

第一章 导 论

1.1 硅微换能器的应用背景

随着MEMS声学器件研究的迅速发展,“微机械加工的电容式超声换能器(cMUT)”和“微机械加工的压电式超声换能器(pMUT)”目前成为国外医疗超声换能器发展的重要趋向^[1]。换能器是超声探头的功能件,具有发射和接收超声信号的功能。换能器的性能指标决定了超声成像系统的性能。高性能的换能器是保证超声诊断图像高分辨率和高清晰度的关键。现有的传统超声换能器为沿厚度方向极化的压电材料(如PZT)并依靠其厚度方向振动进行电声转换。这种换能器的频率由压电材料的厚度决定,因此其工作频率受到压电材料厚度制作工艺的限制,尤其对于高频超声换能器;另外,由于传统换能器与空气或液体间的声阻抗相差较大,其相对带宽受到限制,而宽频带的换能器能够提高轴向分辨力,能够提高组织谐波成像性能并且能够提高超声成像系统的灵敏度;再者,传统的换能器在高频超声及三维超声成像方面的应用难度较大,高频超声换能器需要极薄的压电材料而三维超声成像需要阵元尺寸微小均匀且排列紧密的二维超声换能器阵列,目前的切割和引线工艺都难以满足上述需要。MEMS技术制造的硅微超声换能器具有许多传统换能器没有的优点。首先,硅微超声换能器的频率为振动膜的弯曲振动频率,该频率可以通过调整振动膜的几何尺寸来设计,不受压电材料厚度的限制;其次,硅微超声换能器具有较低的声阻抗,因此换能器的带宽相对较宽,可达100%以上^{[2][8]}。再者,硅微超声换能器的制作方法非常适于制作二维超声换能器阵列,其准确的光刻工艺可以保证每个阵元的几何尺寸的一致性,这是传统换能器的切割工艺很难做到的。最后,硅微压电超声换能器采用半导体工艺在硅片上制作,因此使得将换能器和接收和发射端电路集成在同一硅片上成为可能,这样将很大程度上减小系统的寄生电容以及噪声水平,而且成熟半导体电路工艺制作的发射接收电路还能够有效节省系统成本。

硅微超声换能器主要分为电容式硅微超声换能器和压电式硅微超声换能器两种。电容式硅微超声换能器是由振动膜、背板及中间的微气隙构成的微电容结构,具有接收灵敏度高、带宽较宽的优点。但是该换能器需要一定的偏置电压,

为达到最优性能,偏压的值要在电容的 pull-in 电压附近,而由于工艺加工精度和残余应力的存在,要保证每个换能器单元的 pull-in 电压一致是很困难的;另外,电容式硅微超声换能器在设计上存在难题:作为发射单元,希望振动膜有足够的振幅,就需要较大的微气隙;而作为接收单元,希望具有较高接收灵敏度,这就需要尽量小的微气隙,两者是矛盾的;再者,电容式硅微超声换能器的电阻抗很大,通常为 $G\Omega$ 量级,因此给电学端的匹配带来困难。压电式硅微超声换能器相比电容式换能器具有以下优点:首先,压电式硅微超声换能器的电容较大,因此系统的寄生电容产生的影响相比电容式换能器较小;其次,压电式硅微超声换能器的电阻抗相对较低,更易于发射及接收端的电路匹配;再者,压电式硅微超声换能器不需要偏置电压也没有微气隙,因此对单元的尺寸精确性要求相对不高,工艺难度也相对较低。因此,我们将硅微压电超声换能器作为主要的研究对象,尤其是将可以应用于医学超声频域的 MHz 以上的硅微压电超声换能器作为理论分析设计和实验制作的重点。

1.2 硅微压电超声换能器的发展现状

硅微超声换能器的研究已经成为超声换能器领域的发展热点,其性能和结构优势以及在医疗诊断上的应用前景更被人看好,国外一些大的医疗超声公司如GE等已开展这方面的研究并取得一定的成果^[3]。其中硅微电容式超声换能器及阵列的研究开展较早,其中美国的斯坦福大学研究较为深入和全面^{[4][5][6][7][8]}。另外西班牙的声学研究院、德国Applied Science大学^[9]、英国的Warwick大学^[10]、美国Georgia技术学院^[11]、意大利的Roma大学^[12],土耳其的Işık大学^[13]等许多机构都开展了这项研究。

硅微压电超声换能器的研究相对较晚,但是发展迅速,主要是采用含有压电薄膜的振动膜的弯曲振动方式,压电材料主要为ZnO和PZT压电薄膜^[2]。目前国外已经广泛开展了该项研究,尤其是面向医学诊断频域的换能器的研制。如日本的Osaka大学,在SOI片上做出了基于PZT压电薄膜的换能器阵列,换能器谐振频率为100KHz^{[14][15]}。美国斯坦福大学使用ZnO压电薄膜做出了微换能器及阵列,谐振频率为2.85MHz^{[16][17]}。瑞士的EPFL研制了基于PZT压电薄膜的硅微压电超声换能器,谐振频率为240KHz和16.9MHz两种,其中频率为16.9MHz的换能器的Q值为

25^[(18) (19)]。美国科罗拉多大学研制了谐振频率为 6MHz 的硅微压电超声换能器,并在水中测得相对带宽为 120%^[(20)],该换能器组成的阵列将用于三维超声成像。美国杜克大学研制了用于超声诊断的二维硅微压电超声换能器阵列,其换能器设计频率为 4MHz~13MHz^[(21)]。从进几年的报道来看,面向医学超声应用领域的硅微压电超声换能器及阵列的研究是主要发展方向。

国内在硅微压电超声换能器方面研究较少,在医用频率(2MHz 以上)的硅微压电超声换能器的研究还没有见到报道。清华大学研制了 d_{33} 模式的谐振频率为 44KHz 硅微压电超声换能器,并在空气中测量了换能器的指向性^[(22)]。另外,中国科学院声学研究所长期在压电薄膜和压电换能器及压电体激发方面具有深入的研究工作^[(23) (24)],为硅微压电超声换能器的声电转换分析提供了理论基础。

1.3 论文的主要工作

本文的研究安排主要为:

以研究和制备硅微压电换能器为目的,首先对器件尺寸较大、工艺制作相对简单的硅微压电传声器进行了研制,作为 MEMS 工艺制作的基础;继而设计并制备了工作频率较低的硅微压电超声换能器,为换能器的设计、工艺制作、分析和测量等方面提供了依据;最后设计制作了 MHz 的硅微压电超声换能器。论文的具体内容安排如下:

第一章介绍了硅微超声换能器及换能器阵列的应用背景和技术特点。阐述了硅微超声换能器及阵列的特点,以及应用前景,分析了电容式和压电式硅微超声换能器的特性,并介绍了两种换能器的目前发展状况。

第二章介绍了硅微压电传声器的研制。推导了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,并进行了相关测试。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。

第三章介绍了低频硅微压电超声换能器的研制。分析了换能器的谐振频率及应力对频率的影响,制备完成了换能器芯片并测量了换能器的导纳频响曲线,拟

合得到换能器的等效电路, 并对换能器进行了超声信号的收发实验,

第四章介绍了谐振频率为 1MHz 的硅微压电超声换能器的研制。提出了多微单元并联的新结构。对换能器的谐振频率、受迫振动、等效电路及发射声场进行了计算分析。采用牺牲层释放工艺取代传统体刻蚀方法, 制备完成了频率为 1.14MHz 的并联式换能器芯片, 最后测量了换能器的导纳频响曲线及换能器的接收灵敏度及发射电压响应。

第五章为结论与展望

参考文献

- [1] 袁建人, “国外医疗超声换能器的应用、研究和发展”, 中国医疗器械信息, 2004, 10(5), 48-52
- [2] Firas Akasheh et al. Development of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers. *Sensors and Actuators*, 2004, A111, 275-287
- [3] David M.Mills et al. Medical imaging with capacitive micromachined ultrasound transducer(cMUT) arrays, *IEEE UFFC 50th Anniversary Conference*, 2004, 384-390
- [4] Ömer Oralkan, et al. Volumetric ultrasound imaging using 2-D CMUT arrays. *IEEE trans.UFFC*, 2003, Vol.50, No.11, 1581-1594.
- [5] David T.Yeh et al. 3-D ultrasound imaging using a forward-looking CMUT ring array for intravascular/intracardiac applications. *IEEE Trans. UFFC*, 2006, Vol.53, No.6, 1202-1211
- [6] Utkan Demirciet al. Forward-viewing CMUT arrays for medical imaging. *IEEE Trans.UFFC*, 2004, Vol.51, No.7, 886-894
- [7] Yongli Huang et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUTs) with piston-shaped membrane. *IEEE Ultrasonics Symp.*, 2005, 589-592
- [8] Ira O.Wygant et al. Integration of 2D CMUT arrays with front-end electronics for volumetric ultrasound imaging. *IEEE Trans. UFFC*, 2008, Vol.55, No.2, 327-342
- [9] Marta Buigas,et al. Electro-acoustical characterization procedure for cMUTs.

Ultrasonics, 2004

- [10] A.Neild, et al. Imaging using air-couple polymer-membrane capacitive ultrasonic arrays. *Ultrasonics* 42, 2004, 859-864
- [11] Jaime Zahorian, et al. Annular CMUT arrays for side looking intravascular ultrasound imaging. *IEEE Ultrasonics Symp.*, 2007, 84-87
- [12] E.Cianci, et al. Improvement towards a reliable fabrication process for cMUT. *Microelectronic Engineering*, 2003, 67-68, 602-608
- [13] I.O.Wygant, et al. An Endoscopic Imaging System Based on a Two-Dimensional CMUT Array: Real-Time Imaging Results. *IEEE Ultrasonics Symp.*, 2005, 792-795
- [14] Karou Yamashita, et al. Ultrasonic micro array sensors using piezoelectric thin films and resonant frequency tuning. *Sensors and Actuators*, 2004, A114, 147—153
- [15] Karou Yamashita, et al. Arrayed ultrasonic microsensors with high directivity for in-air using PZT thin film on silicon diaphragms. *Sensors and Actuators*, 2002, A97-98, 302—307
- [16] Gökhan Perçin et al. Piezoelectrically actuated flextensional micromachined ultrasound transducers—II: Fabrication and experiment. *IEEE Trans.UFFC*, 2002, Vol.49, No.5, 585-595
- [17] Gökhan Perçin et al. Piezoelectrically actuated flextensional micromachined ultrasound transducers—I:Theory.*IEEE Trans. UFFC*, 2002, Vol.49, No.5, 573-584
- [18] Brahim Belgacem. Piezoelectric micromachined ultrasonic transducers based on PZT films. *Applications of ferroelectrics*, 2006, 1-6
- [19] Brahim Belgacem et al. Thick Sol-Gel PZT film integrated in SOI-based, micromachined ultrasonic transducers. *IEEE Sensors*, 2006, 1-5
- [20] Jessica Liu, Optimizing the design of a 2D array piezoelectric micromachined ultrasound transducer for 3D echo particle image velocimetry. *IEEE Ultrasonics Symp.*, 2006, 2329-2332
- [21] John B.Castellucci et al. Performance of flexure-mode pMUT 2D arrays. *IEEE Ultrasonics Symp.*, 2007, 1053-1056

- [22] Chao Wang et al. A micromachined piezoelectric ultrasonic transducer operating in d_{33} mode using square interdigital electrodes. IEEE Sensors Journal, 2007, Vol(7), No7, 967-976
- [23] Donghai Qiao, Chenghao Wang and Zuo-qing Wang, "Focusing of surface acoustic wave on a piezoelectric crystal", CHIN.PHYS.LETT., 2006, Vol.23, No.7, 1834-1837.
- [24] Qiao Donghai, Li Shunzhou, Wang Chenghao, High frequency acoustic microscopy with Fresnel zoom lens, Science in China G: Physics, Mechanics & Astronomy, 2007, Vol.50, No. 1, 41-52

第二章 硅微压电传声器的设计与制作

2.1 硅微压电传声器的研究背景

微型传声器是一种典型的弯曲振动压电换能器，在手机、助听器、个人PDA、笔记本电脑及工业监测等领域有着广泛的潜在应用^[1]。与传统的麦克风相比，它具有尺寸小、价格低、易于批量生产，并易于和后端电路集成等优点。MEMS传声器主要有电容式和压电式两种。电容式的MEMS传声器灵敏度较高（可达10mV/Pa）^[2-4]，但需制作微气隙，工艺较为复杂，而且还需要直流偏置电压。压电式的MEMS传声器不需微气隙，制作工艺较为灵活简单，但灵敏度相对较低，如Ried的0.92mV/Pa^[5]以及Kim的1mV/Pa^[6]。压电式MEMS传声器一般采用PZT^[7-10]和ZnO^{[5-6][11-12]}作为压电薄膜，PZT的压电常数较大，但应为工艺中含有Pb，不易与半导体电路工艺兼容^[8]；ZnO的压电常数相对较小，但制作工艺简单易于和IC工艺兼容形成SOC^[5]。

硅微压电传声器是低频压电超声换能器在音频段的应用，它具有谐振频率低（一般在20KHz左右），低频接收响应好的特点。在设计上，由于谐振频率低，因此硅微压电传声器的振动膜面积较大，整个器件的尺寸也相对较大；在制作工艺上，由于振动膜面积较大，因此制作难度相对也较低，因此本文首先对硅微压电传声器进行了研究。

2.2 硅微压电传声器的理论分析

2.2.1 振动膜的薄板假设^[13]

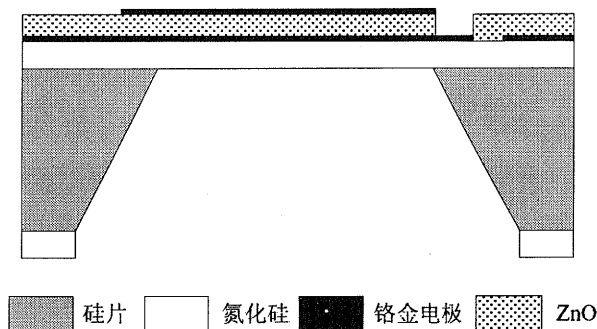


图 2-2-1 硅微压电传声器结构示意图

硅微压电传声器的结构如图 2-2-1 所示,其振动膜一般有支撑层和上下薄膜镀有电极的压电薄膜组成。由于电极的厚度很薄 ($0.1\ \mu\text{m}$ 左右),在分析的过程中往往可以忽略。通常在工程中,最大板厚小于中面最小尺寸的 $1/8$ 至 $1/5$,可称为薄板^[15]。因此,硅微压电传声器的振动膜可以看作是一个由支撑层和压电层构成的双层复合薄板结构,如图 2-2-2 所示。

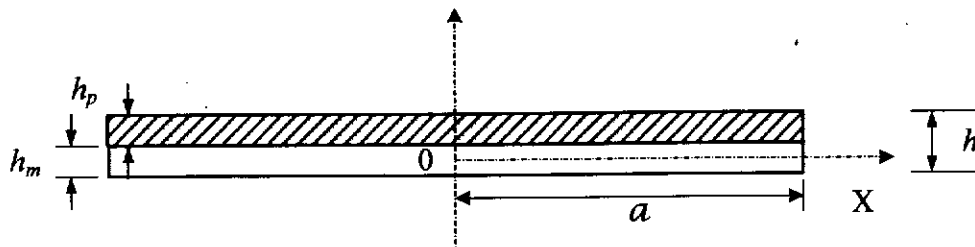


图 2-2-2 硅微压电传声器振动膜结构图

薄板的结构主要承受两种载荷,一种是作用在中面内部的拉、压或剪力,总称中面力;另一种是垂直于中面的力,称横向力。对于中面力,可以认为它们沿板厚均匀分布,由它们所产生的应力和型变可按弹性力学中的平面问题区计算;而横向力使薄板发生弯曲,由此所产生的应力和型变可按照薄板弯曲问题来处理。

以方板为例,当薄板弯曲时,中面将弯成曲面,成为薄板的弹性曲面,将中面上的点在垂直于中面方向的位移记为 $w(x,y)$,称为挠度或挠度函数。如果板的挠度 w 较之于板厚度 h 为小量 ($w \leq h/5$) 称为具有小挠度的薄板,工程上称之为刚性板。薄板的弯曲理论是建立在以下假设基础上的:

1. 板的中面没有变形,在弯曲时此面保持中性。
2. 板的横向正应力可以不予考虑。

由以上假设可知,所有应力分量可由板的挠度 w 表示,而 w 是板平面中两个坐标的函数,与坐标 z 无关,与 x 、 y 有关。此函数须满足一线性偏微分方程,这个方程连同边界条件就能完全确定 w 。这样,这个方程的解,对计算板中任一点的应力就提供了所有需要的条件。对于小挠度的薄板特别有

3. 中面上的点没有平行于 x 、 y 方向的位移,即

$$(u)_{z=0} = 0, \quad (v)_{z=0} = 0$$

在分析薄板问题时, 由于 τ_{xz} 、 τ_{yz} 、 σ_z 应力所引起的形变很小, 可以忽略不计。但是在考虑平衡条件的时候, 它们是不可以忽略的。在薄板的计算中, 通常只计算主要应力 σ_x 、 σ_y 、 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$

对于硅微压电换能器的复合振动膜, 可以按照小挠度薄板结构进行分析。

4. 弯曲中面问题

由上面的表述可知, 对于单层薄板, 其几何中面即为中性面, 没有应变也没有应力, 因此判断此面的位置的标准就是该中性面的两边弯曲刚度相等。对于复合板而言, 应该为中面上下部分的等效弯曲刚度相等。对于单层薄板的弯曲刚度为:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.1)$$

对于复合板结构, 设弯曲的中面位置为坐标零点, 应当有:

$$\int_{z_b}^0 \frac{E(z)}{1-\nu^2(z)} \cdot z^2 dz = \int_0^{z_b+h} \frac{E(z)}{1-\nu^2(z)} \cdot z^2 dz \quad (2.2)$$

其中 h 为复合板的总厚度。由此可以确定复合振动膜上下表面的 z 坐标 z_b , 且 $z_b < 0$ 。

2.2.2 传声器接收特性分析

声学换能器自由场电压灵敏度为^[14]:

$$M_{TV} = \frac{U_r}{p_r} \quad (2.3)$$

用分贝表示为:

$$M_V = 20 \lg \left(\frac{M_{TV}}{M_0} \right) \quad (2.4)$$

式中 U_r 为换能器开路输出电压, p_r 为作用在换能器接收表面的声压, 基准灵敏度 M_0 为 1 V/P_a 。其中:

$$U_r = \frac{Q}{C} \quad (2.5)$$

式中 Q 为压电层产生的电荷, C 为压电层的静电容。

$$C = \frac{(\varepsilon_{33}^T A)}{h_1} \quad (2.6)$$

其中 A 为压电层的面积, h_1 为压电层的厚度。

压电层产生的电荷 Q , 可由压电层内厚度方向的平均应力求得:

$$Q = \int_0^a \int_0^a d_{31}(\overline{\sigma_x} + \overline{\sigma_y}) dx dy \quad (\text{方膜}) \quad (2.7)$$

$$\text{或 } Q = \int_0^a d_{31}(\overline{\sigma_r} + \overline{\sigma_\theta}) 2\pi r dr \quad (\text{圆膜}) \quad (2.8)$$

其中 d_{31} 为压电常数。 $\overline{\sigma_x}, \overline{\sigma_y}$ 分别为 x 、 y 方向的平均应力, $\overline{\sigma_r}, \overline{\sigma_\theta}$ 为 r 、 θ 方向的平均应力, 可由式 (2.9) 求得:

$$\overline{\sigma_i} = \frac{1}{h_1} \int_{z_0}^{z_0+h_{ZnO}} \sigma_i dz \quad (2.9)$$

上式的积分是从 ZnO 层上表面到下表面积分。其中 z_0 为压电层下表面的坐标, 为:

$z_0 = z_b + h_{SiN}$ 。其中 h_{SiN} 为氮化硅支撑层的厚度。 z_b 为整个振动膜下表面的坐标,

可由 (2.2) 式确定为:

$$\int_{z_b}^0 \frac{E(z)}{1-\nu^2(z)} \cdot z^2 dz = \int_b^{z_b+h} \frac{E(z)}{1-\nu^2(z)} \cdot z^2 dz \quad (2.10)$$

其中 h 为振动膜的总厚度。

对于忽略电极的简单情况, 硅微压电传声器的振动膜简化为两层结构, 即氮化硅薄膜和 ZnO 薄膜, h_1 的位置满足下式:

$$\frac{E_{SiN}}{1-\nu_{SiN}^2} \left[(z_b + h_{SiN})^3 + z_b^3 \right] + \frac{E_{ZnO}}{1-\nu_{ZnO}^2} \left[(z_b + h_{SiN} + h_{ZnO})^3 - (z_b + h_{SiN})^3 \right] = 0 \quad (2.11)$$

从上式中, 就可以解出 h_1 相对于弯曲中面的坐标。我们一般希望 ZnO 压电层内部的应力方向是同向的, 因此在设计 and 制作时, 尽量使弯曲中面位于氮化硅薄膜内, 这就存在一个临界状态, 即弯曲中面正好位于氮化硅和氧化锌薄膜的界面

处, 此时应满足下面条件:

$$z_b = -h_{SiN} \quad (2.12)$$

将 (2.12) 代入 (2.11) 可以得到下面的关系:

$$\frac{h_{SiN}}{h_{ZnO}} = \left(\frac{E_{ZnO}}{E_{SiN}} \cdot \frac{1-\nu_{SiN}^2}{1-\nu_{ZnO}^2} \right)^{1/3} = 0.87 \quad (2.13)$$

即当氮化硅薄膜的厚度等于 ZnO 薄膜厚度的 0.87 倍时, 弯曲中面的位置将位于两者界面处; 而当氮化硅薄膜的厚度大于 ZnO 薄膜厚度的 0.87 倍时, 弯曲中面的位置将位于氮化硅薄膜中。

对于方形振动膜, 应力的求解为:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{Ez}{1+\nu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (2.14)$$

对于圆形振动膜, 应力的求解为:

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{E \cdot z}{(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \\ \sigma_\theta = -\frac{E \cdot z}{(1-\nu^2)} \left(\nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \end{cases} \quad (2.15)$$

其中 w 为振动膜在一定载荷下的振动膜的位移。将 (2.14) 或 (2.15) 代入 (2.9) 式及 (2.7) 或 (2.8) 式, 则可求得压电层的产生电荷, 进而由 (2.3)、(2.5) 和 (2.6) 式可求得到传声器的灵敏度。

2.2.3 圆形振动膜硅微压电传声器接收响应分析

2.2.3.1 均匀静压载荷情况下理论计算

在振动膜受到均匀压强的情况下, 边界固定的圆形振动膜横向位移为^[15]:

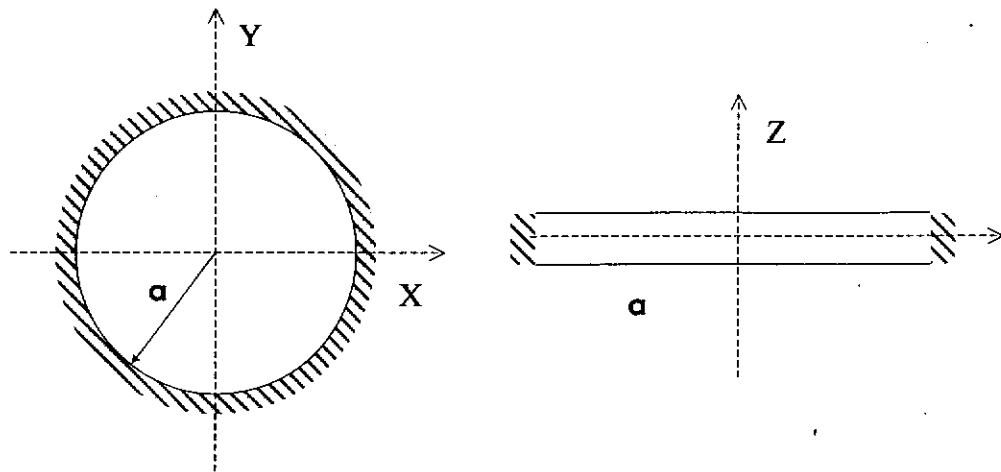


图 2-2-3 边界固定圆形板示意图

$$w = \frac{q_0 a^4}{64 D_e} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2 \quad (2.16)$$

其中 q_0 为压强载荷, a 为振动膜的半径。 D_e 为振动膜的等效弯曲刚度, 可计算为:

$$D_e = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{E(z)}{1 - \nu(z)^2} \cdot z^2 dz \quad (2.17)$$

其中 h 为复合薄板的总厚度。则圆形振动膜的应力分量由 2.15 式可计算为:

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{q_0 E \cdot z}{16 D_e (1 - \nu^2)} [(3 + \nu) r^2 - (1 + \nu) a^2] \\ \sigma_\theta = -\frac{q_0 E \cdot z}{16 D_e (1 - \nu^2)} [(3\nu + 1) r^2 - (1 + \nu) a^2] \end{cases} \quad (2.18)$$

由 2.18 式可以得到圆形振动膜表面的应力分量径向结果示意图, 如图 2-2-4 所示。由图可知, 在振动膜内部的应力分量的方向不是唯一的, 在振动膜的中心区域, 应力是正的, 而在振动膜的边界附近, 应力为负, 因此我们在设计传声器的时候, 希望利用压电层内应力方向相同的区域, 即电极的面积应保证覆盖产生相同极性电荷的压电层区域。由图 2-2-4 可以看出, 当径向位置大于半径的 0.827 倍时, σ_r, σ_θ 均出现负值, 此时压电层产生电荷将出现部分反向, 因此电极的半径应当小于 $0.827a$; 而当径向位置大于半径的 0.628 倍时, σ_r 出现负值, σ_θ 为正, 此时压电层产生电荷同相。因此在电极半径为 $0.628a$ 时, 能够较大程度上得

到压电层中心区域产生的同相电荷。同理，若电极为半径在 $0.827a \sim a$ 范围的环形区域时，将得到压电层边界区域产生的相反极性的同相电荷。

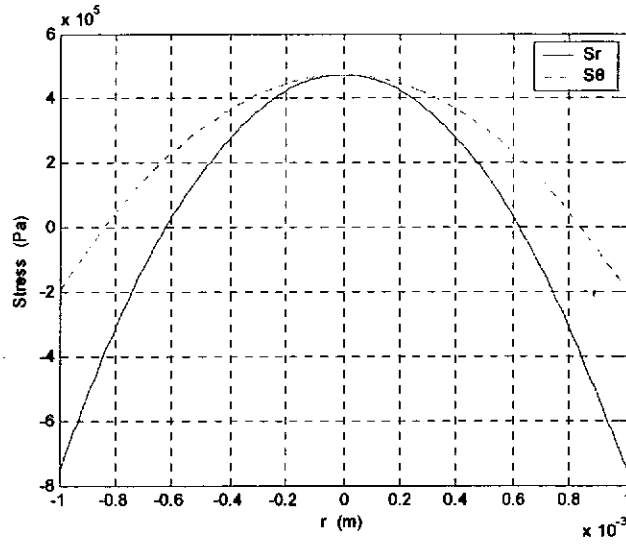


图 2-2-4 圆形振动膜应力分量径向分布图

圆形振动膜内压电层的平均应力由式 (2.9) 为:

$$\begin{cases} \overline{\sigma_{rZnO}} = \frac{1}{h_{ZnO}} \int_{z_0}^{z_0+h_{ZnO}} \sigma_{rZnO} dz \\ \overline{\sigma_{\theta ZnO}} = \frac{1}{h_{ZnO}} \int_{z_0}^{z_0+h_{ZnO}} \sigma_{\theta ZnO} dz \end{cases} \quad (2.19)$$

将 (2.18) 代入 (2.19) 可得压电层内的平均应力为:

$$\begin{cases} \overline{\sigma_{rZnO}} = \frac{q_0 E}{16D_e(1-\nu^2)h_{ZnO}} [(3+\nu)r^2 - (1+\nu)a^2] \cdot \int_{z_0}^{z_0+h_{ZnO}} z \cdot dz \\ \overline{\sigma_{\theta ZnO}} = \frac{q_0 E}{16D_e(1-\nu^2)h_{ZnO}} [(3\nu+1)r^2 - (1+\nu)a^2] \cdot \int_{z_0}^{z_0+h_{ZnO}} z \cdot dz \end{cases} \quad (2.20)$$

其中 $z_0 = z_b + h_{SiN}$ ，式中 z_b 为整个振动膜下表面的坐标，可由 (2.2) 式确定。

设电极为半径为 r_c 的圆形电极，则压电层在电极区域产生的电荷为:

$$Q_c = \int_0^{r_c} d_{31}(\overline{\sigma_r} + \overline{\sigma_\theta}) 2\pi r dr, \quad (2.21)$$

将(2.20)代入 (2.21) 得

$$Q = -\frac{\pi d_{31} q_0 E}{8D(1-\nu)h_{ZnO}} r_c^2 (r_c^2 - a^2) \cdot \int_{z_0}^{z_0+h_{ZnO}} z \cdot dz \quad (2.22)$$

对于只考虑氮化硅和 ZnO 薄膜的情况有：

$$Q = -\frac{\pi d_{31} q_0 E}{16D_e(1-\nu)} r_c^2 (r_c^2 - a^2) \cdot (2z_b + 2h_{SiN} + h_{ZnO}) \quad (2.23)$$

将 Q 代入电压表达式 (2.5)，并由 (2.3) 及 (2.4) 式即可求得静压强下的圆形振动膜传声器的接收灵敏度。

2.2.3.2 计算结果及分析

图 2-2-5 为 ZnO 压电层产生电荷与电极半径的关系，由结果可知，在电极半径 $0 < r_c < 0.628a$ 时，电荷随电极面积增大而增大；当电极半径 $r_c \geq 0.628a$ 时，由于边缘区域产生的反向电荷，使压电层总电荷减少，因此在 $r_c = 0.628a$ 时，产生的同向电荷最大。

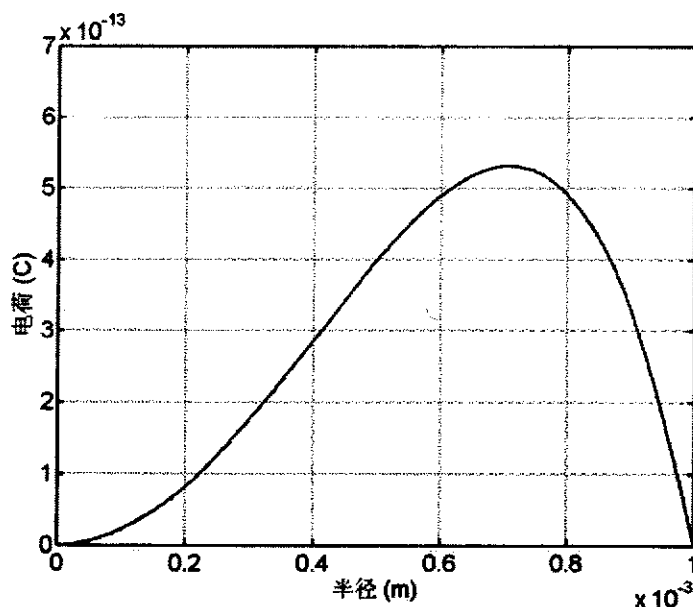


图 2-2-5 压电层产生电量与电极半径的关系

图 2-2-6 为 ZnO 压电层电容与电极半径的关系，可知压电层的电容由电极的面积决定，随半径的增加而增大。

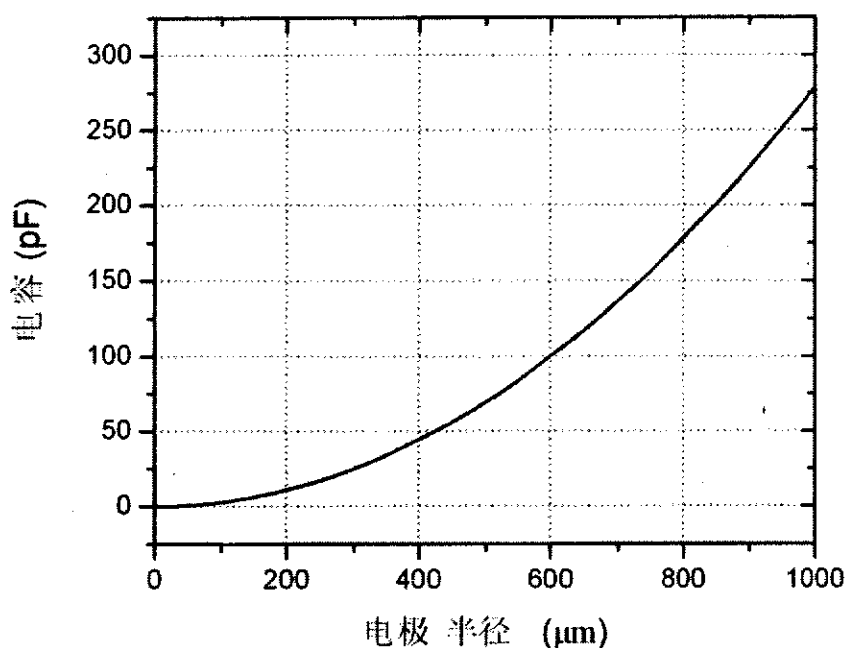


图 2-2-6 压电层静电容与电极半径的关系

图 2-2-7 为压电层产生电压与电极半径的关系。可以看出，当电极为中心区域的圆形电极时，电极半径越小，压电层产生的电压越大，这是因为电容随电极半径的较小而显著减小，因此使得产生的电压增大。但是实际情况下，换能器是要有一定负载的，因此必须具有一定的电容及较小的阻抗才能应用，因此需要根据负载情况，合理的设计电极的半径，达到最优的效果。

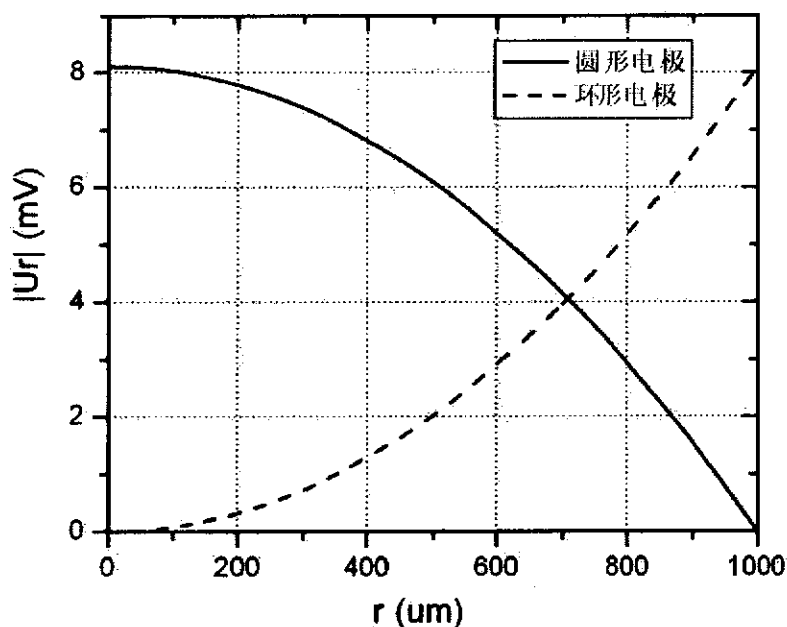


图 2-2-7 接收响应与电极半径的关系

本文还分别计算了电极位于中心区域及边界环形区域的传声器的灵敏度结果, 如图 2-2-8 所示, 为静压强下压电层输出电压结果。其中氮化硅厚度分别为 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 的情况下, ZnO 厚度与输出电压的关系。从图上的结果可以看出, 当氮化硅薄膜厚度一定的情况下, ZnO 薄膜的厚度为氮化硅厚度的 $1/2$ 附近时, 压电层输出的电压值最大。而实际情况下, 支持层的厚度是受到工艺制作限制的, 因此适当调整 ZnO 薄膜的厚度是优化设计的较好选择。

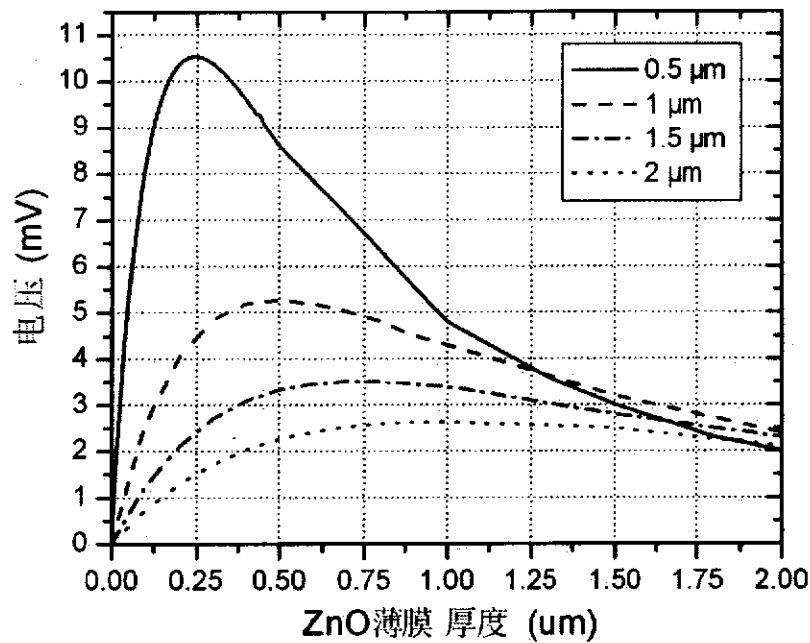


图 2-2-8 接收响应与压电层厚度的关系

2.2.3.3 谐响应灵敏度分析

圆形振动膜在谐载荷下, 其振型为 (详见本文 4.3.3):

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

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

将振型分布 W 代入 (2.15) 及 (2.19), 并由 (2.21) 及 (2.5) 式可以得到谐载荷下的压电层产生的电荷及输出电压。

2.2.3.4 计算结果及分析

图 2-2-9 为 ZnO 压电层输出电压的频响曲线与电极半径的关系。由理论的计算结果可知, 电极的半径越小, 压电层输出电压越大。这里值得注意的是, 此处的输出电压为空载即开路输出电压, 而传声器在实际应用中是有一定负载的, 因此传声器自身的电容不能过小, 同时阻抗不宜过大, 所以电极的半径并不能采取尽量小的设计方案, 需要根据负载进行合理的设计。

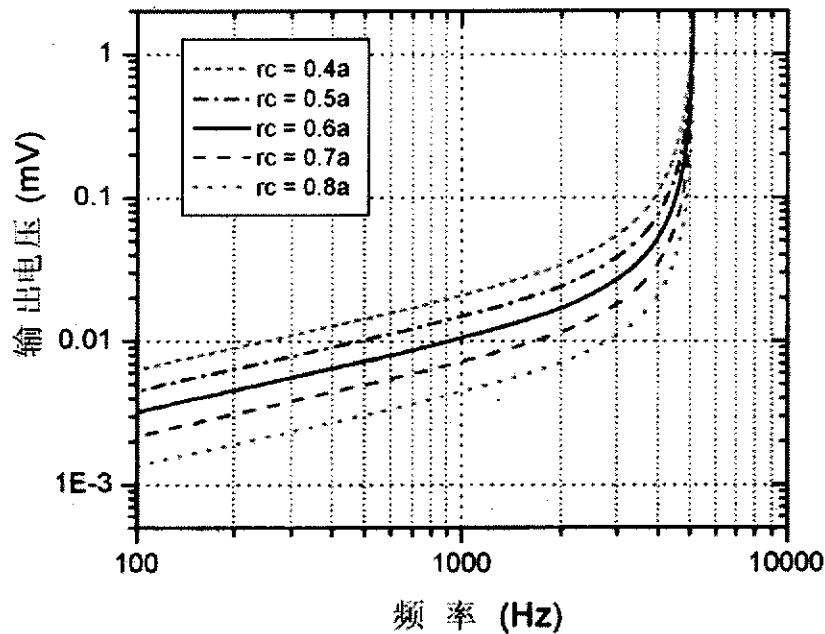


图 2-2-9 灵敏度频响曲线与电极半径的关系

图 2-2-10 为 ZnO 压电层厚度与传声器灵敏度频响曲线的关系。其中支撑层材料均为氮化硅薄膜, 厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。由结果可知, ZnO 厚度为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 左右时, 灵敏度结果较好。当 ZnO 厚度较大时 (大于 $1\text{ }\mu\text{m}$), 灵敏度随 ZnO 厚度增大而减小, 其原因主要为: ZnO 厚度增大使得振动膜谐振频率响应增大, 降低了传声器的低频响应; 同时 ZnO 厚度增大使得振动膜的弯曲中面位于 ZnO 内部, 使压电层内部产生的同相电荷减少, 降低了输出电压。而当 ZnO 厚度较小时 (小于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$), 传声器灵敏度随着 ZnO 厚度的减小而降低, 其原因主要为 ZnO 厚度过小, 虽然一定程度上降低了振动膜的谐振频率, 使其低频响应得到提高, 但压电层的静电容随 ZnO 厚度的减小而显著增大, 如图 2-2-11 所示, 使得传声器的输出电压减小, 灵敏度反而下降。

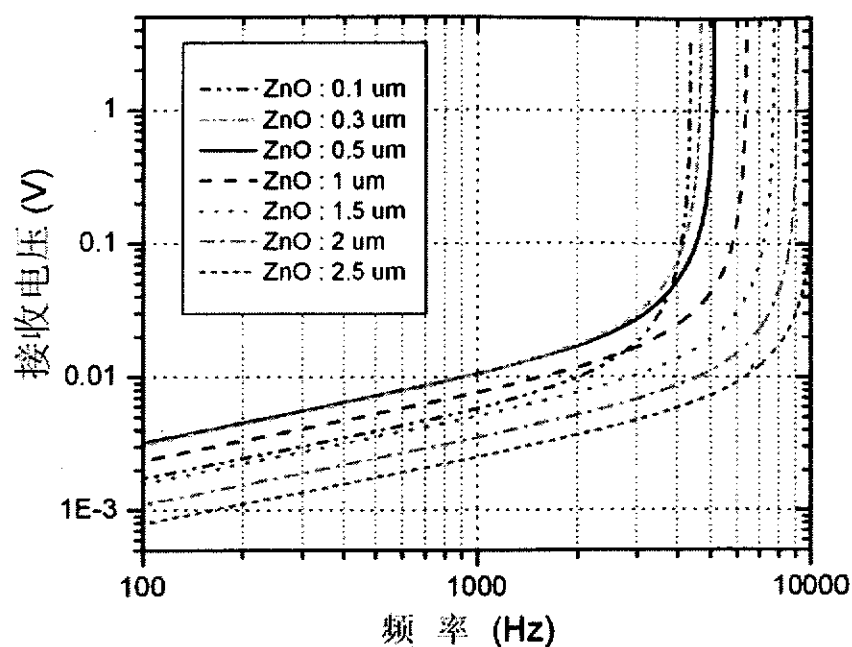


图 2-2-10 灵敏度频响曲线与 ZnO 薄膜厚度的关系

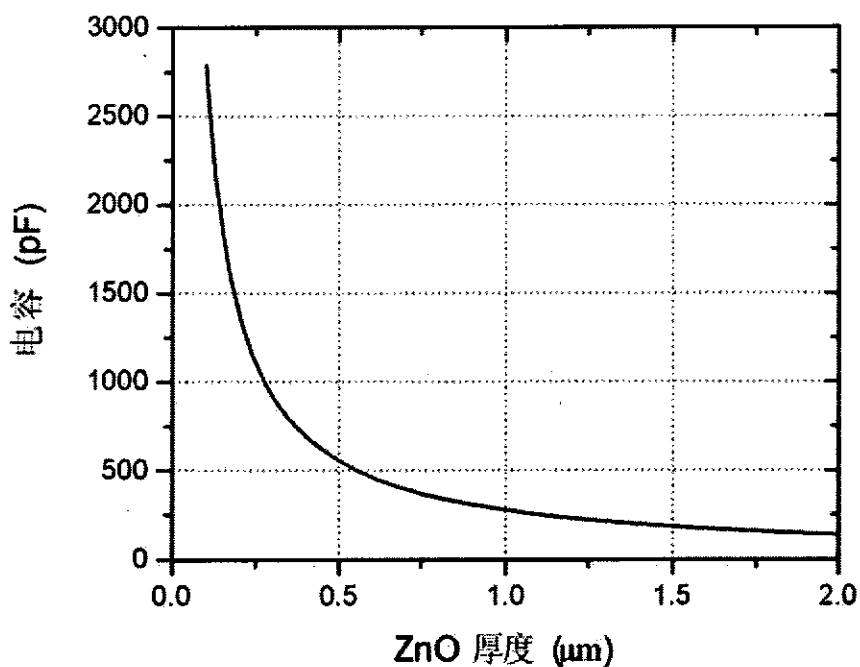


图 2-2-11 压电层静电容与 ZnO 厚度的关系

图 2-2-12 为 $f=1$ KHz 时, ZnO 厚度与传声器输出电压的关系。从图中结果可以看出, 当氮化硅厚度一定的情况下, ZnO 薄膜的厚度为氮化硅厚度的 0.3~0.5 倍左右时, 压电层输出的电压值最大。而实际情况下, 支持层的厚度是受到工艺限制的, 因此适当调整 ZnO 薄膜的厚度是优化设计的较好选择。

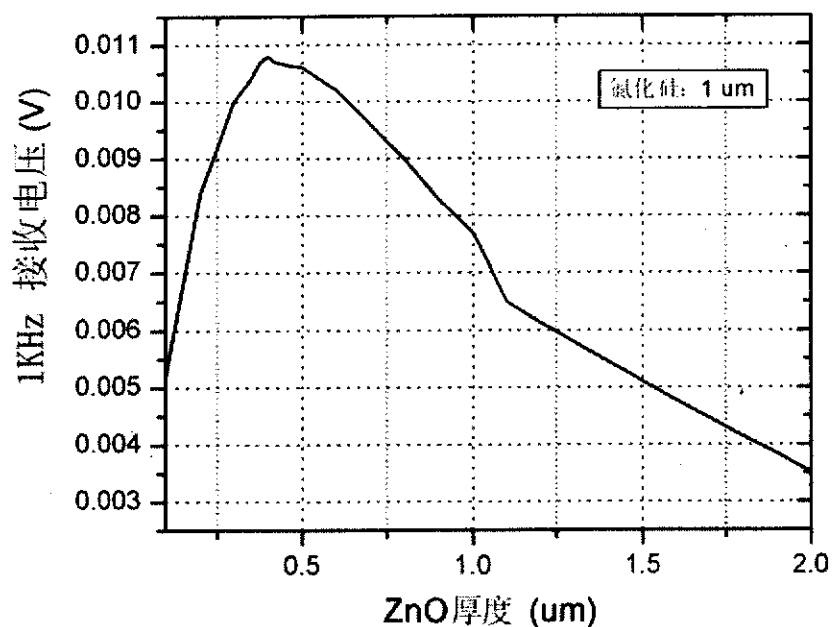


图 2-2-12 传声器 1 KHz 的灵敏度与 ZnO 薄膜厚度的关系

图 2-2-13 为传声器灵敏度与支撑层材料的关系。我们分别选取了厚度为 1 μm 和 2 μm 的氮化硅薄膜及相同厚度的聚酰亚胺薄膜作为振动膜的支撑层，计算了传声器的灵敏度响应曲线。由结果可以看出，在厚度相同的情况下，采用聚酰亚胺支撑层的传声器灵敏度明显高于采用氮化硅支撑层的传声器的灵敏度。这主要是由于聚酰亚胺材料杨氏模量较小，薄膜较为柔软，因此由这种材料制备的振动膜易于弯曲，有利于提高传声器的灵敏度响应。

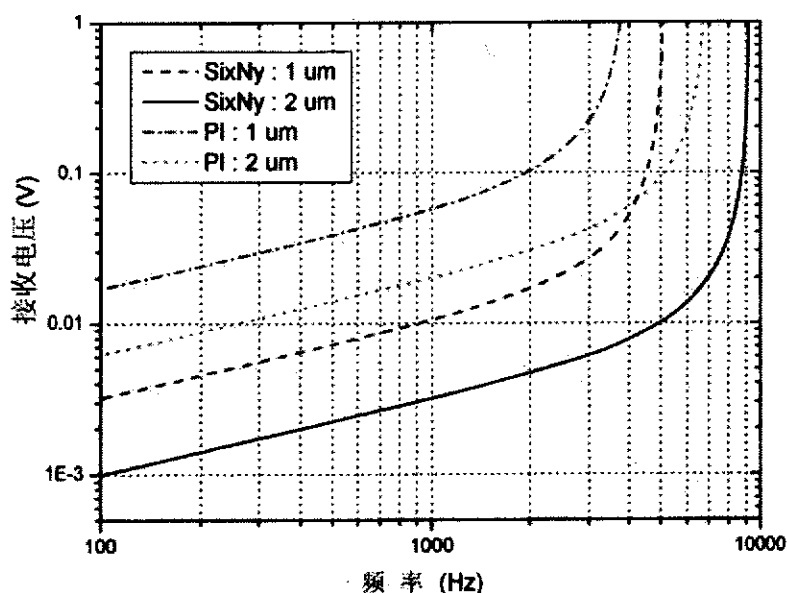


图 2-2-13 灵敏度频响曲线与支撑层材料的关系

2.2.4 方形振动膜硅微压电声器接收响应分析

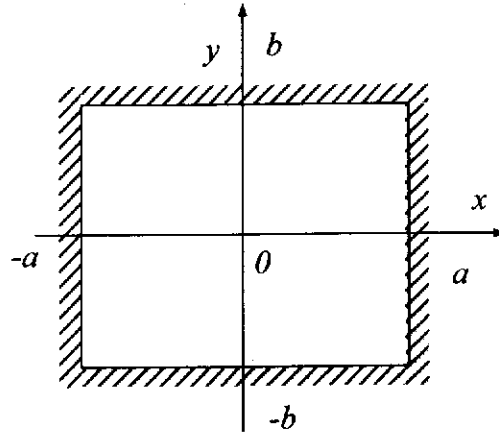


图 2-2-14 方形振动膜示意图

对于方形振动膜的情况，压电产生电荷 Q 可用压电层内 x 和 y 方向的平均应力求得：

$$Q = \int_0^a \int_0^a d_{31} (\overline{\sigma_x} + \overline{\sigma_y}) dx dy \quad (2.24)$$

其中 d_{31} 为压电常数。 $\overline{\sigma_x}, \overline{\sigma_y}$ 分别为压电层 x 、 y 方向的平均应力为：

$$\overline{\sigma_x} = \frac{1}{h_{ZnO}} \int_{z_0}^{z_0+h_{ZnO}} \sigma_x dz \quad \overline{\sigma_y} = \frac{1}{h_{ZnO}} \int_{z_0}^{z_0+h_{ZnO}} \sigma_y dz \quad (2.25)$$

上式的积分是从 ZnO 层上表面到下表面积分，下表面的坐标为 z_0 。由于方形振动膜 x 与 y 方向边长相同，因此是应力是对称的，(2.24) 式可以写为：

$$Q = 2 \int_0^a \int_0^a d_{31} \overline{\sigma_x} dx dy \quad (2.26)$$

当方形振动膜在均匀压强 P 的作用下，振动膜的位移解为^[13]：

$$w = w_0 + w_1 + w_2$$

$$w_0 = \frac{4qa^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^5} \cos \frac{m\pi x}{a} \times \left(1 - \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \cosh \frac{m\pi y}{a} + \frac{1}{2 \cosh \alpha_m} \frac{m\pi y}{a} \sinh \frac{m\pi y}{a} \right)$$

$$w_1 = -\frac{a^4}{2\pi^2 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} E_m \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^2 \cos \alpha_m} \cos \frac{m\pi x}{a} \times \left(\frac{m\pi y}{a} \sinh \frac{m\pi y}{a} - \alpha_m \tanh \alpha_m \cosh \frac{m\pi y}{a} \right)$$

$$w_2 = -\frac{a^4}{2\pi^2 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} E_m \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^2 \cos \alpha_m} \cos \frac{m\pi y}{a} \times \left(\frac{m\pi x}{a} \sinh \frac{m\pi x}{a} - \alpha_m \tanh \alpha_m \cosh \frac{m\pi x}{a} \right) \quad (2.27)$$

式中 $\alpha_m = m\pi b / 2a$ 。上式在实际应用时是很难进行解析计算，这里近似认为振动膜的横向位移为^[15]：

$$w = \frac{q_0 a^4}{32\pi^4 D_e} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{a} \right) \left(1 + \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \quad (2.28)$$

由(2.28)式可以计算得到方形振动膜在均匀压强载荷下的位移分布，如图2-2-15所示，可以看出，振动膜的中心为位移最大处。

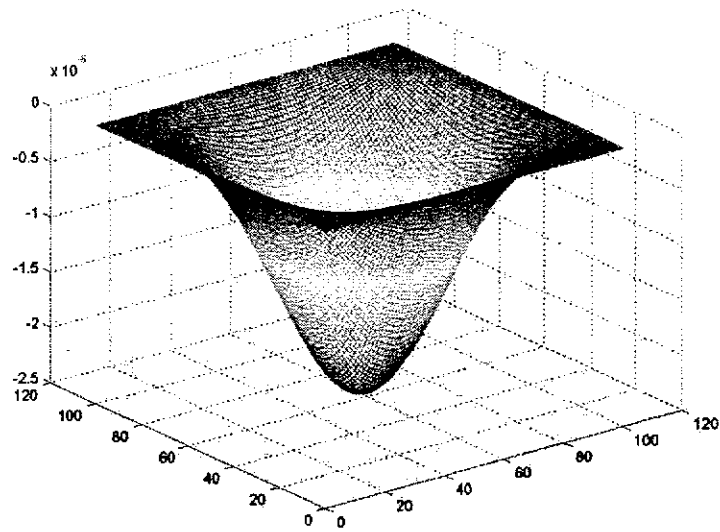


图 2-2-15 方形振动膜位移分布图

将 x 方形的应力用挠度 w 表示为：

$$\sigma_x = \frac{Eq a^2 z}{8\pi^2 D_e (1-\nu^2)} \left[\cos \frac{2\pi x}{a} + \nu \cos \frac{2\pi y}{b} + (1+\nu) \left(\cos \frac{2\pi x}{a} \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \right] \quad (2.29)$$

由上式计算得到的方形振动膜 x 方向应力分布，由图 2-2-16 可以看出，振动膜中心区域与边界处的应力方向相反，中心区域的分布较为均匀。在本文的换能器设计中，主要使用了中间区域压电层产生的电荷，以避免四边反向应力产生的异性电荷，有效保证换能器的接收灵敏度。

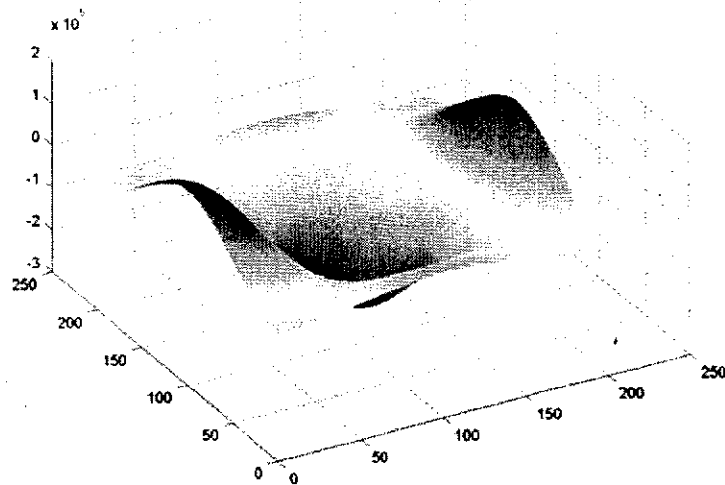


图 2-2-16 方形薄板的 x 方向应力分布图

ZnO 压电薄膜内部的应力为:

$$\sigma_x = \frac{qa^2}{8\pi^2 D_e} \cdot \frac{E_{ZnO}}{1-\nu_{ZnO}^2} \cdot z \cdot \left[\cos \frac{2\pi x}{a} + \nu_{ZnO} \cos \frac{2\pi y}{b} + (1+\nu_{ZnO}) \left(\cos \frac{2\pi x}{a} \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \right] \quad (2.30)$$

振动膜各面相对于弯曲中面的坐标位置确定后, ZnO 薄膜内的平均应力可以求解为:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x = & \frac{qa^2}{16\pi^2 D_e} \cdot \frac{E_{ZnO}}{1-\nu_{ZnO}^2} \cdot \left[(h_1 + h_{SiN} + h_{ZnO})^2 - (h_1 + h_{SiN})^2 \right] \\ & \cdot \left[\cos \frac{2\pi x}{a} + \nu_{ZnO} \cos \frac{2\pi y}{b} + (1+\nu_{ZnO}) \left(\cos \frac{2\pi x}{a} \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.32)$$

假设电极的为以坐标原点为中心边长为 l_e 的正方形电极, 则将 (2.32) 代入

(2.24) 可计算得到压电层在电极区域的电荷为:

$$\begin{aligned} Q = & 2 \int_0^{l_e} \int_0^{l_e} \frac{qa^2}{16\pi^2 D_e} \cdot \frac{E_{ZnO}}{1-\nu_{ZnO}^2} \cdot \left[(h_1 + h_{SiN} + h_{ZnO})^2 - (h_1 + h_{SiN})^2 \right] \\ & \cdot \left[\cos \frac{2\pi x}{a} + \nu_{ZnO} \cos \frac{2\pi y}{b} + (1+\nu_{ZnO}) \left(\cos \frac{2\pi x}{a} \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \right] d_{31} dx dy \end{aligned}$$

将 Q 代入电压表达式 (2.5), 并由 (2.3) 及 (2.4) 式即可求得静压强下的和圆形振动膜传声器类似的方形振动膜传声器的接收灵敏度。

2.3 方形振动膜压电传声器的研制

2.3.1 方形振动膜传声器的设计

方形振动膜压电传声器是一种典型的弯曲振动压电换能器^{[5-7][16][17]}，其振动膜为弹性支撑薄膜和上下表面制作有电极的压电薄膜组成，其中压电薄膜位于支撑薄膜上方。振动膜在受到声压的作用下，发生弯曲振动，压电薄膜会产生相应的应变，由于具有压电性在其表面会产生电荷，由上下电极可输出电压信号。

方形振动膜的制作工艺较为简单，由于硅的各向异性特性，采用体硅刻蚀的方法形成的硅杯空腔上部为矩形（或方形），因此方形振动膜可以直接采用体硅刻蚀方法释放振动膜。图 2-3-1 为我们设计的方形振动膜的硅微压电传声器的俯视图，图 2-3-2 为截面示意图。

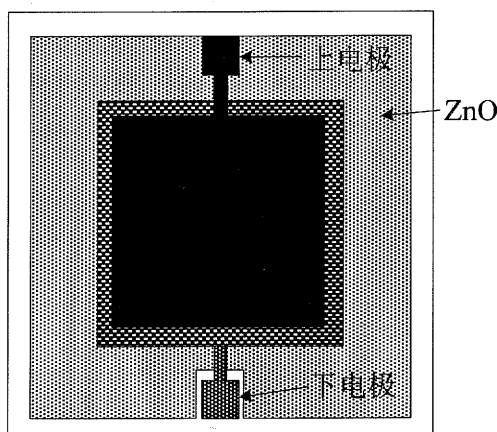


图 2-3-1 方形振动膜硅微压电传声器俯视图

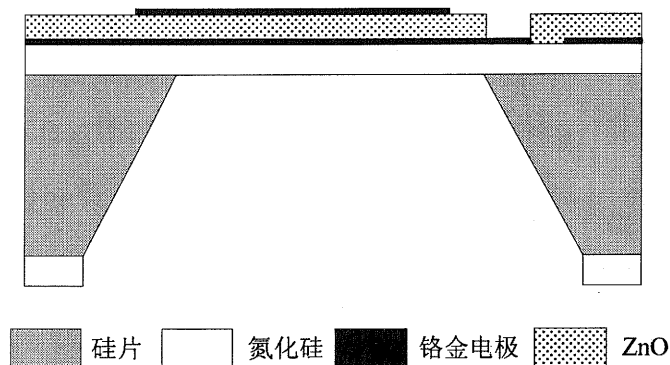


图 2-3-2 方形振动膜硅微压电传声器结构示意图

方形振动膜硅微压电传声器的设计特点为:

(1) 传声器的振动膜面积设计为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 传声器芯片尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$;

(2) 传声器的振动膜支撑层为氮化硅薄膜, 压电层为 ZnO 薄膜, 上、下电极均为铬金薄膜, 为了保证 ZnO 薄膜生长晶向取向择优, 下电极厚度较厚, 约为 $0.14\text{ }\mu\text{m}$, 上电极厚度只需达到导电及电极引线的要求, 我们设计为 $0.8\text{ }\mu\text{m} \sim 0.12\text{ }\mu\text{m}$;

(3) 上电极的面积小于振动膜的面积, 一是以减小由于光刻对准误差造成的电极边界与振动膜窗口的错位, 二是在充分利用振动膜的同向应变区域;

(4) 下电极的面积略大于上电极的面积, 以减小由于光刻对准误差造成的上下电极边界错位的影响, 充分利用上电极的有效面积;

(4) ZnO 薄膜的面积设计较大, 如 2-10 所示, 将上电极的引出点设计在 ZnO 薄膜上, 目的在于当 ZnO 薄膜厚度较大时, 能够避免引线跨越 ZnO 层发生断裂, 提高器件的成品率;

(5) 传声器的支撑层氮化硅薄膜及 ZnO 薄膜可以在图所示的版图设计下改变厚度, 以便进行结构优化。

2.3.2 方形振动膜传声器的制作

方形振动膜压电传声器是工艺最为简单的传声器, 它是运用各项异型体硅刻蚀形成振动膜下方的空腔。其具体的制备工艺流程如图 2-3-3 所示:

(a) 选取双面抛光的 $\langle 100 \rangle$ 硅片做基底, 在硅片上下表面利用低压化学气相淀积方法 (LPCVD) 淀积低应力富硅氮化硅薄膜, 硅片上表面的氮化硅薄膜作为振动膜, 硅片下表面的氮化硅作为体硅刻蚀的掩膜;

(b) 在硅片背面用光刻胶光刻出体硅刻蚀的窗口图形, 并用反应离子刻蚀 (ICP) 去掉窗口图形内的氮化硅薄膜, 形成体硅刻蚀窗口;

(c) 在硅片上表面的氮化硅薄膜上利用真空蒸镀 Cr ($0.04\text{ }\mu\text{m}$)、 Au ($0.1\text{ }\mu\text{m}$) 复合薄膜, 并图形化作为下电极;

(d) 在下电极上磁控溅射生长 ZnO 薄膜, 作为压电层。利用湿法腐蚀 ZnO 薄膜, 形成下电极的引出孔;

(e) 在 ZnO 薄膜上利用反刻剥离的方法, 制备 Cr ($0.04\ \mu\text{m}$)、Au ($0.8\ \mu\text{m}$) 复合薄膜作为上电极;

(f) 用体硅刻蚀夹具保护硅片正面, 利用 KOH 溶液对硅片背面进行深刻蚀, 溶液浓度为 30%, 反应温度为 80°C 。当 KOH 溶液腐蚀至氮化硅薄膜时, 反应停止, 形成振动膜下方的空腔, 完成方形振动膜硅微压电传声器的制备。

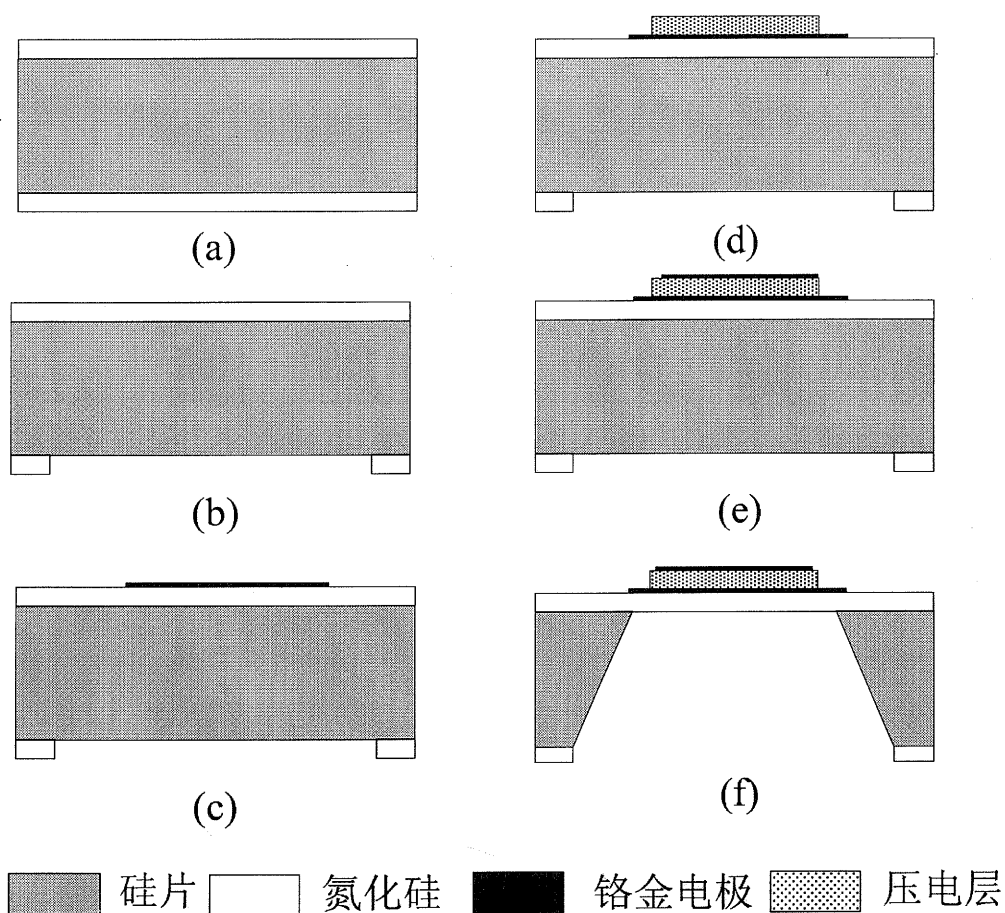


图 2-3-3 方形振动膜传声器工艺制作流程

在试验中我们发现, 氮化硅薄膜厚度过薄, 如 $0.5\ \mu\text{m}$ 时, 振动膜在体硅刻蚀释放过程中, 容易发生破裂; 当厚度增加到 $1\ \mu\text{m}$ 时, 振动膜破裂情况明显减少; 而当氮化硅薄膜的厚度再增加时, 如大于 $1.5\ \mu\text{m}$ 时, 氮化硅薄膜由于制作工艺的原因导致自身的应力加大, 使得振动膜容易破裂。因此, 我们选用了厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 氮化硅薄膜作为传声器的振动膜。

2.3.3 硅微压电传声器的测试

对硅微压电传声器的电声性能进行准确的测试,获取传声器的性能参数是传声器研制过程中重要环节。通过参数的测量,可以验证理论推导与器件设计、工艺步骤的正确性。

2.2.3.1 测试电路

硅微压电传声器工作时不需要极化电压,不用像硅微电容式传声器那样加偏置电压,而且输出阻抗相对较小,在接收匹配电路的设计上比较简单。我们设计了 JFET 放大电路作为传声器接收端的短路,选取了 NEC 的 2SK2552 JFET 芯片。图 2-3-4 为接收电路的原理图,可以看出电路结构非常简单,只需外加一个电阻一个电容即可。

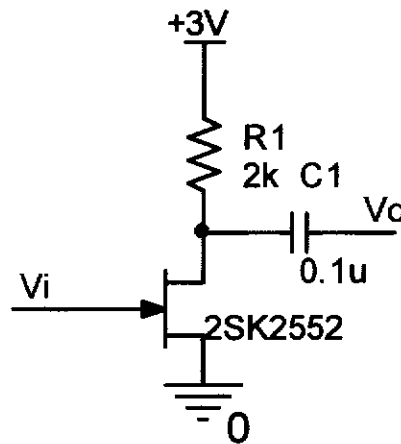


图 2-3-4 压电传声器接收电路示意图

2.2.3.2 测试原理^[14]

对于任一线性时不变系统(硅微压电传声器或标准传声器),对信号频谱为 $X(\omega)$ 的响应频谱为 $Y(\omega)$, 则有:

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (2.33)$$

其中 $H(\omega)$ 是该系统的脉冲响应频谱。

对于比较法传声器测试系统,由此可得其频响关系式:

$$Y_0(\omega) = S_0(\omega)X(\omega) \quad (2.34)$$

$$Y_m(\omega) = S_m(\omega)X(\omega) \quad (2.35)$$

其中为 $X(\omega)$ 声源辐射到两传声器处声压的频谱； $Y_0(\omega)$ 、 $Y_m(\omega)$ 、 $S_0(\omega)$ 、 $S_m(\omega)$ 分别为标准和被测传声器响应的频谱和声压灵敏度频谱。

另外被测传声器的灵敏度也可用下面的方法得出。

由 (2.34)、(2.35) 式得：

$$\lg \frac{Y_0(\omega)}{Y_m(\omega)} = \lg \frac{S_0(\omega)}{S_m(\omega)} \quad (2.36)$$

由 (2.36) 得到：

$$\lg(S_m(\omega)) = \lg(S_0(\omega)) - \lg \frac{Y_0(\omega)}{Y_m(\omega)} \quad (2.37)$$

(2.37) 式中， $\lg \frac{Y_0(\omega)}{Y_m(\omega)}$ 可以从信号分析仪上直接读出，又已知标准传声器的灵敏度 $\lg(S_0(\omega))$ ，这样被测传声器的灵敏度 $\lg(S_m(\omega))$ 即可得出。

至此，通过测量 $Y_m(\omega)$ 、 $S_m(\omega)$ 的值，就基本能衡量被测传声器的电声性能。该测试既可在消声室、半消声室中进行也可以在耦合腔中进行。

2.2.3.3 测试系统

按照国标 GB9401-88 中的要求，在消声室中采用同时比较法对硅微压电传声器进行测试。对比用传声器采用 B&K4149 或 B&K4189 标准电容传声器。将标准传声器和待测传声器并排放在距声源 1m 处进行测试。测试系统的声源采用 JBL4208 监听扬声器系统，扬声器功率放大器采用 CAC 功率放大器，该放大器工作频率 20Hz~26kHz；该测试系统利用 Agilent 35670A 动态信号分析仪将生成的粉红噪声输入到功率放大器，并对采集到的信号进行分析；标准传声器通过运算放大器 B&K2603 将信号放大 50dB 后输入到信号分析仪，待测压电传声器通过自制运算放大器将信号放大 20dB 后输入到信号分析仪（图 2-3-5）。

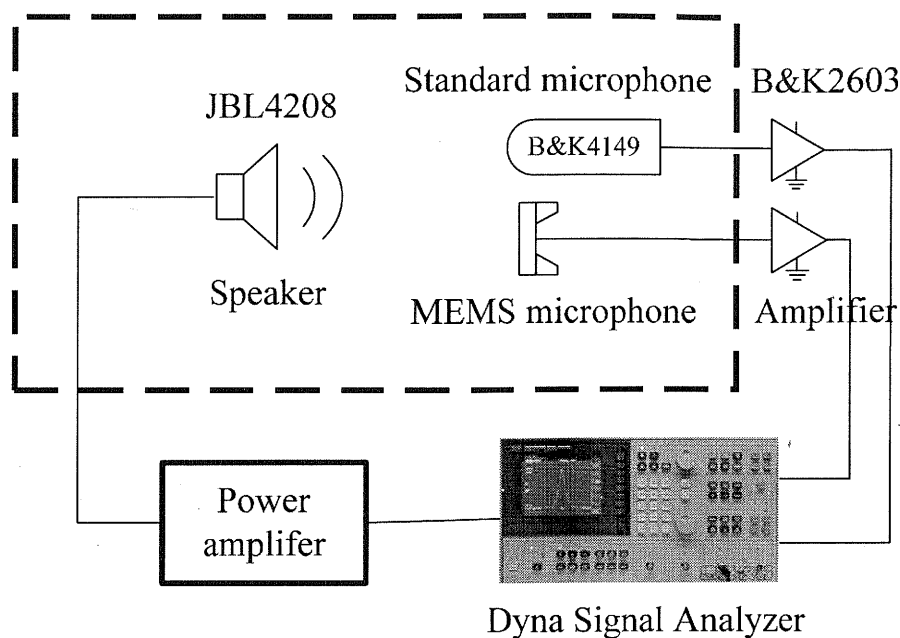


图 2-3-5 同时比较法测试系统框图

2.3.4 方形振动膜硅微压电传声器制作及测试结果

2.3.4.1 传声器制备结果

本文采用用了 2.3.2 所介绍的工艺流程，制作了振动膜边长为 2 mm 的方形振动膜硅微压电传声器芯片。图 2-3-6 为制备完成并贴在测试管座上的方形振动膜硅微压电传声器的照片，芯片划片后尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

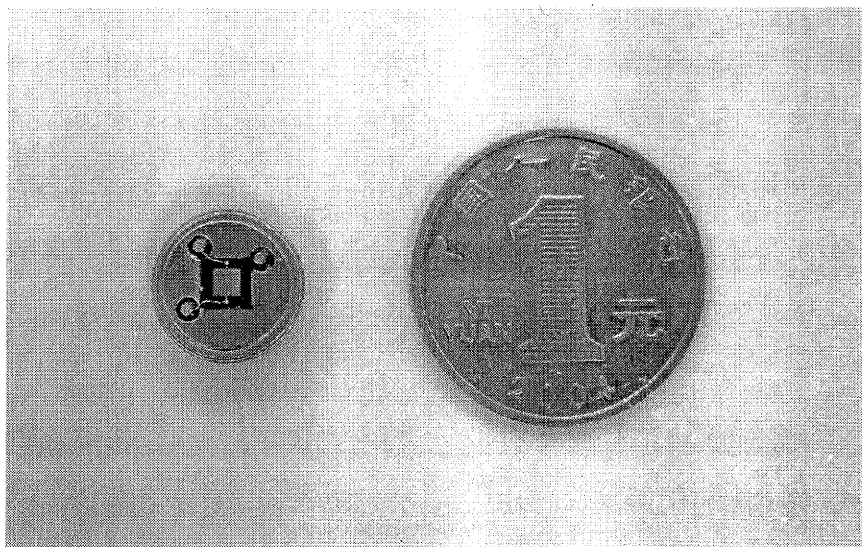


图 2-3-6 方形振动膜硅微压电传声器贴片照片

2.3.4.2 传声器测量结果

本文采用 2.3.3 的方法对方形硅微压电传声器的灵敏度进行了测量。首先测量的传声器是最简单的设计结构:氮化硅薄膜厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$, ZnO 为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 上下电极分别为 $0.14\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.12\text{ }\mu\text{m}$, 电极为 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 方形电极, 即与振动膜的面积相同。图 2-3-7 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 -80 dB (ref 1 V/Pa)。传声器的 A 计权噪声为 -102 dB 。从测量结果看, 传声器的灵敏度较低, 但频响曲线在低频较为平坦。

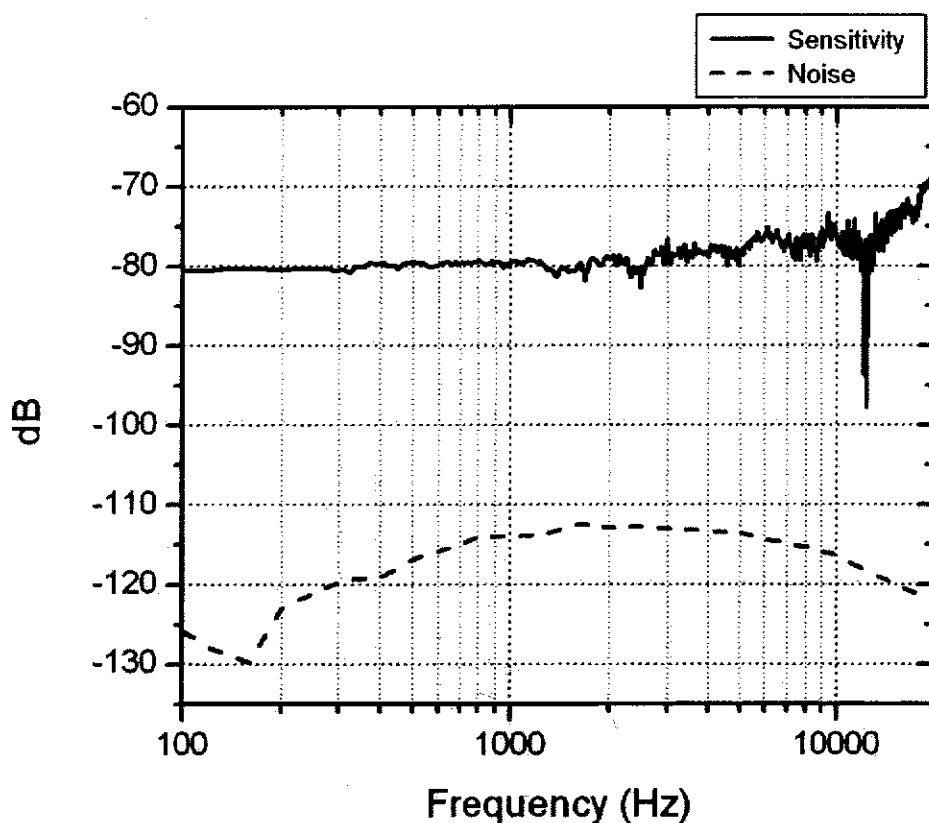


图 2-3-7 传声器灵敏度及噪声测试结果

在上面制备的硅微压电传声器的研究基础上, 理论分析及实验中发现的问题, 本文对方形振动膜硅微压电传声器的结构进行了如下优化了:

- 改变电极面积。将电极设计为边长为 1 mm 的方形电极, 充分利用压电层中心产生同极性电荷的区域, 同时保证一定的输出电容和较低的输出阻抗;
- 改变 ZnO 薄膜的厚度, 根据理论分析的结果, 调整 ZnO 的厚度为氮

化硅薄膜厚度的 $1/2$ 左右, 以提高传声器的灵敏度。

图 2-3-8 为优化后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 -70 dB (ref 1 V/Pa), A 计权噪声为 -105 dB 。灵敏度较没有进行优化设计的传声器提高了 10 dB 。

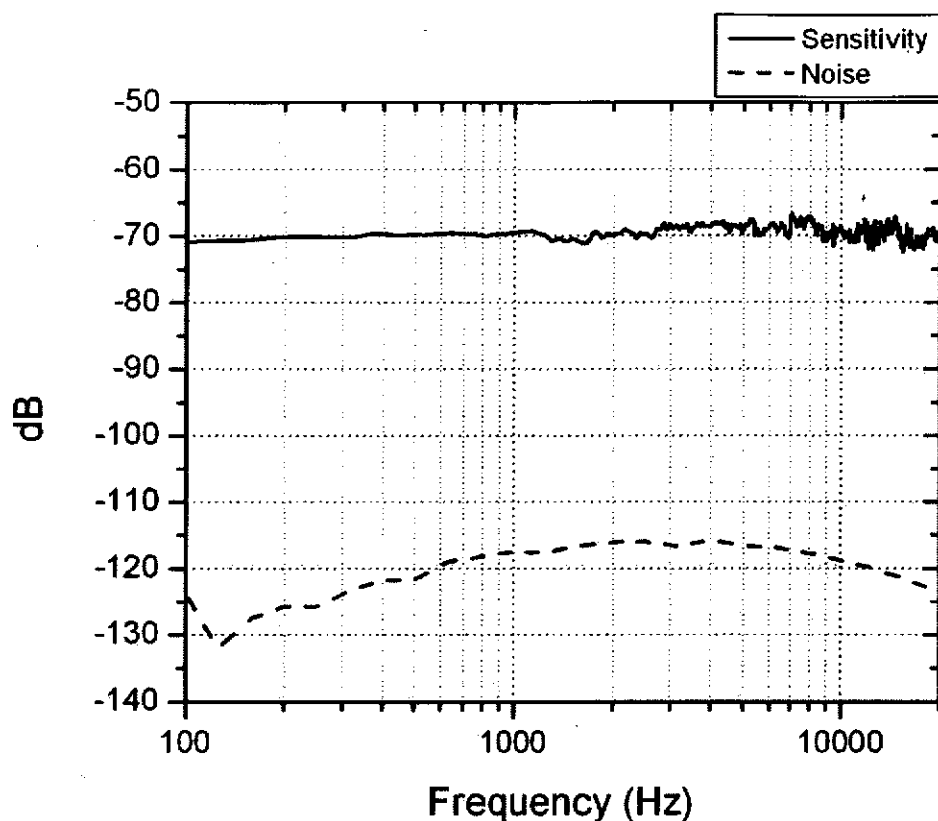


图 2-3-8 优化设计的方形振动膜硅微压电传声器的灵敏度及噪声频响曲线。

2.3.5 方形振动膜传声器存在的问题

首先, 在方形振动膜硅微压电传声器芯片的制作过程中我们发现, 方形振动膜的设计在最后体硅刻蚀完成形成悬空薄膜后, 振动膜容易发生破裂, 成品率不高;

其次, 对于制备完成的传声器芯片, 振动膜容易出现褶皱起伏, 如图 2-3-9 所示, 且在后续使用及测试的时候也较易发生破损。

另外, 从方形振动膜传声器接收灵敏度的测试结果可以看出, 在高频段的响应不很平坦, 我们分析这与方形振动膜存在边角, 这些区域的受迫振动情况较为复杂, 影响了传声器接收特性。

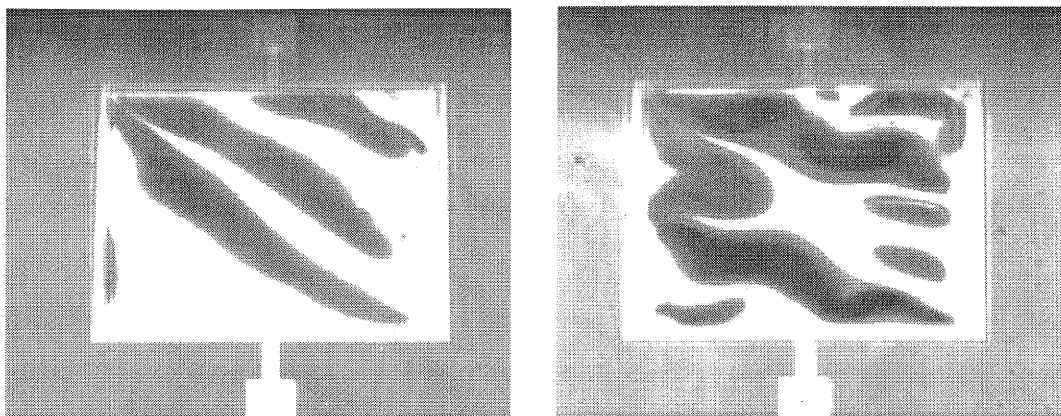


图 2-3-9 发生褶皱的方形振动膜照片

以上问题我们认为这是由于方形振动膜应力释放不均匀，在边角处存在应力集中所致，为了分析这一问题，本文下面进行了传声器振动膜的应力分析。

2.3.6 振动膜应力分析

2.3.6.1 热应力分析

薄膜应力的产生主要有两个原因：

一、 内在因素

在薄膜形成过程中薄膜的不均匀性造成。在淀积过程中，粒子到达所要成膜的表面后，往往没有足够的动能或没有足够的时间进行移动从而形成较好的排列结构。这就造成了晶格应力，往往通过退火等方式给予粒子足够的能量去重新排列，形成较均匀的薄膜结构，减小内在应力。

二、 外在因素（主要原因）

主要是由于薄膜材料和基地材料的热膨胀系数不匹配而造成的热应力。一般淀积薄膜的温度较高，当回复至正常温度时，薄膜和基底下将会产生不同程度的形变从而形成应力。

$$\sigma_{th} = \frac{E_{film}}{1-\nu_{film}} \int_{T_0}^{T_{dep}} (\alpha_{film} - \alpha_{sub}) dT$$

上述两种薄膜应力中，内在因素造成的应力较难分析。

硅微压电传声器的振动膜主要由 ZnO 薄膜和氮化硅薄膜两层材料构成，本文对于这两种材料热膨胀系数不匹配造成的热应力进行了有限元分析。分析使用

ANSYS 软件对氮化硅和 ZnO 双层复合薄膜进行了热应力计算，单元采用了 SOLID90 作为热分析单元，选取 SOLID95 作为力学分析单元，温度载荷梯度为 100°C 。分别对方形和圆形薄膜两种情况进行了计算，其中方形薄膜边长示意性的选取了 $100\text{ }\mu\text{m}$ ，圆形膜的直径也为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ，氮化硅和 ZnO 薄膜的厚度均为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。计算结果如图 2-3-10 和图 2-3-11 所示

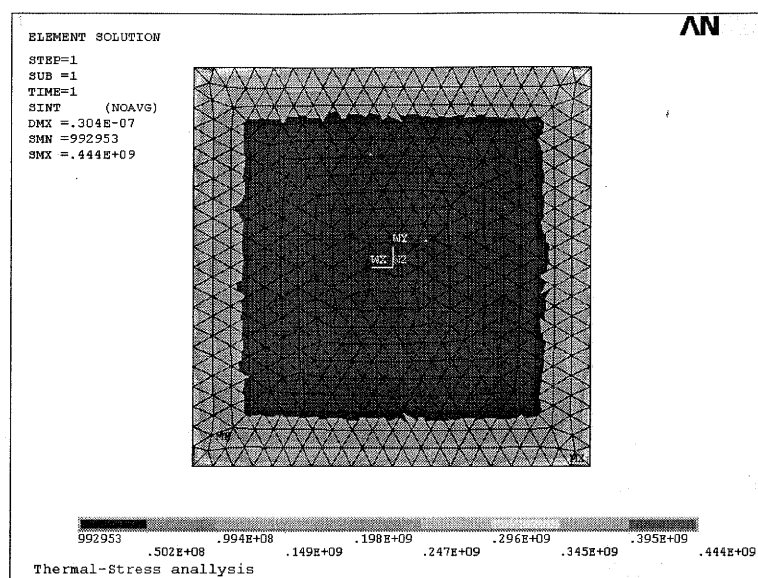


图 2-3-10 方膜热应力分布

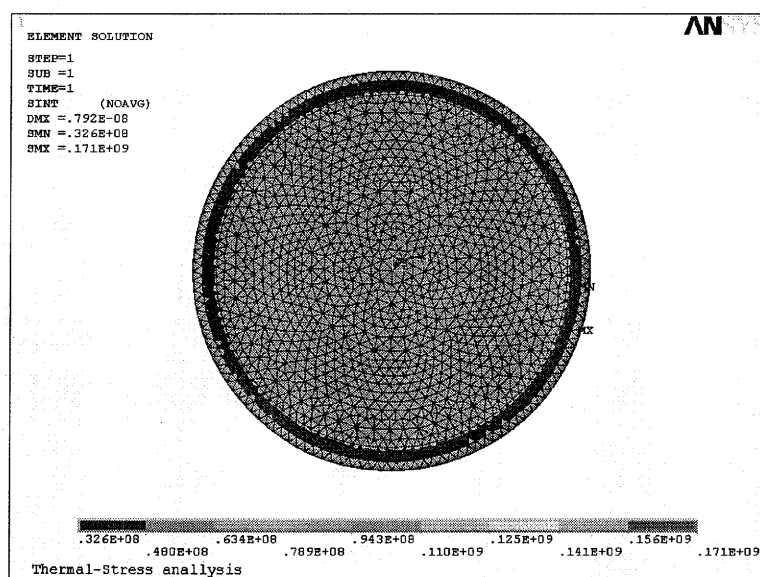


图 2-3-11 圆膜热应力分布

由计算结果可以看出，在经过温度变化后，两层薄膜由于热膨胀系数不同产生了一定的热应力，方形膜的四个角有明显的应力集中现象，而圆形膜则应力分

布较为均匀。应力的集中是造成振动膜破裂的重要原因。

2.3.6.2 均匀载荷作用下应力分析

我们计算了振动膜在均匀的 1Pa 压强下的应力分布,如图 2-3-12 及图 2-3-13 所示:

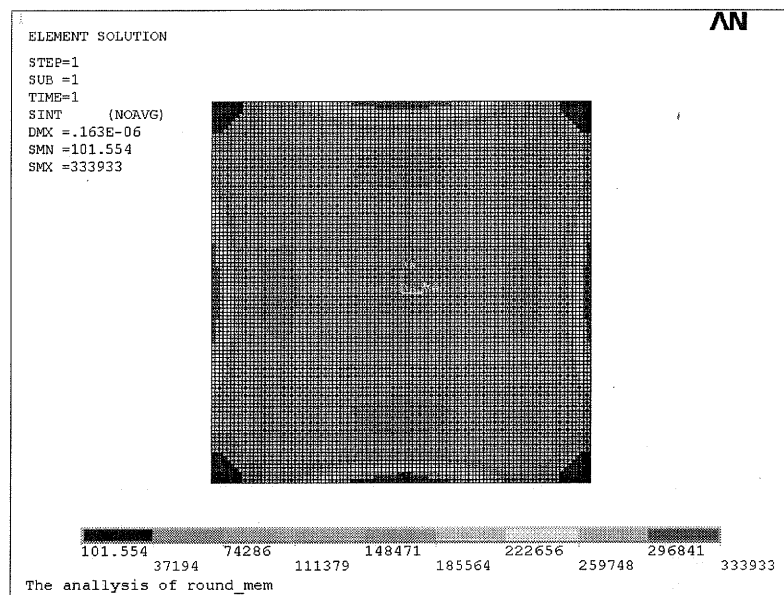


图 2-3-12 方膜应力分布

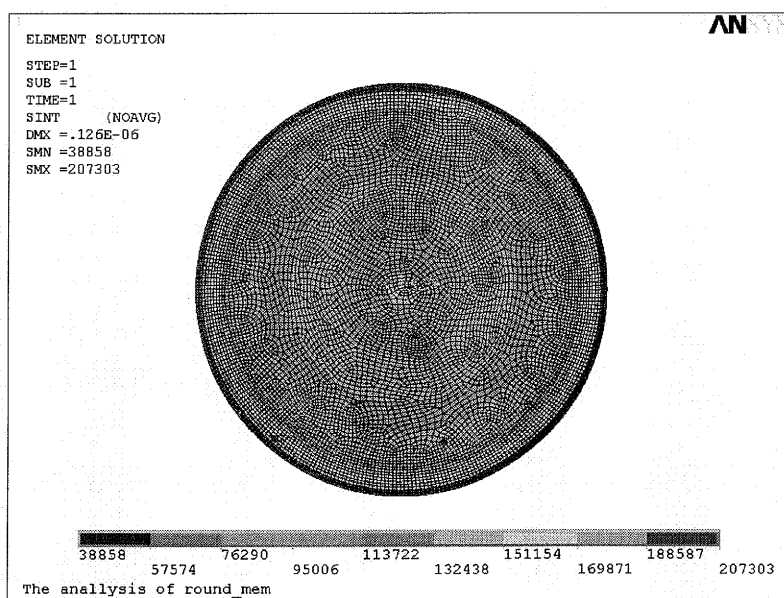


图 2-3-13 圆膜应力分布

由图 2-3-12 和图 2-3-13 的结果可以看出,在均匀载荷的作用下,方形振动膜在四边分布是存在应力集中的,而圆膜则边界分布均匀。由此可以推断圆形振

动膜不容易破裂,且在外界载荷的作用下较为稳定,而方形振动膜在制备过程及使用过程中,由于应力集中的存在,较容易损坏。

鉴于以上问题,我们设计并制作了圆形振动膜的硅微压电传声器,下面具体介绍。

2.4 圆形振动膜硅微压电传声器的研制

2.4.1 圆形振动膜硅微压电传声器的设计

由于硅的各向异性,传统的体硅刻蚀只能形成矩形的振动膜侧墙。目前主要制作圆形振动膜的方法主要有圆形牺牲层法^{[19][20]}和制备浓硼扩散圆墙法^{[21][22]}。为了得到圆形的振动膜,我们选取了制备深度浓硼扩散圆形侧墙的方法,使侧墙内部的振动膜区域为圆形,该工艺方法为韩国学者Woon Seob Lee等人于2005年首先提出^[21],本文将此方法应用于制备圆形振动膜的硅微压电传声器当中。利用浓硼扩散的硅与硅在KOH溶液的腐蚀速率相差较大的原理^[23],在振动膜的下方形成圆形的浓硼扩散硅围墙,使振动膜的边界为圆形,从而避免了由于方形振动膜边角出现的应力集中的问题。

2.4.2 圆形振动膜硅微压电传声器的制作工艺

圆形振动膜传声器的具体制作工艺如图2-4-1所示,

- (a) 在硅片表面热生长制作二氧化硅薄膜,厚度为1 μm ;
- (b) 硅片光刻形成圆形墙区域,并用BHF腐蚀掉圆形区域内部的二氧化硅,同时硅片背面的二氧化硅需用光刻胶做保护;
- (c) 深度浓硼扩散,时间24小时;
- (d) 去除硅片正面和背面的二氧化硅;
- (e) 在硅片正面和背面LPCVD方法淀积低应力氮化硅薄膜,厚度为1 μm ;
- (f) 硅片背面ICP刻蚀氮化硅,形成体硅刻蚀的窗口;
- (g) 在硅片正面氮化硅薄膜上制备下电极、ZnO薄膜和上电极的复合结构,制备方法与2.3.2方形振动膜传声器制备方法相同;
- (h) 硅片正面用夹具保护,背面用25%浓度的KOH溶液进行体硅各向异性刻