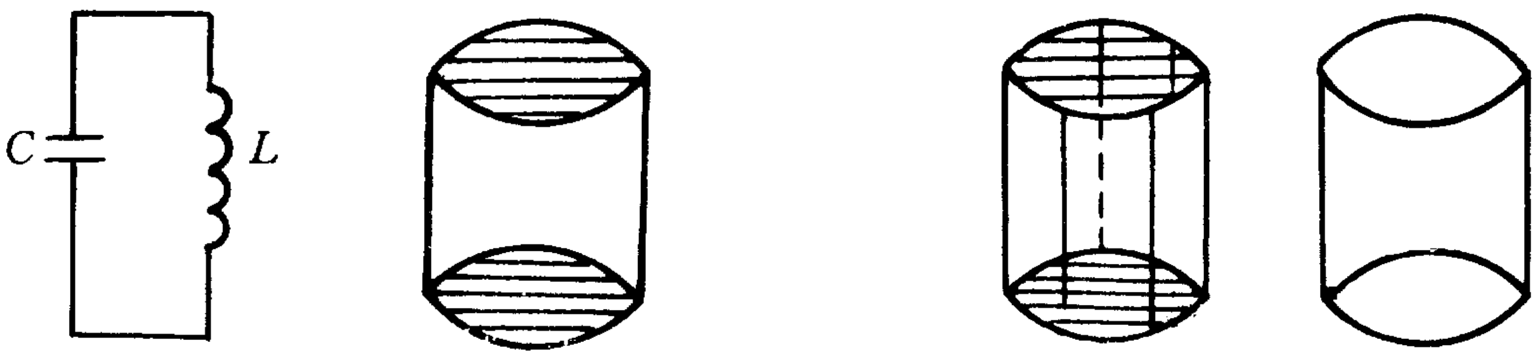
§3.4 微波谐振器

在低频电路中采用集中参数的LC谐振回路来储能和选频的。随着频率的升高,辐射损耗导体损耗以及介质损耗都会急剧增加,使谐振回路的品质因素大大降低,选频特性变差;随着频率的升高电感量L和电容量C将愈来愈小,体积也愈来愈小,致使电感器和电容器的制作困难机械强度变差易击穿,并使振荡功率变小。因此集中参数的LC谐振回路不能用在微波波段作储能和选频元件。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

为了克服上述缺点,必须采用封闭形的微波谐振器(又称谐振腔)来作储能和选频元件。这种谐振器可以定性看成是由集中参数LC谐振回路演变而来的,如图所示。



为了提高谐振回路的谐振频率，必须减少L和C的数值。减少电容量C的办法是将电容器的两极板板间距拉开；减少电感量L的办法是将线圈匝数减少，直至线圈变为一直线。欲使频率进一步提高，可采用多根直导线并联，甚至在极限情况下，可用一个封闭面来代替，这样就构成一个圆柱谐振器或矩形谐振器。

微波谐振器主要有两大类:传输线型谐振器和非传输线型谐振器。

前者是一段两端被开路或短路的传输线,例如:矩形谐振器、圆柱谐振器、同轴谐振器、带状线谐振器和微带谐振器;

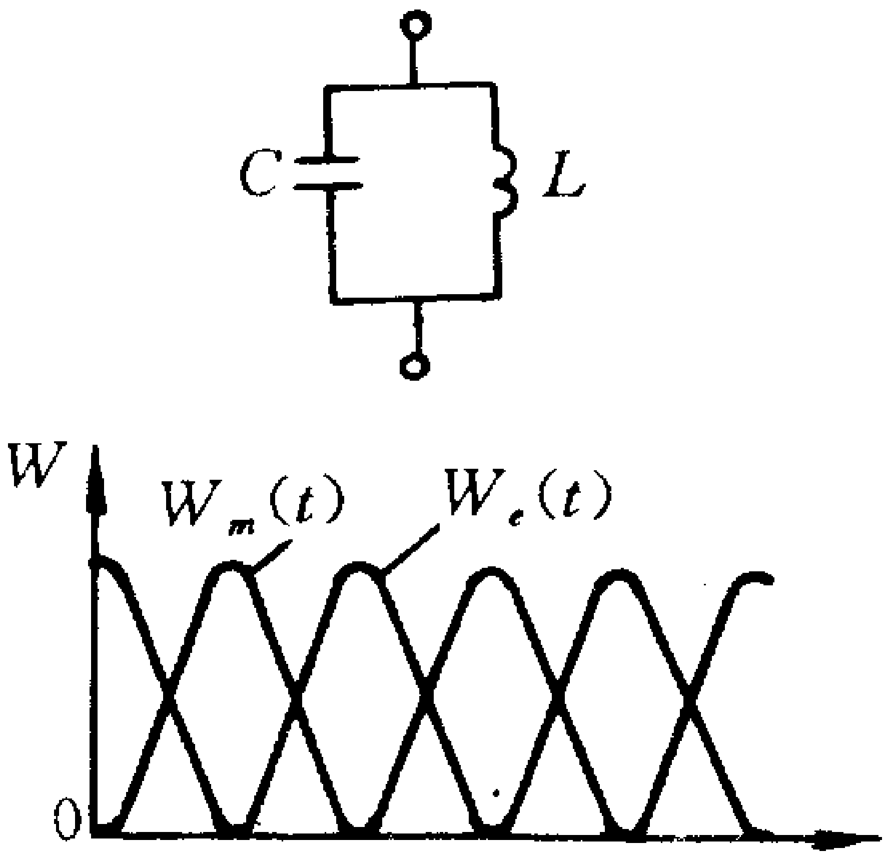
后者是一种特殊形状谐振器,主要用来作各种微波电子管(如速调管,磁控管)的腔体。

微波谐振器中电磁场能量关系和集中参数LC谐振回路中能量关系有许多相同处。

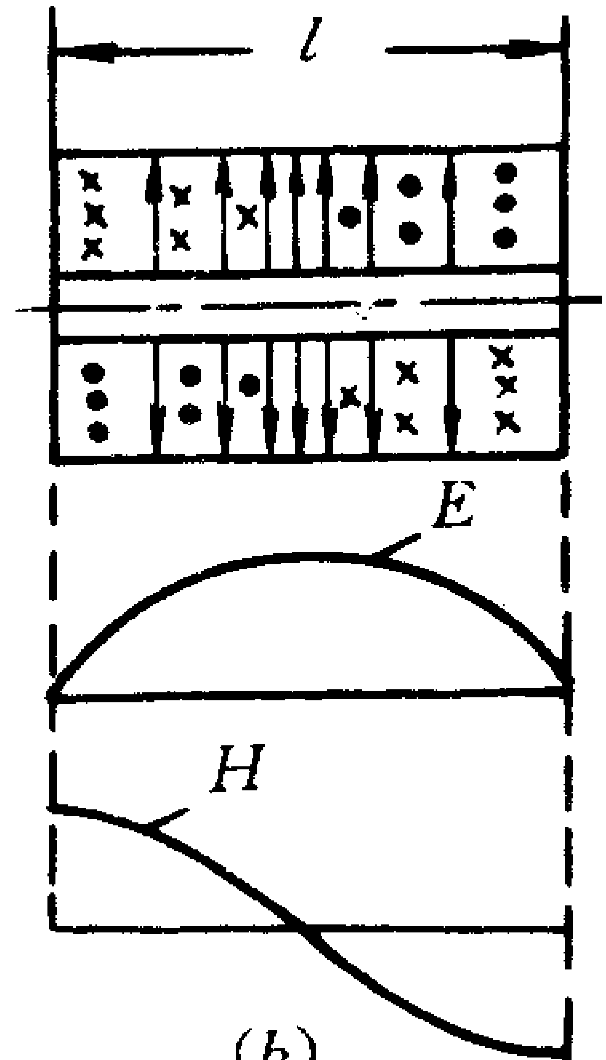
图(a)为集中参数LC并联谐振回路及回路中的电磁场能量随时间分布曲线，图(b)为同轴谐振器及其电磁能量的分布曲线。

图(a)中当LC谐振回路在谐振时，电场能量集中在电容器中，磁场能量集中在电感器中，当电场能量达最大时，磁场能量为零，反之亦然。这样电磁能量随时间相互转换，其转换的频率即为谐振回路的谐振频率；

图(b)所示的同轴谐振器是两端被短路的同轴传输线，在同轴线的纵向，电磁场分布也为驻波分布。当电场能量最大时，磁场能量为最小，反之亦然，这样电磁能量互相转换，其转换频率即为谐振器的谐振频率。可见谐振器的振荡过程即是电磁能量转换的过程。



(a)



(b)

微波谐振和LC谐振电路的不同之处在于电能和磁能分布在整个结构中，不能截然分开，这主要是由于微波传输线的分布参数作用的结果。

场理论是分析微波谐振器的基本理论，但是单模工作的传输线型谐振器也可以采用“路”的分析方法。

为了简便，本节只介绍微波谐振器的基本特性，传输线型谐振器的等效电路和设计公式。并介绍几种基本的微波谐振器。不分析场理论，只给出几个重要结论。

谐振波长λ_0，谐振器品质因数Q，谐振器等效损耗电导G这三个量是描述微波谐振器性能的特性参数。

一、微波谐振器的基本参量

RLC谐振回路常采用L、C和R作为基本参量，这是因为他们能直接测量，而且可以由它导出谐振回路的其余参量，如：谐振频率f_0，谐振回路的品质因素Q_0等。

(一) 谐振频率f_0→谐振波长 λ_0

谐振频率是指谐振器中该模式的场发生谐振的频率。它是描写谐振器中电磁能量的振荡规律的参量。

在谐振时，谐振器内电场能量和磁场能量自行彼此转换，故**谐振器内总的电纳为零**。如果采用某种方法得到谐振器的等效电路，并将所有的电纳归算到同一个参考面上，则在谐振时，此参考面上总的电纳为零，即

$$\sum B(f_0)=0$$

利用上式就可以求得谐振频率。

传输线型谐振器的谐振波长为:

$$\lambda_0=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{p}{2l}\right)^2+\frac{1}{\lambda_c^2}}}$$

1、谐振波长就是工作波长，当填充空气介质时 $\lambda_0=c/f$，谐振器波长与谐振器尺寸、传输模式有关。

2、对于TEM模谐振器，$\lambda_c=\infty$，得 $\lambda_0=2l/p$，即同一谐振器可对应无数个谐振波长，反之，同一工作波长，可以对应无数个谐振器结构尺寸。

3、对于矩形波导模谐振器 $\lambda_0=\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2+\left(\frac{n}{b}\right)^2+\left(\frac{p}{l}\right)^2}}$

4、和加载情况有关

(二) 品质因素Q_0

品质因素Q_0是微波谐振器的重要参量,它描写谐振器的选择性的优劣和能量损耗的大小,其定义为

$$Q_0 = 2\pi \left.\frac{\text{谐振器内储存电磁能量}}{\text{一个周期内损耗的电磁能量}}\right|_{\text{谐振时}}$$

$$= 2\pi \frac{W_0}{P_L T} = \omega_0 \frac{W}{P_l}$$

式中W_0为谐振器中的储能；P_L为谐振器中的损耗功率。

在谐振时,电磁场的总储能为

$$W_0 = \frac{\varepsilon}{2}\int_V E \bullet \overset{*}{E}\, dV = \frac{\mu}{2}\int_V H \bullet \overset{*}{H}\, dV$$

式中V为谐振器的体积;ε和μ分别为谐振器内媒质的介电常数和磁导率。

谐振器的损耗包括：导体损耗、介质损耗和辐射损耗,对于封闭形的谐振器，辐射损耗为零，如果假定谐振器内介质是无耗的，则谐振器的损耗只有壁电流的热损耗,故有

$$P_L = \frac{1}{2}\oint_s |J_l|^2 R_s dS = \frac{R_s}{2}\oint_s |H_t|^2 dS$$

式中S为谐振器导体内壁的表面积;

R_s为导体内表面电阻率;

J_l为导体内表面的电流线密度;

H_t为导体内表面的切向磁场。

由导体壁为非理想造成的功率损耗为P_{l0}，由P_{l0}确定的品质因数称为固有品质因数，或无载品质因数，用Q_0表示：

$$Q_0 = \frac{2\int_V |H|^2 dV}{\delta \oint_S |H_t|^2 dV} \approx \frac{1}{\delta}\frac{V}{S}$$

任何谐振器都必须有和外电路联系的耦合装置，否则一个孤立的谐振器没有实用意义，由外部负载损耗P_{le}确定的品质因数称为外部品质因数，用Q_e表示：

$$Q_e = w_0 \frac{W}{P_{le}}$$

由负载损耗功率为：$P_l = P_{le} + P_{lo}$ 由 P_l 决定的品质因数称为有载品质因素，用Q_L表示：

$$Q_L = w_0 \frac{W}{P_{le} + P_{l0}}$$

三者的关系为：

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_e}$$

(三) 等效电导G

等效电导G表示谐振器功率损耗的大小：

$$G = \frac{2P_l}{|U|^2}$$

其中U为广义传输线的模式电压。由于模式电压不唯一，因此G也不是单值。

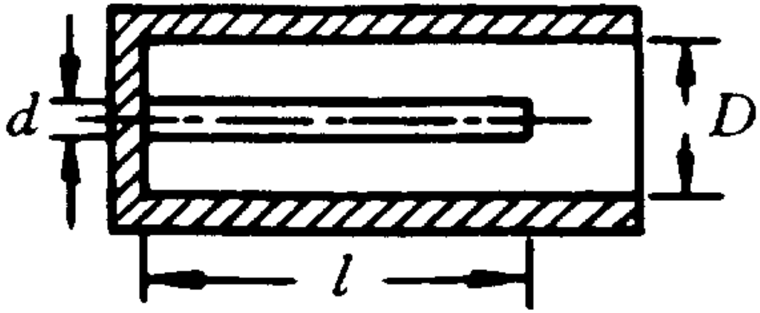
二、同轴线谐振腔

利用同轴线中的驻波振荡构成的谐振腔,称为同轴谐振腔。只要同轴线尺寸满足

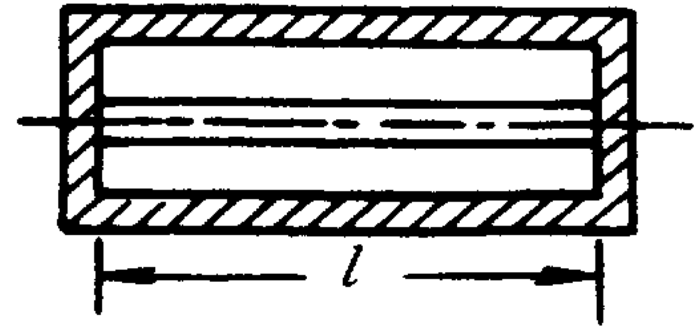
$$a+b<\frac{\lambda_{\min}}{\pi}$$

同轴谐振腔具有振荡模式最简单、工作稳定、工作频带宽等优点。它可作为微波三极管的振荡回路,又可作为波长计和混频器的谐振回路。

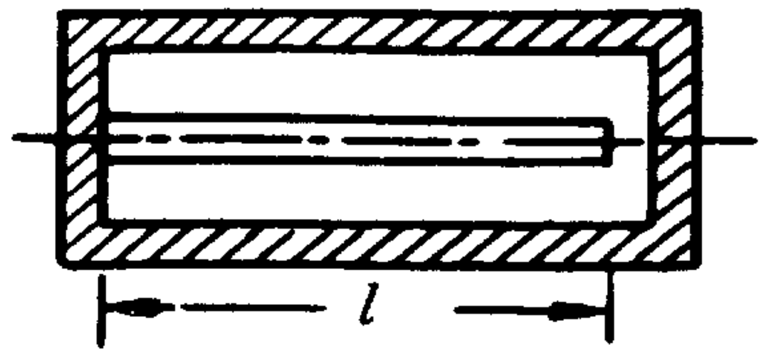
常有的同轴谐振腔有：λ/4同轴腔，λ/2同轴腔和电容加载同轴腔,分别如图(a)(b)和(c)所示。其中λ/4同轴腔和λ/2同轴腔原理和分析方法相同,λ/2同轴腔可以看成两个λ/4同轴腔开路端相对连接而成 。



(a)



(b)



(c)

(一) λ/4同轴谐振腔

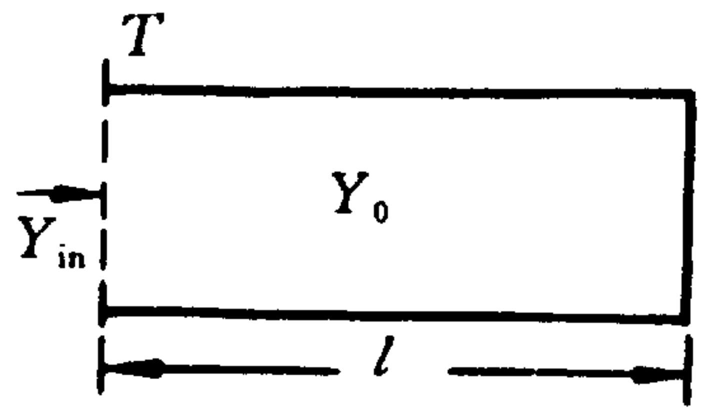
将同轴线一端短路,另一端开路,开路端常用同轴腔的外导体延长线来减少辐射损耗，则构成了λ/4的同轴腔。其谐振频率可采用电纳法分析。如图(a)所示的λ/4同轴腔,可以等效为如图所示的终端短路的双线传输线。根据谐振条件,从参考面T看进去的导纳为零,即

$$B = Y_0 ctg\beta l = Y_0 ctg\frac{2\pi l}{\lambda_0} = 0$$

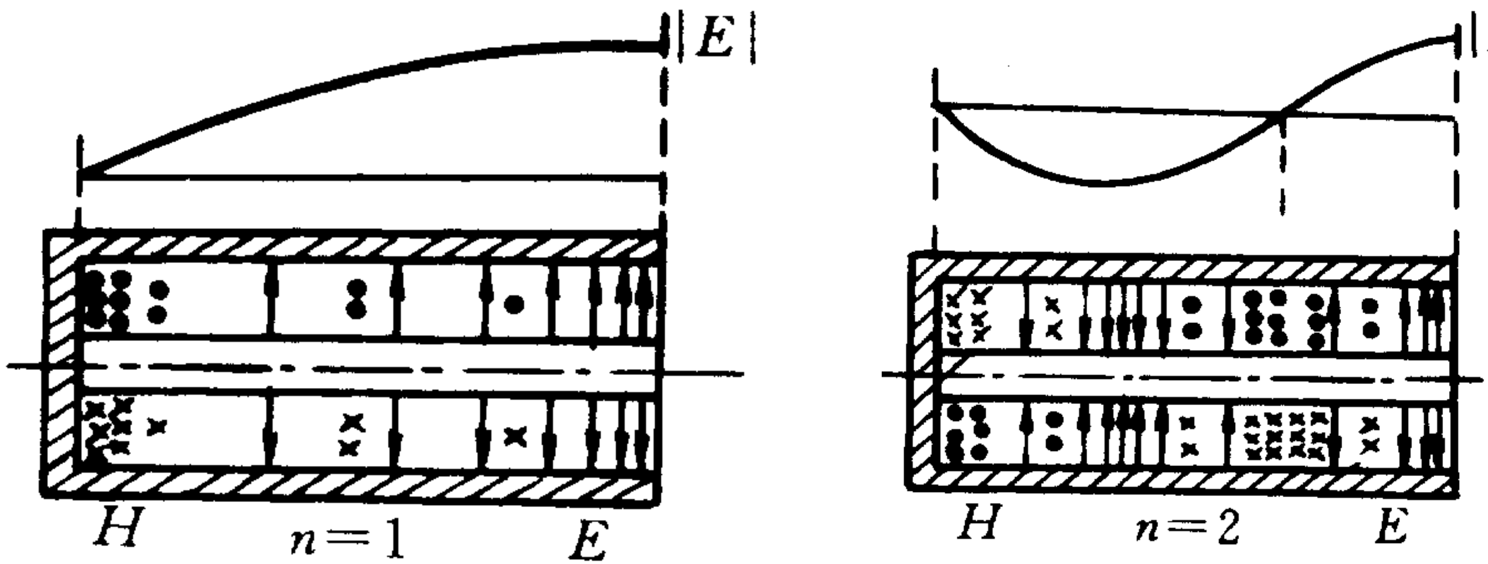
于是得到

$$l = (2n-1)\frac{\lambda_0}{4},(n = 1,2,3,\cdots)$$

$$\lambda_0 = \frac{4l}{2n-1}$$



可见,当腔的长度一定时,每对应一个n值就有一个谐振波长,即对应于一种模式,这就是谐振腔的多谐特性。图(a)和(b)分别给出了n=1和n=2两种振荡模式的场结构图。



(a)　　(b)

据分析,λ/4同轴腔的品质因素的计算公式为

$$Q_0=\frac{D}{\delta}\frac{\ln\frac{D}{d}}{1+\frac{D}{d}+\frac{4D}{\lambda_0}\ln\frac{D}{d}}$$

上式表明λ/4同轴腔的品质因素是同轴线外内直径之比D/d的函数。若保持同轴线外径D不变，将Q_0对d求导，可以证明当D/d=3.6时，Q_0为最大，其值为0.557D/(2δ)，对于铜制的同轴谐振腔，在λ_0=10cm时，$(Q_0)_{max}$=5000。

(二) λ/2同轴谐振腔

将同轴线两端短路,则构成了λ/2的同轴腔。其谐振频率可采用电纳法分析。如图(b)所示的λ/2同轴腔 。根据谐振条件,从参考面T看两边的导纳为零,即

$$\overline{B}_1 = -\overline{B}_2 \qquad \text{或} \frac{l_1}{\lambda_0} + \frac{l_2}{\lambda_0} = n \times \frac{1}{2}$$

于是得到

$$l = n\frac{\lambda}{2},(n = 1, 2, 3, \cdots)$$

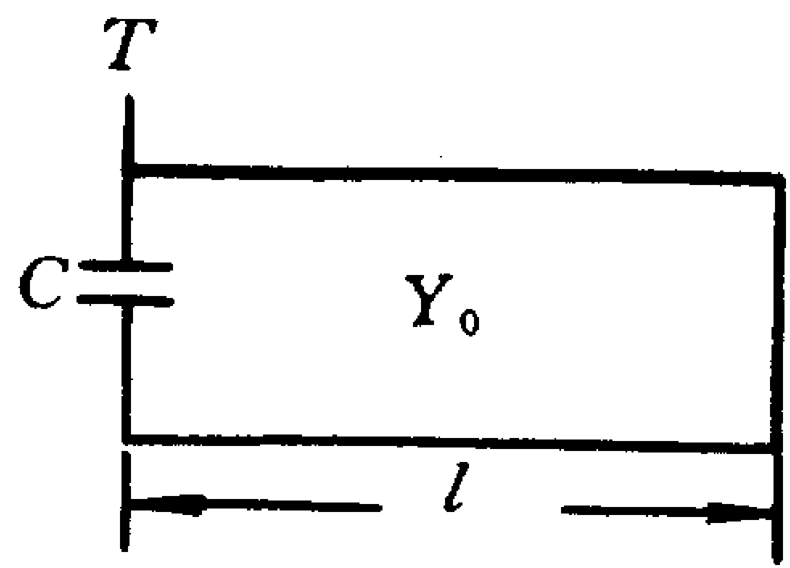
$$\lambda_0 = \frac{2l}{n}$$

谐振腔长度固定时，对应有无穷多谐振波长，反过来当谐振波长固定，对应有无穷多谐振长度。两端短路的同轴谐振腔长度为λ/2的整数倍。

(三) 电容加载同轴腔

电容加载同轴谐振腔，其一端短路,另一端的内导体的端面与外导体的短路面之间形成一个集中电容，故称为电容加载同轴腔。加载同轴腔可等效为一端短路,另一端接集中电容的双线,如图所示。由参考面T向右和向左看的电纳分别为

$$\begin{cases} B_1 = -Y_0 ctg\beta l \\ B_2 = \omega C \end{cases}$$



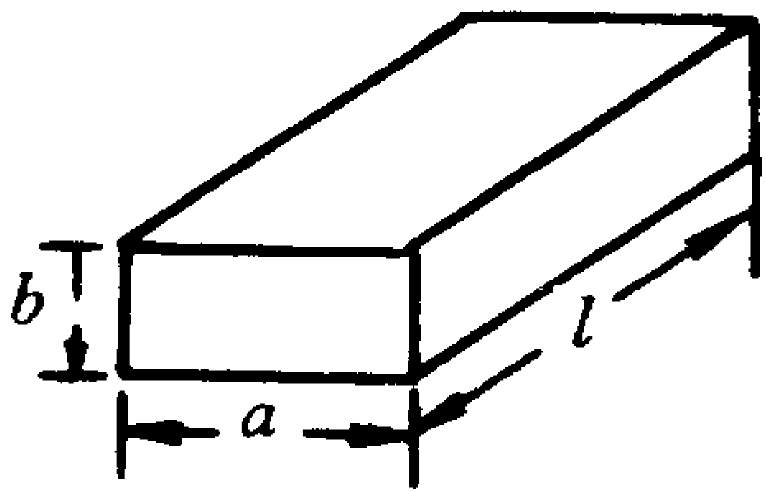
根据谐振条件$B_1+B_2=0$即得

$$\omega C = Y_0 ctg\beta l$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 \pi d^2}{4S}$$

三、矩形谐振腔

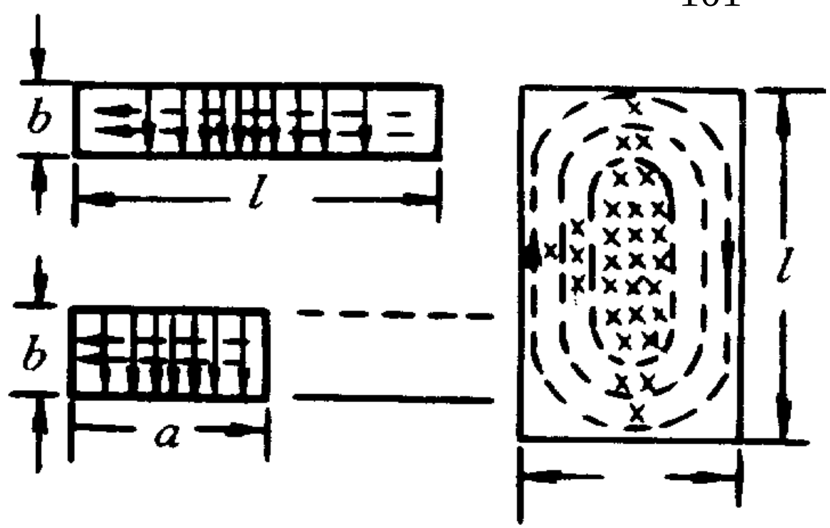
两端短路的矩形波导传输线．即为矩形谐振腔，它的横截面尺寸为a×b，长度为l，如图所示。



(a)

(一) 振荡模式及其场分布

矩形腔中场分布的分析,可借助于矩形波导中传输模式的场分布来求解,使它满足z=0和z=l两个短路面的边界条件,即可求得矩形腔中的场分布。矩形波导中传输的模式有TE模和TM模,相应谐振腔中同样有TE振荡模和TM振荡模,分别以TE_{mnp}和TM_{mnp}表示之,其中下标mn和p分别表示场分量沿波导宽壁,窄壁和长度上变化的半驻波数。其中最低振荡模式为TE_{101},其场分布如图所示。



(b)

(二)谐振波长

谐振条件与λ/2同轴腔相同,但由于波导中传输的波是色散波,故波长应指波导波长λ_p,即

$$l=\frac{p}{2}\lambda_p \quad (p=1,2,\cdots)$$

而

$$\lambda_p=\frac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

矩形谐振腔谐振波长计算公式

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{\lambda_c})^2 + (\frac{p}{2l})^2}}$$

式中λ_c为波导中相应模式的截止波长。此式适用于所有柱形波导谐振腔,对于矩形腔则有

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{(\frac{m}{a})^2 + (\frac{n}{b})^2 + (\frac{p}{l})^2}}$$

把m=1,n=0和p=1代入上式,便得TE_{101}模的谐振波长为

$$\lambda_0 = \frac{2al}{\sqrt{a^2 + l^2}}$$

当波导尺寸满足b＜a＜*l*时,则TE_{101}模式的谐振波λ_0最长,故它为最低振荡模式。

可知,相同mn及p的TE振荡模和TM振荡模的谐振波长相等,故TE振荡模和TM振荡模互为简并模。

TE101谐振模的固有品质与腔体尺寸的关系为：

$$Q_0 = \frac{abl}{\delta} \frac{a^2 + l^2}{(a+2b)l^3 + (l+2b)a^3}$$

对于立方体谐振腔有：

$$Q_0 = \frac{a}{3\delta} = \frac{\lambda_0}{3\sqrt{2}\delta}$$

例如当腔壁为铜，λ_0=10cm，$\delta = 1.22\times10^{-4}$cm 立方体腔的固有品质因素为：$Q_0 = 1.88\times10^4$ 实际值约为 $Q_0 = 10^4$

四、 圆柱形谐振腔

圆柱谐振腔是一段长度为l,两端短路的圆波导。这种腔结构简单，加工方便，Q值高，在微波技术中得到广泛的应用。

圆柱腔中场分布分析方法和谐振波长的计算公式与矩形腔相同,唯一不同的是截止波长λ_c的表达式不同。

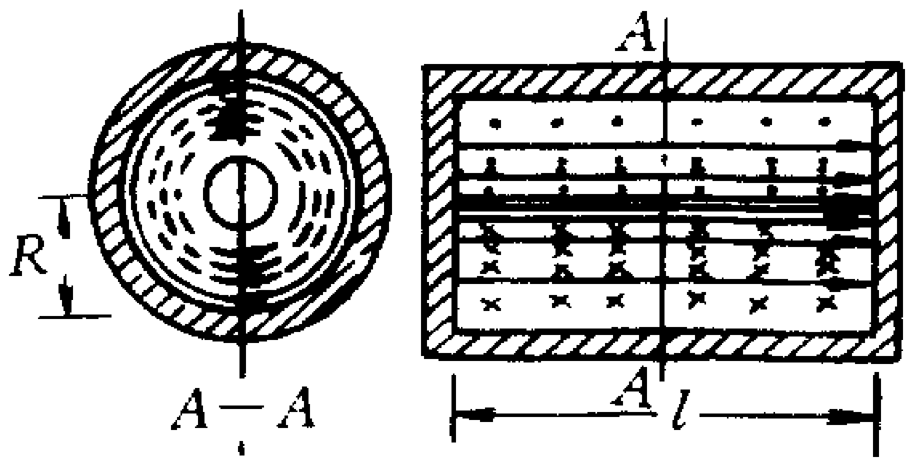
$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2}}$$

(一) 圆柱腔最常用的三个模式

圆柱腔中最常用的三个振荡模为TM_{010}模,TE_{111}模和TE_{011}模,其场分布分别如图(a)(b)和(c)所示,下面分别讨论这三种振荡模式的特点和应用。

1.TM_{010}振荡模

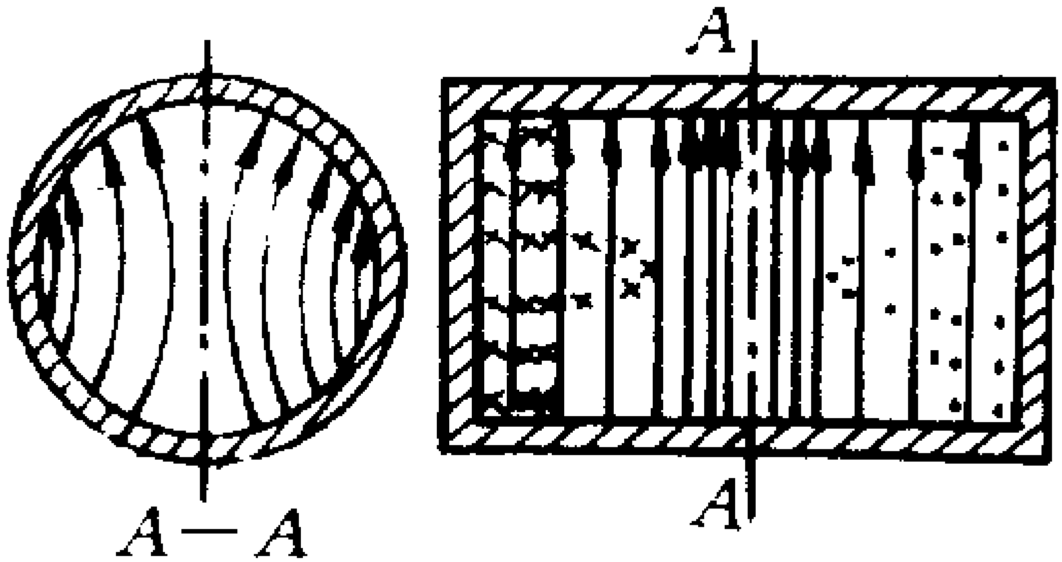
将TM_{010}模的截止波长λc=2.62R和p=0一起代入便得圆柱腔TM_{010}模的谐振波长λ0的计算公式为λ_0=2.62R



(a) TM_{010}模式

可见,谐振波长与腔长度l无关,因此无法靠改变腔长度来实现谐振频率的调谐,通常在空腔的端面中央,放入一个长度可调的圆柱导体来实现调谐。

由于TM_{010}模的圆柱腔场结构特别简单,而且有明显的电场和磁场的集中区,常用作参量放大器的振荡腔介质参量测量用的微扰腔以及波长计。



(b) TE_{111}模式

2. TE_{111}振荡模

将TE_{111}模的截止波长λ_c=3.41R和p=1代入式便可得到圆柱腔中TE_{111}模的谐振波长计算公式为

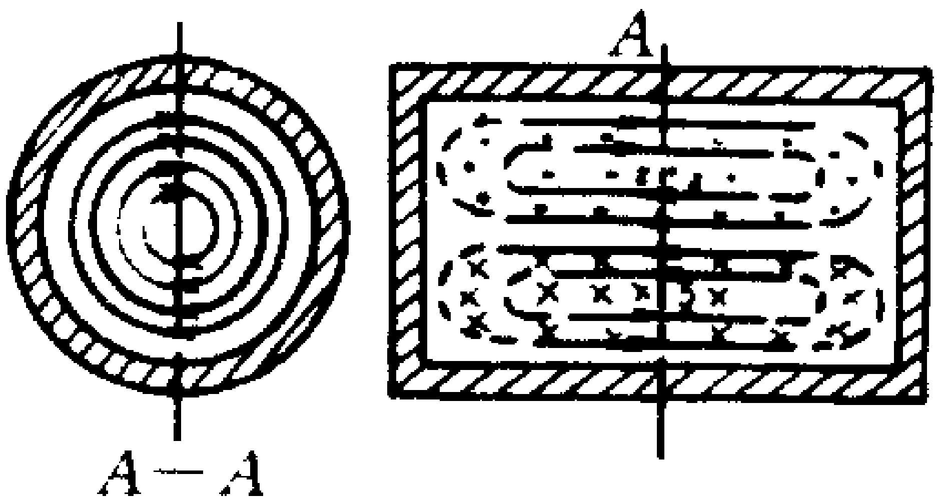
$$(\lambda_0)_{TE_{111}}=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{3.14R}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\right)^2}}$$

当l＞2.1R时,TE_{111}模式的谐振波长最长,故该模式的圆柱腔的体积较小,无干扰模的调谐范围较宽。但这种模式具有极化简并模,而且Q值比较低,故该振荡模只能作中等精度的波长计。

3.TE_{011}振荡模式

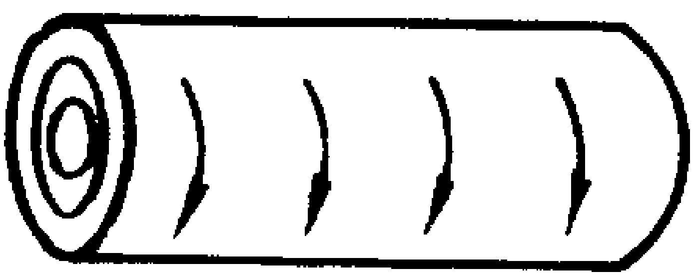
将TE_{011}模的截止波长λc=1.64R及p=1代入式便得TE_{011}振荡模的谐振波长计算公式:

$$(\lambda_0)_{TE_{011}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{1.64R}\right)^2 + \left(\frac{1}{2l}\right)^2}}$$

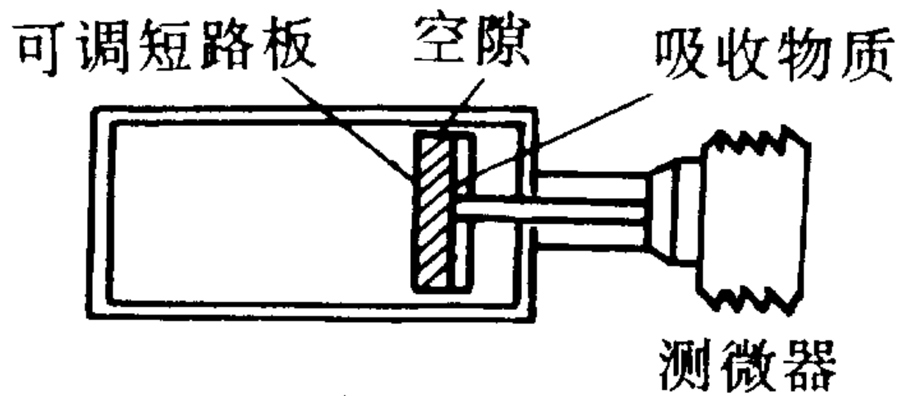


(c) TE_{011}模式

显然它不是圆柱腔中的最低振荡模式,但它的品质因素较高,而且腔壁上只有φ方向的壁电流,这就使得损耗随频率的升高而降低;另一方面使得TE_{011}振荡模的调谐活塞可以做成不接触式的,既便于制造,又便于抑制其他干扰模。壁电流分布和调谐方法分别如图(a)和(b)所示,这种模式的圆柱腔广泛用作高Q波长计和稳频标准腔等。



(a)



(b)

(二) 模式图

由圆柱腔中TE和TM振荡模的λ_c表达式，即可得到圆柱腔谐振频率和谐振腔尺寸的关系式为

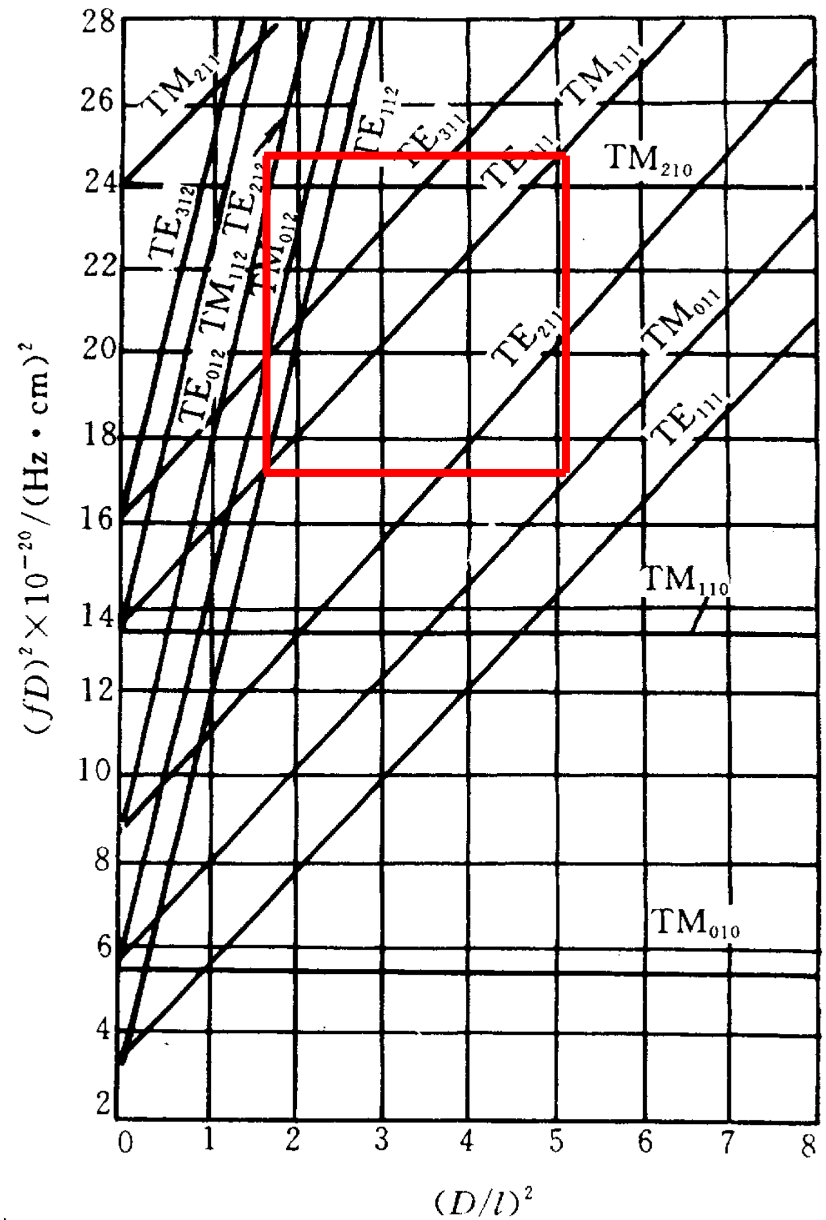
$$(f_0 D)^2 = \left(\frac{v_0 u_{mn}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{v_0 p}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{l}\right)^2$$

式中v_0为光速,D为圆柱腔的直径,l为圆柱腔的长度,f_0为谐振频率。将上式再改写为

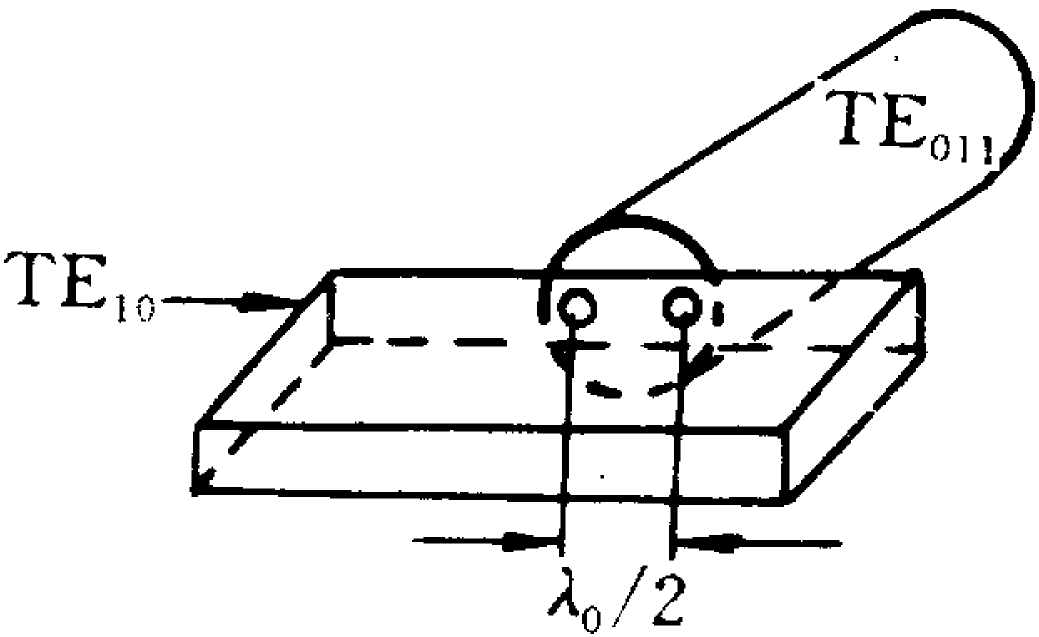
$$(f_0 D)^2 = 9\times 10^{20}\left(\frac{u_{mn}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{l}\right)^2$$

其中f_0的单位为Hz,长度l的单位为cm。

将上式画在横坐标为$(D/l)^2$, 纵坐标为$(f_0D)^2$的坐标系内,则可得到一系列的直线,如图所示。这种图称为模式图,是设计圆柱腔的主要图表。模式图中每一根直线表示一种或几种振荡模式的谐振频率和$(D/l)_2$的关系曲线,又称为该模式的调谐曲线。



如图是圆柱腔TE_{011}振荡模的激励装置。它是由传输TE_{10}模的矩形波导的窄壁和圆柱腔底壁的公共壁上开的两个耦合孔来激励的。两个耦合孔的间距等于矩形波导中TE_{10}模波导波长的一半,即λp/2。这样两个孔的中心的磁场强度是等幅反相的。正好能激励起TE_{011}谐振模,对大部分干扰模无法被激励。



五、其他谐振器

带状线谐振器分为λ/2型和λ/4型两种， λ/2型带状线谐振器的长度为半波长的整数倍。 λ/4型带状线谐振器中心导体长度是 λ/4的奇数倍。

微带线谐振器分为开路微带线谐振器和微带环谐振器，微带环谐振器的谐振波长为：

$$\lambda_0 = \frac{\pi\left(r_1 + r_2\right)}{n}\sqrt{\varepsilon_{re}}$$

介质谐振器是由一段介质传输线构成，介质传输线是高介电常数，低损耗的材料构成，介质谐振器可以是圆柱体，长方体或圆环柱体等等。介质谐振器可以激励TE模也可以激励TM模，介质谐振器也有无限多个谐振模。

六、谐振器的激励与耦合

实际的谐振电路分解成耦合电路和谐振电路的组合。

谐振器的激励和耦合本质上是一类问题。激励的原则如下：

1、应用某种激励装置，它能在被激励一侧建立这样的电场分布，这种电场分布于期望建立的波形的电场分布一致。

2、应用某种激励装置，它能在被激励一侧建立这样的磁场分布，这种电场分布于期望建立的波形的磁场分布一致。

3、应用某种激励装置，它能在被激励一侧的电壁上建立这样的高频电流，这种电流分布于期望建立的波形的壁电流分布一致。

3.4 微波铁氧体元件

一、 微波铁氧体简介

铁氧体是一种人工烧结的磁性材料，其成分为二价的金属（如锰、镁、镍、锌等）和铁的氧化物，这种材料在特性上显示出两重性：

① 在电方面，它显示出低损耗的电介质的特征。其相对介电常数ε_r在10 -20 左右，介质损耗角正切 $\tan\delta$在10^{-2}-10^{-4}数量级，电阻率高达 $10^8\Omega\cdot$cm，因此它不同于所有其他的金属磁性材料，电磁波可以进入其内部与它相互作用。

② 在磁方面，它又表现为一种磁性材料的特征。特别是在固定外磁场偏置后，铁氧体中的自旋电子与微波场产生称之为“铁磁共振效应”、“相移不可逆效应”和“衰减不可逆效应”等现象，其磁导率也表现为张量，并称其为张量磁导率。尤其是，目前所研究的铁氧体材料的内部谐振频率几乎全部落在微波波段。

二、微波铁氧体元件

微波铁氧体元件种类很多，按磁化方式来分有横向磁化元件和纵向磁化元件；按元件的功能来分有隔离器、环形器和移相器，等等。

隔离器是一种铁氧体非互易元件，它的基本特性是当正向波通过它时可以无衰减地通过，当反向波通过它时将产生很大的衰减。故它在微波系统中得到广泛应用。

隔离器的最主要应用是将它放在微波信号源和负载之间，以避免可能的反射波功率对源的破坏。隔离器亦可用于匹配或调谐网络，但它所起的作用是吸收由负载不匹配引起的任何反射功率，使之不再产生二次反射，相当于使用匹配网络的情况。

按工作原理分，隔离器可分为谐振式、场移式和法拉第旋转式三种，结构较简单。使用较普遍的是谐振式和场移式。它们都是在不同类型的传输线中，置放铁氧体片（或棒），并外加恒定偏置磁场构成。

2．微波环行器

微波环行器也是常用的一种非互易铁氧体元件，一般有三端口和四端口环行器两类，理想环行器应具有这样的特性：各端口的能量传输是按照一个方向顺序“环行”的。

对于如图 所示的四端口环行器，功率传输的顺序为：由端口（1）输入的能量只能传输到端口（2），由端口（2）输入的能量只能传输到端口（3）…环行顺序为（1）→（2）→（3）→（4）→（1）。