

本文使用 Agilent 4395 网络/阻抗分析仪测量硅微压电超声换能器的谐振频率以及电学特性。谐振频率测量结果如表 2 所示。其中振动膜边长为 $1000\ \mu\text{m}$ 的换能器谐振频率约为 71 KHz，其导纳的频率响应曲线如图 3-17 所示。

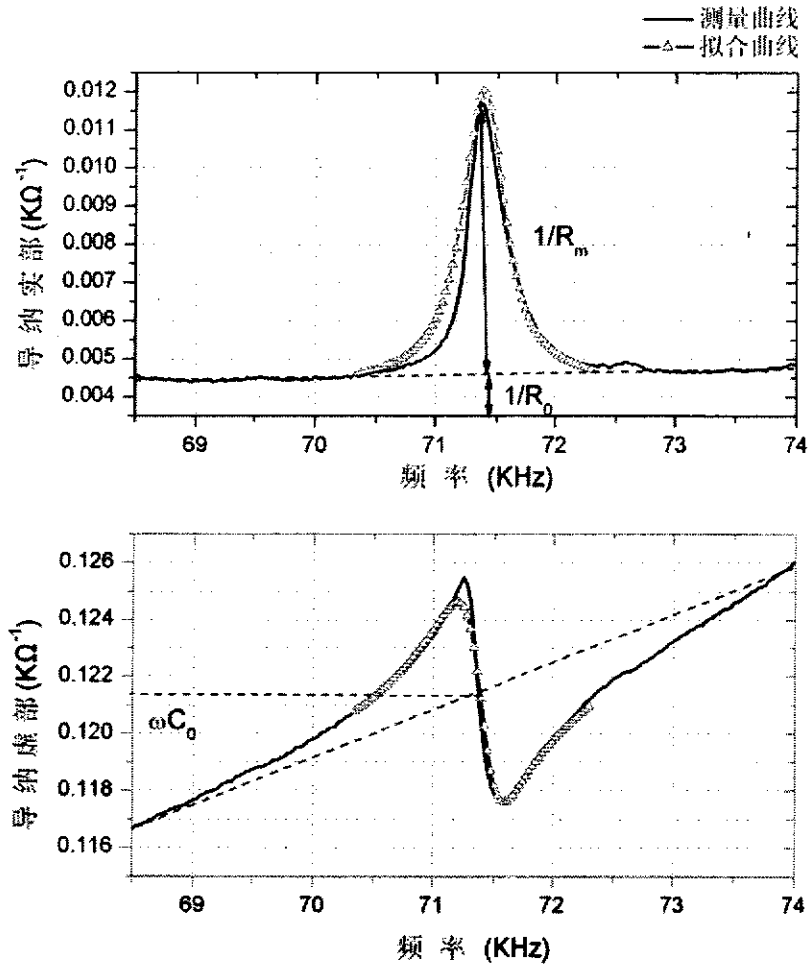


图 3-17 换能器导纳的实部（上图）与虚部（下图）的频响曲线

测得换能器的最大导纳频率 f_m 为 71.25 KHz，最小导纳频率 f_n 为 71.6 KHz，导纳分别为 $0.1257\ \text{K}\Omega^{-1}$ 和 $0.1176\ \text{K}\Omega^{-1}$ 。由测得的换能器的导纳和电容结果可得 R_0 为 $230\ \text{K}\Omega$ ， C_0 为 $270\ \text{pF}$ 。动态电感 L_m 和动态电容 C_m 由 (3.8) 式与测量曲线图 3-17 中谐振频率附近每一点的数据拟合得到 L_m 和 C_m 的数组，拟合频率范围为 $69.90\ \text{KHz} \sim 72.65\ \text{KHz}$ ，并由最小二乘法得到折算到电端的 L_m 和 C_m ，值分别为 $49.69\ \text{H}$ 和 $100\ \text{fF}$ ，均方差分别为：0.148 和 0.144。图 3-17 中三角连线为导纳的拟合曲线。由等效电路可以得到换能器的机械品质因数 Q_m 为

$$Q_m \approx \frac{1}{2\pi f_s C_m R_m} \quad (3.9)$$

其中 f_s 为换能器的串联谐振频率, 这里近似认为 $f_s = f_m$, 则可由(3.9)式和拟合参数 C_m 、 R_m 计算得到硅微压电超声换能器的 Q_m 为 171。

3.4.4 换能器的接收实验

为了初步验证硅微压电超声换能器收发超声信号的性能, 本文进行了接收和发射超声信号的实验。发射换能器与接收换能器均置于油槽中, 距离为 10 cm。发射信号由信号发生器直接产生, 发射信号为 10 个周期的正弦信号, 频率为 71 KHz。接收信号由示波器直接采集。图 3-18 为示波器接收到的信号波形。

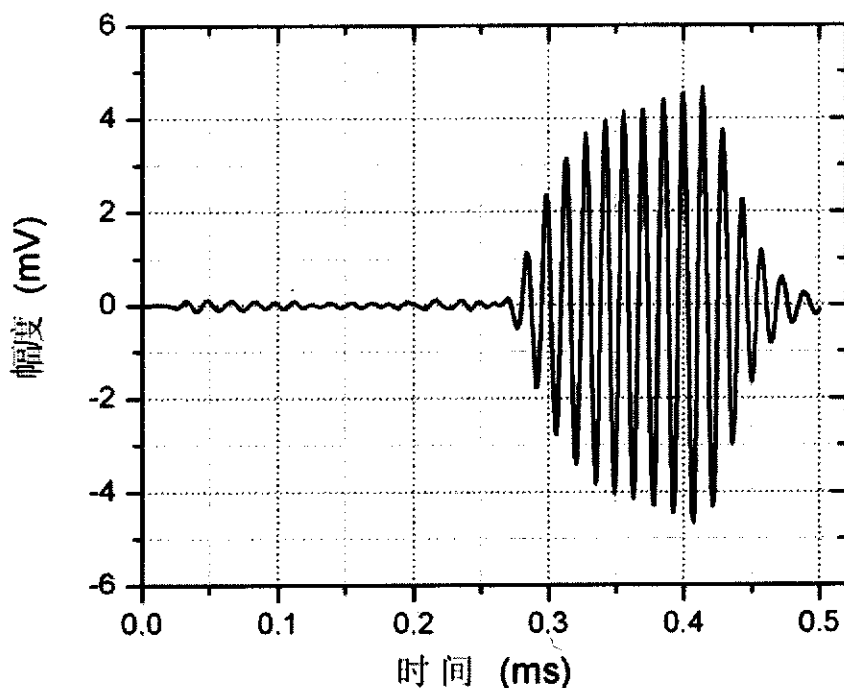


图 3-18 硅微压电超声换能器接收信号波形

图 3-19 为振动膜边长为 $1000\ \mu\text{m}$ 的硅微压电超声换能器的接收灵敏度频响曲线, 它是采用比较法与标准水听器(在 1 KHz~1 MHz 范围内灵敏度为 -210dB , $\text{ref } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$) 在油中测量得到。从图 3-19 可见, 在 71 KHz 附近换能器灵敏度出现最大峰值, 其灵敏度约为 -201.6dB ($\text{ref } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$)。另外在 30 KHz 附近存在一个小峰, 其原因可能是由于实验环境的屏蔽能力较差所引入的干扰所致。

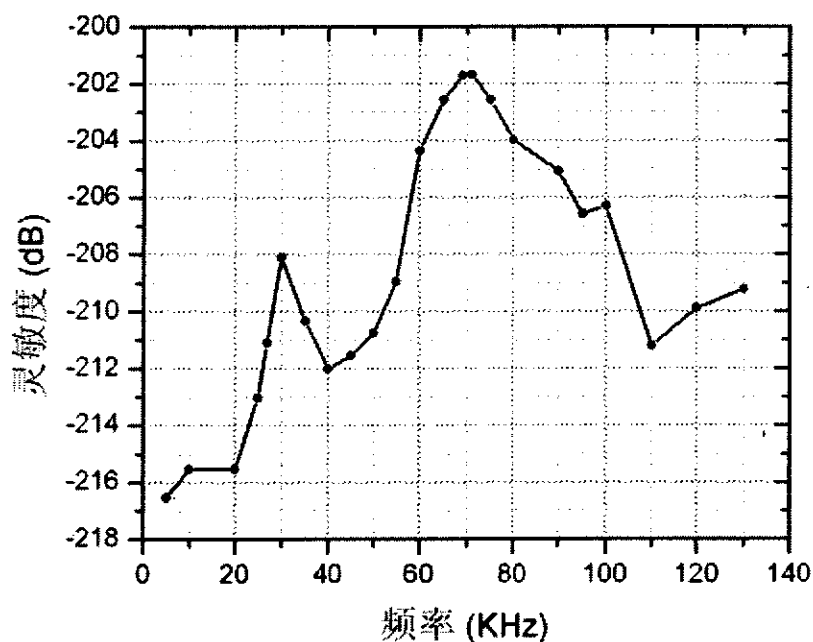


图 3-19 硅微压电超声换能器油中接收灵敏度曲线

3.4.5 换能器的发射实验

超声信号发射实验使用硅微压电超声换能器作为发射换能器，用上述标准水听器作为接收换能器。由图 3-20 所示的接收波形，运用比较法测得电压响应为 137dB (ref 1 $\mu\text{Pa} \cdot \text{m/V}$)。发射灵敏度低的原因是硅微压电超声换能器内阻较大，而发射面积小，又没有经过电感调谐匹配，辐射阻较小，所以发射响应不高。

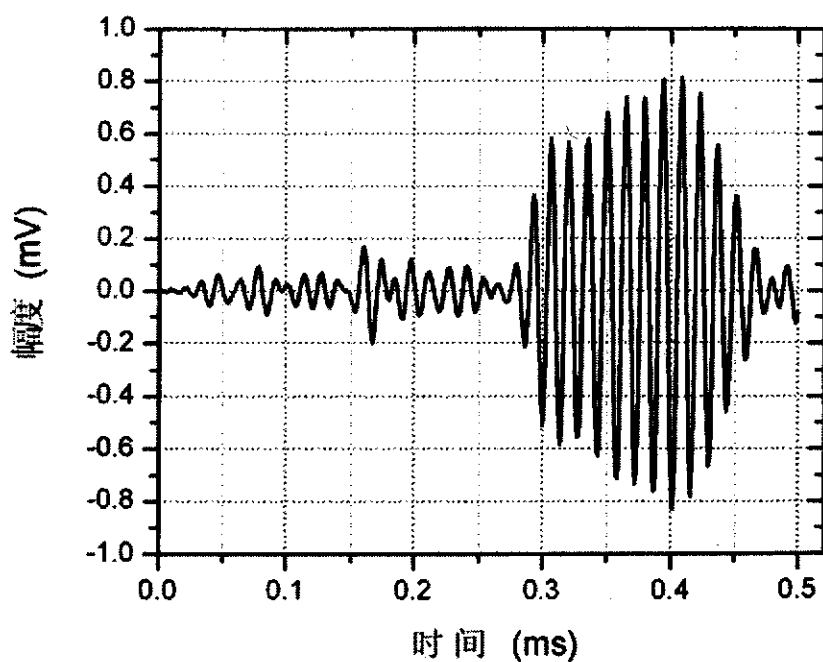


图 3-20 硅微压电超声换能器在油中发射时，标准水听器接收信号波形

3.5 本章小结

本文研究低频的硅微压电超声换能器的振动特性。理论分析表明在本文条件下硅微压电超声换能器的方形薄板结构,其振动特性为:谐振频率和振型振幅分布的分析不能仅考虑弹性恢复力的薄板理论,必须考虑硅微压电超声换能器在MEMS工艺制备过程存在的残余应力的影响。特别是此薄板结构在相对厚度(即薄膜厚度与膜横向线度之比)较薄时,影响很大。我们用MEMS技术研制了不同相对厚度的硅微压电超声换能器进行的实验,结果表明,它与加入残余应力的理论分析结果是相符合的。这样就给出分析硅微压电超声换能器力学振动一个正确途径。另外,通过换能器导纳测量给出换能器的等效电路参数,并由此给出换能器电学特性。最后对换能器进行了超声信号的收发实验,通过比较法测得了换能器的接收灵敏度及发射电压响应。

参考文献

- [1] Omer Oralkan, Sanh Ergun, Ching-Hsiang Cheng *et al.* Volumetric ultrasound imaging using 2-D CMUT arrays. *IEEE Trans. on UFFC*, 2003; 50(11): 1581—1594
- [2] Russell A. Noble, Anthony D.R.Jones, Toby J.Robertson. Novel, wide bandwidth, micromachined ultrasonic transducers. *IEEE Trans. on UFFC*, 2001; 48(6): 1495-1507
- [3] Joshua Knight, Jeff McLean, F.Levent Degertekin. Low temperature fabrication of immersion capacitive micromachined ultrasonic transducers on silicon and dielectric substrates. *IEEE Trans. on UFFC*, 2004; 51(10): 1324—1333
- [4] J.Bernstein, K.Houston, L.Niles *et al.* Micromachined ferroelectric transducers for acoustic Imaging. 1997 *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 1997: 421—424
- [5] Karou Yamashita, Latpasamixay Chansomphou, Hideyuki Murakami *et al.* Ultrasonic micro array sensors using piezoelectric thin films and resonant

- frequency tuning. *Sensors and Actuators*, 2004; A114: 147—153
- [6] Jacek Baborowski, Nicolas Ledermann, Paul Muralt. Piezoelectric micromachined transducers (PMUT's) based on PZT thin film. *IEEE Ultrasonics symposium*, 2002; 1051—1054
- [7] C.Zink, D.Pinceau, E. Defaÿ *et al.* Development and characterization of membranes actuated by a PZT thin film for MEMS applications. *Sensors and Actuators*, 2004; A115: 483-489
- [8] Gökhan Pçrcin, Khuri-Yakub. Piezoelectrically actuated flextensional micromachined ultrasound transducer—II: Fabrication and Experiments, *IEEE Trans. on UFFC*, 2002; 49(5): 585—595
- [9] Sang Choon Ko, Yong Chul Kim, Seung Seob Lee *et al.* Micromachined piezoelectric membrane acoustic device. *Sensors and Actuators*, 2003; A103: 130-134
- [10] Cheol-Hyun Han, Eun Sok Kim. Micromachined piezoelectric ultrasonic transducers based on parylene diaphragm in silicon substrate. 2000 *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2000: 919—923
- [11] Firas Akasheh, Todd Myers, John D.Fraser, *et al.* Development of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers. *Sensors and Actuators*, 2004; A111: 275-287
- [12] 杨楚威, 黄歆, 解述等. 硅微压电薄膜传声器的制备. *声学技术*, 2002; 21: 257-258
- [13] Gökhan Pçrcin, Khuri-Yakub. Piezoelectrically actuated flextensional micromachined ultrasound transducer—I: Theory, *IEEE Trans. on UFFC*, 2002; 49(5): 573—584
- [14] 曹志远. 板壳振动理论. 北京: 中国铁道出版社, 1989
- [15] 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.

第四章 MHz 硅微压电超声换能器的研制

4.1 引言

研制谐振频率在 MHz 的硅微压电超声换能器, 及在微小尺寸下弯曲振动模式的电声转换机制, 不仅能够提供频率应用范围更高的单个硅微压电超声换能器, 而且为研制高性能的微超声换能器阵列, 如可以用于人体 B 超的一维换能器线阵, 以及用于人体三维超声成像的二维换能器面阵能够提供重要的实践基础。

4.2 MHz 硅微压电超声换能器的设计特点

硅微压电超声换能器的工作频率取决于其振动膜的弯曲谐振频率, 对于频率在 MHz 的硅微压电超声换能器而言, 相比于本文第三章所介绍的谐振频率较低的换能器 (如 70 KHz), 其振动膜尺寸的更小, 一般为几十至几百微米, 采用传统的制备低频的硅微压电超声换能器的工艺方法, 制备 MHz 的硅微压电超声换能器的难度较大; 而换能器振动膜尺寸的减小, 使单个换能器的电容减小、输入阻抗增大, 这使寄生电容对微换能器的接收及发射产生更大的影响, 给单个换能器的接收和发射带来较大的困难。采用传统的微压电超声换能器的设计将无法保证换能器的小信号收发效率。我们需要设计能够满足小尺寸振动膜制作的工艺方法及保证换能器收发性能的器件结构, 本文所制作的频率在 1MHz 的硅微压电超声换能器具有以下介绍的设计特点。

4.2.1 多微单元并联设计

为了解决高频硅微压电超声换能器换能面积小、电容小及阻抗高的问题, 本文提出了一种将多个谐振频率一样的微小换能器单元在电学上并联, 由这些微换能器单元组成的微“面阵列”构成一个超声换能器的设计, 如图 4-1 所示。这个并联在一起的换能器的谐振频率即为每个微换能器单元的谐振频率, 换能器的静电电容即为所有并联在一起的微单元电容的总和, 而换能器的阻抗则降低为单个并联单元的 $1/N$, N 为并联单元数。可见, 这种设计的换能器比单个换能器的性能

会有较大的提高

采用这种换能器设计时,所有并联在一起的微换能器需尽量紧密排列,因为并联在一起的单元实际上构成一个微面阵,其发射声场是所有并联单元的叠加,当频率很高并联单元分布面积较大的情况下,该面阵是具有一定的指向性的,因此应当尽量减小并联单元的间距,在提高换能器效率的同时尽量减小对其指向性的影响。可以根据换能器的指向性、阻抗或电容等设计指标,灵活设计微单元的并联数目及分布,从而有效提高换能器的收发效率,增大了换能器电容,减小了寄生电容对于换能器的影响,减小换能器阻抗,减小能量的损耗。本文所采用的是等边六边形的微阵元并联方式,基本保证换能器辐射面的空间对称,并联的数目随正六边形每条边上单元的增加而有规律的增加。

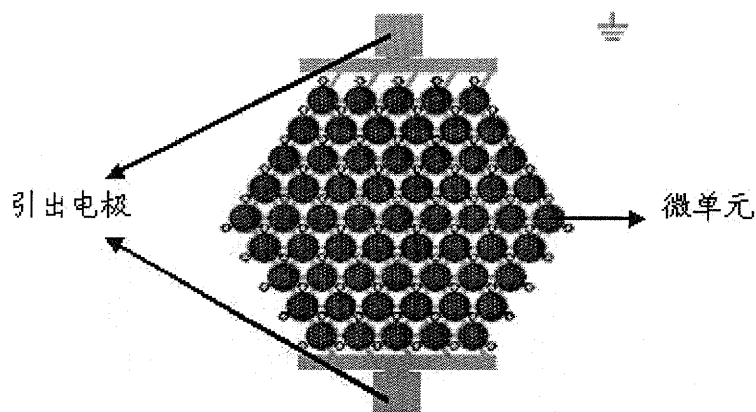


图 4-1 高频硅微压电超声换能器多单元并联设计示意图

4.2.2 圆形振动膜设计

由于换能器采用了多个微单元并联的设计,因此保证每个微单元的成品率及稳定性对于换能器而言非常重要,由第二章 2.3.6 的内容可知,圆形振动膜在制作及使用过程中应力分布均匀且不易损坏,因此本文设计的微小并联换能器单元均为圆形振动膜,以保证整个换能器的成品率。

4.2.3 牺牲层释放工艺

为了提高换能器的谐振频率,换能器的微单元的振动膜需要较小的尺寸,我们设计的换能器的直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ (详见 4.3.1)。当传统的体硅刻蚀由于各向异

性使硅侧墙存在一定的倾角，如图 4-2 (a)，因此正面器件的最小间距是被背面体刻蚀窗口的间距所限制的。对于厚度为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的硅片，背面刻蚀的窗口需比正面器件振动膜的边长大约 $424\text{ }\mu\text{m}$ ，当背面的体刻蚀窗口紧邻排列时， $424\text{ }\mu\text{m}$ 即为正面器件振动膜的最小间距（这里指的是振动膜边与边的间距）。当采用多微单元并联的换能器设计时，采用传统体硅刻蚀工艺时是无法将多微单元紧密排列的。因此本文设计了一种新的牺牲层释放工艺。即在振动膜的下方先制备牺牲层材料，在制备完成振动膜后，通过释放孔和释放沟道对牺牲层进行释放，从而形成振动膜下方的空腔。该工艺方法不需要背面的体硅刻蚀，如图 4-2 (b) 所示，正面器件的间距不受侧墙倾角的影响，因此能够有效解决体硅刻蚀方法由于存在侧墙倾角无法密排换能器单元的问题，为多单元并联设计提供工艺制备上的保证。

另外，采用牺牲层释放工艺制作的振动膜形状是由振动膜下方的牺牲层图形决定的，因此很容易实现圆形的振动膜，在工艺制备上保证了 4.2.2 的圆形振动膜的设计，也提高了振动膜设计的灵活性。

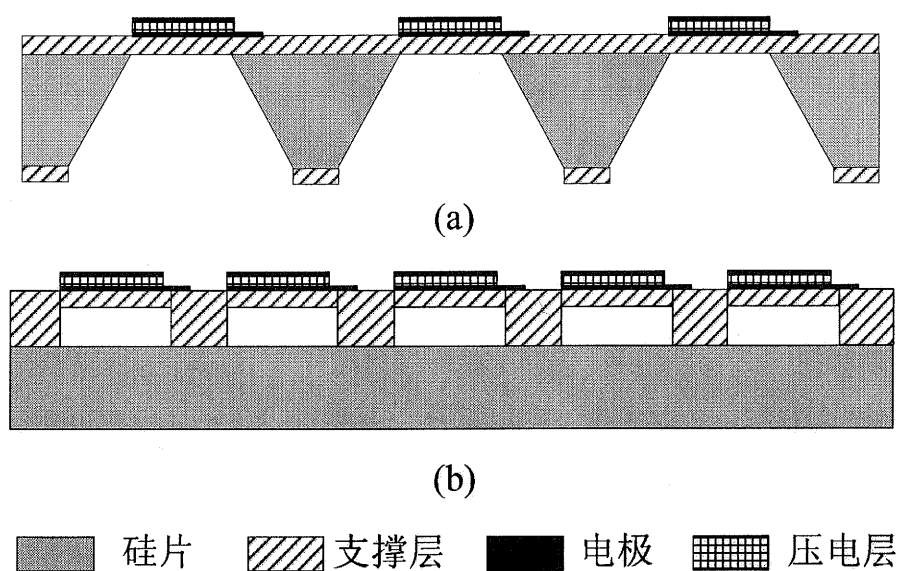


图 4-2 硅微压电超声换能器结构示意图

(a) 体硅刻蚀工艺；(b) 牺牲层释放工艺

4.2.4 三层复合支撑层

为了使换能器的谐振频率达到 MHz 量级，除了减小振动膜的尺寸，还可以采

用增加振动膜的厚度来提高换能器的谐振频率。而前面所研制的低频硅微压电超声换能器所采用的氮化硅薄膜,无法直接制备较厚的振动膜,因为该薄膜厚度增加其内部应力也相应增大,使器件的振动膜容易应为应力过大而破损。本文采用了氮化硅+LTO+氮化硅的复合支撑层结构,在两层氮化硅薄膜中间加入了一层低温二氧化硅薄膜(LTO),使上下两层氮化硅薄膜的内应力均有了一定程度的释放缓冲,降低了整个振动膜内应力,并有效的增加了振动膜的厚度,从而提高了振动膜的谐振频率。

4.3 理论分析^[1]

4.3.1 换能器的机械谐振频率分析

本文设计的 MHz 硅微压电超声换能器的采用的是圆形振动膜,其工作频率为振动膜的机械弯曲谐振频率。圆形薄板的振动方程为:

$$\nabla^2 \nabla^2 w + \frac{\rho h}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0$$

对于边界固支的圆形换能器振动膜,其弯曲振动一阶谐振频率为^[2]:

$$f_r = \frac{1.626}{a^2} \sqrt{\frac{D_e}{\rho_e h}} \quad (4.1)$$

根据第三章所用材料参数以及多层复合膜等效参数的计算方法,计算得到换能器的圆形振动膜的谐振频率与直径的关系,如图 4-3-1 所示。其中振动膜中氮化硅/LTO/氮化硅/结构的厚度分别为: 0.5 μm 、0.9 μm 和 0.5 μm 。上电极、下电极厚度为 0.12 μm 和 0.14 μm 。ZnO 厚度为 1.5 μm 。当振动膜直径为 200 μm 时,谐振频率计算为 1 MHz。

当考虑残余应力的影响时,使用有限元方法计算得到了应力为 150 MPa 时的谐振频率与振动膜直径的关系曲线,图 4-3-1 中虚线为考虑应力的计算结果。将计算结果与本文 3.2.1 中图 3-3 的结果比较可知,在 MHz 以上的频率范围,应力对谐振频率的影响相对较小,考虑残余应力与不考虑应力计算所得的结果差别逐渐变小。当换能器的振动膜直径为 200 μm 时,不考虑应力情况振动膜的谐振频率为 1 MHz,考虑 150 MPa 残余应力的振动膜谐振频率为 1.13 MHz,后者比

前者增大 13%；当换能器直径为 100 μm 时，不考虑应力情况振动膜的谐振频率为 4.03 MHz，考虑 150 MPa 残余应力的振动膜谐振频率为 4.1MHz，后者比前者只增大 1.75%。

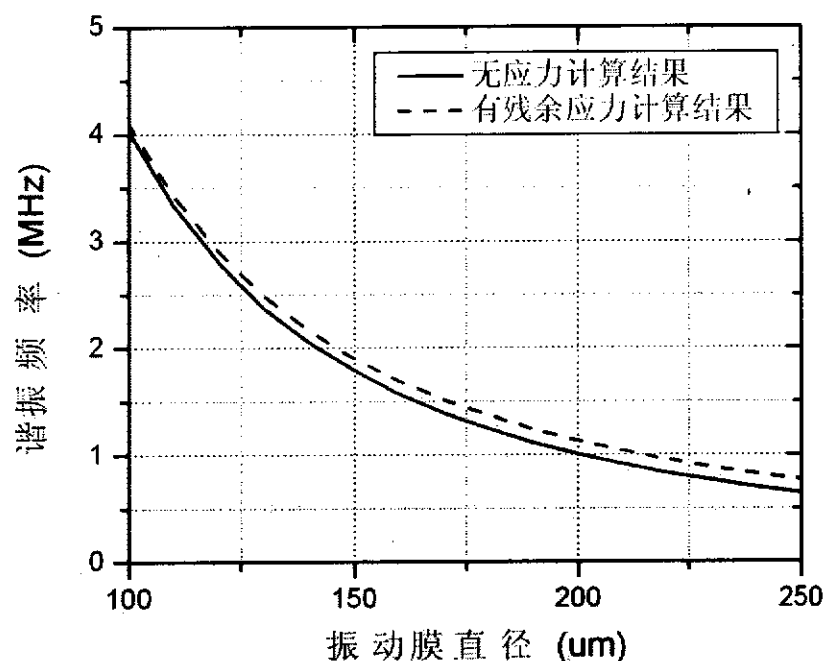


图 4-3-1 振动膜谐振频率与直径关系曲线

4.3.2 换能器的振型分布

本文采用有限元方法计算了圆形振动膜的振幅分布如图 4-3-2 及图 4-3-3 所示，图 4-3-2 为振动膜一阶谐振时的振型，图 4-3-3 为振动膜二阶谐振时的振型。可以看出一阶谐振时，振动膜振动情况简单，容易向外辐射声压，而在二阶谐振时，振动膜振幅分布有反向，因此辐射声压的会大大降低。所以硅微压电超声换能器一般选取振动膜的一阶谐振频率为工作频率。

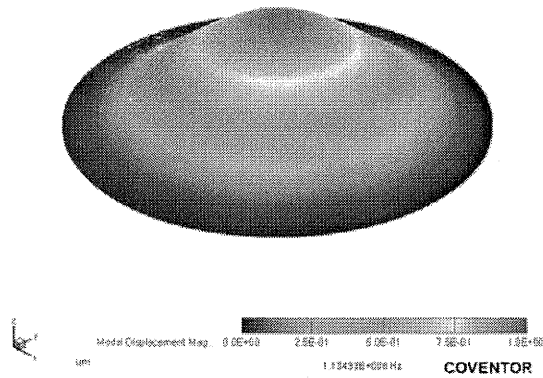


图 4-3-2 一阶谐振振型 (f_{11}) 示意图

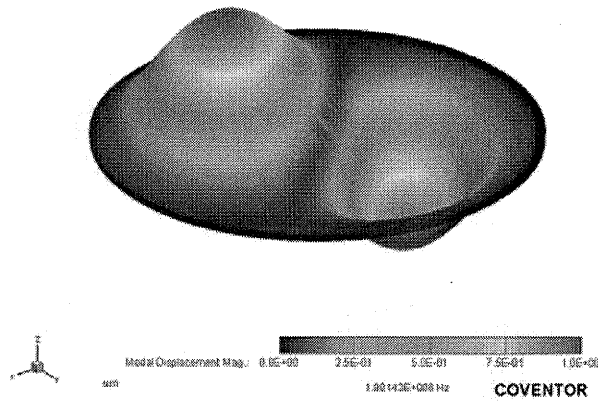


图 4-3-3 二阶谐振振型 (f_{12} 或 f_{21}) 示意图

4.3.3 换能器的受迫振动分析

硅微压电超声换能器为弯曲振动膜模式，其振动膜可以看作是一个由氮化硅复合圆形薄板。其运动方程为^[5]：

$$\begin{cases} T_{rr,r} + \frac{1}{r}(T_{rr} - T_{\phi\phi}) + T_{rz,r} = \rho\ddot{u} \\ T_{zz,z} + T_{rz,r} + \frac{T_{rz}}{r} = \rho\ddot{w} \end{cases} \quad (4.1)$$

其中 u 为径向方向的位移， w 为垂直于板中面方向的位移。在薄板的假设下，可以认为 $u \approx 0$ 。

应力于位移之间的关系为：

$$\begin{cases} T_r = \frac{-z}{s_{11}^E(1-\sigma^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{g_{31}}{s_{11}^E(1-\sigma)} D_z \\ T_{\theta\theta} = \frac{-z}{s_{11}^E(1-\sigma^2)} \left(\sigma \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{g_{31}}{s_{11}^E(1-\sigma)} D_z \\ E_z = -\frac{g_{31}z}{s_{11}^E(1-\sigma)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \bar{\beta}_{33} D_z \end{cases} \quad (4.2)$$

其中 $\bar{\beta}_{33} = \frac{1}{\epsilon_{33}^T(1-k_p^2)}$, ϵ_{33}^T 为自由介电常数, k_p^2 为平面机电耦合系数。

则振动方程可以表示为^[6]:

$$\nabla^4 w + \frac{R_e}{D_e} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{P}{D_e} = 0 \quad (4.3)$$

其中 D_e 为振动薄板的等效弯曲刚度, $R_e = \sum_i \rho_i h_i$, P 为薄板上下表面的压强差。

对于简谐激励, 振动方程可以写为:

$$\nabla^4 W - \frac{\omega^2 R_e}{D_e} W - \frac{P}{D_e} = 0 \quad (4.5)$$

$$\text{即: } \nabla^4 W - k^4 W - \frac{P}{D_e} = 0 \quad (4.6)$$

$$\text{其中 } k^4 = \frac{R_e}{D_e} \omega^2, \quad (4.7)$$

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \quad (4.8)$$

满足方程 (4.6) 的解可以表示为:

$$W = AJ_0(kr) + CI_0(kr) - \frac{P}{\omega^2 R_e} \quad (4.9)$$

式中常数 A 和 C 可由振动膜的边界条件定出。

硅微压电超声换能器的振动膜可认为是固定边界条件, 因此在边界处有位移 w 为零, 弹性曲面的斜率 $\partial w / \partial r$ 也等于零, 所以边界条件为:

$$W|_{r=a} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial r}|_{r=a} = 0 \quad (4.10)$$

将 (4.9) 式代入 (4.10) 可以解出:

$$\begin{cases} A = \frac{I_1(ka)}{J_1(ka)} \cdot C \\ C = \frac{P}{\omega^2 R_e} \cdot \frac{J_1(ka)}{I_1(ka)J_0(ka) + I_0(ka)J_1(ka)} \end{cases} \quad (4.11)$$

将 (4.11) 代入 (4.9) 式则可以得到振动膜的振动位移为:

$$W = H \cdot \frac{P}{\omega^2 R_e} [I_1(ka)J_0(kr) + J_1(ka)I_0(kr)] - \frac{P}{\omega^2 R_e} \quad (4.12)$$

其中 $H = \frac{1}{I_1(ka)J_0(ka) + I_0(ka)J_1(ka)}$ 。

图 4-3-4 为半径为 100 μm 的振动膜的谐响应归一化振幅曲线。其中氮化硅/LTO/氮化硅/结构的厚度分别为: 0.5 μm 、0.9 μm 和 0.5 μm 。上电极、下电极厚度为 0.12 μm 和 0.14 μm 。ZnO 厚度为 1.5 μm 。由图可知, 在 1 MHz 时, 振动膜的振幅最大, 即为其谐振频率点, 与前面谐振频率分析的结果一致。

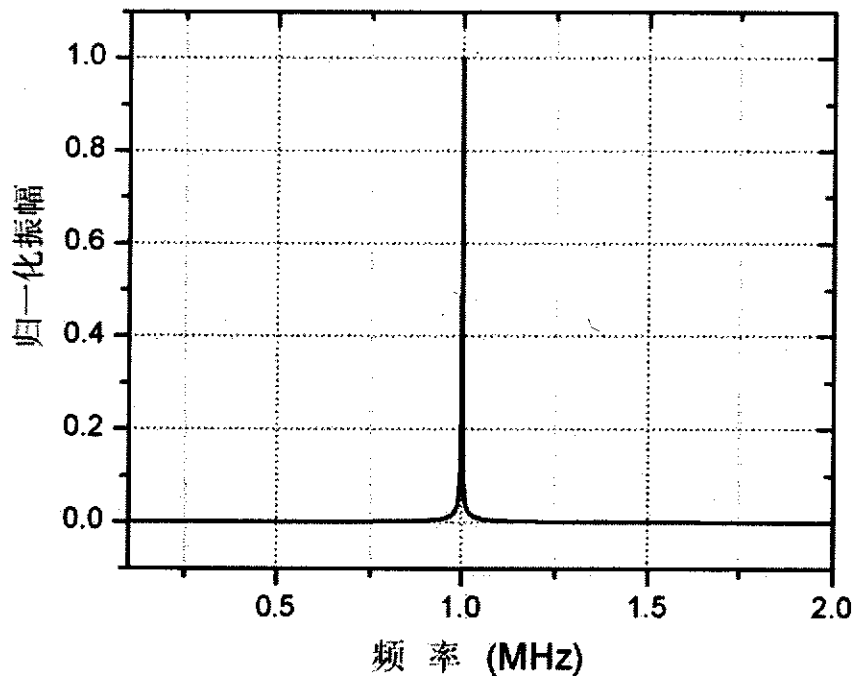


图 4-3-4 谐相应下振动膜振幅频响曲线

4.3.4 换能器的机械耦合能

换能器的弹性能密度为^[7]:

$$u = \frac{1}{2} T_r S_r + \frac{1}{2} T_\theta S_\theta \quad (4.13)$$

而压电层的应变—应力关系为:

$$\begin{cases} T_r = \frac{1}{s_{11}^D(1-\nu^2)} S_r + \frac{\nu}{s_{11}^D(1-\nu^2)} S_\theta - \frac{g_{31}}{s_{11}^D(1-\nu)} D_z \\ T_\theta = \frac{\nu}{s_{11}^D(1-\nu^2)} S_r + \frac{1}{s_{11}^D(1-\nu^2)} S_\theta - \frac{g_{31}}{s_{11}^D(1-\nu)} D_z \\ E_z = -\frac{g_{31}}{s_{11}^D(1-\nu)} S_r - \frac{g_{31}}{s_{11}^D(1-\nu)} S_\theta + \overline{\beta}_{33} D_z \end{cases} \quad (4.14)$$

其中 $\overline{\beta}_{33} = \frac{\beta_{33}}{1-k_p^2}$, k_p 为平面机电耦合系数。将 (4.14) 代入 (4.13) 可得

$$u = -\frac{1}{2s_{11}^D(1-\nu^2)} (S_r^2 + S_\theta^2 + 2\nu S_r S_\theta) - \frac{g_{31}}{2s_{11}^D(1-\nu)} (S_r + S_\theta) D_z \quad (4.15)$$

$$\text{将 } \begin{cases} S_r = -z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\ S_\theta = -z \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \end{cases} \quad (4.16) \text{ 代入 (4.15), 并在压电层厚度上积分, 得到}$$

单位面积上的弹性能为:

$$u = -\frac{(z_0+h)^3 - h^3}{6s_{11}^D(1-\nu^2)} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + 2\nu \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right] + \frac{g_{31}(z_0+h)^2 - h^2}{4s_{11}^D(1-\nu)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) D_z \quad (4.17)$$

其中 D_z 可将 (4.2) 中第三式在压电层厚度内对 z 进行积分求得:

$$D_z = \frac{V}{h\beta_{33}} - \frac{g_{31}(z_0+h)}{2s_{11}^D(1-\nu)} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) \quad (4.18)$$

其中 z_0 为压电层的下表面坐标, h 为压电层的厚度, V 为施加在上下表面的电压。弯曲中面的位置为整个复合振动膜的弯曲中面为坐标零点。将 (4.18) 代入 (4.17) 得到:

$$\begin{aligned}
u = & -\frac{(z_0+h)^3-h^3}{6s_{11}^D(1-\nu^2)} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + 2\nu \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right] \\
& -\frac{1}{8}(z_0+h) \left[(z_0+h)^2-h^2 \right] \left[\frac{g_{31}}{s_{11}^D(1-\nu)} \right]^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \\
& + \frac{g_{31}(z_0+h)^2-h^2}{4s_{11}^D\beta_{33}(1-\nu)h} V \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right)
\end{aligned} \quad (4.19)$$

将 (4.19) 的第三项在半径为 r_c 的电极圆面上积分得:

$$U_{ea} = \frac{\pi g_{31}(z_0+2h)z_0}{2s_{11}^D\beta_{33}(1-\nu)h} V \int_0^{r_c} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) r dr \quad (4.20)$$

即为换能器中压电层的机械耦合能。

4.3.5 换能器的等效电路

在忽略机械损耗的情况下, 弯曲振动的压电超声换能器的机电等效图如图 4-3-5 所示^{[7][8]}:

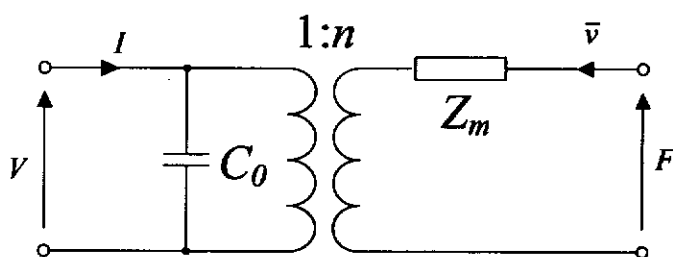


图 4-3-5 弯曲压电换能器的机电等效电路

由图 4-6 有:

$$\begin{cases} F = Z_m \bar{v} + nV & (a) \\ I = -n\bar{v} + j\omega C_0 V & (b) \end{cases} \quad (4.21)$$

其中 Z_m 为机械阻抗, n 为机电转换系数, C_0 为换能器的静态钳定电容。在 (a) 两边乘 $\bar{v}/2$, 在 (b) 两边乘 $V/2$, 以及速度和位移的关系 $\bar{v} = j\omega \bar{w}$, $I = j\omega Q$ 得到:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} F \bar{w} = \frac{1}{2} Z_m j\omega \bar{v} + \frac{1}{2} n V \bar{w} \\ \frac{1}{2} Q V = -\frac{1}{2} n \bar{w} V + \frac{1}{2} C_0 V^2 \end{cases}$$

将上两个式相加得:

$$\frac{1}{2}F\bar{v} + \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}Z_m j\omega\bar{v} + \frac{1}{2}n\bar{w}V - \frac{1}{2}nV\bar{w} + \frac{1}{2}C_0V^2 \quad (4.22)$$

其中 $\frac{1}{2}n\bar{w}V$ 项为换能器的机械耦合能, 与 (4.20) 联立可以解出换能器的机电转换系数为:

$$n = \frac{2U_{ea}}{\bar{W}} \quad (4.23)$$

其中 $\bar{W}$ 为换能器中间面位移幅值分布的面平均值:

$$\begin{aligned} \bar{W} &= \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^c W r dr d\theta}{\pi r_c^2} = \frac{2}{a^2} \int_0^c W r dr \\ &= \frac{2}{r_c^2} \int_0^c H \cdot \frac{P}{\omega^2 R_e} [I_1(ka)J_0(kr) + J_1(ka)I_0(kr)] r dr - \frac{P}{\omega^2 R_e} r dr \\ &= \frac{2H}{r_c} \frac{P}{\omega^2 R_e} [I_1(ka)J_1(kr_c) + J_1(ka)I_1(kr_c)] - \frac{P}{\omega^2 R_e} \end{aligned} \quad (4.24)$$

将 (4.12) 及 (4.24) 代入 (4.23) 可求得机电转换系数 n

在给定声压载荷的情况下, 压电层产生的电荷为:

$$Q = \int_0^c D_{za} 2\pi r dr \quad (4.26)$$

$$\text{则有: } V = \frac{Q}{C_0} = \frac{\int_0^c D_{za} 2\pi r dr}{C_0}, \quad \text{其中 } C_0 = \frac{\epsilon_{33}\pi a^2}{h}.$$

而速度 $\bar{v}$ 与位移 $\bar{W}$ 之间的关系为: $\bar{v} = j\omega\bar{W}$

则由 (4.19) 可求出换能器的机械阻抗

$$Z_m = \frac{P/\pi r_c^2 - nV}{\bar{v}} \quad (4.27)$$

综上求得硅微压电超声换能器机电等效电路的全部参数, 根据该等效电路, 可以求出一系列换能器的相关参数, 为换能器的设计及分析提供了重要方法。

4.3.6 换能器发射声场分析

本文设计的硅微压电超声换能器由多单元并联构成的, 其声场特性为并联单元构成的阵列的声场所决定, 下面以 7 单元并联的频率为 1 MHz 硅微压电超声换

能器为例，分析换能器的发射声场。

4.3.6.1 单个微单元的指向性

对于单个换能器微单元，可以看作是圆形活塞的辐射声场，而圆形活塞辐射声场的计算方法，目前已有了比较多的研究，在远场处的声压可表示为^[43]：

$$\begin{aligned} p_{2i,2i-1} &= j \frac{\omega \rho_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \iint_s e^{jk\rho \sin\theta \cos\varphi} ds \\ &= j \frac{\omega \rho_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \int_0^R \rho d\rho \int_0^{2\pi} e^{jk\rho \sin\theta \cos\varphi} d\varphi \end{aligned} \quad (4.28)$$

在这里 ρ_0 表示密度， R 表示圆形活塞的半径， ω 表示角频率， u_a 表示活塞表面的振动速度。通过一定的数学计算，就能计算出圆形活塞的辐射声场。

单个微换能器单元的指向性为：

$$D(\theta) = \left| \frac{2J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \right| \quad (4.29)$$

以 1 MHz 的换能器微单元为例，直径为 200 μm ，其指向性图如图 4-3-6 所示，其指向性基本上是各向均匀的。

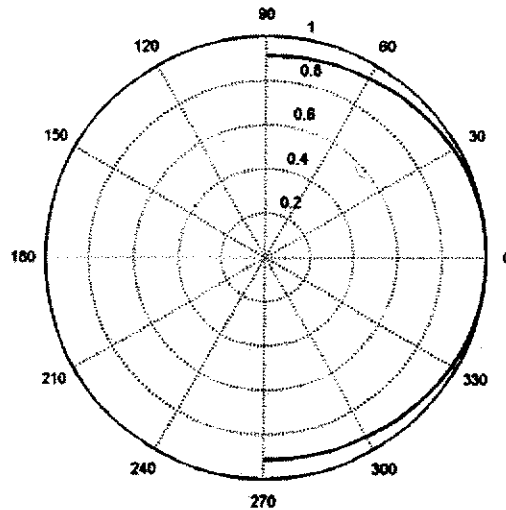


图 4-3-6 1 MHz 微单元的指向性图

4.3.6.2 硅微压电超声换能器的发射声场

对于本文设计的 7 单元并联的换能器而言, 相当于一个由 7 个微小活塞辐射源组成的换能器二维阵, 其发射声场可以计算如下:

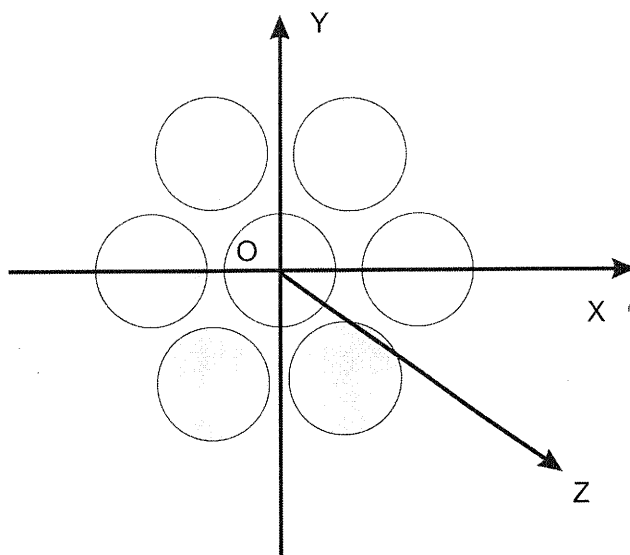


图 4-3-7 1 MHz 硅微压电超声换能器坐标示意图

建立如图 4-3-7 所示的坐标系, 最中间圆形活塞的圆心为坐标原点。在空间上对 7 个换能器单元的声场叠加, 其中换能器微单元的直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$, 频率为 1 MHz, 中心间距为 $230\text{ }\mu\text{m}$ 。得到发射声场的数值计算结果如 4-3-8 图所示:

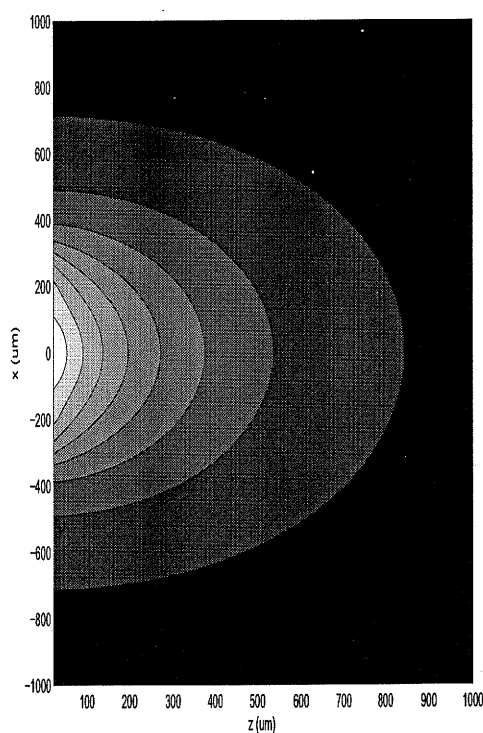


图 4-3-8 1 MHz 硅微压电超声换能器发射声场

有图 4-3-8 可知, 换能器的发射声场, 即 7 个微单元组成的阵列的辐射声场

在空间上没有明显的聚焦。如图 4-3-7, 7 单元并联的硅微压电超声换能器的所有单元都位于一个半径为 $330\text{ }\mu\text{m}$ 的圆形区域内, 而如果采用等效尺寸的单个活塞声源, 其指向性图如图 4-3-9 所示, 从结果看, 活塞声源已经具有一定的指向性, 而等面积分布的 7 单元阵列的指向性相对更加均匀。

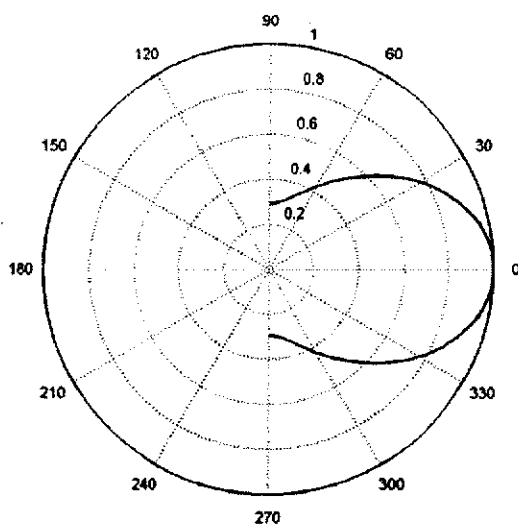


图 4-3-9 直径为 $660\text{ }\mu\text{m}$ 活塞声源的指向性图

4.4 MHz 硅微压电超声换能器的制作工艺

MHz 硅微压电超声换能器的制作放弃了传统的体硅刻蚀形成振动膜背腔的工艺, 采用了新型的牺牲层沟道释放工艺。本文共设计了下面两种工艺方法, 以实现通过释放牺牲层形成换能器的振动膜。

4.4.1 先释放牺牲层法

该制作方法主要是先完成牺牲层的释放, 形成振动膜结构后, 再在振动膜上制备电极及氧化锌薄膜的方法, 其中电极和 ZnO 薄膜的制备方法与低频硅微压电超声换能器的相同, 制作工艺如图 4-4-1 所示。

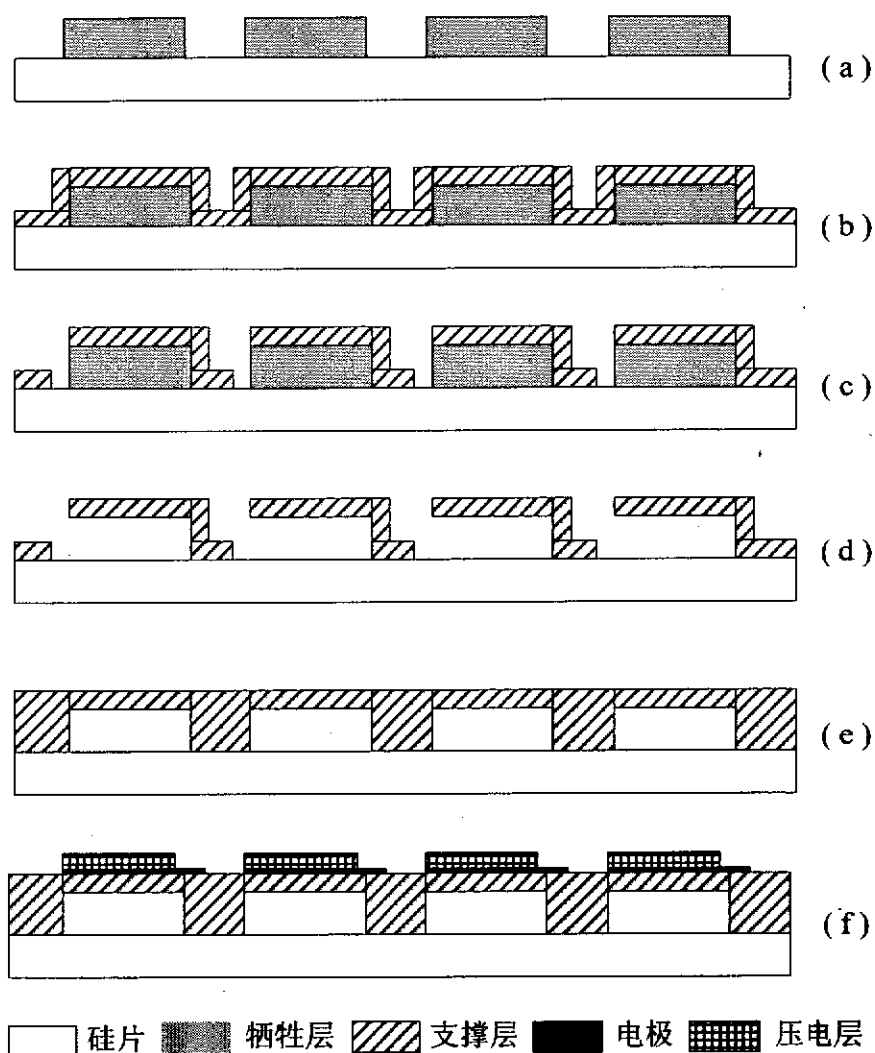


图 4-4-1 先释放牺牲层制备方法的工艺流程

如图 4-4-1 所示，换能器的主要的制作工艺为：

- (a) 硅片正面淀积牺牲层，并图形化形成振动膜下空腔图案；
- (b) 在牺牲层上淀积换能器的振动膜，为 LPCVD 的氮化硅薄膜或氮化硅/AlTO/氮化硅三层复合振动膜；
- (c) 在氮化硅薄膜用 ICP 干法上刻蚀出牺牲层释放孔；
- (d) 湿法释放牺牲层，并置换干燥，形成振动膜下方的空气隙；
- (e) 淀积厚膜，填堵牺牲层释放孔；
- (f) 在氮化硅上制作下电极、压电层和上电极组成的传感部分，完成整个换能器的制备。

这种先释放牺牲层后制备压电薄膜及电极的工艺方法优点为：

- (1) 牺牲层材料选择灵活。

由于易被腐蚀损坏的电极和压电薄膜是在腐蚀释放牺牲层之后制备, 因此对牺牲层的腐蚀液的限制减小, 可以根据需要选择更容易生长、更容易释放的材料作为牺牲层填充;

(2) 牺牲层释放孔填堵简单。

由于正面没有制备电极及氧化锌, 因此在释放完牺牲层后可以直接进行厚膜覆盖对释放孔进行填堵, 然后腐蚀去掉其它区域的厚膜, 而且填孔所采用的厚膜材料也不受腐蚀液的限制, 根据需要进行选择;

该方法的主要问题在于:

(1) 后续工艺需要临近光刻。

由于首先完成了牺牲层的释放, 因此振动膜下方已经为空腔, 在后续图形化电极及压电薄膜时, 不能采用紧密接触或真空吸附式的硅片固定曝光, 振动膜会由于挤压发生损坏, 因此需要采用临近光刻的方法, 使光刻板与硅片之间保留一定距离, 这样势必会影响到光刻对准的精确性。

(2) 悬起的振动膜在后续工艺中容易损坏。

下方悬空的振动膜在后续制备电极及压电薄膜的过程中, 由于还有多次工艺, 增加了振动膜损坏的几率, 降低了换能器振动膜的成品率;

(3) 氧化锌的生长基底的平整度。

释放牺牲层后的振动膜, 其表面平整度受到下方牺牲层材料的影响, 而且在残余应力的情况下, 释放后的振动膜有可能存在一定的形变, 其表面的平整度也会下降, 而 ZnO 压电薄膜的生长需要非常平整的电极表面以保证其晶向, 所以先释放牺牲层的方法需要选取厚度均匀性好、表面平整度高及应力较小的牺牲层材料, 以保证 ZnO 的择优取向生长。

4.4.2 后释放牺牲层法

该制备方法主要是先制备完成振动膜及、电极和氧化锌薄膜, 最后释放牺牲层。其中电极和 ZnO 薄膜的制备方法与低频硅微压电超声换能器的相同。

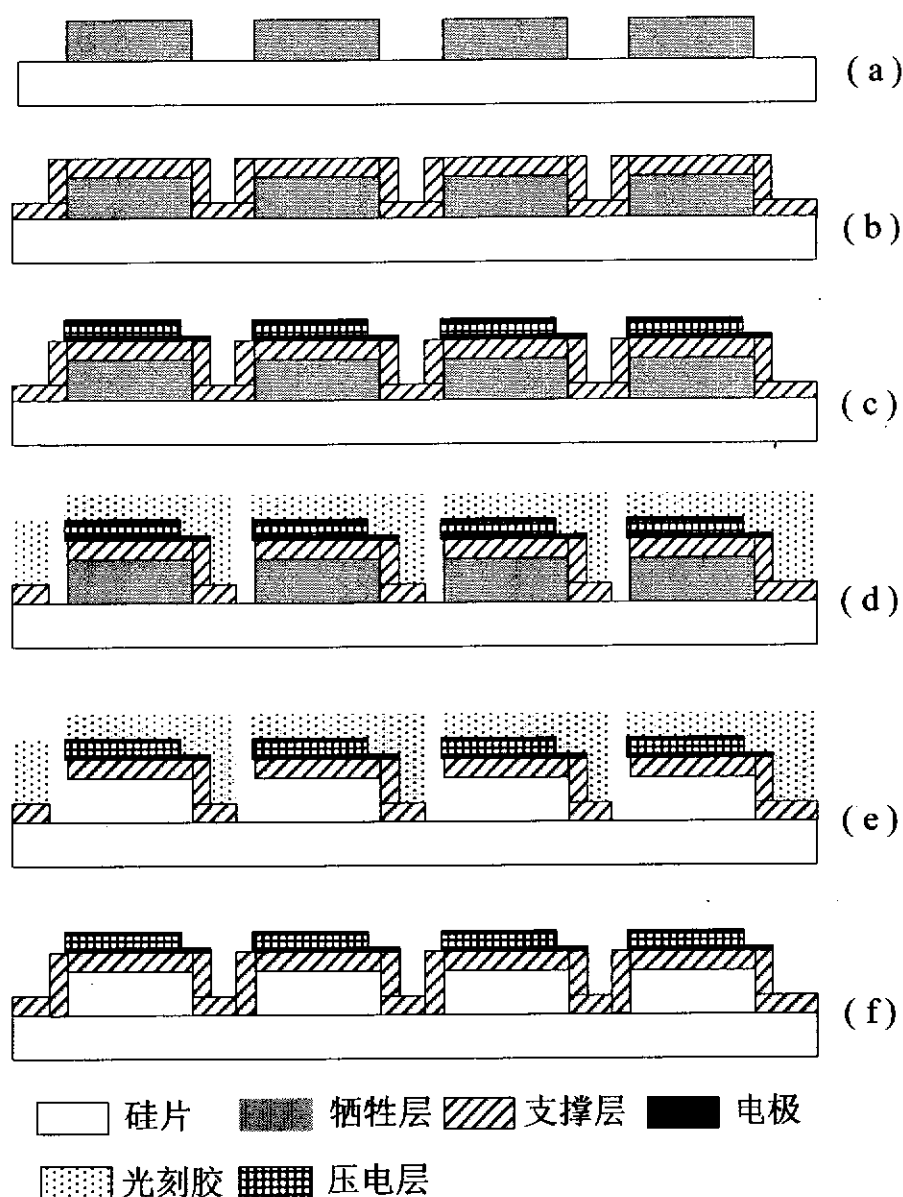


图 4-4-2 牺牲层后释放制备方法的工艺流程

后释放牺牲层制备 MHz 硅微压电超声换能器的工艺流程如图 4-4-2 所示，其主要的工艺制作步骤为：

- (a) 硅片正面淀积牺牲层，并图形化形成振动膜下空腔图案；
- (b) 在牺牲层上淀积换能器的振动膜，为 LPCVD 的氮化硅薄膜或氮化硅/LTO/氮化硅三层复合振动膜；
- (c) 在氮化硅薄膜用 ICP 干法上刻蚀出牺牲层释放孔；
- (d) 用光刻胶保护电极及 ZnO 压电薄膜，湿法释放牺牲层，并置换干燥，形成振动膜下方的空气隙；
- (e) 在氮化硅上制作下电极、压电层和上电极组成的压电传感部分。
- (f) 在氮化硅薄膜用 ICP 干法上刻蚀出牺牲层释放孔；

(e) 反刻法定积厚膜, 填堵牺牲层释放孔, 剥离掉释放孔以外区域的厚膜, 完成换能器的制备。

这种最后释放牺牲层的工艺方法优点为:

- (1) 整个工艺制作过程中, 除填堵释放孔外, 都不需临近光刻, 降低了工艺制作复杂度;
- (2) 在释放牺牲层工艺之前, 振动膜不会发生横向位移, 不易受到损坏;
- (3) 能保证氧化锌压电薄膜在振动膜上生长的稳定性, 保证压电薄膜的晶向及其压电性。

其主要问题在于:

- (1) 在牺牲层释放的时候, 需要避免牺牲层腐蚀液对电极及压电层的造成损伤, 同时牺牲层释放时间不易过长;
- (2) 牺牲层释放孔填堵需要采用反刻法进行, 制作工艺较为复杂。

4.5 MHz 硅微压电超声换能器的制备及测试实验结果

4.5.1 牺牲层释放工艺实验研究

在换能器的整个制作过程中, 牺牲层释放为难度最大的步骤, 本文经过多次实验选取了易生长、易腐蚀的 ZnO 作为牺牲层材料。用稀磷酸湿法释放牺牲层后进行冷冻升华, 保证空气腔的干燥。图 4-5-1 为牺牲层释放后的硅片照片。

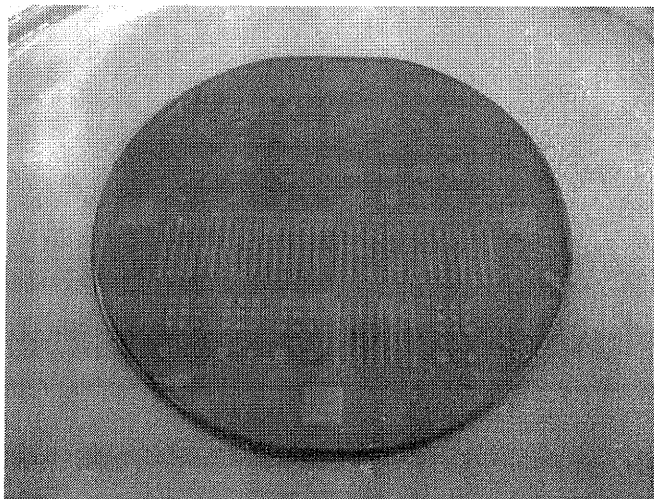


图 4-5-1 硅片释放牺牲层的情况

牺牲层释放需要较为稀释的腐蚀液，一般为 5%~10% 的磷酸即可，由于磷酸较为粘稠，因此稀磷酸更容易进入振动膜下方的微气隙当中腐蚀其中的牺牲层。牺牲层释放时间与牺牲层厚度有关，当牺牲层厚度较大时 ($1\mu\text{m}$)，所用释放时间约为 30 分钟。如释放时间不足，会造成牺牲层释放不完全的情况，如图 4-5-2 所示，振动膜有些区域出现干涉状条纹，是由于振动膜下方的牺牲层腐蚀不均匀导致振动膜下方腔体高度不一，从而产生图 4-5-2 右图所示的振动膜花纹情况。

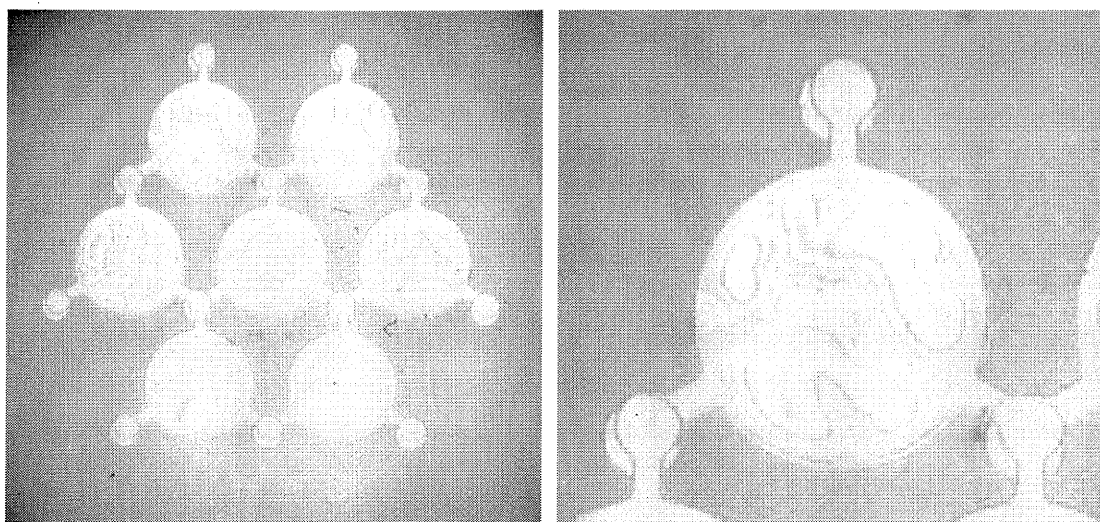


图 4-5-2 牺牲层释放不完全情况照片

当牺牲层全部释放时，将硅片在去离子水中充分浸泡后进行冷冻生化干燥即可。图 4-5-3 为牺牲层释放完成，并干燥升华后的 SEM 照片，可以清楚看到振动膜非常平整。图 4-5-4 为牺牲层释放孔及释放沟道的 SEM 照片，腐蚀液从腐蚀孔进入，首先将腐蚀释放沟道内的牺牲层，然后从释放沟道进入振动膜下方的牺牲层区域。由图 4-5-3 和图 4-5-4 可见，每个振动膜都接有三个牺牲层释放沟道，相邻的振动膜可以共用一个牺牲层释放孔。这样的设计是为了尽量使振动膜下方的牺牲层能充分释放，避免单个沟道堵塞影响腐蚀液体的进入，保证牺牲层释放的成功率。

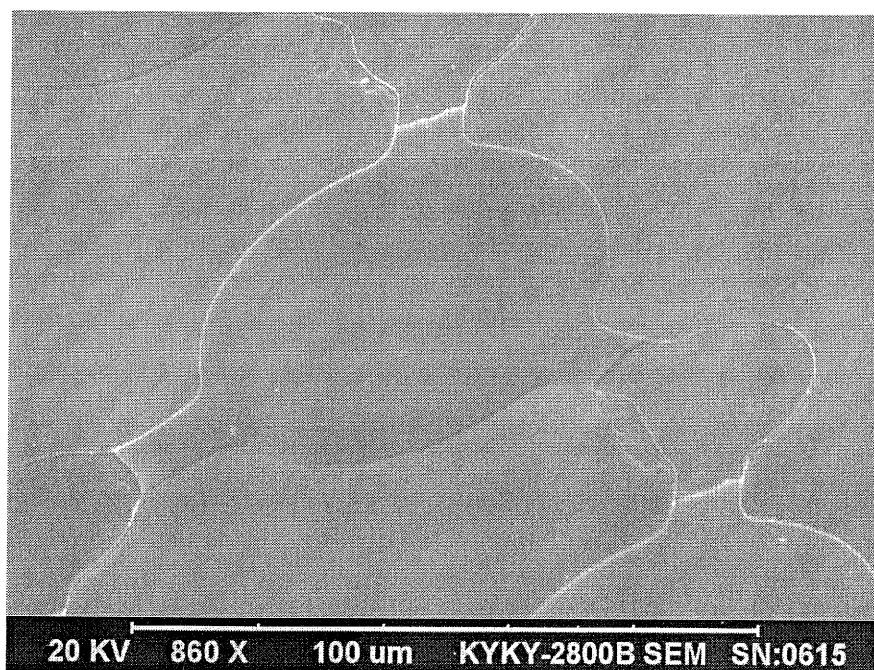


图 4-5-3 牺牲层释放完全后 SEM 照片

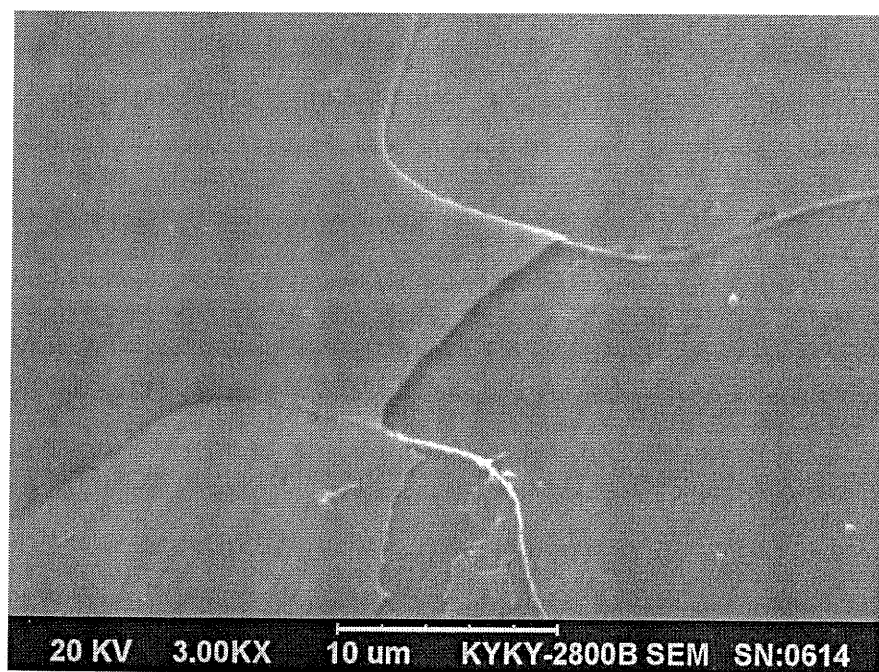


图 4-5-4 释放沟道的放大 SEM 照片

4.5.2 换能器制备实验结果

图 4-5-5 为最终制备完成的 MHz 硅微压电超声换能器照片，由 7 个微换能器单元并联而成，每个单元直径为 $200\ \mu\text{m}$ ，并联单元的中心距离为 $230\ \mu\text{m}$ ，成正六边形排列。

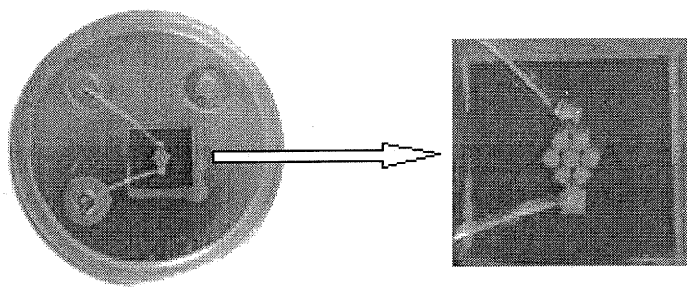


图 4-5-5 1 MHz 硅微压电超声换能器的照片

4.5.3 换能器导纳测试结果

我们使用 Aglient4395 网络分析仪测量了换能器的在空气中的导纳频响曲线，如图 4-5-6 所示。测得换能器谐振频率为 1.14MHz，与 1MHz 的设计频率较为接近，与考虑了残余应力的频率 1.13MHz 符合。

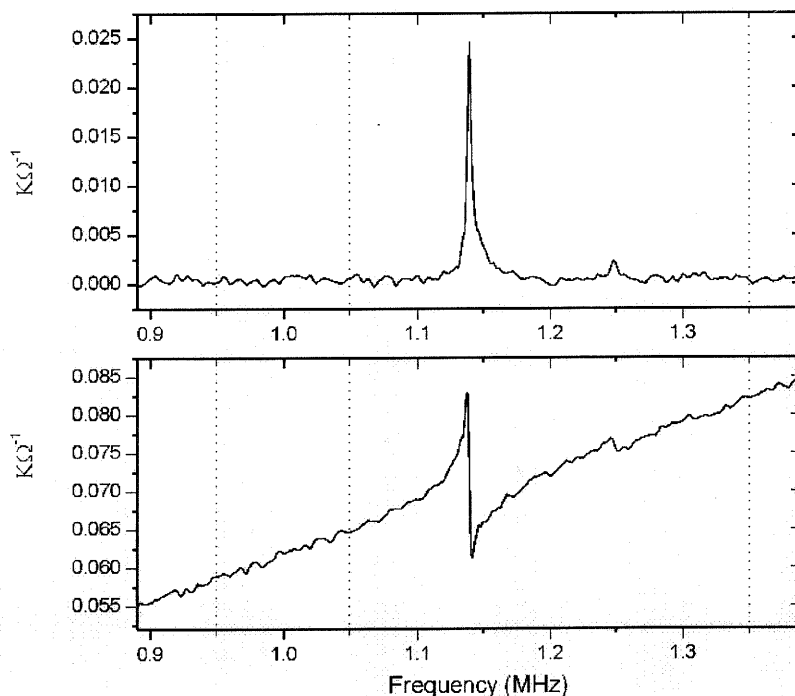


图 4-5-6 1 MHz 硅微压电超声换能器的导纳频响曲线。上图为实部，下图为虚部。

4.5.4 换能器的等效电路

根据换能器在谐振频率附近的导纳、电容等参量提取出等效网路电路参数，具体方法与 3.4.2 节相同。硅微压电超声换能器的测量等效电路结构如图 3-16

所示, 其中 R_0 为压电薄膜ZnO的介电损耗引入的并联电阻, C_0 为换能器的静态电容, R_m , L_m 和 C_m 分别为换能器的动态电阻、动态电感和动态电容。这里不同的是, 由图 4-16 中实部曲线所示, 由于MHz换能器的导纳实部曲线底端值接近于0, 这说明该换能器的ZnO压电薄膜的介电损耗较小, 引入的并联电阻 R_0 非常大, 可以从并联之路上去掉, 此时换能器的等效电路如图 4-5-7 所示。

由图 4-5-7 可得 MHz 硅微压电超声换能器的等效电路的导纳的实部 G 和虚部 B 为 (4.29) 式

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

$$B = \frac{\omega (C_0 + C_m (1 - \omega^2 L_m C_m))}{(1 - \omega^2 L_m C_m)^2 + \omega^2 R_m^2 C_m^2} \quad (4.29)$$

结合由实际测得的换能器的导纳的频率响应曲线, 用最小二乘法拟合可以得到共振频率附近的压电换能器的集中参数等效电路的各参数值。

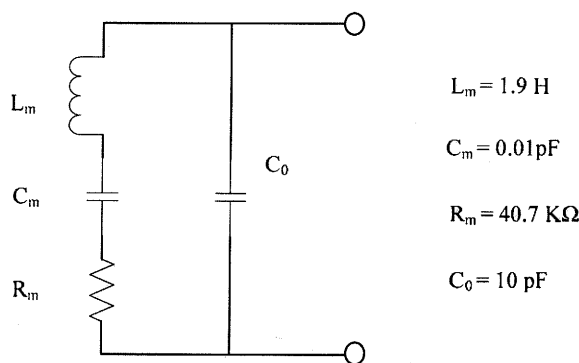


图 4-5-7 MHz 硅微压电超声换能器等效电路

由 (3.9) 式及图 4 所示的等效电路参数可以计算得到频率为 1.14MHz 的硅微压电超声换能器的机械品质因数 $Q_m = 343$ 。

4.5.5 接收和发射灵敏度测试结果

4.5.3.1 实验方法

换能器的接收和发射实验在油槽中进行, 采用比较法对硅微压电超声换能器进行发射及接收实验。收发距离为 6 cm。发射信号由信号发生器直接产生, 发

射信号为 10 个周期的正弦信号，频率 1.14 MHz。接收信号由示波器直接采集。

用于做比较的标准水听器为 NCS-1 型 PVDF 探针式水听器, 如图 4-5-8 左图所示。敏感元件为 PVDF 压电薄膜, 直径 0.8 mm, 厚度为 25 μm 。标准水听器在 1 MHz 的接收灵敏度最高, 为 67.0 nV/Pa, 即 -263.5 dB (ref 1V/ μPa)。发射换能器为 PZT 换能器, 如图 4-5-8 右图所示, 1 MHz 的发射电压响应为 146.2 dB (1 $\mu\text{Pa}\cdot\text{m}/\text{V}$)。

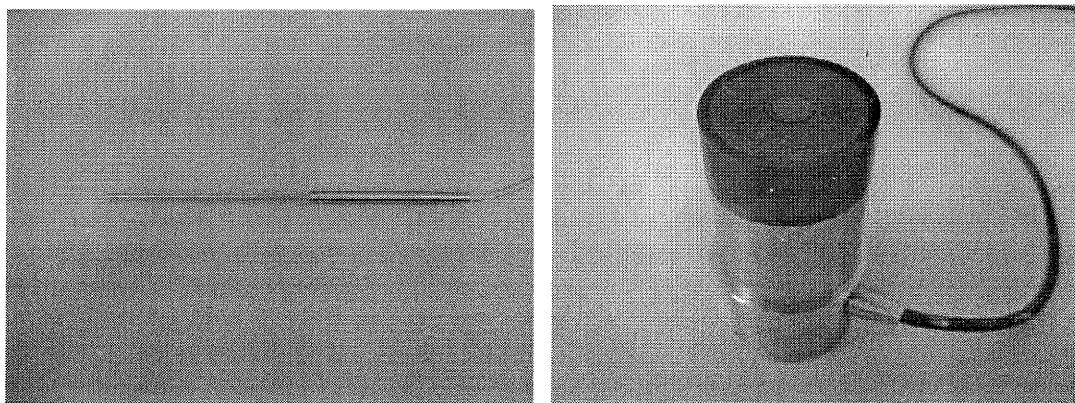


图 4-5-8 标准水听器（左）和发射换能器（右）的实物照片

4.5.3.2 接收匹配电路

由于硅微压电超声换能器的静电容很小, C_0 仅为 10 pF, 直接用导线连接会有较大的寄生电容, 无法有效接收信号。换能器的接收电路选用的是 JFET 放大器作为阻抗匹配, 其特点是输入阻抗大, 带宽为 10 MHz 以上。电路的实物照片如图 4-5-9 所示。

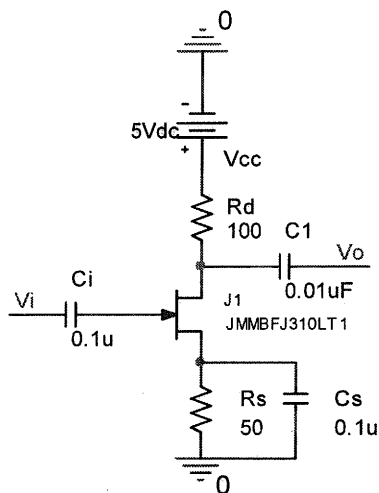


图 4-5-9 接收电路原理图

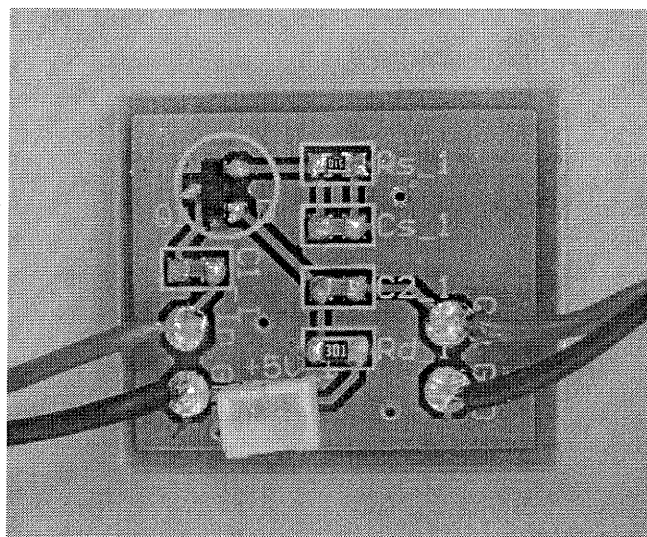


图 4-5-10 JFET 接收电路照片

4.5.3.3 测试结果

通过比较法，测得硅微压电超声换能器在 1MHz 附近的接收灵敏度为 -255.5 dB (ref 1V/ μ Pa)，相比标准水听器提高约 8 dB。

利用比较法，测得硅微压电超声换能器在 1MHz 附近的发射电压响应为 131.2 dB ($1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m/V}$)，相比标准发射换能器降低约 15 dB。

换能器的发射电压响应比较低，其原因分析为单个硅微压电超声换能器的声辐射面积较小，发射端缺少必要的匹配，以及 ZnO 材料的压电常数本身较低。可以通过采用硅微压电超声换能器阵列进行发射，以提高发射声压；根据硅微压电超声换能器的等效电路，设计响应的发射匹配电路，用以提高发射效率；另外，探索制备高压电常数的压电薄膜，如 PZT 等，替代 ZnO，进一步提高硅微压电超声换能器的收发性能。

我们用比较法近似测得 1 MHz 硅微压电超声换能器的归一化接收幅度的频响曲线，如图 4-5-11，可以估算得到换能器的 -3 dB 带宽约为 68%。我们考虑，设计较好的发射匹配电路及收发同路的换能器电路，对硅微压电超声换能器进行自发自收实验应该能够得到更为准确的实验结果。

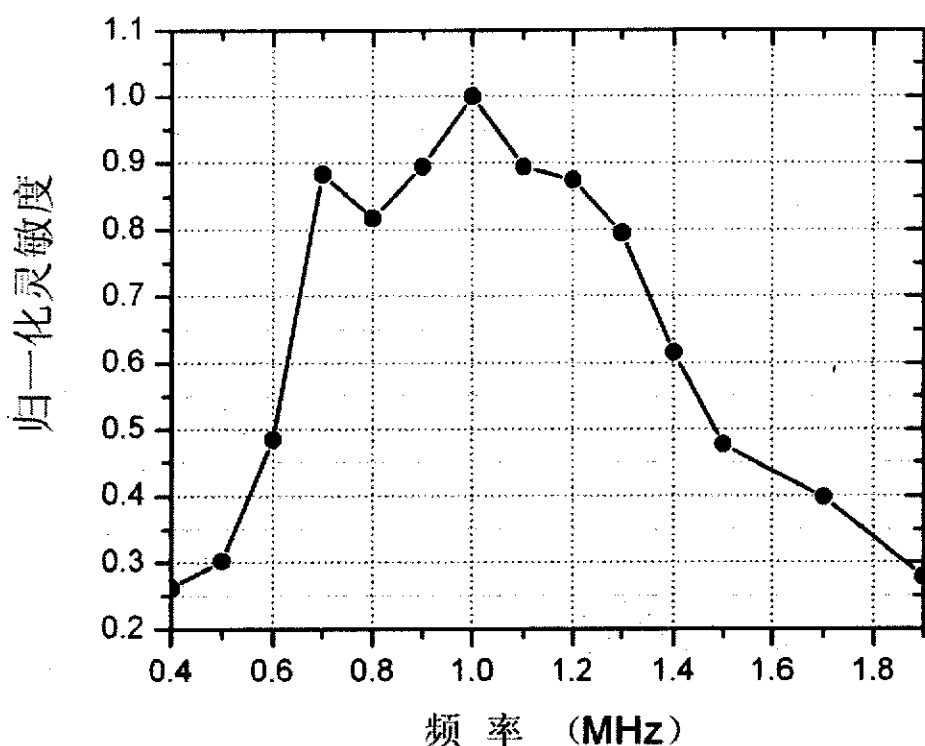


图 4-5-11 换能器归一化接收频率响应

4.6 本章小结

本章主要介绍了谐振频率约为 1MHz 硅微压电超声换能器研制工作。推导了圆形多层复合振动膜的谐振频率，计算了薄膜残余应力对谐振频率的影响。推导了硅微压电超声换能器的受迫振动位移、机械耦合能及等效电路。计算了换能器的发射声场。针对频率较高的换能器的特点，将采用多个微单元并联的结构。设计并制备了谐振频率为 1MHz 的硅微压电超声换能器并研究了牺牲层释放工艺在换能器制备中的应用。测量了换能器的导纳频响曲线，测得换能器的谐振频率为 1.14MHz，与理论分析结果基本一致。拟合得到换能器的等效电路。并初步进行了换能器的收发实验。

参考文献

- [1] 冯若主编. 超声手册, 南京, 南京大学出版社, 1999: 254-263, 1014-1029

- [2] 杜功焕. 声学基础, 南京大学出版社, 2001: 109
- [3] S. 铁摩辛柯. 板壳理论, 科技出版社, 1977
- [4] 徐芝纶. 弹性力学, 高等教育出版社, 1990
- [5] N. T. Adelman, Y. Stavsky. Flexural-extensional behavior of composite piezoelectric circular plates. 1980, Acoustical Society of America, 67(3): 819-822
- [6] 曹志远. 板壳振动理论. 北京: 中国铁道出版社, 1989
- [7] 栾桂东, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器与换能器阵列, 北京, 北京大学出版社, 2005:181
- [8] 林书玉. 超声换能器的原理及设计, 北京, 科学出版社, 2004: 36

第五章 结论与展望

本文主要开展了关于硅微压电传声器、低频和 MHz 级硅微压电超声换能器的理论和实验研究,完成了以下工作:

理论方面:

1. 本文推导了硅微压电传声器的接收响应,计算了均匀载荷及谐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,分析了电极、压电层厚度、支撑层厚度及支撑层材料对硅微压电传声器接收灵敏度的影响,为进行传声器的优化设计提供理论依据。
2. 推导了方形和圆形多层复合振动膜的谐振频率,分析了薄膜残余应力对换能器谐振频率及振幅分布的影响。为设计换能器的工作频率提供理论依据。
3. 推导了硅微压电超声换能器的受迫振动位移、机械耦合能及换能器的等效电路等效电路。
4. 计算了多单元并联的 MHz 硅微压电换能器的发射声场。为合理选取并联单元数目及单元间距的设计提供了参考依据。

实验方面:

1. 设计并制备了方形振动膜、圆形振动膜硅微压电传声器芯片,并根据理论分析进行改进及优化。优化设计后的传声器在 1 KHz 的接收灵敏度为 -60 dB (ref 1 V/Pa),已达到 ZnO 硅微压电传声器的国际先进水平。
2. 首次设计并制作出基于聚酰亚胺振动膜的硅微压电传声器芯片,测得其灵敏度可达 -59 dB (ref 1 V/Pa)。
3. 设计并制备了硅微压电水听器样品,进行了初步的防水封装,并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。
4. 设计并制作了中心频率为 40 KHz~200 KHz 的低频硅微压电超声换能器,测得换能器的谐振频率果与理论分析较为符合。通过测得的换能器导纳频响曲

线拟合得到换能器的等效电路,测得换能器机械品质因数 Q_m 约为 171。测得谐振频率为 71 KHz 的微压电超声换能器的接收灵敏度约为 -201.6 dB (ref 1V/ μ Pa),发射电压响应约为 137 dB (ref 1 μ Pa·m/V)。

5. 提出了一种新型的基于牺牲层释放工艺的多单元并联式硅微压电超声换能器的设计思想。这种设计的硅微压电超声换能器突破了传统体刻蚀工艺在面积上的限制,能够有效降低换能器阻抗、减小寄生电容对换能器的影响,提高单个换能器的收发效率。
6. 在国内首次制备出谐振频率在 MHz 级的硅微压电超声换能器。测得换能器的谐振频率为 1.14 MHz,与理论分析结果基本一致。通过导纳曲线拟合得到换能器的等效电路,测得换能器机械品质因数 Q_m 约为 343。初步测得到换能器的在 1MHz 的接收灵敏度约为 -255 dB (ref 1V/ μ Pa),发射电压响应为 131.2 dB (1 μ Pa·m/V), -3dB 带宽约为 68%。

通过本文的理论和实验研究,为设计和制备硅微压电换能器奠定了一定的基础。同时我们也认识到,本文在某些方面存在一些问题,需要改进和完善的地方现主要总结为以下几个方面:

1. 目前我们对研制的换能器的测量还不够全面,主要是局限于缺乏针对于微小尺寸换能器的相关设备及方法,应当尽量利用现有条件,积极设计专门的实验,细致的测量换能器的参数,为研究硅微压电换能器的性质、参数打好基础。
2. 我们所进行的换能器发射实验时,测得的换能器发射电压响应较低,其原因之一是缺少发射端匹配电路。由于硅微压电超声换能器的阻抗比传统 PZT 换能器高,且自身电容较小,因此对于内阻为 50 欧的信号源而言,发射功率很难加在换能器上,从而影响了换能器的发射效率。要根据硅微压电超声换能器的特性,设计专门的发射匹配电路,提高换能器的发射效率。
3. 目前我们使用的换能器芯片的封装比较简单,只是将换能器贴在一金属管座上进行测量,换能器只能工作于空气或绝缘的液体介质中。而对于面向应用的硅微压电换能器而言,需要有相应的防水封装,化并同时考虑封装对声学接收及声阻抗匹配的相应问题。为硅微压电换能器进一步接近实用化打好基础。

础。

4. 我们所制备的硅微压电换能器均采用了 ZnO 作为压电层, 其压电系数是比较低的, 如果能够将压电系数较高的 PZT、PZ 等材料制作成换能器的压电薄膜, 势必能提高换能器的收发性能, 这需要解决一些薄膜制备问题以及相应的工艺兼容性的问题。
5. 由于采用 MEMS 工艺制备硅微压电换能器的振动膜, 因此薄膜应力对于换能器的是存在一定影响的, 尤其对于低频器件。在这方面的实验研究我们做的还不够细致, 理论分析也需要更加深入, 应当将影响换能器性能的因素尽量加以考虑和分析, 为制作高性能的硅微压电换能器以及换能器阵列打好基础。