

# 结构偏心对开放式同轴谐振腔性能的影响\*

谢永超, 张世昌, 丁学用

(西南交通大学 光电子学研究所, 成都 610031)

**摘要:** 采用 CST 微波工作室软件, 数值模拟了内外导体轴线偏心对开放式同轴谐振腔的影响。结果表明: 不管是内外导体的轴线发生平行偏心, 还是倾斜偏心, 都引起开放式同轴谐振腔的谐振频率、品质因数和场振幅实质性下降; 其中, 倾斜偏心产生的影响比平行偏心更为严重。

**关键词:** 高功率微波; 开放式同轴谐振腔; 结构偏心; 场分布; 谐振频率; 品质因数

**中图分类号:** TN129 **文献标志码:** A

长脉冲及连续波 MW 级回旋管(含振荡器、放大器)的散热问题直接关系到器件的稳定性, 甚至可能导致器件不能正常工作。解决的办法是使用大横向尺寸高阶模式, 但由此却带来了模式竞争等新问题。目前, 国际上同时解决散热和模式竞争问题的普遍的做法是: 在开放式圆柱波导或圆柱谐振腔中插入一根内导体柱, 构成开放式同轴波导或开放式同轴谐振腔<sup>[1-13]</sup>。开放式同轴谐振腔的显著优点是: 可以稀化本征模式谱, 增大模式之间的分隔度, 提高腔体的选模、选频特性, 从而有效地解决模式竞争问题; 而且, 还有利于相对论电子束的降压回收<sup>[2-3]</sup>。

开放式同轴谐振腔在实际制作过程中, 由于制造工艺等因素往往使得内外导体的轴线不能完全重合, 出现所谓的结构偏心情况。结构偏心引起同轴谐振腔边界条件的改变, 从电磁理论看, 也必然导致腔内电磁性能的改变。文献[14]建立了关于同轴波导平行偏心情况下的本征值方程和相应的数值解法, 并被应用到集成电路设计<sup>[15]</sup>和同轴腔回旋管起振电流的线性分析<sup>[16-17]</sup>。本文利用 CST 微波工作室软件平台<sup>[18]</sup>, 数值研究了两大类结构偏心对谐振频率、品质因数和场振幅的影响。

## 1 理论模型

开放式谐振腔中, TE<sub>mnq</sub> 模电磁场的振幅  $f(z)$  在慢变化条件下近似满足微分方程<sup>[1]</sup>

$$[d^2/dz^2 + \kappa^2(z)]f(z) = 0 \tag{1}$$

其中, 轴向波数  $\kappa(z)$  定义为

$$\kappa^2(z) = \omega^2/c^2 - \lambda_{mn}^2 \tag{2}$$

式中:  $\omega$  是谐振频率;  $c$  为自由空间中的光速;  $m, n, q$  分别为模式的角向、径向、纵向模式指数;  $\lambda_{mn}$  是横向波数, 通过求解由边界条件给出的如下本征方程获得

$$J'_m(\lambda_{mn}b)K'_m(\lambda_{mn}a) - J'_m(\lambda_{mn}a)K'_m(\lambda_{mn}b) = 0 \tag{3}$$

此处  $J'_m$  和  $K'_m$  分别是  $m$  阶第一类和第二类贝塞尔函数对其宗量的一阶导数,  $a$  和  $b$  分别代表内导体的半径和腔体外壁的半径。由于腔体外壁在入口前段和出口后段分别具有坡度角  $\theta_i$  和  $\theta_o$ 。所带来的边界不均匀性(参见图 1), 所以,  $\lambda_{mn}$  与轴向位置有关, 是  $z$  的函数。

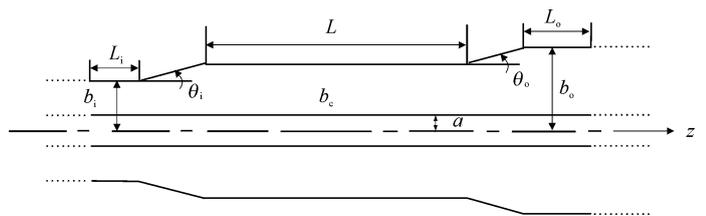


Fig. 1 Schematic diagram of an open coaxial resonator

图 1 开放式同轴谐振腔示意图

同轴谐振腔的结构偏心情况可分为两类: 一种是内外导体的轴线不重合但相互平行, 称为平行偏心, 如图 2(a)所示; 另一类是内外导体的轴线具有夹角  $\alpha$ , 称为倾斜偏心, 如图 2(b)所示。由于两种结构偏心情况下的边界条件不同, 导致了方程(3)的定解不同。

\* 收稿日期: 2008-07-22; 修订日期: 2008-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(60871023)

作者简介: 谢永超(1984—), 男, 硕士, 主要从事高功率微波的研究; xieyongchao2008@126.com。

在使用 CST 的微波工作室(MWS)求解方程(3)时,我们首先采用的是本征模求解器。本征模求解器是基于赫姆霍兹方程,即式(3),用来求解结构的本征模和相应的本征值<sup>[15]</sup>。谐振频率  $\omega_0$  和品质因数  $Q$  关系如下

$$Q = \omega_0 / 2\omega_i \quad (4)$$

式中: $\omega_0$  和  $\omega_i$  分别代表复数频率  $\omega$  的实部和虚部。由于结构偏心引起边界条件的改变,所以,本征方程(3)的解在结构偏心情况下必然发生变化,进而导致场振幅  $f(z)$  和谐振频率  $\omega_0$  变化。由式(4)可知:谐振频率的变化,也就会造成  $Q$  值的改变。

以 CST 软件本征模求解器求得的本征频率为中心频率,然后在所讨论的频率范围内,利用 MWS 的时域求解器进行求解。在使用时域求解器求解时,在谐振频率点设置场监视器来观测场振幅随  $z$  分布的变化。

## 2 平行偏心的影响

本文采用文献[19]所讨论的一组典型开放式同轴谐振腔参数进行数值模拟:腔体模式为  $TE_{111}$ ,内导体半径  $a_0 = 0.2$  cm,腔体外导体半径  $b_c = 0.9$  cm,腔体长度  $L = 11.7$  cm,腔体前端过渡段的半径  $b_i = 0.5$  cm,后端过渡段半径  $b_o = 1.1$  cm,前后过渡段的夹角  $\theta_i = \theta_o = 4^\circ$ ,长度  $L_i = L_o = 2$  cm。如图 2(a)所示,设内外导体轴线的平行偏离值为  $d$ 。

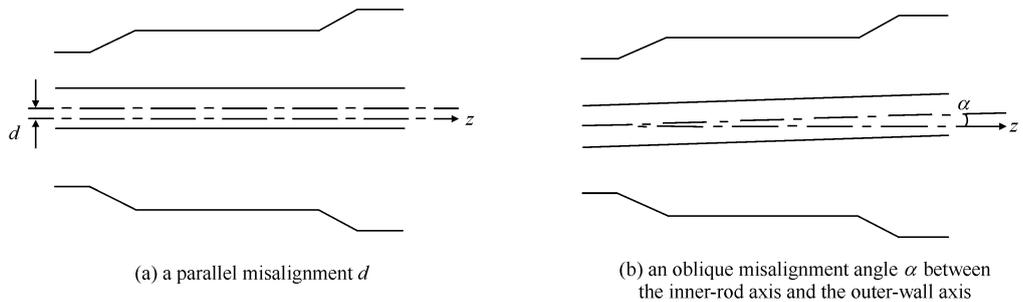


Fig. 2 Schematic diagram of an open coaxial resonator with a parallel misalignment (a) and an oblique misalignment angle between the inner-rod axis and the outer-wall axis (b)

图 2 开放式同轴谐振腔分别存在内外导体轴线平行偏心和倾斜偏心角的示意图

图 3 给出了当平行偏移度  $d/b_i$  在  $0 \sim 2.5\%$  时,模式的谐振频率偏移和  $Q$  值变化情况。结果显示:没有偏心时的谐振频率为 8.978 4 GHz, $Q$  值为 389.641;存在平行偏心后,谐振频率随着平行偏心度的增加而减小, $Q$  值也急剧减小,但当平行偏心度  $d/b_i$  在  $0.25\% \sim 2.5\%$  的范围内变化时, $Q$  值的减小趋于平缓,变化量  $\Delta Q$  在  $-85 \sim -80$  之间。

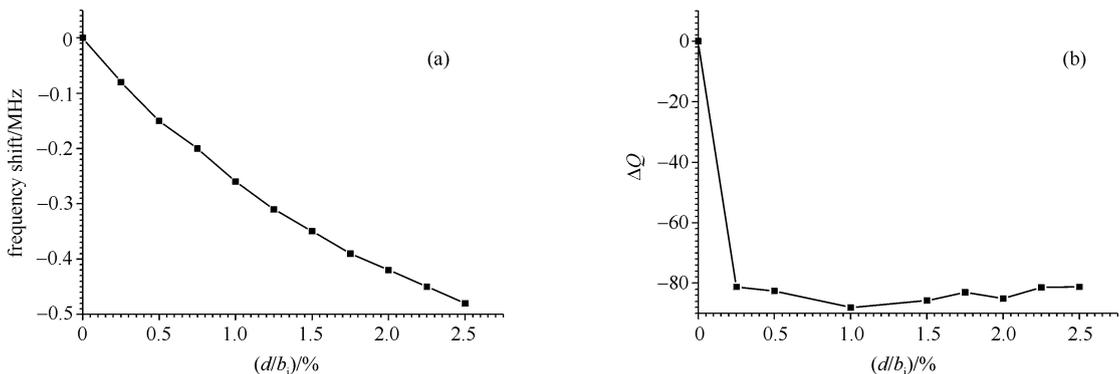


Fig. 3 Frequency shift and  $Q$  factor shift of the  $TE_{111}$  mode in a coaxial resonator caused by parallel misalignment

图 3 平行偏心引起的开放式同轴谐振腔的频率偏移和  $Q$  值偏移

## 3 倾斜偏心的影响

如图 2(b)所示,设内外导体轴线倾斜偏心的夹角为  $\alpha$ ,其余参数与前面相同。图 4(a)给出了谐振频率偏移和倾斜角度之间的关系。可以看到:随着倾斜偏心度的增加,谐振频率变得越来越小;当倾斜偏心夹角  $\alpha$  为  $0.15^\circ$  时,谐振频率的偏移高达 20 MHz。由倾斜偏心夹角  $\alpha$  引起的  $Q$  值变化,如图 4(b)所示,结果表明:倾斜偏心引起  $Q$  值显著减小。

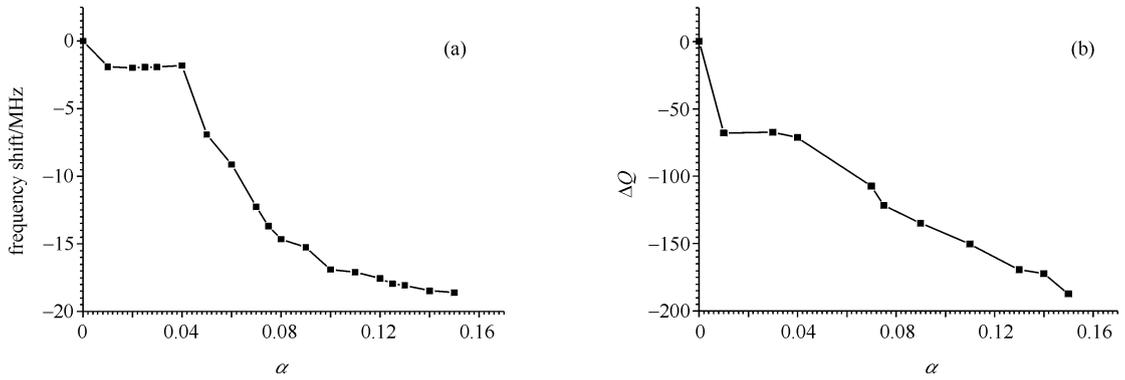


Fig. 4 Frequency shift and Q factor shift of the  $TE_{111}$  mode in a coaxial resonator caused by oblique misalignment

图 4 倾斜偏心引起的开放式同轴谐振腔  $TE_{111}$  的频率偏移和 Q 值偏移

## 4 讨论与结论

数值模拟结果表明:开放式同轴谐振腔内外导体轴线不管是发生平行偏心,还是倾斜偏心,两者都引起开放式同轴谐振腔的谐振频率、场振幅和 Q 值实质性减小;其中,倾斜偏心的影响比平行偏心的影响更为严重。

关于本结论的物理本质,众所周知,决定腔体的谐振频率的主要因素之一,是其本征值;而本征值又与其横向的边界条件直接相关。由于平行偏心和倾斜偏心均改变了结构的边界条件,因此,势必改变谐振腔的谐振频率。按照电磁理论中谐振腔 Q 值的基本定义, Q 值不但与谐振频率成正比,而且还与腔体内的电磁储能成正比,即与场振幅的平方成正比<sup>[20]</sup>。因此,结构偏心引起 Q 值减小,意味着腔体内场振幅会减小。如图 5 所示,我们的数值模拟结果证实了这一分析。图 5 是平行偏心和倾斜偏心对场振幅分布的影响,所使用的参数分别对应图 3(a)和图 4(a)。从图 5 中可以看出,结构偏心的确使场振幅减小。

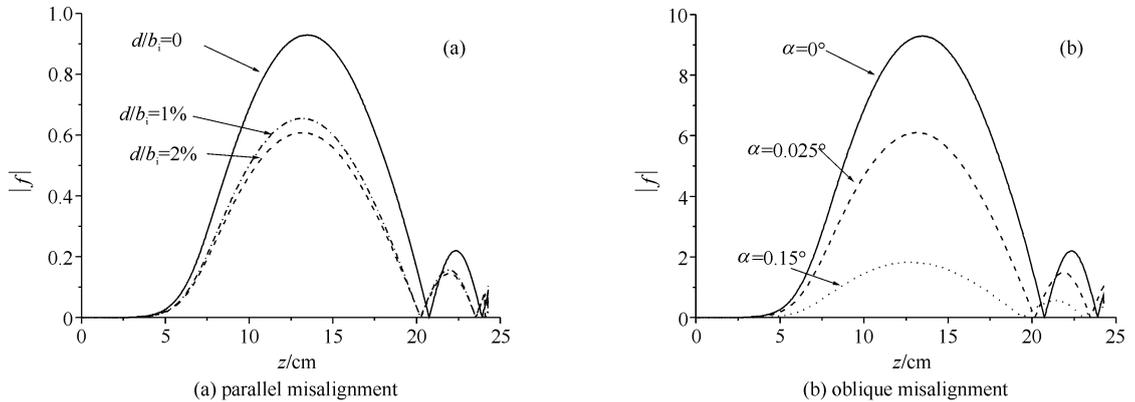


Fig. 5 Field profiles of the  $TE_{111}$  mode in a coaxial resonator with parallel or oblique misalignment

图 5 平行偏心和倾斜偏心同轴谐振腔中  $TE_{111}$  的场振幅

结构偏心引起场振幅分布发生变化的原因,一是由于开放式同轴腔的开放端面所形成的边界条件,不完全严格等同于封闭式谐振腔所具有的那种封闭边界条件,场的分布还与激励频率有关<sup>[19]</sup>;二是由于场振幅分布与谐振腔长度有关,而结构偏心使谐振腔的有效长度(即形成驻波的长度)变短,如图 5 所示。值得注意的是,既然结构偏心使场振幅减小,这就会削弱开放式同轴谐振腔回旋管振荡器中电子束与波的相互作用强度,导致所需要的起振电流增大和输出功率减小<sup>[16-17]</sup>,因此,在同轴谐振腔的工程实施中,应尽力避免发生结构偏心。

致 谢: 中国工程物理研究院应用电子学研究所雷文强博士就 CST 软件应用问题进行了有益讨论,在此表示衷心感谢!

## 参考文献:

- [1] Vlasov S, Zagryadskaya L, Orlova I. Open coaxial resonators for gyrotrons[J]. *Radio Eng Electron Phys*, 1976, **21**:96-201.
- [2] Nusinovich G S, Read M E, Dumbrajs O, et al. Theory of gyrotrons with coaxial resonators[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1994, **41**(3):433-438.
- [3] Piosczyk B, Dammertz G, Dumbrajs O, et al. A 2-MW, 170-GHz coaxial cavity gyrotron[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2004, **32**:413-417.
- [4] Idehara T, Ogawa I, Mitsudo S, et al. A high harmonic gyrotron with an axis-encircling electron beam and a permanent magnet[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2004, **32**(3):903-909.
- [5] Zhang S C, Ouyang Z B, Qiu C R, et al. Coaxial-waveguide gyrotron amplifier operating with high power and ultrahigh gain in millimeter

- and submillimeter waves[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2004, **32**(3): 981-986.
- [6] Zhang S C. Linear and nonlinear investigation of a coaxial-waveguide cyclotron autoresonance maser amplifier[J]. *Phys Plasmas*, 2004, **11**(8): 3969-3975.
- [7] Dumbrajs O, Nusinovich G S. Coaxial gyrotrons: past, present, and future(review)[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2004, **32**(3): 934-946.
- [8] Qiu C R, Ouyang Z B, Zhang S C, et al. Nonlinear theory of a cyclotron autoresonance maser(CARM) amplifier with outer-slotted-coaxial waveguide[J]. *Journal of Phys D*, 2005, **38**: 1571-1576.
- [9] Joye G D, Griffin R G, Hornstein M K, et al. Operational characteristics of a 14-W 140-GHz gyrotron for dynamic nuclear polarization[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2006, **34**(3): 518-523.
- [10] Louksha O I, Piosczyk B, Sominski G G, et al. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2006, **34**(3): 502-511.
- [11] Zhang S C, Thumm M. Large-orbit coaxial-structure cyclotron autoresonance maser[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **88**: 033514.
- [12] Ouyang Z B, Zhang S C. Nonlinear analysis of a large-orbit coaxial-waveguide cyclotron autoresonance maser amplifier[J]. *Appl Phys*, 2007, **102**: 074516.
- [13] Ouyang Z B, Zhang S C. Mode competition in a large-orbit coaxial-waveguide cyclotron autoresonance maser (CARM) amplifier[J]. *Phys D*, 2008, **41**: 015501.
- [14] Zhang S C, Thumm M. Eigenvalue equations and numerical analysis of a coaxial cavity with misaligned inner rod[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2000, **48**(1): 8-14.
- [15] Kouzaev G A, Deen M J, Nikolova N K, et al. Influence of eccentricity on the frequency limitations of circular-pad via-holes[J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Lett*, 2004, **14**(6): 265-267.
- [16] Zhang S C, Thumm M. Gyrokinetic description of the structural eccentricity influence on the starting current of a coaxial-cavity gyrotron [J]. *Physics of Plasmas*, 1999, **6**(5): 1622-1626.
- [17] Zhang S C, Thumm M. Structural eccentricity effect on output power of a coaxial-cavity gyrotron oscillator[J]. *Int J Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **20**(7): 1271-1276.
- [18] 张敏. CST 微波工作室<sup>®</sup>, 用户全书. (卷一/卷二)[K]成都: 电子科技大学出版社, 2004. (Zhang M. CST MWS<sup>®</sup> user fullbook(vol 1/vol 2). Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2004)
- [19] Hung C L, Yeh Y. Spectral domain analysis of coaxial cavities[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **24**(12): 2025-2041.
- [20] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2001. (Zhang K Q, Li D J. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001)

## Effects of structural misalignments on open coaxial resonator performance

XIE Yong-chao, ZHANG Shi-chang, DING Xue-yong

(Institute of Photoelectronics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The effects of the misalignment between the inner-rod axis and the outer-wall axis in an open coaxial resonator are simulated by using the software CST microwave studio. The calculated results show that either the parallel misalignment or the oblique misalignment between the inner-rod axis and the outer-wall axis causes substantial decrease of the resonant frequency, the  $Q$ -factor, and the field amplitude of the open coaxial resonator; and generally, an oblique misalignment has more adverse influence than a parallel misalignment.

**Key words:** high power microwave; open coaxial resonator; structural misalignment; field profile; resonant frequency;  $Q$  factors