 王 谨, 詹明生. 新一代惯性导航技术: 冷原子陀螺仪[J]. 全球定位系统, 2010, 35(4): 1-5.
- 41 Zhu Changxing, Feng Yanying, Ye Xiongying, *et al.*. The absolute rotation measurement of atom interferometer by phase modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2): 808-815.
朱常兴, 冯焱颖, 叶雄鹰, 等. 利用原子干涉仪的相位调制进行绝对转动测量[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 808-815.
- 42 Wang Zhaoying, Wu Zhenjing, Lin Qiang. The relation between the atom interference fringe and the measurement precision of gravity[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3541-3544.
王兆英, 吴珍菁, 林 强. 原子干涉条纹与重力加速度测量精度的关系[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3541-3544.
- 43 Li Qiang, Yun Enxue, Gu Sihong. Study of coherent population trapping state with a four-level system[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 351-355.
李 强, 云恩学, 顾思洪. 用四能级系统研究相干布居囚禁态[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 351-355.
- 44 Li Qianrong, Lu Jiajia, Hu Haiyan, *et al.*. Laser frequency offset locking with optical pumping spectrum in D2 line of cesium[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 2969-2974.
李乾勇, 卢佳佳, 胡海燕, 等. 基于铯原子 D2 线光抽运光谱的半导体激光器偏频锁定[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2969-2974.
- 45 J C Fang, J Qin. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications[J]. Sensors, 2012, 12(5): 6331-6346.
- 46 Li Jun, Lei Xing, Li Pan, *et al.*. Research progress and application of interferometric atom gyroscope [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(7): 1216-1221.
李 俊, 雷 兴, 李 攀, 等. 干涉型原子陀螺仪研究进展与应用[J]. 电讯技术, 2012, 52(7): 1216-1221.