

空间站冷原子柜超高真空腔内射频天线的研制

谢昱^{1,2}, 高源慈³, 周蜀渝⁴, 方苏¹, 李唐¹, 梁昂昂^{1,2}, 李文文^{1,2}, 黄名山^{1,2}, 王文丽¹, 汪斌^{1*}, 刘亮^{1*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;³电子科技大学电子科学与工程学院, 四川 成都 611731;⁴中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800

摘要 射频蒸发冷却作为获取超冷原子简并量子气体的手段之一,对玻色-费米协同冷却的实现至关重要。为了在空间站上实现超冷量子简并气体,设计了一种特殊的射频天线。该天线被置于一个冷原子实验用真空腔内,与腔上集成的冷却、探测、光阱、磁阱、光晶格、Feshbach 磁场等装置一同组成了通用型超冷原子物理实验系统,该实验系统满足载人航天工程在尺寸、重量、功耗、可靠性和电磁兼容性等方面的严格要求。利用有限元仿真方法对天线进行设计和评估,并在地面实验平台上对其各项性能指标进行测试和实验验证。结果表明,本设计除了能够降低 90% 的射频功率需求外,还能维持科学腔的超高真空水平,并具备良好的电磁兼容性,符合载人航天工程的要求。

关键词 量子光学; 玻色-爱因斯坦凝聚体; 射频诱导蒸发冷却; 微波; Zeeman 效应

中图分类号 O514.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220713

1 引言

蒸发冷却的实现打破了传统激光冷却的局限,将超低温极限推向了 nK 尺度^[1],而后续玻色-爱因斯坦凝聚体(BEC)的实现更是拓宽了量子模拟^[2]、量子计算^[3]等前沿科学领域。1997 年 Ammann 等^[4]提出了一种新的可实现 1 nK 以下温度的脉冲冲击冷却方法,2003 年 Leanhardt 等^[5]在磁阱中通过绝热膨胀冷却方法,将极稀薄原子热平衡温度降低到 450 pK。这些深度冷却的尝试已经将超低温下限推至亚 nK 水平,但是由于地面实验条件的限制,传统的实验室方法^[6]难以避免由重力引起的加热效应,超低温水平难以进一步突破。而微重力技术的加入有效解决了这一问题。数秒以上的自由落体时间为原子冷却提供了足够长的窗口期,可以将等效动能温度进一步推至 38 pK^[7]的超低温水平。发展成熟的微重力超冷原子设备有落塔实验设施^[7-10]、抛物线飞行载荷^[11-13]、亚轨道火箭^[14-16]和国际空间站在轨载荷^[17]等。为了创建属于中国的空间超冷原子物理实验平台,2022 年冷原子物理实验柜(CAPR)随中国空间站梦天实验舱发射入轨。

CAPR 在早先激光冷却获得冷原子的实验基础上^[18-20],采用射频诱导蒸发冷却的技术路线,借助空间站微重力条件,可在宏观磁阱中获得超低温 ⁸⁷Rb-⁴⁰K 玻色-费米混合气体。为了满足技术路线和航天发射需

求,科学腔必须采用多窗口金属科学腔的设计方案^[21]。因此腔体被设计成棱长为 54 mm、半径为 102 mm 的正十二棱柱结构,这样能在维持磁场均匀性的同时有效降低蒸发冷却期间线圈的高额功耗。

上述设计虽然解决了磁场功耗问题,但给射频天线的设计带来极大的困难。冷原子实验中采用的射频天线通常分为圆环^[22-24]和带状^[25]两类,这些天线均置于真空腔之外,由于距离原子作用区域较远,需要通过大功率射频信号对天线进行激励,才能使其在目标区域产生足够强度的射频信号。如此大功率的外置射频天线很容易与外部电子设备发生互感,在磁场线圈、稳频电路和采集设备处产生严重串扰,导致相关设备的失能,无法满足电磁兼容的需求。

为了解决功耗和串扰问题,本文提出了一种置于真空腔内的射频(RF)天线设计。该设计具备低功耗、高真空和高电磁兼容性等特性,充分满足在轨射频诱导蒸发冷却和态制备的工程与实验要求。

2 基本原理

在进行射频诱导蒸发冷却之前,⁸⁷Rb 原子首先被抽运到弱场寻觅态(磁阱束缚态) $|F=2, m_F=2\rangle$ 上(F 为原子的总角动量, m_F 为磁量子数),然后被装载进梯度(A)为 150 G/cm($1\text{ G}=10^{-4}\text{ T}$)的磁阱中。此时原子被囚禁在体积小于 8 mm^3 的区域内,其中磁场

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-05-01; 录用日期: 2022-05-25; 网络首发日期: 2022-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(11674338, U1730126)

通信作者: *liang.liu@siom.ac.cn; **wangbin@siom.ac.cn

强度较弱,处于 $|F, m_F\rangle$ 态的原子的能级移动遵从 Zeeman 效应:

$$\Delta E = g_F \mu_B m_F B, \quad (1)$$

式中: ΔE 是原子能级位移; B 是外磁场磁感应强度; g_F 是 Landé 因子; μ_B 是玻尔磁子。此时,磁偶极跃迁的拉比频率^[26]满足

$$\Omega_{\text{RF}} = \frac{\mu_B g_F B_{\text{rf}}}{2\hbar} \times \left[\sqrt{(F - m_F)(F + m_F + 1)} + \sqrt{(F + m_F)(F - m_F + 1)} \right], \quad (2)$$

式中: B_{rf} 是射频信号的磁感应强度; \hbar 是约化普朗克常数。

对于处于 $5^2S_{1/2}|F=2\rangle$ 态的 ^{87}Rb 而言, $g_F = 1/2$, 在射频诱导强度为 $B_{\text{rf}} = 50 \text{ mG}$ 时,其磁偶极跃迁的拉比频率为 $2\pi \times 35 \text{ kHz}$ 。此时拉比频率远高于射频频率,根据 Landau-Zener 跃迁定律,以特定速度 v_T 运动的原子将以一定概率 (P) 从束缚态跃迁至非束缚态:

$$P = 1 - \exp(-2\pi\Gamma_{\text{Lz}}), \quad (3)$$

式中: Γ_{Lz} 是 Landau-Zener 系数,表达式为

$$\Gamma_{\text{Lz}} = \hbar\Omega_{\text{RF}}^2 / (2g_F\mu_B v_T A). \quad (4)$$

当外磁场梯度为 150 G/cm 时,对于热平衡温度为 $T = 200 \mu\text{K}$ 的冷原子团,其 Landau-Zener 系数约为 1.97,此时利用 $B_{\text{rf}} = 50 \text{ mG}$ 的横向射频磁场对原子进行激励,原子将以 99.9971% ($>95\%$) 的概率从束缚态脱离,从而实现射频诱导蒸发冷却。根据式(4)可知,更低的射频功率表明更低的 Landau-Zener 概率,即更多的高温原子来不及跃迁至强场寻觅态(磁阱驱离态),从而射频驱离效率降低,射频蒸发冷却速度和冷却效果受影响。当射频诱导驱离满足大概率事件,即概率大于 95% 时,射频磁偶极跃迁的拉比频率为 $\Omega_{\text{RF}} = 2\pi \times 18.8 \text{ kHz}$,这要求射频信号的磁感应强度必须满足 $B_{\text{rf}} \geq 26.9 \text{ mG}$ 。 $B_{\text{rf}} = 50 \text{ mG}$ 的射频系统的功率设计冗余较高,为 71.2%,能够有效抑制射频功率波动对射频驱离效果的影响,确保蒸发冷却的快速有效进行。

3 系统建模与仿真

3.1 天线原型设计

射频天线和钛合金材质的科学腔结构一起等效于一种特殊的悬置带线,其中钛腔作为屏蔽层,腔内裸露的铜电芯作为导带天线。这样的传输线结构具有损耗小、稳定性高等特点,故对环境抗干扰能力较强,在满足阻抗匹配的情况下,可稳定高效地传递信号。

由于天线的电尺寸较小(小于 0.5%),且射频信号在腔内呈现凋落模,我们可以采用简单的静磁场方法对所需的天线辐射性能进行简单估算。该射频天线以圆弧天线为基础,设计半径为 $R = 12 \text{ mm}$,弧度为 $\theta = 5/(3\pi)$ 。根据简单的静磁场公式,圆弧导体的轴

心磁场分布满足

$$B = \frac{\theta}{2\pi} \times \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (5)$$

式中: μ_0 是真空磁导率; x 是与圆弧原点的距离; I 是激励电流大小。

在 50Ω 的阻抗匹配下,馈入的 3 W 射频信号能够在距离轴线 10 mm 处产生 68.6 mG 的射频磁场,这表明在原理上天线能够产生满足需求的射频磁场。

3.2 天线结构建模

天线置于侧边窗口内侧,垂直于磁阱线圈,通过真空法兰和连接器实现了射频信号在超高真空(UHV)环境内、外的传递,如图 1 所示,其中 σ^+ 为右旋圆偏冷却光, σ^- 为左旋圆偏冷却光。整个天线由三部分组成。

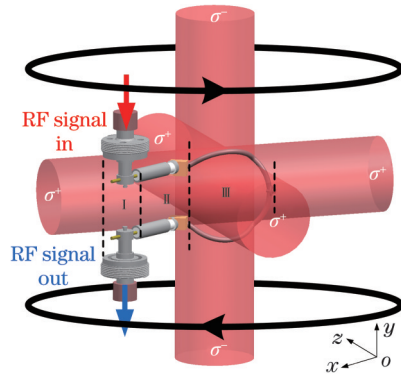


图 1 天线和磁光阱的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of antenna and magneto-optical trap

1) 接口法兰(如图 1 中 I 所示)。由微波高频连接器和螺纹法兰组成,通过螺纹紧固和激光焊接,确保真空腔体的气密性,射频信号在腔内几乎无损地传递。

2) 连接直导线(如图 1 中 II 所示)。由无氧铜电芯、陶瓷套筒和钛屏蔽层组合而成,负责端口与天线之间的射频信号的传递和阻抗匹配。

3) 半开式多段类圆弧天线(如图 1 中 III 所示)。作为射频发射部件,天线由直径为 1 mm 的无氧铜导线绕制而成,其轮廓与图 1 中三对冷却光路彼此相交所构成的几何相交线的形状一致,天线平面与图 1 所示的线圈对垂直,能在腔内产生稳定分布的射频信号。

射频信号从上端馈入,在下端被吸收,沿天线轴向产生垂直磁场方向的射频信号。借助陶瓷套筒和钛结构在 UHV 环境内进行绝缘支撑,天线的结构强度和力学稳定性得以保证。各部件之间采用激光焊接工艺,确保高气密性和低放气率。同时,连接器屏蔽层与钛腔的激光焊接能够实现射频信号的有效屏蔽,降低射频信号在窗口的泄漏,提高了系统的电磁兼容性。

3.3 天线仿真

依据以上设计,我们利用 HFSS 软件对模型进行有限元仿真,并在 3 W 激励信号作用下对天线进行近场辐射分析。在仿真过程中,我们采用 $100 \text{ kHz} \sim$

100 MHz 的激励频率, 获得了各频点的射频辐射分布, 发现频率越高水平分布的射频信号越弱。图 2 是 100 MHz 激励频率下距腔中心 ±5 mm 区域内的射频强度的水平分布。

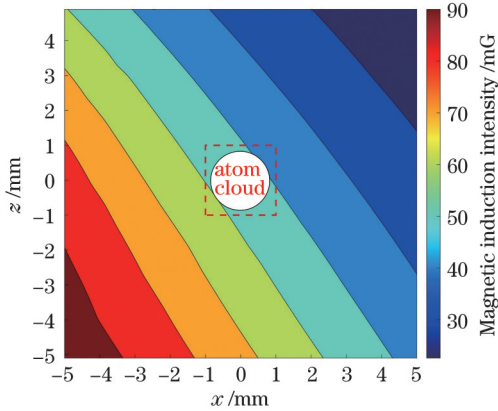


图 2 当激励信号功率为 3 W、频率为 100 MHz 时, 天线产生的射频磁场空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of RF magnetic field generated by antenna when excitation signal power is 3 W and frequency is 100 MHz

仿真结果表明, 腔内激励的射频信号呈现随轴向距离的增加而衰减的凋落模, 信号强度平行于天线平面衰减, 具有良好的分布均匀性和衰减方向性。信号最强处为图 2 左下角天线平面区域附近, 高达 90 mG 以上; 在距中心 ±1 mm 的原子云囚禁区域, 射频强度衰减约一半, 达到了 50 mG, 此时射频强度依旧能够充分满足射频蒸发冷却需求。进一步分析沿磁阱线圈轴向方向的射频磁场偏振特性, 得到图 3(a) 所示的射频磁场各方向分量的线分布, 其中阴影表示激励源频率为 100 kHz~100 MHz 时的射频信号强度, B_x 、 B_y 、 B_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的射频磁场分量。对腔中心区域各分量的频域特性进行分析, 得到图 3(b) 所示的频率分布图, 其中 B_H 、 B_V 分别为磁场的水平、垂直分量。

由图 3(a) 可以发现, 射频信号主要分布在水平分量 B_x 和 B_z 上, 并呈现中心高两侧低的良好对称性。特别地, 在距中心 -4.3~+4.7 mm 的高亮区域, 水平分量场强均达到了 50 mG 以上, 约为腔外侧射频强度的 3.3 倍以上, 空间分布均匀且偏振方向集中, 能够将更多的功率用于实现磁阱中原子的有效驱离, 驱离概率达到 99.99%。

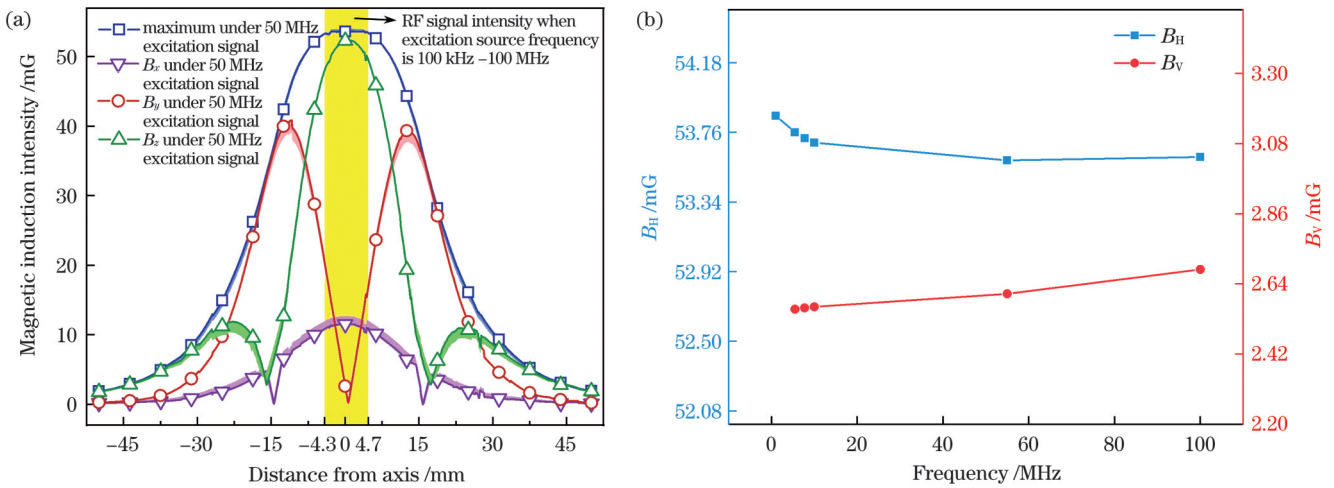


图 3 射频信号分布。(a) 沿轴向的射频磁场分布; (b) 腔中心处的射频强度随频率的变化

Fig. 3 RF signal distributions. (a) RF magnetic field distributions along axis; (b) RF intensity versus frequency at center of chamber

图 3(b) 展示了腔中心处射频磁场各分量随激励频率的变化。可以发现, 腔中心处的射频信号随频率的变化不大, B_H 较强, 不低于 53.6 mG, 而 B_V 较弱, 不高于 2.68 mG。此处射频信号的偏振度不低于 0.9987。

4 天线电性能测试

完成系统集成后, 我们对天线性能进行两次评估。通过测试射频天线 S 参数和射频辐射性能, 分别研究了天线的阻抗匹配特性和传输特性。测试环节均使用标定的 AGLIENT E5071C 矢量网络分析仪作为测试设备。

我们在 100 kHz~150 MHz 的频率范围内测量了天线的反射系数 (S_{11}) 和传输系数 (S_{21}), 得到了图 4 所

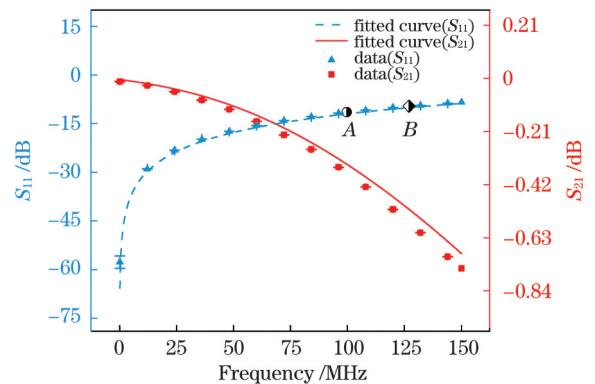


图 4 天线 S 参数的仿真结果与实测结果

Fig. 4 Simulated and measured results for antenna S-parameters

示的测量结果。其中实验需求带宽和阻抗带宽分别对应点 A (100 MHz, -11.7 dB) 和点 B (127.1 MHz, -10 dB)。

通过比较测量结果与仿真结果,发现两者高度吻合,偏差小于 1 dB。 S_{11} 随频率单调增长,而最大能量反射系数出现在需求带宽的上限 A 点处,为 -11.7 dB。天线为低频天线,阻抗带宽为 0~127.1 MHz,相对需求带宽为 199.69%,满足超宽带需求。 S_{21} 随频率的增加而减小,在测量带宽内传输损耗低于 -0.75 dB。

利用环形探测天线在需求带宽内对射频天线的辐射特性进行探测,测试方式如图 5 中插图所示。测试结果如图 5 所示。系统的仿真结果与实际测量结果高度匹配,最大偏差仅为 4%,该偏差对实际实验效果的影响可以忽略。

通过上述两项测试对仿真结果进行了交叉验证,说明有限元仿真结果高度可信,天线性能满足设计要求。

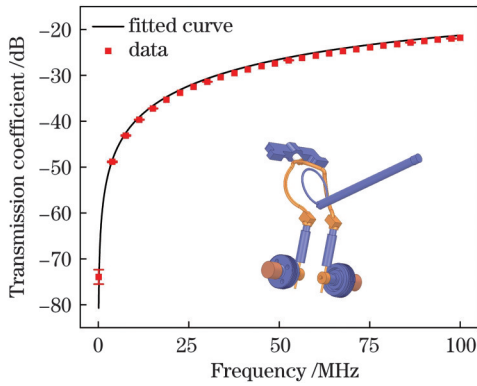


图 5 激励端至探测端的传输系数,插图为探测天线的模型图
Fig. 5 Transmission coefficient from excitation port to probe port with model of probe antenna shown in inset

5 实验分析与讨论

5.1 系统真空标定

通过测量光偶极(O. D.)阱中原子团的寿命,对原子相互作用处的背景真空进行标定。在 300 K 的背景气体(主要残余气体为 H_2)条件下,1 mK O. D. 阱中冷原子团的寿命($1/\gamma_{O.D.}$)与背景真空度(P')的关系^[27]为

$$\frac{\gamma_{O.D.}}{P'} \approx 1.18 \times 10^6 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (6)$$

利用指数型曲线对原子数的演化数据进行拟合,得到的结果如图 6 所示。拟合结果显示,低密度下(即演化 10 s 后)原子寿命为 $1/\gamma_{O.D.} = (41.5 \pm 3.5) \text{ s}$,充分满足实验要求。根据式(6),可推导出原子区域的背景真空度为 $P' = 2.1 \times 10^{-8} \text{ Pa}$,优于先前无腔内射频天线的 UHV 测量结果($5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$)^[21],说明了这种腔内射频天线经过适当的工艺处理之后对 UHV 环境没有明显影响。

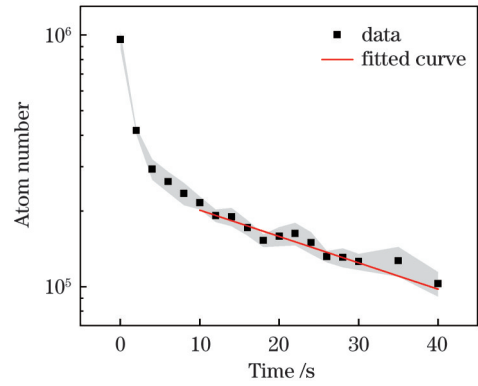


图 6 O. D. 阱中原子数的衰减

Fig. 6 Decay of atom number in O. D. trap

5.2 射频蒸发冷却实验

我们依照设计需求进行了一项射频诱导蒸发冷却实验,验证了天线在实际实验场景下的性能表现。信号源由一个直接数字综合器、一个五阶椭圆滤波器和一个 3 W 的射频功率放大器组成。该信号源能够在 100 kHz~60 MHz 频段内有效输出 2 W 以上的射频信号,足够驱动射频天线在原子处产生 45 mG 以上的射频磁场,对应驱离概率达到 99.97%。

我们原计划采用磁光混合阱的方案,利用蓝失谐的光塞光防止原子四极磁阱中心处^[28]发生严重的 Majorana 翻转^[29]。但由于缺少可使用的大功率光塞激光器,我们不能通过直接获得 BEC 或者玻色-费米混合气的方法来验证射频天线的性能,因此我们设计了一个持续时间为 5 s 的射频蒸发冷却验证实验,每阶段实验采用不同大小的射频功率进行驱动。对比不同功率下的实验结果以探究射频天线性能是否满足实验需求。

实验开始时,我们将初始温度为 200 μK 的 ^{87}Rb 原子抽运至弱场寻觅态 $|F=2, m_F=2\rangle$,并装载入梯度为 150 G/cm 的磁阱中。在接下来的 5 s 时间内,分段线性降低射频频率,第 1 s 内射频频率由 30 MHz 降低至 15 MHz,接下来的 4 s 内射频频率从 15 MHz 降低至 7 MHz。停止实验后关闭射频源和磁场电流源,通过传统吸收成像的方法对原子团进行探测;对获得的二维光学厚度分布进行高斯拟合,得到原子团尺寸和密度等相关信息;结合时间飞行成像法,计算得到蒸发冷却后原子团的温度和相空间密度(PSD)等特征物理量。射频激励信号的功率依次选取满载功率(2 W)的 0%、7.5%、12.5%、25%、50% 和 100%,记录并分析实验数据,得到图 7、8 所示的实验结果。

图 7 表明原子团尺寸随着射频功率的增加而减小,并在射频功率达到满载功率的 50% 后趋于稳定。进一步分析拟合数据得到,PSD 随着射频功率的升高而升高,温度和原子团尺寸则同步降低,并且三者均在激励功率达到满载功率的 50% 后趋于平稳,如图 8 所示。当激励功率大于满载功率的 50% 时,PSD 的差异小于 1.27×10^{-6} ,最终冷却温度的差异小于 50 μK 。以

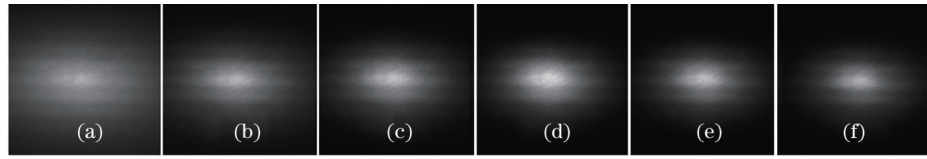


图 7 不同射频激励功率下的光学厚度。(a)满载功率的 0%;(b)满载功率的 7.5%;(c)满载功率的 12.5%;(d)满载功率的 25%;(e)满载功率的 50%;(f)满载功率的 100%

Fig. 7 Optical depths under different RF excitation powers. (a) 0% of full-load power; (b) 7.5% of full-load power; (c) 12.5% of full-load power; (d) 25% of full-load power; (e) 50% of full-load power; (f) 100% of full-load power

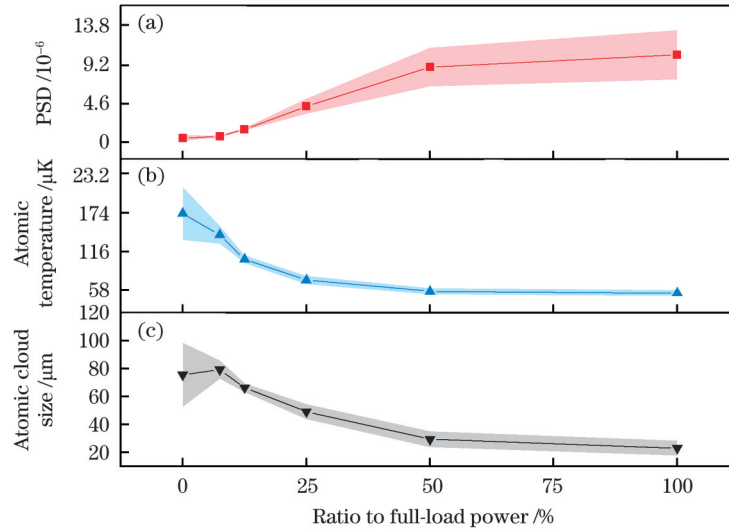


图 8 2D 高斯拟合结果。(a)最终 PSD;(b)最终原子温度;(c)阱中原子团尺寸

Fig. 8 2D Gaussian fitting results. (a) Final PSD; (b) final atomic temperature; (c) atomic cloud size in trap

上现象均表明蒸发冷却效率已经趋于饱和,说明 2 W 的激励功率即可满足射频诱导蒸发冷却的实验要求,即我们设计的天线系统在更高的功率驱动下能够满足实验要求。同时,在射频蒸发冷却期间,没有发生温度随射频功率的增加而快速上升的现象,说明磁场线圈没有受到射频信号的明显串扰,证明了天线系统的优秀电磁兼容性。

6 结 论

所设计的 UHV 腔内天线具备低功耗、超宽带的电子学特性,以 3 W 的低功率激励,能够在 0~127.1 MHz 的阻抗带宽内,在原子作用区域内产生强度不低于 54 mG 的高偏振度射频信号,充分满足实验设计要求。基于超冷原子的真空标定实验显示,原子处的真空度达到 UHV 水平,说明天线制备工艺符合真空设计要求。通过射频诱导蒸发冷却实验,证明了天线能够在 2 W 的实际激励功率下实现冷却效果的充分饱和。上述实验结果不仅表明了所设计的天线具备满足实验需求的各项性能,同时也间接证明了钛腔对射频信号能够进行有效屏蔽吸收,腔内天线具有优秀的电磁兼容性。设计满足各项指标要求,实现了闭环。所设计的低功耗、高指向、高真空、高电磁兼容性的射频天线将在重力测量、磁场测量、时间测量等领域中发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, et al. Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor[J]. *Science*, 1995, 269(5221): 198-201.
- [2] Gröning O, Wang S Y, Yao X L, et al. Engineering of robust topological quantum phases in graphene nanoribbons[J]. *Nature*, 2018, 560(7717): 209-213.
- [3] Swingle B, Bentsen G, Schleier-Smith M, et al. Measuring the scrambling of quantum information[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(4): 040302.
- [4] Ammann H, Christensen N. Delta kick cooling: a new method for cooling atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(11): 2088-2091.
- [5] Leanhardt A E, Pasquini T A, Saba M, et al. Cooling Bose-Einstein condensates below 500 picokelvin[J]. *Science*, 2003, 301(5639): 1513-1515.
- [6] Bederson B, Walther H. *Advances in atomic, molecular, and optical physics*[M]. San Diego: Academic Press, 1996.
- [7] Deppner C, Herr W, Cornelius M, et al. Collective-mode enhanced matter-wave optics[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(10): 100401.
- [8] Kovachy T, Hogan J M, Sugarbaker A, et al. Matter wave lensing to picokelvin temperatures[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(14): 143004.
- [9] Kulas S, Vogt C, Resch A, et al. Miniaturized lab system for future cold atom experiments in microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2017, 29(1): 37-48.
- [10] Condon G, Rabault M, Barrett B, et al. All-optical Bose-Einstein condensates in microgravity[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(24): 240402.
- [11] Barrett B, Antoni-Micollier L, Chichet L, et al. Dual matter-wave inertial sensors in weightlessness[J]. *Nature Communications*,

- 2016, 7: 13786.
- [12] Geiger R, Ménot V, Stern G, et al. Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry[J]. Nature Communications, 2011, 2: 474.
- [13] Stern G, Battelier B, Geiger R, et al. Light-pulse atom interferometry in microgravity[J]. The European Physical Journal D, 2009, 53(3): 353-357.
- [14] Rudolph J, Herr W, Grzeschik C, et al. A high-flux BEC source for mobile atom interferometers[J]. New Journal of Physics, 2015, 17(6): 065001.
- [15] Becker D, Lachmann M D, Seidel S T, et al. Space-borne Bose - Einstein condensation for precision interferometry[J]. Nature, 2018, 562(7727): 391-395.
- [16] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, et al. Space-borne frequency comb metrology[J]. Optica, 2016, 3(12): 1381-1387.
- [17] Aveline D C, Williams J R, Elliott E R, et al. Observation of Bose-Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab[J]. Nature, 2020, 582(7811): 193-197.
- [18] 洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb⁸⁷ 调制转移光谱稳频技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2101003.
Hong Y, Hou X, Chen D J, et al. Research on frequency stabilization technology of modulation transfer spectroscopy based on Rb⁸⁷[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2101003.
- [19] 刘乾, 谢昱, 李琳, 等. 基于红失谐高斯光束的冷原子束长距离传输[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2102001.
Liu Q, Xie Y, Li L, et al. Long-distance transmission of cold atomic beams based on red-detuned Gaussian beams[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2102001.
- [20] 刘乾, 谢昱, 李琳, 等. 基于人工神经网络的超冷原子实验多参数自主优化系统[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2412001.
Liu Q, Xie Y, Li L, et al. Multiparameter autonomous optimization system for ultracold atomic experiments based on artificial neural network[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2412001.
- [21] Liu Q, Xie Y, Li L, et al. Development of an ultra-high vacuum system for a cold atom physics rack in space[J]. Vacuum, 2021, 190: 110192.
- [22] Elliott E R, Krutzik M C, Williams J R, et al. NASA's Cold Atom Lab (CAL): system development and ground test status[J]. Npj Microgravity, 2018, 4: 16.
- [23] Harte T L, Bentine E, Luksch K, et al. Ultracold atoms in multiple radio-frequency dressed adiabatic potentials[J]. Physical Review A, 2018, 97(1): 013616.
- [24] Kim S J, Yu H, Gang S T, et al. Matter-wave beam splitter on an atom chip for a portable atom interferometer[J]. Applied Physics B, 2017, 123(5): 154.
- [25] Martin A G, Helmerson K, Bagnato V S, et al. Rf spectroscopy of trapped neutral atoms[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(21): 2431-2434.
- [26] Rubbmark J R, Kash M M, Littman M G, et al. Dynamical effects at avoided level crossings: a study of the Landau-Zener effect using Rydberg atoms[J]. Physical Review A, 1981, 23(6): 3107-3117.
- [27] Bali S, O' Hara K M, Gehm M E, et al. Quantum-diffractive background gas collisions in atom-trap heating and loss[J]. Physical Review A, 1999, 60(1): R29-R32.
- [28] 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.
- [29] 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.

Development of Radio-frequency Antenna Inside Ultra-High-Vacuum Chamber for Cold Atom Physics Rack of Space Station

Xie Yu^{1,2}, Gao Yuanci³, Zhou Shuyu⁴, Fang Su¹, Li Tang¹, Liang Ang'ang^{1,2}, Li Wenwen^{1,2},
Huang Mingshan^{1,2}, Wang Wenli¹, Wang Bin^{1*}, Liu Liang^{1*}

¹*Aerospace Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

²*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³*School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China;*

⁴*Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract

Objective As one of the means to acquire degenerate quantum gases of ultracold atoms, radio frequency evaporative cooling is crucial for the realization of Bose-Fermi sympathetic cooling. To obtain ultra-cold quantum degenerate gases on a space station, we design a unique radio-frequency (RF) antenna built in a vacuum chamber. The universal ultra-cold atomic physics experimental system, which consists of cooling, detection, an optical trap, a magnetic trap, an optical lattice, a Feshbach magnetic field, an RF antenna and other devices integrated in the chamber, meets the stringent requirements of manned aerospace engineering in terms of size, weight, power consumption, reliability, and electromagnetic compatibility. In this study, we use finite element simulations to design and evaluate the antenna and experimentally verify its various performance indicators on a ground-based experimental platform. In addition to reducing the RF power requirement by 90%, this design can maintain an ultra-high vacuum degree and perform well in terms of electromagnetic compatibility, meeting the requirements of manned aerospace engineering.

Methods This paper presents a standard engineering design flow of RF antenna system. First, a circular arc antenna prototype is set up to evaluate the design specifications. The prototype design is then modified to a single-turn multi-segment circular arc structure to match the actual cooling beams. The well-designed model is imported into the finite element analysis software, HFSS, to obtain the simulation results of the antenna's S-parameters and the emitted RF field in the region of the cold atom cloud under different excitation conditions. After the antenna is assembled into the system, the electronic parameters of the antenna are measured by a vector network analyzer and compared with the simulation data to verify the reliability of the simulation results. Next, the influence of the antenna on the background vacuum of the scientific chamber is evaluated according to an atomic lifetime measurement experiment in the optical dipole trap. Finally, RF-induced evaporative cooling experiments are conducted to judge whether the antenna design meets the actual experimental requirements.

Results and Discussions The measured S-parameters are in good agreement with the simulation data in 100 kHz–150 MHz band (Fig. 4). The maximum deviation between the simulation and measurement results is less than 1 dB, the impedance bandwidth of the antenna ranges from 100 kHz to 127.1 MHz, and the relative bandwidth reaches 199.69%, which meets the demand of an ultra-wideband antenna. A cross-validation experiment is performed using a ring probe antenna for an RF field radiation test (Fig. 5), which proves the credibility of the RF antenna simulation results from the perspective of signal transmission. The electronic evaluations imply that the simulation results are credible and the antenna performance meets the design requirements. By exponentially fitting the evolution of the number of atoms at a low density (after 10 s) (Fig. 6), the atomic lifetime is found to be $1/\gamma_{\text{o.d.}} = (41.5 \pm 3.5)\text{s}$ and the derived background vacuum degree in the atomic region is found to be 2.1×10^{-8} Pa according to Equation (6), which is even better than that (5×10^{-8} Pa) of our previous ultra-high vacuum chamber with no RF antenna inside, indicating that our built-in antenna has little influence on the vacuum environment. The phase space density (PSD) rises while the temperature and atomic cloud size decrease with increasing power, and all of them begin to gradually level off after the power reaches 50% of full-load power (Figs. 7 and 8). When the excitation power is higher than 50% of full-load power, the difference in the final PSD is less than 1.27×10^{-6} , and temperature is not more than 50 μK , implying that the evaporative cooling efficiency tends to saturate. These results indicate that the RF magnetic field strength meets the evaporative cooling requirements, the antenna excitation meets the task needs, and the design achieves a closed loop.

Conclusions In the present study, a RF antenna design inside a vacuum chamber for Chinese Space Station applications is proposed. In addition to allowing the antenna to be closer to the atomic action area, this design also uses the absorption of the titanium chamber to reduce the crosstalk of RF signals and meet the electromagnetic compatibility design requirements. We model and simulate the antenna, with the results indicating that the RF intensity at the center of the magnetic field is approximately 60 mG under an excitation of 3 W signal, and the direct current component of impedance bandwidth of the RF antenna is 0–127.1 MHz. After assembly, we measure the vacuum pressure by the atomic lifetime method and use a vector network analyzer to test the S-parameters of the antenna. The antenna has little impact on the vacuum system, and the measured electronic performances are in good agreement with the simulation results. Finally, we use the antenna to perform RF-induced evaporative cooling in a quadrupole magnetic trap. Under an excitation of more than 1 W RF signals, the atomic temperature is less than 50 μK , and the PSD is increased by an order of magnitude. The experimental results show that the RF signal strength is fully saturated. The RF antenna design realizes a closed loop. This design could have applications beyond space, including gravimetric measurements, magnetometers, and optical lattice clocks.

Key words quantum optics; Bose-Einstein condensates; radio-induced evaporative cooling; microwaves; Zeeman effect