

无自旋交换弛豫原子自旋陀螺非线性特性实验研究

陈东营, 杨远洪*, 王中亮, 刘峰, 姜丽伟, 全伟, 房建成

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 采用基于圆偏振探测光的光纤 Sagnac 原子自旋进动闭环检测技术, 实验测试了无自旋交换弛豫(SERF)原子自旋陀螺在两种不同抽运状态下的角速度输入/输出特性, 发现了 SERF 原子自旋陀螺输出的非线性现象。基于 SERF 原子自旋陀螺理论, 建立了非线性响应模型并进行仿真研究, 仿真结果与实验测试一致。研究表明: SERF 原子自旋陀螺的非线性由原子内在相互作用决定, 与总电子弛豫率 R_{tot} 密切相关。

关键词 光纤光学; 陀螺仪; 无自旋交换弛豫; 原子自旋陀螺; 圆偏光; 非线性响应; 电子弛豫率

中图分类号 TB133

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0806004

Experimental Investigation on Nonlinearity of Spin-Exchange Relaxation-Free Atomic Spin Gyroscope

Chen Dongying, Yang Yuanhong*, Wang Zhongliang, Liu Feng, Jiang Liwei,
Quan Wei, Fang Jiancheng

School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China

Abstract The angular velocity input/output characteristics of a spin-exchange relaxation-free(SERF) atomic spin gyroscope under two different pumping conditions were experimentally tested via an optical fiber Sagnac atomic spin precession closed-loop detection technique based on circularly polarized probe lights. The nonlinearity of the SERF atomic spin gyroscope output was discovered. Based on the basic principle of the SERF atomic spin gyroscope, the nonlinear response model was established and the simulation study was carried out, and the simulation results were in agreement with the experimental results. This indicates that the nonlinearity of the SERF atomic spin gyroscope is determined by the internal interaction of atoms and is closely related to the total electron relaxation rate R_{tot} .

Key words fiber optics; gyroscopes; spin-exchange relaxation-free; atomic spin gyroscope; circularly polarized light; nonlinear response; electron relaxation rate

OCIS codes 060.2370; 120.4820; 120.1880

1 引 言

陀螺仪是惯性系统的核心部件,在惯性导航、定位定向、制导控制等方面起着至关重要的作用。近几年来,随着量子物理和现代光学的进步,原子陀螺得到迅速发展,成为先进惯性仪表领域的研究热点和焦点^[1-3]。原子陀螺根据工作原理可分为原子干涉陀螺和原子自旋陀螺^[4],其中原子自旋陀螺又分为核磁共振原子陀螺和无自旋交换弛豫(SERF)原子自旋陀螺^[5-6],简称 SERF 陀螺。相比而言,SERF 陀螺具有更高的测量精度和灵敏度,是最具有潜力的陀螺仪之一,引起了国内研究者的高度关注。

2005 年,普林斯顿大学 Kornack 等^[7]首次提出并验证了 SERF 陀螺,实现了 $5 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的灵敏度和 $0.04 (\text{°})/\text{h}$ 的零偏稳定性。2013 年,北京航空航天大学 Fang 等^[8]报道了国内第一台 SERF 陀螺,灵敏度为 $1.22 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$; 随后,开展了双轴 SERF 陀螺研究,实现了 $1.093 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的灵敏度和 $0.05 (\text{°})/\text{h}$ 的零偏不稳定性^[9]。相关理论和实验研究表明,SERF 陀螺具备实现高精度测量的潜力。然而,SERF 陀螺的动态范围和线性度也是需要重点关注的特性参数,但是由于实验条件或检测技术的限制,鲜有相关的研究和报道。

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-03-29; 录用日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61227902,U1637106)、创新团队发展计划(IRT1203)

* E-mail: yhyang@buaa.edu.cn

近期,本课题组^[10]提出并实现了一种新的原子自旋进动检测技术,基于圆偏振探测光和反射式光纤 Sagnac 干涉仪,采用闭环检测电路实现了原子进动的线性测量。本文在此基础上,搭建了 SERF 陀螺实验平台,开展了不同抽运条件下 SERF 陀螺输入/输出线性特性实验测试,实验测试结果表明, SERF 陀螺输出存在明显的非线性。基于 SERF 陀螺理论进行初步探究和分析,建立了 SERF 陀螺的动态响应模型,仿真结果与实验测试一致。

2 SERF 陀螺实验系统和测试过程

SERF 陀螺实验装置与文献[10]相同,由原子泡、加热炉、磁屏蔽装置和三维亥姆霍兹线圈组成,原子气室采用与文献[10]相同的原子泡,它是由 GE180 铝硅酸盐玻璃制作的球形泡,其直径为 15 mm,壁厚为 0.2 mm,内部充有 K-Rb 碱金属、 $6.187 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 ^{21}Ne 气体和 6666 Pa 的 N_2 淬灭气体,其中混合金属 K 和 Rb 的密度比为 1:30。

SERF 陀螺采用全光纤自旋进动检测装置^[10],其光路具有很好的互易性,通过检测左右旋圆偏振光往返通过气室后产生的相位差实现原子自旋进动的测量,而且左右旋圆偏振光的总相位差为线偏振光偏振面旋转角的 4 倍,从而获得更高的灵敏度。研制的光纤自旋进动检测系统与闭环光纤陀螺的信号特征相同,采用光纤陀螺全数字闭环检测技术实

现自旋进动引起的相位差测量,输出为数字值 D ,可表示为

$$D = K_S \cdot \Omega = K_D \cdot K_V \cdot l \cdot P_x^e, \quad (1)$$

式中: K_S 为 SERF 陀螺标度因子; Ω 为输入角速度; K_D 为数字检测部分的系数; K_V 为与原子气室相关的参数,可等效为原子气室的维尔德常数; P_x^e 为原子自旋进动信号在检测方向(x 轴)上的投影分量; l 为探测光通过气室的长度。该方案采用相干相位闭环检测技术,消除了光强波动、光路损耗和电路增益等的影响,抗干扰能力强,而且灵敏度高;基于全数字闭环检测技术,不存在原理性非线性误差,测量线性好,测量范围宽。

如图 1 所示,在进行 SERF 陀螺测试实验时, SERF 陀螺气室组件与抽运系统和光纤检测系统一起集成安装在专用转台上,精确调整使气室 y 轴与转台旋转主轴平行,检测信号和电源由电缆连接到转台仪器台,转台由转台控制器控制,陀螺信号由计算机采集保存。首先加热使气室温度稳定到工作温度,调整磁补偿线圈电流使气室空间磁场为零^[11],然后采用大功率抽运激光极化 K 原子,通过自旋交换碰撞极化 Rb 原子来实现 ^{21}Ne 的超极化。在此基础上,采用方波调制/解调法补偿核自旋磁场,保证原子气室中电子和核子自旋极化处于动态平衡状态^[12]。实际测试时,从小到大均匀施加转速,记录测试系统输出信号。

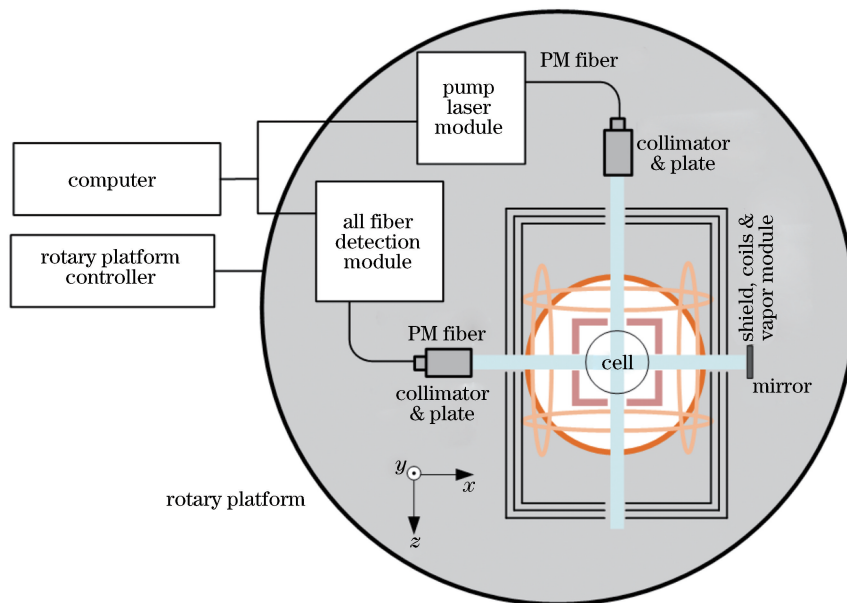


图 1 SERF 陀螺实验装置

Fig. 1 Experimental setup of SERF gyroscope

分别对两种不同抽运状态的 SERF 陀螺进行了测试,抽运功率分别取 75 mW 和 150 mW,测量范

围为 ± 10 ($^\circ$)/s,在小转速范围 (± 2 ($^\circ$)/s)内测试速率间隔取 ± 0.5 ($^\circ$)/s,在较大速率范围测试速率

间隔取 ± 1 ($^\circ$)/s。在两种抽运状态下,测试得到的SERF陀螺的输出如图2所示。测试结果显示:在小转速范围内,SERF陀螺的输出呈现较好的线性,当转速增大时,SERF陀螺的输出呈现明显的非线性,并且不同抽运条件下线性状态不同:抽运功率越大,线性区域越宽。在 ± 10 ($^\circ$)/s测量范围内,检测的相位差远小于1 rad,全数字检测系统具有理想的线性,因此,可以确认SERF陀螺的输出非线性是由其内在性质决定的。

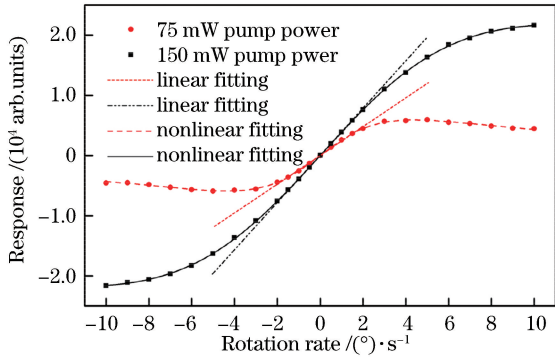


图2 SERF陀螺的响应

Fig. 2 Response of SERF gyroscope

3 SERF原子自旋陀螺非线性响应模型

在SERF状态K-Rb- 21 Ne原子气室中,K原子首先被沿 z 轴入射的抽运光极化,通过自旋交换碰撞实现Rb原子极化和 21 Ne原子超极化。在 z 轴加上一个偏置磁场,补偿 21 Ne原子超极化产生的核磁场,可实现碱金属原子电子自旋和 21 Ne原子核自旋强耦合,通过检测Rb原子进动在 x 轴的分量来测量SERF陀螺绕 y 轴的转动^[7]。目前,小角度线性SERF陀螺研究报道较多^[7,9,11],但关于SERF陀螺动态响应及非线性特性的分析尚未见报道。实际上,SERF陀螺转速检测包含两个基本的过程:1)转动引起核自旋变化、进而引起原子进动检测方向自旋分量发生变化;2)利用探测光检测对应自旋进动分量。由于本实验采用线性光纤原子自旋检测系统,不会引入非线性误差。因此,需要考察SERF态碱金属原子电子自旋和 21 Ne原子核自旋强耦合条件下,待测进动分量与输入角速度的关系。在SERF状态K-Rb- 21 Ne原子气室中,电子和核子极化处于动态平衡的状态下,Rb原子的自旋进动可用如下Bloch方程描述^[13],

$$\frac{\partial \mathbf{P}^e}{\partial t} = \frac{1}{Q} [\gamma_e \mathbf{B} \times \mathbf{P}^e + \mathbf{R}_p (\hat{z} - \mathbf{P}^e) +$$

$$R_m (\hat{x} - \mathbf{P}^e) - R_{sd} \mathbf{P}^e], \quad (2)$$

式中: \mathbf{B} 为电子感应到的磁场; \mathbf{P}^e 为电子极化率; γ_e 为电子旋磁比; R_p 和 R_m 是抽运和检测光光束的抽运率; R_{sd} 为电子自旋交换破坏率; Q 是由于电子和核子自旋交换碰撞产生的电子减慢因子。求解(2)式可得电子极化率 \mathbf{P}^e 在 x 方向的分量 P_x^e ,

$$P_x^e = \frac{P_0^e (\gamma_e R_{tot} B_y + \gamma_e^2 B_x B_z)}{R_{tot}^2 + \gamma_e^2 (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}, \quad (3)$$

式中: P_0^e 为抽运完成后沿 z 轴的电子极化率; $R_{tot} = R_p + R_{sd}$ 为总电子弛豫率。在SERF陀螺中,通过精密调节线圈补偿磁场可保证气室空间位置磁场为0,即 $B_x = 0, B_z = 0, B_y = 0$,当沿 y 轴输入转速为 Ω_y 的角速度时,将有 $B_y = B_y^n = \Omega_y / \gamma_n, B_y^n$ 为转动引起的核子等效磁场, γ_n 为核子旋磁比,代入(3)式可将 P_x^e 改写为

$$P_x^e = \frac{P_0^e \gamma_e \Omega_y}{R_{tot} \gamma_n \left[1 + \left(\frac{\gamma_e}{R_{tot} \gamma_n} \right)^2 \Omega_y^2 \right]}. \quad (4)$$

由(4)式可见, P_x^e 和 Ω_y 之间满足洛伦兹曲线关系,根据洛伦兹曲线的特点可知,当转速 $\Omega_y = \pm R_{tot} \gamma_n / \gamma_e$ 时, P_x^e 分别取得最大、最小值 $\pm P_0^e / 2$ 。在基于K-Rb- 21 Ne耦合磁强计的SERF陀螺中, γ_e 和 γ_n 都为常数,即Rb原子电子旋磁比为 $\gamma_e = 28 \text{ Hz/nT}$, 21 Ne的核子旋磁比为 $\gamma_n = 1.21 \times 10^9$ ($^\circ$) $\cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$,因此,总电子弛豫率 R_{tot} 决定了 Ω_y 的大小,从而决定了SERF陀螺的最大可测量范围,总电子弛豫率 R_{tot} 越大 Ω_y 越大,测量范围越宽。将上式按洛伦兹色散曲线函数简化并带入(1)式,可获得数字输出 D 和转速 Ω_y 的测量模型

$$D = \frac{K_1 \Omega_y}{1 + K_2 \Omega_y^2}, \quad (5)$$

式中: $K_1 = K P_0^e \gamma_e / (R_{tot} \gamma_n)$, $K = K_D K_V l$;系数 $K_2 = [\gamma_e / (R_{tot} \gamma_n)]^2$ 。

以(5)式为目标函数,对两种不同抽运功率条件下的输出分别进行拟合,得到的拟合曲线如图2所示,小抽运功率和大抽运功率对应的系数 K_2 分别为0.067和0.008,对应的总电子弛豫率 R_{tot} 分别为 561 s^{-1} 和 1624 s^{-1} 。根据参考文献^[14]的相关研究可知,在一定的抽运功率范围内,总电子弛豫率 R_{tot} 随抽运功率的增加而增加,这与实验结果和(5)式描述的结果一致。理论和实验结果均表明,在一定的抽运功率范围内,SERF陀螺的线性范围随抽运功率的增加而增加。从图2可以看出,大角速度下,SERF陀螺输出呈现明显的非线性,其中线性范

围与抽运功率大小相关,大抽运功率的总电子弛豫率 R_{tot} 相对较大,线性范围较宽。

4 结 论

采用具有线性输出特性的圆偏光原子自旋进动检测技术,对两种不同抽运条件下的 SERF 陀螺输出响应进行了实验研究,结果表明,当转速较大时 SERF 陀螺的输出呈现明显的非线性。根据 SERF 陀螺工作原理,分析研究了 SERF 态碱金属原子电子自旋和 ^{21}Ne 原子核自旋强耦合条件下,待测进动分量与输入角速度的关系。建立了 SERF 陀螺输出响应理论模型并进行了仿真研究,仿真结果与实验一致。这表明 SERF 陀螺的非线性响应由原子气室内在性质决定,与总电子弛豫率 R_{tot} 密切相关。本文对 SERF 陀螺非线性响应特性的研究,为 SERF 原子自旋陀螺的进一步理论研究和工程化应用提供了理论和实验依据。

参 考 文 献

- [1] Cooper J J, Hallwood D W, Dunningham J A. Entanglement-enhanced atomic gyroscope [J]. *Physical Review A*, 2010, 81(4): 043624.
- [2] Dong H F, Fang J C, Qin J, *et al.* Analysis of the electrons-nuclei coupled atomic gyroscope[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(12): 2886-2889.
- [3] Ma Y L. Progress of atomic gyroscope[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(3): 89-92.
马永龙. 原子陀螺的研究进展[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(3): 89-92.
- [4] Fang J C, Qin J. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications [J]. *Sensors*, 2012, 12(5): 6331-6346.
- [5] Qin J, Wang S L, Gao P Z, *et al.* Advances in nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2014, 1(2): 64-69.
秦杰, 汪世林, 高溥泽, 等. 核磁共振陀螺技术研究进展[J]. *导航定位与授时*, 2014, 1(2): 64-69.
- [6] Wan S A. Study on experiment of error analysis and suppression methods for SERF atomic spin gyroscope [D]. Beijing: Beihang University, 2014: 103-107.
万双爱. SERF 原子自旋陀螺仪的误差分析与抑制方法实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014: 103-107.
- [7] Kornack T W, Ghosh R K, Romalis M V. Nuclear spin gyroscope based on an atomic comagnetometer [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95 (23): 230801.
- [8] Fang J C, Qin J, Wan S G, *et al.* Atomic spin gyroscope based on ^{129}Xe -Cs comagnetometer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1512-1515.
- [9] Jiang L W, Quan W, Li R J, *et al.* A parametrically modulated dual-axis atomic spin gyroscope [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(5): 054103.
- [10] Yang Y H, Liu L N, Chen D Y, *et al.* Detection method of fiber atomic spin precession based on circularly polarized probe light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0112001.
杨远洪, 刘琳妮, 陈东营, 等. 基于圆偏振探测光的光纤原子自旋进动检测技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0112001.
- [11] Li R J, Fan W F, Jiang L W, *et al.* Rotation sensing using a K-Rb- ^{21}Ne comagnetometer [J]. *Physical Review A*, 2016, 94(3): 032109.
- [12] Brown J M. A new limit on Lorentz- and CPT-violating neutron spin interactions using a K- ^3He comagnetometer [D]. Princeton: Princeton University, 2011: 110-113.
- [13] Fan W F, Liu G, Li R J, *et al.* A three-axis atomic magnetometer for temperature-dependence measurements of fields in a magnetically shielded environment [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(9): 095007.
- [14] Chen Y, Quan W, Zou S, *et al.* Spin exchange broadening of magnetic resonance lines in a high-sensitivity rotating K-Rb- ^{21}Ne co-magnetometer[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36547.