

Lesson 4

# Electromagnetic Fields and Waves

圆图应用  
阻抗匹配设计相关

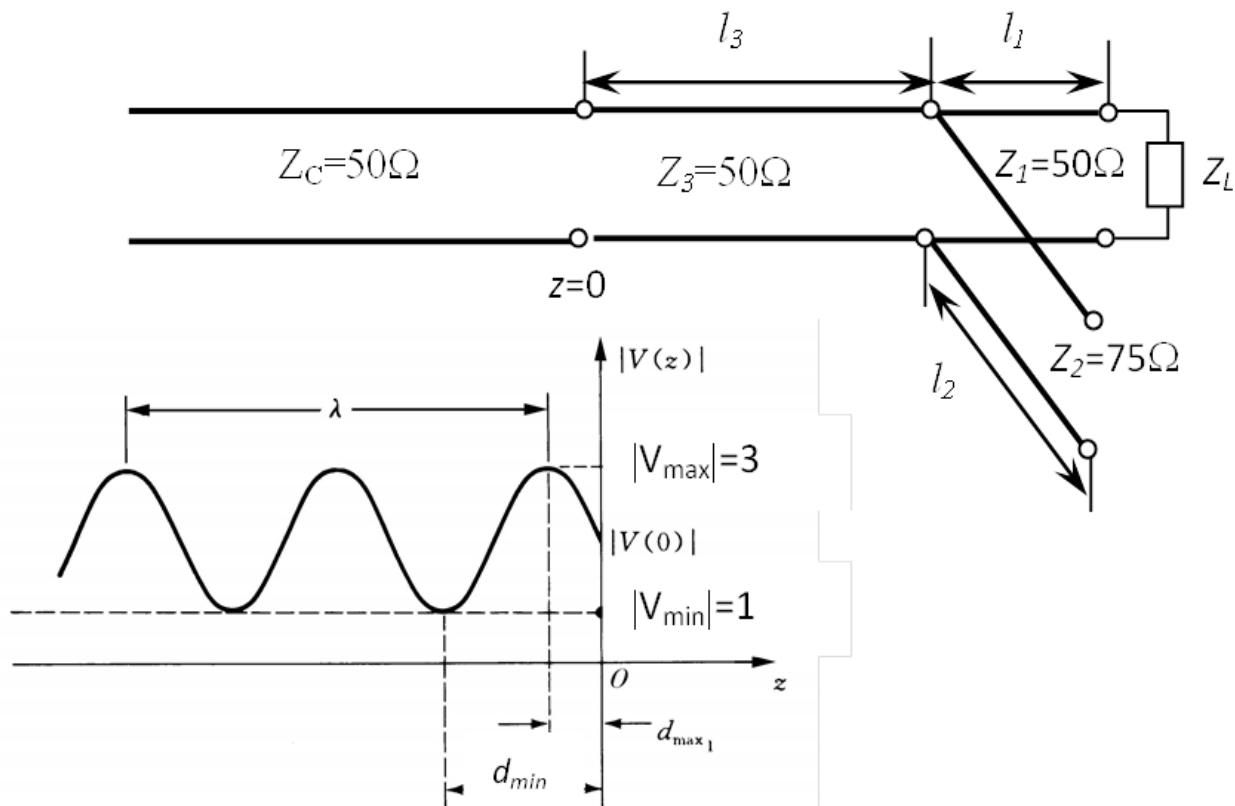
郑史烈

zhengsl@zju.edu.cn

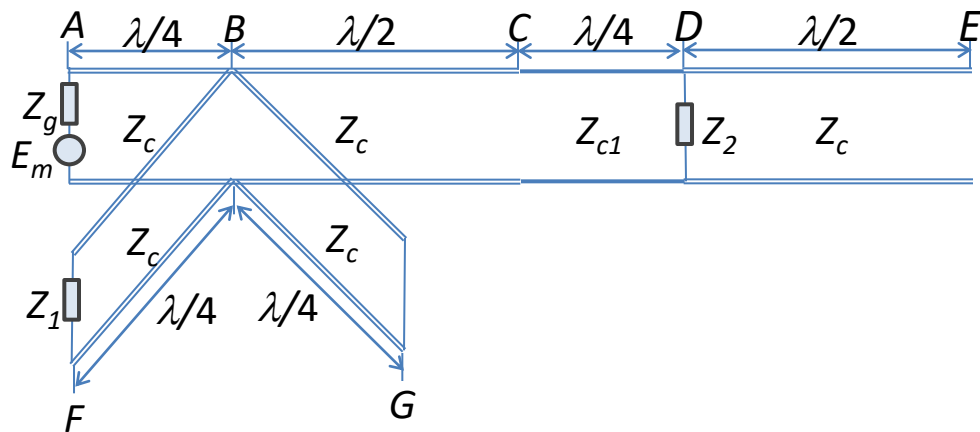


**James Clerk Maxwell**  
1831 – 1879

1) 已知 $\lambda=10\text{cm}$ ,  $l_1=1\text{cm}$ ,  $l_2=2\text{cm}$ ,  $l_3=3\text{cm}$ , 在 $z=0$ 输入端口左边传输线上的电压传播如下图所示, 求终端负载 $Z_L=?$

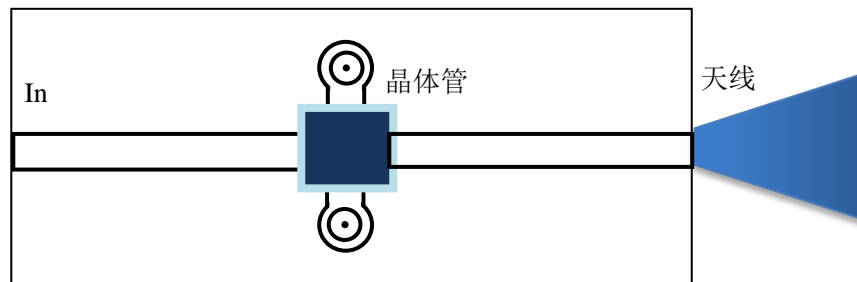


2. 由若干段传输线和负载组成的电路如下图所示， $\lambda$ 为波长。  
 已知， $Z_g = Z_c = Z_1 = 100\Omega$ ， $Z_{c1} = 150\Omega$ ， $Z_2 = 225\Omega$ ， $|E_m| = 50\text{mV}$ 。试分析 $AB$ 、 $BC$ 、 $CD$ 、 $DE$ 、 $BF$ 、 $BG$ 各段传输线的工作状态，并计算各段传输线的始段、末端电压放电流振幅，画图示意沿各段传输线电压主、电流振幅的相对分布。



## 课程设计

- ❖ 设计射频功率放大器输入匹配电路、输出匹配电路（和天线匹配），并用圆图示意匹配过程。

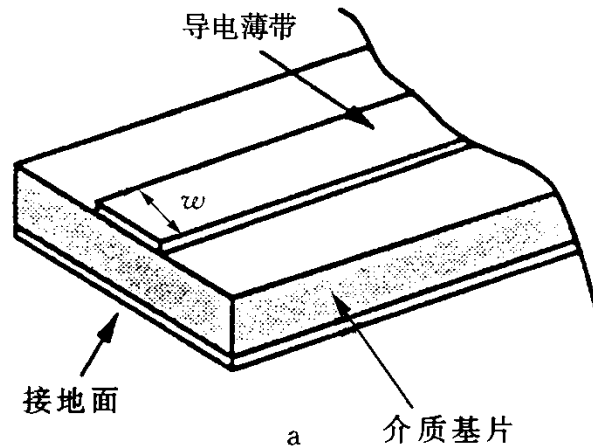


- ❖ 晶体管输入端的电压反射系数 $S_{11}$ 为 $0.28\angle -45^\circ$ ，输出端的电压反射系数 $S_{22}$ 为 $0.88\angle -5^\circ$ 。工作频率是10GHz，天线的输入阻抗是 $75\Omega$ ，微带线特征阻抗为 $50\Omega$ 。整个电路要求匹配至 $50\Omega$ （In处）。

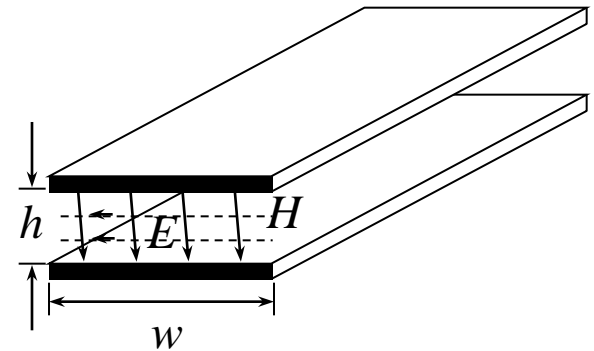
- ❖ 微带线基板可从以下板材中选取（本次设计不考虑材料的损耗）：
- ❖ 厚度可选：0.76、1.01、1.52mm。
- ❖ 微带线：可参考《Microstrip and stripline design》或教材第321页。

型号	频率	介电常数	损耗因子	型号	频率	介电常数	损耗因子
HT1.5	10GHz	$2.35 \pm 0.05$	0.0025	射频-35	1.9GHz	$3.5 \pm 0.1$	0.0025
TLE-95	10GHz	$2.95 \pm 0.05$	0.0028	射频-30	1.9GHz	$3.0 \pm 0.1$	0.0014
TLX-9	10GHz	$2.50 \pm 0.04$	0.0019	TLY-5	10GHz	$2.20 \pm 0.02$	0.0009
TP-32	10GHz	$3.20 \pm 0.1$	0.0022	TSM-30	10GHz	$3.0 \pm 0.05$	0.0015
TLT-9	1MHZ	$2.50 \pm 0.05$	0.0006	TLC-32	10GHz	$3.20 \pm 0.05$	0.03

## TEM模近似下的微带线



## 用TEM模近似的平行平板波导

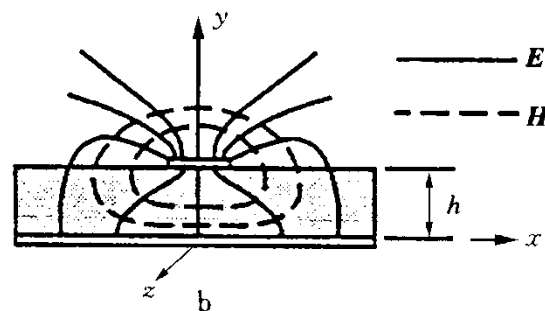
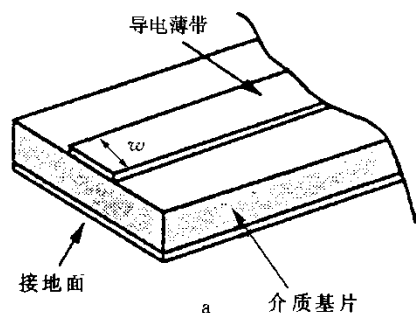


### ❖ TEM模近似下微带线的特征参数

$$R' = \frac{2R_s}{w} \quad G' = \frac{\sigma w}{h} \quad L' = \frac{\mu h}{w} \quad C' = \frac{\epsilon w}{h}$$

$$k = \omega \sqrt{L'C'} = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{h}{w}$$

## 介质填充不均匀导致微带线不支持纯TEM工作



❖ 交界面电场切向分量连续  $E_x^d = E_x^a \Rightarrow (\nabla \times \mathbf{H})_x^d = \epsilon_r (\nabla \times \mathbf{H})_x^a$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r \mathbf{E}$$

❖ 应用介质和空气分界面磁场法向分量连续条件

$$\epsilon_r \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} \right)^a - \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} \right)^d = (\epsilon_r - 1) \frac{\partial H_y}{\partial z}$$

❖ 因为  $\epsilon_r \neq 1$ ,  $H_y \neq 0$ , 所以式左边为非零量, 这只有当  $H_z \neq 0$  才能满足。

❖ 同样, 从介质与空气交界面磁场的切向分量连续导致  $E_z \neq 0$ 。

## 准TEM模近似下的微带线

❖ 不考虑微带线的色散，即假设微带线的传播常数

$k$ 与频率 $\omega$ 呈线性关系

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon_e} = \omega \sqrt{\epsilon_{re} \epsilon_0 \mu_0} = k_0 \sqrt{\epsilon_{re}}$$

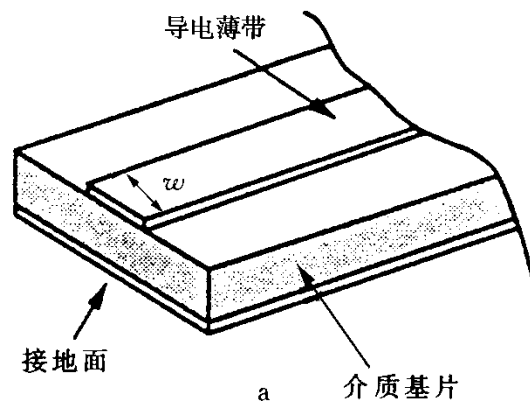
❖  $\epsilon_{re}$ 的物理意义是：当微带线等效为平行板波导并为相对介电常数 $\epsilon_{re}$ 的介质填充时，该平行平板波导的相速即微带线的相速。

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_e \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{re} \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}}$$

❖ 准TEM模近似下，微带线的色散特性归结为求有效相对介电常数

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} F(w/h)$$

$$F(w/h) = \begin{cases} (1 + 12h/w)^{-1/2} + 0.04(1 - w/h)^2 & (w/h \leq 1) \\ (1 + 12h/w)^{-1/2} & (w/h \geq 1) \end{cases}$$

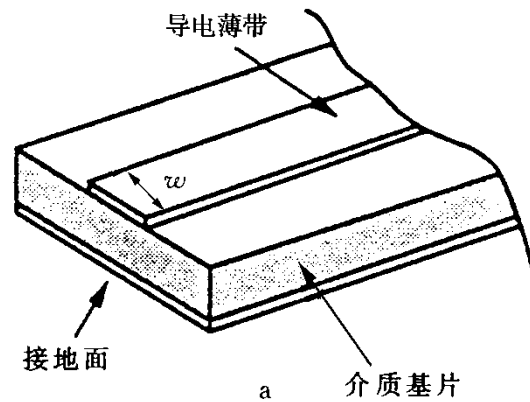




## 准TEM模近似下的微带线

❖ 特征阻抗  $Z_e = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + 0.25\frac{w}{h}\right) \quad \left(\frac{w}{h} \leq 1\right)$

$$Z_e = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \left\{ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.67 \ln\left(\frac{w}{h} + 1.44\right) \right\}^{-1} \quad \left(\frac{w}{h} \geq 1\right)$$



❖ 式中,  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi \Omega$

❖ 微带线综合: 由 $Z_e$ 、 $\epsilon_{re}$ 及介质基片相对介电常数 $\epsilon_r$ , 确定微带线相对尺寸 $w/h$

❖ 当  $Z_e \sqrt{\epsilon_{re}} \geq 89.91$ , 也就是 $A > 1.52$ 时  $\frac{w}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2}$

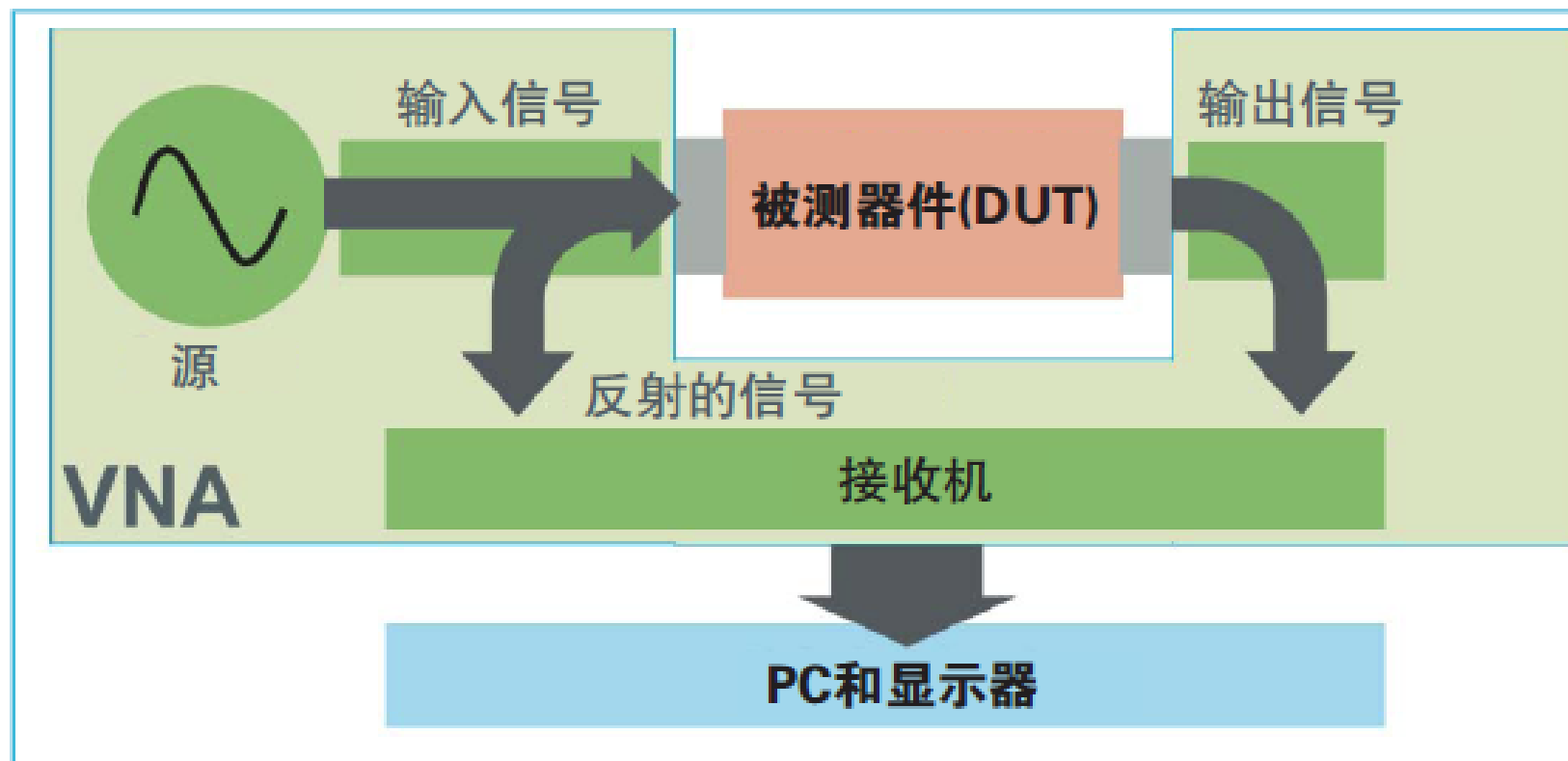
❖ 当  $Z_e \sqrt{\epsilon_{re}} < 89.91$ , 也就是 $A < 1.52$ 时

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\}$$

$$A = \frac{Z_e}{60} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

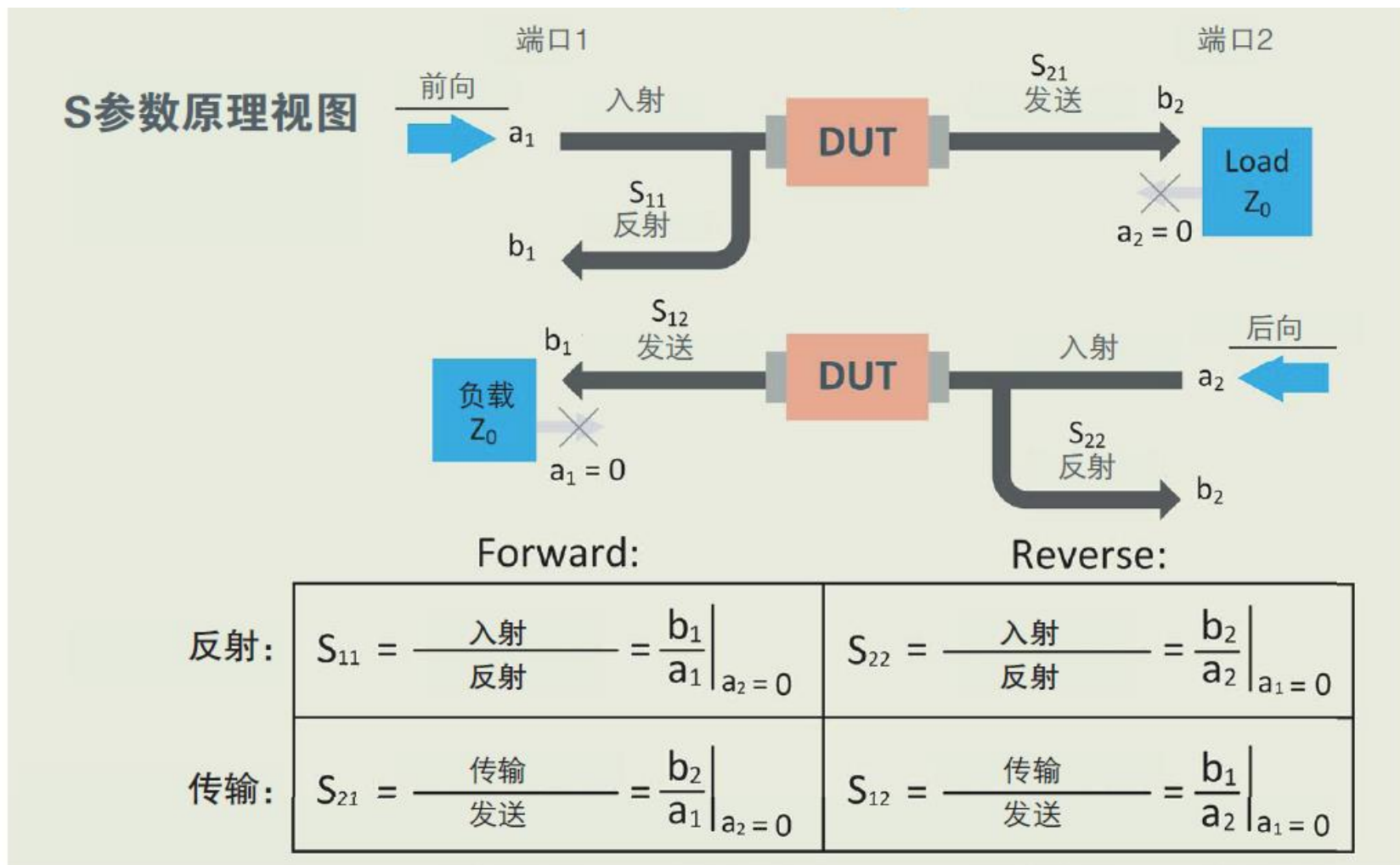
$$B = \frac{60\pi^2}{Z_e \sqrt{\epsilon_r}}$$

## 矢量网络分析仪 (Vector Network Analyzer)



❖ “矢量” 是指可同时测量幅度和相位。

## S 参数：描述RF电器元件在稳态激励时的电气属性和性能，是复数



## 常用S参数名称

### 前向反射系数

- 输入回波损耗
- 输入匹配
- VSWR

$S_{11}$

$S_{21}$

### 前向传输系数

- 增益
- 损耗

### 反向传输系数

- 反向隔离度

$S_{12}$

$S_{22}$

### 反向反射系数

- 输出回波损耗
- 输出匹配
- VSWR

VSWR: 电压驻波比

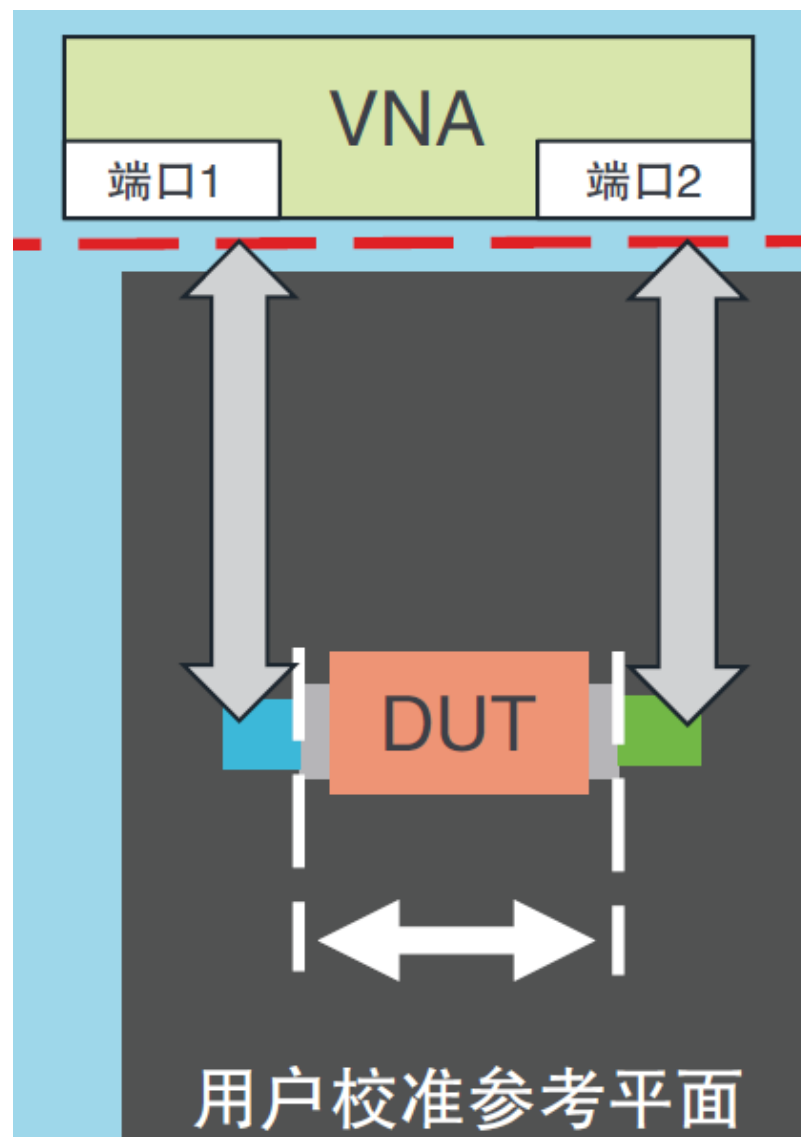
## VNA 校准

### ❖ 出厂校准

- 涵盖直到Port1和Port2连接器
- 确保输出信号满足规范，输入信号一直能准确表示

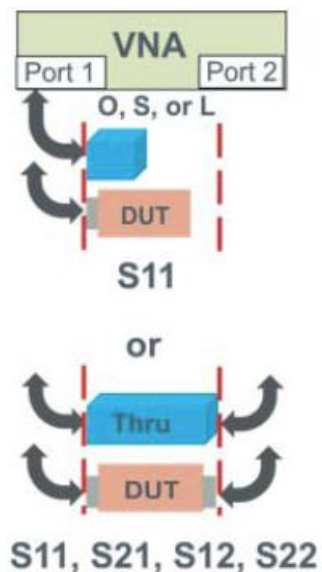
### ❖ 用户校准

- 消除电缆、适配器及DUT连接中使用的大多数项目的影响
- 可以精确测量纯DUT性能



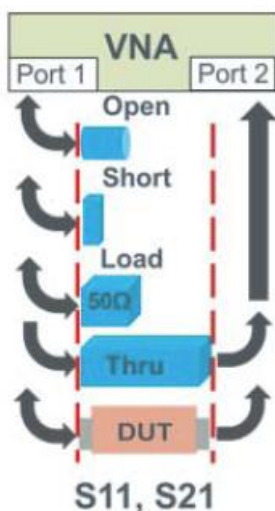
# 校准方法

## 响应



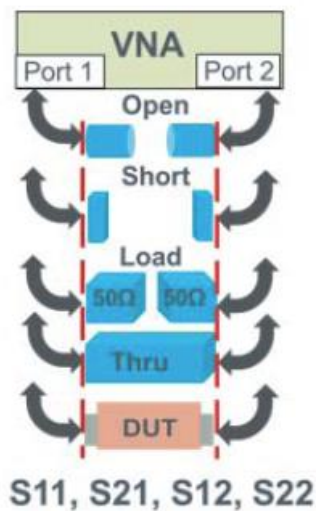
- 非常简单
- 连接非常少
- 准确度较低
- 价格低

## 2端口、1条路径



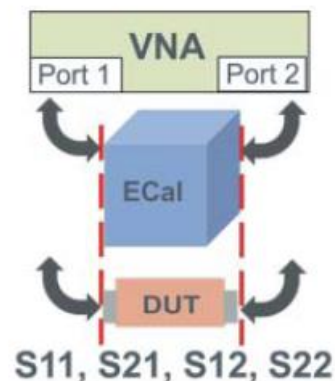
- 简单
- 连接少
- 准确度中等
- S参数有限

## 2端口、2条路径



- 复杂
- 多个连接
- 准确度高
- 全部S参数

## 电子



- 非常简单
- 连接非常少
- 准确度高
- 价格高

## 常用同轴连接器

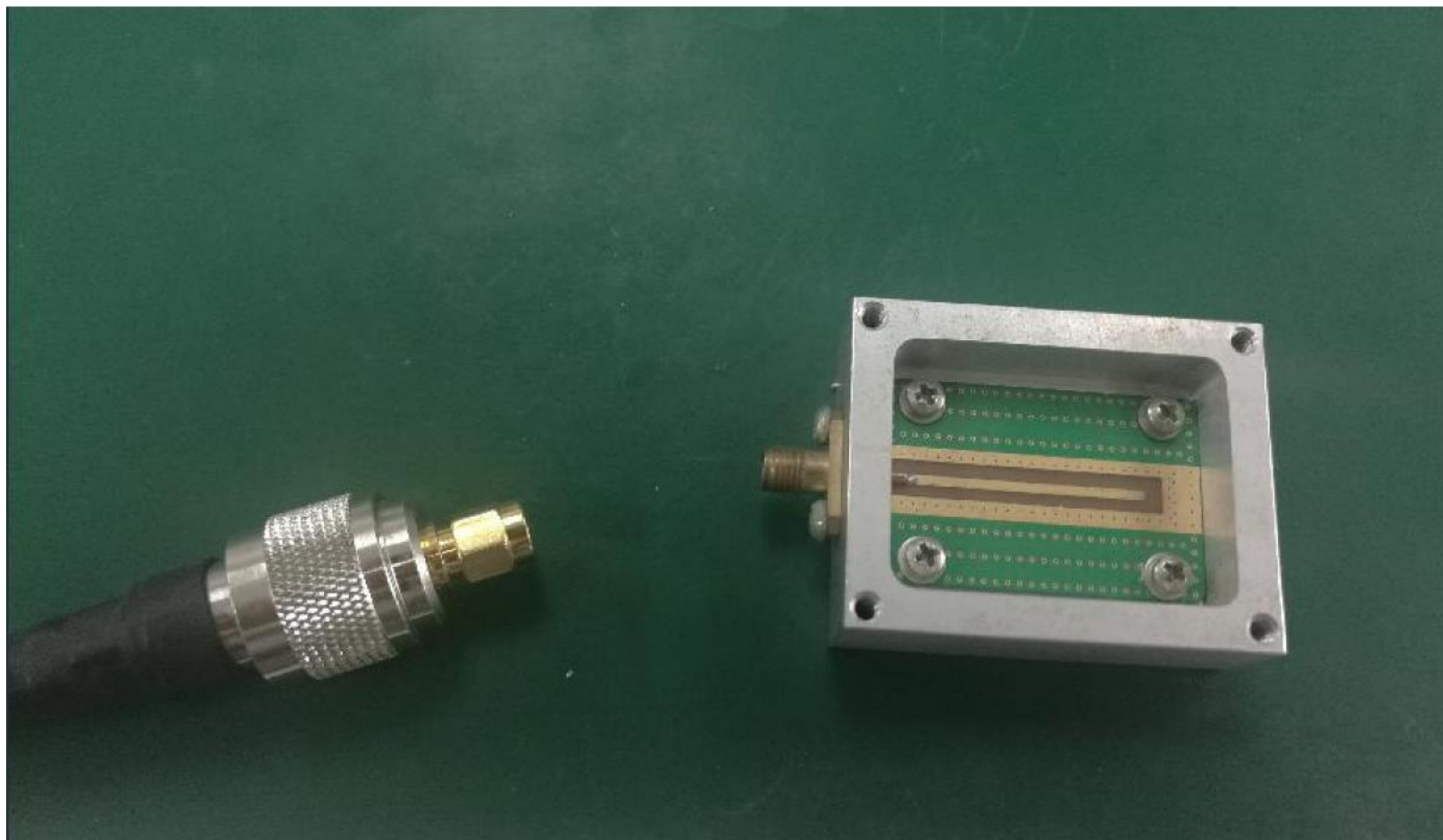
- 同轴连接器用于传输射频信号，传输频率范围很宽，可达18GHz或更高。主要用于雷达、通信、数据传输及航天航空设备
- 同轴连接器的基本结构：中心导体（阳性或者阴性的中心接触件）；内导体外的介电材料（或称为绝缘体）最外面是外接触件（起同轴电缆外屏蔽层的作用，相当于传输信号，作为屏蔽或电路的接地元件）
- 同轴连接器接头主要分为：卡口式（BNC）；螺纹式（SMA、SMC、TNC、N型），推入式（SMB、BMA）等
- 同轴连接器分：
  - Male：公接头，螺纹在内，里面是针
  - Female：母接头，螺纹在外，里面是一个孔。
  - 通常设备侧接头为母头，线缆侧为公头



TNC (M)



SMA (F)





## 描述同轴连接器要素

- 接头类型
- 特征阻抗：50欧姆标50或不标，75欧姆标75
- 接头方式：公头，母头
- 外壳形式：直式：不标，弯式：W
- 安装形式：法兰盘：F，螺母：Y，焊接：H
- 接线种类：适配的电缆型号，内外径要求等
- 衰减：对应不同频段射频信号引起的信号强度衰减
- 螺纹类型：外螺旋，内螺纹



SMA直角插孔、插座

## 常用射频接头—N 型

❖ N型系列是一种具有螺纹连接器结构的中大功率连接器，抗震性强，可靠性高，机械和电气性能优良，常用于天线馈线，射频模块连接，功分、合路器等。一般工作于5GHz以内，改进性能可到12G，甚至18GHz。



## 微波接头

### ❖ BNC连接器（卡口）

工作频率可以到4GHz



❖ TNC连接器，工作频率可以达到12GHz，广泛应用于移动电话微波/天线的连接。



## 微波接头

- ❖ SMB连接器 (Sub-Miniature B connector) 是一种卡口式连接器, 工作频率到4GHz。



- ❖ GPO (SMP) 连接器

GPO连接器工作带宽到40GHz, 基于止动结构不同, 插拔寿命从100~1000次不等



- ❖ GPPO (SSMP) 连接器

GPPO连接器只有GPO连接器的1/3, 工作带宽至65GHz。



## 常用射频接头-SMA

❖ SMA是一种应用广泛的小型螺纹连接的连接线，寿命长，性能优越，可靠性高，常用于微波设备和数字通信设备的射频回路或微带。标准SMA连接器设计工作频率为12.4GHz，较好的SMA可以用于18GHz甚至到24GHz。部分厂家生产的特殊高质量的SMA连接器可以达到26.5GHz



• SMA公的是针加内螺纹 母的是孔加外螺纹，RP-SMA公的是孔加内螺纹，母的是针加外螺纹，RP-SMA是台湾那边比较多

### ❖ 3.5mm连接器

最先由美国Hewlett Packard (HP公司, 现在的Agilent) 研制开发, 尺寸和规格上与SMA一致, 不同的是在接头中使用了空气介质, 工作频率到34GHz。物理接口相对SMA更坚固耐用, 可实现数千次重复连接。因其外导体内径为3.5mm, 从而被命名为3.5mm连接器。



### “K”和2.92mm连接器

由Wiltron公司 (现在的Anritsu公司) 在1983年开发设计, 同时命名为K (工作频率覆盖微波波段的K波段), 因其外导体内径为2.92mm, 被称为2.92mm连接器。K连接器可以与SMA、3.5mm和其它的2.92mm连接器 (如HP 2.92mm) 相互连接, 工作频率为40GHz, 可用到46GHz。有些厂家也称此连接器为2.9或SMK连接器。

2.4mm 连接器, 1.85mm连接器, 1.0mm连接器, W波段连接器。。。

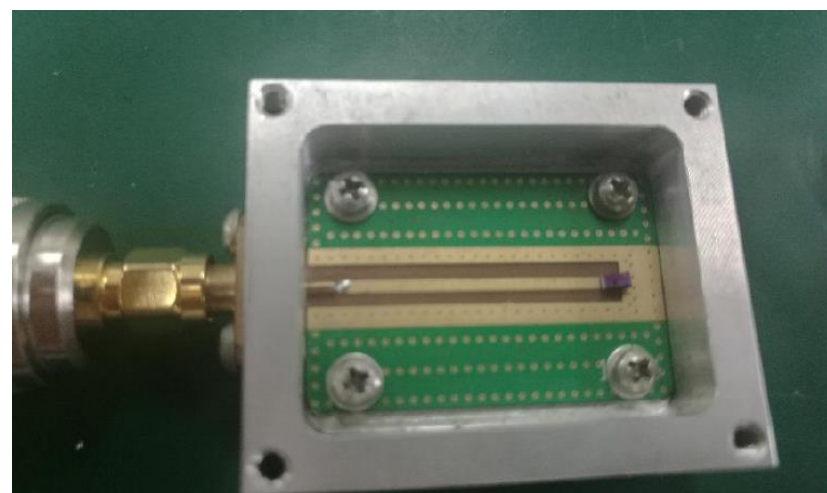
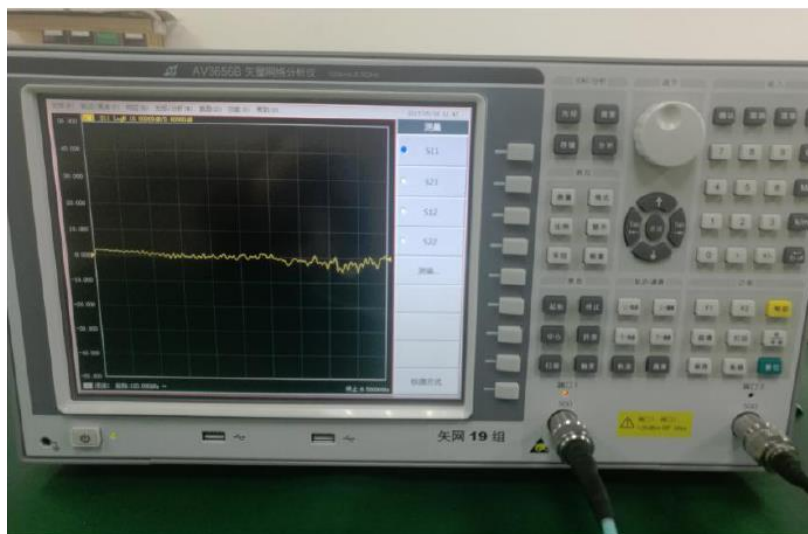
## 常用射频线缆接头——同轴终端负载

- 同轴终端负载用于同轴链接系统的末端链接，一般用于射频信号传输的系统测试。具有与传输线适配的特征阻抗。





# 微带传输线负载特性矢网测量





# The End.

郑史烈

zhengsl@zju.edu.cn