

# 一种适用于毫米波段的新型集成平面 回音壁模介质谐振器<sup>1</sup>

刘 革 吴坚强 刘盛纲

(电子科技大学高能电子学研究所 成都 610054)

**摘 要** 本文根据回音壁模的特性, 讨论了一种适用于毫米波段的新型集成平面回音壁模介质谐振器。采用 X. H. Jiao (1987) 的分析思想, 导出了特征方程, 并进行了详细的理论分析和谐振频率的数值计算, 计算结果与有关文献相当吻合。结果表明, 该谐振器特别适用于毫米波集成电路。

**关键词** 回音壁模, 介质谐振器, 毫米波, 谐振频率

**中图分类号** TN815

## 1 引 言

由于介质谐振器体积小、 $Q$  值高、成本低, 特别适用于微波集成电路。因此, 介质谐振器在国内外已得到广泛应用。应用的波段也逐步由微波波段向毫米波波段扩展, 但是当频率提高到毫米波段时, 工作于 TE, TM 或混合模的低模式介质谐振器, 由于它们的辐射和材料损耗均随频率的增高而增大,  $Q$  值大大下降, 并且它们的尺寸也变得太小, 这样使介质谐振器在毫米波段的应用受到很大限制, 而工作在回音壁模式 (Whispering Gallery Mode) 即高阶角向模的介质谐振器却特别适用于毫米波段。这时除了在毫米波段介质谐振器的尺寸仍可足够大外, 它还具有许多独特优点, 如辐射损耗比低模式低、能抑制寄生模。因而回音壁模介质谐振器在国外已受到广泛重视<sup>[1-7]</sup>。迄今为止, 人们已对回音壁模介质谐振器进行了大量的研究, 并取得了一定的成果。为了更加适应毫米波集成电路发展的需要, 本文详细讨论了一种新型的集成平面回音壁模介质谐振器。

## 2 回音壁模

1910 年 Lord Rayleigh<sup>[8]</sup> 在声学场研究中发现高频声波具有紧贴着刚性凹面产生“回音”效应, 因此, 把这种传输模式称为回音壁模 (Whispering Gallery Mode)。此后, J. R. Wait<sup>[9]</sup> 对圆柱介质中类似的传输模进行了研究。80 年代初 J. Arnaud<sup>[1]</sup> 首次提出了回音壁模介质谐振器。

圆柱介质中的回音壁模是沿介质柱边界内侧传播, 且限于在圆柱横截面内, 大部分电磁能量约束在柱面和焦散面之间的小环状区域内, 在焦散面内和圆柱边界外, 场是衰减的。回音壁模的这些特性可以从射线光学来说明, 如图 1, 射线在介质-空气界面上被反

1

1994-09-26 收到, 1995-02-27 定稿  
电子部预研基金资助项目

射，并切于内焦散面，故射线只在介质柱内边界附近的小环状区域内传播<sup>[2]</sup>。另外还可以从数学的观点加以说明，因介质柱中的导波沿径向的变化可用  $J_n(kr)$  描述，对于回音壁模它对应  $kr$  的阶为  $n$ ，而  $n$  是一个大数，这时  $J_n(kr)$  可由 Airy 函数近似，它表示模场在焦散面和介质柱面间的区域内振荡，而在其外部则作指数衰减，图 2 表示了这种场分布。根据射线光学法，或求解贝塞尔微分方程<sup>[3]</sup>，可求出焦散面的半径为

$$a_i = n/k. \quad (1)$$

式中  $n$  为角向模数， $k$  为径向传播常数。



图 1 回音壁模射线模型

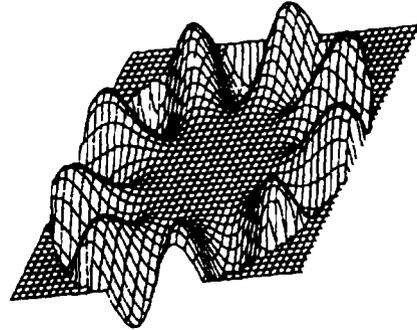


图 2 回音壁模场分布

回音壁模按场结构特征可分为  $WGE_{nml}$  模和  $WGH_{nml}$  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  $n$  是大数。 $m$  为径向模数， $m=0$  的模为基模，而  $m \neq 0$  的模统称为寄生模。 $l$  为轴向模数， $l=0$  的模为基模，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 集成平面回音壁模介质谐振器

在早期的回音壁模介质谐振器的研究中，一般采用的是一个中间半径大，两端半径稍小的圆柱形介质体<sup>[1-4]</sup>，如图 3 所示。对回音壁模电磁场的径向限制由半径为  $a$  或  $a_1$  的圆柱边界形成，轴向则由该结构的特性所决定。回音壁模在两端半径减小的区域中轴向按指数衰减。而低次模、寄生模通过不连续面  $z = \pm d$  的两端面泄漏而被两端的吸收材料吸收，对回音壁模无影响。这样，介质谐振器的回音壁模被限制在  $|z| < d$  的区域形成振荡。

由于集成毫米波电路的需要，人们提出了平面回音壁模介质谐振器<sup>[5-7]</sup>，如图 4 所示的薄介质圆盘，当  $d < \lambda_0/(2\sqrt{\epsilon_r})$  时，沿轴向不能支持驻波，故可近似认为回音壁模无轴向传输，模式能量集中在圆横截面边界与焦散面之间。近来在平面回音壁模介质谐振器实验中已观察到了回音壁模场<sup>[5]</sup>。理论和实验都证明，真正理想而实用的是平面回音壁模介质谐振器。

在平面回音壁模介质谐振器的基础上，我们不难设想一种新型结构的平面回音壁模介质谐振器。它是用较薄的介质圆盘 ( $d < \lambda_0/(2\sqrt{\epsilon_r})$ )，一面全涂金属，另一面在  $a-a_i$  间涂金属环， $a_i$  为焦散面半径，这样就构成了集成平面回音壁模介质谐振器，如图 5 所示。

### 4 理论分析

我们可以用磁壁法来求解如图 5 的集成平面回音壁模介质谐振器。设  $r = a$  和  $a_i$  处为磁壁，上、下导体片为电壁，电磁场在这些电壁和磁壁所限定的空间里振荡，构成一个谐振器，如图 6 所示。当  $d < \lambda_0/(2\sqrt{\epsilon_r})$  时，则其中振荡模式只有横磁模 WGH。由于  $d < \lambda_0/(2\sqrt{\epsilon_r})$ ，场沿  $Z$  方向无变化， $\partial/\partial z = 0$ ，于是 WGH<sub>nm</sub> 模的波函数为

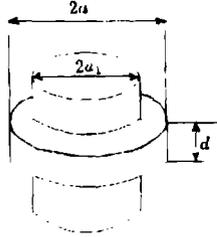


图 3 圆柱形回音壁模介质谐振器

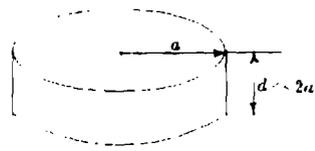


图 4 平面回音壁模介质谐振器

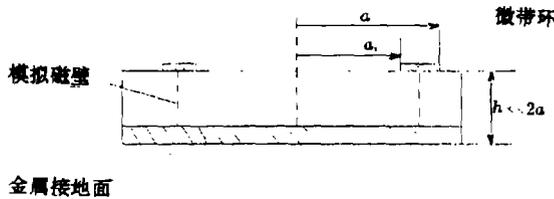


图 5 集成平面回音壁模介质谐振器

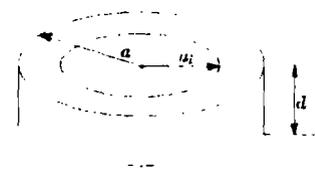


图 6 集成平面回音壁模介质谐振器的磁壁法模型

$$\varphi_{n,m} = A_{nm}[J_n(kr) + C_n Y_n(kr)] \begin{pmatrix} \cos n\theta \\ \sin n\theta \end{pmatrix}, \tag{2}$$

式中  $J_n(kr)$ ， $Y_n(kr)$  分别是  $n$  阶第一类和第二类贝塞尔函数，

$$k = k_0 \sqrt{\epsilon_r}. \tag{3}$$

波函数在  $r = a$  和  $r = a_i$  的磁壁上应满足边界条件

$$\partial\varphi/\partial n = 0. \tag{4}$$

由 (4) 式得

$$J'_n(ka) + C_n Y'_n(ka) = 0, \tag{5a}$$

$$J'_n(ka_i) + C_n Y'_n(ka_i) = 0. \tag{5b}$$

解 (5) 式得特征方程

$$J'_n(ka)/Y'_n(ka) - J'_n(ka_i)/Y'_n(ka_i) = 0, \tag{6}$$

式中  $a$  为集成平面回音壁模介质谐振器的半径， $a_i$  为焦散面半径。由此得出谐振频率为

$$f_0 = C \cdot k / (2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_r}) \tag{7}$$

上述的近似方法是零次近似，它忽略了边缘场和介质部分填充的影响，因此所得到的结果误差较大，为了提高精度，须把磁壁法模型加以改进。用有效半径  $r_e$  代替真实半径  $r$ ，以补偿近似的影响<sup>[10]</sup>。此有效半径的近似公式是

$$r_e = r \sqrt{1 + \frac{2d}{\pi r} \left[ \ln \left( \frac{\pi r}{2d} \right) + 1.7726 \right]}, \quad (8)$$

式中  $r$  为真实半径， $d$  为介质厚度。

另外，为了补偿介质部分填充影响，用动态有效介电常数  $\epsilon_{\text{dyn}}$  代替真实的介电常数  $\epsilon_r$ ，而动态有效介电常数是

$$\epsilon_{\text{dyn}} = \frac{C_{\text{dyn}}(\epsilon_r)}{[C_{\text{dyn}}(1)]}, \quad (9)$$

而

$$C_{\text{dyn}} = C_{0,\text{dyn}} + C_{e,\text{dyn}}, \quad C_{0,\text{dyn}} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{\sigma d} \left[ 1 - \frac{J_{n-1}(kr) J_{n+1}(kr)}{J_n^2(kr)} \right],$$

$$C_{e,\text{dyn}} = \frac{C_{e,\text{stat}}}{\sigma}, \quad C_{e,\text{stat}} = \frac{\pi r \sqrt{\epsilon_r}}{C Z_0(2r/d)} - \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi r^2}{d}, \quad \sigma = \begin{cases} 1, & n = 0, \\ 2, & n \neq 0. \end{cases} \quad (10)$$

这里  $Z_0(2r/d)$  是形状比为  $2r/d$  的微带线的特性阻抗。

## 5 数值计算和讨论

(6)–(10) 式建立了集成平面回音壁模介质谐振器的谐振频率与其参数间的关系，是超越方程，我们利用计算机进行数值求解。表 1 列出本文计算与参考文献 [7] 的结果比较。从计算结果看两者相当吻合，故本文的分析、计算方法是合理的。表 2 为谐振频率随半径的变化。由表可见半径增大，谐振频率下降，同时，邻谱线的间距减小。表 3 为谐振频率随谐振器自身介电常数的变化。由表可知，介电常数愈小，谐振频率愈高，同时使相邻谱线变为较为稀疏，这是由于谐振频率与介电常数的关系近似为  $f \propto 1/\sqrt{\epsilon_r}$ 。实用中应尽可能选取小的半径尺寸和介电常数，这样可使谱线较疏，谐振器尺寸较小，以便于满足集成电路的需要，但同时应注意到介电常数变小， $Q$  值也随之降低，根据文献 [1–7] 介电常数选取 9–40 之间比较适合于毫米波回音壁模介质谐振器。

表 1 本文方法与参考文献结果比较  
( $\epsilon_r = 9.6$   $2a = 18.90\text{mm}$   $2a_1 = 17.90\text{mm}$ )

| 模式                    | f(GHz) |        |
|-----------------------|--------|--------|
|                       | 文献 [7] | 本文     |
| WGH <sub>19,0,0</sub> | 31.736 | 31.915 |
| WGH <sub>20,0,0</sub> | 34.455 | 33.733 |
| WGH <sub>21,0,0</sub> | 35.157 | 35.370 |

表 2 谐振频率随半径的变化 ( $\epsilon_r = 9.6$ )

| 2a (mm)               | 18.9   | 14.0   | 7.0     |
|-----------------------|--------|--------|---------|
| 2a <sub>1</sub> (mm)  | 17.9   | 13.2   | 6.6     |
| 模式                    | f(GHz) | f(GHz) | f(GHz)  |
| WGH <sub>19,0,0</sub> | 31.951 | 40.132 | 102.093 |
| WGH <sub>20,0,0</sub> | 33.733 | 42.550 | 106.930 |
| WGH <sub>21,0,0</sub> | 33.370 | 44.043 | 111.236 |

表 3 谐振频率随介电常数的变化 ( $2a=7.0\text{mm}$ ,  $2a_i=6.6\text{mm}$ )

| $\epsilon_r$          | 9.6             | 15.0            | 20.0            | 25.0            | 36.0            |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 模式                    | $f(\text{GHz})$ | $f(\text{GHz})$ | $f(\text{GHz})$ | $f(\text{GHz})$ | $f(\text{GHz})$ |
| WGH <sub>19,0,0</sub> | 102.093         | 82.474          | 71.532          | 64.064          | 53.520          |
| WGH <sub>20,0,0</sub> | 106.930         | 86.354          | 74.883          | 67.962          | 56.018          |
| WGH <sub>21,0,0</sub> | 112.136         | 90.508          | 78.490          | 70.288          | 58.706          |

## 6 结 束 语

本文应用磁壁法分析、计算了一种适用于毫米波段的新型回音壁模介质谐振器，计算结果与文献对照符合很好。本文的研究结果将对毫米波集成电路的发展起到一定的作用。下一步的工作，我们将研究集成平面回音壁模介质谐振器与微带线，介质波导的耦合，以及由其构成的滤波器和稳频振荡器等毫米波电路。

## 参 考 文 献

- [1] Arnaud. J, Vedrenne C. IEE Proc.-H, 1982, 129(4): 183-187.
- [2] Cros D, Guillon P. IEEE Trans on MTT, 1990, MTT-38(11): 1667-1674.
- [3] Guillon P. Microwave & RF, 1987, 9: 75-96.
- [4] Jiao X H, Guillon P, Bermudes L. Infrared and Millimeter waves, 1989, 10(8): 519-528.
- [5] Jiao X H, Guillon P, Cros D. IEEE Trans on MTT, 1989, MTT-37(2): 432-437.
- [6] Cros D. Electron. Lett., 1988, 24(13): 797-798.
- [7] Jiao X H. IEEE Trans. on MTT, 1987, MTT-35(12): 1169-1175.
- [8] Rayleigh L. Phil. Mag., 1910, 20(12): 1001-1004.
- [9] Wait J R. Radio Sci, 1967, 2(9): 1005-1017.
- [10] 吴万春. 微波毫米波与光集成电路的理论基础, 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985: 68-70.

A NEW TYPE OF INTEGRATED PLANAR WHISPERING  
GALLERY MODE DIELECTRIC RESONATOR SUITABLE FOR  
MILLIMETER WAVE INTEGRATED CIRCUITS

Liu Ge      Wu Jianqiang      Liu Shenggang

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

**Abstract** According to the behaviours of the whispering gallery modes, a new type of integrated planar whispering gallery mode dielectric resonator is discussed. The characteristic equation is derived by applying the method proposed by X. H. Jiao(1987). The calculated values show in good agreement with that in the previous papers. The results obtained show that this type of resonator is very suitable for millimeter wave integrated circuits.

**Key words** Whispering gallery modes, Dielectric resonators, Millimeter wave, Resonant frequency

刘 革: 男, 1964 年生, 博士, 现从事电磁与微波技术的研究.

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.

刘盛纲: 男, 1933 年生, 中科院院士. 现从事电磁场与微波技术的研究.