

仪器与测量

基于 ^7Li 冷原子操控的超高真空测量*

成永军 董猛† 孙雯君 吴翔民 张亚飞 贾文杰 冯村 张瑞芳

(兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理国家级重点实验室, 兰州 730000)

(2024年8月29日收到; 2024年9月30日收到修改稿)

国际单位制的重新定义促进真空计量体系向量子化转变, 真空参数的量子化是国际真空测量学领域目前最具引领性、前瞻性和颠覆性的研究方向之一, 量子真空测量是基于微观粒子体系的量子效应, 利用光学手段和量子力学理论实现真空参数的精密测量. 本文通过自主研制的冷原子真空测量装置操控 ^7Li 原子, 利用锂冷原子在磁光阱和磁阱中的逃逸损失特性开展了超高真空测量实验研究, 结果表明, 针对 N_2 , Ar , He , H_2 四种真空常用气体分子, 在 3×10^{-8} — 4×10^{-5} Pa真空范围, ^7Li 冷原子真空测量的不确定度最大为7.6%—6.0% ($k=2$), ^7Li 冷原子的真空反演结果与传统电离真空计的测量结果具有良好的一致性, 其相对灵敏度因子的最大偏差小于8%, 验证了冷原子量子真空测量的准确性和可靠性, 研究成果对促进全新跨代真空测量技术发展, 满足空间科学探测、超精密测量与高端装备制造等需求具有重要意义.

关键词: 超高真空测量, 冷原子, 磁光阱, 磁阱**PACS:** 06.20.-f, 37.10.Gh, 34.50.Cx, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.73.20241215**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241215

1 引言

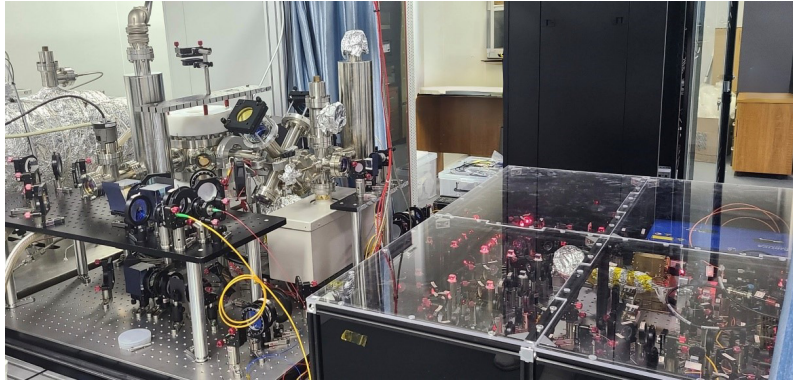
7个国际单位制(SI)基本单位全部实现量子化定义促进真空测量体系向量子化转变. 真空测量的研究对象是微观中性气体分子, 真空参数作为导出量是最适宜进行量子测量的计量参数之一. 冷原子真空测量技术属于量子计量的范畴, 也是目前真空测量前瞻性和颠覆性技术研究方向之一. 对照国际上对真空区域的划分, 基于冷原子的量子物理特性适宜于超高真空(10^{-5} — 10^{-9} Pa)测量. 超高真空测量在空间科学、真空表面分析、核聚变、高能加速器、真空微电子技术等方面具有广泛的应用价值^[1-3]. 一直以来, 超高真空测量主要采用电离真空计, 使用前需要经过多级真空标准的校准传递才能实现量值溯源. 另外, 仪器自身存在的高温灯丝热辐射效应、吸放气效应、催化化学反应等固有特性会改

变被测真空环境, 影响测量准确性^[4-6]. 而基于冷原子碰撞损失逃逸特性的真空测量, 其本质是测量气体分子数密度, 具有非接触、对真空环境扰动小等优点, 其测量机理是基于冷原子-中性气体分子碰撞体系的本征物理特性, 并可作为基础标准直接溯源至SI单位的基本量——秒和开尔文, 不需要进行繁琐的校准.

利用冷原子效应测量真空的基本构想最初启发于囚禁于真空系统中冷原子的寿命由背景气体分子数密度决定, 于1988年由Prentiss等^[7]首次构建理论雏形. 发展至今, 目前国际上最有代表性的研究机构主要有美国国家标准与技术研究院(NIST)、加拿大英属哥伦比亚大学(UBC)和俄罗斯科学院. 美国NIST从冷原子真空测量第一性原理理论计算和实验测量验证两个方面开展了广泛深入研究, 已建立了实验室大型测量装置, 占地面积约 2 m^2 , 测量下限达到了 4×10^{-9} Pa^[8-17]. 加拿

* 国家自然科学基金(批准号: 62371214)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongmeng1313@163.com

图 1 ^7Li 冷原子真空测量装置实物图Fig. 1. Photo of ^7Li cooled atomic vacuum measurement device.

大 UBC 主要在磁阱中开展了 ^{87}Rb 冷原子真空测量技术研究^[18–20], 俄罗斯科学院在光偶极阱中开展了 ^6Li 冷原子真空测量研究^[21], 也均已建立了实验测量验证装置.

在国内, 兰州空间技术物理研究所紧随国际真空测量技术发展前沿, 于 2020 年在国家重大项目的支持下, 牵头开展了基于冷原子的超高真空测量技术研究. 经过多年技术攻关, 已研制出了我国首台 ^7Li 冷原子超高真空测量装置, 如图 1 所示, 整体技术达到国际先进水平. 本文系统介绍了测量装置结构组成和工作原理, 并全面开展了真空测量实验比对验证等研究工作, 本项研究工作对推动我国全新跨代真空测量技术发展、创立真空量子测量标准、研制小型化量子真空测量传感器具有一定的支撑作用, 并将来在空间科学探测、引力波测量、重粒子加速器等军民技术领域中具有较好的应用前景.

2 测量理论模型

冷原子真空测量的基本原理是, 囚禁于势阱中的冷原子与真空室的中性气体分子发生碰撞, 当冷原子获得的能量大于势垒阱深时, 原子发生逃逸损失, 最后通过确定原子阱深、原子损失率和损失率系数等参数即可实现真空度的测量, 基本理论公式为

$$p = nk_{\text{B}}T = \frac{\Gamma_{\text{loss}}}{k_{\text{loss}}(U)}k_{\text{B}}T, \quad (1)$$

式中, n 为分子数密度 (m^{-3}), k_{B} 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T 为气体分子温度 (K), Γ_{loss} 为冷原子损失率 (s^{-1}), U 为原子阱深 (K), $k_{\text{loss}}(U)$ 为碰撞损失率系数 (m^3/s). 冷原子损失率 Γ_{loss} 通过实验测量精确获得, 损失率系数 $k_{\text{loss}}(U)$ 可采用理论

计算和实验测量的方式获取, 对于浅势阱, 可采用 *ab initio* 第一性原理精确计算得到. 由于 $k_{\text{loss}}(U)$ 是与真空度无关的表征碰撞体系散射特性的物理常数, 因此, 真空度 p 这一宏观量与微观量 k_{loss} 紧密联系在一起, 从而实现量子测量.

对于损失率系数 k_{loss} 的准确获取, 在磁光阱 (MOT) 中, 原子阱深通常在 0.2—5 K 范围内变化, 冷原子-气体分子碰撞过程中存在量子衍射碰撞效应, 即碰撞后冷原子获得的能量还不足以逃出囚禁区造成相空间原子数目的减少. 因此, 采用基于范德瓦耳斯长程相互作用系数 C_6 的半经典理论可计算损失率系数. 碰撞体系的总损失率系数 k_{t} ^[9] 为

$$k_{\text{t}} = \kappa \left(\frac{\mu}{m_{\text{h}}} \frac{k_{\text{B}}T}{E_6} \right)^{0.3} x_6^3 \frac{E_6}{\hbar}, \quad (2)$$

式中, $\kappa = 12.88$; $\mu = m_{\text{h}} \cdot m_{\text{c}} / (m_{\text{h}} + m_{\text{c}})$ 为约化质量, m_{h} 为气体分子质量; m_{c} 为 ^7Li 原子质量 ($1.17 \times 10^{-26} \text{ kg}$); T 为气体分子温度 (K); $E_6 = \hbar^2 / (2\mu x_6^2)$ 为范德瓦耳斯能量; $x_6 = (2\mu C_6 / \hbar^2)^{1/4}$ 为范德瓦耳斯长度; $\hbar$ 是约化普朗克常数 (值为 1.0546). 量子衍射损失率系数 k_{g} 的一阶近似为

$$k_{\text{g}} \approx \kappa \varsigma \frac{m_{\text{c}}}{\mu} \frac{U}{E_6} \left(\frac{\mu}{m_{\text{h}}} \frac{k_{\text{B}}T}{E_6} \right)^{-0.1} x_6^3 \frac{E_6}{\hbar}, \quad (3)$$

式中, $\varsigma = 0.3755$, U 为阱深 (K). 则 ^7Li 冷原子-中性气体碰撞损失率系数 $k_{\text{loss}} = k_{\text{t}} - k_{\text{g}}$. 图 2 为基于以上半经典理论计算的 $^7\text{Li}-\text{N}_2$, $^7\text{Li}-\text{Ar}$, $^7\text{Li}-\text{He}$, $^7\text{Li}-\text{H}_2$ 碰撞体系在不同阱深条件下的损失率系数, 阱深变化范围取 1×10^{-4} —1 K, 气体分子温度取 293 K.

结果表明, 损失率系数 k_{loss} 随原子阱深的增大而逐渐减小, 当阱深小于 1 mK 时, 损失率系数为

恒定值, 这是由于 1 mK 以下的原子阱深为浅势阱, 碰撞体系的量子衍射碰撞效应可以忽略. $^7\text{Li}-\text{N}_2$, $^7\text{Li}-\text{Ar}$, $^7\text{Li}-\text{He}$ 和 $^7\text{Li}-\text{H}_2$ 的 k_{loss} 值分别为 2.45×10^{-15} , 2.15×10^{-15} , 1.90×10^{-15} 和 $3.93 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{s}$. 可见浅势阱下 k_{loss} 与气体种类弱相关, 均在 $10^{-15} \text{ m}^3/\text{s}$ 量级, 除 H_2 外, 最大偏差在 30% 以内, 而对于电离真空计, 各气体组分灵敏系数的偏差可达数倍 [22], 这也表明在真空腔中待测气体组分未知的情况下, 基于冷原子的量子真空全压力测量的准确性更高.

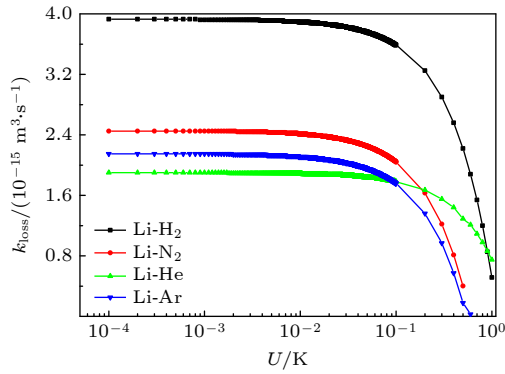


图 2 碰撞体系的损失率系数 k_{loss} 与阱深 U 的关系曲线
Fig. 2. Loss rate coefficient k_{loss} versus trap depth U for the collision system.

3 实验测量装置

^7Li 冷原子的真空测量装置, 其结构组成主要由 ^7Li 冷原子冷却囚禁系统和动态流量真空系统两部分组成. 测量装置结构组成及工作原理如图 3 所

示. 基本工作原理为: 原子炉加热产生的高速原子蒸气进入二维磁光阱 (2D MOT) 进行预冷却减速, 预冷却原子通过差分管道进入三维磁光阱 (3D MOT), 在磁场和光场的作用下被俘获而形成冷原子团. 超高/极高真空系统通过微流量计引入气体分子, 气体分子与 ^7Li 冷原子发生碰撞导致原子从势阱中逃逸, 最后通过采用光电倍增管 (PMT) 荧光探测系统测量 ^7Li 冷原子逃逸损失特性实现真空度准确反演.

3.1 ^7Li 冷原子冷却囚禁系统

^7Li 冷原子冷却囚禁系统用于在 3D MOT 中俘获真空测量传感 ^7Li 原子, 主要由锂源高温原子炉、2D MOT 单元、3D MOT 单元、电离真空计、原子俘获与成像光路、光电倍增管原子荧光探测系统、离子泵和钛升华泵抽气单元等组成. 锂源原子炉温度设置为 260 $^{\circ}\text{C}$, 对应的热 Li 原子饱和蒸气压力仅 10^{-10} Pa . 2D MOT 的光场由波长为 671 nm 的 4 束正交红失谐圆偏振光组成, 磁场由一对尺寸为 60 mm $\times$ 20 mm $\times$ 10 mm 的铷铁硼磁铁产生, 磁场梯度为 0.5 T/m. 热原子束被 2D MOT 预冷却在与两组激光垂直的轴向上形成梭形原子团. 3D MOT 的光场由波长为 671 nm 的 6 束正交红失谐圆偏振光组成, 磁场由一对反赫姆霍兹线圈组成, 线圈电流 15 A 时径向磁场梯度为 0.1 T/m. 冷原子荧光测量选用日本滨松 H10721-20 型号光电倍增管 (PMT). 差分抽气管设计为内径 2 mm, 长度 50 mm, 差分效果 2 个量级. 两台离子泵和两台钛

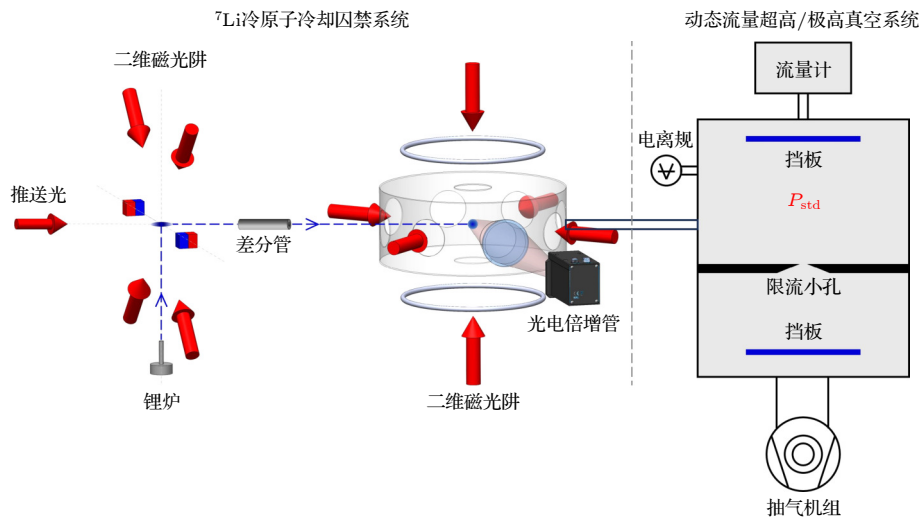


图 3 ^7Li 冷原子真空测量装置原理图
Fig. 3. Schematic diagram of the ^7Li cold atom measurement apparatus.

升华泵分别连接于 2D MOT 和 3D MOT 真空室, 离子泵抽速 40 L/s. 图 4 为在 3D MOT 真空腔体中拍摄到的 ^7Li 冷原子团照片 (CF40 法兰中心亮点即为冷原子团), 原子个数为 10^8 个, 其形貌呈现尺寸约 $0.8\text{ cm} \times 0.8\text{ cm} \times 0.4\text{ cm}$ 的椭球状, 温度为 $270\text{ }\mu\text{K}$.

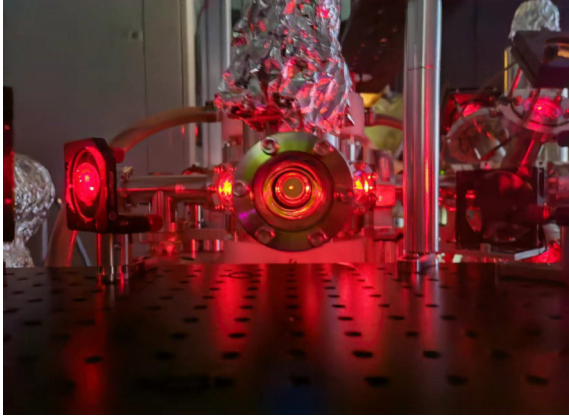


图 4 3D MOT 真空腔体中 ^7Li 冷原子团拍摄照片
Fig. 4. Photo of ^7Li cold atom clusters in 3D MOT vacuum cavity.

3.2 动态流量真空系统

动态流量真空系统用于在 3D MOT 中产生不同量级大小的动态平衡气体压力, 主要由高精度气体微流量计、限流小孔分子流导元件、测量室和抽气室、磁悬浮涡轮分子泵和低温泵抽气机组、热阴极电离真空计和四极质谱计等组成. 气体微流量计采用定容-恒压式流量计, 其定容室容积为 5 L, 极限真空度为 $5 \times 10^{-8}\text{ Pa}$, 进气小孔采用直径约 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的无氧铜激光烧蚀小孔, 测量的其对于 N_2 的分子流导为 $5.3 \times 10^{-9}\text{ m}^3/\text{s}$. 测量室和抽气室为 SUS316L 加工而成的 $\phi 250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 的柱形容器, 之间由直径 33 mm, 厚度 0.2 mm 的抽气小孔连接. 抽气室直连抽速 2000 L/s 的低温泵, 测量室通过 DN160 全金属角阀连接分子泵级联抽气机组, 电离真空计和四极质谱计连接在测试室上分别用于真空度测量和气体组分分析及其真空检漏. 最终在测量室可获得 $6 \times 10^{-9}\text{ Pa}$ 极限真空度.

4 实验结果与讨论

利用 ^7Li 冷原子真空测量装置在磁光阱中和四极磁阱中开展实验验证研究, 主要包括冷原子损失率实验测量、冷原子损失率系数实验测量、

冷原子真空测量结果与电离真空计的比对验证 3 部分内容.

4.1 冷原子损失率实验测量

首先, 在 3D MOT 真空室中装载冷原子, 冷却光频率锁定在 ^7Li 原子的 $|2^2\text{S}_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |2^2\text{P}_{3/2}, F'=2\rangle$ 跃迁线下红失谐 22 MHz, 泵浦光频率锁定在 ^7Li 原子的 $|2^2\text{S}_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |2^2\text{P}_{3/2}, F'=2\rangle$ 跃迁线下红失谐 31 MHz, 图 5 为 ^7Li 原子的 ^2S 基态和 ^2P 激发态能级图.

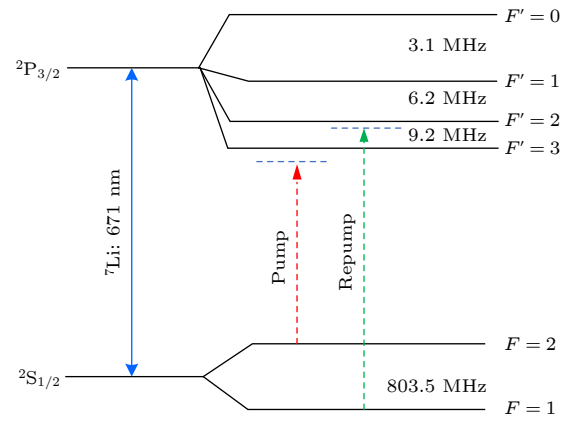


图 5 ^7Li 原子 ^2S 基态和 ^2P 激发态能级图
Fig. 5. Energy level diagrams of ^2S ground state and ^2P excited state of ^7Li atom.

冷原子装载和损耗的动力学方程可表示为

$$\frac{dN}{dt} = R - \Gamma_{\text{loss}}N - \alpha N^2, \quad (4)$$

式中, N 为冷原子个数; R 为冷原子装载率 (s^{-1}); Γ_{loss} 为冷原子-气体分子碰撞损失率 (s^{-1}); α 为冷原子间的非弹性两体碰撞损失率. 当 3D MOT 中冷原子的损耗与装载达到动态平衡时, 关闭装载光路, 仅观测原子耗散过程, 求解 (4) 式得到:

$$N(t) = \frac{\Gamma_{\text{loss}}N_0}{\Gamma_{\text{loss}}e^{\Gamma_{\text{loss}}t} + (e^{\Gamma_{\text{loss}}t} - 1)\alpha N_0} + C, \quad (5)$$

式中, N_0 为稳态 $t=0$ 时刻的初始原子数目; C 为考虑到环境杂散光和本底噪声影响而引入的补偿项.

冷原子真空测量过程中需要精确控制各种操作信号的产生、稳定及撤销时间, 信号间隔在 μs 量级, 采用 Labview 编写的时序调控程序对损失率测量中各光路和电路的开关、冷原子团的装载时间、PMT 的触发时间等进行精确操控. 图 6 为磁光阱和磁阱中冷原子损失率测量的控制时序, 其中红色和黑色线段代表磁光阱中的测量时序, 绿色和

黑色代表磁阱中的测量时序, V_{bg} 表示 PMT 测量的背景散射荧光信号, V_0 表示动态平衡后的初始装载信号, V_{re} 表示剩余原子再捕获后的信号.

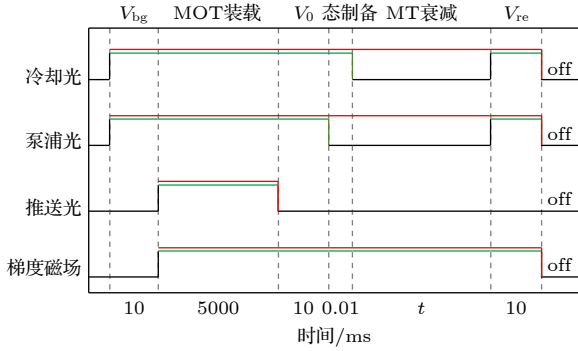


图 6 磁光阱和磁阱中冷原子损失率测量控制时序
Fig. 6. Timing sequence of the cold atom loss rate measurements in MOT and MT.

图 7 为在 2×10^{-7} Pa 和 1×10^{-6} Pa 真空度条件下, 分别采用纯度为 99.999% 的高纯 N_2 和 Ar 在磁光阱和磁阱中测量的 ^7Li 冷原子的损失率曲线示意图, 图中蓝色和红色数据点表示实测的冷原子荧光信号随时间的变化, 蓝色和红色曲线是利用 (5) 式采用 Mathematica 软件指数拟合的结果.

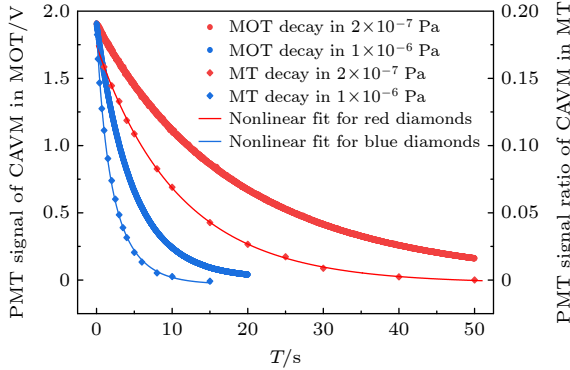


图 7 磁光阱和磁阱中冷原子损失率测量曲线
Fig. 7. Measurement curves of the loss rate of cold atoms in MOT and MT.

结果表明, 在磁光阱中, 2×10^{-7} Pa 和 1×10^{-6} Pa 下的冷原子损失率 Γ_{loss} 分别为 $4.55 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $2.08 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, 对应的冷原子两体碰撞损失率 α 分别为 $5.43 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 $5.30 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. 同样, 在磁阱中 2×10^{-7} Pa 和 1×10^{-6} Pa 下的损失率分别为 $9.39 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $3.50 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, 冷原子间的两体碰撞损失率分别为 $2.39 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ 和 $1.10 \text{ s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$. 可见, 在该测试状态下, 磁光阱和磁阱中, 初始阶段 ^7Li 冷原子间两体碰撞损失占总体损失的比例

$\alpha N^2 / (\Gamma_{\text{loss}} N + \alpha N^2)$ 最大分别可达到 19% 和 37%, 占比可观, 测量模型中考虑冷原子间的碰撞损失影响时才能准确获取损失率 Γ_{loss} .

4.2 碰撞体系损失率系数实验测量

在采用基于长程范德瓦耳斯系数 C_6 的半经典理论计算损失率系数 k_{loss} 时, 需要对磁光阱中的原子阱深 U 进行实验测量, 目前磁光阱阱深的测量主要有“光缔合法”[23] 和“重俘获法”[24]. 本实验中, 势阱深度的测量采用“光缔合法”, 详细测量原理及过程见课题组前期发表文献 [25–27], 本文不再赘述, 最后测量得到的阱深值为 0.53 K, 代入 (1) 式和 (2) 式计算得到碰撞体系的损失率系数 k_{loss} .

另外, 除了通过实验测量阱深的方法理论计算损失率系数外, 在此采用磁阱中基于 *ab initio* 量子第一性原理精确计算的损失率系数值 [17], 在特定的真空压力点 p 下, 通过分别测量磁阱和磁光阱中的损失率 Γ_{MT} 和 Γ_{MOT} , 进而可精确实验测量得到磁光阱中碰撞体系的损失率系数 k_{loss} . 测量原理如下:

$$\frac{p}{k_B T} = \frac{\Gamma_{\text{MOT}}}{k_{\text{loss}}} = \frac{\Gamma_{\text{MT}} - \Gamma_{\text{Maj}}}{k_{\text{tot}}}, \quad (6)$$

则磁光阱中的损失率系数 k_{loss} 为

$$k_{\text{loss}} = \frac{\Gamma_{\text{MOT}} \cdot k_{\text{tot}}}{\Gamma_{\text{MT}} - \Gamma_{\text{Maj}}}, \quad (7)$$

式中, Γ_{Maj} 为磁阱中的马约拉纳自旋翻转非理想损失率, 其计算公式为 $\Gamma_{\text{Maj}} = \hbar / (mc \cdot R^2)$, 本实验中冷原子团的直径 R 为 6 mm, 从而得到 $\Gamma_{\text{Maj}} = 3.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. 为消除本底背景真空 (6×10^{-9} Pa) 对测量结果的影响, 分别利用气体微流量计向真空测量室中引入 1×10^{-6} Pa 的 N_2 , Ar, He, H_2 四种高纯气体进行碰撞体系损失率系数的实验测量, 实验温度由中央空调恒温控制在为 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$.

磁阱中测量损失率的实验过程为: 冷原子装载完毕后, 关闭 2D MOT 冷却光和泵浦光、推送光、3D MOT 泵浦光, 同时仅维持 3D MOT 冷却光 $10 \mu\text{s}$, 将冷原子全部制备到 $F = 1$ ($m_F = -1$) 能态. 然后, 关闭所有光场, 维持 10 G/s 梯度磁场 $30 \mu\text{s}$. 最后, 再次打开 3D MOT 冷却光和泵浦光, 重新俘获磁阱中剩余冷原子, 同时触发 PMT 观测当前 3D MOT 中锂原子荧光信号, 并进行数据采集分析. 实验中, 为避免多次装载原子数目存在的

差异性, 提高测量精度, 在原子装载完成后同步触发 PMT, 将最后探测的原子荧光信号利用初始信号做归一化处理. 表 1 为最后计算得到的磁光阱中 ${}^7\text{Li-N}_2$, ${}^7\text{Li-Ar}$, ${}^7\text{Li-He}$, ${}^7\text{Li-H}_2$ 的损失率系数, 并和采用半经典理论的计算结果进行了对比.

表 1 *ab initio* 第一性原理实验测量的损失率系数 k_{loss} 和半经典理论计算值对比

Table 1. Comparison of the loss rate coefficient k_{loss} measured by the *ab initio* first principle experiment and the calculated value of the semiclassical theory.

碰撞体系	第一性原理测量值 $k_{\text{loss}}/(10^{-15} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	半经典理论计算值 $k_{\text{loss}}/(10^{-15} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
${}^7\text{Li-N}_2$	1.36	0.27
${}^7\text{Li-Ar}$	1.21	0.059
${}^7\text{Li-He}$	1.04	1.29
${}^7\text{Li-H}_2$	1.56	2.12

对比结果表明, 在保持磁光阱阱深不变的前提下, 对于 ${}^7\text{Li-He}$ 和 ${}^7\text{Li-H}_2$, 两种测量方法得到的损失率系数结果较为一致, 偏差分别为 24% 和 36%, 而对于 ${}^7\text{Li-N}_2$ 和 ${}^7\text{Li-Ar}$, 基于阱深测量的半经典理论计算值远远偏离基于 *ab initio* 第一性原理的实验测量值, 出现了数量级的差异. 结合 4.3 节表 2 的比对验证结果, 表明该半经典理论在计算大质量数分子碰撞体系的损失率系数 k_{loss} 时, 采用一阶近似计算量子衍射碰撞损失率系数 k_g 时存在较大的局限性, 从而导致最终的碰撞系数 k_{loss} 存在近 1—2 个数量级的偏差, 该理论只适用于 Li-H₂ 和 Li-He 原子结构简单体系 k_{loss} 的预估.

表 2 冷原子校准的分离规相对 N_2 的灵敏度因子
Table 2. Sensitivity factors of extractor gauge relative to N_2 by cold atom calibration.

气体	冷原子校准结果	文献[28]	文献[29]	文献[30]
N_2	1	1	1	1
Ar	1.51	1.41	1.529	1.42
He	0.17	0.163	0.18	0.179
H_2	0.37	0.389	—	—

4.3 冷原子真空测量比对验证

当测量装置达到 6×10^{-9} Pa 极限本底真空后, 利用 N_2 , Ar, He 和 H_2 四种高纯气体进样开展实验比对验证, 通过动态流量真空系统在 3D MOT 真空室中产生 10^{-8} — 10^{-5} Pa 的动态平衡压力, 然后同时采用电离真空计和锂冷原子进行测量, 比对电离真空计选用德国 Leybold 公司的 IE514 分离

规, 并于测量前在国防最高真空计量标准装置上对其利用 N_2 进行了校准. 测量过程中, 实验温度由中央空调恒温控制在为 (22 ± 1) °C, 磁光阱的阱深仍然维持在 0.53 K, 其损失率系数采用表 1 中第一性原理的实验测量值, 最后, 按照 3.1 节冷原子损失率的测量方法得到不同真空度下的损失率 Γ_{loss} 后, 利用 (1) 式计算得到冷原子真空测量结果. 图 8 为利用 4 种气体测量的不同真空度 p 下的损失率 Γ_{loss} (其中, 内插图为 3×10^{-8} — 3×10^{-7} Pa 真空范围的损失率 Γ_{loss}), 结果表明, 各碰撞体系的损失率 Γ_{loss} 与真空度之间呈现良好的线性关系, 线性拟合优度的皮尔森相关系数和 R^2 值均为 1, 从而验证了冷原子真空测量的合理性和可靠性.

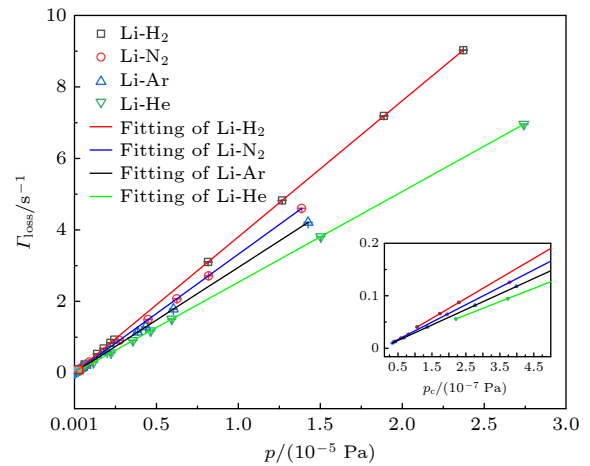


图 8 损失率 Γ_{loss} 与冷原子测量真空度 p 的关系曲线
Fig. 8. Curve of loss rate Γ_{loss} versus cold atom measurement vacuum pressure p .

最后, 将冷原子测量的 N_2 , Ar, He, H_2 四种气体的真空度和分离规 IE514 的测量结果进行比对, 得到基于冷原子反演的分离规的灵敏度因子 $1/\text{CF}$ ($1/\text{CF}$ 为分离规和冷原子测量结果的比值), 结果如图 9 所示, 其中对于测试气体 N_2 , 电离真空计的测量结果取校准证书对示数修正后的值. 结果表明, 在 3×10^{-8} — 4×10^{-5} Pa 整个测量范围内, 除了在 10^{-8} Pa 和 10^{-7} Pa 两个压力点下, 冷原子和分离规测量结果可能受本底极限真空和压力波动影响, 灵敏度因子值有所偏离线性外 (最大偏差为 25%), 其他压力点下的灵敏度因子值具有良好的一致性, 相对标准偏差均小于 5%.

将冷原子测量的 4 种气体的灵敏度因子利用 N_2 的值进行归一化后, 和已发表文献 [28–30] 中基于传统连续膨胀法校准得到的灵敏度因子进行了

比对, 如表 2 所示. 结果表明, 冷原子校准得到的各测试气体的相对灵敏度因子和传统方法也具有很好的一致性, 最大偏差小于 8%, 从而也间接验证了冷原子真空测量的准确性和可靠性.

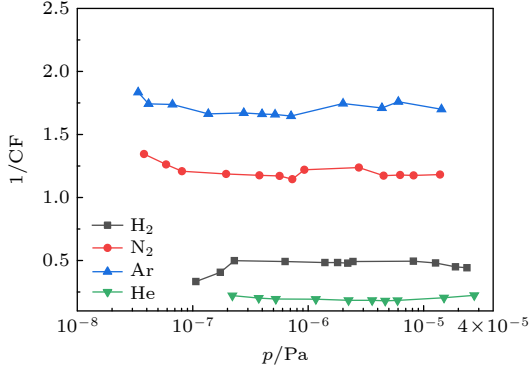


图 9 分离规灵敏度因子与冷原子测量真空度的关系曲线
Fig. 9. Curve of the sensitivity factor of the extractor gauge versus the vacuum pressure of the cold atom measurement.

4.4 冷原子真空测量不确定度分析评估

在以上实验研究的基础上, 依据测量不确定度评定方法 [31], 对冷原子真空测量结果进行不确定度分析评估. 基于冷原子真空测量基本原理和实验过程, 结合 (1) 式和 (7) 式, 建立冷原子真空测量模型 $p = f(\Gamma_{\text{loss}}, \Gamma_{\text{MOT}}, k_{\text{tot}}, \Gamma_{\text{MT}}, \Gamma_{\text{Maj}}, k_{\text{B}}, T, w)$, 即:

$$p = \frac{\Gamma_{\text{loss}} \cdot (\Gamma_{\text{MT}} - \Gamma_{\text{Maj}}) \cdot k_{\text{B}} \cdot T}{\Gamma_{\text{MOT}} \cdot k_{\text{tot}}} + w. \quad (8)$$

可见, 冷原子真空测量的不确定度主要来源于损失率 Γ_{loss} 测量引入的不确定度; 损失率系数 k_{loss} 测量时磁阱中损失率 Γ_{MT} 和 Γ_{Maj} 引入的不确定度、第一性原理计算的损失率系数 k_{tot} 引入的不确定度、磁光阱中损失率 Γ_{MOT} 引入的不确定度; 玻尔兹曼常数 k_{B} 的不确定度; 气体分子温度 T 测量引入的不确定度; 测量室本底真空波动 w 引入的不确定度. 由于在 1×10^{-6} Pa 真空条件下测量损失率系数 k_{loss} 时, 磁阱中的 Majorana 非理想损失率 Γ_{Maj} 比原子损失率 Γ_{MT} 小 3 个量级, 因此可忽略其影响. 则测量模型最终简化为

$$p = \frac{\Gamma_{\text{loss}} \cdot \Gamma_{\text{MT}} \cdot k_{\text{B}} \cdot T}{\Gamma_{\text{MOT}} \cdot k_{\text{tot}}} + w. \quad (9)$$

由于各不确定度分量间不相关, 因此相对合成标准不确定度 $u_{\text{c,r}}(p)$ 为

$$u_{\text{c,r}}(p) = \left[u_{\text{r}}^2(\Gamma_{\text{loss}}) + u_{\text{r}}^2(\Gamma_{\text{MT}}) + u_{\text{r}}^2(\Gamma_{\text{MOT}}) + u_{\text{r}}^2(k_{\text{tot}}) + u_{\text{r}}^2(k_{\text{B}}) + u_{\text{r}}^2(T) + u_{\text{r}}^2(w) \right]^{1/2}. \quad (10)$$

原子损失率测量不确定度 $u_{\text{r}}(\Gamma_{\text{loss}})$ 由重复性测量、光电倍增管荧光信号测量及曲线拟合不确定度

表 3 冷原子真空测量不确定度汇总表

Table 3. Summary of cold atom vacuum measurement uncertainties.

不确定度来源	评定方法	不确定度分量
损失率不确定度 $u_{\text{r}}(\Gamma_{\text{loss}})$	A类	10^{-8} Pa 0.03% @ N ₂ ; 0.02% @ Ar
		10^{-7} Pa 0.07% @ N ₂ ; 0.05% @ Ar; 0.05% @ He; 0.04% @ H ₂
		10^{-6} Pa 0.04% @ N ₂ ; 0.1% @ Ar; 0.02% @ He; 0.04% @ H ₂
		10^{-5} Pa 0.06% @ N ₂ ; 0.04% @ Ar; 0.07% @ He; 0.08% @ H ₂
	B类	0.6%
损失率不确定度 $u_{\text{r}}(\Gamma_{\text{MT}})$	A类	1.6% @ N ₂ ; 1.7% @ Ar; 1.5% @ He; 1.5% @ H ₂
	B类	0.6%
损失率不确定度 $u_{\text{r}}(\Gamma_{\text{MOT}})$	A类	0.05% @ N ₂ ; 0.07% @ Ar; 0.09% @ He; 0.06% @ H ₂
	B类	0.6%
损失率系数不确定度 $u_{\text{r}}(k_{\text{tot}})$	—	0.8% @ N ₂ ; 0.3% @ Ar; 2.4% @ He; 1.9% @ H ₂
玻尔兹曼常数不确定度 $u_{\text{r}}(k_{\text{B}})$	—	忽略不计
气体分子温度不确定度 $u_{\text{r}}(T)$	B类	0.3%
本底真空波动不确定度 $u_{\text{r}}(w)$	A类	10^{-8} Pa 2.5% @ N ₂ ; 2.5% @ Ar; 2.0% @ He; 2.7% @ H ₂
		10^{-7} Pa 0.5% @ N ₂ ; 0.7% @ Ar; 0.6% @ He; 0.8% @ H ₂
		10^{-6} Pa 0.07% @ N ₂ ; 0.07% @ Ar; 0.08% @ He; 0.1% @ H ₂
		10^{-5} Pa 忽略不计
合成标准不确定度		10^{-8} Pa 3.3% @ N ₂ ; 3.2% @ Ar; 3.6% @ He; 3.8% @ H ₂
		10^{-7} Pa 2.2% @ N ₂ ; 2.2% @ Ar; 3.1% @ He; 2.8% @ H ₂
		10^{-6} Pa 2.1% @ N ₂ ; 2.0% @ Ar; 3.0% @ He; 2.7% @ H ₂
		10^{-5} Pa 2.1% @ N ₂ ; 2.0% @ Ar; 3.0% @ He; 2.7% @ H ₂

合成得到, 分别采用 A 类和 B 类评定方法. 其中重复性测量不确定度根据 6 次测量的结果, 采用 A 类评定方法利用贝塞尔公式计算得到, 光电倍增管荧光信号测量不确定度由其仪器的非线性决定, 采用 B 类评定方法, 根据产品手册和实验观测其非线性小于 1%, 按照均匀分布计算, 则不确定度分量为 $1\%/\sqrt{3} = 0.6\%$, 原子损失率曲线拟合引入的不确定度小于 10^{-4} , 可忽略不计; 同理, 损失率系数 k_{loss} 测量过程中的原子损失率测量不确定度 $u_r(\Gamma_{\text{MT}})$, $u_r(\Gamma_{\text{MOT}})$ 按以上相同方法分析计算得到; 第一性原理计算的损失率系数不确定度 $u_r(k_{\text{tot}})$ 根据文献 [17] 得到; 玻尔兹曼常数测量不确定度 $u_r(k_B)$ 可完全忽略不计; 真空室内气体分子温度采用铂电阻测量, 由于测量装置位于恒温恒湿洁净间内, 温度波动最大为 1 K, 实验测量温度为 295 K, 则温度变化半宽度为 0.7%, 按照均匀分布计算, 气体分子温度测量不确定度为 $0.7\%/\sqrt{3} = 0.3\%$. 对于本底真空影响引入的测量不确定度, 在本底真空 6×10^{-9} Pa 下重复 6 次测量, 通过计算本底真空变化的实验标准偏差来评价其引入的测量不确定度, 当测试气体的真空度为 10^{-5} Pa 时, 高于本底真空 3 个量级, 不确定度可完全忽略不计. 综上, 冷原子真空测量不确定度各分量大小及各气体不同真空度所对应的不确定度如下表 3 汇总.

取包含因子 $k = 2$ (置信概率为 95%), 则在 10^{-8} — 10^{-5} Pa 范围内, 冷原子真空测量不确定度对于 N_2 为 6.6%—4.2%, Ar 为 6.4%—4.0%, He 为 7.2%—6.0%, H_2 为 7.6%—5.4%.

5 结 论

基于超冷原子效应已实现了国际单位制中时间秒的量子化定义, 在超高真空测量领域, 如何基于冷原子-气体分子微观粒子间的量子化特征实现真空量值的精确反演, 是目前国际前瞻性、颠覆性真空测量技术中最具代表性的研究方向, 属于多学科交叉量子精密测量的范畴, 在量限拓展和测量精度方面具有显著优势. 本文利用自主研发的 ^7Li 冷原子超高真空测量装置, 通过操控锂冷原子团的数目、密度、温度、能态和阱深等量子特性开展了真空测量实验和比对验证工作, 主要结论如下.

1) 在 3D MOT 中俘获了 2×10^8 个 ^7Li 原子, 温度约 270 μK , 在确定冷原子-气体分子碰撞损失

率 Γ_{loss} 时, 冷原子间的两体碰撞损失率占比可达 37%, 为实现精确测量, 测量理论模型中须考虑该影响量.

2) 基于原子阱深测量的半经典理论计算方法和基于 *ab initio* 第一性原理的实验测量方法在计算 $^7\text{Li}-\text{He}$, $^7\text{Li}-\text{H}_2$ 这种原子结构简单体系的损失率系数 k_{loss} 时, 可认为两种方法具有一致性, 最大偏差为 36%. 但半经典理论不适用于 $^7\text{Li}-\text{N}_2$, $^7\text{Li}-\text{Ar}$ 等复杂碰撞体系 k_{loss} 的准确计算.

3) 在 3×10^{-8} — 4×10^{-5} Pa 真空范围, 除 10^{-8} Pa 和 10^{-7} Pa 两个压力点外, 冷原子测量的 4 种气体的灵敏度因子的相对标准偏差均小于 5%, 基于 ^7Li 冷原子校准的分离规的相对灵敏度因子和传统方法具有良好的一致性, 最大偏差小于 8%, 充分验证了冷原子量子真空测量的准确性和可靠性.

4) 在 3×10^{-8} — 4×10^{-5} Pa 真空范围, 对应于 N_2 , Ar, He, H_2 四种气体, ^7Li 冷原子真空测量的不确定度分别为 6.6%—4.2%, 6.4%—4.0%, 7.2%—6.0% 和 7.6%—5.4%, 包含因子均取 $k = 2$.

本项研究作为后续我国在超高极高真空测量领域建立自主知识产权的量子真空计量标准, 研制小型高性能冷原子真空测量传感器具有较大促进作用, 研究成果在空间科学探测、高能粒子加速器、引力波测量等军民高新技术领域具有广泛应用前景.

感谢华东师范大学武海斌教授、武跃龙研究员在锂冷原子冷却囚禁系统搭建中的支持; 感谢吉林大学王德权教授团队在锂原子-气体分子碰撞体系损失率系数理论计算研究中的指导.

参考文献

- [1] Li D T, Cheng Y J, Feng Y, Lu Y W, Zhao L, Xu J 2009 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **29** 522 (in Chinese) [李得天, 成永军, 冯焱, 卢耀文, 赵澜, 徐婕 2009 *真空科学与技术学报* **29** 522]
- [2] Li D T, Wang Y J, Zhang H Z, Xi Z H, Li G 2021 *Space Sci. Tech.* **23** 7592858
- [3] Liu J, Wang G, Hu Y M, Zhang T, Luo Z R, Wang Q L, Shao L J 2016 *Chin. Sci. Bull.* **61** 1502 (in Chinese) [刘见, 王刚, 胡一鸣, 张腾, 罗子人, 王晴岚, 邵立晶 2016 *科学通报* **61** 1502]
- [4] Wang Y Z, Chen X 2007 *Vacuum Technology* (Beijing: Beihang University Press) p6 (in Chinese) [王欲知, 陈旭 2007 *真空技术* (北京: 北京航空航天大学出版社) 第 6 页]
- [5] Jennering B, Anderson J, Bernien M, Bundaleski M, Dimitrova H, Granovskij M, Illgen C, Setina J, Jousten K,

- Kucharski P, Reinhardt C, Scuderi F, Silva R A S, Stöltzel A, Teodoro O M N D, Trzpił-Jurgielewicz B, Wüest M 2021 *Vacuum* **183** 109884
- [6] Fedchak J A, Abbott P J, Hendricks J H, Arnold P C, Peacock N T 2018 *J. Vac. Sci. Technol. A* **36** 030802
- [7] Prentiss M, Cable A, Bjorkholm J E, Chu S, Raab E L, Pritchard D E 1988 *Opt. Lett.* **13** 452
- [8] Scherschligt J, Fedchak J A, Barker D S, Eckel S, Klimov N, Makrides C, Tiesinga E 2017 *Metrologia* **54** 125
- [9] Eckel S, Barker D S, Fedchak J A, Klimov N N, Norrgard E, Scherschligt J, Makrides C, Tiesinga E 2018 *Metrologia* **55** 182
- [10] Makrides C, Barker D S, Fedchak J A, Eckel S, Tiesinga E 2019 *Phys. Rev. A* **99** 042704
- [11] Makrides C, Barker D S, Fedchak J A, Scherschligt J, Eckel S, Tiesinga E 2020 *Phys. Rev. A* **101** 012702
- [12] Makrides C, Barker D S, Fedchak J A, Scherschligt J, Eckel S, Tiesinga E 2022 *Phys. Rev. A* **105** 029902
- [13] Makrides C, Barker D S, Fedchak J A, Scherschligt J, Eckel S, Tiesinga E 2022 *Phys. Rev. A* **105** 039903
- [14] Barker D S, Klimov N N, Tiesinga E, Fedchak J A, Scherschligt J, Eckel S 2021 *Measurement: Sensors* **18** 100229
- [15] Barker D S, Acharya B P, Fedchak J A, Klimov N N, Norrgard E B, Scherschligt J, Tiesinga E, Eckel S 2022 *Rev. Sci. Instrum.* **93** 121101
- [16] Barker D S, Fedchak J A, Klos J, Scherschligt J, Sheikh A A, Tiesinga E, Eckel S 2023 *AVS Quantum Sci.* **5** 035001
- [17] Klos J, Tiesinga E 2023 *J. Chem. Phys.* **158** 014308
- [18] Booth J L, Shen P, Krems R V, Madison K W 2019 *New J. Phys.* **21** 102001
- [19] Shen P, Madison K W, Booth J L 2020 *Metrologia* **57** 025015
- [20] Shen P, Madison K W, Booth J L 2021 *Metrologia* **58** 022101
- [21] Makhalov V B, Martiyanov K A, Turlapov A V 2016 *Metrologia* **53** 1287
- [22] Jousten K 2016 *Handbook of Vacuum Technology* (Weinheim: Wiley-VCH) p634
- [23] Dongen J V, Zhu C, Clement D, Dufour G, Booth J, Madison K 2011 *Phys. Rev. A* **84** 022708
- [24] Kawanaka J, Shimizu K, Takuma H 1993 *Appl. Phys. B* **57** 113
- [25] Zhang S Z, Sun W J, Dong M, Wu H B, Li R, Zhang X J, Zhang J Y, Cheng Y J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 094204 (in Chinese) [张苏钊, 孙雯君, 董猛, 武海斌, 李睿, 张雪姣, 张静怡, 成永军 2022 *物理学报* **71** 094204]
- [26] Wu X M, Cheng Y J, Dong M, Sun W J, Zhang S Z, Ma Z Y, Li Y P, Jia W J, Feng T Y, Wu C Y 2023 *Vacuum* **207** 111561
- [27] Sun W J, Wu X M, Cheng Y J, Ma Z Y, Jia W J, Zhang Y F, Zhang R F, Wu C Y, Feng C, Luo H G 2024 *Vacuum* **222** 113079
- [28] Hajime Yoshida, Kenta Arai 2018 *J. Vac. Sci. Technol. A* **36** 031604
- [29] Alper Elkatmis, Rifat Kangi 2019 *Measurement* **131** 269
- [30] Yoshida H, Arai K, Kobata T 2014 *Vacuum* **101** 433
- [31] Bich W 2014 *Metrologia* **51** S155

INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

Ultra-high vacuum measurement based on
 ^7Li cold atoms manipulation^{*}Cheng Yong-Jun Dong Meng[†] Sun Wen-Jun Wu Xiang-Min
Zhang Ya-Fei Jia Wen-Jie Feng Cun Zhang Rui-Fang*(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics State Key Laboratory,
Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)*

(Received 29 August 2024; revised manuscript received 30 September 2024)

Abstract

The redefinition of the International System of Units (SI) promotes the transformation of the vacuum measurement system toward quantization, and the quantization of vacuum parameters is one of the most leading, prospective and subversive research directions in the field of international vacuum metrology, and the quantum vacuum measurement is based on the quantum effect of the microscopic particle system, and the use of optical means and the theory of quantum mechanics to realize the precision measurement of the vacuum parameters. We develop a lithium-cooled atom vacuum measurement apparatus, which mainly consists of a ^7Li atom trap system and a continuous expansion vacuum system. In this work, an experimental study of ultrahigh vacuum measurement is carried out by manipulating ^7Li atoms and utilizing the loss characteristics of lithium cold atoms in magneto-optical and magnetic traps, and the results show that for the four commonly used gas molecules in vacuum, namely N_2 , Ar, He, and H_2 , in the vacuum range of $(3 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-5})$ Pa, the maximum measurement uncertainty is 7.6%–6.0% ($k = 2$) based on ^7Li cold atoms, and the cold atom vacuum measurement results are in good agreement with those of the traditional ionization vacuum gauges, and their relative sensitivities are in good agreement with those of the ionization vacuum gauges, and the maximal deviation of the relative sensitivity factor is less than 8%, which verifies the accuracy and reliability of the cold-atom quantum vacuum measurements. The research results are of great significance in promoting the development of new cross-generation vacuum measurement technology and meeting the needs of space science exploration, ultra-precision measurement and high-end equipment manufacturing.

Keywords: ultra-high vacuum measurement, cold atom, magneto-optical trap, magnetic trap**PACS:** 06.20.-f, 37.10.Gh, 34.50.Cx, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.73.20241215**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241215^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62371214).[†] Corresponding author. E-mail: dongmeng1313@163.com

基于 ^7Li 冷原子操控的超高真空测量

成永军 董猛 孙雯君 吴翔民 张亚飞 贾文杰 冯村 张瑞芳

Ultra-high vacuum measurement based on ^7Li cold atoms manipulation

Cheng Yong-Jun Dong Meng Sun Wen-Jun Wu Xiang-Min Zhang Ya-Fei Jia Wen-Jie Feng Cun
Zhang Rui-Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 220601 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241215

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241215>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于磁光阱中 ^6Li 冷原子的真空度测量

Vacuum pressure measurement based on ^6Li cold atoms in a magneto-optical trap

物理学报. 2022, 71(9): 094204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212204>

基于二维磁光阱的增强型 ^{199}Hg 冷原子团制备

Enhanced production of ^{199}Hg cold atoms based on two-dimensional magneto-optical trap

物理学报. 2024, 73(1): 013701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231243>

超高真空原子尺度 $\text{Au}_x/\text{Si}(111)-(7\times 7)$ 表面吸附的电荷分布测量

Measurement of distribution of charge adsorbed on $\text{Au}_x/\text{Si}(111)-7\times 7$ surface on an atomic scale in ultra-high vacuum

物理学报. 2023, 72(11): 110701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230051>

采用永磁铁的钠原子二维磁光阱的设计和研发

Design and research of two-dimensional magneto-optical trap of sodium atom using permanent magnets

物理学报. 2020, 69(12): 126701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200266>

室温超高真空环境原子尺度 $\text{Au}/\text{Si}(111)-(7\times 7)$ 不定域吸附的局域接触势能差测量技术

Measurement of local contact potential difference of atomic scale $\text{Au}/\text{Si}(111)-(7\times 7)$ delocalized adsorption state in room-temperature and ultra-high vacuum environment

物理学报. 2022, 71(6): 060702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211853>

光学阱中 Λ 增强型灰色黏团冷却辅助原子装载

Atoms loading and cooling for an optical cavity assisted by Λ -enhanced gray-molasses cooling process

物理学报. 2024, 73(11): 113701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240182>