

积分球与微波腔一体化装置的研制

孟艳玲¹ 高源慈² 郑本昌¹ 刘 鹏¹ 万金银¹ 肖 玲¹ 王秀梅¹ 成华东¹ 刘 亮¹

(¹ 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)
² 电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要 首先对一体化的积分球微波腔进行了论证, 然后进行了设计、仿真和加工实测。采用单端环耦合的方式进行微波激励, 分别对从圆柱腔的端面及侧面耦合的方式进行了仿真, 结果发现在圆柱腔侧面耦合能得到较好的场型分布。实现了通过微调耦合环的方式进行模式选择的新方法, 这种方法简便易行, 且能有效减小微波腔的体积。测试结果表明设计的微波腔体积小、结构稳定, 能同时满足积分球冷却和微波腔的功能要求即实现了积分球与微波腔一体化的要求, 更重要的是一体化结构不需要使用漫反射涂料, 不会影响腔的模式及场型分布, 有利于提高钟信号的信噪比和对对比度。

关键词 原子与分子物理学; 激光冷却; 一体化; 积分球; 微波腔

中图分类号 O431.2; TN629.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0918001

Design for the Integration of Integrating Sphere and Microwave Cavity

Meng Yanling¹ Gao Yuanci² Zheng Benchang¹ Liu Peng¹ Wan Jinyin¹ Xiao Ling¹
Wang Xiumei¹ Cheng Huadong¹ Liu Liang¹

¹ Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract The design, simulation and measurement of the microwave cavity for the cold atom clock are presented. Single-ended loop coupling is used to stimulate the microwave field. Based on the result of simulation, the loop coupled from the side surface of the cylindrical cavity will induce a more symmetric microwave field than that coupled from the end face. The mode selection is realized by finely tuning the coupling loop. This method is not only simple, but it can also effectively reduce the volume of microwave cavity. Finally, the microwave cavity developed is tested and the results indicate that the performance of the microwave cavity meets the requirements of stable integrating sphere atom clock with small volume. Moreover, no reflective coating, which will affect the microwave field pattern, is needed for cooling atoms. This is beneficial to enhance the clock signal, and finally will improve the signal to noise ratio and the contrast.

Key words atomic and molecular physics; laser cooling; integration; integrating sphere; microwave cavity

OCIS codes 020.3320; 350.4010; 020.1335

1 引 言

积分球冷原子钟具有体积小、重量轻、能耗低,

稳定度高等优点。法国巴黎天文台的积分球铯原子钟 (HORACE)^[1-2] 频率稳定度已经做到了

收稿日期: 2014-02-25; **收到修改稿日期**: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(11034008)、国家 863 计划(2012AA120702)

作者简介: 孟艳玲(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事激光冷却与小型化冷原子钟等方面的研究。

E-mail: yanling_meng@siom.ac.cn

导师简介: 刘 亮(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事冷原子物理、原子钟和原子干涉仪等方面的研究。

E-mail: liang.liu@siom.ac.cn(通信联系人)

$2.9 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, HORACE 计划是为伽利略系统提供下一代的高精度星载原子钟,该系统最初是由激光冷却、微波腔及探测区构成^[3],后来经改进将激光冷却与球形微波腔进行一体化设计^[4]。上海光学精密机械研究所的积分球小组在 2008 年获得积分球冷却铷原子^[5],2009 年使用柱形谐振腔获得冷原子和微波作用的 Ramsey 条纹,并在 2010 年首次实现积分球冷原子钟的闭环锁定^[6]。

Ramsey 条纹的信噪比与原子钟的稳定度直接相关,而微波场分布直接影响 Ramsey 条纹的信噪比。使微波腔同时具有积分球冷却原子的作用,也就是积分球微波腔一体化技术非常重要,首先积分球微波腔一体化可以简化原本复杂的系统,满足星载体积小、重量轻的要求;其次,常规的积分球^[6-8]通常为石英材料制成,外面涂覆漫反射率涂料,由于涂料对微波有较强的吸收作用,把这样的积分球放置在微波腔内会明显降低微波腔的品质因素 Q,恶化腔内电磁场分布,而一体化后的微波腔将同时担任积分球的作用,不需要使用漫反射涂料,也就不会出现 Q 值衰减及场型畸变,均匀的场分布能增加钟跃迁信号的信噪比和对比度;最后,一体化的积分球微波腔为全金属结构,稳定性及可靠性非常高,为星载积分球冷原子钟打下了基础。

本文从星载积分球冷原子钟的目标出发,对铷原子钟的积分球微波腔一体化方案进行了论证,并从光学和微波指标的要求出发综合设计了微波腔的结构和尺寸且对微波耦合方式进行了优化仿真,得到了较好的微波轴向场分布。根据设计加工了圆柱形实验腔,对微波腔表面处理镀银,使其在

780 nm 的漫反射率大于 96%,并通过微调耦合环实现了简并模式抑制,实测了腔的共振频率及 Q 值,最终实现了微波腔和积分球的一体化。

2 积分球和微波腔一体化的论证

积分球和微波腔一体化的关键在于使微波腔同时实现积分球的功能,而实现积分球功能的关键则需要微波腔内表面具有很高的漫反射率。制作微波腔的材料如金属铜、银或者金对激光的反射率能达到 96% 以上,因此使得积分球和微波腔的一体化成为可能。一束激光射入积分球后会在积分球内多次反射形成均匀的各向同性的漫反射光场,当激光频率为负失谐,特定速度的原子将与某一特定角度(这个角度是自动匹配的)的光线相互作用以补偿原子的多普勒频移,在很大的速度范围内,原子都可以感受到光场的作用力而受到冷却。积分球的响应时间反映了光子进入积分球后存在的时间,设计时需要使这个参数尽量大^[8]:

$$\gamma = -\frac{3}{2} \frac{D_s}{c} \frac{1}{\ln \rho(1-f)}, \quad (1)$$

式中 γ 为积分球的响应时间, D_s 是积分球的直径, c 为光速, ρ 为积分球内表面反射率, f 为积分球的开孔率。从(1)式可以看出,在积分球尺寸及开孔一定的情况下,漫反射率越高,光子在积分球内存在的时间越长,积分球的损耗也就越低。加工了不同材质的漫反射率样片,如钛合金及无氧铜,并对其表面进行镀银处理。780 nm 处的漫反射率测试结果如表 1 所示。

表 1 漫反射率样片测试

Table 1 Testing result of samples' diffuse reflectivity

Samples	Titanium alloys		Oxygen-free copper		
	Base plate	MSIP	Base plate	MSIP	Electroplate
Diffuse reflectivity / %	52.0	83.1	67.5	74.4	96.6

表 1 中,基片表示未做镀银处理,MSIP 表示磁控溅射离子镀银,电镀即利用电解作用使金属表面镀银。积分球外壁喷涂的漫反射涂层在 450~800 nm 波段的反射率一般为 96%~98%^[8-9],少数能达到 99% 以上^[10]。由测试数据可以看出,无氧铜电镀处理后漫反射率可以满足积分球的要求,表明积分球微波腔一体化方案可行。

柱形谐振腔及球形谐振腔均能产生与原子作用所需的微波场。同球形积分球一样,圆柱形积分球也可以实现原子的冷却^[11-12],并且,由于圆柱形的

结构区别于球形结构,较易通过改变打光位置来改变柱形积分球内冷原子的分布,提高探测方向的冷原子数,最终提高钟信号的信噪比^[12]。圆柱形积分球冷却实验的成功为积分球微波腔一体化打下了基础,且圆柱形谐振腔品质因数 Q 高,易于加工、调试。因此,最终选用圆柱腔方案。

3 理论计算及仿真

谐振腔与波导在结构上有相似之处,求解场方程时,只需要在波导的边界条件基础上,增加谐振腔

在两个端面的边界条件即可。为了激发原子基态能级的磁偶极跃迁，要求在微波场与原子相互作用区域微波的磁场方向平行于 C 场方向，对于圆柱形谐

振腔通常设计相互作用区在轴线附近，只有 TE_{mnp} 型振荡模在轴线上的磁场分布平行于 C 场方向，圆柱形谐振腔 TE_{mnp} 型振荡模的场方程为^[13]

$$\begin{cases} E_r = \pm \frac{2\omega\mu_0 m}{k_c^2 r} H_0 J_m(k_c r) \begin{cases} \sin m\varphi \\ \cos m\varphi \end{cases} \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ E_\varphi = \frac{2\omega\mu_0 m}{k_c^2} H_0 J'_m(k_c r) \begin{cases} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{cases} \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ E_z = 0 \\ H_r = -j \frac{2}{k_c} \left(\frac{p\pi}{l}\right) H_0 J'_m(k_c r) \begin{cases} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{cases} \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ H_\varphi = \pm j \frac{2m}{k_c^2 r} \left(\frac{p\pi}{l}\right) H_0 J_m(k_c r) \begin{cases} \sin m\varphi \\ \cos m\varphi \end{cases} \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ H_z = -j2 H_0 J_m(k_c r) \begin{cases} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{cases} \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 a 为圆柱腔的半径， l 为圆柱腔高度， $k_c = x'_{nm}/a$ ，而 x'_{nm} 是第一类 m 阶贝塞尔函数的导数 $J'_m(\rho) = 0$ 的第 n 个根，而工作在铷原子钟跃迁频率点的众多 TE_{mnp} 型振荡模中， TE_{011} 模能满足轴线上磁场均匀分布的要求，具有较高 Q 值并且体积较小，

因此通常选用圆柱形微波腔的 TE_{011} 模作为冷原子钟的工作模式。该模式的电场绕圆柱腔轴线呈圆周闭合状态，而磁场没有圆周方向的分量。如图 1 所示，谐振在 6.83468 GHz 时圆柱腔内的磁场分布，通过软件仿真可以看到场型达到预定的要求。

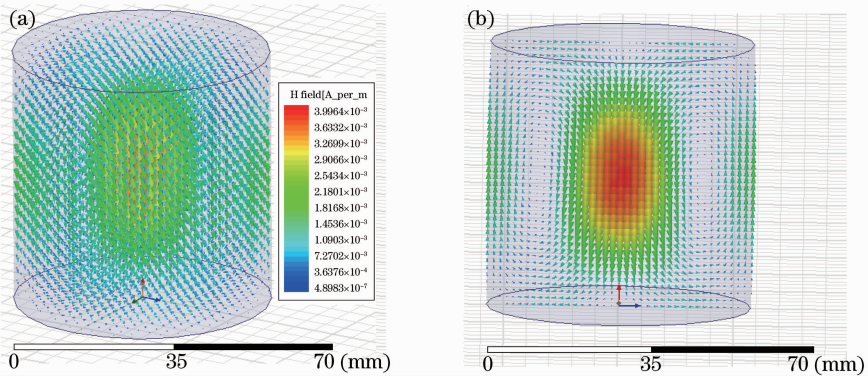


图 1 圆柱腔内的磁场分布。(a) 三维图像；(b) 轴截面上的二维图像

Fig. 1 Magnetic-field distribution in the cylindrical cavity. (a) Three-dimensional image; (b) two-dimensional image of the axial cross section

圆柱形谐振腔 TE_{011} 模的品质因数为^[14]

$$Q_0 = \omega_0 \frac{W}{P_{Lc} + P_{Ld}} = \frac{\lambda_0}{\delta} \times \frac{0.61 \times [1 + 0.168 (D/l)^2]^{3/2}}{1 + 0.168 (D/l)^3}, \quad (3)$$

式中 δ 为谐振频率时谐振腔材料的趋肤深度， $D = 2a$ ，为圆柱直径。考虑到微波腔要兼具积分球冷却的作用，设计的微波腔直径与高度比为 1:1，因为这个尺寸比较接近球，是工作频点上使得 TE_{011} 模 Q 值最高的比例，且有利于光场在腔内的均匀分布。理论计算得到直径与高度比为 1:1 时的高度尺寸为

57.6 mm，材料为镀银表面，相应的品质因数大于 30000。实际应用时需要在微波腔的轴线位置开两个直径为 10 mm 的通光孔，由于系统对微波腔内场型的对称性要求较高，结合实际经验考虑到耦合孔的位置会对场型分布产生影响，因而对此进行了数值仿真。仿真结果如图 2 和图 3 所示，从数值仿真结果可以发现：采用单根同轴线方式进行耦合，耦合环在圆柱腔侧面激励的方式比在圆柱腔端面激励更能保证微波腔内场型的对称性。因此，实际应用中选择侧面耦合的方式。

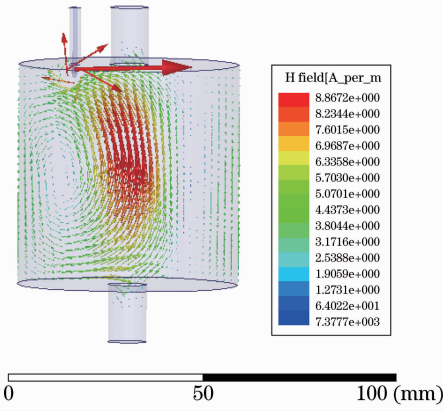


图 2 端面耦合磁场分布

Fig. 2 Magnetic-field distribution when the loop is coupled from the end surface of the cavity

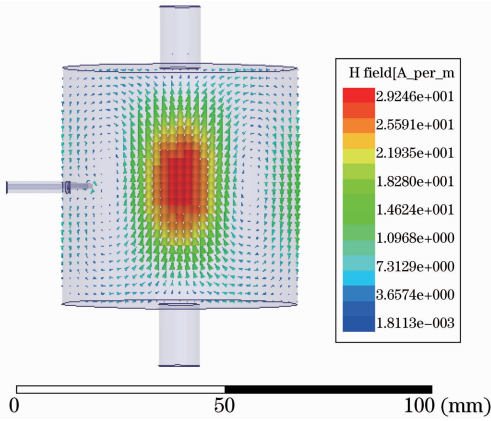


图 3 侧面耦合磁场分布

Fig. 3 Magnetic-field distribution when the loop is coupled from the side surface of the cavity

4 模式选择方式

微波腔内可存在无穷多的 TE 模和 TM 模, 这些模式能否存在, 主要取决于边界条件和激励方式。圆柱腔边界条件与模式谐振频率之间的关系可以由圆柱腔的模式表达式^[14]来描述:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{f_0 D}{c}\right)^2 &= \frac{1}{4} \left(\frac{pD}{l}\right)^2 + \left(\frac{x'_{nm}}{\pi}\right)^2 & \text{TE}_{mnp} \\ \left(\frac{f_0 D}{c}\right)^2 &= \frac{1}{4} \left(\frac{pD}{l}\right)^2 + \left(\frac{x_{nm}}{\pi}\right)^2 & \text{TM}_{mnp} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

式中 x_{nm} 、 x'_{nm} 分别是第一类 m 阶贝塞尔函数和其导数为零的第 n 个根, 由上式可知当微波腔直径与高度比为 1:1 时, 在铷原子钟跃迁频率点上只有 TM_{111} 与 TE_{011} 模构成了简并模, TM_{111} 模是影响腔内磁场分布的主要干扰模。

传统的抑制 TM_{111} 模方法是在端盖由 $1/4$ 波长的短路缝隙完成的, 这种方式会增大端盖的厚度, 也

就意味着体积和重量会增加, 并且若采用以这种方式进行模式选择的微波腔作为积分球冷却原子, 端盖与腔体的间隙也可能引起光场泄漏等问题。因此采用另外一种方法—优化激励方式的方法来抑制 TM_{111} 模。

微波腔采用的是耦合环激励(磁偶极子)方式, 相比于矩形波导耦合, 这种方式能有效地缩减微波腔的体积。将同轴线内导体延伸后弯成环形, 将其端部焊在外导体上, 使耦合环的磁场分量(环面的法线方向)与圆柱谐振腔的 TE_{011} 模磁场分量一致, 即可激励 TE_{011} 模, 而在激励端口 TM_{111} 模的磁场分量与激励磁场正交, 不能被激励, 所以采用这种激励方式可巧妙地抑制 TM_{111} 模的产生^[15]。

根据理论计算和仿真结果, 用无氧铜加工了实验腔, 并对腔表面进行处理后镀银。优化时主要在于调整环面与磁力线相垂直, 使其最大限度地激发 TE_{011} 模, 抑制其他模式。耦合的好坏对输出信号有极大的影响, 图 4(实线)显示出优化前的模式耦合情况, 可以看出在 TE_{011} 模式的旁边有一个较明显的高阶模式, 通过微调耦合环的位置, 不仅把高阶模式调到几乎消失, 并且增大了 TE_{011} 模的耦合度(虚线), 证明了这种模式选择方式的可行性。

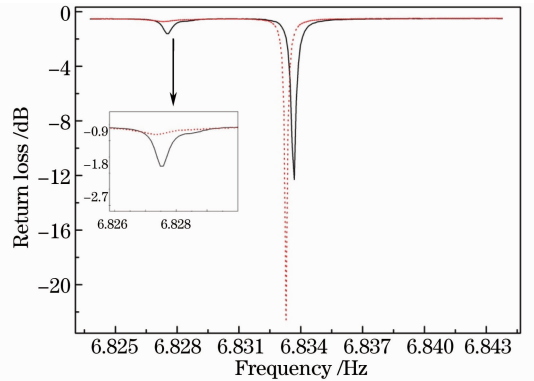


图 4 整耦合环前(实线)与微调耦合环位置后(虚线)的模式

Fig. 4 Testing results before (solid) and after (dashed) finely tuning the coupling loop

5 共振频率及 Q 值

由于真空和空气的介电常数不同会对共振频率有影响, 理论计算得到微波腔在真空中的共振频率比在空气中的高 1.98 MHz^[16]。因此在热真空罐中实际测试了微波腔的共振频率和 Q 值, 测试方法采用单端反射法^[17]。实验结果如图 5 所示, 其中图 5(a)为热真空罐测试实验装置图, 图 5(b)为共振频

率测试结果图。热真空罐中的温度为 $30.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，气压为 $1.6 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ ，测得的中心频率为 6.834025 GHz ， Q 值为 11000。对于 TE_{011} 模温度

升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，共振频率减小 113456 Hz ^[16]。实际使用时适当改变微波腔的工作温度即可以使微波腔工作在钟跃迁频率 $6.834\ 682\text{ GHz}$ 。

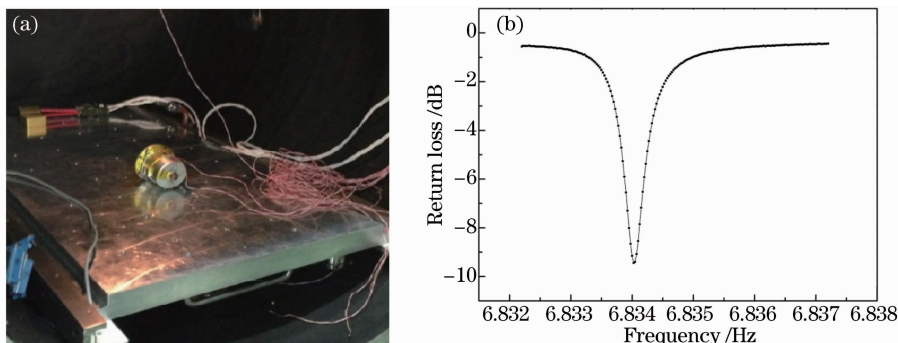


图5 微波腔测试结果。(a) 实验装置图；(b) 实验测得的共振频率

Fig. 5 Testing result of microwave cavity. (a) Experimental setup; (b) testing result of the resonant frequency

6 结 论

成功研制了一体化的积分球微波腔，对其进行了设计、仿真和加工实测。当其表面漫反射率在 780 nm 达到 96% 以上时，它既能实现微波腔的功能，又可以用来冷却原子。通过模拟仿真发现侧面环耦合可以获得更好的微波场型分布，并且通过微调耦合环的方法成功实现了模式选择，有利于微波腔的进一步小型化。根据仿真结果加工了实验腔，测试表明其共振频率及 Q 值均满足要求。

一体化的微波腔结构简单、体积小重量轻、全金属结构稳定可靠，为星载积分球冷原子钟打下基础。最重要的是利用腔壁的镀银层形成漫反射光场，避免了使用漫反射涂料对微波腔 Q 值的大幅衰减以及对模式和场型的影响，因此一体化的积分球与微波腔能提高原子钟信号的信噪比及对比度。

参 考 文 献

- 1 Esnault F X, Holleville D, Rossetto N, *et al.*. High-stability compact atomic clock based on isotropic laser cooling[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033436.
- 2 Esnault F X, Rossetto N, Holleville D, *et al.*. HORACE: a compact cold atom clock for Galileo [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(5): 854–858.
- 3 Valentin C, Guillot E, Guillemot C, *et al.*. Microwave interrogation of cesium atoms cooled in isotropic light[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(5): 1224–1228.
- 4 Esnault F X, Perrin S, Tremine S, *et al.*. New design of the compact cold atoms clock HORACE[C]. *Proceedings of the 20th EFTF*, 2006. 237–240.
- 5 Cheng Huadong, Zhang Wenzhuo, Ma Hongyu, *et al.*. Laser cooling of rubidium atoms from background vapor in diffuse light [J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(2): 023407.
- 6 Wang Xucheng, Cheng Huadong, Zheng Benchang, *et al.*. Integrating sphere cold atom clock with cylindrical microwave cavity[C]. *2011 Joint Conference of the IEEE International IEEE*, 2011: 1–3.

- 7 Zheng Benchang, Cheng Huadong, Meng Yanling, *et al.*. Development of an integrating sphere cold atom clock[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(12): 123701.
- 8 Ma Hongyu, Cheng Huadong, Zhang Wenzhuo, *et al.*. Laser cooling of rubidium atoms in an integrating sphere [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3): 1569–1573.
- 马红玉, 成华东, 张文卓, 等. 积分球内的铷原子激光冷却[J]. *物理学报*, 2009, 58(3): 1569–1573.
- 9 Wang Xucheng. Cold Atom Clock Based on Integrating Sphere [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012. 21–24.
- 王旭成. 积分球冷原子钟[D]. 上海: 中国科学院上海精密机械研究所, 2012. 21–24.
- 10 Ketterle W, Martin A, Joffe M A, *et al.*. Slowing and cooling atoms in isotropic laser light[J]. *Physical Review Letters*, 1992, 69(17): 2483.
- 11 Guillot E, Pottier P E, Dimarcq N. Three-dimensional cooling of cesium atoms in a reflecting copper cylinder[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(21): 1639–1641.
- 12 Yanling M, Huadong C, Benchang Z, *et al.*. Controlling the shape of a cold atom cloud in a cylindrical cavity[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(6): 063701.
- 13 Lin Weigan. *Electromagnetic Field Theory* [M]. Beijing: Post and Telecom Press, 1984. 362–363.
- 林为干. *电磁场理论* [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1984. 362–363.
- 14 Wang Wenxiang. *Microwave Engineering Technology* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009. 208–211.
- 王文祥. *微波工程技术* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. 208–211.
- 15 Zhang Shue, Li Shuyi. Design and implement of microwave resonator cavity for wetness measurement coaxial ring coupling [J]. *International Electronic Elements*, 2008, 11: 6–8.
- 张淑娥, 李舒毅. 微波谐振腔湿度测量同轴环耦合设计与实现 [J]. *国外电子元件*, 2008, 11: 6–8.
- 16 Bian Fenggang, Wei Rong, Lü Desheng, *et al.*. Design for microwave cavity in a laser-cooled Rb fountain clock[J]. *Chinese J 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.
- 17 Gao Yuanci, Yu Guofen, Sun Jiahong. Measurement and research of the quality factor of quasi-optical resonator by scalar network analyzer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(4): 517–520.
- 高源慈, 余国芬, 孙嘉鸿. 准光腔品质因数的标网测量与研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(4): 517–520.