

微带型回音壁模介质谐振器带阻方向滤波器¹

吴坚强 刘革 刘盛纲

(电子科技大学高能电子学研究所 成都 610054)

摘要 本文报道了使用新型平面回音壁模介质谐振器的微带型毫米波带阻、方向滤波器。全文用行波环谐振器的方法进行分析,并给出了 Ka 波段带阻、方向滤波器的实验研究,其结果表明,该谐振器特别适用于毫米波微带集成电路。

关键词 毫米波, 介质谐振器, 回音壁模, 滤波器, 微带线

中图分类号 TN815, TN713

1 引言

工作于 TE, TM 或混合模的低模介质谐振器,当频率提高到毫米波段时,尺寸变为极小,同时 Q 值大大下降,使其应用受到很大限制,而工作在回音壁模的(即高阶角向模)介质谐振器,即使在毫米波段,其尺寸也可做得足够大, Q 值也相当高,并具有良好的寄生模抑制。因而特别适用于毫米波段,在国外已受到广泛重视^[1-6]。

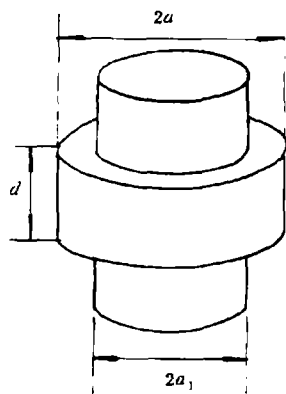


图 1 圆柱回音壁模介质谐振器

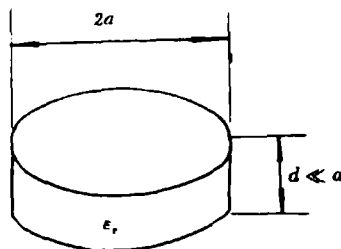


图 2 平面回音壁模介质谐振器

早期的回音壁模介质谐振器采用的是一个中间半径大,两端半径稍小的圆柱形介质体^[1-4](如图 1)。虽然人们在该谐振器中成功地激励出了回音壁模,但由于它们结构的限制,不利于用在集成电路中。近来,人们提出了一种新型的平面结构回音壁模介质谐振器(如图 2),它特别适用于平面混合,单片集成电路。文献 [5,6] 利用它实现了毫米波微带型

¹ 1994-11-21 收到, 1995-05-08 定稿
电子部预研基金资助课题

带阻滤波器,但没有论及方向滤波器。本文根据回音壁模的行波特性,用它首次成功地实现了微带型方向滤波器。

2 介质谐振器中的回音壁模

为了下面理论分析和实验研究的需要,我们对回音壁模作一个简要描述。回音壁模的传输特性不同于低模式的 TE, TM 或混合模。它是沿介质边界内侧传播,且限于圆横截面内,大部分电磁能量约束在边界和焦散面之间的小环状区域内,在焦散面和圆介质边界外场是衰减的,在轴向,回音壁模的传输很小。因此,回音壁模可看成沿边界传输的角向行波^[7,8]。这个特性对我们下面的理论分析和实验研究是非常重要的。

回音壁模按场结构特征可分为 $WGE_{n,m,l}$ 和 $WGH_{n,m,l}$ 模两类。WGE 模的电场主要为径向, WGH 模的磁场主要为径向。下标 n 为角向模数,回音壁模是高次角向模,所以 n 是大整数; m 为径向模数, $m=0$ 为基模,而 $m \neq 0$ 的模统称为寄生模。 l 为轴向模数, $l=0$ 的为基模,而 $l \neq 0$ 的模统称为寄生模。因此我们感兴趣的是高 n 值, $m=0$, $l=0$ 的那些模。

3 理论分析

由第 2 节对回音壁模的描述可知,介质谐振器中的回音壁模可看成是在介质边界和介质内焦散面之间传播的行波。故行波回音壁模可由外来行波源:如微带线、介质波导、曲折线或其它传输线来激励。它们之间的耦合可利用行波环谐振器的方法进行分析^[9]。本文采用微带线来激励,谐振器放置在微带线基片上,激励是通过磁环进行的(如图 3)。这种情况下激励的应是 WGE 模。

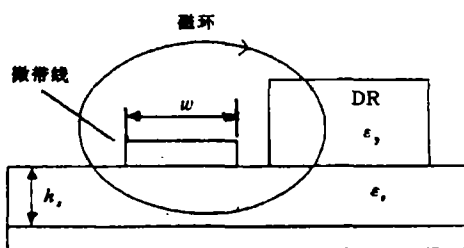


图 3 微带线激励的回音壁模

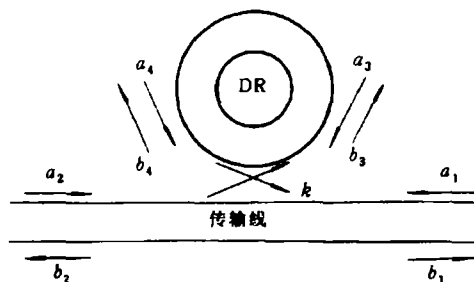


图 4 回音壁模介质谐振器与单根传输线的耦合

3.1 与单根传输线的耦合

图 4 为回音壁模介质谐振器与单根传输线的耦合。设其耦合系数为 k , 根据行波谱

振器理论可得散射矩阵为

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{1-k^2} & 0 & jk \\ \sqrt{1-k^2} & 0 & jk & 0 \\ 0 & jk & 0 & \sqrt{1-k^2} \\ jk & 0 & \sqrt{1-k^2} & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$[b] = [S][a], \quad [b] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}, \quad [a] = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 a_i , b_i 分别是耦合面的归一化入射和反射波振幅。设 α 、 φ 为等效行波环的总衰减和总相移, 则有

$$a_3 = b_4 \exp -(\alpha + j\varphi), \quad a_4 = b_3 \exp -(\alpha + j\varphi), \quad (3)$$

当端口 1 作为输入端和源相接, 端口 2 作为输出端和匹配负载相接时, 有

$$\begin{aligned} b_1 &= 0, & b_2 &= \frac{\sqrt{1-k^2} - e^{-(\alpha+j\varphi)}}{1 - \sqrt{1-k^2}e^{-(\alpha+j\varphi)}} \cdot a_1, \\ b_3 &= 0, & b_4 &= \frac{jk}{1 - \sqrt{1-k^2} \cdot e^{-(\alpha+j\varphi)}} \cdot a_1. \end{aligned} \quad (4)$$

从上式可见, 当回音壁模的周向相移 $\varphi = 2n\pi$ ($n = 1, 2, \dots$), 即 $\exp(j\varphi) = 1$ 时发生谐振, 这时 b_4 达极大值, b_2 为极小值, 相当于反应式谐振器。而当 $\varphi = (2n-1)\pi$ 时, 为反谐振, b_2 达最大, b_4 最小。调节 k , 使 $\sqrt{1-k^2} = \exp(-\alpha)$ 时

$$|b_2| = 0, \quad |b_4| = \frac{1}{\sqrt{1-e^{-2\alpha}}} \cdot a_1. \quad (5)$$

这表明我们可以通过调节耦合系数 k , 使所有入射功率被谐振器吸收, 在端 2 无功率传输。故这时用单个或多个相隔 $\lambda_g/4$ 的谐振器可构成带阻滤波器。

3.2 与双传输线的耦合

图 5 为回音壁模介质谐振器与双传输线的耦合。应用上节单传输线的耦合分析结果可得双传输线的耦合参量为

$$\begin{aligned} b_1 &= 0, & b_2 &= \frac{\sqrt{1-k_1^2} - \sqrt{1-k_2^2}e^{-(\alpha+j\varphi)}}{1 - \sqrt{1-k_1^2}\sqrt{1-k_2^2}e^{-(\alpha+j\varphi)}} a_1, \\ b_3 &= \frac{-k_1k_2e^{-\alpha-j\varphi/2}}{1 - \sqrt{1-k_1^2}\sqrt{1-k_2^2}e^{-(\alpha+j\varphi)}} a_1, & b_4 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

从上式可见, 当回音壁模的周向相移 $\varphi = 2n\pi$, 即 $\exp(j\varphi) = 1$ 时, 发生谐振。调节 k_1, k_2 使

$$b_1 = 0, \quad b_2 = 0, \quad b_3 = \sqrt{1 - (1 - e^{-\alpha})/k_1^2} \cdot a_1, \quad b_4 = 0. \quad (7)$$

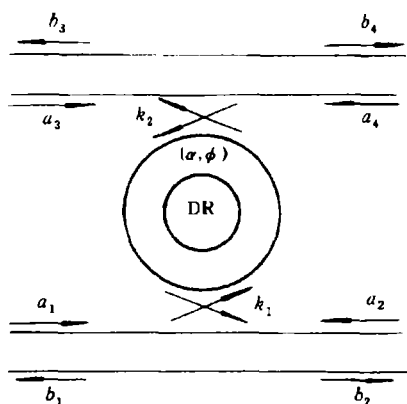


图 5 回音壁模介质谐振器同双传输线的耦合

这表明可以通过调节耦合系数 k_1 和 k_2 使所有入射功率被谐振器吸收，在端 2 无功率传输，而在端 3 获得耦合输出。故这时用单个或多个相互耦合的谐振器可构成方向滤波器，如果端 1 为输入端，则端 2 为带阻输出，端 3 为带通输出，端 4 为隔离端。我们知道应用介质谐振器制作方向滤波器时，要用圆环形介质谐振器，使其成为行波谐振器，才具方向性。而对回音壁模介质谐振器，则不需如此。

4 实例

根据上述，我们制作了一个 Ka 波段的微带型双阶平面回音壁模介质谐振器带阻滤波器和单阶方向滤波器。微带电路制作在 Duroid5880 上，厚 0.254mm，宽 0.76mm， $\epsilon_r=2.22$ ，特性阻抗为 50Ω 。微带线同测量线的矩形波导过渡采用脊波导过渡^[10]。(4) 式和 (6) 式分别给出带阻和定向滤波器的耦合特性，我们注意到，无论是带阻还是定向滤波器，它们的特性都由耦合系数 k 决定。而耦合系数 k 由谐振器同微带线的耦合距离确定。实验也表明：耦合系数（即谐振器位置）对滤波器的特性影响非常大，在实验中必须仔细进行调节，以达最佳滤波效果。

4.1 双阶平面回音壁模介质谐振器带阻滤波器

平面回音壁模介质谐振器由氧化铝陶瓷制成， $\epsilon_r=9.4$ ， $a=7.0\text{mm}$ ， $d=1.5\text{mm}$ 。两谐振器间隔 $9\lambda_g/4$ ，间隔增大是为了避免谐振器间的相互耦合。谐振模式为 $\text{WGE}_{9,0,0}$ 模，测量结果如图 6 所示。中心频率 $f_0=32.38\text{GHz}$ ，阻带内衰减大约为 23.3dB，波动约为 0.6dB，带宽 110MHz，图 6(b) 为宽带扫描特性，可以看出至少在 $f_0 \pm 2.5\text{GHz}$ 的范围内无干扰模产生的寄生阻带。一个寄生模阻带在 29.83GHz 附近，它对应 $\text{WGE}_{8,0,0}$ 模；另一个寄生模阻带在 34.86GHz 附近，它对应 $\text{WGE}_{10,0,0}$ 模。

4.2 平面回音壁模介质谐振器方向滤波器

平面回音壁模介质谐振器仍由氧化铝陶瓷制成， $\epsilon_r=9.4$ ， $a=6.0\text{mm}$ ， $d=1.5\text{mm}$ 。谐振模式为 $\text{WGE}_{3,0,0}$ 模。测量结果如图 7 所示。中心频率 $f_0=34.54\text{GHz}$ ，3dB 带宽 90MHz，带内插损约 1.1dB，带外衰减约 31dB。图 7(b) 为宽带扫描特性，可以看出至少在 $f_0 \pm 2.7\text{GHz}$ 的范围内无干扰模产生的寄生通带。一个寄生模通带在 31.72GHz 附近，它对应 $\text{WGE}_{7,0,0}$ 模；另一个寄生模通带在 37.72GHz 附近，它对应 $\text{WGE}_{9,0,0}$ 模。隔离端的输出极小，带通和隔离端的方向性约为 20dB。

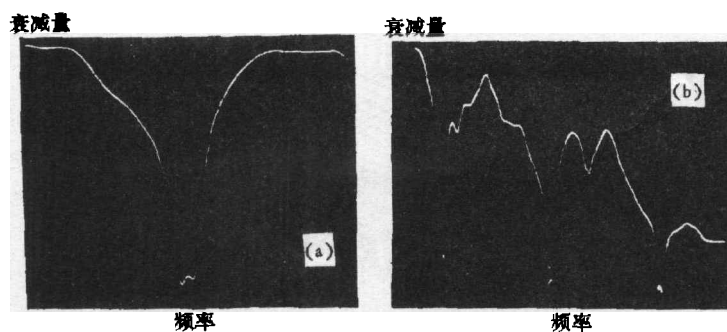


图 6 微带型双阶回音壁模介质谐振器带阻滤波器
(a) 带阻滤波器的频响特性, (b) 宽带扫描特性

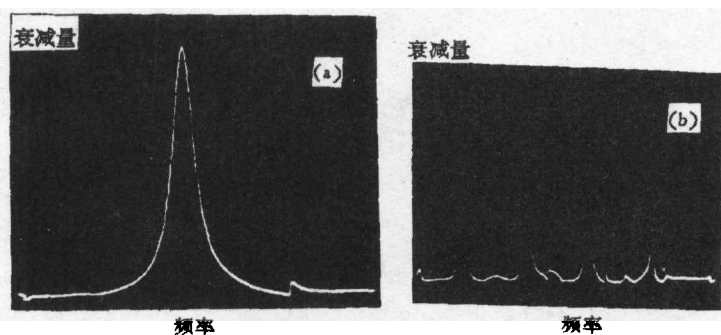


图 7 微带型回音壁模介质谐振器方向滤波器
(a) 带通端的频响特性, (b) 宽带扫描特性

图 6(b) 中的 $WGE_{10,0,0}$ 模的阻带衰减陡然减小和图 7(b) 中的 $WGE_{9,0,0}$ 模的通带衰减陡然增加是由于我们所用的 8mm 扫频源在高于 35.0GHz 以后输入陡然下降所致。

5 结束语

本文给出了新型平面回音壁模介质谐振器带阻、方向滤波器。实验结果表明：即使在毫米波段该谐振器仍具有高的 Q 值和模式纯度，同时尺寸也可做得足够大，因此它特别适用于毫米波集成电路。可以预计，该谐振器在毫米波段将会有重要的应用前景。

最后需要指出，本文的目的是为了讨论平面回音壁模介质谐振器及其应用在毫米波集成电路中的优点，因此制作谐振器所选择的参数不一定完全符合实际毫米波集成电路的需求。为了满足实际要求，我们可以根据本文提供的实验结果适当选择其参数。例如：我们制作的谐振器尺寸比实际毫米波集成电路的要求大，为了满足小型化的要求，可通过减小谐振器的半径来达到，这时，我们只需采用较低的回音壁模式或较大的介电常数材料即可。

参 考 文 献

- [1] Vedrenne C, *et al.* IEE Proc.-H, 1982, 129(4): 183-187.
- [2] Auraguchi M, *et al.* IEEE Trans on MTT, 1982, MTT-30(11): 1867-1873.
- [3] Hoefler W J R, *et al.* IEEE Trans, on MTT, 1982, MTT-30(12): 2190-2194.
- [4] Guillon P. Microwave & RF, 1987, 26(9): 75-96.
- [5] Jiao X H, *et al.* IEEE Trans on MTT, 1987, MTT-35(12): 1169-1175.
- [6] Jiao X H, *et al.* IEEE Trans on MTT, 1989, MTT-37(2): 432-437.
- [7] Rayleigh Lord. Phil. Mag., 1914, 27(11): 100-104.
- [8] 刘 革, 刘盛纲. 电子科技大学学报. 1994, 23(4): 387-391.
- [9] Guillon P, *et al.* Electronic Lett, 1985, 21(3): 88-89.
- [10] 薛 泉. 毫米波微带混合集成技术: [博士论文]. 电子科技大学应用物理所, 1993.

MILLIMETER-WAVE BANDSTOP AND DIRECTIONAL FILTERS
USING PLANAR WHISPERING-GALLERY MODES DIELECTRIC
RESONATORS AND MICROSTRIP LINE

Wu Jianqiang Liu Ge Liu Shenggang

(*University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054*)

Abstract This paper reports the utilization of a new type of planar whispering-gallery modes dielectric resonators and microstrip line for the design of Ka-band bandstop and directional filters. The analysis is based on the traveling wave ring resonator. Finally, experimental results of bandstop and directional filters in Ka-band are given, which show such resonators are very suitable for use in millimeter-wave microstrip integrated circuits.

Key words Millimeter-wave, Dielectric resonators, Whispering-gallery modes, Filter, Microstrip line

吴坚强: 男, 1961年生, 副教授, 从事微波技术、等离子体物理等方面的研究工作.

刘 革: 男, 1964年生, 博士生, 从事电磁场理论、微波技术等方面的研究工作.

刘盛纲: 男, 1933年生, 院士, 从事电磁场理论、等离子体、光学等方面的研究工作.