

微波带状綫設計 參考資料

李知新編

电子动态编辑部

西安电子416部队



毛 主 席 语 录

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

外国一切好的经验，好的技术都要吸收过来，为我所用。

学习外国的东西，是为了研究和发展中国的东西。

学习外国必须同独创精神相结合。

TN 019.2

前 言

目前我国电子工业在毛主席革命路线指引下，正在飞跃发展，微波集成电路在电子设备中已经广泛应用。

为了方便微带器件和微带电路的设计，我们搜集了一些国内外资料，编写成册，做为设计的参考，本资料包括基本的微带线，耦合微带线，缝隙线(槽线)和集总参数元件四部分的计算公式，曲线以及用电子计算机计算的数据表。

由于我们水平有限，路线觉悟低，同时，又缺乏实践经验，缺点和错误一定不少，请读者批评指正。

编 者

一九七三年元月

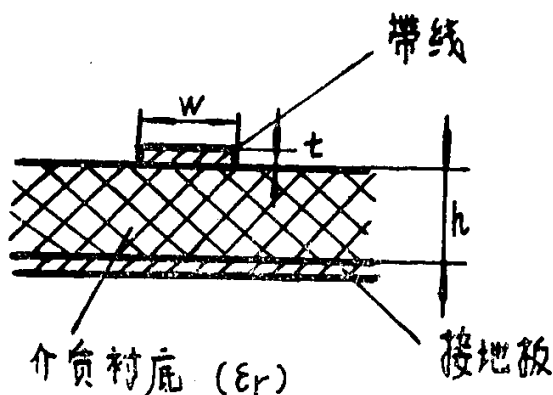
目 录

一、基本的微带线	(1)
1. 微带线的结构形式	(1)
2. 微带线的特性阻抗 Z_0 及有效介电常数 ϵ_{eff}	(1)
3. 微带线的导内波长 λ_g	(2)
4. 对有限厚度微带线线宽的修正	(2)
5. 微带线的损耗	(2)
6. 微带线的品质因数	(6)
7. 微带线的辐射	(7)
8. 耦合微带线	(8)
9. 基本的微带线电路	(1 1)
(1) 微带线拐角	(1 1)
(2) 两节四分之一波长阻抗变换器	(1 2)
(3) 指数变化的非均匀微带线	(1 5)
(4) 功率分配器	(1 7)
(5) 二分支线耦合器/阻抗变换器	(1 9)
(6) 三分支线耦合器	(2 0)
(7) 环形三分贝电桥	(2 1)
(8) 反向耦合器	(2 1)
(9) 微带线的不均匀性及其等效电路	(2 2)
10. 低通滤波器/阻抗变换器的设计	(3 1)
11. 带通滤波器的设计	(3 2)
12. 微带线与同轴线的过渡连接	(3 5)
二、由介质片隔开的平行带状传输线	(3 7)
1. 结构形式	(3 7)

2. 曲线算法	(3 7)
3. 查表算法	(4 0)
三、缝隙线(槽线)	(4 0)
1. 结构形式	(4 0)
2. 计算公式	(4 0)
3. 特性曲线	(4 3)
4. 缝隙线与微带线、同轴线的过渡连接	(4 8)
四、集总参数元件及其电路	(4 8)
1. 薄膜电容器	(4 8)
2. 电感	(4 9)
3. 电阻	(5 0)
4. 集总参数的方向耦合器	(5 1)
5. 应用举例	(5 5)
(1) 三分贝耦合器	(5 5)
(2) 6GC切比雪夫阻抗变换滤波器	(5 7)
(3) 2.25GC 功率放大器	(5 8)
五、数据表(附表)	(5 8)
1. 基本微带线的特性阻抗及有效介电常数数据表	(5 9)
2. 耦合微带线(耦合对)的阻抗及导内波长数据表	(1 5 1)
3. 滤波器设计数据表	(1 7 9)
4. 导体材料物理特性数据表	(2 1 1)
5. 衬底特性表	(2 1 2)
6. 介质薄膜特性表	(2 1 2)
7. 电阻薄膜特性表	(2 1 2)
8. 长度换算表	(2 1 3)

一、基本的微带线

1. 微带线的结构形式



w = 微带宽度
 t = 微带厚度
 h = 介质衬底厚度
 ϵ_r = 介质衬底材料的相对介电常数。

图 1 微带结构

2. 微带线的特性阻抗 Z_0

当介质衬底为空气 (即 $\epsilon_r = 1$) 时, 其特性阻抗为 Z_{01}

$$Z_0 = Z_{01} / \sqrt{\epsilon_e} \quad (1)$$

其中 ϵ_e —— 有效介电常数

当 $0 \leq \frac{w}{h} \leq 1$ 时

$$Z_{01} = 60 \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right) \quad \text{欧姆} \quad (2)$$

当 $\frac{W}{h} \geq 1$ 时

$$Z_{01} = \frac{120\pi}{\frac{W}{h} + 2.42 - 0.44 \frac{h}{W} + \left(1 - \frac{h}{W}\right)^6} \quad \text{欧姆} \quad (3)$$

式(2)(3)之精度为 $\pm 0.25\%$ 。

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式(4)之精确度为 $\pm 2\%$ 。

对于不同的 $\frac{W}{h}$ 和 ε_r 、 Z_0 和 ε_e 的数值列于附表1。

3. 微带线的导内波长 λ_g

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_e} \quad (5)$$

其中 λ_0 ——自由空间波长。

4. 对有限厚度微带线线宽的修正

$$W' = W + \Delta W \quad (6)$$

其中

$$\Delta W = \frac{t}{\pi} \left(1 + l_n \frac{4\pi W}{t} \right) \quad (7)$$

$$\frac{W}{h} \leq \frac{1}{2\pi}$$

$$\Delta W = \frac{t}{\pi} \left(1 + l_n \frac{2h}{\pi} \right) \quad (8)$$

$$\frac{W}{h} \geq \frac{1}{2\pi}$$

此修正对于 $\frac{\Delta W}{t} > 1.33$ 时是有效的。

5. 微带线的损耗

微带线的损耗来源于导体损耗和介质损耗，而导体损耗又包括带线的损耗和接地板的损耗。

微带线的总损耗为：

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_{c1} + \alpha_{c2} + \alpha_d \\ &= \frac{r_1 + r_2}{2Z_0} + \frac{gZ_0}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 α_{c1} ——导体损耗（奈贝/米）

α_{c2} ——接地板损耗（奈贝/米）

r_1 、 r_2 分别是导体和接地板的每米长的有效串联电阻。

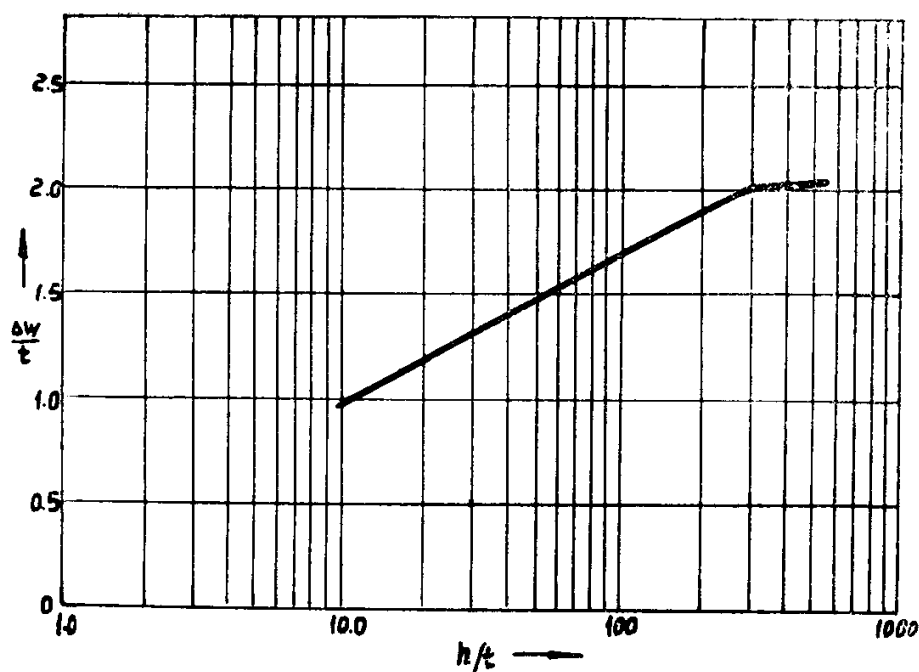


图 2 $\frac{\Delta W}{t}$ 与 h/t 关系曲线

如果带线的电流均匀分布并且在带线下面的接地板的电流分布也是均匀的，则导体损耗可以近似地由下式得到：

$$\begin{aligned} \alpha_c &= \alpha_{c1} + \alpha_{c2} \\ &= \frac{\sqrt{\pi f \mu}}{2Z_0 W} \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_{c1}}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{c2}}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

或

$$\alpha_c = \frac{R_{s1} + R_{s2}}{2Z_0 W} \quad (11)$$

其中 σ —— 电导率 (欧姆/米)

R_s —— 表面电阻率 (欧姆/米²)

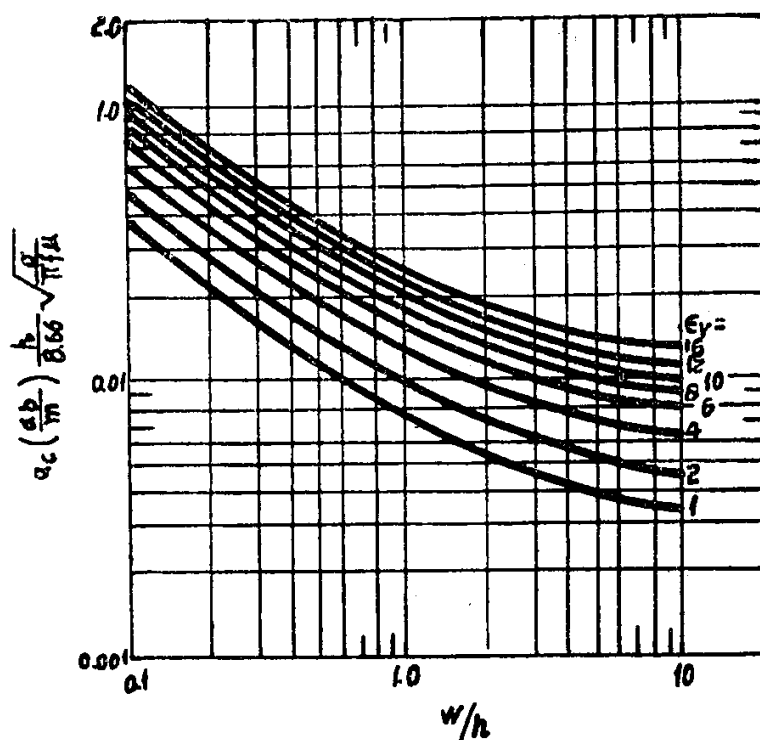


图3 导体损耗 α_c 与 W/h 的关系

介质损耗 α_d 不依赖于带线的形状比 $\frac{W}{h}$ ，但其损耗为：

$$\alpha_d = \frac{gZ_0}{2} = \frac{W}{2} \left(\frac{\mu}{\epsilon'} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \cdot \epsilon'' \quad (12)$$

其中 g ——总介质损耗的有效电导（欧姆/米）

ϵ' ——介质介电常数的实部。

ϵ'' ——介质介电常数的虚部。

应该指出的是微带线的导体损耗是与带线的厚度和表面光洁度紧密相关的。

带线损耗随其厚度的变化的通用曲线如图4所示，这是根据 $f = 8 \text{ GC}$ 铜的电导率为 $\alpha \sqrt{\frac{8\sigma}{5.7 \times 10^7 f}}$ (f 以 GC 为单位) 理论计算的。

我们知道，银、铜、金、铝虽然是良好的导体，但它们对介质的粘

附性能差，因此往往需要在介质表面先蒸发上一薄层粘附性能好的铬以后再蒸良好的金属导体材料。这样才能保证良好的粘附，应该指出的是铬层厚度对损耗有直接影响，如图 5 所示。

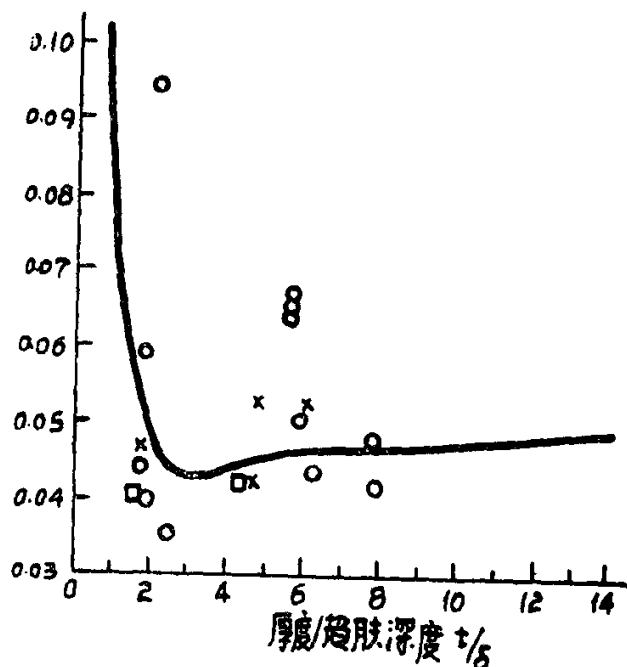


图 4 通用损耗曲线 $W/h = 1$, $\epsilon_r = 11$, $h = 0.508\text{mm}$

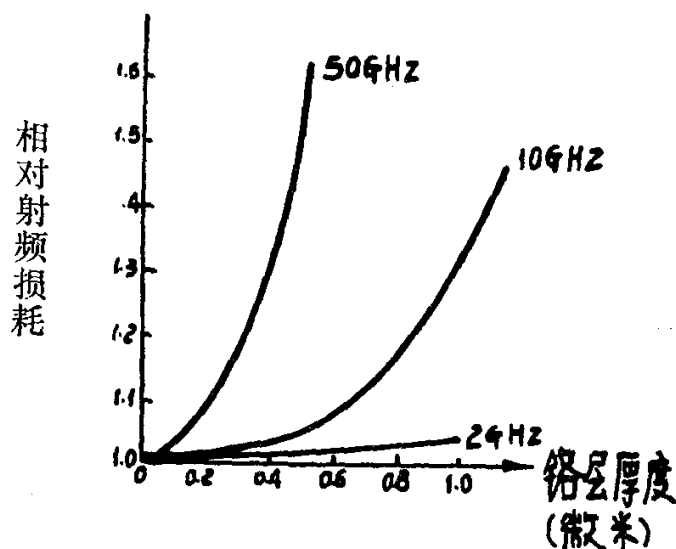


图 5 2GC—50GC 相对射频损耗（铬—金属损耗/金属损耗）的变化与铬层厚度的关系。

通常沉积200—400埃的铬，即使在较高的频率下，射频电阻的增加也是可以忽略的。最好避免使用铬、金组合，因为在高温下铬向金中扩散使电阻率显著增加。

导体材料特性		$f = 2\text{GC}$		
材 料	表面电阻 $\Omega/\square$	趋肤深度 微米	热胀系数 $^{\circ}\text{C} \times 10^6$	对介质 粘附
银、铜、金、铝	0.028~0.036	1.4~1.9	15~26	差
铬、钼、钛	0.072~0.18	4.0~10.5	8.5~9.0	好
钨、钨	0.047	2.6	6.0~4.6	尚可

表面光洁度与损耗的关系如图 6 所示

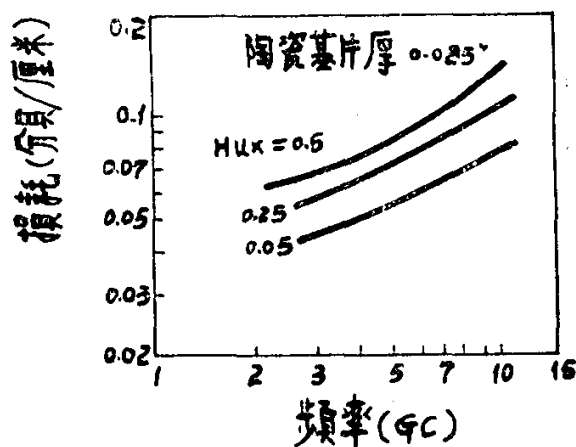


图 6 表面光洁度与损耗

6. 微带线的品质因数

由微带线所构成的空腔谐振器的品质因数可用下式表示

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (13)$$

其中 Q_c ——导体的品质因数

Q_d ——介质的品质因数

如果带线材料和接地板材料为同一材料制作，则其 Q_c 为

$$Q_c = \frac{2\pi f_0 Z_0^2 \cdot C}{r_s} \quad (14)$$

其中 f_0 —— 工作频率

C —— 单位长度电容量

r_s —— 单位长度总串联传导损耗

另外 Q_c 用归一化形式表示为

$$\frac{Q_c}{h\sqrt{f}} \cdot \frac{6}{\sqrt{\sigma}} = \frac{\lambda_{TEM}}{\lambda_g} \cdot \frac{W}{h} Z_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (15)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (16)$$

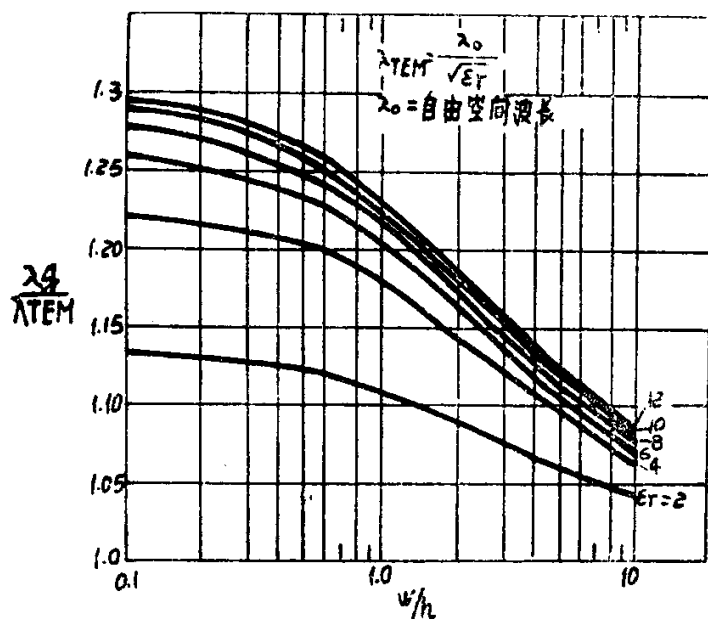


图 7 微带线的形状比 W/h 与 $\left(\frac{\lambda_{TEM}}{\lambda_g}\right)^{-1}$ 的关系曲线

7. 微带线的辐射

微带线可看成是开放系统，所以微带线的辐射是难免的，如果我们设计中选择 $h \ll \lambda$ 时则可采用下式计算

$$\frac{P_r}{P_o} = \frac{320}{Z_o} \left(\frac{\pi \sigma}{\lambda} \right)^2 \quad (17)$$

其中 P_r ——辐射功率
 P_o ——线中传输的总功率
 σ ——电导率

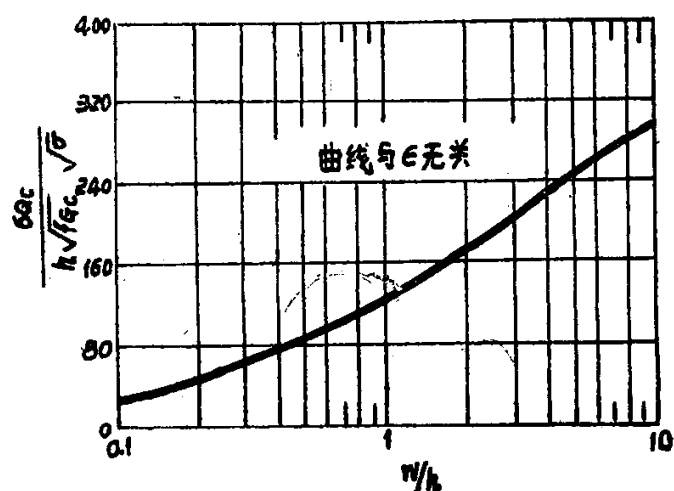


图8 Q_c 归一化值与 W/h 关系曲线

当 $h \ll \lambda$ 时功率大部分集中在微带线附近, 如图9所示。

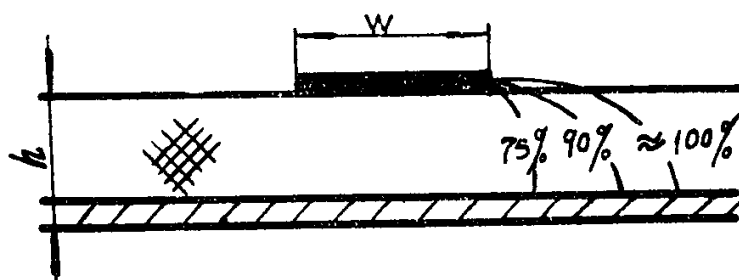


图9 微带线附近的功率分布

对于微带线开路端接近于衬底时, 则此开路端的辐射电阻 R_r 为

$$R_r = 240 \pi^2 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 F(\epsilon_e) \quad (18)$$

其中辐射因数 $F(\epsilon_e)$ 为

$$F(\epsilon_e) = \frac{\epsilon_e - 1}{\epsilon_e} - \frac{(\epsilon_e - 1)^2}{2\epsilon_e \sqrt{\epsilon_e}} \ln \frac{\sqrt{\epsilon_e} + 1}{\sqrt{\epsilon_e} - 1} \quad (19)$$

辐射电阻 R_r 与微带线特性阻抗之比等于从此开路不连续性 辐射的功率分数。

$$\frac{R_r}{Z_o} \propto \frac{P_r}{P_o} \quad (20)$$

即

$$\frac{\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 F(\epsilon_e)}{Z_o} \propto \frac{P_r}{P_o} \quad (21)$$

由式(20)可以看出微带传输线的开路辐射主要与传输线的特性阻抗, 衬底厚度, 有效介电常数有关, 从此可以看出衬底不应选的太厚, h 增大, P_r 也增大。

8. 耦合微带线

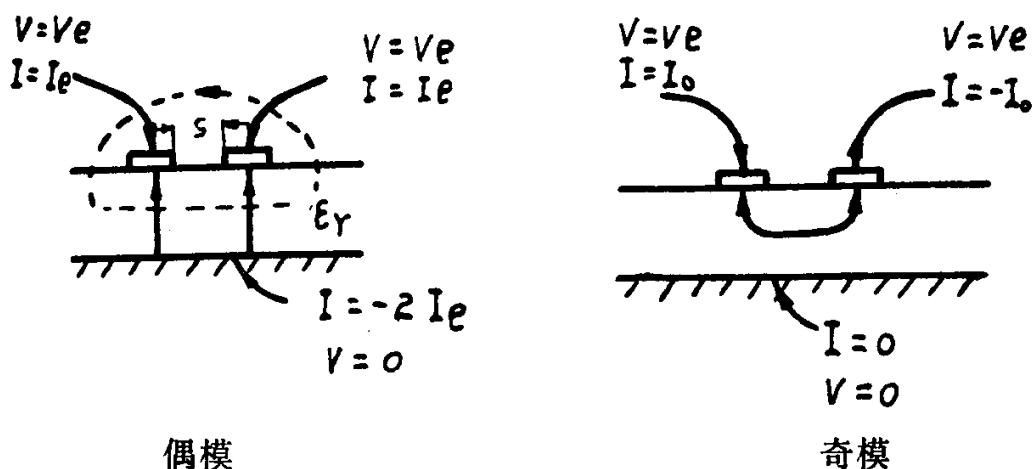


图10 耦合微带线的结构

奇模耦合: 两根带线中传播方向相反的耦合称为奇模耦合, 相应的特性阻抗为奇模阻抗。

偶模耦合: 两根带线中传播方向相同的耦合称为偶模耦合, 相应的特性阻抗为偶模阻抗 Z_{oe} ,

奇模阻抗 Z_{o0} 为:

偶模阻抗

$$Z_{oe} = \frac{1}{C \sqrt{C_{e1} C_{e2}}}$$

奇模阻抗

$$Z_{oo} = \frac{1}{C \sqrt{C_{o1} C_{o2}}}$$

偶模波长

$$\lambda_{ge} = \lambda \sqrt{\frac{C_{e1}}{C_{e2}}}$$

奇模波长

$$\lambda_{go} = \lambda \sqrt{\frac{C_{o1}}{C_{o2}}}$$

其中 λ —— 自由空间波长

C —— 自由空间光速 $C = 3 \times 10^8$ 米/秒

$$C_{e1} = C_e / \epsilon_r = 1$$

$$C_{e2} = C_e / \epsilon_r = K$$

$$C_{o1} = C_o / \epsilon_r = 1$$

$$C_{o2} = C_o / \epsilon_r = K$$

$$\begin{aligned} C_e = & \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\alpha_n^2} \epsilon_o (\epsilon_r \coth \alpha_n h + 1) \left\{ - \frac{24(1-A)}{S^2 \alpha_n^2} \sin \frac{\alpha_n S}{2} \right. \\ & + \frac{24(1-A)}{S^3 \alpha_n} \left[\frac{S^2}{4} - \frac{2}{\alpha_n^2} \right] \cos \frac{\alpha_n S}{2} + \frac{48(1-A)}{S^3 \alpha_n^3} \\ & + \frac{B^2}{\alpha_n^2 + B^2} \sin \alpha_n \left(W + \frac{S}{2} \right) + \frac{B \alpha_n}{\alpha_n^2 + B^2} \cos \alpha_n \left(W + \frac{S}{2} \right) \\ & + \frac{\alpha_n}{\alpha_n^2 + B^2} e^{-3B \left(W + \frac{S}{2} \right)} \left[\alpha_n \sin 4 \alpha_n \left(W + \frac{S}{2} \right) \right. \\ & \left. \left. - B \cos 4 \alpha_n \left(W + \frac{S}{2} \right) \right] \right\}^2 \end{aligned}$$

$$C_0 = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\gamma_n a} \epsilon_0 (\epsilon_r \coth \gamma_n h + 1) \left\{ \frac{4}{S \gamma_n} \sin \gamma_n \frac{S}{2} \right. \\
+ \frac{8}{S^2 \gamma_n^2} \left(\cos \gamma_n \frac{S}{2} - 1 \right) - \frac{B^2}{\gamma_n^2 + B^2} \cos \gamma_n \left(W + \frac{S}{2} \right) \\
+ \frac{B \gamma_n}{\gamma_n^2 + B^2} \sin \gamma_n \left(W + \frac{S}{2} \right) - \frac{\gamma_n}{\gamma_n^2 + B^2} e^{-3B \left(W + \frac{S}{2} \right)} \\
\left. \left[\gamma_n \cos 4 \gamma_n \left(W + \frac{S}{2} \right) + B \sin 4 \gamma_n \left(W + \frac{S}{2} \right) \right] \right\}^2$$

$$a = 4 \left(W + \frac{S}{2} \right)$$

$$\gamma_n = \frac{n\pi}{a}$$

$$\alpha_n = \frac{2n-1}{2} \cdot \frac{\pi}{a}$$

$$A = \left[1 - \left(\frac{1 + l_n(K+5)}{10} \right) S/h \right]$$

$$B = \frac{1 + l_n \sqrt{K+2}}{W}$$

K —— 相对介电常数 $\epsilon_r = K$

$\epsilon_0 = 0.886 \times 10^{-11}$ 秒/欧姆·米

$Z_{00}, Z_{0e}, \lambda_{ge}/\lambda$ λ_{g0}/λ 值查附表 2

9. 基本的微带线电路

(1) 微带线拐角

微带线90°拐角的最佳尺寸

$$X_1 = 0.565 W_1$$

$$X_2 = 0.565 W_2$$

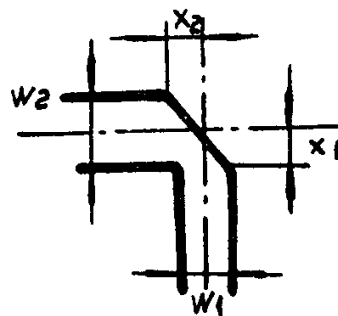


图11 直拐角的尺寸

拐角的等效电长度

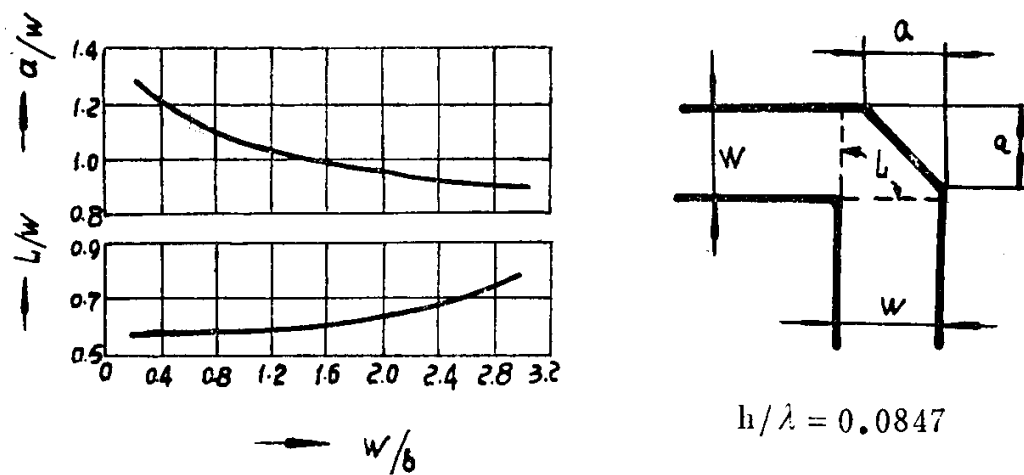


图12 直拐角及等效电长度

(2) 两节四分之一波长阻抗变换器

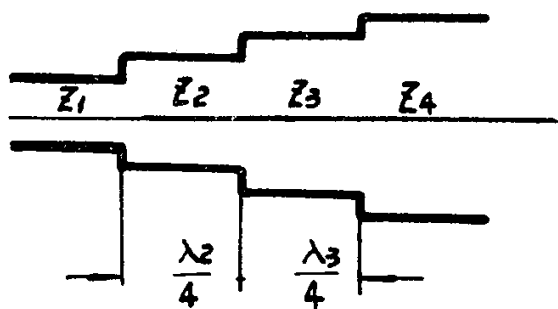


图13 两节四分之一波长阻抗变换器

$$Z_2/Z_1 = Z_4/Z_3 = (Z_4/Z_1)^{\frac{1}{4}}$$