

对极小型磁控管微波腔多普勒和腔牵引频移的分析

雒向东¹ 罗崇泰²

(1. 兰州城市学院培黎工程技术学院, 兰州 730070;

2. 中国空间技术研究院兰州物理研究所表面工程技术国家级重点实验室, 兰州 730000)



摘要: 用 Ansoft HFSS 仿真软件建立了极小型氢频标磁控管微波腔模型结构, 对仿真设计出的微波腔其多普勒和腔牵引频移进行了分析。在 50℃ 时, 将贮存泡温度变化控制在 0.01℃ 范围内, 多普勒相对频移可获得 1.4×10^{-15} 频率准确度; 当 $Q_c=5 \times 10^3$ 时, 腔谐振频率与原子跃迁频率差值小于 5Hz, 原子线宽小于 1Hz 时, 谐振腔就满足振荡条件, 并可保证腔牵引相对频移小于 10^{-14} 。

关键词: 磁控腔; 多普勒频移; 腔牵引频移

Frequency Shift Analysis of Doppler and Cavity Pulling for Extremely Small Magnetron Microwave Cavity

Luo Xiangdong¹ Luo Chongtai²

(1. Peili Technical College of Lanzhou City University, Lanzhou 730070;

2. National Key Lab of Surface Engineering, Lanzhou Institute of Physic of China Academy of Space Technology, Lanzhou 730000)

Abstract: The mode of extremely small magnetron microwave cavity of hydrogen maser is built by Ansoft HFSS, and its frequency shift of Doppler and cavity pulling is analyzed. When the temperature of storage bulb changes within a limit of 0.01℃, the relative frequency shift of Doppler is 1.4×10^{-15} at 50℃. When $Q_c=5 \times 10^3$, the difference between cavity oscillation frequency and atom transition frequency is with a limit of 5Hz and the atom line broad is with a limit of 1Hz, the oscillation condition of microwave cavity is satisfied and the relative frequency shift outputted of cavity pulling is with a limit of 10^{-14} .

Key words: magnetron cavity; Doppler frequency shift; cavity pulling frequency shift

1 引言

导航卫星由于有效载荷的限制, 所载氢钟必须小型化, 而氢钟的小型化主要是其谐振腔的小型化设计, 进而带动其它部件的减少。小型化的谐振腔是氢脉泽的心脏部件, 其谐振频率的变化会引起脉泽输出频率的变化, 所以对小型谐振腔其频移及线宽问题的分析对提高小型氢脉泽频率准确度有重要意义。

2 极小型磁控管微波腔的设计^[1~3]

建立模型: 磁控管微波腔结构尺寸是一半径为 b ($b=32\text{mm}$)、长为 L ($L=100\text{mm}$) 的金属圆柱筒包围着一个长度为 l ($l=80\text{mm}$)、半径为 a ($a=18\text{mm} < b$) 的同轴金属圆柱壳, 金属圆柱壳厚度为 d ($d=1\text{mm}$), 均匀分布 n ($n=2$) 个长为 l 、宽为 w 的缝隙, 腔体为理想电壁, 电极镀银, 电极距腔筒上下底间距 10mm, 在电极上下加 4 个半径为 1mm、长度为 10mm 的对称镀银金属圆柱支柱, 再放置一贮存泡, 贮存泡形状取圆柱壳形状, 长度与壳电极等长, 一端中央带有半径为 0.6mm、厚 1mm 的圆筒, 贮存泡是石英玻璃材质,

作者简介: 雒向东 (1965-), 教授, 物理电子学专业; 研究方向: 原子频标及电磁场理论。

收稿日期: 2010-11-22

厚度取 1mm。用 Ansoft HFSS 建立的带泡磁控管微波腔模型如图 1 所示。

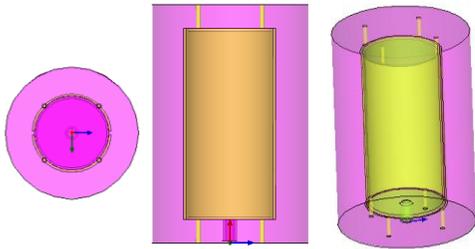
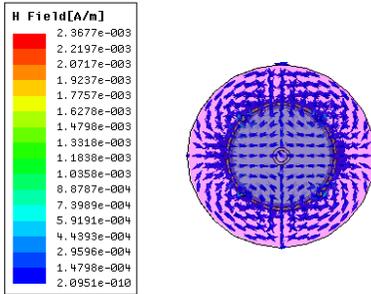
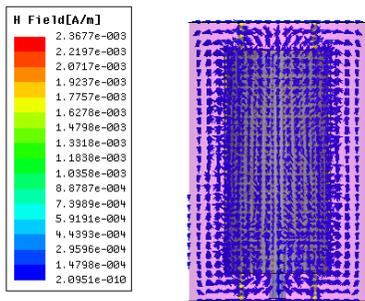


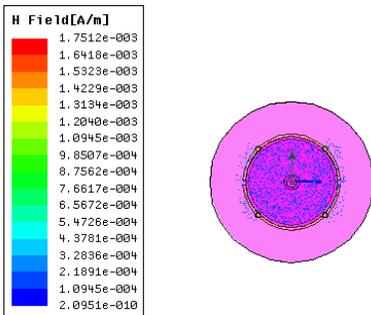
图 1 带支柱和贮存泡的磁控管微波腔模型图



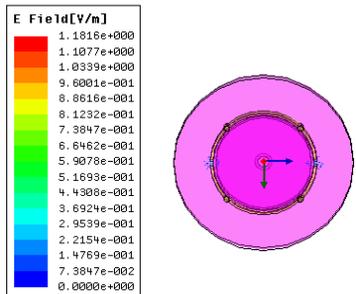
a 磁场矢量顶视图



b 磁场矢量侧视图



c 磁场矢量顶视图



d 电场幅度顶视图

图 2 带支柱和贮存泡的磁控管微波腔

用 HFSS 软件采用最小频率 0.5GHz 开始计算 20 个模式，最大迭代计算次数是 6，最大迭代频差为 0.02%。从仿真结果可知，当取壳电极缝隙间距 2mm 时，磁控管微波腔 TE₀₁₁ 本征模谐振频率最接近氢原子超精细结构 (0-0) 跃迁频率 1.4239GHz，误差为 0.25%，品质因数为 5627。图 2 是带支柱和贮存泡的磁控管微波腔的电磁场图，从图 2a 和 2b 可看出磁场仍近似是 TE₀₁₁ 模式，图 2d 反映出电场仍主要分布在微波腔壳电极缝隙区域，并且电场结构已不为 TE₀₁₁ 模式，我们可不考虑电场分布的变化；从图 2c 可看出磁场在磁控管内及支柱附近分布仍然较强，在磁控管内变化比较均匀^[4]。可见贮存泡的引入对磁控管微波腔电磁场分布影响较小，由于增加了腔内的损耗，所以对品质因数和谐振频率有一定的影响。

3 极小型磁控管微波腔的多普勒频移

多普勒效应是指波源与接收器有相对运动时，接收器收到的波动频率与静止频率不同的现象。当运动原子在辐射场传播方向上有速度分量时，会产生一级多普勒效应。在微波腔中辐射场以驻波形式存在，一级多普勒频移为零。因为实际原子还存在一定的定向运动成分，所以还剩余一级多普勒频移，计算表明^[5]：对一般氢频标其相对频移为 10⁻¹⁸ 数量级，效应可以被忽略。

二级多普勒效应与原子运动方向无关，考虑相对论效应时，在二级近似下有：

$$\delta\omega_D = -\vec{k} \cdot \vec{v} + \frac{1}{\omega} (\vec{k} \cdot \vec{v})^2 - \frac{\omega}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad (1)$$

表明在辐射场波矢量与原子运动方向垂直时，还有二级多普勒频移为：

$$\delta\omega_{D2} = -\frac{\omega}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad (2)$$

相对频移为：

$$\frac{\delta\nu_D}{\nu} = -\frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad (3)$$

$$\text{因为 } \bar{v}^2 = \frac{3kT}{m}$$

$$\text{得 } \frac{\delta\nu_D}{\nu} = -\frac{3}{2} \frac{kT}{mc^2} \quad (4)$$

$$\frac{\delta\nu_D}{\nu} = -1.4 \times 10^{-13} T \quad (\text{对氢原子}) \quad (5)$$

设 T=323K (50℃)，相对频移达 -4.522×10⁻¹¹。

可见温度对频移影响很大,故微波腔必须采用恒温措施,若贮存泡温度变化控制在 0.01°C 范围内时,可获得 1.4×10^{-15} 的频率准确度。

4 极小型磁控管微波腔的腔牵引频移

当谐振腔谐振频率 ν_c 与原子跃迁频率 ν_0 不等时会产生腔牵引效应,这时振荡频率与两者有关,但与它们不完全相等,对量子振荡器必须要考虑原子系统与辐射场相互作用引起的相移。

电磁场与介质相互作用可用介质极化来描写,复极化率反映两者之间的相位差,用引入麦克斯韦方程的复极化率可以得到腔内电磁场运动方程,从其稳态解可得到振荡的振幅和相位条件^[5]:

$$\omega_c^2 - \omega^2 = \frac{4\pi\omega^2\chi'_e}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\frac{\omega_c}{Q_c} = -\frac{4\pi\omega\chi''_e}{\varepsilon} \quad (7)$$

设原子谱线为洛伦兹线形,可得:

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_c - \omega} = \frac{\Delta\omega_0}{\Delta\omega_c} \quad (8)$$

$$\text{令 } s = \frac{\Delta\omega_0}{\Delta\omega_c} \quad (9)$$

对量子振荡器其原子谱线宽度远小于腔模宽度,即 $\Delta\omega_0 \ll \Delta\omega_c$, $s \ll 1$,可得:

$$\omega = \frac{s\omega_c + \omega_0}{1+s} \approx \omega_0(1-s) + s\omega_c \quad (10)$$

$$\text{即 } \omega = \omega_0 + (\omega_c - \omega_0)\frac{\Delta\omega_0}{\Delta\omega_c} \quad (11)$$

若用原子 Q 值来表示原子谱线的相对宽度时,可得:

$$Q_a = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_0} \quad (12)$$

则式(11)可写为:

$$\omega = \omega_0 + (\omega_c - \omega_0)\frac{Q_c}{Q_a} \quad (13)$$

可得腔牵引相对频移为:

$$\frac{\delta\nu_c}{\nu} = \frac{\nu_c - \nu_0}{\nu} \frac{Q_c}{Q_a} \quad (14)$$

可见若 Q_a 较高,线宽较窄时,量子振荡器振荡频率接近于 ω_0 ,所以谐振腔谐振频率与原子跃迁频率不等时,另一个系统对振荡频率会产生牵引效应,牵引程度决定于两系统频率失谐程度和两者 Q 值之比。

对文中设计的微波腔,取 $Q_c = 5\times 10^3$,为保证相对频移 $\frac{\delta\nu_c}{\nu} < 10^{-14}$,腔谐振频率需调到与原子跃迁频率差值小于 5Hz 之内,由式(14)计算得 $Q_a > 1.76\times 10^9$ 。

$Q_a = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_0}$ 取决于原子发射谱线的宽度,改变原子发射谱线宽度的办法有引入低频塞曼跃迁(增加磁弛豫几率)等方法。另外一种有效办法就是通过改变束流强度来改变自旋交换碰撞弛豫时间,从而改变线宽,关系如下^[5]:

$$\Delta\nu = \frac{1}{\pi T_2} = \frac{1}{\pi T_\tau} \left(1 + q \frac{I_a}{I_{th}} \right) \quad (15)$$

若保证 $Q_a > 1.76\times 10^9$,则计算得 $\Delta\nu_0 < 0.81 \approx 1\text{Hz}$ 。

取 $\sqrt{2}\bar{v} = 3.58\times 10^5\text{cm/s}$, $\sigma_{cx} = 2.85\times 10^{-15}\text{cm}^2$,由

$$q = \frac{T_\tau}{T_{2s.c}} \frac{I_{th}}{I_a} = \frac{\sqrt{2}\sigma_{cx}\bar{v}h\nu_c T_b}{8\pi\mu_B^2 Q_c \eta V_b T_\tau} \frac{I}{I_a} \quad (16)$$

$$q < 3 - 2\sqrt{2} = 0.172 \quad (17)$$

$$\text{得: } \frac{V_c T_b}{Q_c \eta V_b T_\tau} \frac{I}{I_a} < 3.47\times 10^{-4} \quad (18)$$

式中: I 为进入贮存泡的总原子束流; I_a 为进入贮存泡的激活原子束流。

根据 Harry E. Peters 的分析^[6]:新设计的磁控管腔最有效的泡子长度是与电极等长,新结构的腔与传统设计相比,对应各种不同 D/d 的值,填充因子均大于1.6倍。对极小型磁控管微波腔, $\frac{V_c}{V_b} = 4$,取 $\frac{I}{I_a} = 2$, $\eta = 5$ 。代入上式得需要满足的振荡条件为:

$$\frac{T_b}{T_\tau} = 1 + \frac{T_b}{T'_1} < 2.1688\times 10^{-4} Q_c \quad (19)$$

式中: T'_1 为贮存时间和自旋交换弛豫时间以外的因素造成的弛豫时间。

$$\text{当 } Q_c = 5000 \text{ 时, } \frac{T_b}{T_\tau} < 2.1688\times 10^{-4} Q_c = 1.0844,$$

$$\frac{T_b}{T'_1} < 0.0844;$$

$$\text{当 } Q_c = 7000 \text{ 时, } \frac{T_b}{T_\tau} < 2.1688\times 10^{-4} Q_c = 1.5182,$$

$$\frac{T_b}{T'_1} < 0.5182;$$

(下转第 54 页)

