

蚀，当刻蚀完浓硼扩散区域以外的硅时，将形成圆形振动膜结构。

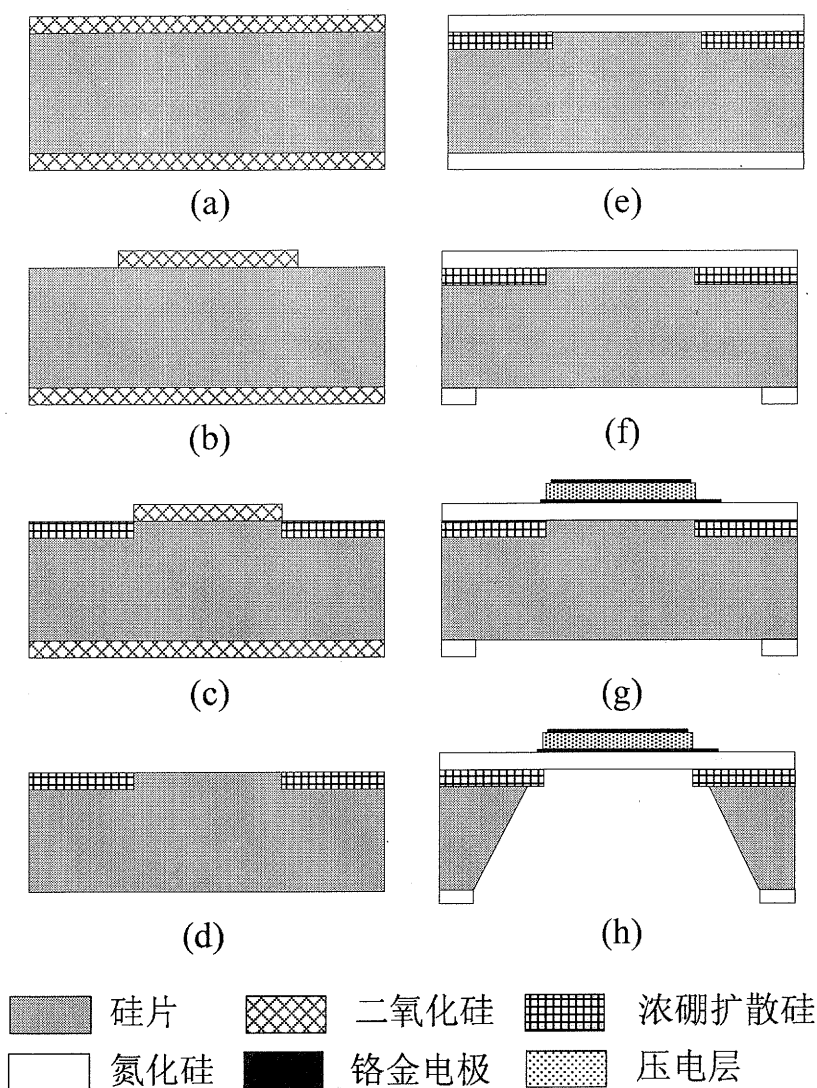


图 2-4-1 圆形振动膜硅微压电传声器的工艺流程

2.4.3 圆形振动膜硅微压电传声器的制作结果

图 2-4-2 为制备完成的圆形振动膜传声器的 SEM 照片。从图 2-4-2 左图可以看出振动膜的形状为圆形，且边界光滑曲线连续。从图 2-4-2 右图可以看出背面的圆形侧墙的边界，而从进一步放大的图 2-4-3 可以清晰看出圆形振动膜的侧墙，可见侧墙厚度约为 $20\ \mu\text{m}$ ，且厚度均匀。因此采用 2.4.2 制备圆形振动膜的方法是有效的。图 2-4-4 为硅片背面多个器件体硅刻蚀后的 SEM 照片，刻蚀面整齐，侧墙倾角清晰，释放后的振动膜平整且没有破损，有效提高了器件的成品

率，同时较好的解决了方膜存在的褶皱问题。

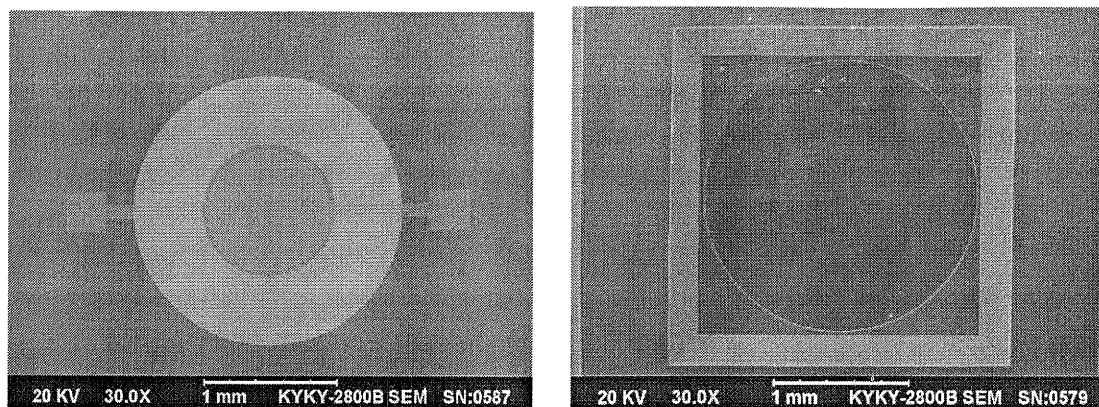


图 2-4-2 圆形振动膜硅微压电传声器 SEM 照片，左为正面，右为背面。

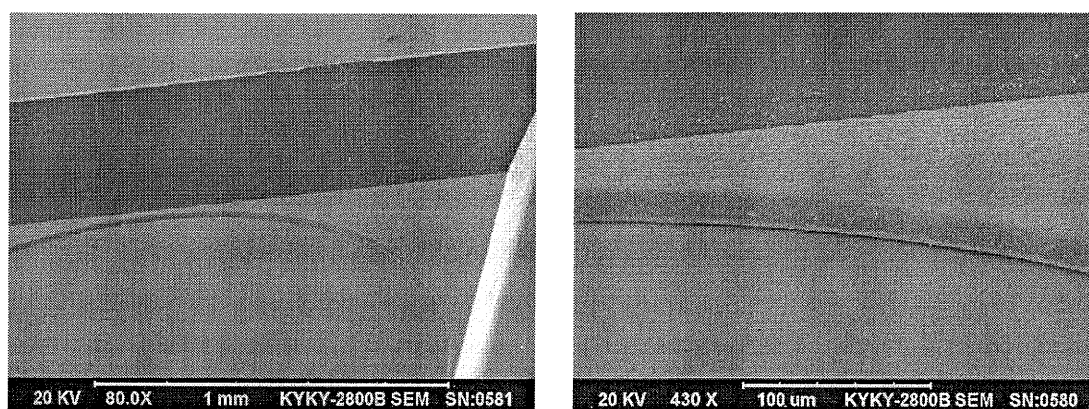


图 2-4-3 圆形振动膜侧墙的放大 SEM 照片

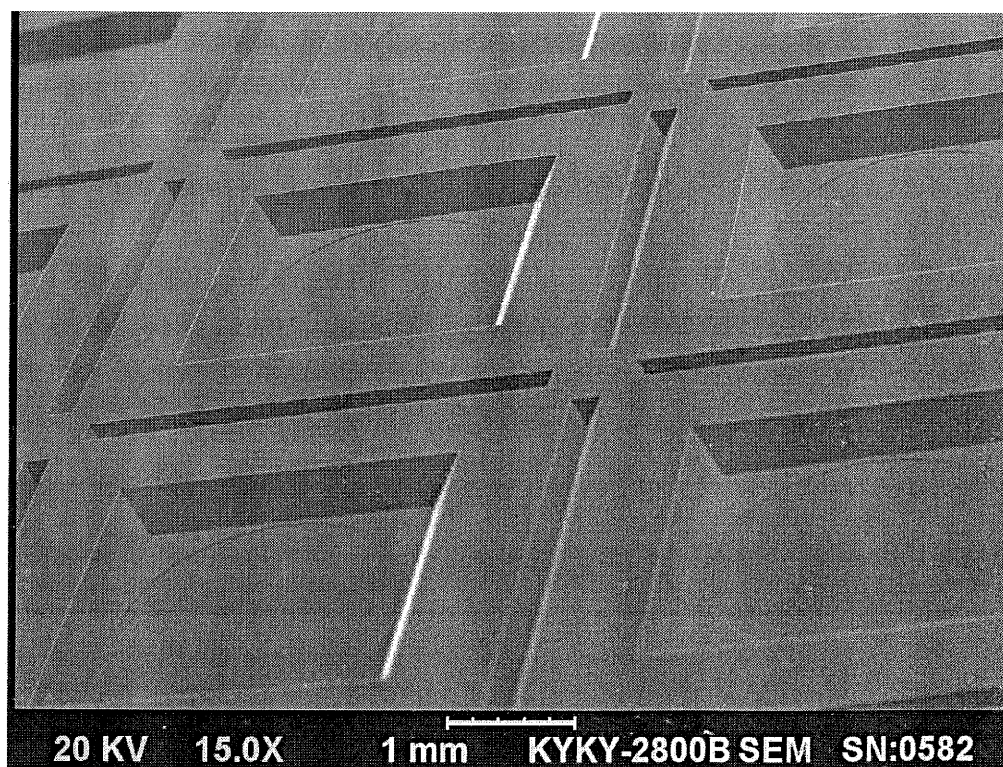


图 2-4-4 硅片背面多个器件体硅刻蚀后的 SEM 照片

2.4.4 圆形振动膜硅微压电传声器的测试结果

我们所制备的圆形振动膜硅微压电传声器的振动膜半径为 1 mm，氮化硅薄膜厚度为 1 μm ，ZnO 为 1 μm ，上下电极分别为 0.14 μm 和 0.12 μm ，电极为半径为 1 mm 的圆形电极，即与振动膜的面积相同。图 2-4-5 为测得传声器的灵敏度和噪声的频响曲线。在 $f = 1 \text{ KHz}$ 时，传声器的灵敏度为 -68 dB (ref 1V/Pa)，A 计权噪声为 -103 dB (ref 1V/Pa)。

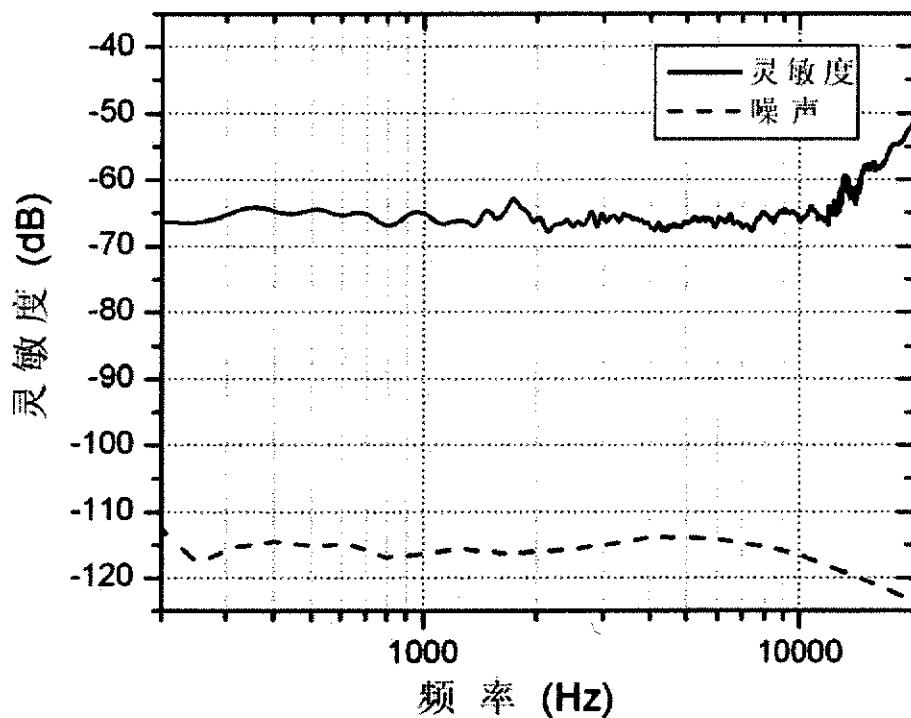


图 2-4-5 圆形振动膜硅微压电传声器灵敏度及噪声频响曲线

在上面制备的圆形振动膜硅微压电传声器的研究基础上，根据理论分析对传声器的电极半径及 ZnO 厚度做了相应的参数调整：电极半径设计为 600 μm ，ZnO 薄膜厚度为 0.6 μm 。图 2-4-7 为制备完成的优化设计后的硅微压电传声器的灵敏度测试曲线，在 $f = 1 \text{ KHz}$ 时，其灵敏度提高为 -60 dB (ref 1 V/Pa)，A 计权噪声为 -103 dB。有结果可知，圆形振动膜传声器的灵敏度明显高于方形振动膜的传声器，我们分析认为由于圆形振动膜有利于应力释放，增大振动膜的位

移；而且没有应力集中的角区域，使制备完成的振动膜平整度高，振幅分布稳定，有利于灵敏度的提高。而采用优化电极面积的设计使得换能器的灵敏度有了进一步的提高，达到了 1 mV/Pa 水平，基本达到国外报道水平。

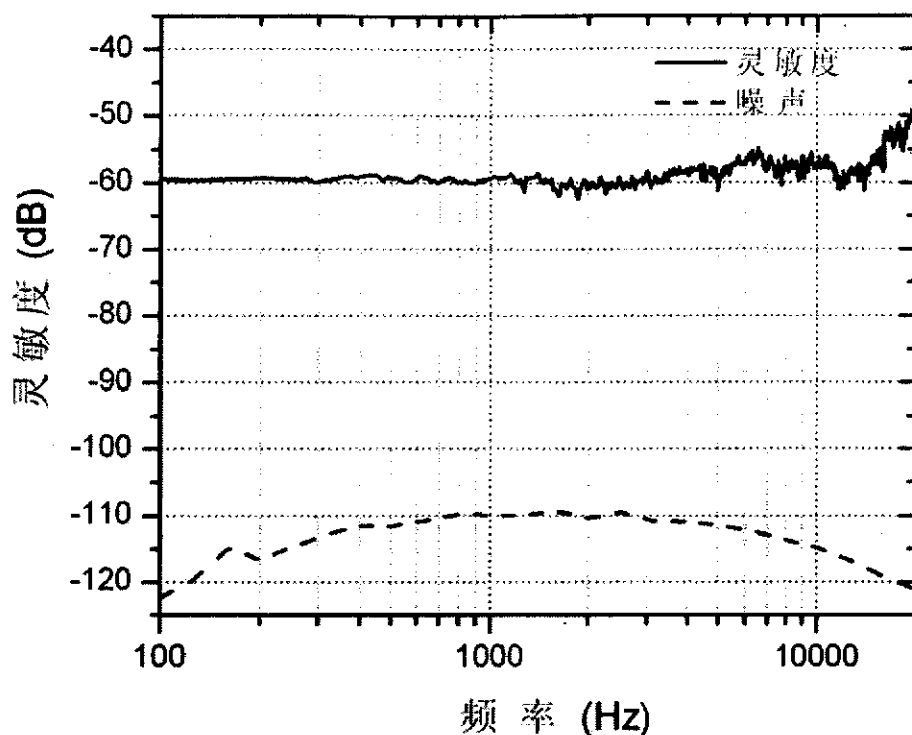


图 2-4-5 优化设计后的圆形振动膜硅微压电传声器的灵敏度及噪声测量曲线

2.5 聚酰亚胺振动膜硅微压电传声器的研制

由于硅微压电传声器是靠振动膜在声压下的受迫弯曲振动来传感信号的，而日常的可听声的声压是非常小的，因此柔软的谐振频率较低的振动膜也是提高灵敏度的重要方法。最为常用的振动膜材料是氮化硅薄膜^{[5][6][11][19-20]}，其弹性常数及薄膜的残余应力较大(10^2 MPa)，因此振动膜的谐振频率较高，接收灵敏度较低。目前提高灵敏度的主要方法为：

1) 增大振动膜的面积，降低振动膜的谐振频率来提高低频响应^{[6][12]}，其缺点是芯片面积较大；

2) 采取悬臂梁结构来降低振动膜的谐振频率^{[9][10][11]}，其问题是存在声漏，音频响应不平坦；

3) 采用分割多电极串联结构^{[5][16]}，增大输出信号幅度，其缺点是多对电极跨

层互联工艺复杂度较高。

为了解决这一问题,我们制作了一种新型的采用聚酰亚胺薄膜 (Polyimide) 作为振动膜的硅微压电传声器。聚酰亚胺材料的弹性常数较小,约为聚酰亚胺材料的 $1/20$; 而且聚酰亚胺薄膜的应力也很小,只有聚酰亚胺薄膜的 $1/4$ 左右,因此它能够降低振动膜的谐振频率,提高灵敏度。另外,聚酰亚胺材料的电性能及介电性能也很好,能有效减小器件的寄生电容,提高信噪比。该硅微压电传声器的制作工艺较为简单,只需用 4 块 MASK 即可完成,能有效节约制作成本。

2.5.1 聚酰亚胺振动膜的硅微压电传声器制作方法

基于聚酰亚胺振动膜的硅微压电传声器的制作方法如图 2-5-1 所示。

a) 选用双面抛光的 $\langle 100 \rangle$ 晶向硅片作为基底,首先用低压化学气相淀积 (LPCVD) 在硅片的正反两面生长氮化硅薄膜,厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。硅片正面的氮化硅薄膜用来作为体硅刻蚀的阻挡层,保护聚酰亚胺薄膜。硅片背面的氮化硅薄膜用来做体硅深刻蚀的掩膜层;

b) 在硅片正面的氮化硅薄膜上面制作厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺薄膜;

c) 在 PI 上蒸发镀 Au 薄膜,厚度为 $0.3\ \mu\text{m}$,用湿法腐蚀形成下电极图形。在 Au 上用磁控溅射方法生长 ZnO 压电薄膜,厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。用磷酸腐蚀形成下电极的引出孔;

d) 为了保护 ZnO 薄膜,采用剥离法制备上电极 Au 薄膜。在 ZnO 上用光刻胶并用负版光刻形成上电极图形,热蒸发镀 Au 薄膜,厚度为 $0.08\ \mu\text{m}$ 。

e) 将硅片置入丙酮中浸泡,除去剩余光刻胶及附着在光刻胶上的 Au,完成上电极 Au 的制备;

f) 用反应离子刻蚀 (ICP) 刻蚀硅片背面的氮化硅,形成体硅刻蚀的窗口图形;

g) 在硅片正面甩涂 KOH 保护胶 B2,使用浓度为 30% KOH 溶液对硅片背面进行刻蚀,当 KOH 刻蚀到 PI 下的氮化硅时停止;

h) 在丙酮溶液中去掉 B2 胶;

i) 硅片背面用 (ICP) 干法刻蚀氮化硅保护层,释放出聚酰亚胺振动膜,完成硅微压电传声器的制作。

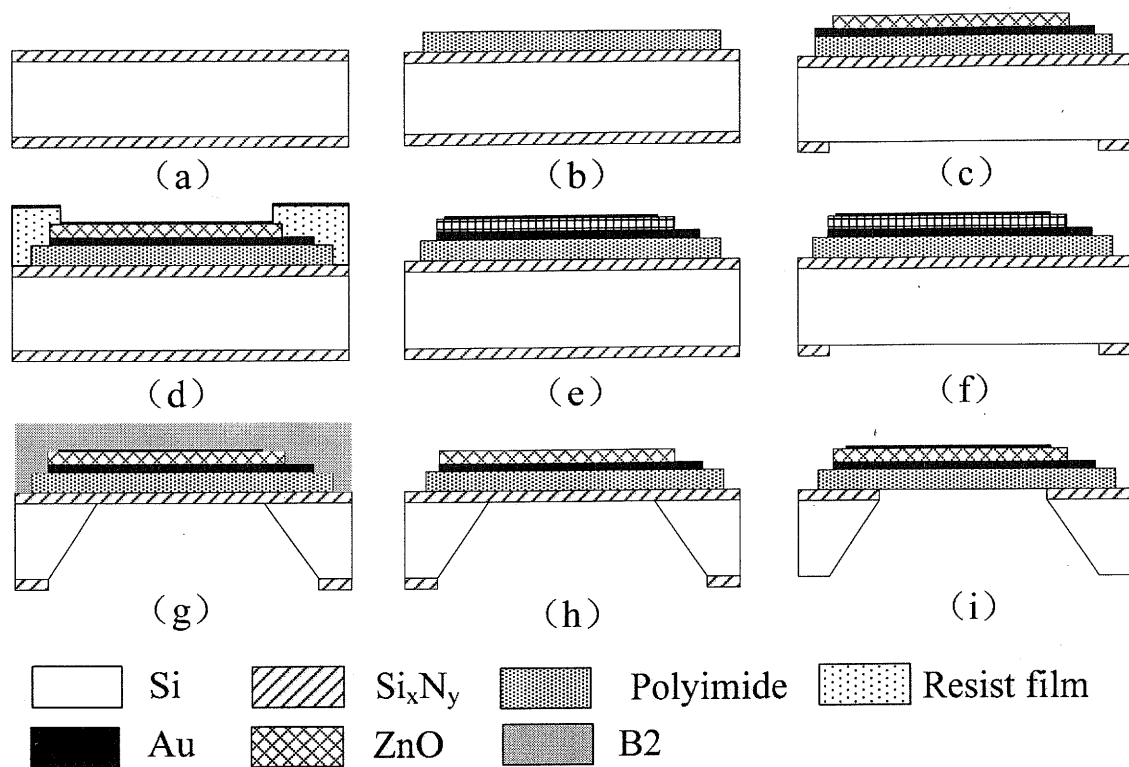


图 2-5-1 聚酰亚胺振动膜硅微压电传声器工艺流程图

图 2-5-2 为我们制备完成的以聚酰亚胺薄膜为振动膜的 MEMS 压电传声器照片，振动膜为 $2000\ \mu\text{m} \times 2000\ \mu\text{m}$ 。图 2-5-2 左为传声器正面照片，图 2-5-2 右为换能器背面照片。图 2-5-3 为传声器背面的放大照片，可以清晰看到聚酰亚胺振动膜以及硅侧墙结构，由于最后一步采用 ICP 干法刻蚀阻挡层氮化硅，因此硅侧墙的表层也部分刻蚀而不那么光滑。在侧墙与聚酰亚胺振动膜的连接处可以看到未被 ICP 刻蚀的氮化硅阻挡层的边缘。

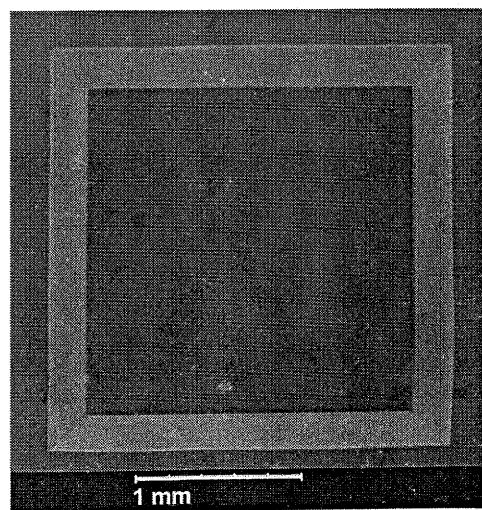
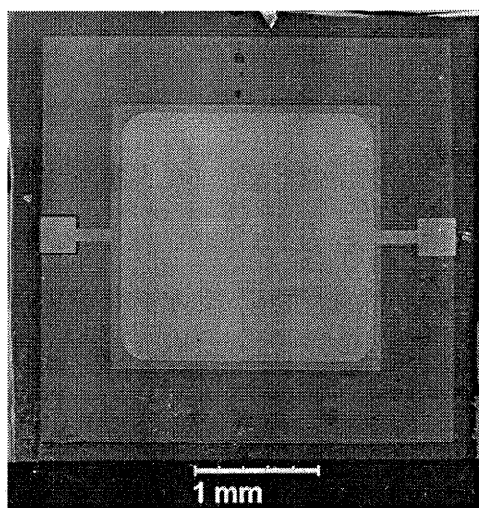


图 2-5-2 传声器 SEM 照片，左为正面图，右为背面图。

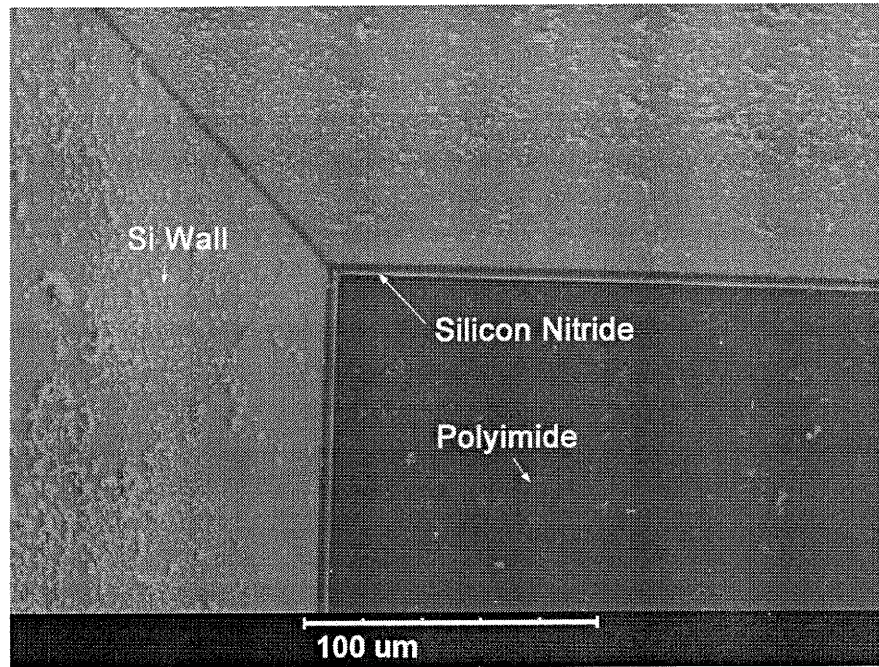


图 2-5-3 传声器芯片背面放大 SEM 照片

2.5.2 聚酰亚胺振动膜的制备

PI 薄膜的制备主要分为甩胶和升温缩聚两个过程：首先用低速（500 转/min）将胶初步甩匀，时间为 10s；然后用高速（1500 转/min）甩胶，时间约为 30s；最后加热缩聚，进行梯步升温，依次升温至 150℃、200℃、280℃，并各保温 1 小时，即可获得聚酰亚胺薄膜。通过实验发现，第一步 150℃ 的保温过程很容易发生起泡现象，我们认为是薄膜没有充分干燥就进行升温的原因。为解决该问题，我们在第一步梯度升温之前，用热板对聚酰亚胺薄膜进行快速干燥，温度 80℃，时间为 20s，很好的解决了产生气泡的问题。图 2-5-4 为制备完成的传声器振动膜的截面图。可以看到聚酰亚胺薄膜的厚度约为 2 μm ，且较为均匀，在其上制备的 Au 电极及 ZnO 压电薄膜也较为平整。图中截面有部分缺损，是由于 MEMS 传声器的振动膜很薄（2.88 μm ），在切割截面的过程中造成的机械破损所致。

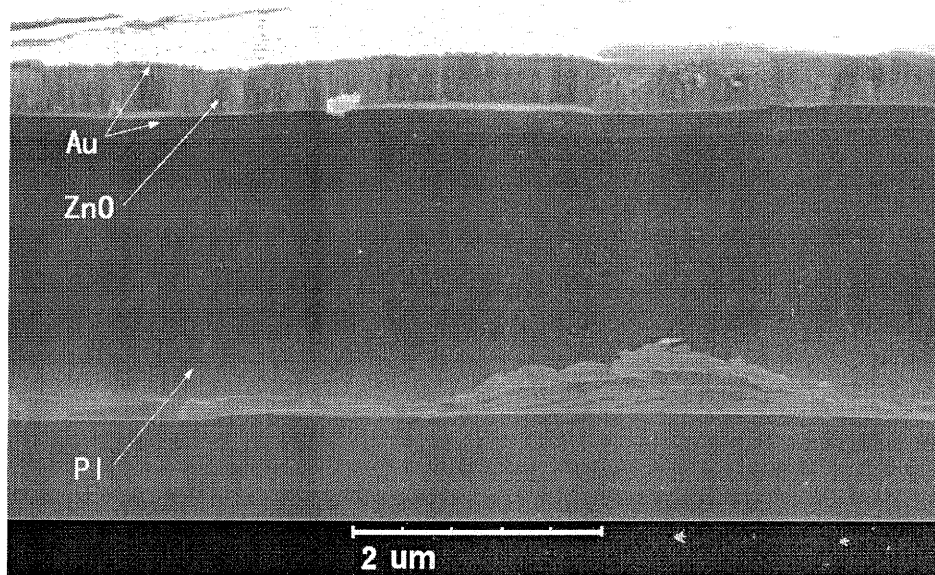


图 2-5-4 传声器振动膜的剖面 SEM 照片

2.5.3 ZnO 薄膜在聚酰亚胺薄膜上的制备

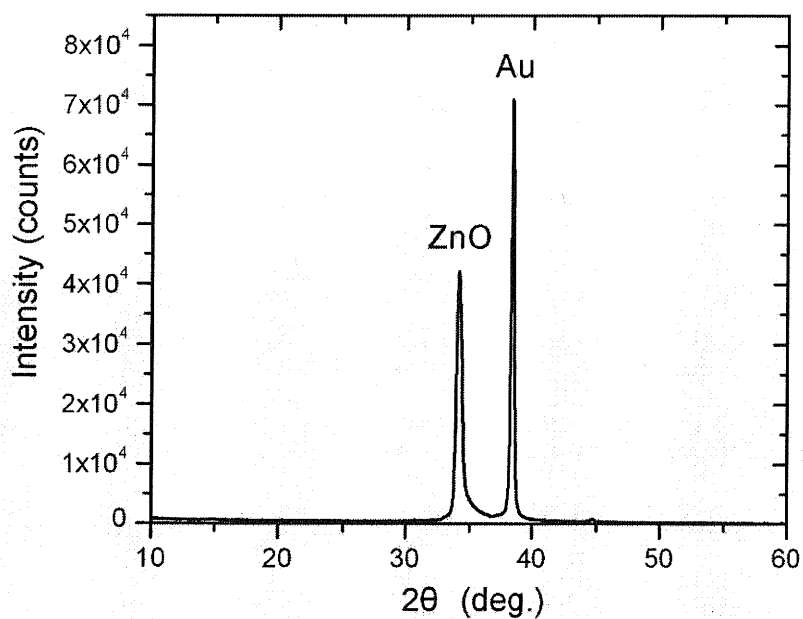


图 2-5-5 ZnO 薄膜的 X 射线衍射图

硅微压电传声器的 ZnO 薄膜采用磁控溅射方法制备, 为保证 ZnO 材料的晶向,

我们选用了较厚的下电极 Au ($0.3\ \mu\text{m}$) 作为引导层。图 2-5-5 为制备在 Au 电极上的 ZnO 薄膜 ($0.5\ \mu\text{m}$) 的 X 射线衍射图, 可以看出最高强度衍射峰位于 $2\theta = 34^\circ$ 附近, 说明在 PI 振动膜的 Au 下电极制备的 ZnO 薄膜沿 (002) 方向择优取向。

2.5.4 聚酰亚胺振动膜硅微压电传声器的测试结果

图 2-5-6 为本文制作的聚酰亚胺振动膜硅微压电传声器的在 1 KHz 标准声源激励下的接收信号波形。

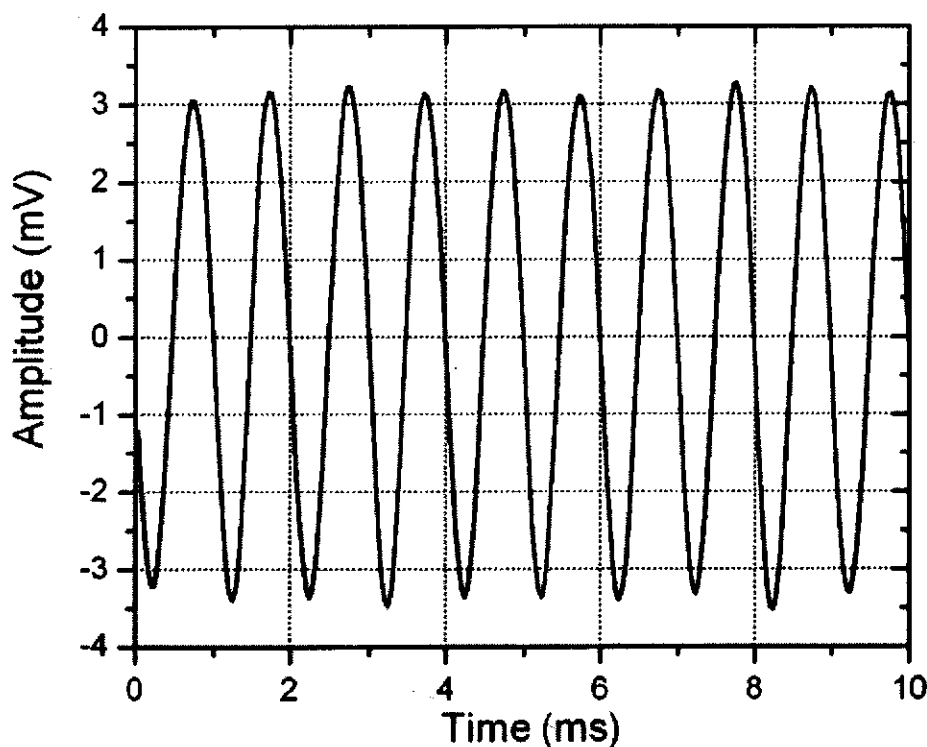


图 2-5-6 传声器 1KHz 接收信号

采用比较法对聚酰亚胺振动膜传声器进行测试。图 2-5-7 为测得的传声器的灵敏度频响曲线, 实线和虚线分别为相同尺寸的采用 Polyimide 振动膜和氮化硅振动膜的 MEMS 传声器的结果。由图 2-5-7 可以看出, 聚酰亚胺振动膜压电传声器的灵敏度曲线在音频范围内频响较为平坦, 在 23 KHz 有一峰值, 即为其一阶谐振频率。在 $f = 1\ \text{KHz}$ 时, 聚酰亚胺压电传声器的灵敏度为 $1.1\ \text{mV/Pa}$ ($-59\ \text{dB}$, ref $1\ \text{Pa/V}$), 较本文 2.3 制作的氮化硅振动膜传声器提高了 11 dB。传声器的噪声测量结果如图 2-5-8 所示。聚酰亚胺振动膜传声器的 A 计权噪声为 $-103.5\ \text{dB}$, 噪声水平相比氮化硅振动膜的传声器 ($-105\ \text{dB}$) 略高但并不明显。

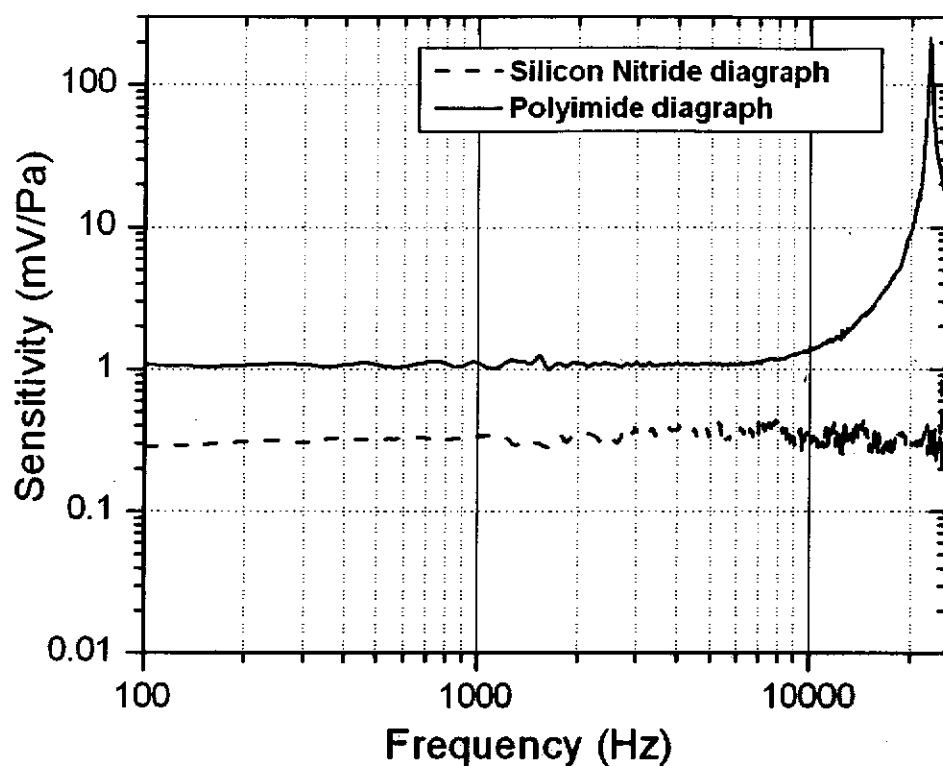


图 2-5-7 传声器的灵敏度频响曲线.

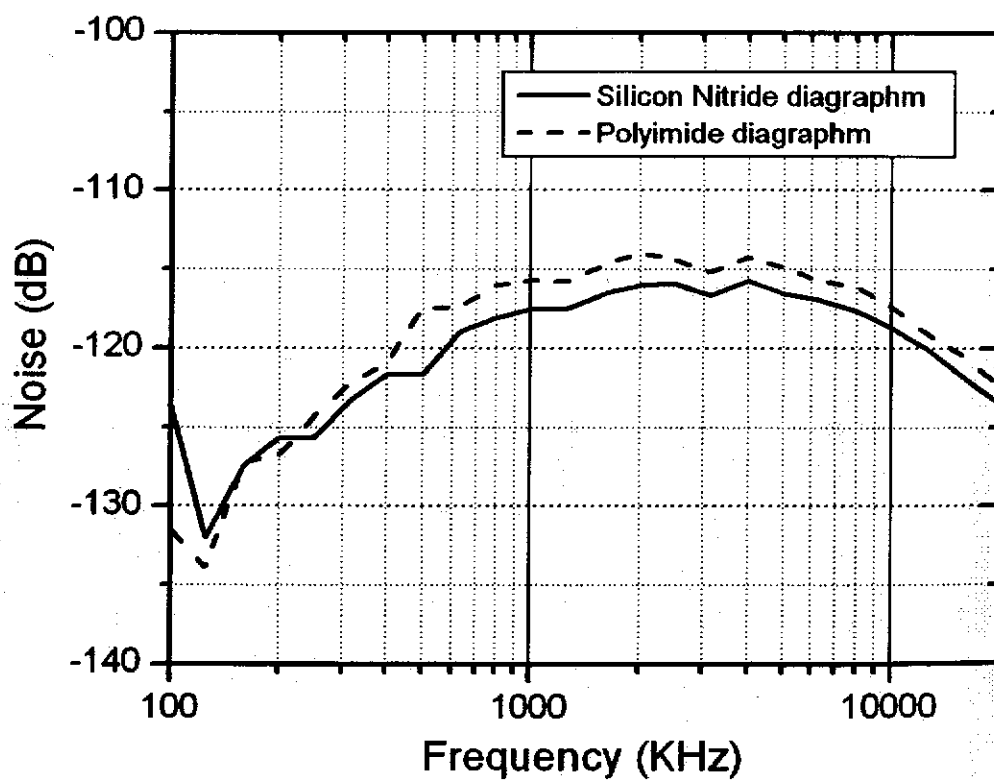


图 2-5-8 传声器的噪声频响曲线

我们设计并制作了一种能够有效降低振动膜谐振频率并提高音频灵敏度的以 Polyimide 材料作为振动膜的新型 MEMS 压电传声器。测得 MEMS 传声器的灵敏度较传统的氮化硅振动膜的 MEMS 传声器有明显提高,且低频响应平坦。达到了 1.1 mV/Pa 水平,基本达到 ZnO 硅微压电传声器的国际先进水平。本工作作为研制低谐振频率、高灵敏度的 MEMS 压电传声器提供了一种新的实验方法。

2.6 硅微压电水听器的研制

2.6.1 硅微压电水听器的制作及封装

硅微压电水听器是采用硅微压电传声器作为传感元件,由于硅微压电水听器主要应用于水下,所以对其封装的结构要求比较特殊:首先,要满足声波的可传导性;其次,为了避免敏感的核心原件及基本电路被外部物质污染或防止水的泄露造成电短路,传感元件需要被密封起来。

在设计时,我们采用了将硅微芯片粘接在标准电路基板上,利用硅微芯片的反向(背面)可接收声压信号的特点,在基板上开启一个可接收声信号的孔(小于 $\phi 1\text{mm}$),同时,由于将芯片可接触水的一面电极接地,并将其粘接部分用胶粘保持水密性(见图 2-6-1)。

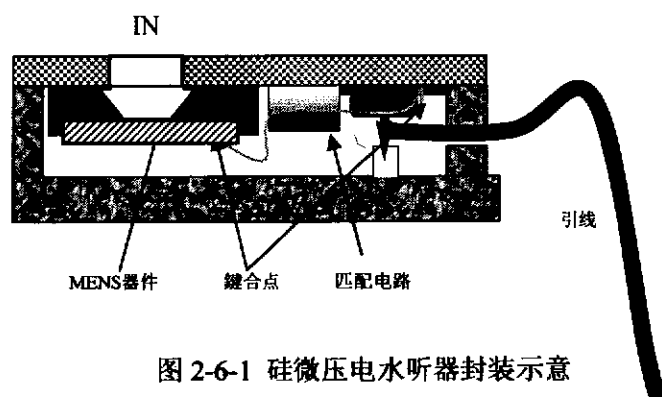


图 2-6-1 硅微压电水听器封装示意

然后将相应的电子元器件焊接到电路基板上和底板上;由于封装器件用于水下,而封装的器件内部空间为空气隙和器件的固定,所以将内部空间做到尽可能的小($8\times 4\times 1\text{mm}$),以保证内外压差不至于对芯片造成损坏。封装后的成品外形尺寸为: ($10\times 6\times 4\text{mm}$),实物样品见图 2-6-2。

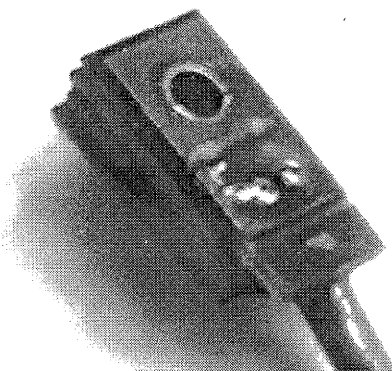
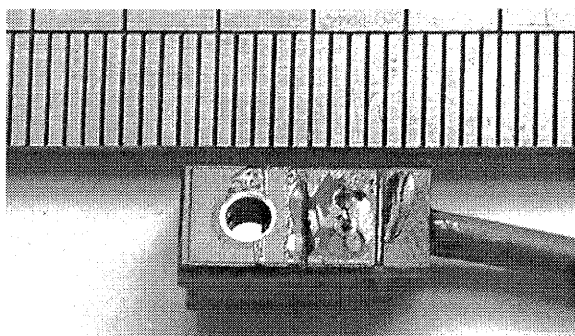


图 2-6-2 硅微压电水听器封装实物

2.6.2 硅微压电水听器系统电路

硅微压电水听器的测试电路仅有一个高输入阻抗低噪声的跟随（放大）器。跟随放大器可用现成的 JFET 或者用 BiCMOS 做成专用的传声器的放大器均可。本实验装置的是 JFET 管，它加了两个隔直电容（一在输入端，一在输出端）和一个可调节放大倍数的电阻构成。（见图 2-6-3）

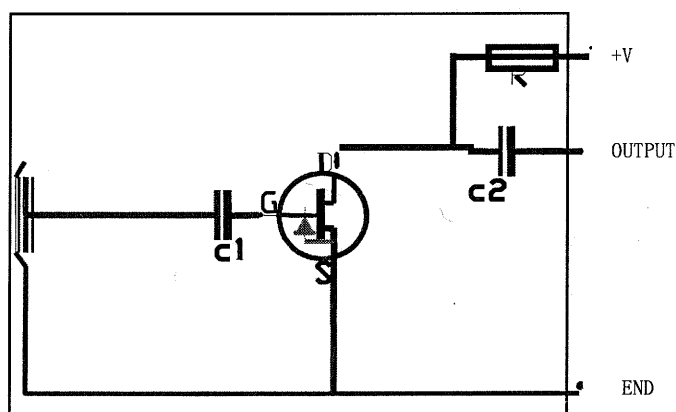


图 2-6-3 硅微压电水听器电路示意

2.6.3 硅微压电水听器的测试方法及测试结果

受水下测量环境的条件所限，依据标准《声学 水声换能器自由场校准方法》GB/T 3223—1994 和《声学 水听器低频校准方法》GB/T 4130—2000 的要求，

采取分频段测量的方法完成，低频（20Hz~1 KHz）采用振动液柱进行，高频段（2 KHz~20 KHz）在大型消声水池（自由场）中采用比较法进行。

2.6.3.1 振动液柱法

依据测量标准，我们制作了一个刚性圆筒状容器(内径小于波长的顶端开口的筒)见图 2-6-4。

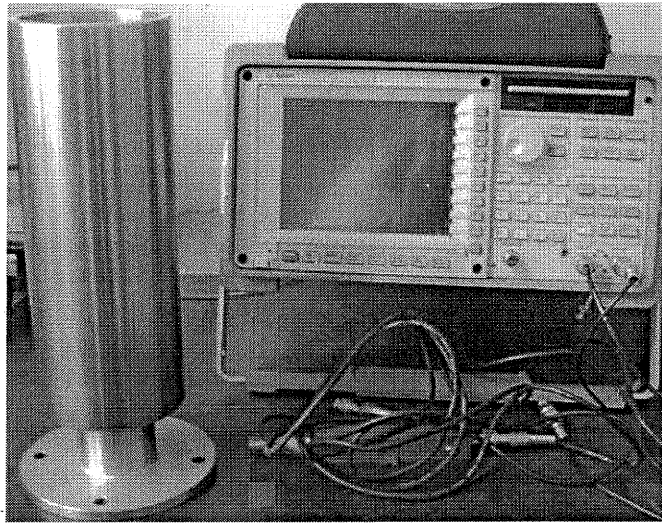


图 2-6-4 振动液柱法水桶及仪器

振动液注法测量的原理如图 2-6-5 所示。主要使用容器底部的振动加速度计来测量，

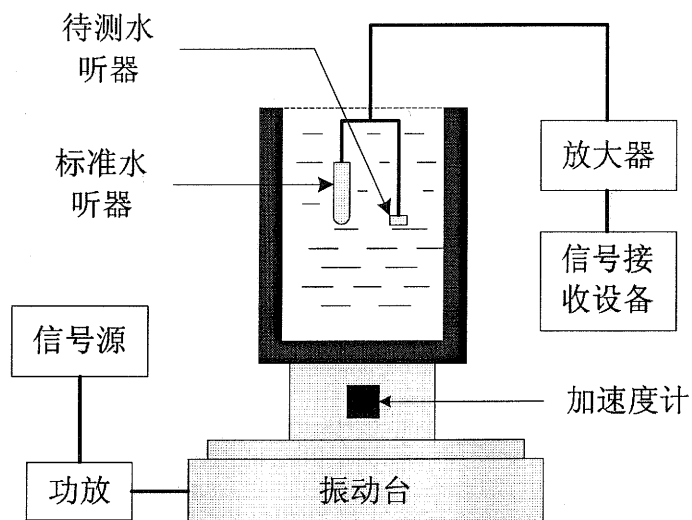


图 2-6-5 振动液柱法示意图

水听器的声压灵敏度为：

$$M_J = \frac{U_J}{\rho h} \times \frac{M_a}{U_a}$$

式中： M_J 为水听器的声压灵敏度， U_J 为水听器输出端的开路电压， ρ 为液体的密度， h 为水听器中心至液面的深度， M_a 为加速度计的灵敏度， U_a 为加速度计的输出端的开路电压。

高频段我们采用同时比较法进行测量，将待测水听器和标准水听器同时放入容器内声压相同的区域中，测出水听器输出端的开路电压，待测水听器的声压灵敏度为：

$$M_x = M_s \frac{U_x}{U_s}$$

式中： M_x 为待校水听器的声压灵敏度， M_s 为标准水听器的声压灵敏度， U_x 为待校水听器输出端的开路电压， U_s 为标准水听器输出端的开路电压。声学研究所消声水池长 15m、宽 7.5m、深 5m 其测量频率响应在 2 KHz~600 MHz。

图 2-6-6 为振动液柱法测得的低频段水听器灵敏度曲线，在 $f=1$ KHz，灵敏度约为 -190 dB (ref 1 V/ μ Pa)。图 2-6-7 为消声水池内比较法测得的高频段频响曲线。从测量结果看，水听器的低频响应较好，但在高频段出现了明显的降低，其原因初步分析可能由于振动膜厚度过小使得谐振频率较低造成；另外，水听器所采用的防水封装在屏蔽干扰方面不够理想，因此测量结果也受到电磁干扰的影响。

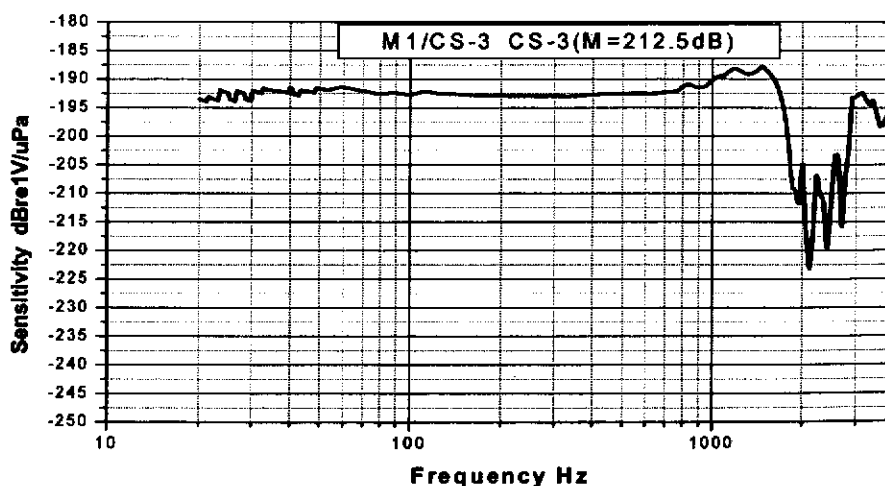


图 2-6-6 振动液柱法测量水听器响应

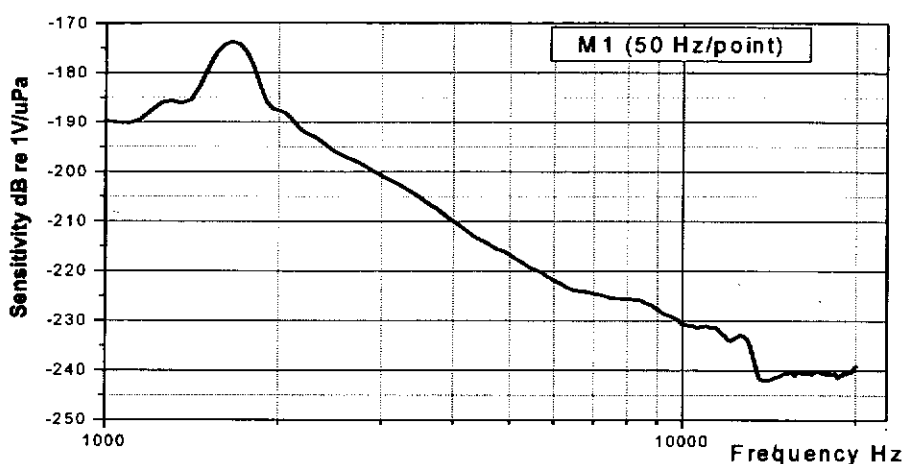


图 2-6-7 自由场测量水听器频响曲线

2.6.3.2 耦合腔互易法

耦合腔互易法校准原理与国标GB/T 3223 中水声换能器自由场互易校准原理相同,不同的只是把发射器(F)、互易换能器(H)、[接收]水听器(J)放在充满液体的刚性腔内,在均匀的压力场下校准。耦合腔示意图如图 2-6-8 所示。按图 2-6-9 校准步骤作三次测量,分别测量出发射器(F)和互易换能器(H)的激励电流 I_F 、 I_H 及互易换能器(H)和水听器(J)输出端的开路电压 U_{FH} 、 U_{FJ} 、 U_{HJ} ,当 $I_F=I'_F$ 时则可以得到水听器的声压灵敏度为:

$$M_{PJ} = \left[\frac{U_{FJ} U_{HJ}}{U_{FH} I_H} J \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中: M_{PJ} —水听器的声压灵敏度; U_{FJ} 为发射器(F)发送时,水听器(J)输出端的开路电压; U_{FH} —发射器(F)发送时,互易换能器(H)输出端的开路电压; U_{HJ} 为互易换能器(H)发送时,水听器(J)输出端的开路电压; I_H 为互易换能器(H)的激励电流; J 为耦合腔互易常数。

当耦合腔的尺寸远小于腔内液体声波波长时,互易常数为:

$$J = \omega C_a$$

其中 C_a 为耦合腔液体及其边界的声顺。

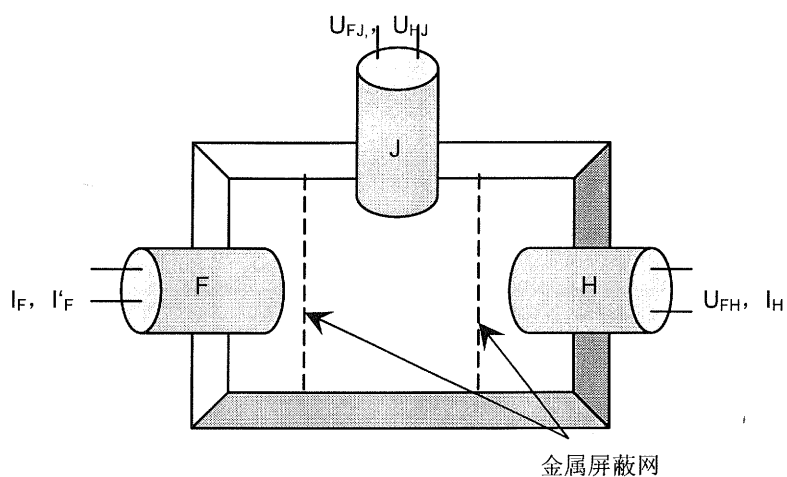


图 2-6-8 耦合腔示意图

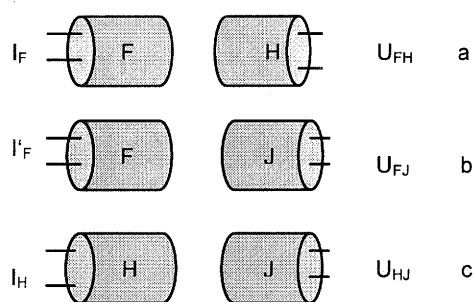


图 2-6-9 校准步骤图

图 2-6-10 为实际制作的耦合腔照片, 图 2-6-11 为采用耦合腔法测得的传声器灵敏度曲线。与前面用分段法测得的结果大致接近。

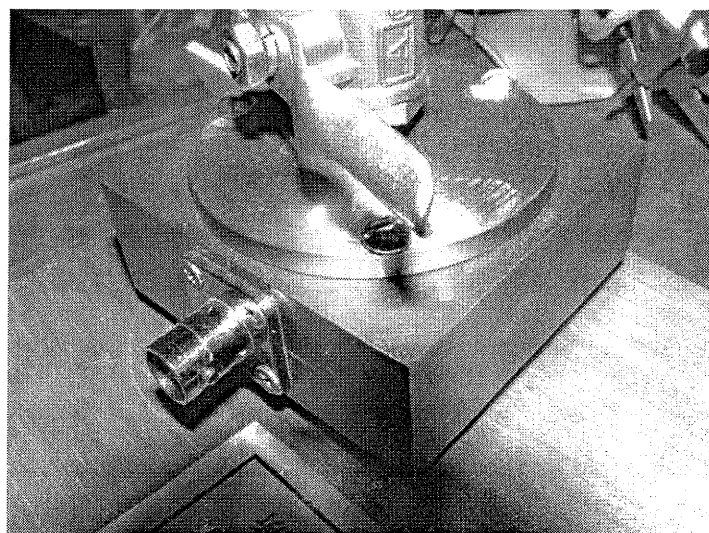


图 2-6-10 耦合腔实物图片

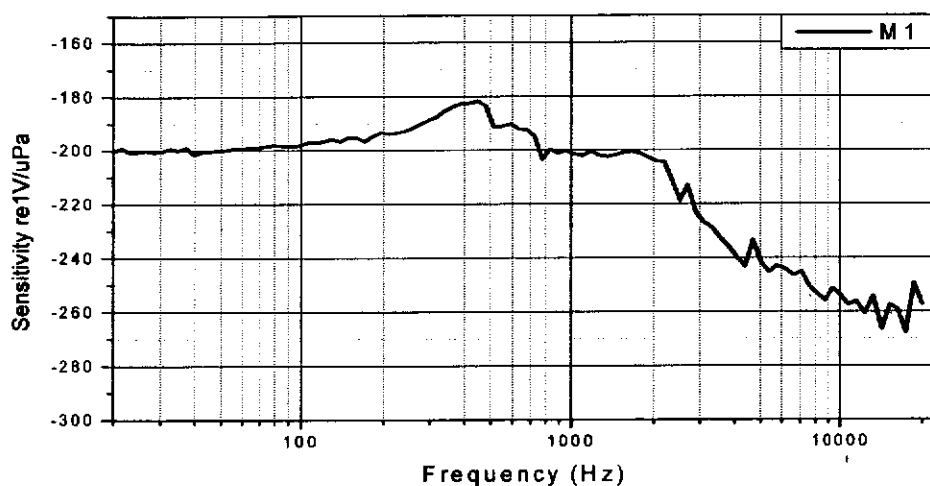


图 2-6-11 耦合腔测量水听器频响曲线

2.7 本章小结

本文推导了硅微压电传声器的接收响应，计算了均匀载荷下圆形振动膜和方形振动膜硅微压电传声器的接收响应，并根据分析结果进行了压电层厚度及电极形状的优化设计。分别设计并制备了方形振动膜、圆形振动膜及基于聚酰亚胺振动膜的硅微压电传声器芯片，进行了灵敏度及噪声测量。并根据理论分析，对传声器进行了优化设计，使硅微压电传声器的灵敏度得到较大提高。在硅微压电传声器的基础上研制了硅微压电水听器，分别采用了振动液柱与耦合腔互易法测量了水听器的灵敏度曲线。

参考文献

- [1] Benedetto V. 2006 Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE IEEE 2006
- [2] Bahram Azizollah Ganji, Burhanuddin Yeop Majlis. "Condenser Microphone performance Simulation using equivalent circuit method", IEEE, 2004: 22-29.
- [3] W. Kuhnel and G. Hess, "A silicon condenser microphone with structured back

- plate and silicon nitride membrane", *Sensors and Actuators A*, vol.30, pp.251-258, 1992.
- [4] P.C. Hsu, C. H. Mastrangelo, and K. D. Wise, "A high sensitivity polysilicon diaphragm condenser microphone", *IEEE*, 1998. 580-585.
- [5] Ried R P, Kim E S, Hong D M et al. Piezoelectric microphone with on-chip CMOS circuits. 1993 *J. Microelectromech. Syst.* 2 (3): 111-119
- [6] Kim E S, Kim J.R and Muller R S. Improved IC-compatible piezoelectric microphone and CMOS process, 1991 *Int Conf Solid State Sens Actuators IEEE* 1991: 270-273
- [7] Zink C, Pinceau D, Defay E et al. Development and characterization of membranes actuated by a PZT thin film for MEMS applications. 2004 *Sensors and Actuators A* 115: 483
- [8] Horowitz S B, Toshikazu Nishida, Cattafesta III L N et al. Design and characterization of a micromachined piezoelectric microphone. 2005 *11th AIAA aeroacoustics Conference*. 2998: 1
- [9] Saleh, S.A, Hamed Elsimary, Mohamed, H.F et al. Design of piezoelectric cantilever microphone and its MEMS-acoustical circuit for hearing aid devices. 2003 *Proc. 46th IEEE International Midwest Symp. on* 2: 27
- [10] Ren T L, Zhang L T, Liu L T et al. Design of a PZT based cantilever structure. 2001 *Solid-State and Integrated-Circuit Technology Proceedings* 6th. Vol.2: 789-792
- [11] Lee S S, Ried R P, and White R M. Piezoelectric cantilever microphone and microspeaker. 1996, *J. Microelectromech. Syst.* 3 (2) 238
- [12] Ko S C, Kim Y C, Lee S S et al. Micromachined piezoelectric membrane acoustic device. 2003 *Sensors and Actuators A* 103 130-134
- [13] S. 铁摩辛柯. 板壳理论, 科技出版社, 1977
- [14] 栾桂东, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器与换能器阵列, 北京大学出版社, 2005
- [15] 徐芝纶. 弹性力学(下册), 高等教育出版社, 1990

- [16] 杨楚威, 黄歆, 李俊红, 解述, 魏建辉, 马军, 汪承灏. 硅微 ZnO 压电薄膜传声器的研制, 应用声学, 2003, 22(5): 1-4
- [17] 杨楚威, 黄歆, 解述等. 硅微ZnO压电薄膜传声器的研制, 声学技术, 2002, 21(增刊): 257-258.
- [18] 杨楚威. 硅微压电传声器的研究. 中国科学院声学研究所, 硕士毕业论文, 2003.
- [19] 杨楚威, 李俊红, 黄歆, 汪承灏. 圆形振动膜 ZnO 压电微传声器的研制, 应用声学, 2006, 25(4): 197-200
- [20] 郝震宏, 汤亮, 李俊红, 乔东海. 基于圆形振动膜的硅微压电超声换能器的设计, 声学技术, 2006, 25(4): 25-27
- [21] Woon Seob Lee, Yong Chul Kim, Jin Seung et al. Fabrication of circular diaphragm for piezoelectric acoustic devices. IEEE, 2005: 307-310
- [22] 李俊红, 徐联, 汪承灏. PZT 压电硅微传声器的设计与制备, 声学技术, 2006, 25(增刊): 557-558
- [23] 黄庆安. 硅微加工技术. 科学技术出版社. 1996: 64-71

第三章 低频硅微压电超声换能器的研制

3.1 低频硅微压电超声换能器设计

低频硅微压电超声换能器结构特点与硅微压电传声器类似,但工作频率为振动膜的弯曲振动的谐振频率^[1-11]。振动膜的谐振频率主要由振动膜的厚度和边长决定,因此,相对于音频的压电传声器而言,硅微压电超声换能器需要增大振动膜的厚度或减小振动膜的尺寸,来提高振动膜的弯曲谐振频率。

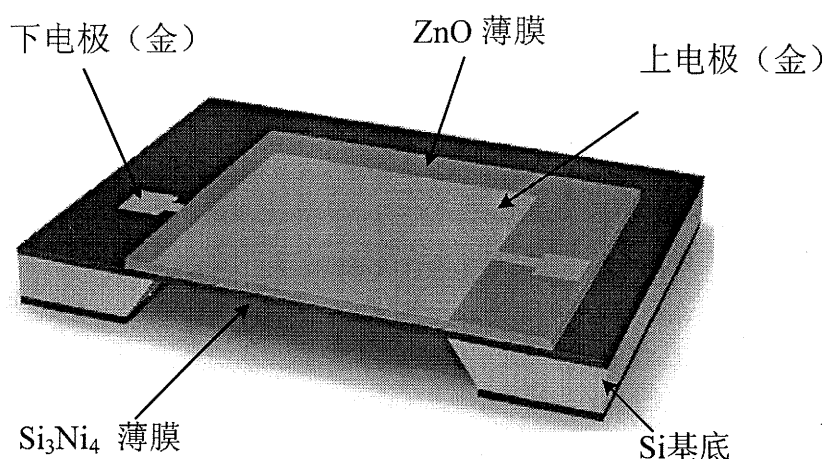


图 3-1 硅微压电超声换能器示意图

3.2 低频硅微压电超声换能器的理论分析

对于硅微压电超声换能器,它的振动一般是受两种力控制,一种是材料的弹性力,一种是MEMS技术制备过程形成的残余应力,通常为张应力。在低频时,即硅微压电换能器作传声器时,它是受张力控制^[12],而在几兆赫级硅微压电超声换能器则是受弹性力控制^[13]。本文则选择中间频率范围即较低频率的硅微压电超声换能器进行理论分析,研究这两种力对硅微压电超声换能器的谐振频率及振动膜振幅分布的影响。并研制了一种制作在硅基底上,以ZnO薄膜作为压电材料、氮化硅薄膜为支撑层的Au/ZnO/Au/Si₃N₄结构的硅微压电超声换能器(如图3-1所示)进行实验验证。

3.2.1 忽略残余应力的薄板理论分析与计算

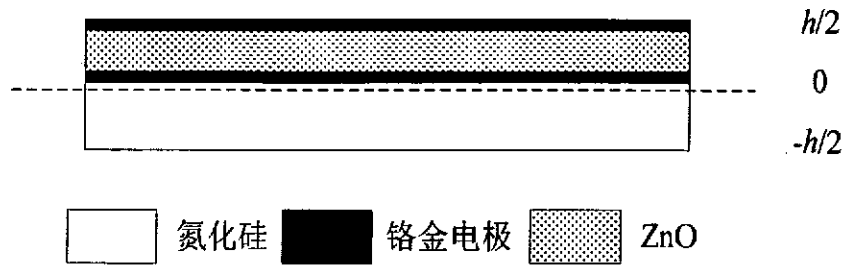


图 3-2 复合四层振动膜剖面示意图

硅微压电超声换能器的振动膜为方形。振动膜可认为是四边固定的方形薄板。对于单层矩形薄板，在忽略其内应力时其自由振动方程为：

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \frac{\rho h}{D} = 0 \quad (3.1)$$

式中 w 为薄板的位移。 ω 为薄板的振动频率。 D 为薄板的弯曲刚度：

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \text{ 其中 } E、\rho、h、\nu \text{ 分别为薄板的杨氏模量、密度、厚度和泊松比。}$$

对于边界固定的方形薄板，其边界上应满足条件 $w=0$ ， $\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$ 。根据板

振动理论，满足上述边界条件的简谐解为^[14]：

$$w(x, y) = W(x, y) \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.2)$$

其中 W 为振形级数：

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_{ij} \left[(-1)^i \left(\frac{x^3}{a^3} - \frac{x^2}{a^2} \right) + \left(\frac{x^3}{a^3} - 2 \frac{x^2}{a^2} + \frac{x}{a} \right) - \frac{1}{i\pi} \sin \frac{i\pi x}{a} \right] \times \left[(-1)^j \left(\frac{y^3}{a^3} - \frac{y^2}{a^2} \right) + \left(\frac{y^3}{a^3} - 2 \frac{y^2}{a^2} + \frac{y}{a} \right) - \frac{1}{j\pi} \sin \frac{j\pi y}{a} \right] \quad (3.3)$$

式中 A_{ij} 为待定系数。将 (3.2) 式代入 (3.1) 式可以得到关于系数 A_{ij} 的齐次线性方程组：

$$\begin{aligned}
& A_{mn} \left[\left(\frac{m^2 + n^2}{a^2} \right)^2 - \frac{\alpha^4}{\pi^4} \right] - \frac{4}{m^2 n^2} \left(\frac{m^4 + 2m^2 n^2}{a^4} - \frac{\alpha^4}{\pi^4} \right) \left\{ 2 + (-1)^n \sum_{j=1}^{\infty} A_{mj} + [1 + 2(-1)^n] \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^j A_{mj} \right\} \\
& - \frac{4}{m^2 n^2} \left(\frac{m^4 + 2m^2 n^2}{a^4} - \frac{\alpha^4}{\pi^4} \right) \left\{ 2 + (-1)^m \sum_{i=1}^{\infty} A_{in} + [1 + 2(-1)^m] \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i A_{in} \right\} + \frac{16}{m^2 n^2 \pi^4} \left(\frac{2m^2 n^2}{a^4} - \frac{\alpha^4}{\pi^4} \right) \\
& \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ 2 + (-1)^i + (-1)^m [1 + 2(-1)^i] \right\} \left\{ 2 + (-1)^j + (-1)^n [1 + 2(-1)^j] \right\} A_{ij} = 0 \quad (3.4) \\
& (m, n = 1, 2, 3, \dots)
\end{aligned}$$

式中 $\alpha^4 = \omega_{mn}^2 \frac{\rho h}{D}$ 。上述方程组 (3.4) 如有非零解则需要其系数矩阵的行列式为零, 因此可以得到关于 ω_{mn} 的频率方程。实际的行列式求解只能对方程组 (3.4) 进行有限项的计算。硅微超声换能器主要是在振动膜的一阶谐振频率工作, 分析表明, 此时取 6 阶进行计算已足够精确, 谐振频率表达式为:

$$f_{11} = \frac{17.994}{\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (3.5)$$

我们所研制的硅微压电超声换能器的振动膜为四层复合薄板结构, 它是由 ZnO 薄膜作压电层, 氮化硅薄膜作支撑层, 金作为上下电极的 Au/ZnO/Au/Si₃N₄ 结构, 如图 3-2 所示。复合振动膜中的金薄膜、氮化硅薄膜均是各向同性薄板。另外近似认为 ZnO 薄膜为各向同性材料^[13]。对于复合薄板可以用等效材料参数作近似, 仍可用 (3.5) 式来计算谐振频率, 这时等效密度 ρ_e 为:

$$\rho_e = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho \cdot dz \quad (3.6)$$

则硅微压电超声换能器的四层复合薄板的等效密度为:

$$\rho_e = \frac{1}{h} \left[(h_{Au1} + h_{Au2}) \rho_{Au} + h_{ZnO} \rho_{ZnO} + h_{Si_3N_4} \rho_{Si_3N_4} \right] \quad (3.6a)$$

等效弯曲刚度 D_e 可以计算为:

$$D_e = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot z^2 dz \quad (3.7)$$

其中 h 为复合薄板的总厚度。则硅微压电超声换能器的四层复合薄板的等效弯曲刚度为:

$$D_e = \frac{1}{3} \frac{E_{Si_3Ni_4}}{1-\nu_{Si_3Ni_4}^2} \left[\left(-\frac{h}{2} \right)^3 - \left(-\frac{h}{2} + h_{Si_3Ni_4} \right)^3 \right] + \frac{1}{3} \frac{E_{Au}}{1-\nu_{Au}^2} \left[\left(-\frac{h}{2} + h_{Si_3Ni_4} \right)^3 - \left(-\frac{h}{2} + h_{Si_3Ni_4} + h_{Au1} \right)^3 \right] \\ + \frac{1}{3} \frac{E_{ZnO}}{1-\nu_{ZnO}^2} \left[\left(-\frac{h}{2} + h_{Si_3Ni_4} + h_{Au1} \right)^3 - \left(\frac{h}{2} - h_{Au2} \right)^3 \right] + \frac{1}{3} \frac{E_{Au}}{1-\nu_{Au}^2} \left[\left(\frac{h}{2} - h_{Au2} \right)^3 - \left(\frac{h}{2} \right)^3 \right] \quad (3.7a)$$

其中 $h, h_{Si_3Ni_4}, h_{Au1}, h_{ZnO}, h_{Au2}$ 分别为四层复合薄板的总厚度、氮化硅薄膜的厚度、下电极金膜的厚度、ZnO薄膜厚度和上电极金膜的厚度。将 (3.7a) 式代入 (3.5) 式就可以计算得到四层复合薄板在固定边界条件下的一阶谐振频率 f_{11} 。由 (3.5) 式可知, 在振动膜材料一定的情况下, 硅微压电超声换能器复合振动膜的一阶谐振频率主要决定于振动膜的面积 (边长) 和振动膜的厚度。

表 1 材料参数

材料	杨氏模量 (GPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)
ZnO	127	0.43	5680
Si ₃ Ni ₄	222	0.26	2800
Au	57	0.35	19320

硅微压电超声换能器当 ZnO 薄膜厚度分别为 1 μm、2 μm 和 3 μm 时, 振动膜的一阶谐振频率与氮化硅薄膜厚度的关系由图 3-3 所示, 计算使用表 1 中的材料参数。此时固定上电极金膜厚度为 0.12 μm, 下电极金膜厚度为 0.14 μm, 振动膜边长为 1 mm。从计算结果看, 对于相同厚度的氮化硅薄膜, ZnO 薄膜的厚度越大, 振动膜的谐振频率越高。而当 ZnO 薄膜厚度一定时, 振动膜的谐振频率也随着氮化硅薄膜的厚度增大而增大。

换能器振动膜的一阶谐振频率与振动膜边长的关系如图 3-4 中虚线所示, 此时 ZnO 厚度为 1 μm, 氮化硅厚度为 1 μm, 上电极金膜厚度为 0.12 μm, 下电极金膜厚度为 0.14 μm。可见振动膜的边长越小, 其一阶谐振频率越高。

但是对这种硅微压电超声换能器的谐振频率的实验结果 (详情见下) 和薄板理论计算结果相差较大。我们认为这是由于硅微压电超声换能器制作过程中, 在其振动膜内部形成一定的残余内应力, 通常为拉应力 (张力), 这种薄膜的残余应力对振动膜的谐振频率产生影响所致, 下面就来讨论残余应力的影响。

u_1
(3.7a)

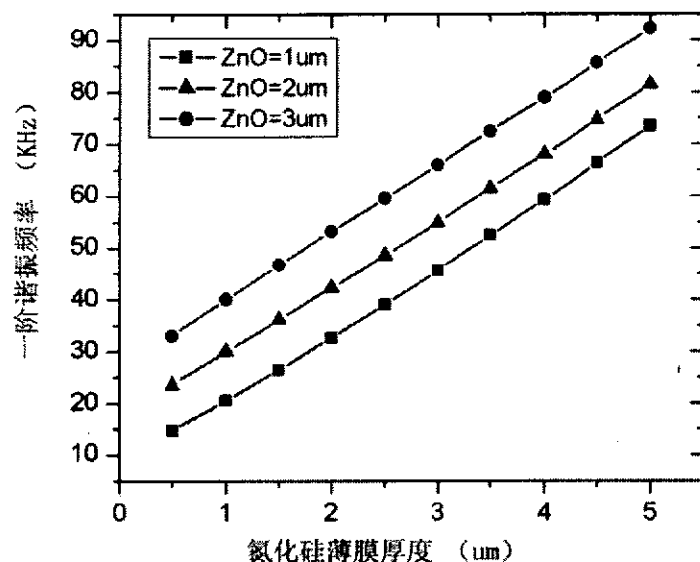


图 3-3 振动膜的一阶谐振频率与氮化硅厚度的关系

3.2.2 考虑残余应力时的薄板振动的有限元分析

3.2.2.1 有限元建模

文中计算采用了多层膜的复合结构建模,所使用的软件为 MEMS 专业有限元分析工具 CoventorWare,图 3-5 为换能器三维模型的剖面示意图。网格划分采用软件提供的 Manhattan bricks 进行划分。图 3-6 为有限元网格划分后的振动膜。上述有限元模型中每层的厚度及材料特性都分别指定,而残余应力只是施加在氮化硅薄膜内。这里我们做了这样的近似:由于采用的氮化硅薄膜厚度较厚,为 1 μm ,因此我们认为主要的应力存在于氮化硅薄膜中,忽略了金电极及氧化锌薄膜内部的应力。

图 3-4 和图 3-5 所示的振动膜的下表面及实际固定面的位置。在理论计算中,我们考虑过分别采用四边固支和四边简支的边界条件进行计算,最后确定采用四边固支的边界条件来计算,其主要依据为:实际的振动膜的边界情况为:悬空振动膜边界以外的氮化硅与硅片接触的下表面为实际固定面,如下图 3-4 和图 3-5 所示,红色区域的氮化硅与硅片接触面为实际固定面,而换能器的电极及压电层都附着在氮化硅薄膜上,两条虚线中间部分的振动膜为下方空心的可发生弯曲振动的部分。

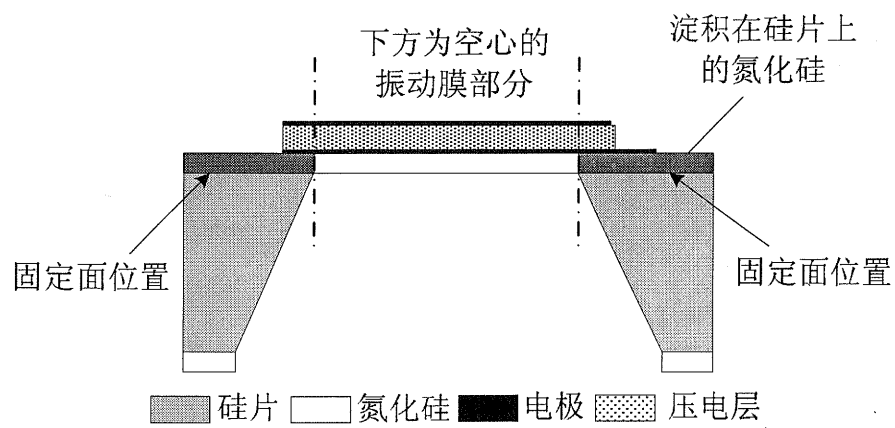


图 3-4 换能器振动膜的剖面示意

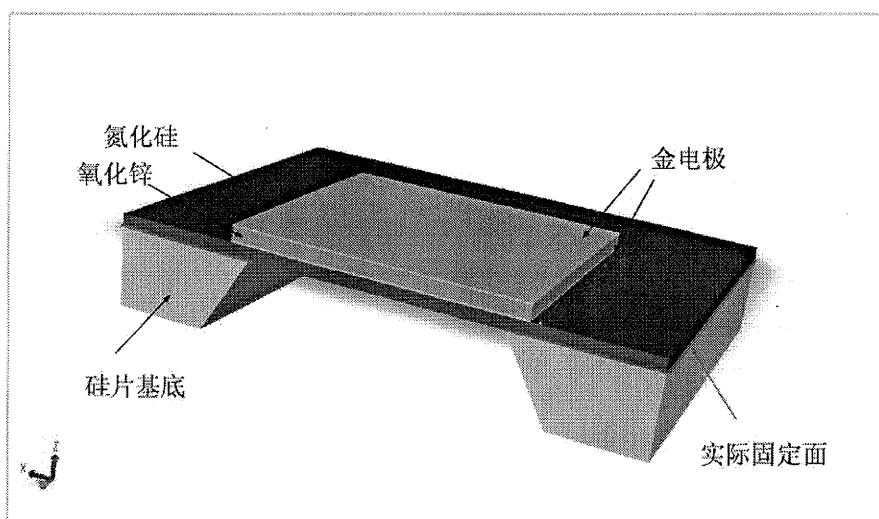


图 3-5 硅微压电超声换能器的有限元建模截面示意

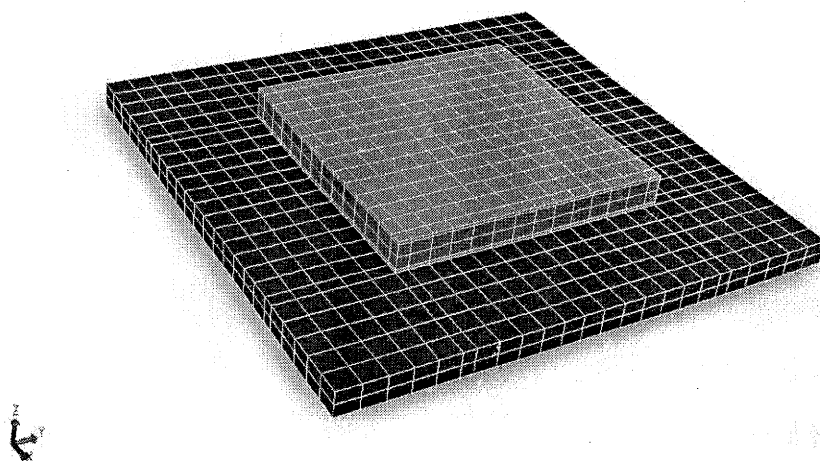


图 3-6 网格划分后的四层复合振动膜

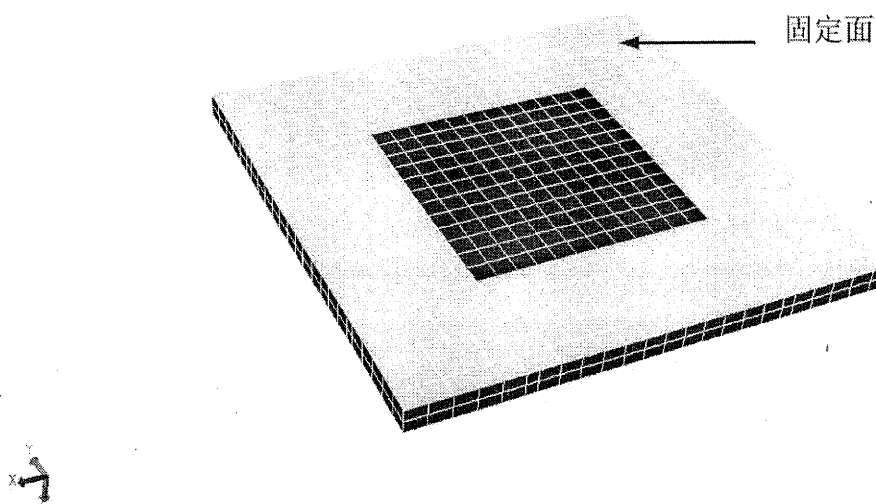


图 3-7 有限元分析的实际固定面位置（氮化硅薄膜下表面）

基于上述有限元模型及实际的边界条件，我们进行了模态计算，得到边长为 1 mm 的振动膜的一阶谐振频率为 20.769 KHz，Au/ZnO/Au/Si_xN_y 结构的各层厚度分别为：0.12 μm / 1 μm / 0.14 μm / 1 μm。而同样尺寸的振动膜采用四边简支边界条件算得的一阶谐振频率为 11.452 KHz，采用固支边界条件计算得到的一阶谐振频率为 20.766 KHz，因此我们认为固支边界条件更接近实际器件的振动膜边界条件。

3.2.2.2 谐振频率

硅微压电超声换能器的复合振动膜结构在考虑残余应力时，我们较难得到其解析解，本文借助用有限元方法来进行计算及分析。图 3-8 中的点线为使用有限元计算软件 CoventorWare 计算得到不同残余应力条件（0, 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa 和 200 MPa）谐振频率随振动膜边长的变化曲线，此时各层厚度为：金：0.12 μm；氧化锌：1 μm；Au：0.14 μm；氮化硅：1 μm，边长为 1000 μm。从计算结果可得出如下结论：

- 1) 当应力为 0 时，有限元计算结果与板理论计算结果是一致的；
- 2) 在相同振动板尺寸下，残余应力越大，其谐振频率越高；
- 3) 在一定残余应力条件下，振动板边长越大，即板厚度相对于板的线度（边

长)或称之为相对厚度越薄,谐振频率越低;反之,则越高;

4)由此可以推论,相对厚度较薄时,则主要是由残余应力控制;相对厚度较厚时,则主要是由弹性力控制。

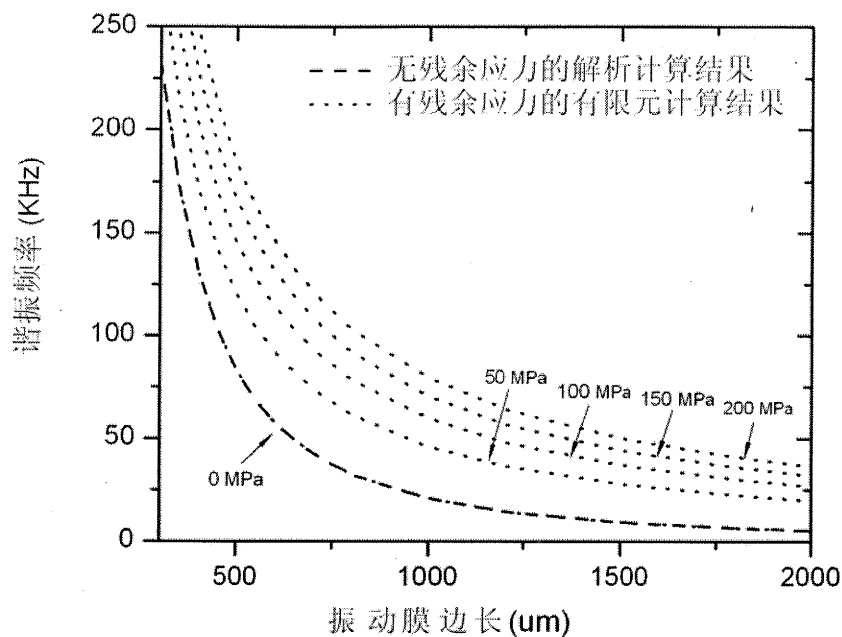


图 3-8 硅微压电超声换能器一阶谐振频率,残余应力为参数

3.2.2.3 振幅分布

用有限元方法计算换能器的振幅分布,此时Au/ZnO/Au/Si₃N₄结构各层厚度为:金: 0.12 μm; 氧化锌: 1 μm; Au: 0.14 μm; 氮化硅: 1 μm,边长为 1000 μm。图3-9上图为有限元计算的换能器振动膜的一阶谐振模式振幅分布示意图,图3-9下图为二阶谐振模式振幅分布示意图。在一阶谐振模式下,振动膜上各点z方向的位移同相,为类活塞式同相单一模式振动。在二阶谐振模式下,振动膜左右两边位移反相,此时向外辐射的声场也较为复杂和不那么有效,因此硅微压电超声换能器一般选取在振动膜的一阶谐振频率工作。

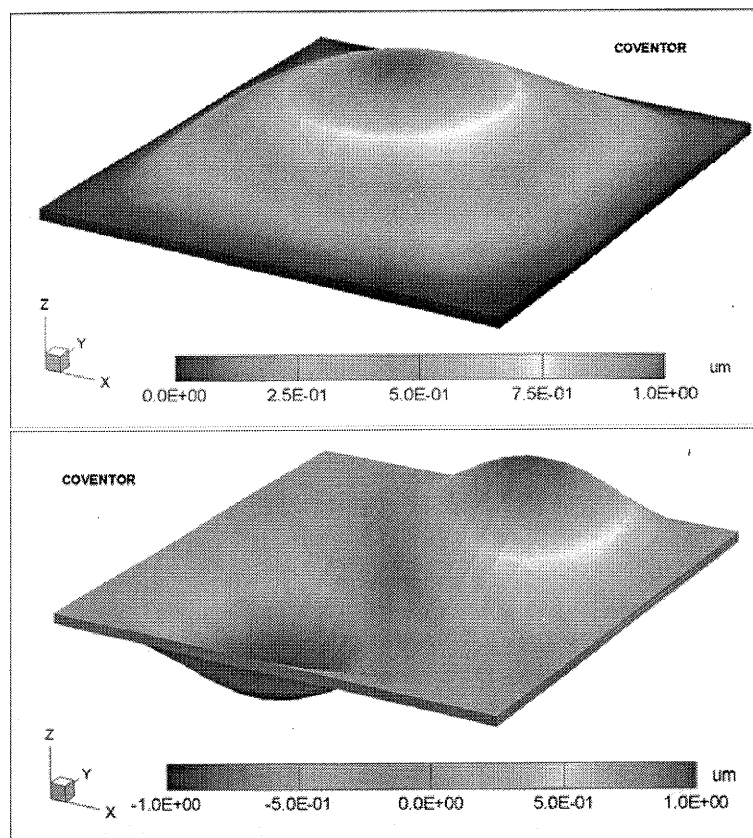
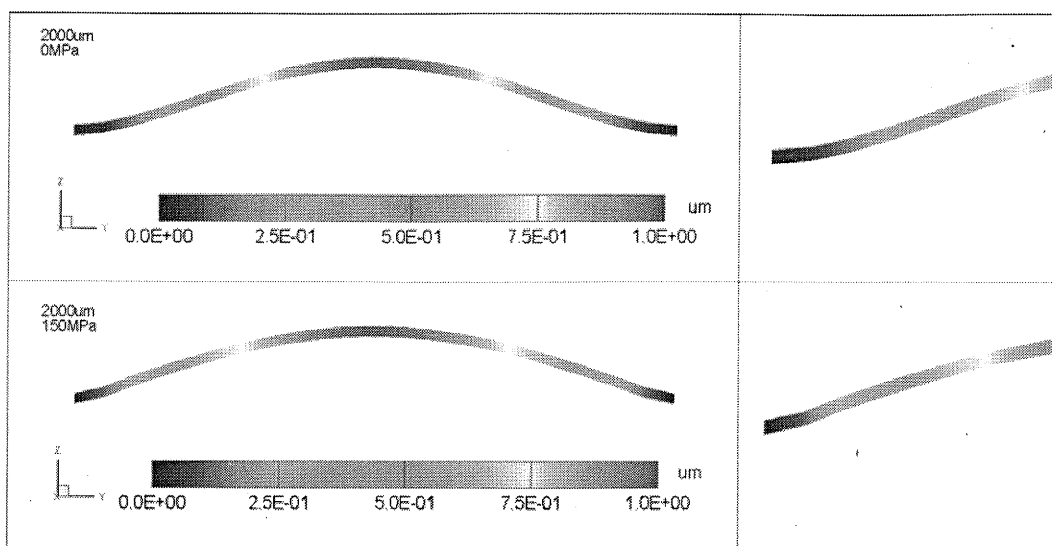
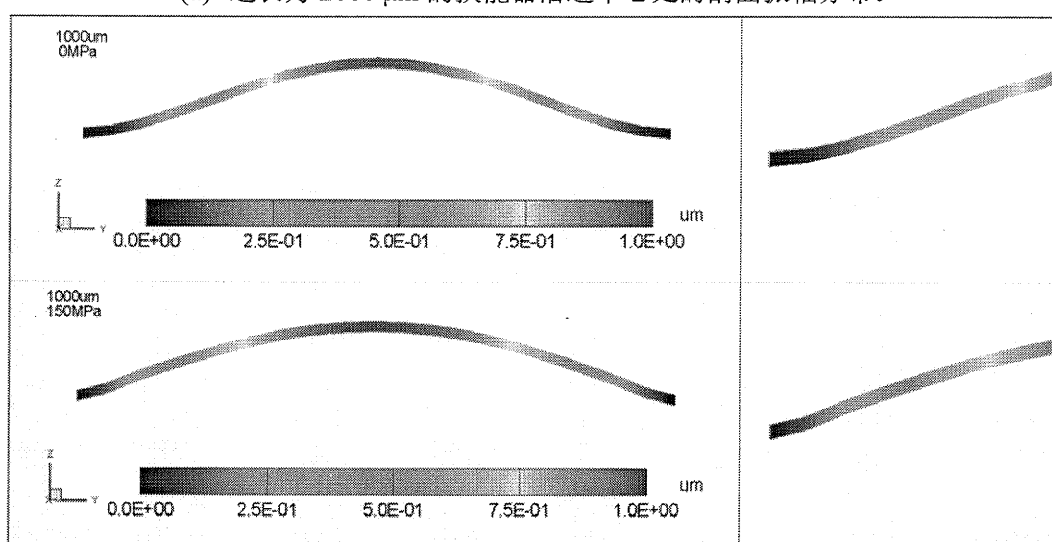


图 3-9 振动膜谐振模式振幅分布。上图为振动膜一阶谐振模式振幅分布，下图为振动膜的二阶谐振模式(f_{12} 或 f_{21})的振幅分布

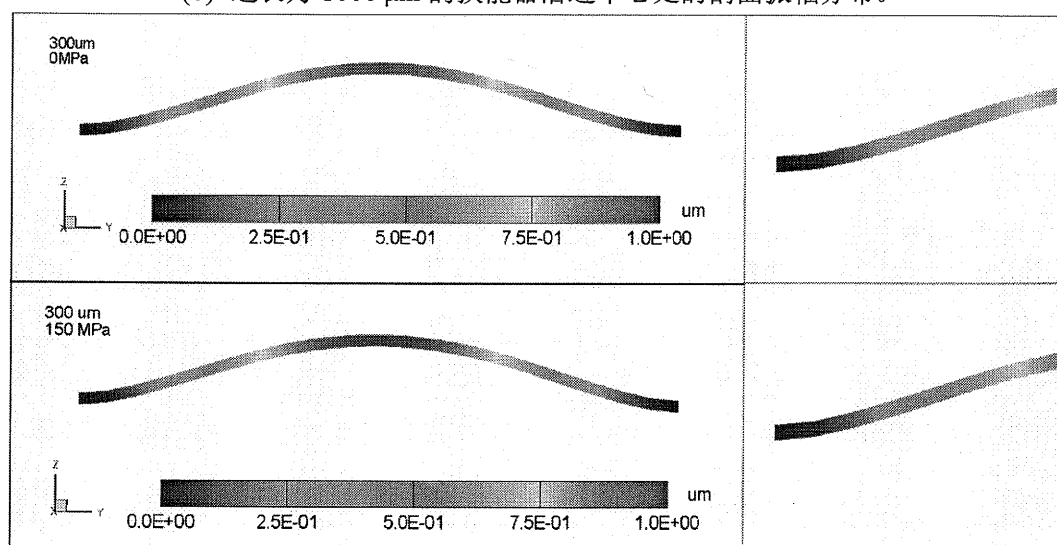
图 3-10 为振动膜边长分别为 $2000\ \mu\text{m}$ 、 $1000\ \mu\text{m}$ 及 $300\ \mu\text{m}$ 时，在没有残余应力 ($\sigma = 0$) 及计入残余应力 ($\sigma = 150\ \text{MPa}$) 时沿边中心处的剖面振幅分布图。我们从图 3-10(a)看到在边长为 $2000\ \mu\text{m}$ ，即振动膜相对厚度比较小时，残余应力为零和残余应力为 $150\ \text{MPa}$ 时，振幅分布曲线有较大的差异，特别是接近边缘部分，对 $\sigma = 0$ 时，法向位移随边缘位置距板中心距离变化，开始为零并保持一定距离比较平坦，经过一定距离后才逐渐增加。这正是单纯受弹性力控制的板振动的特征，此时板振动边界条件为 $\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$ 。而在考虑残余应力 $\sigma = 150\ \text{MPa}$ 时，法向位移的平坦区域很小，振幅很快增加，此时振动加入了由残余应力（张力）控制的“膜”的振动特征。在对于相对厚度较大（即对于边长在 $300\ \mu\text{m}$ 时）， $\sigma = 0$ 和 $\sigma = 150\ \text{MPa}$ 时的振动分布相差无几，如图 3-10(c)所示，这是由于主要是受弹性力控制，而残余应力的影响较小了。在边长为 $1000\ \mu\text{m}$ 时是处于中间状态，如图 3-10(b)所示，残余应力有一定的影响。



(a) 边长为 2000 μm 的换能器沿边中心处的剖面振幅分布。



(b) 边长为 1000 μm 的换能器沿边中心处的剖面振幅分布。



(c) 边长为 300 μm 的换能器沿边中心处的剖面振幅分布。

图 3-10 硅微压电超声换能器一阶谐振振幅示意图。左图为沿边中心处的剖面的全振幅分布，右图为振幅分布在边界处放大示意图。

3.3 实验用硅微压电超声换能器的制备

低频的硅微压电超声换能器，其设计频率在几十千赫兹到几百千赫兹，相对于传声器而言，需要提高振动膜的谐振频率以到达超声应用的要求。而由 3.2 的理论分析可知，可以通过减小振动膜的面积或增大振动膜的厚度来提高振动膜的谐振频率。对于减小振动膜面积的方法，则可以使用压电传声器相同的振动膜结构；对于增大振动膜厚度的设计，则需采用多层复合振动膜的结构。

3.3.1 单层支撑层硅微压电超声换能器的制备

单层支撑层硅微压电超声换能器的制备方法与方形振动膜硅微压电传声器的制作方法相近。其主要制作工艺流程如图 3-11 所示：

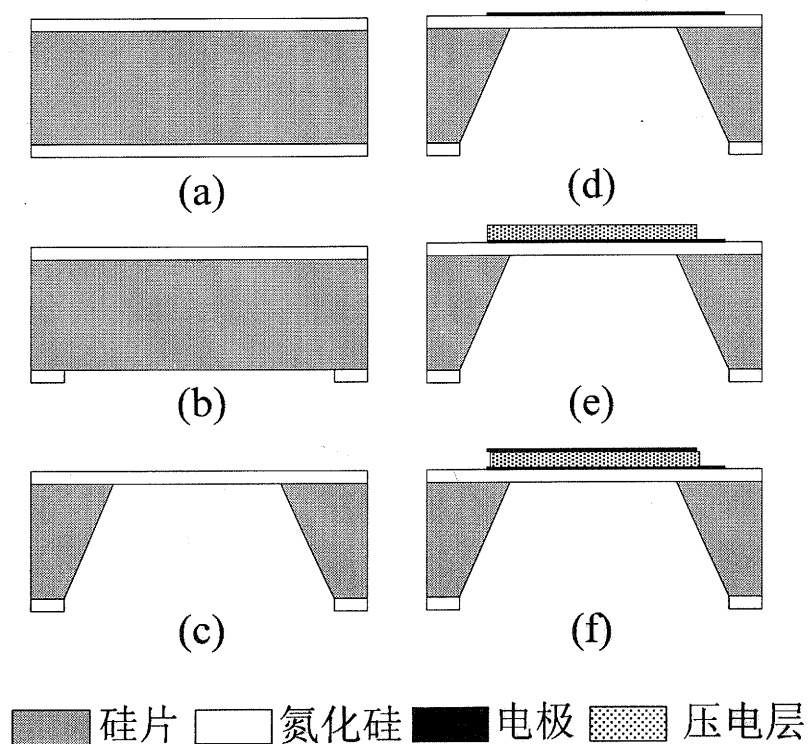


图 3-11 低频硅微压电超声换能器工艺流程

(a)选取 2 寸<100>硅片做基底，硅片厚度为 300 μm ，在硅片两面用 LPCVD 方法淀积氮化硅薄膜，厚度为 1 μm ；

(b) 光刻并腐蚀背面的氮化硅，形成体硅刻蚀的掩模图形；

(c) 利用在 KOH 溶液中对硅片背面进行各向异性的体硅腐蚀, 去除掩模以外的硅, 形成振动膜下方空腔;

(d) 硅片正面淀积铬 (40 nm) 和金 (100 nm) 薄膜, 双面对准光刻图图形化形成下电极;

(e) 在下电极上用磁控溅射方法生长 ZnO 薄膜, 厚度为 1 μm , 腐蚀该层形成下电极引出孔;

(f) 用反刻法在 ZnO 薄膜上淀积铬 (20 nm) 和金 (100 nm) 薄膜形成上电极, 制作完成硅微压电换能器芯片。

3.3.2 复合支撑层硅微压电超声换能器的制备

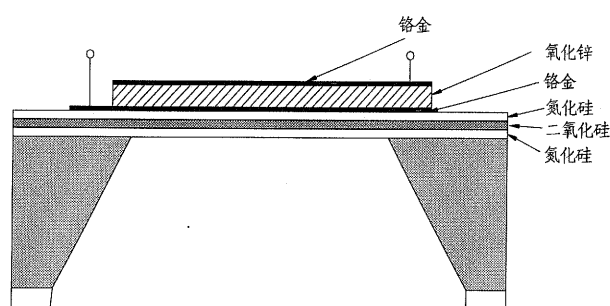


图 3-12 复合支撑层硅微压电超声换能器的结构示意图

图 3-12 为三层复合支撑层的硅微压电超声换能器的结构示意图, 其设计目的是为了得到较厚的支撑层厚度。其具体制作工艺如图 3-13 为:

(a) 选取 2 寸<100>硅片做基底, 硅片厚度为 300 μm , 在硅片两面用 LPCVD 方法淀积氮化硅薄膜 0.5 μm ;

(b) 在硅片正面的氮化硅薄膜上用 PECVD 方法淀积厚度为 1 μm 的低温二氧化硅薄膜;

(c) 在硅片两面用 LPCVD 方法淀积第二层氮化硅薄膜, 厚度为 0.5 μm ,

(d) 并光刻腐蚀背面的氮化硅, 形成体硅刻蚀的掩模图形;

(e) 硅片正面淀积铬 (20 nm) 和金 (100 nm) 薄膜, 并图图形化形成下电极;

(f) 在下电极上磁控溅射 ZnO 压电薄膜 1.5 μm 作为压电层, 并腐蚀该层形成下电极引出孔;

(g) 反刻法淀积铬 (20 nm) 和金 (100 nm) 薄膜, 并图图形化形成上电极;

(h) 用夹具保护硅片正面，在 KOH 溶解中对硅片背面进行各项异性的体刻蚀，去除掩模以外的硅，形成硅微压电换能器的复合振动膜结构。

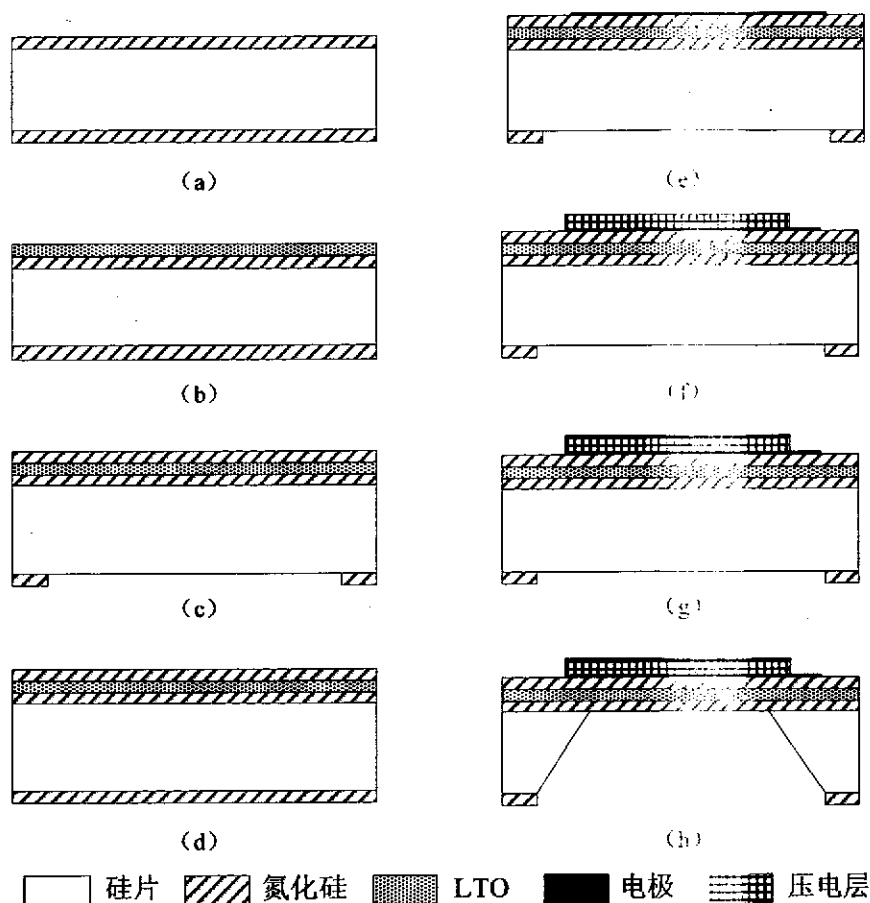


图 3-13 复合支持层硅微压电换能器工艺流程

3.4 换能器制作及测试结果

3.4.1 换能器实验制备结果

我们分别制作了振动膜边长为 $2000\ \mu\text{m}$ 、 $1000\ \mu\text{m}$ 、 $700\ \mu\text{m}$ 和 $450\ \mu\text{m}$ 四种硅微压电超声换能器。图 3-14 为制作完成的边长为 $1000\ \mu\text{m}$ 的硅微压电超声换能器芯片的 SEM 照片。图 3-15 为制备在铬金电极上的厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的 ZnO 薄膜的 X 射线衍射图。由图可见最高强度衍射峰位于 $2\theta = 34^\circ$ 附近，且半高宽较窄，说明 ZnO 压电薄膜沿 (002) 方向择优取向。

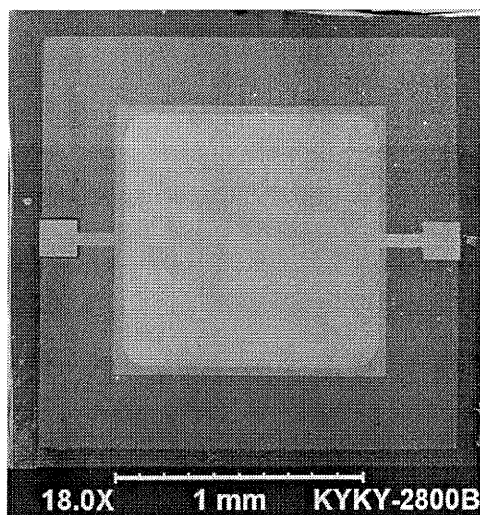


图 3-14 硅微压电超声换能器芯片 SEM 照片

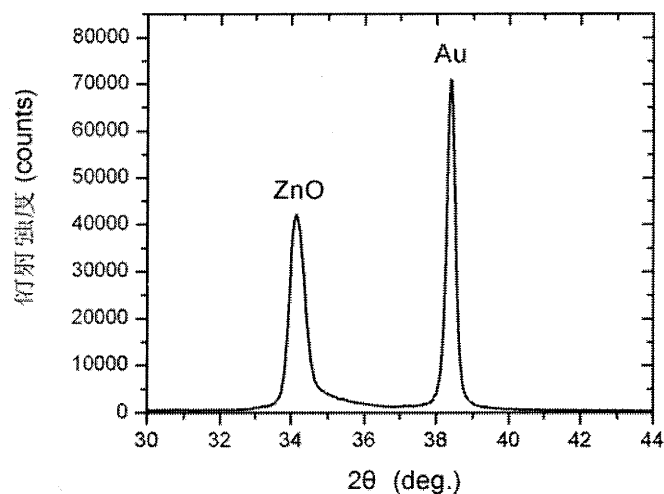


图 3-15 压电薄膜 ZnO 和 Au 电极的 X 射线衍射图

3.4.2 换能器的谐振频率

我们所制备的换能器的 ZnO 薄膜厚度为 $1\ \mu\text{m}$ ，上、下电极金膜厚度分别为 $0.12\ \mu\text{m}$ 和 $0.14\ \mu\text{m}$ ，氮化硅薄膜厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。换能器振动膜边长分别为 $2000\ \mu\text{m}$ 、 $1000\ \mu\text{m}$ 、 $700\ \mu\text{m}$ 和 $450\ \mu\text{m}$ 。振动膜的应力由 BGS6431 型电子薄膜应力分布测试仪测得约为 $150\ \text{MPa}$ ^[15]。

用 Agilent4395 网路分析仪测得的换能器谐振频率结果如表 2 所示。由表 2 可知，考虑残余应力的有限元计算结果与实验较为一致，而忽略残余应力则与理

论结果相差较大, 因此分析时必须考虑残余应力的影响。

表 2 硅微压电超声换能器谐振频率的理论计算结果和实验测试结果

振动膜边长 (μm)	理论计算结果(KHz)		实验结果 (KHz)
	$\sigma = 0$	$\sigma = 150 \text{ MPa}$	
2000	5.2	32.1	43.7
1000	20	69.8	71.25
700	40	105	98.9
450	100	193.8	190

3.4.3 换能器的等效电路

硅微压电超声换能器在谐振频率附近的等效电路如图 3-16 所示,

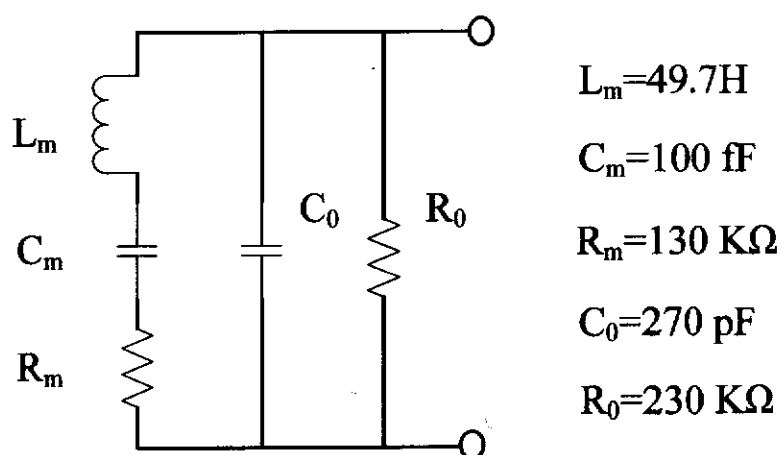


图 3-16 硅微压电超声换能器集中参数等效电路

导纳的实部 G 和虚部 B 分别为:

$$G = \frac{1}{R_0} + \frac{\omega^2 R_m C_m^2}{(1 - \omega^2 L_m C_m)^2 + \omega^2 R_m^2 C_m^2} \quad (3.8)$$

$$B = \frac{\omega (C_0 + C_m (1 - \omega^2 L_m C_m))}{(1 - \omega^2 L_m C_m)^2 + \omega^2 R_m^2 C_m^2}$$

其中 R_0 为 ZnO 薄膜的介电损耗引入的并联电阻, 为共振频率附近导纳的实部最小值的倒数。 C_0 为换能器的静态电容。 R_m 为动态电阻, 为共振频率附近导纳实部的最大值与最小值的差的倒数。 L_m 为动态电感, C_m 为动态电容。