

第3章 微波传输线

- 3.1 TEM, TE和TM波的一般解
- 3.2 矩形金属波导
- 3.3 圆波导
- 3.4 同轴线的高次模及单模传输
- 3.5 带状线和微带
- 3.6 介质波导

3.5 带状线和微带

高频设备：如手机

要用平面传输线

3.5 带状线和微带

什么是带状线和微带（平面传输线），如何设计

微波集成电路中常用的4种基本平面传输线

带状线和微带

目前，微波技术正朝着两个主要方向迅速发展

一个方向是继续向高频段即毫米波和亚毫米波段发展

另一方向是大力研制微波集成电路

这就要求研制一种体积小、重量轻、平面型的传输线

微波平面传输线：

在微波集成电路中充当连接元件和器件的传输线，同时它还可用来构成电感、电容、谐振器、滤波器、功分器、耦合器等元器件。

简介

发展趋势

➤ 频率范围在扩展

毫米波 → 子毫米波

➤ 微波集成电路 (MIC)

体积小 & 重量轻

1965: 出现第一块 MIC

利用平面传输线实现



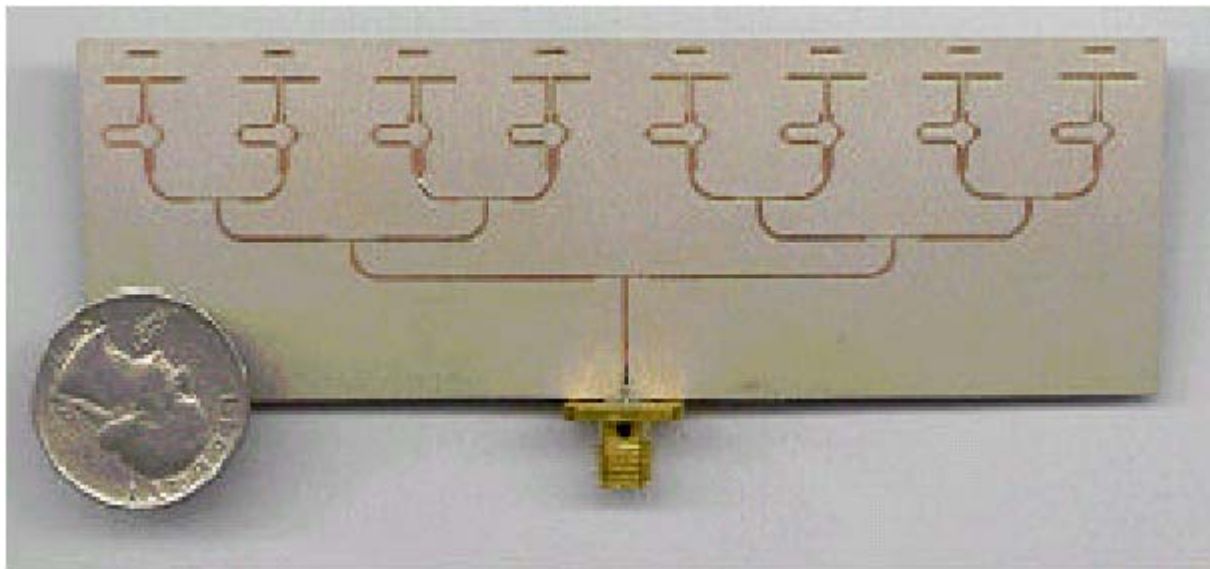
▣ 带状线 (对称)

▣ 微带线 (非对称)

- 优点: 几十年发展历史 (成熟)、应用最广、体积小、重量轻、易于批量生产、成本低、可用光刻工艺制作、工作频段为 100M - 30GHz
- 缺点: 损耗大、Q值低和难以承受较大功率

和同轴线以及波导相比

平面传输线例



特点

- (1) 扁平、小尺寸、轻——低损耗
- (2) 所有线集成在一个平面内——易制作

先用模板，再光刻，感光部分刻蚀或腐蚀掉，从而形成微波集成电路。

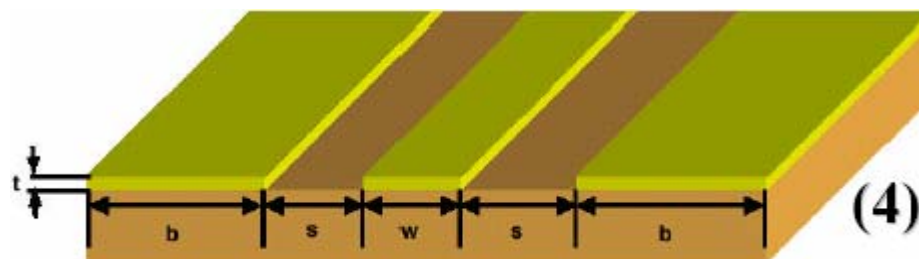
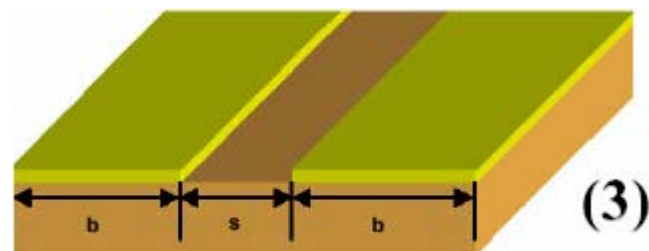
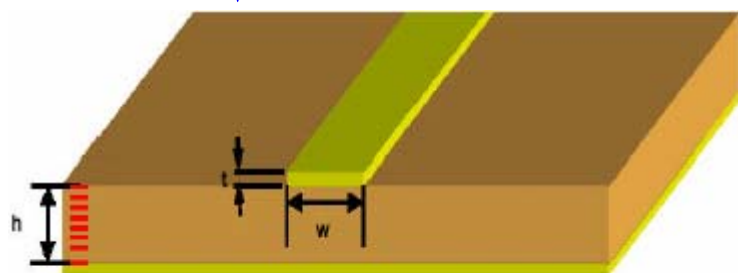
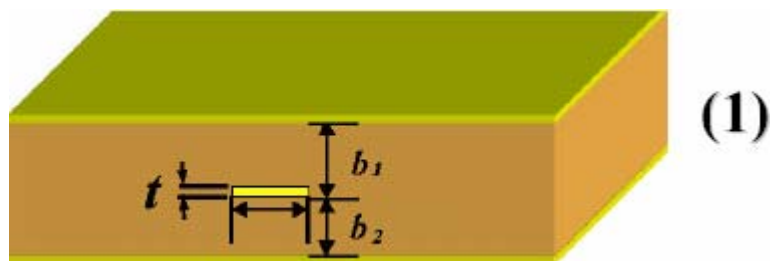
4种平面传输线

1、带状线

2、微带线

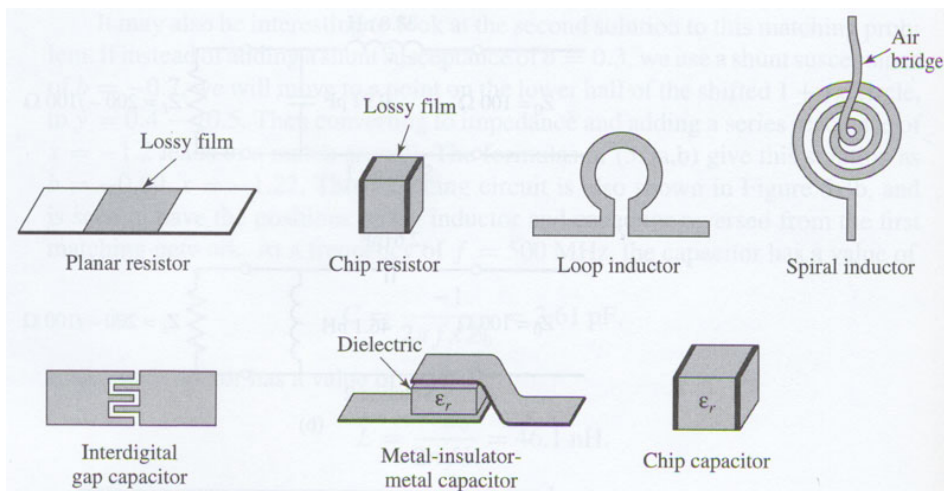
3、槽线

4、共面带状线

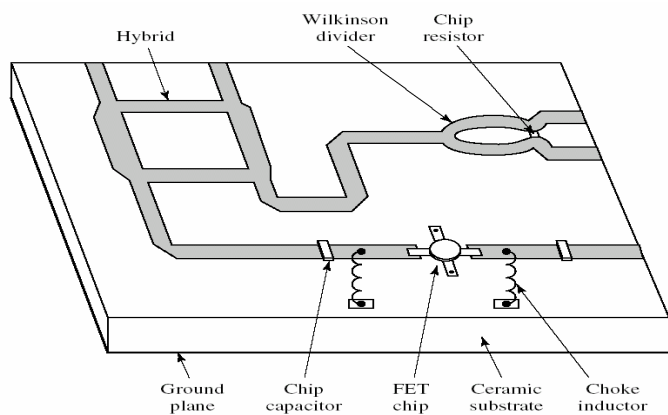


Symmetry 对称

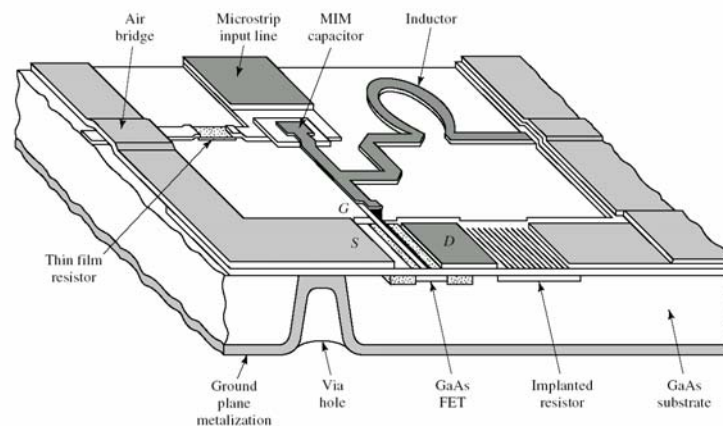
Asymmetry 非对称



微波集成电路中用的
集总参数元件



混合微波集成电路



单片微波集成电路

平面传输线的应用

减少元件和电路的几何尺寸，以达到增加电路的封装密度、减少功耗和减小信号传播延迟的目的

传输线、波导比较

特性	同轴线	波导	平面传输线
模式：主要模式 其他	TEM TM,TE	TE10 TM,TE	
色散	无	中	
带宽	高	低	
损耗	中	低	
功率容限	中	高	
尺寸	大	大	
制作难度	中	中	
与其他元件集成	难	难	

平面传输线研究内容

(1) 结构

(2) 电磁场分布

(3) 特性阻抗

(4) 损耗

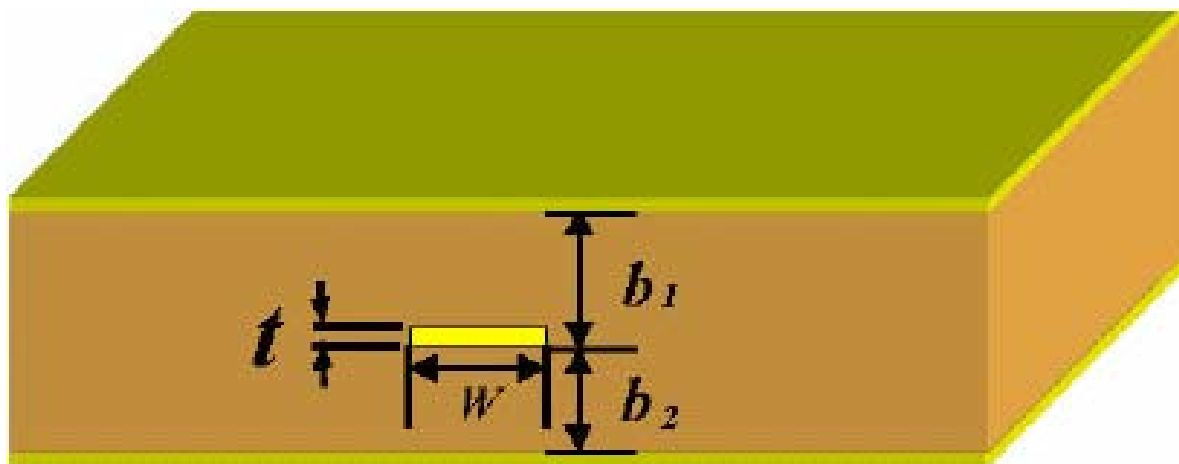
1、带状线

(1) 结构

两个接地宽平板

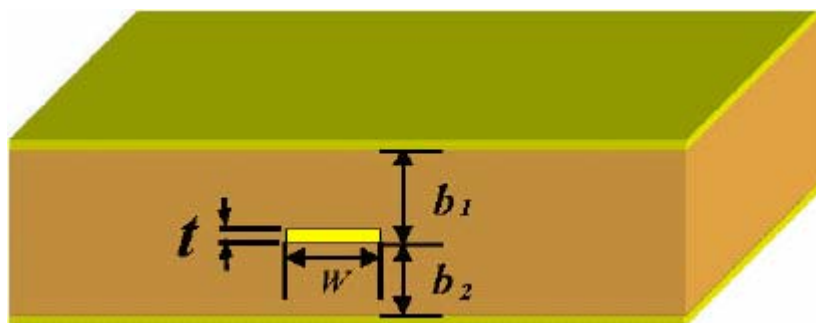
一个窄导电带($W \gg t$)

一个低损电介质基底

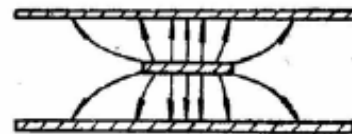
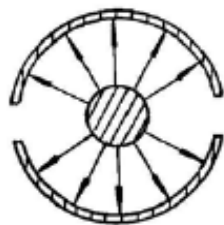
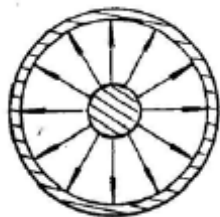


1、带状线

实际制作：在一块厚度为 b_2 的接地基片上，将中心导带腐蚀成要求形状，然后用另一个厚度为 b_1 的接地基片覆盖。



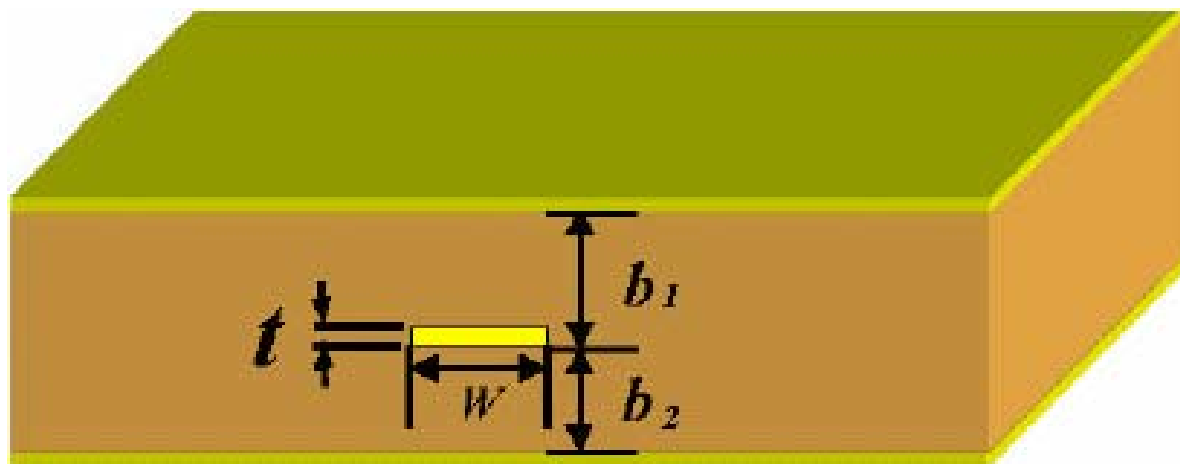
可以看成由同轴线演变过来：将同轴线外导体对半剖开，然后把这两半导体分别向上、下方向展平，再把内导体做成扁平带状，即构成带状线。



1、带状线

由上述演化过程可见，带状线中的电磁场矢量均匀分布在其横截面内而无纵向分量，故带状线中的工作波型是TEM波。因而带状线也属于TEM波传输线

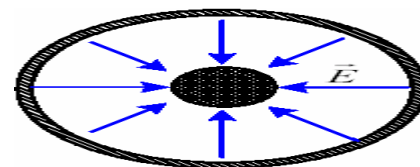
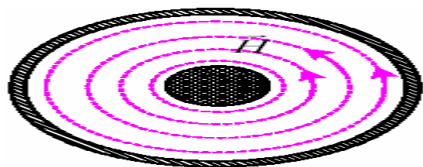
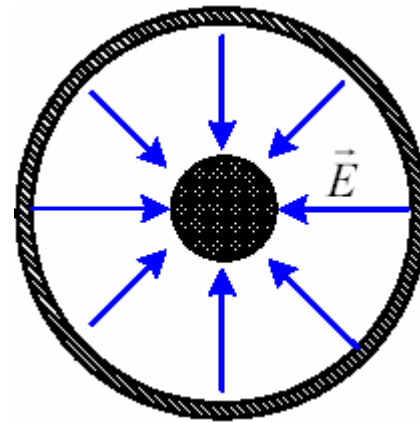
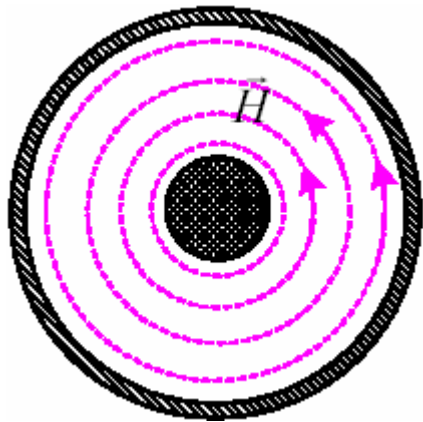
即由于带状线有两个导体和一个均匀介质，故可以存在TEM模，这是常用的工作模式，通常高阶TE和TM模式需要避免。



1、带状线

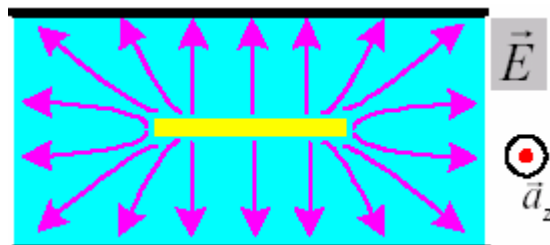
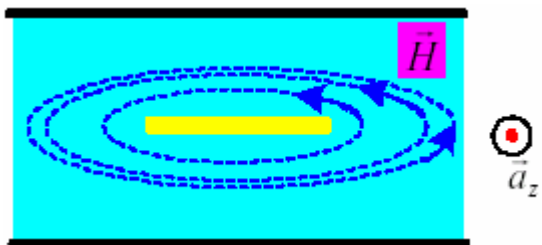
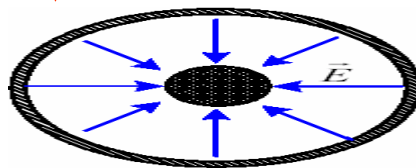
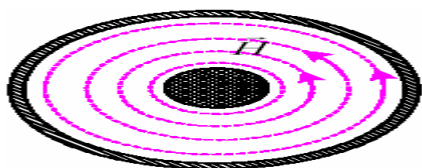
(2) 电磁场分布

回忆同轴线电磁场分布

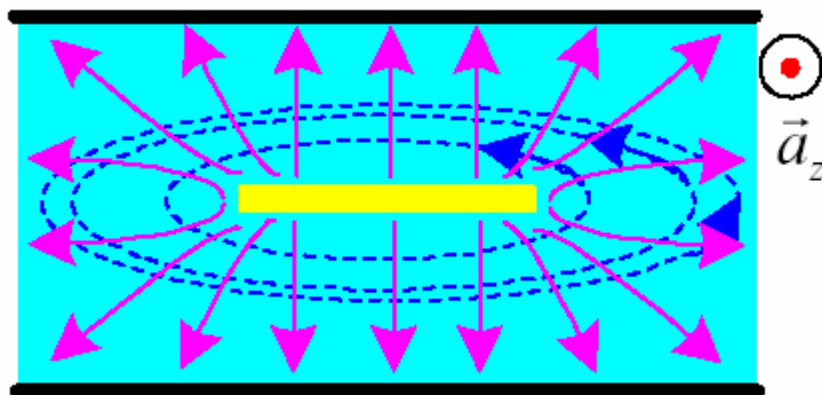


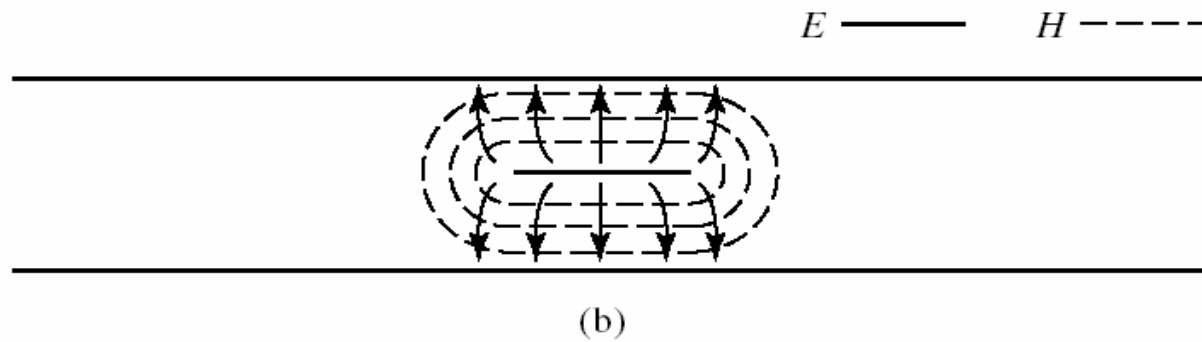
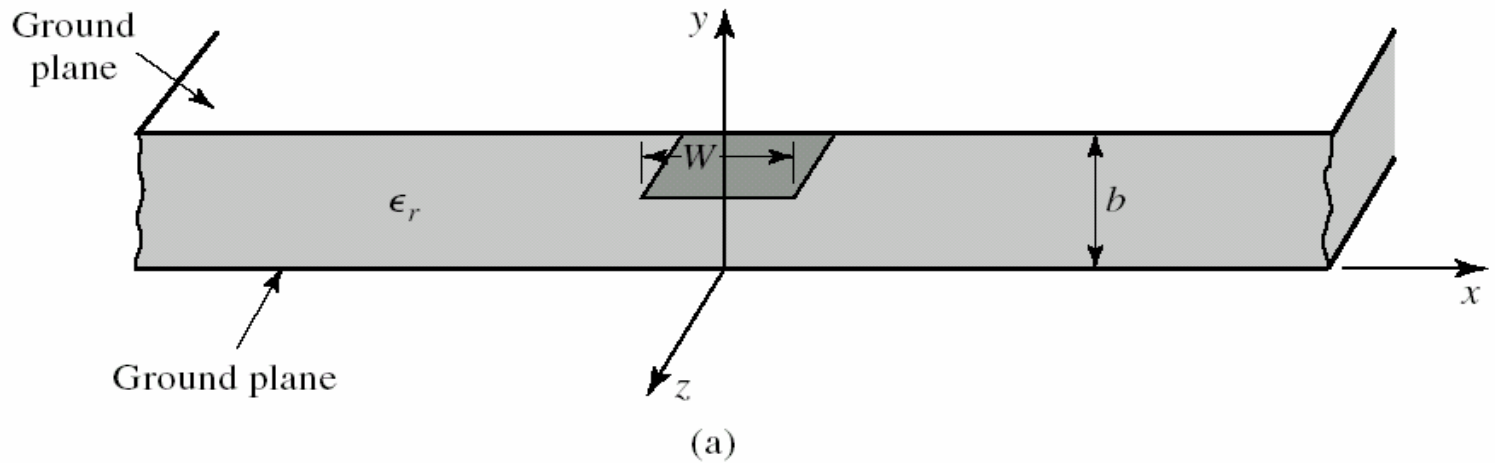
1、带状线

(2) 电磁场分布

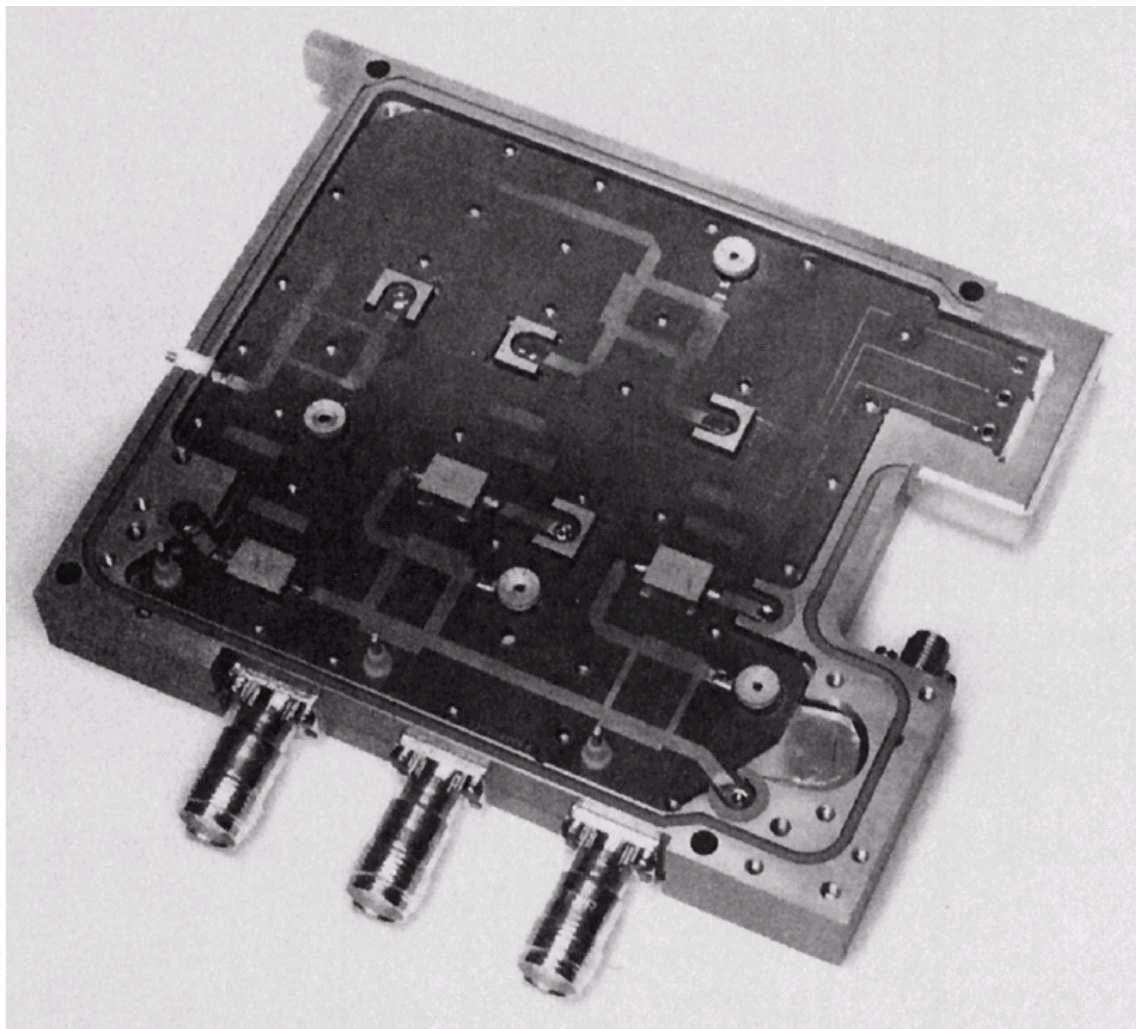


合成





带状传输线. (a) 几何结构. (b) 电力线和磁力线.

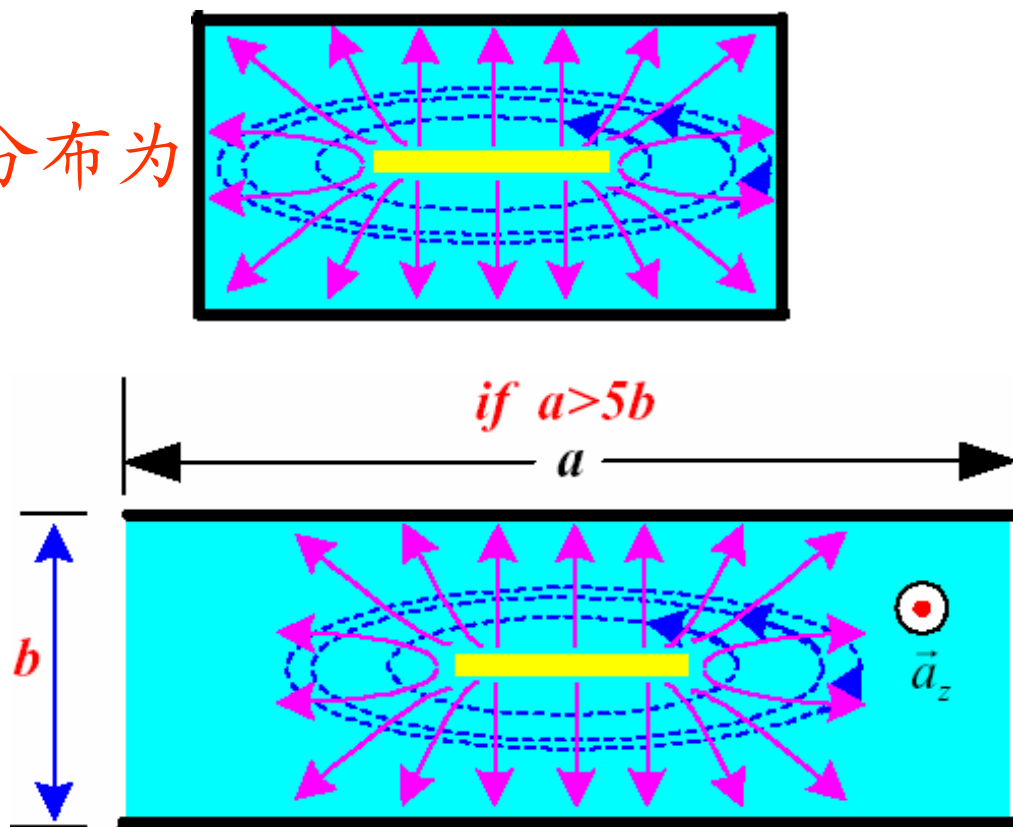


带状线电路组件，有四个正交混合网络、
开路可调短截线及同轴接头

1、带状线

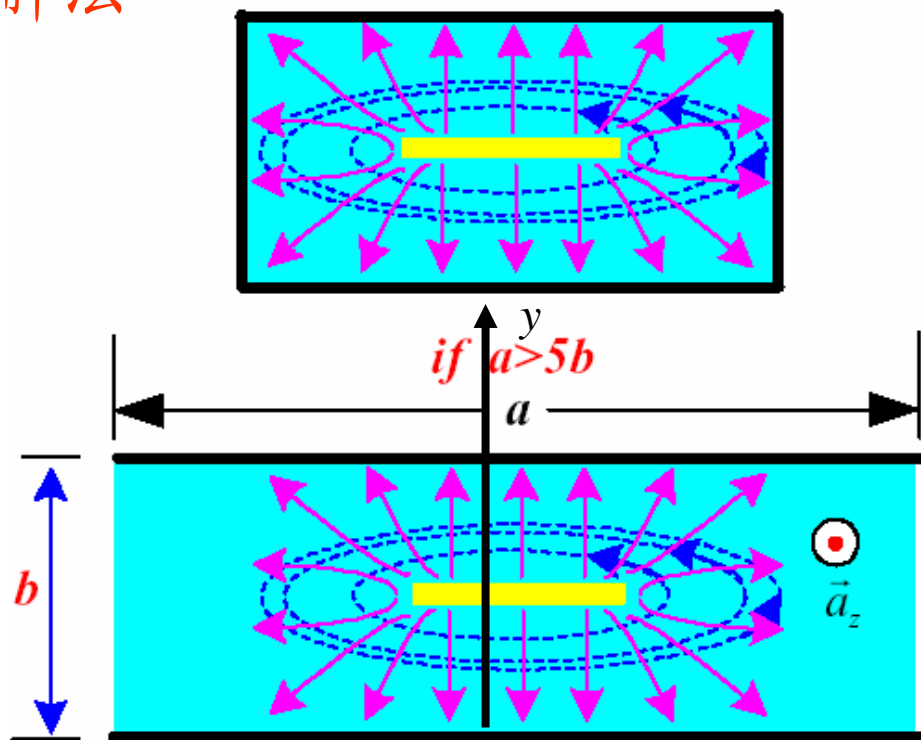
(2) 电磁场分布

如果封闭分布为



1、带状线

近似静电场解法



侧面不封闭

$$\begin{array}{ccccccc} \Phi(x, y) & \Rightarrow & E_y & \Rightarrow & \left| \begin{array}{c} V \\ D \end{array} \right. & \Rightarrow & C \Rightarrow Z_0 \\ & & & & \rho_s \Rightarrow Q & & \end{array}$$

满足拉氏方程

1、带状线

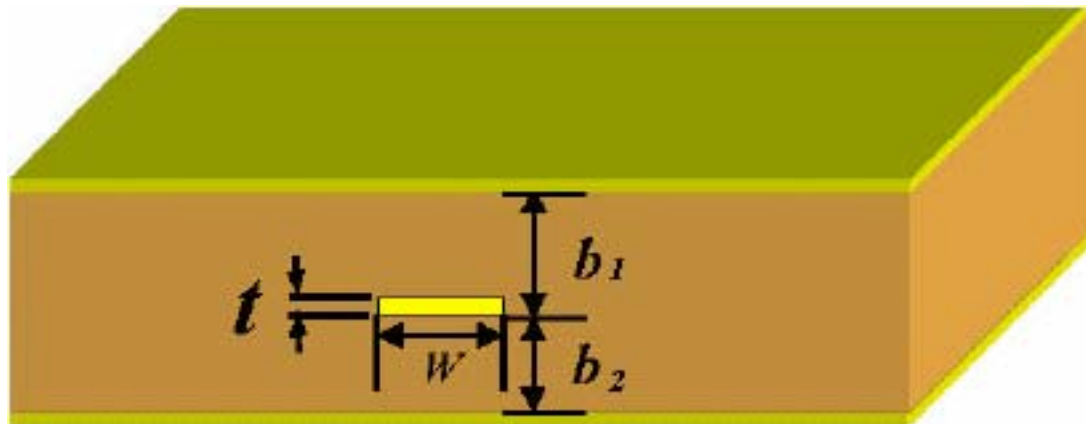
$$\operatorname{sech}(x) = \frac{1}{\cosh(x)} = \frac{2}{e^x + e^{-x}}$$

(3) 特性阻抗

a、如果 $W \leq \frac{1}{2}b$ 窄导体带 $Z_0 = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(2 \frac{(1 + \sqrt{k})}{(1 - \sqrt{k})} \right)$ $k = \operatorname{sech} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{W}{b} \right)$

b、如果 $W > \frac{1}{2}b$ 宽导体带 $Z_0 = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{\pi^2}{\ln \left(2 \frac{(1 + \sqrt{k'})}{(1 - \sqrt{k'})} \right)}$ $k' = \sqrt{1 - k^2}$

$$b = b_1 + b_2$$

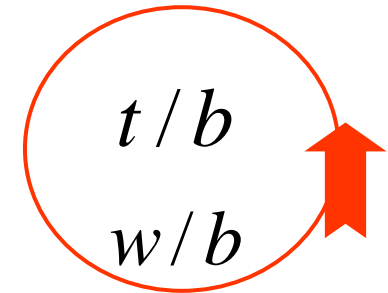
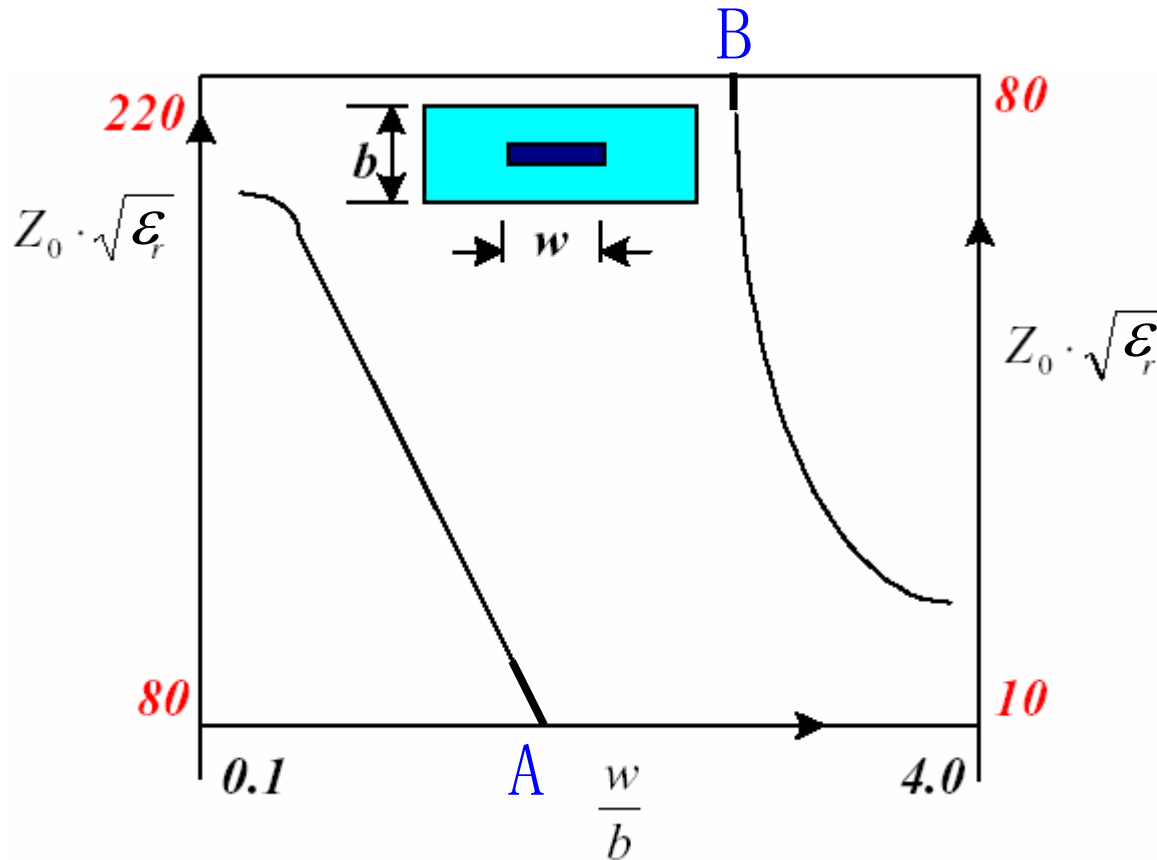


1、带状线

同一条线

(3) 特性阻抗

双坐标: A和B点是同一点



Z_0



当线宽度 w 增加时,
特性阻抗下降

Z_0 b ϵ_r \rightarrow w ?

通常设计中已知 Z_0 , 高度 b 和介电常数 ϵ_r , 需要反过来计算带线宽度 w ,

1、带状线

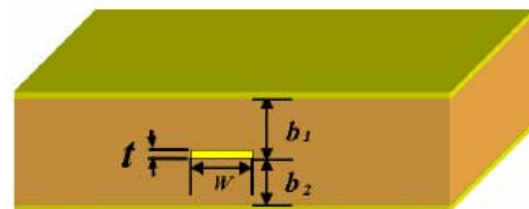
(4) 损耗

基底介质损耗

介质损耗 + 导体（包括接地板损耗）

导体带、接地板的电阻损耗

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c$$



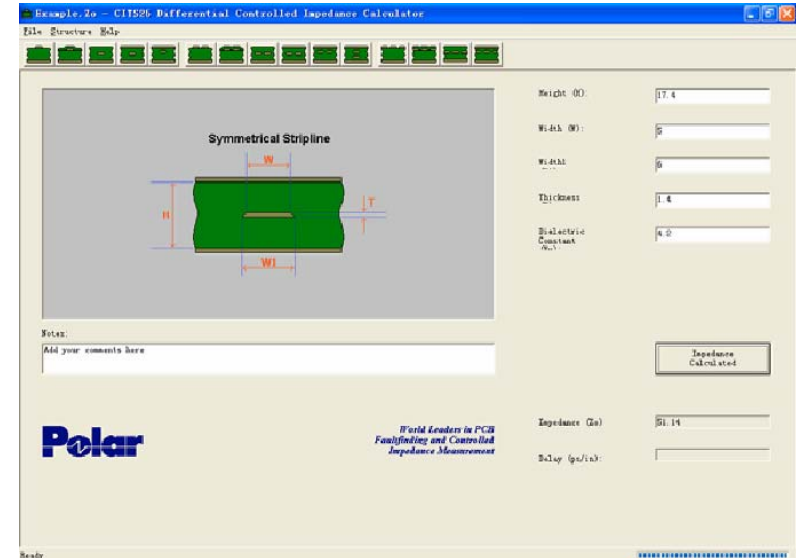
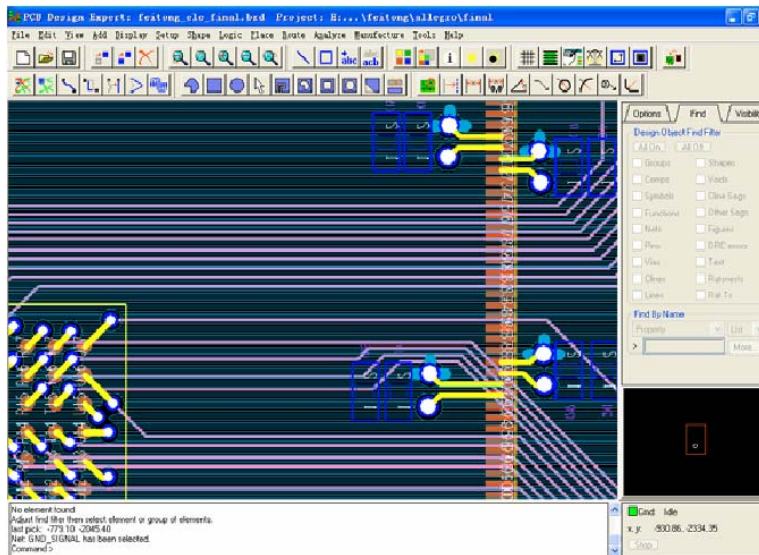
$$\alpha_d = \frac{1}{2} G Z_c = \frac{1}{2} G \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{27.3 \sqrt{\epsilon_r}}{\lambda_0} \operatorname{tg} \delta \quad \alpha_c = \frac{1}{2} \frac{R}{Z_c}$$

(介质损耗角正切)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G}{\omega C}$$

$$\alpha = 1/2 \left(R \sqrt{C/L} + G \sqrt{L/C} \right)$$

带状线软件设计示例



H:17.4 W:5 W1:6 T:1.4 Er:4.2 ==> Impedance:51.14

2、微带线

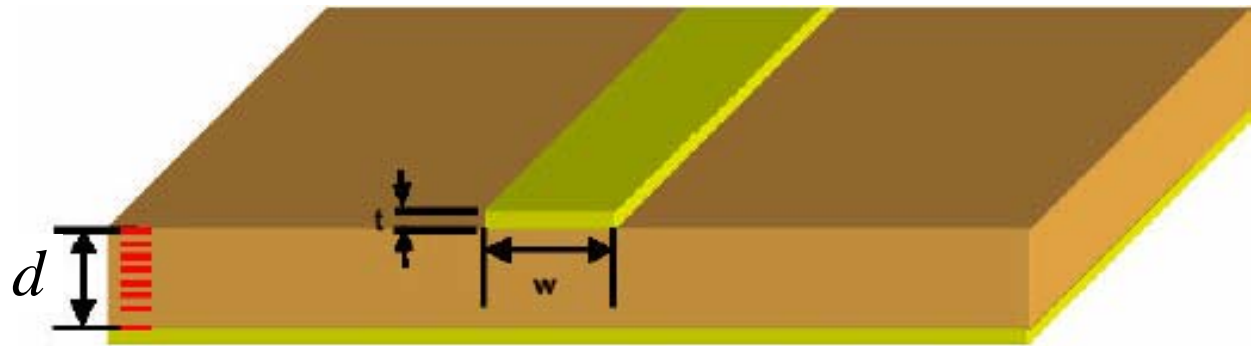
微带是微波集成电路（MIC）中使用最多的一种传输线

（1）结构

一个薄带

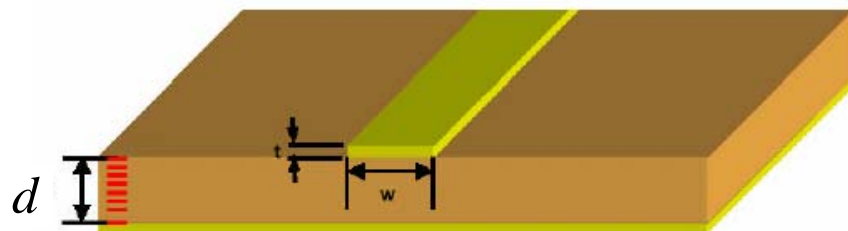
一个接地板

一个低损电介质基底



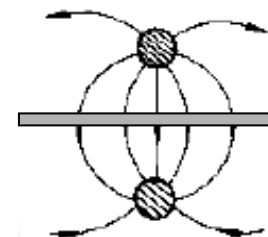
$$t \ll d, t \rightarrow 0$$

2、微带线

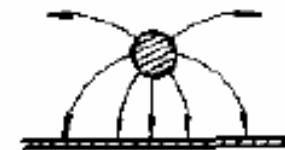


微带看成是由平行双导线演变而成。

在平行双导线两圆柱导体间的中心对称面上放一个无限薄的导电平板，由于所有电力线都与导电平板垂直，因此不会扰动原电磁场分布。



去掉平板一侧的圆柱导体，另一侧的电磁场分布不受影响。于是，一根圆柱导体与导电平板构成一对传输线

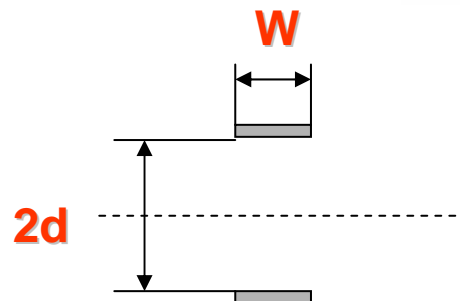


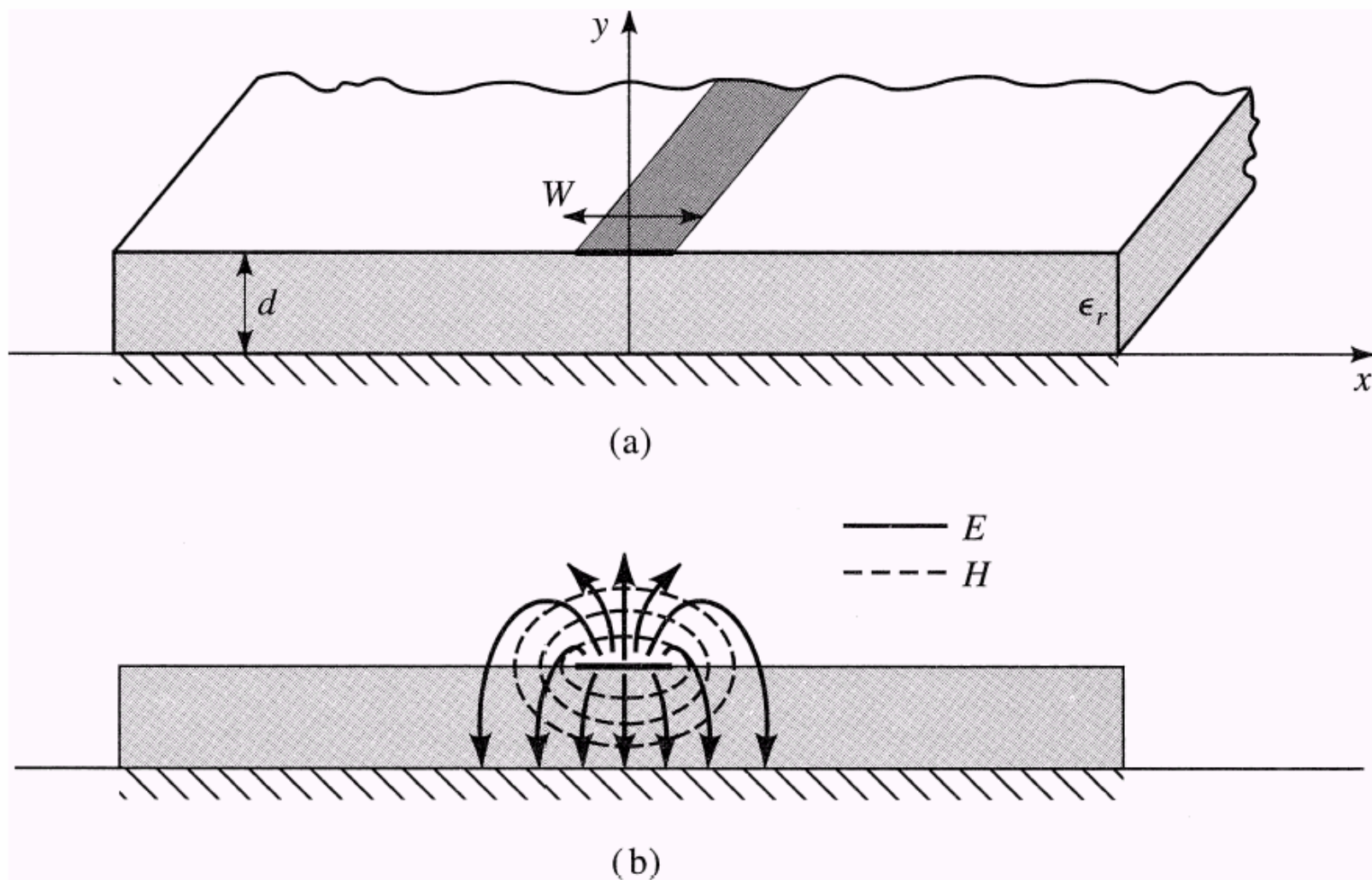
再把圆柱导体做成薄带，这就构成了微带



由镜像法有：

也可看成平行双导线传输线，包含两个平面带状导体，宽度为 W ，距离为 $2d$

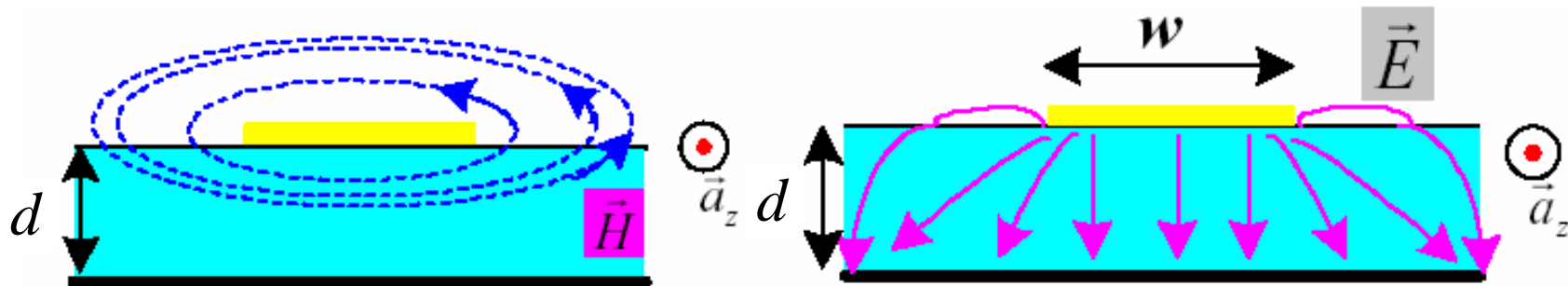




微带传输线. (a) 几何结构. (b) 电力线和磁力线.

2、微带线

(2) 电磁场分布



证明：反证法

假设是TEM波，在介质内和上面空气中相速度不同
传输一段便分开，不满足在边界（连续）条件

电磁场可能存在纵向分量 $d \ll \lambda$ 条件下，纵向分量很小，可以近似地看成是TEM波

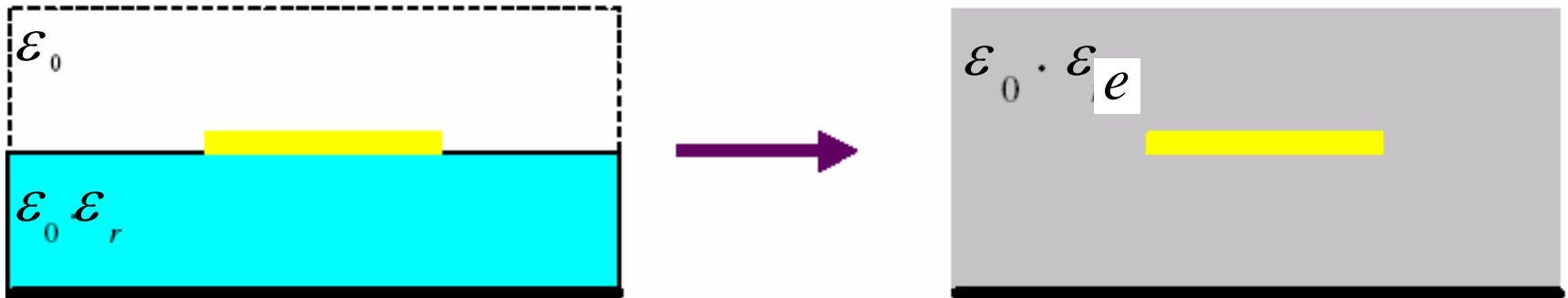
准TEM模 → 场分布与TEM相近，基本在平面上

分析方法 → 用TEM方法分析，在上方空气填充介质 → 等效介质

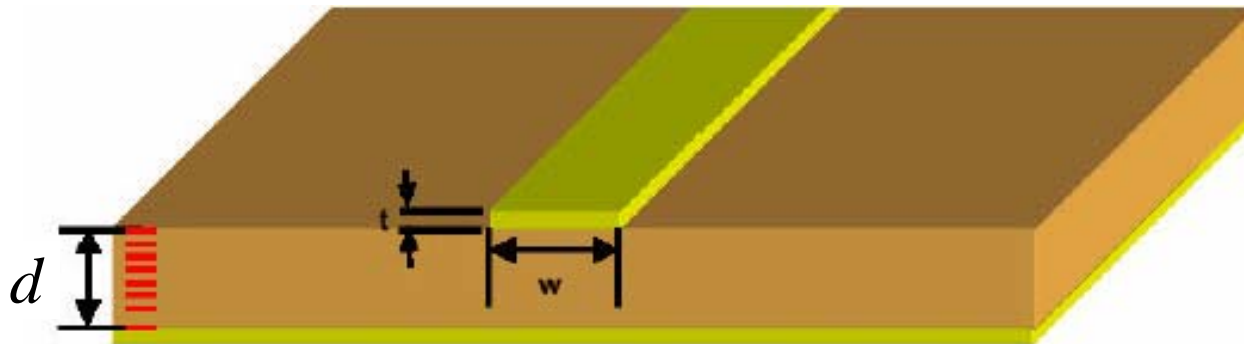
2、微带线

(3) 特性阻抗

把实际混合介质系统看成单一、均匀、相对介电常数为 ϵ_e 的介质所构成的系统。



ϵ_e 为等效相对介电系数



$$Z_0 = \frac{1}{v_p C} = \frac{\sqrt{\epsilon_e}}{c C}$$

2、微带线

(3) 特性阻抗

等效相对介电系数 ϵ_e



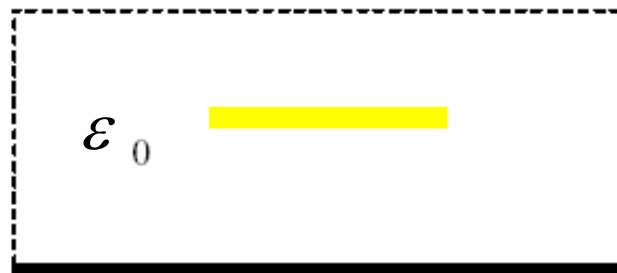
C

实际微带线
的分布电容

等效相对介电常数:

$$\epsilon_e = \frac{C}{C_0}$$

$$\therefore Z_0 = \frac{Z_{0A}}{\sqrt{\epsilon_e}}$$



C_0

填充空气时
的分布电容

$$Z_0 = \frac{1}{v_p C} = \frac{\sqrt{\epsilon_e}}{c C}$$

$$Z_{0A} = \frac{1}{c C_0}$$

2、微带线

(3) 特性阻抗

结论

$$Z_0 = \frac{Z_{0A}}{\sqrt{\epsilon_e}}$$

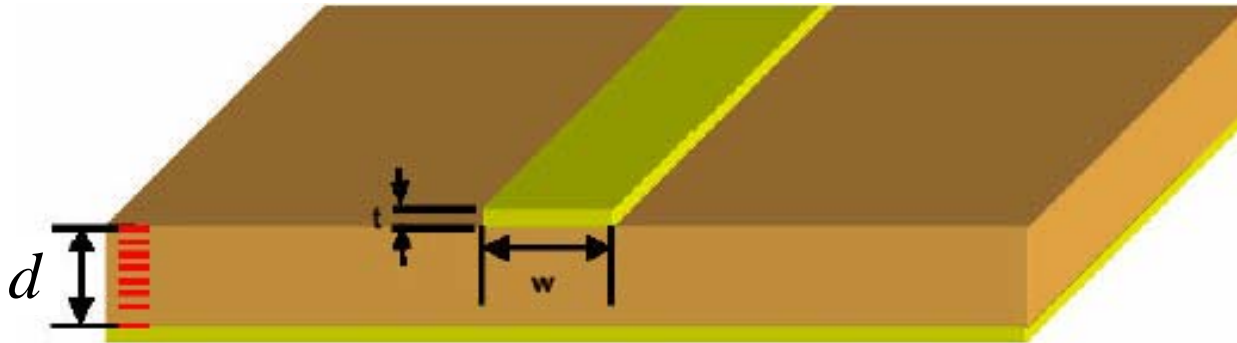
$$Z_{0A} = \frac{1}{v_0 C_o} = ?$$

$$\epsilon_e = \frac{C}{C_o}$$

2、微带线

$$Z_0 = \frac{Z_{0A}}{\sqrt{\epsilon_e}}$$

(3) 特性阻抗 $Z_{0A} = ?$



$$t \ll d, t \rightarrow 0$$

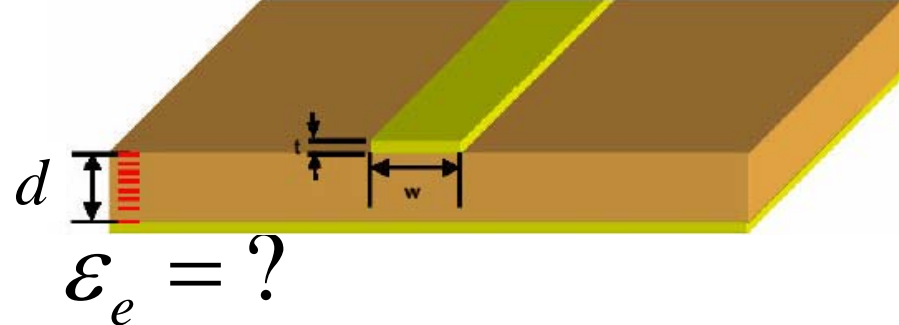
a、如果 $W \leq d$ $Z_{0A} \approx 60 \cdot \ln \left(8 \cdot \frac{d}{W} + \frac{1}{4} \frac{W}{d} \right) \approx 60 \cdot \ln \left(8 \cdot \frac{d}{W} \right)$

b、如果 $W > d$ $Z_{0A} = 60 \cdot \frac{2\pi}{\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.444 \right)}$

精度 $W < 0.1d : 0.25\%$
 $W > 0.1d : 1\%$

2、微带线

(3) 特性阻抗



$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}}$$

$$\epsilon_e = 1 + q \cdot (\epsilon_r - 1)$$

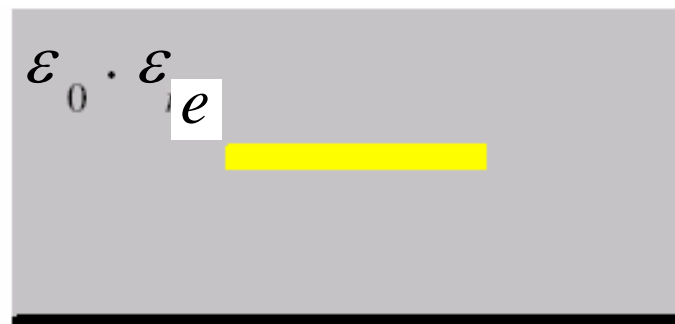
> 1

定义介质填充系数

$$q = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}} \right)$$

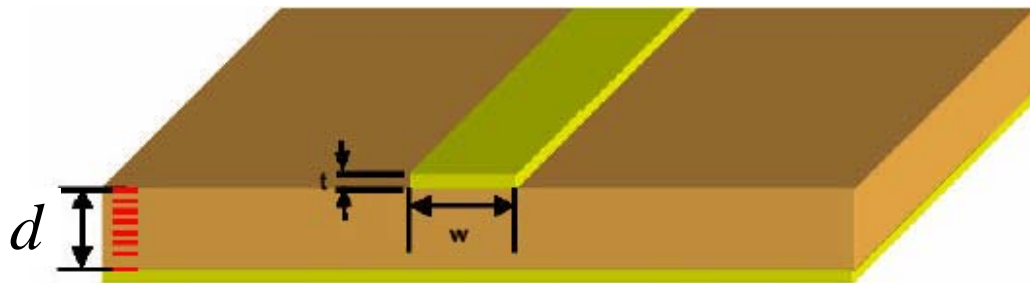
$$q \in \left(\frac{1}{2}, 1 \right)$$

$W \rightarrow 0$ $W \rightarrow \infty$



q : 经保角变换后介质所占面积与总面积之比值，它表示介质的填充程度

2、微带线



(3) 特性阻抗

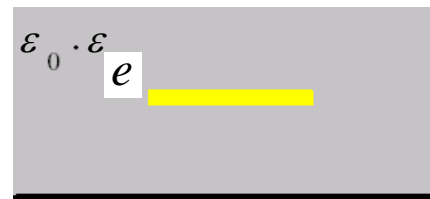
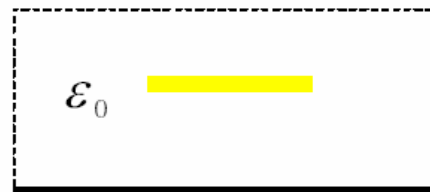
填充系数

介质的填充程度

$$\varepsilon_e = 1 + q \cdot (\varepsilon_r - 1)$$

如果 $q=0$ $\varepsilon_e = 1$

如果 $q=1$ $\varepsilon_e = \varepsilon_r$



2、微带线

(3) 特性阻抗 $Z_0 = ?$

计算方法

公式方法

工程方法



2、微带线

(3) 特性阻抗



公式方法 判断W-d

计算 $Z_{0A} = ?$

$$W \leq d \Rightarrow Z_{0A} \approx 60 \cdot \ln \left(8 \cdot \frac{d}{W} + \frac{1}{4} \frac{W}{d} \right) \approx 60 \cdot \ln \left(8 \cdot \frac{d}{W} \right)$$

$$W > d \Rightarrow Z_{0A} = 60 \cdot \frac{2\pi}{\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.444 \right)}$$

计算 $q = ?$

$$\Rightarrow q = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}} \right)$$
$$\epsilon_e = 1 + q \cdot (\epsilon_r - 1)$$

计算 $Z_0 = ?$

$$\Rightarrow Z_0 = \frac{Z_{0A}}{\sqrt{\epsilon_e}}$$

2、微带线

实际应用中常见的是已知 Z_0, ε_r 求 W/d

由前面结论有

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right\} \right], & \frac{W}{d} > 2 \end{cases}$$

其中

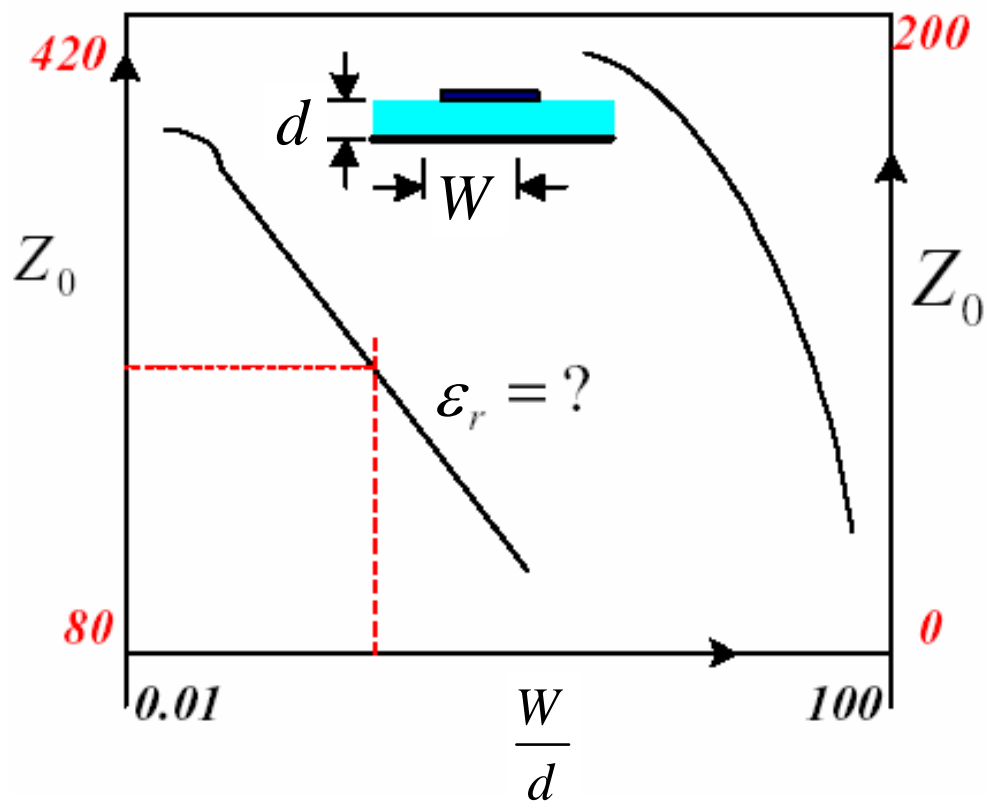
$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}}$$

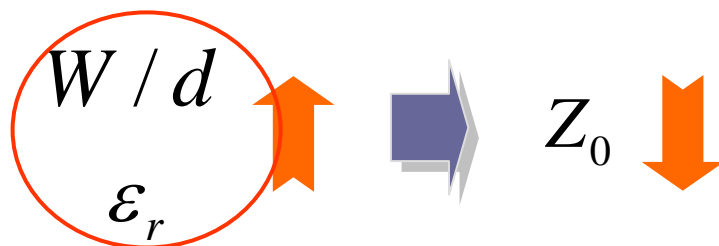
2、微带线

(3) 特性阻抗

工程方法 查图、表



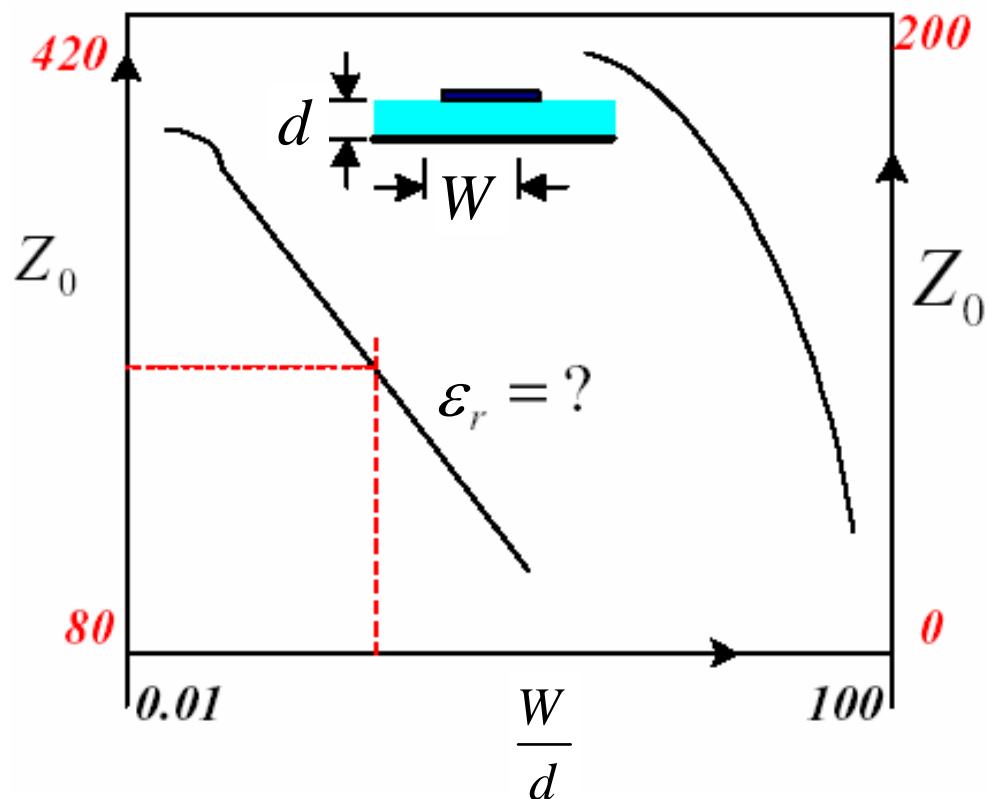
$$Z_0 = ?$$



2、微带线

(3) 特性阻抗

思考：如何设计微带线



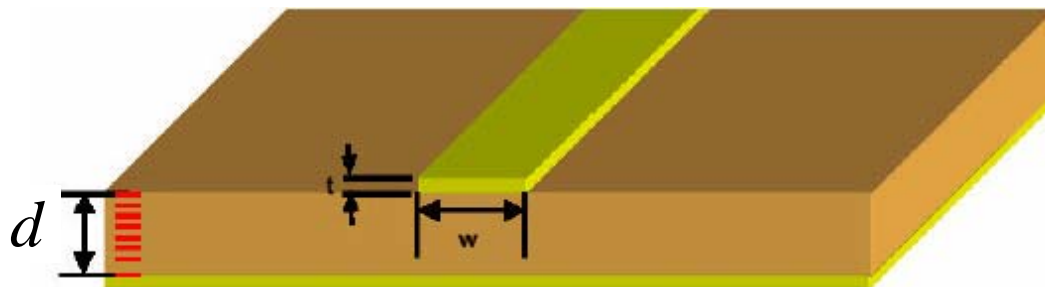
书上P125页还给出了近似的静电场求解法，和带状线的求解方法类似

2、微带线

(4) 损耗

基底介质损耗

导体带、接地板的电阻损耗



$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c$$

介质 $\alpha_d = \frac{k_0 \varepsilon_r (\varepsilon_e - 1) \text{tg} \delta}{2\sqrt{\varepsilon_e} (\varepsilon_r - 1)} \text{Np/m}$

电介质的损耗角正切

导体 $\alpha_c \approx \frac{R}{2Z_0} \quad (\text{Np/m})$

2、微带线

$$R = R_s \cdot \frac{l}{w}$$

如何计算 α_c

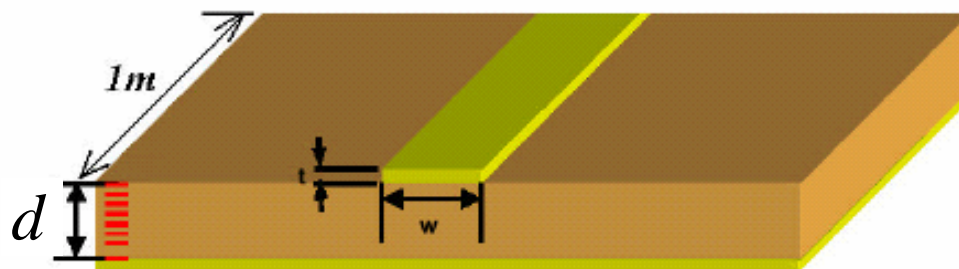
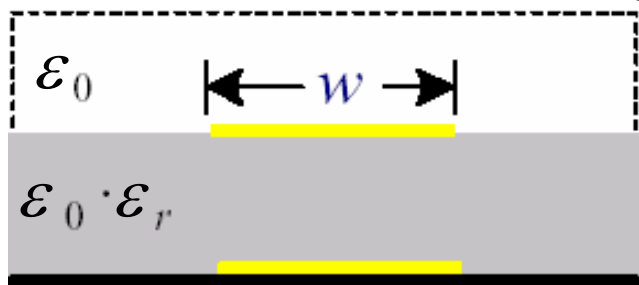
$$\alpha_c \approx \frac{R}{2Z_0} \quad (\text{Np/m}) = 8.686 \frac{R}{2Z_0} \quad (\text{dB/m})$$

$$R = R_s \cdot \frac{l}{W} = R_s \cdot \left(\frac{1}{W} + \frac{1}{W} \right) = \frac{2 \cdot R_s}{W}$$

单位长度

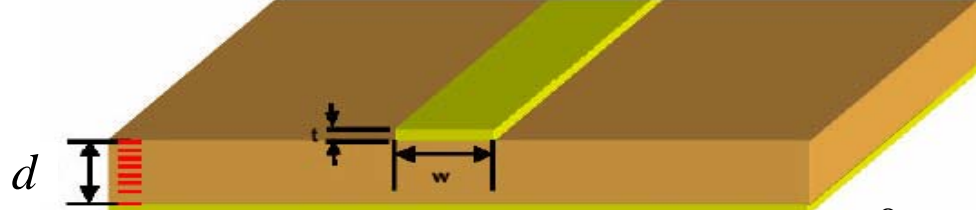
$$R_s = \sqrt{\pi f \mu / \sigma} = \sqrt{\omega \mu_0 / 2 \sigma}$$

所以
$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 \cdot W} \quad (\text{Np/m})$$



电磁场主要分布在介质内，来回 $\times 2$

2、微带线



例 计算在2.5GHz时，一根 $Z_0 = 50\Omega$ 相移为 90° 的微带线宽度和长度 基片厚度 $d = 0.127cm$ $\epsilon_r = 2.20$

解：猜测 $W/d > 2$

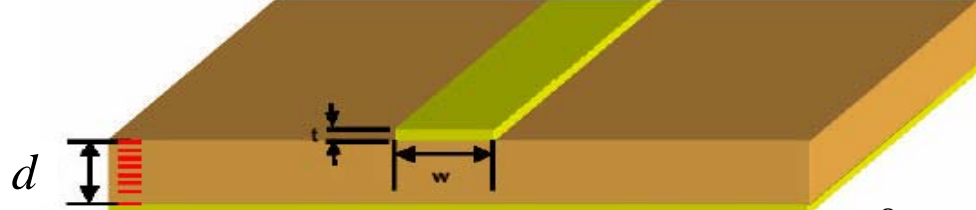
由

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right], & \frac{W}{d} > 2 \end{cases}$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{得到} \quad W/d = 3.081 \quad B = 7.985$$

所以 $W/d > 2$ 如果不对则用 $W/d < 2$

2、微带线



例 计算在2.5GHz时，一根 $Z_0 = 50\Omega$ 相移为 90° 的微带线宽度和长度 基片厚度 $d = 0.127cm$ $\epsilon_r = 2.20$

解: $B = 7.985$ $W/d = 3.081$ 得到 $W = 3.081d = 0.391cm$

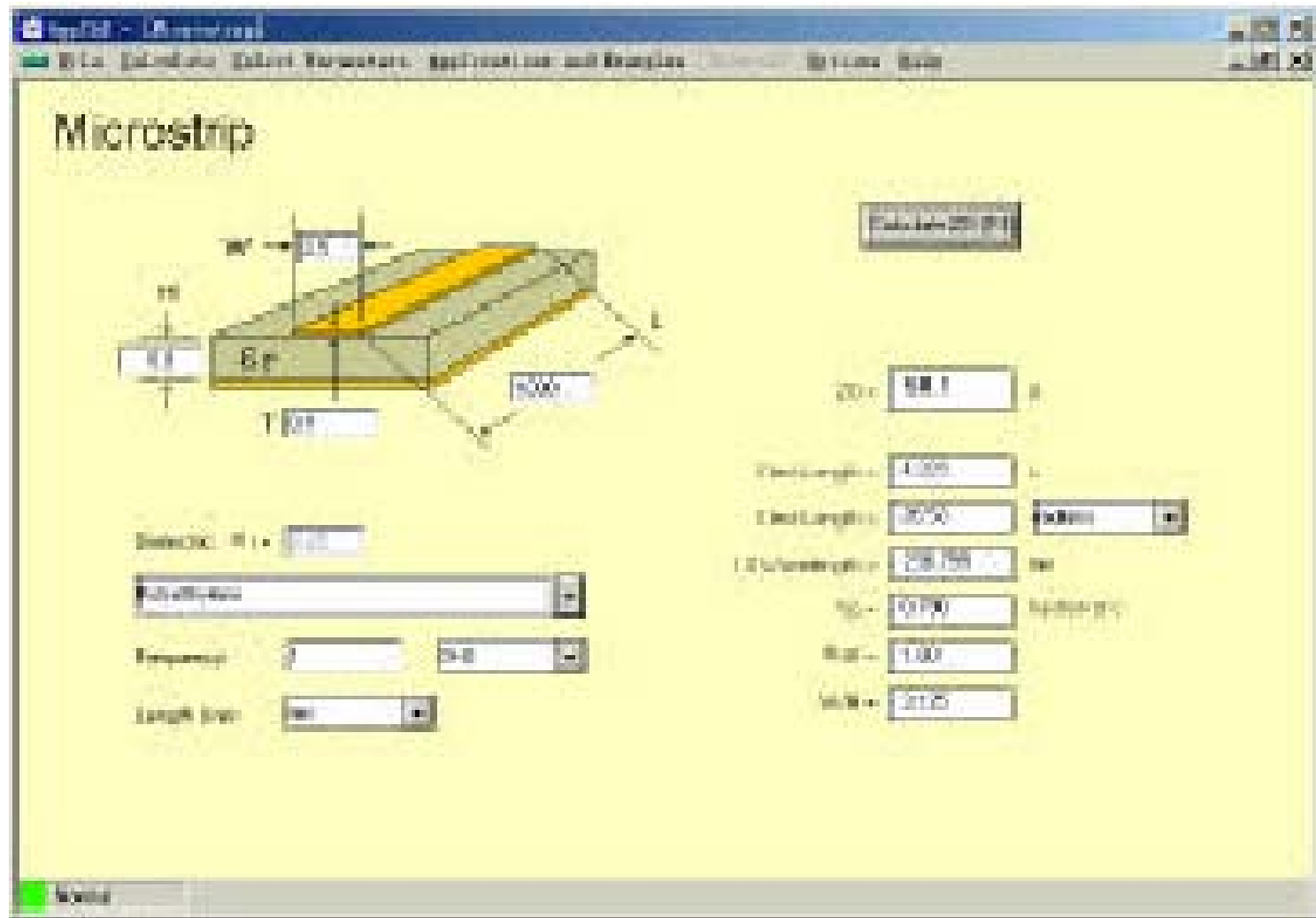
由 $\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}}$ 所以 $\epsilon_e = 1.87$

$$\theta = 90^\circ = \pi / 2 = \beta l = \sqrt{\epsilon_e} k_0 l \quad k_0 = 2\pi f / c = 52.35 / m$$

因此
$$l = \frac{\pi / 2}{\sqrt{\epsilon_e} k_0} = 2.19cm$$

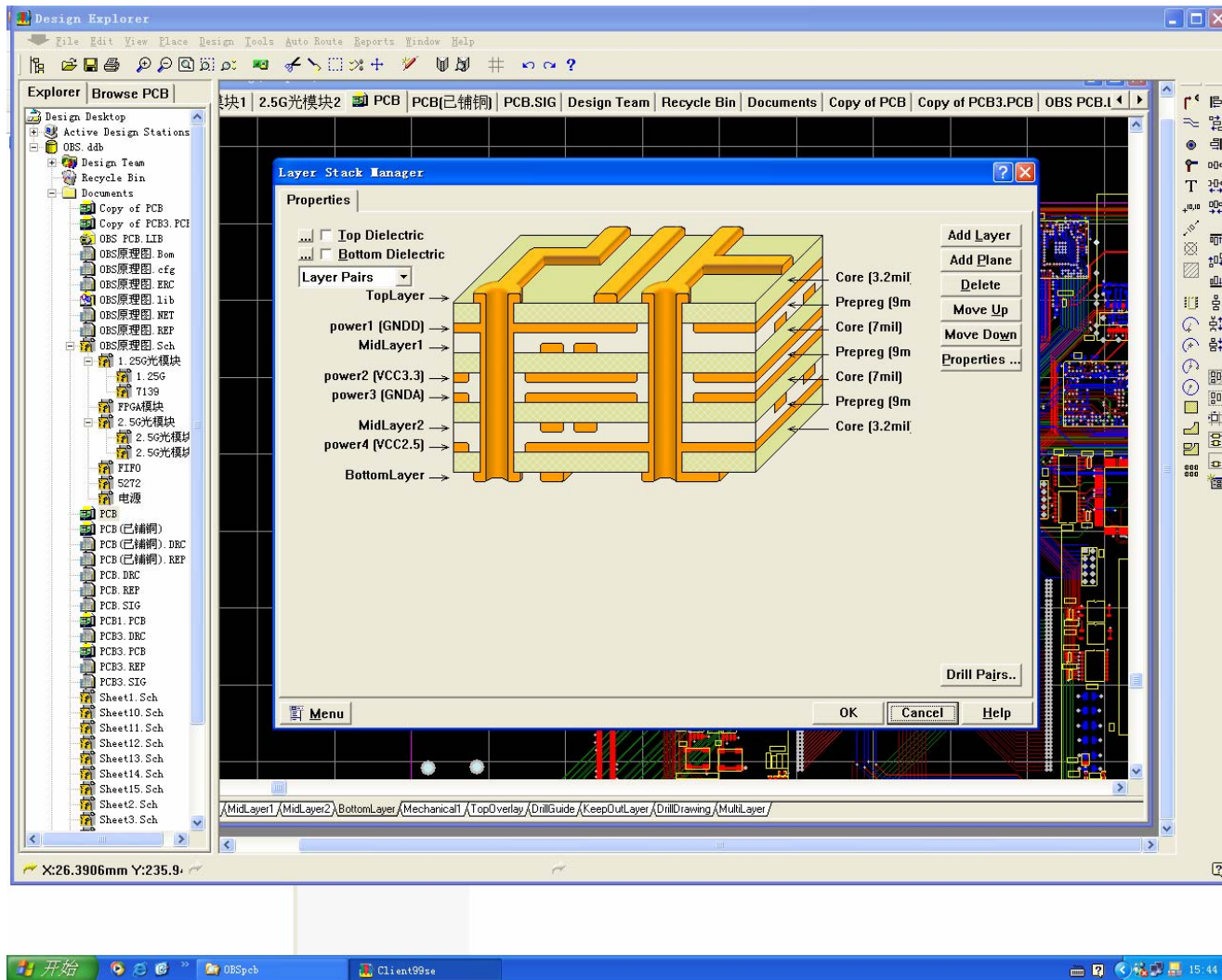
2、微带线

CAD software

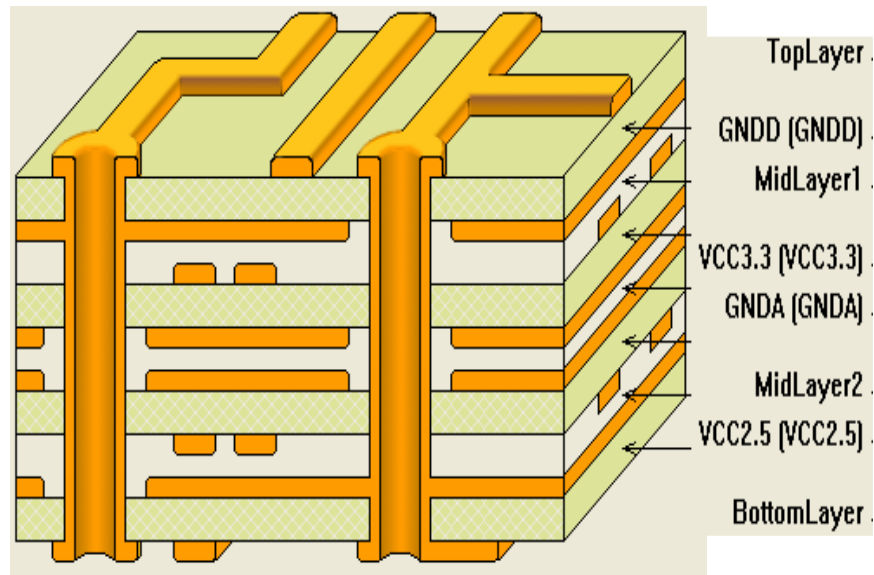
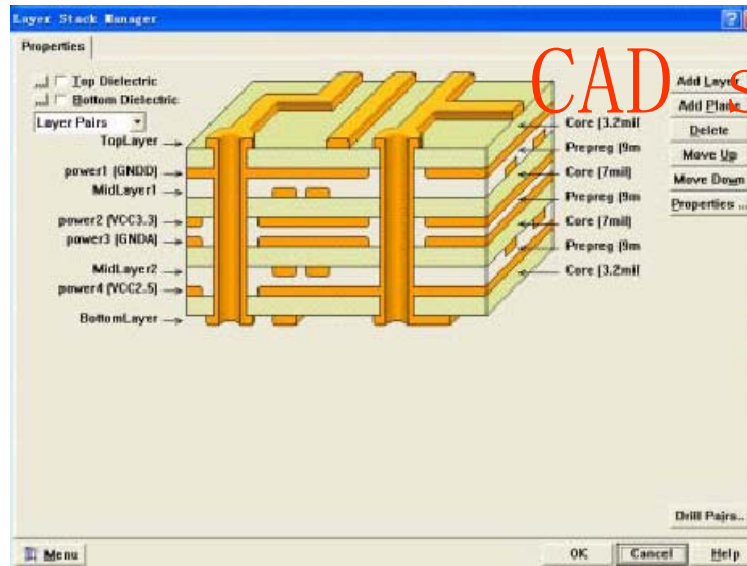


2、微带线

CAD software



2、微带线



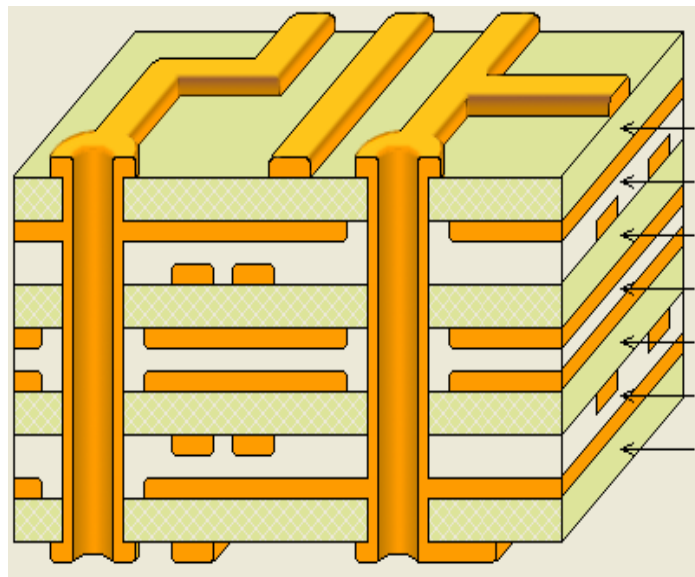
微带线匹配

匹配线有

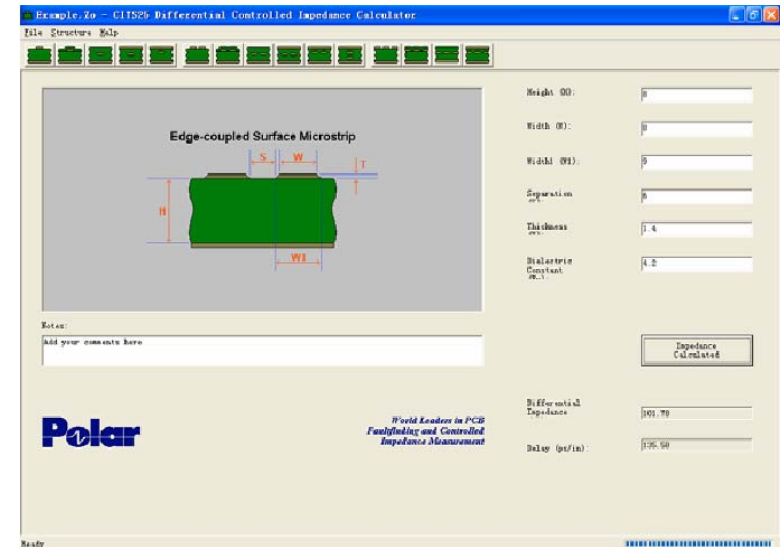
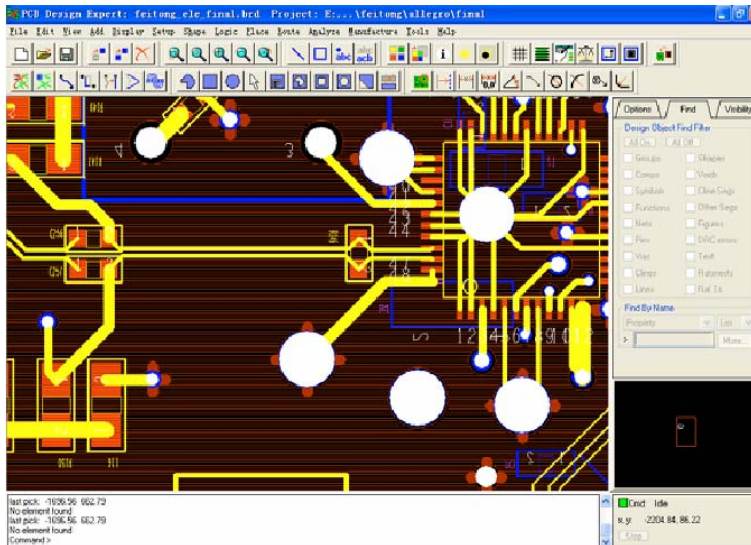
开路线

短路线

微带线实现方法



耦合微带线软件设计示例



H:8 W:8 W1:9 S:6 T:1.4 Er:4.2



Differential Impedance:101.76

Delay (ps/in):135.58

1 mil=1/1000 inch=0.0254 mm

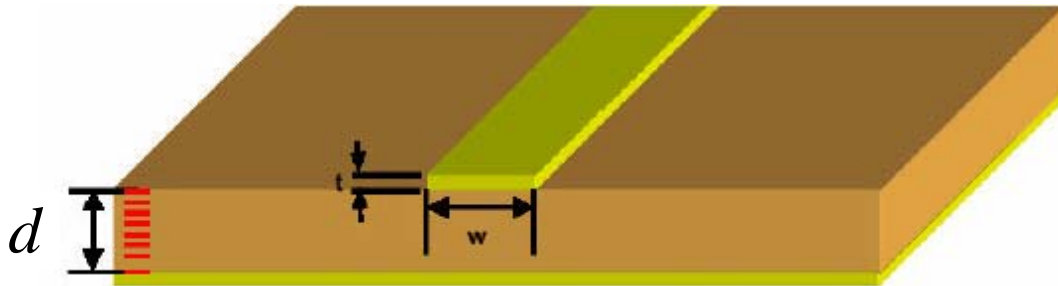
1 yard=3 feet=36 inch \approx 0.914 m

2、微带线

例 一微带线：铜质 $t = 0$ ， $W = 1\text{mm}$ ，
基底厚度 $d = 2.4\text{mm}$ ， $\varepsilon_r = 8.4$ $\text{tg} \delta = 0.0005$
工作频率 10GHz ，求

a、特性阻抗

b、导体损耗和介质损耗引起的衰减



2、微带线

例 已知: $t = 0$, $d = 2.4\text{mm}$, $W = 1\text{mm}$,

$$\varepsilon_r = 8.4 \quad \text{tg} \delta = 0.0005$$

$$f = 10\text{GHz} \longrightarrow \text{空气中的波长 } \lambda = c / f = 3\text{cm}$$

a、特性阻抗

$$Z_{0A} \approx 60 \cdot \ln \left(8 \cdot \frac{d}{W} + \frac{1}{4} \frac{W}{d} \right) \approx 60 \cdot \ln \left(8 \cdot \frac{d}{W} \right)$$
$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}}$$
$$Z_0 = \frac{Z_{0A}}{\sqrt{\varepsilon_e}} \longrightarrow 76\text{ohm}$$

2、微带线

例 已知: $t = 0$, $d = 2.4\text{mm}$, $W = 1\text{mm}$,

$$\varepsilon_r = 8.4 \quad tg\delta = 0.0005$$

$$f = 10\text{GHz} \longrightarrow \lambda = c/f = 3\text{cm}$$

b、导体损耗和介质损耗引起的衰减

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 \cdot W} \quad (\text{Np/m}) \longrightarrow 2.98\text{dB/m}$$

$$R_s = \sqrt{\pi f \mu / \sigma} = \sqrt{\omega \mu_0 / 2\sigma}$$

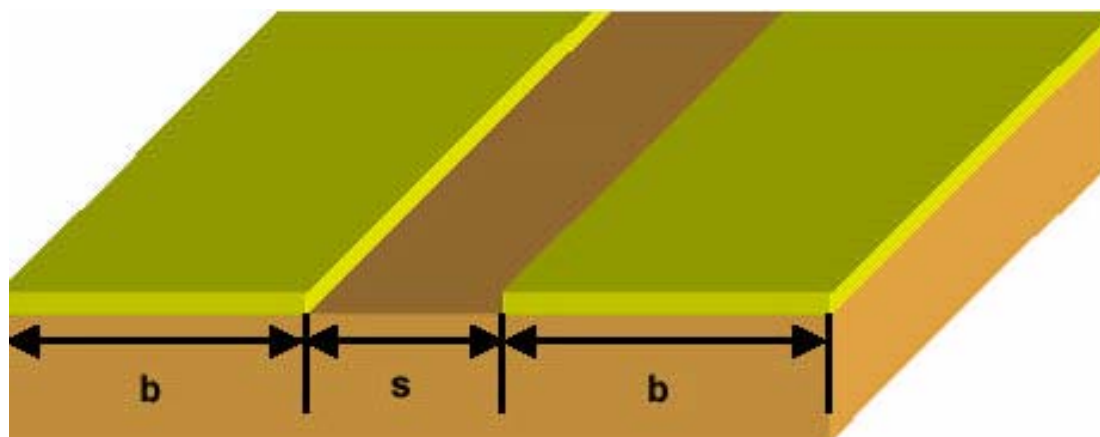
$$\alpha_d = \frac{k_0 \varepsilon_r (\varepsilon_e - 1) tg\delta}{2\sqrt{\varepsilon_e} (\varepsilon_r - 1)} \text{Np/m} \longrightarrow 0.98\text{dB/m}$$

应用与高阻抗线、串联短线和短路等电路中

3、槽线

(1) 结构

-- Slot 槽



在同一侧有两个导体 -- 形成槽

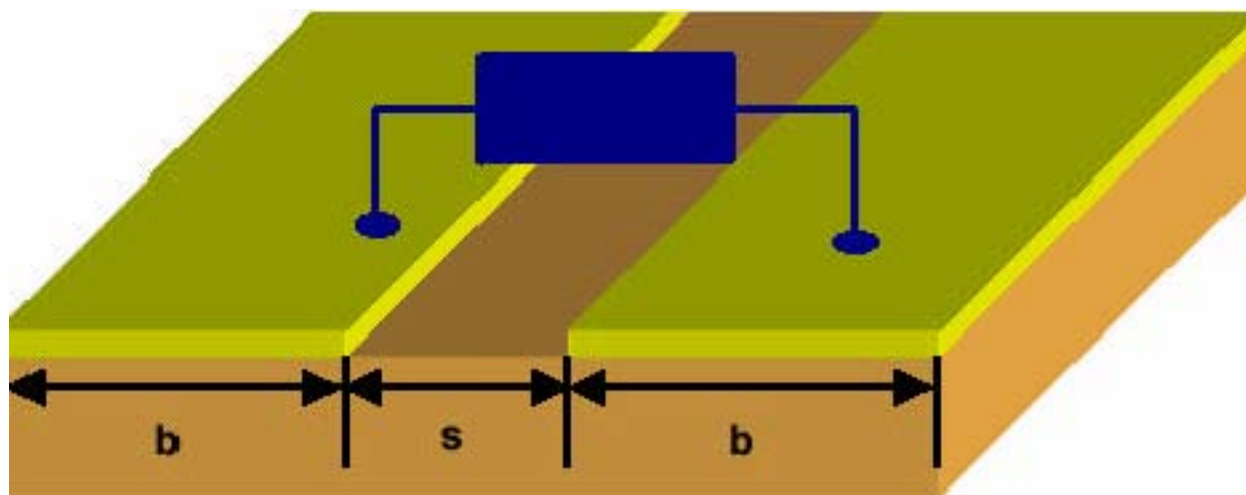
一个低损电介质衬底

特性阻抗 Z_0 随 s 增加而增加

3、槽线

(2) 电磁场分布

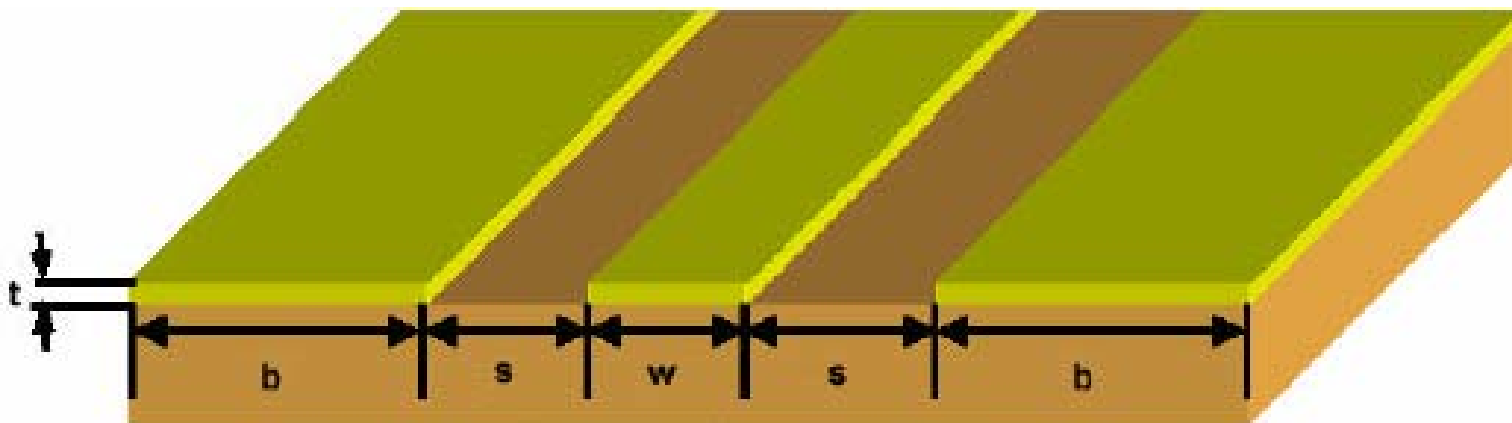
(3) 元件易安装



4、共面带状线

(1) 结构

— — 共面



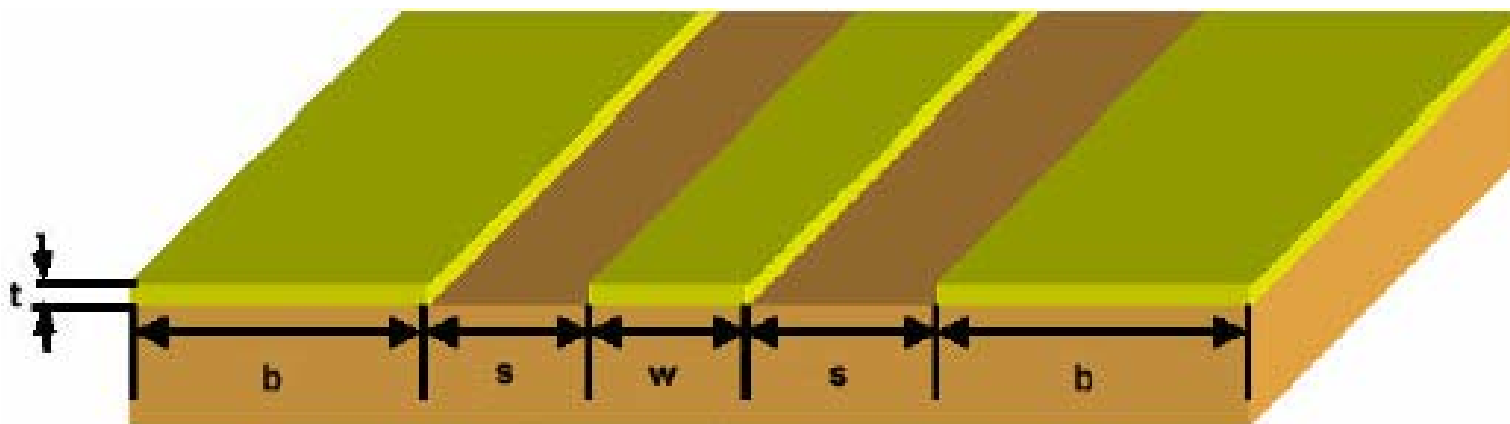
在同一侧有三个导体 — — 两个地

一个低损电介质衬底

4、共面带状线

(2) 电磁场分布

(3) 元件易安装



平面传输线优缺点

优点

- (1) 小——尺寸、重量、成本；易安装、易制作
- (2) 结构——在一个平面上
- (3) Z_0 的设计——通过改变其中一根线的尺寸

平面传输线优缺点

缺点

- (1) 小——电流、功率容量小
- (2) 结构——有辐射损耗（用高介电常数的衬底）
- (3) Z_0 的设计——仔细设计（不易匹配）

有外导体

思考为什么这时辐射小？（考虑边界条件）

传输线与波导比较

特性	同轴线	波导	带状线	微带线
模式：主要模式 其他	TEM TM,TE	TE10 TM,TE	TEM TM,TE	准TEM 混合TM,TE
色散	无	中	无	低
带宽	高	低	高	高
损耗	中	低	高	高
功率容限	中	高	低	低
尺寸	大	大	中	小
制作难度	中	中	易	易
与其他元件集成	难	难	中	容易

传输线的功率容限

传输线上的电压、电流不可以任意大，而是受到击穿电压和最大载流量的限制。

若线上电压超过击穿电压时，传输线中的绝缘介质将被击穿，轻者使传输线的效率显著降低，严重时，传输线会被损坏无法再现。

实际工作中，常用“功率容量”来描写传输线是否处于容许的工作状态。所谓传输线的功率容量就是在不发生电击穿条件下，传输线上允许传输的最大功率或称极限功率。

单位距离空气击穿电压（或电场强度） $3 \times 10^6 \text{V/m}$



传输线的功率容限

功率容量不仅与击穿电压有关（每一种传输线都具有一定的击穿电压值，它由传输线的结构、材料、填充介质等因素所决定），还与线上的工作状态有关。线上愈接近行波状态，功率容量就愈大。若传输功率一定，愈接近行波状态，则可选用击穿电压定额愈小的传输线，使传输线更经济轻便。因此，从功率容量角度也可以说明，传输线的最佳状态是行波工作状态。

传输线的功率容限

(1) 同轴线

(2) 微带线

(3) 圆波导

(4) 矩形波导