

滤波器技术(4)

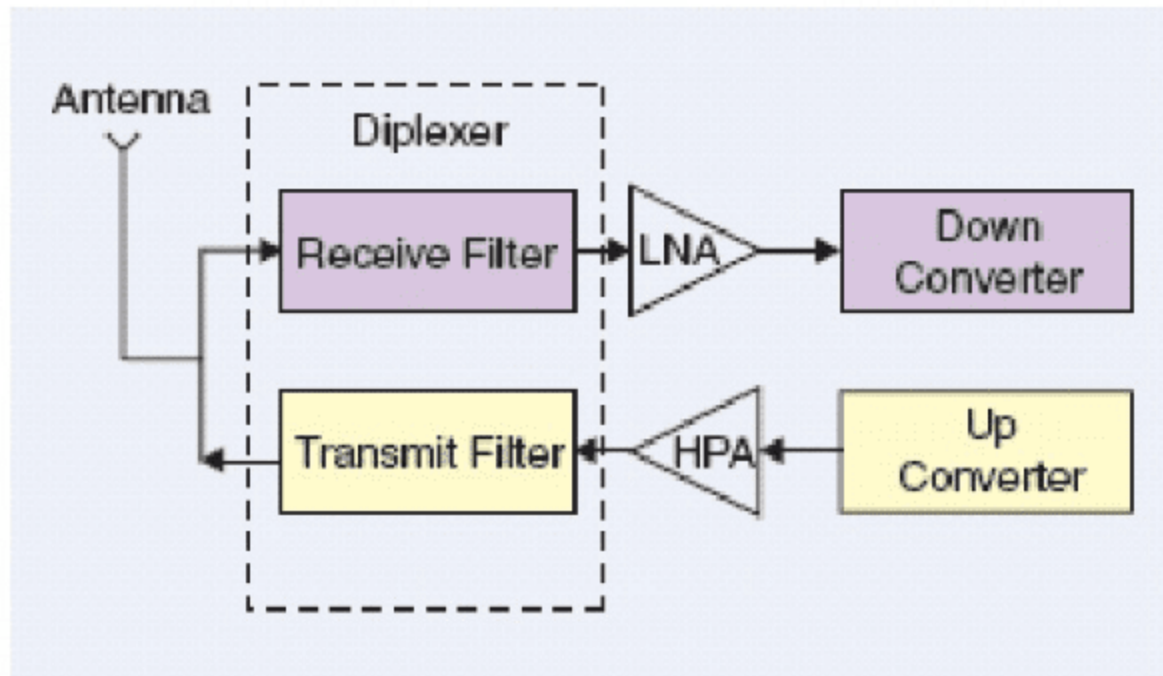
Filter Technology(4)

TE01 δ 模介质滤波器

TE01 δ Mode DR Filter

1.发展背景 Background

由于无线电通信技术的发展，低成本、更有效、高品质的无线通信收发系统需要高性能的滤波器。介质谐振腔体滤波器由于其体积小，损耗小，选择性高而逐渐广泛应用到各类通信基站中，在即将到来的3G通信领域拥有广阔的市场前景。它的研究与开发，是今后滤波器发展的重点之一。



2.介质谐振腔 DR resonant cavity

2.1 介质谐振器的物理组成

介质谐振器由高介电常数、低损耗和低频率温度系数的微波介质粉末材料（如：钛酸钡，锆酸盐，钛酸锆锡等）经混合高温烧结而成，这些介质材料通常都具有优良的电磁特性。

为了减小介质谐振器放入腔体后的损耗，提高介质谐振器的Q值，通常选择支撑柱来支撑介质谐振器。支撑柱通常选用低损耗，介电常数相对于谐振器来说很低的介质材料，通常我们使用的是Al₂O₃。

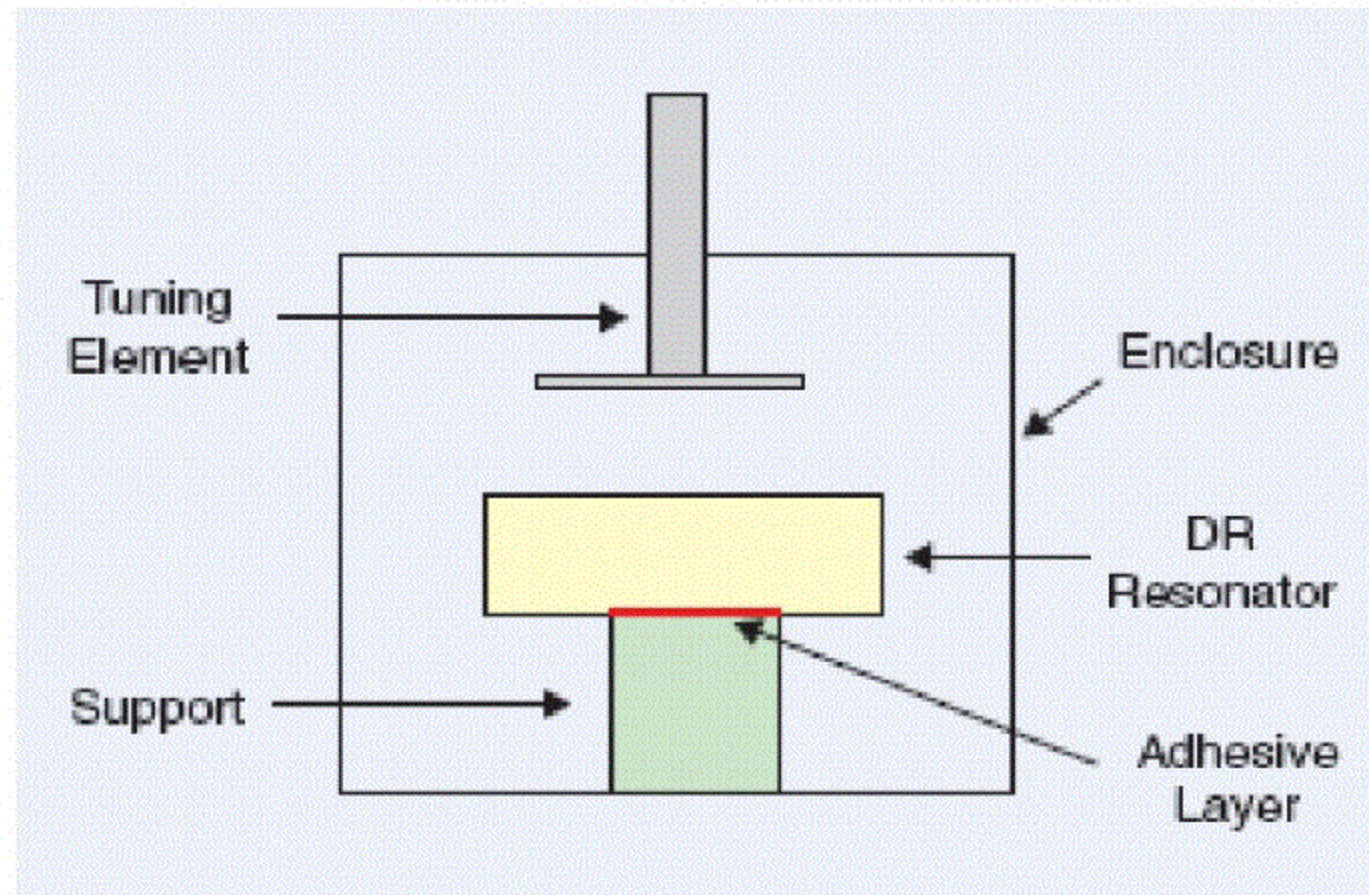
2.2 介质谐振腔的结构

Tuning Element: metal or dielectric

Support: Alumina

Enclosure: Aluminum cavity

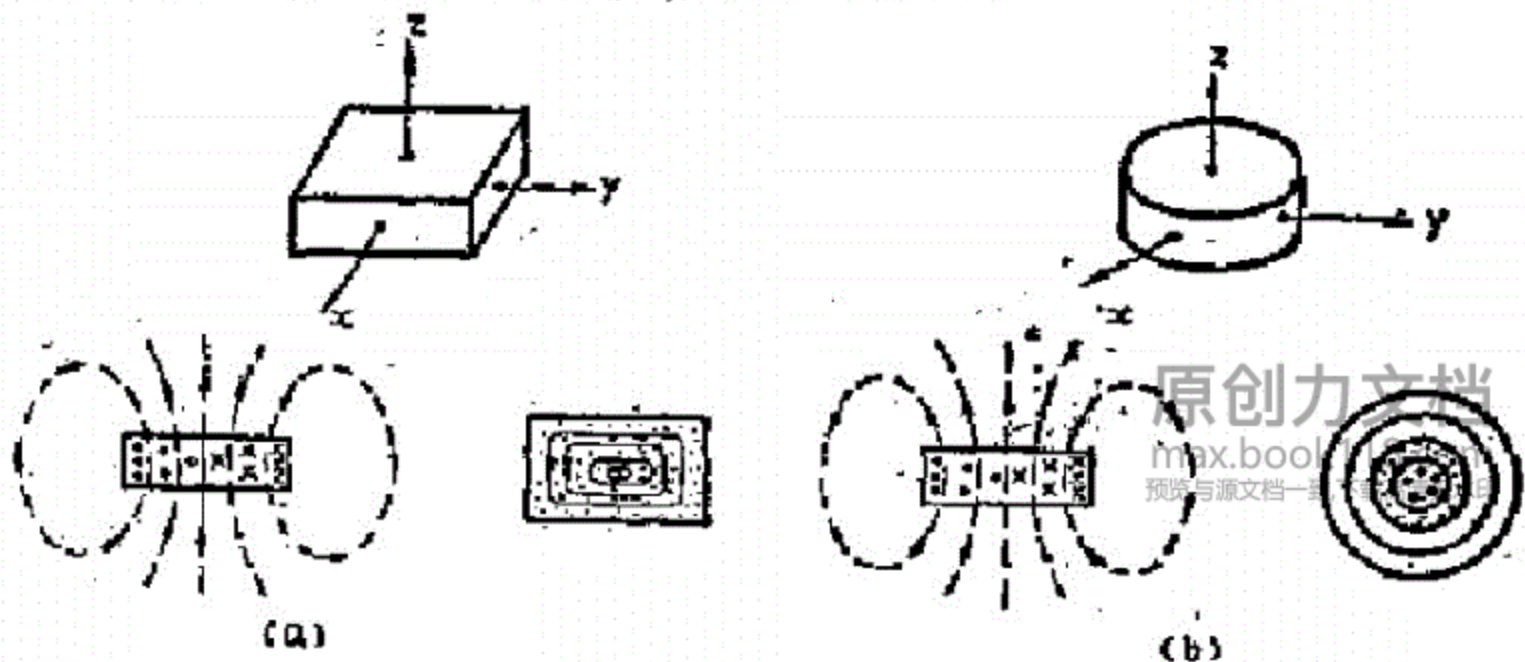
Adhesive: Proprietary



2.3 介质谐振器的形状及电磁场型

Shape & Electromagnetic Field Distribution

最常用的介质谐振器形状有矩形,圆柱形和圆环形.其中矩形介质谐振器的工作主模为 $TE_{11\delta}$;圆柱形介质谐振器的工作主模为 $TE_{01\delta}$ 模,如下图所示:



内部的电磁场结构 Inner electromagnetic field

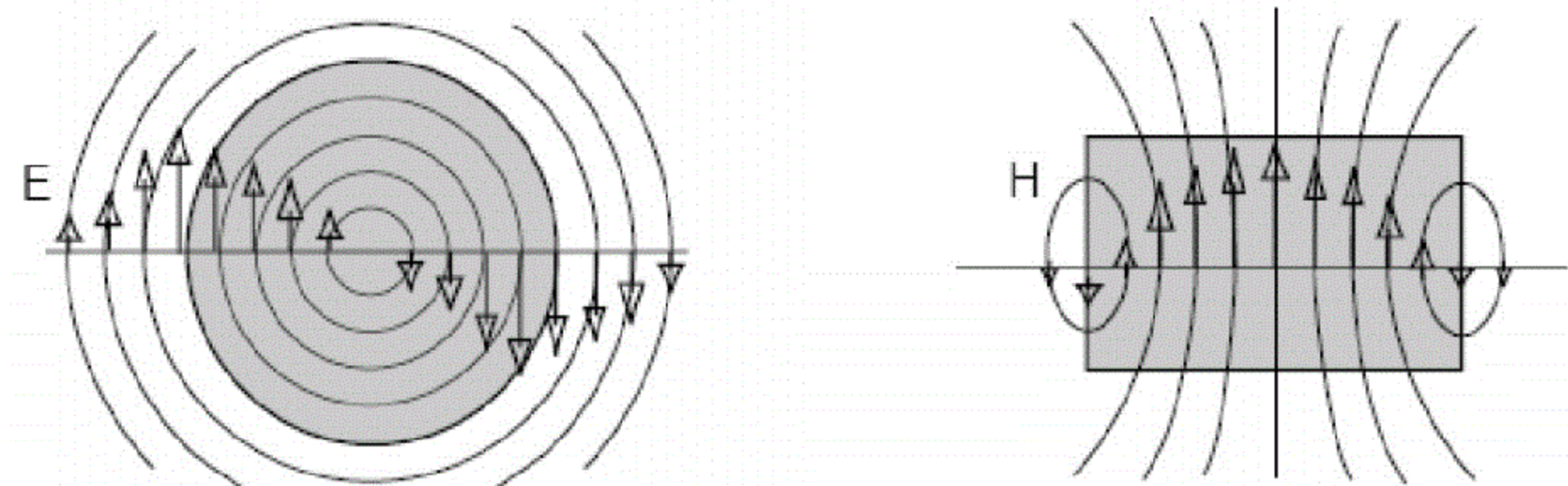


fig. 1 - TE_{01δ}

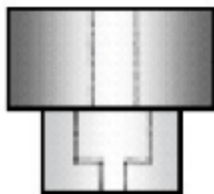
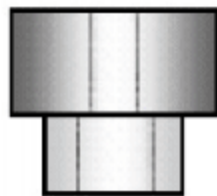
TE_{01δ}模介质谐振器实物照片

典型尺寸:

腔体直径/介质外径>1.5倍(太小影响Q值)

外径/高度=2.5(提高Q值,避开TM模)

内/外径比最大可到0.35(在频域上使基模与高次模分开,方便安装)



2.4 介质谐振器的工作原理 Principium

电壁 Electric Wall

电场的切向方向为零,磁场的法向方向为零.它能使电磁波产生完全反射,没有透射波穿过电壁.

经典的电壁为理想导体壁(电阻率为零).

通过导体壁围成的一个金属空腔,一旦有适当频率的电磁波入射,波将在壁上全反射,并在腔内形成电磁驻波,发生电磁谐振.

非理想导体壁形成的金属空腔 → 金属空腔滤波器

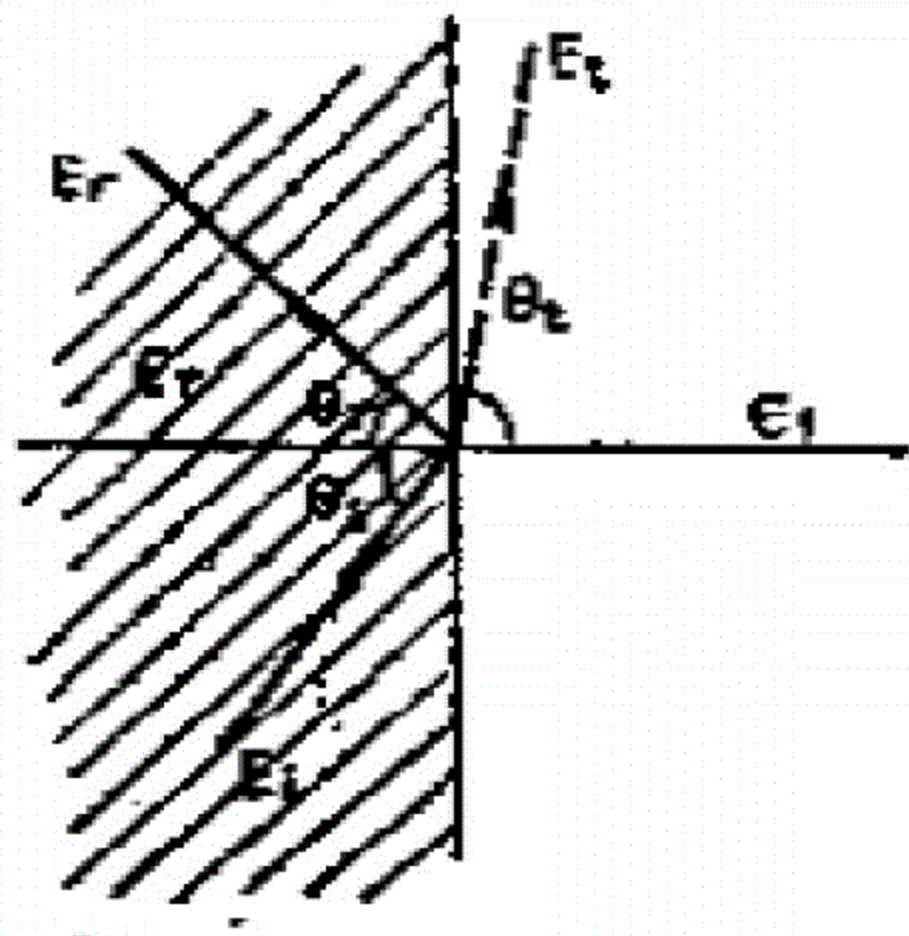
磁壁 Magnetic Wall

电场的法向方向为零,磁场的切向方向为零.它也能使电磁波产生完全反射,没有透射波穿过磁壁.

经典的近似磁壁为高介电常数的介质面.

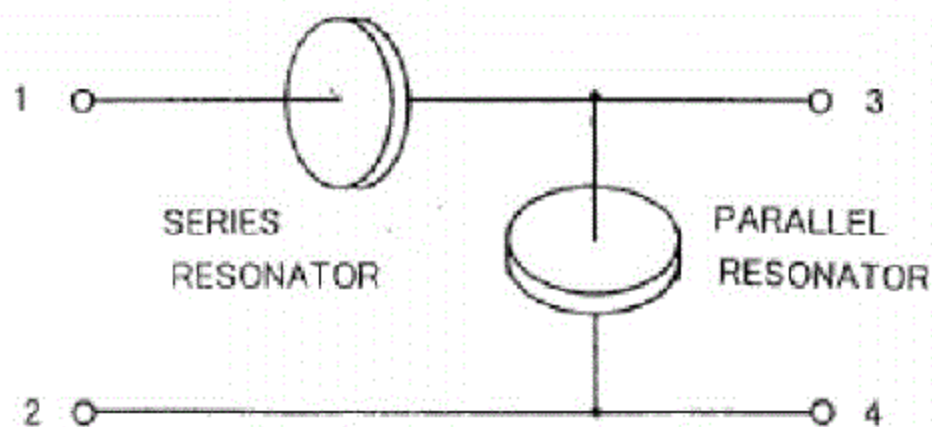
既然电壁所构成的空腔可以作为微波谐振器,显然,由高K材料做成的介质谐振器也可以作微波谐振器,所不同是对于介质谐振器而言,电磁能量大部分被禁固在介质谐振器内部,导致提高Q值的同时却给介质滤波器的调试带来困难

介质表面反射电磁波示意图

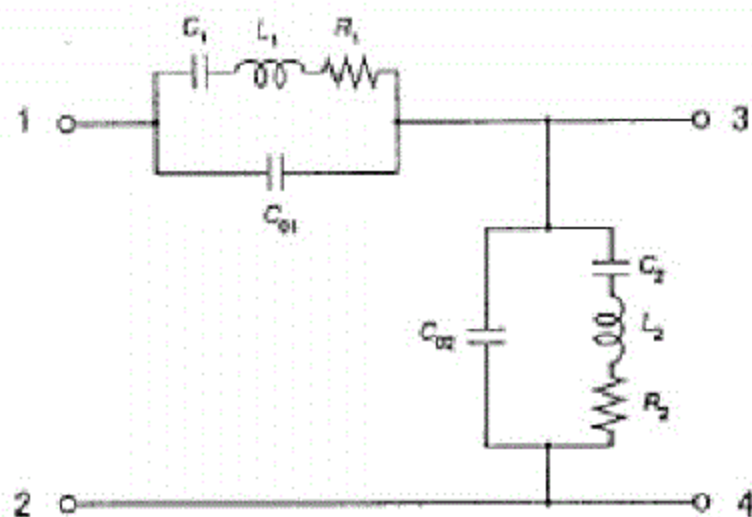


$$\sqrt{\epsilon_2} \sin \theta_i = \sin \theta_t$$

2.5 介质谐振器等效电路 Equivalent Circuit

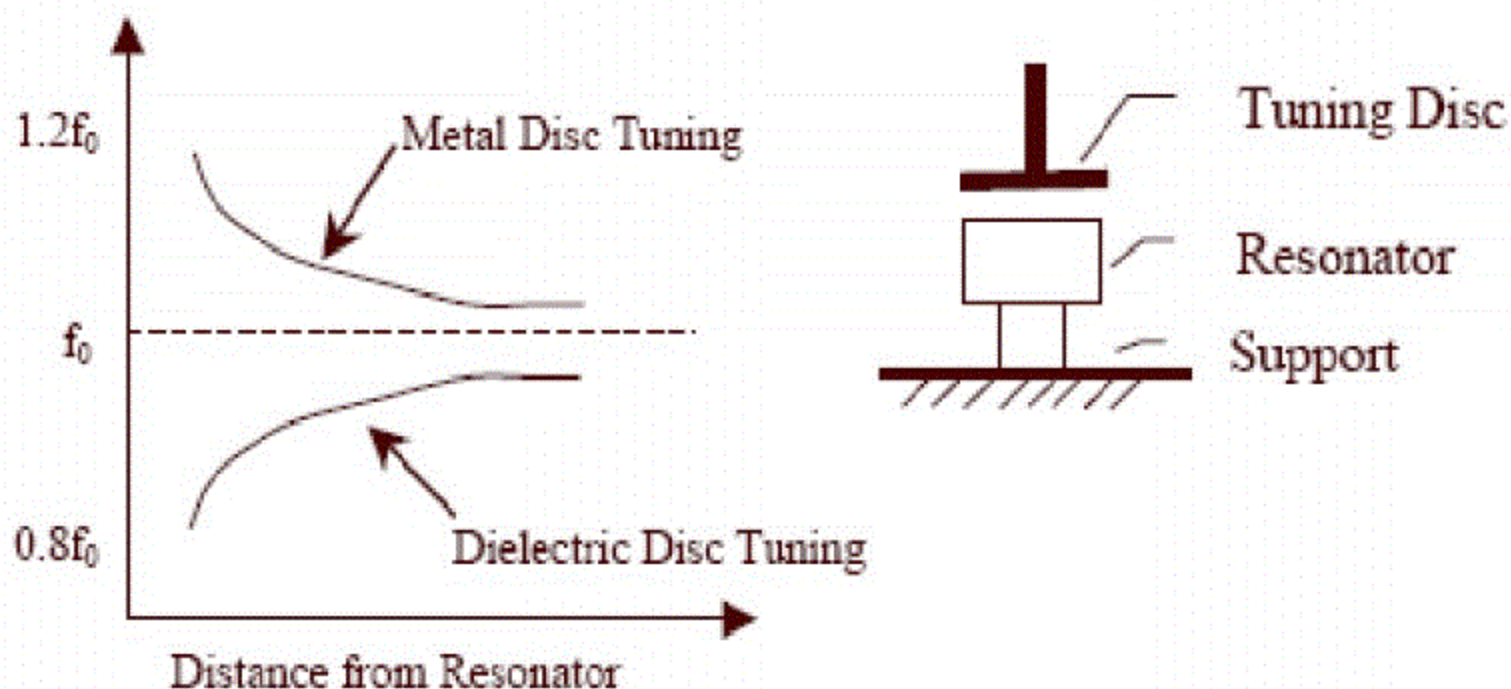


(a)



2.6 调节器 Tuning element

如前所述,介质谐振腔的调节器可以为金属,也可以为介质.通过调节调节器与介质谐振器的间距,可以影响介质谐振器外部的电磁场结构进而调整频率,最终实现特定的滤波器传输特性.



2.7 介质谐振器的性能指标 Electrical Characteristics

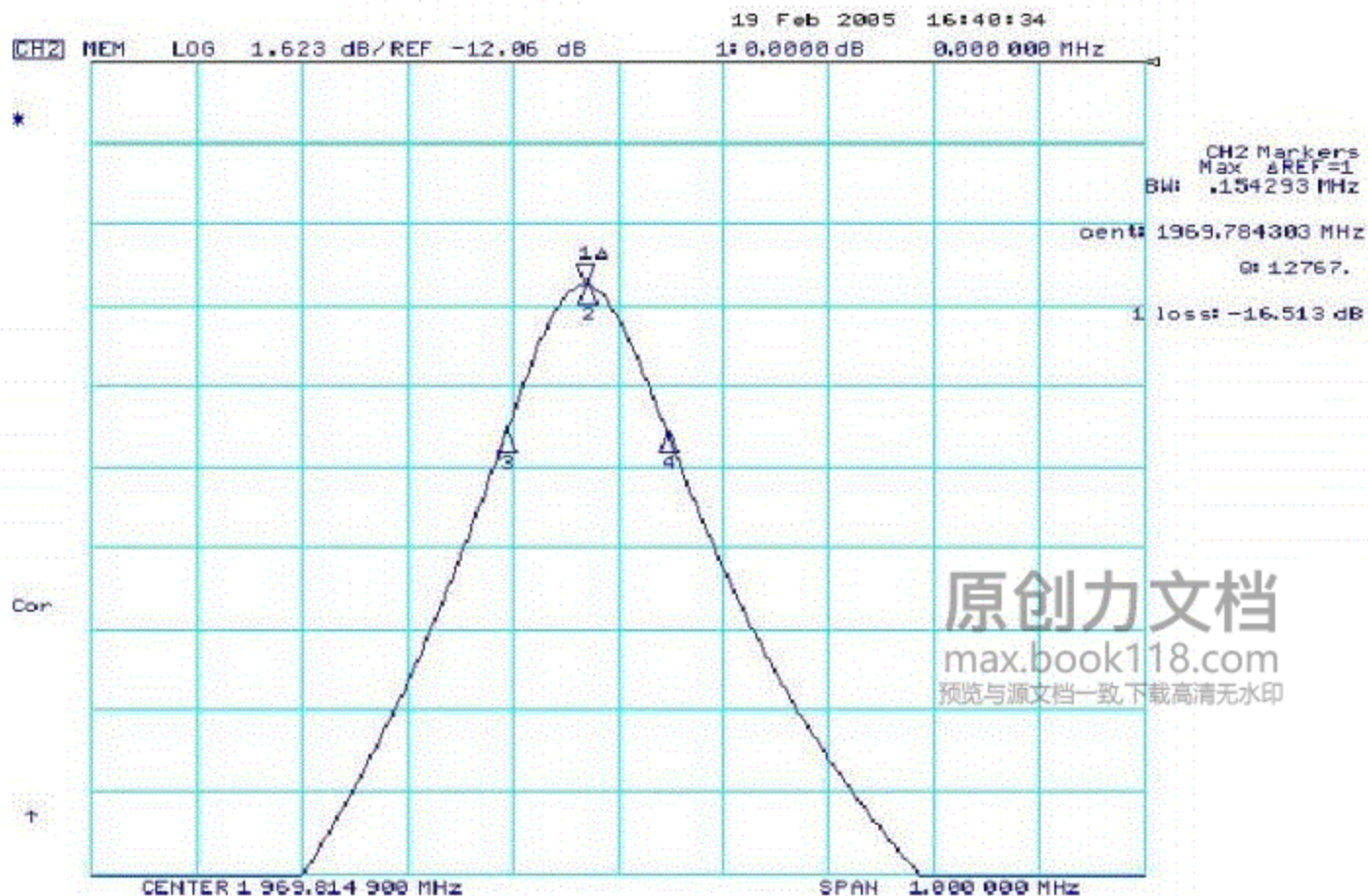
Q值 Q value

介质谐振器的Q值分为有载Q值(Loaded Q)和无载Q值(Unloaded Q).

无载Q值是介质谐振器的一个恒定指标，它不随谐振器与外界电路的耦合强弱而改变；有载Q值也是恒量介质谐振器性能的一个指标，通常我们在实际的测量过程中得到的就是它的有载Q值，如下图所示。这两个Q值实际上是衡量同一个性能的不同表达方式，它们之间可以互相转换，转换公式如下：

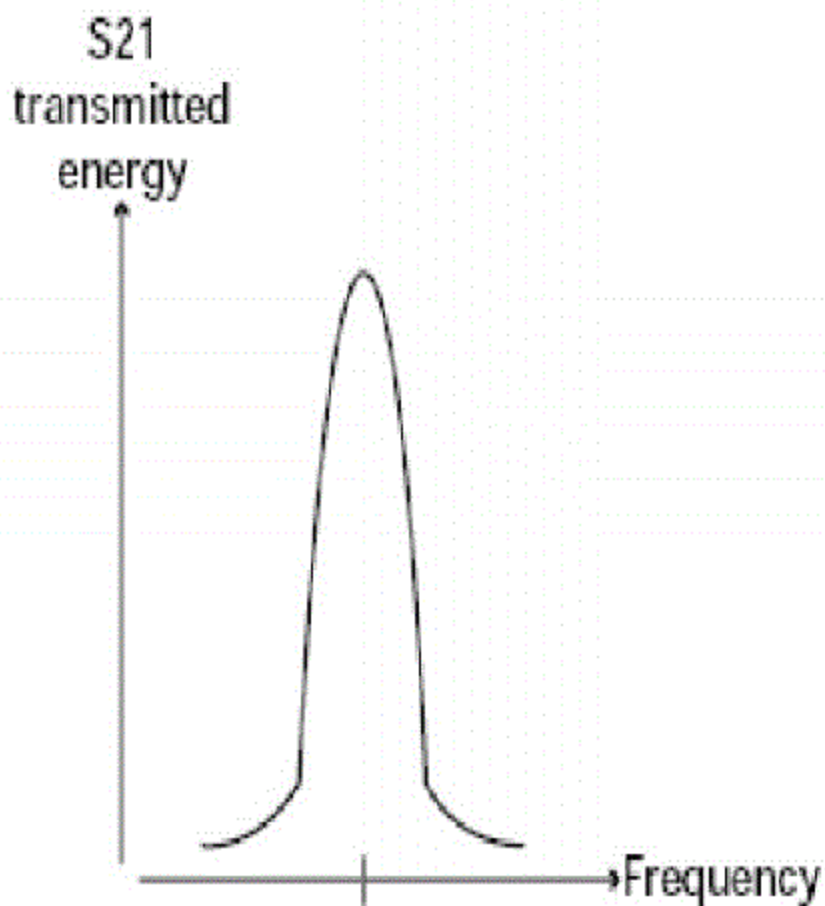
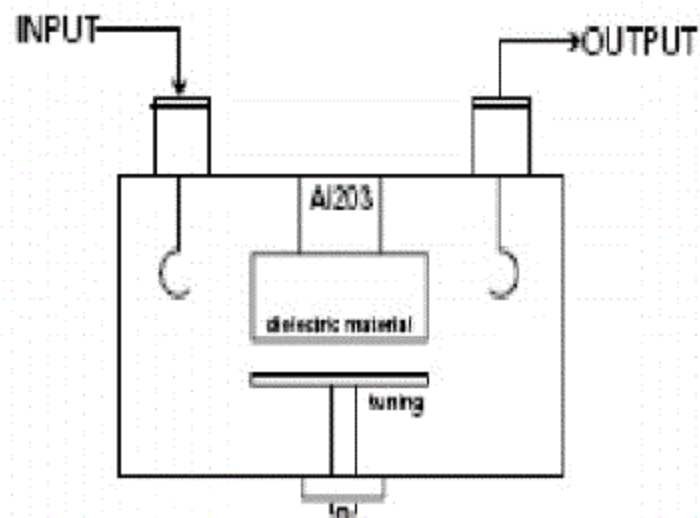
$$Qu = (f_o/BW) / (1 - 10^{(-IL/20)})$$

其中 $f_o/BW = \text{Loaded } Q$



Loaded Q值测量方法1

悬空的耦合环,垂直于电场



Loaded Q值测量方法2

接地的耦合环,垂直于磁场

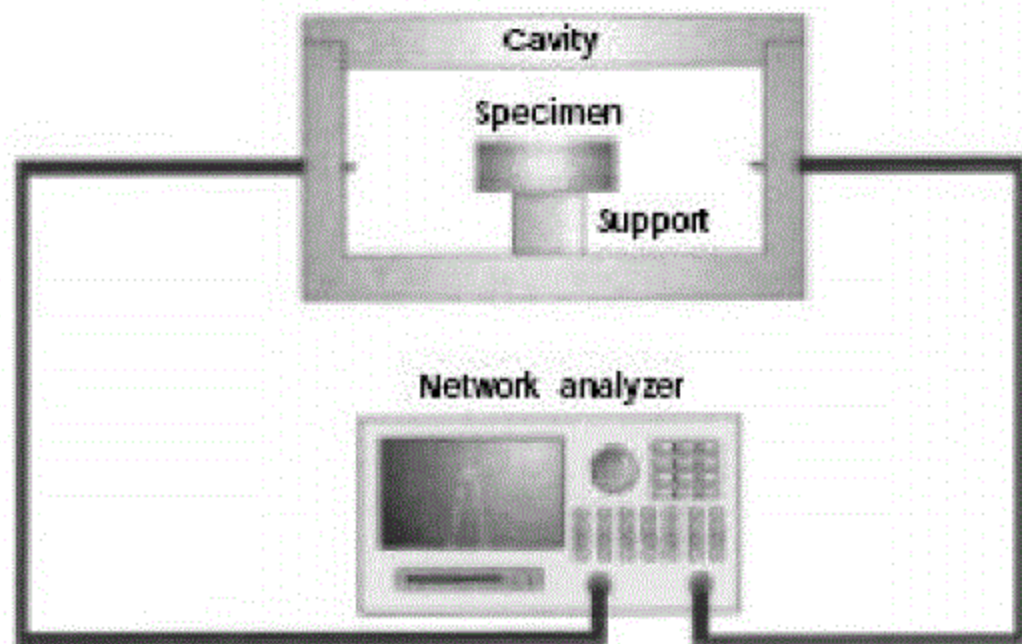


Figure 2. DR cavity Setup for Q-Factor & Temp. Coeff. Measurement

谐振频率 F_0 和相对介电常数 ϵ'

Resonant Freq.& Relative Dielectric Constant

从下面的公式我们可以得出两个结论:

介电常数一定,体积越大,频率越低

体积一定,介电常数越高,频率越低

公式中体积 V 的单位为 $V \text{ (mm}^3\text{)}$ F_0 的单位为GHz

$$F_0 = \frac{233}{\sqrt{\epsilon'} \cdot V^{\frac{1}{3}}}$$

频率温度系数 τ_f Temperature Coefficient

频率温度系数的计算公式如下: (单位为PPM/°C)

$$\tau_f = \frac{\Delta F}{F_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

Where F_0 is the resonant frequency (MHz) at ambient temperature, ΔF the frequency variation (MHz) among the ΔT temperature range (°C).

介质谐振器的频率温度系数 VS 滤波器的频率温度系数

通常介质谐振器在成型后会会有一个固有的频率温度系数，它的测量由介质供应商在专门的不锈钢结构的夹具中来完成，它一般不会生产为0 PPM/°C。

而我们的铝材空腔谐振单元在工作频带也存在一个频率温度系数,它也不会为 0 PPM/°C。

滤波器的频率温度系数可以近似由以下公式计算：

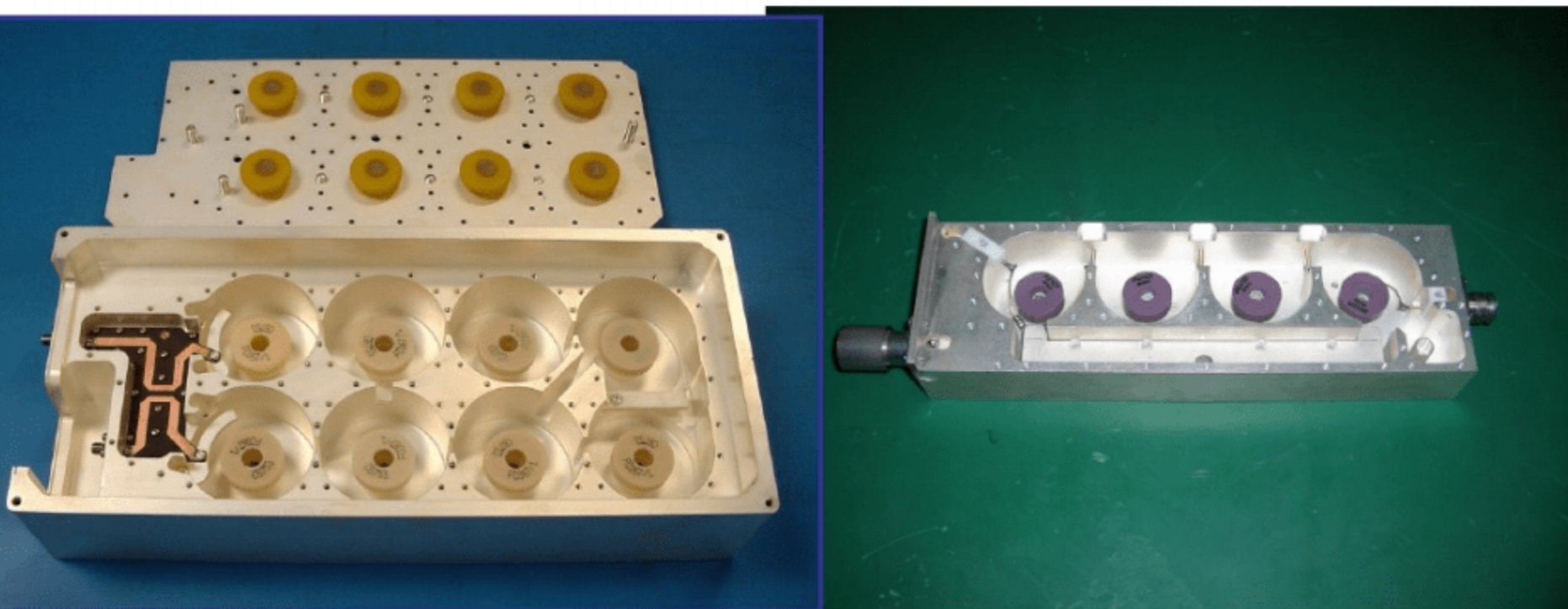
滤波器的频率温度系数≈介质的频率温度系数+空腔的频率温度系数
(经验公式,有待考证)

在滤波器的制作过程中，需要适当调整介质谐振器的频率温度系数，使它与空腔的频率温度系数一正一负且大小相等，最终实现滤波器的频率温度系数接近于零(解决温漂问题)。

3 介质滤波器 DR filter

3.1 构成 Structure

将若干个介质谐振单元通过合理的级间耦合(相邻&非相邻)和输入输出耦合构成的能完成滤波功能的二端口网络.



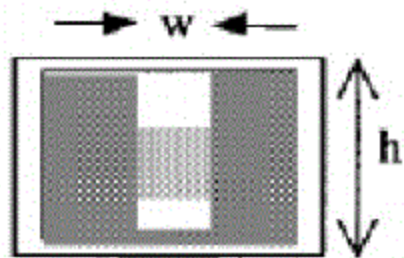
3.2 优缺点Advantage & Disadvantage

相对于金属空腔滤波器而言,介质滤波器具有如下优缺点,

	Q值/体 积V	温度稳 定性	峰值 功率	相对 带宽	成 本	寄生模 (谐波)	平均 功率	生产 (调试)
介质滤 波器								

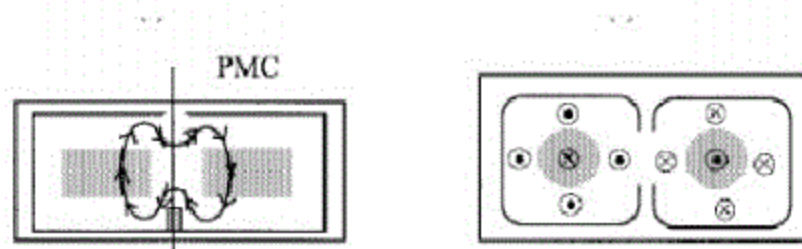
3.3 相邻腔之间的耦合 Adjacent Coupling

腔间的耦合通过耦合窗口实现，耦合窗口结构的设计要考虑电磁场排列。窗口应该开在磁场最强的地方，且要与磁场方向平行,建议开口方向如下：



为了保证 TM_{01} 模远离 TE_{01} 模，窗口的宽度 W 不能太大，这是由于 TM_{01} 模的耦合要比 TE_{01} 模强，且对频率的调节更敏感。(两模频率调节方向相反)

两耦合腔间的磁结构

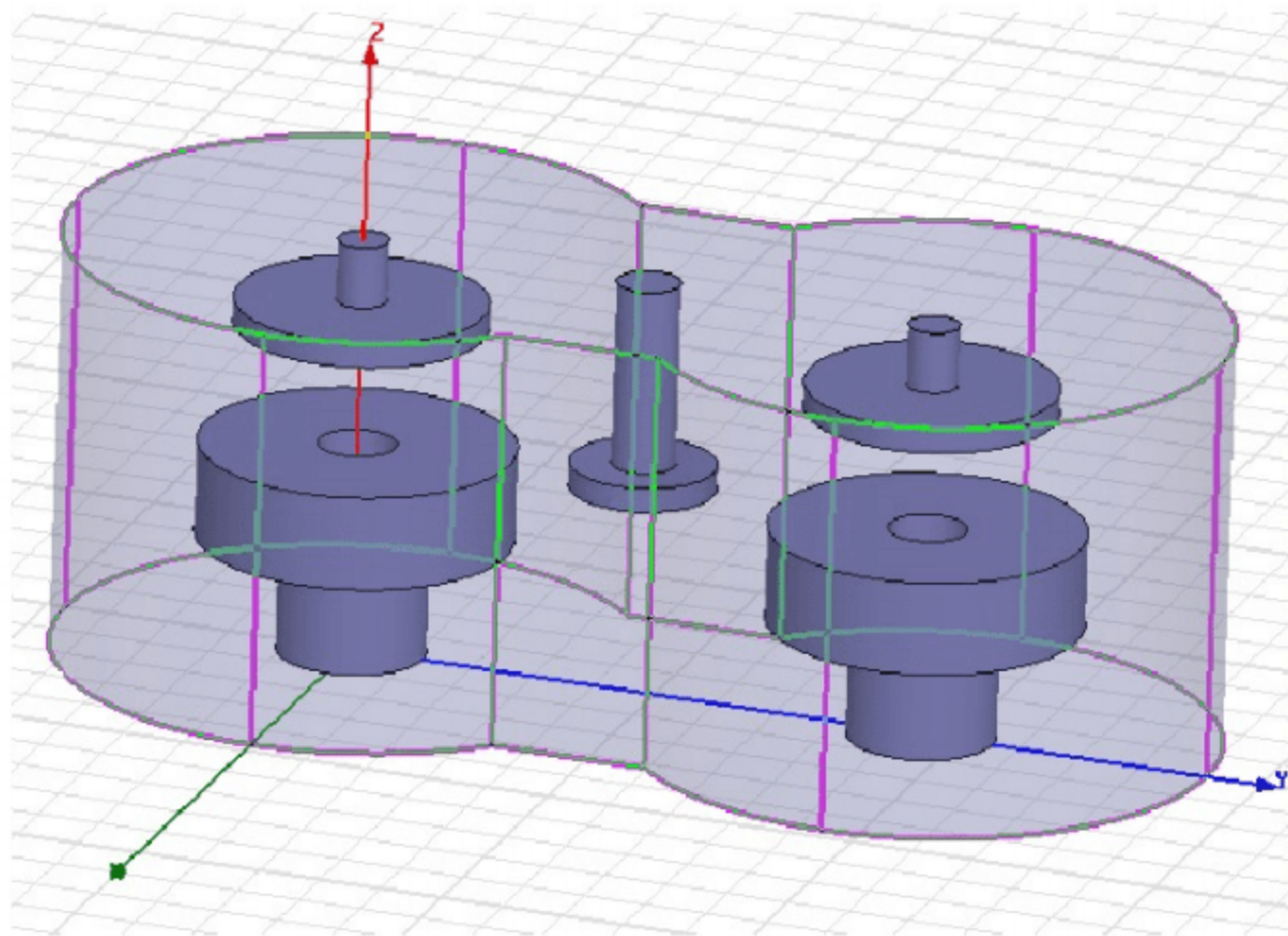


cavities are shown in Fig. 6(c) and (d). The tangential magnetic fields across the iris seem to have discontinuity because the magnetic field of the working mode changes sign (or direction) across the iris. But the localized fields (i.e., high-order modes) will dominate the fields around the iris and make sure the total tangential fields are continuous across the boundary. The relative magnetic field orientation of the working mode across the adjacent cavities is very important in determining the sign of nonadjacent coupling, which we will discuss later on. Rigorous mode-matching technique [19] or an empirical approach can be used to obtain the dimensions of the iris.

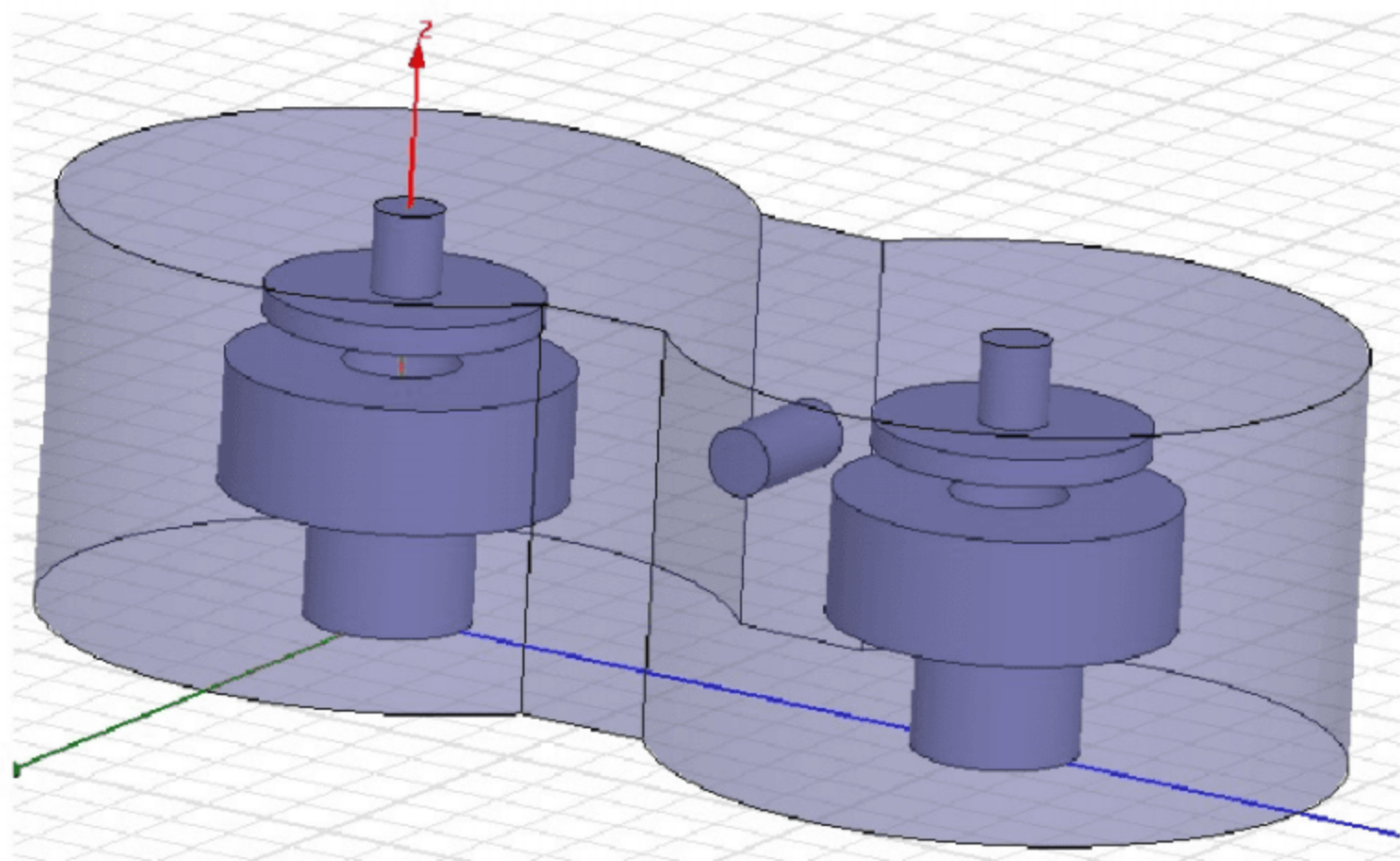
通过窗口的切线方向的磁场，看起来是不连续的，因为工作模式(TE01)的磁场通过窗口时改变了符号。但是部分磁场(比如高次模产生的)会占据耦合窗口周围的空间，使得整个切线方向的磁场能连续的通过边界。

工作模式(TE01)在两相邻腔之间的磁场方向对于决定非相邻腔之间的耦合符号非常重要。

耦合方式1(从盖板上加螺杆,随着螺杆的深入耦合将减小,适合排腔复杂场合)

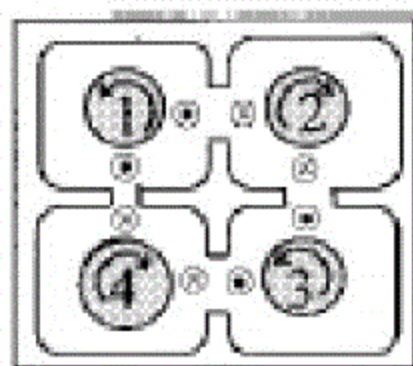


耦合方式2(从侧面加螺杆,随着螺杆的深入耦合加强,适合一字型排腔场合)

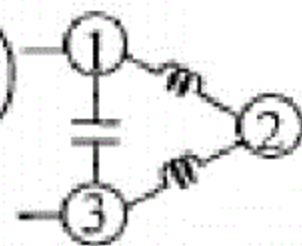
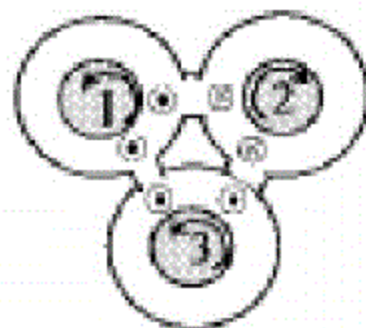
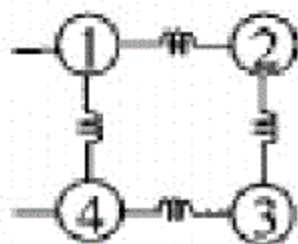


3.4 非相邻腔之间的(交叉)耦合Nonadjacent Coupling

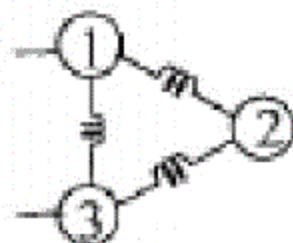
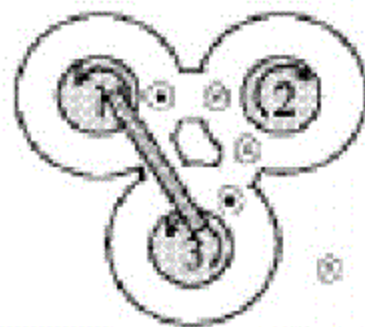
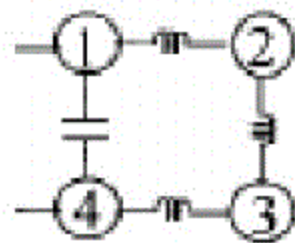
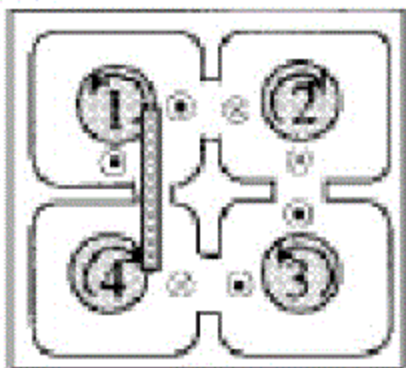
交叉耦合可以用来实现提高滤波器性能,比如准椭圆函数,时延和非对称响应.以下为三个一组和四个一组的交叉结构及他们的等效电路.



(a)



(b)



交叉耦合分析

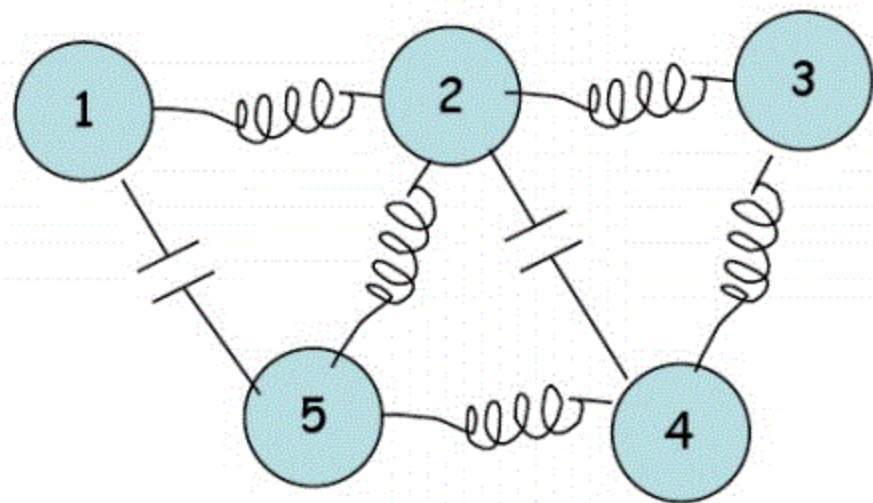
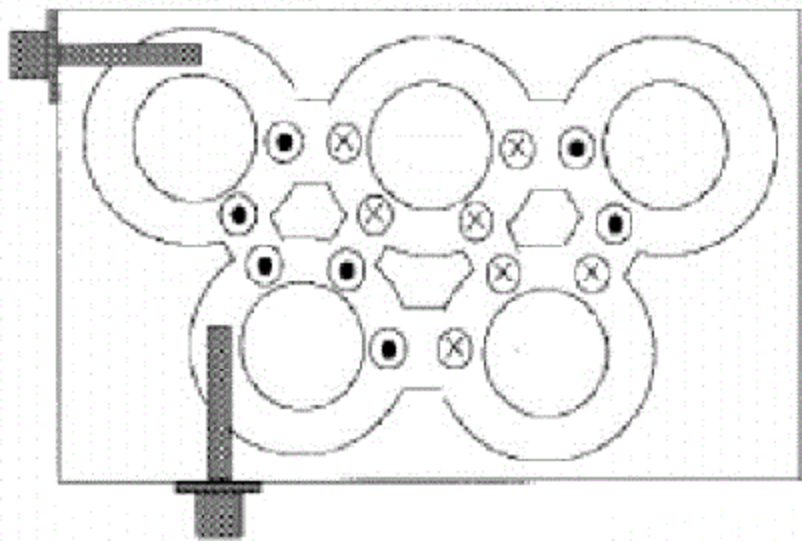
在上图中,磁耦合为一个正耦合并用一个电感表示;而对于不相邻但符号相同的耦合,我们看作一个负耦合,并用一个电容表示.

我们可以发现,通过三个一组和四个一组平面的窗口结构实现的交叉耦合符号不一样,只是因为中间多了一个金属片.

这点与其它的腔体滤波器比如波导和梳状线不一样,因为工作模式的电磁分布不一样.

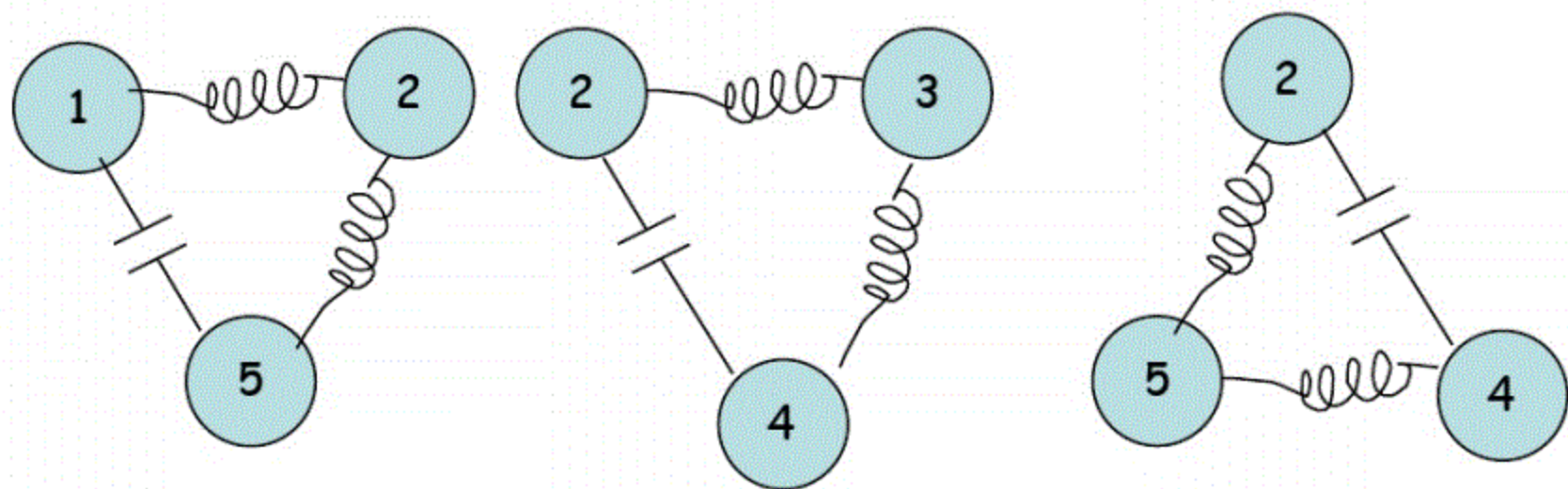
五腔三飞

以下为一个典型的介质滤波器五腔三飞结构,等效电路如右图

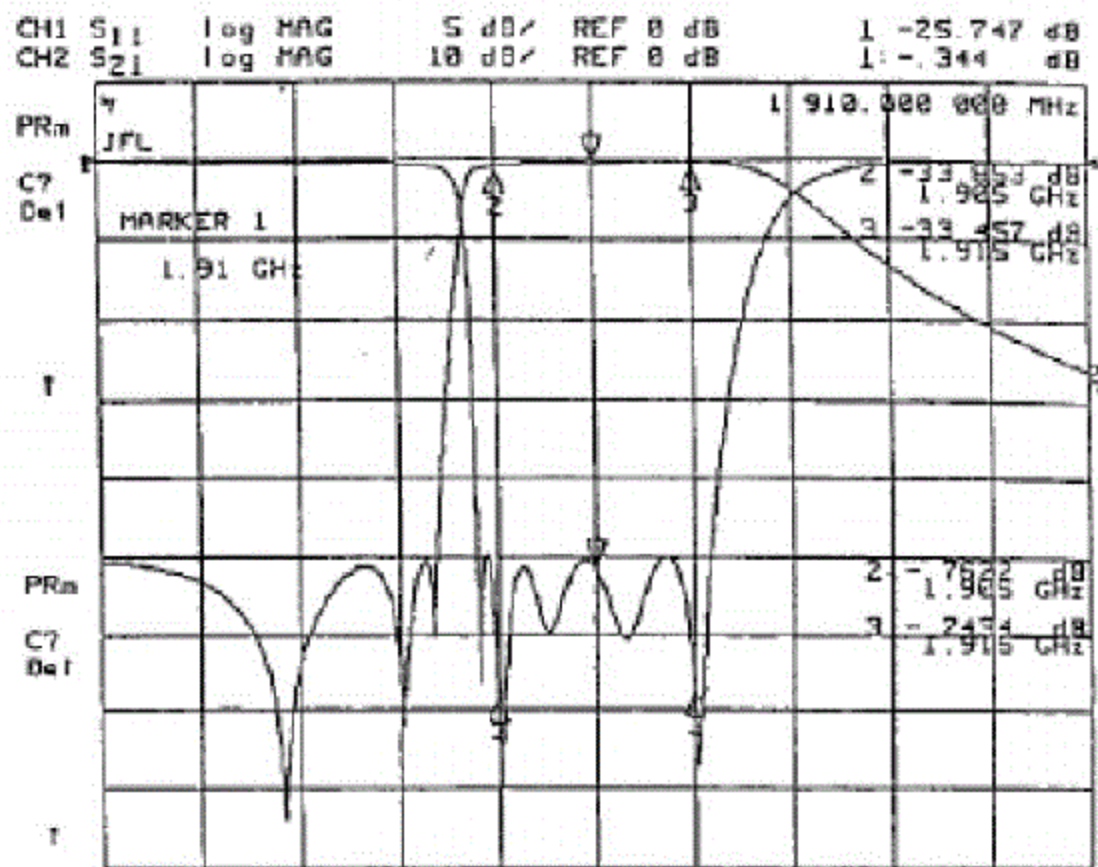


上述等效电路可以分解为三个CT结构:

根据以往的相位分析法可知,每个CT结构将在通带左端产生一个零点.



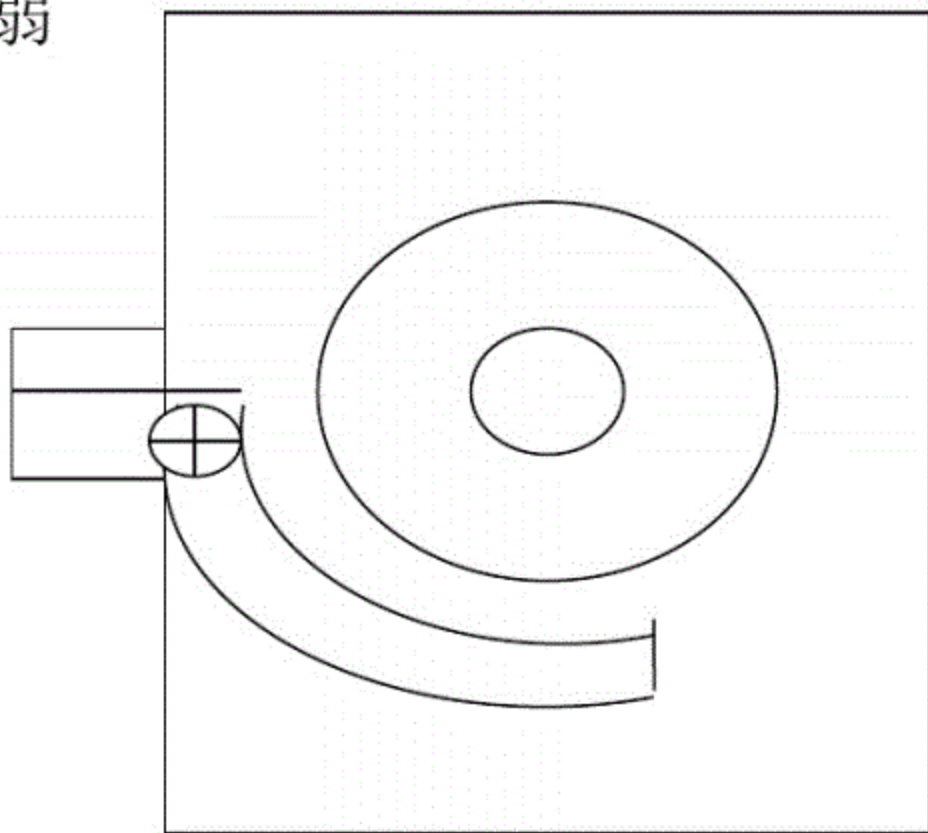
传输函数曲线



3.5 输入输出耦合(抽头) Input/Output Coupling

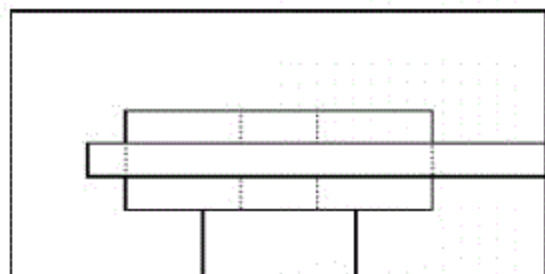
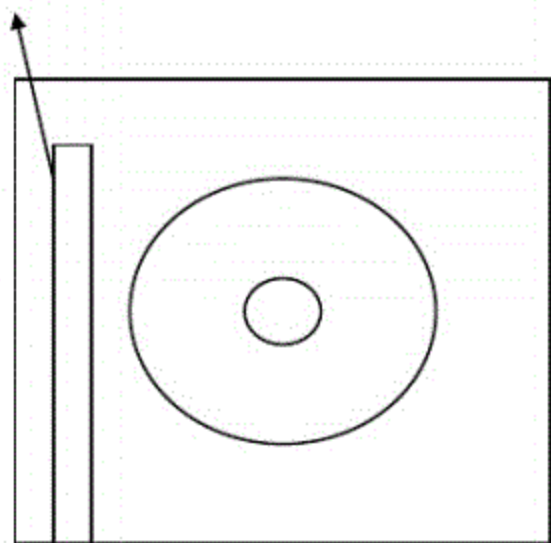
电耦合

镰刀形状的接地环,调整环与介质谐振器的间距可以调整耦合强弱



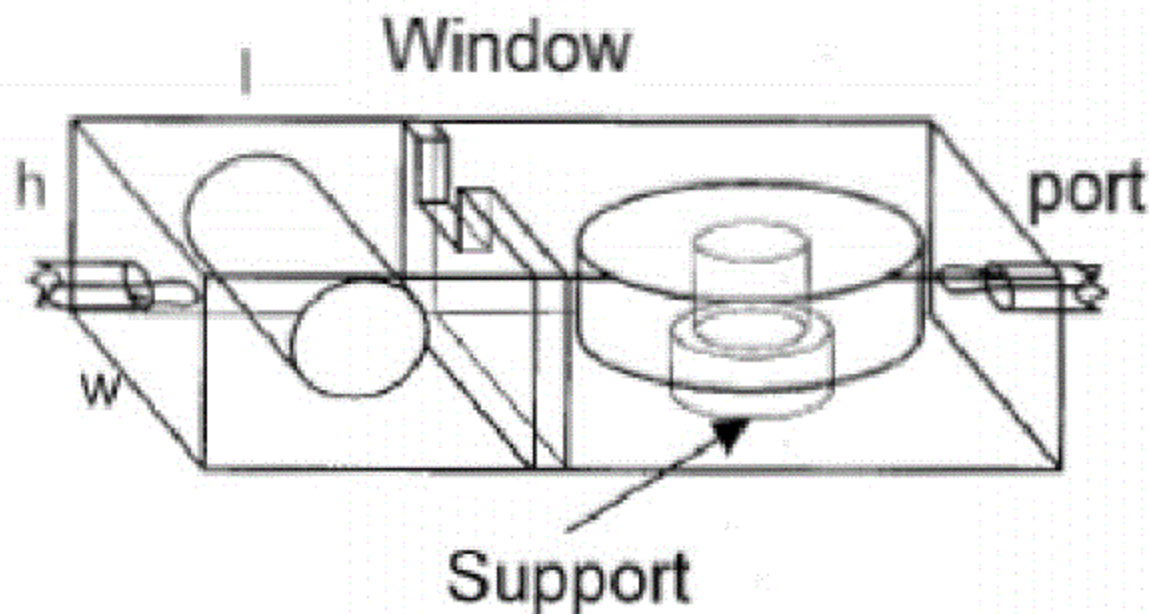
磁耦合

一端接地的金属柱,与介质谐振器垂直放置.一般在金属柱上焊接抽头,调整抽头对地高或金属柱与介质谐振器的间距可以调整耦合强弱.(适合于耦合较弱场合)



金属空腔耦合

输入输出为一个与介质谐振器垂直放置的金属空腔(适合于耦合较强场合,谐波改善的同时Q下降)



3.6 外部Q和抽头时延 External Q & Delay

在实际的滤波器调试中,如果能将抽头的外部Q值(或时延和 相位)调到理论,通带就可以很容易地升起来了,也不需要反复地” cut and try”. 特别是调试介质滤波器的时候.

外部Q值与抽头反射时延关系:

$$Q_e = f_o / b_w = f_o / (636.6 / t)$$

bw为耦合带宽,t为抽头反射时延

外部Q值与耦合矩阵值的关系

BW为滤波器实际带宽，**Ms1**为外部与第一腔的耦合矩阵值。

$$Q_{e1} = 1/(W * M_{s1}^2), W = BW / f_0$$

$$Q_{en} = 1/(W * M_{Ln}^2), W = BW / f_0$$

由以上两公式可以推算出反射时延与耦合矩阵值的关系

$$t_1 = 636.6 / (BW * M_{S1}^2)$$

$$t_n = 636.6 / (BW * M_{ln}^2)$$

3.7 平均功率容量 Average Power Capacity

介质滤波器的平均功率容量不高,如果强行加载高平均功率会带来两个问题:

3.7.1 谐振器炸裂

主要是介质谐振器供应商在谐振器技术上的体现。介质供应商,应该制造可靠性非常高的谐振器,选择适当的粘胶,适当的支撑柱设计,优良的制造、粘结工艺。

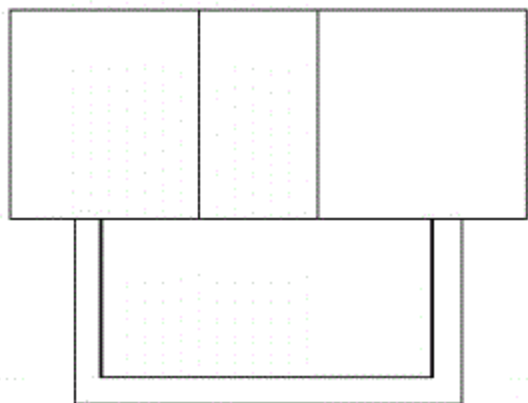
3.7.2 滤波器通带偏移(与高温测试偏移不同)

解决办法:

A.提高谐振器Q 值

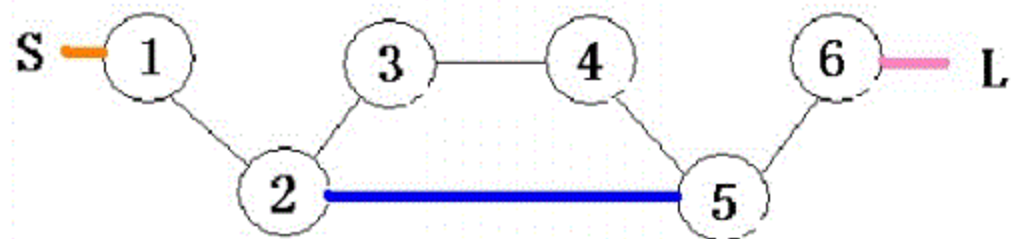
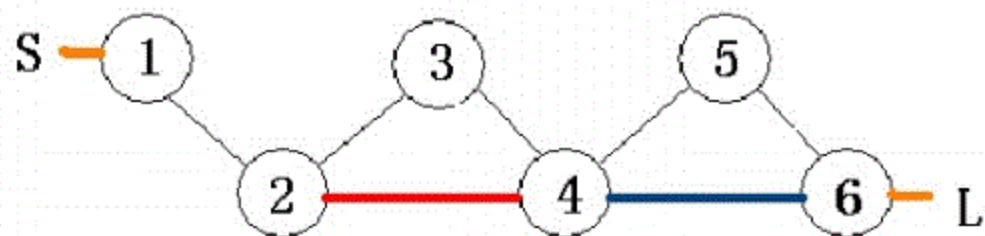
B.在满足高低温的条件下,尽量使介质谐振器的频率温度系数(绝对值)小.

C.提高支撑柱与粘胶的热传导率,在满足Q的前提下减短支撑柱的高度



D.改变滤波器内部的交叉耦合

以下两种方案中,采用对称交叉耦合的方案佳.



4.介质滤波器设计方法 Procedures

- 4.1 通过仿真确定节数,单腔大小和Q值,交叉耦合的位置及符号,耦合矩阵(系数)
- 4.2 通过规范要求选择合适的级间耦合方式及输入输出耦合方式
- 4.3 设计介质谐振器和支撑柱
调节器,谐振频率,安装方式,尺寸,介电常数(介质材料)等
- 4.4 为实现级间耦合和输入输出耦合选择合适的物理模型
- 4.5 确定窗口尺寸
- 4.6 安装调试