

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.04.01

原子气室的加工与制造：从极化、弛豫到系统指标

王超^{1,2}, 梁永辉¹, 王柯穆³, 汪之国^{1,2*}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073; 2. 量子信息机理与技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;
3. 湖南铁道职业技术学院 智能制造学院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 介绍了原子气室在热原子精密测量体系中的作用, 阐述了原子自旋弛豫的主要物理机制及其对极化寿命、相干时间、系统噪声和长期漂移的影响; 对比了传统玻璃加工与 MEMS 微加工气室的工艺特点、适用场景和发展趋势, 分析了材料选择、结构设计、壁面处理、缓冲气体计量及热-磁环境管理等因素对气室性能的调控作用。展望原子气室加工与制造领域未来的发展方向, 指出需要基于原子数密度、自旋极化度、弛豫时间等本征参数和典型应用系统指标, 建立面向工程应用的气室表征与评价框架; 可将关键误差源控制前移至气室设计、制造与评价阶段, 通过建立制造参数与器件性能之间的物理关联, 推动原子气室向性能可复现、寿命可预估、适于规模化生产的标准化器件方向发展。

关键词: 量子精密测量; 量子传感; 热原子; 原子气室; 自旋弛豫; 微纳加工; 抗弛豫涂层; 气密封装
中图分类号: TB9; TH73; O4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 04-0001-16

Fabrication of atomic vapor cells: from polarization and relaxation to system-level metrics

WANG Chao^{1,2}, LIANG Yonghui¹, WANG Kemu³, WANG Zhiguo^{1,2*}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Key Laboratory of Mechanism and Technology of Quantum Information, Changsha 410073, China;
3. School of Intelligent Manufacturing, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: This paper introduces the role of atomic vapor cells in hot-atom precision measurement systems and discusses the principal physical mechanisms governing atomic spin relaxation, as well as their effects on polarization lifetime, coherence time, system noise, and long-term drift. The processing characteristics, applicable scenarios, and development trends of conventional glass-fabricated vapor cells and MEMS-micromachined vapor cells are compared. The effects of material selection, structural design, wall-surface treatment, buffer-gas metering, and thermal and magnetic environment management on vapor-cell performance are also analyzed. Looking ahead, the development of atomic vapor-cell processing and manufacturing should focus on establishing an engineering-oriented characterization and evaluation framework based on intrinsic parameters, including atomic number density, spin polarization, and relaxation time, together with the performance requirements of representative application systems. Key error sources should be controlled at the stages of vapor-cell design, fabrication, and evaluation. By establishing the underlying physical correlations between manufacturing pa-

收稿日期: 2026-06-03; 修回日期: 2026-07-11; 录用日期: 2026-07-16; 发表日期: 2026-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23B2066, 12174446); 湖南省杰出青年科学基金项目(2023JJ10050)

引用格式: 王超, 梁永辉, 王柯穆, 等. 原子气室的加工与制造: 从极化、弛豫到系统指标[J]. 计测技术, 2026, 46(4): 1-16.

Citation: Wang Chao, Liang Yonghui, Wang Kemu, et al. Fabrication of atomic vapor cells: from polarization and relaxation to system-level metrics[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(4): 1-16.



rameters and device performance, atomic vapor cells can be advanced toward standardized devices with reproducible performance, predictable service lifetimes, and compatibility with large-scale production.

Key words: quantum precision measurement; quantum sensing; thermal atomic; atomic vapor cell; spin relaxation; microfabrication; anti-relaxation coating; hermetic sealing

0 引言

热原子系综与光的相互作用是一大类量子传感的核心物理基础^[1-2],由此发展的原子磁力仪、原子钟和原子陀螺仪等器件,支撑了磁场测量^[3-7]、时间频率基准^[8-11]与惯性传感^[12-16]等领域的技术发展。相较冷原子体系,热原子体系无需激光冷却与超高真空维持,在系统复杂度、体积功耗与批量化制造方面具有显著优势,是当前小型化量子传感器领域中最接近工程应用的技术途径,其应用边界持续拓展^[1, 17-20]。气室作为装载原子的物理载体^[21-22],其材料选择、制造工艺与封装策略等影响线宽展宽、频移、噪声基底抬升与长期漂移等参数,直接决定测量系统的性能上限与可重复性等关键指标^[23-30]。

本文根据应用类型的不同,将热原子传感器件分为A、B、C三类,它们对气室的要求存在显著差异。

A类器件包括无自旋交换弛豫磁力仪(Spin-Exchange Relaxation-Free, SERF)、光泵磁力仪(Optically Pumped Magnetometer, OPM)等,此类器件追求磁共振跃迁极窄线宽与 $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的灵敏度,需严格抑制壁面弛豫、热场非均匀性及寄生磁场^[4-6, 31]。需要说明的是,虽然SERF和OPM同为A类器件,但二者的具体实现路径不同:SERF依赖高压缓冲气体、近零磁场与高温工作环境以抑制自旋交换展宽;OPM则可通过弛豫涂层或缓冲气体压窄线宽,部分OPM可在室温下运行。因此,气室加工与制造过程中,需要根据具体目标的工作模式,有针对性地选择涂层、缓冲气体和工作温度窗口。

B类器件包括相干布居囚禁原子钟(Coherent Population Trapping Atomic Clock, CPT)、芯片级原子钟(Chip-Scale Atomic Clock, CSAC)等,此类器件以高频率准确度与长期稳定度为核心要求,对缓冲气体压力频移及其温度系数敏感,需抑制气

体渗透引发的慢漂移^[32-36]。

C类器件包括核磁共振陀螺仪(Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope, NMRG)、共磁仪等,此类器件依赖碱金属-惰性气体自旋交换动力学,对核自旋纵向弛豫时间 T_1 、横向弛豫时间 T_2 、长期稳定性及光学集成可靠性要求极高^[21, 23, 37-39]。

早期气室设计仅关注基本密封与透光性,而随着系统指标向高灵敏度与长稳态推进,壁面状态^[40-42]、气体组分^[43-45]、窗口应力^[38, 46]、热/磁场非均匀性^[15, 43, 47-52]等因素已成为影响极化效率、弛豫速率、压力移频与长期漂移的关键^[53-59]。本文按“物理机制-制造封装-壁面材料工程-结构集成-气体与长期稳定-表征与评价”的逻辑展开论述,介绍不同类型原子气室加工与制造技术的特点,对比不同工艺的优缺点、适用场景,探讨材料选择、结构设计、壁面处理、缓冲气体计量及热-磁环境管理等因素对气室性能的影响。分析原子气室加工与制造技术所面临的挑战,并展望该技术未来的发展方向,为相关领域的科研人员提供借鉴。

1 极化、弛豫分解、受限扩散与频移

SERF/OPM磁力仪、原子钟、核自旋陀螺仪/共磁仪的工程化性能预测核心逻辑基本一致,即将线宽、频移、稳定度等器件层观测量,映射到弛豫率、扩散常数、边界条件参数与频移系数等气室参数,再通过回归分析建立其与制造端参数的关联。Happer W等人^[54]对碰撞、光泵及扩散机制的阐述,为弛豫分解提供了核心理论基础。

1.1 极化

对以光泵为代表的极化过程而言,极化率 P 可用简化关系概括为^[39, 60-61]

$$P \approx \frac{R_{\text{op}}}{R_{\text{op}} + R_{\text{rel}}} \quad (1)$$

式中: R_{op} 为有效泵浦率, R_{rel} 为总退极化弛豫率。制造工艺对 R_{rel} 的影响,常通过两种方式体现:①

窗口应力双折射改变偏振态,使“标称圆偏振”退化为椭圆偏振,带来光泵效率下降与读出偏置^[38, 46, 62];②平行窗口形成反射干涉,使透射强度随波长/温度/角度出现周期性起伏,导致温漂或激光频率漂移被转化为信号漂移^[57, 59]。 R_{rel} 的具体来源将在下一节结合弛豫模型讨论。

1.2 Bloch 方程、线宽与弛豫分解

弱激发、近线性响应条件下,原子自旋极化的宏观磁化矢量 $\mathbf{M}(t)$ 演化遵循扩展的 Bloch 方程^[63],即

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B} - \left(\frac{\mathbf{M}_x}{T_2}, \frac{\mathbf{M}_y}{T_2}, \frac{\mathbf{M}_z - \mathbf{M}_0}{T_1} \right) + \mathbf{R}_{\text{pump}} + \mathbf{R}_{\text{meas}} \quad (2)$$

式中: t 为时间, γ 为旋磁比, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, $\mathbf{M}_x$ 、 $\mathbf{M}_y$ 、 $\mathbf{M}_z$ 分别为 x 、 y 、 z 方向的磁化矢量, $\mathbf{M}_0$ 为初始磁化矢量, $\mathbf{R}_{\text{pump}}$ 为光泵或自旋交换源项, $\mathbf{R}_{\text{meas}}$ 为读出附加效应。洛伦兹线型近似下,谱线半高宽 Δf 与横向弛豫时间满足 $\Delta f \approx 1/(\pi T_2)$ 。

总横向弛豫率 $\Gamma_2 = 1/T_2$ 是多种机制的叠加^[64],即

$$\Gamma_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_1} + \Gamma_{\text{SE}}^{(\text{eff})} + \Gamma_{\text{VB}} + \Gamma_{\text{opt}}^2 = \Gamma_{\text{SD}} + \Gamma_{\text{wall}} + \Gamma_{\text{imp}} + \Gamma_{\text{opt}}^1 + \Gamma_{\text{SE}}^{(\text{eff})} + \Gamma_{\text{VB}} + \Gamma_{\text{opt}}^2 \quad (3)$$

式中: $\Gamma_{\text{SE}}^{(\text{eff})}$ 为自旋交换项; Γ_{VB} 为梯度弛豫项; Γ_{opt}^1 和 Γ_{opt}^2 为光致弛豫项,其中 Γ_{opt}^1 表示光泵或测量光导致的退极化、重新布居、光抽运弛豫, Γ_{opt}^2 表示光场导致的功率展宽、AC Stark 不均匀、测量扰动引起的横向退相干; Γ_{SD} 为自旋破坏碰撞项; Γ_{wall} 为壁弛豫项; Γ_{imp} 为杂质弛豫项。

式(3)中各项的核心影响因素: Γ_{SD} 由缓冲气体种类、压强及温度决定^[54, 65-66]; Γ_{wall} 受腔体尺寸、表面涂层性质及原子扩散过程主导^[40, 67]; Γ_{imp} 与封装洁净度、材料放气及寄生气体含量相关;自旋交换项 $\Gamma_{\text{SE}}^{(\text{eff})}$ 在 SERF 条件下可被强烈抑制,是实现窄线宽的关键^[4, 6, 68-69]; Γ_{VB} 由磁场空间不均匀性引起,对核自旋器件影响显著^[15, 49, 51, 70-73]; Γ_{opt}^1 和 Γ_{opt}^2 受光功率、偏振与失谐影响^[24, 74-79]。

1.3 受限扩散与边界条件

当缓冲气体使原子运动进入扩散主导区(平均自由程 $\beta \ll$ 腔体特征尺寸 L),或磁场在空间存在明

显非均匀性时,需要采用含扩散项的 Bloch-Torrey 方程描述自旋演化过程^[15, 40, 80]。在这种情况下,腔体边界条件(如壁面去极化强度、吸附驻留时间等)将通过有效边界参数直接决定 Torrey 方程本征模的衰减率。

壁面弛豫经验模型可以表示为^[15, 81-82]

$$\Gamma_{\text{wall}} = c_1 n(T) + c_2 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (4)$$

式中: $n(T)$ 为碱金属原子密度(可通过 Steck 手册给出的蒸气压公式并结合理想气体定律计算得到^[83-84]), c_1 、 c_2 为与壁面材料和涂层性质相关的拟合系数, E 为吸附或相互作用的有效激活能, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度。该模型揭示了不同涂层可以通过改变 c_2 与 E 的数值,显著调制壁面弛豫率随温度的依赖关系。

此外,壁面弛豫的主导地位随气室微型化急剧增强。Wu Zhen^[40]系统阐述了壁面碰撞弛豫的扩散理论框架,壁面边界条件由退极化参数 μ_1 描述($\partial \rho / \partial n = -\mu_1 \rho$, ρ 为原子自旋极化密度, n 为壁面外法线方向, μ_1 由涂层微观品质如表面粗糙度、化学组成、润湿性等决定),对于裸玻璃壁面($\mu_1 \gg 1$)的立方体腔室,最低扩散本征模弛豫率为 $\Gamma_{\text{wall}} = 3\pi^2 D / L^2$,扩散常数 D ^[85]由工作原子与缓冲气体的种类及其压强决定。Zhang Xiangdong 等人^[15]进一步将 μ_1 无量纲化,得到参数 λ , $\lambda = \mu_1 L (\lambda \geq 0)$,并建立了 λ 与壁面碰撞退极化概率 ξ_s 的定量关系,即 $\lambda \approx [3L / (4\beta)] \cdot \xi_s$:理想涂层对应 $\lambda \rightarrow 0$,裸玻璃对应 $\lambda \gg 1$ 。该形式将涂层微观品质 ξ_s 通过 λ 直接映射到宏观弛豫率,为涂层定量设计提供了理论桥梁。在弱退极化区($\lambda \ll 1$,高性能涂层情形), Γ_{wall} 简化为

$$\Gamma_{\text{wall}} \simeq \Gamma_w = \frac{6\lambda D}{L^2} \quad (5)$$

式中: Γ_w 为简化后的壁弛豫项。式(5)表明:当特征尺寸 L 从毫米级缩小至微米级时, Γ_w 将急剧增大。因此进行壁面工程优化是微型化器件实现长弛豫时间的必要条件。

1.4 梯度场导致的频移与系统误差

非均匀磁场对 NMRG 和共磁仪的影响尤为关键:既引入附加弛豫 Γ_{VB} ,又导致原子核共振频率偏移,且偏移具有自旋物种(同位素)依赖性,在

双同位素共磁测量中存在不可消除的系统误差。Zhang Xiangdong 等人^[15]通过微扰理论推导的频移框架表明, 频移与磁场梯度分布密切相关, 且对边界条件参数 λ 敏感, 这一机理为壁面相互作用参数表征提供了新方法。

SERF/OPM 磁力仪中, 加热器电流或外部走线引入的寄生磁场与梯度是常见误差源。透明薄膜加热器中的电流会在气室附近产生寄生磁场及其梯度^[68, 86]。通过在测量时间窗内切断加热电流或采用加热电流斩波技术, 可以显著减小有效共振线宽并抑制频率漂移, 这表明在高灵敏度测量模式下, 热管理、电磁屏蔽、梯度补偿与气室设计需要一体化优化。

上述弛豫机制、受限扩散与梯度频移的抑制效果, 直接取决于气室的制造工艺、腔体结构与封装质量——传统玻璃加工与 MEMS 微加工两条技术路线, 正是通过不同的工艺设计实现对这些物理机制的差异化调控, 下文将详细对比分析其核心工艺与演进方向。

2 气室制造与封装

气室的制造直接决定原子/核自旋的边界条件与内环境, 现有技术可归纳为传统玻璃加工与 MEMS 微加工两条路线, 核心差异体现在对原子环境变量的长期稳定控制能力与几何一致性/集成潜力的权衡。

2.1 传统制造路线

传统路线采用氢氧焰加热吹制硼硅酸盐玻璃(如 Pyrex), 形成球形或圆柱形腔体, 优势在于光学质量高、表面易于涂覆抗弛豫涂层, 通过玻璃封装安瓿瓶或金属分配器在真空系统中完成碱金属和缓冲气体填充^[38, 87]。以 Rb-Xe 核自旋气室为例介绍典型流程: 高温(450 °C)长时间烘烤预处理→安瓿瓶破裂或蒸馏引入碱金属(如 ⁸⁷Rb)→高真空歧管系统填充工作气体(如 ¹²⁹Xe、¹³¹Xe)与缓冲气体(如 N₂、⁴He)→高温(> 600 °C)熔融密封→核磁共振谱学表征核自旋横向弛豫时间 T_2 与信噪比。

该路线通过严苛烘烤、精准静态气体配比和高温熔封, 实现杂质弛豫 Γ_{imp} 的强力抑制。基于该路线制造的气室长期频率漂移低, 但几何形状一

致性差。此外, 难以用于批量生产、不易与光学/电子系统集成短板, 限制了该路线在小型化、低成本、阵列化应用中的发展。

2.2 MEMS 微加工路线

基于半导体和 MEMS 工艺的微加工路线, 通常采用“玻璃-硅-玻璃(Glass-Silicon-Glass, GSG)三明治方案”: 光刻与深刻蚀, 如深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)定义硅片三维腔体, 再与上下玻璃片键合密封成形。该路线的核心优势在于极高的几何一致性、晶圆级批量制造能力及与光子/电子线路的单片集成潜力^[1, 9, 88]。其成功依赖三大关键技术: 碱金属与气体的可控引入、低温高强度密封工艺、与抗弛豫壁面工程的兼容性, 其中键合密封是决定气室内环境质量与涂层适用性的核心技术。

腔体成型为原子提供了基础物理空间, 而不同的成型工艺直接影响磁场均匀性与光路兼容性。DRIE 可制造高深宽比垂直侧壁腔体, 基于水射流辅助深硅刻蚀可实现 6 mm 光程^[89]; 基于玻璃湿法腐蚀可制备 45° 反射镜面, 用于紧凑型反射腔体^[22, 90-91]; 基于飞秒激光直写或硅层去除技术可制造全玻璃结构, 降低损耗与寄生电磁效应^[18, 92]。

腔体成型之后, 碱金属的可控引入成为决定气室性能的关键环节, 其工艺选择需与腔体结构、封装方式深度兼容, 具体工艺包括商业碱金属药丸物理引入^[90-91, 93]、蜡包裹碱金属激光融蜡释放^[1, 94]、叠氮化铷(RbN₃)光/热分解^[95-99]、叠氮化钡(BaN₃)与氯化铷(RbCl)反应生成^[94, 100-101]等, 各有优劣。现代微加工气室正向高度集成化方向演进: 可集成透明氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)薄膜^[9, 68]或非磁性交流加热结构^[1, 48]以实现精密温控, 集成钝化金反射镜(反射率 > 90%)以提高光场利用率^[102]; 引入波导结构, 进一步缩小系统体积^[103]; 构建集成电极, 在腔内产生并测量电场^[104]。

微加工碱金属蒸气池关键工艺方法对比如表 1 所示。目前填充工艺正在从外部物理引入向内部化学生成发展, 密封工艺正在从高温阳极键合向低温(钎键合、Au-In TLP 键合)与局部化(激光密封)方向演进。工艺发展的核心目标是兼容高性能抗弛豫涂层并提升气氛控制精度。应用导向方面,

表1 微加工碱金属蒸气池关键工艺方法对比

Tab.1 Comparison of key process techniques for microfabricated alkali-metal vapor cells

工艺类别	具体方法	基本原理	关键优点	面对的主要挑战或存在的缺点	代表文献
碱金属填充方法	物理引入：商业碱金属药丸(SAES Getters)	预制铯 / 铷药丸(含 Zr-Al 合金)置于储液池，密封后激光或焦耳加热释放	工艺成熟稳定，兼容批量制造，可控制气氛密封	激活产生热量和颗粒，可能污染光学腔，成本较高	[90–91, 93]
	物理引入：蜡包裹碱金属	在惰性气体中封装碱金属于蜡包，置入腔体后激光融蜡释放	避免氧化，可非超高真空操作，蜡层提供临时抗弛豫保护	工艺复杂，蜡残留可能影响性能，难实现晶圆级批量生产	[1, 94]
	化学生成：叠氮化铷(RbN ₃)光 / 热分解	RbN ₃ 溶液点入腔体，密封后紫外光解或热分解产生 Rb 和 N ₂ (缓冲气)	晶圆级批量填充，反应产物纯净(Rb + N ₂)	精确控制 N ₂ 气压较难，RbN ₃ 对湿气敏感，需使用透明窗口	[95–99]
	化学生成：叠氮化铷(BaN ₃)与氯化铷(RbCl)反应	腔室内密封混合物，加热生成 Rb、BaCl ₂ 和 N ₂	真空系统可操作，适合复杂气室结构，碱金属纯度高	副产物 BaCl ₂ 不透明，影响光学通透性，工艺时序复杂	[94, 100–101]
密封 / 键合方法	阳极键合	硅与硼硅玻璃在 300 ~ 450 °C、>500 V 条件下离子迁移键合	技术成熟、强度高、气密性好，无需中间层	高温导致碱金属氧化、涂层降解，产生腔内气体污染	[90, 101, 105–109]
	铟(In)键合	利用铟低熔点(156 °C)，140 °C热压密封	超低温兼容抗弛豫涂层，气密性优异(漏率 10 ⁻¹³ mbar·L/s)	铟易氧化，可能与碱金属反应，影响长期寿命	[56, 110]
	金-铟瞬态液相(Au-In TLP)键合	非对称 Au/In 结构 200 °C 键合，形成 AuIn ₂ 金属间化合物	中温键合，耐受 490 °C 后续工艺，涂层兼容性好、强度高	涉及多层金属沉积与图形化，工艺复杂，可能形成空洞	[111]
	铜-铜(Cu-Cu)热压键合	Cu 膜 350 °C、高压下固态扩散键合	气密性极佳，无固有气体产生，允许处理非玻璃材料(如蓝宝石)	铜层引入热磁噪声，不适用于超高灵敏度磁力仪，对表面要求苛刻	[93]
	牺牲微通道 + 玻璃焊料回流	刻蚀微通道抽气 / 充气，450 ~ 500 °C 玻璃焊料回流密封	腔内气氛控制能力卓越，有效去除杂质气体，气密性高	需 2 次键合，工艺步骤较多，回流温度仍较高	[112]
	局部激光密封	CO ₂ 激光局部加热熔化薄玻璃膜，与基底融合封堵微通道	高灵活性，“先填充后密封”，不损伤涂层或碱金属	需使用精密激光控制系统，对微结构设计(膜厚、通道尺寸)有特定要求	[46]

为满足低弛豫需求，建议优选低温密封与高纯度填充方法；为满足长期稳定性需求，建议优选高强度高气密性密封与稳定填充方法；为满足复杂气氛需求，建议选择局部激光密封与牺牲微通道技术。

气室的制造与封装为原子提供了基础物理环境，而壁面作为原子碰撞的直接接触界面，其状态与材料选择将直接放大或抑制弛豫效应，成为决定气室相干时间与长期稳定性的核心因素。

3 壁面状态与材料工程

气室特征尺寸减小时，比表面积增大^[113]，壁面碰撞成为原子 / 核自旋弛豫的主导机制之一，不仅展宽共振线宽、降低相干时间，更因吸附、化学反应、涂层 / 材料退化等慢变量特征影响，成为长期频率漂移的核心来源^[27–28, 53, 114–116]。

3.1 壁面效应的应用特异性影响

对于不同器件，壁面效应的影响具有不同的

特征。

对于A类器件,壁面弛豫作为附加弛豫源,展宽零场共振线宽并降低响应斜率,同时通过缩短相干时间 T_2 抬升自旋投影噪声本底,二者共同降低磁力仪的磁场灵敏度^[5, 68]。

对于B类器件,壁面弛豫压低暗态相干寿命(通常小于数毫秒),导致CPT共振线宽展宽、信噪比下降,加剧长期频稳恶化^[27-28, 117]。

对于C类器件,壁面碰撞是核自旋横向弛豫时间的主要限制因素,例如: ^{131}Xe 同位素核四极矩效应对壁面电场梯度敏感,引发频移与线宽变化^[53, 118-119]。

为解决壁面弛豫对三类器件应用的显著制约,

抗弛豫技术持续发展——通过物理或化学修饰内壁减少自旋翻转概率,已成为提升气室性能的核心路径。涂层作为最直接有效的修饰手段,其材料选择与工艺兼容性至关重要。

3.2 抗弛豫涂层:从经典材料到新型化学键合

涂层的核心性能参数为每次碰撞的弛豫概率 μ 与原子壁面平均驻留时间 τ_{dwell} ,后者与吸附能 E_a 满足 $\tau_{\text{dwell}} \propto \exp[E_a/(k_{\text{B}}T)]$ 。理想抗弛豫表面特性表现为原子能够低温快速脱附。在与壁面的结合中,经典涂层(石蜡、烯烃)通过物理吸附实现,新型硅烷类涂层通过共价键与玻璃结合,热稳定性更优。

涂层材料性能对比如表2所示。

表2 涂层材料性能对比
Tab.2 Comparison of coating material properties

具体材料	涂层类型	核心性能指标	工作温度	优缺点	代表文献
石蜡	物理吸附	约 10^4 次碰撞; Cs的 T_1 为 $0.7 \sim 1$ s	室温至 80°C	抗弛豫性能优异; 分子熔点低	[2, 120-122]
烯烃	物理吸附	约 10^6 次碰撞; Cs的 T_1 约50 s; Rb的 T_1 约60 s	约 30°C	抗弛豫性能优异; 分子熔点极低	[122-124]
十八烷基三氯硅烷(OTS)	化学键合	约2 000次碰撞; 部分实验中 ^{129}Xe 的 T_2 可达千秒	约 170°C	Si-O共价键结合, 热稳定性好, 工艺兼容性高; 末端 $-\text{CH}_3$ 表面能偏高, 抗弛豫性能一般	[5, 21, 120, 125-126]
全氟十二烷基三氯硅烷(PDTS)	化学键合	Xe的 T_2 为28.8 s, 较OTS提升32.7%	$> 110^\circ\text{C}$	110°C 条件下保持优异均匀性, 抗弛豫性能显著优于OTS和RbH; 工艺复杂	[127]
氢化物(RbH)	物理吸附	Xe的 T_2 为 $15 \sim 20$ s, 具体取决于实验条件	$> 110^\circ\text{C}$	可被核自旋极化, 产生显著壁诱导频移, 适用于壁面相互作用研究; 高温性能退化	[128-129]
氧化铝(Al_2O_3)	化学键合	将 ^{131}Xe 的 T_2 提升4.7倍; 可能降低 ^{129}Xe 的 T_2	耐高温	对 ^{131}Xe 优化效果显著	[130]

不同涂层的抗弛豫性能差异可达两个数量级^[121]。传统石蜡涂层工作温度通常低于 80°C ,在与极化原子进行约 10^4 次碰撞后才使其退极化; 烯烃涂层进一步将退极化碰撞次数提升至约 10^6 次,此时Rb原子纵向弛豫时间 T_1 可达53 s,但其抗弛豫性能在约 33°C 以上温度条件下会急剧退化; 硅烷涂层(如十八烷基三氯硅烷,即octadecyltrichlorosilane, OTS)可耐受 170°C 的工作温度,却仅能维持约2 000次壁面碰撞。现有涂层材料难以兼顾高

温耐受性与超低弛豫率。

工艺时序是影响涂层应用效果的关键,高性能热敏涂层(烯烃、硅烷)要求较低的最终密封温度(如 140°C 钢键合^[110])或较强的局部激光密封能力^[46],避免封装过程中降解。

除了表面涂层的修饰作用,气室本体材料的固有物理化学性质也对器件性能产生根本性影响,其选择需与涂层工艺、工作温度及应用场景协同考量。

3.3 壁面本体材料工程

气室本体材料的物理化学性质对器件性能产生根本性影响：电学性能方面，蓝宝石(Al_2O_3)的直流电阻显著高于玻璃，可将壁面漏电流抑制数个数量级，是高纯度电场操控的理想选择^[97]；热学与化学稳定性方面，工作温度影响壁面吸附/脱附平衡、放气率和涂层寿命，材料与涂层需在目标工作温区内保持稳定；材料选择方面，铝硅酸盐玻璃(Aluminosilicate Glass, ASG)代替硼硅酸盐玻璃(Borosilicate Glass, BSG)可使 ^{131}Xe 的 T_2 提升3.2倍，效果与原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD) Al_2O_3 涂层相当，揭示了基体材料本征表面特性的重要性^[130]。

壁面工程是宏观体材料选择与微观表面修饰的系统工程，实现高性能微型化原子器件，需在设计之初一体化考量基体材料、抗弛豫涂层及封装工艺的温度历程与兼容性。

4 结构与集成

微型器件的结构与集成核心目标是为原子系综创造稳定、可控且干扰极低的物理环境，需精确协同管理磁场、温度与光路，任何环节失衡都会制约器件性能上限。

4.1 磁屏蔽与梯度补偿

SERF模式高灵敏度器件依赖多层高磁导率材料(如坡莫合金)磁屏蔽筒，典型3~5层设计方案的理论屏蔽因子可达 10^6 ^[131]。Fang Xiujie等人^[132]研发的四层 μ 金属屏蔽系统，实现了 10^5 屏蔽因子，0.5 nT最内层残余磁场的噪声小于 $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，为亚飞特斯拉磁测灵敏度提供可能。

屏蔽系统内部需布置三轴补偿线圈，用于偏置磁场、射频驱动场产生及残余磁场梯度补偿。磁场梯度是原子自旋扩散弛豫和频移的关键因素^[15, 71, 133]。Zhan Xiang等人^[134]利用一阶和二阶梯度线圈联合补偿，在 100°C 条件下测得正方体气室内部一阶梯度约为 $0.8 \text{ nT}/\text{cm}$ ，二阶梯度约为 $-7.4 \text{ nT}/\text{cm}^2$ 。在静磁场磁感应强度为 $+B_0$ 、右旋泵浦条件下，仅一阶补偿时， ^{129}Xe 横向弛豫时间约19 s(80°C)；进行联合补偿后， ^{129}Xe 横向弛豫时间约56 s。与一阶补偿相比，联合补偿后 T_2 延长1~

4.3倍。Wu Zhihong等人^[51]基于K-Rb- ^{21}Ne 共磁力仪系统探讨了磁场梯度的原位测量、解耦与抑制方法，他们开展的实验中，采用8 mm球形GE180玻璃气室，内含2 amagat ^{21}Ne 、50 Torr N_2 和K-Rb混合碱金属，利用脉冲泵浦光暗态自由感应衰减法，可原位测量并解耦两类梯度干扰，其中电子极化梯度和残余磁场梯度对核自旋横向弛豫影响占比分别为57.05%和34.30%；搭配自研一阶梯度线圈主动补偿后，陀螺灵敏度提升20.45%、零偏不稳定性改善8.60%。Yuan Linlin等人^[135]发现极化梯度弛豫率可占总横向弛豫的90%以上，通过调控气室压强与温度等参数可将其降低为原来的1/15，为抑制陀螺长期漂移提供了可行路径。

4.2 光路优化与几何设计

传统GSG平面结构中，光束沿硅片厚度方向传播，光程约1~2 mm，限制了相互作用原子数量与信噪比。反射型气室通过集成 45° 或 54.74° 蚀刻反射镜面，使光路在芯片平面内折叠，以改善系统性能。王涛龙^[22]通过湿法腐蚀制作 45° 反射镜，构建6 mm光学长度单腔反射型气室，基于芯片原子钟开展测试，实现了 $1.23 \times 10^{-10}/\text{s}$ 短期频率稳定度与0.92 kHz CPT共振线宽，验证了该方案的工程潜力；球形微气室通过晶圆级微玻璃吹制技术批量制备，其对称性有助于降低内部磁场梯度，为多光束配置提供更大布局自由度，可降低系统误差与校准复杂度^[136]。

4.3 加热与磁干扰抑制

升温是获得足够碱金属原子密度的必要手段，但加热器引入的寄生磁场和温度梯度是主要噪声源。先进加热方案致力于精密温控与磁干扰最小化：高频(数十至数百kHz)交流加热将磁场噪声推移至高频段，Fang Xiujie等人^[132]采用80 kHz交流加热稳定气室至 190°C ，通过扭曲线圈抵消加热线磁场；Griffith WC等人^[137]利用斩波式直流加热与测量方案，仅在电流关闭“安静”窗口时测量，实现了约 $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度；郝杰鹏等人^[1, 138]将加热丝平行排列，并固定在耐高温材料基底上，形成加热薄膜，采用耐高温材料作为基材，采用非磁性镍铬合金线作为加热丝，加热膜电阻约为 150Ω 。通过PID控制，实现了 $\pm 5 \text{ mK}$ 的短期(2 h)稳定性

和 ± 10 mK的长期(20 h)稳定性,碱金属气室非磁性电加热系统引入的磁场噪声小于 $15 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

高性能集成的目标是:实现温度均匀稳定、寄生磁场极低且可重复,避免原子密度与场环境不均引发的额外弛豫、线宽展宽或长期频漂。

5 气体与长期稳定

微型化原子/核自旋器件的性能与气室内气体组分长期稳定性和封装完整性息息相关:短期指标(线宽、对比度、信噪比)受缓冲气体压强与配比调控,长期稳定性指标(频率漂移、老化、寿命)受气体化学相容性与封装气密性影响,温度将气体状态变量变化投影到弛豫率 Γ_2 和共振频移,最终决定器件阿伦方差、角随机游走(Angular Random Walk, ARW)。

5.1 缓冲气体的核心作用与权衡

缓冲气体的首要作用是将碱金属原子运动从弹道区推向扩散区,有效性根据Knudsen数 K_n ($K_n = \beta_1/l, \beta_1$ 为原子平均自由程, l 为气室特征尺寸)判断, $K_n \ll 1$ 时,扩散近似成立,原子与壁面碰撞频率显著降低,自旋相干时间延长^[54]。

选择缓冲气体时需权衡多种因素。提高压强 p 可抑制壁面弛豫,但会引入压力展宽 $\Gamma(\Gamma \propto p)$ 与压力频移 $\Delta\nu(\Delta\nu \propto p)$ ^[28, 139],对CPT而言,压力展宽与CPT线宽和弛豫率正相关^[140-141];缓冲气体热力学性质与理想温度工作点(如CPT的“零温度系数”点)紧密相关;NMRG中,不同惰性气体同位素对缓冲气体压强和配比的响应不同,需分别优化以最大化双同位素频差稳定性^[37, 129]。气体工程的核心是按主导性能指标排序以优选应用方案:壁面弛豫敏感时优先提高压强,碰撞展宽或温漂为约束时优先保证配比可重复性并降低温度敏感性。

缓冲气体的权衡关系在不同应用场景中呈现出差异化优先级,气体工程的目标与实现路径需精准匹配A、B、C类器件的应用性能需求^[9]。

5.2 三类应用的气体工程目标与案例

对于A类器件,气体工程目标为以高原子密度提升信噪比,同时有效线宽压至自旋破坏碰撞、磁场梯度弛豫与光抽运效应决定的极限。Karabinaoglu M S等人^[57]发现,He为278.8 Torr、 N_2 为

19.4 Torr、加热 100°C 、5 mW激光条件下,Cell-II实现4.21 pT最低可探测磁场,同时他们研究了温度和激光强度方面的最佳工作条件,表明气体工程需与热管理和磁场梯度抑制协同设计。

对于B类器件,气体工程目标为保障温度-频率响应曲线的可预测性与可重复性,通过优化缓冲气体种类和配比寻找零温度系数(Zero Temperature Coefficient, ZTC)点^[140],如Ar- N_2 混合气体在 64°C 附近的一阶温度系数即趋于零^[142]。极高气密性是长期稳定的前提,可防止碱金属氧化和气体组分变化,这是实现CSAC商业化的关键^[143]。

对于C类器件,气体工程目标为以缓冲气体(如 N_2)控制碱金属弛豫并作为“淬灭”气体,以极化气体(如 ^3He 或 ^{129}Xe)作为实现陀螺效应的核心工作介质^[143]。气体工程不仅影响弛豫时间 T_2 ,还通过受限扩散、非均匀磁场与壁面边界条件耦合引入系统性频移,优化目标是在微小体积内实现两种惰性气体同位素的长相干时间与稳定频率关系^[16, 87]。

5.3 长期漂移的核心机理与抑制

长期稳定性本质是保持气体状态变量(压强、组分)的长时间稳定性。

气体渗透是气室长期稳定的首要限制因素,He、Ne等气体会缓慢穿过BSG窗口,Abdullah S等人^[32]量化了Ne在 81°C 条件下通过BSG的渗透常数,渗透现象导致Cs气室压力以 $-0.9 \mu\text{bar}/\text{d}$ 下降,原子钟天稳定度限制在 5×10^{-11} 水平。玻璃表面沉积 Al_2O_3 致密薄膜可有效降低渗透率^[33-34],Carlé C等人^[34]系统测量了不同窗口材料下的He渗透常数 K 。BSG的 $K = (5.5 \pm 0.7) \times 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$,对应渗透时间常数 $\tau = (79 \pm 6) \text{ d}$;ASG的 $K = (1.4 \pm 0.2) \times 10^{-21} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, τ 延长至约30 500 d。后续研究表明^[33],BSG基底上 Al_2O_3 涂层可以将He渗透率降低为原来的1/130,对于使用ASG的气室,其He渗透率为BSG气室的1/450, Al_2O_3 涂层则进一步将防渗透性能提升近5倍,使He渗透率相较裸BSG标准气室降低了三个数量级以上。

内部化学反应与杂质放气(如碱金属与 H_2O 、 O_2 反应)改变气体成分^[115],引入额外弛豫中心,即使无缓冲气体的石蜡涂层Rb气室中,涂层放气(主

要为 H_2 及 C_3 以上碳氢化合物)产生的本底气压仍可达4 Pa, 导致Rb原子与本底气体的速度改变碰撞率高达 $10^6 s^{-1}$ [144-145], 采用深度烘烤除气与高洁净度材料是抑制此类漂移的关键[146-147]。

物理泄漏由封装缺陷(如键合裂缝)导致, 低温钢键合[111, 148]或优化阳极键合工艺可将泄漏率控制在 $< 10^{-12} mbar \cdot L/s$ 水平, 保障长寿命[93, 108]。

制造工艺的温度历程和材料选择直接决定长期稳定机制的抑制效果。高性能抗弛豫涂层(烷烃、烯烃、硅烷类)不耐高温, 传统阳极键合温度($\geq 300^\circ C$)会破坏涂层[142], $140^\circ C$ 钢键合等低温封装技术或局部激光密封技术是实现高相干涂层与高气密性封装兼容的重要途径。

6 表征与评价

高性能热原子器件的应用不仅体现于实验室中的单一样品使用, 更在于批量制造性能可复现、可预测且长期稳定的器件并应用于多种场景。建立从本征物理参数到应用性能指标的特征与评价体系, 是实现这一目标的前提。

6.1 气室本征参数的表征

系统集成前, 需对气室的本征物理参数进行独立测量, 为后续器件性能分析提供定量输入。气体状态方面, 原子数密度通过吸收光谱法测量[149], 混合气体摩尔分数可通过范德华碰撞展宽方法高精度获取[150], 亚多普勒光谱则用于检验气室是否受污染物影响[44]。自旋参数方面, 极化度 P 采用瞬态响应法[151]或专门光谱技术[152]测量, T_1 与 T_2 借助暗态扫频法在泵浦光关闭条件下分离获取, 从而为量化壁面弛豫和梯度弛豫提供直接工具[23]。气密性与寿命方面, 以光学膜片挠度法(约 $2.5 \times 10^{-12} mbar \cdot L/s$)为高灵敏度检漏手段, 基于氦质谱法进行校准[148], 结合加速老化实验和铷消耗模型可预测气室的工作寿命[153]。

6.2 面向应用的性能评价

完成本征表征后, 需将气室置入目标器件架构, 以系统指标为判据进行分级评价。

对于A类器件, 以磁场灵敏度和零场附近工作点稳定性为核心评价指标, 须在明确原子密度、温度和光强的条件下开展测定。性能评价时需要

重点考察: 标称工作点的灵敏度复现性、非磁性AC加热或斩波方案引入的寄生磁场水平、残余磁场补偿后灵敏度曲线的批间一致性。

对于B类器件, 以短期与中长期频率稳定度、CPT对比度、线宽及温度频移系数等为核心评价指标。性能评价时需要重点考察: 温度-频率响应曲线的批间可重复性、ZTC点位置的批次统计分布、缓冲气体配比精度, 将限制长期频率漂移的方法从服役阶段的温度补偿, 前置优化为在气室制造阶段主动调控。

对于C类器件, 以 T_2 、陀螺标度因子稳定性、角度随机游走和零偏不稳定性为核心评价指标。性能评价时需要重点考察: T_2 的批次统计分布、同一批次气室在标准化陀螺系统中的性能一致性, 并将梯度、边界弛豫等系统误差源的标定前移——从整机调试阶段前推至气室筛选阶段。

气体密封性与寿命验证为三类器件气室应用的共性要求: 以氦质谱检漏为基准, 结合加速老化实验和性能漂移模型, 实现从单点合格判定向全寿命周期预测的跨越。

7 挑战与展望

7.1 核心矛盾与待突破瓶颈

热原子气室的设计空间同时受到物理极限与工艺的双重约束, 这些边界决定了未来技术发展的上限。

晶圆级制造中硅与玻璃壁面材料的非对称分布将进一步放大特征尺寸效应, 使实际壁面弛豫偏离单一材料的简化模型。

烯烃涂层可实现 10^6 次壁面碰撞而不退极化, 却在 $33^\circ C$ 以上迅速失效; OTS涂层耐温至 $170^\circ C$, 但允许的壁面碰撞次数仅为烯烃涂层的0.2%。目前缺乏兼具高温耐受与超低弛豫率的涂层, 未来此领域可能的突破方向包括采用多层异质涂层、二维材料衬底及表面全氟化修饰方案等。同时, 当前涂层质量严重依赖经验工艺, 表面能、粗糙度、覆盖率及化学态与弛豫率之间的定量关联尚未建立。将原子力显微镜、X射线光电子能谱和拉曼光谱等原位表面表征与弛豫测量联用, 是摆脱经验试错方法、走向涂层精准理论设计的关键一步。

7.2 从实验室原型到标准化器件

热原子器件发展的长远目标,是将性能的确 定性从整机端的后补偿前移至气室端的设计与制 造阶段,使器件指标尽可能由气室自身品质决定。 对于A类器件,需要从依赖多层磁屏蔽与线圈补偿 转向原生无磁设计,如基于非磁性AC加热、对称 布线和光诱导原子解吸附(Light-Induced Atomic De- sorption, LIAD)光控密度等技术从源头抑制寄生干 扰,使气室本征灵敏度不被系统噪声掩盖;对于B 类器件,关键在于将气体组分工程的成果固化为 气室制造参数,如通过精准配比将一阶温度频移 系数调至近零等。对于C类器件,需要从单样品性 能突破迈向批次可互换、标准化研发,可以建立 包括气室几何尺寸、涂层状态、梯度分布、陀螺 角度随机游走、零偏不稳定性等的定量映射,在 产线生产阶段即可预测气室在标准表头中的表现, 以设计可复现的产品,替代逐个产品筛选。

当上述设计方法与晶圆级批量制造深度融合, 热原子气室将完成从实验室原型设备向可量产标 准化器件的转变。

参考文献

- [1] Yu Huiyao, Zhang Xuyuan, Zhang Jian, et al. Key technologies in developing chip-scale hot atomic devices for precision quantum metrology[J]. *Micromachines*, 2024, 15(9): 1095.
- [2] Fabricant A, Novikova I, Bison G. How to build a magnetometer with thermal atomic vapor: a tutorial[J]. *New Journal of Physics*, 2023, 25(2): 025001.
- [3] 赵一心, 刘曦屿, 于东睿, 等. 原子磁力仪在异常作用力及类轴子暗物质探测中的应用[J]. *计测技术*, 2023, 43(4): 1-14.
Zhao Yixin, Liu Xiyu, Yu Dongrui, et al. Search for exotic force and axionlike dark matter with atomic magnetometry[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(4): 1-14.
- [4] 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.
- [5] Seltzer S J. Developments in alkali-metal atomic magnetometry[D]. Princeton: Princeton University, 2008.
- [6] Shah V, Romalis M V. Spin-exchange relaxation-free magnetometry using elliptically polarized light[J]. *Physical Review A*, 2009, 80(1): 013416.
- [7] Zhao Binbin, Li Lin, Zhang Yaohua, et al. Optically pumped magnetometers recent advances and applications in biomagnetism: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(17): 18949-18962.
- [8] Kitching J, Knappe S, Donley E A. Atomic sensors — a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 1749-1758.
- [9] Kitching J. Chip-scale atomic devices[J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(3): 031302.
- [10] Kitching J, Hummon M, McGehee W, et al. Next-generation chip scale atomic clocks[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2889(1): 012015.
- [11] 廉吉庆, 潘多, 赵天, 等. 基于外腔半导体激光器的微型原子钟[J]. *计测技术*, 2025, 45(2): 26-32.
Lian Jiqing, Pan Duo, Zhao Tian, et al. Miniature atomic clock based on external cavity diode laser[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45(2): 26-32.
- [12] Shi Meng. Investigation on magnetic field response of a ^{87}Rb - ^{129}Xe atomic spin comagnetometer[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 32033-32041.
- [13] Quan Wei, Wei Kai, Zhao Tian, et al. Synchronous measurement of inertial rotation and magnetic field using a K-Rb- ^{21}Ne comagnetometer[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(1): 012118.
- [14] Yu Wenbin, Xu Zhengyi, Jin Taoyun, et al. A novel method of measuring spin polarization of noble-gas atoms in nuclear magnetic resonance gyroscopes[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 9521210.
- [15] Zhang Xiangdong, Hu Jinbo, Xiao Dawu, et al. Frequency shift caused by nonuniform field and boundary relaxation in magnetic resonance and comagnetometers[J]. *Communications Physics*, 2025, 8(1): 93.
- [16] Limes M E, Dural N, Romalis M V, et al. Long spin-1/2 noble gas coherence times in mm-sized anodically bonded batch-fabricated ^3He - ^{129}Xe - ^{87}Rb cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(13): 134001.
- [17] Laskar A W, Singh N, Mukherjee A, et al. Interplay of classical and quantum dynamics in a thermal ensemble of atoms[J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18(5): 053022.
- [18] Artusio-Glimpse A B, Meraki A, Shillingburg H, et al. Wafer-level fabrication of fully-dielectric vapor cells for Rydberg atom electrometry[PP/OL]. *ArXiv* (2025-03-19)[2026-03-04]. <https://arxiv.org/abs/2503.15433>.
- [19] Schlossberger N, Prajapati N, Berweger S, et al. Ryd-

- berg states of alkali atoms in atomic vapour as SI-traceable field probes and communications receivers[J]. *Nature Reviews Physics*, 2024, 6(10): 606–620.
- [20] Zektzer R, Lu X, Hoang K T, et al. Strong interactions between integrated microresonators and alkali atomic vapors: towards single-atom, single-photon operation[J]. *Optica*, 2024, 11(10): 1376–1384.
- [21] 李新坤, 蔡玉珍, 郑建朋, 等. 碱金属原子气室研究进展[J]. *导航与控制*, 2020, 19(1): 125–132.
Li Xinkun, Cai Yuzhen, Zheng Jianpeng, et al. Research progress on the alkali metal atomic vapor cell[J]. *Navigation and Control*, 2020, 19(1): 125–132.
- [22] 王涛龙. 芯片原子钟的集成反射型气室设计、制造和测试[J]. *中国激光*, 2025, 52(1): 94–99.
Wang Taolong. Design, Fabrication, and testing of integrated reflective vapor cell for chip-scale atomic clocks[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(1): 0104003–0104006.
- [23] 钱天予, 郑锦韬, 熊志强, 等. 基于暗态扫频法的Rb-Xe自旋交换体系弛豫时间测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(9): 146–154.
Qian Tianyu, Zheng Jintao, Xiong Zhiqiang, et al. Measurement method for relaxation time of Rb-Xe spin exchange system based on dark state sweeping method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 146–154.
- [24] 邓敏, 裴华刚, 张樊, 等. 矢量光频移对铷原子磁力仪中自旋噪声抑制的理论研究[J]. *宇航计测技术*, 2025, 45(5): 17–27.
Deng Min, Pei Huagang, Zhang Fan, et al. Theoretical study on spin noise suppression by vector light shift in rubidium atomic magnetometers[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2025, 45(5): 17–27.
- [25] Micalizio S, Godone A, Levi F, et al. Spin-exchange frequency shift in alkali-metal-vapor cell frequency standards[J]. *Physical Review A*, 2006, 73(3): 033414.
- [26] Levi F, Camparo J, Francois B, et al. Precision test of the ac stark shift in a rubidium atomic vapor[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(2): 023433.
- [27] Knappe S, Gerginov V, Schwindt P D D, et al. Atomic vapor cells for chip-scale atomic clocks with improved long-term frequency stability[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2351–2353.
- [28] Kazakin A, Kleimanov R, Korshunov A, et al. MEMS alkali vapor cell encapsulation technologies for chip-scale atomic clock[J]. *Computing, Telecommunication and Control*, 2021, 14(2): 49–64.
- [29] Wang Weiyi, Xia Mingming, Quan Wei, et al. Mode analysis of spin field of thermal atomic ensembles[J]. *Quantum Science and Technology*, 2024, 9(3): 035048.
- [30] Li Guoliang, Shang Jintang, Zhang Jin, et al. Wafer-level integration of micro heaters on an alkali vapor cell for chip-scale atomic magnetometers[C]// *Proceedings of 2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2018: 1564–1567.
- [31] 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. Optical Physics*, 2006, 23(6): 1001–1006.
- [32] Abdullah S, Affolderbach C, Gruet F, et al. Aging studies on micro-fabricated alkali buffer-gas cells for miniature atomic clocks[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 163505.
- [33] Carlé C, Mursa A, Karvinen P, et al. On the reduction of gas permeation through the glass windows of micromachined vapor cells using Al_2O_3 coatings[J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(8): 085102.
- [34] Carlé C, Keshavarzi S, Mursa A, et al. Reduction of helium permeation in microfabricated cells using aluminosilicate glass substrates and Al_2O_3 coatings[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(21): 214501.
- [35] Kukhtetskiy S V, Fomenko E V, Anshits A G. Anomalous diffusion of helium and neon in low-density silica glass[J]. *Membranes*, 2023, 13(9): 754.
- [36] Carlé C, Abdel Hafiz M, Keshavarzi S, et al. Pulsed-CPT Cs-Ne microcell atomic clock with frequency stability below 2×10^{-12} at 105 s[J]. *Optics Express*, 2023, 31(5): 8160.
- [37] 徐正一. 核磁共振陀螺仪的关键技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
Xu Zhengyi. Key Techniques of nuclear magnetic resonance gyroscope[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [38] Hong S H, Yim S H, Jeong T, et al. Fabrication of an Rb-Xe gas cell with optical components attached by optical contact bonding for an atom spin gyroscope[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(14): 3988–3994.
- [39] 魏梦梦. 核磁共振陀螺仪中原子自旋极化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
Wei Mengmeng. Study on atomic spin polarization in nuclear magnetic resonance gyroscope[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [40] Wu Zhen. Wall interactions of spin-polarized atoms[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2021, 93(3): 035006.

- [41] Yasuda R, Ishii K, Klassen W, et al. Measurement of the total spin angular momentum $\langle F_z \rangle$ of alkali-metal atoms [J]. *Physical Review A*, 2025, 111(3): 033111.
- [42] Li Shuguang, Dai Pengfeng, Liu Jinsheng, et al. Spin relaxation of rubidium atoms in an octadecyltrichlorosilane anti-relaxation and anti-reflection coated vacuum multi-pass cell[J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12(11): 4384–4398.
- [43] Ball J E, Wild J M, Norquay G. Investigating rubidium density and temperature distributions in a high-throughput ^{129}Xe -Rb spin-exchange optical pumping polarizer [J]. *Molecules*, 2023, 28(1): 11.
- [44] Lei M, Eckel S P, Norrgard E B, et al. Collisional broadening of ^{85}Rb Rydberg levels: conclusions for vapor-cell manufacture [J]. *Physical Review Applied*, 2025, 23(3): 034028.
- [45] Xu Yian, Pei Hongyu, Cong Yuxin, et al. A non-thermal method to maintain alkali vapor density of anti-relaxation coating cell in spin exchange relaxation-free magnetometer [J]. *Measurement*, 2025, 242: 115960.
- [46] Péroux L, Dewilde A, Chutani R, et al. Locally sealed microfabricated vapor cells filled from an ex situ Cs source [J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(14): 144003.
- [47] Wu Jiaqi, Liu Feng, Duan Lihong, et al. Transient heat transfer modeling of SERF co-magnetometer atomic ensemble based on the thermoelectric analogy method [J]. *Photonics*, 2025, 12(3): 224.
- [48] Chen Zhichao, Li Yong. Design of non-magnetic temperature control system for alkali vapor cell of NMRG[C]// *Proceedings of 2021 4th International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME)*, 2021: 59–62.
- [49] Pang Haoying, Liu Feng, Fan Wenfeng, et al. Comprehensive analysis of the effects of magnetic field gradient on the performance of the SERF co-magnetometer[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 5215–5228.
- [50] Tian Hao, Liu Zhanchao, Xiao Lan, et al. The coupling effect of temperature and Rb-Xe in NMR sensor[J]. *Measurement*, 2024, 224: 113762.
- [51] Wu Zhihong, Pang Haoying, Wang Zhuo, et al. Magnetic field gradient in K-Rb- ^{21}Ne comagnetometer: measurement, decoupling and suppression[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 363: 114687.
- [52] Cates G D, Schaefer S R, Happer W. Relaxation of spins due to field inhomogeneities in gaseous samples at low magnetic fields and low pressures [J]. *Physical Review A*, 1988, 37(8): 2877–2885.
- [53] Walker T G, Larsen M S. Spin-exchange-pumped NMR gyros [M]// *Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics*. Amsterdam: Elsevier, 2016: 373–401.
- [54] Happer W, Jau Y Y, Walker T. Optically pumped atoms [M]. Berlin: WILEY-VCH, 2010.
- [55] 汪之国, 江奇渊, 张焱, 等. 光泵浦核磁共振陀螺灵敏度优化[J]. *导航与控制*, 2022, 21(增刊2): 51–59.
- Wang Zhiguo, Jiang Qiyun, Zhang Yi, et al. Parameter optimization on sensitivity in optically pumped NMRGs [J]. *Navigation and Control*, 2022, 21(S2): 51–59.
- [56] 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.
- [57] Karabinaoğlu M S, Cakli B M, Sevim M H. The characterization of atomic vapor cells for high-sensitivity magnetic field measurements in SERF regime[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2025, 9(4): 1–4.
- [58] Jiang Minwei, Wang Jian, Zhai Hao, et al. Level assessment of ^{87}Rb in rubidium-filled MEMS vapor cells by X-ray imaging for atomic magnetometers[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2024, 63(5): 051006.
- [59] Karabinaoğlu M, Çakir B, Başoğlu M E. Atomic comagnetometer gyroscopes for inertial navigation systems: a review [J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2024, 32(2): 305–319.
- [60] 傅杨颖. 铯原子射频磁力仪的初步实现与性能优化[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- Fu Yangying. Preliminary implementation and performance optimization of cesium atomic radio-frequency magnetometer[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020.
- [61] 丰宇焜. 利用氙同位素共磁力仪寻找亚毫米尺度的单极-偶极相互作用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- Feng Yukun. Search for monopole-dipole interactions at the sub-millimeter range with a xenon isotope comagnetometer[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [62] 邹升. 超高灵敏原子自旋惯性测量装置碱金属气室技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- Zou Sheng. Research on alkali metal cell based on ultra-sensitive atomic spin inertial measurement device [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [63] Bloch F. Nuclear induction[J]. *Physical Review*, 1946, 70(7/8): 460–474.
- [64] Budker D, Romalis M. Optical magnetometry[J]. *Nature*

- Physics, 2007, 3(4): 227–234.
- [65] Kelley M, Branca R T. Theoretical models of spin-exchange optical pumping: revisited and reconciled [J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129(15): 154901.
- [66] Appelt S, Baranga A B A, Erickson C J, et al. Theory of spin-exchange optical pumping of ^3He and ^{129}Xe [J]. Physical Review A, 1998, 58(2): 1412–1439.
- [67] Shah V, Knappe S, Schwindt P D D, et al. Subpicotesla atomic magnetometry with a microfabricated vapour cell [J]. Nature Photonics, 2007, 1(11): 649–652.
- [68] Walker T G, Happer W. Spin-exchange optical pumping of noble-gas nuclei [J]. Reviews of Modern Physics, 1997, 69(2): 629–642.
- [69] Das T, Ullrich C A, Jentschura U D. Retardation effects in atom-wall interactions [J]. Physical Review A, 2024, 109(2): 022808.
- [70] Limes M E, Dural N, Romalis M V, et al. Dipolar and scalar ^3He - ^{129}Xe frequency shifts in stemless cells [J]. Physical Review A, 2019, 100(1): 010501.
- [71] Liu Xiaohu, Chen Chang, Qu Tianliang, et al. Transverse spin relaxation and diffusion-constant measurements of spin-polarized ^{129}Xe nuclei in the presence of a magnetic field gradient [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 24122.
- [72] Wang Xuelei, Li Jianli, Qu Chunyu, et al. Method to quickly estimate T_1 value by suppressing spin exchange relaxation and magnetic field gradient relaxation in atomic sensors [J]. Optics Express, 2024, 32(9): 15380–15389.
- [73] Zheng Junhe, Xiao Wei, Li Sheng, et al. Langevin approach to magnetic-field-gradient-induced spin relaxation in a coated cell [J]. Physical Review A, 2024, 109(2): 022803.
- [74] Ding Zhichao, Yuan Jie. Influence of linearly polarized light on the transverse relaxation of ground-state ^{133}Cs atoms [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 12404.
- [75] Ke Hongliang, Miao Peixian, Yang Shiyu, et al. Temperature dependent relaxation lifetime T_1 , T_2 measurements of the spin-polarized ^{87}Rb atoms [J]. Optik, 2019, 180: 517–525.
- [76] Cai Ze, Duan Lihong, Fan Shimiao, et al. Comprehensive analysis of the impact of optical magnetic misalignment on the performance of the SERF co-magnetometer [J]. Optics Express, 2025, 33(9): 19220–19234.
- [77] Chen Xu, Wang Wupeng, Mei Jialin, et al. Research on optimization method of beam shaping based on ultra high sensitivity magnetic field measurement [C]// Proceedings of 2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2023: 274–277.
- [78] Mao Yunkai, Dong Boxian, Li Jianli, et al. Influence of pump power and beam diameter on the transverse relaxation rate of noble gas nuclear spins in the nuclear magnetic resonance gyroscope [C]// Proceedings of SPIE-CLP Conference on Advanced Photonics 2022, 2023: 12601.
- [79] Ruan Jiasen, Duan Lihong, Fu Yang, et al. Effects of pump laser intensity on the cell temperature working point in a K-Rb- ^{21}Ne spin-exchange relaxation-free co-magnetometer [J]. Optics Express, 2023, 31(5): 8342–8351.
- [80] Torrey H C. Bloch equations with diffusion terms [J]. Physical Review, 1956, 104(3): 563–565.
- [81] Butscher R, Wäckerle G, Mehring M. Nuclear quadrupole interaction of highly polarized gas phase ^{131}Xe with a glass surface [J]. The Journal of Chemical Physics, 1994, 100(9): 6923–6933.
- [82] Volk C H, Kwon T M, Mark J G, et al. Measurement of the Rb- ^{131}Xe spin-exchange cross section in ^{131}Xe relaxation studies [J]. Physical Review Letters, 1980, 44(3): 136–139.
- [83] Alcock C B, Itkin V P, Horrigan M K. Vapour pressure equations for the metallic elements: 298 ~ 2 500 K [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1984, 23(3): 309–313.
- [84] Alkali D line data [DS/OL]. [2026-03-04]. <https://proceedings.steck.us/alkalidata/>.
- [85] Zhang Xiangdong, Hu Jinbo, Zhao Nan. Stable atomic magnetometer in parity-time symmetry broken phase [J]. Physical Review Letters, 2023, 130(2): 023201.
- [86] Jiménez-Martínez R, Griffith W C, Wang Y J, et al. Sensitivity comparison of MX and frequency-modulated Bell-bloom Cs magnetometers in a microfabricated cell [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(2): 372–378.
- [87] Yim S H, Lee D Y, Lee S, et al. Experimental setup to fabricate Rb-Xe gas cells for atom spin gyroscopes [J]. AIP Advances, 2022, 12(1): 015025.
- [88] Knapkiewicz P. Technological assessment of MEMS alkali vapor cells for atomic references [J]. Micromachines, 2019, 10(1): 25.
- [89] Karlen S, Haesler J, Overstolz T, et al. Sealing of MEMS atomic vapor cells using Cu-Cu thermocompression bonding [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(1): 95–99.
- [90] Dyer S, Griffin P F, Arnold A S, et al. Micro-machined deep silicon atomic vapor cells [J]. Journal of Applied

- Physics, 2022, 132(13): 134401.
- [91] Nishino H, Yano Y, Hara M, et al. Reflection-type vapor cell for micro atomic clocks using local anodic bonding of 45° mirrors[J]. Optics Letters, 2021, 46(10): 2272–2275.
- [92] Han Runqi, You Zheng, Zhang Fan, et al. Microfabricated vapor cells with reflective sidewalls for chip scale atomic sensors[J]. Micromachines, 2018, 9(4): 175.
- [93] Lucivero V G, Zanoni A, Corielli G, et al. Laser-written vapor cells for chip-scale atomic sensing and spectroscopy[J]. Optics Express, 2022, 30(15): 27149–27163.
- [94] Wang Xuelei, Ye Mao, Lu Fei, et al. Recent progress on micro-fabricated alkali metal vapor cells[J]. Biosensors, 2022, 12(3): 165.
- [95] Pereira H M, Dorés B S, Silva J P O, et al. Microfabrication of rubidium-85 vapor cell for optically pumped magnetometer applications through UV light decomposition of rubidium azide[J]. Vacuum, 2025, 234: 114103.
- [96] Maurice V, Chutani R, Carlé C, et al. Versatile micro-fabricated alkali vapor cells using local sealing[C]// Proceedings of 2022 International Frequency Control Symposium - European Frequency (IFCS - EFTF 2022), Paris, France, 2022.
- [97] Karlen S. Fabrication and characterization of MEMS alkali vapor cells used in chip-scale atomic clocks and other atomic devices[D]. Rue Emile-Argand: l'Université de Neuchâtel: 2017.
- [98] Karlen S, Buchs G, Overstolz T, et al. MEMS atomic vapor cells for gyroscope applications[C]// Proceedings of 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), 2017: 315–316.
- [99] Buchs G, Karlen S, Overstolz T, et al. Nuclear spin decoherence time in MEMS atomic vapor cells for applications in quantum technologies[C]// Proceedings of Fourth International Conference on Quantum Technologies (ICQT - 2017). Moscow, Russia, 2018: 020011.
- [100] Perez M A, Nguyen U, Knappe S, et al. Rubidium vapor cell with integrated nonmetallic multilayer reflectors[C]// Proceedings of 2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2008: 790–793.
- [101] Guo Ping, Meng Hongling, Dan Lin, et al. Wafer-level filling of MEMS vapor cells based on chemical reaction and evaporation[J]. Micromachines, 2022, 13(2): 217.
- [102] Wittkämper F, Scholtes T, Linzen S, et al. Integration of passivated gold mirrors into microfabricated alkali vapor cells[J]. Coatings, 2023, 13(10): 1733.
- [103] Bopp D G. Nanophotonic integration of microfabricated alkali vapor cells[D]. Boulder: University of Colorado, 2020.
- [104] Ma L, Viray M A, Anderson D A, et al. Measurement of dc and ac electric fields inside an atomic vapor cell with wall-integrated electrodes[J]. Physical Review Applied, 2022, 18(2): 024001.
- [105] Hasegawa M, Chutani R K, Boudot R, et al. Effects of getters on hermetically sealed micromachined cesium - neon cells for atomic clocks[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(5): 055022.
- [106] Lv Qiang, He Lu, Xu Jian. An experimental study of atomic vapor cell fabrication for atomic clock[C]// Proceedings of 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011: 552–554.
- [107] Pétremand Y, Affolderbach C, Straessle R, et al. Micro-fabricated rubidium vapour cell with a thick glass core for small-scale atomic clock applications[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(2): 025013.
- [108] Zhang Lu, Zhang Wendong, Zhang Shougang, et al. Micro-fabrication and hermeticity measurement of alkali - atom vapor cells based on anodic bonding[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100201.
- [109] Nishino H, Furuya Y, Ono T. Micro-fabricated vapor cells with sealed Rb atoms by distillation at wafer level and two-step bonding for miniature atomic clocks[J]. Optics Express, 2021, 29(26): 44316–44321.
- [110] Straessle R, Petremand Y, Briand D, et al. Towards wall-coated microfabricated cells: alkali vapor-cells using indium thin-film low-temperature bonding[C]// Proceedings of 2012 European Frequency and Time Forum, 2012: 309–311.
- [111] Wang Yiqun, Wu Yaning, Xia Xianhai, et al. Micro-fabricated alkali vapor cells sealed at low temperature using asymmetric Au-In transient liquid phase (TLP) bonding[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(SD): SDDL03.
- [112] Tsujimoto K, Hirai Y, Sugano K, et al. Sacrificial micro-channel sealing by glass-frit reflow for chip scale atomic magnetometer[C]// Proceedings of 2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2011: 368–371.
- [113] Seltzer S J, Michalak D J, Donaldson M H, et al. Investigation of antirelaxation coatings for alkali - metal vapor cells using surface science techniques[J]. The Journal of Chemical Physics, 2010, 133(14): 144703.

- [114] Kitching J, Knappe S, Hollberg L. Miniature vapor-cell atomic-frequency references[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(3): 553–555.
- [115] Camparo J C, Frueholz R P, Jaduszliwer B. Alkali reactions with wall coating materials used in atomic resonance cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62 (2) : 676–681.
- [116] Dellis A T, Shah V, Donley E A, et al. Low helium permeation cells for atomic microsystems technology [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2775–2778.
- [117] Chutani R. Design, technology and packaging of cesium vapor cells for mems atomic clocks [D]. Besançon: Université de Franche-Comté, 2011.
- [118] Wu Z, Happer W, Kitano M, et al. Experimental studies of wall interactions of adsorbed spin-polarized ^{131}Xe nuclei [J]. *Physical Review A*, 1990, 42(5): 2774–2784.
- [119] Chen Yao, Yu Mingzhi, Ma Yintao, et al. Quadrupolar interaction induced frequency shift of ^{131}Xe nuclear spins on the surface of silicon [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(35): 355102.
- [120] Ulanski E, Wu Z. Measurement of dwell times of spin polarized rubidium atoms on octadecyltrichlorosilane - and paraffin - coated surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(20): 201115.
- [121] Balabas M V, Karaulanov T, Ledbetter M P, et al. Polarized alkali-metal vapor with minute-long transverse spin-relaxation time [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105 (7): 070801.
- [122] Balabas M V, Tretiak O Y. Comparative study of alkali-vapour cells with alkane-, alkene- and 1-nonadecylbenzene - based antirelaxation wall coatings [J]. *Quantum Electronics*, 2013, 43(12): 1175.
- [123] Corsini E P, Karaulanov T, Balabas M, et al. Hyperfine frequency shift and zeeman relaxation in alkali-metal-vapor cells with antirelaxation alkene coating [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(2): 022901.
- [124] Li Wenhao, Balabas M, Peng Xiang, et al. Characterization of high-temperature performance of cesium vapor cells with anti-relaxation coating [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(6): 063104.
- [125] Hafiz M A, Maurice V, Chutani R, et al. Characterization of Cs vapor cell coated with octadecyltrichlorosilane using coherent population trapping spectroscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(18): 184901.
- [126] Straessle R, Pellaton M, Affolderbach C, et al. Microfabricated alkali vapor cell with anti-relaxation wall coating [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(4): 043502.
- [127] Li Shun, Lin Longbin, Xu Fangqi, et al. A novel anti-relaxation material applied in miniaturized atomic spin gyroscope [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025: 1–14.
- [128] Rohrbaugh S, Wang H T J, Singh J, et al. Magnetic decoupling of ^{129}Xe nuclear spin relaxation due to wall collisions with RbH and RbD coatings [J]. *Physical Review A*, 2012, 86(4): 043413.
- [129] Wang Xuelei, Li Jianli, Liu Zhanchao, et al. Optimizing ^{129}Xe and ^{131}Xe relaxation in an NMR gyroscope using buffer gas pressure and wall coating [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2023, 352: 107430.
- [130] Mohammednoor R M. MEMS components for NMR atomic sensors [D]. Irvine: University of California, 2019.
- [131] Ma Danyue, Lu Jixi, Fang Xiujie, et al. Parameter modeling analysis of a cylindrical ferrite magnetic shield to reduce magnetic noise [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(1): 991–998.
- [132] Fang Xiujie, Wei Kai, Fan Wenfeng, et al. Precise determination of magnetic gradient relaxation of coupled atomic spin ensemble in spin-exchange relaxation-free co-magnetometer [J]. *Photonics*, 2023, 10(4): 400.
- [133] Sheng D, Kabcenell A, Romalis M V. New classes of systematic effects in gas spin comagnetometers [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(16): 163002.
- [134] Zhan Xiang, Chen Chang, Wang Zhiguo, et al. Improved compensation and measurement of the magnetic gradients in an atomic vapor cell [J]. *AIP Advances*, 2020, 10 (4): 045002.
- [135] Yuan Linlin, Huang Jiong, Fan Wenfeng, et al. Measurement and analysis of polarization gradient relaxation in the atomic comagnetometer [J]. *Measurement*, 2023, 217: 113043.
- [136] Ji Yu, Shang Jintang, Gan Qi, et al. Improvement of sensitivity by using microfabricated spherical alkali vapor cells for chip - scale atomic magnetometers [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(10): 1715–1722.
- [137] Griffith W C, Knappe S, Kitching J. Femtotesla atomic magnetometry in a microfabricated vapor cell [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27167–27172.
- [138] 郝杰鹏, 周斌权. 碱金属气室无磁电加热技术研究与应用系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (5) : 180–183.
Hao Jiepeng, Zhou Binqun. Study on non-magnetic heating technology and system for alkali vapor cells [J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(5): 180–183.
- [139] Kozlova O, Guérandel S, De Clercq E. Temperature and

- pressure shift of the Cs clock transition in the presence of buffer gases: Ne, N₂, Ar[J]. *Physical Review A*, 2011, 83(6): 062714.
- [140]李青林. 小型化高性能相干布居囚禁原子钟新方案探索[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2024.
- Li Qinglin. Novel schemes for compact and high-performance coherent population trapping atomic clocks [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences), 2024.
- [141]Jia Shuo, Jiang Zhiyuan, Jiao Binbin, et al. The micro-fabricated alkali vapor cell with high hermeticity for chip-scale atomic clock [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(1): 436.
- [142]李云超, 胡旭文, 刘召军, 等. 芯片原子钟原子气室的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060003.
- Li Yunchao, Hu Xuwen, Liu Zhaojun, et al. Research progress of atom vapor cell for chip-scale atomic clock[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060003.
- [143]董海峰, 房建成, 周斌权, 等. Mems原子自旋陀螺气室芯片加工设备与工艺研究[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(11): 2592-2596.
- Dong Haifeng, Fang Jiancheng, Zhou Binqun, et al. Fabrication of atomic vapor cell chip for MEMS atomic spin-polarized gyroscope[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(11): 2592-2596.
- [144]Sekiguchi N, Hatakeyama A. Non-negligible collisions of alkali atoms with background gas in buffer-gas-free cells coated with paraffin[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(4): 81.
- [145]Hatakeyama A, Kuroda T, Sekiguchi N, et al. Analysis of background gas in an alkali-metal vapor cell coated with paraffin[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(7): 133.
- [146]Chen W C, Gentile T R, Fu C B, et al. Polarized ³He cell development and application at NIST[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 294: 012003.
- [147]Weller D, Yilmaz A, Kübler H, et al. High vacuum compatible fiber feedthrough for hot alkali vapor cells[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(5): 1546.
- [148]Straessle R, Pellaton M, Pétremand Y, et al. Low-temperature indium hermetic sealing of alkali vapor-cells for chip-scale atomic clocks[C]// *Proceedings of 2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2012: 361-364.
- [149]郑慧婕, 全伟, 刘翔, 等. 原子吸收光谱对碱金属原子蒸气密度与压强的测量方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(2): 507-511.
- Zheng Huijie, Quan Wei, Liu Xiang, et al. Measurement of atomic number of alkali vapor and pressure of buffer gas based on atomic absorption[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(2): 507-511.
- [150]Zou Sheng, Jin Ge, Shi Tao, et al. Determination of mole fractions in alkali-metal mixtures via collisional broadening from Van Der Waals interactions [J]. *Measurement*, 2025, 244: 116544.
- [151]Ding Zhichao, Yuan Jie, Long Xingwu. Practical method for transversely measuring the spin polarization of optically pumped alkali atoms[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2018, 51(12): 125001.
- [152]Liu X H, Luo H, Qu T L, et al. Measuring the spin polarization of alkali-metal atoms using nuclear magnetic resonance frequency shifts of noble gases[J]. *AIP Advances*, 2015, 5(10): 107119.
- [153]Liu Zhi, Zou Sheng, Yin Kaifeng, et al. Lifetime estimation model of vapor cells in atomic magnetometers [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(28): 285003.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 王超(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为量子精密测量。



通信作者: 汪之国(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为基于热原子体系的量子精密测量技术。获湖南省杰出青年基金资助, 获湖南省光学学会奖2项, 主持国家自然科学基金等项目近20项。