

基于原子干涉的量子陀螺仪

陆璇辉, 王将峰

(浙江大学 物理系 光学研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 介绍了一种基于原子干涉测量的量子陀螺仪, 对原子干涉的 Sagnac 效应原理进行了简单描述, 在此基础上介绍原子 Mach-Zehnder 干涉仪构成的量子陀螺仪的工作原理。量子陀螺仪的测量精度比传统的高精度陀螺仪的精度高几个数量级, 是新一代的陀螺仪。

关键词: 陀螺仪; 原子干涉; 量子陀螺仪; 惯性器件

中图分类号: O431.2 ; TP212.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 2276(2007) 03- 0293- 03

Quantum gyroscope based on an atom interferometer

LU Xuan-hui, WANG Jiang-feng

(Institute of Optics, Physics Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The quantum gyroscope based on an atom interferometer is introduced. The Sagnac effect for atom interferometry is described. The operation principle of quantum gyroscope that is made of atomic Mach-Zehnder interferometer is presented. The measurement precision of quantum gyroscope is several order higher than that of traditional gyroscope. It is a new generation of gyroscope.

Key words: Gyroscope; Atom interferometry; Quantum gyroscope; Inertia device

0 引言

陀螺仪是惯性器件之一, 由于陀螺在任何环境下都具有自主导航的能力, 自问世以来, 引起了人们极大的关注, 广泛用于航海、航空、航天、军事等领域, 而且一直是各国重点发展的技术之一。在科学技术突飞猛进的今天, 与陀螺相关的技术仍然是人们关注的焦点。陀螺已有近 100 年的发展史, 根据测量原理的不同研制出了各式各样的陀螺仪, 从传统的刚体转子陀螺仪到新型的固态陀螺仪, 种类十分繁多。液浮陀螺、静电陀螺和动力调谐陀螺是技术成熟的三刚钢体转子陀螺仪。随着光电技术的发展, 出现了激光陀螺、光纤陀螺, MEMS 技术的进步使得微机械陀螺应运而生。量子光学实验技术的进步, 特别是激光冷却原子技术的发展, 出现了量子陀螺仪。

陀螺精度的分布相差约 9 个数量级, 根据其精度范围可大致分为 4 部分: 低精度陀螺仪、中高精度陀螺仪、高精度陀螺仪和超高精度陀螺仪。低精度陀螺仪指精度范围超过 10^{-1} (°/h) 的陀螺仪, 一般是机械

陀螺仪和微机械陀螺仪^[1-2]。中高精度陀螺仪指精度在 $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-1}$ (°/h) 范围的陀螺仪, 主要有激光陀螺仪和光纤陀螺仪^[3]。高精度陀螺仪指精度在 $10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}$ (°/h) 范围内的陀螺仪, 主要包括静电陀螺、磁浮陀螺和液浮陀螺^[4]。超高精度陀螺仪指精度范围在 $10^{-9} \sim 10^{-7}$ (°/h), 主要是量子陀螺仪, 也称原子陀螺仪, 是目前分辨率最高的陀螺仪^[5]。这种陀螺仪的核心是原子干涉仪, 耶鲁大学^[5-6]和斯坦福大学^[7]的实验率先展示出物质波干涉仪在精确测量中的巨大潜力。这种量子传感器的最显著的应用就是惯性测量、度量衡学以及物理基础研究中的一些尚未解决的问题, 如广义相对论的等效原理的验证。在相同的实验条件下, 用原子干涉仪测量旋转角度要比用光学方法灵敏 10 个数量级。下面简单介绍其工作原理。

1 原子干涉的原理

原子干涉仪是用一冷的 Rb(或 Cs)原子束以两个不同的拓扑路径传播, 构成类似光学 Mach-Zehnder 型

收稿日期: 2006- 12- 02; 修订日期: 2007- 04- 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1334050)

作者简介: 陆璇辉(1957-), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光物理和量子光学的研究。Email: xhlu@zju.edu.cn

干涉仪,测量由于两原子束通过不同路径引起的相位差。在这种干涉仪中,通过原子光学元件(例如类似光学中的分光计和反射镜,它们已经实现光学双光子的传播)的分光和反射,来测出由于惯性力的作用使原子波函数的相位发生变化,然后测出这个相位的变化量。当原子吸收或发射一个光子时,原子和光场的动量应守恒。随着原子分光镜和原子反射镜等原子光学元件的实现,必须考虑能操控原子的适当方法,其实光和物质的相互作用也是用来实现这个目的的主要手段。可以理解为光子的相干交换和光子动量的交换。可以由图 1 描述,在一个原子系统中,处于 $|g\rangle$ 能级的原子由于激光的作用被分为 $|g\rangle$ 和 $|e\rangle$ 两个能级,原子所处的态取决于以下参数:激光能量;相互作用时间;激光频率。

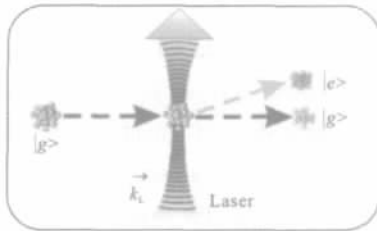


图 1 原子在激光的作用下分裂成两个能级

Fig.1 An atomic ensemble is split into two energy levels under laser interaction with atom

这种相互作用形成了不同的原子路径。另外,在相互作用之后,在不同的能级上原子的数目取决于相互作用时的激光相位。选择相互作用的类型以便几个路径重叠,原子波包的相干图样就可以被探测到,原子干涉仪就诞生了。

如上所述,原子干涉仪和光学干涉仪有许多相同之处,但是在原子干涉仪中,光和物质相互交换了。这种技术已被用在原子钟上,然而原子钟的“光学”跃迁是通过微波来实现的。

干涉仪对频率的改变最为敏感。利用原子干涉仪对在光和原子相互作用中的光场相位改变的敏感性测量惯性力,在外在势场如重力场影响下,原子通过不同的干涉仪路径受到不同势的作用,从而有效地改变时间和(或)空间上原子和光相互作用的时间和地点。换句话说,原子们“看见”了光场的相位改变。

1.1 Sagnac 效应

为了能更好地理解量子陀螺仪,通过图 2 可以了解 Sagnac 效应。

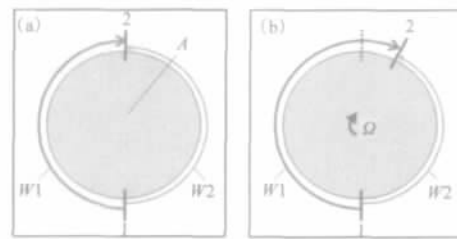


图 2 Sagnac 效应

Fig.2 Sagnac effect

两列波 W1 和 W2 围绕着 A 区传播。A 区没有旋转时,两列波同时从点 1 出发,同时到达点 2。但是当 A 区以角速度 Ω 旋转时,两列波会在不同的时间到达点 2,此时产生的相位也就不同。这个 Sagnac 相位角可用相对论来计算,即:

$$\varphi_{\text{Sagnac}} = \frac{2E\Omega A}{hc^2} \quad (1)$$

式中: E 表示波的相对论能量 ($E=mc^2$); c 为真空中光速; h 为普朗克常数。公式(1)对所有性质的波都适用,当然也适用于被描述为德布罗意波的原子系统。对原子来说, Sagnac 相位角用下式表示:

$$\varphi_{\text{Sagnac}} = \frac{2m\Omega A}{h} \quad (2)$$

式中: m 是原子的质量。与可见光比较,原子固有的 Sagnac 相位角比相等的区域 A 大 10 个数量级。这个显著的优点是将物质波干涉仪用作惯性传感器的主要原因。

1.2 Mach-Zehnder 干涉仪

如前所述,为了测量旋转角度,必须有一垂直于区域 A 旋转轴线的干涉仪。文中借用光学的 Mach-Zehnder 干涉仪(图 3)来说明原子干涉仪。在这种类型的干涉仪中,一个 1:1 分束器将入射波分为均等的两份,然后利用反射镜分别使两束波改变方向,最后将它们在一个 1:1 的分束器中重合。

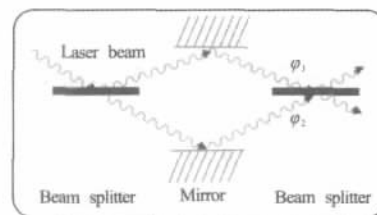


图 3 激光 Mach-Zehnder 干涉仪

Fig.3 Optical Mach-Zehnder type interferometer

原子干涉仪的情况与上述情况类似。它利用操控良好的激光光束实现原子的分束和反射。按照原子光学,分光器和反射镜分别由 $\pi/2$ 和 π 脉冲来实现。如

图 4 所示, 两个输出端的原子数与每次相互作用时的激光相位 φ 有关, φ 因两束原子受外场的作用而改

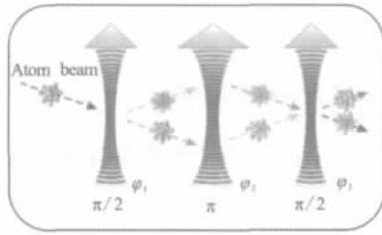


图 4 原子干涉的示意图

Fig.4 Scheme of atom interferometry

变。例如, 在最后的 $\pi/2$ 脉冲之前沿着光束方向的加速使原子跑到光场的反节点中, 导致两原子路径相互作用中包含由加速度引起的相位变化, 如图 5 所示。因此只要测出原子干涉花样产生的相移, 就能测出加

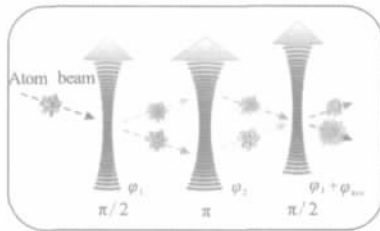


图 5 原子干涉仪在有加速度时的相位移动示意图

Fig.5 Scheme for phase shift of atom interferometer for an acceleration in the direction of the beam before the last $\pi/2$ pulse

速度的变化, 它的分辨率至少比光纤高几个数量级。这里必须指出的是这种干涉是原子内态的干涉, 即表现形式是原子态的变化。

2 冷原子与原子干涉仪

热原子和冷原子在上述原子干涉仪中均可实现原子干涉。因为冷原子的动量更小, 相干长度更长^[8], 其测量灵敏度比热原子会高很多, 即相干长度越长其干涉条纹越容易获得, 灵敏度越高。因此冷原子是原子干涉仪提高灵敏度的关键所在, 其中一个重要部分是激光冷却原子, 其基本原理为: 正在行进中的原子被迎面而来的激光照射, 激光频率和原子振频一致, 原子就会吸收迎面而来的光子受激跃迁到高能态, 因而减小动量。原子处在高能态后又会朝各个方面发射同样的光子, 因此, 实际效果是原子的动量每碰撞一次就减小一点, 直至最低。动量越小, 速度越小。

当发射光子的速率很高时, 温度就会降低很多。用两两相对, 沿 3 个正交方向的 6 束激光使原子减

速, 真空中的一束原子先是被迎面而来的激光束阻止, 然后把原子引进 6 束激光的交汇处, 其效果就是不管原子企图向何方运动, 都会遇上具有恰当能量的光子, 并被推回到 6 束激光交汇的区域。在这个小区域里, 聚集了大量冷却下来的原子, 组成肉眼看去像豌豆大小的发光气团。由 6 束激光组成的阻尼机制就像某种粘稠的液体, 原子陷入其中会不断降低速度, 这种方法被称为“光学粘胶”。激光可以将原子冷却到非常低的温度, 但由于它对原子耗散力, 因此在空间无势场, 无法有效束缚原子, 使它们在短时间内从光学粘胶中逃脱。为真正俘获原子, 需在上述原子冷却基础上, 再加上两个磁场方向相反的线圈(也称亥姆霍兹线圈)以产生磁场梯度, 其最小值处于激光束相交的区域。磁场对原子的塞曼效应产生一个比重力大的力, 把原子拉回到陷阱中心。虽然此时的原子没有真正被俘获, 但却被激光和磁场约束在一个很小的范围里, 这被称为磁光阱(MOT)。势阱大大延长了冷原子团的寿命, 使它们可以作为一种介质应用于原子干涉仪。两个 MOT 内的冷原子(⁸⁷Rb)团在激光的推动下形成原子束相对传输, 一定的间隔用一个 $\pi/2 \sim \pi \sim \pi/2$ 的激光脉冲序列激发原子束时, 原子波包就会被分裂、偏移、重新汇合而产生干涉^[9]。原子干涉仪型量子陀螺仪如图 6 所示。

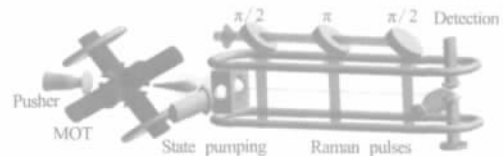


图 6 原子干涉仪型量子陀螺仪示意图

Fig.6 Scheme for quantum gyroscope based on atom interferometer

3 结束语

冷原子干涉量子陀螺仪是一种全新的惯性测量传感器, 由于其超高精度和超高分辨率的优异特性受到各国的重视, 它可用于许多特殊要求的测量, 如重力加速度和加速度的测量, 高灵敏导航系统等。还可广泛应用在航空航天、航海、地球物理和广义相对论的等效原理的验证等诸多领域, 发展潜力十分诱人。欧美发达国家已在这方面投入大量资金和力量开展研发, 如英国、荷兰、法国、德国、意大利等多国科学家

(下转第 311 页)

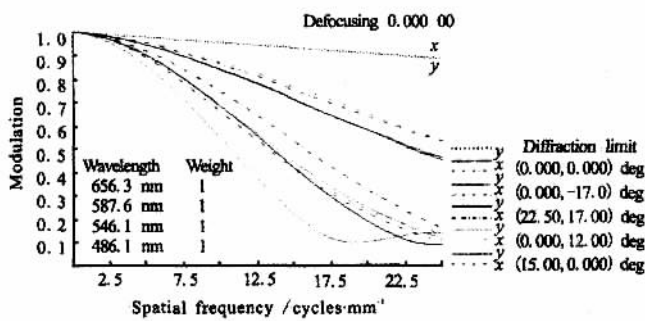


图 4 系统传递函数曲线图

Fig.4 MTF plot of the system

4 结 论

采用 FFS 棱镜等新型光学元件, 利用新的像差理论和优化设计方法对 HMD 目视光学系统进行优化设计, 可以使 HMD 光学系统达到较为理想的设计结果, 在满足系统视场、出瞳要求的同时使其重量大大减轻, 结构更紧凑。

参考文献:

- [1] Takahisa Ando, Koji Yamasaki, Masaaki Okamoto, et al. Head-mounted display using a holographic optical element [C]// Proceedings of SPIE, Practical Holography XII, 2003, 3293: 183-189.
- [2] Hiroaki Hoshi, Naosato Taniguchi, Hideki Morishima, et al. Off-axial HMD optical system consisting of aspherical surfaces without rotational symmetry [C]// Proceedings of SPIE, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III, 1996, 2653:

(上接第 295 页)

提出了 HYPER 航天器计划, 准备 2012 年把高精度原子干涉陀螺仪用于太空中。

参考文献:

- [1] JIANG Lu, YU Yuan-zhi, JI Chun-sheng. Application and comparison of gyroscopes in navigation [J]. Ship Engineering (姜璐, 于远治, 吉春生. 陀螺仪在导航中的应用及其比较. 舰船工程), 2004, 26(2): 10-13.
- [2] DONG Yu-qian, GAO Zhong-yu. Study on prototype of micro-mechanical vibratory wheel gyroscope [J]. Journal of Astronautics (董煜茜, 高钟毓. 微机械振动轮式陀螺仪的实验研究. 宇航学报), 2000, 21(1): 65-70.
- [3] GARY A, NEAL B, LEE I, et al. Evolution of precision IFOG [C]//ION 57th Annual Meeting/CIGTF 20th Biennial Test Symposium, 2001: 200-204.
- [4] LIANG Ge-ting, HUI Jun-jun. Development and application of

234-242.

- [3] BUNKENBURG J, DROESSLER T A. Innovative diffractive eyepiece for helmet mounted display [C]// Proceedings of SPIE, Novel Optical Systems and Large-Aperture Imaging, 1998, 3430: 41-49.
- [4] HUXFORD R B. Wide FOV head mounted display using hybrid optics [C]// Proceedings of SPIE, Optical Design and Engineering, 2004, 5249: 203-207.
- [5] SUN Qiang, LIU Rong, PIAO Ren-guan, et al. Application of plastic aspherical elements in Head Mounted 3D display [J]. Optics and Precision Engineering (孙强, 柳荣, 朴仁官, 等. 塑料非球面透镜在头盔 3D 显示中的应用. 光学精密工程), 2005, 13(1): 47-52.
- [6] Shoichi Yamazaki, Kazutaka Inoguchi, Yoshihiro Saito, et al. Thin wide-field-of-view HMD with free-form-surface prism and applications [C]// Proceedings of SPIE, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VI, 1999, 3639: 453-462.
- [7] GAO Yong, ZHOU Hai-xian, ZHAO Zhi-min. Study on HMD optical system [J]. Electronics Optics & Control (郭勇, 周海宪, 赵志敏. 头盔显示器光学系统的研究. 光电与控制), 2002, 9(3): 37-40.
- [8] HA Yong-gang, ZHOU Ya, WANG Yong-tian, et al. Head mounted display for augmented reality visualization [J]. Optical Technology (哈涌刚, 周雅, 王涌天, 等. 用于增强现实的头盔显示器的设计. 光学技术), 2000, 26(4): 350-353.
- [9] Takayuki Nakano, Yasuhisa Tamagawa. Design of a wide-angle fast optical system with anamorphic mirrors [C]// Proceedings of SPIE, International Optical Design Conference 2002, 2002, 4832: 502-509.
- [10] Optical Research Associates, Inc. CODE V Reference Manual [Z]. USA: Optical Research Associates, Inc, 2006

gyroscopes [J]. Winged Missiles Journal (梁阁亭, 惠俊军. 陀螺仪的发展及应用. 飞航导弹), 2006, (4): 38-40.

- [5] GUSTAVSON T L, LANDRAGIN A, KASEVICH M A. Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope [J]. Class, Quantum Grav, 2000, 17: 2385-2398.
- [6] 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]. Phys Rev Lett, 1998, 81: 971-974.
- [7] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. High precision absolute gravity measurements using atom interferometry [J]. Metrologia, 2001, 38: 25-61.
- [8] Yver-Leduc F, CHEINET P, FILS J, et al. Reaching the quantum noise limit in a high-sensitivity cold-atom inertial sensor [J]. J Opt, 2003, B5: 136-142.
- [9] ARLT J J, BIRKL G, RASEL E M, et al. Atom optics, guided atoms, and atom interferometry [J]. Adv At Mol Opt Phys, 2005, 50: 55-89.