

微波测量基础

授课教师：郭诚

西安交通大学 电子与信息工程学院

授课教师

- 1.施宏宇： 天线测试原理和方法
- 2.郭诚： 微波测量的基本原理
- 3.校外导师： 矢量网络分析仪原理

课程内容

- 1. 标准与定标
- 2. S参数与噪声
- 3. 校准、去嵌入和芯片测试
- 4-6. 天线测试原理和方法
- 7. 企业导师教学
- 8. 实践操作

课程大纲

- 1.专题1：微波测量中的标准与定标
 - “定标”是所有测量的第一步，如果没有好的标准，就没有正确的测量。这一专题从国际单位制讲起，阐述微波技术中的几个关键物理量，即频率、功率、阻抗的标准与定标。也展开介绍了例如噪声的标准与定标。一个非常有意思的结论是，微波测量中的定标几乎都与国际单位制中的“长度”有关。
- 2.专题2：S参数与噪声
 - “S参数”或许是微波测量中最重要的内容。这一专题从测量设备的原理出发，介绍S参数的测试原理和方法。该专题同样介绍了“噪声系数”的测试方法。

- 3.专题3： 校准、去嵌入和芯片测试
- 精确的测量离不开校准和去嵌入，这一问题在芯片设计和测试领域中变得尤为明显。本专题结合去嵌入算法和在片测试原理。介绍去嵌入的理论和实际应用。该专题也包括部分芯片测试的实际案例。
- 4-6 施宏宇老师负责，天线和材料测试基本原理
- 7.企业导师教学：由电科思仪公司工程师讲授，主要讲VNA的原理和高级操作技巧。
- 8、 实践操作

由我和施宏宇老师带大家操作探针台系统、天线测试系统等设备。

课程特点及常见思维误区

- 1. 微波测量是属于“科学”的范畴，是微波工程的基础。
- 2. 这不是一门实验课，是科学（物理学）和微波工程的结合。

如斯内普教授所说：“由于这里没有傻乎乎地挥动魔杖，所以你们中间有许多人不会相信这是魔法”。

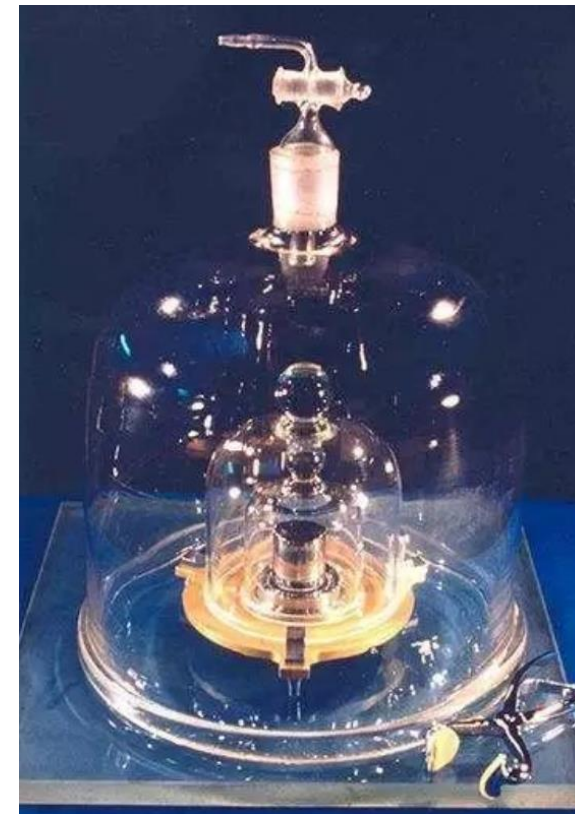
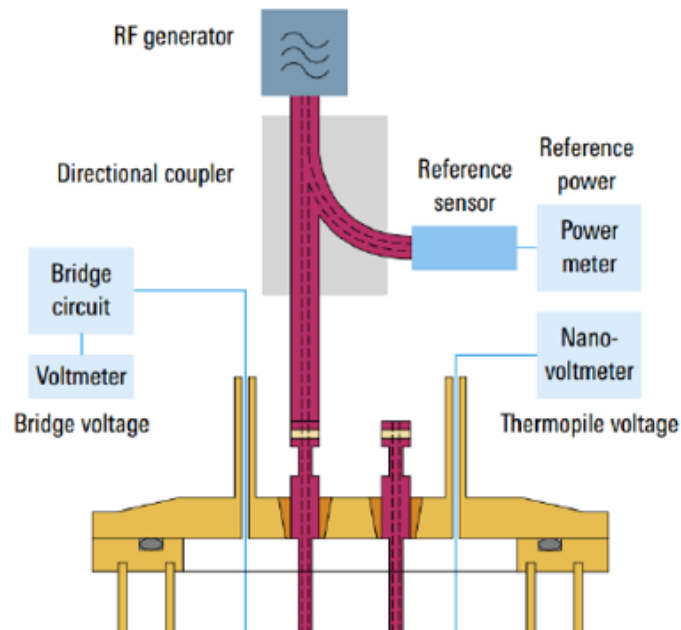
我说：“由于在这门课里，确实会让你傻乎乎的去操作仪器，但是你们不要天真的以为它是一门实验课。”

- 3. 不要只学会了操作，不懂原理；也不要眼高手低，懂了原理不肯自己拧螺丝。
- 4. 授课内容基本来自各种文献（因此没有教材）。

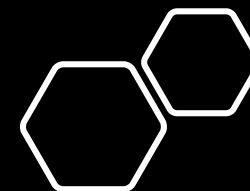
考核方式

- 1. 选择一篇文献（一个题目）进行学习和报告， 1-4人一个组 20-30%
- 2. 开卷考试，主要考察对基本概念和测试方法的掌握 70-80%

不能使用或者至少不能被我发现使用Chatgpt写报告，可以用它辅助你写，但是关键是要自己写。



• 第一讲：微波测量中的标准和定标



授课教师：郭诚

引子：测量的基本要素（1）

“邹忌修八尺有余，而形貌佚丽”
请问他身高一米几？



拃 (zhǎ)



度 (tuǒ)



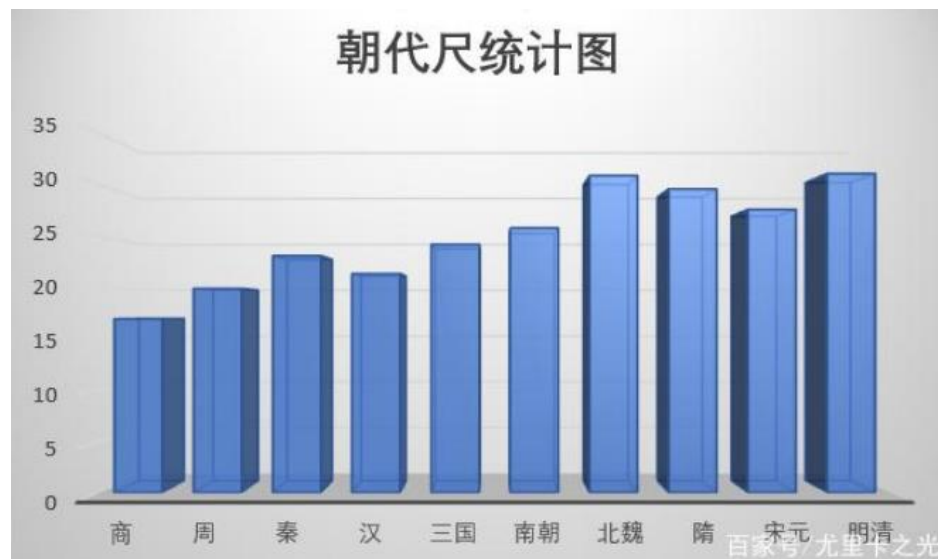
步



腕尺



英尺



测量的核心之一在于“标准”
“标准”就是指出“一米是多长，
一斤是多重，一秒是多久”

思考：秦始皇与“度量衡”



“度”：长度（基本单位）

“量”：体积（导出单位）

“衡”：重量（基本单位）

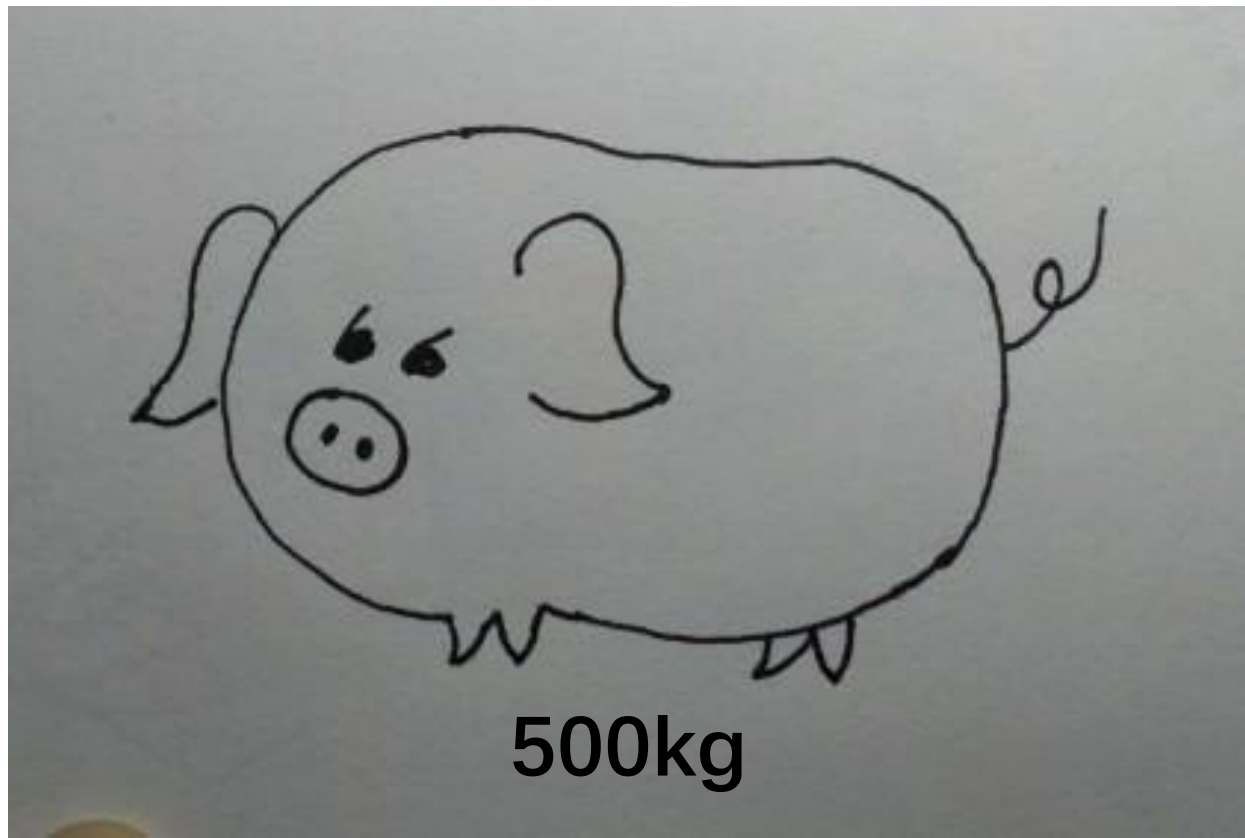
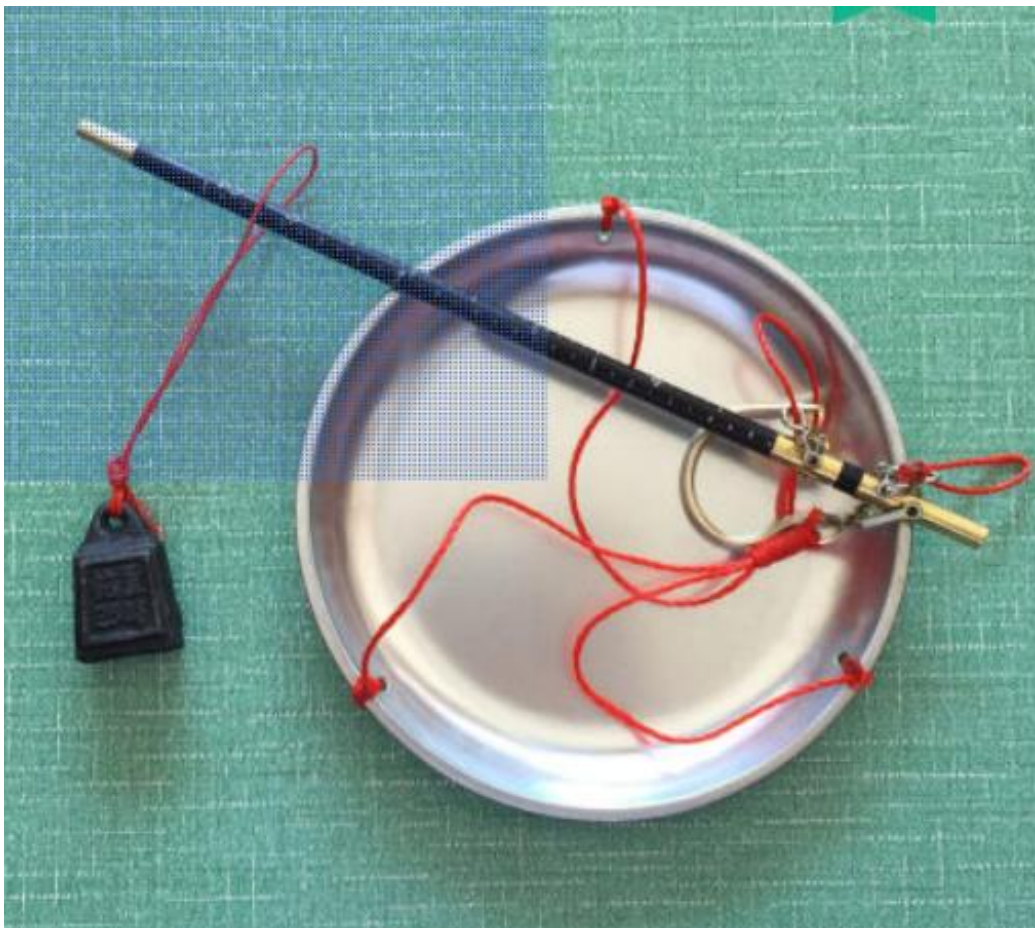
问：这三个量是相互独立的吗？线性相关否？



秦始皇：

线性相关？什么鬼，寡人不要学同济版的线性代数！

引子：测量的基本要素（2）



问：如何用四两的秤砣称出千斤的大肥猪？

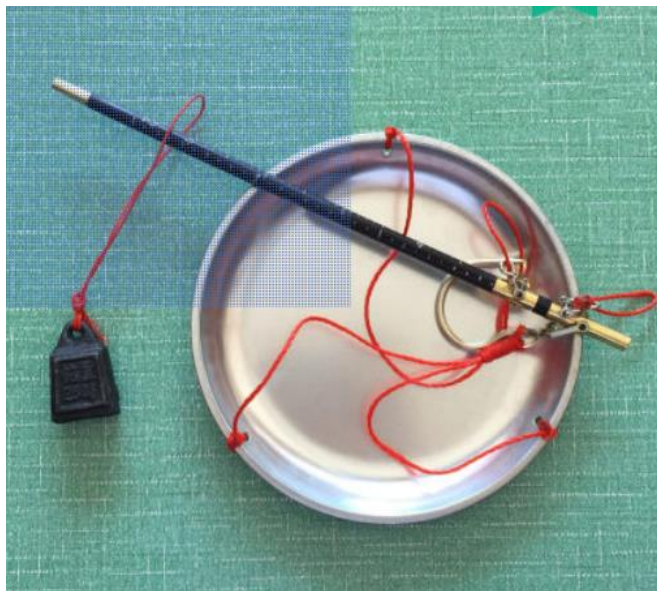
秤砣和秤杆的作用各是什么？



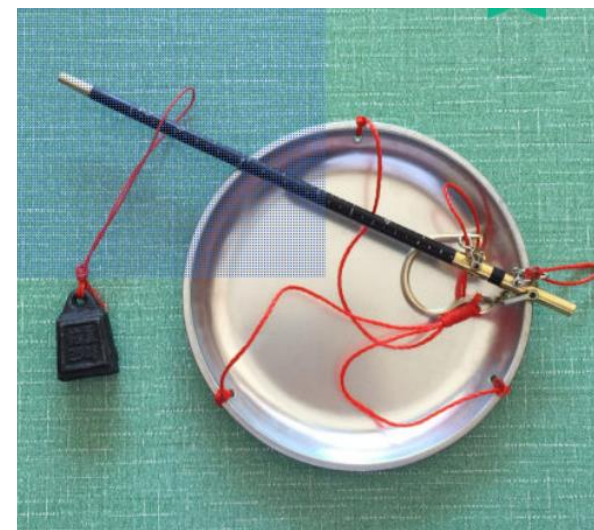
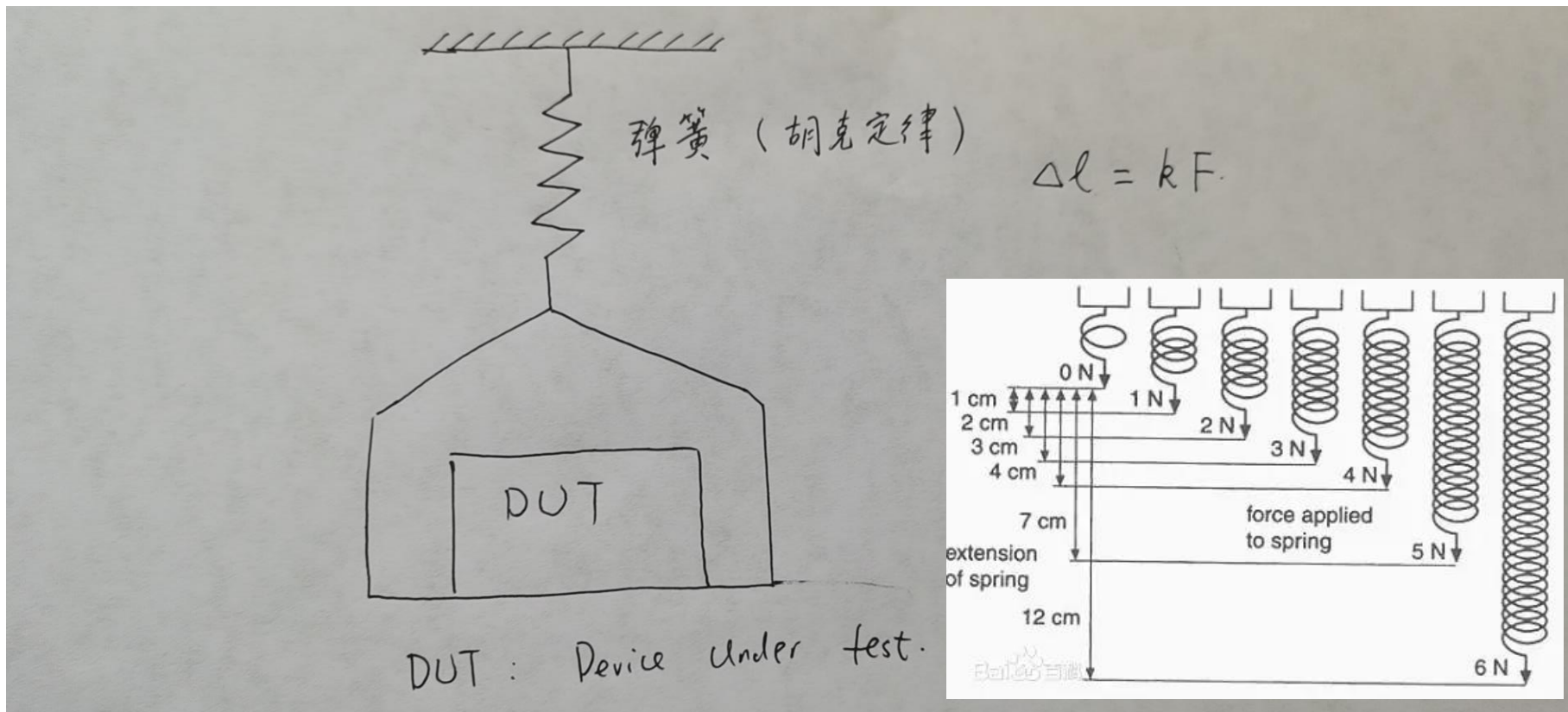
引子：测量的基本要素 (3)

要想测量某个物理量

- 首先需要提供一个标准，例如一公斤有多重，一米有多长，一秒有多久等等
- 其次需要设计一种机制，这种机制能够将标准（通常是一个离散的量）转换为连续可变的量。



引子：测量的基本要素之进一步讨论



此简单例子中的重要概念：

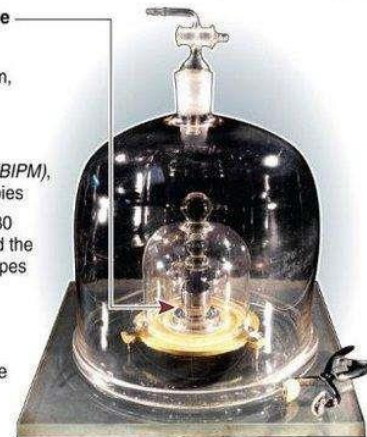
1. 标准的传递和**标定**
2. 可测范围
3. 测试得到的结果究竟是什么？
4. **校准**和**去嵌入**

The kilogramme prototype

The kilogramme is officially defined by a lump of metal stored in a vault in France for more than 120 years under the International System of Units (SI)

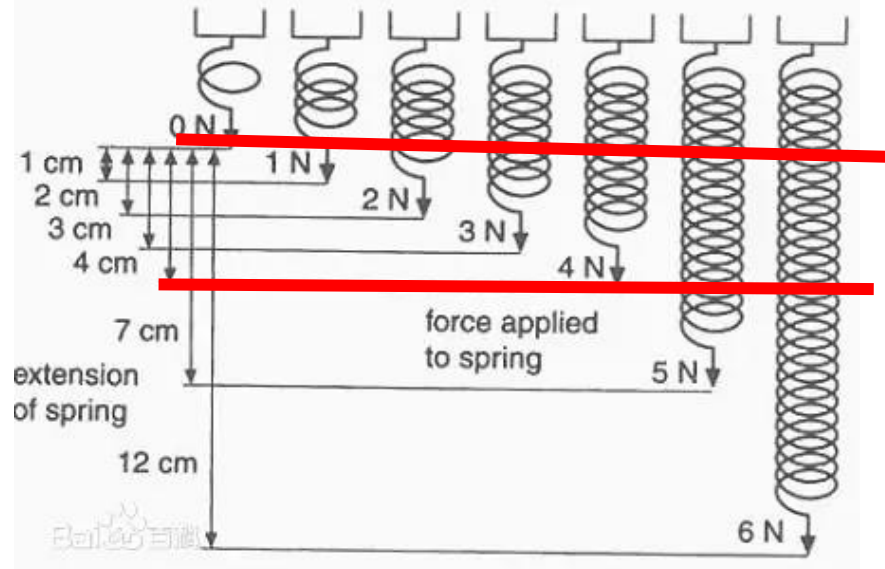
The International prototype

- ▶ Manufactured in 1889
- ▶ Made up of 90% platinum, and 10% iridium
- ▶ Kept in a vault at the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), along with six official copies
- ▶ The basis of more than 80 copies distributed around the world as national prototypes
- ▶ Steam-cleaned under strict guidelines on a regular basis
- ▶ The last remaining base unit measured against a specific material artefact



The chunk of metal is under triple lock-and-key in Sevres, France

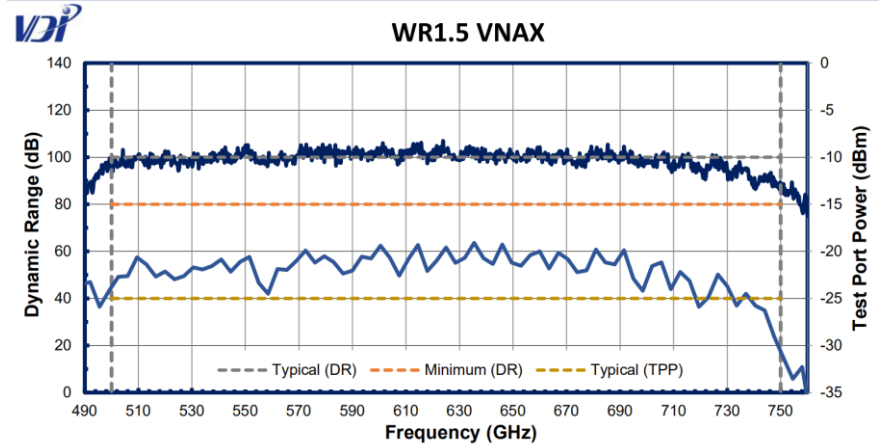
- 1. 标准的传递和**标定**
- 2. 可测范围
- 3. 测试得到的结果究竟是什么？



- 标定**和测量的过程：
- 1. 弹簧自然下垂，长度为2cm
 - 2. 找一个2N的砝码挂上去，测得长度为4cm，因此形变量为2cm (4-2)
 - 3. 根据胡克定律，推算出弹簧对重物的响应为1cm/N
 - 4. 挂上一个未知重物，测得形变为Lcm，因此推测其重量(质量)为： $(L-2) / 1 = (L-2) \text{ N}$
 - 5. 弹簧的可测范围（动态范围）为0-4N

测试得到的实际是一个**无量纲的数**

仪器型号	2438PA/PB
通道数	单/双通道
频率范围*	9kHz~500GHz
脉冲功率范围*	-40dBm~+20dBm
连续波功率范围*	-70dBm~+50dBm



4. 校准和去嵌入 (De-embedding)

“校准”是操作；“去嵌入”是目标

一个现实生活中的例子，你去食堂打饭。

你：“阿姨，猪脑壳咋卖”

阿姨：“35一斤”

你：“拿盘子给我打一斤”

阿姨：“好嘞”

你：“阿姨，你咋盘子也给我称进去了”

阿姨：“小朋友你不懂，测量之前，针对盘子的重量已经我已经做了**校准**了，盘子作为**测量夹具（工装、fixture）**已经被我**去嵌入**了”。

你：你悄咪咪的把盘子拿走，秤上面写着：“**-0.15kg**”，于是你大喊666，刷卡走了。

阿姨：“回来回来，超过30了要输密码，你咋就走了呢？”

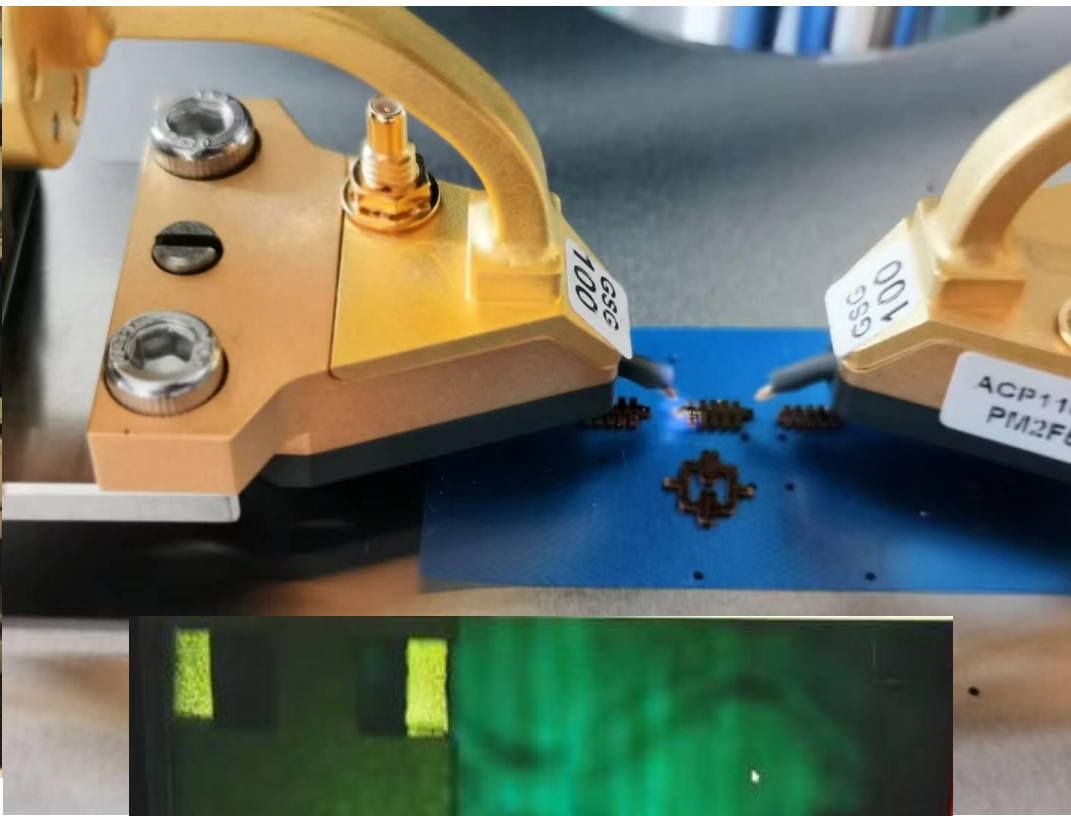
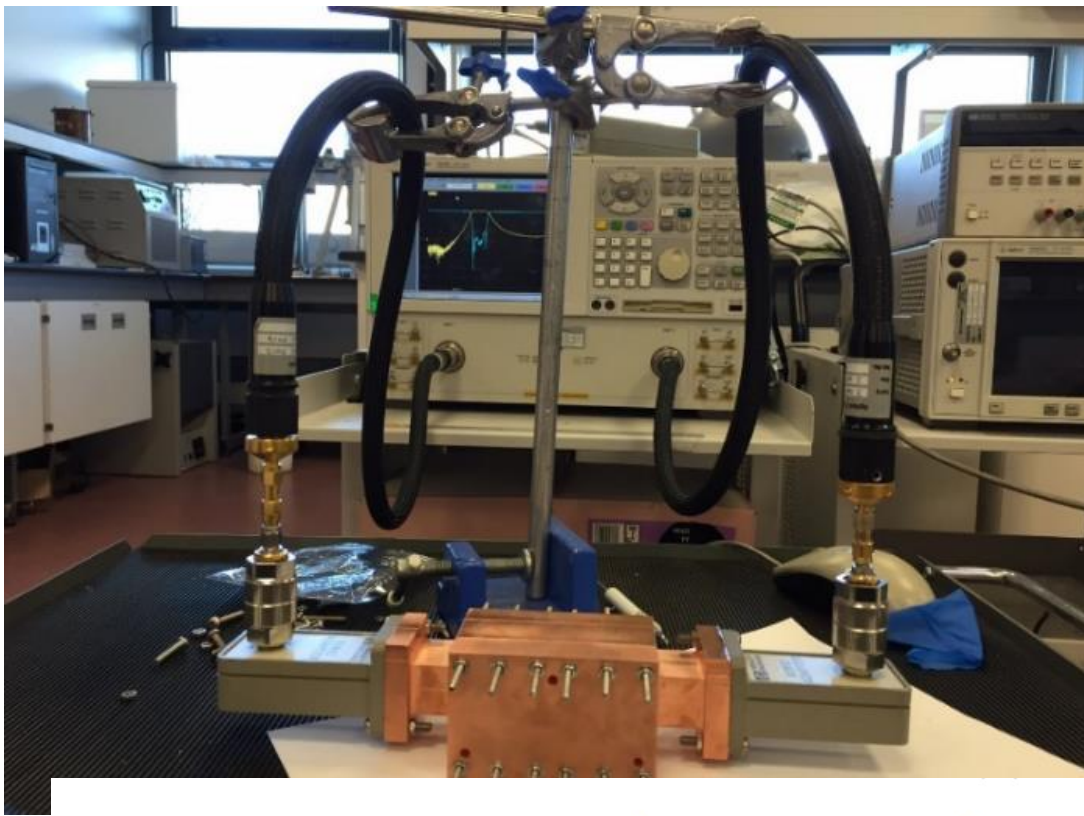
郭老师：“珍惜，你在这门课里很难再遇到**这么简单粗暴的去嵌入算法**了（可能在施老师那边，测天线的时候，还会遇到那么一两次）”

注：“测量夹具”指为了测量某个器件，**不得不和这个器件一起被测的那个东西**，例如，装猪脑壳的盘子，你穿的鞋和衣服（测身高体重），电缆，波导，射频探针等。

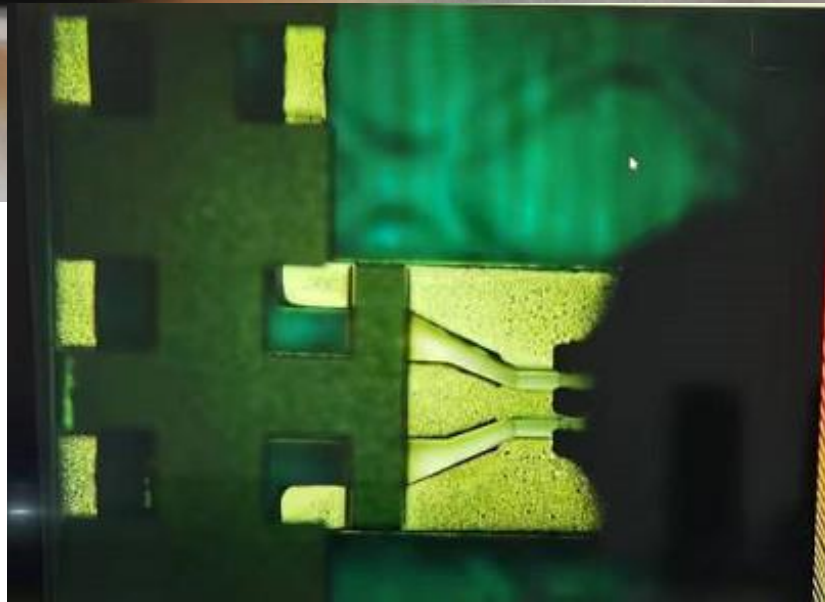
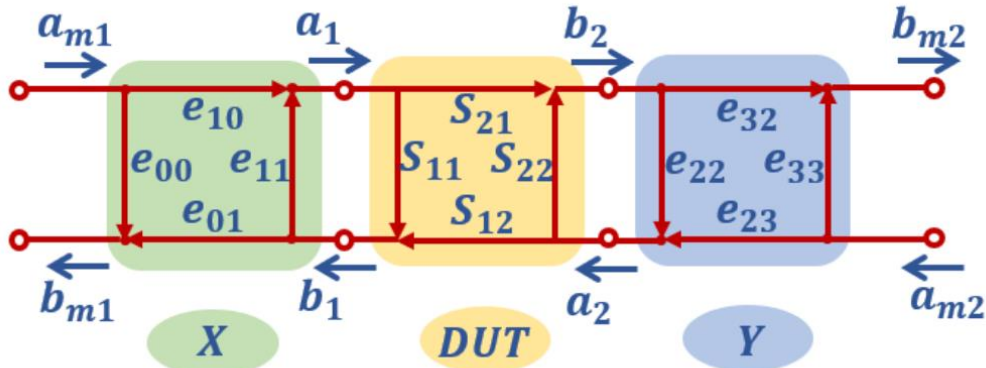


$L(SI) \rightarrow S \rightarrow Z$, 淘精且准

去嵌测试，水好论文



去皮称重，算精品价



本章目录

第一节 微波测量中的标准与定标：从国际单位制（SI）谈起

第二节 频率的标准及定标的方法

第三节 功率的标准及定标方法

第四节 阻抗的标准及定标方法

从国际基本单位制说起



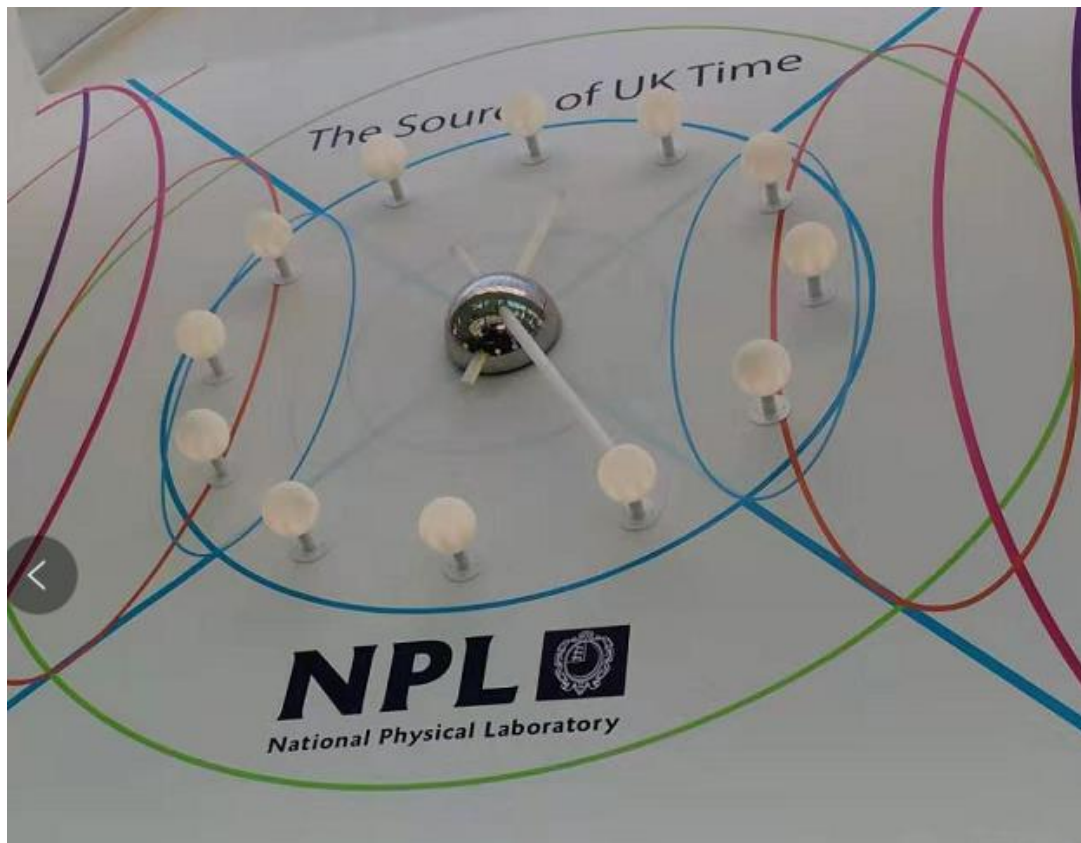
The seven SI base units

Symbol	Name	Quantity
s	second	time
m	metre	length
kg	kilogram	mass
A	ampere	electric current
K	kelvin	temperature
mol	mole	amount of substance
cd	candela	luminous intensity

其余单位可由基本单位导出

例如：频率（赫兹）可表示为 $1/s$

能量（焦耳）可表示为 $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$



计量部门：为各种物理量设定标准
例如：1kg是多重，1m是多长，1s有多久

(上图为英国国家物理实验室，全世界最老牌的计量机构之一)

标准与定标：从一个笑话讲起

一天，数学家觉得自己已受够了数学，于是他跑到消防队去宣布他想当消防员。

消防队长说：“您看上去不错，可是我得先给您一个测试。”

消防队长带数学家到消防队后院小巷，巷子里有一个货栈，一只消防栓和一卷软管。消防队长问：“假设货栈起火，您怎么办？”数学家回答：“我把消防栓接到软管上，打开水龙，把火浇灭。”

消防队长说：“完全正确！最后一个问题：假设您走进小巷，而货栈没有起火，您怎么办？”

数学家疑惑地思索了半天，终于答道：“我就把货栈点着。”消防队长大叫起来：“什么？太可怕了！您为什么要将货栈点着？”

数学家回答：“这样我就把问题化简为一个我已经解决过的问题了。”

当你要测试一个物理量的时候，先别想着直接去测它，要想办法把锅甩给计量机构，即：
Trace the measuring quantity to SI units ! !

物理量名称	物理量符号	物理量单位	单位的名称	单位的符号	单位定义
时间	t	1s	秒	s	1秒是铯-133原子在基态下的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的时间
长度	L	1m	米	m	1米是光在真空中在 $(299792458)^{-1}$ s内的行程
质量	m	1kg	千克	kg	1千克是普朗克常量为 $6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s($6.62607015 \times 10^{-34}$ kg·m ² ·s ⁻¹)时的质量
电流	I	1A	安培	A	1安培是1s内通过 $(1.602176634)^{-1} \times 10^{19}$ 个元电荷所对应的电流，即1安培是某点处1s内通过1库伦电荷的电流， $1A = 1C/s$.
热力学温度	T	1K	开尔文	K	1开尔文是玻尔兹曼常数为 1.380649×10^{-16} J·K ⁻¹ (1.380649×10^{-23} kg·m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹)时的热力学温度
物质的量	n (v)	1mol	摩尔	mol	1摩尔是精确包含 $6.02214076 \times 10^{23}$ 个原子或分子等基本单元的系统的物质的量
发光强度	I (Iv)	1cd	坎德拉	cd	1坎德拉是一光源在给定方向上发出频率为 540×10^{12} s ⁻¹ 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $(683)^{-1}$ kg·m ² ·s ⁻³ 时的发光强度

把待测的物理量用如上几个SI单位的线性组合表示出来
这个操作就是“甩锅”给计量单位的过程

例如：频率（赫兹）可表示为1/S
能量（焦耳）可表示为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

标准与定标的历史：从古代到近代

- 古代计量标准：人（一般是某个皇帝）
- 近代计量标准：物（一坨有形的物质）
- 现代计量标准：自然常数（永远不会变的东西）

古代长度标准：皇帝的胳膊或者腿



=

俺不服，赢老哥，你明显只是帽子高！



+



李老弟，显然，你没寡人高

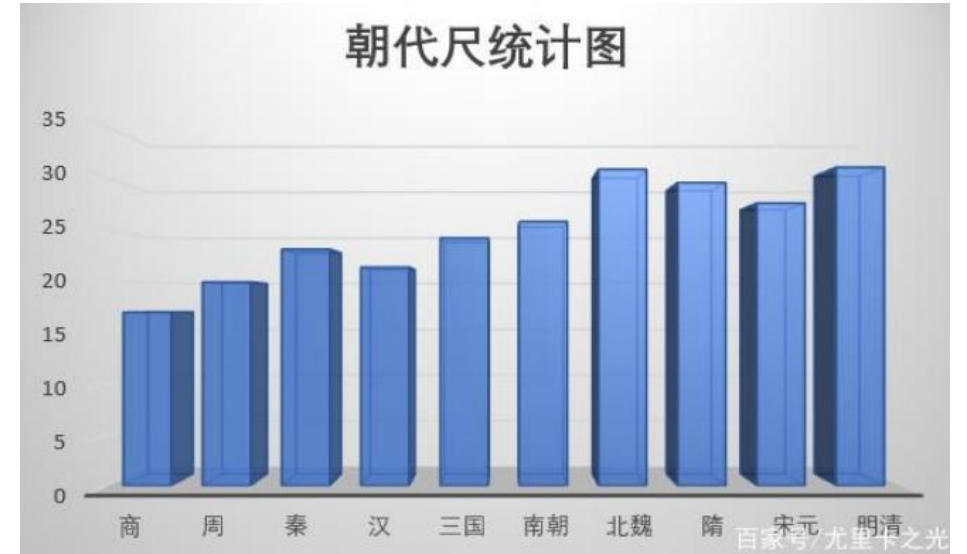


+



1 (长颈鹿) = 2.7 (唐太宗)

1 (长颈鹿) = 2.5 (秦始皇)



具有**时间**（朝代）和**空间**（国家和地区）的双重局限性

近代定标方法：一坨物质

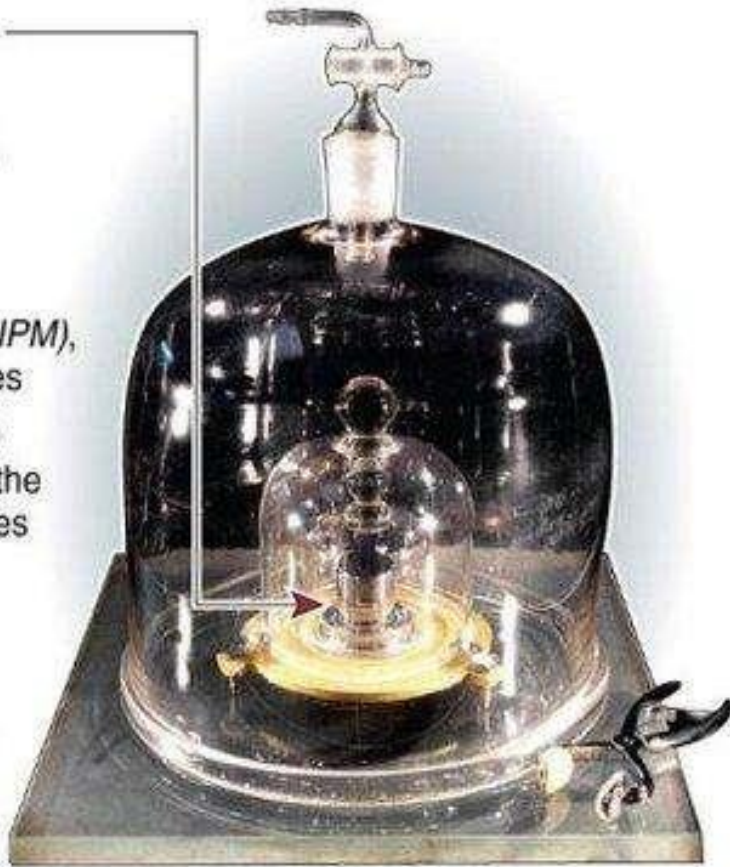
https://www.bilibili.com/video/BV1rW41147be?p=1&share_medium=android&share_plat=android&share_session_id=d9d1ce29-f861-442d-bb514460f3e3a953&share_source=WEIXIN&share_tag=s_i×tamp=1648546915&unique_k=xzqKWuB

The kilogramme prototype

The kilogramme is officially defined by a lump of metal stored in a vault in France for more than 120 years under the International System of Units (SI)

The International prototype

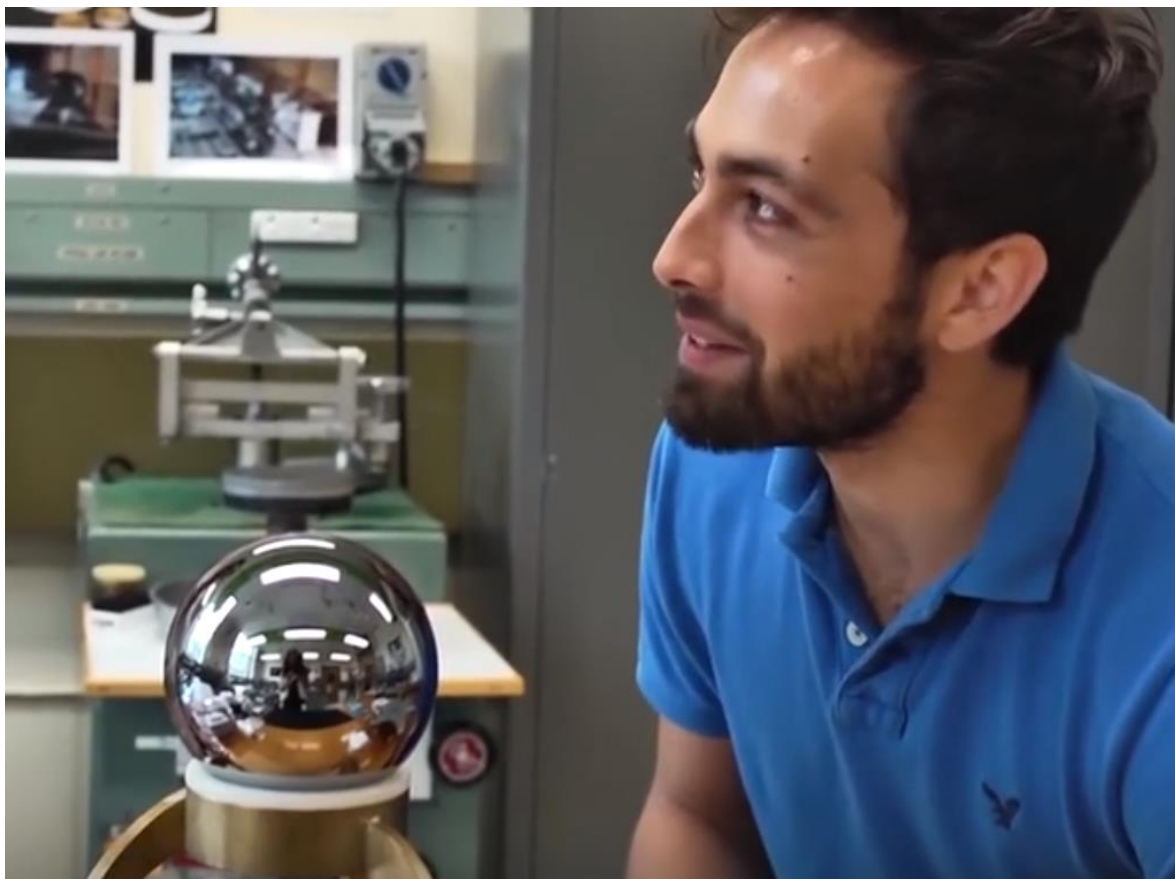
- ▶ Manufactured in 1889
- ▶ Made up of 90% platinum, and 10% iridium
- ▶ Kept in a vault at the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), along with six official copies
- ▶ The basis of more than 80 copies distributed around the world as national prototypes
- ▶ Steam-cleaned under strict guidelines on a regular basis
- ▶ The last remaining base unit measured against a specific material artefact



The chunk of metal is under triple lock-and-key in Sevres, France

在1889~1989年的100年间，其他国家千克原器与国际千克原器的质量发生了约0.05毫克的变化。作为唯一实物基准的国际千克原器的稳定性受到质疑，科学家们开始致力于质量单位的重新定义。有科学家提出，可以使用自然界中的基本物理常数来重新定义质量单位，因为这些物理常数不会改变，用它们来定义包括千克在内的基本单位，就再也不用担心随时间推移会影响单位的量值了。

国际千克容器 (big K) : 耗资几千万“做了个球”



https://www.bilibili.com/video/BV19t411T78V/?spm_id_from=333.788.recommend_more_video.4

从古到今均适用：时间的标准：周期性运动（1）

孔子：“日往则月来，月往则日来，日月相推而明生焉；寒往则暑来，暑往则寒来，寒暑相推而岁成焉！”

“鼓之以雷霆，润之以风雨；日月运行，一寒一暑”

西游记：天上一日，人间一年。

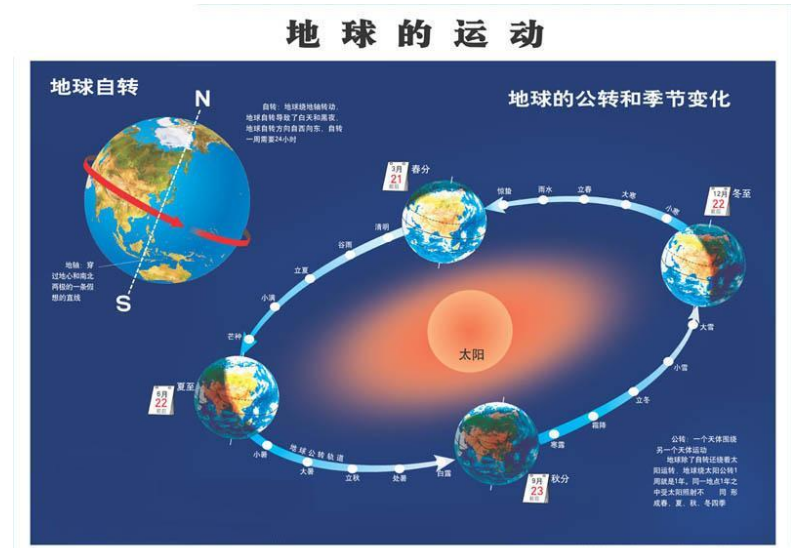
苏东坡：明月几时有？把酒问青天。不知天上宫阙，今夕是何年。

在更大尺度的时间和空间上具有局限性和不确定性

如何制定（选择）一个：

1.永远能用

2.地球人和外星人都能用的标准？



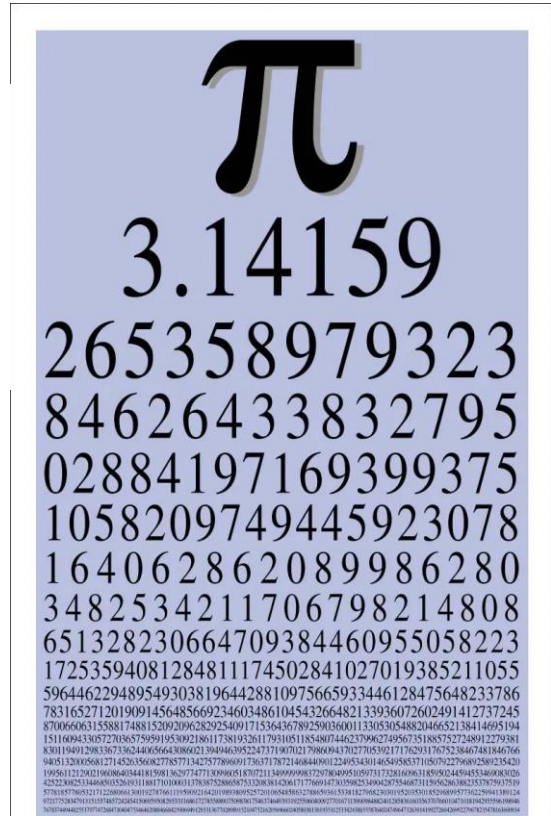
自然常数与定标：叶文洁如何教三体星人认字？

手把手教你如何构建红岸基地同款4A级“自解译系统”！

- 数学常数，如圆周率pi和自然常数e
- 物理常数，如玻尔兹曼常数（温度），普朗克常数（质量）
- 原子/分子的谐振特性（频率）
- 光速（长度）
- 电子电荷量（电流）

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n$$

• A ~~diamond~~ constant is Forever!



物理量名称	物理量符号	物理量单位	单位的名称	单位的符号	单位定义
时间	t	1s	秒	s	1秒是铯-133原子在基态下的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的时间
长度	L	1m	米	m	1米是光在真空中在 $(299792458)^{-1}$ s内的行程
质量	m	1kg	千克	kg	1千克是普朗克常量为 $6.62607015 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ($6.62607015 \times 10^{-34} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)时的质量
电流	I	1A	安培	A	1安培是1s内通过 $(1.602176634)^{-1} \times 10^{19}$ 个元电荷所对应的电流，即1安培是某点处1s内通过1库伦电荷的电流， $1\text{A} = 1\text{C/s}$.
热力学温度	T	1K	开尔文	K	1开尔文是玻尔兹曼常数为 $1.380649 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ($1.380649 \times 10^{-23} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)时的热力学温度
物质的量	n (v)	1mol	摩尔	mol	1摩尔是精确包含 $6.02214076 \times 10^{23}$ 个原子或分子等基本单元的系统的物质的量
发光强度	I (Iv)	1cd	坎德拉	cd	1坎德拉是一光源在给定方向上发出频率为 $540 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $(683)^{-1} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 时的发光强度

例：时间的标准：周期性运动（2）

- **Clock = Oscillator + Counter**

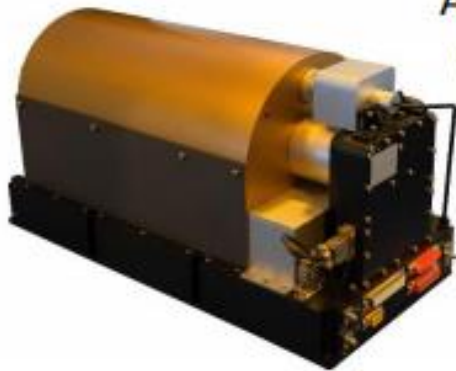
$$\text{🌀} + \text{98889} = \text{Time}$$



Pendulum



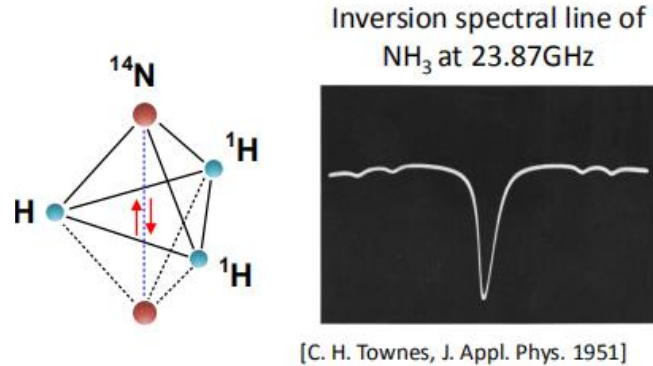
Crystal Oscillator



Atomic Clock

[Robert Lutwak, Principles of Atomic Clocks, IFCS 2011]

The First Molecular (Atomic) Clock



Inversion spectrum of ammonia

Advantages:

- All electronics
- Simple clock configuration

Disadvantages:

- Weak absorption intensity
- Bulky gas cell due to the long wavelength

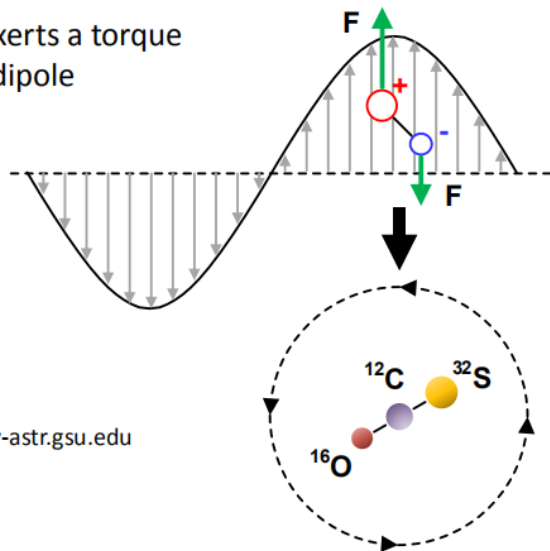


First "Atomic" Clock in 1949
($\sigma \approx 2 \times 10^{-8}$)

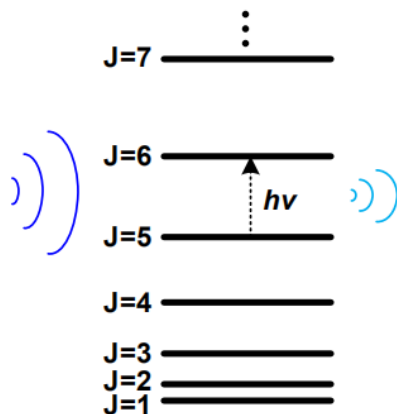
[Harold Lyons, "Atomic Clocks",
Scientific American, 1957]

现代定标方法：自然常数+计算公式

The EM field exerts a torque on an electric dipole



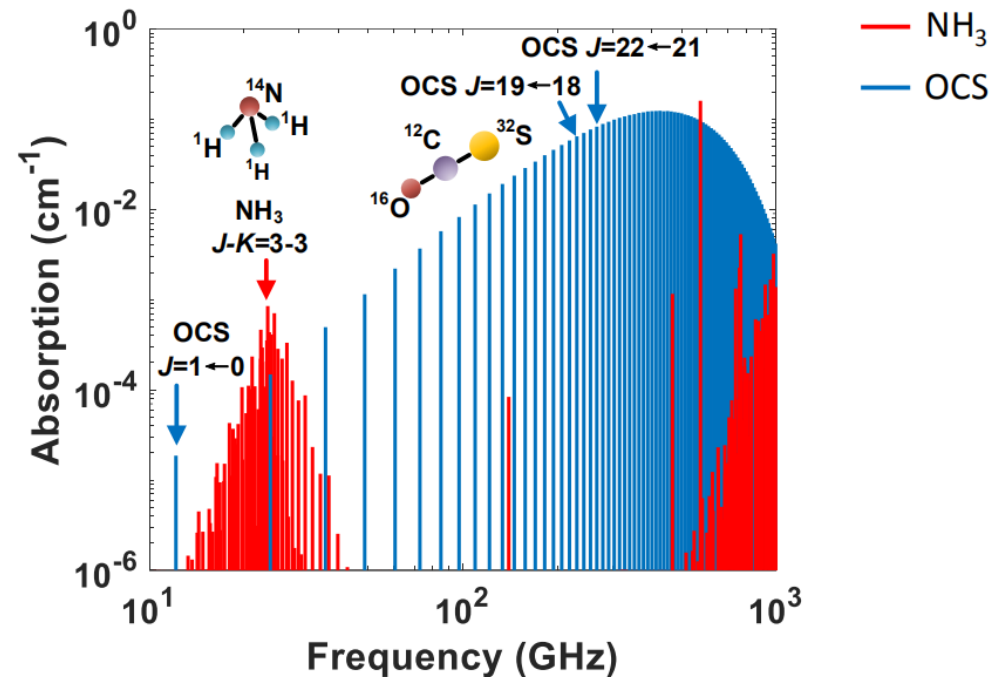
hyperphysics.phy-astr.gsu.edu



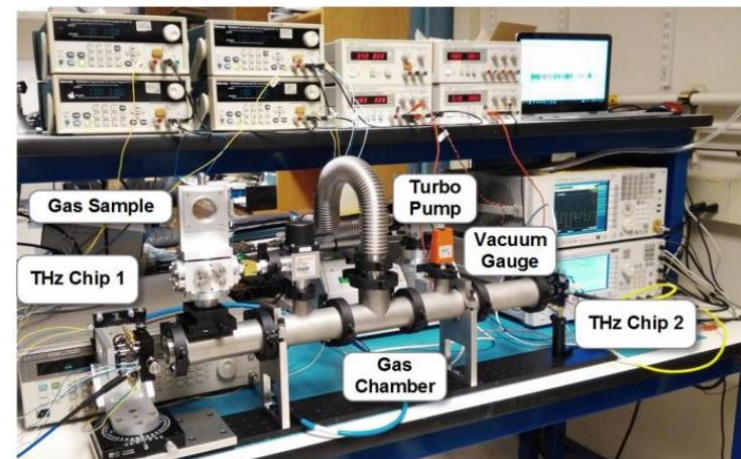
$$\text{Energy of State } J: E_J = \frac{h^2}{8\pi^2 I} J(J+1)$$

$$\text{Resonant frequency: } \nu = \frac{E_{J+1} - E_J}{h} = \frac{h}{4\pi^2 I} (J+1)$$

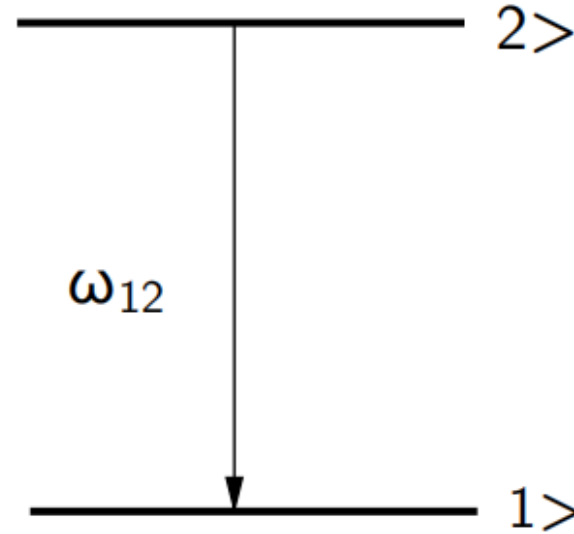
- **Molecular rotation by a torque exerted from an RF wave on the electric dipole**
- **For linear polar molecules**
 - Equally-spaced absorptive transition lines



不需要测试就能直接算出来的标准才是好标准
地球人和外星人都能用



- atomic clocks transition in microscopic quantum systems
- new SI definition of time unit in 1967: caesium primary standard



Definition

"The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom." [2]

- 什么是一个好的标准？

- (1) 与自然常数或物理定律相关联
- (2) 数值是绝对的，理论上没有误差

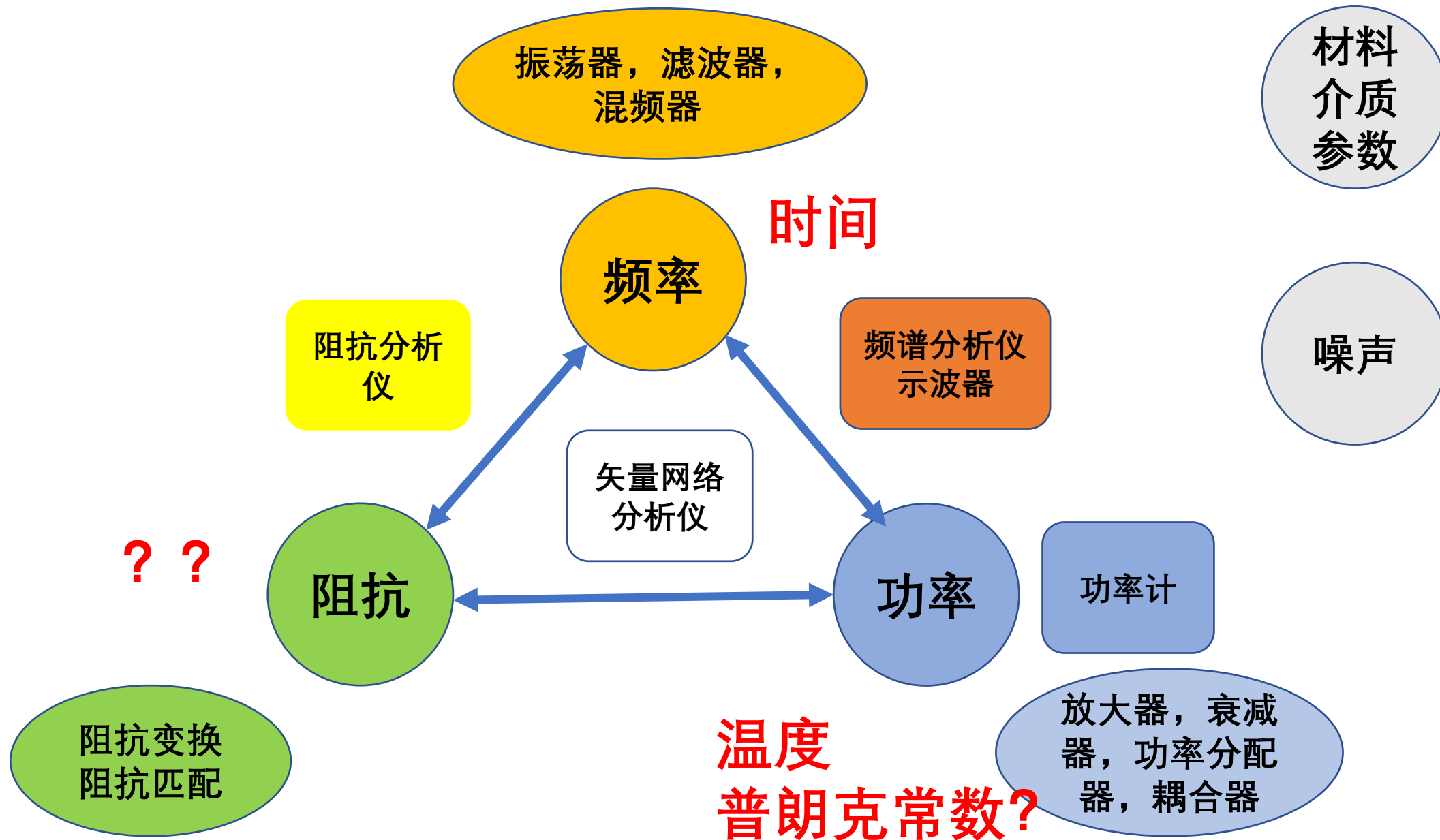
- 例：1秒是铯-133原子在基态下的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的时间。

- 例2：1米是光在真空中在 $(299792458)^{-1}$ s内的行程

- 例3：

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$$

微波测量中的“基本单位”



小结

- 1. 早到秦始皇都知道，做测量（估计是用来收税）之前要先“统一度量衡（定标准）”。
- 2. 古时候的皇帝喜欢用自己当标准，不仅具有时间和空间的双重局限性，可能还会暴露自己比别人矮。
- 3. 用有形的物质（如一坨金属）做标准，可能也会存在时间或者空间的局限性；
- 4. 最好的标准应该是可以直接算出来的，如自然常数。

“A ~~Diamond~~ Constant is Forever”

本章目录

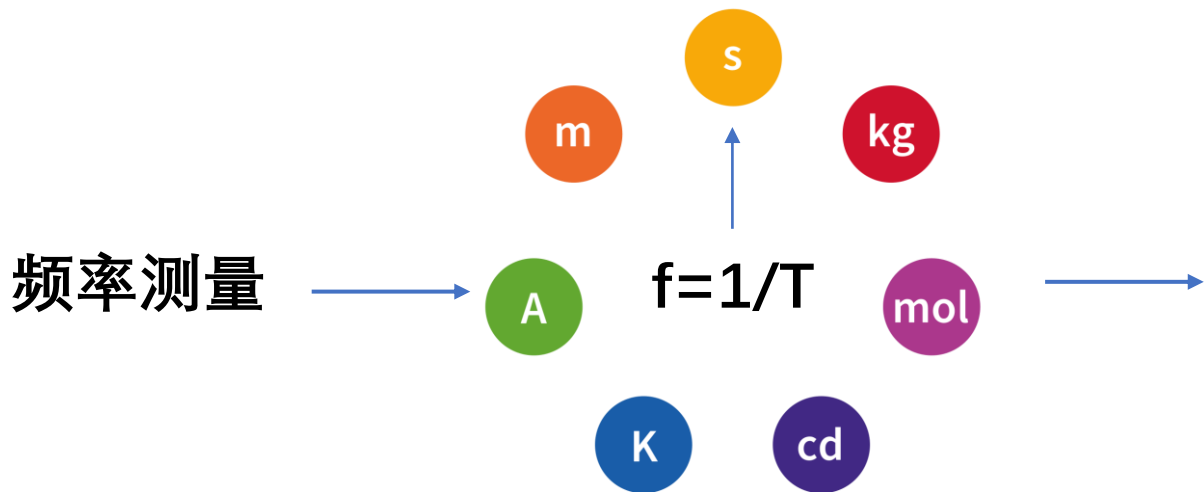
第一节 微波测量中的标准与定标：从国际单位制（SI）谈起

第二节 频率的标准及定标的方法

第三节 功率的标准及定标方法

第四节 阻抗的标准及定标方法

时间和频率的标准：周期性运动



周期性运动

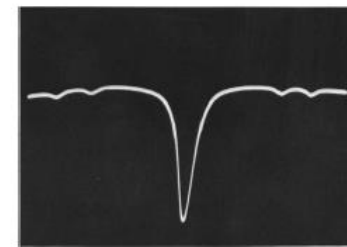
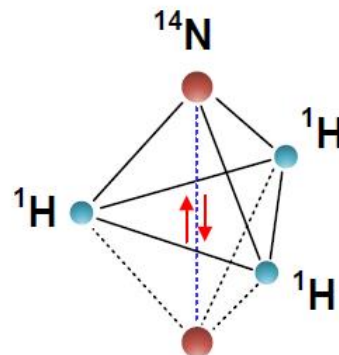


Crystal oscillator

时间的标准

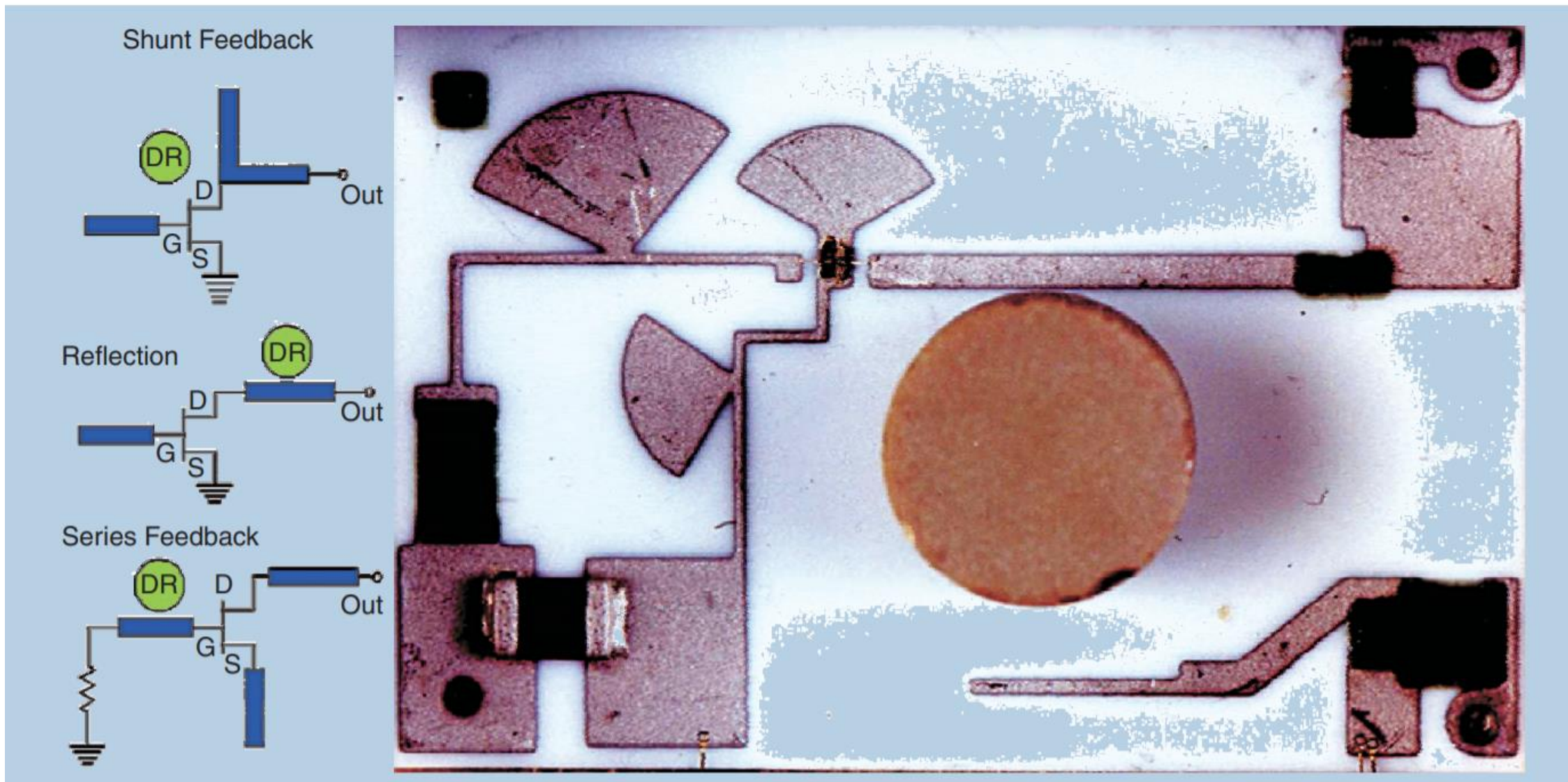
晶体振荡器
分子或原子的周期
微波谐振腔

在基本单位里对应时间



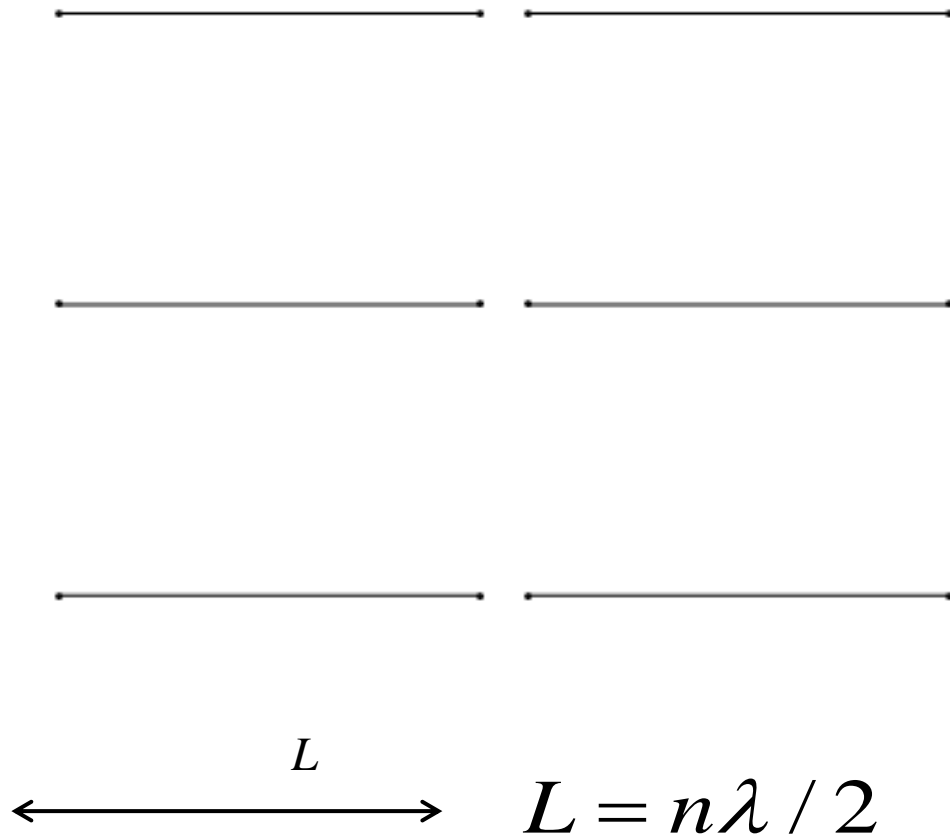
Inversion spectral line of NH₃ at 23.87GHz

频率源电路 (1)



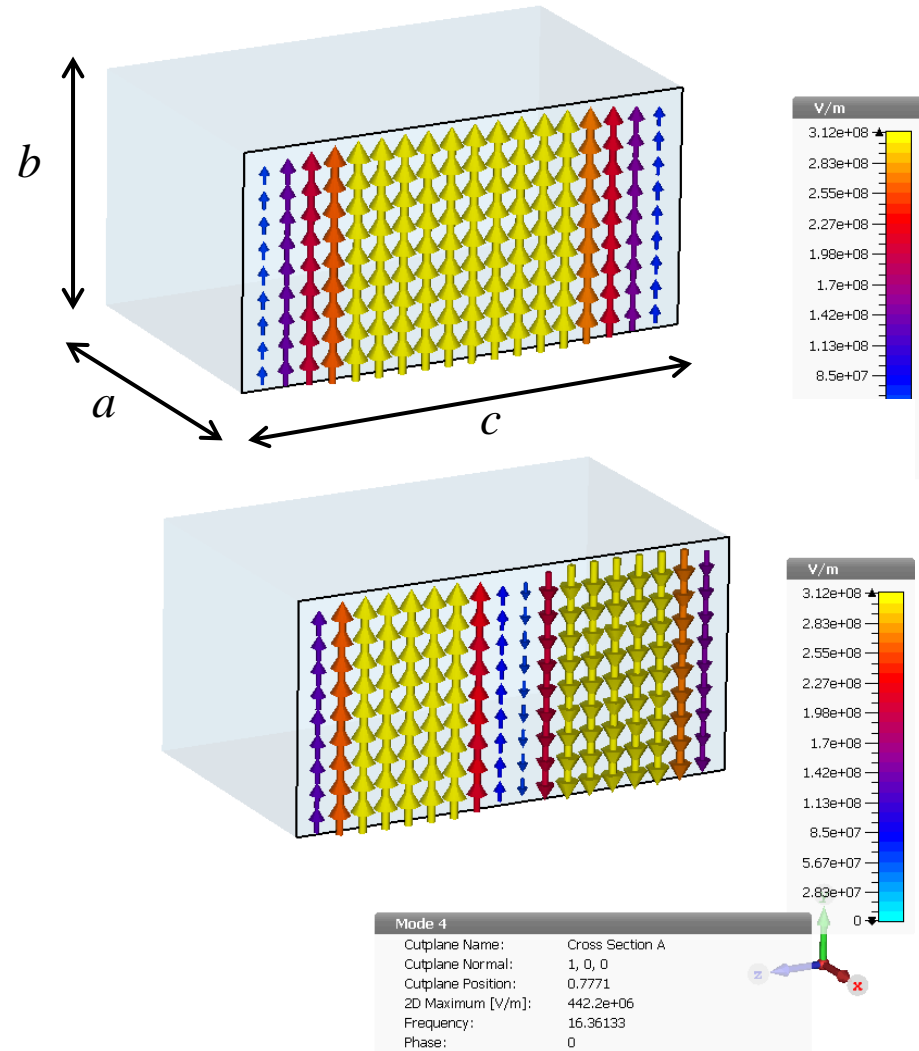
思考：在这个例子中，频率究竟由哪个物理量决定？

频率究竟由哪个物理量决定？

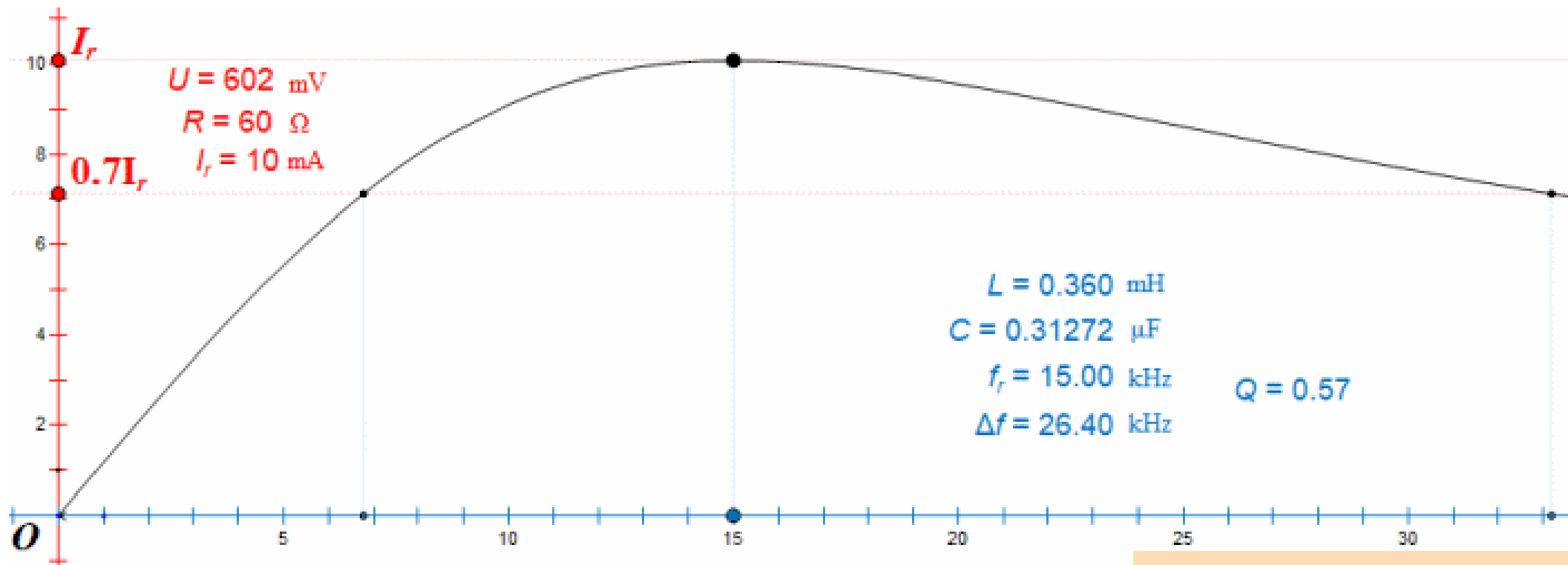


微波谐振腔的频率响应特性

$$E_y = E_0 \cdot \sin(m\pi x / a) \cdot \sin(n\pi y / b) \cdot \sin(l\pi z / c)$$



频率稳定性与品质因数



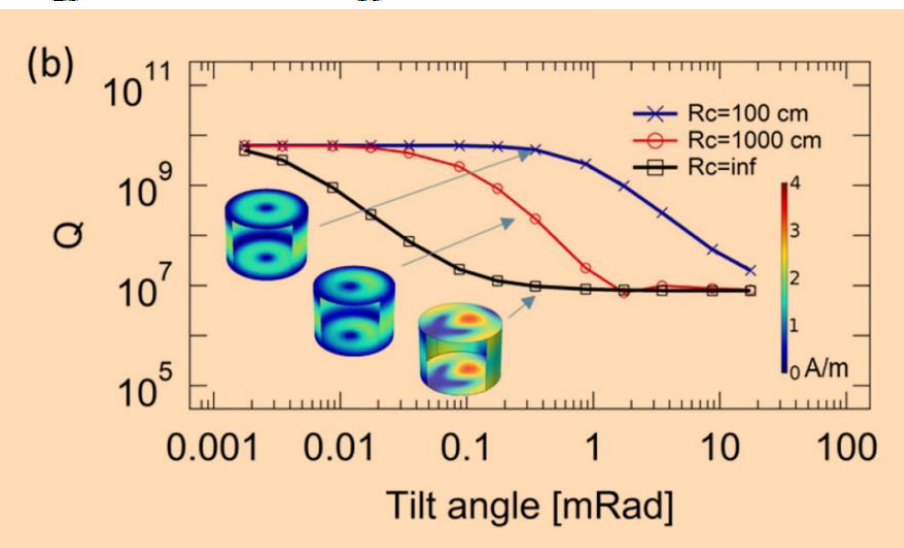
LC: 10^2

晶体振荡器: 10^4

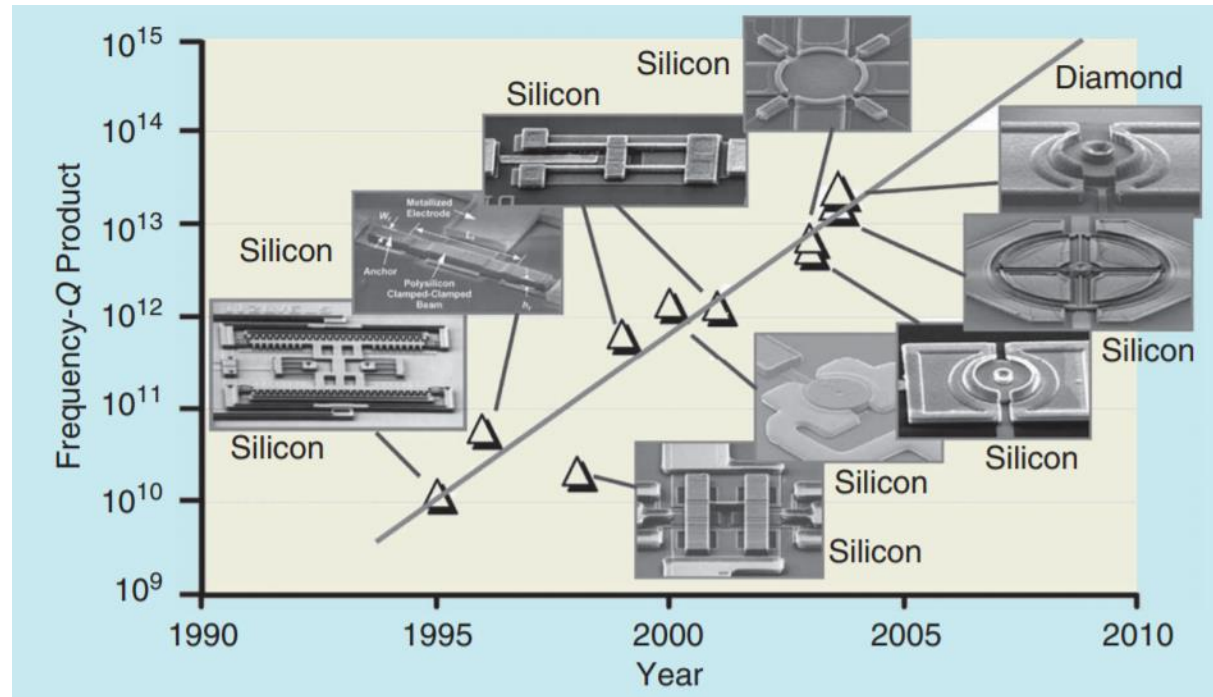
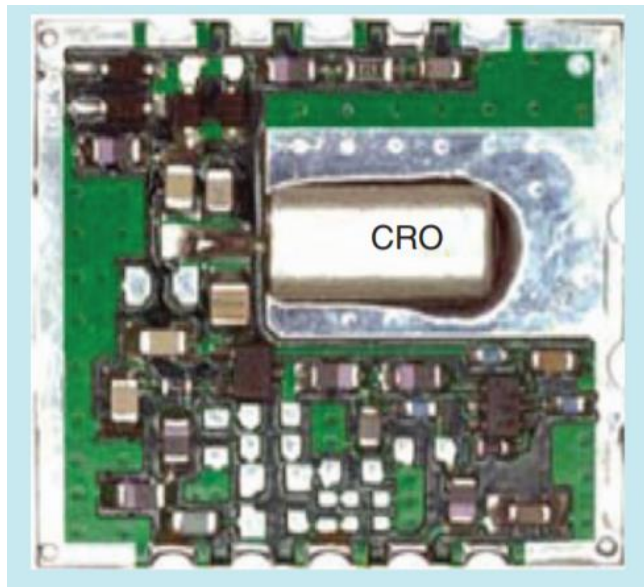
微波谐振腔: 10^3 - 10^4

超导谐振腔: 10^8 - 10^9

理论上的原子/分子谱线: Infinity!



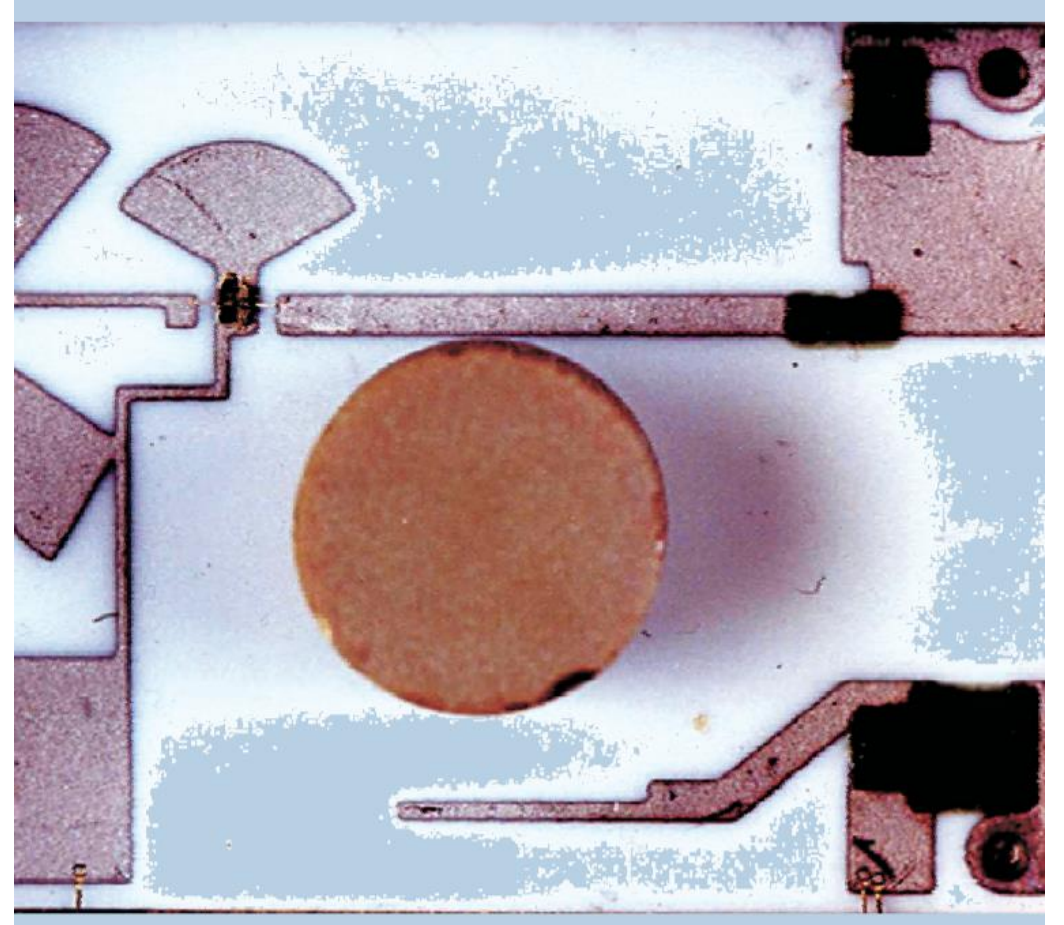
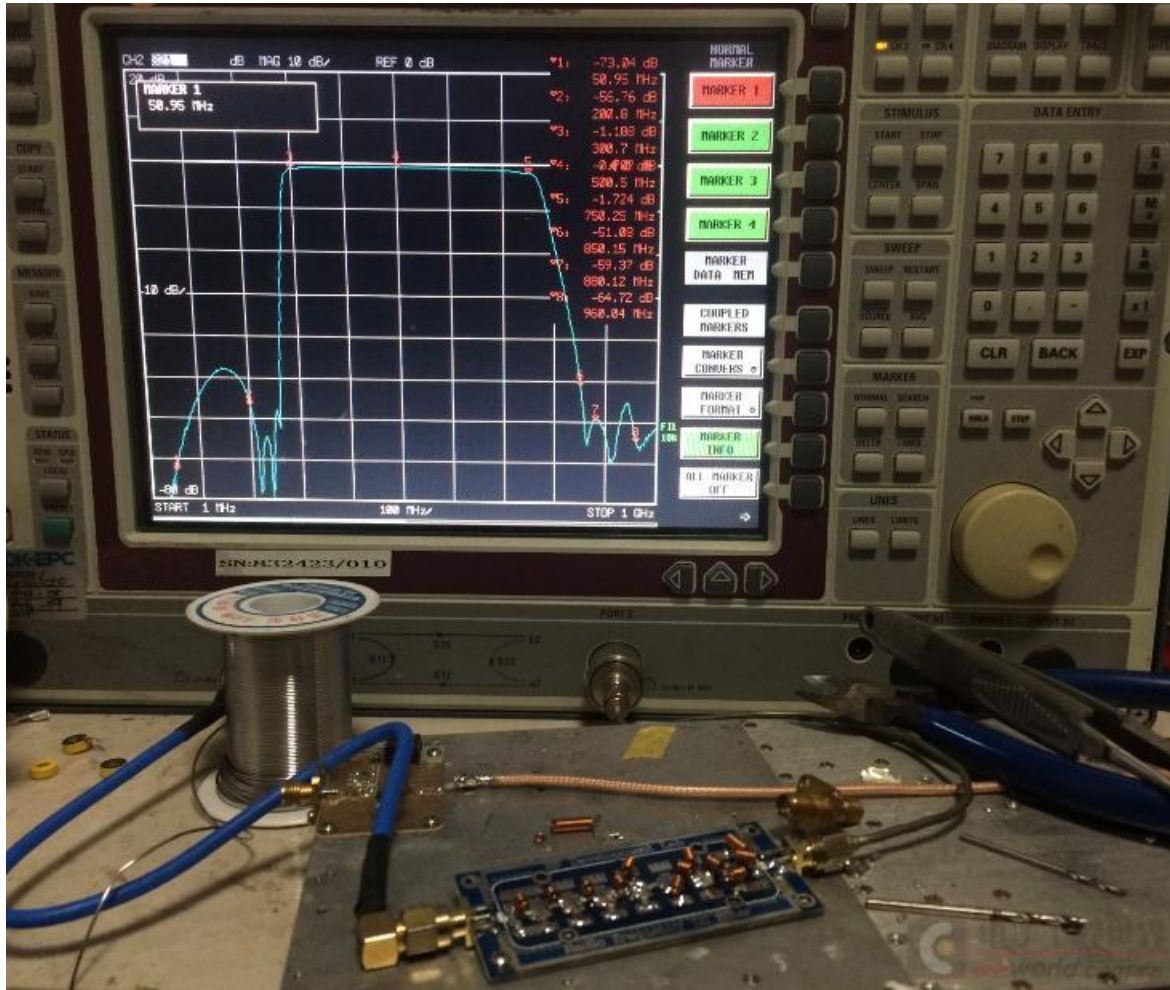
频率源电路 (2)



Flexural Mode		Bulk Mode	
Folded Beam		Disk (Contour Mode)	
Clamped-Clamped Beam		Disk (Wine Glass Mode)	
Free-Free Beam		Square (Extension)	
Ring		Square (Deform)	

结论：虽然“频率”所直接对应的基本单位是“时间”（一级标准）但是在大多数的微波测试系统中，频率的基准实际上是“长度”（二级标准）

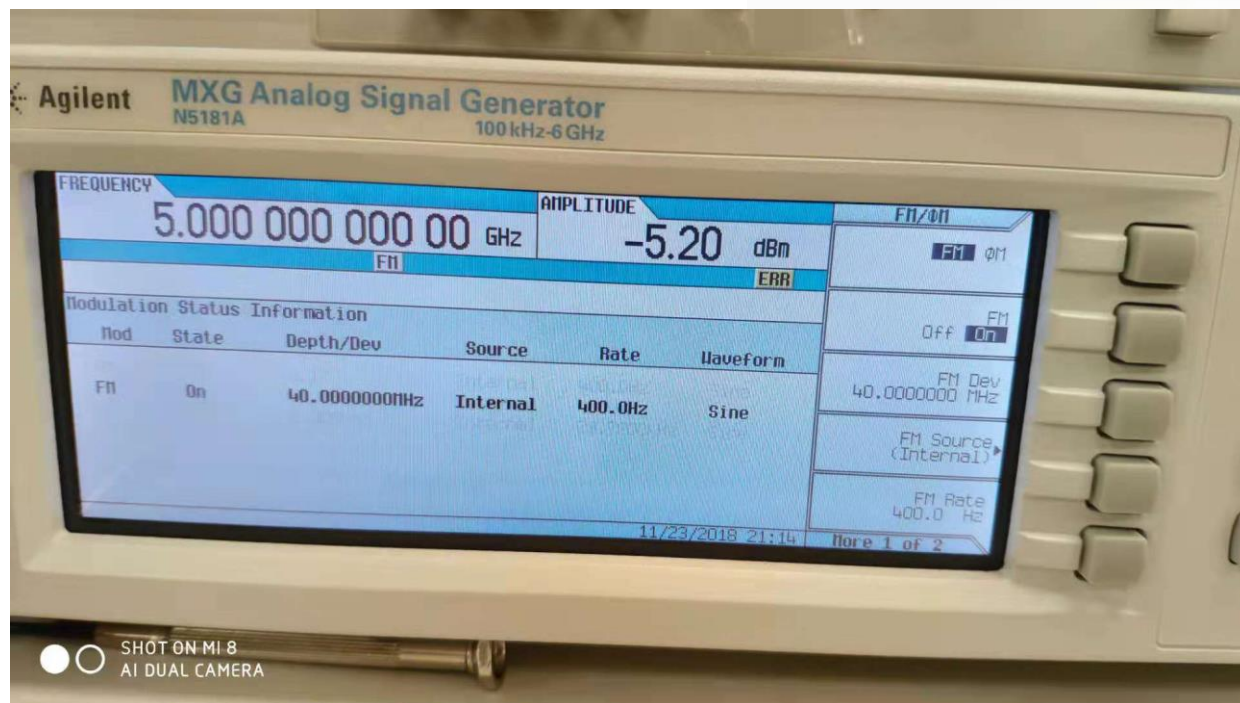
从上级标准到下级标准的传递



为了保证输出频率的精确性，通常需要用一台更精确的仪器对该电路进行调试。这一操作的本质是标准的传递

频率源电路 (3) : 从频率标准到任意频率的产生?

Crystal oscillator

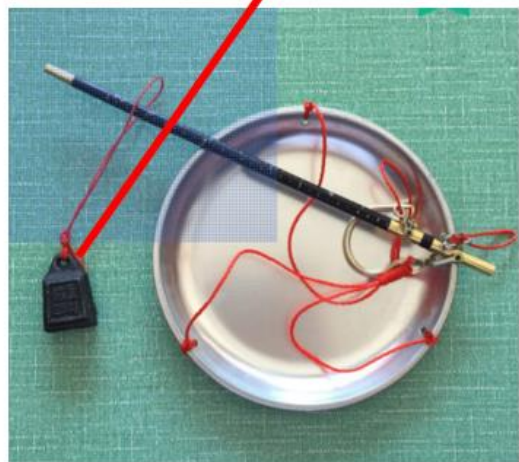
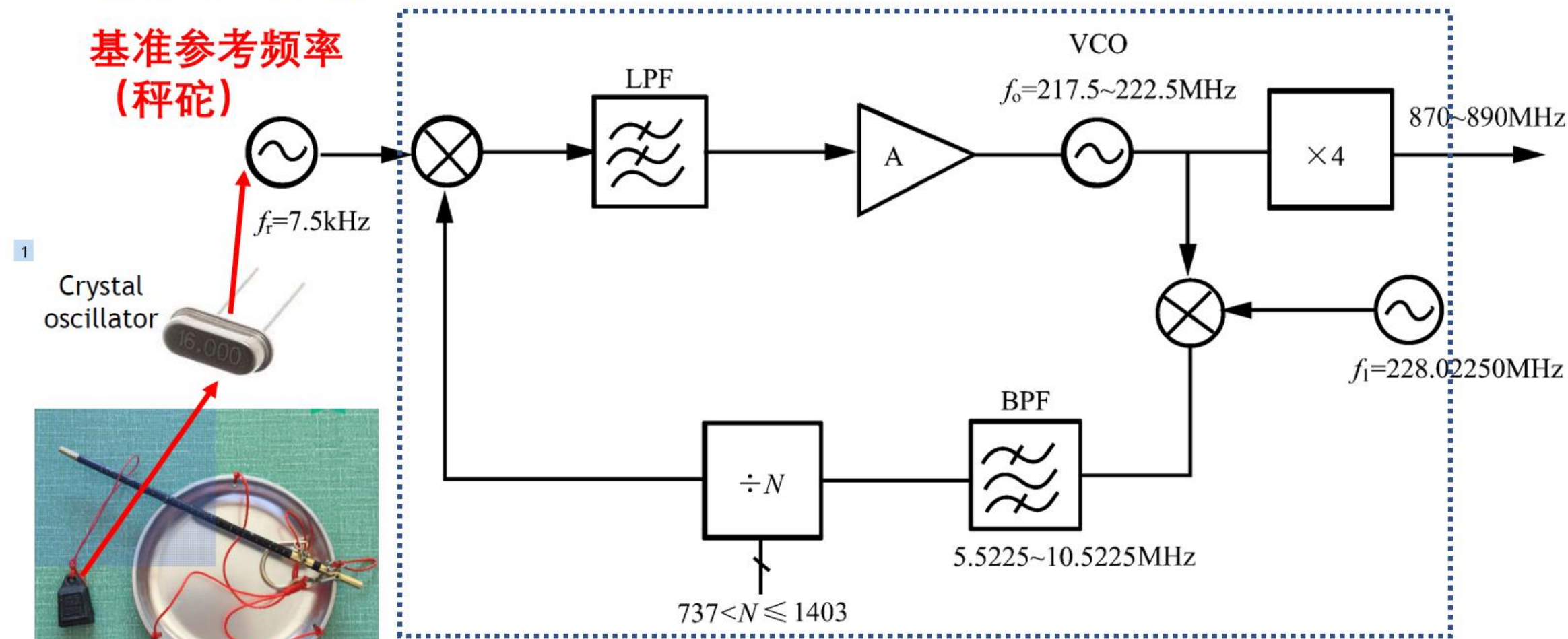


信号输出端口

例：870-890MHz频率综合源

可以产生大量与基准参考频率源具有同样高精度和稳定度的频率信号

输出频率
(来3.1415斤猪肉?)



通过参考频率产生大量其它频率的电路 (秤杆)

小结

- 1. 频率所对应的国际基本单位是时间（一级标准）
- 2. 绝大多数的微波电路不会直接用基本单位来定标
- 3. 各类高Q值的微波谐振器是频率的二级标准(因此频率实际上由长度定义！)
- 4. 二级标准可以通过一级标准来进一步校准，这一过程称为“标准传递”
- 5. 从离散的频率标准到连续的频率产生需要用到电路

本章目录

第一节 微波测量中的标准与定标：从国际单位制（SI）谈起

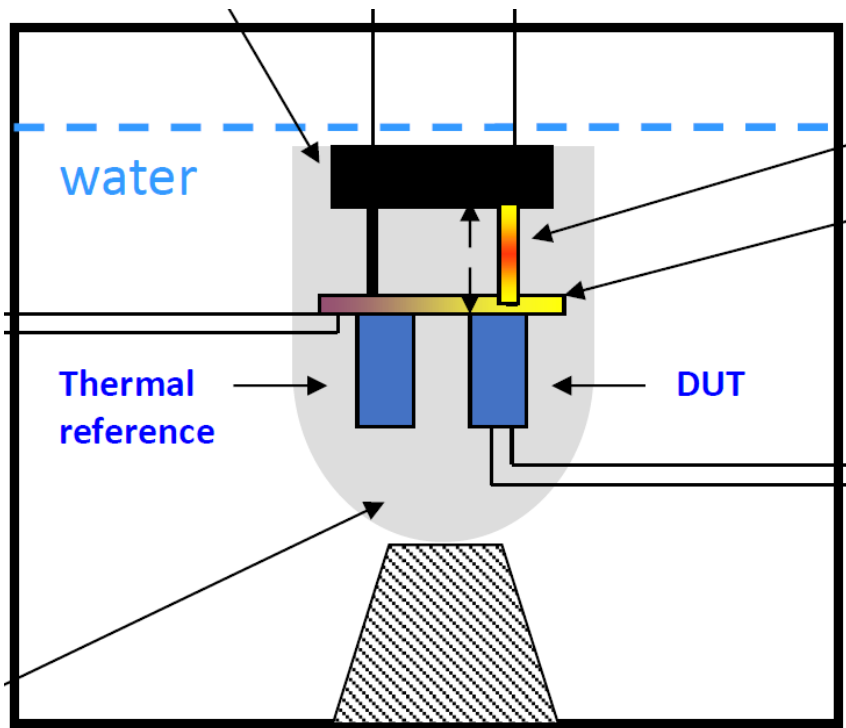
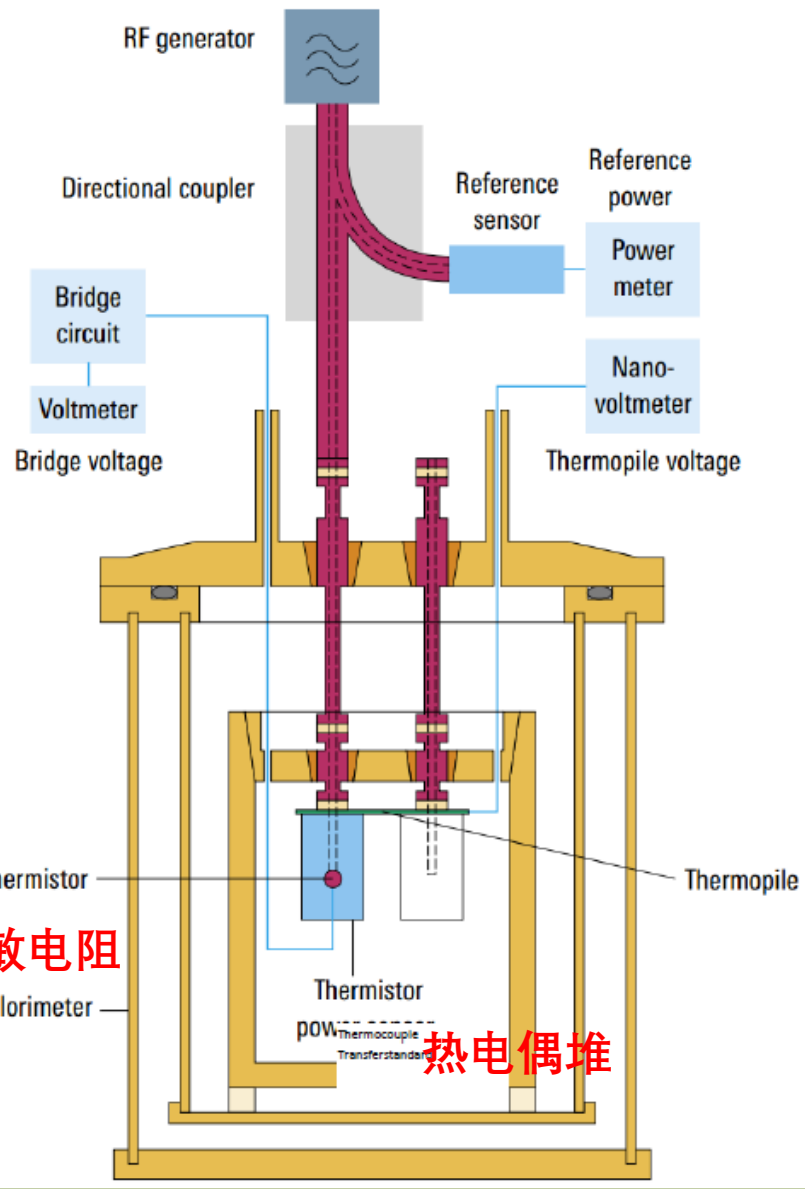
第二节 频率的标准及定标的方法

第三节 功率的标准及定标方法

第四节 阻抗的标准及定标方法

功率的标准：温度

(Calorimeters, 量热计) 一级标准, Frequency invariant!



$$\nabla T = \rho \cdot \nabla P$$

$$\tau = \rho \cdot C$$

ρ : 热阻

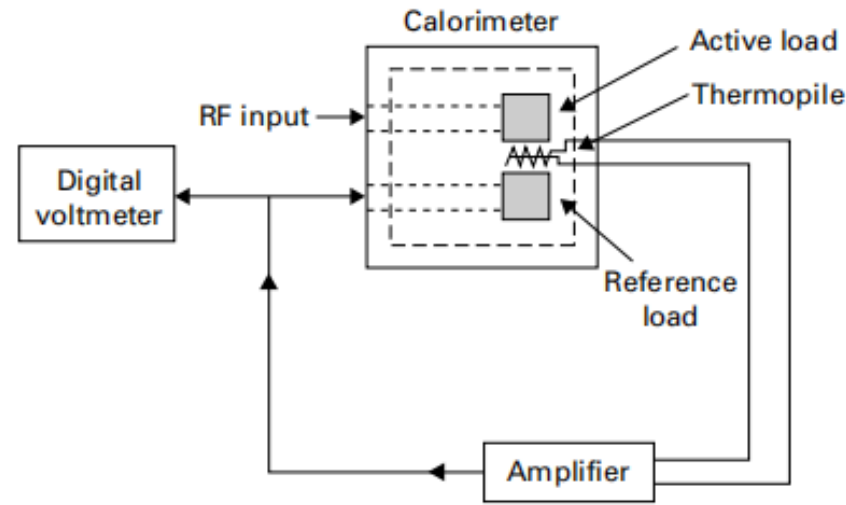
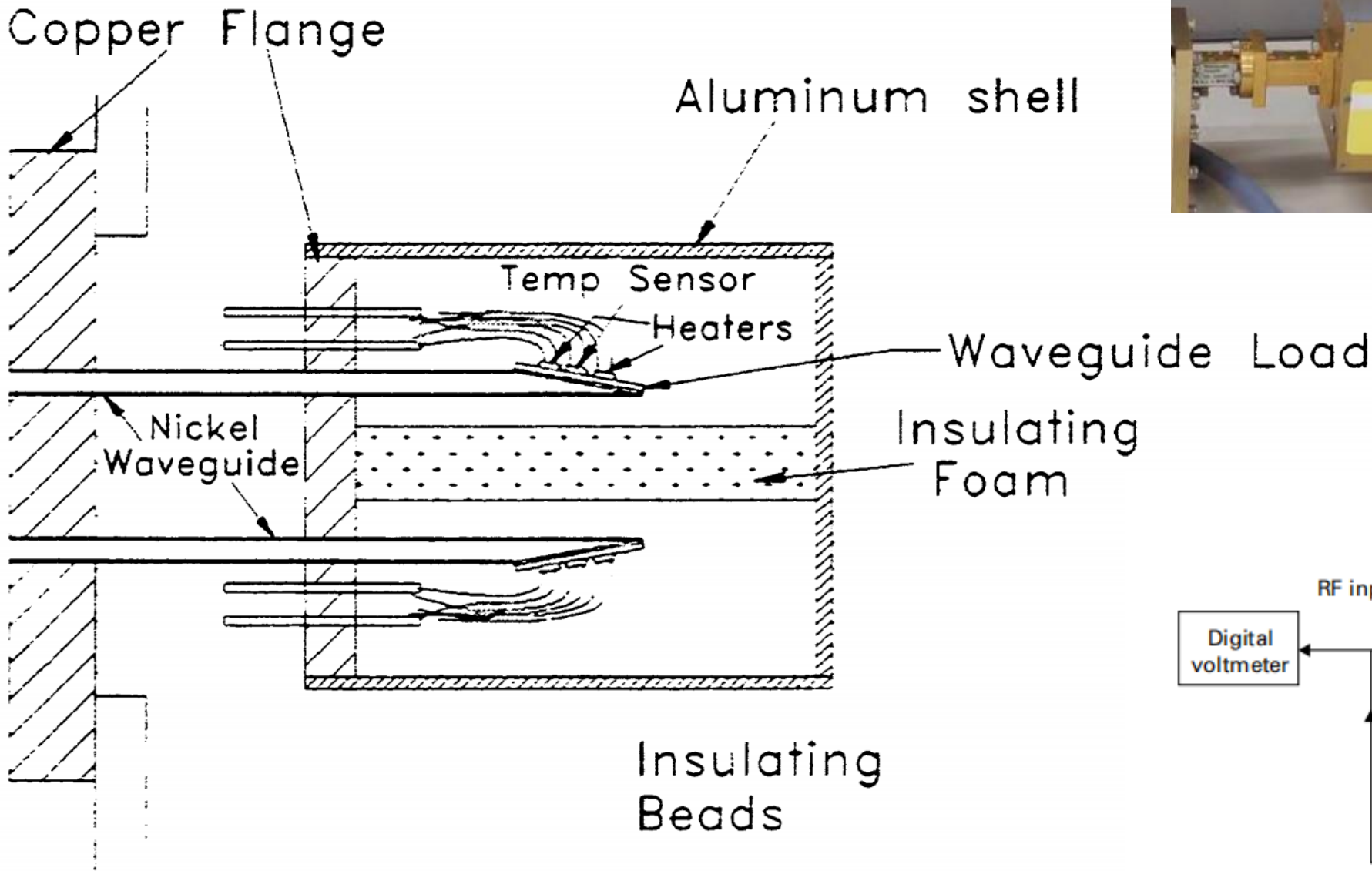
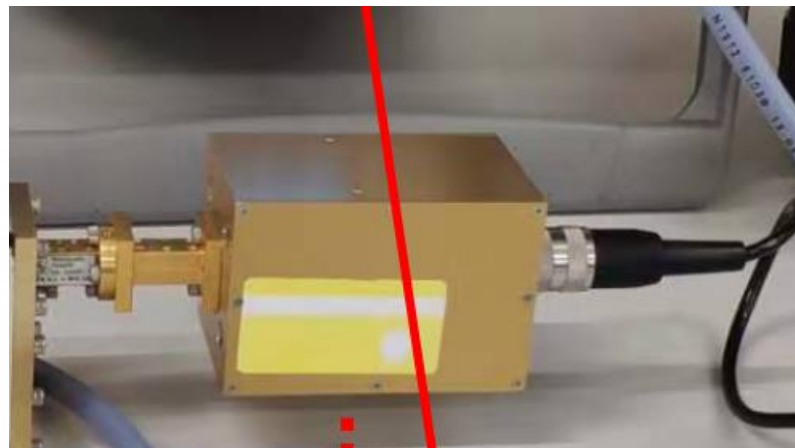
C : 热容 (与质量有关)

τ : 时间常数

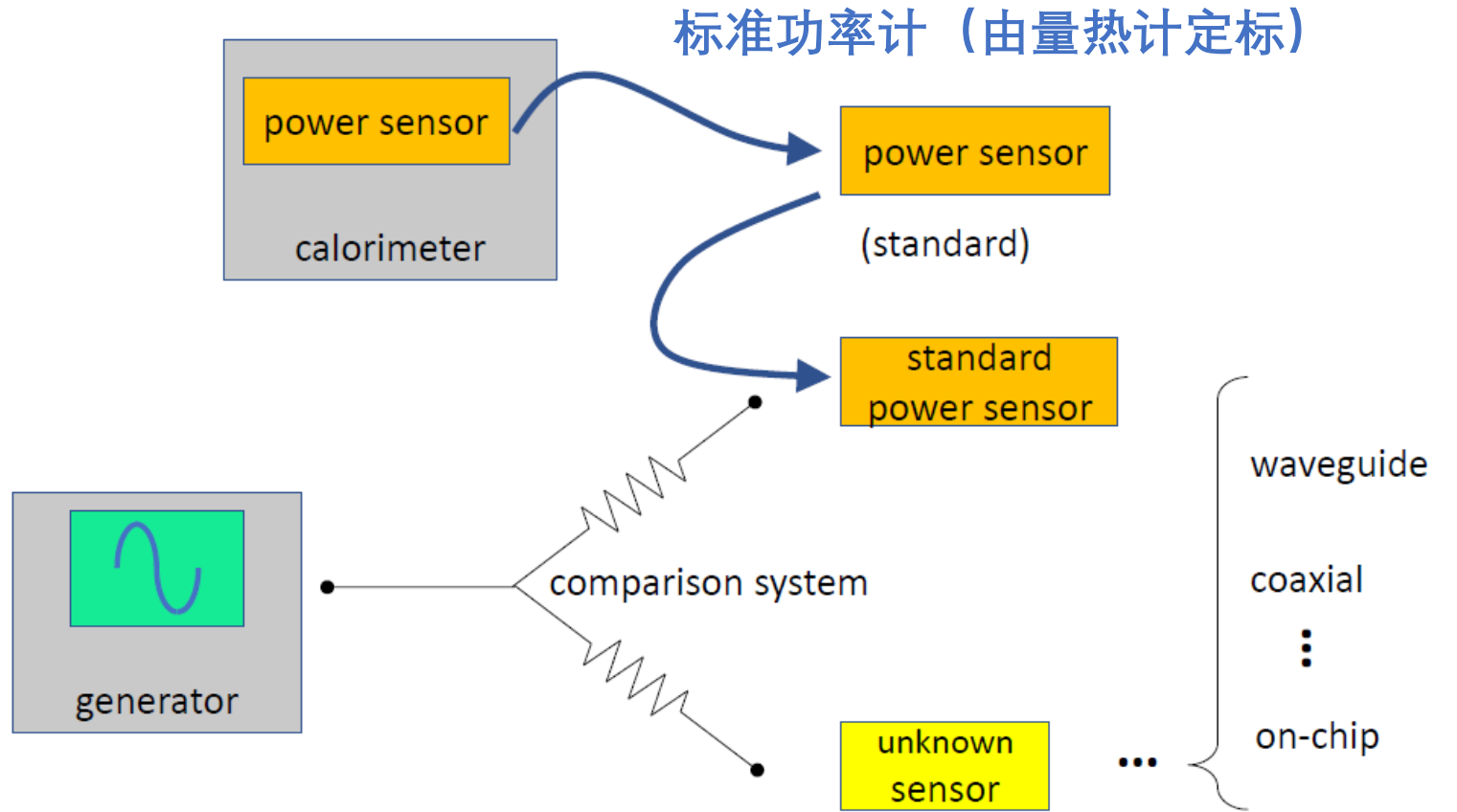
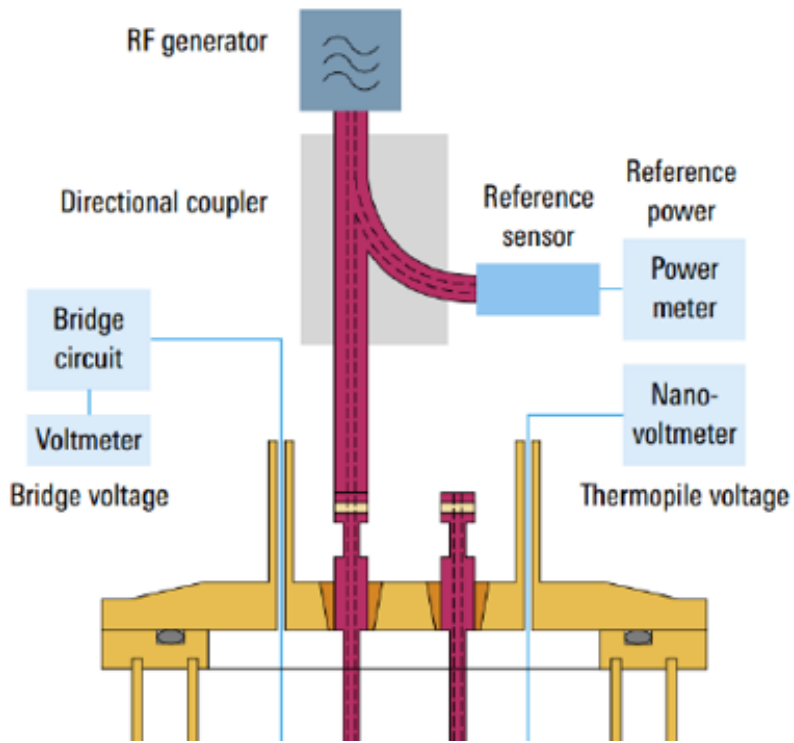
P : 输入功率

Primary standards of Power

例：“低成本”量热式宽带功率计



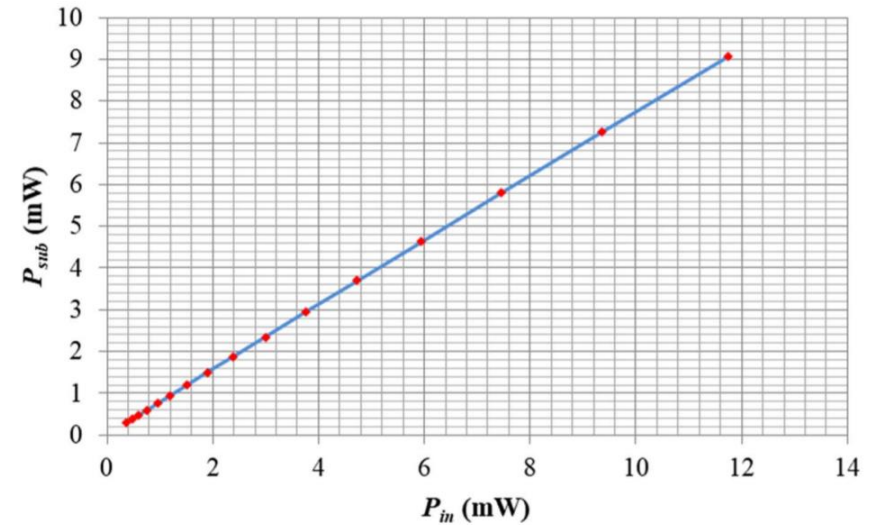
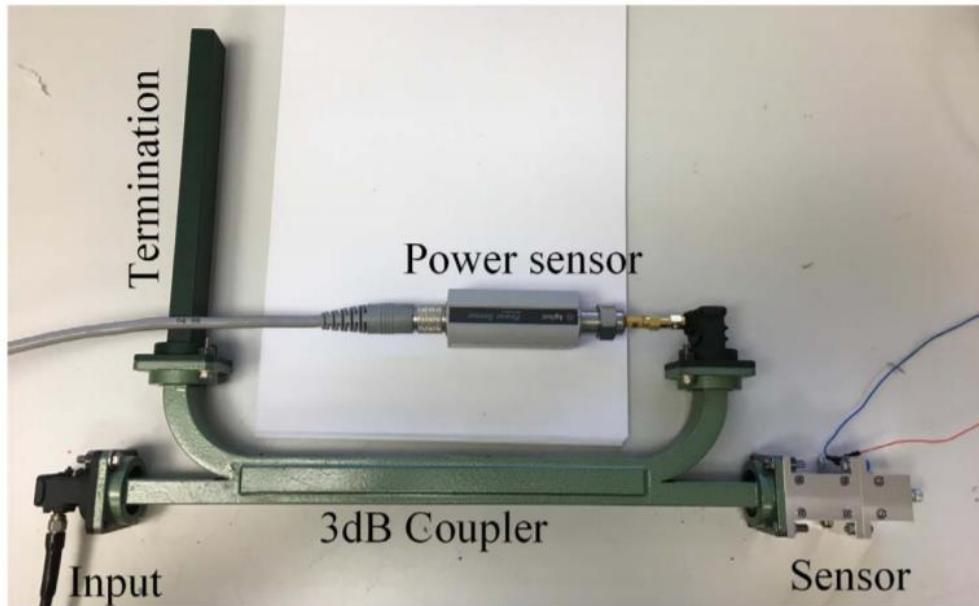
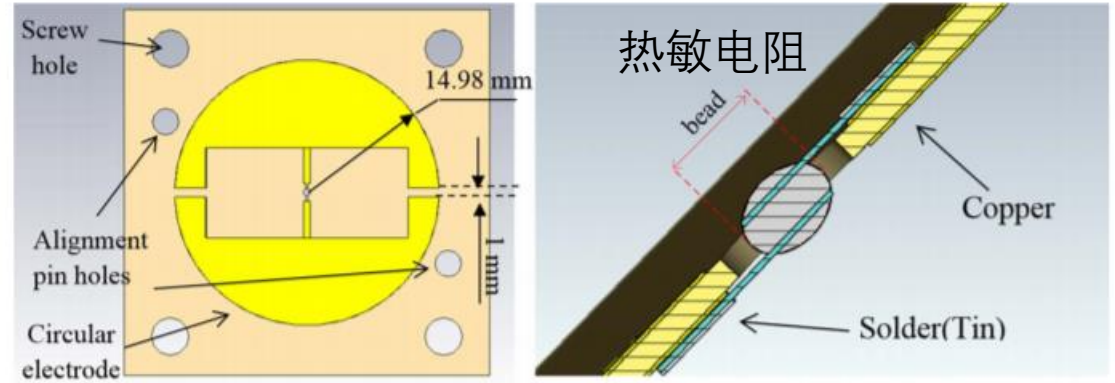
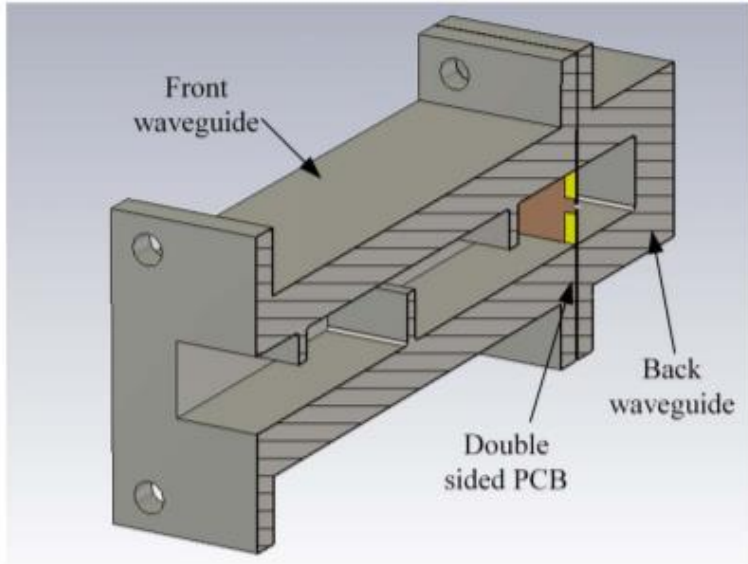
功率标准的传递



普通功率计（由标准功率计定标）

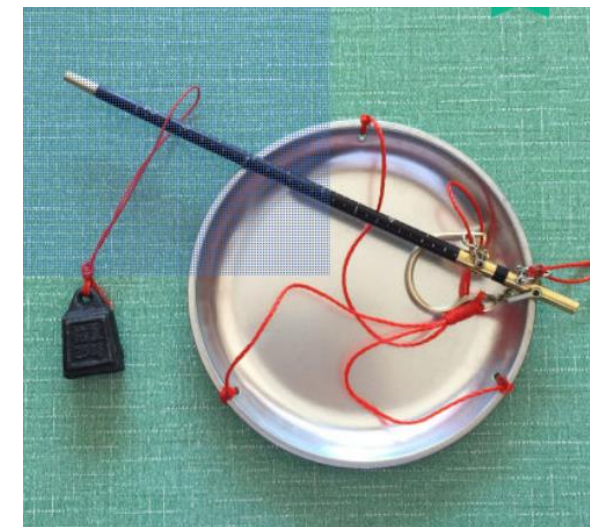
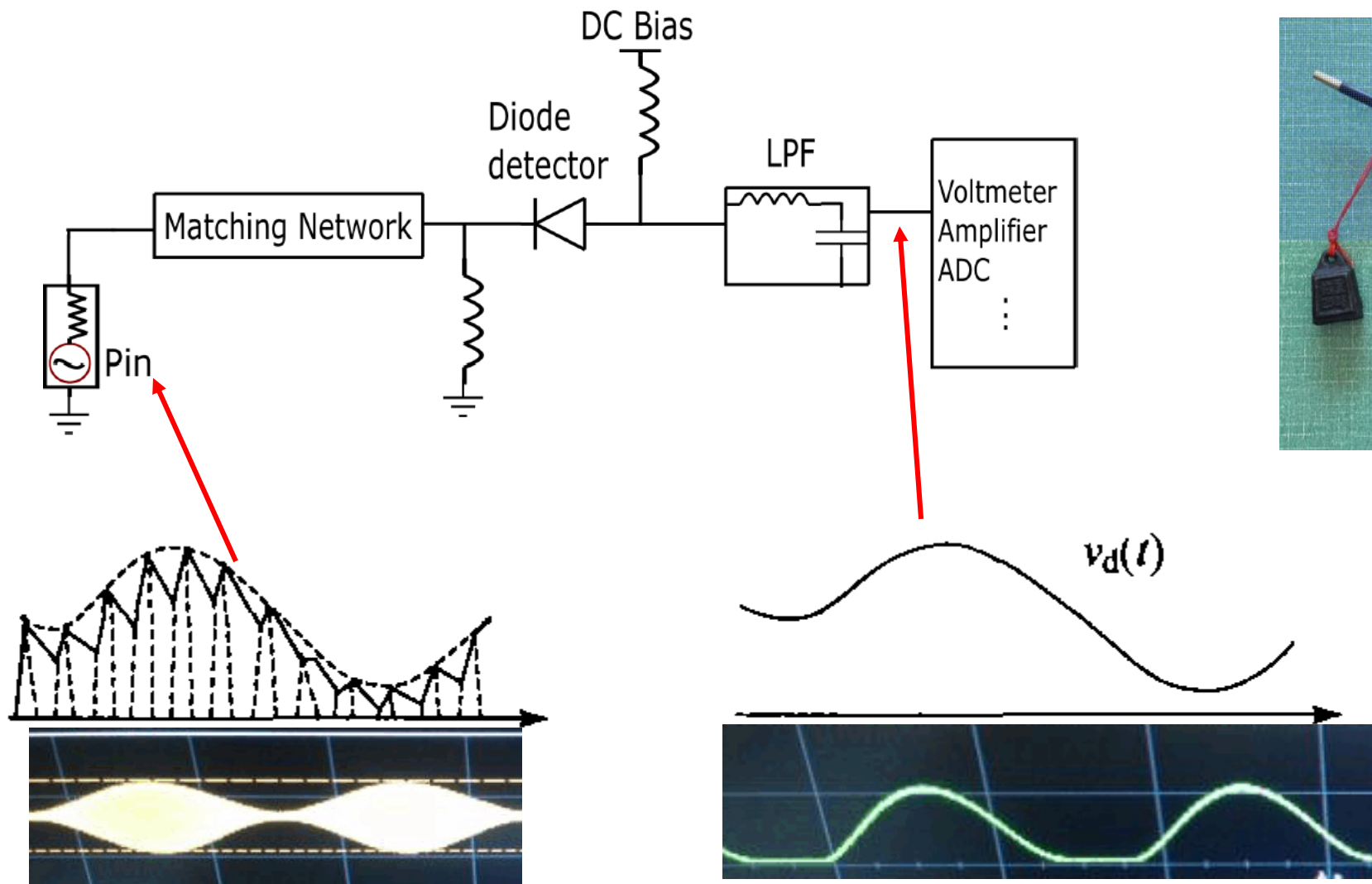
量热计（功率标准）→ 标准功率计（由量热计定标）→ 普通功率计（由标准功率计定标）
(Transfer power sensor)

Transfer Power meter (二级标准)

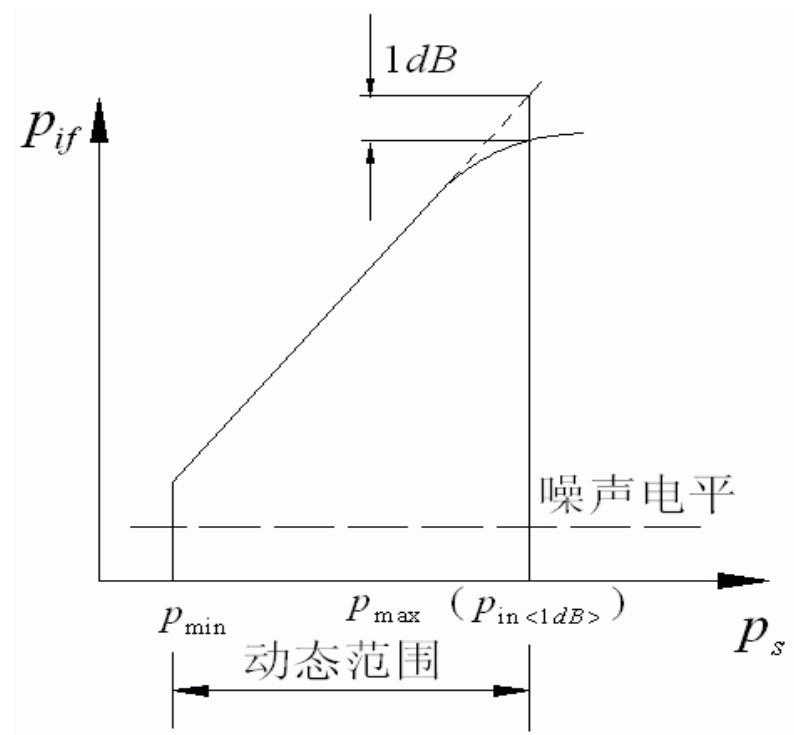
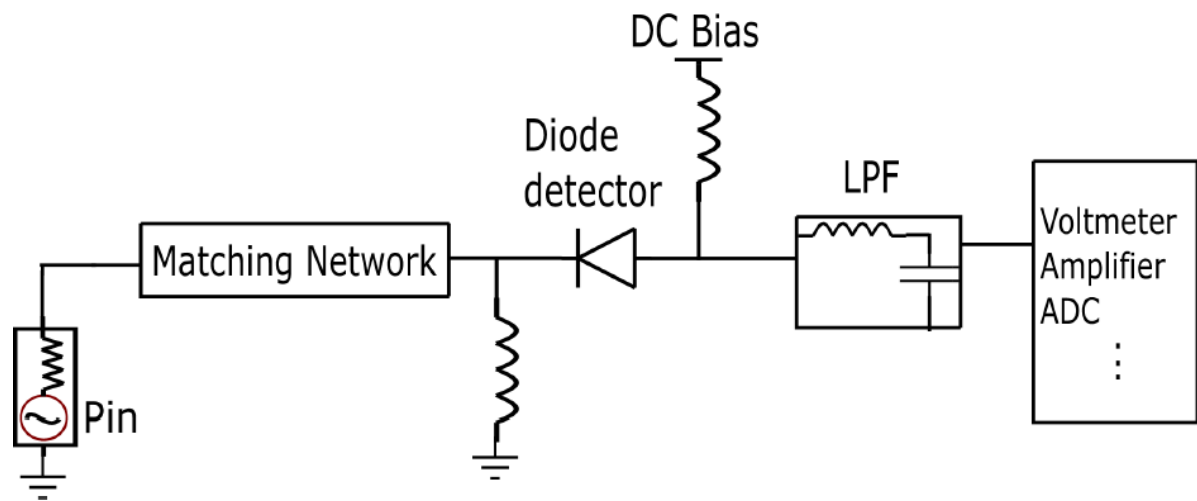


例：实验室用功率计

该电路只能知道功率的相对值
无法知道绝对值



胡克定律的类比：二极管功率计的动态范围



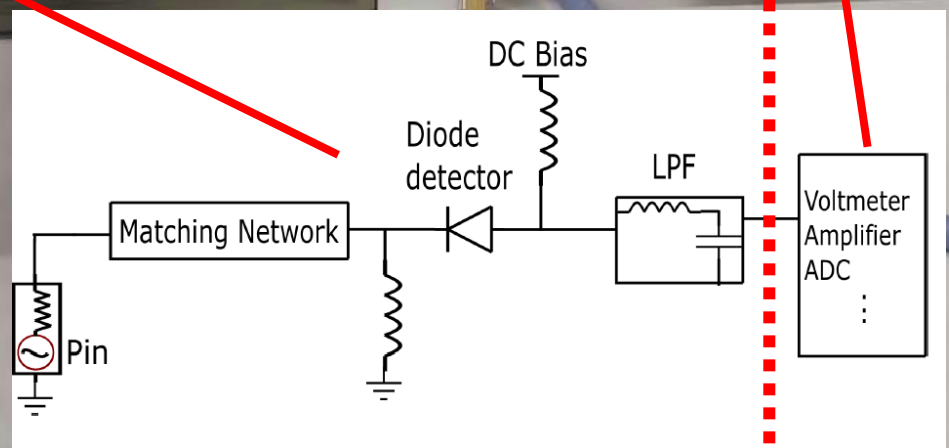
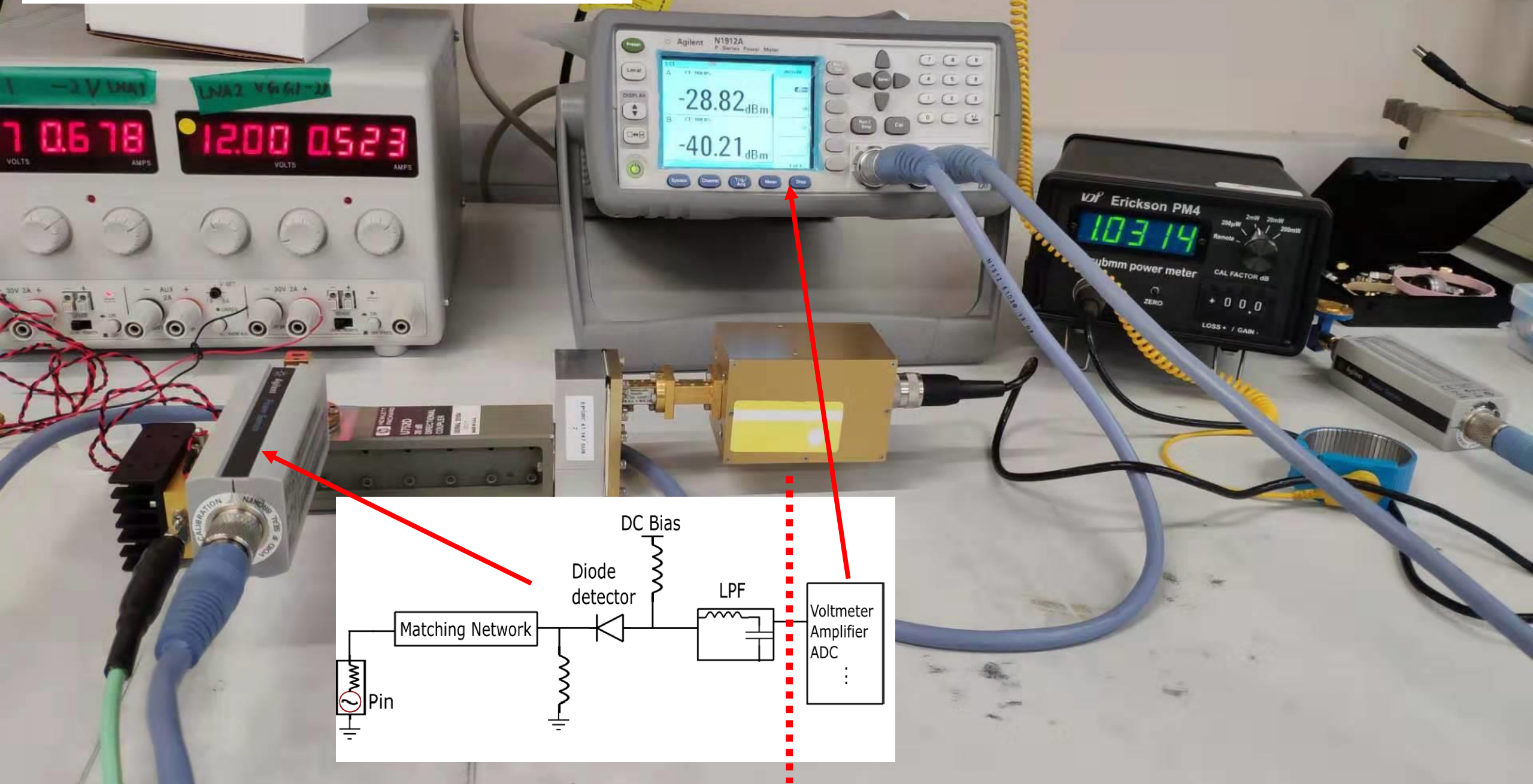
$$i = f(v) = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + \dots$$

$$= a_0 + a_1 (v_s + v_L) + a_2 (v_s + v_L)^2 + a_3 (v_s + v_L)^3 + \dots$$

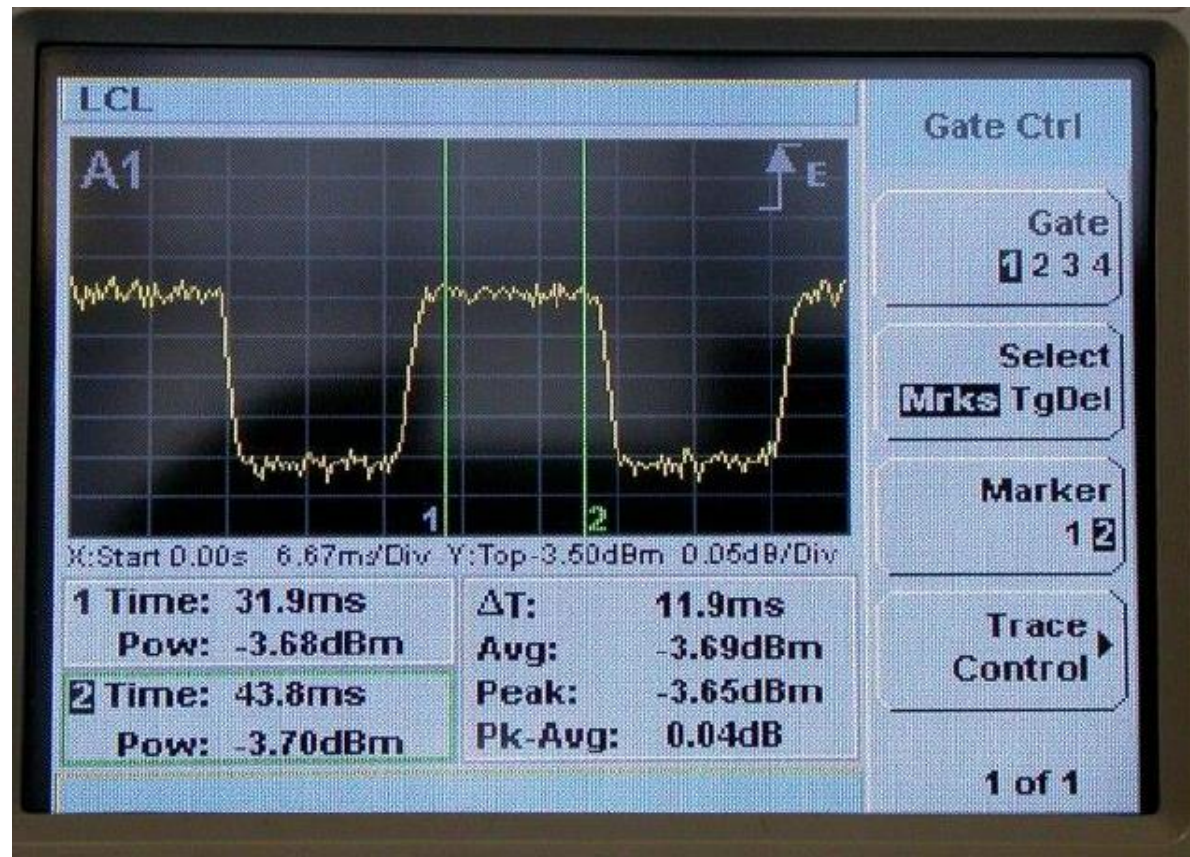
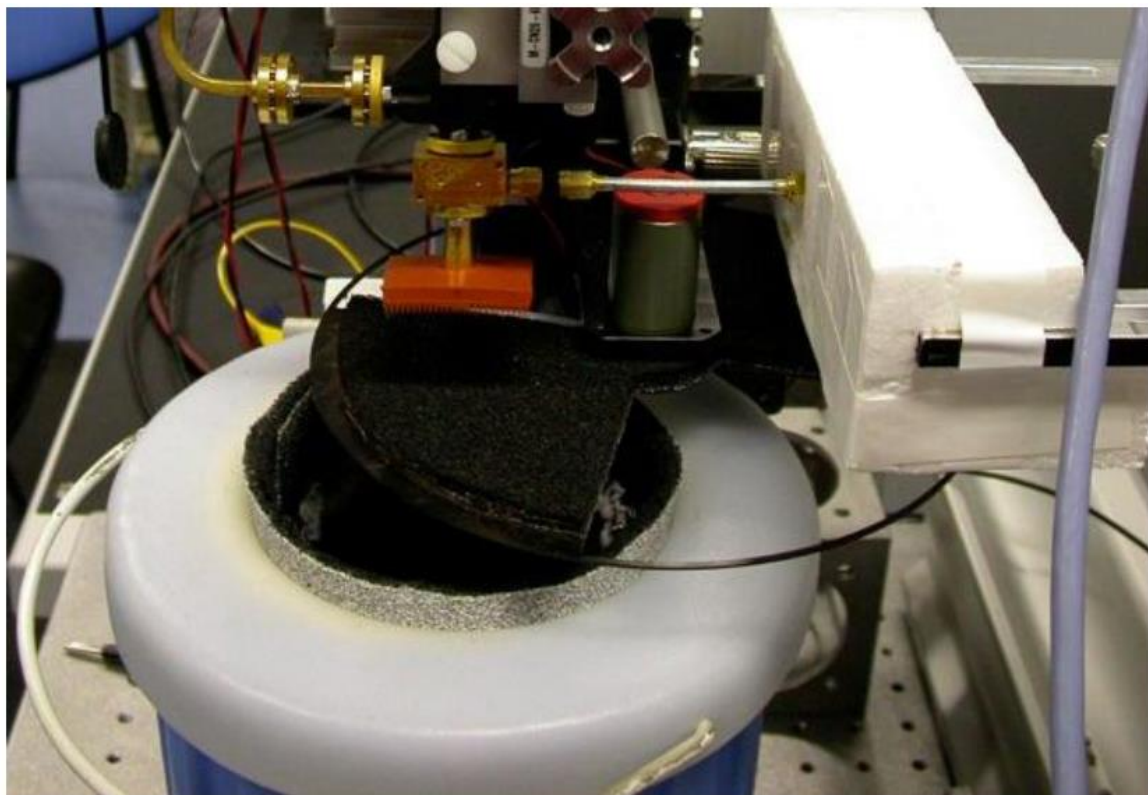
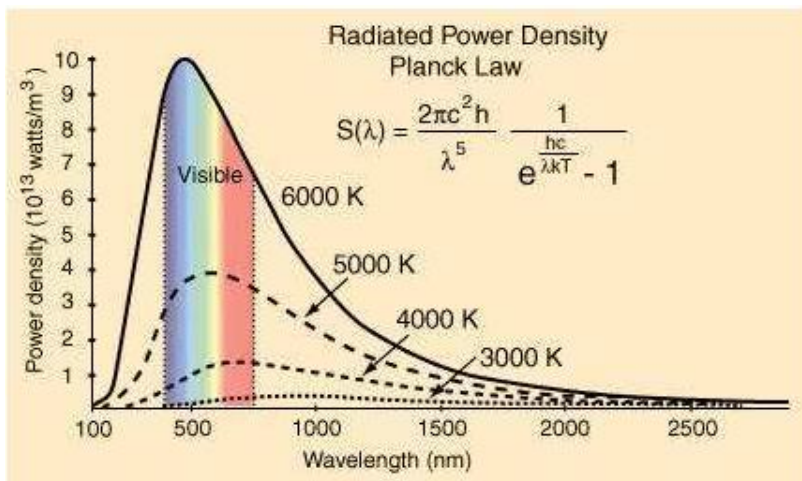
$$= a_0 + a_1 (v_s + v_L) + a_2 (v_s^2 + v_L^2) + 2a_2 v_s v_L + a_3 (v_s^3 + v_L^3) + 3a_3 (v_s^2 v_L + v_L^2 v_s) + \dots$$

$$\approx a_0 + a_1 (v_s + v_L) + a_2 v_L^2 + 2a_2 v_s v_L + a_3 v_L^3 + 3a_3 v_L^2 v_s$$

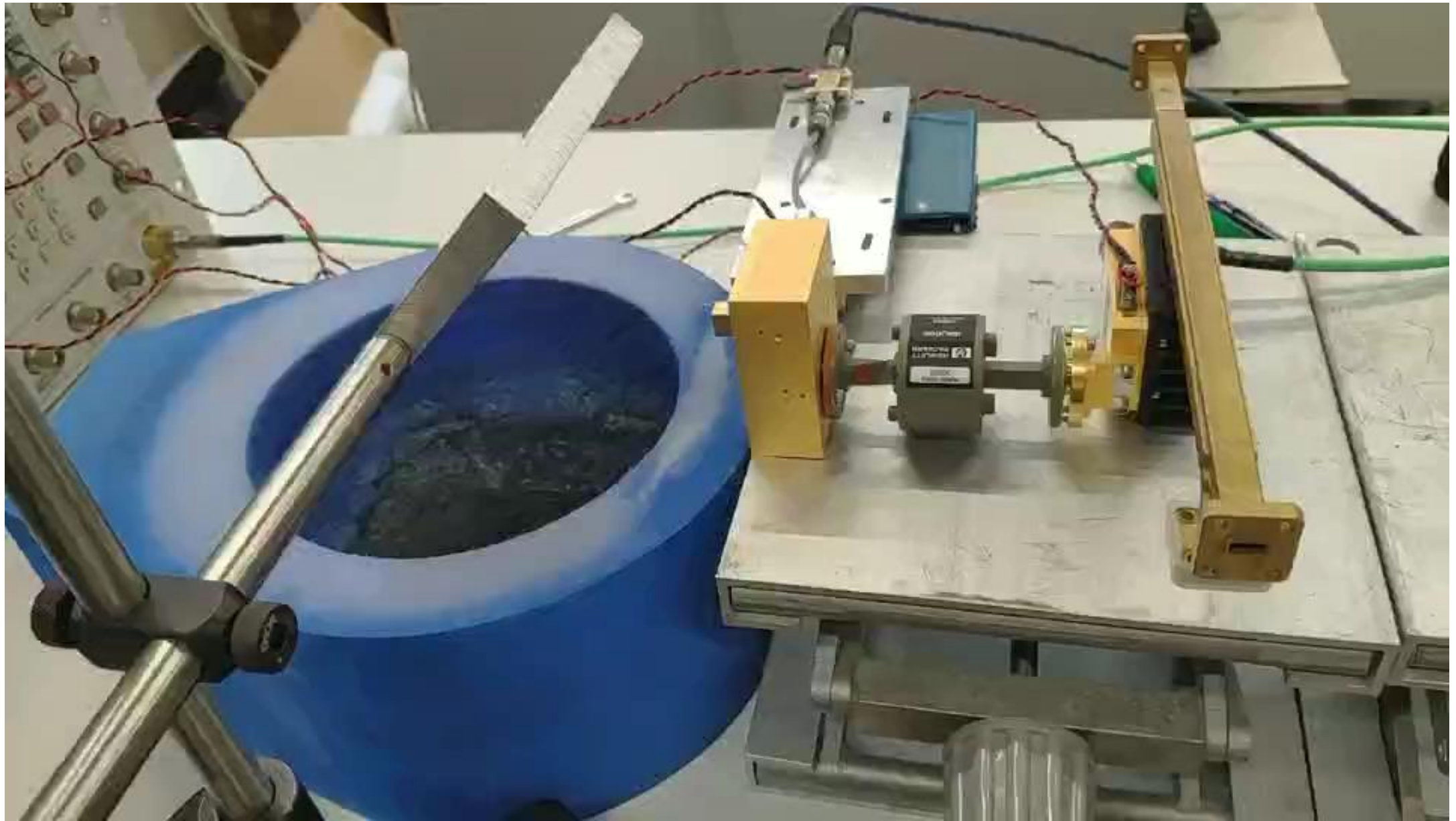
例：同轴和波导接口的功率计



例：利用温度定义功率



问：把手放上去测会有啥后果？



题外话：不懂噪声与黑体辐射的人容易被骗： 谈“气功”与“噪声”

所有受试者发出的“气”的主要成分是太赫兹波。如图1所示

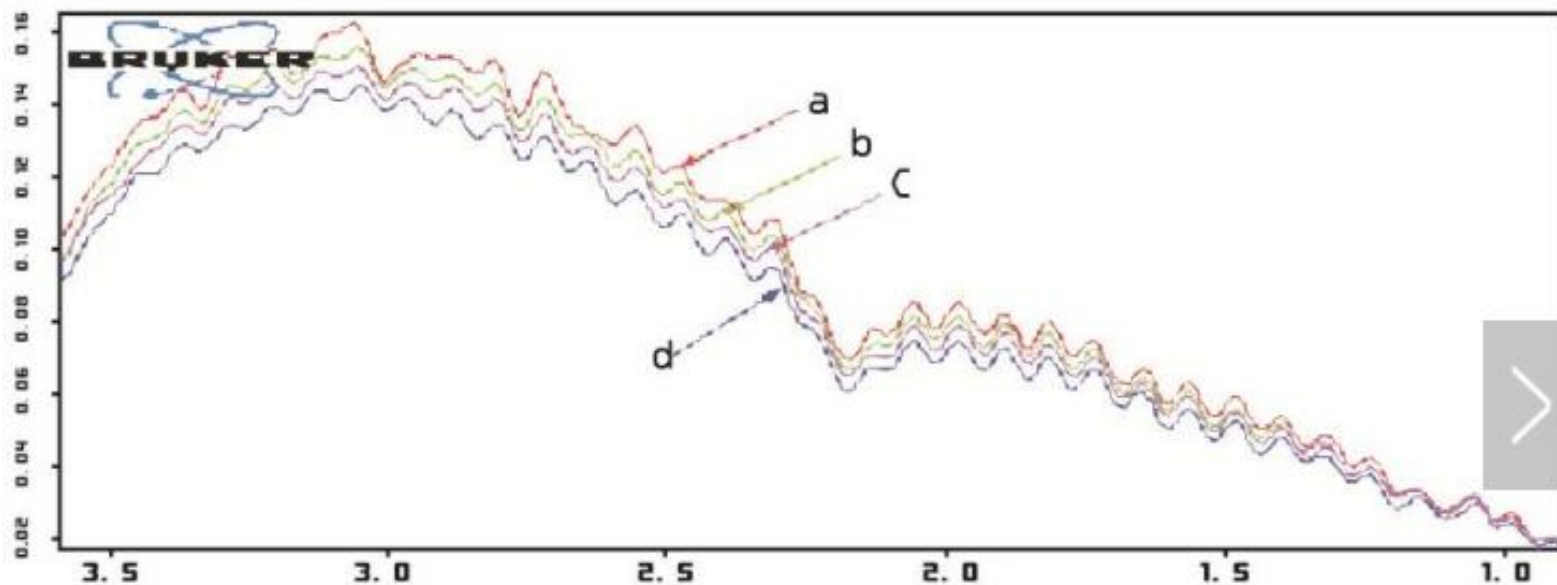
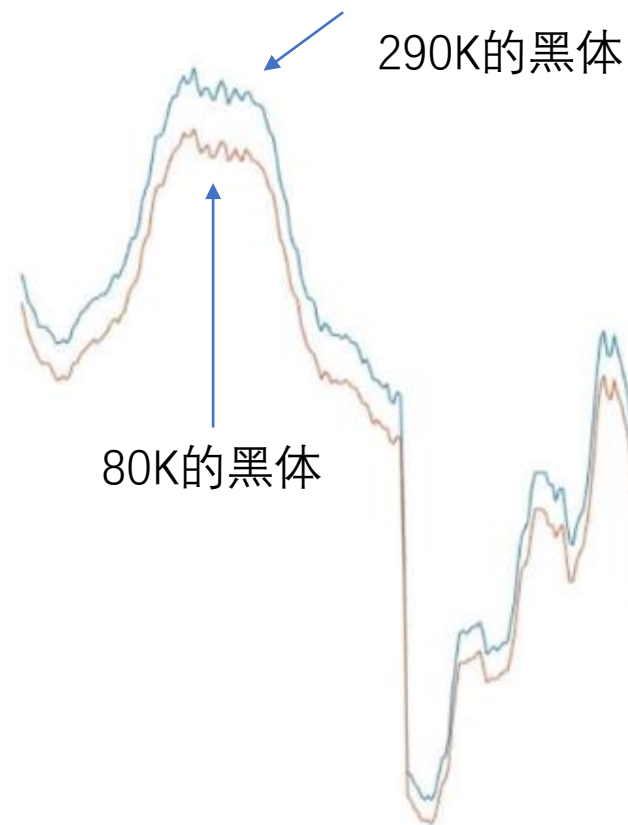


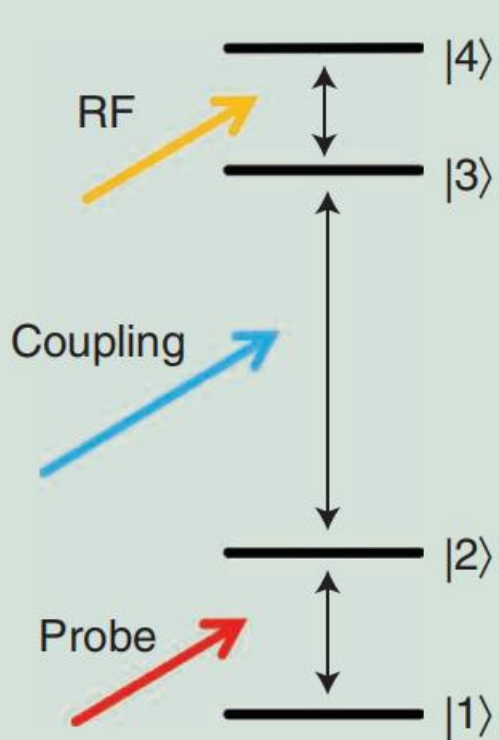
图1: 气功师们发出的太赫兹波曲线与地球（宇宙）背景辐射的太赫兹波段曲线对比注:

- A曲线，资深气功名家发出的太赫兹波；
- B曲线，一般气功发出的太赫兹波；
- C曲线，没有接触过气功的普通人发出的太赫兹波；
- D曲线，地球（宇宙）的太赫兹波段背景辐射电磁波。

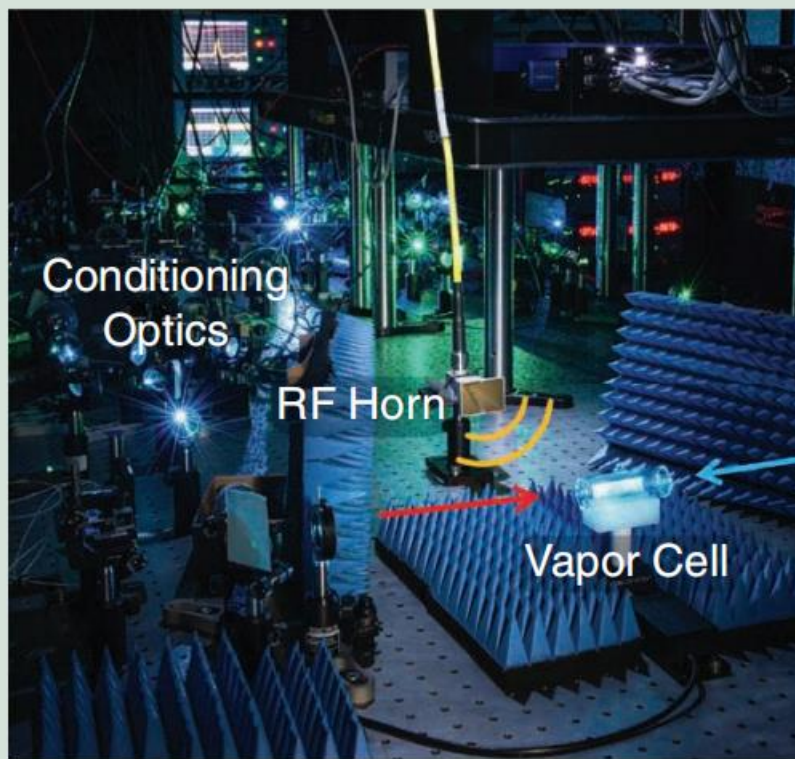


因此我非常感兴趣，您在实验中测试得到的结果究竟是因为气功大师发功时体温升高产生的，还是体温并没有升高，但是黑体辐射功率密度提高了？如果有时间，可否回复一下邮件。如果是后者，这将是非常非常有趣的一个科研结果。

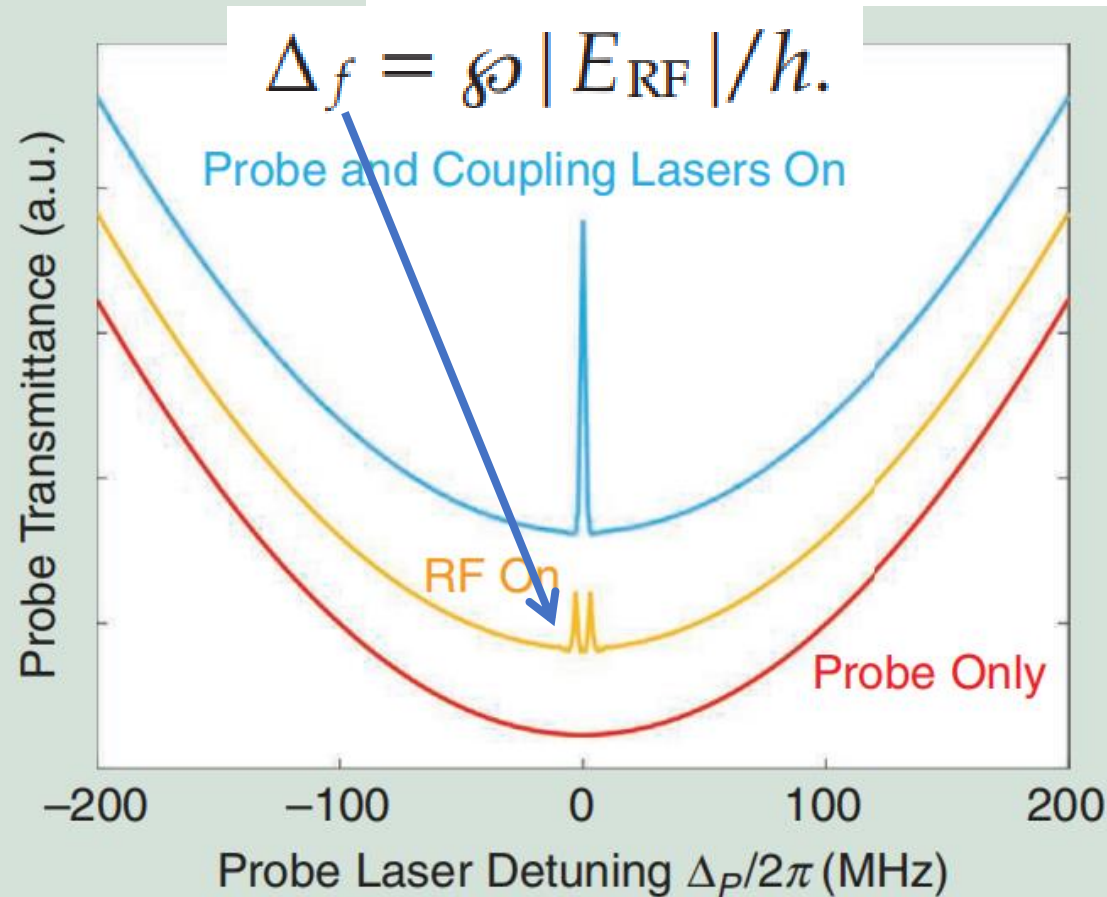
微波功率（电场强度）的第二种定义：普朗克常数+频率



(a)

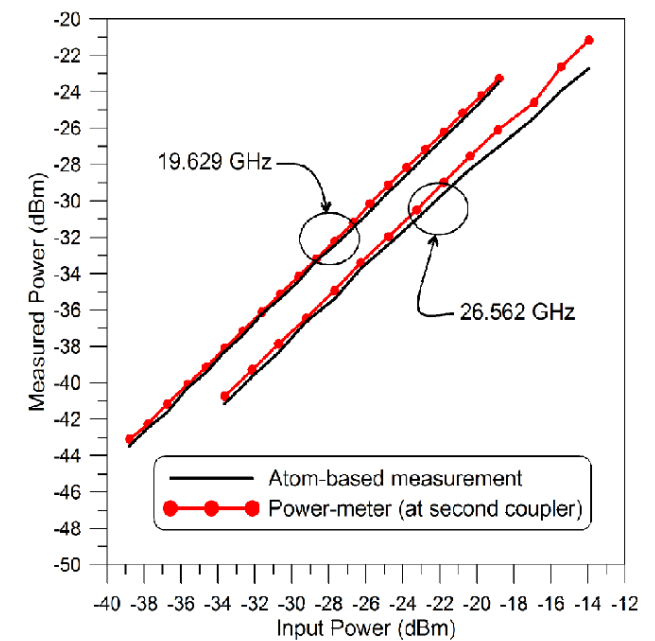
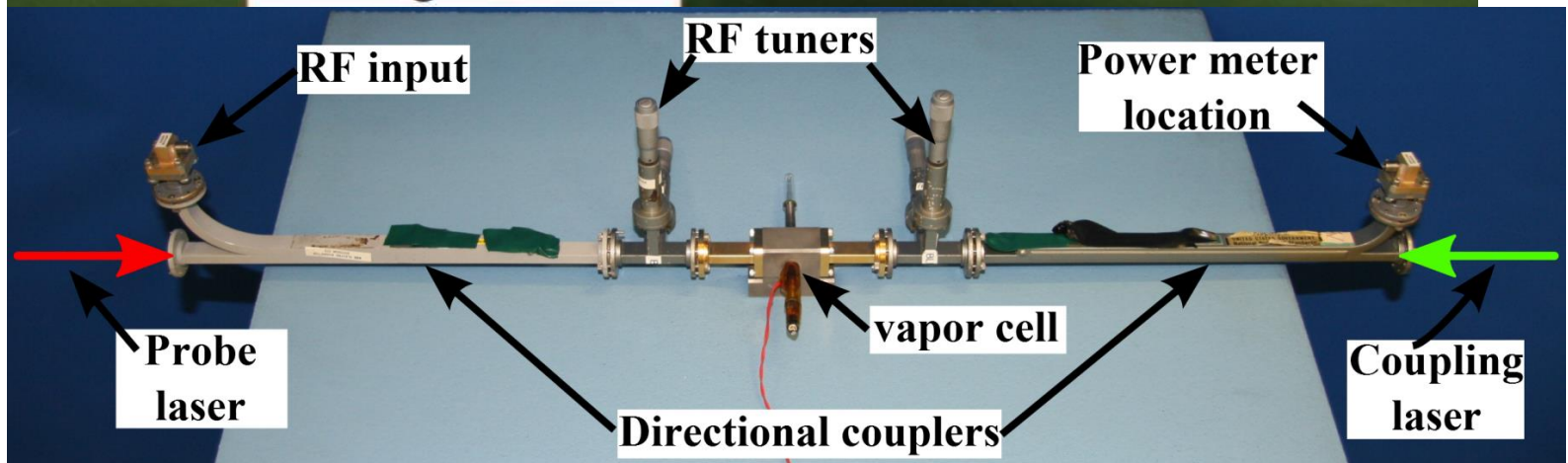
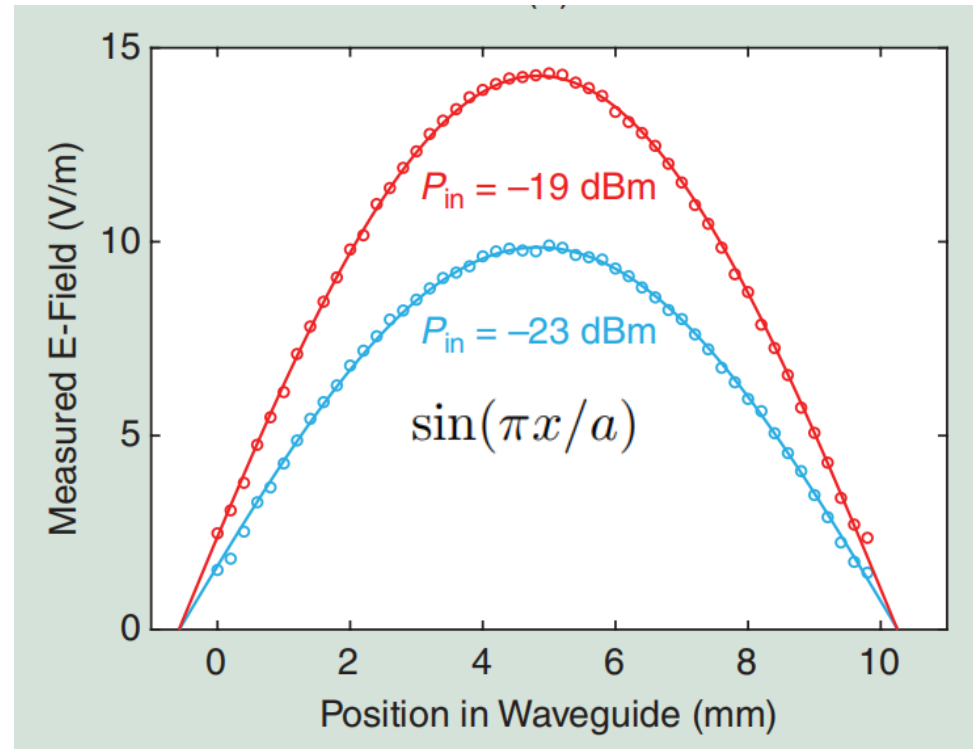
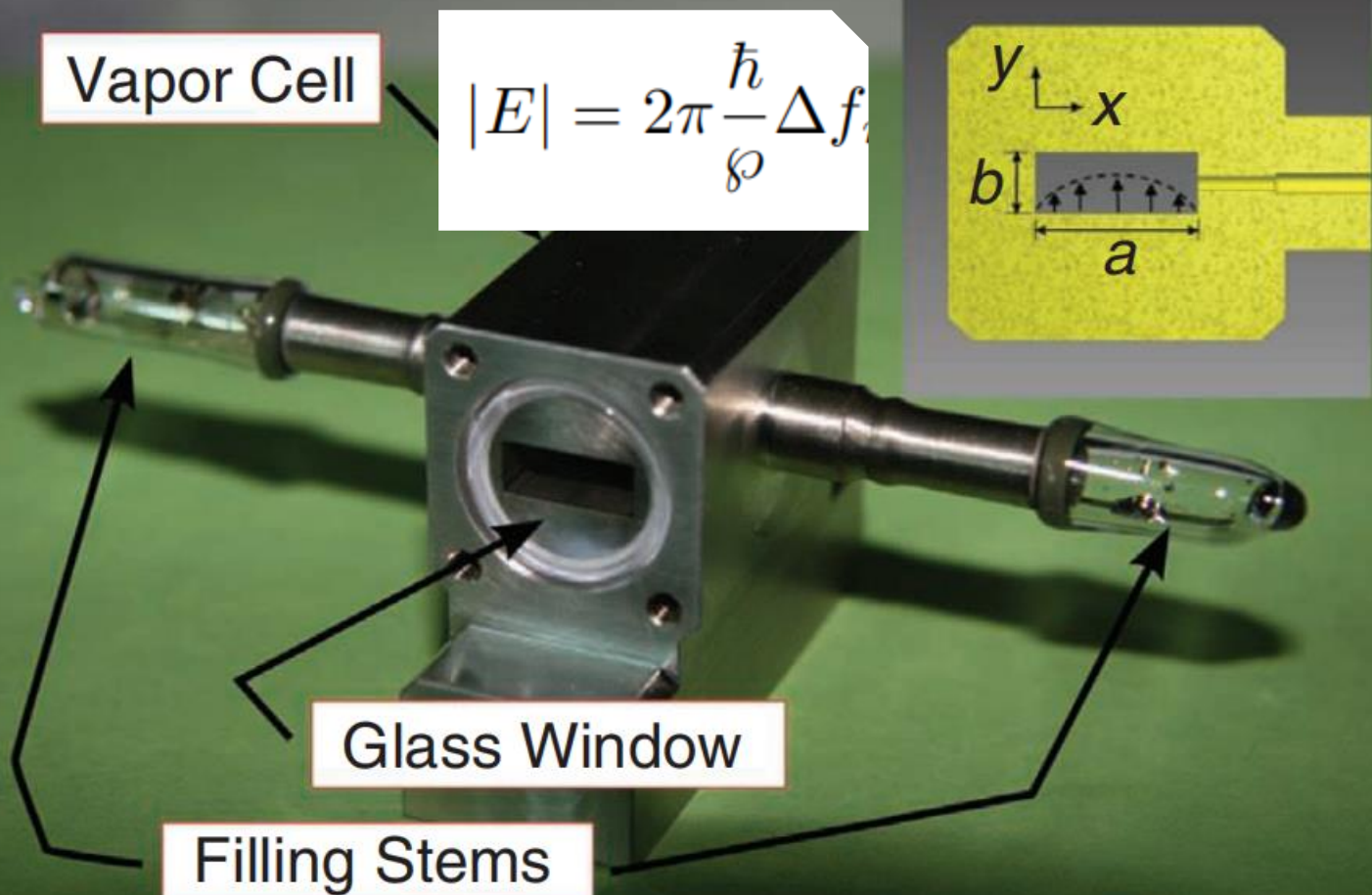


(b)



基于里德堡原子体系的 功率（电场强度）测量原理

$$|E| = 2\pi \frac{\hbar}{\wp} \Delta f_1$$



小结

- 1. 功率所对应的国际基本单位是**温度/ 或普朗克常数+频率**
- 2. 量热计 (**Calorimeters**) 是微波功率的一级标准。
- 3. 量热式功率计是微波功率二级标准, 称为**Transfer Power meter**
- 4. 二极管等**检波器**是功率的三级标准, 需要用二级标准定标 (校准) 才能使用。
- 5. 二极管检波器的**动态范围**通常优于量热式功率计

本章目录

第一节 微波测量中的标准与定标：从国际单位制谈起

第二节 频率定标及测量：“日月相推，则明生焉；寒暑相推，则岁生焉”

第三节 功率定标及测量：**Power is Money, Friend!**

第四节 **S**参数，阻抗定标及测量：从“阻抗”到“反射”

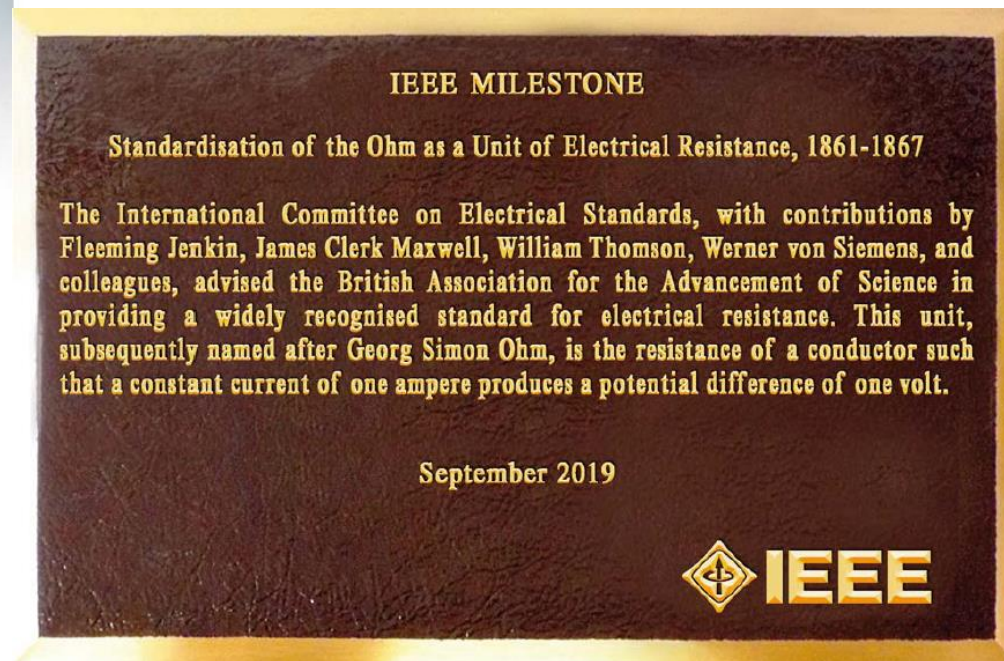
电阻的标准 (1861-1867)



Fig. 4. Siemen's mercury column resistance unit, courtesy Siemens Historical Institute, Berlin.



Fig. 5. BA Standard Resistor as first purchased by Michael Faraday in 1865, copyright London Science Museum, Science and Society Picture Library, rights reserved.



$$R = \rho L / S$$

阻值由材料特性和物理尺寸决定

几个容易混淆的阻抗概念

$$Z = \frac{U}{I}$$

阻抗

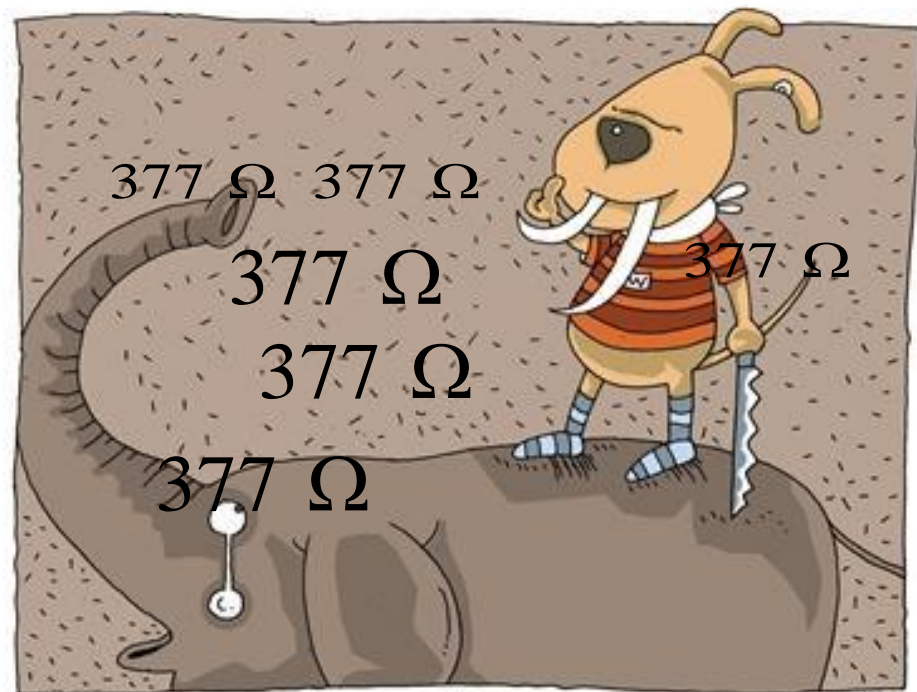
$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$$

自由空间
波阻抗

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

传输线特
征阻抗

蔺相如司马相如，名相如实不相如
魏无忌长孙无忌，此无忌彼亦无忌
这几个阻抗之间**有联系也有区别！**



谁说我这嘴里吐不出象牙？

自由空间里有377欧？到处都是？我们去抓阻抗，致富？
微波理论中的“狗嘴里吐不出象牙”！

阻抗概念的内涵和外延



Fig. 4. Siemen's mercury column resistance unit, courtesy Siemens Historical Institute, Berlin.

有一种物质，它有一种基本性质 ρ ，它被我们捏成了某种形状（ L/S ），然后我们给它加个电（ U ），它可以流过特定的电流（ I ），因此我们管它叫做电阻（ R ）

$$R = \rho L / S$$

自由空间阻抗

有一个方程，它里面有两个自然常数，叫做 μ_0 和 ε_0 ，我们根据边界条件，掐指一算发现，哎呀：

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377 \Omega$$

$$U = \int E \cdot dl$$

$$I = \oint H \cdot dl$$

$$[E/H] = \left[\frac{\int E \cdot dl}{\oint H \cdot dl} \right] = [U/I] = [R]$$

郭诚是个老师，回家做饭给老婆吃

施宏宇是个老师

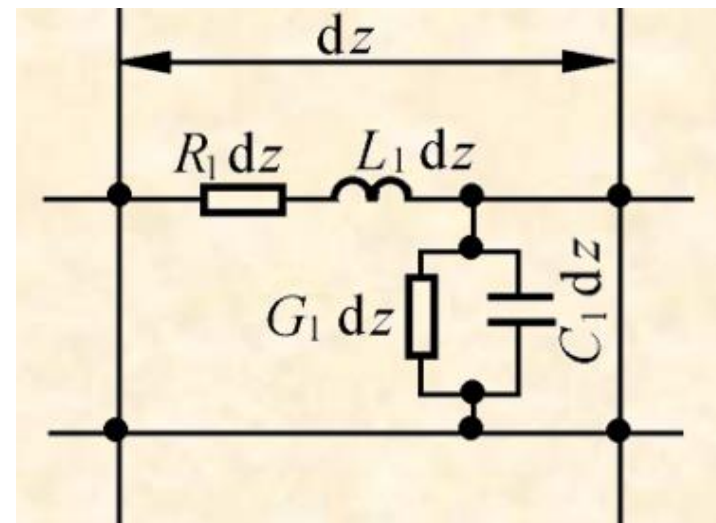
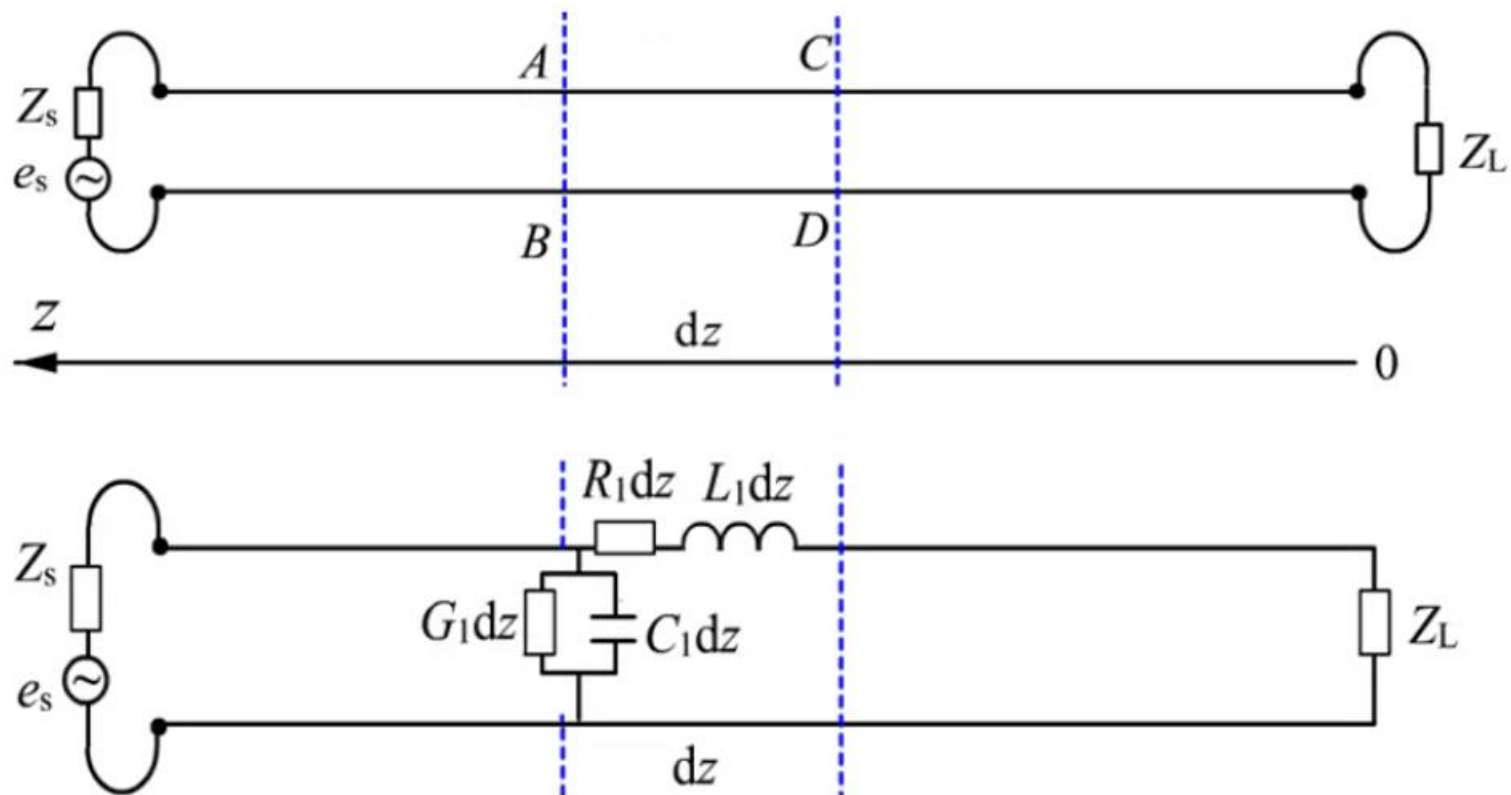
施宏宇回家做饭给老婆吃

✓

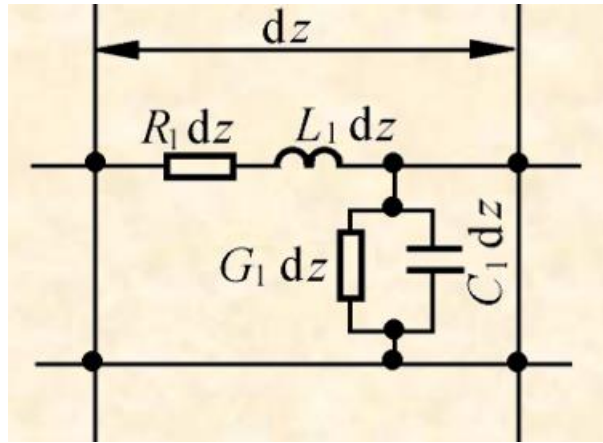
✓

?

传输线特征阻抗：传输线理论回顾



传输线理论回顾



Δz 长度传输线的等效电路

- R = 单位长度分布电阻 (Ω/m) \longrightarrow 导体损耗
- L = 单位长度分布电感 (H/m) \longrightarrow 本征参数
- G = 单位长度分布电导 (S/m) \longrightarrow 介质损耗
- C = 单位长度分布电容 (F/m) \longrightarrow 本征参数

$$dV = I(R_1 + j\omega L_1)dz = IZ_1 dz$$

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1$$

$$dI \approx V(G_1 + j\omega C_1)dz = VY_1 dz$$

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1$$

$$\frac{dV}{dz} = Z_1 I \quad \frac{dI}{dz} = Y_1 V$$

传输线理论回顾

$$\begin{array}{l} \frac{dV(z)}{dz} = -Z_1 I(z) \\ \frac{dI(z)}{dz} = -Y_1 V(z) \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{两边求导} \\ \rightarrow \end{array} \quad \begin{array}{l} \frac{d^2 V(z)}{dz^2} = -Z_1 \frac{dI(z)}{dz} = Z_1 Y_1 V(z) \\ \frac{d^2 I(z)}{dz^2} = -Y_1 \frac{dV(z)}{dz} = Z_1 Y_1 I(z) \end{array}$$

↓ 移项

$$\begin{array}{l} \frac{d^2 V(z)}{dz^2} - Z_1 Y_1 V(z) = 0 \\ \frac{d^2 I(z)}{dz^2} - Z_1 Y_1 I(z) = 0 \end{array}$$

定义电压传播常数:

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)}$$

传输线理论回顾：特征阻抗的推导

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) = 0$$
$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) = 0$$

电压的解为： $V(z) = A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{\gamma z}$

传输线特征阻抗的物理含义是
电压波和电流波的比值

电流的解为： $I(z) = \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma z} - A_2 e^{\gamma z})$

$$Z_0 = \frac{V^+(Z)}{I^+(Z)} = -\frac{V^-(Z)}{I^-(Z)} \quad \text{式中} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{R_l + j\omega L_l}{G_l + j\omega C_l}} \quad \text{为传输线的特征阻抗}$$

特征阻抗的量纲分析

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_l + j\omega L_l}{G_l + j\omega C_l}}$$

(无耗传输线)

(有耗传输线)

电感 (L)	$L = E \cdot \Delta t / \Delta I$	$1\text{H} = 1\text{V} \cdot \text{s} / \text{A} = 1\Omega \cdot \text{s} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2 \cdot \text{A}^2$	$\text{L}^2\text{MT}^{-2}\text{I}^{-2}$
电容 (C)	$C = q / U$	$1\text{F} = 1\text{C} / \text{V} = 1\text{s}^4 \cdot \text{A}^2 / \text{kg} \cdot \text{m}^2$	$\text{L}^{-2}\text{M}^{-1}\text{T}^4\text{I}^2$
电阻 (R)	$R = U / I$	$1\Omega = 1\text{V} / \text{A} = 1\text{W} / \text{A}^2 = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$	$\text{L}^2\text{MT}^{-3}\text{I}^{-2}$

$$\left[\sqrt{\frac{L}{C}} \right] = [R]$$

例：传输线分布参数

	同轴线 a : 内导体半径 b : 外导体半径 μ, ε : 填充介质	双导线 D : 线间距离 d : 导线直径	平行板传输线 W : 平板宽度 d : 板间距离 μ, ε : 填充介质
$L(\text{H/m})$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$	$\frac{\mu}{\pi} a \cosh\left(\frac{2D}{d}\right)$	$\frac{1}{\pi a \sigma \delta}$
$C(\text{F/m})$	$\frac{2\pi\varepsilon}{\ln(b/a)}$	$\frac{\pi\varepsilon}{a \cosh(D/2a)}$	$\varepsilon \frac{W}{d}$
$R(\Omega/\text{m})$	$\frac{1}{2\pi a \sigma \delta} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$	$\frac{1}{\pi a \sigma \delta}$	$\frac{2}{W \sigma \delta}$
$G(\text{S/m})$	$\frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)}$	$\frac{\pi\sigma}{a \cosh(D/2a)}$	$\sigma \frac{W}{d}$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\mu/\varepsilon} \ln(b/a) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \cdot \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r} \cdot \ln(b/a)$$

例：同轴线的特征阻抗

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}} = \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\mu / \varepsilon} \ln(b / a) \\ &= \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} \cdot \sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} \cdot \ln(b / a) \cdot \frac{1}{2\pi} \end{aligned}$$

自由空间波
阻抗
(阻抗量纲)
(自然常数)

相对介电常
数/磁导率
(无量纲)
(自然属性)

尺寸因子
(无量纲)
(跟尺寸
有关)

阻抗的定义非常科学 (都是自然常数)

从公式可以看出，传输线的阻抗与介质材料和传输线的物理尺寸相关。

因此，无源微波器件的质量取决于加工工艺的水平。

珍惜你们身边做工艺的小伙伴，
抱紧他们的大腿

特征阻抗，构词法和量纲分析：

● Wingardium Leviosa

- wing: 翅膀
- levi: 漂浮
- 磁悬浮: magnetically Levitated
 - 量纲就好像英语的词根一样!

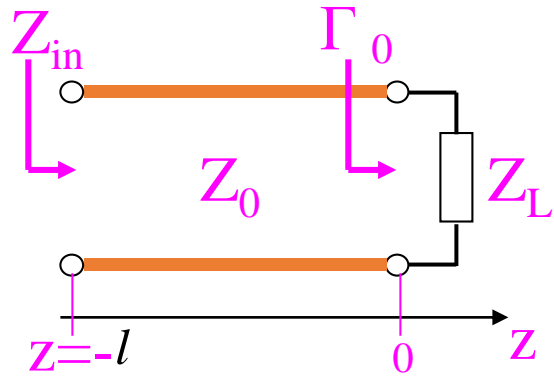
● Expecto Patronum

- expect: 期待
- Patr: 父亲
- 爱国者: Patriot

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \cdot \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \cdot \ln(b/a) \cdot \frac{1}{2\pi}$$



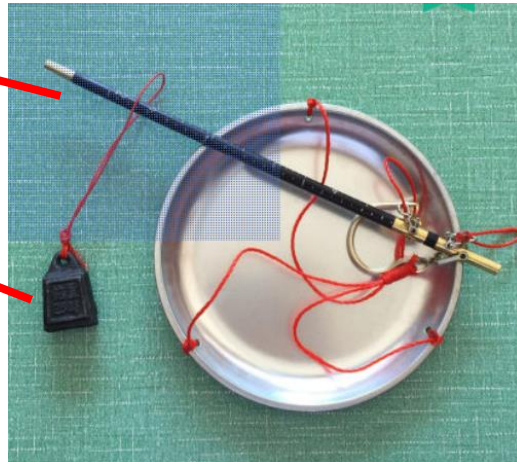
射频阻抗与反射系数



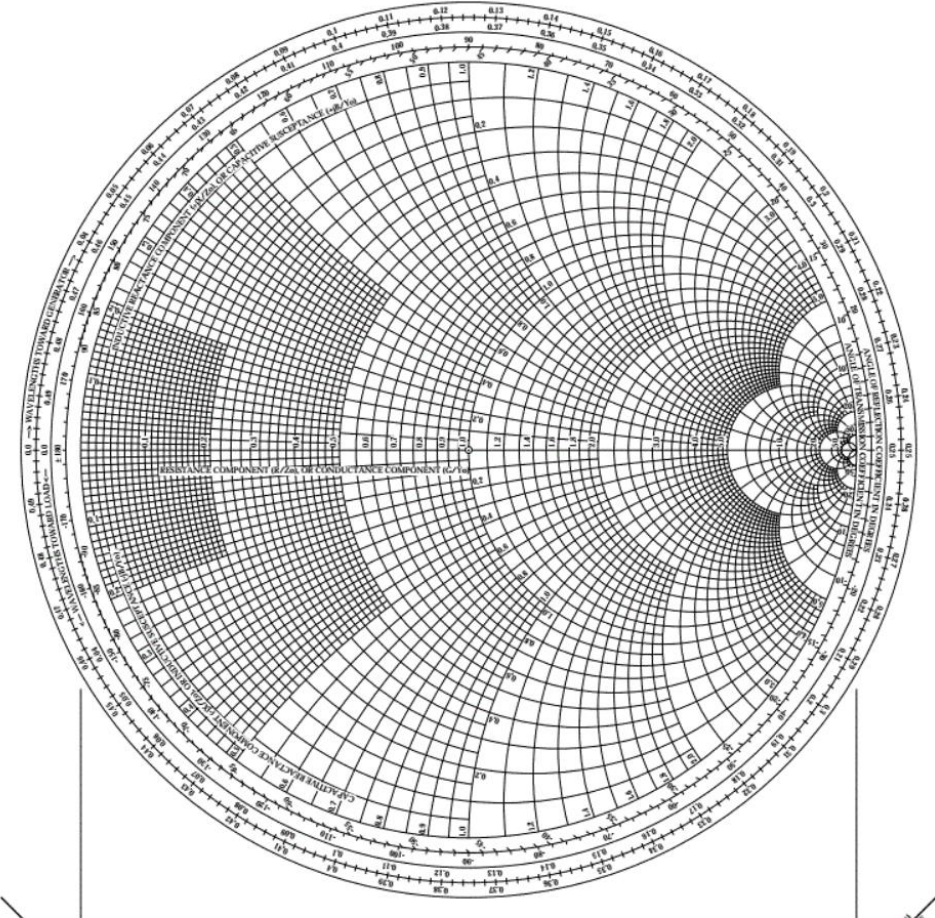
$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$\Gamma_0 = \frac{V^-}{V^+}$$

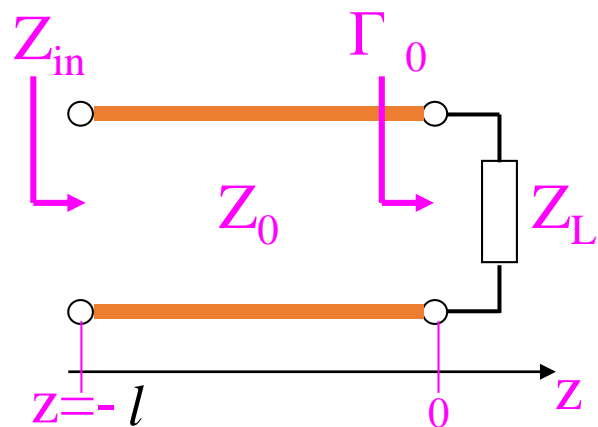
$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$$



The Complete Smith Chart
Black Magic Design



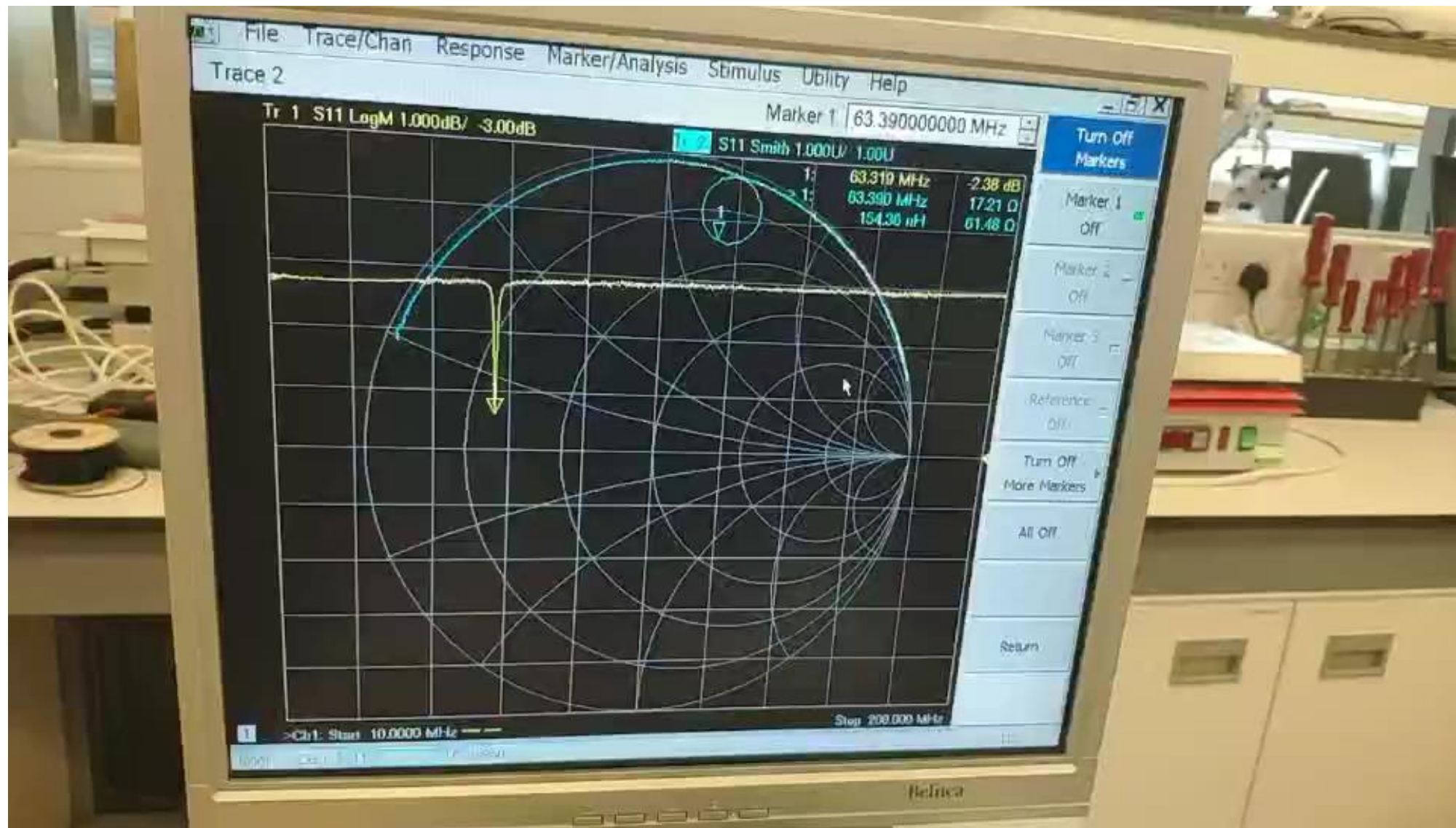
阻抗和特征阻抗的匹配：边界条件



$$Z_0 = \frac{V^+(Z)}{I^+(Z)} = -\frac{V^-(Z)}{I^-(Z)} \quad \Gamma_0 = \frac{V^-}{V^+}$$

$$Z_L = \frac{V(0)}{I(0)}$$

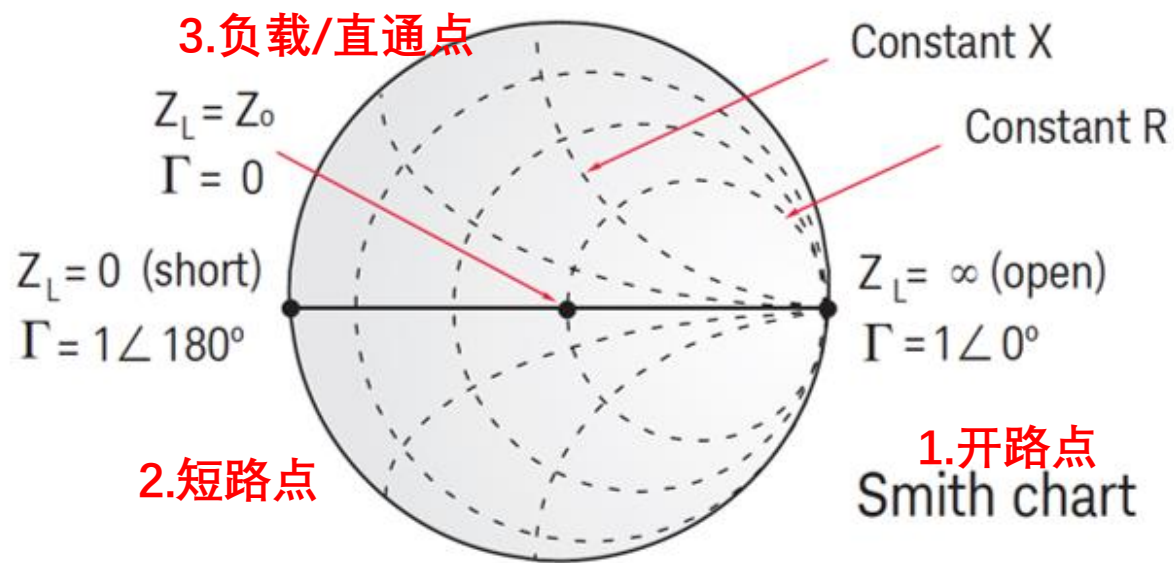
例：利用反射测量射频阻抗



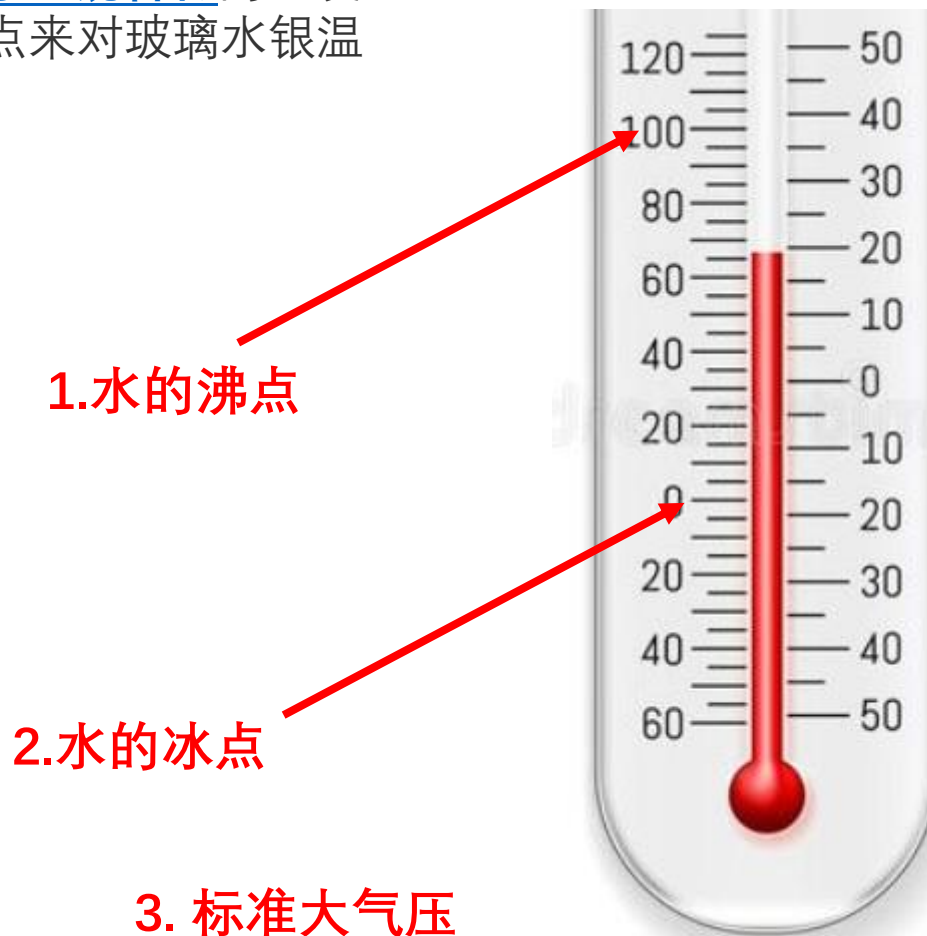
谁是秤砣？谈射频阻抗的标准（1）

摄氏温标与射频阻抗的类比

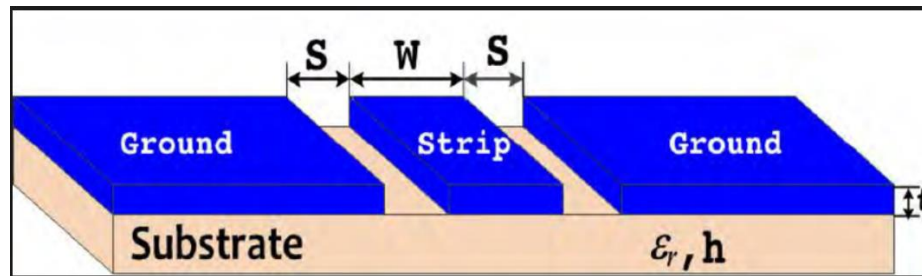
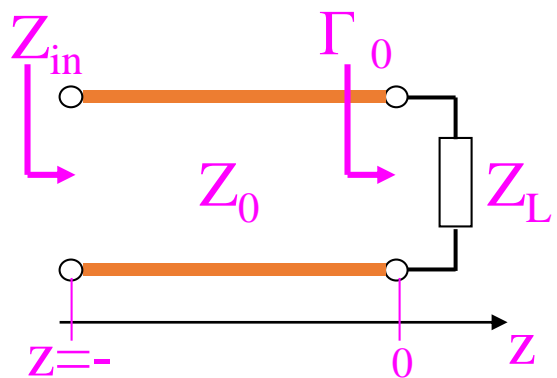
摄氏温标的发明者是Anders Celsius（1701—1744），其结冰点是 0°C ，沸点为 99.974°C 。1740年瑞典人摄氏（Celsius）提出在标准大气压下，把冰水混合物的温度规定为**0度**，**水的沸腾温度规定为99.974度**。根据水这两个固定温度点来对玻璃水银温度计进行分度。两点间作100等分，每一份称为1摄氏度。记作 1°C 。



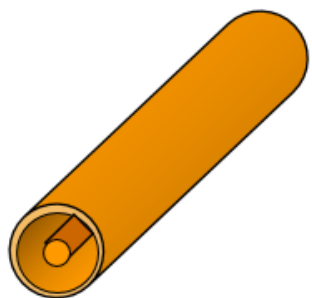
SOLT/TRL校准



谁是秤砣？谈射频阻抗的标准（2）

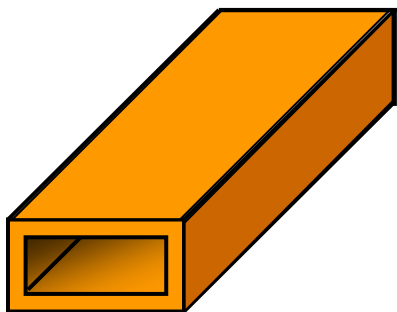


共面波导 $Z_0 = 50$



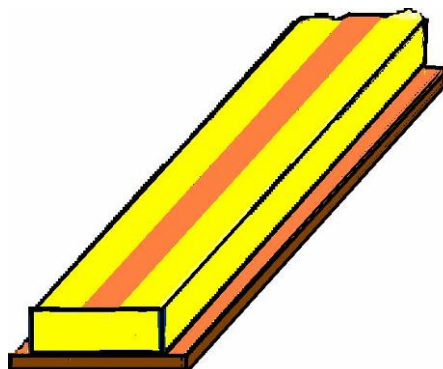
同轴线

$Z_0 = 50$



矩形波导

$Z_0 = 300-500$ (随频率变化)



微带

$Z_0 = 50$

世界货币与阻抗的类比：“50欧姆”和“美元交易”

Frequency Domain Solver Parameters

Method

Broadband sweep:

General purpose

Properties...

Mesh type:

Tetrahedral

Results

Store result data in cache

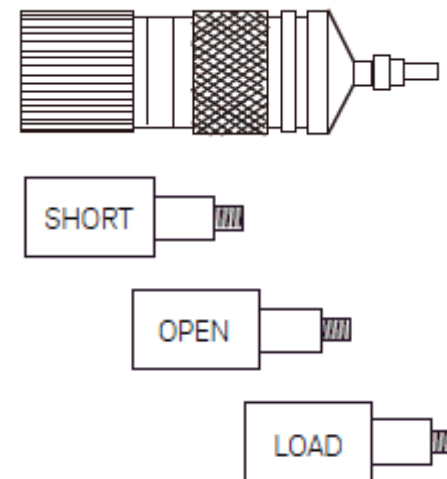
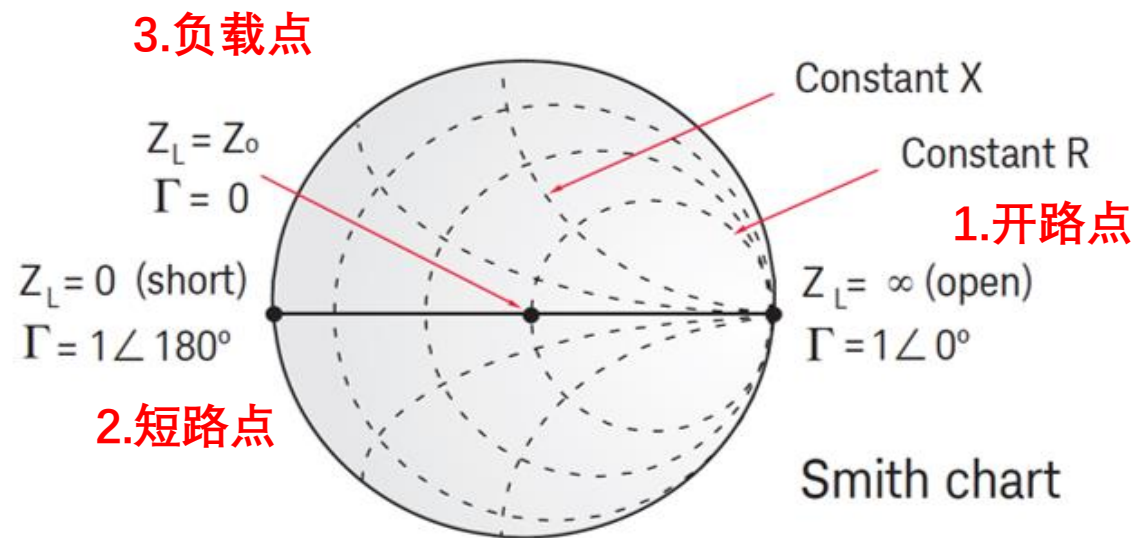
Calculate port modes only

Normalize S-parameter to

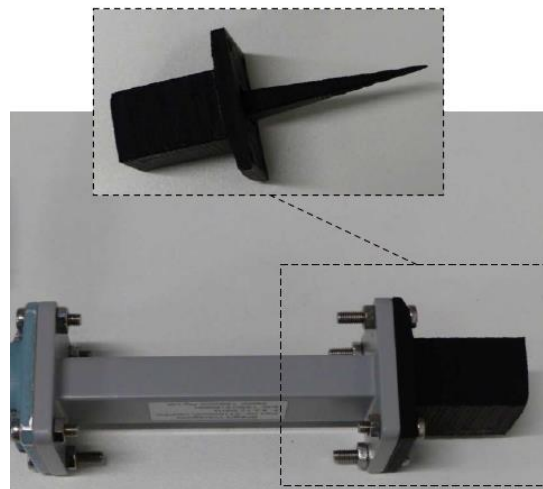
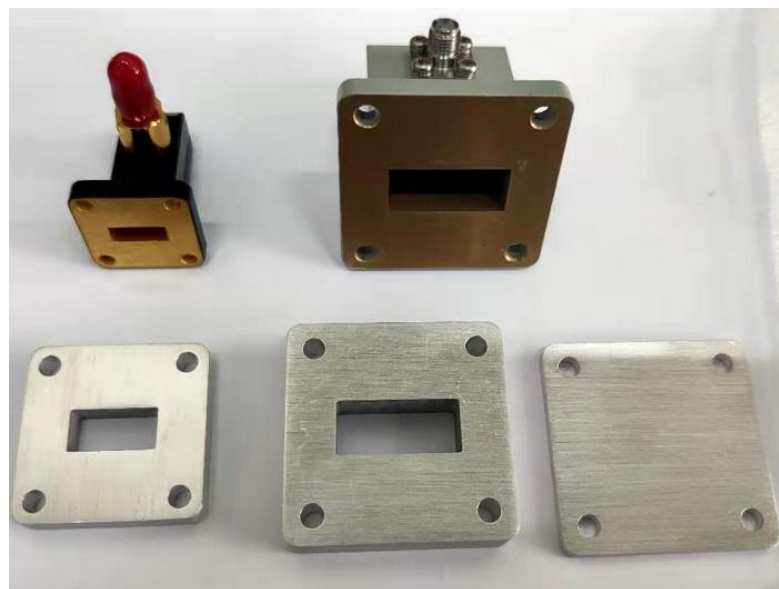
50 Ohm

Excitation

例：射频阻抗标准：同轴和波导校准件

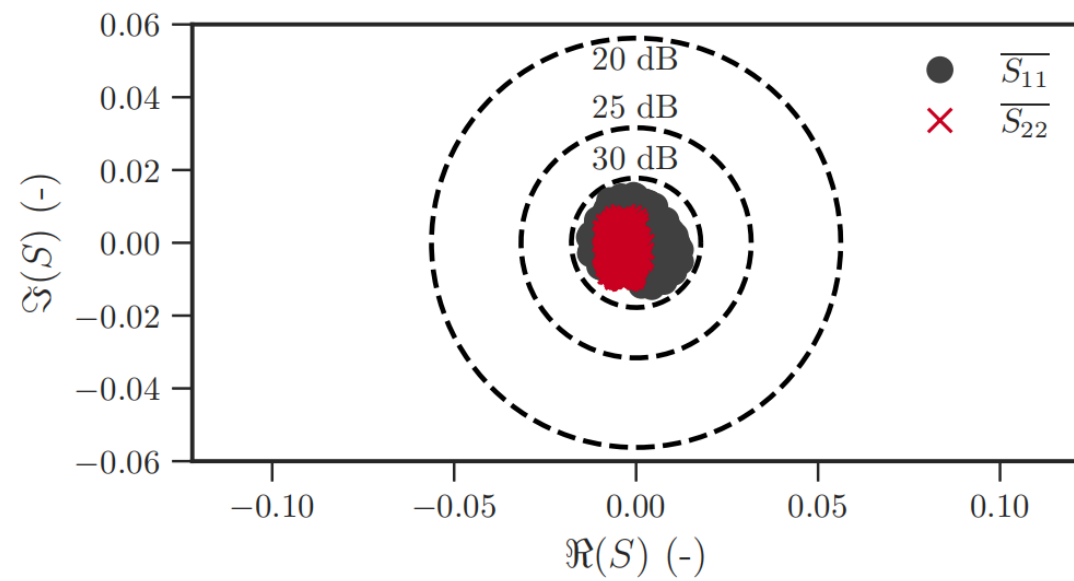
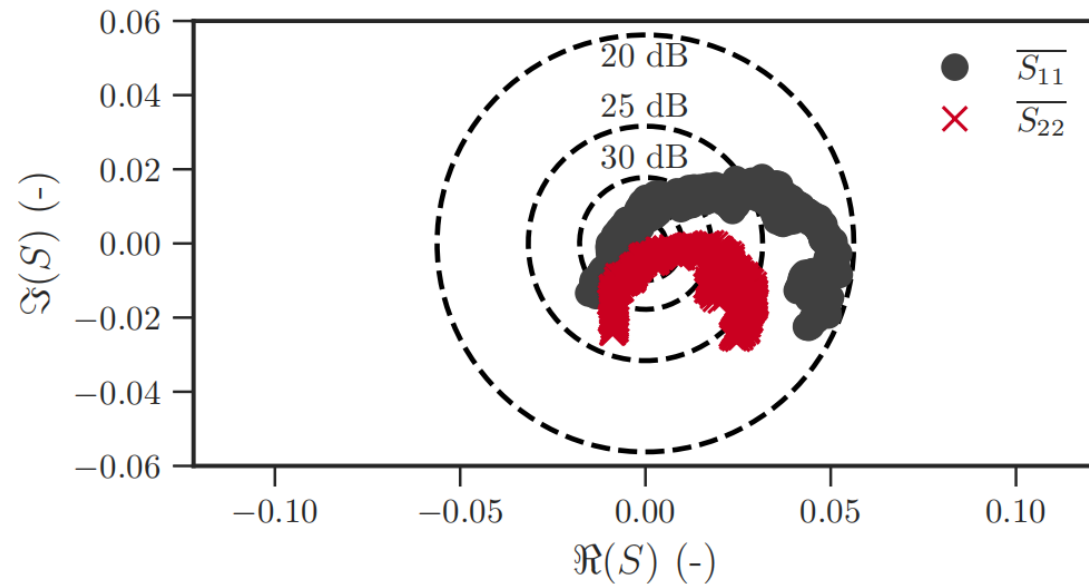
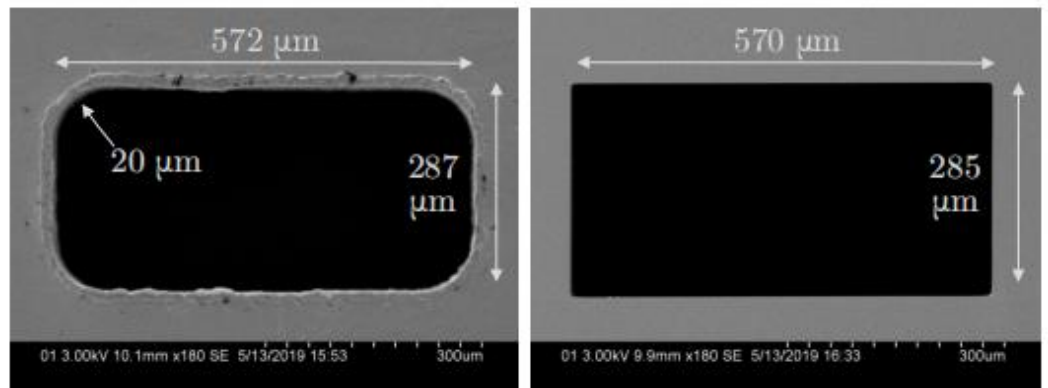
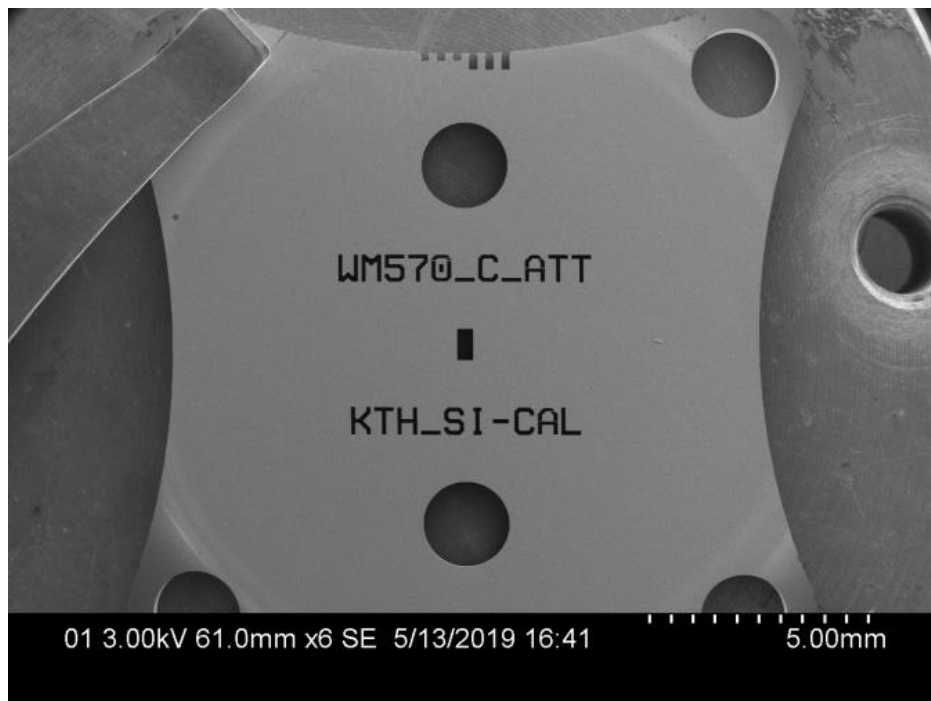


同轴标准（校准件）

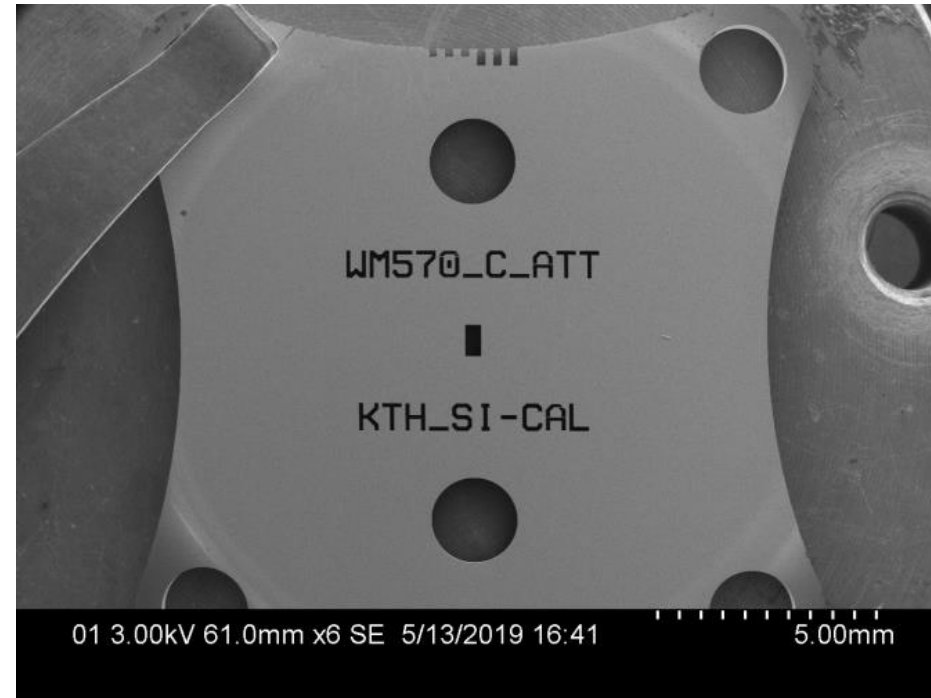


波导标准（校准件）

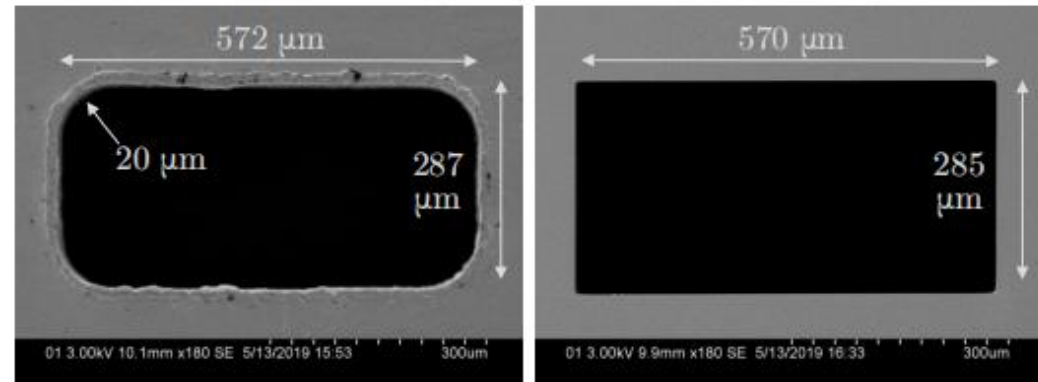
例：射频阻抗标准：高频波导校准片



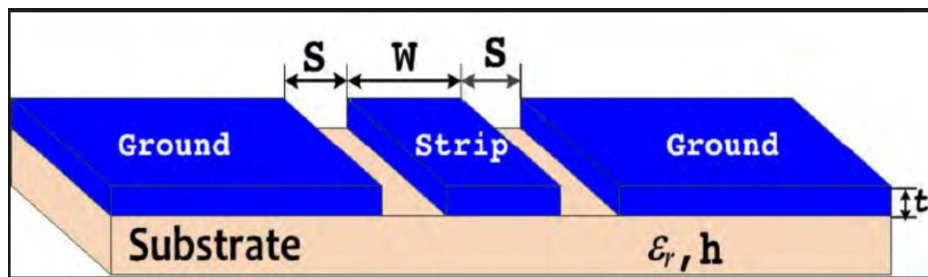
$$\begin{aligned}
 Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}} = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\mu / \varepsilon} \ln(b/a) \\
 &= \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} \cdot \sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} \cdot \ln(b/a) \cdot \frac{1}{2\pi}
 \end{aligned}$$



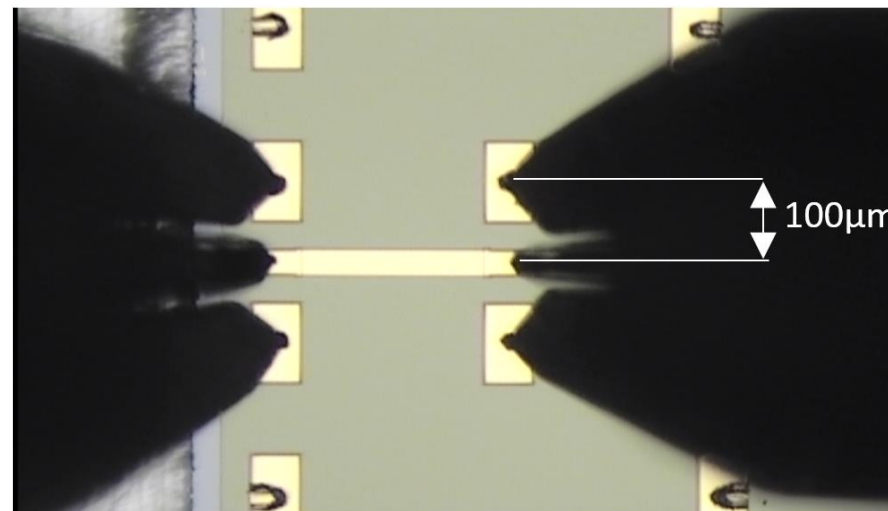
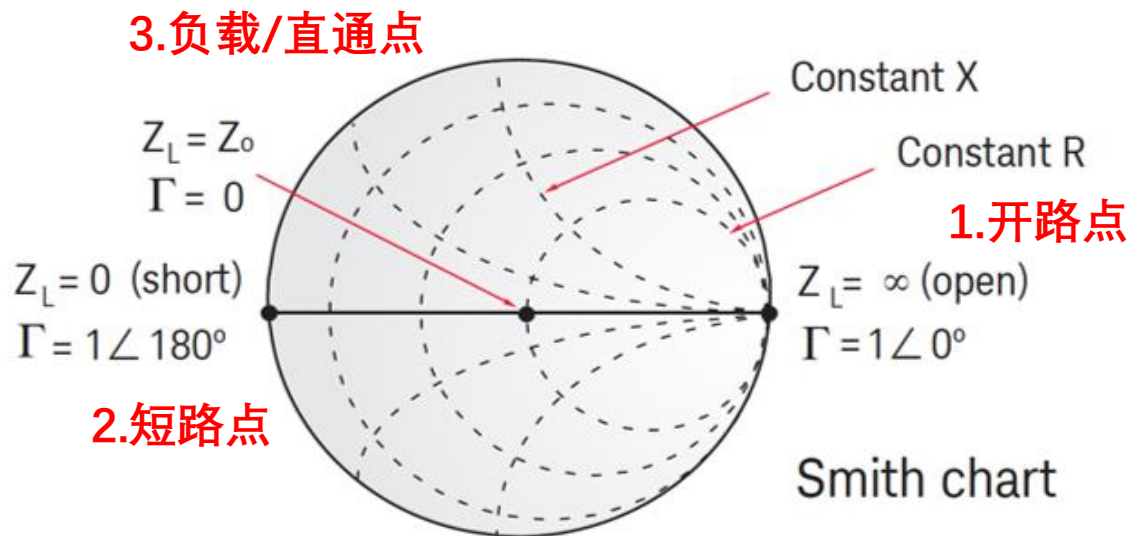
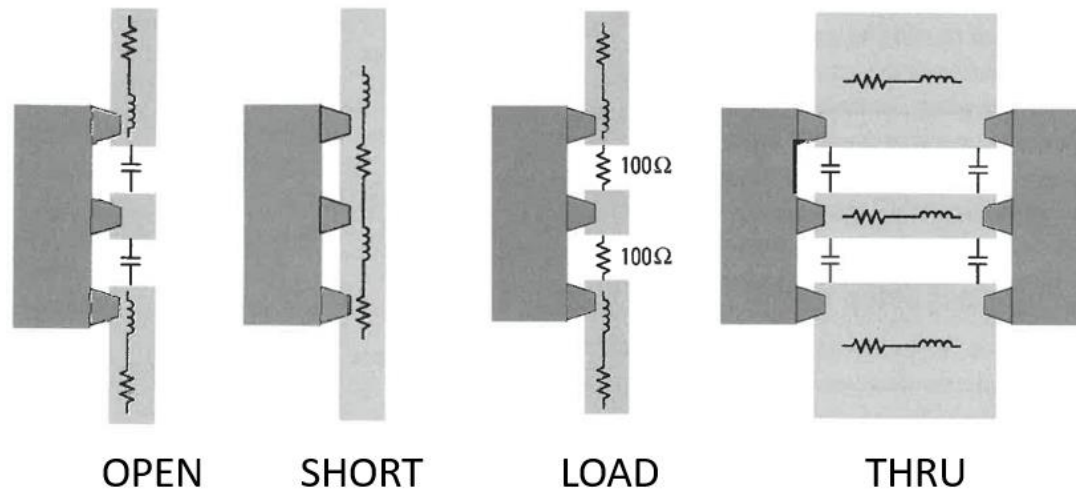
Impedance Metrology
 = Material metrology
 + Length Metrology



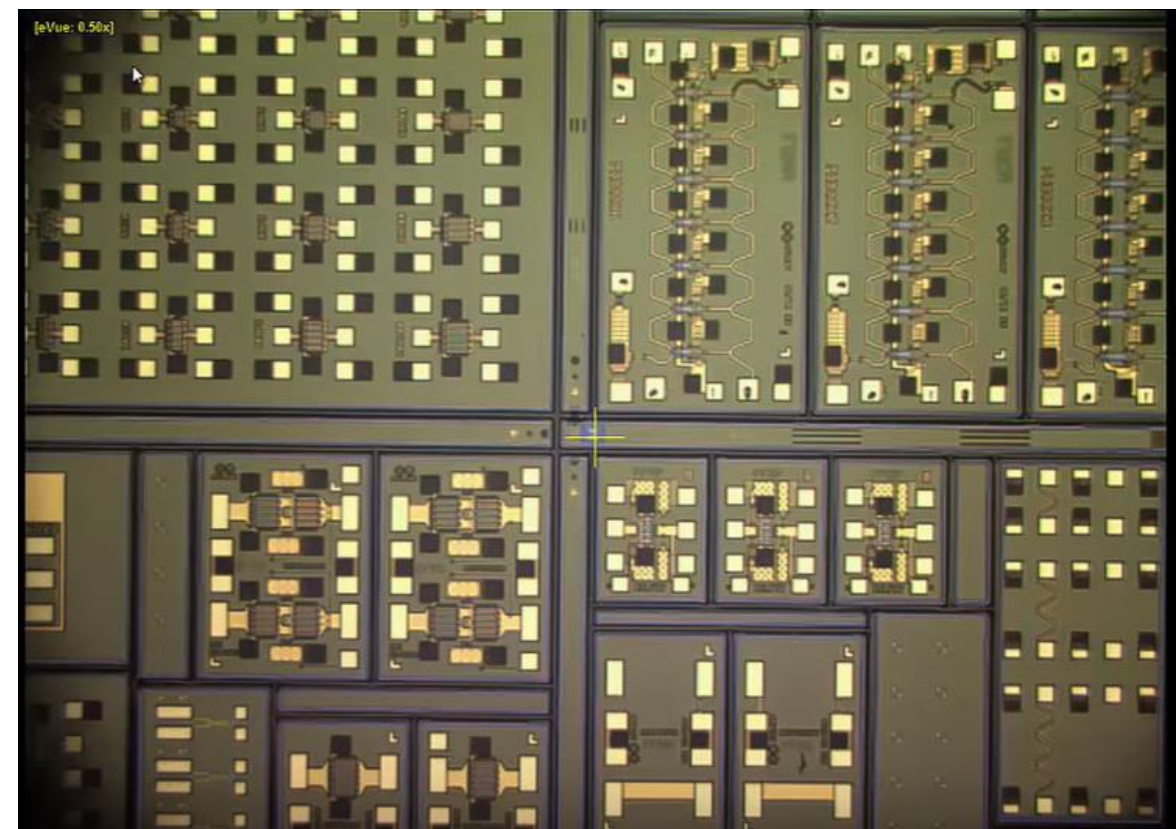
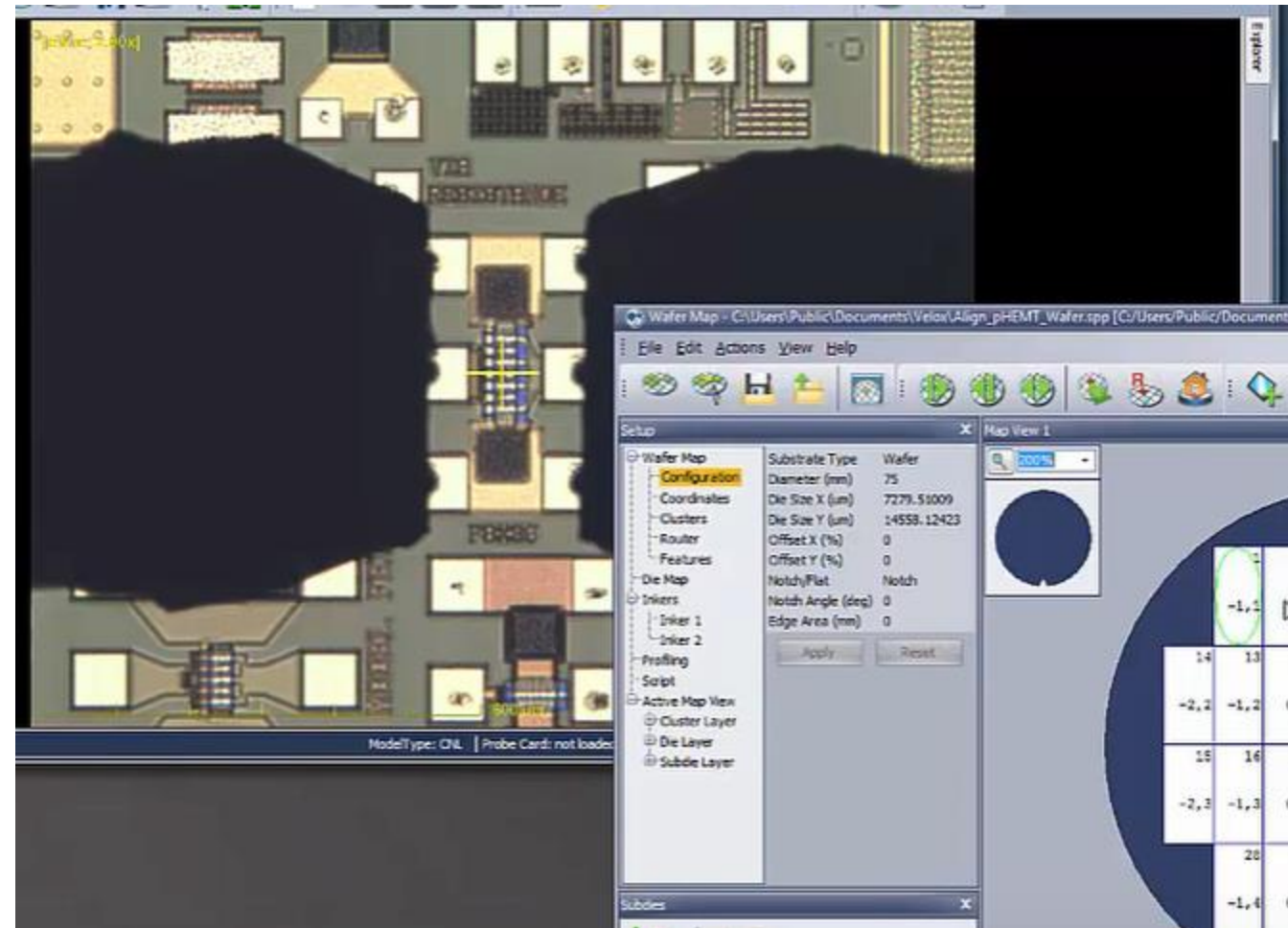
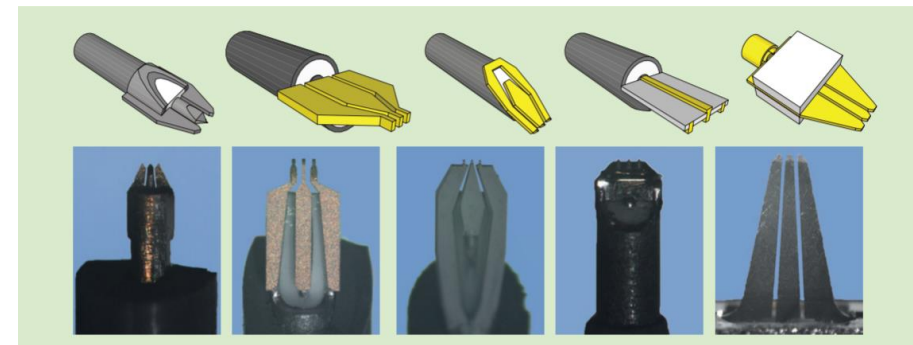
射频阻抗标准: CPW (多用于芯片测量)



共面波导及其校准件



例：芯片测量



阻抗小结

- 1. 阻抗和特征阻抗具有**相同的量纲**，但不是一个东西。
- 2. 特征阻抗和阻抗的匹配：边界条件的匹配
- 3. 阻抗和特征阻抗的一级标准都是“**长度**”
- 4. 各类**校准件**是阻抗的二极标准（Open, Short, Load, 1/4 Line 等）
- 5. **反射系数**和测试系统的**特征阻抗**共同确定了待测件的**阻抗**

小结

第一节 微波测量中的标准与定标：频率、功率、阻抗

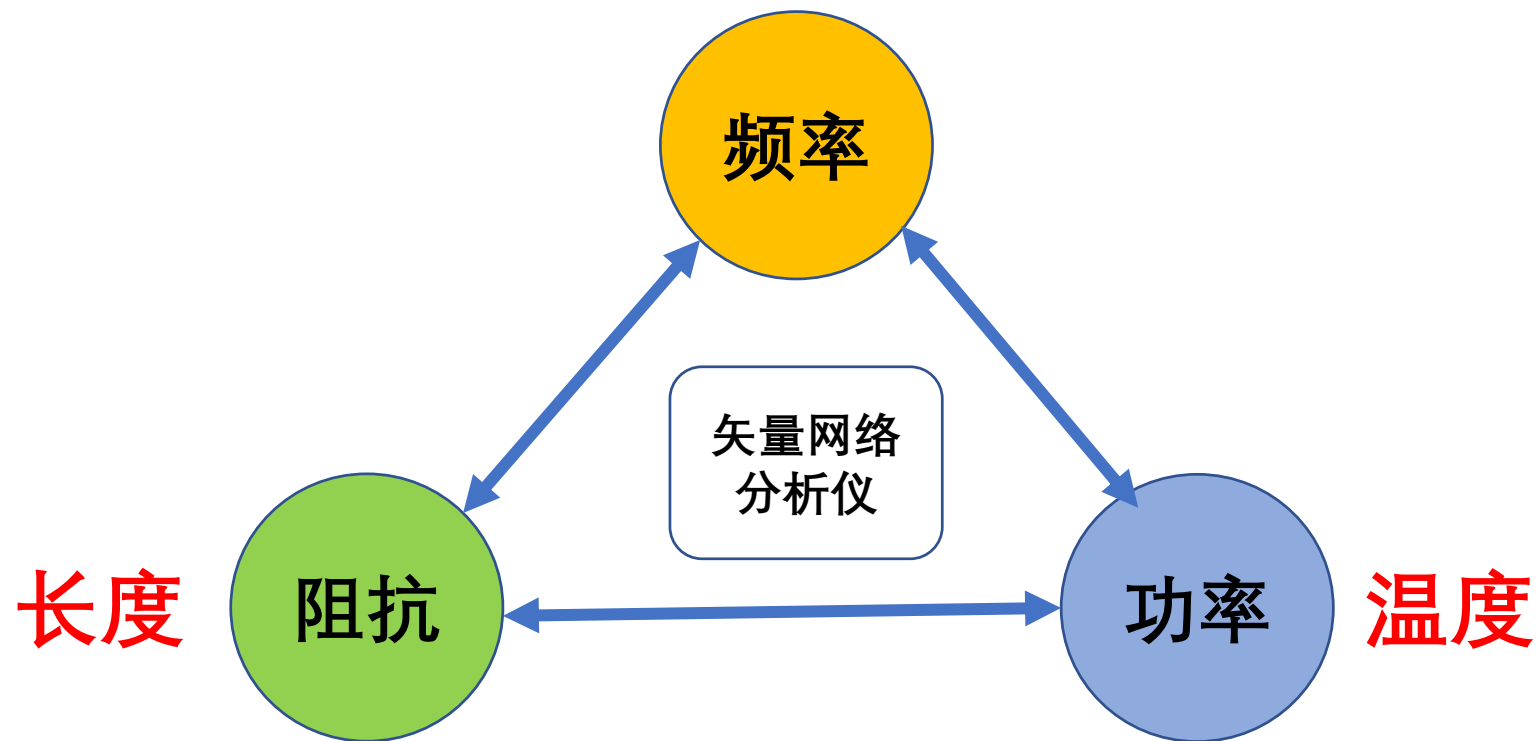
第二节 频率定标及测量：利用周期性运动作为频率的标准

第三节 功率定标及测量：利用热作为功率的标准

第四节 **S**参数，阻抗定标及测量：短路，开路，负载等作为阻抗的标准

微波测量中的“基本单位”与国际单位

时间->长度



材料
介质
参数

噪声

本节思考题

- 1. 请根据提供的文献，计算在里德堡原子体系下，矩形波导传输功率与普朗克常数、频率分裂和波导尺寸的关系。（1人）
- 2. 根据提供的文献，并调研文献，给出VDI-PM系列毫米波量热式功率计的基本原理及其控制电路原理（2-3人）
- 3. 根据提供的文献，描述“太赫兹分子钟”捕捉OCS分子震荡频率的原理。（2人）
- 4. 以1/4波长矩形波导校准片为例，计算当厚度误差，长/宽误差为a%和b%时，S参数的测量误差为多少？（3-4人）
- 5. 以同轴传输线为例，计算当外导体半径误差为a%时，特征阻抗的误差为多少？计算当介电常数的误差为b%时，特征阻抗的误差为多少？（1-2人）
- 6. 调研文献，描述信号源的种类和基本原理。重点阐述为什么设备级的信号源能产生频率间隔低至sub-1Hz的信号（3-4人）
- 7. 调研所有同轴连接器及同轴传输线的种类和适用范围/兼容性（至少应覆盖DC-110GHz）。（1人）
- 8. 调研利用LabView或Matlab控制VNA等设备实现自动测试的方式（3-4人）
- 9. 用批判的态度阅读论文《基于太赫兹技术对中医气理论外气实质研究》等几篇文献，调研论文中所用仪器的基本原理，结合热噪声定标原理，重新阐明论文中出现的实验现象的科学原理。（2-3人）