

# 空间冷原子钟原位探测微波腔设计

王新文<sup>1,2</sup>, 高源慈<sup>3</sup>, 赵剑波<sup>1</sup>, 彭向凯<sup>1,2</sup>, 任伟<sup>1</sup>, 项静峰<sup>1</sup>, 张镇<sup>1</sup>, 董功勋<sup>1</sup>, 刘亢亢<sup>1</sup>,  
屈求智<sup>1</sup>, 刘亮<sup>1,2\*\*</sup>, 吕德胜<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

<sup>3</sup>电子科技大学电子科学与工程学院, 四川 成都 611731

**摘要** 高精度空间冷原子钟在基础物理研究、导航定位系统, 以及深空探测领域均有重要应用。为此, 设计了一种结合激光冷却与原子原位探测方案的新型微波腔, 在该微波腔中心可以俘获与冷却铷原子, 然后在微重力环境下对冷原子样品开展原子钟操作。该方案相对于已有的空间冷原子钟方案, 在减少冷原子损耗、死时间占比和分布腔相移上具有较大的优势。分析了微波腔的详细结构与光学设计, 确定了微波腔需要的基本参数, 并对微波腔内部的微波磁场进行了仿真分析。在已完成研制的微波腔内开展特性测试, 测试与仿真结果说明, 所设计微波腔的性能可以满足不确定度优于  $1 \times 10^{-16}$  的高精度空间冷原子钟的要求。

**关键词** 测量; 冷原子钟; 激光冷却; 微波腔; 微重力; 原位探测

中图分类号 O436; TN61; TH714

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0901006

## Design of Microwave Cavity for *in Situ* Atom Detection Used in Space Cold Atom Clock

Wang Xinwen<sup>1,2</sup>, Gao Yuanci<sup>3</sup>, Zhao Jianbo<sup>1</sup>, Peng Xiangkai<sup>1,2</sup>, Ren Wei<sup>1</sup>, Xiang Jingfeng<sup>1</sup>,  
Zhang Zhen<sup>1,2</sup>, Dong Gongxun<sup>1</sup>, Liu Kangkang<sup>1</sup>, Qu Qiuzhi<sup>1</sup>, Liu Liang<sup>1,2\*\*</sup>, Lü Desheng<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,  
Chengdu, Sichuan 611731, China

**Abstract** High-precision space cold atom clocks play an important role in basic physics researches, navigation and positioning systems, and deep space exploration in the future. Herein, a novel microwave cavity is presented, which combines laser cooling and *in situ* atom detection. In microgravity, <sup>87</sup>Rb atoms can be captured and cooled at the center of the microwave cavity, and the cold atom sample can be interrogated by the microwave field of the cavity. The analysis shows that this scheme has considerable advantages over the existing space cold atom clock schemes in reducing the loss of cold atoms, the proportion of dead time, and the range of distributed phase shift in the cavity. The detailed structure and optical design of the microwave cavity are presented herein, and the microwave magnetic field inside the microwave cavity is simulated. The characteristic test is performed in the cavity, and it shows that the design of the microwave cavity meets the requirement of the uncertainty of the space cold atom clock being better than  $1 \times 10^{-16}$ .

**Key words** measurement; cold atom clock; laser cooling; microwave cavity; microgravity; detection *in situ*

**OCIS codes** 120.4570; 020.3320; 020.4900; 020.7010

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-05-11; 录用日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(11034008)、中国科技部仪器项目(2013YQ09094304)

\* E-mail: dslv@siom.ac.cn; \*\* E-mail: liang.liu@siom.ac.cn

# 1 引 言

随着激光冷却原子技术的应用与发展<sup>[1-2]</sup>,原子钟的计时与频率测量精度得到了很大提高<sup>[1]</sup>,地面喷泉原子钟将秒的定义准确度提高到 $(2\sim 3)\times 10^{-16}$ <sup>[3-6]</sup>。在空间轨道开展冷原子及相关原子钟研究对科研人员具有很大的吸引力,在空间微重力环境下,自由状态的冷原子有更长的寿命,因而可以期望获得精度更高的原子钟。法国早在1997年就提出了空间冷原子钟计划<sup>[7]</sup>,现已完成空间冷原子钟的地面测试<sup>[8]</sup>;由中国科学院上海光学精密机械研究所研制的铷原子空间冷原子钟(CACES),搭载我国“天宫二号”空间实验室于2016年9月发射升空,在国际上首次开展了冷原子操作及原子钟长期运行实验,取得了比地面性能提高近4倍的结果<sup>[9]</sup>。

在我国已成功运行的铷原子空间冷原子钟和法国即将发射的铯原子空间冷原子钟设计中,用于激励原子获取冷原子钟频的微波腔都采用了环形微波腔的设计方案<sup>[10-11]</sup>,冷原子在被俘获之后,又被慢速抛射,在运动过程中完成选态、两次微波作用,以及能级布居数探测等原子钟步骤。该方案的优点是各功能区域分划清晰,性能要求明确,便于集成操作;但是,该方案占用飞行舱内的体积、质量等资源相对较多。另外,在整个原子钟运行时序中,冷原子与环形微波腔的微波探测时间在单次原子钟周期中占比较小。这样,Dick效应<sup>[12-14]</sup>会对原子钟稳定度带来较大影响。另一方面,微重力环境下冷原子在飞行过程中由于热膨胀及背景气体碰撞导致原子数损耗较大,同样会影响原子钟的稳定度。

本文在TE<sub>011</sub>模式柱形微波腔的基础上,提出一种新的在微波腔中开展冷原子原位探测的方案,与积分球冷原子钟<sup>[15-17]</sup>和腔内磁光阱<sup>[18]</sup>原位探测方案不同,该方案利用多端波导馈入方法<sup>[19]</sup>,使微波腔内与原子相互作用的微波场相位尽可能均匀分布,同时将微波馈入波导复用为激光的传输通道,再利用柱形微波腔中心轴的两个截止波导,在微波腔中心俘获与冷却铷原子。在空间微重力环境下,原子团可以进行原位微波探测与布居数探测,利用该机制开展微重力环境下的原子钟实验。与环形腔方案相比,该方案受本振噪声的影响更小,相同线宽下的原子数损失更少,预期可以获得不确定度优于 $1\times 10^{-16}$ 的高精度原子钟。

# 2 微波腔与馈入波导设计

## 2.1 微波腔整体设计

铷原子冷原子微波钟的钟频是 $|F=2, m_F=0\rangle$ 和 $|F=1, m_F=0\rangle$ ( $F$ 为<sup>87</sup>Rb原子的超精细能级, $m_F$ 为塞曼分裂磁子能级)两个基态超精细能级之间的跃迁频率,其值在6.834682610 GHz附近,所以微波腔的谐振频率应该与其一致。在冷原子微波钟的运行过程中需要一个均匀的静态磁场即C场来作为原子的量子化轴,原子的0-0跃迁由与C场平行的微波磁场来激发。圆柱形的TE<sub>011</sub>共振模在轴向上的磁场分布相位较均匀且损耗最小,因此通常选择TE<sub>011</sub>柱形微波腔作为冷原子钟的工作腔<sup>[20]</sup>。为满足在该模式下的单模振荡,微波腔的内部尺寸有一定的限制,TE<sub>011</sub>模式微波腔真空谐振频率为

$$f_{011} = \left[ \left( \frac{p'_{01}}{a} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{d} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{c}{2\pi}, \quad (1)$$

式中: $p'_{01}=3.832$ 为贝塞尔函数的根; $c$ 为光速; $a$ 为圆柱腔半径; $d$ 为两个端盖之间的距离。取 $a=32.4$  mm、 $d=38$  mm作为基准值,然后在设计分析过程中根据腔壁开孔对谐振频率的影响,适当对微波腔直径和截止长度尺寸作微调。腔体材料选择无氧铜,以实现较高品质的因数 $Q$ 值。

图1为设计完成的微波腔整体及部分组件的模型图。图1(a)为微波腔主体,在圆柱面上中部对称开有8个圆孔,用于横向冷却激光、微波馈入,以及作为荧光收集的通道。图1(b)为微波腔上下盖,在微波截止面上包含上下2个竖直冷却光通道(侧面倾斜8°的直径为8 mm的管道),以使冷原子束能够入射到微波腔中心。图1(c)为微波腔整体装配图,微波腔主体周围分布4个矩形波导、2个荧光收集镜筒、2个荧光成像镜筒,横向冷却光通过矩形波导入射到微波腔中心,该部件将在后面做详细介绍。

## 2.2 微波馈入波导的设计

为了使腔内微波场的磁场相位在空间分布上更均匀,以便原子钟工作时引入更小的分布式腔相移,馈入波导采用在腔体周围四端口对称的布局设计<sup>[19]</sup>。为了降低腔内微波场受到的外部耦合的影响,在外部射频信号源与微波腔之间增加一个过渡矩形波导,波导与微波腔之间采用小孔耦合。以上设计思路已被多个喷泉冷原子钟采用,这里考虑的是通过过渡波导不仅可以馈入微波信号,还可以引入冷却激光,因此,在过渡波导上做了两方面的变化

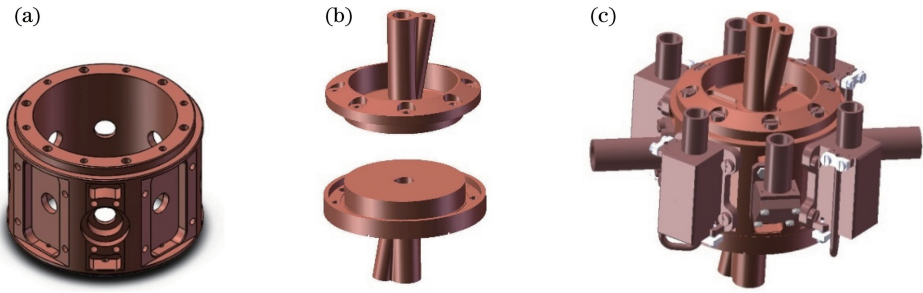


图1 微波腔模型图。(a)微波腔主体;(b)端盖;(c)微波腔整体

Fig. 1 Microwave cavity model diagrams. (a) Microwave cavity body; (b) end covers; (c) ensemble of microwave cavity

(图2);1)在 $xy$ 面开孔作为截止波导,引入原子冷却激光束;2)在波导中心放置 $45^\circ$ 反射镜,使激光通过孔入射到微波腔内。需要注意的是,矩形波导内置石英反射镜会使谐振频率降低,在设计时需要提前考虑到这样的频率偏差。本实验中反射镜厚度为1.5 mm,由仿真结果可知,其对谐振频率的影响在621 MHz左右,据此在设计时对波导尺寸进行微调。

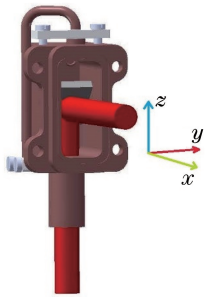


图2 矩形过渡波导结构图

Fig. 2 Rectangular transition waveguide structure

### 2.3 腔耦合设计与微波场仿真

外部射频信号通过同轴电缆与矩形波导之间的天线耦合馈入到波导内,波导与微波腔之间采用小孔耦合,馈入小孔同时也是激光入射到微波腔的通道。在确定小孔尺寸时,需要考虑激光光斑的尺寸,且尽量减小其对腔内微波场分布的影响。从激光冷却原子效果来看,光斑直径应大一点,但是从波导对微波腔的影响考虑,需要耦合弱一些。在不同尺寸耦合孔情况下,使用 HFSS 软件对该微波腔在微波频率 6.834 GHz 的四端口激励下内部的微波磁场进行仿真分析,仿真条件为在 4 个耦合波导分别馈入 0.1 W 功率、6.834 GHz 频率的相位相同的微波。图 3 显示了小孔直径分别为 6, 8, 10 mm 时,微波腔内轴线上 3 个坐标方向的磁场强度分布,其中坐标轴方向与图 2 一致。可以看出,随着耦合孔直径变

大,馈入微波腔内的微波磁场强度依次变大。但是,实验更关心的是原子钟运行过程中冷原子所在位置 10 mm 范围内的磁场强度,在这个区域内, $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的磁场强度保持了很好的一致性,但每个方向上均存在一定的功率分布不均匀,当小孔直径分别为 6, 8, 10 mm 时,磁场强度分布的最大变化分别约为 12%, 7%, 9%。对原子与微波相互作用来说,中心磁场强度分布的不均匀会导致 Ramsey 谱线中心峰跃迁几率对比度下降<sup>[20]</sup>。根据 Ramsey 跃迁几率的计算,这 3 种微波磁场强度分布对应的跃迁几率对比度降幅均在 1% 以下,因此选择耦合孔直径为 10 mm。

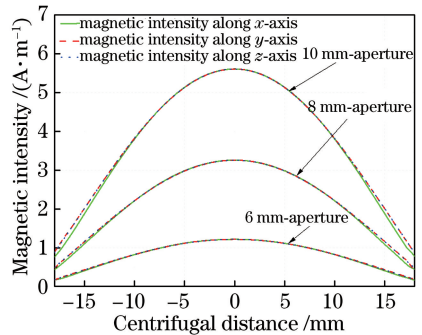


图3 不同微波腔壁耦合孔尺寸下中心微波磁场强度分布的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of central microwave magnetic intensities under different coupling hole sizes at cavity wall

在确定耦合孔尺寸后,将其他探测及成像结构配合到微波腔,再整体上对腔内模式开展仿真。由于微波腔开孔较多,本文主要关注腔内整体微波场模式是否受到开孔的较大影响。仿真结果如图 4 所示,微波腔同轴耦合环处磁场功率最大,中心足够大范围内的磁场分布都比较均匀,微波腔内整体模式分布没有出现异常点,在三维视觉上反映了图 3 的仿真数据。



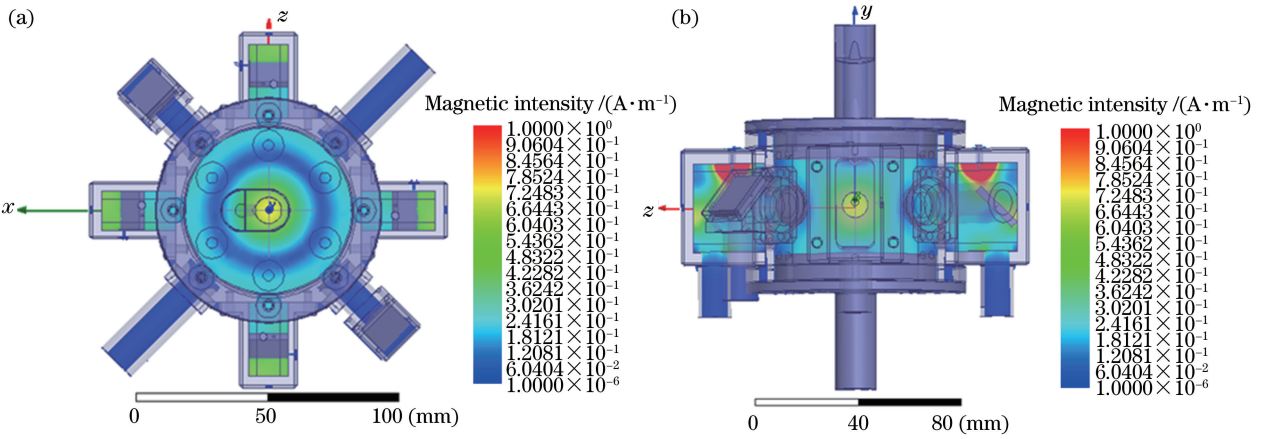


图 4 微波腔磁场仿真图。(a)中间截面磁场强度分布;(b)中轴线剖面磁场强度分布

Fig. 4 Simulated results of microwave cavity magnetic fields. (a) Distribution of magnetic field intensity in middle section; (b) distribution of magnetic field intensity in central axis profile

### 3 微波腔内激光冷却与探测光路

冷原子钟的钟周期过程是微波和激光与原子相互作用交替的过程,依次经过激光冷却、原子选态、微波与原子相互作用和激光探测等步骤,在微波和激光与原子相互作用在同一区域的情况下,合理分配有限馈入孔就显得尤为重要。图 5 显示了微波腔内的激光分配与光路走向,其中图 5(a)为水平方向的两个正交冷却光光路图,冷却激光采用正交线偏振的方式设计。重抽运光和水平的一路冷却光通道复用,作用是在原子冷却阶段使跃迁到  $|F=1\rangle$  态的原子重新抽运到  $|F=2\rangle$  态,在循环跃迁下进行激光冷却,同时在探测阶段使  $|F=1, m_F=0\rangle$  能级上的原子被抽运到  $|F=2\rangle$  能级上以便探测,两路冷却光经过微波腔后由  $0^\circ$  全反射镜原路返回形成驻波。

图 5(b)为轴线方向光路图及探测荧光收集光路,其中探测光与朝上的冷却光通道复用,两束光在经过偏振分束器(PBS)透射与反射后以正交的线偏振形式沿微波腔上传播,然后在向下冷却激光扩束系统 PBS 处两束激光被检偏后分别被 PBS 反射或透射,被反射的探测光又被一个  $0^\circ$  反射镜原路反射回去与向上的探测光形成驻波。在原子选态阶段,关断方向朝下的激光使探测光变为行波,赶走  $|F=2\rangle$  上的原子,完成原子选态;在原子能级探测阶段,打开方向朝下的激光使探测光形成驻波,可以用于探测  $|F=2\rangle$  能级上的原子数。在腔壁上另外开孔作为荧光收集窗口。微波腔壁上荧光收集开孔对腔内微波磁场强度分布的影响如图 6 所示,可以看出,开孔后磁场强度的最大变化幅度是从 7%变为 9%,根据 Ramsey 跃迁几率的计算,其对比度影响仍在 1%以下<sup>[20]</sup>。

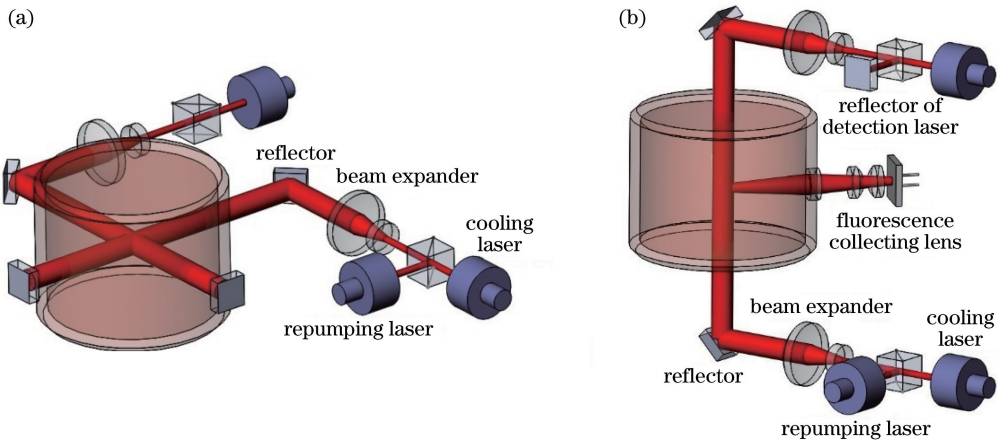


图 5 微波腔光路图。(a)水平方向光路图;(b)轴线方向光路图

Fig. 5 Microwave cavity optical path diagrams. (a) Horizontal light path diagram; (b) axis direction light path diagram

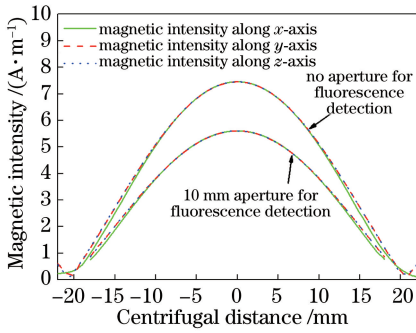


图 6 微波腔壁上荧光探测开孔对微波磁场强度的影响

Fig. 6 Influence of aperture for fluorescence detection on microwave magnetic field intensity on microwave cavity wall

#### 4 微波腔实现与初步测试结果

作为一个微波、光学集成的结构,微波腔装配完成后需要对两方面性能进行确认。其中,光学特性由于调节结构在微波腔外,这里主要关心微波特性,重点在于微波腔的谐振频率和 4 个波导耦合到微波腔内功率的对称性。

图 7 为微波腔装配完成后的实物图,整个微波腔通过底座安装在真空法兰上。使用 R&S 公司的 ZVB20 四端口矢量网络分析仪,将 4 个端口同时连接到 4 个波导耦合同轴电缆上测试 S 参数。利用微波腔波导的  $S_{11}$  参数可以对谐振频率进行测量,图 8 所示为某一个波导测量的微波腔  $S_{11}$  参数,图中吸收较大的峰为微波腔谐振点,频率为 6832.682 MHz,右侧吸收较弱的峰为矩形波导谐振点,谐振频率为 6889.469 MHz,这 2 个谐振点可以通过精磨微波腔和波导内壁进行调节<sup>[21]</sup>。把微波腔与矩形波导 2 个谐振点调开 50 MHz,是为了降低原子钟运行过程中波导特性的微弱变化对微波腔内微波场的影响,同时在调节过程中可以明确分辨各个波导的耦合强度。如图 8 所示,微波腔谐振频率比原子共振频率小 2 MHz,即预留的抽真空后谐振频率的变化量。

图 9 显示了 4 个波导之间的传输参数,利用任意 2 个波导之间传输的对称性,6 个传输参数可以代表任意波导之间的传输损耗。通过调节同轴波导与矩形波导之间的耦合强度,尽量把 4 个波导之间的传输损耗调成一致,以便后续实验能在微波腔中心获得均匀分布的微波场和最小的分布相位差。图 9 为调节后功率较平衡的结果, $S_{12}$ 、 $S_{13}$ 、 $S_{14}$ 、 $S_{23}$ 、 $S_{24}$  和  $S_{34}$  的吸收相对强度分别为  $-13.414$  dB、 $-13.581$  dB、 $-13.359$  dB、 $-13.536$  dB、

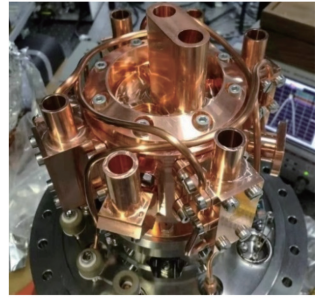


图 7 微波腔装配完成实物图

Fig. 7 Photo of microwave cavity after assembly

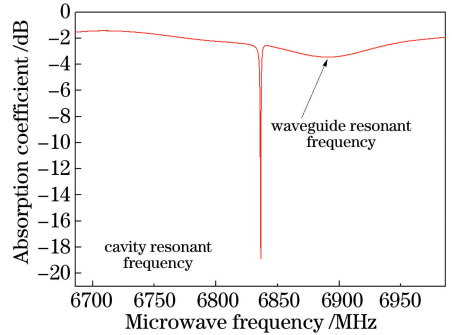


图 8 单个波导测量的微波腔  $S_{11}$  参数

Fig. 8  $S_{11}$  parameter of microwave cavity measured by single waveguide

$-13.422$  dB 和  $-13.576$  dB,波导之间传输损耗差别最大的是  $S_{13}$  与  $S_{14}$ ,差别达到 0.222 dB,根据这一误差,计算得到微波腔内中心 10 mm 范围内相位分布不平衡约为  $20 \mu\text{rad}$ ,从而导致分布式腔相移在冷原子钟常规运行参数下小于  $1 \times 10^{-16}$ <sup>[22]</sup>,此结果可满足高性能冷原子钟对微波腔的设计要求。

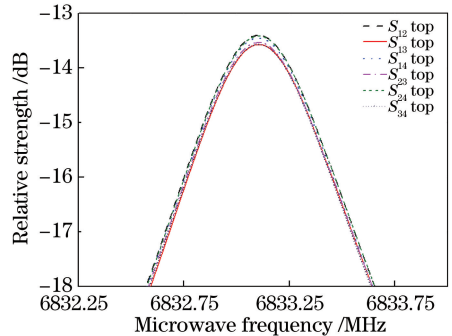


图 9 四个波导之间的传输参数

Fig. 9 Transmission parameters of four waveguides

#### 5 结 论

改进微波腔多端馈入过渡波导,使激光与微波信号共同入射到微波腔,并对影响微波性能的参数进行优化,实现了可以开展铷原子原位冷却与探测的微波谐振腔。对组装完成的微波腔进行性能仿真

和 S 参数特性测试,结果显示,多端耦合之间的传输特性具有很好的一致性。将这样的微波腔应用于空间冷原子钟,相比于环形腔的空间分立场设计方案,其 Dick 效应噪声和量子投影噪声更低,可以进一步提高原子钟的稳定度,由于腔内中心微波场的分布更均匀,由分布式腔相移引起的原子钟频移有望低于  $1 \times 10^{-16}$ 。由于该设计将原子冷却、选态、探测功能集成到同一个微波腔中,其光学与微波特性的调整统一具有较高的难度,但是集成化的设计使得结构紧凑,易于冷原子钟整机小型化,适合于体积、质量资源比较宝贵的卫星载荷。因此,基于该设计的高精度冷原子钟预期会在基础物理研究、卫星导航定位、深空探测等领域发挥重要作用。

## 参 考 文 献

- [1] Kasevich M A, Riis E, Chu S, *et al.* RF spectroscopy in an atomic fountain [J]. *Physical Review Letters*, 1989, 63(6): 612-615.
- [2] Clairon A, Salomon C, Guellati S, *et al.* Ramsey resonance in a zacharias fountain [J]. *Europhysics Letters (EPL)*, 1991, 16(2): 165-170.
- [3] Guena J, Abgrall M, Rovera D, *et al.* Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(3): 391-409.
- [4] Gerginov V, Nemitz N, Weyers S, *et al.* Uncertainty evaluation of the caesium fountain clock PTB-CSF2[J]. *Metrologia*, 2010, 47(1): 65-79.
- [5] Ovchinnikov Y, Marra G. Accurate rubidium atomic fountain frequency standard [J]. *Metrologia*, 2011, 48(3): 87-100.
- [6] Levi F, Calonico D, Calosso C E, *et al.* Accuracy evaluation of ITCsF2: a nitrogen cooled caesium fountain[J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 270-284.
- [7] Laurent P, Lemonde P, Simon E, *et al.* A cold atom clock in absence of gravity [J]. *The European Physical Journal D*, 1998, 3(3): 201-204.
- [8] Laurent P, Massonnet D, Cacciapuoti L, *et al.* The ACES/PHARAO space mission [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 540-552.
- [9] Liu L, Lü D S, Chen W B, *et al.* In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled  $^{87}\text{Rb}$  atoms [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2760.
- [10] Laurent P, Abgrall M, Jentsch C, *et al.* Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results[J]. *Applied Physics B*, 2006, 84(4): 683-690.
- [11] Ren W, Gao Y C, Li T, *et al.* Microwave interrogation cavity for the rubidium space cold atom clock[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(6): 060601.
- [12] Silvermetz D, Bloch M, Meirs M. Local oscillator induced instabilities in trapped ion frequency standards[C] // Nineteenth Annual Precise Time and Material Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting. December 1-3, 1987, California. [S.l.: s. n.], 1987: 113-132.
- [13] Dick G, Prestage J, Greenhall C, *et al.* Local oscillator induced degradation of medium-term stability in passive atomic frequency standards[C] // 22nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1990: 487-508.
- [14] Santarelli G, Audoin C, Makdissi A, *et al.* Frequency stability degradation of an oscillator slaved to a periodically interrogated atomic resonator [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1998, 45(4): 887-894.
- [15] Cheng H D, Zhang W Z, Ma H Y, *et al.* Laser cooling of rubidium atoms from background vapor in diffuse light [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(2): 023407.
- [16] Xiao L, Wang X C, Zhang W Z, *et al.* Loading of cold  $^{87}\text{Rb}$  atom with diffuse light in an integrating sphere[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(3): 253-255.
- [17] Liu P, Meng Y L, Wan J Y, *et al.* Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(6): 062101.
- [18] Müller S T, Magalhães D V, Alves R F, *et al.* Compact frequency standard based on an intracavity sample of cold cesium atoms [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(11): 2592-2596.
- [19] Li R X, Gibble K. Evaluating and minimizing distributed cavity phase errors in atomic clocks [J]. *Metrologia*, 2010, 47(5): 534-551.
- [20] Vanier J, Audoin C. The quantum physics of atomic frequency standards [M]. Bristol, Philadelphia: Adam Hilger, 1989: 617-645.
- [21] Bian F G, Wei R, Lü D S, *et al.* Design for microwave cavity in a laser-cooled Rb fountain clock [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1185-1189.  
边风刚, 魏荣, 吕德胜, 等. 激光冷却铷原子喷泉钟的微波谐振腔设计 [J]. *中国激光*, 2006, 33(9): 1185-1189.
- [22] Peng X K. Research on key technologies of space cold atom clock [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.  
彭向凯. 空间冷原子钟关键技术研究 [D] 上海: 中国科学院大学, 2019.