

基于多反射腔的原子器件的一些进展

蔡波,郝传鹏,盛东

(1. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,精密科学仪器安徽普通高校重点实验室(中国科学技术大学),安徽合肥 230027;
2. 合肥微尺度物质科学国家研究中心,安徽合肥 230026)

摘要: 原子器件是多门学科交叉形成的研究领域. 它结合原子光谱的稳定性和精密仪器的小型化技术,实现了新型的高精度探测器件. 目前原子器件在原子钟、磁力仪和陀螺仪等方面都有着一定的研究规模和可预见的应用前景. 多反射腔可以增加原子与光的作用距离,在不改变其他参数的情况下提高器件的灵敏度,是实现高灵敏度小型化原子器件的有效方法之一. 本文首先回顾之前基于多反射腔的一些原子器件的进展,并着重讨论基于 Herriott 腔的原子磁力仪. 在这方面,我们利用阳极键合和三维打印光学平台的方法简化光路调节,实现了便于使用的含多反射腔的原子磁力仪,并将其应用到电子与核自旋磁力仪.

关键词: 原子器件;原子磁力仪;多反射腔;阳极键合

中图分类号: TM936 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.12.002

引用格式: 蔡波,郝传鹏,盛东. 基于多反射腔的原子器件的一些进展[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(12):957-964.

CAI Bo, HAO Chuanpeng, SHENG Dong. Progresses on multipass-cavity-assisted atomic devices[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(12):957-964.

特
约
评
述

Progresses on multipass-cavity-assisted atomic devices

CAI Bo, HAO Chuanpeng, SHENG Dong

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, Key Laboratory of Precision Scientific Instrumentation of Anhui Higher Education Institutes, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

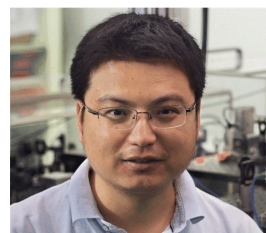
Abstract: Atomic instrumentation is an interdisciplinary research area. It combines the high stability property of atomic spectroscopy and the miniaturization technique from precision engineering. There have been considerable research efforts and application promise in such fields as atomic clocks, atomic magnetometers and atomic interferometers. The introduction of multipass cavities could effectively increase the interaction length between atoms and light, without changing other experimental parameters. This could improve the device sensitivity while keeping the instrument size small. In this paper, recent progress on atomic devices using multipass cavities was reviewed, and Herriott-cells-assisted atomic

收稿日期: 2019-11-29; 修回日期: 2019-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(11774329, 11974329)资助.

作者简介: 蔡波,男,1994年生,博士生.研究方向:小型化原子器件. E-mail: caibo022@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 盛东,中国科学技术大学工程科学学院特任教授,中组部“青年千人计划”入选者.2011年获马里兰大学博士学位,2011年6月至2014年7月在普林斯顿大学从事博士后研究,2014年8月至2016年8月在美国国家标准和技术研究院原子器件组任研究助理,2016年8月至今在中国科学技术大学任教.研究方向是基于原子光谱的精密测量和精密仪器. E-mail: dsheng@ustc.edu.cn



magnetometers were discussed at length. Using anodic bonding and 3D printing techniques, optical adjustments were removed, and the multipass cells were applied in the electron spin and nuclear spin magnetometers.

Key words: atomic devices; atomic magnetometers; multipass cavities; anodic bonding

0 引言

原子器件是利用原子光谱进行精密测量的一类小型化器件的统称,目前被广泛研究的小型化原子钟、原子磁力仪和原子干涉仪都属于这类器件.虽然从 20 世纪 50~60 年代就开始了这方面的研究,但原子器件真正标志性的工作是美国国家标准与技术研究院(NIST)John Kitching 小组 2004 年在小型化原子钟上的突破^[1].他们第一次将微加工中的阳极键合技术^[2]引入到原子池的加工中,在保持高稳定性和可重复性的同时大幅度降低了器件的功耗和尺寸.这一突破很快被工业界重视,在不到 10 年的时间里,Microsemi 公司利用这个技术生产出高质量的商业化芯片微波钟^[3].目前,NIST 的原子器件组正在开发第二代的芯片原子钟,相对于第一代的产品,它融合了光频梳、光学微腔和微加工原子池,目标是实现可见光波段原子钟的小型化^[4].

原子磁力仪是原子器件发展的另一个重要方向.早在 20 世纪 50 年代末,碱金属和氦原子磁力仪就开始被研究^[5-7],并很快实现了在地球和空间探测上的应用^[8].William Happer 教授^[9-10]在 20 世纪 70 年代发现原子间的自旋交换碰撞引起的驰豫在超低磁场情况下会被抑制,普林斯顿大学的 Mike Romalis 组在 2002 年利用这种现象开发出无自旋交换驰豫的磁力仪.该磁力仪可以实现 $10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 的磁场灵敏度,达到了超导磁力仪的水平.其简单的工作模式和较低的成本大大促进了原子磁力仪在生物磁场探测上的应用.此后,在普林斯顿大学^[11]和 NIST 组^[12]的研究基础上,商业化的原子磁力仪探头也开始应用到心磁和脑磁^[13]的探测上.

原子干涉仪在原子冷却技术的基础上得到了快速发展.常用的原子干涉仪技术可类比于光学上的 Mach-Zehnder 干涉仪,利用一对拉曼光实现了原子的分束和合束^[14].原子干涉仪可以作为陀螺仪^[15]和重力加速度计^[16]使用.目前原子干涉仪作为原子器件的发展有两个方向:一个是可移动化的技术,其发展趋势是将复杂的实验装置集成化后搬出实验室使用^[17];另一个是小型化技术,这方面遇到的困难

要大于原子磁力仪系统,研究人员已经分别在冷原子系统^[18]和热原子系统^[19]上进行了探索.

区别于以上的原子系统,金刚石色心(NV diamond)属于凝聚态系统.这个系统从 2008 年开始被应用到磁场探测中^[20-22].虽然金刚石色心的磁场灵敏度不如原子磁力仪,但它的微小尺寸使它可以在亚微米的尺度上进行测量,从而获得了非常高的空间分辨能力.此外,它在惯性测量上也有一定的应用前景^[23-25].

本文内容主要分为以下几个部分:节 1 简要介绍不同多反射腔的特点及其在原子器件中的应用;节 2 介绍密集型 Herriott 腔的设计及标准化制作方法;节 3 与节 4 分别介绍了含多反射腔的原子气室在电子自旋和核自旋原子磁力仪中的应用.

1 多反射腔在原子器件中的应用

原子器件的灵敏度是由探测的信噪比(S/N)所决定的,因此增加灵敏度可以从抑制噪声和提高信号两个方面入手.在噪声抑制方面,已经有利用光噪声^[26]和原子自旋^[27]的投影噪声压缩提高灵敏度的研究.需要指出的是,对相干性指数衰减的系统,自旋压缩只能将灵敏度提高 $e^{1/2}$ ^[28-30],如果想突破这个极限,就需要寻找更加非线性的系统^[31].

在提高信号方面,最简单的方法是提高探测光的功率.在光散粒噪声的条件下,S/N 与光子数呈根号关系而不是更快的线性关系,这样增加光功率来提高探测灵敏度到一定程度会受限于系统自身的资源.另一个提高信号的方法是增加原子密度,但对光泵系统来说,这同样需要等量增加抽运光来达到预期的信噪比的增加.在光强不变的约束下,可以通过提高光与原子的作用时间或距离来增加信号,这就可以利用多反射腔实现.在不改变其他系统参数的情况下,多反射腔的引入可以有效提高系统的信噪比,增加系统的探测灵敏度.

法布里珀罗(Fabry-Perot, FP)腔是物理系统中最常见的多反射腔,它基于光在两面高反射率的腔镜间来回反射和相互干涉.FP 腔有几个优点:其一是它有光强增强的作用,因此 FP 腔又被称为光

增强腔. 对弱的能级跃迁来说, 光强增强与光程增加的效果是等价的, 这一特点在基础物理研究中被广泛利用^[32]. 在 NV^[33] 和原子磁力仪系统^[34] 中, FP 腔的这一特点也被用来提高探测的灵敏度. FP 腔的另一个优点是它腔内的光有很好的空间模式. 对原子干涉仪来说, 拉曼光的空间模式和相位匹配是很重要的因素; 同时, 为了提高等效的原子运动面积, 需要高动量转移的拉曼跃迁, 这个过程最终受限于可利用的光强^[35]. FP 腔可以有效地解决这两个问题^[36].

FP 腔同时也有光频率的选择性和对干涉现象的依赖性. 光频率的选择性决定了整个光谱范围内只有很少区域的光可以被 FP 腔利用, 而且 FP 腔的腔长需要额外锁定. 对干涉现象的依赖使它不适用于大幅度的法拉第旋转信号的探测, 因为在这种情况下光的偏振会大角度旋转, 从而破坏了相干的效应. 基于几何光学的多反射腔就可以避免这两方面的限制.

内部全反射就是一种基于几何光学的多反射技术, 它最常见的应用是在光纤中. 光是被束缚在光纤的纤芯中传播, 当光传播到纤芯与包层的界面时, 由折射定理决定, 光会被全反射回纤芯. 原子器件中最适合使用这种多反射技术的是 NV 的系综. 只要入射角度和边界设计合理, 就可以使激发光在 NV 系综内部形成多次反射, 最后才从入射口出射^[37]. 基于内部全反射的技术一方面可以完全依靠本身的资源实现, 因此可以做得非常集成; 另一方面被束缚的光更倾向于遍历整个腔体, 而不是像 FP 腔那样将光在相同空间上反复叠加, 因此内部全反射技术更适合于系综而不是单个色心.

内部全反射技术依赖于固态凝聚态系统的边界, 这不是气态原子系统的优势. 在气态的原子系统中, 以 White 腔^[38] 和 Herriott 腔^[39] 为代表的其他几何光学腔也有很多应用. 这些腔的基本原理可以概括为光从一面镜子前端的小孔入射, 然后在多面有曲率的镜子间来回反射多次后, 再从一个小孔出射. 这些腔及其变体在精密光谱测量中有着广泛的应用^[40-41]. 这里, 我们着重讨论一种 Herriott 腔的变体^[42]. 它由两面曲率相同的柱面镜组成, 在腔镜的曲率、对称轴夹角以及间距满足一定关系的时候, 入射光从前腔镜的中心孔入射, 经过多次反射后可以从相同孔出射, 形成闭合回路. 这种 Herriott 腔的光斑更加密集, 因此被称为密集型 Herriott 腔. Romalis 组 2011 年将它应用到原子磁力仪中^[43], 之

后它已经被用来测量核磁共振信号^[44]、提高标量磁力仪灵敏度^[45] 和探测核电四极共振信号^[46].

2 密集型 Herriott 腔的设计

对于密集型 Herriott 腔, 其形成闭合回路后, 在前后腔镜上都会出现李萨如图形. 以腔镜的平面为 xy 平面, 数学上李萨如图形是 x 轴与 y 轴上两个不同频率振荡信号合成的, 两路振荡频率的比值为两个整数的比值. 而在 Herriott 腔上, 相应的参数是相邻的光斑点在 x 轴和 y 轴上对应于圆周运动扫过的角度 θ_x 和 θ_y . N 次反射后形成闭合回路的条件是 $N\theta_{xR} = M_x\pi$ 和 $N\theta_{yR} = M_y\pi$, 这里 M 是正整数.

假设两镜之间的距离为 d , 腔镜的焦距为 f , 两柱面镜主轴之间的夹角为 $\pi/2 - \delta$, 我们可以利用 ABCD 矩阵的方法计算光在腔内的传播. 设第 i 次光入射的位置和斜率为 $r_i = [x_i, x_i', y_i, y_i']'$, 光从一个腔镜传播到另一个腔镜的算符 D 为

$$D = \begin{bmatrix} 1 & d & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

而每次腔镜发射的算符 R 为^[42]

$$R = T(-\delta) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} T(\delta),$$

$$T(\delta) = \begin{bmatrix} \cos\delta & 0 & \sin\delta & 0 \\ 0 & \cos\delta & 0 & \sin\delta \\ -\sin\delta & 0 & \cos\delta & d \\ 0 & -\sin\delta & 0 & \cos\delta \end{bmatrix}.$$

依照矩阵计算的方法, 如果预先给定设计的反射次数 N 和腔镜的焦距 f , 我们就可以算出满足闭合回路的其他的可能参数.

根据实际情况 (腔镜直径 12.7 mm, 开孔直径 2.5 mm), 我们选择了一组计算出的参数: $N = 22$, $f = 50$ mm, $d = 19.3$ mm, $\delta = 37.82^\circ$. 我们对基于此参数的 Herriott 腔进行了建模, 图 1 展示了 TracePro 仿真计算出的光线轨迹和后腔镜上光斑分布.

在仿真计算中, 我们还探究了腔镜满足出射条件对各参数之间精确度的要求. 为了让光在 N 次反

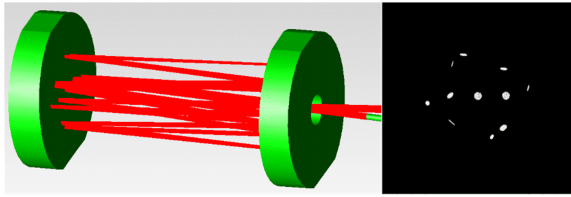


图 1 TracePro 仿真的 Herriott 腔光线分布和后腔镜光斑分布
Fig. 1 The simulated light propagations inside the cavity, with a snap of the light spot distributions on the back cavity mirror

射后可以从前腔镜的小孔出射, 我们需要将两柱面镜相对转角 δ 误差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内, 腔镜之间的距离误差控制在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 之内, 这对腔的制作提出了较高的要求. 最终我们设定了结合阳极键合工艺以及机械模具辅助定位的制作方案, 避免了人工调节的不确定性, 制作出了可以良好工作的 Herriott 腔, 重复制作出的腔性能一致, 有非常好的替代性. 图 2 展示了阳极键合制作的含 Herriott 腔的气室及 Herriott 腔后腔镜上的实际光斑分布.

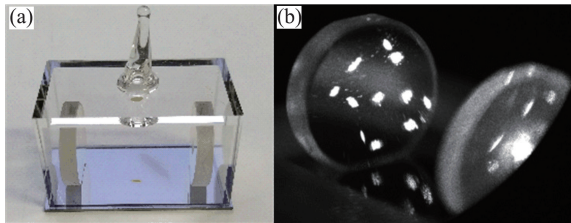


图 2 (a) 基于阳极键合技术制作的含 Herriott 腔的气室和 (b) 后腔镜上的光斑分布
Fig. 2 (a) An atom cell with an anodic bonded Herriott cavity, and (b) the light spot distributions on the back mirror of the cavity

3 基于密集型 Herriott 腔的电子自旋原子磁力仪

原子磁力仪利用原子自旋的拉莫进动来对外磁场进行测量. 它的一般结构如图 3(a) 所示, 由抽运光、探测光和气室三部分组成. 在我们的多反射腔系统中, 由于微加工技术制作的气室可以保证腔与硅片的相对位置在很高的精度内不变, 我们可以进一步地将气室和探测光系统利用光纤和 3D 打印平台融合在一起. 这样一方面让系统更加集成, 另一方面可以摆脱光路调整的部分, 实现探测光即插即用. 图 3(b) 展示了基于此的新系统.

我们首先利用这个系统进行了电子自旋标量磁力仪的灵敏度测量. 我们在含多反射腔的气室中充入自然丰度的铷原子和 60 kPa 的氮气, 并在 $8 \mu\text{T}$

的偏置磁场下工作. 利用文献[48]的方法, 我们设计了如图 4 所示的闭环操作的标量磁力仪.

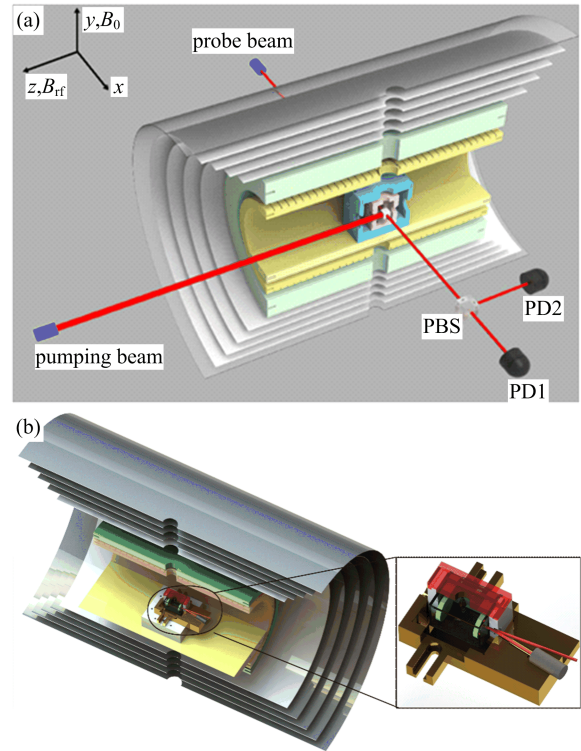


图 3 (a) 典型的原子磁力仪的装置^[47], (b) 集成了探测光的多反射腔系统
Fig. 3 (a) A typical atomic magnetometer setup^[47], and (b) the core part of the multipass cavity system with an integrated probe beam

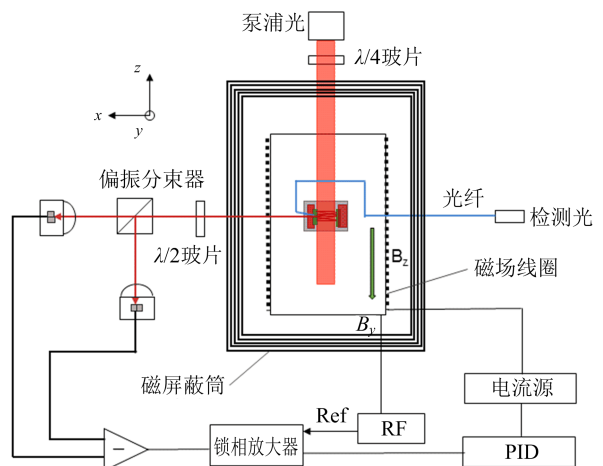


图 4 闭环操作的标量原子磁力仪的示意图
Fig. 4 The experiment scheme of a scalar magnetometer operated in close-loop mode

这里我们在垂直于主磁场 B_0 和抽运光的方向 (z 轴) 施加了一个射频场 B_{rf} , Rb 原子的极化可以用下面的方程描述:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = -\gamma [\mathbf{P} \times (\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_{rf})] - \frac{\mathbf{P}}{T} + R_{op}(\mathbf{z} - \mathbf{P})$$

式中, γ 代表原子的旋磁比, R_{op} 代表抽运光的抽运速率. 这样, 原子的极化里会出现射频场驱动的交流成分. 我们将探测光经过以射频场频率 ω_{rf} 作为参考频率的锁相放大器, 并监视其同相位 (x) 和 90° 相位差 (y) 输出. 当射频场频率 ω_{rf} 在拉莫进动 $\omega_0 = \gamma\mathbf{B}_0$ 附近扫描时, 锁相放大器的两路输出将分别呈现出洛伦兹线型和色散线型. 将射频场初始调至共振位置后, 可以利用色散线型输出, 反馈给磁场线圈电流, 将射频场一直保持共振, 从而将色散线型的输出一直锁定在零点. 这种闭环操作的好处是它只需要标定一次磁场线圈的电流与磁场的关系, 而不需要其他额外的标定. 同时, 它可以将原子磁力仪锁定在对磁场灵敏度最高的位置. 图 5 展示了利用这种方法在原子池加热到 90°C 的条件下测量得到的磁场灵敏度.

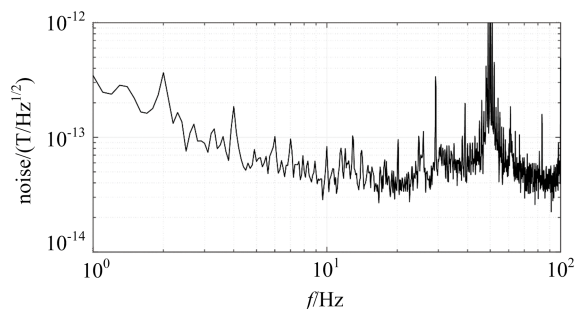


图 5 基于多反射腔的标量原子磁力仪的灵敏度测量

Fig. 5 Sensitivity of cavity-assisted scalar atomic magnetometer

4 基于密集型 Herriott 腔的核自旋原子磁力仪

在其他应用中, 我们经常需要向原子池内添加更多的气体, 其中最重要的一类是惰性气体原子. 惰性气体原子只有核自旋, 相对于电子自旋原子, 它的弛豫时间可以大好几个量级. 但是, 它不像电子自旋可以方便地使用激光进行高效率极化. 一种有效的核自旋极化的方法是, 通过极化碱金属原子的自旋交换碰撞将极化传递给惰性气体原子的核自旋^[50-51], 这也被称为超极化过程. 另一方面, 由原子磁力仪可以发展出原子共磁力仪^[52]. 在这个系统中, 两种气体原子被束缚在同一原子池中, 它们可以同时同地地感受到磁场的变化, 从而可以利用这两种原子的信号消除磁场的影响, 进行与自旋相关的精密测量. 将电子自旋、核自旋和原子共磁力仪结

合, 就发展出了核自旋共磁力仪^[53-54], 这里极化碱金属原子作为原子磁力仪也可以有效地探测核自旋的信号^[55]. 目前, 核自旋共磁力仪也是小型化原子陀螺仪的重要发展方向之一^[56].

我们希望利用核自旋-碱金属系统先实现核自旋磁力仪. 核自旋磁力仪利用极化的核自旋对磁场的响应来探测磁场的变化, 它是核自旋共磁力仪的基础. 这里我们选用氙气作为核自旋气体, 这是因为在惰性气体原子中, 氙气与碱金属原子的碰撞截面是最大的. 这样, 一方面它可以很快地被碱金属极化 (极化时间约为 1 min), 另一方面, 氙气的极化磁场也可以最灵敏地被碱金属原子磁力仪探测到.

在未充入氙气的系统中, Rb 原子磁力仪中原子极化弛豫的主要来源是原子间的自旋交换碰撞. 充入氙气后, 碱金属原子的弛豫主要受限于其与氙气原子之间的碰撞. 图 6 展示了氙气加入前后 Rb 原子自旋噪声谱的变化. 自旋噪声谱是在没有极化的情况下原子噪声的功率在频谱上的分布^[57]. 从图可见, 氙气的引入会大大增宽铷原子的线宽. 氙气核自旋的灵敏度受限于碱金属原子磁力仪的灵敏度, 而 Rb 原子磁力仪的灵敏度与其共振线宽成反比. 如何增加核自旋气体中碱金属原子的探测灵敏度是近期研究的热点. 目前提出的解决方案^[58-59]都需要结合大幅度高频率的磁场脉冲来实现自旋与环境的解耦, 这会对系统带来很大的干扰, 影响系统的稳定性. 使用多反射腔这种被动的方法则可以在提高灵敏度的同时, 大幅降低这种干扰.

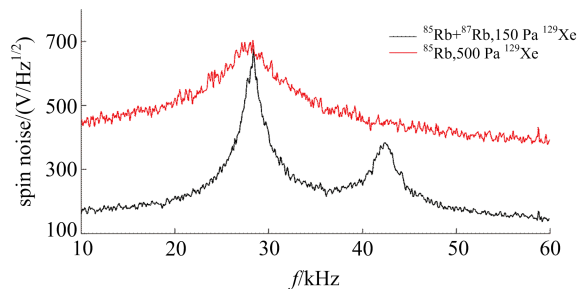


图 6 加入氙气前后 Rb 原子自旋噪声谱的对比

Fig. 6 Spin noise spectrum of Rb atoms with and without xenon atoms

我们在含有多反射腔的气室内充入自然丰度的 Rb 原子, 650 Pa 的 ^{129}Xe 气体和 40 kPa 的氮气. 抽运光与探测光的设置与上面提到的碱金属原子磁力仪一样, 主磁场大小为 $16 \mu\text{T}$. 与 Rb 原子磁力仪不同的是, 射频激发场的频率在 ^{129}Xe 的拉莫频率附近扫描. 图 7 展示了在原子池加热到 90°C 的条件

下 ^{129}Xe 对激发场信号的响应,同时也是极化氙气磁力仪的开环工作特征.在共振点附近,氙气信号的相位与激发场的频率失谐有很强的线型关系.这样,可以通过锁相环回路将相位信号反馈给射频场的频率,从而实现闭环操作.与图 4 的电子自旋磁力仪利用磁场电流反馈不同,利用锁相环闭环的好处是系统的带宽原则上只受共振频率的限制,这样闭环时系统的工作带宽可以远超过开环时氙气信号的带宽.目前,我们正在进行闭环方面的工作.从初步的数据看来,闭环时氙气磁力仪的带宽可以比开环带宽大两个量级以上, ^{129}Xe 磁力仪的磁场灵敏度在 1 Hz 处好于 $10\text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$.

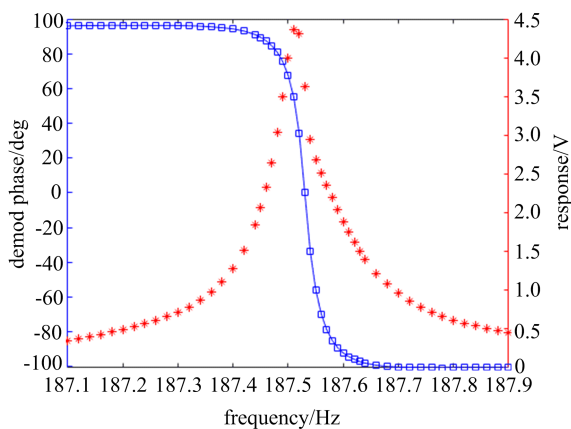


图 7 ^{129}Xe 对激发频率的响应

Fig. 7 Response of ^{129}Xe atoms to the driving fields

5 结论与展望

我们已经探索出制作含多反射腔的标准化原子气室的方法,并且将它应用到电子和核自旋的原子磁力仪中.在现有的基础上,我们还将开展三个方面的工作.第一是将其应用到全光矢量原子磁力仪^[60]中,实现新型的高带宽大范围的矢量磁场探测.第二是将其应用到 ^{129}Xe - ^{131}Xe -Rb 核自旋磁力仪中,实现双闭环操作.核自旋共磁力仪可以作为下一代全球磁力仪网络计划(GNOME)^[61-63]的探测器.我们实验室作为 GNOME 的站点之一,已经用电子自旋磁力仪提供过两轮的数据.在新一代 GNOME 的计划中,我们将利用核自旋共磁力仪提供高带宽高灵敏度的核自旋数据.第三,我们也将进一步优化含多反射腔的标准化原子气室的制作方法.现有工序中,在向气室充气阶段,我们还依赖传统的吹玻璃技术,这也使气室上遗留了一个小“尾巴”(见图 2).我们正在设计新的真空系统,计划将整个充气和键合的过

程在该系统内完成,尽量减少制作过程中不易重复的步骤.

基于多反射腔的技术是原子器件里连接高灵敏度和小型化的有效途径之一.在国际上,基于多反射腔的原子磁力仪也正在被应用到地磁场环境中,进行更贴近实际应用的测量^[64-65].由于制作工艺和操作繁杂等因素的限制,这方面的工作还只是局限在少数的研究组.希望随着我们研究工作的进一步深入,制作工艺的进一步成熟,可以带动更多的研究人员对这方面工作的兴趣,并拓展更多的应用.

致谢 感谢余倩倩、谢子平和刘思奇同学在本文的撰写过程中提供的帮助.

参考文献(References)

- [1] KNAPPE S, SHAH V, SCHWINDT P D, et al. A microfabricated atomic clock [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85:1460.
- [2] WALLIS G, POMERANTZ D I. Field assisted glass-metal sealing[J]. J Appl Phys, 1969, 40: 3946-3949.
- [3] Microsemi. Chip Scale Atomic Clock (CSAC) [EB/OL]. [2019-11-01]. <https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac>.
- [4] NEWMAN Z L, MAURICE V, DRAKE T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. Optica, 2019, 6(5): 680-685.
- [5] DEHMELT H G. Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms[J]. Phys Rev, 1957, 105: 1924-1925.
- [6] BELL W E, BLOOM A L. Optical detection of magnetic resonance in alkali metal vapor [J]. Phys Rev, 1957, 107: 1559-1565.
- [7] COLEGROVE F D, FRANKEN P A. Optical pumping of helium in the $^3\text{S}_1$ metastable state [J]. Phys Rev, 1960, 119: 680-690.
- [8] HOVDE D C, PROUTY M D, HROVIC I, et al. Commercial magnetometers and their application[M]// BUDKER D, KIMBALL D F J. Optical Magnetometry. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [9] HAPPER W, TANG H. Spin-exchange shift and narrowing of magnetic resonance lines in optically pumped alkali vapors [J]. Phys Rev Lett, 1973, 31: 273-276.
- [10] HAPPER W, TAM A C. Effect of rapid spin exchange on the magnetic-resonance spectrum of alkali vapors

- [J]. *Phys Rev A*, 1977, 16: 1877-1891.
- [11] XIA H, BARANGA A B, HOFFMAN D, et al. Magnetoencephalography with an atomic magnetometer [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 211104.
- [12] SHAH V, KNAPPE S, SCHWINDT P D D, et al. Subpicotesla atomic magnetometry with a microfabricated vapour cell [J]. *Nat Photonics*, 2007, 1: 649-652.
- [13] BOTO E, HOLMES N, LEGGETT J, et al. Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system [J]. *Nature*, 2018, 555: 657-661.
- [14] KASEVICH M, CHU S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 67: 181-184.
- [15] GUSTAVSON T, BOUYER P, KASEVICH M. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 2046-2049.
- [16] DICKERSON S M, HOGAN J M, SUGARBAKER A, et al. Multiaxis inertial sensing with long-time point source atom interferometry [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 083001.
- [17] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity surveys using a mobile atom interferometer [J]. *Sci Adv*, 2019, 5: eaax0800.
- [18] CHEN Y J, HANSEN A, HOTH G W, et al. Single-source multiaxis cold-atom interferometer in a centimeter-scale cell [J]. *Phys Rev Appl*, 2019, 12: 014019.
- [19] BIEDEMANN G W, MCGUINNESS H J, RAKHOLIA A V, et al. Atom interferometry in a warm vapor [J]. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 163601.
- [20] MAZE J R, STANWIX P L, HODGES J S, et al. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond [J]. *Nature*, 2008, 455: 644-647.
- [21] BALASUBRAMANIAN G, CHAN I Y, KOLESOV R, et al. Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions [J]. *Nature*, 2008, 455: 648-651.
- [22] TAYLOR J M, CAPPELLARO P, CHILDRESS L, et al. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution [J]. *Nat Phys*, 2008, 4: 810-816.
- [23] AJOY A, CAPPELLARO P. Stable three-axis nuclear-spin gyroscope in diamond [J]. *Phys Rev A*, 2012, 86: 062104.
- [24] LEDBETTER M P, JENSEN K, FISCHER R, et al. Gyroscopes based on nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Phys Rev A*, 2012, 86: 052116.
- [25] WOOD A A, LILETTE E, FEIN Y Y, et al. Magnetic pseudo-fields in a rotating electron-nuclear spin system [J]. *Nat Phys* 2017, 13: 1070-1073.
- [26] WOLFGRAMM F, CERE A, BEDUINI F A, et al. Squeezed-light optical magnetometry [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 053601.
- [27] MA J, WANG X, SUN C P, et al. Quantum spin squeezing [J]. *Phys Rep*, 2011, 509: 89-165.
- [28] HUELGA S F, MACCHIAVELLO C, PELLIZZARI T, et al. Improvement of frequency standards with quantum entanglement [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 3865-3868.
- [29] AUZINSH M, BUDKER D, KIMBALL D F, et al. Can a quantum nondemolition measurement improve the sensitivity of an atomic magnetometer? [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 173002.
- [30] ESCHER B M, DE MATOS FILHO R L, DAVIDOVICH L. General framework for estimating the ultimate precision limit in noisy quantum-enhanced metrology [J]. *Nat Phys*, 2011, 7: 406-411.
- [31] VASILAKIS G, SHAH V, ROMALIS M V. Stroboscopic backaction evasion in a dense alkali-metal vapor [J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 143601.
- [32] WOOD C S, BENNETT S C, CHO D, et al. Measurement of parity nonconservation and an anapole moment in cesium [J]. *Science*, 1997, 275: 1759-1763.
- [33] JENSEN K, LEEFER N, JARMOLA A, et al. Cavity-enhanced room-temperature magnetometry using absorption by nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 160802.
- [34] VASILAKIS G, SHEN H, JENSEN K, et al. Generation of a squeezed state of an oscillator by stroboscopic back-action-evading measurement [J]. *Nat Phys*, 2015, 11: 389-392.
- [35] CHIOU S W, KOVACHY T, CHIEN H C, et al. 102-hk large area atom interferometers [J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 130403.
- [36] HAMILTON P, JAFFE M, BROWN J, et al. Atom interferometry in an optical cavity [J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 100405.
- [37] CLEVENSON H, TRUSHEIM M E, TEALE C, et al. Broadband magnetometry and temperature sensing with a light-trapping diamond waveguide [J]. *Nat Phys*, 2015, 11: 393-397.
- [38] WHITE J U. Long optical paths of large aperture [J]. *J Opt Soc Am*, 1942, 32: 285-288.
- [39] HERRIOTT D R, SCHULTE H J. Folded optical delay lines [J]. *Appl Opt*, 1965, 4: 883-889.
- [40] BOUCHIAT M A, GUENA J, POTTIER L. Atomic parity violation measurements in the highly forbidden

- $6S_{1/2}$ - $7S_{1/2}$ caesium transition. I. Theoretical analysis, procedure and apparatus[J]. *J Phys France*, 1985, 46: 1897-1924.
- [41] HAO L Y, SHI Q, WU G R, et al. Cylindrical mirror multipass Lissajous system for laser photoacoustic spectroscopy[J]. *Rev Sci Instrum*, 2002, 73: 2079.
- [42] SILVER J A. Simple dense-pattern optical multipass cells[J]. *Appl Opt*, 2005, 44: 6545-6556.
- [43] LI S, VACHASPATI P, SHENG D, et al. Optical rotation in excess of 100 rad generated by Rb vapor in a multipass cell[J]. *Phys Rev A*, 2011, 84: 061403 (R).
- [44] SHI J, IKALAINEN S, VAARA J, et al. Observation of optical chemical shift by precision nuclear spin optical rotation measurements and calculations[J]. *J Phys Chem Lett*, 2013, 4: 437-441.
- [45] SHENG D, LI S, DURAL N, et al. Subfemtotesla scalar atomic magnetometry using multipass cells[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 160802.
- [46] COPPER R J, PRESCOTT D W, MATZ P, et al. Atomic magnetometer multisensor array for rf interference mitigation and unshielded detection of nuclear quadrupole resonance [J]. *Phys Rev Appl*, 2016, 6: 064014.
- [47] HAO C P, QIU Z R, SUN Q, et al. Interactions between nonresonant rf fields and atoms with strong spin-exchange collisions [J]. *Phys Rev A*, 2019, 99: 053417.
- [48] SMULLIN S J, SAVUKOV I M, VASILAKIS G, et al. Low-noise high-density alkali-metal scalar magnetometer[J]. *Phys Rev A*, 2009, 80: 033420.
- [49] HAPPER W, JAU Y Y, WALKER T. *Optically Pumped Atoms* [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley-VCH, 2010.
- [50] BOUCHIAT M A, CARVER T R, VARNUM C M. Nuclear polarization in He^3 gas induced by optical pumping and dipolar exchange [J]. *Phys Rev Lett*, 1960, 5: 373-375.
- [51] WALKER T G, HAPPER W. Spin-exchange optical pumping of noble-gas nuclei[J]. *Rev Mod Phys*, 1997, 69: 629-642.
- [52] LAMOREAUX S K, JACOBS J P, HECKEL B R, et al. New limits on spatial anisotropy from optically-pumped ^{201}Hg and ^{199}Hg [J]. *Phys Rev Lett*, 1986, 57: 3125-3128.
- [53] TULLNEY K, ALLMENDINGER F, BURGHOFF M, et al. Constraints on spin-dependent short-range interaction between nucleons [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 100801.
- [54] SHENG D, KABCENELL A, ROMALIS M V. New classes of systematic effects in gas spin comagnetometers [J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 163002.
- [55] GROVER B C. Noble-gas NMR detection through noble-gas-rubidium hyperfine contact interaction[J]. *Phys Rev Lett*, 1978, 40: 391-392.
- [56] WALKER T G, LARSEN M S. Spin-exchange-pumped NMR gyros[J]. *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2016, 65: 373-401.
- [57] CROOKER S A, RICKEL D G, BALATSKY A V, et al. Spectroscopy of spontaneous spin noise as a probe of spin dynamics and magnetic resonance[J]. *Nature*, 2004, 431: 49-52.
- [58] KORVER A, THRASHER D, BULATOWICZ M, et al. Synchronous spin-exchange optical pumping [J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 253001.
- [59] LIMES M E, SHENG D, ROMALIS M V. 3He - ^{129}Xe comagnetometry using ^{87}Rb detection and decoupling [J]. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 033401.
- [60] PATTON B, ZHIVUN E, HOVDED C, et al. All-optical vector atomic magnetometer [J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 013001.
- [61] The GNOME Experiment [DB/OL]. [2019-11-01]. <https://budker.uni-mainz.de/gnome/>.
- [62] POSPELOV M, PUSTELNEY S, LEDBETTER M P, et al. Detecting domain walls of axionlike models using terrestrial experiments [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 021803.
- [63] PUSTELNY S, KIMBALL D F J, PANKOW C, et al. The Global Network of Optical Magnetometers for Exotic physics (GNOME): A novel scheme to search for physics beyond the Standard Model[J]. *Ann Phys (Berlin)*, 2013, 525: 659-670.
- [64] LUCIVERO V G, LEE W, ROMALIS M, et al. A femtotesla quantum-noise-limited pulsed gradiometer at Earth's magnetic fields [C]// 50th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting. College Park, MD: American Physical Society, 2019.
- [65] LIMES M, KORNACK T, FOLEY E. Pulsed intrinsic gradiometer operating in Earth's field [R]. Mainz, Germany: WOPM, 2019.