

3.2 定向耦合器

定向耦合器在微波技术中有着广泛的应用,如用来监视功率、频率和频谱;把功率进行分配和合成;构成雷达天线的收发开关平衡混频器和测量电桥;又可以利用定向耦合器来测量反射系数和功率,等等。

定向耦合器的种类很多。

按传输线类型来分有波导、同轴线、带状线和微带线定向耦合器;

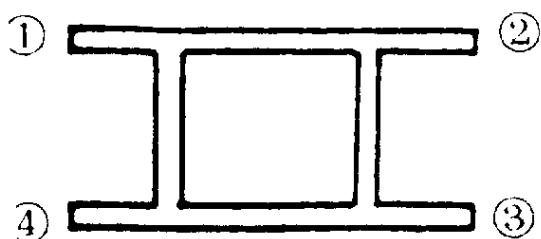
按耦合方式来分有单孔耦合、多孔耦合、连续耦合和平行线耦合定向耦合器;

按耦合输出的方向来分有同向耦合器和反向耦合器;

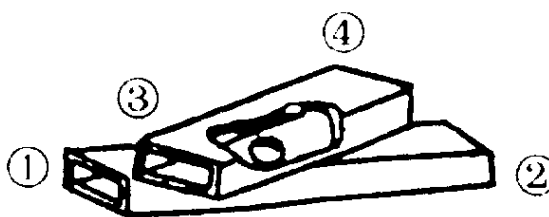
按输出的相位来分有 90° 定向耦合器和 180° 定向耦合器;

按耦合的强弱来分有强耦合中等耦合和弱耦合定向耦合器。

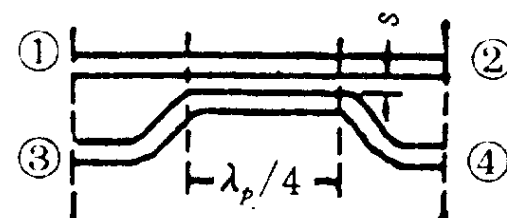
图中给出了几种定向耦合器的结构示意图,其中图(a)为微带分支定向耦合器,图(b)为波导单孔定向耦合器,图(c)为平行耦合线定向耦合器,图(d)为波导匹配双T,图(e)为波导多孔定向耦合器,图(f)为微带混合环。



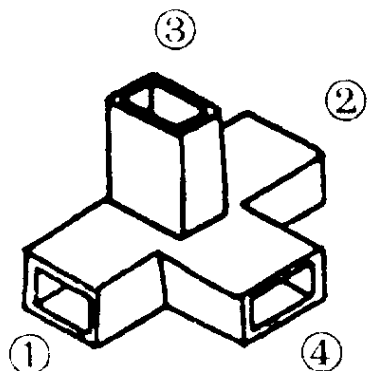
(a)



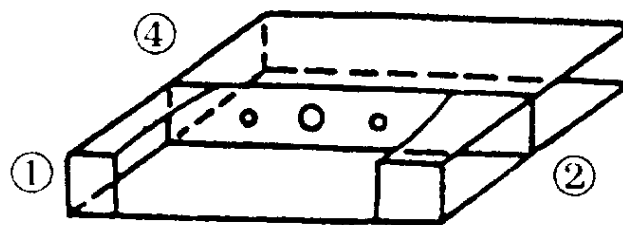
(b)



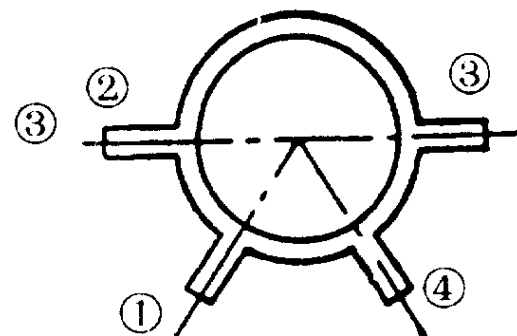
(c)



(d)

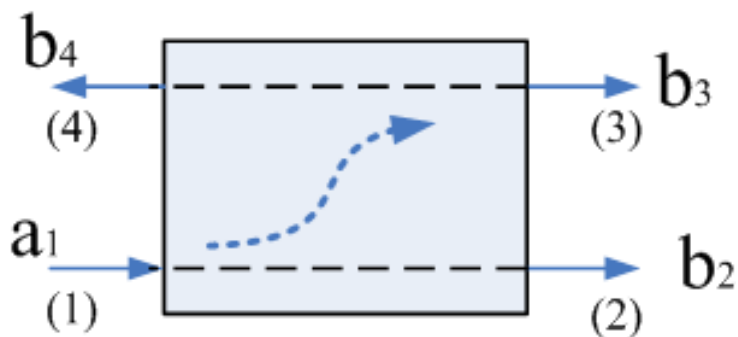


(e)



(f)





上图是定向耦合器的原理框图，有4个端口，两根传输线传输线之间有一定的耦合，当功率由端口1向端口2传输时，如果端口2,3,4都接匹配负载，则副线上只有端口3有能量输出端口4无能量输出，称为同向定向耦合器，并称端口2为直通端口，3为耦合端口，4为隔离端口。若端口2仍为直通端口，3为隔离端口，4为耦合端口，则称为反向定向耦合器。

一、定向耦合器的技术指标

定向耦合器的主要技术指标有耦合度、定向性、输入驻波比和工作带宽。

(一) 耦合度C

耦合度C定义为输入端口的输入功率 P_1 和耦合端口的输出功率 P_3 之比的分贝数即

$$C = 10 \lg \frac{P_1}{P_3} (dB)$$

当输入功率 P_1 一定时，耦合输出功率 P_3 越大，耦合度C越小， P_3 越小，C越大。由此可见耦合度的分贝数愈大耦合愈弱。

通常把耦合度为0~10dB的定向耦合器称为强耦合定向耦合器;把耦合度为10~20dB的定向耦合器称为中等耦合定向耦合器;把大于20dB的耦合度的定向耦合器称为弱耦合定向耦合器。

由于定向耦合器是个可逆四端口网络,因此耦合度又可表示为:

$$C = 10 \lg \left[\frac{\frac{|\tilde{U}_{i1}|^2}{2}}{\frac{|S_{13} \tilde{U}_{i1}|^2}{2}} \right] = 20 \lg \frac{1}{|S_{13}|} (dB)$$

(二)隔离度 D

定义为输入端的输入功率 P_1 与隔离端的输出功率 P_4 之比，用分贝表示为：

$$D = 10\lg \frac{P_1}{P_4} = 10\lg \frac{1}{|S_{41}|^2}$$

理想情况下，端口4应无输出，D应为无穷大，但是由于设计或加工不理想，有极小部分功率从端口4输出，使隔离度不再是无穷大。

定向性D'

通常采用耦合端口和隔离端口的输出功率之比的分贝数来表示定向耦合器的定向传输性能,称为定向性D', 即

$$D' = 10\lg \frac{P_3}{P_4} = 10\lg \frac{|S_{31}|^2}{|S_{41}|^2} = 20\lg \frac{|S_{31}|}{|S_{41}|} (dB)$$

上式表明, D' 愈大,隔离端口输出愈小,定向性愈好。在理想情况下, $P_4=0$,即 $D'=\infty$,实用中我们常对定向性提出一个最小值 D'_{\min} 。

(三)输入驻波比 ρ

将定向耦合器除输入端口外,其余各端口均接上匹配负载时,输入端的驻波比即为定向耦合器的输入驻波比。此时,网络的输入端的反射系数即为网络的散射参量 S_{11} ,故有

$$\rho = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}$$

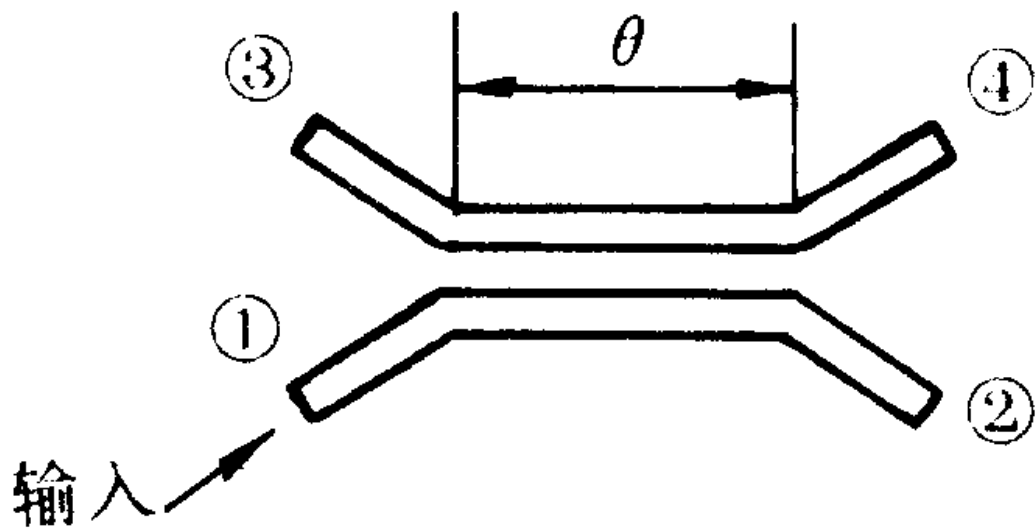
(四) 工作频带宽度

满足耦合度、隔离度（或定向系数）及输入端口驻波比的定向耦合器的工作频带宽度,简称工作带宽。

一、平行耦合线定向耦合器

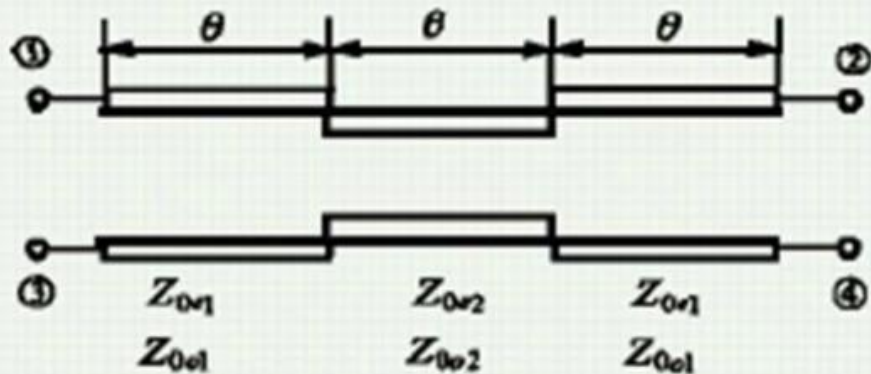
平行耦合线定向耦合器是TEM波传输线定向耦合器的一种主要形式，目前主要由耦合带状线和耦合微带线构成，具有反向耦合器的特点。

单节 $\lambda/4$ 波长平行
耦合线定向耦合线：

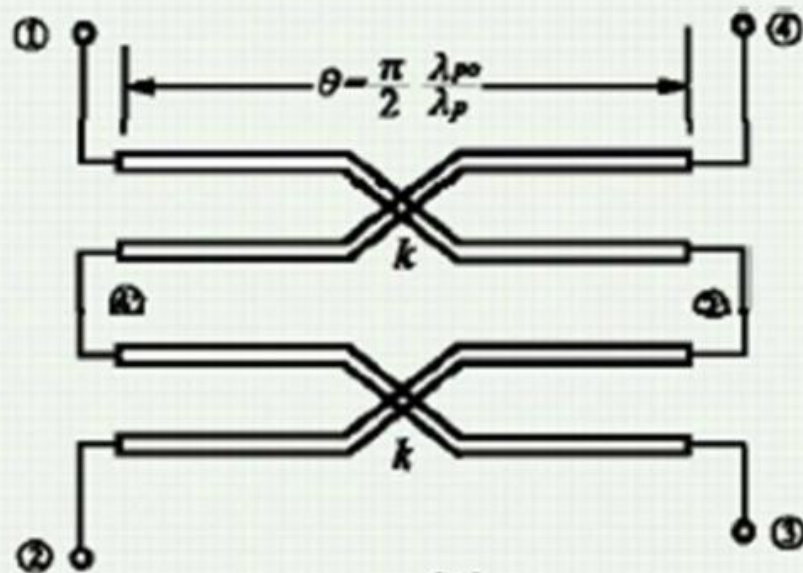


平行耦合线定向耦合器的组合

单节平行线定向耦合器只适用窄带弱耦合，难以实现强耦合，若要求强耦合或宽带耦合时，可将多个单节平行线耦合器进行**串接**或**级联**组合。



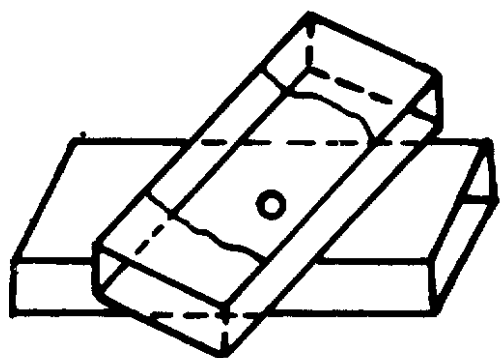
(a)



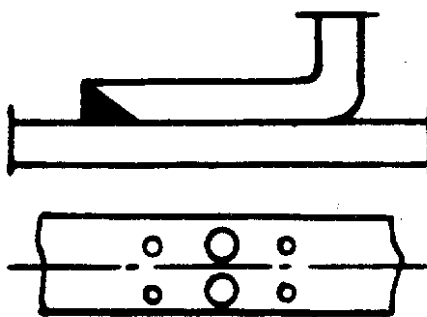
(b)

二、波导型定向耦合器

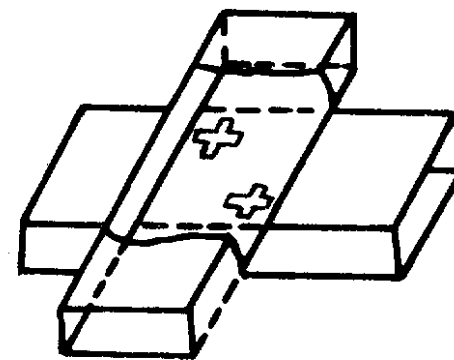
大多数波导定向耦合器的耦合都是通过主副波导的公共壁上的耦合孔来实现的。通过耦合孔将主波导中的电磁能量耦合到副波导中,并具有一定的方向性。副波导各端口的输出功率的大小,决定于耦合孔的大小形状和位置。



(a)

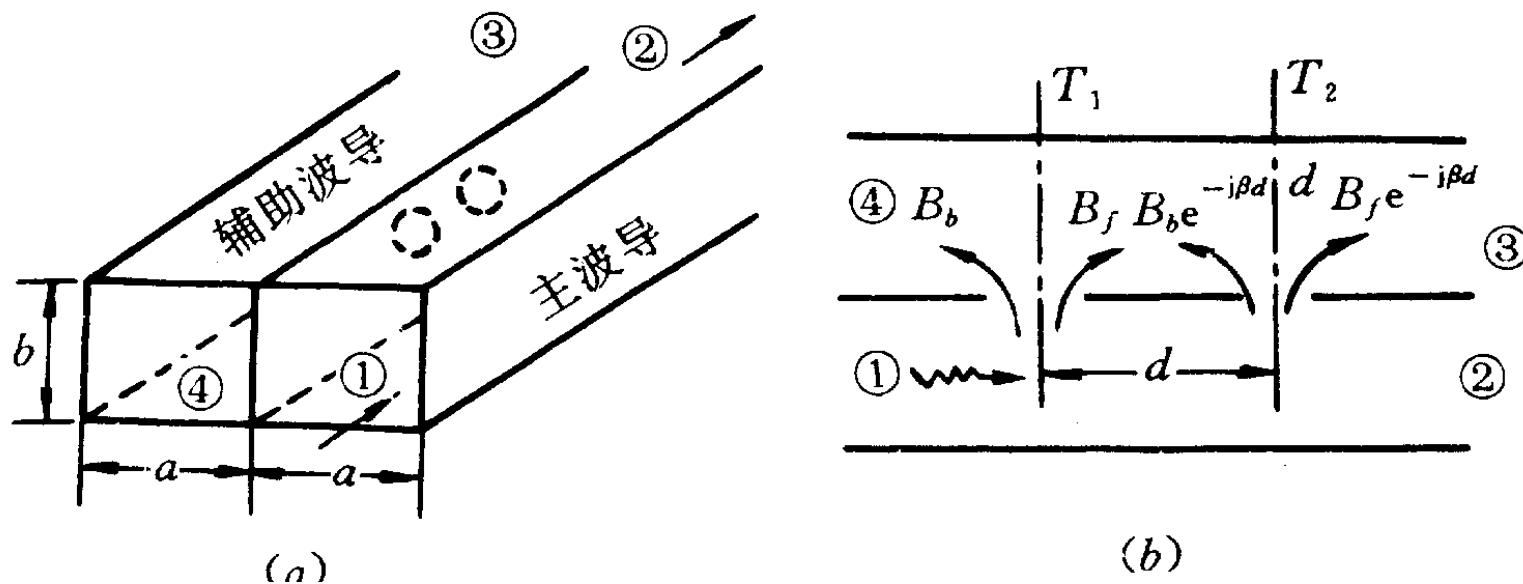


(b)



(c)

最简单的双孔定向耦合器,是在两个波导的公共窄壁上开有形状尺寸完全相同相距 d 为 $\lambda_{p_0}/4$ 的两个耦合孔,如图所示。在波导窄壁 $b/2$ 处,取一个水平纵截面,如(b)所示。下面说明这种定向耦合器的工作原理。



当 TE_{10} 模从主波导①端口输入向②端口传输时,主波导中 H_z 分量就会通过两个耦合孔耦合到副波导中并分别向③和④端口传输。到③端口的耦合波是通过两个耦合孔的正向耦合波的叠加,由于两个耦合波到③端口由路程引起的相位均为 βd ,故两耦合波在③端口为同相叠加而有输出,即

$$B_3 = B_{f1}e^{-j\beta d} + B_{f2}e^{-j\beta d} = (B_{f1} + B_{f2})e^{-j\beta d}$$

而④端口的耦合波是通过两个耦合孔的反向耦合波的叠加,由于两耦合波在④端口因路程引起的相位差为 $2\beta d = \pi$,故④端口为两个反向耦合波的反相叠加,即

$$B_4 = B_{b1} + B_{b2}e^{-j2\beta d} = B_{b1} - B_{b2}$$

当两个耦合孔大小形状均相等,且耦合孔很小时,则有

$$B_{f1} = B_{f2} = B_{b1} = B_{b2}$$

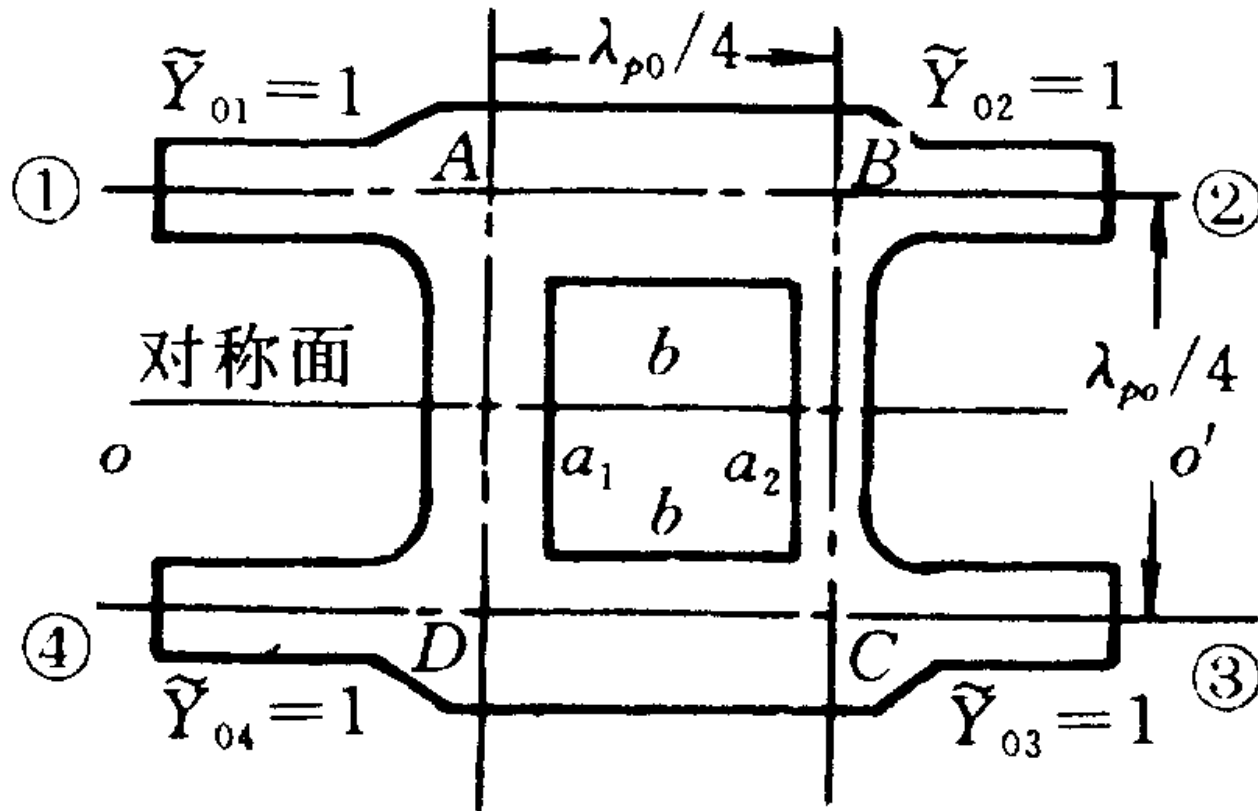
即表示③端口有输出, $B_3 = 2B_f e^{-j\frac{\pi}{2}}$, 而④端口无输出, $B_4=0$, 从而达到理想定向性。

三、分支定向耦合器

分支定向耦合器是由两根平行的主传输线和若干耦合分支线组成。分支线的长度及相邻分支线之间的距离均为 $\lambda_{p_0}/4$ 。这种分支定向耦合器可以用矩形波导同轴线带状线和微带线来实现。波导型分支定向耦合器是由E—T分支组成,根据E—T分支的性质,分支线是串联在主线上的,因此是串联结构。而同轴型带状型和微带型分支是与主线相并联的,因此是并联结构。由于微带型分支定向耦合器在微带电路中得到广泛应用,故这里以它为例来分析分支耦合器的工作原理和工作特性。

双分支定向耦合器的工作原理

这种定向耦合器是通过两个耦合波的路程差引起的相位差来达到定向性的。如图(a)的微带型双分支定向耦合器,当信号自①端口输入时,经过A点分A→B→C和A→D→C两路到达C点,由于两路程相同,故两路在C点相加,使③端口有输出;①端口的输入信号经过A点分A→D和A→B→C→D两路到达D点,由于两路的路程差为 $\lambda_{p0}/2$,即相位差为 π ,故两路在D点相抵消,使④端口无输出。故这种定向耦合器称为同向定向耦合器,由于②和③端口输出相位差 90° ,故又称为 90° 同向定向耦合器。



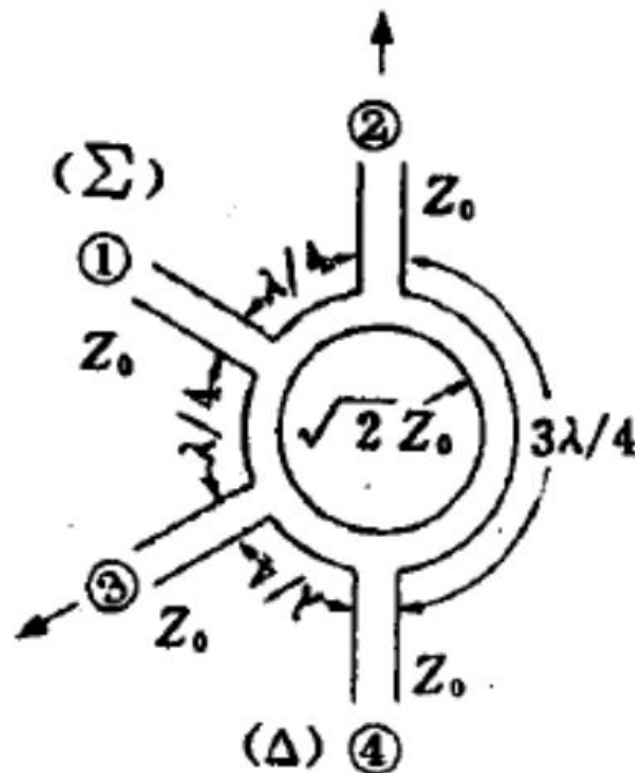
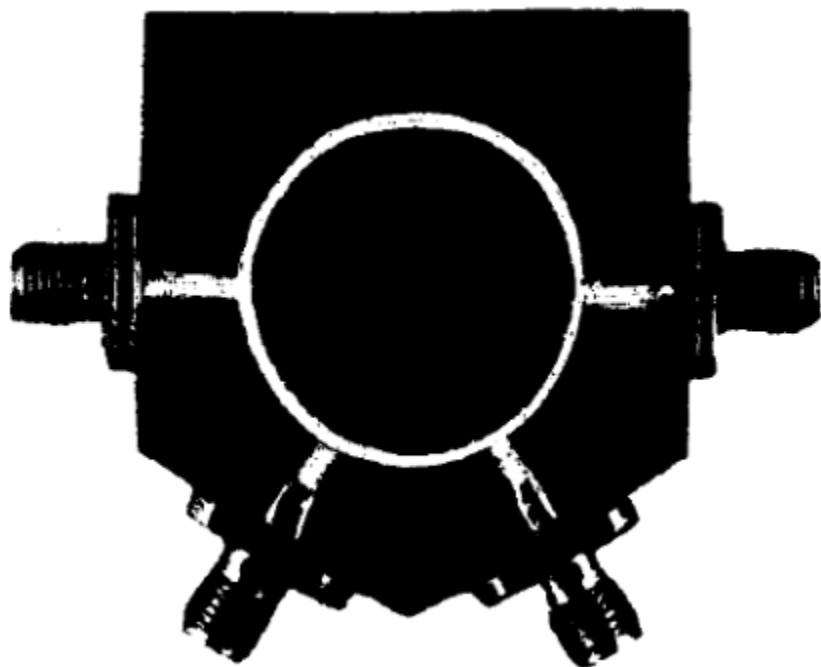
(a)

端口2为直通端，端口3为耦合端，端口4为隔离端。

端口2和端口3相位相差 $\pi/2$ 。

四、混合环

早期的混合环是波导制成的，功率容量大，但是体积大，笨重，在小功率微波集成电路中，常用微带混合环。环的全长为 $3\lambda/2$ ，4个分支线并联在环上。1端口输入，2,3端口等功率输出，4端口无输出。



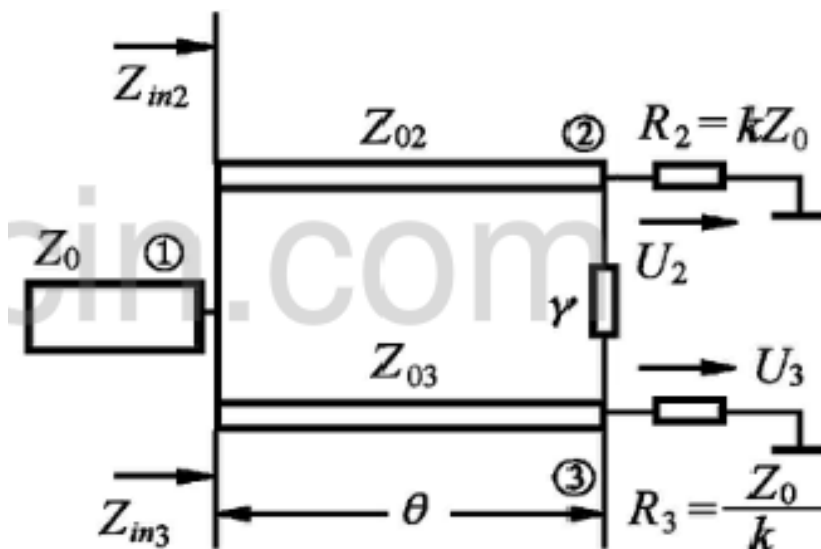
五、微带功分器

前面讲的定向耦合器可以作为功率分配器使用，但是它们结构复杂，成本高，如果单纯进行功率分配，常采用T形接头或T形接头的变形。

右图是微带三端口功分器原理图，信号由1端口输入从2,3端口输出，两段传输线在信号中心频率的电长度均为 $\lambda/2$ 。2,3端口无耦合。

功分器应满足的条件：

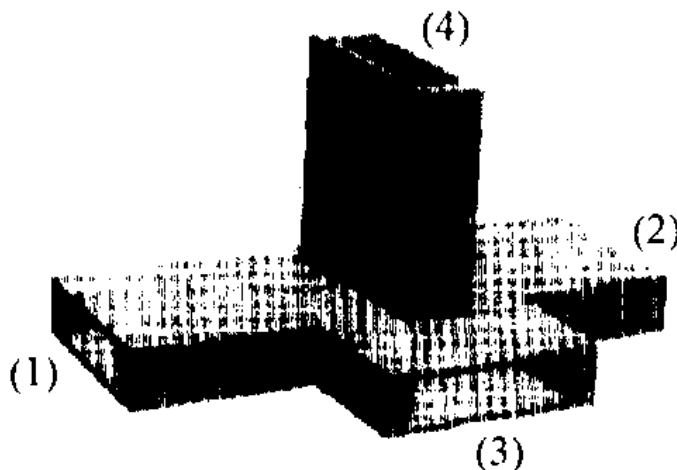
- 1、2,3端口输出功率比可为任意指定值；
- 2、1端口无反射；
- 3、2,3端口输出电压等幅同相



微带三端口功分器原理图

五、双T

将具有共同对称面的E—T接头和H—T接头组合起来,即构成双T接头,如图所示。一般把**E臂**称为④端口,**H臂**称为③端口,①和②臂称为平分臂,③和④臂称为隔离臂,根据E—T和H—T接头的特性可以得到双T接头的特性如下:



(1)当信号由E臂输入时,则①和②端口等幅反相输出,而H臂输出为零。

(2)当信号由H臂输入时,则①和②端口等幅同相输出,E臂输出为零。

(3)如果E和H臂均接匹配负载,当信号自①和②端口等幅同相输入时,则H臂有输出,而E臂输出为零;反之当信号自①和②端口等幅反相输入时,则E臂有输出,而H臂输出为零。可见E臂和H臂互为隔离,①和②臂互为平分。不难写出双T接头的散射参量矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & -S_{14} \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 \\ S_{14} & -S_{14} & 0 & S_{44} \end{bmatrix}$$

对于普通的双T接头,由于连接处结构突变,即使双T各臂均接匹配负载,接头处也会产生反射,为了要消除反射,通常在接头处加入匹配元件(如螺钉膜片或锥体),就可得到匹配的双T,它具有下列重要特性:

(1)匹配特性:在理想情况下,它的四个端口是完全匹配的,只要①和②端口能调到匹配,③和④端口一定匹配。即 $S_{11}=S_{22}=S_{33}=S_{44}=0$ 。

(2)隔离特性:当E和H臂具有隔离特性时,则①和②端口也具有隔离特性。

(3)平分特性:当信号自E臂输入时,则反相等分给①和②端口,即 $S_{14}=-S_{24}$;当信号自H臂输入时,同相等分给①和②端口,即 $S_{13}=S_{23}$;当信号自①端口输入时,则同相等分给③和④端口,即 $S_{31}=S_{41}$;当信号自②端口输入时,则反相等分给③和④端口,即 $S_{32}=-S_{42}$ 。故匹配双T的散射矩阵为

$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

匹配双T的应用:

1、平衡混频器

在接收机混频电路中，为使本振信号和接收信号分离，可将他们分别接在匹配双T的E臂和H臂上，混频晶体管接在主线的主臂中，这样本振和接收信号以相等的幅度，适当的相位进行混频。

2、阻抗测量电桥

由H臂输入的信号等幅同向的分配到1,2端口，1端口接已知阻抗 Z_0 ,2端口接被测阻抗 Z_x ，如果 Z_0 和 Z_x 相等，则E臂不会有输出，指示为零，否则，调整已知的 Z_0 ，当E臂输出指示为零，则测得 Z_x 和调整后的 Z_0 相等。