

基于差分检测的球形碱金属气室导致 线偏光转角的测量

刘 刚, 赵毓婷, 全 伟

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191

摘要 对球形碱金属气室导致的线偏光振动方向转角进行了理论研究及差分检测实验测量。结果表明, 当光束通过中心位置、入射面与振动方向相垂直或平行的位置时, 气室对其偏振态没有影响, 而其他位置均会产生一定偏转角, 且偏转角随位置的不同而变化。对直径 12 mm、壁厚 0.9 mm 的气室, 偏离中心 0.7 mm 处产生的理论偏转角约为 0.08° 。在使用球形碱金属气室作为中心元件的仪器时, 需要考虑其对线偏光转角的明显影响。

关键词 测量; 偏振检测; 线偏光转角; 差分检测; 光学仿真; 球形碱金属气室

中图分类号 O436.3 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0412005

Measurement of Linearly Polarized Light Rotation Caused by Spherical Alkali Vapor Cell Based on Difference Detection

Liu Gang, Zhao Yuting, Quan Wei

*National Key Laboratory of Science and Technology on Inertial Laboratory, School of Instrument Science
and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

Abstract Rotation of the linearly polarized light caused by spherical alkali vapor cell is studied theoretically and measured experimentally. The results show that the vapor cell has no effect on the polarization state of linearly polarized light when the light beams pass through the cell center, and the incident plane is parallel or perpendicular to the polarization orientation. While the other positions will produce a certain rotation, and the rotation angle varies with the positions. For the ideal vapor cell with the external diameter of 12 mm and thickness of 0.9 mm, the theoretical rotation is up to 0.08° when a position is off center of 0.7 mm. Therefore, the effect of polarization rotation should be considered, when using the spherical alkali vapor cell as a central element of the instrument.

Key words measurement; polarization detection; polarization rotation; difference detection; optical simulation; spherical alkali vapor cell

OCIS codes 120.5410; 260.5430; 040.5570; 350.4800

1 引 言

碱金属气室作为封装工作原子的器件, 在原子钟^[1]、原子磁强计^[2-3]、原子陀螺仪^[4-5]等仪器的研究和开发中起到重要作用。由于原子器件对工作原子的操控和检测都依赖于光束^[2], 气室对通过其中的光束会产生一定的影响, 因而碱金属气室的质量在一定程度上影响了原子器件的性能, 并得到广泛关注。

目前, 对于碱金属气室的研究主要集中在新型气室材料、生产工艺和尺寸参数优化等方面。气室材料通常为透明玻璃材料^[6-7], 也可采用特定晶体材料进行封装^[8]。气室制备工艺根据应用的不同逐渐从传统吹制法^[6,9]发展为光胶黏接、微加工以及化学反应法等多种制备方法^[10-13]。气室尺寸根据不同应用需求, 直径范围从微米级到厘米级不等。此外, 为了增强气室的抗弛豫特性, 气室表面抗弛豫镀膜^[14-16]也是研究的重点。原子器件的实验装置中最常用的碱金属气室有球形^[7,14]、方形^[10]和圆柱形^[11]等形状。其中, 球形玻璃气室

收稿日期: 2016-11-09; 收到修改稿日期: 2017-01-01

基金项目: 国家自然科学基金(61227902, 61374210)

作者简介: 刘 刚(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事航天器惯性执行机构、精密机电控制和原子磁强计等方面的研究。

E-mail: lgang@buaa.edu.cn

具有良好的抗压特性、抗弛豫特性及多通光口径等优点^[9],是研究与应用的重点,但其形状和生产工艺导致质量难以保证。同时,碱金属气室在应用过程中需要光束对原子蒸汽进行检测,而碱金属气室本身导致的线偏光转角会对检测结果产生影响^[17],故检测球形碱金属气室导致的光束偏振态改变非常重要。装置研究中通常选择较细的光束并调节入射位置为气室中心以避免线偏光转角。但是,入射气室的检测光束具有一定的几何尺寸,准确调节入射气室中心位置难度较大,因此,对球形气室实际引入的线偏光转角的研究和检测更困难。

线偏光偏振转角的检测方法主要有机械调制法^[18]、差分检测法以及法拉第调制检测法^[19-20]等。其中:机械调制法操作简便,精度较低,且应用有限;差分检测法精度较高,精度极限由光路中器件性能决定,常应用于原子磁强计等高精度实验研究;法拉第调制检测法精度最高,可达 10^{-6} 量级,是超高精度检测的常用手段。

本文对球形碱金属气室对线偏光可能产生的振动方向偏转进行理论计算与仿真,并根据计算值采用差分检测方法进行检测并得到结果。结论对相关原子仪器的开发和检测具有一定参考作用。

2 理论分析与仿真

碱金属气室的理论分析过程为:利用几何光学对经过碱金属气室的线偏光进行计算,得到出射光束的偏振状态与气室导致的线偏光振动方向偏转角的大小。由几何光学的折射定律与非涅耳定律,可以得到通过碱金属气室的任意特定位置的线偏光发生的转动。光学仿真主要利用理论计算结果,通过计算机得到对应位置的偏振状态,以图像形式表示经过气室后的线偏振光受到影响的状态。研究中全部以理想气室模型为基础进行计算和仿真^[7,12],理想气室模型如图1所示。

2.1 偏振转角的理论计算

当一束线偏振光入射气室表面时,会先后产生4次折射,其光路如图2所示,光线由带箭头的直线表示, θ_1 为一次折射的入射角。常用于气室制备的玻璃材料本身不具有双折射效应,由于其形状的特殊性,不同入射点的入射角度不同,折射效果会有差异。为方便计算,将入射光束分解为两个振动方向相互垂直的偏振分量(通常以s和p表示)。由菲涅耳公式可知,不同振动方向的线偏振光透过率不同,经过球形气室4次折射后得到的合成线偏光的振动方向与原始入射光存在差异,具体表现为

$$\Gamma_{sr} = \left[1 - \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta'_1)}{\sin^2(\theta_1 + \theta'_1)} \right]^2 \cdot \left[1 - \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta'_2)}{\sin^2(\theta_2 + \theta'_2)} \right]^2, \quad (1)$$

$$\Gamma_{pr} = \left[1 - \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta'_1)}{\tan^2(\theta_1 + \theta'_1)} \right]^2 \cdot \left[1 - \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta'_2)}{\tan^2(\theta_2 + \theta'_2)} \right]^2, \quad (2)$$

式中 Γ_{sr} 和 Γ_{pr} 分别为垂直和平行于折射面的线偏光分量的透过率, θ 为经过气室表面时发生折射的入射角、折射角, θ_1, θ_2 表示入射角, θ'_1, θ'_2 表示折射角,下角标数字表示所经过折射次数,这些角度均可通过几何光学计算得出。

以入射垂直方向线偏光为例,在气室表面的不同位置,s光和p光可分别表示为

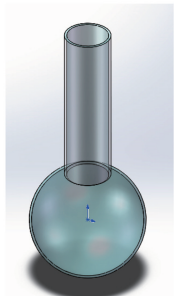


图1 球形碱金属气室理想模型示意图
Fig. 1 Ideal model of spherical alkali vapor cell

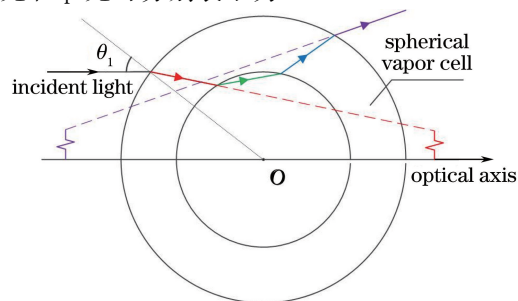


图2 光束经过球形碱金属气室折射示意图
Fig. 2 Schematic of refraction while light hits a spherical vapor cell

$$I_s = I \cdot \sin^2 \alpha, I_p = I \cdot \cos^2 \alpha, \quad (3)$$

式中 α 为入射线偏光的振动方向与折射平面之间的夹角,其随位置的不同发生相应变化, I 为入射光光强, I_s 、 I_p 分别为 s 和 p 方向的光强分量。因此,通过碱金属气室后两个方向上的光强分别为

$$\begin{cases} I_{st} = I \cdot \sin^2 \alpha \cdot \left[1 - \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta'_1)}{\sin^2(\theta_1 + \theta'_1)} \right]^2 \cdot \left[1 - \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta'_2)}{\sin^2(\theta_2 + \theta'_2)} \right]^2 \\ I_{pt} = I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \left[1 - \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta'_1)}{\tan^2(\theta_1 + \theta'_1)} \right]^2 \cdot \left[1 - \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta'_2)}{\tan^2(\theta_2 + \theta'_2)} \right]^2 \end{cases}, \quad (4)$$

合成后会产生一个偏离原来振动方向的角度,该角度可表示为

$$\Delta\alpha = \arctan [(I_{st}/I_{pt})^{1/2}] - \alpha. \quad (5)$$

由此可见, $\Delta\alpha$ 与 α 、 θ 有关。图 3(a)、(b) 分别给出了 α 和 θ 对 $\Delta\alpha$ 的影响,其中:图 3(a) 为 α 给定, $\Delta\alpha$ 随 θ 的变化曲线,即从气室中心到边缘一条特定直径上各个位置对应的偏振方向转角变化,可见 θ 越小对应振动方向的偏转角越小,越靠近中心处气室的影响越不明显;图 3(b) 为 θ 给定, $\Delta\alpha$ 随 α 的变化曲线,即以中心光轴为圆心的特定直径圆环上各个位置对应的线偏光转角变化。当 $\alpha=45^\circ$ 时,气室的影响最明显,而当 α 为 0° 或 90° 时,气室对检测光的偏振态没有影响,即当折射面与线偏光振动方向相互垂直或平行时,影响最小。另外,气室通常由特定材料制备,材料折射率保持不变,因此上述计算过程中材料折射率为 1.51,气体介质折射率为 1。

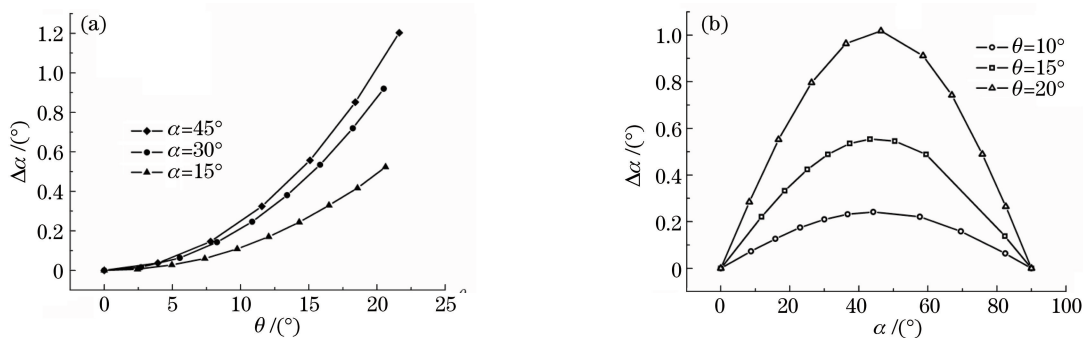


图 3 $\Delta\alpha$ 分别与 θ 和 α 的关系曲线。(a) α 确定;(b) θ 确定

Fig. 3 Curves of $\Delta\alpha$ versus θ and α respectively. (a) Certain α ; (b) certain θ

2.2 偏振转角的仿真

根据上述计算结果,仿真得到对应每个位置的偏转角度图像。为了验证计算结果的正确性,分别采用 Zemax 和 Matlab 两种软件进行仿真并对比结果。仿真参数如下: $2r=12\text{ mm}$, $2r'=10.2\text{ mm}$, $n=n''=1$, $n'=1.51$,其中, $2r$ 和 $2r'$ 分别为球形气室的外径和内径, n 、 n' 和 n'' 分别为气室外介质、气室材料和气室内介质对测量光束的折射率。对于未封装的气室,气室内外介质均为空气,因而有 $n=n''$,设置入射光方向为竖直方向。得到的结果如图 4 所示。

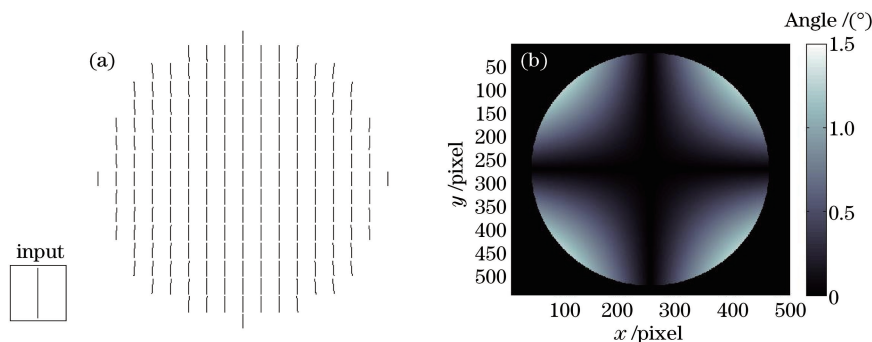


图 4 不同位置偏转角的仿真结果。(a) Zemax 仿真;(b) Matlab 仿真

Fig. 4 Simulation results of rotation angle with different positions. (a) By Zemax; (b) by Matlab

图 4(a) 为 Zemax 仿真结果,直线表示线偏光,其方向为偏振光的振动方向,可以直观地看到位于中心处及中心水平线和垂线(即 α 为 0° 和 90°) 位置上的线偏光方向没有发生改变,均为竖直方向;其他位置上的线

偏光均有一定程度偏转,且不同位置产生的偏转角度存在差别,具体表现为靠近中心处偏转角较小,边缘处偏转角较大。图 4(b)为 Matlab 仿真结果,图像大小为 539 pixel×507 pixel,水平和竖直方向上每个像素点对应尺寸分别为 0.024 mm 与 0.027 mm,图像中心位置即为气室中心,不同颜色表示不同偏转角的大小,其最小值为 0°(中心处),最大值为 1.244°(边缘处)。由图 4(b)可知,对直径 12 mm、壁厚 0.9 mm 的气室,偏离中心 0.7 mm 处产生的理论偏转角约为 0.08°。两种仿真方式均证明碱金属气室对线偏光的偏振方向会产生影响,且影响的大小随位置的不同而改变。

3 实验检测

为验证计算与仿真结果的正确性,对一碱金属气室进行实验测量。理论计算结果表明,在仿真范围内,气室能够产生的最大转角为 1.244°,该角度范围适于差分检测法进行测量。差分检测的装置如图 5 所示。

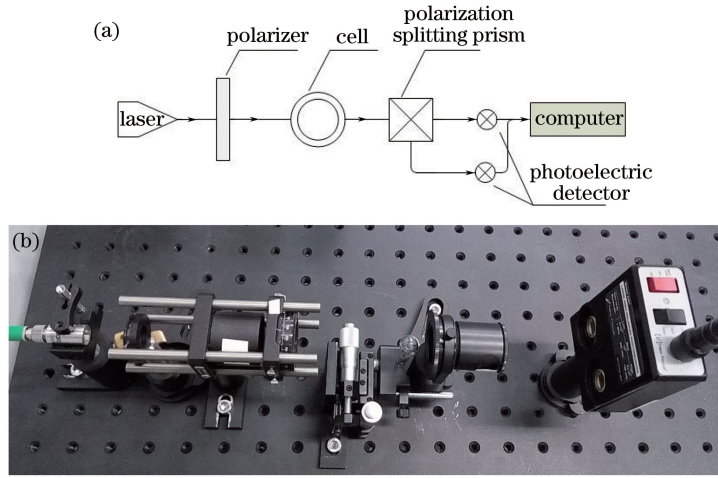


图 5 差分检测装置示意图。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 5 Schematic of difference detecting system. (a) Schematic; (b) physical map

差分检测的主要装置包括光源、起偏器、偏振分光棱镜以及光电探测器等。起偏器将光束调制为线偏光,在未加入待测气室时调节偏振分光棱镜,按照特定方式分割线偏光,通常以 45°分割线偏光,使得到达两个光电探测器的光强相等,此时得到的差分结果为 0;在放入待测介质后,线偏光发生偏转,经过偏振分光棱镜分割后,两个方向上的光强分量产生差异,由此计算得到待测介质引入的线偏光振动方向偏转角。

首先,入射一定角度的光强为 I_0 的线偏光,在未放入气室时调节偏振分光棱镜(沃拉斯顿棱镜组)的角度,使得入射到两个差分检测光电探测器的光强相等,即

$$I_1 = I_2 = I_0 \cos^2(\pi/4). \quad (6)$$

在放入气室后,入射到光棱镜的线偏光引入了一个转动角度,设该角度为 φ ,则此时经过分光棱镜后两探测器入射光强分别为

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \cos^2(\varphi - \pi/4) \\ I_2 = I_0 \sin^2(\varphi - \pi/4) \end{cases} \quad (7)$$

根据两者差分结果求解由碱金属气室引入的线偏光转角大小,其结果可表示为

$$\varphi = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}\right) = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{\Delta I}{I_0}\right), \quad (8)$$

式中 ΔI 为光强的差分值。

差分检测的结构清晰、操作方便、解算过程简单,且精度较高。实验中光电探测器的输出信号为电压信号,根据光电探测器可将其转化为光强,然后通过对应的光强信号即可解算相应的角度信息。

由于气室不同部分对线偏光的影响不同,因而需要测量多个位置,实验中选用二维平移台对气室的位置进行微调。具体操作方法为:调节光棱镜使差分检测输出为 0,将待测气室固定在二维平移台上,并安装在

光路中;通过二维平移台微调气室位置,找到气室中心点,因为中心点处对两个方向上的微调均不敏感,此时差分检测输出为0;以该点为中心,在平移台的两个方向上分别进行微调,记录每次调节所对应位置的差分值,通过输出的差分值即可计算每个位置上由气室导致的线偏光的转动角度。考虑到球形气室对通过其中的光束有一定发散作用,实验中测量范围在距离中心处2 mm以内。

4 检测结果与分析

在实际测量过程中,在水平和竖直两个方向上分别采用0.5 mm步长,每个方向测量5个点,共计25个点。实验中采用New Focus激光器为光源,工作电流为98.4 mA,工作电压为42.7 mV,输出功率为10.0 mW,入射气室的光强为1.20 mW,光电探测器的输出信号为电压信号,测量得到不同位置的差分结果如表1所示。对测试数据进行解算得到对应的偏转角度结果如表2所示。理论计算结果如表3所示。

表1 差分检测数据

Table 1 Data of difference detection

Position /mm	Differential voltage /mV				
	5.11 /mm	5.61 /mm	6.11 /mm	6.61 /mm	7.11 /mm
5.36	-21.0	-16.0	-9.0	5.0	6.2
5.86	-15.0	-9.3	-2.2	5.6	1.4
6.36	6.2	1.9	-0.2	-8.0	-13.0
6.86	43.0	4.0	-5.0	-10.0	-17.0
7.36	58.0	14.0	-6.0	-13.0	-20.0

表2 不同位置的线偏光转角的测量值

Table 2 Measured rotation angle of linearly polarized light for different positions

Position /mm	Measured value of linearly polarized angle /($^{\circ}$)				
	5.11 /mm	5.61 /mm	6.11 /mm	6.61 /mm	7.11 /mm
5.36	-0.42	-0.32	-0.17	0.09	0.12
5.86	-0.30	-0.19	-0.04	0.07	0.11
6.36	0.12	0.03	-0.003	-0.16	-0.26
6.86	0.86	0.79	-0.09	-0.20	-0.34
7.36	1.15	0.28	0.12	-0.26	-0.39

表3 不同位置线偏光转角的理论值

Table 3 Theoretical rotation angle of linearly polarized light for different positions

Position /mm	Theoretical value of linearly polarized angle /($^{\circ}$)				
	5.11 /mm	5.61 /mm	6.11 /mm	6.61 /mm	7.11 /mm
5.36	-0.306	-0.156	0	0.156	0.306
5.86	-0.156	-0.079	0	0.079	0.156
6.36	0	0	0	0	0
6.86	0.156	0.079	0	-0.079	-0.156
7.36	0.306	0.156	0	-0.156	-0.306

为更直观地反映各位置对应的偏转角大小和不同位置处偏转角的差异,以上理论计算和测量结果可以采用图6进行比较。其中,图6(a)对应表3的理论偏转角;图6(b)对应表2的实际测量值,不同颜色表示对应偏转角的大小。

以上测试结果的中心位置在二维平移台的(6.11 mm,6.36 mm)处,数据的正负表示线偏光偏转的方向。应用的光电探测器参数为low挡,对应 2×10^3 V/A,对应光功率0.6 A/W,根据该参数将差分光电探测器的输出的电压值转化为差分光强值,并结合(8)式即可计算出对应的偏振转角大小。从图6(a)和图6(b)中可知,实验结果与理论计算非常相近:1)靠近气室中心处的偏转角比较小,靠近边缘处的偏转角比较大,与图3(a)的结论一致;2)不同区域内,处于水平中心和竖直中心线上位置对应的偏转角基本为0,越远离中心线位置产生的偏转角越大,在 45° 位置处偏转角最大,与图3(b)的结论一致。至此,已验证理论计算和仿真实验

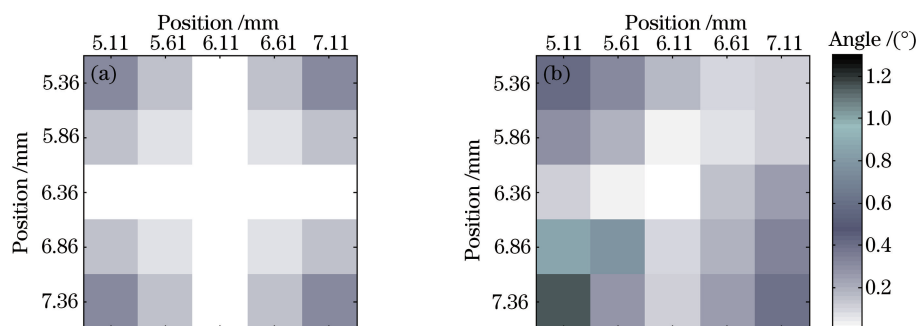


图 6 不同位置线偏光转角大小对比。(a)理论值;(b)测量值

Fig. 6 Comparison of rotation angle of linearly polarized light for different positions.

(a) Theoretical results; (b) experimental results

结果的正确性。

由表 2 与表 3 可以看出,实际测量得到的数据与理论值相比偏大,主要原因有以下几点:1) 理论计算和仿真采用的气室壁厚为一经验值,实际材料参数可能相对预期数值偏大,导致理论结果偏小;2) 球形气室对光束具有一定的发散作用,当光束入射中心位置时扩散现象微弱,而当检测光束偏离中心位置时,出射光束会产生一定的位置偏移和光斑扩散,这对光电探测器采集光强信息产生误差,造成数据不准确;3) 理论计算中得到的数据是针对单点的偏转角,而实验过程中采用的检测光束虽然极细,但仍有一定的直径,这也会产生检测值相比理论值偏大的结果;4) 检测光束光强稳定性、气室表面的清洁程度和气室材料本身的均匀性等性能缺陷均会对检测结果产生一定影响。

综上,球形气室对通过其中的线偏光的振动方向具有一定的影响,且不同位置的影响程度不尽相同。通过检测实验结果可以看出,气室靠近中心位置的偏转角比较微弱,在实际使用中,应该尽量将光束的入射位置调节在中心位置上,以减小气室对光束偏振态产生的影响。

5 结 论

通过理论研究精确计算了球形碱金属气室对线偏光振动方向的转角的影响,并利用 Zemax 与 Matlab 软件进行了相应的仿真实验。两种仿真结果均验证了球形气室对线偏光偏振方向的影响随位置的变化而变化。最后,通过差分检测的方法对气室样本进行测量,得到在距离中心 0.7 mm 处与入射线偏光偏振角方向呈 45° 角的位置上转角约为 0.3° ,这对球形碱金属气室作为中心器件的仪器是一个无法忽视的偏量。该结果对于应用球形碱金属气室的仪器研究和开发具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Knappe S, Shah V, Schwindt P D D, *et al.* A microfabricated atomic clock[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(9): 1460-1462.
- [2] Budker D, Romalis M. Optical magnetometer[J]. Natural Physics, 2007, 3(4): 227-234.
- [3] Ledbetter M P, Savukov I M, Acosta V M, *et al.* Spin-exchange-relaxation-free magnetometry with Cs vapor[J]. Physics Review A, 2008, 77(3): 033408.
- [4] Cooper J J, Hallwood D W, Dunningham J A. Entanglement-enhanced atomic gyroscope[J]. Physics Review A, 2010, 81(4): 043624.
- [5] Fang J C, Wan S A, Qin J, *et al.* A novel Cs-129Xe atomic spin gyroscope with closed-loop Faraday modulation[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(8): 083108.
- [6] Bell W E, Bloom A L, Lynch J. Alkali metal vapor spectral lamps[J]. Review of Science Instruments, 1961, 32(6): 688-692.
- [7] Eklund E J, Shkel A M. Glass blowing on a wafer level[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2007, 16(2): 232-239.
- [8] Dural N, Romalis M V. Gallium phosphide as a new material for anodically bonded atomic sensors[J]. Applied Physics

- Letters Material, 2014, 2(8): 086101.
- [9] Eklund J E, Shkel A M, Knappe S, *et al.* Glass-blown spherical microcells for chip-scale atomic devices[J]. Sensors and Actuators A, 2008, 143(1): 175-180.
- [10] Liew L A, Knappe S, Moreland J, *et al.* Microfabricated alkali atom vapor cells[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(14): 2694-2696.
- [11] P'etremand Y, Affolderbach C, Straessle R, *et al.* Microfabricated rubidium vapour cell with a thick glass core for small-scale atomic clock applications[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(2): 025013.
- [12] Straessle R, Pellaton M, Affolderbach C, *et al.* Low-temperature indium-bonded alkali vapor cell for chip-scale atomic clocks[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(6): 064501.
- [13] Knappe S, Velichansky V, Robinson H G, *et al.* Compact atomic vapor cells fabricated by laser-induced heating of hollow-core glass fibers[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(6): 3142-3145.
- [14] Balabas M V, Budker D, Kitching J, *et al.* Magnetometry with millimeter-scale antirelaxation-coated alkali-metal vapor cells[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 23(6): 1001-1006.
- [15] Atutov S N, Benimetskiy F A, Plekhanov A I, *et al.* Study of Rb-vapor coated cells-atomic diffusion and cell curing process[J]. The European Physical Journal D, 2016, 70(2): 1-6.
- [16] Wei Q, Yang L, Yao C, *et al.* Coating qualities evaluation for alkali-metal atomic vapor cells based on frustrated total internal reflection[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(3): 030701.
- [17] Kornack T W. A test of CPT and Lorentz symmetry using a K^{-3} He co-magnetometer[D]. Princeton: Princeton University, 2005: 141-143.
- [18] Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.* Calibration of rotating quarter-wave method based polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912005.
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 旋转波片法偏振检测装置器件参数校准[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912005.
- [19] Yu Zhenfang, Qiu Qi, Guo Yong. Dual modulation optical polarimetry for glucose monitoring[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0117001.
余振芳, 邱 琪, 郭 勇. 双调制光学偏振法葡萄糖浓度检测[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0117001.
- [20] Ding Zhichao, Li Yingying, Wang Zhiguo, *et al.* Research of rubidium atomic magnetometer based on Faraday rotation detection[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408003.
丁志超, 李莹颖, 汪之国, 等. 基于法拉第旋转检测的铷原子磁力仪研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408003.