磁阱中冷原子真空测量的研究进展

冯村 成永军^{*} 吴翔民 董猛 张亚飞 孙雯君 (兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室 兰州 730000)

Recent Developments in Magnetic Traps Using Cold-Atom Vacuum Measurements

FENG Cun, CHENG Yongjun^{*}, WU Xiangmin, DONG Meng, ZHANG Yafei, SUN Wenjun (Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract The cold atom vacuum measurement is a new technique for ultra-high/extreme-high vacuum (UHV/XHV) measurements, which is traceable to the fundamental properties of atoms in an ideal magnetic trap and can establish vacuum primary metrology standards. Firstly, we summarize the binding performance of various types of magnetic traps by comparing and analyzing the magnitude of the magnetic field, magnetic trapping potential, and magnetic trapping parameters of different magnetic traps. Secondly, we investigated the domestic and international research on cold-atom vacuum measurements in magnetic traps. We reviewed the theoretical parameter calculations and equipment development experiments for realizing cold-atom primary vacuum standards. Finally, we provide an outlook on cold atom vacuum measurements in magnetic traps in terms of optimization and construction of magnetic traps.

Keywords Magnetic traps, Cold atoms, Vacuum measurement, Primary metrology standards, Ultrahigh/Extreme-high vacuum

摘要 冷原子真空测量是一种超高/极高真空度测量的新技术,理想磁阱中冷原子真空测量可溯源至原子基本性质,能够 建立真空原级计量标准。通过不同磁阱磁场强度、磁捕获势能和磁捕获参数的对比分析,对各类磁阱的束缚性能进行总结。 调研了国内外在磁阱中冷原子真空测量的研究,综述了实现冷原子原级真空标准的理论参数计算和设备研制实验。从优化 和构建磁阱方面对磁阱中的冷原子真空测量进行展望。

关键词 磁阱 冷原子 真空测量 原级计量标准 超高/极高真空 中图分类号: O46 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202408001

当今许多前沿科学研究和先进制造领域,比如 宇航科学^[1-2]、表面科学^[3-4]、精密仪器制造^[5-8]等,需 要超高/极高真空(UHV/XHV)条件下的环境保障。 冷原子真空测量技术有望在 UHV/XHV 范围内实 现更加精确的真空测量并建立室温下的原级真空 标准,该技术利用囚禁在阱中的冷原子和背景气 体碰撞造成的损失率与压力之间的关系来反演真 空度。

冷原子真空测量的关键是观测传感器原子在 阱中的衰减,通过数值拟合提取碰撞损失率,进而 反演气体压力。阱作为囚禁原子的有效手段和真 空测量的必要前提分为磁光阱(MOT)和磁阱。MOT 中传感器原子的衰减规律会受到激光束加热效应 以及量子碰撞衍射效应^[9]的影响。

磁阱阱深较浅(<1 mK),在与背景气体分子发 生碰撞过程中,由量子碰撞衍射导致的阱加热效应 可以忽略不计;理想磁阱中测得的真空度仅取决于 基本原子特性(碰撞截面),因此可以用来构建 UHV/XHV范围内的冷原子原级标准(CAVS)^[10];理 想磁阱中更加精确的测量有利于 UHV/XHV 测量下 限的扩展。

本文简述了磁捕获原理和磁阱囚禁特性,在描述不同磁阱磁场强度,磁捕获势能的基础上,分析 了调控磁阱性能的磁捕获参数,对比总结了各类型 的磁阱束缚性能;其次论述了磁阱中冷原子真空测 量的国内外研究现状,对损失率系数测定的实验以 及磁阱设备研发的样机进行了归纳,介绍了基于磁 阱的冷原子原级真空标准。最后针对测量程序优 化和磁阱设备构建对磁阱中的冷原子真空测量进 行了展望。

1 磁阱原理与优势

1.1 磁捕获原理

磁捕获依赖于原子磁偶极子与空间变化磁场的相互作用,对于具有磁矩的碱金属原子,可以施加外磁场来实现磁捕获。在磁场强度 B 作用下磁 矩为µ时产生的相互作用能为^[11-12]

$$E = -\mu \cdot B = -\mu B \cos\theta \tag{1}$$

θ表示磁矩μ与磁场强度B之间的夹角。在磁捕 获场中产生的力可以表示为

$$F = -\nabla E = \nabla \left[\mu \cdot B(r) \right] \tag{2}$$

不同能级磁矩的大小和方向存在差异,根据式 (2)可知,磁场强度必须在空间中递变,以配合磁矩 产生递变的势能和力,形成磁阱。

当原子能级分裂后,内部出现两种不同的响应, 如图 1 所示。即能级能量随磁场强度的增大而增大 或者随磁场强度的增大而减小,前者被称为弱场趋 寻态,后者被称为强场趋寻态。由于原子趋向于在 能量最低处保持稳定,在弱场趋寻态下,原子会受 到趋向低场的力,原子在场强最小的区域保持稳定; 在强场趋寻态下,原子会受到趋向高场的力,原子 在场强最大的区域保持稳定。根据恩肖定理^[14-15], 处在强场趋寻态的原子无法被捕获,因此,磁阱的 设计可归结为在局部区域内构造最小磁场强度不 为零的磁场,用以捕获弱场趋寻态的原子。

1.2 基于磁阱的冷原子真空标准

目前对 UHV/XHV 的测量主要集中在磁阱和 MOT上。MOT 具有更高的压力测量上限(10⁻⁵ Pa), 正好满足磁悬浮转子真空计(SRG)的测量下限,通 过连接 MOT 和 SRG 可以连接高真空压力和超高 真空压力主要标准和水银压力计主要标准; MOT 的



图1 原子能级的塞曼分裂与磁场强度的关系,强场趋寻态和 弱场趋寻态分别用实线和虚线表示^[13]

Fig. 1 The relationship between the Zeeman splitting at the atomic level and the magnitude of the magnetic field, and the strong and weak field pursuing states are represented by solid and dashed lines, respectively^[13]

阱深更深(MOT 为1K,磁阱为1mK),阱中的原子 数更多,MOT 的荧光信号也更容易在更高的背景压 力下被检测到^[16]。然而 MOT 在压力测量过程中也 存在许多严重的问题:

(1) 在 MOT 中,存在被捕获的基态原子以及激 发态原子,激发态原子和基态原子与测试气体粒子 之间的速度平均碰撞损失截面不同,在固定的背景 气压下,激发态与基态原子数占比变化也会导致 MOT 测量的损失率发生变化。

(2)MOT的阱深易受到用于形成 MOT 的激光 束的功率、失谐、尺寸和对准的强烈影响^[17-19]。

(3)MOT 校准复杂, MOT 的阱深一般在 1-2 K 范围内^[20], 由于阱较深, 对于基态和激发态的原子, 碰撞引起的损耗可能会受到相互作用势以及非弹 性碰撞通道的显著影响, 需要对损失率系数重新进 行复杂计算^[21-22]。磁阱相较于 MOT 作为传输标准 具有以下优势:

(1) 当原子从 MOT 转移到磁阱时, 原子被冷却 并通过泵浦光进入超精细基态, 单一状态保证了磁 阱的损失率通过单一阱深测量。

(2) 磁阱由通电线圈产生的磁场构成, 阱深仅由 通电导线的电流进行调控。

(3) 磁阱的阱深较浅, 一般在 1 mK 左右, 由量 子衍射碰撞导致传感器原子碰不出磁阱的比例不 足千分之一, 当背景温度和阱深被确定后, 其对真 空测量造成的不确定度可以忽略不记。 (4)由于理想磁阱中对于 UHV/XHV 测量仅取 决于基本原子特性(碰撞截面),因此可以用来构建 CAVS。

(5) 理想磁阱具有更高的测量精度,可以在更低的压力范围内实现对 UHV/XHV 的测量;加拿大英属哥伦比亚大学(UBC)也通过基于磁阱的冷原子原级真空标准对 MOT 传输标准进行校准^[16],基于磁阱的 CAVS 对于真空下限的扩展至关重要。

2 磁阱分类

目前已研发出多种用于囚禁原子的磁阱,按照 原理可以分为三种类型:四极磁阱^[23-26],时间平均轨 道势能(TOP)磁阱^[27-29], Ioffe-Pritchard(IP)磁阱^[30-34]。 本节主要针对这三类磁阱的原理和性能进行简要 介绍。

2.1 四极磁阱

四极磁阱的结构如图 2(a)所示,由两个通相反 电流的线圈构成,磁场强度可以表示为

$$|B_{\text{quad}}(\vec{r})| = B' \sqrt{x^2 + y^2 + 4z^2}$$
(3)

可推断出磁场为空间范围内沿任意方向随距 原点距离线性变化的梯度磁场,在磁阱中心场强为 零,轴向梯度为径向梯度的两倍,在原点附近的磁 场轮廓大致呈球形。





磁阱中的非理想损失会影响对真空度的测量, 在四极磁阱中的原子经过磁场零点时,原子磁矩相 对于磁场的取向可能会发生变化而导致原子发生 马约拉纳(Majorana)自旋翻转损失^[23, 25, 35]。

2.2 TOP 磁阱

TOP 磁阱在四极磁阱的径向内添加一个旋转 偏置场 *B*_b来实现,结构如图 2(b)。*B*_b 会在空间中 产生旋转的均匀场,偏移四极磁阱中心的零点,使 被捕获的原子远离零点^[29]。TOP 磁阱的平均磁场 强度可以近似表示为

$$\langle B \rangle = B_{\rm b} + \frac{B^{\prime 2}}{4B_{\rm b}^2} (x^2 + y^2 + 8z^2)$$
 (4)

平均磁场强度的最小值位于磁阱中心且不为 零,避免了 Majorana 损失。TOP 磁阱中心附近的磁 捕获势能可以表示为

$$U_{\rm TOP} = \mu B_{\rm b} + \frac{\mu}{2} (B_{\rho}^{"} \rho^2 + B_z^{"} z^2)$$
 (5)

其中 $B''_{\rho}=B'^{2}/2B_{b}, B''_{z}=4B'^{2}/B_{b}, \rho^{2}=x^{2}+y^{2}, B''_{\rho}$ 表示径向 曲率, B''_{z} 表示轴向曲率, ρ 表示径向坐标。在 B_{b} 作 用下, 囚禁原子的线性势能变为局部磁场强度不为 零的抛物线势能。为了保证 TOP 磁阱的正常运行, *B*_b 的角频率 Ω 必须满足一定条件^[13]:Ω 应大于被捕 获原子的振荡频(10² Hz 量级),使原子在磁场一个 旋转周期内的平均有效势能中运动。Ω 应小于与两 个连续内部量子态之间的跃迁频率(10⁶ Hz 量级), 防止 Majorana 损失。

2.3 IP 磁阱

IP 磁阱结构如图 2(c)所示,由四根轴向载流直 导线以及一对载流线圈构成,在磁阱中心附近的磁 场强度不为零,形成抛物线势能束缚原子。IP 磁阱 的磁场强度可以表示为^[30]

$$|B(\rho,z)| = B_0 + \frac{1}{2} B_{\rho}'' \rho^2 + \frac{1}{2} B'' z^2$$

= $B_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{B'^2}{B_0} - \frac{B''}{2} \right) \rho^2 + \frac{1}{2} B'' z^2$ (6)

*B*₀ 表示总偏置磁场, *B*′表示径向磁场梯度, *B*″ 表示轴向磁场曲率^[36]。在调节磁场时, *B*₀ 应大于零, 防 止 Majorana 损失。IP 磁阱的捕获势能可以表示为

$$U_{\rm IP} = \mu B_0 + \frac{\mu}{2} (B_{\rho}^{\prime\prime} \rho^2 + B^{\prime\prime} z^2) \tag{7}$$

2.4 磁阱性能总结

四极磁阱的有效曲率可以表示为 B"_{eff}=B'/r= B"R/r, R 表示线圈半径, r 表示原子云半径, 有效曲 率远大于 TOP 磁阱或 IP 磁阱^[37]。相同径向梯度下, TOP 磁阱的径向曲率比 IP 磁阱小两个数量级^[33], 轴 向曲率比 IP 磁阱大两个数量级^[13], 取轴向与径向曲 率的平均值可以得出 IP 磁阱的束缚更强^[32]。由此 可得四极磁阱能实现对原子的最强束缚, 但存在 Majorana 损失。TOP 磁阱和 IP 磁阱可以对 Majorana 损失进行有效抑制, 特别是 IP 磁阱平均曲率值比 TOP 磁阱大约一个数量级, 因此, 综合考虑, IP 磁阱 在对冷原子的束缚效率方面具有更显著的优势。

3 基于磁阱的真空测量

目前基于磁阱真空测量的国外研究机构有美国家标准与技术研究院(NIST)和加拿大英属哥伦比亚大学(UBC),国内研究机构有兰州空间技术物理研究所,本节将介绍这些机构的相关研究。

3.1 美国国家标准与技术研究院

近年来,NIST 不仅在理论上对损失率系数进行 计算与测定,而且对磁阱 CAVS 设备进行持续开发, 并搭建了动态膨胀系统来验证 CAVS。

3.1.1 磁阱中的损失率系数计算与测定

NIST 对于 CAVS 理论研究主要基于两个方面: 对不同种类传感器原子和不同种类背景气体组成 系统的损失率系数进行理论测定;将国际单位制(SI) 可追溯性从计算已知的碰撞截面转移到通过实验 测定的碰撞截面^[38-39]。

NIST 使用初始基态电子 Born-Oppenheimer 势能面进行量子紧耦合散射计算,对基于⁷Li和⁸⁷Rb 原子并引入稀有气体原子、H₂分子或¹⁴N₂分子的 CAVS 系统的损失率系数进行理论确定;并对损失率系数进行了不确定度评估,包括相对论自旋轨道校正估计和范德华系数不确定度,损失率系数的相对不确定度为 1% 至 2%^[40]。通过实验表明半经典近似与量子计算的损失率系数一致^[41-43],误差为 10%。

在扩展测量下限方面, NIST 基于初始计算确定的 Li+H₂系统损失率系数, 通过实验确定的相对灵 敏度系数 S_{GAS} 可以扩展得到 Li+任意气体或 Rb+任 意气体的损失率系数^[41, 44]。这样对于任意背景气体 系统的真空度反演, 无需计算损失率系数, 不依赖 于校准仪表, 可通过实验测量的 S_{GAS} 获得。

3.1.2 磁阱 CAVS 设备

NIST 制作了一套实验原理样机(L-CAVS)和 两套便携式样机(pCAVS)。L-CAVS 利用 MOT、磁 阱和射频 (RF) 天线来冷却和捕获传感器原子, 通过 真空测量室与动态膨胀系统相连。在真空测量室 中, 2D MOT 的原子被进一步冷却, 并捕获在 3D MOT 中, 之后转移到四极或 IP 磁阱中。⁸⁷Rb 原子 具有单一可捕获态 $|F = 1, m_{\rm F} = -1\rangle$, 保证了磁阱损失 率从单一阱深测量, 且⁸⁷Rb 可用的阱深范围相较于 ⁷Li 更大; L-CAVS 中最多可以捕获 5×10⁷ 个 100 μ K 的⁸⁷Rb 原子。

测量室上下设置 Bitter 式电磁^[46-48] 来产生两种 磁阱, Bitter 式电磁铁可冷却强电流产生的热量, 不 会使磁阱过热或变形^[49-51]。Bitter 式电磁铁堆叠成 三叶草结构^[52], 如图 3 所示, 由曲率线圈, 反偏置线 圈和三叶草线圈构成, 通过调节各线圈电流使 IP 磁 阱产生偏置磁场以抑制 Majorana 损失。



图3 NIST 三叶型磁阱结构示意图^[45] Fig. 3 The structure diagram of cloverleaf trap^[45]

NIST 基于⁸⁷Rb 的 CAVS 在四极磁阱中⁸⁷Rb 原子 损失率,测量了动态膨胀室中的基准压力($\leq 10^{-9}$ Pa 的纯 H₂)^[53-55]。结果如图 4 所示,根据半经典理论给 出⁸⁷Rb+H₂系统损失率系数可以估计系统压强为 4.3 nPa,与基准压力接近。其中主要不确定度为 ⁸⁷Rb+H₂系统半经典估计中假设的 25% 不确定度。

由于 L-CAVS 不便携,不易于使用,且用于激 光冷却和捕获原子的设备需要大量组件,需要提高 集成度,对 CAVS 的小型化设计进行探索^[57]。NIST 开发了比 L-CAVS 更小、复杂度更低、成本更低的 pCAVS。

L-CAVS 需要在 2 m² 的实验平台上进行搭建, 而 pCAVS 除激光系统外的尺寸在 15 cm×35 cm× 50 cm 以内。pCAVS 由一个源室和一个测量室构 成, N52 型 NdFeB 永磁体安装在测量室外部, 为磁 阱产生四极磁场, 结构如图 5 所示。测量室中采用 纳米衍射光栅芯片^[59]将2m³的光学系统缩小至单 根光纤发射器,结构如图6所示。输入激光束照射 光栅芯片时会产生三束与输入光束相交的反射光 束,形成光栅 MOT(gMOT)所需的四束相交光束。 gMOT 对通过差分泵浦管的热⁷Li原子进行减慢、 冷却和捕获^[60-62];未被捕获的⁷Li会粘附在室温真空 室壁上而限制加载率^[63],NIST 通过设计短⁷Li塞曼 减速器与光栅芯片配合使用来优化捕获速度。



图4 不同时间 *t* 下测得四极磁阱中⁸⁷Rb 传感器原子数以及 拟合曲线^[56]

Fig. 4 The number of ⁸⁷Rb sensor atoms in the quadrupole trap was measured at different times t and the fitted curves^[56]



图5 NIST 有关 pCAVS 设备三维模型图^[58] Fig. 5 NIST 3D model diagram of pCAVS device^[58]

NIST 使用两台基于⁷Li 的 pCAVS 测量同一真 空压力。两台 pCAVS 被安装在同一真空室中,并 通入相同功率的激光束,原子云之间相距 20 cm。 测量到⁷Li 原子数随时间的初始衰减曲线如图 7(a) 所示,由于连接到 pCAVS # 1 的视口中存在泄漏, 两个 pCAVS 测量的衰减率不同。修复泄漏后测得 两个 pCAVS 衰减率如图 7(b)所示,假设背景气体 为 H₂,根据半经典理论给出⁷Li+H₂ 系统损失率系数



- 图6 光栅芯片照片,以直径 24 mm 的美元硬币作为参考(a)。 芯片靠近中央三角形孔顶点处的扫描电子显微照片 (b)^[60]
- Fig. 6 Photograph of the triangular grating chip with a 24 mm diameter US quarter dollar for scale(a). Scanning electron micrograph of the chip near one of the vertices of the triangles and the central triangular hole(b)^[60]

可得^[64], pCAVS # 1 压力为 41.5 nPa、pCAVS # 2 压 力为 42.2 nPa。对于 41.8 nPa 的真空室压力,两台 pCAVS 测量结果基本一致,其中主要不确定度为 ⁷Li+H₂系统理论值中 2% 不确定度。

3.1.3 CAVS 比对验证实验

NIST 将 pCAVS 连接到动态膨胀系统,从而对 四个标准进行比较: L-CAVS、pCAVS 和流量计/动 态膨胀系统。为了验证 CAVS, NIST 构建了一种动 态膨胀系统,可以在超高真空范围内产生捕获原子 所需的低不确定度压力,以对冷原子真空传感器与 动态膨胀标准进行高精度比较。

在 L-CAVS 中相同真空条件下测量 IP 磁阱和 四极磁阱中的 Rb 原子的衰减率,结果如图 8(a)。 较低的传感器原子云密度可以抑制蒸发、偶极弛豫 和三体损耗。由于 Majorana 损失,四极磁阱中原子 数衰减更快,而 IP 磁阱由于存在偏置磁场损失率更 低。NIST 结合 CAVS 和动态膨胀流标准进行初步



图7 四极磁阱中捕获的⁷Li 原子数 N/N₀ 与拟合曲线, (a)表 示泄漏修复前的测量值, (b)表示泄漏修复后的测量 值^[65]

Fig. 7 Recaptured ⁷Li atom number N/N_0 as functions of time *t* in the magnetic quadrupole trap, (a) represents the measured value before the leak repair, and (b) represents the measured value after the leak repair^[65]

测试,在 IP 磁阱中通入不同流量 He 测量 Rb 原子 在磁阱中的衰减,由于磁阱偏置磁场低于图 8(a)中 的偏置磁场,因此 Majorana 损失不可忽略。测量结 果如图 8(b)所示,当 XHV 流量计向与 L-CAVS 相 连的动态膨胀室供应 He 时,磁阱的损失率会急剧 增加。对于 3×10⁻¹² mol/s 和 6×10⁻¹² mol/s 的 He,损 失率分别为 4.6×10⁻² s⁻¹ 和 8.7×10⁻² s⁻¹。表明 Rb+He 碰撞造成的损失在背景损失中占主导地位。

3.2 加拿大英属哥伦比亚大学

UBC 基于粒子之间量子衍射碰撞的普遍定律 描述了磁阱中的损失率系数,并在已知深度的磁阱 中建立了冷原子原级标准。

3.2.1 磁阱中损失率系数的计算与测定

UBC使用 Rb 原子在不同阱深下测量了⁸⁷Rb+ ⁴⁰Ar 的碰撞横截面, 对室温背景碰撞产生的阱损失 率进行研究, 并使用 Rb+Ar 系统模型相互作用势证 实了在不同阱深处实验测量的损失率与由 C₆ 系数 表征的已知势的长程吸引部分一致。





在 MOT 和四极磁阱中测量⁸⁷Rb 损失率与氩气 密度的关系,结果如图 9(a)。Rb 原子被限制在 1 K 的 MOT 中;处于 $|F = 1, m_F = -1\rangle$ 态的 Rb 原子在 79 G/cm 磁场梯度下,被限制在 0.64 mK 的磁阱中^[68]。通过对数据进行拟合可以得到速度平均碰撞系数 $\langle \sigma_{Rb,Ar}\nu_{Ar} \rangle$ 。在 MOT 和四极磁阱中拟合损失率系数 与阱深的关系,结果如图 9(b)所示,在大于 800 mk 范围内,⁸⁷Rb 损失率系数随阱深变化明显;在小于 10 mk 范围内,⁸⁷Rb 损失率系数基本不发生变化。由此表明通过测量阱损失率来推断总碰撞截面时,

更浅的阱深可以产生更小的不确定度。

3.2.2 磁阱中的冷原子原级标准

2011年 UBC 首次提出可以使用限制在磁阱中 的原子或分子云来创建原级真空标准^[69]。2020年 UBC 基于量子衍射碰撞的物理性质,通过拟合不同 阱深下测量得到的阱损失率函数来提取由量子衍 射碰撞传递的能量谱。利用量子衍射碰撞的普遍 定律,实现了第一个也是唯一一个适用于高真空和 超高真空(UHV)状态(*p*<10⁻⁷ Pa)的原级量子压力 标准。



图9 磁阱中⁸⁷Rb的损失率与室温氩气密度之间的关系曲线(a),实验测量的损失率斜率(σ_{Rb,Ar}ν_{Ar})(正方形)和理论计算的损失 率斜率(圆圈),关于⁸⁷Rb⁻⁴⁰Ar 碰撞的阱深函数(b)^[67]

Fig. 9 Loss rate of trapped ⁸⁷Rb versus room temperature argon gas density (a), the experimentally measured(squares) and theoretically computed(circles)loss rate slope, $\langle \sigma_{Rb,Ar} \nu_{Ar} \rangle$, as a function of trap depth for ⁸⁷Rb-⁴⁰Ar collisions (b)^[67]

UBC 针对捕获的⁸⁷Rb 与(He、Ar 和 Xe)原子和 (H₂、N₂和 CO₂)分子气体之间的碰撞进行< σ_{tot} v>的 测定。通过测量磁阱损失率 $\Gamma_{toss}(U)$ 作为固定气 体压力下阱深的函数,对每种气体的标准进行校 准^[70-71]。首先在两组不同压力的 Ar 下测量了归一 化损失率Γ_{loss}/p_x 随磁阱阱深 U 的变化曲线,结果如 图 10(a)所示,不同压力下归一化损失率曲线重叠, 表明<σ_{loss}(U) v>值不随气压变化。随后,为了验证量



图10 不同阱深下测得的_{Γloss}/*p*_x值(a),不同 *U*/*U*_d下的⟨σ_{loss}(*U*)ν⟩/⟨σ_{tot}ν⟩值(b),不同 *U*/*U*_d下⟨σ_{tot}ν⟩的不确定度(c), 氩气的 IG 读 数与 MOT 衰减率的关系(d)^[16]

Fig. 10 Γ_{loss}/p_x values measured at different trap depths (a), the value of $\langle \sigma_{\text{loss}}(U)v \rangle / \langle \sigma_{\text{tot}}v \rangle$ under different U/U_d (b), (c) shows a plot of the uncertainty in the determination of $\langle \sigma_{\text{tot}}v \rangle$ as a function of the range of U/U_d accessed for the measurement, the relationship between IG reading in argon and MOT decay rate (d)^[16]

子衍射碰撞的普遍性,测量了(He、Ar和 Xe)原子和(H₂、N₂和 CO₂)分子< $\sigma_{loss}(U)$ v>/< σ_{tot} v>与 U/U_d之间的关系曲线, < σ_{tot} v>表示速度平均总碰撞截面, U_d为量子衍射能;结果如图 10(b)所示,不同气体在不同 U/U_d下的测量值都遵循相同的线性函数,表明量子衍射碰撞只依赖于势的长程部分 C₆的解析形式,量子衍射碰撞传递能量太少,不足以使碰撞粒子之间的内部状态发生变化^[72]。通过多次对通用多项式进行实验拟合,可以降低测量的< σ_{tot} v>不确定度^[73],统计(拟合)不确定度与 U/U_d范围的函数如图 10(c)所示,对于较轻的(He 和 H₂), U_d 明显大于其他校准的物质(Ar、Xe、CO₂和 N₂),从而限制了U/U_d<0.1 的范围,导致统计拟合误差较大。考虑系统不确定度后,校准的最佳范围为 0.1 \leq U/U_d<0.4。

对于 MOT 在测量过程中存在许多严重问题, UBC 使用基于磁阱中的 CAVS 对基于 MOT 的传 输标准进行校准, 如图 10(d)所示, 将 MOT 损失率 读数与 Ar 气体离子计"a"读数之间的直接比较,表明可以根据 MOT 损失率将压力校准到 6.0×10⁻⁵ Pa 范围。

3.3 兰州空间技术物理研究所

报

兰州空间技术物理研究所在国家重大项目的 支持下,研制出了我国首台锂冷原子超高/极高真空 测量装置,如图 11(a)所示。基于该装置,在四极磁 阱中开展了实验研究^[74]。磁阱中冷原子数目的不连 续测量会导致损失率提取的拟合误差较为显著,兰 州空间技术物理研究所采用四极磁阱拟合得到的 损失率如图 11(b)所示,损失率拟合为 0.0755 s⁻¹,相 对标准误差(RSE)约为 8.48%,在 1.15×10⁻⁷ Pa 下会 给测量结果造成 9.67×10⁻⁹ Pa 的误差。通过严格控 制每次实验的初始装载 V₀,并将推动光束关闭由定 时触发改为条件触发,重复磁阱测量过程得到的损 失率如图 11(c)所示,损失率拟合为 0.0749 s⁻¹, RSE 明显降低,仅为 1.60%,该 RSE 对应在 1.14×10⁻⁷ Pa



图11 锂冷原子真空测量装置实物照片(a),冷原子真空测量初始装载装置控制优化之前(b)和之后(c),磁阱中冷原子真空测量 的衰变曲线随时间变化的比较^[75]

Fig. 11 Lithium cold-atom vacuum measurement device physical photo (a), comparison of the decay curves of cold atoms vacuum measurement in magnetic trap with time before (b) and after (c) optimization of the cold atoms vacuum measurement initial loading control, comparison plots between cold atoms vacuum measurement in magnetic trap^[75]

真空度下引入 1.82×10⁻⁹ Pa 的影响, 与背景真空度 相近, 与不控制初始装载 V₀ 的情况相比, 拟合结果 的 RSE 明显偏低, 通过优化数据处理和调整测量方 法提高了测量精度。

将磁阱和 MOT 中的冷原子真空测量与电离规 示数进行三者比对,对比结果如图 12 所示。MOT 中冷原子真空测量和电离规测量的比对结果在整 个测量真空范围内比值稳定,通过线性拟合表明两 次测量具有良好的线性关系。MOT 和磁阱中冷原 子真空测量的比对结果表明,在 2×10⁻⁷ Pa 至 5×10⁻⁶ Pa 的真空范围内,比值较为稳定,但在低于 2×10⁻⁷ Pa 的真空范围内,两者之间的比值发生明显变化,由 此验证基于原子基本性质原理和光学方法的磁阱 中冷原子真空测量在超高真空范围内较传统真空 计具有线性计量优势。



- 图12 在 1×10⁻⁸ Pa 至 5×10⁻⁶ Pa 真空范围磁阱和 MOT 中的 冷原子真空测量与电离规示数的比较图,横坐标为 MOT 中冷原子真空测量结果
- Fig. 12 Magneto-optical trap and IG indication in the vacuum range of 1×10^{-8} Pa to 5×10^{-6} Pa, the horizontal coordinate is the result of cold atoms vacuum measurement in magneto-optical trap

4 总结与展望

本文介绍了各类型磁阱的结构以及磁场分布, 对比分析得出 IP 磁阱能够产生更好的束缚并且更 适用于冷原子真空测量。总结了国内外机构基于 磁阱真空测量的理论研究,实验测定以及设备开发。 面对在 UHV/XHV 建标需求,为解决磁阱中非理 想损耗导致测量不确定性的问题,迫切需要优化测 量程序和构建新型设备,可以在以下方面进行深入 研究。

对于 L-CAVS 磁阱存在不连续测量损失率提 取拟合误差,其一需尽量消除和降低实验环境造成 的误差,确保每次加载的初始条件相同;其二可以 设计反馈电路主动控制来保持光学装置稳定。L-CAVS 磁阱中还存在测量时间过长的问题,在 10⁻⁸ Pa 量级以上可以达到 100 s 至 1000 s。过长的测量时 间会使应用范围受限,真空标准也无法实现 100 s 至 1000 s 范围内的绝对稳定,后续需要研究在较短 时间内提取损失率的技术。

对于在 pCAVS 磁阱中使用永磁体构建四极磁 阱而存在马约拉纳损失,首先可以结合磁阱类型, 磁场分布来选择在 pCAVS 中磁阱的搭建思路。其 次针对小型化和便携性这一主题,结合与真空设备 间的装配方式,在不干涉小型 MOT 操作的基础上来 确定磁阱的结构设计,最后根据已有的磁阱结构和 磁阱类型对新设计的磁阱的可靠性进行评估,结合 实际加工条件对新磁阱进行修改。

参考文献

- Brockwell T G, Meech K J, Pickens K, et al. The mass spectrometer for planetary exploration (MASPEX)
 [C]//2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2016: 1–17
- [2] Dekoulis G. Space flight[M]. IntechOpen, 2018
- [3] Mozetič M, Vesel A, Primc G, et al. Recent developments in surface science and engineering, thin films, nanoscience, biomaterials, plasma science, and vacuum technology[J]. Thin Solid Films, 2018, 660: 120–160
- [4] Palmberg P W. Ultrahigh vacuum and surface science[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1994, 12(4): 946–952
- [5] Ellefson R E. Methods for *in situ* QMS calibration for partial pressure and composition analysis[J]. Vacuum, 2014, 101: 423–432
- [6] Joyce B A. Molecular beam epitaxy[J]. Reports on Progress in Physics, 1985, 48(12): 1637–1697
- [7] Kibbel H, Kasper E. Industrial aspects of silicon molecular beam epitaxy[J]. Vacuum, 1990, 41(4-6): 929–932
- [8] Te Sligte E, Koster N, Molkenboer F, et al. EBL2: high power EUV exposure facility[C]//Proceedings of SPIE 9985, Photomask Technology 2016. San Jose: SPIE, 2016: 259–266
- [9] Zhang S Z, Sun W J, Dong M, et al. Vacuum pressure measurement based on ⁶Li cold atoms in a magneto-optical trap[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(9): 094204 (张 苏钊, 孙雯君, 董猛, 等. 基于磁光阱中⁶Li 冷原子的真.

空度测量 [J]. 物理学报, 2022, 71(9): 094204 (in Chinese))

- [10] Scherschligt J, Fedchak J A, Barker D S, et al. Development of a new UHV/XHV pressure standard (cold atom vacuum standard)[J]. Metrologia, 2017, 54(6): S125– S132
- [11] Schwinger J, Deraad Jr L L, Milton K, et al. Classical electrodynamics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019
- [12] Temple G. Static and dynamic electricity[J]. Nature, 1940, 146(3701): 446
- [13] Pérez-Ríos J, Sanz A S. How does a magnetic trap work?[J]. American Journal of Physics, 2013, 81(11): 836–843
- [14] Earnshaw S. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether[J]. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 1848, 7: 97–112
- [15] Wing W H. On neutral particle trapping in quasistatic electromagnetic fields[J]. Progress in Quantum Electronics, 1984, 8(3-4): 181–199
- [16] Shen P R, Madison K W, Booth J L. Realization of a universal quantum pressure standard[J]. Metrologia, 2020, 57(2): 025015
- [17] Gensemer S D, Sanchez-Villicana V, Tan K Y N, et al. Trap-loss collisions of ⁸⁵Rb and ⁸⁷Rb: dependence on trap parameters[J]. Physical Review A, 1997, 56(5): 4055– 4063
- [18] Prentiss M, Cable A, Bjorkholm J E, et al. Atomic-densitydependent losses in an optical trap[J]. Optics Letters, 1988, 13(6): 452–454
- [19] Steane A M, Chowdhury M, Foot C J. Radiation force in the magneto-optical trap[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1992, 9(12): 2142–2158
- [20] Van Dongen J, Zhu C, Clement D, et al. Trap-depth determination from residual gas collisions[J]. Physical Review A, 2011, 84(2): 022708
- [21] Beijerinck H C W. Rigorous calculation of heating in alkali-metal traps by background gas collisions[J]. Physical Review A, 2000, 61(3): 033606
- [22] Beijerinck H C W. Heating rates in collisionally opaque alkali-metal atom traps: role of secondary collisions[J]. Physical Review A, 2000, 62(6): 063614
- [23] Brink D M, Sukumar C V. Majorana spin-flip transitions in a magnetic trap[J]. Physical Review A, 2006, 74(3): 035401
- [24] Davis K B, Mewes M O, Joffe M A, et al. Evaporative cooling of sodium atoms[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(26): 5202-5205
- [25] Majorana E. Atomi orientati in campo magnetico variabile[J]. Il Nuovo Cimento (1924-1942), 1932, 9(2):

43 - 50

- [26] Maruyama R. Optical trapping of ytterbium atoms[D]. Washington: University of Washington, 2003
- [27] Kozuma M, Deng L, Hagley E W, et al. Coherent splitting of Bose-Einstein condensed atoms with optically induced Bragg diffraction[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(5): 871–875
- [28] Petrich W, Anderson M H, Ensher J R, et al. Stable, tightly confining magnetic trap for evaporative cooling of neutral atoms[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(17): 3352–3355
- [29] Rolston S L. Magnetic trapping, evaporative cooling, and Bose Einstein Condensation[J]. AIP Conference Proceedings, 1999, 464(1): 91–110
- [30] Bergeman T, Erez G, Metcalf H J. Magnetostatic trapping fields for neutral atoms[J]. Physical Review A, 1987, 35(4): 1535–1546
- [31] Ketterle W, Durfee D S, Stamper-Kurn D M. Making, probing and understanding Bose-Einstein condensates[M]. arXiv: cond-mat/9904034, 1999
- [32] Ketterle W, Van Druten N J. Bose-Einstein condensation of a finite number of particles trapped in one or three dimensions[J]. Physical Review A, 1996, 54(1): 656–660
- [33] Mewes M O, Andrews M R, Van Druten N J, et al. Bose-Einstein condensation in a tightly confining dc magnetic trap[J]. Physical Review Letters, 1996, 77(3): 416–419
- [34] Thomas N R, Wilson A C, Foot C J. Double-well magnetic trap for Bose-Einstein condensates[J]. Physical Review A, 2002, 65(6): 063406
- [35] Sukumar C V, Brink D M. Spin-flip transitions in a magnetic trap[J]. Physical Review A, 1997, 56(3): 2451–2454
- [36] Courteille P W, Muniz S R, Magalhães K, et al. Magnetic field tomography[J]. The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics, 2001, 15(2): 173–180
- [37] Ketterle W, Van Druten N J. Evaporative cooling of trapped atoms[J]. Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, 1996, 37: 181–236
- [38] Makrides C, Barker D S, Fedchak J A, et al. Elastic rate coefficients for Li+ H₂ collisions in the calibration of a cold-atom vacuum standard[J]. Physical Review A, 2019, 99(4): 042704
- [39] Scherschligt J, Fedchak J A, Ahmed Z, et al. Review article: quantum-based vacuum metrology at the National Institute of Standards and Technology[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2018, 36(4): 040801
- [40] Klos J, Tiesinga E. Elastic and glancing-angle rate coefficients for heating of ultracold Li and Rb atoms by colli-

sions with room-temperature noble gases, H_2 , and $N_2[J]$. The Journal of Chemical Physics, 2023, 158(1): 014308

- [41] McCulloh K E, Tilford C R, Ehrlich C D, et al. Low range flowmeters for use with vacuum and leak standards[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1987, 5(3): 376–381
- [42] Partridge H, Stallcop J R, Levin E. Potential energy curves and transport properties for the interaction of He with other ground-state atoms[J]. The Journal of Chemical Physics, 2001, 115(14): 6471–6488
- [43] Ury G B, Wharton L. Absolute total scattering cross sections of ⁷Li–Ar[J]. The Journal of Chemical Physics, 1972, 56(12): 5832–5837
- [44] Berg R F, Fedchak J A. NIST calibration services for spinning rotor gauge calibrations[R]. NIST, 2015: 93
- [45] Siegel J L, Barker D S, Fedchak J A, et al. A Bitter-type electromagnet for complex atomic trapping and manipulation[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(3): 033201
- [46] Long Y, Xiong F, Gaire V, et al. All-optical production of Li⁶ molecular Bose-Einstein condensates in excited hyperfine levels[J]. Physical Review A, 2018, 98(4): 043626
- [47] Luan T, Zhou T W, Chen X Z, et al. A modified Bittertype electromagnet and control system for cold atom experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(2): 024701
- [48] Sabulsky D O, Parker C V, Gemelke N D, et al. Efficient continuous-duty Bitter-type electromagnets for cold atom experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(10): 104706
- [49] McKay Parry N, Baker M, Neely T, et al. Note: high turn density magnetic coils with improved low pressure water cooling for use in atom optics[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(8): 086103
- [50] Ricci L, Martini L M, Franchi M, et al. A current-carrying coil design with improved liquid cooling arrangement[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(6): 065115
- [51] Roux K, Cilenti B, Helson V, et al. Compact bulk-machined electromagnets for quantum gas experiments[J]. SciPost Physics, 2019, 6(4): 048
- [52] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R, et al. Bose-einstein condensation in a gas of sodium atoms[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(22): 3969–3973
- [53] Ensher J R. The first experiments with Bose-einstein condensation of ⁸⁷Rb[D]. Colorado: University of Colorado, 1999
- [54] Herold C D. Ultracold mixtures of rubidium and ytterbium for open quantum system engineering[D]. College Park: University of Maryland, 2014

- [55] Kastler A. Quelques suggestions concernant la production optique et la détection optique d'une inégalité de population des niveaux de quantifigation spatiale des atomes. Application à l'expérience de Stern et Gerlach et à la résonance magnétique[J]. Journal de Physique et Le Radium, 1950, 11(6): 255–265
- [56] Barker D S, Acharya B P, Fedchak J A, et al. Precise quantum measurement of vacuum with cold atoms[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(12): 121101
- [57] Eckel S, Barker D S, Fedchak J A, et al. Challenges to miniaturizing cold atom technology for deployable vacuum metrology[J]. Metrologia, 2018, 55(5): S182–S193
- [58] Sitaram A, Elgee P K, Campbell G K, et al. Confinement of an alkaline-earth element in a grating magneto-optical trap[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(10): 103202
- [59] McGilligan J P, Griffin P F, Riis E, et al. Diffraction-grating characterization for cold-atom experiments[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(6): 1271–1277
- [60] Barker D S, Norrgard E B, Klimov N N, et al. Singlebeam Zeeman slower and magneto-optical trap using a nanofabricated grating[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(6): 064023
- [61] Nshii C C, Vangeleyn M, Cotter J P, et al. A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies[J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(5): 321–324
- [62] Cotter J P, McGilligan J P, Griffin P F, et al. Design and fabrication of diffractive atom chips for laser cooling and trapping[J]. Applied Physics B, 2016, 122(6): 172
- [63] Haw M, Evetts N, Gunton W, et al. Magneto-optical trap loading rate dependence on trap depth and vapor density[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(3): 475–483
- [64] Arpornthip T, Sackett C A, Hughes K J. Vacuum-pressure measurement using a magneto-optical trap[J]. Physical Review A, 2012, 85(3): 033420
- [65] Ehinger L H, Acharya B P, Barker D S, et al. Comparison of two multiplexed portable cold-atom vacuum standards[J]. AVS Quantum Science, 2022, 4(3): 034403
- [66] Barker D S, Klimov N N, Tiesinga E, et al. Progress towards comparison of quantum and classical vacuum standards[J]. Measurement: Sensors, 2021, 18: 100229
- [67] Fagnan D E, Wang J C, Zhu C C, et al. Observation of quantum diffractive collisions using shallow atomic traps[J]. Physical Review A, 2009, 80(2): 022712
- [68] Ladouceur K, Klappauf B G, Van Dongen J, et al. Compact laser cooling apparatus for simultaneous cooling of lithium and rubidium[J]. Journal of the Optical Society of

America B, 2009, 26(2): 210-217

- [69] Booth J L, Fagnan D E, Klappauf B G, et al. Method and device for accurately measuring the incident flux of ambient particles in a high or ultra-high vacuum environment: 8803072[P]. 2014
- [70] Bennett J R J, Hughes S, Elsey R J, et al. Outgassing from stainless steel and the effects of the gauges[J]. Vacuum, 2004, 73(2): 149–153
- [71] Hong S S, Shin Y H, Arakawa I. Investigation of gas species in a stainless steel ultrahigh vacuum chamber with hot cathode ionization gauges[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(2): 359–364
- [72] Booth J L, Shen P R, Krems R V, et al. Universality of quantum diffractive collisions and the quantum pressure

standard[J]. New Journal of Physics, 2019, 21(10): 102001

- [73] Derevianko A, Porsev S G, Babb J F. Electric dipole polarizabilities at imaginary frequencies for hydrogen, the alkali-metal, alkaline-earth, and noble gas atoms[J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2010, 96(3): 323-331
- [74] Hoffmann D, Bali S, Walker T. Trap-depth measurements using ultracold collisions[J]. Physical Review A, 1996, 54(2): R1030
- [75] Sun W, Wu X, Cheng Y, et al. Cold atom technology applied to ultra-high vacuum (UHV) measurements[J]. Vacuum, 2024, 222: 113079

文章简介

冷原子真空测量是一种超高/极高真空度测量的新技术,可以对宇航科学、表面科学、精密仪器制造等领域所需的超高/极高真空环境实现更加精确的测量。该技术利用冷原子和背景气体碰撞造成的损失率与压力之间的关系来反演真空度,损失过程主要发生在磁阱和磁光阱中。磁光阱中冷原子的衰减规律会受到激光束加热效应以及量子碰撞衍射效应的影响。磁阱阱深较浅,在与背景气体分子碰撞过程中,由量子碰撞衍射导致的阱加热效应可以忽略不计;理想磁阱中测得的真空度仅取决于基本原子特性(碰撞截面),可以用来构建超高/极高真空范围内的冷原子原级标准(CAVS);理想磁阱中更加精确的测量有利于超高/极高真空测量下限的扩展。本文简述了磁捕获原理和磁阱囚禁特性,在描述不同磁阱磁场强度,磁捕获势能的基础上,分析了调控磁阱性能的磁捕获参数,对比总结了各类型的磁阱束缚性能;其次论述了磁阱中冷原子真空测量的国内外研究现状,对损失率系数测定的实验以及磁阱设备研发的样机进行了归纳,介绍了基于磁阱的冷原子原级真空标准。最后针对测量程序优化和磁阱设备构建对磁阱中的冷原子真空测量进行了展望。

通讯作者介绍

成永军,博士,研究员,博士生导师。现任国防科技工业真空一级计量站常务副站长、中国航天科技集团五院 510 所真空计量技术研究中心主任。长期从事真空计量测试技术及仪器研究,科研成果获国家技术发明二等奖 1 项,获国防科技进步一等奖等省部级奖励 10 项。发表学术论文 160 余篇。获授权国家发明专利 40 余件,其中 1 件获中国专利优秀奖。获陈嘉庚青年科学奖、中国青年科技奖、中国真空科技青年创新奖。入选科技部创新人才推进计划"中青年科技创新领军人才"、中国航天科技集团学术技术带头人。担任中国真空学会理事兼质谱分析与检漏专委会副主任委员、中国计量测试学会理事兼真空计量专委会副主任委员、中国宇航学会计量与测试专委会委员、《科技导报》期刊编委。国务院政府特殊津贴专家。

团队介绍

研究团队长期从事真空计量测试技术研究,研制了系列真空计量标准装置和高端真空测量仪器,建立 了我国较完整的真空测试计量体系。团队依托国防科技工业真空一级计量站、真空计量及应用技术国际联 合研究中心等多个国家级研发创新平台开展工作,研究成果获得"国家技术发明二等奖""国防科技进步一 等奖""中国计量测试学会科技进步一等奖"为代表的科技奖励数十项,主导制定了真空测试计量技术领域 的 ISO 国际标准、国家标准以及行业标准 30 余项。团队入选科技部创新人才推进计划重点领域创新团队, 获中国航天科技集团航天金牌班组、全国工人先锋号等荣誉称号。