

## 基于光谱吸收的碱金属气室温度梯度测量方法

阮家森<sup>1,2</sup>, 段利红<sup>1,2\*</sup>, 全伟<sup>1,2</sup><sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;<sup>2</sup>北京航空航天大学杭州创新研究院(余杭), 浙江 杭州 310023

**摘要** 无自旋交换弛豫(SERF)原子惯性测量仪表因具有超高的理论精度和易于集成等优势,成为超高精度惯性测量仪表的重要发展方向。均匀且稳定的温度场是 SERF 惯性测量仪表实现超高精度测量的重要基础,提出了一种基于光谱吸收的碱金属气室全域温度梯度测量方法,通过在线获取气室不同位置激光入射前后的强度,根据光强比与温度的函数关系可获得气室内部相应位置的温度信息。较为全面地分析了光谱吸收法实现在线碱金属气室温度测量的可行性以及线偏振检测光频率对测温结果的影响,并通过有限元仿真与实验测试结果的对比,验证了所提方法的有效性。所提温度梯度测量方法是基于仪表原有设备实现的,不引入额外干扰,简单可靠且可操作性强。此方法的提出为 SERF 惯性测量仪表的加热系统设计与性能提升提供了重要的技术支撑。

**关键词** 测量; 光谱吸收法; 温度测量; 温度梯度; 无自旋交换弛豫

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1904005

## 1 引言

惯性测量仪表是惯性导航系统中的核心部件,其经历了从机电式<sup>[1]</sup>到光电式<sup>[2-3]</sup>的发展。随着量子操控理论与光学操控技术的发展,新型量子式惯性测量仪表逐渐成为惯性测量领域的研究热点<sup>[4]</sup>。量子式惯性测量仪表由于其物理原理不同,主要分为两大类:冷原子干涉类<sup>[5]</sup>和原子自旋类。后者由于测量方法不同又分为核磁共振<sup>[6]</sup>和无自旋交换弛豫(SERF)<sup>[7]</sup>两个方向。SERF 惯性测量仪表因同时具备超高的理论精度以及小型化工程化潜力,成为新一代惯性测量仪表的重要发展方向。

SERF 态的实现需要稳定和均匀分布的原子密度,原子密度与温度密切相关,因此需要准确测量气室内部的气室温度和温度梯度。现有温度的测量方法主要有铂电阻测温<sup>[8]</sup>、光纤光栅测温<sup>[9-10]</sup>、红外测温<sup>[11]</sup>以及光谱吸收法测温<sup>[12]</sup>等。其中,铂电阻测温和光纤光栅测温需要传感器接触被测物体,实验中的玻璃气室为密闭空间,无法内部布置传感器。红外测温可以无接触进行温度测量,但是其测量的只是物体表面的温度,无法进行气室内部温度的测量。光谱吸收法测温是利用碱金属原子吸收相应波段电磁波的性质,通过测量某一波段激光入射前后的光强比,计算拟合得到气体的温度信息。这种测温方法可实现封闭气室内部的气室温度测量,是目前气室温度测量采用较多的一种方

法。例如,郑文杰等<sup>[13]</sup>基于比尔-朗伯定律中气体吸收谱线宽度与温度的关系,得到温度改变对气体吸收谱线宽度的影响规律。廖文汉等<sup>[14]</sup>利用直接吸收光谱方法,精密测量了铯原子的 D1 跃迁吸收谱线,依据谱线多普勒展宽分量获得了原子气体在该平衡态下的热力学温度。现有光谱吸收法研究均聚焦于测温精度以及影响因素分析,缺乏气室内部温度梯度的相关研究。

本文为了得到准确的气室内部温度梯度信息,采用光谱吸收法对 SERF 惯性测量系统的碱金属气室内部温度场进行测量。首先从理论上分析了激光频率对气室温度测量精度的影响,随后通过连续控制入射气室的激光方位,得到气室内部的纵向温度梯度分布信息,并对气室温度场进行了有限元仿真分析,最后通过实验验证了所提方法的有效性。

## 2 基本原理

## 2.1 光谱吸收法测量气室温度的原理

在 SERF 惯性测量系统中,通常采用一束圆偏振光极化原子,另一束与之垂直的线偏振光对电子自旋进动信号敏感。极化的原子自旋具有旋光效应<sup>[15]</sup>,当线偏振光经过极化的原子气室时会发生双折射现象,即线偏振光的偏振面方向也会发生旋转。因此,可以通过检测该旋光角的大小得到原子自旋进动信号,进而实现惯性测量。该旋光角( $\theta$ )<sup>[16]</sup>可以表示为

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-07-05; 录用日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(62003024, 61721091, 61773043)

通信作者: \*duanlihong@buaa.edu.cn

$$\theta = \frac{1}{2} \ln r_{ec} P_x^e f_{D1} \times \frac{v - v_{D1}}{(v - v_{D1})^2 + (\Gamma_{D1}/2)^2}, \quad (1)$$

式中:  $l$  为检测光通过气室的光程;  $r_e$  为经典电子半径;  $c$  为光的传播速度;  $P_x^e$  为电子极化率在  $x$  方向上的分量;  $f_{D1}$  为碱金属原子 D1 线跃迁对应的振荡强度;  $v$  为检测光的频率;  $v_{D1}$  为碱金属原子 D1 线的跃迁频率;  $\Gamma_{D1}$  为碱金属原子 D1 线的压力展宽;  $n$  为碱金属原子的密度, 其与温度的关系可以用饱和蒸汽压公式<sup>[17]</sup>表示为

$$n = \frac{1}{T} \cdot 10^{21.886+A-B/T}, \quad (2)$$

式中:  $T$  为气室的温度;  $A$  和  $B$  为与碱金属原子相关的常数。常用的碱金属原子为 K 原子和 Rb 原子, 其中 K 原子的  $A$  和  $B$  数值分别为 4.402 和 4453, Rb 原子的  $A$  和  $B$  数值分别为 4.312 和 4040。SERF 惯性测量仪表利用一束线偏振光进行信号的检测, 可以直接采用原有的线偏振光进行气室温度的测量。

线偏振光透过碱金属原子气体前后的光强吸收公式<sup>[18]</sup>可以表示为

$$I_{out} = I_{in} \exp[-n\sigma(v)l], \quad (3)$$

式中:  $l$  为线偏振光通过气室的光程;  $I_{in}$  为进入气室前的光强;  $I_{out}$  为出射气室的光强;  $\sigma(v)$  为光吸收横截面。受气室透过率和通光面粗糙度的影响, 实际出射光强  $I'_{out}$  小于因原子密度而改变的出射光强  $I_{out}$ 。设其他因素引起的光强变化量为  $\delta$ , 则  $I_{out} = I'_{out} + \delta$ 。光吸收横截面的表达式为

$$\sigma(v) = r_{ec} f_{D1} \frac{\Gamma_{D1}/2}{(v - v_{D1})^2 + (\Gamma_{D1}/2)^2}. \quad (4)$$

联立式(2)~(4)可以得到气室内的温度与入射气室前后光强比的关系:

$$\ln\left(\frac{I_{out}}{I_{in}}\right) = -l r_{ec} f_{D1} \frac{10^{21.886+A-B/T} (\Gamma_{D1}/2)}{T [(v - v_{D1})^2 + (\Gamma_{D1}/2)^2]}. \quad (5)$$

由式(5)可知, 当线偏振光的频率  $v$  与压力展宽  $\Gamma_{D1}$  为常数时, 线偏振光入射气室前后的光强比与气室温度  $T$  呈一一对应关系。图 1 为入射气室前后的光强比随气室温度的变化规律, 其中线偏振光的频率设置为 Rb 原子 D1 线的跃迁频率, 即  $3.78 \times 10^5$  GHz (对应波长为 794.98 nm), 压力展宽则由缓冲气体  $^{21}\text{Ne}$  和淬灭气体  $\text{N}_2$  的压强主导。本文采用的 K-Rb- $^{21}\text{Ne}$  气室压强为 2 个大气压, 对应的压力展宽为 13 GHz。从图 1 可以看出, 通过测量线偏振光入射气室前后的光强比, 可以得到气室内部原子的温度信息。

此外, 从式(5)中可以得知, 在确定气室参数的情况下, 入射气室前后的光强比除了与气室温度相关, 还会受到线偏振光频率的影响。用波长来表征线偏振光的频率, 图 2 为不同线偏振光波长下入射气室前后的光强比随气室温度的变化规律。可以看到, 当线偏振光的波长接近 Rb 原子 D1 线跃迁频率所对应的波长

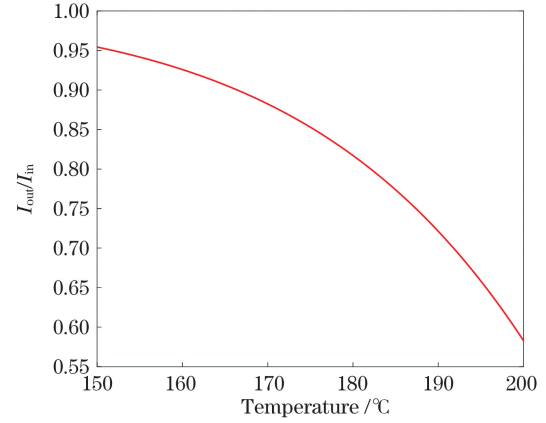


图 1 入射气室前后的光强比随气室温度的变化

Fig. 1  $I_{out}/I_{in}$  versus air cell temperature

时, 入射气室前后的光强比随气室温度变化的斜率越大, 其对气室温度的变化越敏感。因此, 为了保证测量气室温度的精确度, 线偏振光的频率应选择原子跃迁频率。

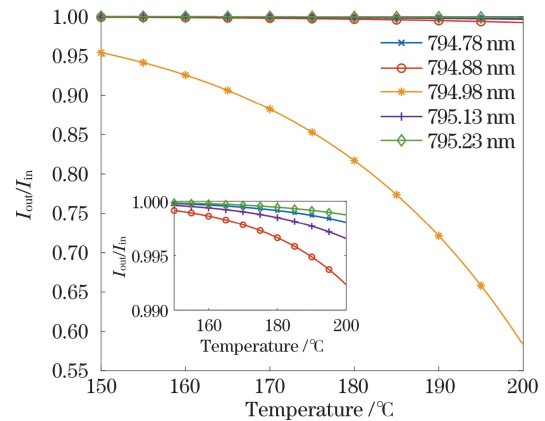


图 2 不同线偏振光波长下入射气室前后的光强比随气室温度的变化

Fig. 2  $I_{out}/I_{in}$  versus air cell temperature under different linearly polarized light wavelengths

## 2.2 碱金属气室温度的仿真

原子系统工作在高密度条件下是惯性测量仪表实现 SERF 态的必要条件, 因此需要对碱金属原子气室进行加热。目前实验中采用柔性加热膜中通以高频电流的加热方式, 通过高导热系数的材料将热量从加热膜传递到气室中。图 3(a)为实验中设计的烤箱结构, 采用氮化硼材料, 导热系数为  $25.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 长度为 40 mm, 纵向通光孔直径为 10 mm, 横向通光孔直径为 5 mm, 表面覆盖有柔性加热膜; 图 3(b)为球形碱金属气室, 其直径为 10 mm, 壁厚约为 0.5 mm, 通过支架将其固定在烤箱中心。

设定烤箱温度为  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , 烤箱表面与空气的热对流交换系数为  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 通光面与空气的热对流交换系数为  $3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。图 4(a)仿真了烤箱的温度分布。从仿真结果可以看出, 由于热传递和热辐射过程中的能量损耗, 碱金属气室的温度低于烤箱温度并存在温度梯度。从图 4(b)的仿真结果可以明显看

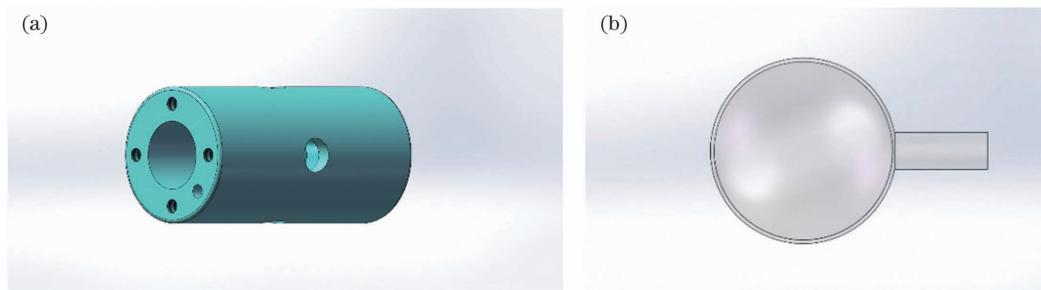
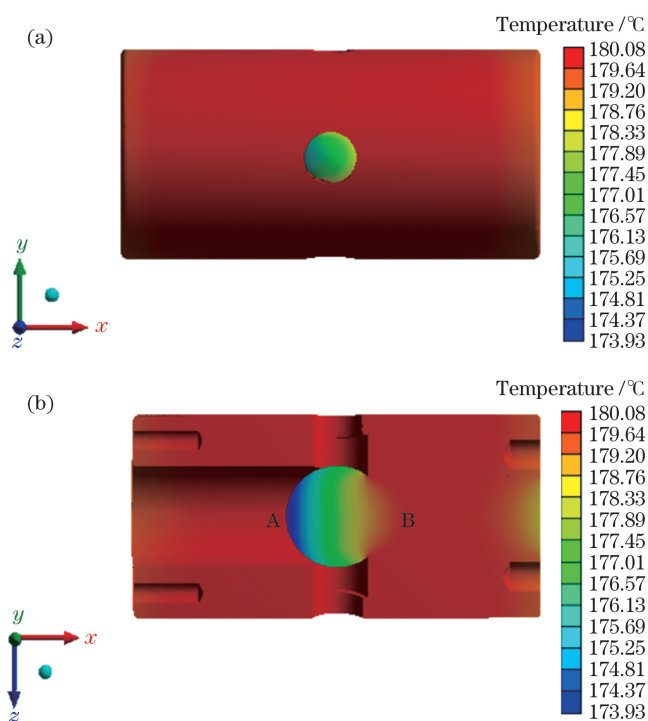


图 3 加热结构三维图。(a)烤箱;(b)气室

Fig. 3 Three dimensional drawings of heating structure. (a) Oven; (b) air cell

图 4 加热结构的温度云图。(a)烤箱和气室的温度云图;  
(b)烤箱和气室截面的温度云图Fig. 4 Temperature cloud diagrams of heating structure.  
(a) Temperature cloud diagram of oven and cell;  
(b) temperature cloud diagram of section of oven and cell

到,气室温度梯度主要存在于  $x$  轴方向,B 侧的温度明显高于 A 侧的温度。从式(1)可知,SERF 惯性测量仪表的旋光角信号与原子密度相关,气室温度梯度的存在导致气室内部原子的密度分布不均,从而原子自旋弛豫率增大,限制了 SERF 惯性测量仪表灵敏度的进一步提升。下文将通过本文所提出的光谱吸收方法,对 SERF 惯性测量仪表的碱金属气室温度与温度梯度进行原位测量,并通过与仿真结果的对比,验证该方法的准确性。

### 3 分析与讨论

本文所用实验装置如图 5 所示。激光源采用分布式反馈半导体激光器,出射光斑直径为 1 mm,激光线宽为 1 MHz,出射激光功率最高为 80 mW。实验中,

在激光器注入电流一定的情况下,通过改变激光器温度来实现波长调节,可调节范围为 794.6~796.0 nm。由上面的分析可知,线偏振光的频率为原子跃迁频率时入射气室前后的光强比对气室的温度变化最敏感,因此调节激光器温度,使其频率等于 Rb 原子的 D1 线跃迁频率。激光器出射光束经线偏振片起偏后,通过 1/2 玻片和偏振分光棱镜(PBS)组合可实现主路光与旁路光的光强比调节。主路光进入碱金属气室参与后续实验,旁路光进入光电探测器 1 转化为电压信号传输到上位机中,得到入射气室前的光强信息。气室是直径为 10 mm 的球形气室,内部充有自然丰度的碱金属 K 原子和 Rb 原子、惰性气体  $^{21}\text{Ne}$  以及淬灭气体  $\text{N}_2$ ,内部总气压大约为 2 个大气压。将气室放入贴有柔性加热膜的烤箱中,整个气室及烤箱处于由三层磁屏蔽筒和三轴亥姆霍兹线圈形成的弱磁环境中。主路光经过气室后直接入射到光电探测器 2 中,其同样转化为电压信号并传输到上位机中,得到入射气室后的光强信息。光电探测器的敏感面尺寸为 10 mm × 10 mm,可保证实验中的线偏振光完全被接收而不溢出。室温下原子对激光的吸收可以忽略,但由于气室本身存在光损耗,室温下入射气室前后的光强比并不为 1。因此上位机中对光电探测器 2 的信号增加了一个偏置,其大小为其他因素引起的光强变化量  $\delta$  对应的电压值,该值会在实验前进行测试标定。烤箱外表面放置了温度传感器用来监测温度,以保证实验条件与仿真条件一致。

首先在不同的烤箱温度下基于光谱吸收法进行气室温度测量。线偏振光沿  $z$  轴方向入射气室,激光束对准球形气室的中心。在实验中,保持激光器的电流不变,频率设为  $3.78 \times 10^5$  GHz,在 160~190 °C 的烤箱温度范围内,每隔 10 °C 测量入射气室前后的线偏振光光强,反复进行多次。测试结果与仿真结果的对比如图 6 所示。可以看出,实测值与仿真值随温度的变化具有相同的规律,但存在偏差。温度越高,实测值与仿真值的偏差越大。这是由于在测量时,温度点以烤箱的温度为基准。同一温度点下的实测值大于仿真值表示气室中心处的温度小于烤箱处的温度,因此线偏振光入射气室前后的强度比值实测值大于仿真值。两者差值随着温度的增大而增大,这是由于烤箱温度越



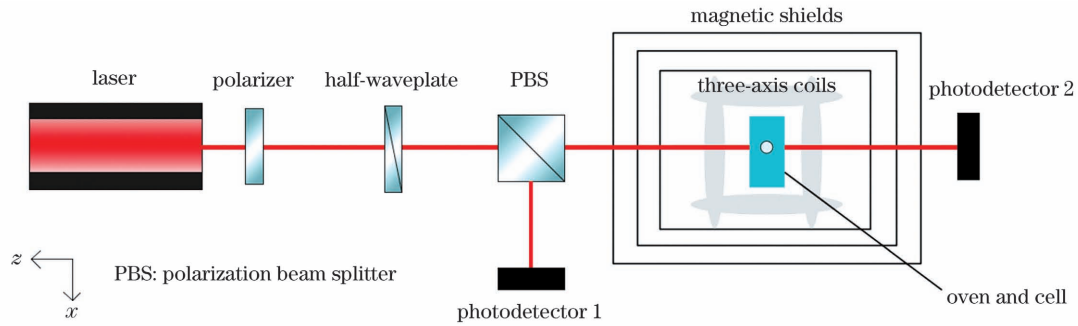


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic of experimental devices

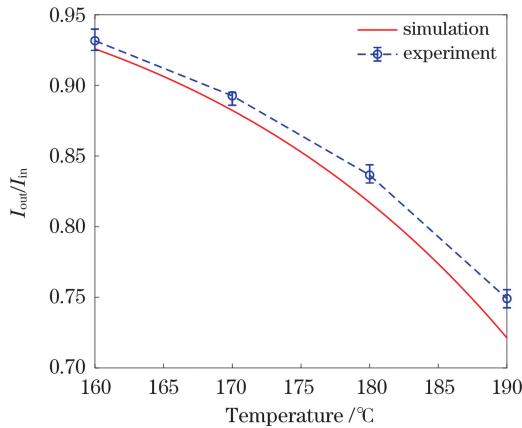


图 6 不同温度下气室中心处入射气室前后的光强比仿真值与实测值

Fig. 6 Simulated and measured  $I_{out}/I_{in}$  at center of air cell under different temperatures

高,其与气室中心处的温度差值越大,这符合气室加热结构的仿真结果。以烤箱温度为 180 °C 为例,线偏振光入射气室前后的比值实测值为 0.8365,相同比值下仿真结果对应的温度为 177.14 °C。表示此时气室中心处的温度为 177.14 °C,与烤箱温度相差 2.86 °C。

其次,我们进行了  $x$  轴方向温度梯度的测量。激光器被放置在高精度位移台上,其可以在  $x$  方向上平移,位移精度为 0.1 mm。利用激光器配合位移台可以得到  $x$  轴方向不同点处的线偏振光入射气室前后的光强比,根据式(5)将这些信息转化为温度信息即可得到气室  $x$  轴方向的温度梯度。将实验装置中烤箱的温度设置为 180 °C,以气室中心为 0 点,将沿  $x$  轴

正向的移动记为+,反之记为-,步进为 0.5 mm。表 1 为不同探测点处线偏光传播方向上气室加热结构的温度仿真值。对于同一探测点处,在探测光传播方向上每隔 2 mm 取一个点,4 个点处的温度平均值为该探测点处气室加热结构的温度仿真值。气室温度实测值与气室加热结构温度仿真值的对比如图 7 所示。可以看出,温度仿真值与实测值的变化趋势一致。仿真结果显示,气室  $x$  轴方向的温度梯度为 0.725 °C/mm,实测结果为 0.744 °C/mm,其结果在误差允许的范围内,表明光谱吸收法能够很好地评估气室内部的温度梯度。而偏离原点处的实验测量温度值小于仿真值的原因,这是由于气室为球形玻璃结构,偏离原点处的激光通过气室的光程变小,因此入射气室前后的光强比  $I_{out}/I_{in}$  变大。

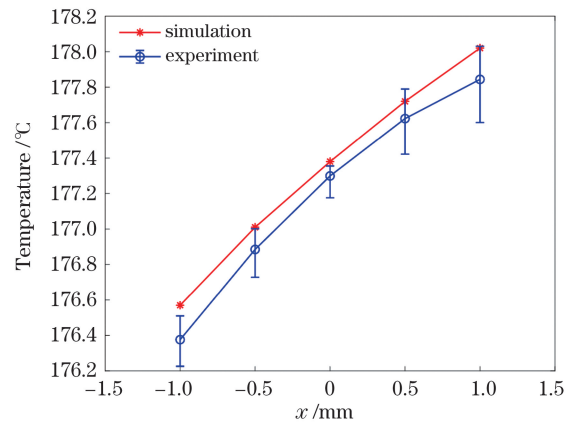


图 7 气室  $x$  轴方向的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution in  $x$ -axis direction of air cell

表 1 不同探测点处气室加热结构的温度仿真值

Table 1 Simulated temperatures for air cell heating structure at different detection points

Position of detection point /mm	Simulated result / °C				Average value / °C
	1	2	3	4	
-1.0	176.59	176.61	176.64	176.45	176.57
-0.5	176.99	177.08	177.05	176.9	177.01
0	177.34	177.4	177.42	177.35	177.38
0.5	177.7	177.76	177.73	177.7	177.72
1.0	177.97	178.05	178.04	178.03	178.02

## 4 结 论

提出了一种基于光谱吸收技术的碱金属气室全域温度以及温度梯度的在线测量方法,利用 SERF 惯性测量仪表中已有的线偏振光通过气室前后的光强比,可获得准确的气室温度场信息。分析了利用光谱吸收法测量气室温度的原理,讨论了激光频率对测温精度的影响,并通过对比实验与仿真结果验证了所提方法的有效性。所提方法适用于包括 SERF 惯性测量仪表在内的高精度量子传感器的气室温度及温度梯度的精确评估,为无磁电加热系统与烤箱结构的优化设计提供了重要的技术支撑。

### 参 考 文 献

- [1] Xie H K, Fedder G K. Integrated microelectromechanical gyroscopes[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2003, 16(2): 65-75.
- [2] Nayak J, Pinnoji P D. Advanced optical gyroscopes [C] // Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP), December 17-18, 2013, New Delhi, India. New York: IEEE Press, 2013.
- [3] Zheng G. The new-conceptual fiber-optic gyroscope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7853: 78530Y.
- [4] Fang J C, Qin J. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications[J]. *Sensors*, 2012, 12(5): 6331-6346.
- [5] Zhang L, Gao W, Li Q, et al. A novel monitoring navigation method for cold atom interference gyroscope[J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 222.
- [6] Kitching J, Knappe S, Donley E A. Atomic sensors: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 1749-1758.
- [7] 秦杰. 基于  $^{129}\text{Xe}$ -Cs 的 SERF 原子自旋陀螺仪原理实验研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.  
Qin J. Experimental study on the principle of SERF atomic spin gyroscope based on  $^{129}\text{Xe}$ -Cs Kramp-Karrenbauer CS [D]. Beijing: Beihang University, 2012.
- [8] 郝杰鹏, 周斌权. 碱金属气室无磁电加热技术与系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25(5): 180-183.  
Hao J P, Zhou B Q. Study on non-magnetic heating technology and system for alkali vapor cells[J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(5): 180-183.
- [9] Wang Y P, Wang D N, Jin W.  $\text{CO}_2$  laser-grooved long period fiber grating temperature sensor system based on intensity modulation[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(31): 7966-7970.
- [10] 刘帅, 曾琦, 黎超超, 等. 基于飞秒光纤光栅的准分布式高温传感器及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(1): 0106007.  
Liu S, Zeng Q, Li C C, et al. Application of quasi-distributed high temperature sensor based on femtosecond fiber Bragg grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(1): 0106007.
- [11] Castro P, LeCun R, Manana M, et al. Infrared temperature measurement sensors of overhead power conductors [J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7126.
- [12] 艾苏曼, 邓昊, 黄安, 等. 基于宽波段吸收光谱测温方法的影响因素数值研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1830003.  
Ai S M, Deng H, Huang A, et al. Numerical study on influencing factors of thermometry method based on broadband absorption spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1830003.
- [13] 郑文杰, 刘铁根, 楚奇梁, 等. 基于气体吸收谱线宽度的温度检测方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(5): 389-393.  
Zheng W J, Liu T G, Chu Q L, et al. A method to detect temperature based on gas absorption spectral linewidth [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, 15(5): 389-393.
- [14] 廖文汉, 潘奕捷, 王贺, 等. 基于铯 133 原子 D1 线直接吸收光谱的多普勒展宽热力学温度测量[J]. *光学技术*, 2019, 45(1): 40-43.  
Liao W H, Pan Y J, Wang H, et al. Doppler broadening thermodynamic temperature measurement based upon direct laser absorption spectroscopy on  $\text{Cs}^{133}$  D1 line [J]. *Optical Technique*, 2019, 45(1): 40-43.
- [15] Budker D, Gawlik W, Kimball D F, et al. Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(4): 1153-1201.
- [16] 段利红. SERF 原子陀螺仪信号检测误差分析及其抑制方法实验研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2018: 46-47.  
Duan L H. Experimental study on error analysis and suppression for signal detection of SERF atomic gyroscope [D]. Beijing: Beihang University, 2018: 46-47.
- [17] Alcock C B, Itkin V P, Horrigan M K. Vapour pressure equations for the metallic elements: 298-2500 K [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1984, 23(3): 309-313.
- [18] Demtröder W. *Laser spectroscopy: vol. 1: basic principles* [M]. Berlin: Springer, 2013.

## Temperature Gradient Measurement Method for Alkali Metal Cell Based on Spectral Absorption

Ruan Jiasen<sup>1,2</sup>, Duan Lihong<sup>1,2\*</sup>, Quan Wei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup> Hangzhou Innovation Institute (Yuhang), Beihang University, Hangzhou 310023, Zhejiang, China

### Abstract

**Objective** Spin exchange relaxation free (SERF) atomic inertial measurement instruments have become important in paving the direction for the potential development of ultra-high-precision inertial measurement instruments by virtue of their ultra-high theoretical accuracy and easy integration. The realization of the SERF state requires a stable and uniform atomic density, which is closely related to temperature. Therefore, it is necessary to accurately measure the temperature and its gradient inside a cell. Among the various existing methods for temperature measurement, such as the platinum resistance method, the fiber grating method, the technique of infrared temperature measurement, and the spectral absorption method, only the last one can accurately measure the temperature inside the cell. However, all existing

research on the spectral absorption method focuses on the accuracy of temperature measurement and the analysis of influencing factors. Thus, relevant research on the temperature gradient that exists inside a cell is lacking. Therefore, in this study, the spectral absorption method is proposed to measure the temperature field inside the alkali metal cell of the SERF inertial measurement system. A longitudinal temperature gradient is obtained inside the cell by the continuous control of the laser orientation in the incident chamber. This method can accurately evaluate the cell temperature and the temperature gradient of high-precision quantum sensors. It provides important technical support for optimizing the design of electric heating without a magnetic system or an oven structure.

**Methods** In this study, the spectroscopic absorption is used to measure the temperature inside a cell. First, the relationship between the temperature and the ratio of the intensity of linearly polarized light before and after passing through the gas cell is theoretically analyzed. Simultaneously, the influence of the frequency of the linearly polarized light on the accuracy of temperature measurement is also analyzed, and the linearly polarized light frequency under the highest temperature sensitivity is obtained. Subsequently, an experimental platform is built. The temperature at the center of the cell is measured and compared with that of platinum resistor at the monitoring point. After that, the temperatures at five points at equal interval in the longitudinal direction of the cell are also measured by moving the light source on the stage, and the results thus obtained are compared with the temperature simulation results to evaluate the accuracy of the method.

**Results and Discussions** When the parameters of the cell are determined through theoretical analysis, it is observed that the ratio of the intensity of light before and after entering the cell is affected jointly by the cell temperature as well as the frequency of the linearly polarized light. The ratio decreases with an increase in cell temperature (Fig. 1). When the frequency of the linearly polarized light is close to the transition frequency at the D1 line of the Rb atom, the ratio increases with the temperature change rate of the gas cell, thus indicating that it is more sensitive to the temperature change (Fig. 2). At the optimum laser frequency, the temperature at the center of the cell is measured using an experimental setup. The result obtained is less than that at the oven walls, and this difference increases as the temperature increases (Fig. 6). The study shows a loss in heat conduction from the oven to the cell, and this loss increases as the oven temperature is increased, which is consistent with the actual situation. Subsequently, four points are selected at equal interval in the longitudinal direction of the cell, and the test results show that the longitudinal temperature gradient of the cell is  $0.744\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$  (Fig. 7). For comparison, the simulation results at the same location indicate that the temperature gradient of the cell is  $0.725\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$  (Table 1). The two results are comparable with the difference lying in the allowable error range, thus showing the accuracy of this method in evaluating temperature gradients.

**Conclusions** In this study, an online method for measuring the temperature and its gradient in alkali metal cells based on spectral absorption is proposed. This method can obtain accurate temperature field information using the intensity ratio of the linearly polarized light before and after entering the cell in the SERF inertial measurement instrument. At the optimal laser frequency, the temperature gradient of the cell in the current heating structure is  $0.744\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ . This result is similar to the simulation result, which shows the accuracy of this method. Thus, this method is suitable for the accurate evaluations of the cell temperature and the temperature gradient of high-precision quantum sensors, including SERF inertial measurement instruments, and provides important technical support for the optimization of the design of electric heating without a magnetic system or oven structure.

**Key words** measurement; spectral absorption method; temperature measurement; temperature gradient; spin exchange relaxation free