

8 mm 波段圆柱螺旋腔的研制^{*}

骆永健 黄元福 孟建军

(中山大学无线电电子学系, 广州 510275)

摘 要 为了用 8 mm 波段傅里叶变换谱仪测量气体的转动吸收谱线, 研制了一个用作气体样品池的圆柱螺旋腔. 讨论了如何通过选择腔体结构和耦合方式抑制干扰模, 并对腔的模式纯度和有载 Q_L 值进行了测试.

关键词 螺旋腔, 样品池, 模式纯度

分类号 TN 015

以往的微波吸收谱仪使用的气体样品池有 S 型波导池和气密型 Fabry-Pelot 开放腔, 前者频带虽宽但尺度太长, 使用极不方便; 后者体积过大且带宽太窄, 不适合我们的毫米波谱仪的使用. 我们要研制的圆柱螺旋腔有如下特性: 使用锁相稳频的 8 mm 固态源^[1], 工作频率约为 35.68 GHz, 体积较小, 约 200 cm³, 频带宽度稍大于 4 MHz, Q_L 值约为 8 900, 腔内电磁场的模式单一, 即单模工作; 气密性能好.

在共振腔样品池中, 由于电磁场的多次反射效应, 增加了气体分子的吸收波程, 其等效长度用式子 $L_{\text{eff}} = Q_L \lambda / (2\pi)$ 来表示. 若取 $Q_L = 8 900$, $\lambda = 8.5$ mm, 则 $L_{\text{eff}} \approx 12$ m. Ramsey 等人在 X 波段谱仪实验测试中使用长为 16 m 的 S 型波导作为气体样品池^[2], 得到较好的结果. 而在毫米波段, 气体的吸收要比 X 波段强, 可认为 12 m 的吸收长度是能满足要求的.

1 腔的工作模式

设计一个单模腔的可能方案是选择最低模作为工作模式, 但圆柱腔的最低模式 TE_{11} 不是好的选择. 这是因为: ① TE_{11} 模不是圆对称模, 存在极化简并, 只要腔的加工存在很细微的椭圆度将导致极化方向的旋转, 很难实现单模工作; ② 由 TE_{11} 和 TM_{01} 模的临界波长表达式可知, TE_{11} 模的单模工作条件是 $(\lambda_c / 3.41) < R < (\lambda_c / 2.61)$, 其中, R 为腔的半径, 对于 8 mm 波段, 腔的直径太小, 容积也太小, Q_L 值太低, 不合作样品池.

我们认为圆柱腔的最佳工作模式应选 TE_{0p} 模^[3]. 这是因为: ① TE_{0p} 模的轴向磁场分量 $H_z = 0$, 腔的侧壁只有圆周电流, 而端壁没有径向电流, 允许端壁与圆柱体不接触, 便于使用胶圈实现气密而不影响腔内场分布; ② TE_{0p} 模工作的腔直径可有 2.6 cm, p 为腔轴向的半波长的个数, 可选择 $p = 23$, 取腔长 $l \approx 10$ cm, 于是得到合适的腔体容积; ③ 在 TE_{0p} 和 TM_{0m} 模中, 只有 $m = 0$ 时才不会产生极化简并, 即 TE_{0p} 和 TM_{00} 模是圆对称的, 若选择 TE_{01}

* 国家教委博士点基金资助项目

收稿日期: 1997-10-22 骆永健, 男, 59 岁, 教授

模作为工作模式可避免极化简并. 至于其它的干扰模, 如 $E-H$ 简并模 TM_{1k} $n > 2$ 的 TE_{0n} 以及 $p \neq 23$ 的 TE_{0lp} 等模式必须在设计中采取相应措施予以有效的抑制.

1.1 选择腔体结构, 抑制 $E-H$ 简并干扰模 TM_{1p}

TM_{11} 是 TE_{01} 的简并干扰模, 可以选择腔体螺旋结构来抑制此干扰模. 在圆柱腔的模式中, TE_{01} 具有纯圆周的侧壁电流, 而 TM_{11} 模通过腔体的电流是轴向的. 若能设计出这样的腔体内侧壁, 把轴向电流截断, 只存在圆周电流, 则 TM_{11} 模将被抑制. 实现这种腔体结构的方案是采用所谓“螺旋腔”.

1.2 选择耦合孔位置, 抑制 TE_{02} 干扰模

圆柱腔的输入或输出与波导之间的耦合采用圆孔耦合方式, 耦合圆孔开在端壁上. 由于端壁上的电场分量为零, 而矩形波导中的 H_x 磁场分量与圆柱腔中 H_r 磁场分量是平行的, 所以这种耦合是磁耦合. 据波导理论, 在矩形波导中传播的主模一般是 TE_{01} 模, 它的磁场分量 $H_z = H_{0x} \sin(\pi x/a) \sin(k_t z - \omega t)$ 呈正弦分布, 在波导横截面中心最大, 故应让耦合孔位于矩形波导的横截面中心处, 以得到最大传输. 又据圆柱腔理论, 腔中的 TE_{01} , TE_{02} 模在端壁处的磁场分量 H_r 沿径向分布如图 1 所示. 从图 1 中可以看到, 耦合孔应选取在 TE_{02} 模 $H_r = 0$ 的位置, 即 $(r/R) = 0.546$ 或 $(r/D) = 0.273$ 处, 这样 TE_{02} 模便不会被激发. 而在此处, TE_{01} 模的 H_r 仍差不多取最大值.

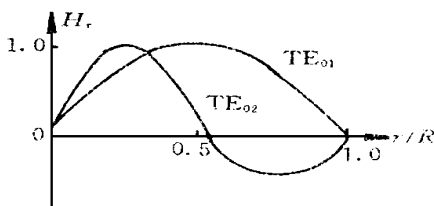


图 1 端壁上 H_r 随 r/R 的变化

Fig. 1 Variation of H_r with r/R on end wall

1.3 选择圆柱腔的直径, 抑制 TE_{0n} ($n \geq 3$) 干扰模

据圆柱腔中 TE_{0n} 模的截止波长公式 $\lambda_c \geq 0.617R$, 若要使得 35.68 GHz 的 TE_{03} 模及以上模式在腔中都被截止, 则要求腔的半径应为 $R \leq (\lambda_c / 0.617) = 1.36$ cm. 我们选取 $R = 1.3$ cm, 即腔的直径 $D = 2.6$ cm. 而当 $R = 1.3$ cm 时, TE_{01} 模的截止波长为 $\lambda_c = 1.64R = 21.32$ mm, 即 $f_c = 14.07$ GHz. 可见, TE_{01} 模不会被截止.

1.4 选择工作方块, 抑制 $p \neq 23$ 的 TE_{0lp} 干扰模

由 TE_{0lp} 模的谐振波长公式可得下面关系式

$$(fD)^2 = (cx_{mn}/l)^2 + (c/2)^2 p^2 (D/l) \quad (1)$$

式中, c 为电磁波传播速度, x_{mn} 为第一类 m 阶贝塞尔函数的导数的第 n 个根, l 为圆柱腔的长度.

令 $y = (fD)^2$, $x = (D/l)^2$, 又 TE_{01} 模的 $x_{mn} =$

3.83, 并取 $c = 3 \times 10^8$ m/s, 则 (1) 式可写为

$$y = 13.39 + 2.25p^2 x \quad (2)$$

现据 (2) 式, 以 y 为纵坐标, x 为横坐标, 绘制圆柱腔内 TE_{0lp} 模式图 (图 2), y 的单位为 $100 \text{ (GHz}^2 \text{ cm}^2)$.

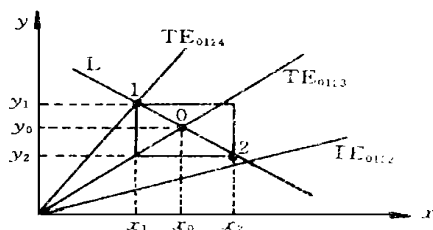


图 2 TE_{0lp} 模的工作方块图

Fig. 2 Work block of the TE_{0lp} mode

取 mm 波源中心频率 $f_0 = 35.68$ GHz, 腔径 $D = 2.6$ cm, 得 $y_0 = (fD)^2 = 86.059$, 又据 (2) 式得 $x_0 = 0.06105$. 过 0 点作一条与 TE_{0123} 模式关于 $x = x_0$ 对称的直线 L , 其方程为

$$y = y_0 - (9/4)(23)^2(x - x_0) \quad (3)$$

于是在模式图上容易作出工作方块. 据 (2), (3) 式可算得顶点 1 和顶点 2 的坐标分别为 $x_1 = 0.05796$, $y_1 = 88.8470$ 和 $x_2 = 0.06319$, $y_2 = 83.8825$. 据关系式 $y = (fD)^2$ 便可求得在

这工作方块内单模工作的频带宽度 $\Delta f \approx 1.2 \text{ GHz}$. 再据关系式 $x_0 = (D/l)^2$, 可求得圆柱腔的长度 $l = 10.52 \text{ cm}$.

2 圆柱螺旋腔 Q_L 值的估算

由圆柱腔中 TE_{012} 模的固有品质因数公式

$$Q_0 = \frac{0.336 [1.49 + (pR/l)^2]^{3/2} \lambda_0}{[1 + 1.34p^2 (R/l)^2] W} \quad (4)$$

式中, W 为腔壁导体的趋肤深度, 对于理想的实黄铜壁腔, 当工作频率为 35.68 GHz 时, 可算出 TE_{012} 模的 $Q_0 \approx 50\,000$.

又据单孔耦合圆柱腔的有载品质因数估算公式

$$Q_L = \lambda_g \pi h D^2 l^3 / (0.464 p^2 \lambda^2 d^6) \quad (5)$$

式中 λ_g 为波导波长, λ 为自由空间波长, πh 为波导截面积, d 为耦合孔的直径, 取 $d = 3 \text{ mm}$, 可算出 $Q_L \approx 33\,000$. 再由关系式 $Q_{L1} = Q_0 / (1 + U)$ 可求出耦合系数 $U = 0.5$.

我们的圆柱腔是双孔耦合的, 有一个输入孔和 1 个输出孔, 且 2 个孔的直径相同, 则有载 Q 值为 $Q_{L2} = Q_0 / (1 + 2U) \approx 25\,000$. 由于所研制的圆柱螺旋腔, 腔内壁是不连续的, 有很多缝, 将会泄漏部分能量导致 Q_L 明显下降一半多^[4], 就是说大约为 $Q_{L2} \approx 11\,000$, 再考虑腔两端气密胶圈处的损耗, 估计该圆柱螺旋腔的有载品质因数不会超过 $9\,000$.

3 圆柱螺旋腔的腔体结构

圆柱螺旋腔的腔体结构由下面几个部分构成.

(1) 腔的铜质外壳. 这是一个外径 50 mm 内径 28 mm , 长度 104 mm 的圆筒. 在它的两端开有 O 型槽用以放置气密封胶圈, 并对称开有 4 个螺丝口以便用螺丝钉拧紧两个端壁 (图 3).

(2) 螺旋形内壁. 先加工 1 条直径为 25.4 mm 长度约为 150 mm 的实芯铝棒, 用直径约 0.8 mm 的漆包线 (铜芯) 在这铝棒上密绕大约 12 cm 长, 均匀涂上约 2 mm 的环氧树脂固定漆包线, 等环氧树脂充分干固后, 加工成直径略微小于 28 mm 的圆柱体, 再均匀涂上薄层环氧树脂, 将其插入铜外壳内, 让二者粘牢, 然后车去铝芯和漆包线层的 0.3 mm , 磨光内壁, 并切去露出铜外壳两端的漆包线, 便得一个内径为 26 mm 的螺旋形腔体 (图 3).

(3) 端壁的结构. 腔的端壁有 2 块, 输入、输出耦合孔开在同一端壁上, 因为它上面焊有波导, 所以把它固定在铜外壳的一端 (图 4a). 另一块端壁上开一个气孔, 为避免对腔内电磁场分布的影响, 小圆孔应开在该端壁的中心 (图 4b). 该端壁可以依靠 4 个螺丝钉进行约 1 mm 的微调, 用以微调腔长, 作为腔的调谐备用.

(4) 腔体的气密结构. 腔体本身的气密是在铜外壳的两端开 O 型槽并使用 O 型胶圈来实现的; 至于耦合波导的气密是在波导接口处让法兰夹紧塑料王片来实现的 (图 4b).

4 圆柱螺旋腔参数的测量

测量用的 8 mm 源是锁相稳频的固态源, 锁相环路的频率基准由 HP8656A 频率综合仪提供, 其频稳度为 10^{-8} , 且频率可调.

(1) 腔内工作模式的测试. 把安装在螺旋测微计上的铜质活塞取代腔体 1 个端壁, 它可移动 15 mm , 稍大于 3 个波导半波长. 锁相环锁定时 8 mm 固态源的工作频率为 $f_0 =$

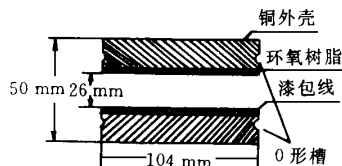


图 3 圆柱体轴向切面

Fig. 3 Cylindert cross section

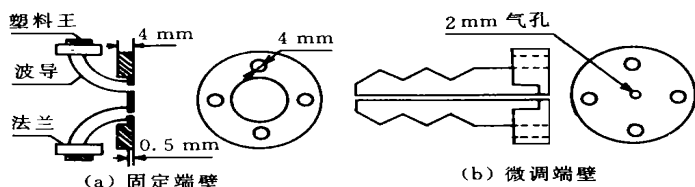


图 4 端壁结构图

Fig. 4 Structure of the end walls

35.68 GHz. 当活塞从外往里缓慢移动时,在频谱仪上观察到 3 个谐振峰,它们对应的腔长(括号里为理论值)分别为: 105.31 (105.23), 100.72 (100.65) 和 96.14 (96.08) mm. 显然,二者在误差范围内是相当一致的. 另外,在活塞移动过程中,还观察到在不同腔长上有几个很小的峰,这些小峰是腔内干扰模的反映,但它们的高度只有 3 个主峰的 6% 左右,这表明干扰模是抑制得比较好的. 当取下活塞换上腔体原来的端壁,把腔长调整在 $l = 105.31$ mm 附近并微调 8 mm 源锁定频率时,又在频谱仪上观察到 1 个最大谐振峰. 显然,该腔实现了单模工作,其工作模式是 TE_{012} 模.

(2) 腔有载 Q_L 值的测量. 在频谱仪上显示腔工作模式 TE_{012} 对应的谐振峰,改变频率综合仪的频率使 8 mm 源的频率跟着改变,测出 2 个半功率点对应的频率从而得到频差 Δf , 利用关系式 $Q_L = f_0 / \Delta f$ 可算出 Q_L . 重复多次测量,求 Q_L 的平均值,最后得腔的有载 $Q_L \approx 8900$, 这个实验测量结果与理论估算值完全符合.

参 考 文 献

- 1 Ye H, Luo Y J. A digital phase-locked 8 mm band solid state source. Chinese J Infr MMW, 1994, 13(4): 353~ 356
- 2 Ramsey J M, Whitter W B. Fourier transform microwave spectrometer using an electric-field Cross-Correlation technique. Rev Sci Instr, 1986, 57(7): 1329~ 1337
- 3 Lddings C K. Improvement of cylindrical microwave cavities using a TE_{01n} mode. Rev Sci Instr, 1986, 57(8): 1593~ 1596
- 4 Estin A J. High mode Tunable cavity for microwave-gas interactions. Rev Sci Instr, 1962, 33(3): 369~ 371

Study of Cylinder Helical Cavity for 8 mm Waves

Luo Yongjian* Huang Yuanfu Meng Jianjun

Abstract The cylindrical helical cavity sample pool is installed to measure gas rotational absorption spectra by means of an 8 mm microwave Fourier transform spectrometer. Techniques for suppression of unwanted oscillation modes through selecting the structure of cavity and method of coupling are discussed. The modes spurious and loaded cavity quality factor are measured

Keywords helical cavity, sample pool, modes spurious

* Department of Radio and Electronics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China