

3mm 球形铁氧体 Y 结波导环行器

张登国 杨淑雯

(深圳大学新技术研究中心, 广东, 深圳, 518060)

唐晓宏

(电子科技大学应用物理研究所, 四川, 成都, 610054)

TN12

A 摘要 研制了 3mm 球形铁氧体波导环行器. 在得出环行器工作模式及工作频率的基础上, 给出了该类波导环行器外部性能的数值求解. 理论分析值与实验测试结果基本吻合.

关键词 铁氧体, 波导环行器, 毫米波.

微波器件

引言

波导环行器已广泛用于高分辨率雷达和射电天文等微波系统中. 该类波导环行器中使用的铁氧体样品一般是三角柱形、圆柱形和六角柱形. 随着波导环行器频率升高到毫米波段后, 铁氧体样品由于尺寸小并容易碎, 所以制作比较困难. 于是出现了在波导 Y 结环行器中使用铁氧体球样品. 使用频率越高, 所需铁氧体样品将越来越小, 而采用压缩空气吹制法吹制铁氧体球样品, 不受样品尺寸限制, 吹制小样品尤其容易. 已有文章报道研制成功 8mm^[1] 和 4mm^[2] 球形铁氧体波导环行器. 本文研制 3mm 球形铁氧体波导环行器, 并给出其工作模式及频率, 以及器件性能及其简单的理论计算.

1 环行器结构

研制的 3mm 球形铁氧体波导环行器结构如图 1 所示. 使用的波导环行器结腔为 3mm 频段常用的 Y 型结腔, 端口 1、2、3 所用波导为 3mm 频段上的标准波导, 其中仅传输主模式 TE_{16} 模. $\varphi=0$ 的端口 1 为输入端口, 而 $\varphi=2\pi/3$ 的端口 2 和 $\varphi=4\pi/3$ 的端口 3 是两个输出口. 腔中使用球形铁氧体取代了通常的圆柱体铁氧体. 为了获得宽带性能, 亦使用了圆形金属垫片作为阻抗变换器. 铁氧体样品选用 N_1-Z_1 铁氧体, 其相对介电常数 $\epsilon_r=13.5$, 相对线宽 $\Delta H < 200$ Oe, 饱和磁化强度 $4\pi M_s = 4950$ G; 工作频率由铁氧体球半径确定.

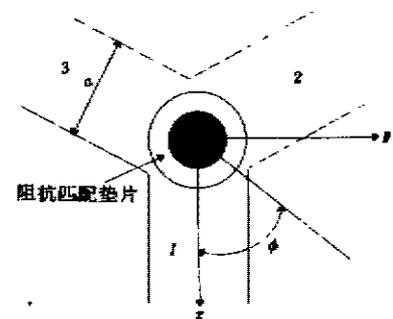


图 1 3mm Y 结球形铁氧体波导环行器结构图
Fig. 1 Top-view of 3mm Y-junction waveguide circulator with ferrite sphere

2 工作频率性能

球坐标下的张量磁导率为^[3]

$$[\mu(r, \theta, \varphi)] = \begin{bmatrix} \mu \sin^2 \theta + \mu_z \cos^2 \theta & (\mu - \mu_z) \sin \theta \cos \theta & -jk \sin \theta \\ (\mu - \mu_z) \sin \theta \cos \theta & \mu \cos^2 \theta + \mu_z \sin^2 \theta & -jk \cos \theta \\ jk \sin \theta & jk \cos \theta & \mu \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式(1)虽与球坐标 φ 无关,但仍然极为复杂. 严格求解使用圆柱体铁氧体的波导环行器^[4]的三维电磁场理论文章虽然很多,但使用球形铁氧体的波导环行器的三维电磁场问题,目前尚未得到解决.

文献[5,6]指出:波导环行器的中心工作频率由无外加磁偏场作用下的波导结腔与铁氧体样品构成的谐振器的谐振频率确定. 由于铁氧体的介电常数较高,可将球形铁氧体的外表面近似看作磁壁^[3]. 这样,工作模式就为 TE_{m0} 模式. 选择最低工作模式 TE_{111} 时,波导环行器的中心工作频率为

$$f_0 = 1.372c/(\pi R \epsilon_r^{1/2}), \quad (2)$$

式(2)中 c 为光速; R 、 ϵ_r 分别为铁氧体球的半径和相对介电常数.

当外加磁偏场后,波导环行器及铁氧体球内的电磁场将发生变化. 然而铁氧体球壳处近似开路边界条件仍然成立,我们认为场的变化不会很大,只是频率将发生分裂以便获得所需的环行器环行功能. 想以单一的 TE_{m0} 模式来满足张量磁导率下的麦克斯韦方程当然不可能. 正象铁氧体柱内的电磁场展开一样,铁氧体球内的电磁场无疑亦应该是一组模式的叠加. 在目前对球坐标系下的张量磁导率式(1)形成的张量麦克斯韦方程组成的波导环行器的三维电磁场尚未获得解的情况下,我们寻求一组最少的本征模式叠加,以满足所述的张量麦克斯韦方程组成的波导环行器三维电磁场问题的解答. 当然,这是一种近似,而且无疑应该从主模式着手. 考虑最低工作模式 TE_{111} , 没有加外偏磁场时的电场,可写为仅由两个本征模式表示,即正弦项和余弦项的叠加.

外加了偏磁场后,依据麦克斯韦方程中的法拉第定律有铁氧体样品的磁场

$$\vec{H} = j \frac{1}{\omega} [\mu_r]^{-1} \nabla \times \vec{E}, \quad (3)$$

式(3)中 $[\mu_r]^{-1}$ 由下式给出

$$[\mu_r]^{-1} \mu_0 (\mu^2 - k^2) = \begin{bmatrix} (\mu^2 - k^2) \cos^2 \theta + \mu \sin^2 \theta & (k^2 - \mu^2 + \mu) \sin \theta \cos \theta & -jk \sin \theta \\ (k^2 - \mu^2 + \mu) \sin \theta \cos \theta & (\mu^2 - k^2) \sin^2 \theta + \mu \cos^2 \theta & -jk \cos \theta \\ jk \sin \theta & jk \cos \theta & \mu \end{bmatrix}. \quad (4)$$

磁化铁氧体样品内的电场依据麦克斯韦方程中的安培定律,由式(3)求得的磁场重新计算为:

$$\vec{E} = -j \frac{1}{\omega \epsilon_r \epsilon_0} \nabla \times \vec{H}. \quad (5)$$

对环行器而言, $(r=R, \theta=\pi/2, \varphi=0)$ 点处的 $E_\theta H_\varphi^* + E_\varphi H_\theta^*$ 表示一个正比于端口一输入功率的量. 同样地, $(r=R, \theta=\pi/2, \varphi=2\pi/3)$ 点和 $(r=R, \theta=\pi/2, \varphi=4\pi/3)$ 点处的 $E_\theta H_\varphi^* + E_\varphi H_\theta^*$ 分别表示一个正比于环行器两个输出端口的输出功率量. 定性分析时比例常数可假定为一致, 则波导环行器插入损耗和隔离的计算公式为:

$$\begin{aligned} \tau(\text{dB}) &= 10 \log \left[\frac{E_\theta H_\varphi^* + E_\varphi H_\theta^* (\varphi = 2\pi/3)}{E_\theta H_\varphi^* + E_\varphi H_\theta^* (\varphi = 0)} \right], \\ \alpha(\text{dB}) &= 10 \log \left[\frac{E_\theta H_\varphi^* + E_\varphi H_\theta^* (\varphi = 4\pi/3)}{E_\theta H_\varphi^* + E_\varphi H_\theta^* (\varphi = 0)} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

3 实验结果

图 2 为由式(2)给出的球形铁氧体波导环行器中心频率随铁氧体球半径的变化曲线, 图 2 中亦给出了实验测量出的中心频率结果, 它与理论预算值基本吻合. 图 3 给出了 3mm 球形铁氧体波导环行器的插入损耗和隔离值的数值计算结果及其与实验测量结果的比较. 数值计算的插入损耗非常小. 这是因为在其计算中, 波导与结腔之间的过渡段, 由阻抗匹配垫片导来的反射损耗以及来自铁氧体球表面的反射等等均未考虑. 就环行器的隔离值而言, 由式(6)得到的数值计算结果与实验测量结果比较, 趋势是一致的; 数值计算结果只是实验测量结果的一半, 主要原因是我们在前面的所有数值计算中均忽略了基于 $\lambda/4$ 变换器原理的阻抗匹配垫片的存在, 其他原因是前面所作的近似.

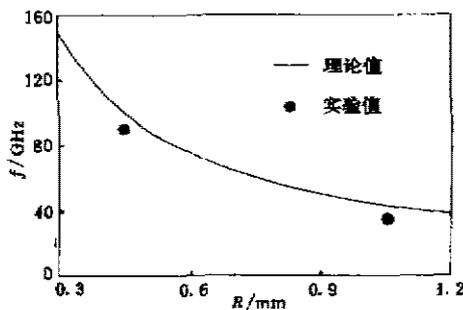


图 2 球形铁氧体波导环行器的中心频率随铁氧体球半径的变化曲线
Fig. 2 Variation of central frequency with radius of ferrite sphere for the waveguide circulator

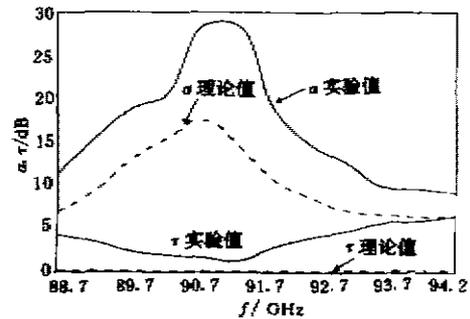


图 3 3mm Y 结球形铁氧体波导环行器性能的理论值与实验值的比较
Fig. 3 Comparison between theoretical and experimental values of insertion loss and isolation versus frequency for 3mm Y-junction waveguide circulator with ferrite sphere

由于制作铁氧体小球样品比研磨铁氧体小柱体要简单容易, 可以预见, 利用球形铁氧体制作环行器, 在亚毫米波段甚至光波段, 将会受到人们的青睐. 本文提出的分析方法无疑

亦适合于这些频段上的球形铁氧体环行器的分析和计算.

参考文献

- 1 Zhang D G, Yung E K N, Yang S W. *Electronics Letters*, 1995, **31**(25):2185~2187
- 2 彭世容, 黄福田. *磁性材料与器件*, 1984, **15**(1):6~10
- 3 张登国. *通信学报*, 1989, **10**(3):52~55
- 4 Zhag D G, Yung E K N, Ding H Y. *Microwave and Optical Tech. Letters* 1995 **10**(4), 230~235
- 5 Solbach K. *Microwave & RF*, 1983, (6), pp73~78
- 6 Owen B. *Bell System Tech. Journal*, 1972, **51**(3):595~627

3mm Y-JUNCTION WAVEGUIDE CIRCULATOR WITH A FERRITE SPHERE

Zhang Dengguo, Yang Shuwen

(Advanced Technology Research Center, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Tang Xiaohong

(Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract A 3mm waveguide Y-junction circulator with a ferrite sphere was developed. Based on the derived operating modes and operating frequencies of the waveguide circulator, a numerical solution of the operation characteristics of the novel waveguide circulator was given. Good agreement between the analytical results and experimental measurements was observed.

Key words ferrite, waveguide circulator, millimeter wave.