

基于圆偏振探测光的光纤原子自旋进动检测技术

杨远洪*, 刘琳妮, 陈东营, 杨福铃, 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 分析了极化碱金属气室的旋光特性,极化的原子气室宏观上可等效为一种法拉第旋光晶体,其旋光系数与原子自旋进动相关。提出了采用圆偏振探测光测量通过气室的左右旋圆偏振光相位差来实现原子自旋进动检测的思路。基于改进的全光纤反射型 Sagnac 干涉仪,搭建了光纤原子自旋进动检测系统,通过圆偏振探测光实现了无自旋交换弛豫态自旋进动信号的检测。在原子自旋陀螺仪实验平台上进行了实验验证并实现了陀螺效应,实验结果证明了所提理论的正确性。对陀螺性能进行了初步测试,得到其零偏不稳定性为 $0.29 (^{\circ})/h$ 。

关键词 测量; 光纤光学; 相干检测; 原子自旋进动检测; Sagnac 干涉仪; 无自旋交换弛豫; 圆偏振光

中图分类号 TB133

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0112001

Detection Method of Fiber Atomic Spin Precession Based on Circularly Polarized Probe Light

Yang Yuanhong*, Liu Linni, Chen Dongying, Yang Fuling, Quan Wei, Fang Jiancheng

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The optical rotation property of a polarized alkali vapor cell is demonstrated. The polarized atomic gas chamber can be macroscopically equivalent to a Faraday polarized crystal, whose optical rotation coefficient is related to the spin precession of atoms. A novel atomic spin precession detection scheme is proposed by means of the detection of the phase difference between the left and the right circularly polarized probe lights when a circularly polarized probe light is propagating through the vapor cell. Based on the modified all-fiber reflective Sagnac interferometer, the fiber atomic spin precession detection system is built and the detection of spin precession signals in the spin exchanged relaxation free states is realized by a circularly polarized light. The detection scheme is verified and the gyroscopic effect is realized on the experimental platform of an atomic spin gyroscope. The experimental results confirm that the proposed theory is correct. The performance of this gyroscope is preliminarily tested and its zero-bias instability is $0.29 (^{\circ})/h$.

Key words measurement; fiber optics; coherent detection; atomic spin precession detection; Sagnac interferometer; spin-exchanged relaxation free; circularly polarized light

OCIS codes 120.1880; 060.2370; 120.4820

1 引 言

自旋是粒子的内禀属性,原子自旋对磁场和载体运动都敏感,在有磁场作用或相对惯性空间发生转动时,原子自旋进动会发生变化。这种进动随磁场或转动发生的变化是确定的^[1],因此可以通过检测原子的进动实现磁场或惯性转动的测量,进而形成原子磁强计和原子陀螺。通过控制原子泡的剩磁和抽运激光参数,可操纵碱金属原子自旋使其处于无自旋交换弛豫(SERF)态。SERF 技术解决了原

子密度与横向弛豫时间的矛盾,基于 SERF 态可获得高灵敏度原子磁强计^[2-4]和高精度原子自旋陀螺仪^[5]。

原子自旋进动检测技术是原子磁强计和原子陀螺的关键技术。目前,研究者基本都以线偏光作为原子自旋进动检测的探测光,采用测量线偏振光通过碱金属气室后偏振面的旋转角来检测原子自旋进动信号。为提高检测精度和抑制误差,研究者提出了多种基于线偏振探测光的自旋进动检测技术,如差分法^[6]、法拉第调制法^[7]、电光调制法^[8]、光弹调

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-08-21; 录用日期: 2018-09-05

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

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

制法^[9]等。为提高检测精度,Ding等^[10]提出了利用两个特定频率的近共振检测光的检测方法;Sheng等^[11]为了获得高灵敏度的标量原子磁强计,在碱金属气室内部加入柱面镜构成谐振腔来增大光程,使光束反射42次后射出;Colombo等^[3]利用衍射光学元件实现了4通道的磁场检测。这些方法都基于线偏振探测光检测法,在实验室条件下可实现高精度的自旋进动检测,但还存在抗干扰能力较弱、测量范围有限的问题。

在处于SERF态的碱金属原子气室中,原子具有一致且稳定的自旋进动性,在宏观上可等效为一种光学法拉第晶体^[12],其旋光系数与碱金属的自旋进动状态相关。基于这一设想,本文提出了采用圆偏振探测光测量通过气室的左右旋圆偏振光相位差来实现原子自旋进动检测的思路。考察了极化碱金属气室的旋光特性,建立了左右旋圆偏探测相移差与气室自旋进动的模型。基于改进的全光纤反射型Sagnac干涉仪,搭建了光纤自旋进动检测系统,利用圆偏振探测光实现了SERF态原子自旋进动信号的检测。在原子自旋陀螺仪平台上进行了原理验证与原子陀螺性能的初步测试。

2 基于圆偏振探测光的自旋进动检测原理

2.1 极化SERF态原子气室的旋光特性

如图1所示,在磁屏蔽环境下,通过磁场、光场对原子自旋进行综合操控,可以实现球形气室内原子自旋的极化,形成极化SERF态原子气室,其中 xyz 为坐标系。线偏探测光通过SERF态气室后将发生偏转,探测光偏转角度 θ 与原子自旋进动信号 P^e 在检测方向上的投影 P_x^e 的关系^[13]可以表示为

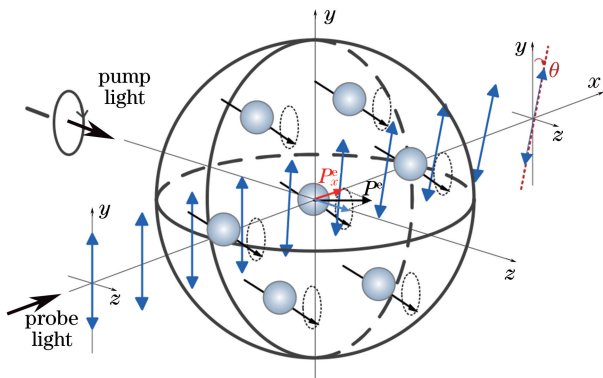


图1 SERF态原子气室及偏振探测光变化示意图
Fig. 1 Schematic of vapor cell in SERF states and variation of polarized probe light

$$\theta = \frac{\pi}{6} n l r_e c P_x^e \left[-\frac{(v - v_{D1})}{(v - v_{D1})^2 + (\Gamma_L/2)^2} + \frac{(v - v_{D2})}{(v - v_{D2})^2 + (\Gamma_L/2)^2} \right], \quad (1)$$

式中: n 为气室碱金属的原子密度; l 为气室长度; r_e 为电子半径; c 为光速; v 为检测光频率; v_{D1} 和 v_{D2} 分别为碱金属原子的D1和D2线跃迁频率; Γ_L 为压力展宽。

定义极化气室的等效旋光系数为

$$K_V = \frac{\pi}{6} n r_e c \left[-\frac{v - v_{D1}}{(v - v_{D1})^2 + (\Gamma_L/2)^2} + \frac{v - v_{D2}}{(v - v_{D2})^2 + (\Gamma_L/2)^2} \right] P_x^e, \quad (2)$$

则(1)式可重写为

$$\theta = K_V \cdot l. \quad (3)$$

结合(2)式和(3)式可以看出,SERF态原子气室等效为法拉第旋光晶体时,其旋光特性方程与常规法拉第旋光晶体的完全一致。由于气室长度固定,可认为SERF态原子气室的旋光系数是变化的,与原子自旋进动信号在检测方向上的投影 P_x^e 呈正比关系。通过测量旋光角度 θ ,可确定 K_V 值,实现 P_x^e 的测量。

2.2 基于圆偏振光相位差的原子自旋进动检测原理

基于偏振光学理论,偏振态可用本征矢量的任意标准正交基来分析,线偏振光可由左右旋圆偏振光表征,这从理论上表明利用圆偏振光也可实现极化气室原子进动的检测。线偏振检测光可以视为一束左旋圆偏振光和一束右旋圆偏振光的合成,在极化的碱金属气室中,可设频率为 v 的左、右旋圆偏振光具有不同的折射率 $n_+(v)$ 和 $n_-(v)$,圆偏振光和线偏振光^[13]可分别描述为

$$E(l) = \frac{E_0}{4} \exp[i\omega\bar{n}(v)l/c] \exp(i\varphi_l)(\hat{y} + i\hat{z}) + \frac{E_0}{4} \exp[i\omega\bar{n}(v)l/c] \exp(i\varphi_r)(\hat{y} - i\hat{z}), \quad (4)$$

$$E(l) = E_0 [\cos(\theta)\hat{y} - \sin(\theta)\hat{z}], \quad (5)$$

式中: E_0 为光振幅; ω 为角频率; \hat{y} 、 \hat{z} 分别为两垂直的单位基向量坐标; $\bar{n}(v)$ 为平均折射率, φ_l 、 φ_r 分别为左右旋圆偏振光的相位,其表达式分别为

$$\bar{n}(v) = [n_+(v) + n_-(v)]/2, \quad (6)$$

$$\varphi_l = -\varphi_r = \theta = \frac{\pi v l}{c} [n_+(v) - n_-(v)]. \quad (7)$$

当同频的左右旋圆偏振探测光同轴同时注入极化原子气室时,左右旋圆偏振光的相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi_l - \varphi_r = 2\theta = 2K_V \cdot l. \quad (8)$$

(8)式表明,左右旋圆偏振光经过极化气室后的相位差是线偏振探测光旋转角的两倍。不同于基于线偏振探测光的自旋进动检测技术,通过检测左右旋圆偏振探测光的相位差 $\Delta\varphi$ 可实现自旋进动的检测。通过相干检测技术可以提取相位差信息 $\Delta\varphi$, 确定 K_V 值, 最终获得准确的 P_r^s 值。采用合适的圆偏振光干涉检测技术不仅可达到更高的灵敏度, 还可有效消除各种干扰因素对测量结果的影响。

3 基于圆偏探测光的全光纤自旋进动检测方案

为实现基于圆偏振探测光的原子自旋进动检测, 提出了一种基于改进的全光纤反射型 Sagnac 干涉仪的检测方案, 结构如图 2 所示, 系统由全光纤闭环检测模块和光纤探头组件两部分组成, 其中 PIN-

FET 为场效应管探测器。在全光纤闭环检测模块中, 超辐射发光二极管 (SLD) 光源发出的光经过单模 (SM) 耦合器后由光纤起偏器起偏, 变为线偏光。光纤偏振器的尾纤与相位调制器的保偏 (PM) 尾纤以 45° 角熔接, 在 45° 熔接点后光路中光偏振态 (红色和黑色线条分别表示两偏振模式的演变) 的整体变化过程如图 3 所示。以 45° 注入保偏尾纤的线偏光均分为两个正交线偏振光, 分别沿保偏光纤的快轴和慢轴传输。这两个正交模式的线偏光在相位调制器处受到调制, 在经过保偏光纤绕制的延时器后进入光纤探头组件。光纤探头组件由准直器、 $1/4$ 波片和反射镜组成, 准直器和 $1/4$ 波片集成在准直光管中, 将光引入气室, 反射镜安装在气室的另一端, 将通过气室的光原路反射后注入保偏光纤。在光纤探头组件中, 光束经过准直器和 $1/4$ 波片, 转变为左旋和右旋圆偏振光, 入射到原子气室中。经过

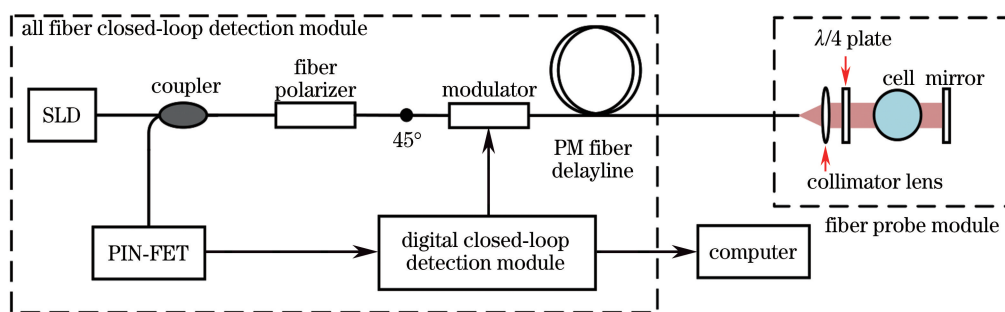


图 2 圆偏振光检测系统结构的示意图

Fig. 2 Structural diagram of circularly polarized light detection system

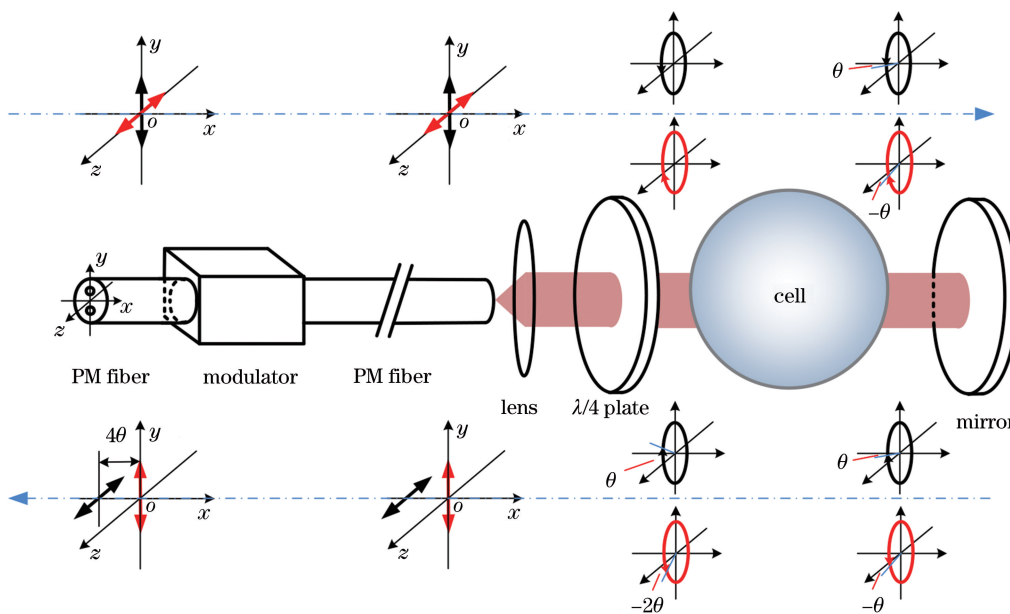


图 3 圆偏振光检测系统的互易性

Fig. 3 Reciprocity of circularly polarized light detection system

极化 SERF 原子气室后,左右旋圆偏振光产生相位差 $\Delta\varphi=2\theta$ 。在镜面处反射后,两束圆偏振光旋转方向互换,再次经过原子气室,产生同样的相位差 $\Delta\varphi$ 。这样,入射的左右旋圆偏振光在反射后射出时,相位差变化为 $2\Delta\varphi=4\theta$ 。检测光沿原光路返回后,两偏振光经历光程完全互易,只携带双折射原子气室产生的相位差,较好地抑制了环境变化(如温度)的影响。两偏振光在 45° 熔接点发生干涉,输出干涉信号只与原子气室引起的左右旋圆偏振光相位差有关^[14],可表示为

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2} I_0 \cdot \eta \{1 - \cos[2\Delta\varphi + \varphi_m(t)]\}, \quad (9)$$

式中: I_{out} 为 PIN-FET 检测到的光强; I_0 为光源光强; η 为与光路损耗有关的系数; $\varphi_m(t)$ 为调制信号(方波和台阶波)作用在调制器上产生的调制相位。

如图 2 所示,系统与闭环光纤陀螺的信号特征相同,可采用光纤陀螺全数字闭环检测技术检测由自旋进动引起的相位差^[15],闭环检测系统输出的数值 D 可表示为

$$D = 2\Delta\varphi = 4\theta. \quad (10)$$

该方案采用相干相位闭环检测技术,引入负反馈回路,形成闭环控制系统,可以保证整个测量范围内系统具有良好的测量精度,增强了检测的稳健性,消除了光强波动、损耗和电路增益等的影响,抗干扰能力强,灵敏度高。基于全数字闭环检测技术的圆偏振检测法不存在原理性非线性因素,测量线性好,测量范围宽。为抑制检测光路中可能存在的背向反射等引入的噪声,选取宽谱 SLD 光源、微凸抛光连接器(APC)光纤跳线等光学器件,有效抑制了光路背向反射的强度和寄生干涉。

4 原子自旋陀螺实验与测试

为验证上述理论与技术,将研制的全光纤自旋进动检测系统用于原子自旋陀螺仪,进行了理论验证和陀螺性能初步测试。

图 4 所示为原子自旋陀螺的工作原理图,其中 K 和 S 分别为稀有气体的核自旋角动量和碱金属电子自旋角动量。在 SERF 态原子气室中,由于稀有气体原子核自旋与碱金属原子电子自旋的强耦合作用,稀有气体核自旋可以跟随并补偿外界磁场的变化,使碱金属原子电子自旋所受静磁场接近于零,保持了电子自旋的定轴^[5]。设抽运光方向为 z 轴方向,探测光方向为 x 轴方向,陀螺敏感轴为 y 轴方向。当气室绕 y 轴方向相对于惯性空间转动时,

探测电子自旋极化率在 x 轴的投影量 P_x^e 就能获得载体相对于惯性空间的转动。原子自旋陀螺的测量方程^[16]为

$$P_x^e = \frac{P_z^e \gamma_e \Omega_y}{R_{\text{tot}} \gamma_n}, \quad (11)$$

式中: P_z^e 为原子自旋极化率在 z 轴的投影; R_{tot} 为碱金属原子总的弛豫率; γ_n 为稀有气体的原子核自旋磁比; γ_e 为碱金属原子电子自旋磁比; Ω_y 为待测转速。

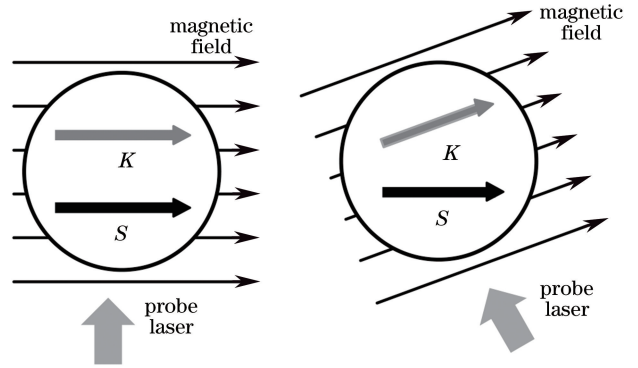


图 4 SERF 原子陀螺仪工作原理示意图
Fig. 4 Schematic of operation principle of SERF atomic gyroscope

图 5(a)所示为 SERF 原子自旋陀螺仪实验平台示意图,系统主要由检测系统、抽运光系统、碱金属气室与加热炉、磁屏蔽系统组成。基于图 2 所示的结构,研制的基于圆偏振光的原子自旋检测系统样机如图 5(b)所示,准直器和 $1/4$ 波片集成在准直光管中,其余部分(光纤闭环检测模块)安装在仪器盒中,这两个部分通过 PM 光纤连接。检测系统采用宽谱的 SLD 光源,抽运光源采用外腔激光器(ECDL),波长调谐到 K 原子的 $D1$ 谐振线 770 nm 。抽运光通过起偏器和 $1/4$ 波片后入射到气室抽运气室原子。气室安装在氮化硼材料制作的加热炉内,通过在加热炉侧面贴附加热片进行加热。加热炉固定在磁屏蔽系统中,磁屏蔽系统包括磁屏蔽桶和磁补偿线圈,实验使用的三层圆柱形磁屏蔽桶采用高导磁材料制作,可实现对环境磁场的初步屏蔽,三轴磁场线圈可进一步对剩余磁场进行补偿。

实验用碱金属气室为一直径为 15 mm 的球形玻璃气室,放置在磁屏蔽桶中心。气室中充有体积比为 $1:30$ 的混合 $K\text{-Rb}$ 碱金属、 2.3 amagat 的 ^{21}Ne 气体和约 6666 Pa 的 N_2 气体。实验过程中,首先极化原子实现 SERF 态,加热炉将原子气室升温到 180°C ;然后打开抽运光,抽运光入射到气室中极化 K 原子, Rb 原子通过与 K 原子和 ^{21}Ne 核子的自旋

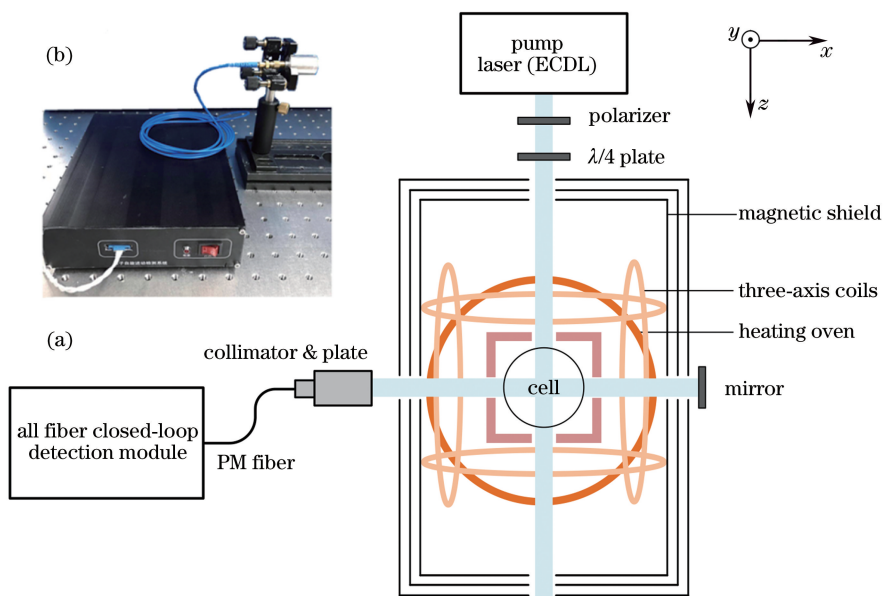


图 5 实验平台。(a)原子自旋陀螺仪实验平台结构图;(b)全光纤自旋进动检测装置照片

Fig. 5 Experimental platform. (a) Structural diagram of atomic spin gyroscope; (b) photograph of all-fiber spin precession detection module

交换碰撞最终实现气室内电子与核子的自旋极化耦合。在检测装置组装到原子自旋陀螺仪实验平台的过程中,使用美国 Thorlabs 公司生产的 TXP5004 偏振检测仪测量偏振态变化,在线调整 1/4 波片与保偏光纤的对轴角度,以保证获得较理想的圆偏振探测光。同时调整反射镜角度,使反射光最大限度地耦合回光纤。使用美国 Agilent 公司生产的 33522B 信号发生器给磁场线圈的三个轴向施加不同的波形信号,根据检测系统输出的响应曲线对剩余磁场进行补偿^[17],保证原子泡位置的剩余磁场接近于零。

待原子气室极化达到 SERF 态且磁场补偿完毕后,首先进行了陀螺标度测试,以 $0.1\text{ }(^{\circ})/\text{s}$ 作为输入角速度的变量间隔,在角速率 $\pm 1\text{ }(^{\circ})/\text{s}$ 的范围进行了陀螺性能的初步测试,检测系统输出的数字量与转速的关系如图 6 所示,该转速范围内检测结果呈现了较好的线性度,通过拟合曲线得到的测试标

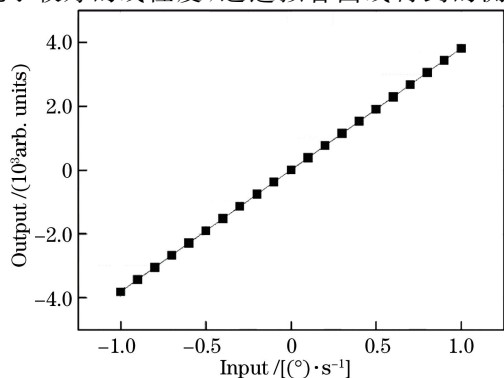


图 6 转速与输出值的关系

Fig. 6 Relationship between rotation speed and output value

度因数为 $3812\text{ }(^{\circ})^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,采用光纤陀螺测试标准 GJB 2426A-2004 规定的计算办法,计算得到线性度为 1.84×10^{-4} 。

进行了系统静态性能测试,零位测试结果如图 7(a)所示,Allan 分析曲线如图 7(b)所示,由图可得零偏不稳定性约为 $0.29\text{ }(^{\circ})/\text{h}$ 。

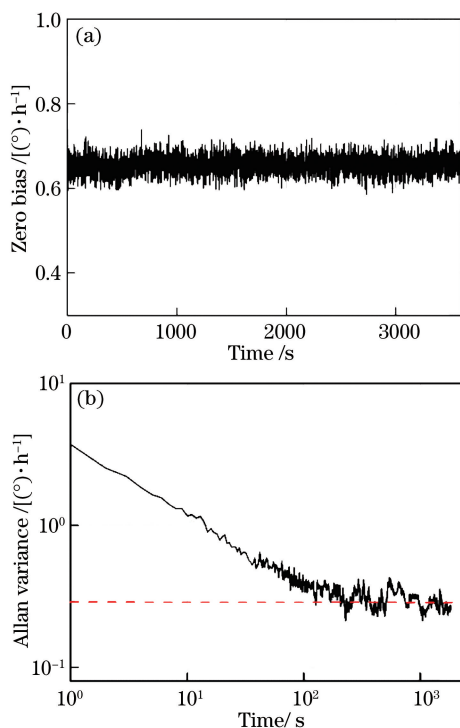


图 7 系统性能测试曲线。(a)静态测试;(b)Allan 方差

Fig. 7 Performance test curves of system.

(a) Static test; (b) Allan variance

5 结 论

将处于 SERF 态的碱金属原子气室宏观上等效为一种光学法拉第晶体,提出了采用圆偏振探测光相干检测技术实现原子自旋进动信号检测的思路。设计和实现了基于反射型 Sagnac 干涉仪的全光纤原子自旋检测装置。在原子 SERF 陀螺仪平台上实现了陀螺性能测试,在 ± 1 ($^{\circ}$)/s 范围内,线性误差为 1.84×10^{-4} ,零偏不稳定性约为 0.29 ($^{\circ}$)/h。实验结果证明了所提理论的正确性和基于圆偏振探测光实现原子自旋进动检测方案的可行性,为高精度、大动态范围的原子自旋进动信号检测提供了实用的新技术。

参 考 文 献

- [1] Cronin A D, Schmiedmayer J, Pritchard D E. Optics and interferometry with atoms and molecules [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(3): 1051-1129.
- [2] Kominis I K, Kornack T W, Allred J C, *et al.* A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. *Nature*, 2003, 422(6932): 596-599.
- [3] Colombo A P, Carter T R, Borna A, *et al.* Four-channel optically pumped atomic magnetometer for magnetoencephalography[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15403-15416.
- [4] Chen B T, Jiang M, Ji Y L, *et al.* Spin exchange relaxation free atomic magnetometer for zero-field nuclear magnetic resonance detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1104001.
陈伯韬, 江敏, 季云兰, 等. 用于零场核磁共振探测的无自旋交换弛豫原子磁力仪[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1104001.
- [5] 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.
- [6] Kamada K, Ito Y, Ichihara S, *et al.* Noise reduction and signal-to-noise ratio improvement of atomic magnetometers with optical gradiometer configurations[J]. *Optics Express*, 2015, 23 (5): 6976-6987.
- [7] Allred J C, Lyman R N, Kornack T W, *et al.* High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(13): 130801.
- [8] Hu Y H, Hu Z H, Liu X J, *et al.* Reduction of far off-resonance laser frequency drifts based on the second harmonic of electro-optic modulator detection in the optically pumped magnetometer [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(21): 5927-5932.
- [9] 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.
- [10] Ding Z C, Long X W, Yuan J, *et al.* Sensitive determination of the spin polarization of optically pumped alkali-metal atoms using near-resonant light [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32605.
- [11] Sheng D, Li S, Dural N, *et al.* Subfemtotesla scalar atomic magnetometry using multipass cells [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(16): 160802.
- [12] Happer W, Mathur B S. Off-resonant light as a probe of optically pumped alkali vapors[J]. *Physical Review Letters*, 1967, 18(15): 577-580.
- [13] Seltzer S J. *Developments in alkali-metal atomic magnetometry*[D]. Princeton: Princeton University, 2008: 38-44.
- [14] Blake J, Tantaswadi P, de Carvalho R T. In-line Sagnac interferometer current sensor [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(1): 116-121.
- [15] Zhang W X. *Fiber optic gyroscope and application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 98-119.
张维叙. *光纤陀螺及其应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 98-119.
- [16] Qin J, Fang J C, Wan S A. Experimental design of a dual axis atomic spin gyroscope [C]. 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT), 2012: 24-27.
- [17] Chu Z Y, Sun X G, Wan S A, *et al.* Active magnetic compensation of spin-exchange-relaxation-free atomic magnetometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1808-1813.
楚中毅, 孙晓光, 万双爱, 等. 无自旋交换弛豫原子磁强计的主动磁补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22 (7): 1808-1813.