

第3章 超声波的产生

- 压电效应
- 压电材料
- 几类治疗超声换能器

1. 压电效应

➤ 超声换能器：什么是换能器？

顾名思义：换能器就是进行能量转换的器件。

➤ 什么是超声换能器？

在超声频率范围内，将交变的电信号转换成声信号，或者将外界声场中的声信号转换成电信号的能量转换器件。在所有的超声应用中，超声波都是换能器产生的。

用途最多的压电式超声换能器和磁致伸缩超声换能器两大类。

1. 压电效应

压电效应是法国物理学家居里兄弟于1880年发现的。当把一定数量的砝码放在一些天然晶体上时，这些天然晶体的表面会产生一定数量的电荷，而且所产生的电荷数量上与砝码的重量成正比，这种现象称为压电效应。1881年，科学家又从理论上预计并从实验上验证了逆压电效应的存在。

压电效应是超声发展史上的重大发现，这一发现大大加速了声学在国防以及国民经济各行各业中的广泛应用。

压电效应

➤ 正压电效应

正压电效应的物理本质，是由于不对称的晶体内部离子受外力作用后，离子间产生不对称的相对位移。结果引起了新的电偶极矩，从而引起晶体表面电荷堆积。正压电效应将机械能转换成电能。

➤ 逆压电效应

指压电材料在外电场作用下，其内部电极化状态发生相应的变化，导致压电体产生与外加电场强度成正比的压电现象。即它把电能转换成机械能，形成振动，振动在弹性媒质下传播形成声波。

2. 压电材料

- 超声技术的发展离不开压电材料的发展
- 压电材料是压电换能器的核心
- 而压电换能器是绝大部分超声应用技术的核心

2. 压电材料

- 压电单晶
- 压电陶瓷
- 压电高分子聚合材料
- 压电复合材料

2. 压电材料

➤ 压电单晶

天然：石英，酒石酸钠

人工合成：石英、铌酸锂、钽酸锂

铌镁酸铅

优点：压电性和频率稳定性好

压电陶瓷

- 特点（优点）
 1. 原材料价格低廉，
 2. 机械强度高，易于加工成各种形状和尺寸，满足不同的需求；
 3. 通过材料添加，可制成品种、性能不同的材料；
 4. 采用不同的形状和极化方式，得到各种所需的振动模式。

2. 压电材料

➤ 压电陶瓷

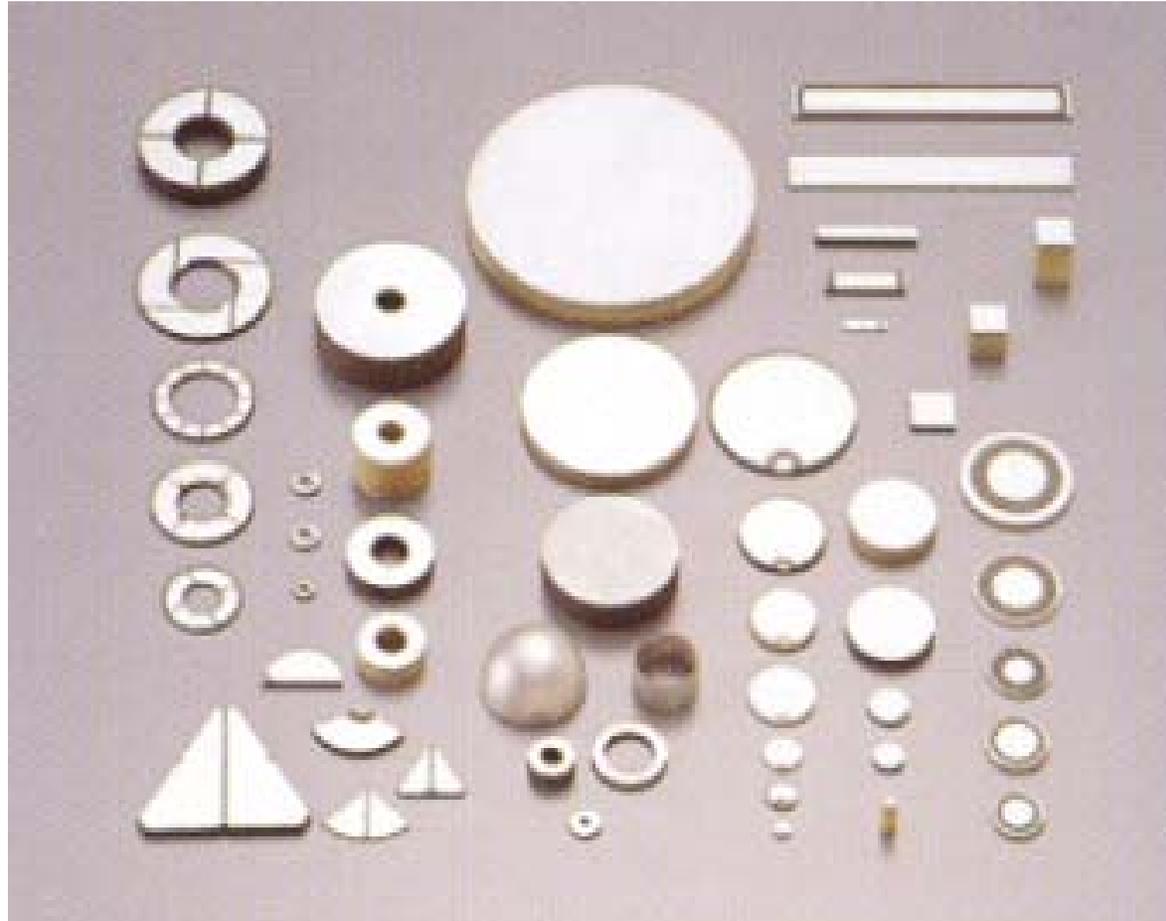
用途非常广。多晶体，最常用的PZT

配方：系统，合成固溶体

工艺：工艺流程

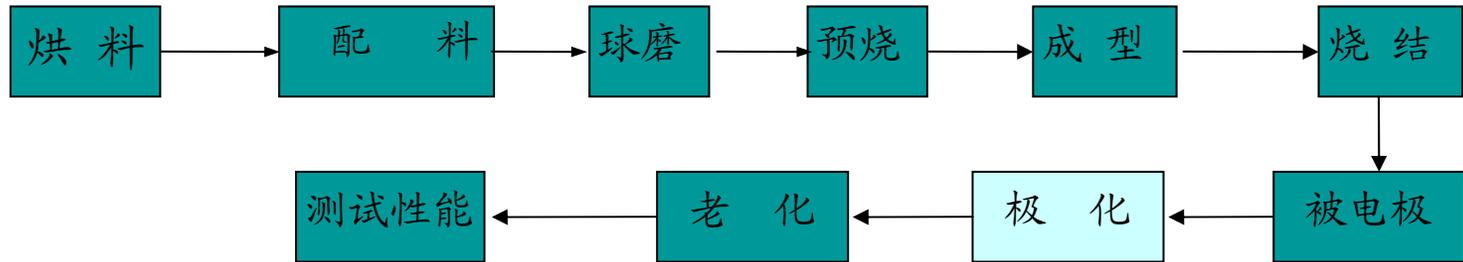
压电陶瓷的性能主要取决于陶瓷材料组分和显微结构

压电陶瓷材料



各种类型压电陶瓷片

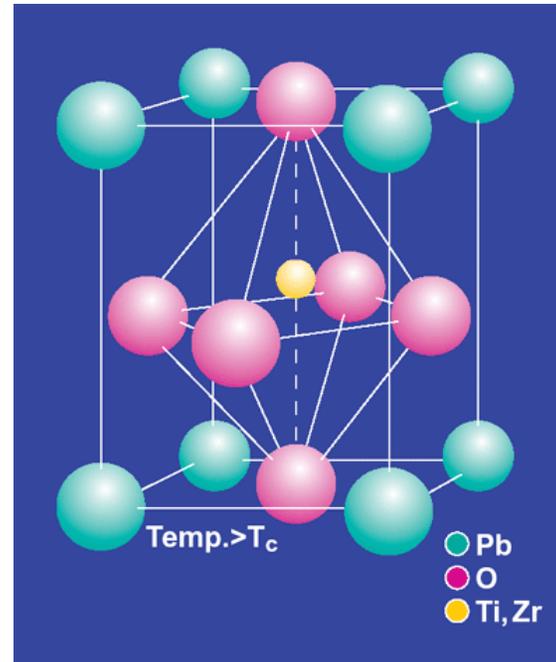
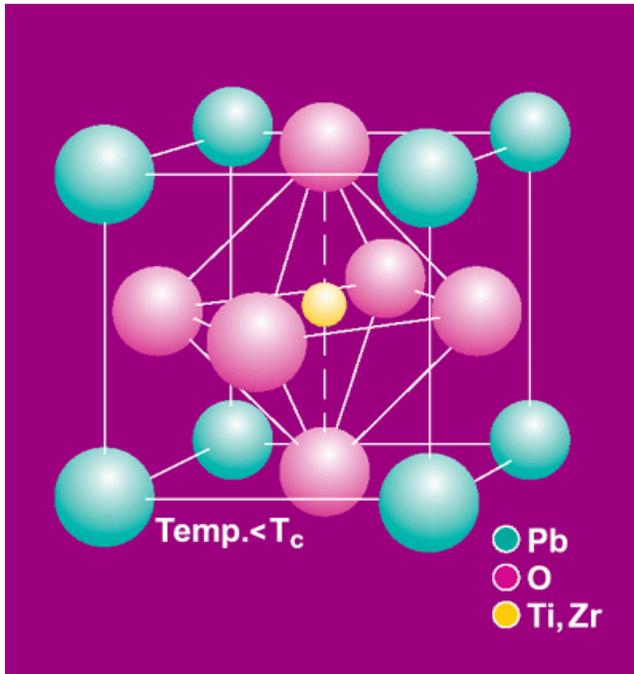
2. 压电陶瓷材料



传统的压电陶瓷工艺流程

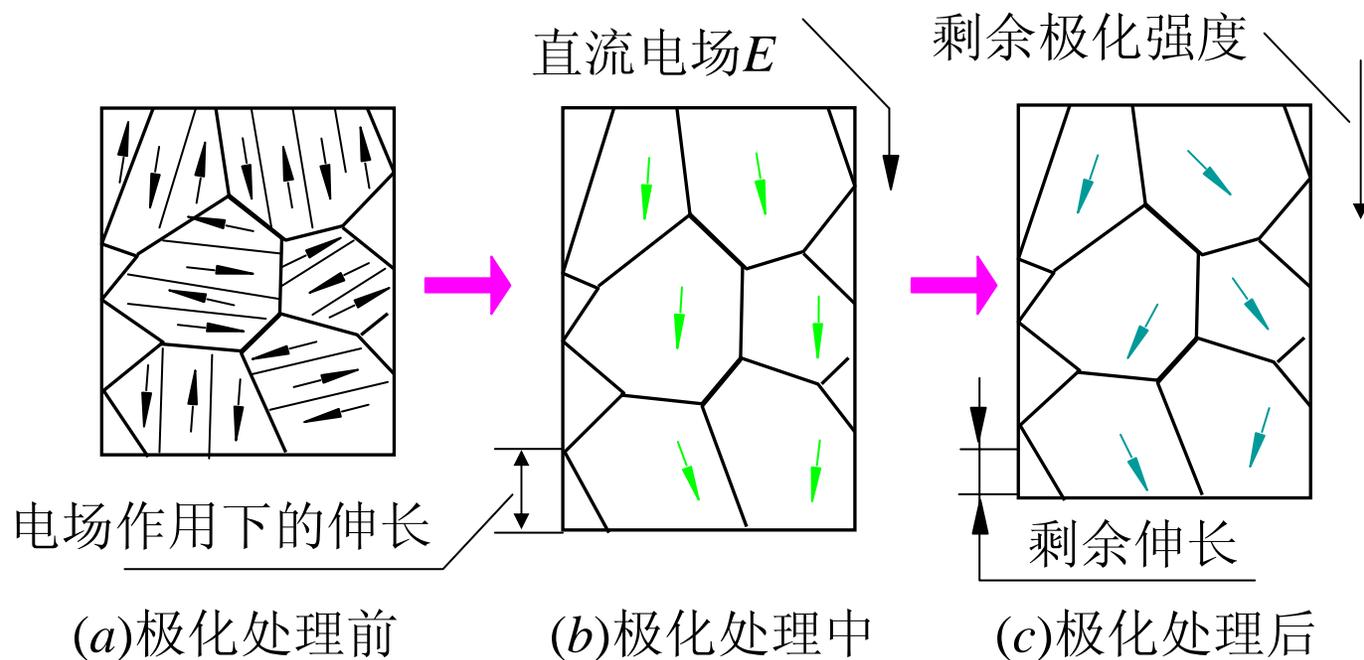
压电陶瓷

- 晶胞结构

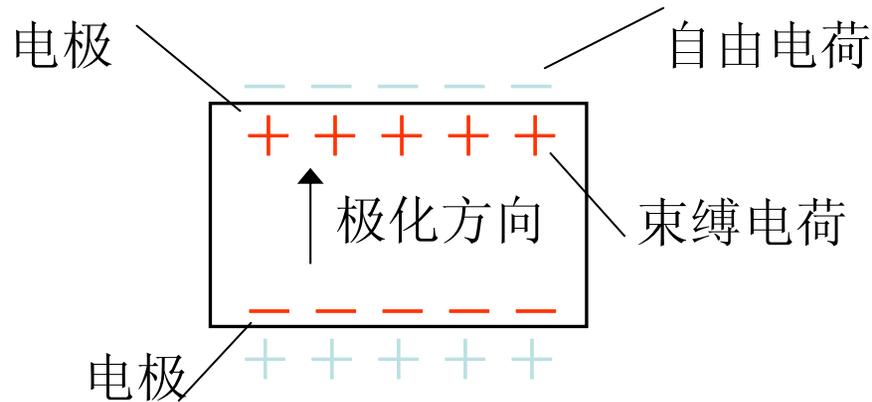


压电陶瓷的压电效应

压电陶瓷属于铁电体一类的物质，是人工制造的多晶压电材料，它具有类似铁磁材料磁畴结构的电畴结构。电畴是分子自发形成的区域，它有一定的极化方向，从而存在一定的电场。在无外电场作用时，各个电畴在晶体上杂乱分布，它们的极化效应被相互抵消，因此原始的压电陶瓷内极化强度为零，见图（a）。

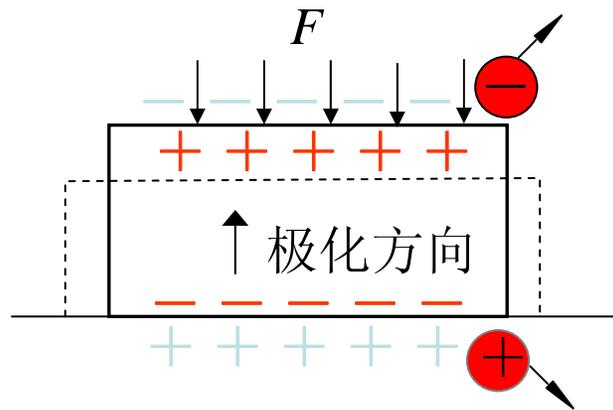


但是，当把电压表接到陶瓷片的两个电极上进行测量时，却无法测出陶瓷片内部存在的极化强度。这是因为陶瓷片内的极化强度总是以**电偶极矩**的形式表现出来，即在陶瓷的一端出现正束缚电荷，另一端出现负束缚电荷。由于束缚电荷的作用，在陶瓷片的电极面上吸附了一层来自外界的自由电荷。这些自由电荷与陶瓷片内的束缚电荷符号相反而数量相等，它起着屏蔽和抵消陶瓷片内极化强度对外界的作用。所以电压表不能测出陶瓷片内的极化程度，如图。



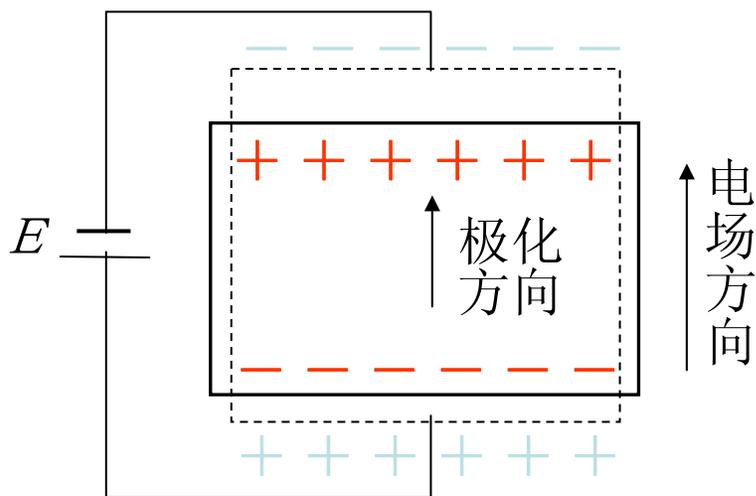
陶瓷片内束缚电荷与电极上吸附的自由电荷示意图

如果在陶瓷片上加一个与极化方向平行的压力 F ，如图，陶瓷片将产生压缩形变（图中虚线），片内的正、负束缚电荷之间的距离变小，极化强度也变小。因此，原来吸附在电极上的自由电荷，有一部分被释放，而出现放电现象。当压力撤消后，陶瓷片恢复原状（这是一个膨胀过程），片内的正、负电荷之间的距离变大，极化强度也变大，因此电极上又吸附一部分自由电荷而出现充电现象。这种由机械效应转变为电效应，或者由机械能转变为电能的现象，就是正压电效应。



正压电效应示意图
(实线代表形变前的情况，虚线
代表形变后的情况)

同样，若在陶瓷片上加一个与极化方向相同的电场，如图，由于电场的方向与极化强度的方向相同，所以电场的作用使极化强度增大。这时，陶瓷片内的正负束缚电荷之间距离也增大，就是说，陶瓷片沿极化方向产生伸长形变（图中虚线）。同理，如果外加电场的方向与极化方向相反，则陶瓷片沿极化方向产生缩短形变。这种由于电效应而转变为机械效应或者由电能转变为机械能的现象，就是逆压电效应。



逆压电效应示意图
(实线代表形变前的情况，
虚线代表形变后的情况)

正压电效应的电位移与施加的应力有如下关系：

$$\mathbf{D}=\mathbf{dT}$$

d:压电常数

逆压电效应的应变与施加的电场强度有如下关系：

$$\mathbf{S}=\mathbf{dE}$$

d:压电常数

注：正、逆压电效应的压电常数一样。

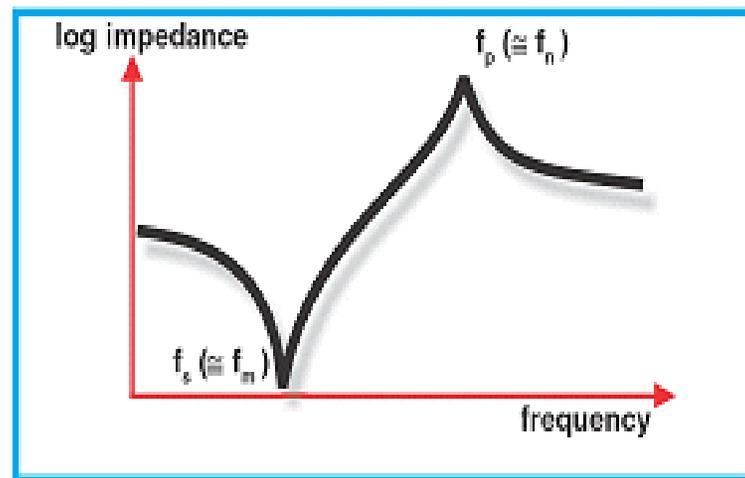
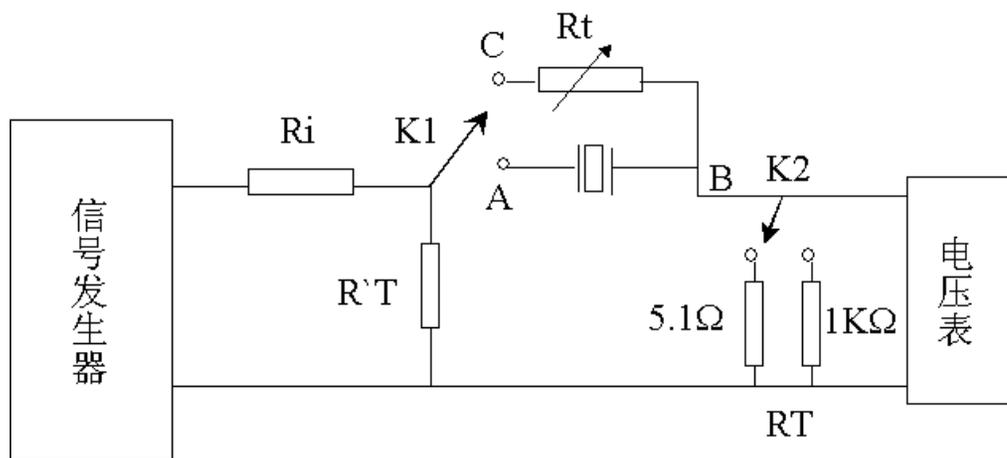
各种压电材料的参数

- 介质损耗 $\tan \delta$: 压电体在交变电场的作用下, 输入电能以漏电损耗和微观的弛豫损耗等方式被消耗掉, 转化为热能损失, 此过程称为介质损耗。

$$\tan \delta = I_R/I_C = \frac{1}{\omega RnC}$$

$$Q_e = \cot \delta = \omega RnC \quad \text{电学品质因素}$$

将压电振子（经极化工艺处理的压电陶瓷片）接入一特定的传输网络中（如图一A、B两点），外加一定的信号电压给压电振子，并逐步改变电压频率，当频率调到某一数值时，压电振子产生谐振。此时振子阻抗最小，输出电流最大，以表示最小阻抗（或最大导纳）的频率。当频率继续增大到另一频率时，振子阻抗最大，输出电流最小，以表示最大阻抗（或最小导纳）的频率。我们把阻抗最小的频率近似作为谐振频率，阻抗最大的频率近似作为反谐振频率。

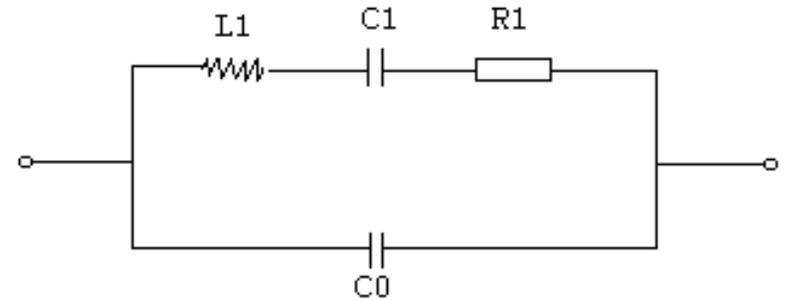


π 型网络传输法测试线路

- 机械品质因素 Q_m : 表示压电材料在谐振时机械损耗的大小, 是综合评价压电材料性能的重要参数。

$$Q_m = \frac{1}{4\pi (C_0 + C_1) R_1 \Delta f}$$

将压电振子在谐振频率附近的参数和特性用一相应电路的参数和特性来表示, 这个电路称为电振子的等效电路



等效电路

- L1——动态电感。
- C1——动态电容。
- R1——动态电阻 (或串联谐振电阻)
- C0——并联电容 (或静态电容)

- 频率常数N: 压电振子的基本谐振频率与沿振动方向的振子长度的乘积是一个常数, 这个常数称为频率常数。

频率常数与振动模式有关

单位: Hz.m

$$N_L = f_L \times L$$

$$N_t = f_t \times h$$

- 机电耦合系数k: 反映材料中机械能与电能之间的转换关系

$$k^2 = \frac{\text{通过压电效应转换的电能}}{\text{储入的机械能的总量}}$$

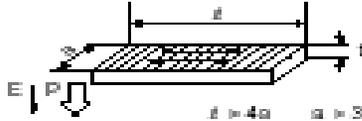
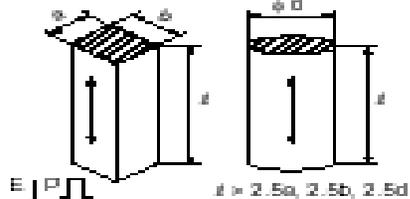
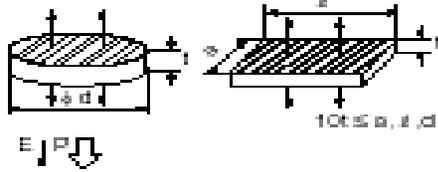
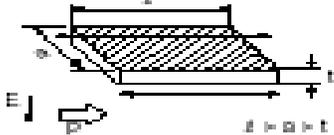
$$k^2 = \frac{\text{通过逆压电效应转换的机械能}}{\text{储入的电能的总量}}$$

机电耦合系数与振子的材料和振动模式有关

其它的压电参数

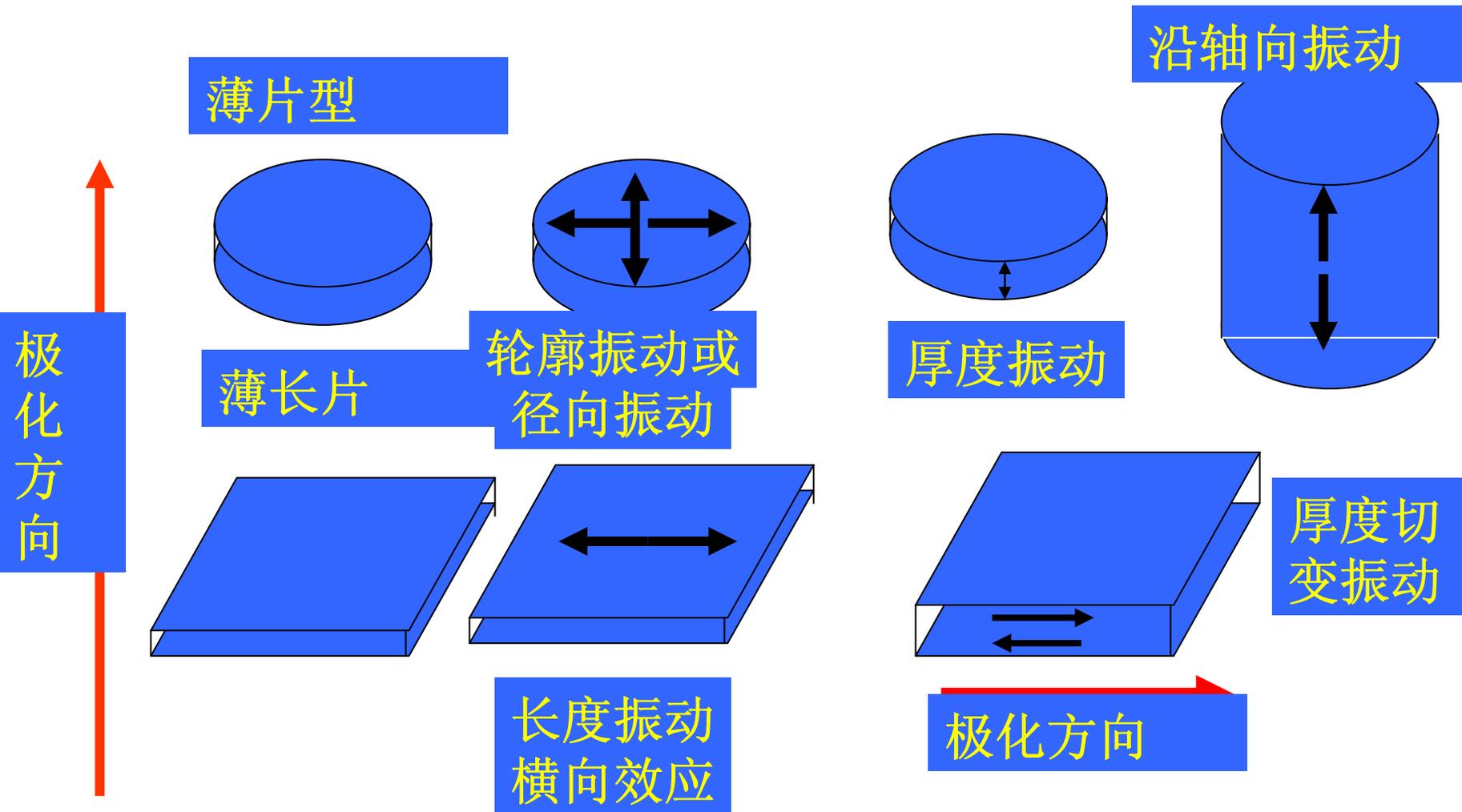
- d_{33}, d_{31} : 压电电荷系数 (压电应变系数)
- g_{33}, g_{31} : 压电电压系数,
- k_{33}, k_{31}, k_p : 机电耦合系数, 机电转换效率指标
- N_{33}, N_{31}, N_p : 频率常数
- Y_{31}^E, Y_{33}^E : 杨氏模量
- T_c : 居里温度

压电陶瓷振动模态

Vibration Mode	Shape/Vibration Mode	Resonant Frequency (fr)	Material Constant Symbol					
			k	d	g	Y^E	ϵ^T	N
Radial Mode	 <p>P: Direction of polarization E: Direction of electric field Thin disk with radial vibration mode. Polarization is oriented along the thickness of the disk. $d > 15t$</p>	$\frac{Np}{d}$	k_p	d_{31}	g_{31}	Y_{11}^E	ϵ_{33}^T	Np
Length Mode	 <p>Thin rectangular plate, with the direction of vibration orthogonal to the polarization axis and with a single point of resonance. $t > 4a$ $a > 3t$</p>	$\frac{N_{31}}{l}$	k_{31}	d_{31}	g_{31}	Y_{11}^E	ϵ_{33}^T	N_{31}
Longitudinal Mode	 <p>Square and cylindrical columns. Vibration is oriented along the direction of polarization. Only a single point of resonance. $h > 2.5a, 2.5b, 2.5d$</p>	$\frac{N_{33}}{l}$	k_{33}	d_{33}	g_{33}	Y_{33}^E	ϵ_{33}^T	N_{33}
Thickness Mode	 <p>Disk and rectangular plates which are thin compared to their surface areas. They have multiple points of resonance in longitudinal vibration mode. $10t \leq a, b, d$</p>	$\frac{Nt}{t}$	k_t	d_{33}	g_{33}	Y_{33}^E	ϵ_{33}^T	Nt
Shear Mode	 <p>Disk or rectangular plates, with the electric field orthogonal to the direction of polarization, causing a shear vibration along the surface. $t > a > t$</p>	$\frac{N_{15}}{t}$	k_{15}	d_{15}	g_{15}	Y_{44}^E	ϵ_{11}^T	N_{15}

(2) 压电振子的振动模式

伸缩振动、切变振动、弯曲振动



伸缩振动：极化方向与电场方向平行时产生的振动。
包括长度伸缩振动、厚度伸缩振动。

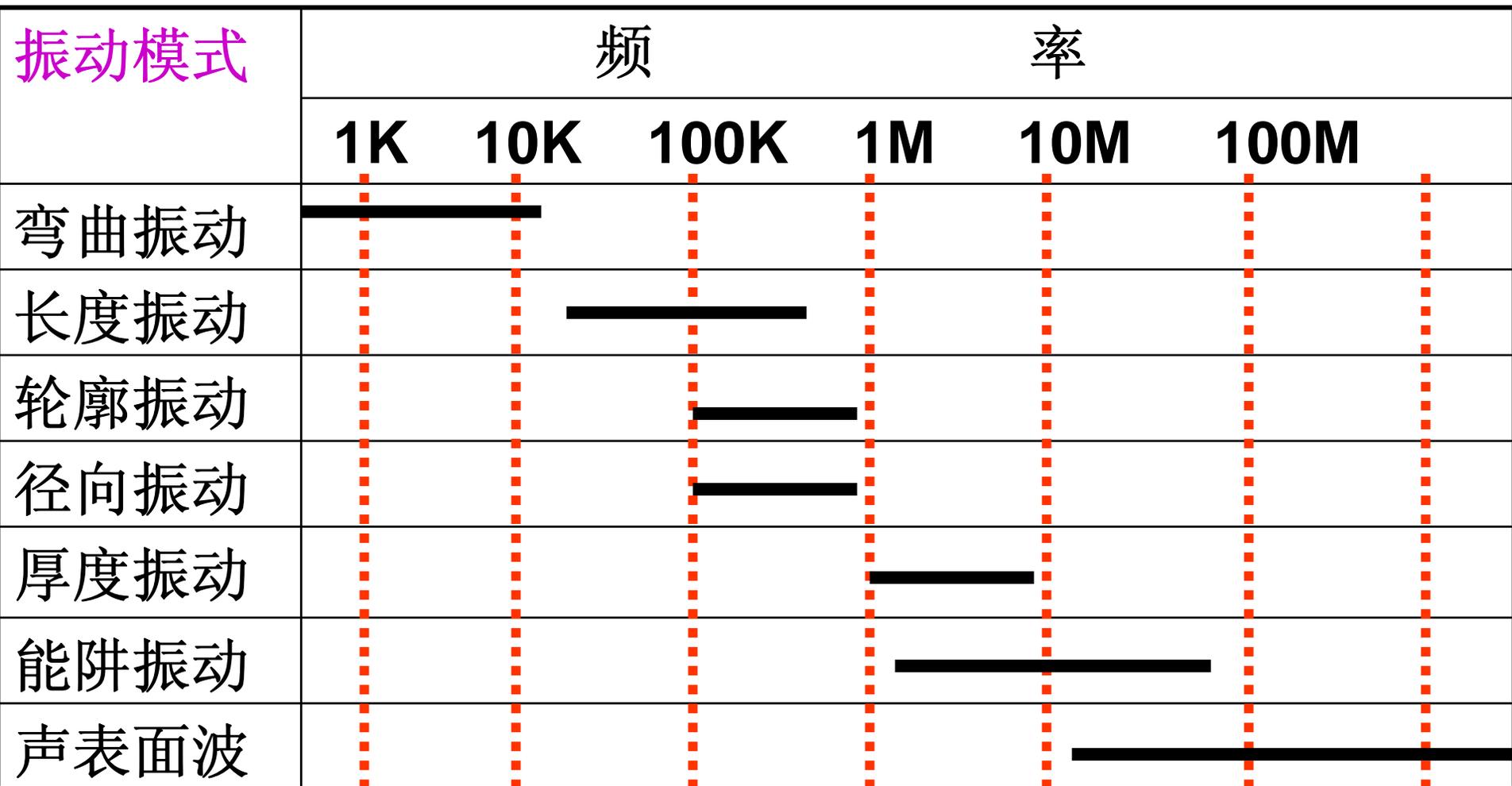
切变振动：极化方向与电场方向垂直时产生的振动。
包括平面切变振动、厚度切变振动。

纵向效应：弹性波传播方向与极化轴平行。

横向效应：弹性波传播方向与极化轴垂直。

弯曲振动：具有两种以上激励电极的振子，在极化方向与电场方向平行而施加的方式不同时，产生的振动。
包括厚度弯曲和横向弯曲。

各种振动模式可达到的频率范围



4. 压电材料及其应用

(1) 材料

钛酸钡

钛酸铅

锆酸铅

钛锆酸铅



钙钛
矿型

非钙钛矿型： 焦绿石、硫
化镉、氧化锌、氮化铝

(2) 应用

电声器：扬声器、送话筒、

水下通讯和探测：水声换能器、鱼群探测器

雷达中的陶瓷表面波器件

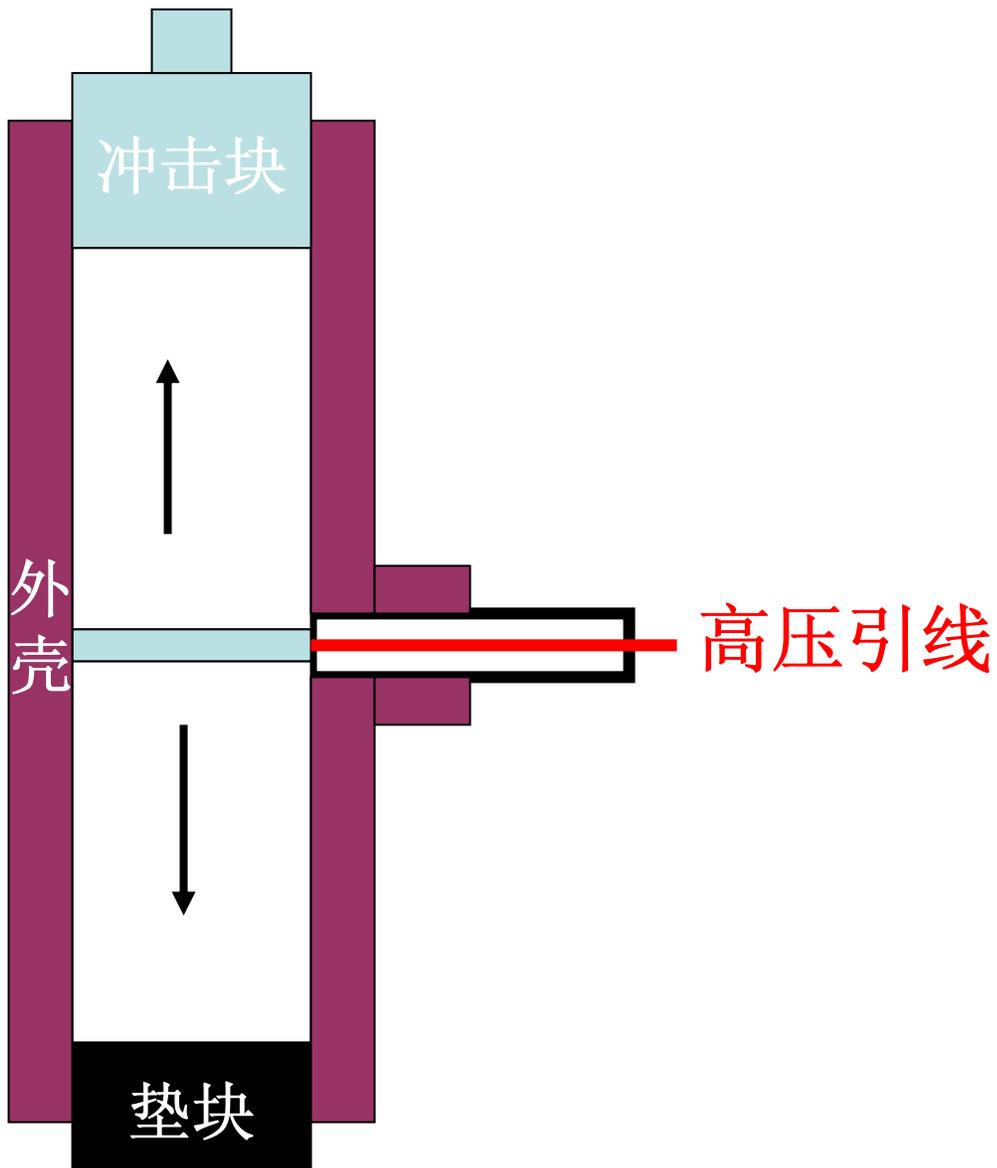
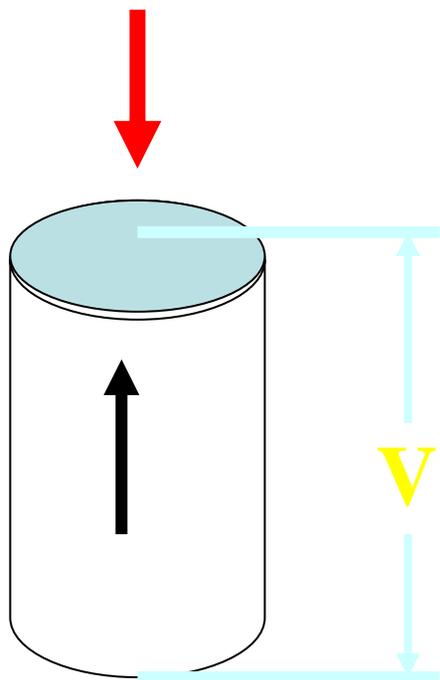
通讯设备：陶瓷滤波器

精密测量：压力计

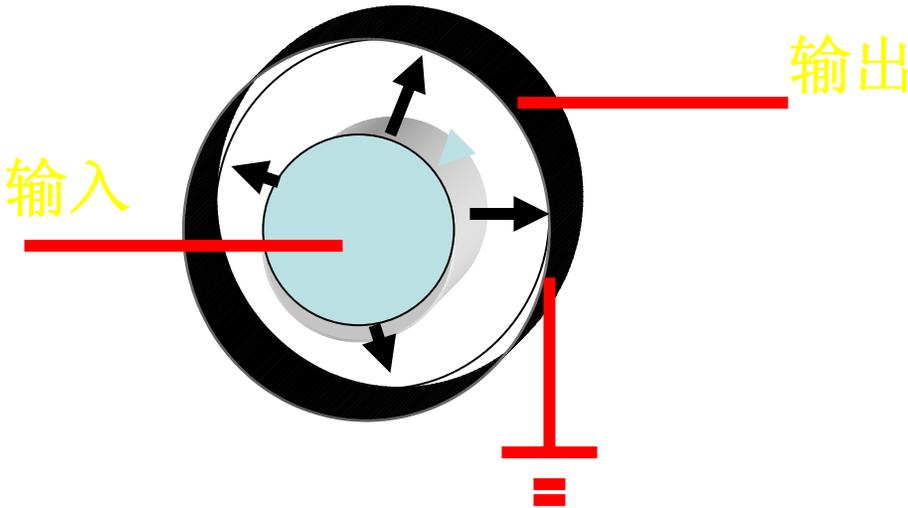
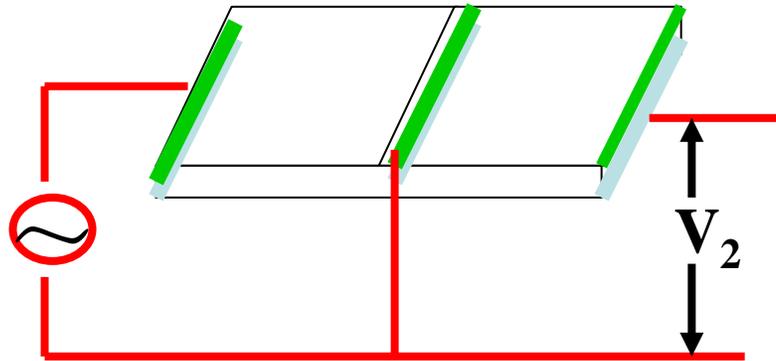
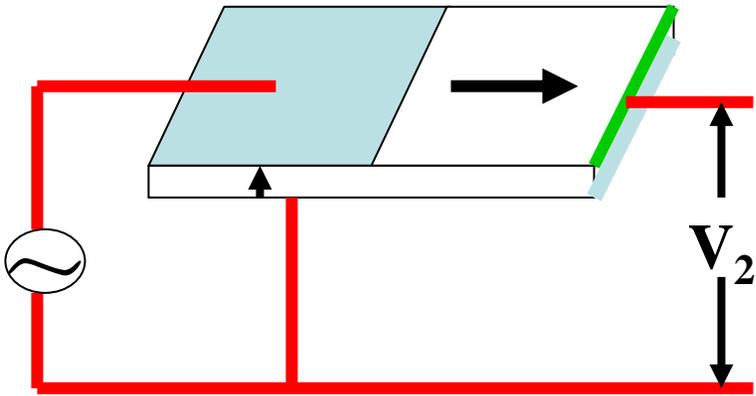
红外技术：红外热电探测器

高压电源：变压器

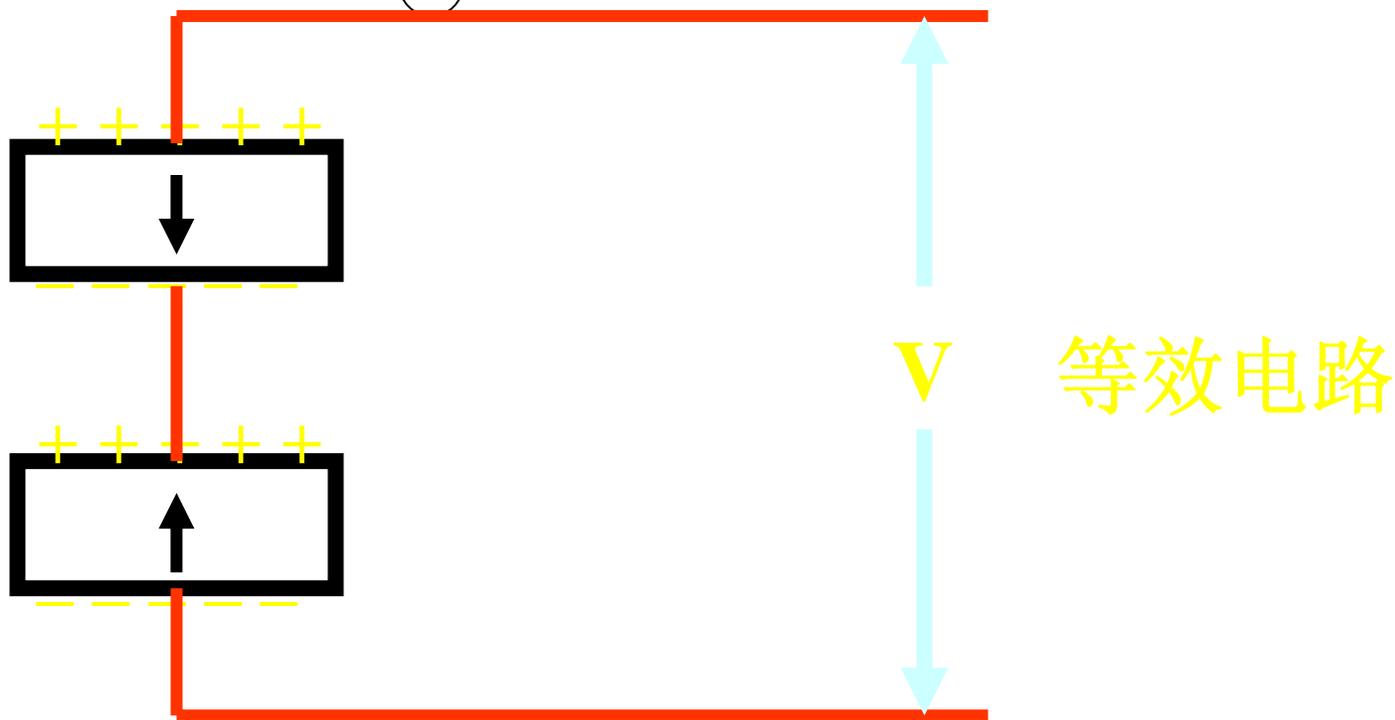
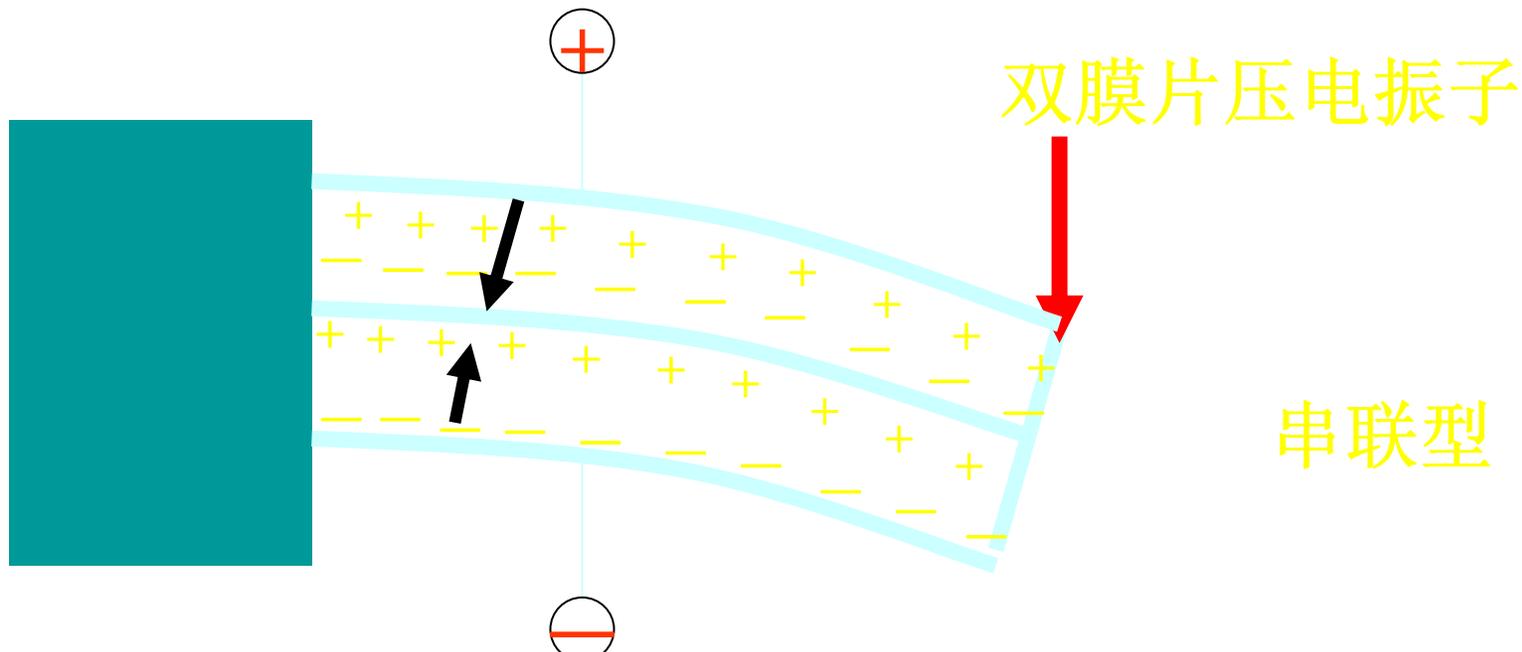
压电陶瓷点火器



压电陶瓷变压器

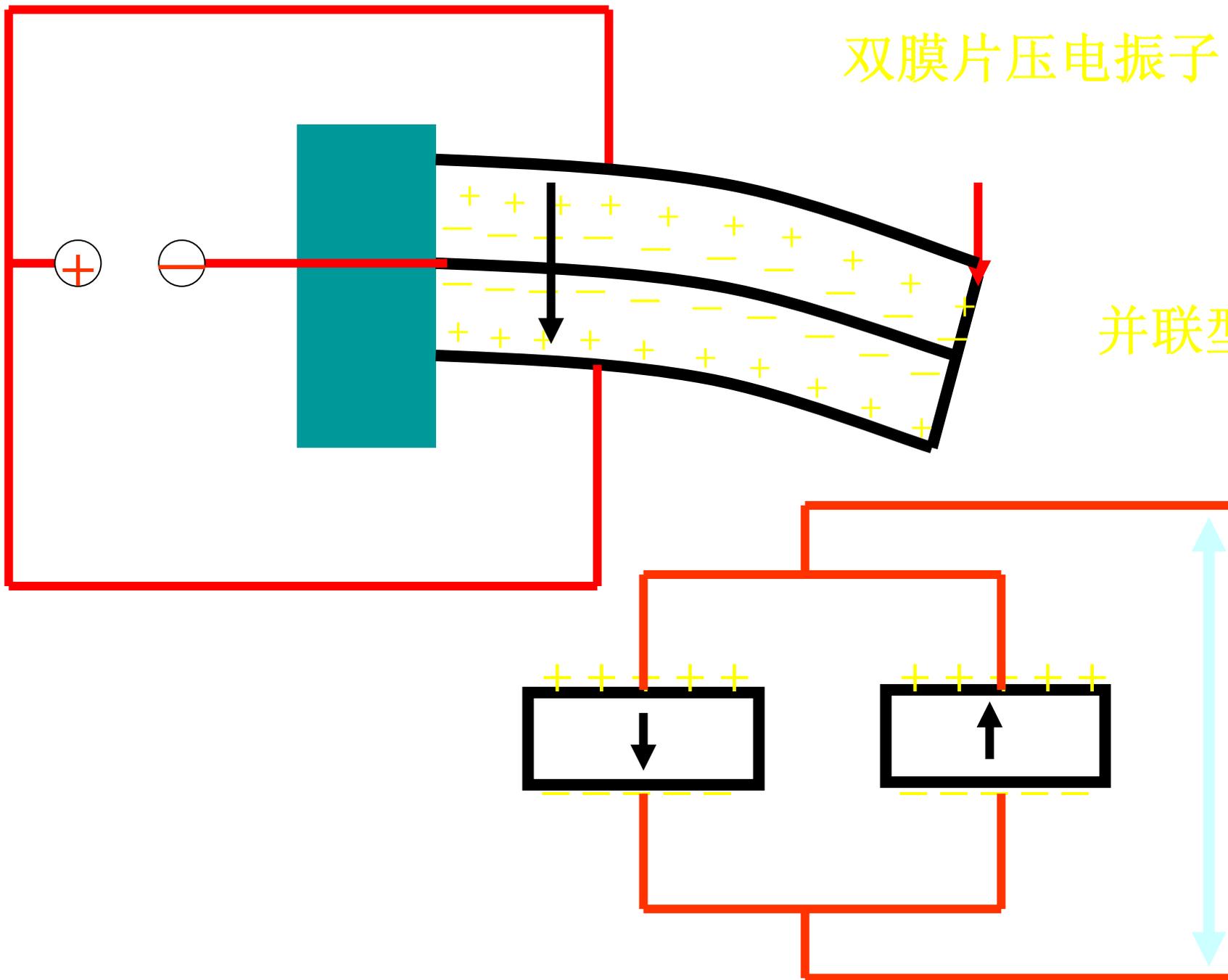


伸缩振动

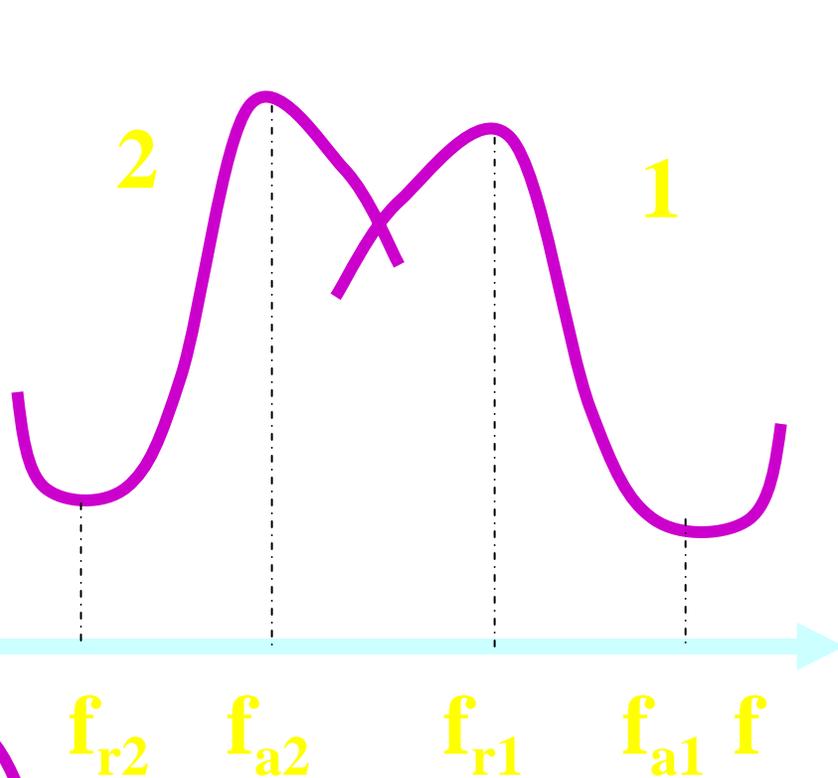
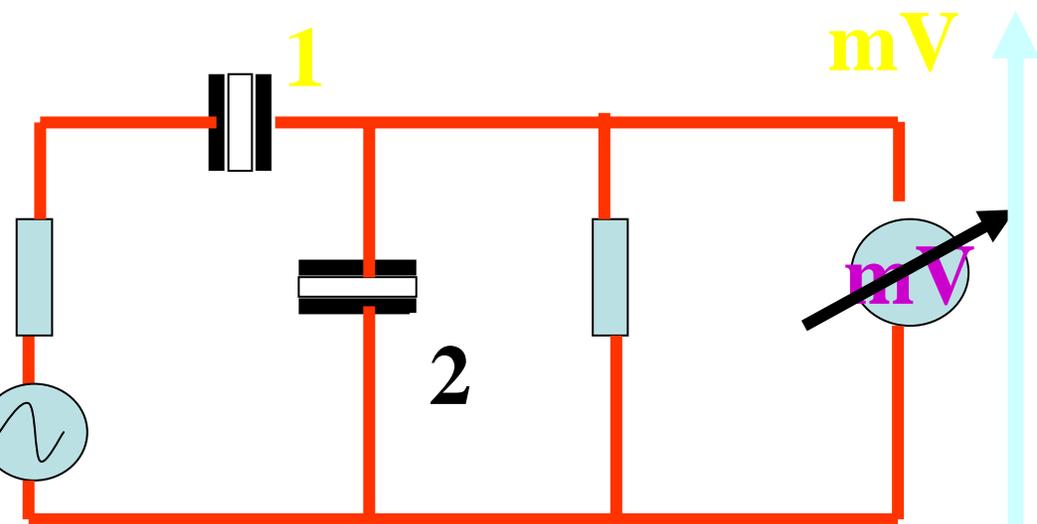


双膜片压电振子

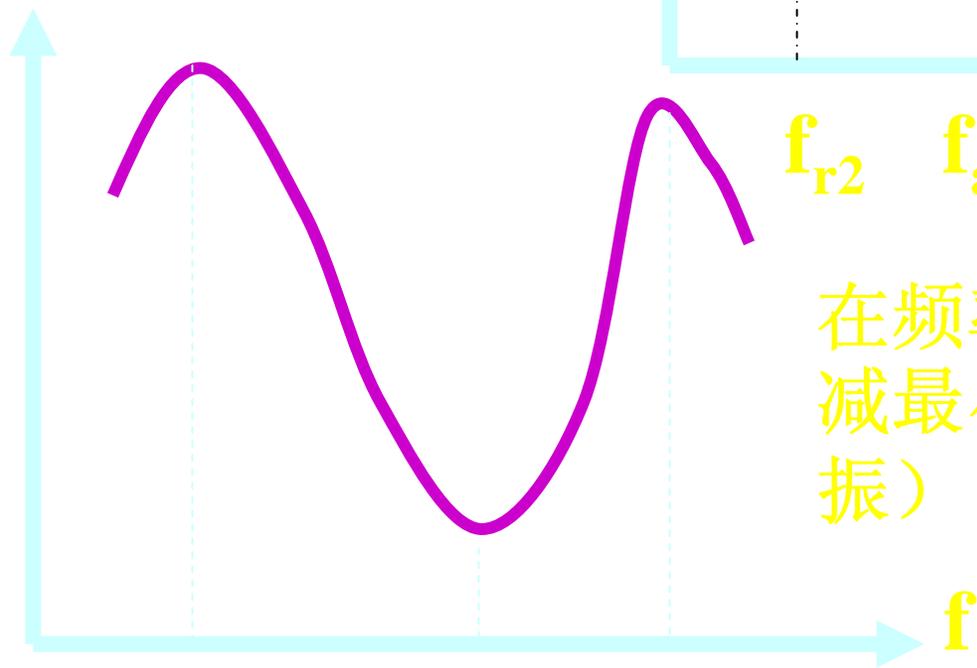
并联型



压电陶瓷滤波器



损耗



在频率附近的信号衰减最小 f_{a2} (2的反谐振) = f_{r1} (1的谐振)

压电陶瓷主要材料物理性能参数表

材料 型号	机电耦合系数				介电 常数	介质 损耗	压电常数				弹性柔顺 常数	机械 品质 因数	声速 (m/s)				体积密度	居里 温度
	Kp	K31	K33	Kt			$\epsilon_{T_{c3}}$	Tg δ%	d31 (-10^{-12} m/v)	d33 (10^{-12} m/v)			g31 (10^{-3} vm/n)	g33 (10^{-3} vm/n)	S_{11}^e (10^{-12} m ² /n)	Qm		
P-51	0.62	0.35	0.69	0.50	2200	2	186	600	10	24	16.7	80	3000	2900	3800	4500	7.6	260
p-52	0.64	0.36	0.70	0.50	2800	2	230	530	10	22	17	75	3000	2900	3800	4000	7.6	220
PSnN-5	0.60	0.33	0.68	0.50	1600	1.9	160	450	12	24	15.4	95	3100	2950	3650	4000	7.5	350
PMgN-51	0.64	0.35	0.70	0.52	3800	1.8	270	500	7.6	19.5	18.2	70	3000	2900	3600	3850	7.6	200
P-41	0.58	0.34	0.66	0.48	1050	<0.3	113	260	12	28	12	1000	3475	3300	3900	4200	7.5	320
P-42	0.58	0.34	0.67	0.48	1250	0.3	126	280	11	25	12.5	800	3380	3240	3800	4160	7.5	320
P-43	0.58	0.34	0.68	0.48	1420	0.5	136	300	10.8	24	12.8	600	3360	3200	3750	4150	7.5	320
P-81	0.52	0.30	0.60	0.45	1000	0.5	90	220	11.2	24.8	11.1	800	3500	3400	3900	4560	7.5	300
P-82	0.52	0.28	0.57	0.40	1100	0.5	100	240	11	25	12	1000	3500	3500	3900	4200	7.6	300
P-83	0.49	0.28	0.58	0.42	1200	0.8	90	195	9.2	20	11.1	450	3500	3400	3920	4560	7.5	305
PZT-5H	0.68	0.38	0.76		3200	2	275	620	8.4	20	18	70	2850	2800	3100	3900	7.5	200
PZT-5X	0.70	0.40	0.77		4500	2	300	750	8	17.5	19	65	2850	2800	3100	3850	7.5	180
PCrN-4	0.60	0.35	0.68	0.45	1500	0.5	140	300	10.5	24	13.3	400	3300	3100	3700	4100	7.5	310
PliS-51	0.65	0.38	0.71	0.55	2000	2	200	550	11.4	28	15.9	100	3100	2950	3850	4500	7.5	300
PbaS-4	0.58	0.34	0.70	0.47	1500	0.5	130	350	10.5	25	11.5	400	3400	3200	3700	4250	7.5	300
PbaS-5	0.59	0.34	0.60	0.47	1650	0.5	150	330	10	22	13.5	1800	3400	3200	3700	4200	7.5	300
BaTiO3	0.34	0.196			1550	0.5	60	160	4.4	11	8.4	1300	4800			5350	5.6	110
p-53	0.64				3600	2	220	550	9	21	16	80	2950			3950	7.6	

二、压电材料

3. 压电高分子聚合物

PVDF or PVF₂ 聚偏氟乙烯

- 特点：薄膜型压电材料
高柔顺性、高机械强度、高压电常数
低 Q_m 值、声阻抗率低，可作水听器、
高分辨率窄脉冲换能器、高频超声换能器。



二、压电材料

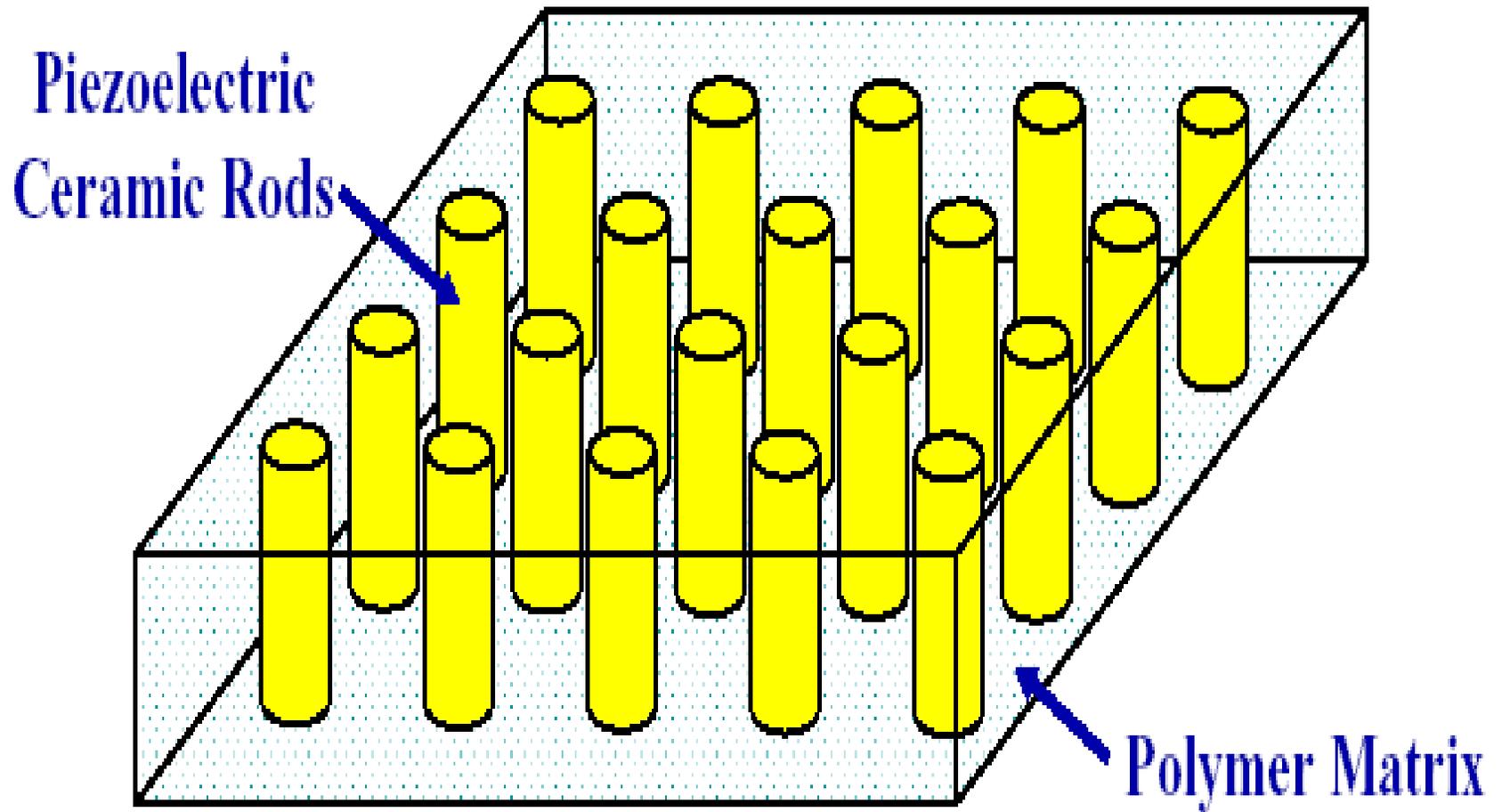
4. 压电复合材料

压电陶瓷+高分子聚合物 = 压电复合材料

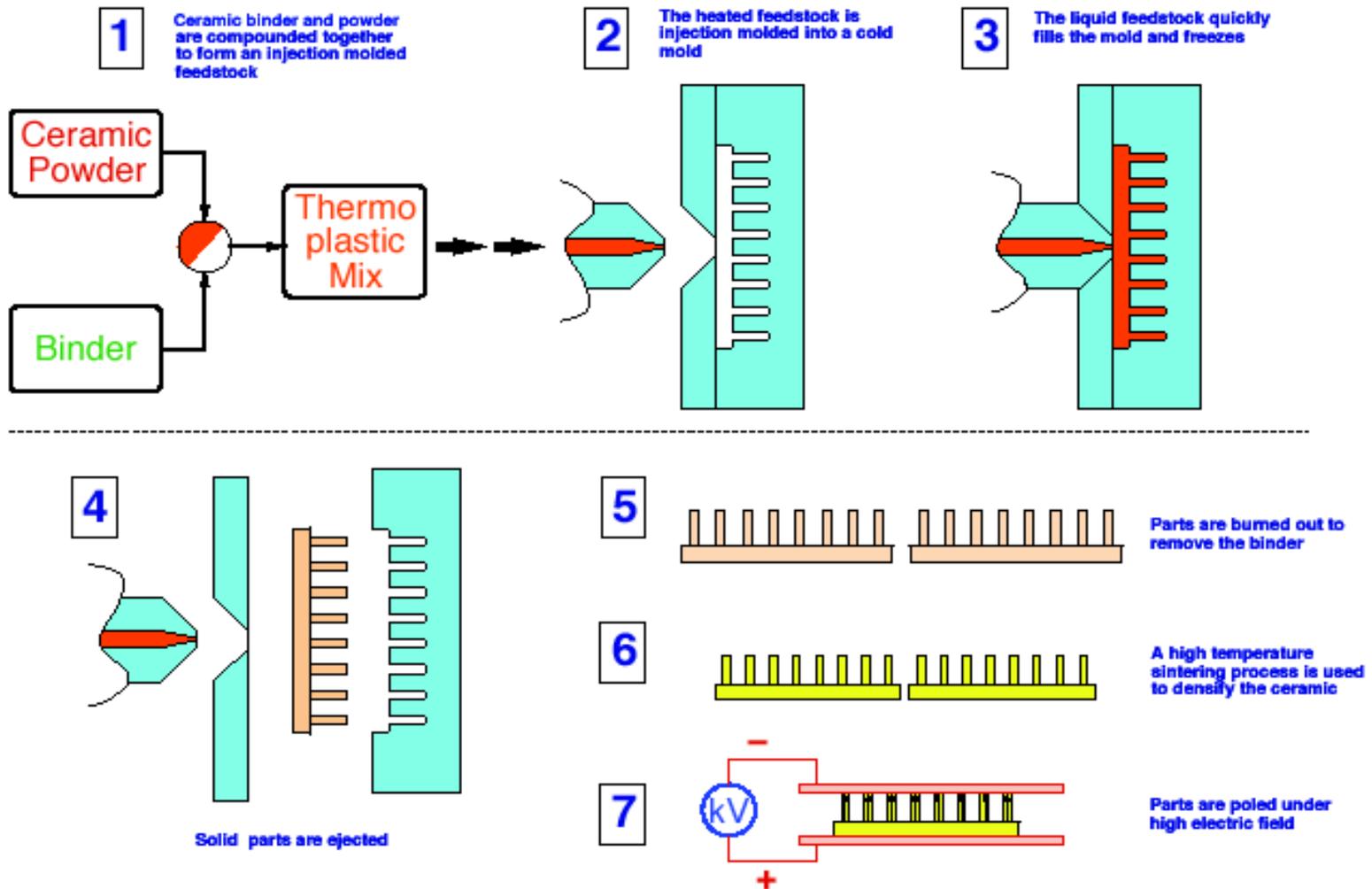
类型：1-3型、2-2型、0-3型、3-1型等

现在的B超探头换能器几乎全是压电复合材料

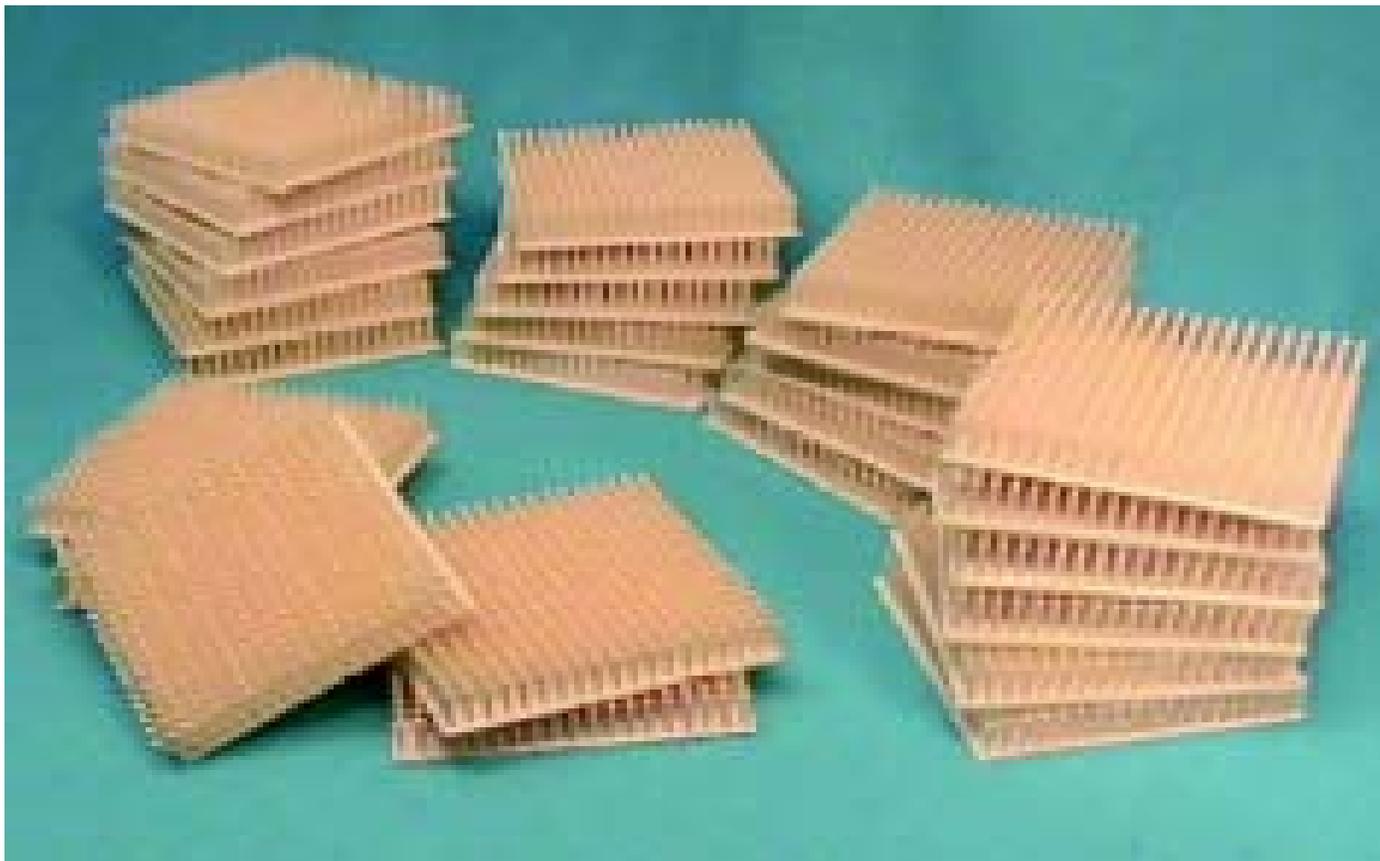
1-3型压电复合材料



1-3型压电复合材料工艺流程



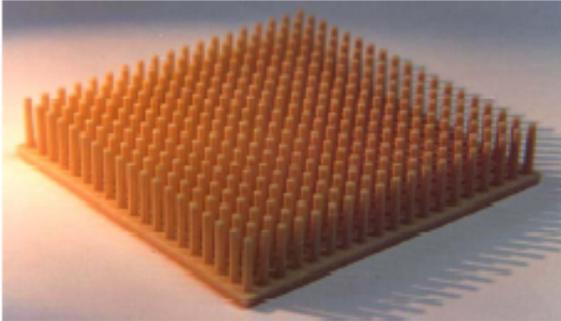
1-3型压电复合材料图示



1-3型压电复合材料

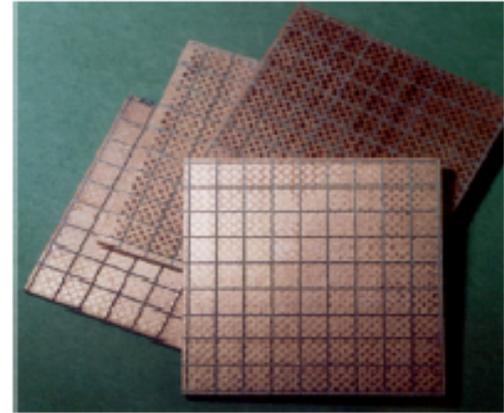
Receive

15 - 25 % Piezoelectric Ceramic



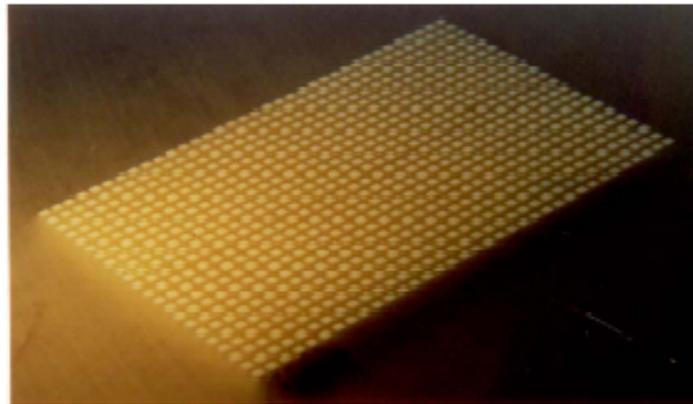
Transmit

>50 % Piezoelectric Ceramic



Transmit/Receive

30 - 50 % Piezoelectric Ceramic



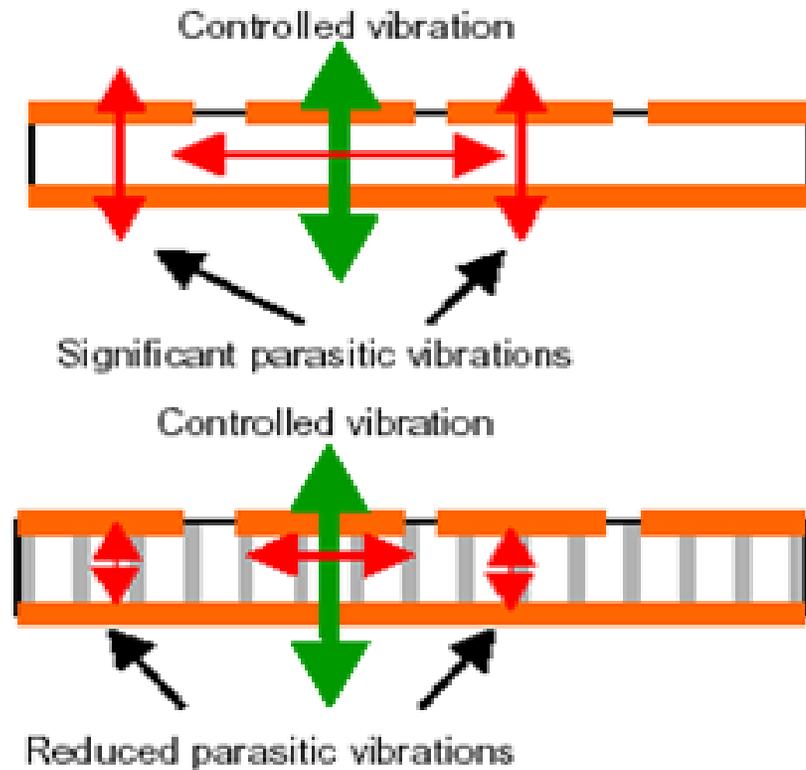
1-3型压电复合材料

特点

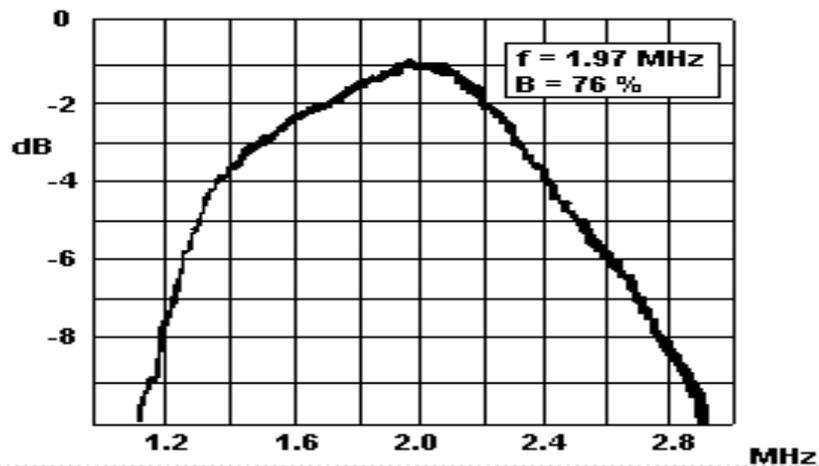
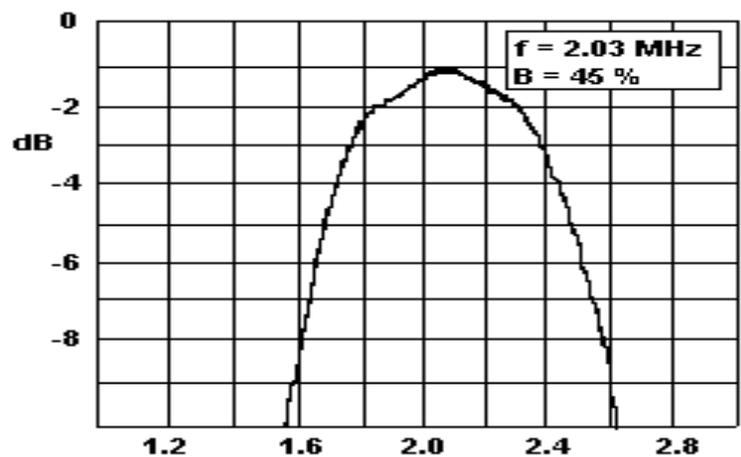
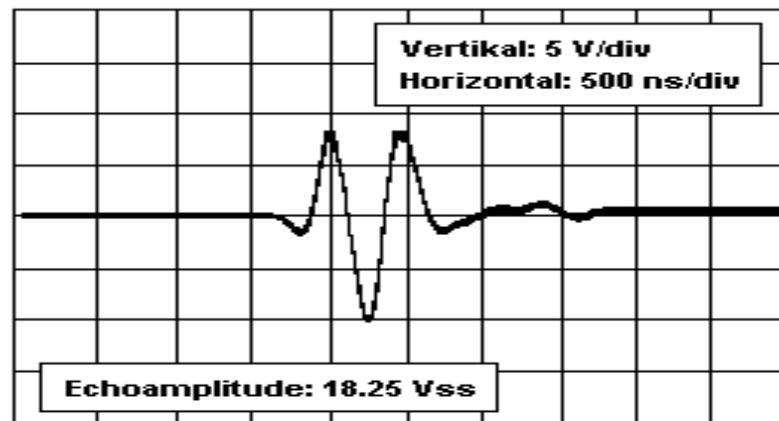
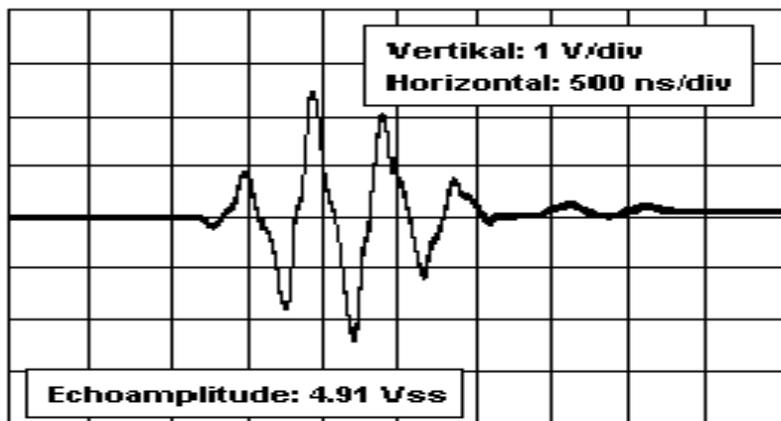
1. 声阻抗低: 约为PZT的 $1/4$, 制作换能器时容易找到相应的吸声被衬材料, 易与人体组织匹配;
2. 低 Q_m 值: 约比PZT低 $1 \sim 2$ 个数量级, 适合做宽带换能器;
3. 低 K_p : 比PZT径向振动模低, 使能量集中于厚度振动, 提高电声转换效率;
4. 柔韧性: 可制作成特定形状满足实际应用;
5. 材料中的PZT相分布的可控性, 换能器设计灵活

压电陶瓷与复合压电陶瓷比较

Figure 6 :
Diagrammatic view of
the reduction of cross
coupling in
piezocomposite 1-3
materials compared
with monolithic
ceramics

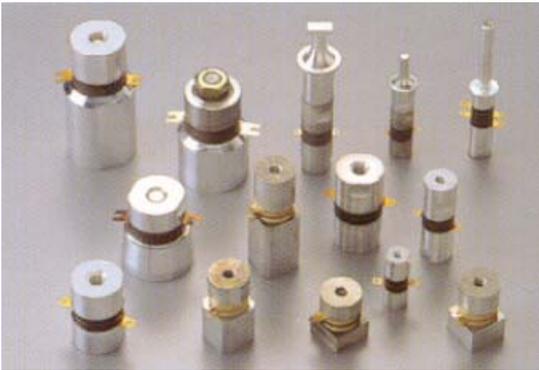


压电陶瓷与复合压电陶瓷



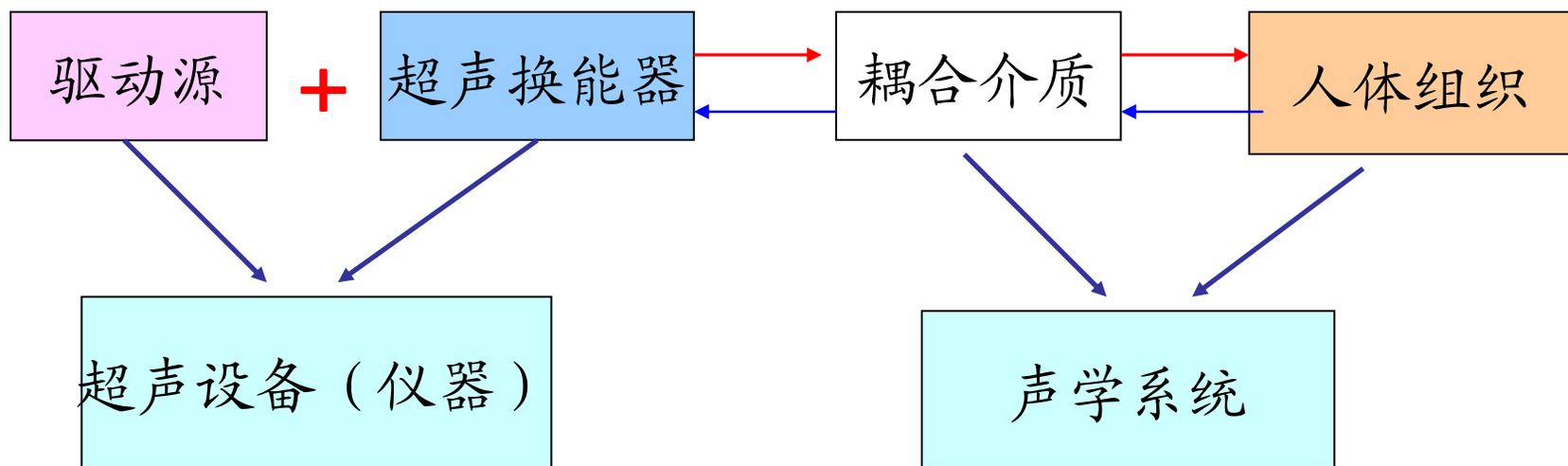
三、治疗超声换能器

各种类型的超声换能器



电能 \rightleftharpoons 机械振动能

换能器的工作原理



换能器的主要性能指标

➤ 工作频率 f

超声换能器工作频率的选择是很重要的，它不仅直接关系到换能器的频率特性和方向性，也影响换能器的发射功率、效率和灵敏度等重要指标。

换能器的工作频率应与整个超声设备的工作频率相一致。通常等于它本身的谐振频率。这样可以获得最佳的工作状态、取得最大的发射功率和效率。

- 带宽：
- 机电转换系数和机电耦合系数
- 换能器的阻抗特性
- 换能器的品质因素：由于换能器是由机械系统和电路系统两大部分组成，所以常用 Q_e 和 Q_m 共同描写换能器的品质因素。
- 方向特性：指向性函数

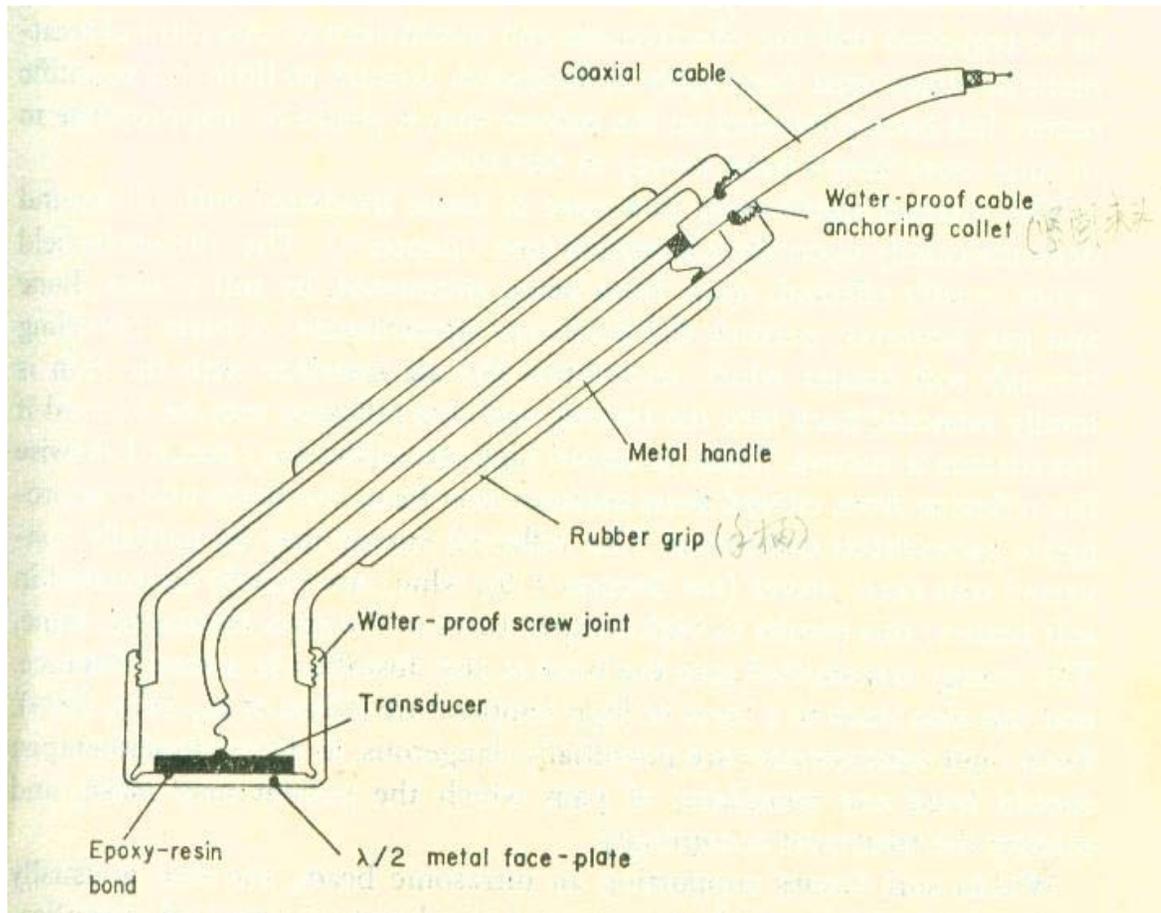
- 换能器的频率特性：换能器的一些重要参数指标随工作频率变化的特性。
- 声场的几何参数：换能器的焦距、焦域尺寸等
- 辐射声功率：换能器在单位时间内向声场介质辐射的声能量。
- 电声效率：换能器辐射声功率与输入电功率的比值

三、治疗超声换能器

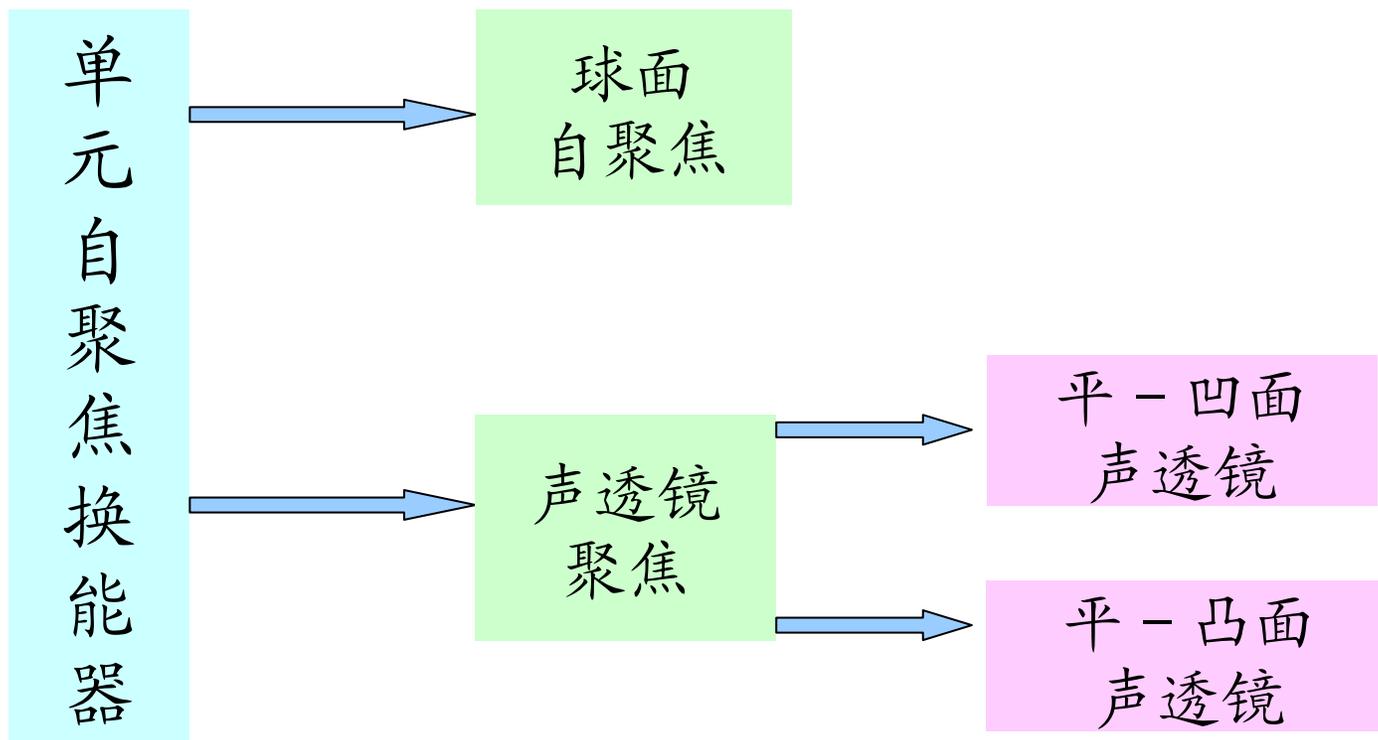
换能器的结构类型

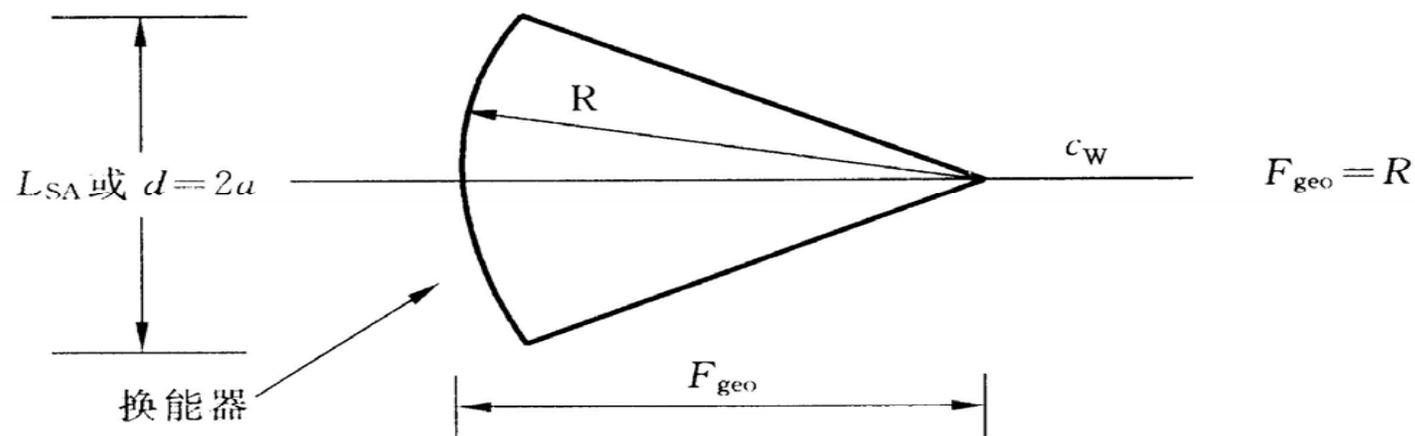
1. 厚度振动模式：超声理疗、热疗、高强
聚焦超声设备， $f = 0.5 \sim 5\text{MHz}$
2. 长度伸缩振动模式：超声手术器械， $f =$
 $20 \sim 100\text{kHz}$

理疗换能器的结构

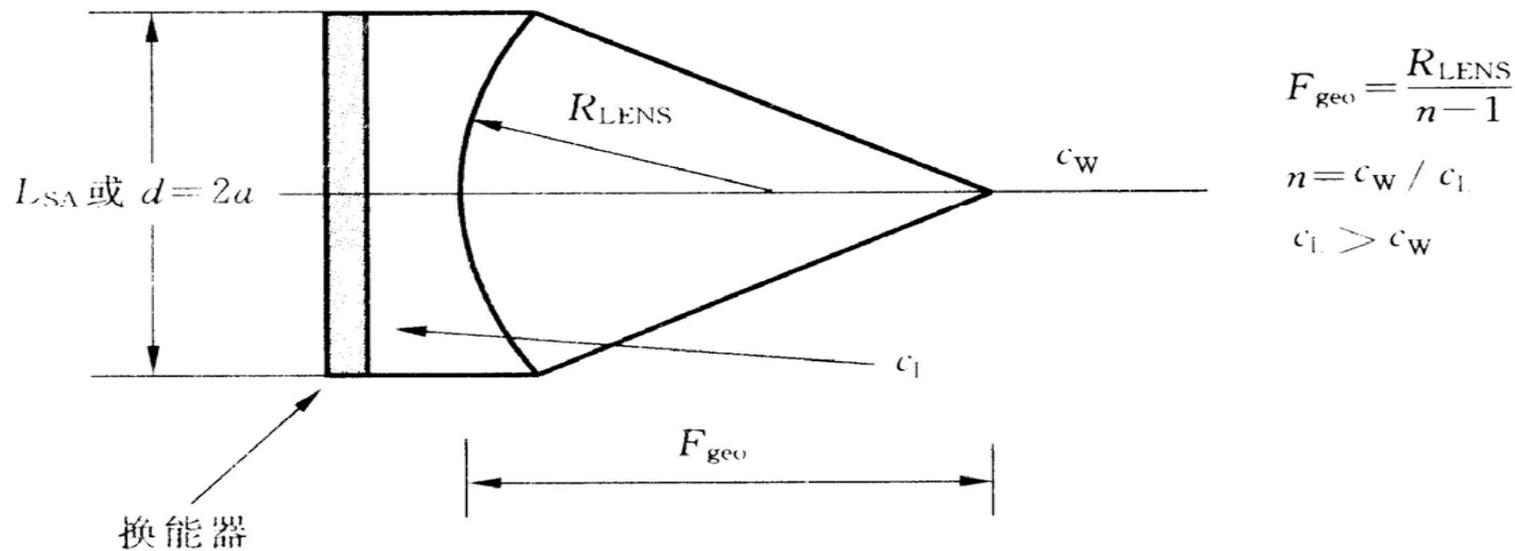


单元聚焦换能器结构

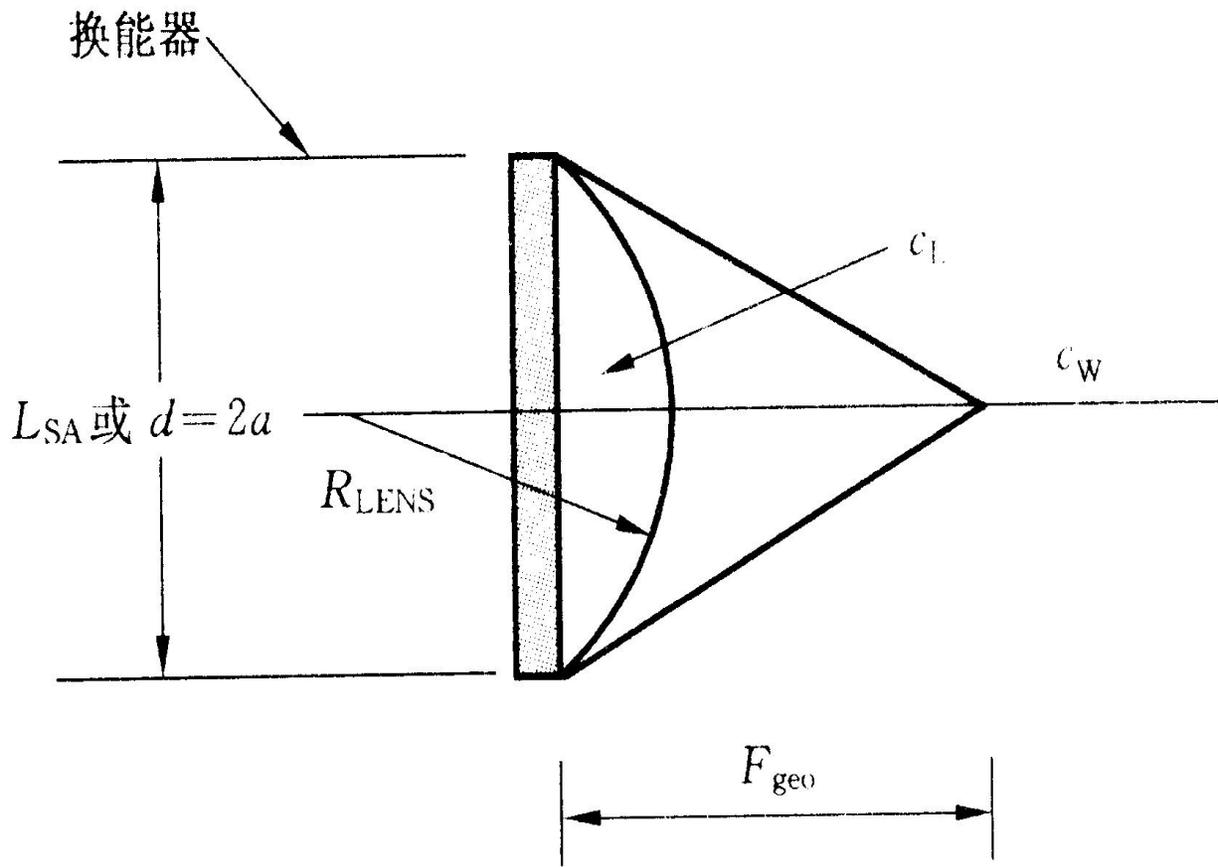




a) 曲率半径为 R 、焦距等于 R 的换能器



b) 平凹透镜换能器



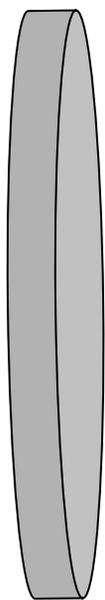
$$F_{geo} = \frac{R_{LENS}}{n-1}$$

$$n = c_W / c_L$$

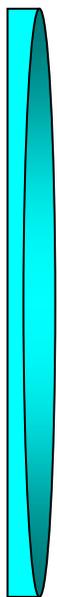
$$c_L < c_W$$

平 - 凸面透镜换能器

2. 透镜式聚焦换能器



压电陶瓷



透镜



2. 透镜式聚焦换能器

- 考虑声阻抗匹配

Transmission	Sound	Density	Absorption	Ma
--------------	-------	---------	------------	----

$$Z_{\text{PZT}} = 30; \quad Z_{\text{Al}} = 16.9; \quad Z_{\text{perspex}} = 3.2;$$

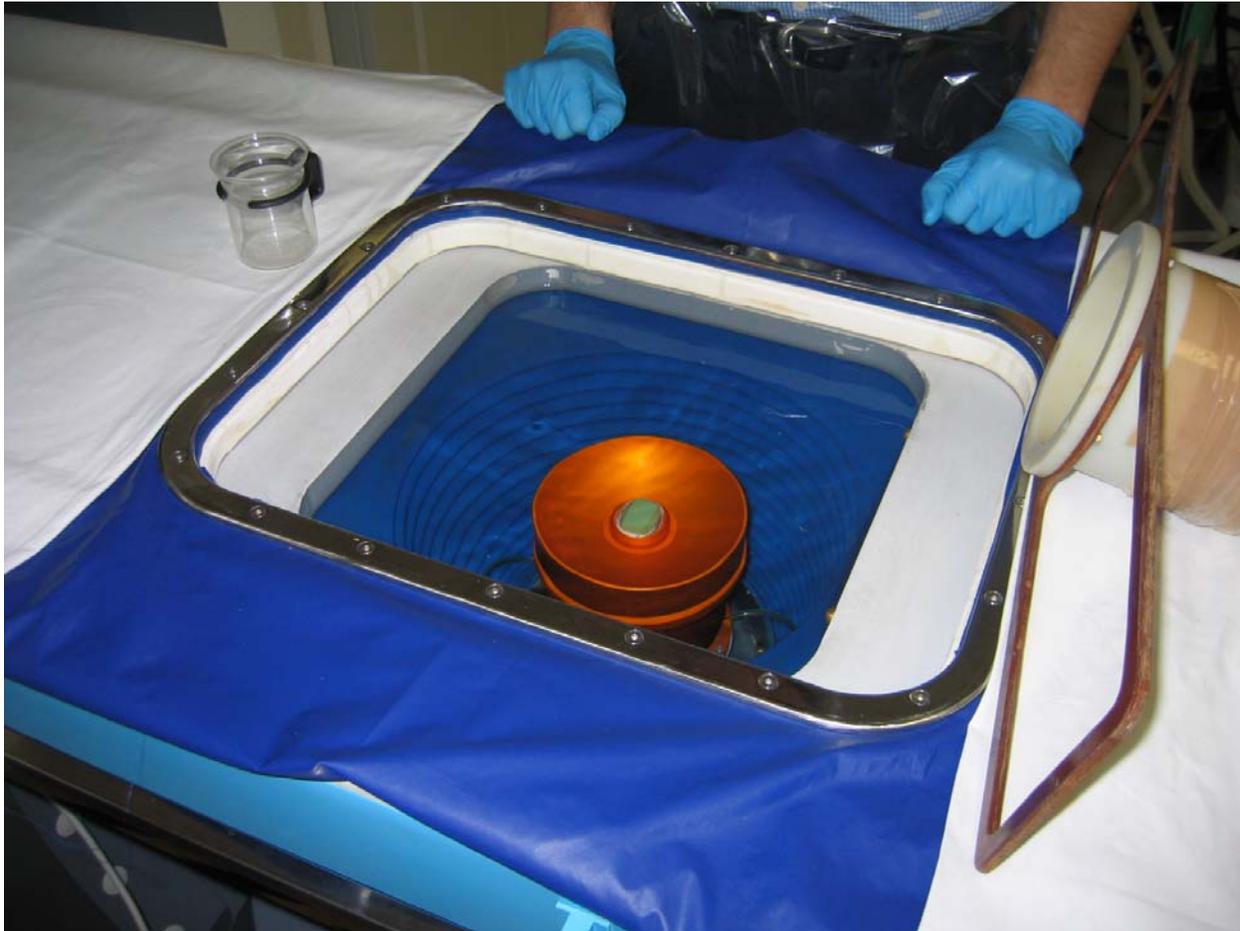
$$Z_{\text{water}} = 1.5; \quad Z_{\text{fat}} = 1.4; \quad Z_{\text{faft tissue}} = 1.6; \quad Z_{\text{bone}} = 7.8$$

Transmissivity τ

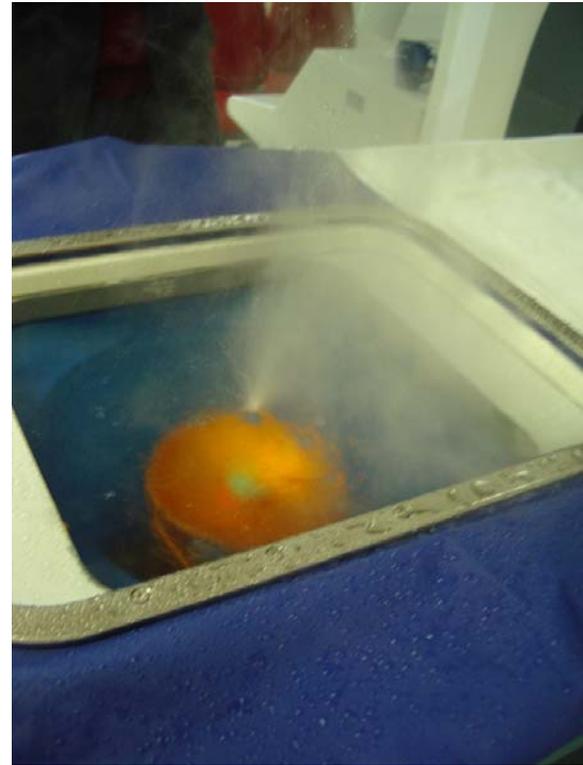
$$\tau = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

Medium 1	Medium 2
PZT	Aluminium
PZT	Perspex

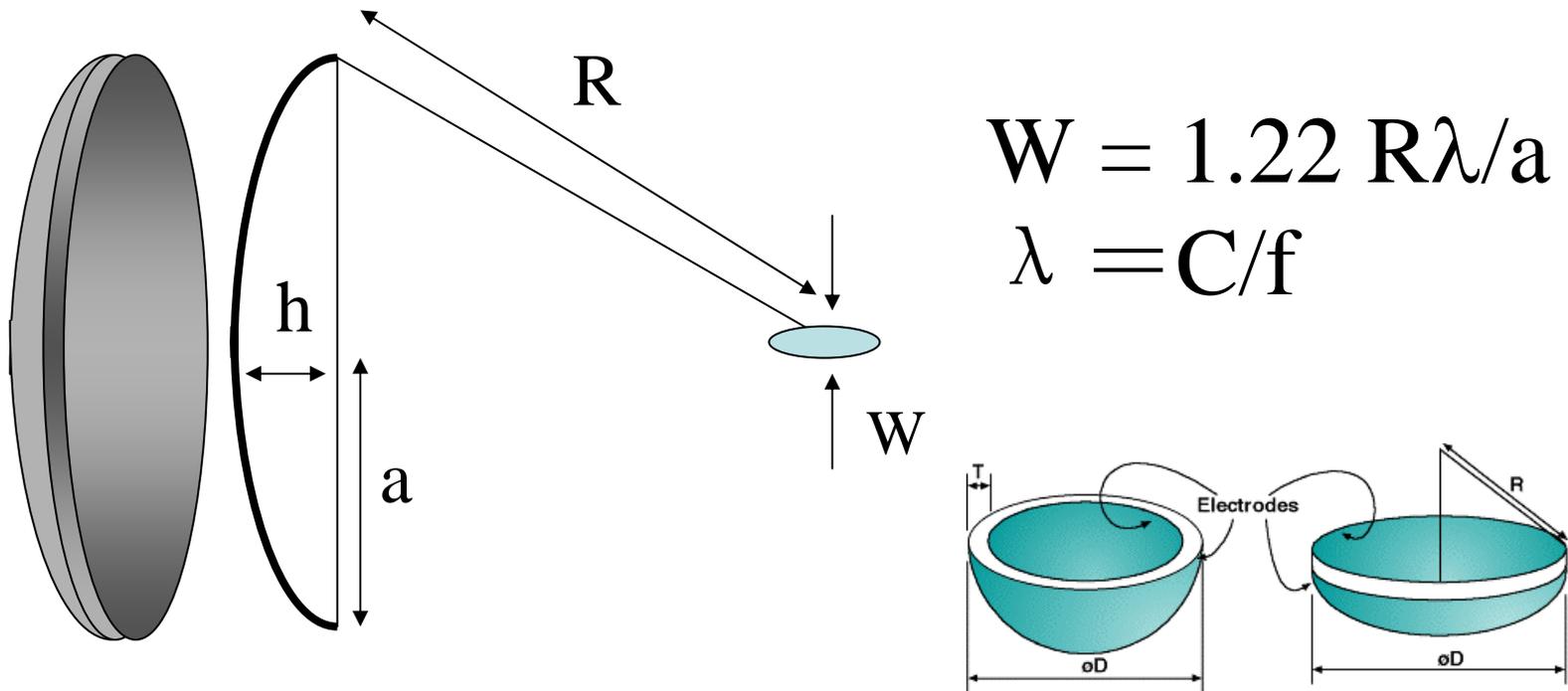
Plane transducers with a lens



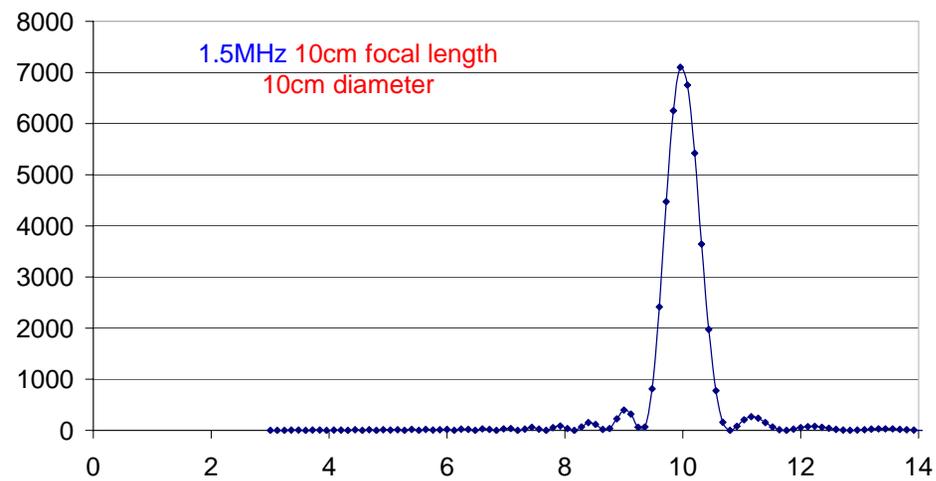
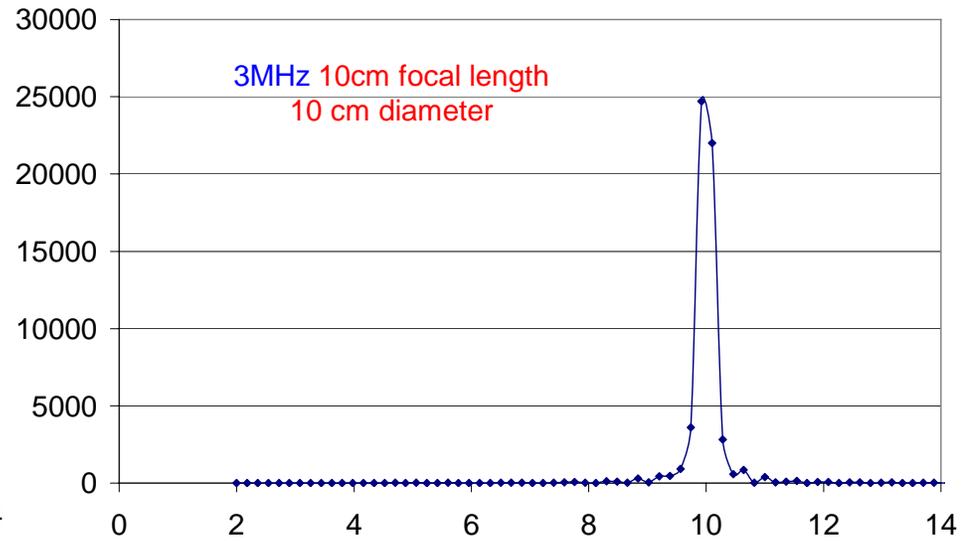
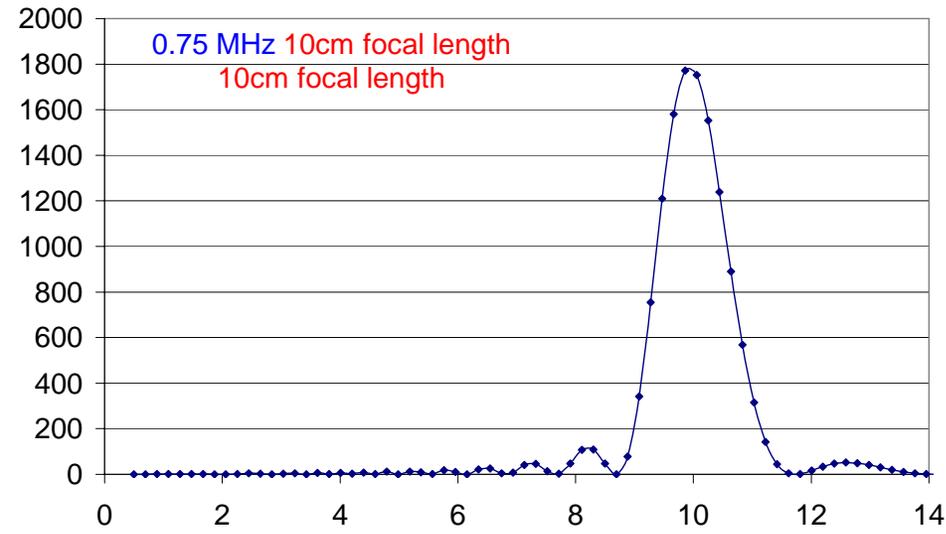
2. 透镜式聚焦换能器



3. 球面聚焦换能器

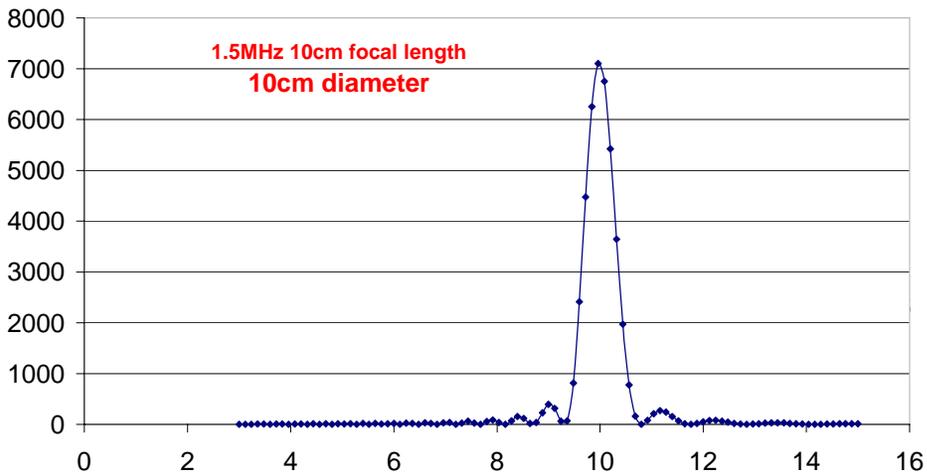
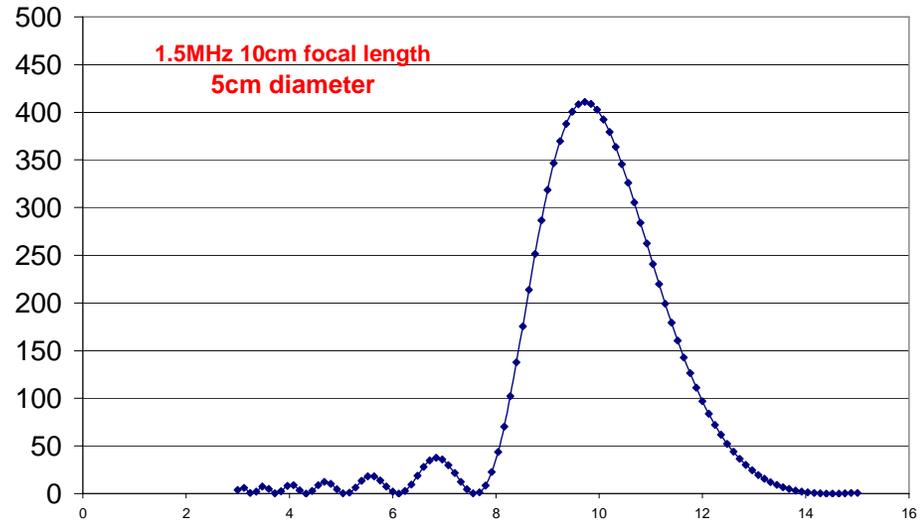
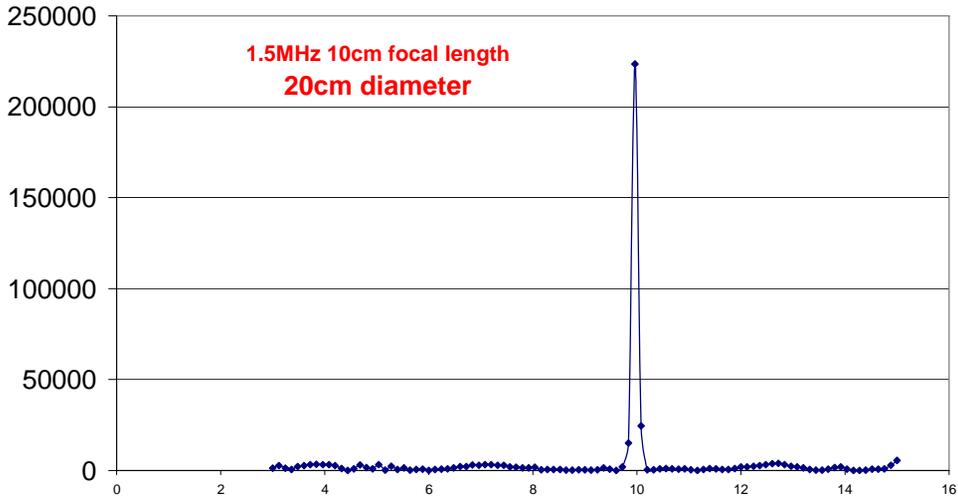


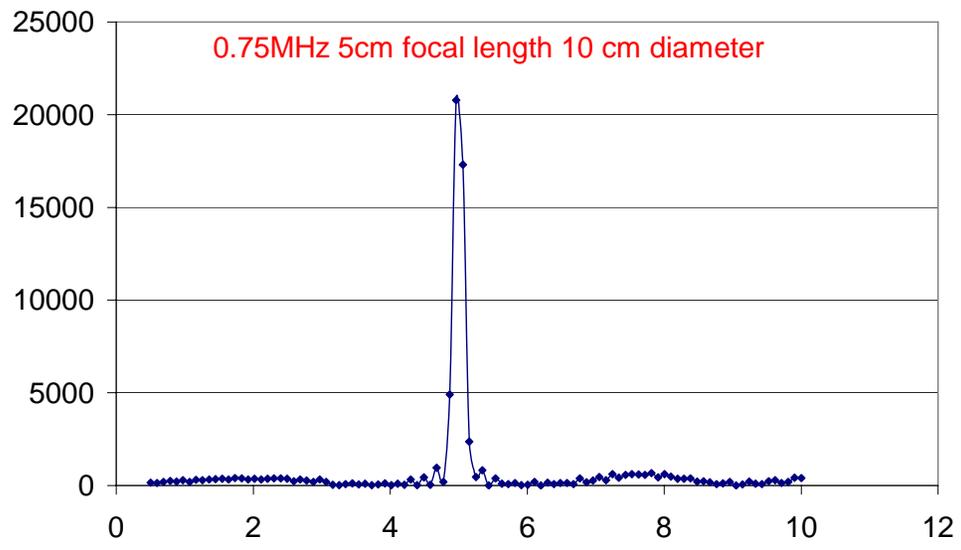
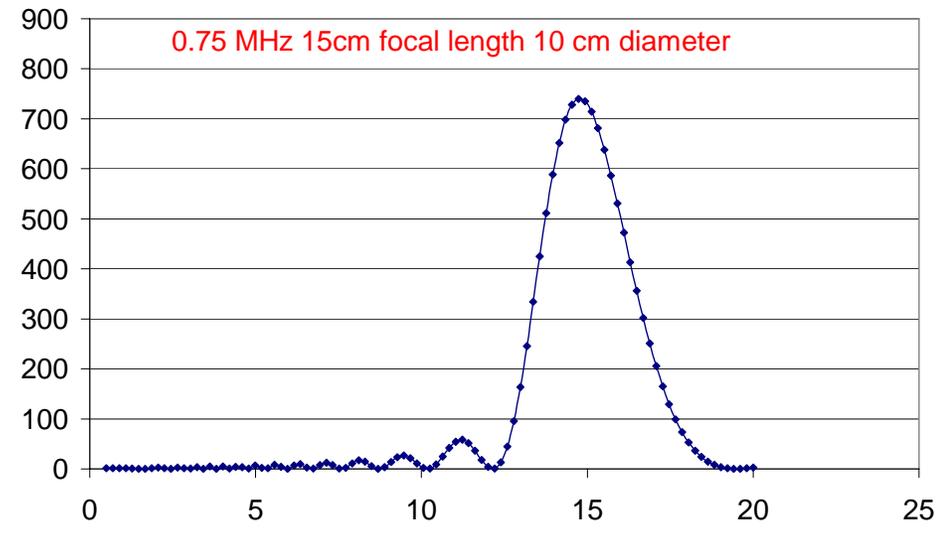
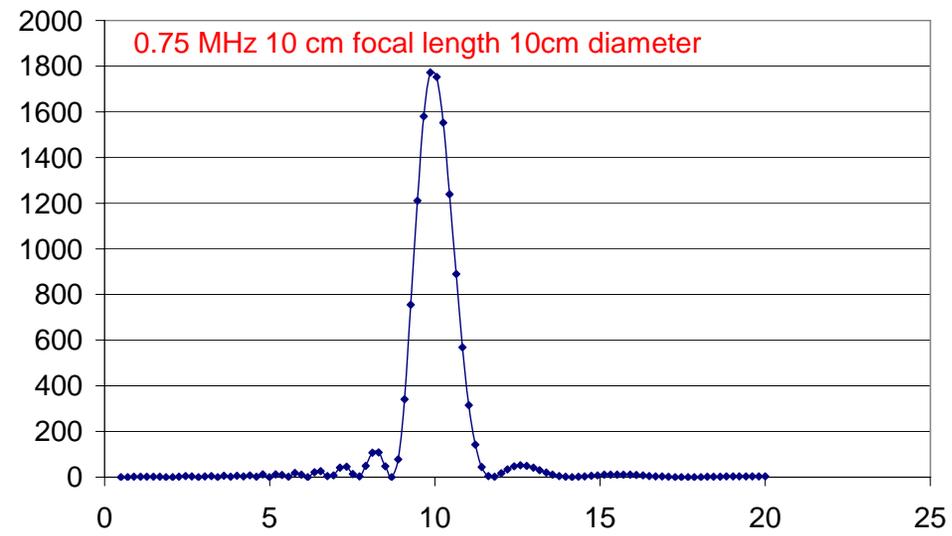
f 相同, R 大, W 大; R 相同, f 高, W 小
 f 和 R 相同, a 大, W 小; f 和 a 相同, R 大, W 大;



Effect of frequency

Effect of transducer diameter





Change in focal length

球面自聚焦换能器

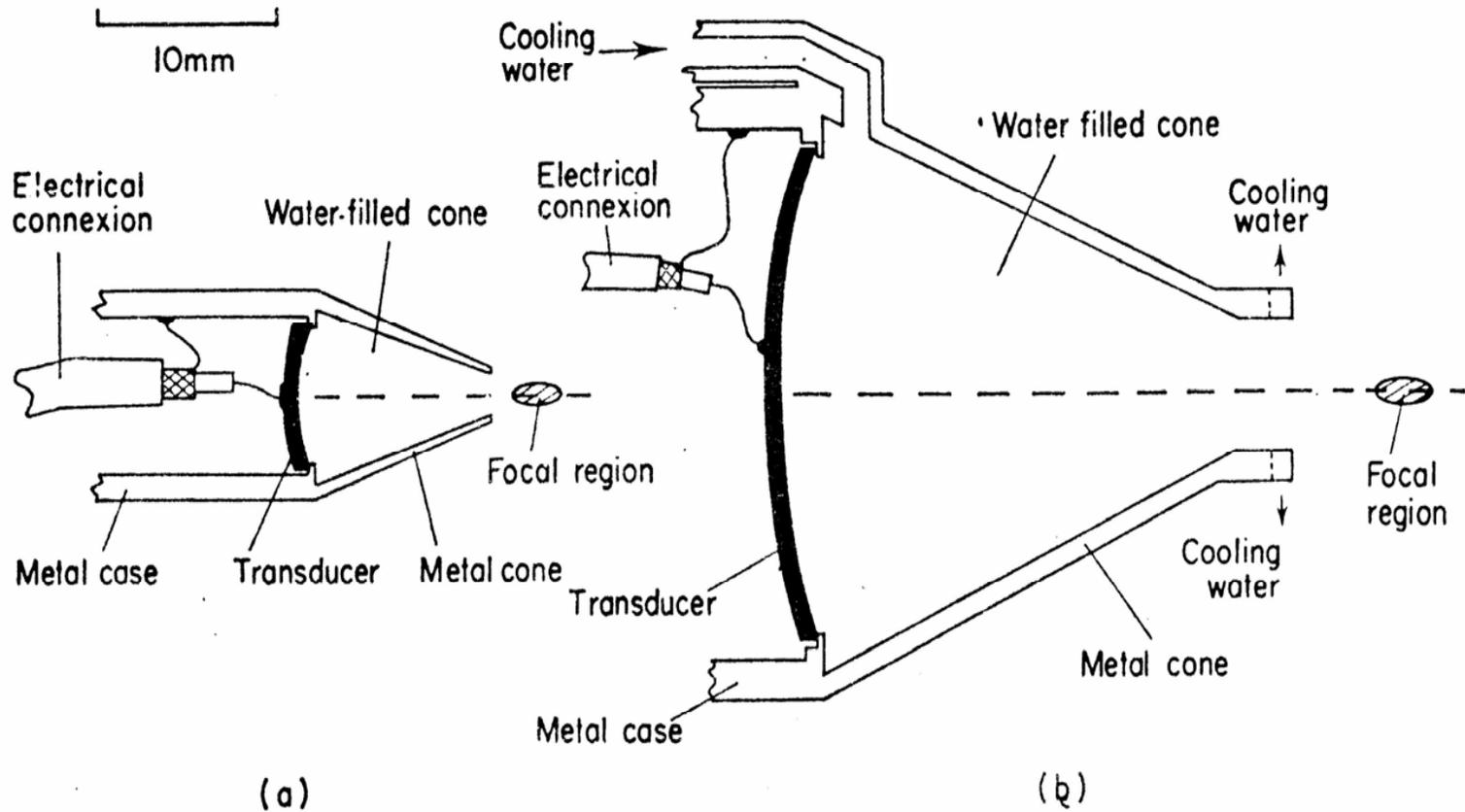
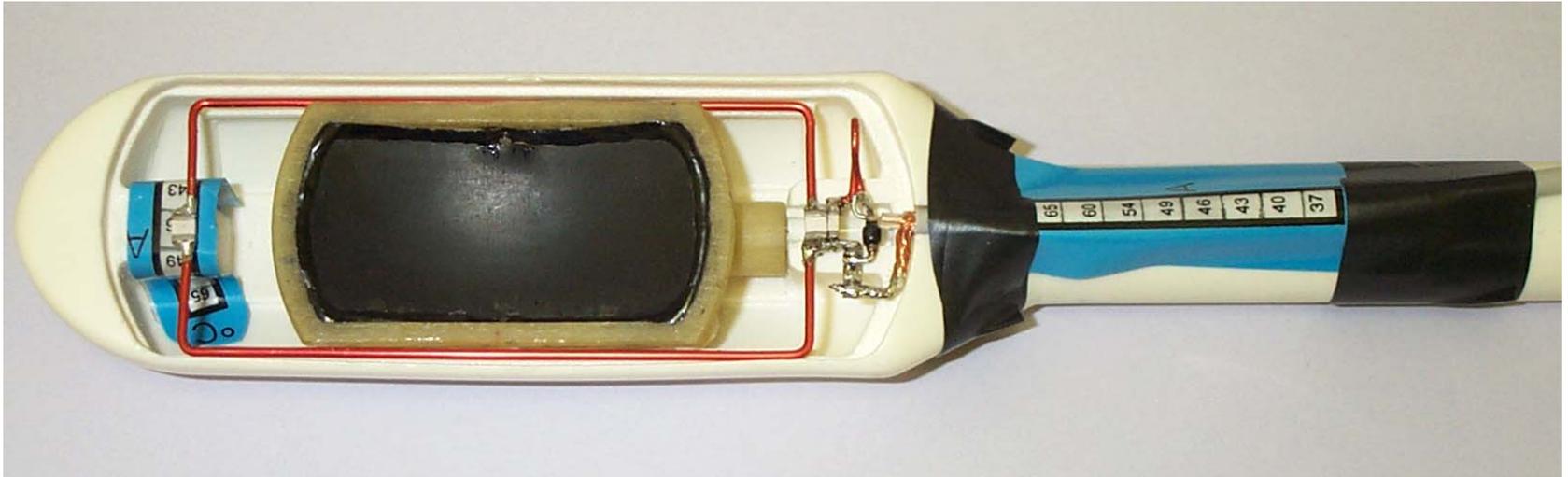


FIG. 3.12 Typical generators using self-focusing transducers. (a) Simple uncooled arrangement for operation at 3 MHz (after Kossoff, 1964); (b) 2 MHz system with water cooling.

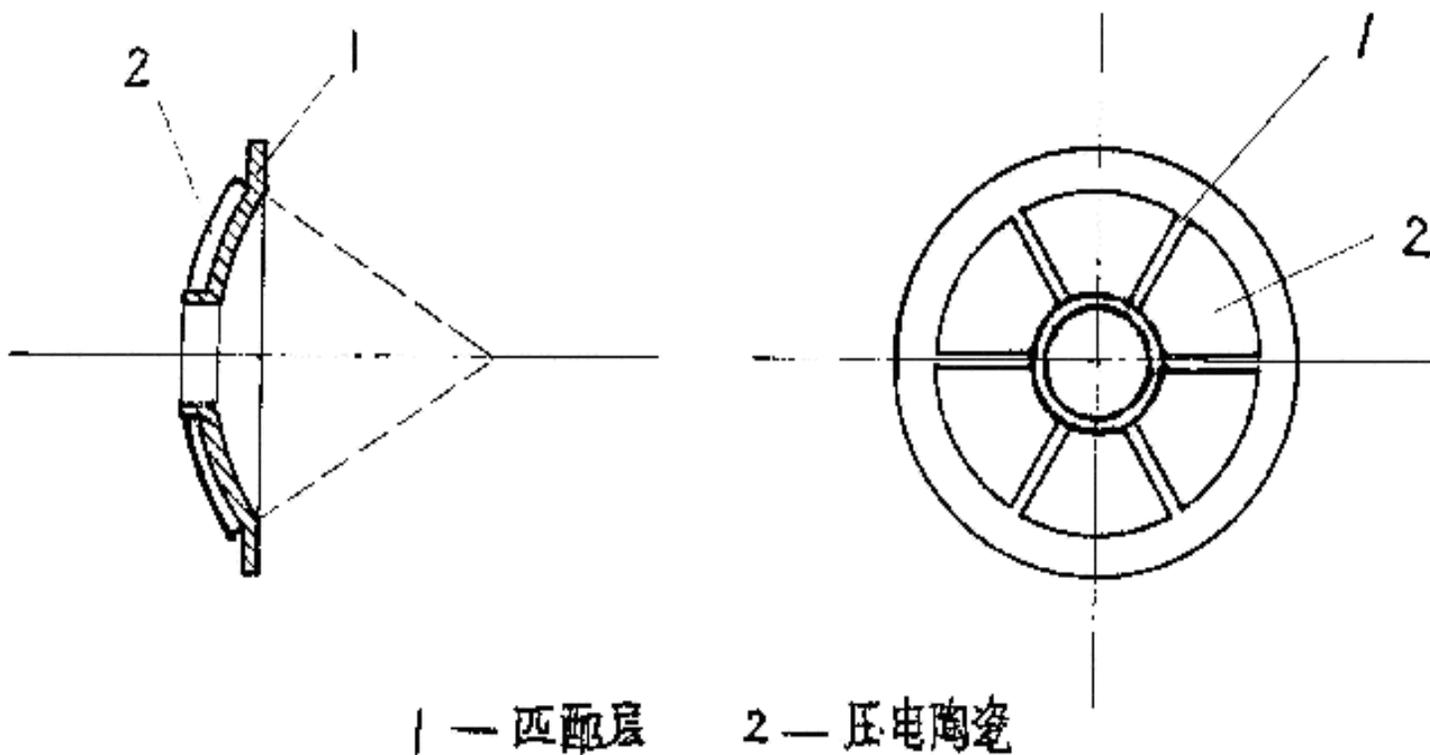
Truncated bowls



单元聚焦换能器的使用

- 球面自聚焦换能器：焦域可设计，转换效率高，大功率使用；但制造工艺复杂，大尺寸不易加工，且易脆。
- 声透镜：要考虑透镜材料性能（阻抗匹配、衰减、耐温和变形、粘接剂等因素），适用于中小功率。

聚焦换能器阵列的结构



4. 多阵元组合换能器



Hemispherical Bowls used for Brain HIFU by Boston group

4. 组合换能器

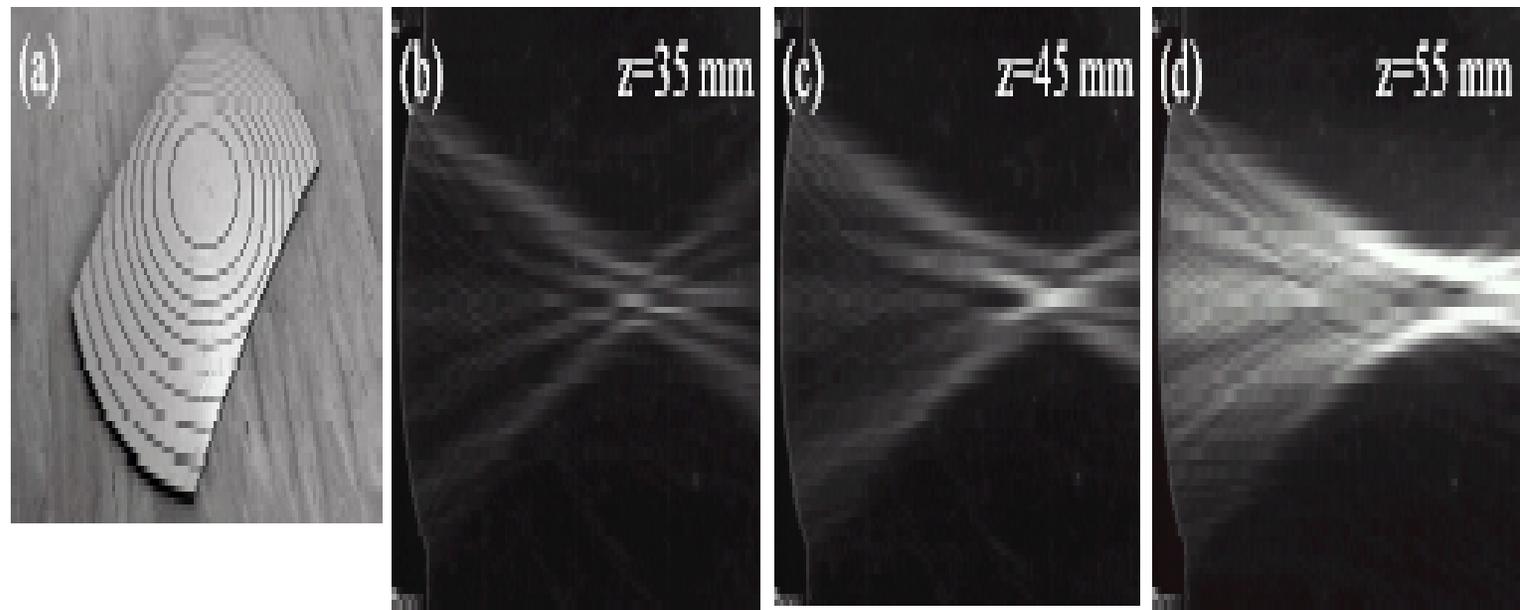


FIGURE 1. (a) 9-Ring Annular Array Crystal, and (b-d) Qualitative Evaluation of Focusing Ability of Array using Schlieren Imaging

纹影法

4. 组合换能器

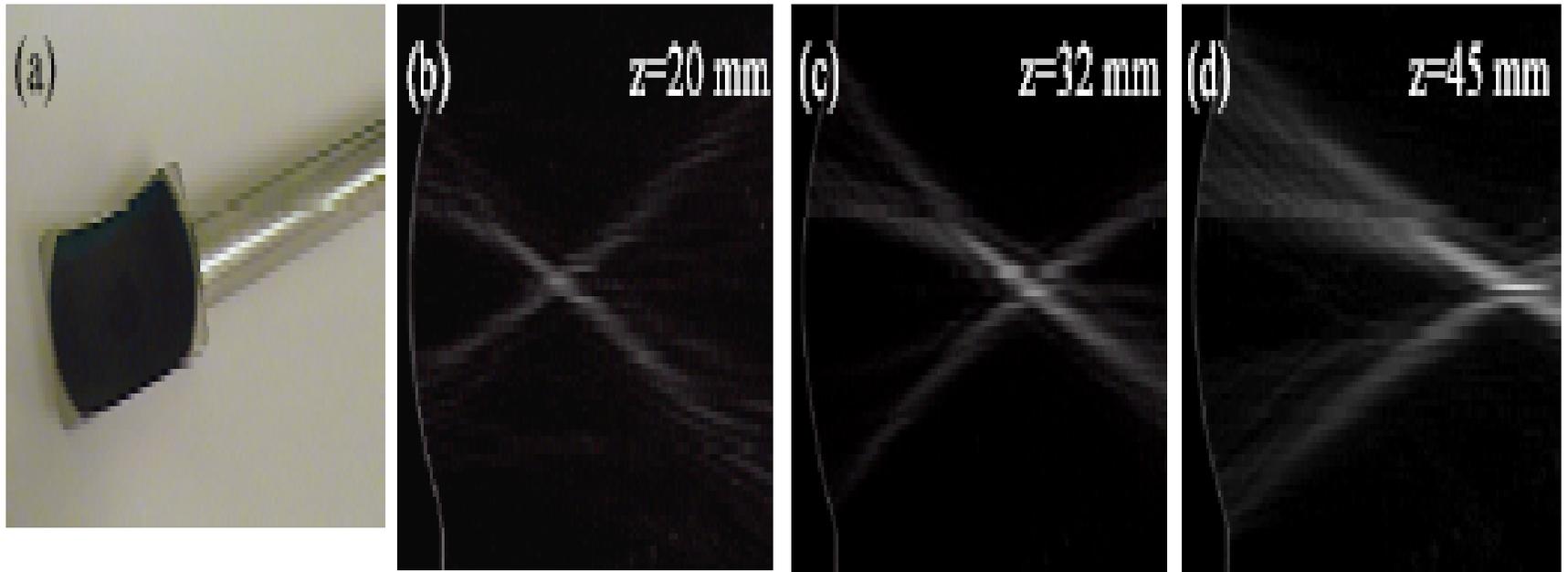


FIGURE 2. (a) 17-Ring Annular Array Transducer Assembly, and (b-d) Qualitative Evaluation of Focusing Ability of Array using Schlieren Imaging.

4. 组合换能器

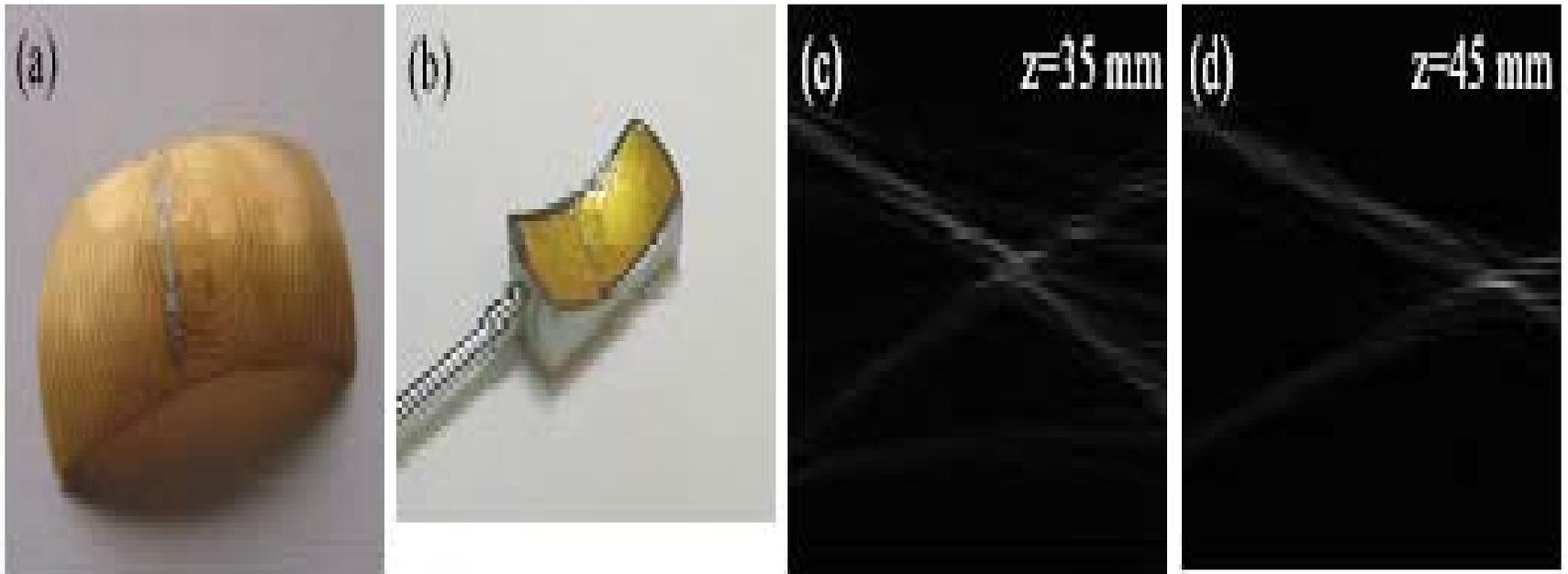


FIGURE 3. (a) 20-Ring Annular Array Crystal, (b) Transducer Assembly, and (c-d) Qualitative Evaluation of Focusing Ability of Array using Schlieren Imaging.

4. 组合换能器



128



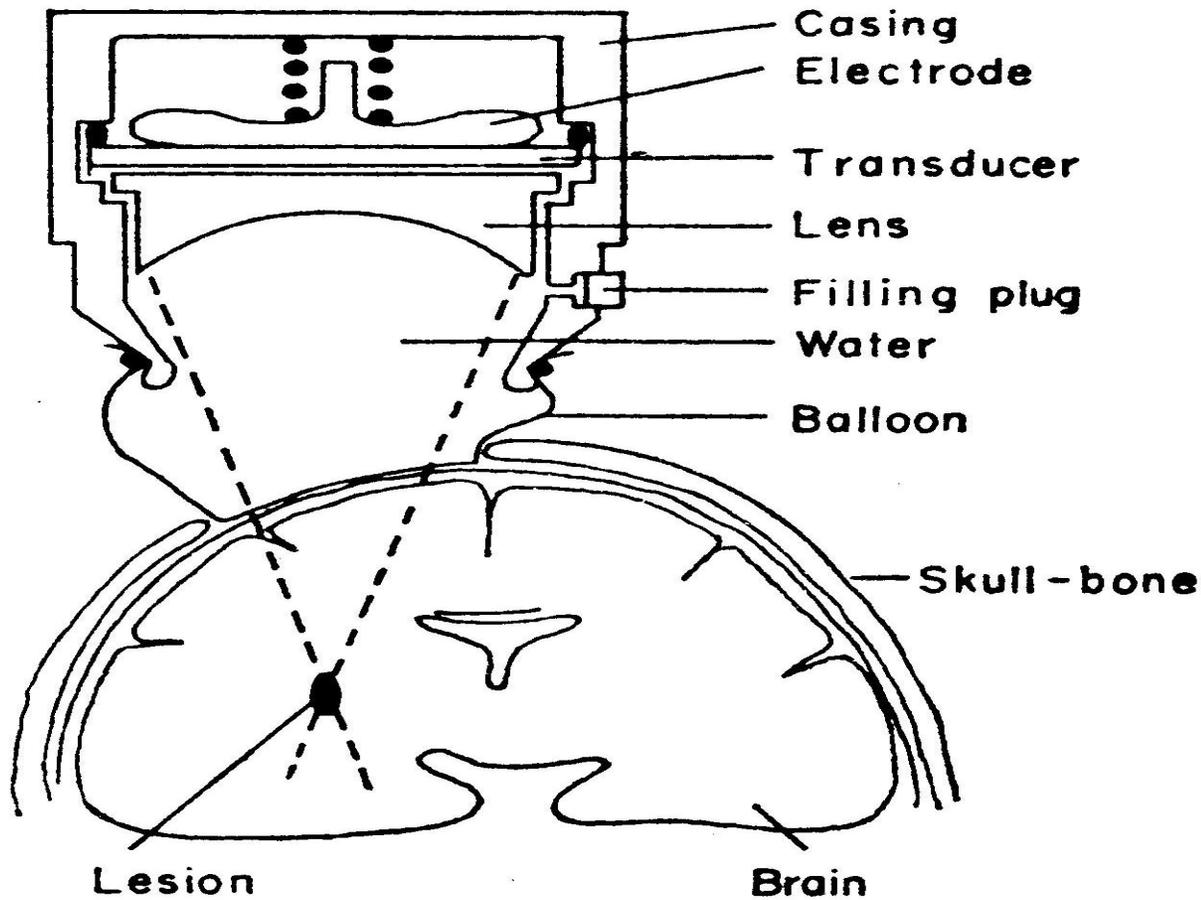
Arc 73 degr.



Arc 29 degr.



Fig.5 : 104 elements high power MRI compatible transducers



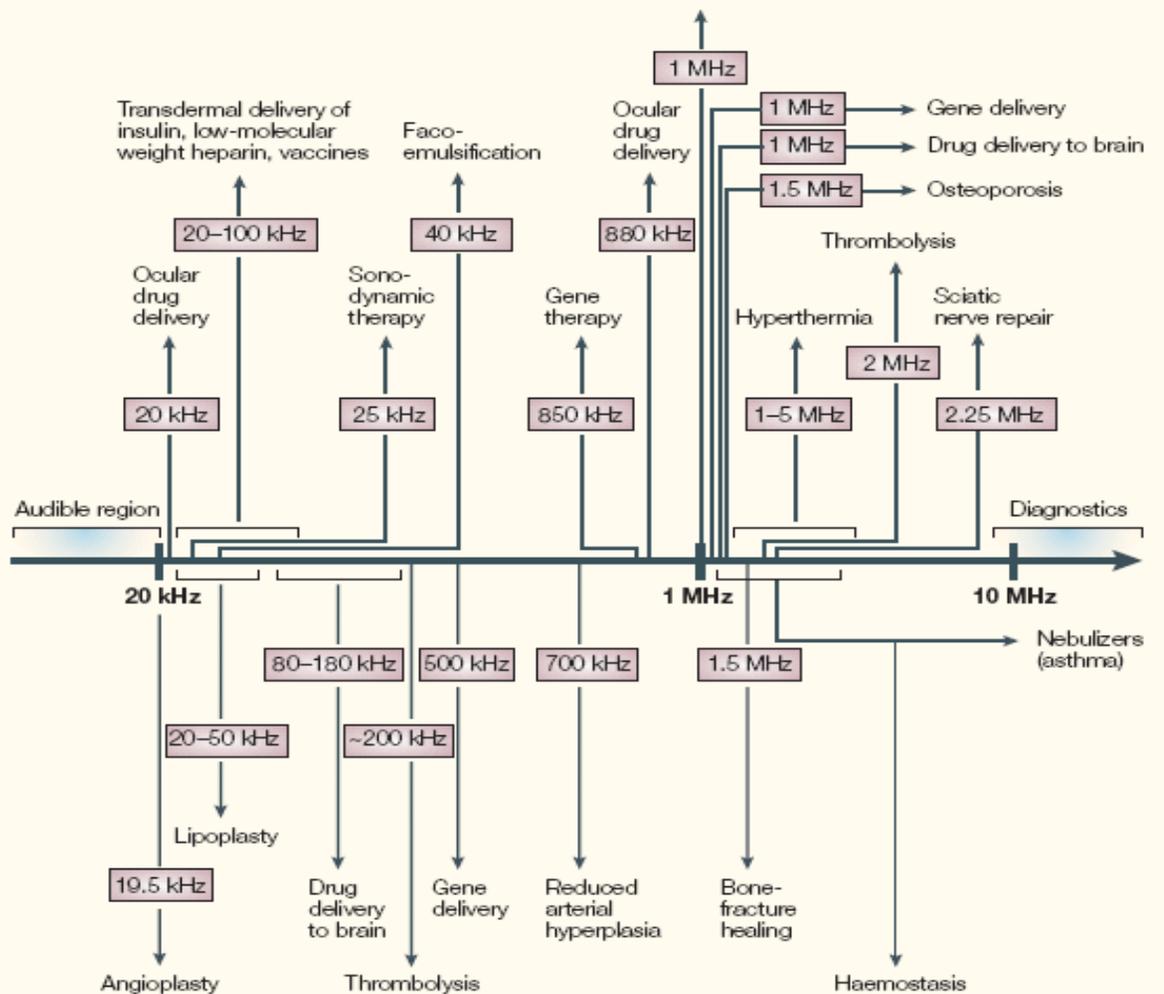
平一凹面声透镜与厚度振动换能器结合用于治疗
 脑部疾病的动物试验的聚焦换能器应用实例

几类聚焦超声换能器比较

换能器类型		优点	缺点
单元换能器	透镜	制造、控制易实现，技术成熟	效率低、易变形
	自聚焦	容易实现理想焦域	成本高、工艺难，焦距不可调
多阵元换能器	纯多阵元	转换效率高	工艺复杂、压电片和多路功放要求高
	相控	焦距、焦点形状可控，效率高	开发难度大、技术尚不成熟

超声无创治疗广阔的应用范围

市场潜力超过1000亿美元



治疗超声

- 血管成形术
- 超声去脂
- 眼药物传送
- 经皮药物传送
- 声动力治疗
- 药物传送到大脑
- 溶栓
- 乳化
- 基因传送
- 基因治疗
- 降低动脉增生
- 骨折愈合
- 热疗
- 热切除(恶性肿瘤,良性肿瘤,非肿瘤性疾病)
- 坐骨神经修复
- 止血
- 超声雾化(哮喘)
- 子宫颈炎
- 外阴疾病
- 过敏性鼻炎
- 其他...

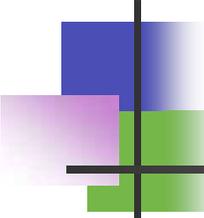
小 结

- 压电效应：正、逆压电效应
- 压电材料：
单晶、压电陶瓷、PVDF、压电复合陶瓷四类
- 几类治疗超声换能器：
平面、透镜、聚焦、组合换能器
- 医学超声换能器的检测方法：
辐射压力法、水听器、激光、体模

§ 3.4、3.5 and § 8.4
Measurement of Acoustic Power and
Acoustic Field of Therapeutical Ultrasound
治疗超声的声功率和声场特性测量

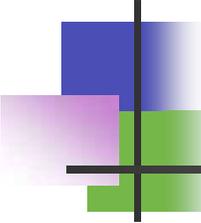
李发琪

重庆医科大学生物医学工程系



教学目的及要求

1. 掌握声功率测量原理与方法、声场测量方法、HIFU声场特性；
2. 熟悉描述声场特性的重要参数（名词术语）；
3. 了解其他测量声功率的方法、电声参数测量方法。



主要教学内容

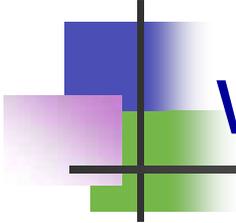
3.4 治疗超声的声输出、声场特性和换能器电声参数的测量（P70）；

3.5 超声治疗系统的声场特性测量和标准化（P81）；

8.4 HIFU 辐照参数及其测量（P188）

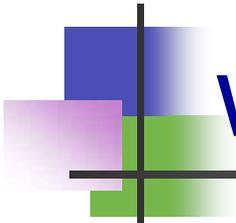
8.4.1 声功率的测量

8.4.2 声场特性描述



What is calibration ?

Quantitative & Qualitative
characterisation
of the
acoustic field



Why calibrate ?

Clinical Safety:

Select treatment output

Limit exposure of sensitive sites

Clinical efficacy comparison:

between patients (repeatability)

between different equipment types

3.4.1 治疗超声的特性参数

□ 声输出

- 声功率、声工作频率、换能器表面平均声强、最大声强、声压最大值、声辐射力

□ 声场特征

- 声压或声强的空间分布、聚焦几何参数（焦域尺寸、焦距）、聚焦增益、指向性图案、声束宽度、有效孔径、非线性畸变系数

□ 换能器

→ 电声参数

发射特性：辐射电导、电声效率、自由场发射响应

接收特性：自由场接收灵敏度

收发特性：综合灵敏度(脉冲回波灵敏度)

- 电参数：换能器的阻抗(导纳) - 频率特性、谐振频率

- 几何参数：换能器的形状、尺寸、电缆长度

§ 3.4.2 和 8.4.1

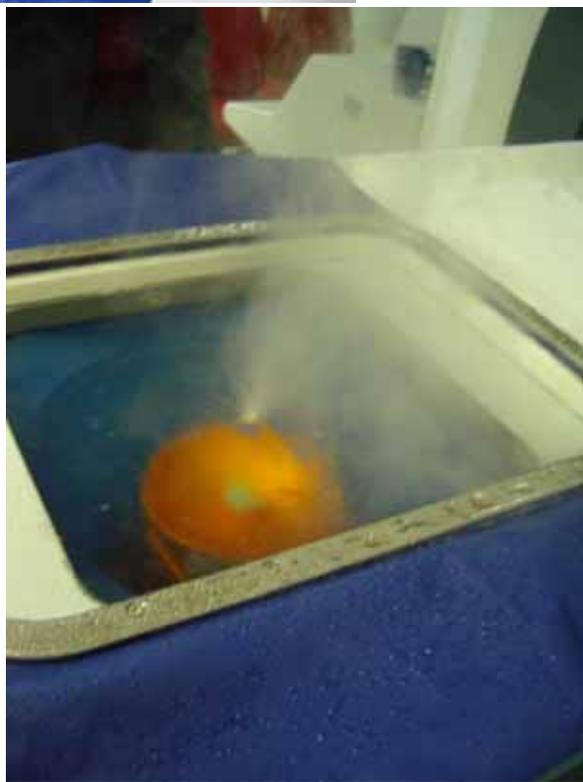
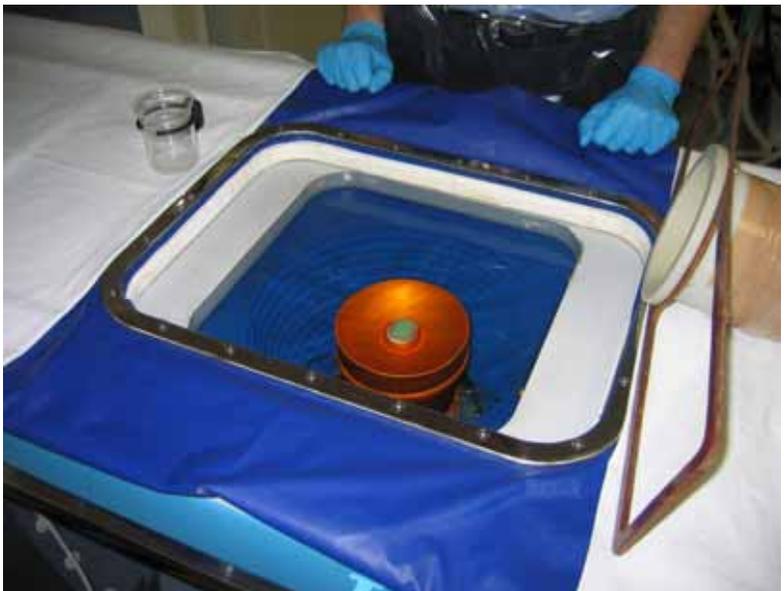
声功率测量——辐射力天平法 (Radiation Force Balances , RFB)

□ 物理基础

→ 自由场中声波行波作用于障碍物上的朗之万辐射力 (声辐射压力) 与声源的声功率成正比。

□ 朗之万辐射力 (P70)、声辐射压力 (P110)

📖 当连续声波入射到靶面上时，会对靶在传播方向上产生一个不随时间变化的辐射压力。当靶被系于悬线上，而悬线另一端与一敏感的力平衡元件（如微量电子天平等）相连接时，即可直接测出这个辐射压力的数值。（P113）



声辐射压力

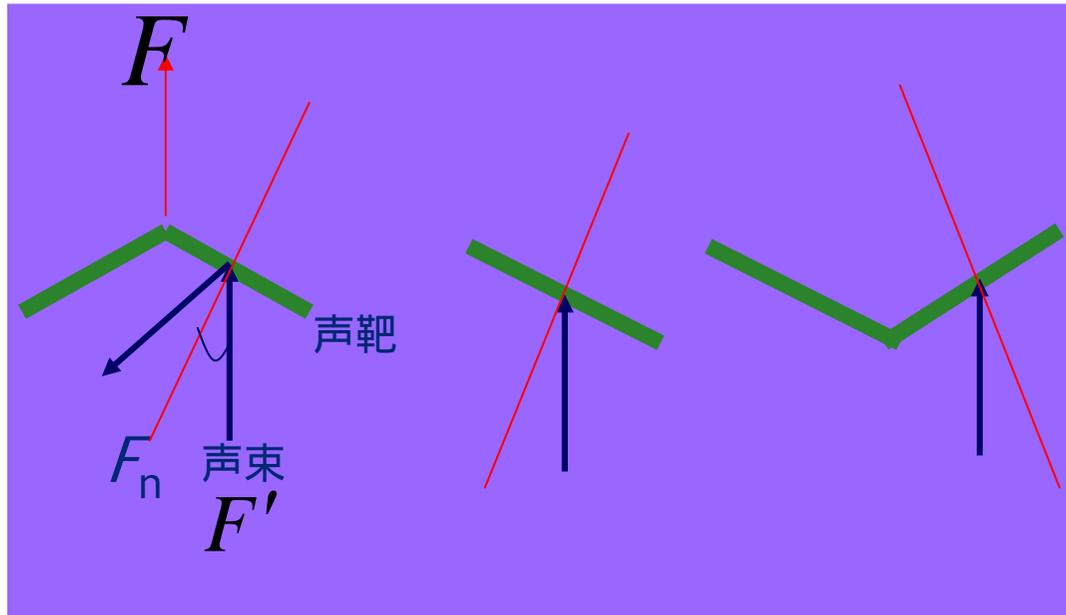
- 对于理想的声吸收靶，当声波垂直入射时，由式（4-80）并 $r_1=0$ （全吸收），得辐射压力 F ：

$$F = \frac{\overline{W}}{c_0}$$

式中 \overline{W} 为靶所接收到的时间平均声功率， c_0 为声传播速度。在水中时， $c_0 = 1500 \text{ m/s}$ ，则可以算得：1mW功率的超声波对全吸收靶产生 $67 \mu \text{g}$ 的辐射压力。

$$P = Fc \quad (\text{P71})$$

→ 采用全反射靶 ($r_1=1$)，如果此时的靶面与声头辐射面平行而置，那么在声头与靶面之间将形成驻波，影响测量。为此常使声束与靶面垂线之间呈一定角度 θ ，则



$$F_n = 2F' \cos \theta$$

$$F = F_n \cos \theta$$

$$F' = \frac{F}{2 \cos^2 \theta}$$

$$\bar{W} = F' c_0 = \frac{F c_0}{2 \cos^2 \theta}$$

$$F = \frac{2\bar{W}}{c_0} \cos^2 \theta$$

$$P = \frac{F c}{2 \cos^2 \theta}$$

显然，当 $\theta = 45^\circ$ 时，两种方式所得公式相同，即灵敏度仍为 $67 \mu\text{g} / \text{mW}$ 。

□ 对平面行波

→ 全吸收靶 $P = Fc$

→ 圆锥形全反射靶 $P = Fc / 2 \cos^2 \theta$

□ 对中间有开孔的球面聚焦换能器

$$P = \frac{2Fc}{\cos \alpha_m + \cos \alpha_{mi}}$$

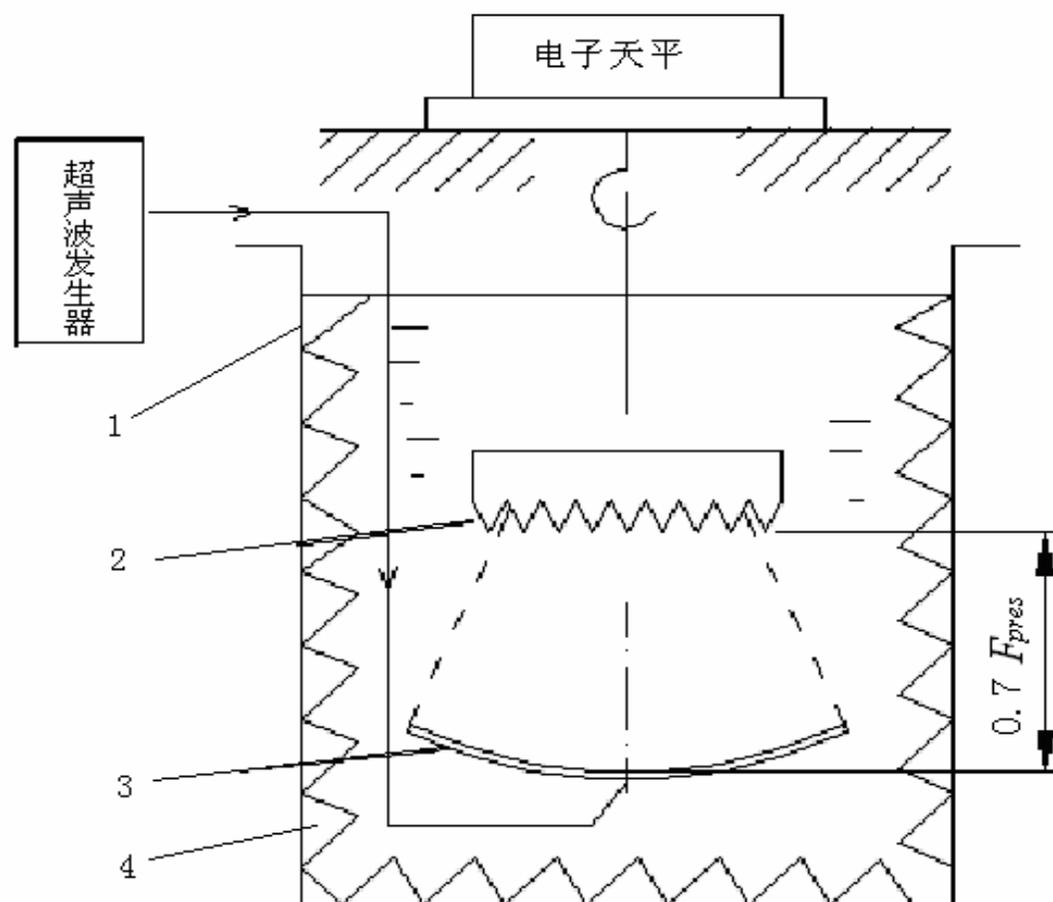
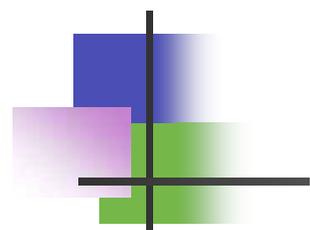
半开口夹角 半开孔夹角（无开孔时为0）

- ⇒ Measure acoustic power of HIFU using radiation force method in absorbing target

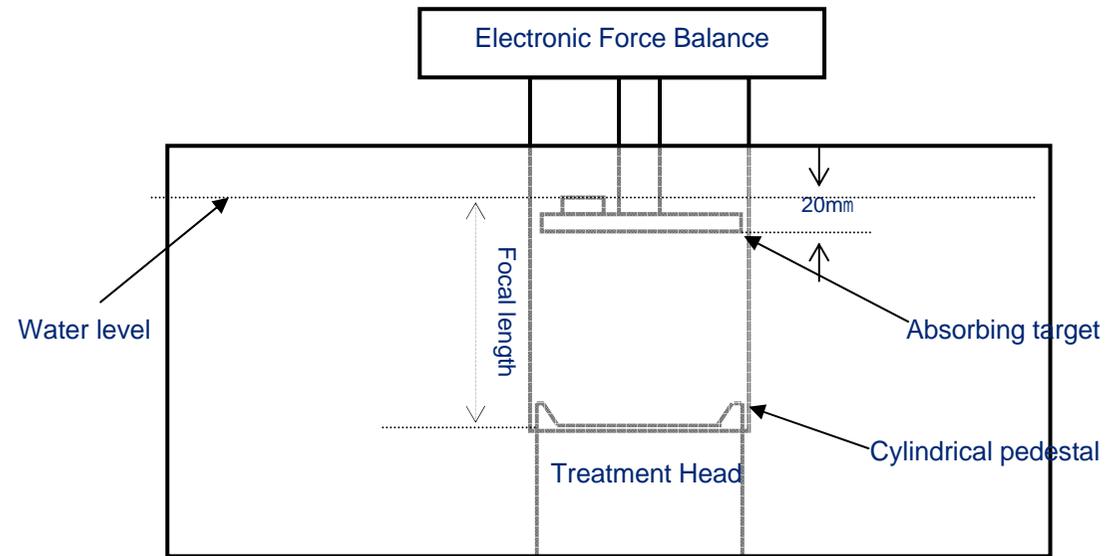
$$P = \frac{2FC}{\cos \arctg(a/fl) + \cos \arctg(b/fl)}$$

P, acoustic power (W) , F, radiation force (N) , C, sound speed in degassed water (m/s) , 2a、 2b, inside and outside aperture of transducer (mm) , fl, focal length (mm)。

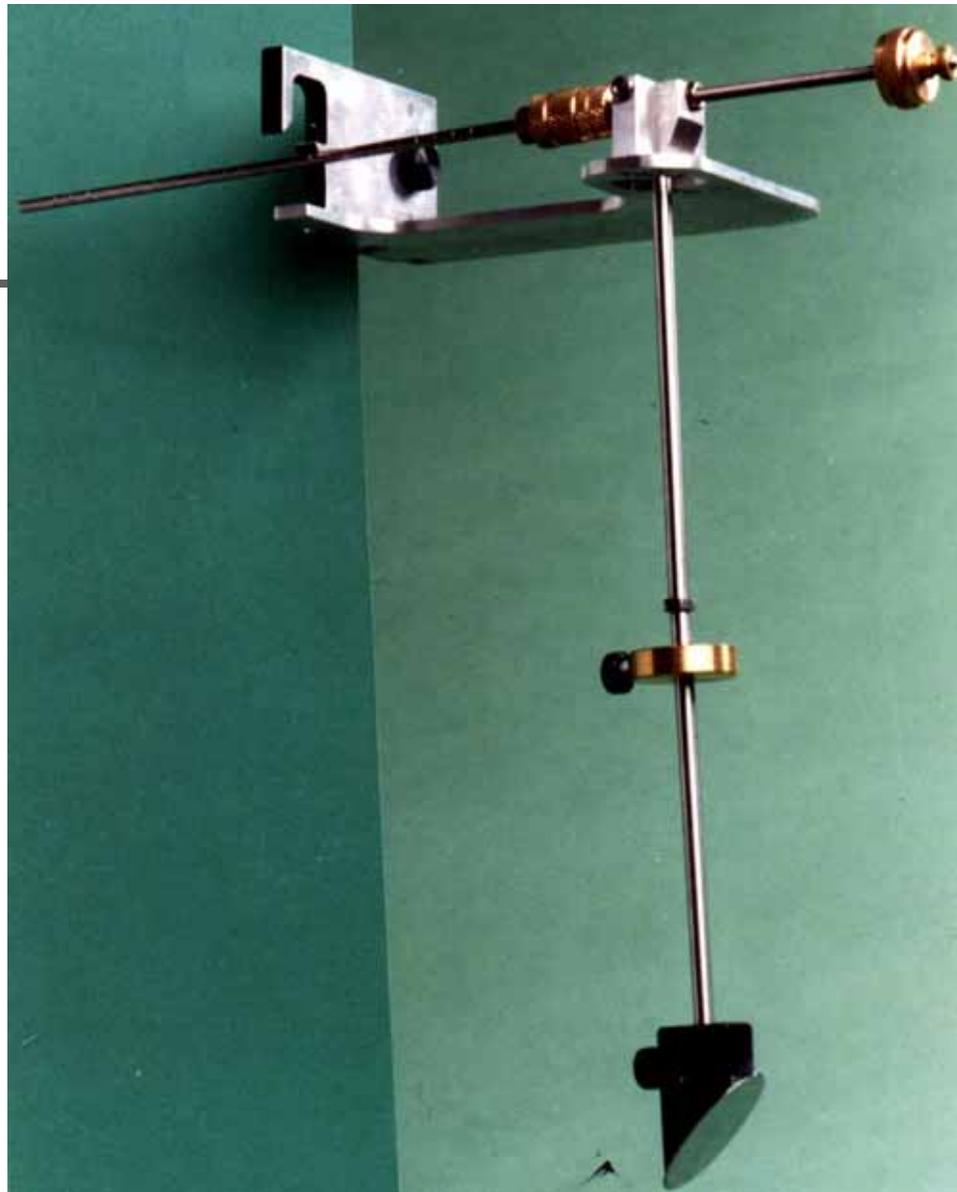
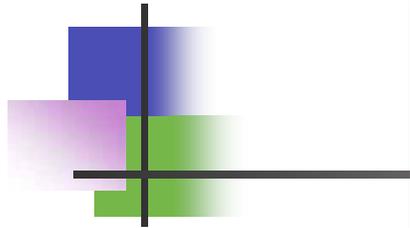
声功率和声场特性测量



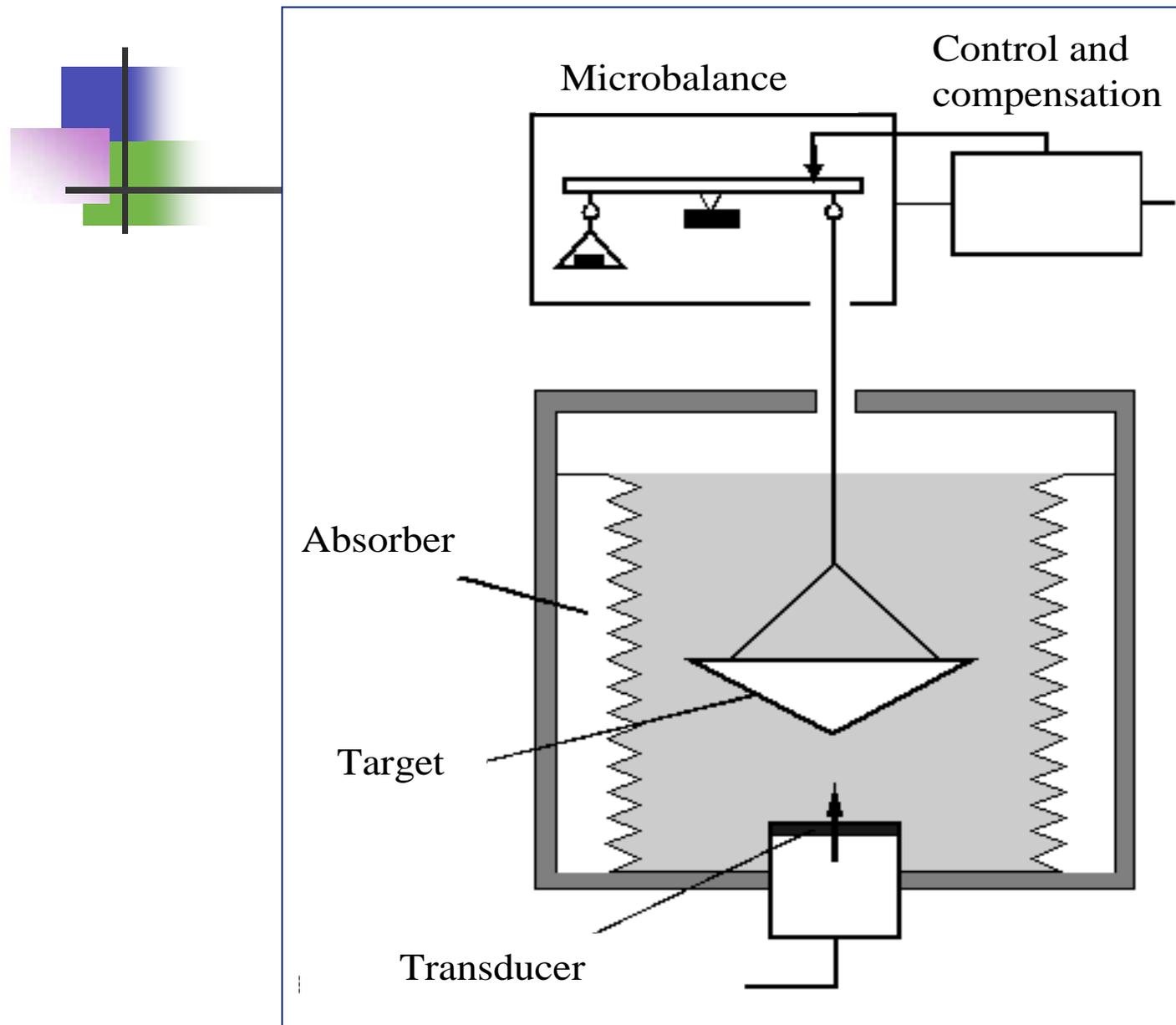
- 1 — 吸声水槽
- 2 — 吸收靶
- 3 — 聚焦换能器或换能器阵
- 4 — 吸声材料



声功率和声场特性测量



声功率和声场特性测量



Radiation force balances (RFB)

- Bigger container
- Degassed water
- Temperature
- Acoustic absorber lines walls
- Absorbing target Difficult to produce target that absorbs 100% of sound and target heats up, changing its buoyancy and hence weight.
- Reflecting target Reflected ultrasound is absorbed by absorbing materials lining the tank, which can heat up and cause convection currents in the tank.
- Requires target large enough to intercept whole beam
- Counter-balance (Sensitive balance needed)
- Pre-focus

§ 3.4.2 和 8.4.2

声场特性测量——水听器（Hydrophone）法

- 采用已校准的水听器，置于水中声场内测量场点的声压波形及其分布，根据声场特性参数的定义，使用相应的公式计算出相应的参数。声场中水听器接收面所在位置的声压可由水听器的输出电压得到

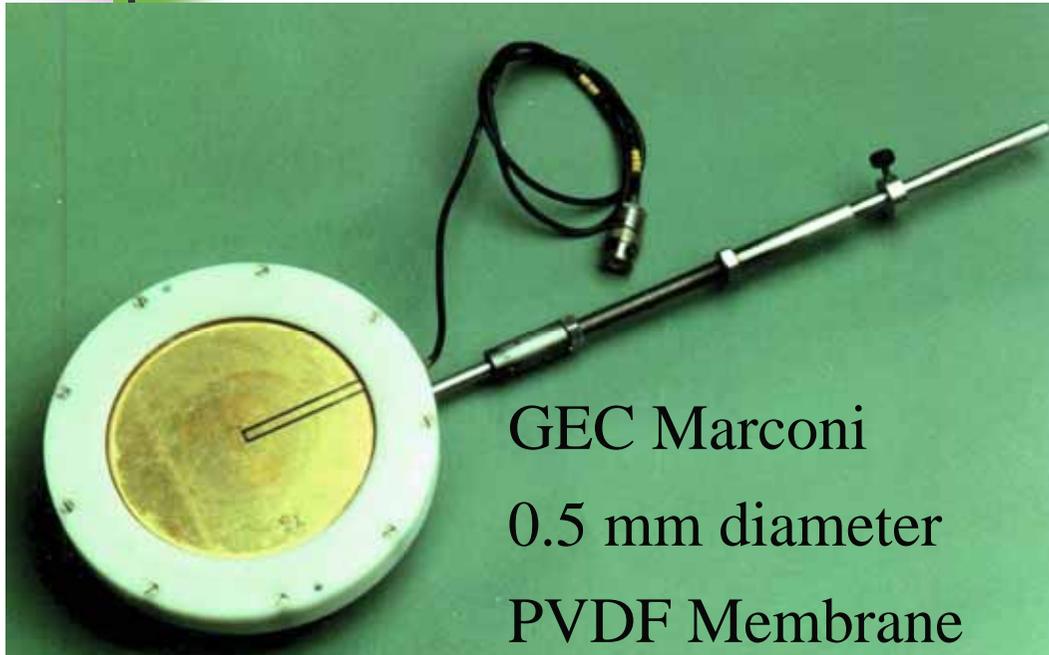
$$p_{H(x,y,z,t)} = \frac{U_{H(x,y,z,t)}}{M_L}$$

M_L 为水听器自由场电缆末端有载电压灵敏度。

§ 8.4.2 声场特性描述 (P191-195)

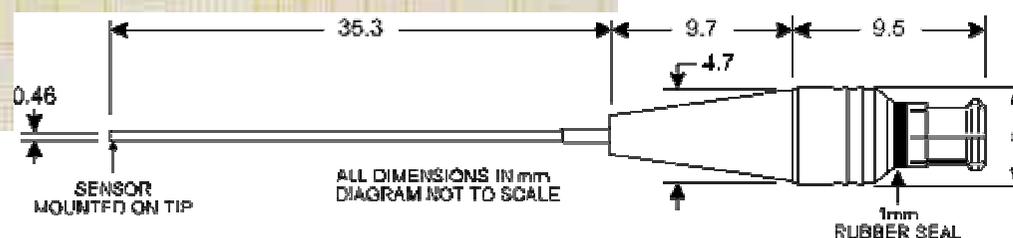
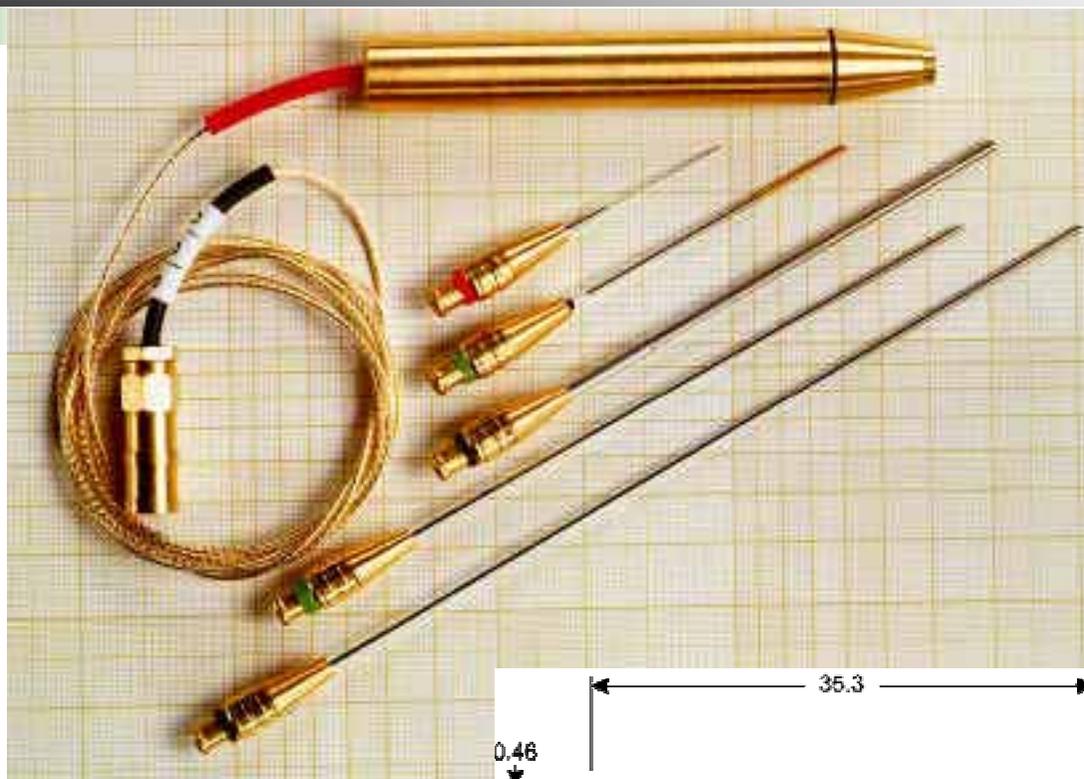
- 声压最大值测量
- 声工作频率测量
- 空间峰值声强测量
- 声焦域测量
 - 最大声压半值处的最大尺寸 (Full width at half (pressure) maximum , **FWHW**)
maximum dimensions of -6dB focal region in the directions which are perpendicular to the beam axis and parallel to the beam axis
 - 最大旁瓣级、轴向次极大极、声焦距、声压聚焦增益
- -6 dB波束面积内时间平均声强的空间平均值测量
- 谐波畸变系数

Membrane Hydrophone



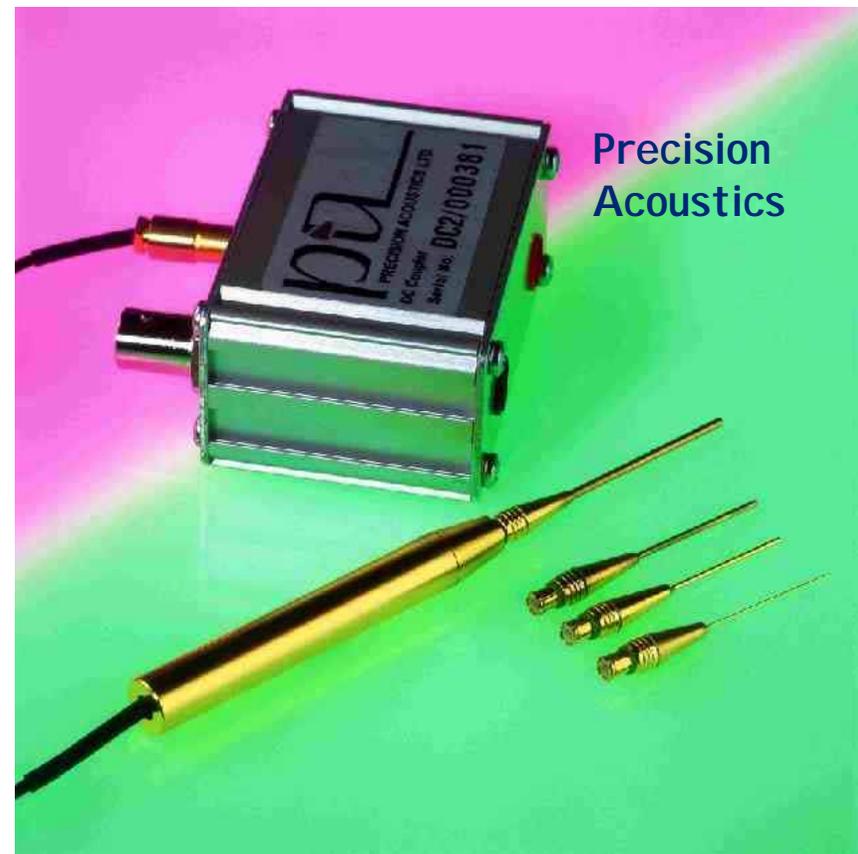
Low intensity – 100 Wcm^{-2}
20 – 40 cycles, 1 kHz

Needle Hydrophone



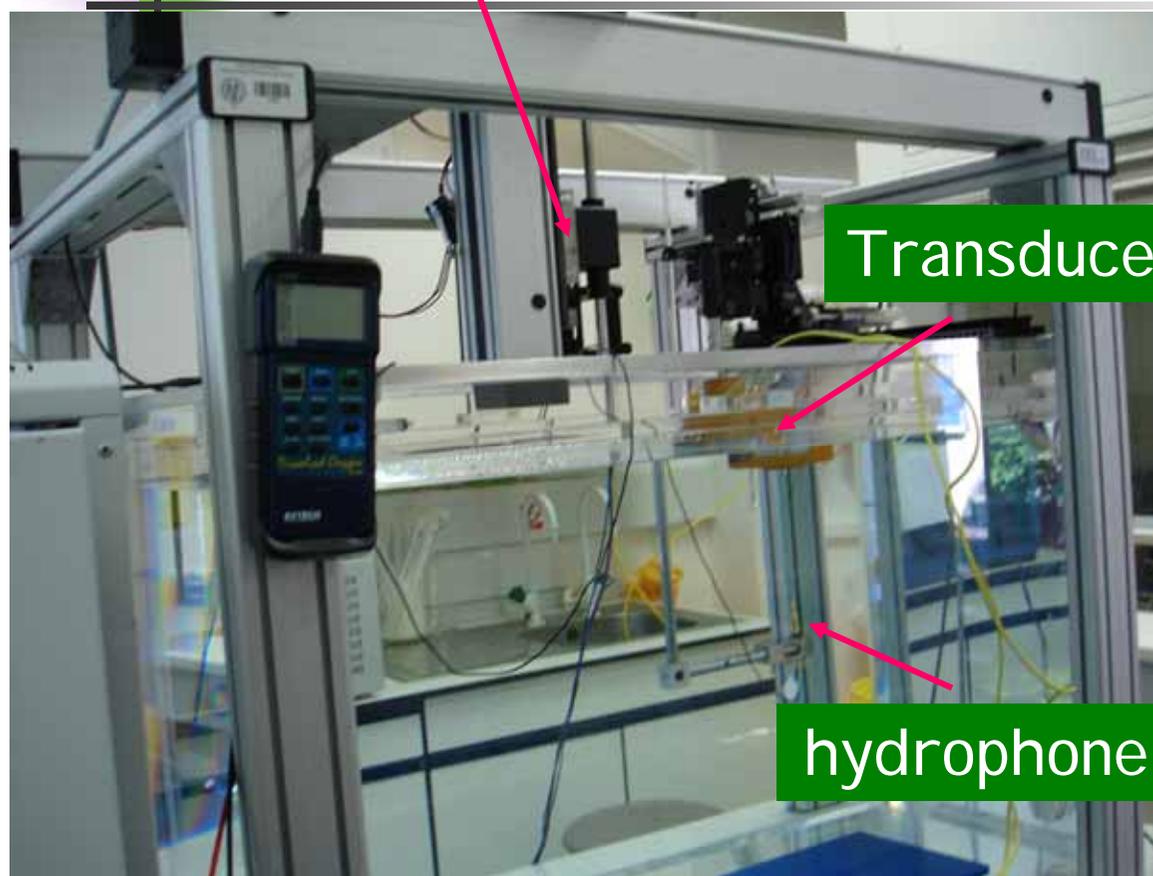
HP 0.2mm INTERCHANGEABLE PROBE

Needle hydrophone



Free field conditions

3D motion setup



Transducer

hydrophone

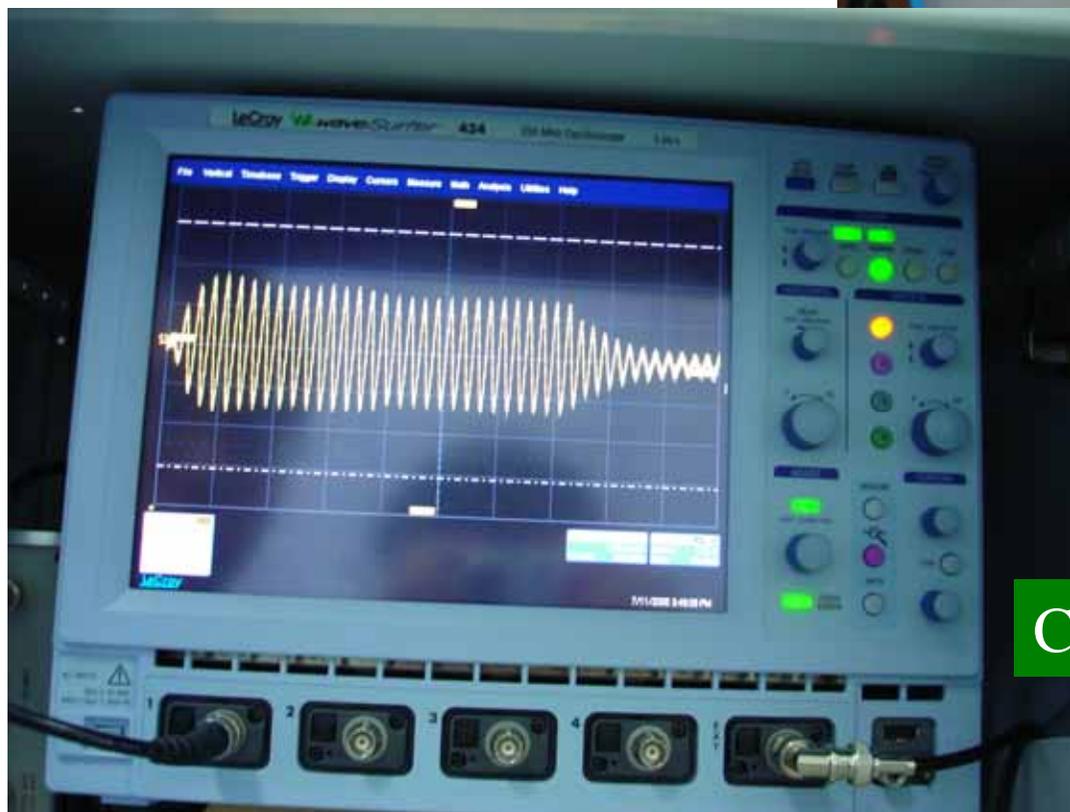


Signal generator

声功率和声场特性测量

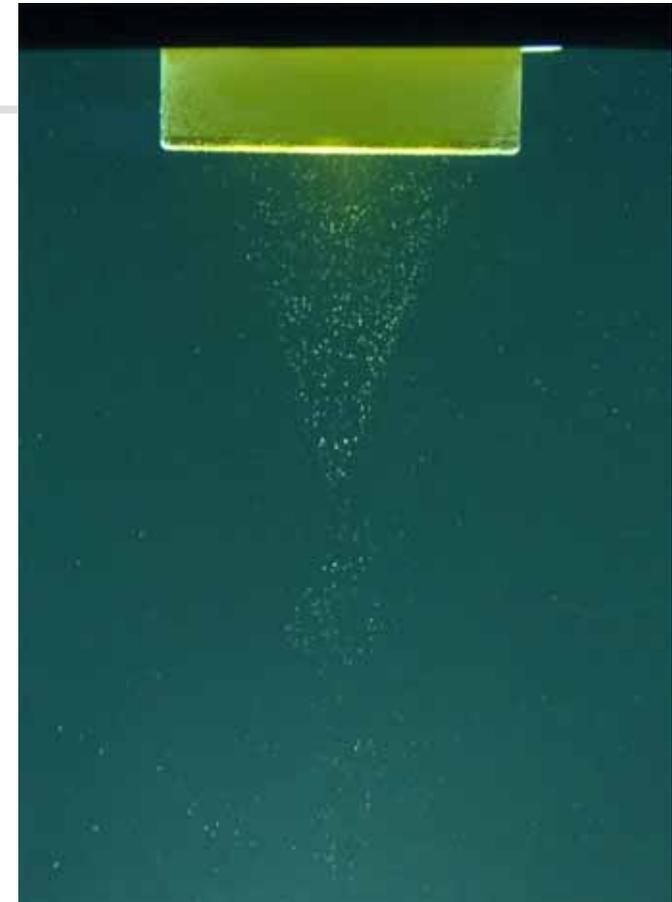


Power amplifier

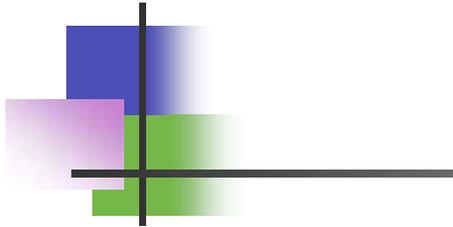


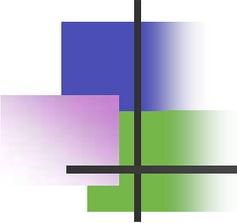
Communicable oscillograph

声功率和声场特性测量



声功率和声场特性测量





HIFU声场测量，采用水听器法测量水中场点的声压波形及其分布，然后根据特性参数的定义，使用相应的公式计算出这些参数。

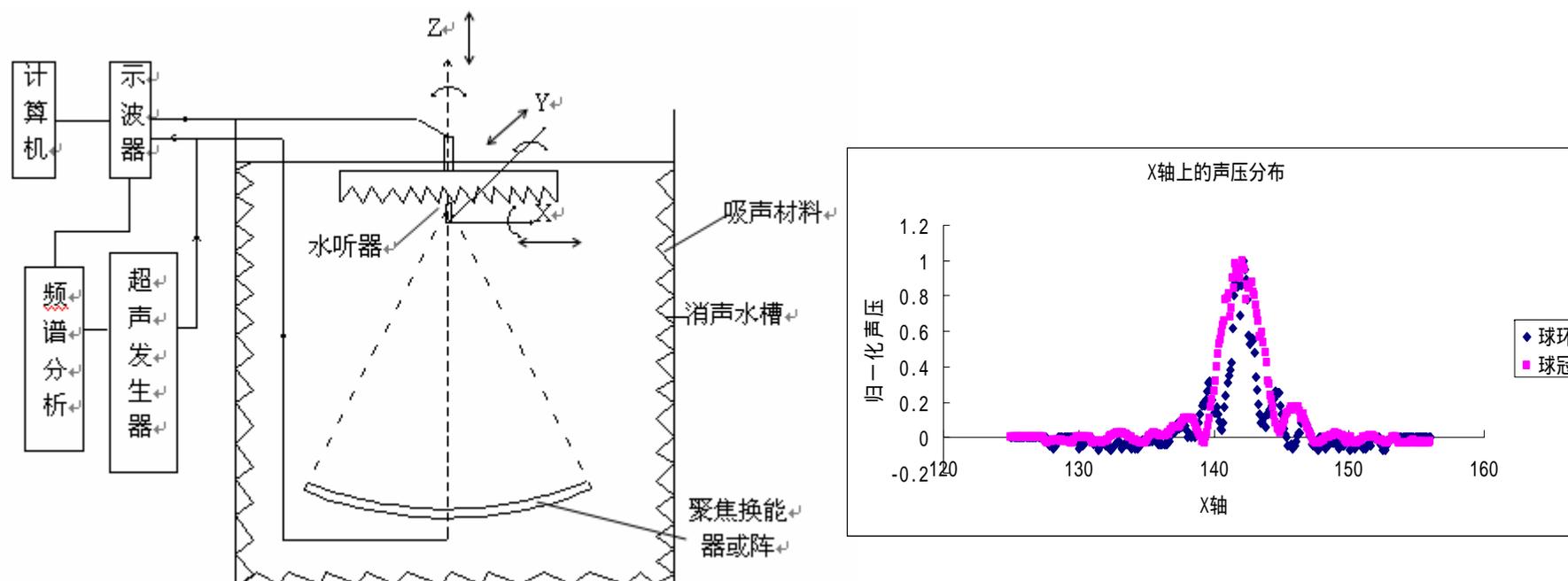
技术关键: 耐高声压、宽频带响应、有足够的线性动态范围和空间分辨力，并有较长使用寿命的水听器。

上述要求尚难完全达到。

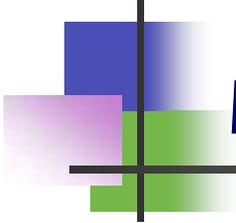
目前采用聚偏氟乙烯（PVDF）压电元件，可在高达70MPa压力时保持线性响应。

测量方法：

图示出采用已校准的水听器测量HIFU声场的系统示意图。水听器被刚性固定在一个三维扫描机构上，水听器位置信号和水听器输出信号均被采集，输入计算机。应用专用软件可画出声场的声压参数的分布图。为避免水槽壁和水听器夹具支架的声反射，要用吸声贴面把它们遮蔽起来。同时采用脉冲声技术有效地防止反射干扰。



水听器法测量HIFU声场参数的系统的示意图

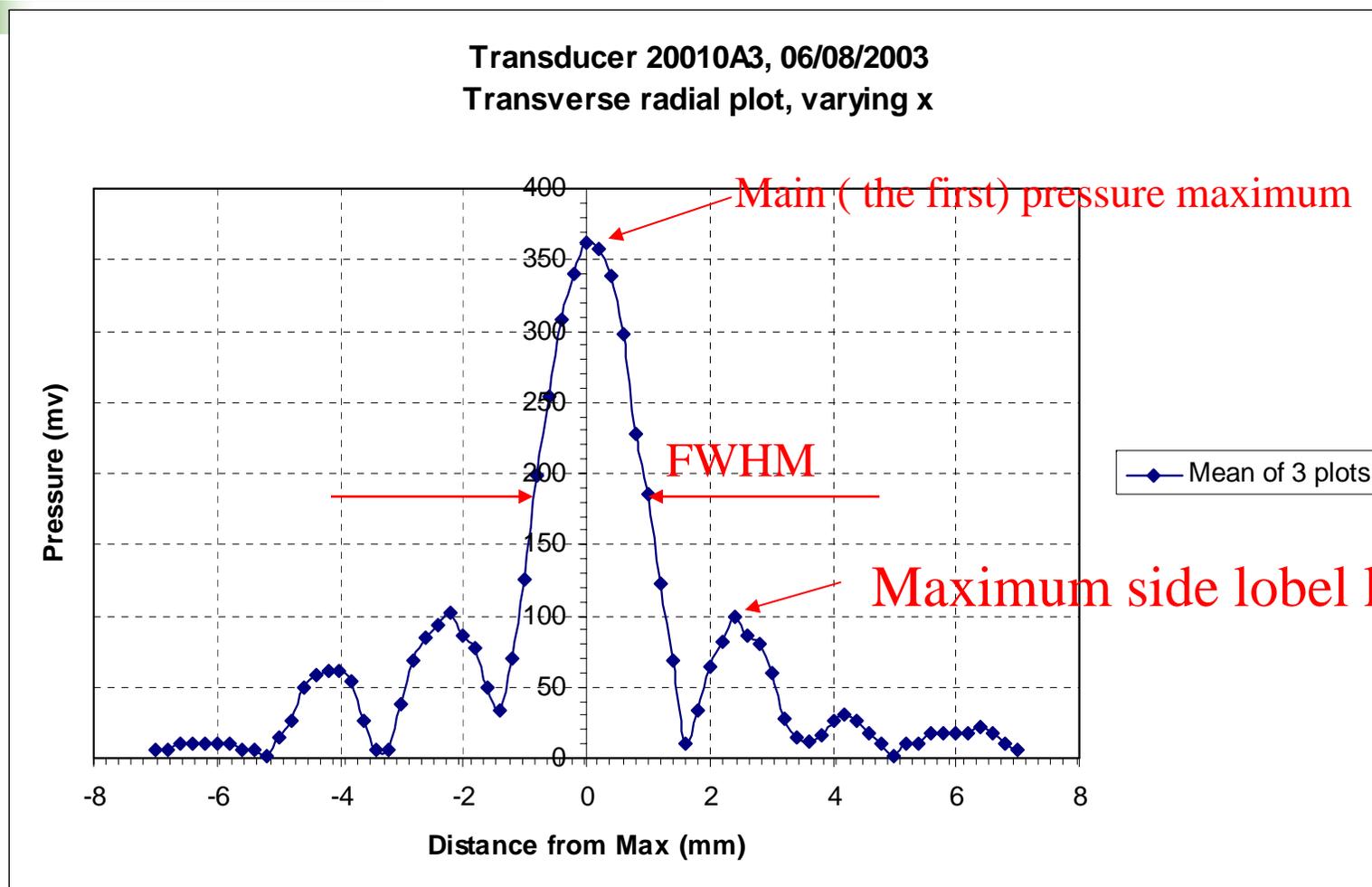


What do we measure?

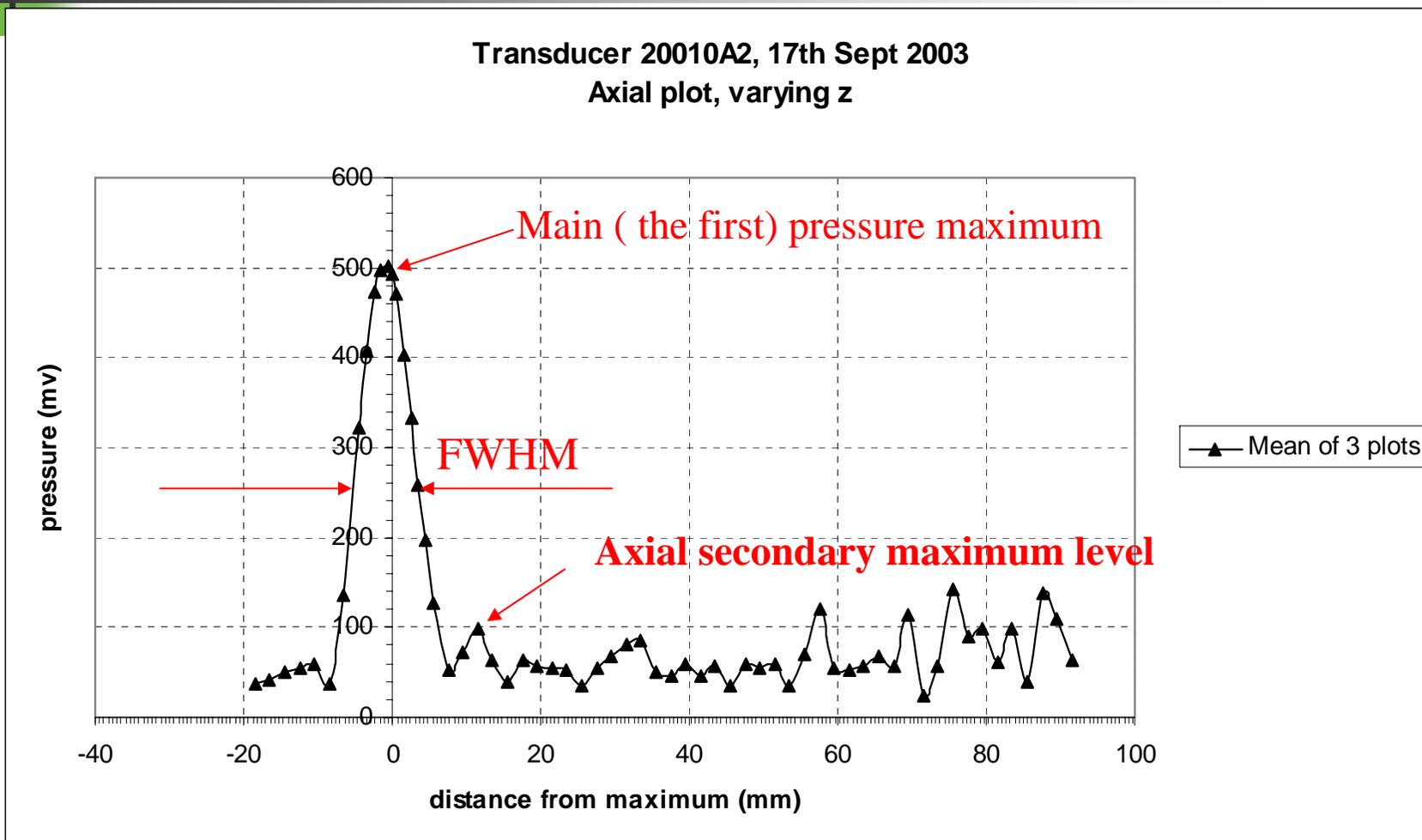
FWHM

最大声压半值处的最大尺寸
(Full width at half (pressure) maximum , **FWHW**)

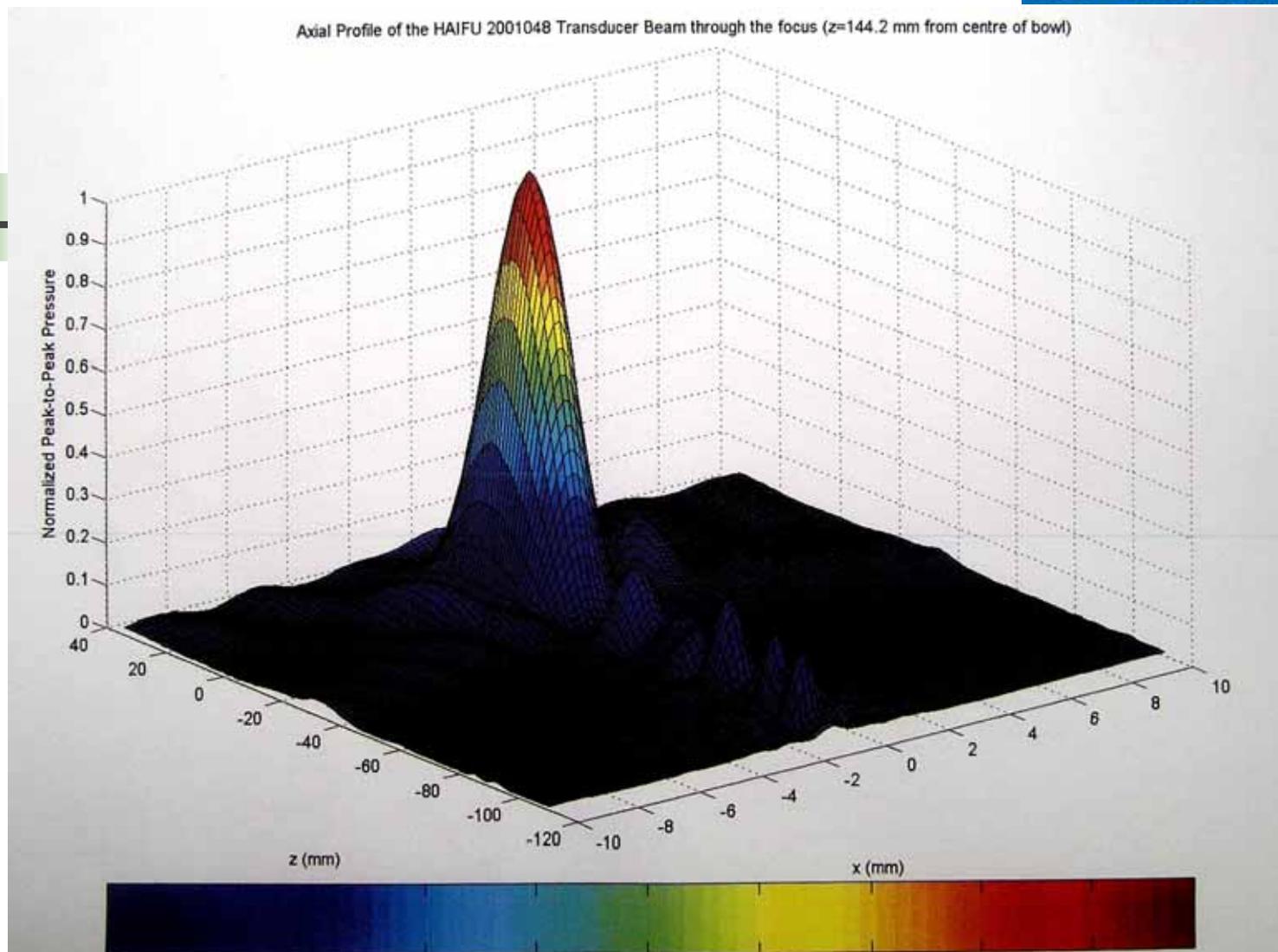
Beam profiles (transverse)



Beam profiles (axial)

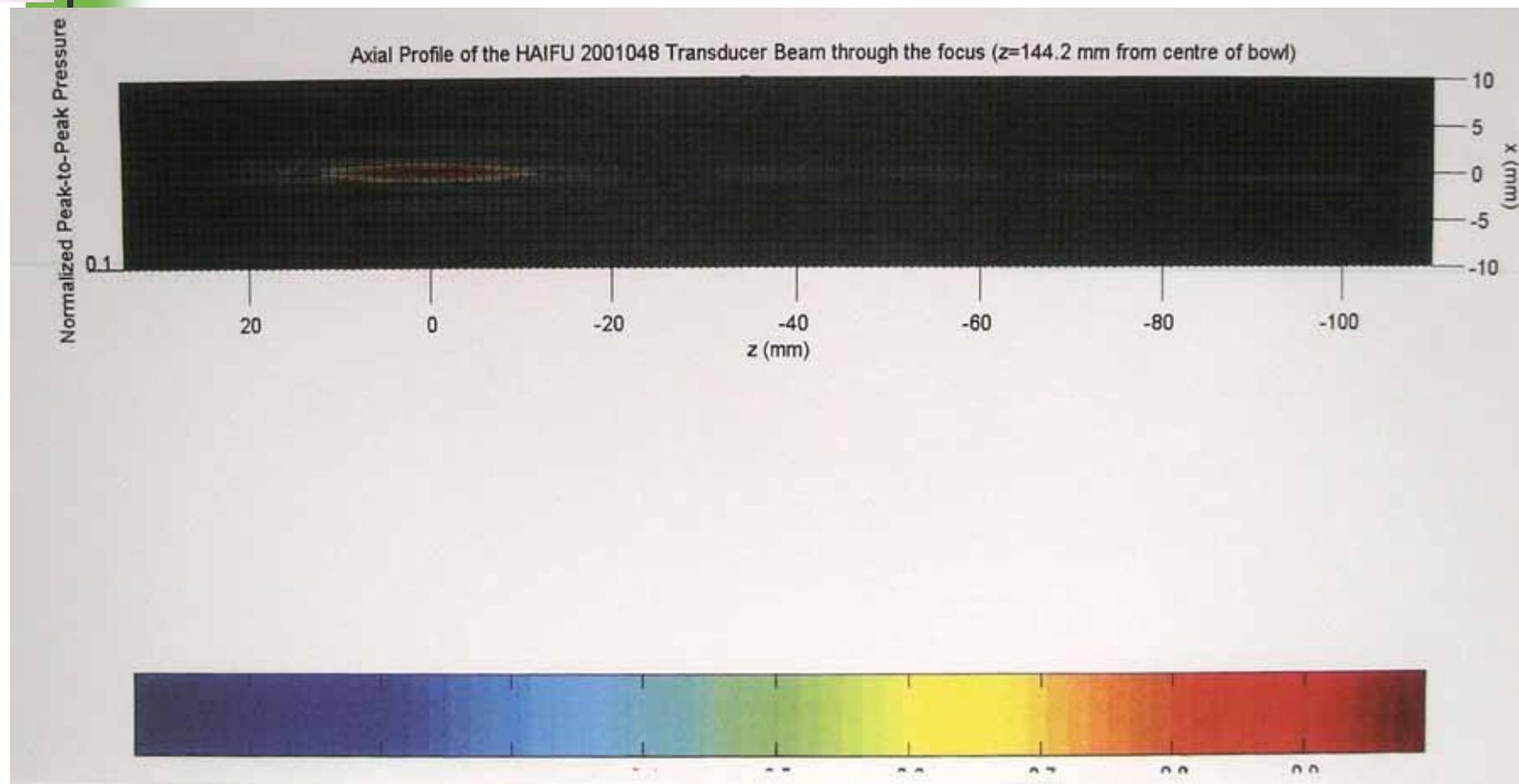


声功率和声场特性测量



0.8MHz 120mm 135mm

声功率和声场特性测量



§ 3.5 超声治疗系统的声场特性测量标准

□ 超声理疗系统

→ 1996颁布了IEC61689：“Ultrasound –Physiotherapy System-Field Specification and Method of measurement in frequency 0.5MHz to 5MHz”.

□ 高强度聚焦超声肿瘤治疗系统

→ 2005年我国完成了GB/T 19890-2005《声学 高强度聚焦超声（HIFU）声功率和声场特性测量》国家标准的制定，这是世界上**第一个**关于HIFU的国家标准.

测量系统的要求

□ 辐射力天平系统的要求

→ 靶的要求

本标准推荐采用吸收靶，要求其声压反射系数 $\leq 5\%$ ；声压透射系数小于10%。靶的面积足够大，其直径或最小尺度大于所截取平面内-26dB声束宽度的1.5倍

→ 靶的支撑（或悬吊）系统要求

靶的支撑要有足够的稳定性，在测量中靶体的水平位移应足够小，不影响测量结果。保持靶面垂直于声束轴。

→ 测力系统

测力系统可采用电子天平或测力传感器系统。要求其测量精密度优于 10^{-3} N。

□ 水听器测量系统的要求

→ 水听器的要求

水听器灵敏度的要求

水听器电缆末端的自由场电压灵敏度不低于 10nV/Pa

水听器频带宽度要求

在声工作频率的2倍频程范围内变化时，水听器灵敏度的起伏应处于 $\pm 6\text{dB}$ 范围内。

水听器指向性要求

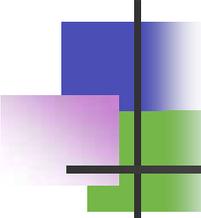
在声工作频率下，在声轴方向上声压 -6dB 主波束宽 70°

□ 水听器的线性度

→ 水听器的线性动态范围：至少在10MPa瞬态声压作用下保持线性的电压输出，线性度不大于 $\pm 5\%$ 满量程。

□ 水听器安装调节夹具的要求

→ 水听器安装调节夹具应能牢固夹持水听器，能绕通过水听器接收面中心并垂直于水听器主声轴的两个正交轴线旋转，作方位角和俯仰角的调节，并保证调节中水听器的接收面的中心不发生位移。



思考题

1. 请设计一个测量HIFU声功率的实验方案。
2. 请设计一个描述HIFU声场的实验方案。