

多晶片超声聚焦探头

朱儒良 陆宝琴

(中国科学院东海研究站)

一、引言

超声聚焦探头作为超声断面图象系统中不可缺少的部份,愈来愈显示出它的重要性。自六十年代后半期开始,国外对单晶片聚焦探头进行了广泛的研究,而对于多晶片探头到七十年代才开始受到人们的重视。性能良好的多晶片聚焦探头1976年左右才被研制出来^{[1][2]},而带有阻抗匹配层的多晶片聚焦探头1980年后才有产品出现。随着基础研究的深入,人们能容许接受超声功率的剂量愈来愈低,所显示的人体断面图象要求愈来愈清晰。所有这些,都对超声探头的性能提出更高的要求。

对于超声探头来说,具有宽阔的频带或低的 Q 值、短的脉冲响应、低的损耗和高的灵敏度,是十分重要的。而对于多晶片聚焦探头,还希望有较窄的近场声束、弱的横向偶合、弱的近场多次反射,则更为重要。这些因素在许多方面影响着整个系统的分辨率。本文以下将对多晶片聚焦探头的设计方法进行简要的论述,并介绍我们于1980年研制成功的多晶片超声聚焦探头的性能以及它所显示的图象质量。

二、多晶片超声聚焦探头的构成与原理

多晶片超声聚焦探头是由于它的辐射面做成曲面形状,以便获得较窄的近场声束,故称聚焦探头。探头的性能与探头的设计、

结构工艺过程都有着密切的联系。由于探头工作频率较高、波长较短,所以探头的各个部件的物理性能、几何形状、加工精度、胶层的均匀性、微小气泡,都对探头的性能产生重大影响。

1. 多晶片超声聚焦探头的近场声束

对固定频率 f 、固定曲率半径 R 固定开口半径 a 的探头来说,只是在特定的距离上才有较窄的近场声束。因此我们必须根据所探测的目标大部份落在什么距离上和要求达到的横向分辨率,来确定探头的线度和几何形状。在文献(3)(4)(5)中,已导出了圆形和长方形聚焦探头的近场声束计算公式,可用以计算探头的近场声束。为了便于比较起见,这里将平面形探头的声束先列出。

平面形探头

其最佳直径可由下式决定[2]:

$$d = 2\sqrt{\lambda H} \quad (1)$$

式中 H 为探测深度, d 为探头直径, λ 为波长。

平面形探头在近场区域中的(0~ H)能量,是以直径为 $0.96d$ 的圆柱形声束进行传播的。在此距离内,声束宽度近似为 d ,以后声束开始发散,到达 $2H$ 距离时,此时声束宽度等于 $1.35d$ (如图1)。

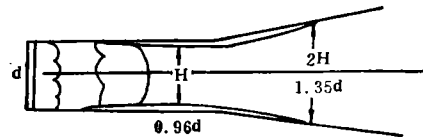


图1 平面形换能器的近场声束

圆形聚焦探头

圆形聚焦探头束宽随距离变化关系由下

式来确定^[5]：

$$B_{-6\text{db}} \doteq \frac{a(R-Z)}{R \cdot \sin \frac{\pi a^2}{2\lambda} \frac{(R-Z)}{RZ}} \quad (2)$$

$$B_{-20\text{db}} \doteq \frac{1.92a(R-Z)}{R \cdot \sin \frac{\pi a^2}{2\lambda} \frac{(R-Z)}{RZ}} \quad (3)$$

曲率中心点上的束宽由下式来确定

$$B_{F-6\text{db}} = 2\lambda R / \pi a \quad (4)$$

$$B_{F-20\text{db}} = 1.22\lambda R / a \quad (5)$$

式中： a 为探头的开口半径；

R 为探头的曲率半径；

λ 为波长；

Z 为距离。

长方形聚焦探头

长方形聚焦探头的束宽随距离变化关系由下式确定：

$$B_{-6\text{db}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{4Ra}{(R-Z)} \cdot \frac{1}{[C_1^2(X) + S_1^2(X)]} \quad (6)$$

$$\text{式中：} C_1(X) = \int_0^X \frac{\cos x}{\sqrt{2\pi x}} dx$$

$$S_1(X) = \int_0^X \frac{\sin x}{\sqrt{2\pi x}} dx$$

$$X_2 = \frac{\pi a^2}{\lambda R Z} (R-Z)$$

a 为长方形聚焦探头的短轴开口半径；

R 为长方形聚焦探头的曲率半径。

根据公式(2)(3)(6)，可以计算各种距离下的声束宽度。它表示了传播介质不存在吸收、散射、反射情况下，探头的近场声束的形状。实验证明了在声焦区附近声束随距离的变化与上述计算相符合。人体内的声阻抗变化很大，吸收也很大，并存在各种散射和反射体。因此，人体内的声场分布和声束形状将是十分复杂，而有待于研究的课题。

2. 声阻抗匹配和匹配层的选取

声阻抗匹配

超声探头在向人体辐射声波而在传播途

径中遇到不同的声阻抗界面时，它就产生反射回波。现在，可以区别声阻抗相差仅百分之一的两层相邻界面。下面我们分析一下探头的压电晶体和人体组织的声阻抗特性。为了便于参考起见，将其他几种有关材料的声阻抗也列于表1中。

压电晶体的声阻抗在 $35 \times 10^6 \text{kg/S} \cdot \text{m}^2$ 左右。人体表层组织的声阻抗在 $2.0 \times 10^6 \text{kg/S} \cdot \text{m}^2$ 左右。两种介质声阻抗相差很大，当声波通过时产生强烈的反射回波，并且在两层介质中间来回形成一连串反射回波，而且其反射强度远远超过人体表层组织内的反射波强度。会造成诊断仪近区图象不清晰。此外，两层介质阻抗的严重失配，会大大降低探头的传输系数，所以在探头的压电晶体和人体介面间插入阻抗渐变层——阻抗匹配层，可以在很大程度上减弱多次反射回波的强度。在超声探头中，大都采用高阻尼背衬材料，以便获得宽阔的频率响应，但是探头的大部份声功率向背衬材料辐射，会大大降低探头

表1 各种介质的声阻抗

介 质	传播速度 m/s	密 度 g/cm ³	声阻抗值 10 ⁶ kg/s·m ²
水(37℃)	1523	1.00	1.523
人体软组织	1500	1.06	1.590
肌组织	1400	1.07	1.498
脂肪组织	1580	0.95	1.501
骨 骼	3380	1.80	6.184
硬橡皮	1400	1.1	1.55
聚酯树脂	2550	1.2	3.02
聚乙烯	930	1.05	0.98
有机玻璃	2600	1.19	3.09
氯化聚醚	2250~2230	1.408	3.168
聚四氟乙烯	1380	2.209	3.048
聚氯乙烯	2200	1.446	3.081
聚苯乙烯			3.25
天然胶	1470	0.98	1.44
铝	5100	2.7	13.8
硬 铝	5200	2.7	14.0
铝镁合金	5200	2.65	13.7
石英玻璃	5370	2.6	13.9
瓷	4880	2.41	11.7
钛	4200	4.51	18.9
PZT-5A	4350	7.75	33.7
PZT-2	4420	7.6	33.6
LiNbO ₃	7400	4.73	35.0
NBS-17	4500	6.4	29.8

的电声效率和灵敏度。适当地选取匹配层的声阻抗，同样可以获得很宽的频率响应，并且在整个频率范围内得到较高的灵敏度。

匹配层的选取

设带有匹配层的聚焦探头模式如图 2 所示，负载为水介质，声阻抗为 Z_2 ，第 i 层匹配层的声阻抗为 Z_i ，压电元件的声阻抗为 Z_0 ，背衬材料的声阻抗为 Z_B ，相应的声速和厚度分别为 $V_L, V_i, V_0, V_B, t_L, t_i, t_0, t_B$ ，用 Z_{T_i} 表示第 i 层匹配层引入的输入阻抗。利用传输线公式：

$$Z_{T_i}(f) = \frac{Z_{i-1} - iZ_i \operatorname{tg} \theta_i}{Z_i - iZ_{i-1} \operatorname{tg} \theta_i} Z_i \quad (7)$$

式中 $\theta_i = 2\pi t_i / \lambda_i(f)$

$\lambda_i(f)$ 为第 i 层匹配层中的波长，它是频率的函数。

在两层匹配层情况下，有

$$\begin{aligned} Z_{T_2}(f) &= \frac{Z_L \cdot Z_1 - Z_L \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2 - i(Z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_2)}{Z_1 Z_2 - Z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2 - i(Z_L \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_2)} \cdot Z_2 \\ &= Z_2 \cdot \frac{(Z_L \cdot Z_1 - Z_1 Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2)(Z_1 \cdot Z_2 - Z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2) + (Z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 + Z_1 Z_2 \operatorname{tg} \theta_2) \cdot}{(Z_1 \cdot Z_2 - Z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2)^2 +} \\ &\quad \frac{(Z_1 Z_2 \operatorname{tg} \theta_1 + Z_1 Z_2 \operatorname{tg} \theta_2)}{(Z_L \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 + Z_1 \cdot Z_L \cdot \operatorname{tg} \theta_2)^2} + iZ_2 \\ &\quad \cdot \frac{(Z_L Z_1 - Z_L \cdot Z_2 \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2)(Z_L Z_2 \operatorname{tg} \theta_1 + Z_1 \cdot Z_L \cdot \operatorname{tg} \theta_2) - (Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2) \cdot}{(Z_1 \cdot Z_2 - Z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2)^2 +} \\ &\quad \frac{(Z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_2)}{(Z_1 \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_2)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

式中

$$\theta_1 = (2m+1)t_1 / \lambda_1(f)$$

$$\theta_2 = (2m+1)t_2 / \lambda_2(f)$$

在共振情况下，即 $f = f_t$ ，令 $t_1 = \frac{\lambda_1(f_t)}{4}$

$t_2 = \frac{\lambda_2(f_t)}{4}$ 代入上式，则可求得：

$$Z_{T_2}(f_t) = \frac{Z_L \cdot Z_2^2}{Z_1^2}$$

令 $Z_{T_2}(f_t) = Z_0$ 代入上式有

$$Z_0 = \frac{Z_L \cdot Z_1^2}{Z_2^2} \quad (12)$$

在一层匹配层情况下：

$$\begin{aligned} Z_{T_1}(f) &= \frac{(Z_L \cdot \cos \theta_1 - iZ_1 \cdot \sin \theta_1)}{(Z_1 \cdot \cos \theta_1 - iZ_L \cdot \sin \theta_1)} \cdot Z_1 \\ &= \frac{Z_1^2 \cdot Z_L}{Z_1^2 \cdot \cos^2 \theta_1 + Z_L^2 \cdot \sin^2 \theta_1} \\ &\quad - \frac{Z_1(Z_1^2 - Z_L^2) \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_1}{Z_1^2 \cdot \cos^2 \theta_1 + Z_L^2 \cdot \sin^2 \theta_1} \\ &= R_e Z_{T_1}(f) - I_m Z_{T_1}(f) \quad (8) \end{aligned}$$

由上式我们可以求出引入一层匹配下的输入阻抗对频率的关系曲线。当 $t_1 = (2m+1)\lambda_1(f_t)/4$ 时。(8)式的虚部为零，实部为

$$Z_{T_1}(f_t) = Z_1^2 \cdot Z_L / Z_L^2 = Z_1^2 / Z_L \quad (9)$$

在最理想的声阻抗匹配情况下。令

$$Z_{L1}(f_t) = Z_0 \quad (f_t \text{ 为共振频率})$$

代入式(9)得

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 \cdot Z_L} \quad (10)$$

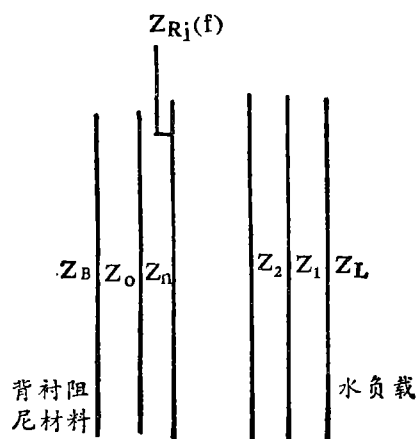


图 2 匹配层探头的物理模式

调节两层匹配层声阻抗,使下列等式成立

$$Z_L/Z_1 = Z_2/Z_0$$

代入式(12),可求得

$$Z_1 = \sqrt[4]{Z_0 \cdot Z_L^3} \quad (13)$$

$$Z_2 = \sqrt[4]{Z_0^3 \cdot Z_L} \quad (14)$$

当 $f=3\text{MHz}$ 时,计算结果如下。

一层匹配 $Z_1 = 6.2 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$

两层匹配 $Z_1 = 3.2 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$

$$Z_2 = 13.1 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$$

三层匹配 $Z_1 = 2.93 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$

$$Z_2 = 7.74 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$$

$$Z_3 = 22.4 \times 10^6 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$$

匹配层的厚度如下:

两层匹配

第一层 材料 $t = \lambda(ft)/4(\text{mm})$

聚酯树脂 0.21

有机玻璃 0.22

氯化聚醚 0.19

聚氯乙烯 0.12

聚苯乙烯 0.23

第二层 铝镁合金 0.43

石英玻璃 0.45

瓷

选择匹配层的材料是相当重要的,它不仅满足特定阻抗的要求,而且选择插入损耗相对小的材料。此外这种材料的柔顺性、老化性能、可粘性同样十分重要。满足一层匹配层声阻抗的材料是金属粉和塑料的混合物,要把它制成很薄的并具有一定曲率半径的元件,也是有不少实际问题的。满足两层匹配层声阻抗的材料较多,但也因受到各种条件的限制,不能方便地进行试验。我们选择有机玻璃为第一匹配层,石英玻璃和铝镁合金为第二匹配层,并把这两种材料按相应的曲率半径制成曲面形状。压电元件和匹配层必需保证彼此吻合,以避免粘结胶层增厚而引进插入损耗。这是一个比较困难的事情,一般要求胶层的厚度为 0.02mm 左右。

带有阻抗匹配层的超声探头,特别是单探头,其性能远优于一般探头。而对于多晶片聚焦探头,则必须克服许多技术上的困难,才能获得较好的效果。

3. 阻尼层

一般压电材料机械 Q_m 较高,其内耗较小。它具有较高的发射效率,但有较长的发射脉冲响应,即当发射脉冲波结束时,探头仍有较长时间的余振,形成比发射电脉冲宽得多的脉冲响应。余振的宽度往往几倍于发射脉冲宽度,具有较长脉冲响应的发射波,会使整个系统的纵向分辨率降低。为了获得极为短暂的脉冲响应。人们一方面研究新型的压电材料,另一方面则在探头上施加背衬阻尼材料,以使脉冲余响缩短。高阻抗、高衰减的背衬阻尼材料,可使探头的脉冲余响变窄,并且使探头的频率响应变得更为平坦。这也是人们所期望的。但高阻抗阻尼层吸收了探头的大部分声功率,从而使有效电声效率降低,灵敏度亦相应降低。低阻抗高衰减的阻尼层,可在一定程度上提高探头的灵敏度。

阻尼层高衰减的目的是吸收探头向后辐射的声能,减低有害的反射回波强度。采用一种特殊形状的尖劈形阻尼层会得到更好的结果。我们作了 30° 和 45° 尖劈形阻尼层,效果较好,特别是 30° 的更好。

4. 过渡层

探头在使用过程中经常产生摩擦,还涂上各种耦合剂,这样很易损坏,所以必须加上保护层或称过渡层。过渡层的声学特性应接近人体的声阻抗,才不会增大插入损耗和增加反射回波强度。过渡层的厚度及形状仍取决于它的声学特性。

5. 压电晶片间的横向耦合影响和晶片的分割

多晶片聚焦探头的压电元件应具有较低的横向耦合系数,但有较高的厚向耦合系数。由于压电元件很薄,因此分割压电晶片是相

当困难的事情。为此，我们研制一种特殊的切割机，能在长为130毫米的凸面元件上分割出256个以上的小晶片，切缝宽度达到0.05毫米以下。

6. 低损耗高灵敏度多晶片聚焦探头

人体中超声波传播损失是很大的，如探测深度为20厘米的肌体组织，双程传播损失达80db，因此，希望探头具有低损耗高灵敏度。而现在的探头都装有高阻尼背衬材料，这种探头损耗大、灵敏度低，所以设计空气背衬多层匹配的聚焦探头将是一个努力的方向。这种探头不装有任何背衬材料，它的阻尼效果是通过装有特殊的匹配层来获得短暂的脉冲响应，同时匹配层起到声阻抗匹配，展宽频带的效果。还有一种由压电元件和PVDF材料组成的复合聚焦探头，已受到人们的重视。这种探头发射时用压电元件，而接收时用PVDF组成的曲面基阵。PVDF材料具有十分宽阔的频率响应，并且不存在任何横向耦合效应，这些明显优点显示了它对现有探头的竞争性。

三、多晶片超声聚焦探头

多晶片超声聚焦探头(图3)的辐射面为公共负极，压电晶片的凸面为64个阵元的正极。多晶片超声聚焦探头的参数如下：



图3 多晶片超声聚焦探头的外形

压电元件厚向共振频率 f_r 3.1MHZ

压电元件厚度 t 0.66mm

压电元件频率常数 N_f 1.9MHZ

阵元静态电容 C_0 950PF

压电元件声速 V_0 4500m/s

压电元件密度 ρ_2 6.4g/cm³

压电元件曲率半径 $R_{\text{阵}}$ 75.66mm

$R_{\text{内}} 75\text{mm}$

第一阻抗匹配层声阻抗 $\rho_1 C_1$ 3.09×10^6
kg/s·m²

第一阻抗匹配层厚度 t_1 0.22mm

第一阻抗匹配层曲率半径 $R_{1\text{阵}}$ 74.56mm
 $R_{1\text{内}}$ 74.32mm

第二阻抗匹配层声阻抗 $\rho_2 C_2$ 13.9×10^6
kg/s·m²

第二阻抗匹配层厚度 t_2 0.44mm

第二阻抗匹配层曲率半径 $R_{2\text{阵}}$ 75.0mm
 $R_{2\text{内}}$ 74.56mm

探头有效辐射面 S $128 \times 14\text{mm}^2$

阵元数 n 64

晶片数 M 256

相邻阵元间距 d_1 2mm

相邻晶片间距 d_2 0.5mm

切缝宽度 d_3 0.08mm

注：第一阻抗匹配层的材料为有机玻璃；
第二阻抗匹配层的材料为玻璃

1. 电导特性曲线

超声探头的阻抗特性曲线随探头的结构而有很大的变化。如低阻抗阻尼层和高阻抗阻尼层其辐射阻就相差较大。另外有匹配层和没有匹配层的探头的阻抗特性曲线就更不一样。图4为多晶片超声聚焦探头的电导特性曲线。图中实线为空气中测得。虚线为传声油中测得。由图知，加了阻抗匹配层后，频带展宽了许多。具有一层匹配的探头在空气中或油中应显示有两个共振峰。有二层匹配的探头应显示三个共振峰。

2. 脉冲响应

图5a、5b为多晶片超声聚焦探头阵元的发射脉冲响应。由图知，探头加上背衬阻尼材料后，脉冲响应有明显改善。探头余响的大小完全由压电材料的特性所确定，所以施加背衬材料是完全必要的。

3. 近场声束

图6a、6b为多晶片超声聚焦探头的近场声束。它是在水池中摄下的。由图知，声束由

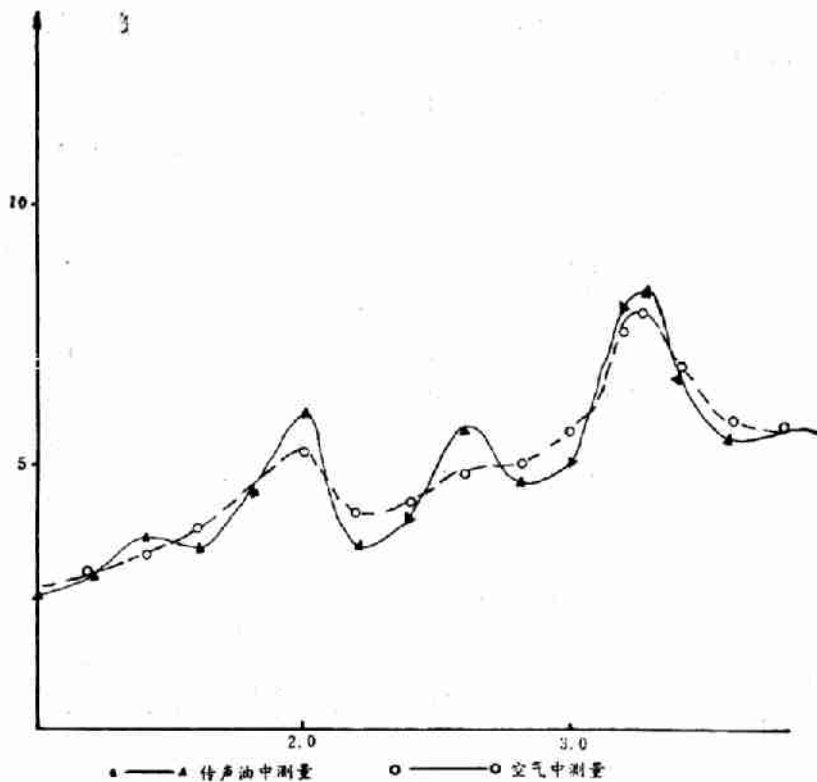


图4 超声聚焦探头的电导特性曲线



图5a 探头无背衬材料的发射脉冲响应



图5b 探头有背衬材料的脉冲响应



图6a 聚焦探头的近场声束



图6b 纵向分辨率

探头开始变窄，到声焦点后又逐渐变宽，它反映了近场区声能分布状况。它与理论计算基本符合。

4. 横向分辨率和纵向分辨率

图7为STS-1线阵超声诊断仪拍摄的横向分辨照片。它是用美国医用超声仪器标准测试网格作为目标拍得的(仿制的网格)照片中所显示的横向分辨率在2~3毫米之间。这同理论计算的声束宽度(在焦点附近)相符合。

图8的近场声束实际上显示了纵向分辨

率的大小。声束中的相邻亮点间距离为2毫米。用相距为1毫米的丝线也能显示出来。所以纵向分辨率小于2毫米。



图7 横向分辨率



图8 乒乓球的截面图象

5. 图象质量

多晶片超声聚焦探头是为STS-1线阵超

声诊断仪研制的。该诊断仪经上海市第六人民医院、上海市中山医院、上海市肿瘤医院经三个月的临床诊断试用，表明该诊断仪所显示的图象清晰，基本满足临床诊断要求。详见(9)(10)

四、结 束 语

国内外把多晶片超声聚焦探头作为超声医疗仪器的重要课题来进行研究。这一方面说明了探头的重要性。另一方面研制性能优良的探头涉及到许多问题，如曲面形声学基阵的近场理论、宽频带换能器的研究、曲配层的传输特性理论研究、扫描波束的旁瓣仰制、声场测试，还涉及到压电材料的特性研究和探头工艺过程的研究，即涉及到许多方面的研究工作。另外由于工作频率较高。波长为毫米量级，所以必须设计专门的制备方法才能保证所需的精度，上面这些问题对研制性能优良的探头增加了复杂性。

本文定性地论述了多晶片超声聚焦探头的基本原理，简要地介绍了我们所研制的聚焦探头的性能。我们从压电元件曲面加工、阵元分割、匹配层的制备初步建立了一套方法。并在理论上进行了一些研究，但这些工作还是初步的。

在研制过程中，我们得到了向大威、冯

绍松两位同志的关心和帮助，上海东明厂对我们的支持还有其他一些同志提出了宝贵意见，在此，一并表示谢意。另外我们和沈志华同志作了许多有益讨论，在此也表谢意。

参 考 文 献

- [1] Kossoff, G. Robinson, D. E. and Garrett, W. J. "Ultrasonic Two-Dimensional Visualization Techniques" IEEE. Vol SU-12 No.2 June 1965
- [2] Kossoff, G. Robinson, D. E. and Garrett, W. J. "Ultrasonic Two-Dimensional Visualization for Medical Diagnostic" T. A. S. A Vol.44 No.5 November 1968.
- [3] 奥岛基良、大槻茂雄
“凹面振動子のビーム幅の近似評価法上可変開口振動子”
- [4] 飯沼一浩、橋口六雄
“凹面振動子による超音波ビーム幅の作図法”日超医论文集24: 43、1973
- [5] 朱儒良、陆宝琴“超声聚焦探头的近场声束计算”(东海站内部报告)
- [6] 朱儒良、陆宝琴
超声聚焦探头的凹面声场
- [7] 布列霍夫斯基
“分层介质中的波”
- [8] 陕西师大应用声学所超声研究室
全国生物医学超声工程学术医用超声仪器科技情报会议资料
医用相控阵超声换能器的初步研究
- [9] STS-1 超声实时图象诊断仪试用报告上海市第六人民医院 周永昌 闻恽
- [10] STS-1 超声实时图象诊断仪试用报告
上海市中山医院 徐智章

(上接第 11 页)

[2] 上海市区域环境噪声标准研究组，上海市区域环境噪声标准(建议)研究说明，1981。

[3] Jan-Inge Gustafson and Stafon Einarsson, Gallery Houses with Respect to Traffic Noise 1973

inter-noise.

[4] Czarnecki, S. Complex Method of Noise Control in Urban Areas, 1978 inter-noise.

[5] 马大猷，微穿孔板吸声结构的理论和设计，中国科学，No.1,1975.