图 3.57 刻蚀 SiO_2

步骤 49. 去除 PR

➤ 工艺剖面视图

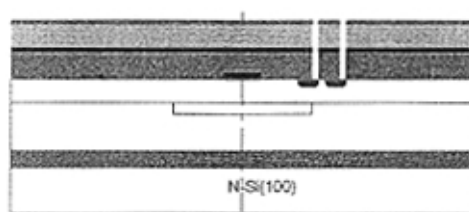


图 3.58 去除 PR

步骤 50. 化学电镀 Cu

➤ 注意要点

由于铜的电阻率低，抗电迁移能力强，因此已被用作互连材料。但是铜的主要问题之一缺乏一种合适的铜刻蚀工艺。这个问题已通过采用镶嵌工艺（damascene process）得到解决[20]。在镶嵌工艺中，首先各向异性刻蚀层间介质层，接着淀积一层薄的阻挡金属层如 Ti、Ta、TaN 和 TiN 等。然后淀积一层厚度比 SiO_2 凹槽厚一些的铜，使其填满所有的 SiO_2 凹槽。最后采用 CMP 方法去除多余的铜。

铜可以采用多种方法进行淀积，但对于镶嵌工艺，电镀和离化金属等离子 PVD 法是比较好的选择[20]。对于电镀工艺，必须在阻挡层金属顶部淀积一层薄的铜籽层，以激发电镀的开始。但是，由于淀积速率与局部的电流密度有关，因此，电镀铜存在着淀积均匀性差的问题。

➤ 具体工艺描述

预淀积前清洗 → PVD 阻挡层（厚度 10nm，Ta 或者 TaN，或者两者一起） → PVD 铜籽层（100nm 左右） → 电镀 Cu → 热退火提高电导率。

1. 预淀积前清洗：在淀积开始前，清洗溅射靶，常用的是 Ar 溅射预清洗，来去除溅射时可能引入的铜玷污，或者采用化学预清洗，利用 H_2 和 He 等离子，清除靶上的 Cu 氧化层。

2. PVD 阻挡层：Cu 扩散进入硅衬底，可能引起器件失效，因此，需要淀积阻挡层。阻挡层一般有 Ti、TiN、Ta、TaN、W 和 WN 等，最常用的是淀积几十 nm 的 Ta 金属层，现在的趋势是将 Ta 和 TaN 结合在一起使用。

3. PVD 铜籽层：厚度一般为 50~200nm，如果不淀积铜籽层，结果可能导致淀积 Cu 失败或者淀积的 Cu 的质量和均匀性非常差。对于非常窄的金属孔，可能需要采用金属 CVD 工艺。

4. 电镀 Cu：采用 $CuSO_4$ 溶液，Cu 作为阳极，已淀积铜籽层的晶片作为阴极，固定的电流，依靠 Cu^{2+} 扩散淀积在晶片表面上。

➤ 工艺剖面视图

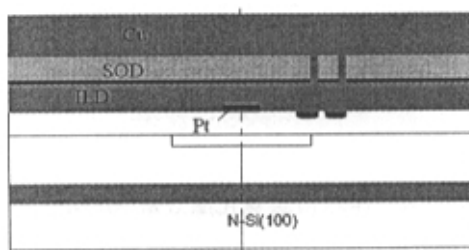


图 3.59 电镀 Cu

步骤 51. CMP Cu

➤ 注意要点

铜 CMP 抛光液主要由磨料、氧化剂、络合剂、pH 值调节剂及其它添加剂组成。所有抛光液的种类主要分为两大类：一类是酸性介质(HNO_3 或 H_2SO_4) + BAT(benzotriazole)，另一类是碱性介质 (NH_4OH) + 氧化剂 ($K_3Fe(CN)_6$ 、 $Fe(NO_3)_3$ 、 H_2O_2 、 KIO_3) + 络合剂 (NH_3 、 NH_4NO_3)。目前国际上开发的铜 CMP 抛光液均为酸性抛光液 (pH 值在 4 左右)，磨料使用 Al_2O_3 ，这是因为铜在酸性溶液中腐蚀速率高， Al_2O_3 颗粒在 pH 值等于 4 左右的抛光液中分散性最好，对铜的去除速率高。

➤ 具体工艺描述

抛光液国际流行的抛光液，即选择 pH 值大约为 4 的酸性抛光液，磨粒可采用 Al_2O_3 。

➤ 工艺剖面视图

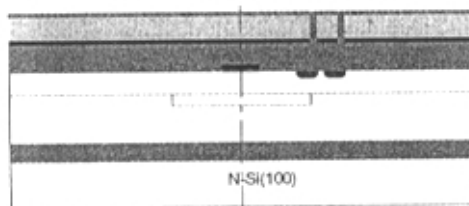


图 3.60 CMP Cu

步骤 52. PECVD SiO_2 , 钝化

➤ 工艺剖面视图

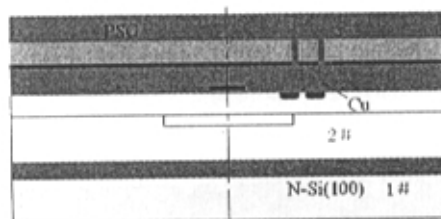


图 3.61 PECVD SiO_2

(七) 方形膜片的制取

步骤 53. 背面热氧化生长 SiO_2 , 作为衬垫氧化层 (Pad oxide)

➤ 具体工艺描述及其剖面视图

采用热氧化生长的办法, 生长厚度为 20nm 的 SiO_2 薄膜。具体工艺已在步骤 3 中描述。

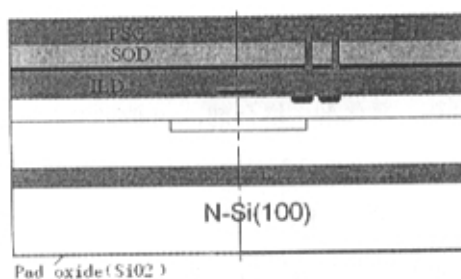


图 3.62 热生长 SiO_2 衬垫氧化层

步骤 54. PECVD Si_3N_4 , 作为腐蚀掩膜层

➤ 具体工艺描述及其剖面视图

由于已经金属化, 因此淀积 Si_3N_4 采用工艺温度低的 PECVD 工艺。具体工艺已在步

骤 41 描述。

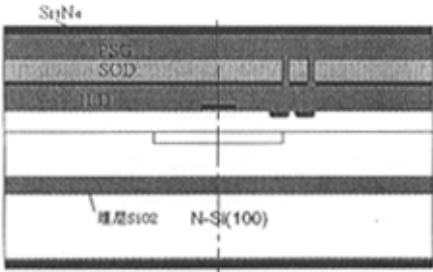


图 3.63 PECVD SiN

步骤 55. 标准光刻 6 #，形成背面腐蚀区域

➤ 工艺剖面视图

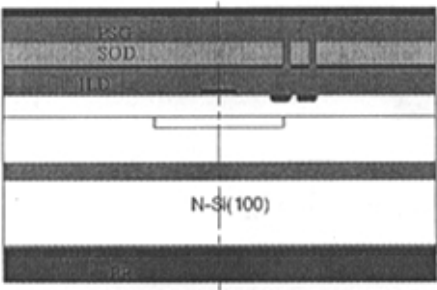


图 3.64 涂敷 PR

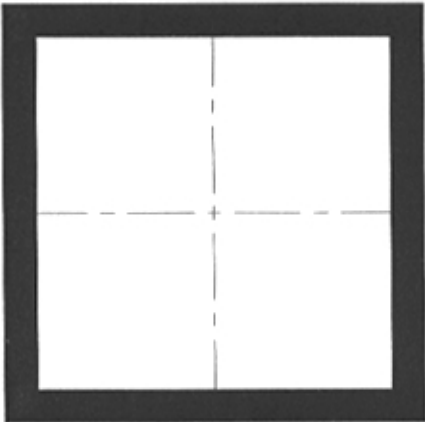


图 3.65 掩膜版 6 # (方膜片版)

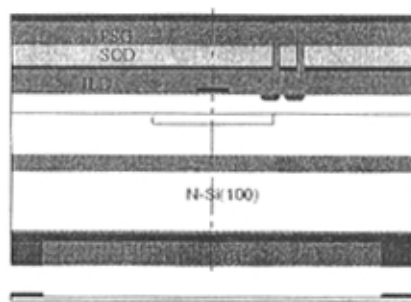


图 3.66 对准和曝光

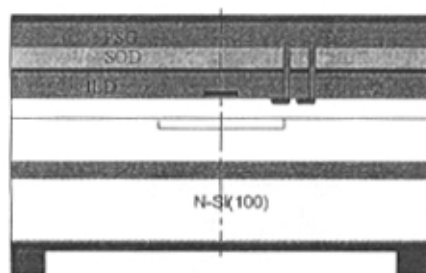


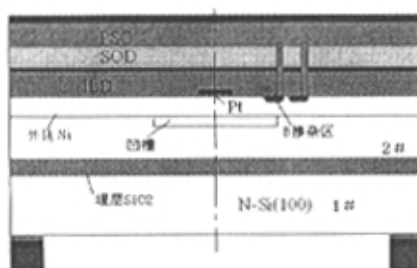
图 3.67 显影和坚膜

步骤 56. 背面刻蚀 Si_3N_4 掩膜层及 SiO_2 层

➤ 具体工艺描述

为了达到腐蚀 Si_3N_4 掩膜层及 SiO_2 层的目的,可以采用干法腐蚀或者湿法化学腐蚀的办法。较简单的方法是采取湿法化学腐蚀的办法:可采用 HF 和甘油的混合液,腐蚀温度为 $80\sim 90^\circ\text{C}$,通过实验调整浓度可以获得相等的腐蚀速率。一般情况下, 80°C , $1\sim 3\text{mol/L}$ 浓度的 HF 对 SiO_2 及 Si_3N_4 掩膜的腐蚀速率相等,大约为 10nm/min 。或者采用干法腐蚀,其中关键的是选择等离子体刻蚀剂,选择的刻蚀剂对 Si 的选择性较大即可,比如 C_2F_6 或者 CF_4+H_2 等。

➤ 工艺剖面视图

图 3.68 背面刻蚀 Si_3N_4 掩膜层及 SiO_2 层

步骤 57. 去除 PR 并清洗

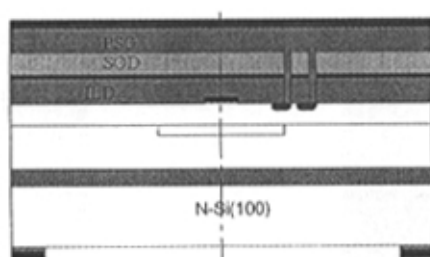


图 3.69 去除 PR

步骤 58. 腐蚀硅衬底，制取方形膜片，腐蚀终止于埋层氧化物

➤ 具体工艺描述

制取方形膜片除了采用传统的各向异性湿法腐蚀之外，还可采取干法腐蚀技术。对于湿法腐蚀技术，腐蚀剂可采用 KOH、EDP 或者 TMAH 等，具体条件及注意事项已在 3.1 节中进行了分析。而对于干法腐蚀，关键是选择的腐蚀剂对 SiO_2 和 Si_3N_4 的选择性要大，常用的等离子体刻蚀剂可选择的有： Cl_2 、 CCl_4 、 CF_2Cl_2 、 CF_3Cl 、 Br_2 和 CF_3Br 等[30]。

➤ 工艺剖面视图

采取湿法腐蚀的工艺剖面视图如图 3.70 所示，而采用干法腐蚀的工艺剖面视图及其版图分别如图 3.71 和图 3.72 所示。

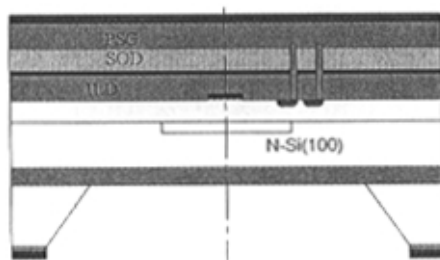


图 3.70 湿法腐蚀衬底

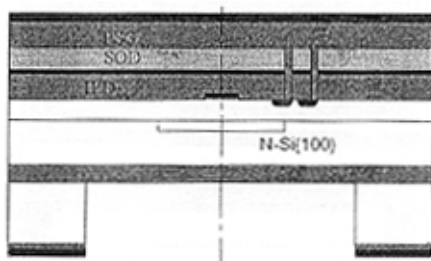


图 3.71 干法腐蚀衬底

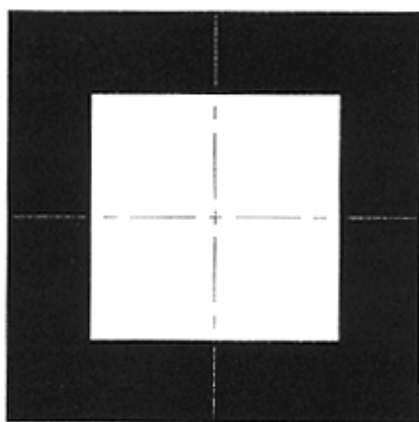


图 3.72 干法腐蚀掩膜版 6' # (方膜片版)

步骤 59. 腐蚀埋层氧化物, 终止于 2# 单晶硅片

➤ 工艺剖面视图

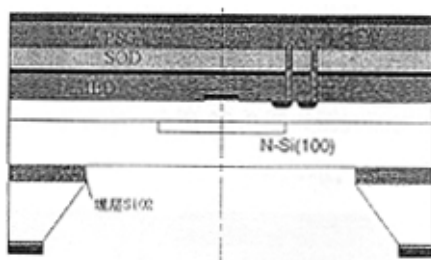


图 3.73 腐蚀埋层氧化物

步骤 60. 清洗

(八) 硅谐振梁的制取

步骤 61. 去除硅片正面的 Si_3N_4 掩膜层

➤ 具体工艺描述及其剖面视图

可以选择温度为 100°C 的 H_3PO_4 ，并采用回流蒸发器，防止操作时腐蚀液成分发生变化。

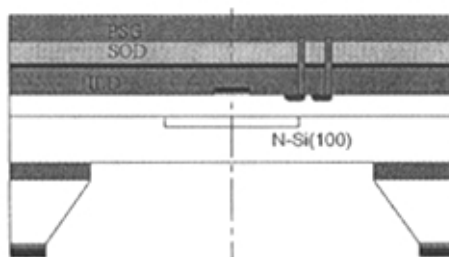


图 3.74 刻蚀正面的 SiN 掩膜

步骤 62. 标准光刻 7#, 形成制备硅梁区域

➤ 工艺剖面视图

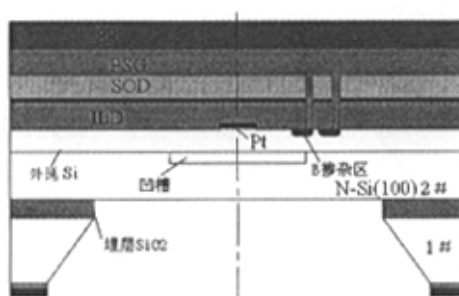


图 3.75 涂敷 PR

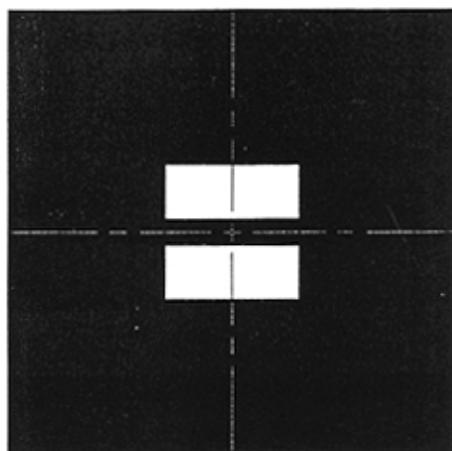


图 3.76 掩膜版 7# (谐振梁版)

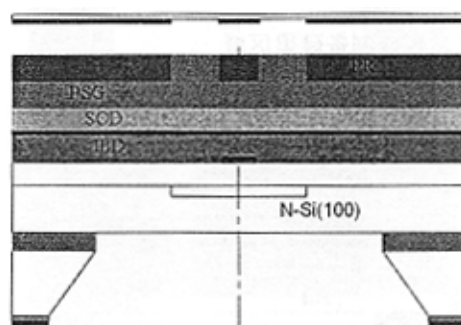


图 3.77 对准和曝光

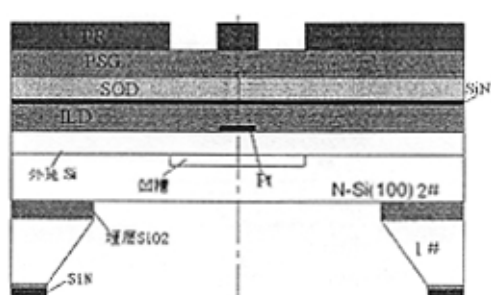


图 3.78 显影和坚膜

步骤 63. 刻蚀介质层和钝化层

➤ 工艺剖面视图

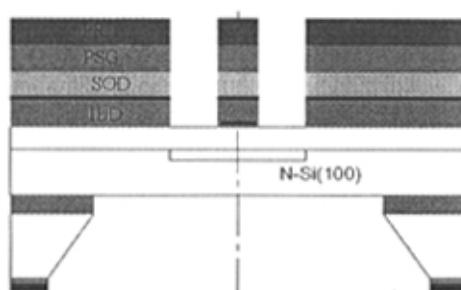


图 3.79 刻蚀介质层和钝化层

步骤 64. 去除 PR

➤ 工艺剖面视图

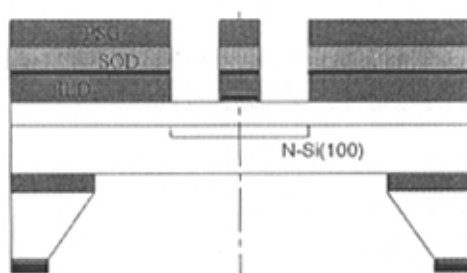


图 3.80 去除 PR

步骤 65. RIE 腐蚀, 释放硅梁结构

➤ 工艺剖面视图

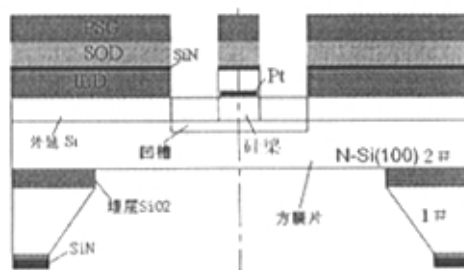


图 3.81 RIE 腐蚀, 释放硅梁结构

步骤 66. 去除硅片背面的 Si_3N_4 掩膜层

➤ 工艺剖面视图

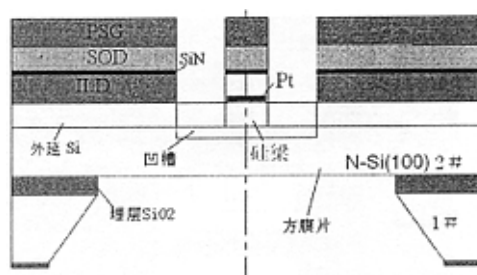


图 3.82 刻蚀硅片背面的 SiN 掩膜

(九) 结构释放

步骤 67. 划片，释放结构，准备封装

芯片分割分为两个步骤进行：第一步是划片；第二步是管芯分离。而划片的主要方法有：(1) 金刚刀划片；(2) 激光划片；(3) 高速砂轮划片；其中高速砂轮划片是目前最常用的方法，具有切割深度可控，划片损伤区域小，划片道窄等特点。对于沿<100>方向生长的硅片，划片方向为垂直于和平行于主参考面的两个方向，行刀方向不受限制。

管芯分离的基本过程为先将砂轮划好的大圆片（已在划片前粘贴在胶带上）胶带用玻璃棒沿划片方向轻碾（已划穿的情况可省去此步骤），然后加热并撑大胶带，沿半径方向均匀拉撑，即可使管芯分离[9]。

§3.3 硅微谐振式压力传感器封装结构的考虑

对于硅微谐振式压力传感器，品质因数 Q 值将直接影响到传感器的性能。 Q 值也即是表征阻尼的大小，反映的是传感器谐振曲线的尖锐程度。 Q 值越高，意味着损耗越小，谐振频率的稳定度越高，传感器也就越稳定，抗外界振动干扰的能力越强，这样，传感器的重复性就越好，传感器的灵敏度、精确度就越高。因此，在设计硅微谐振式压力传感器时，应当尽量提高谐振传感器的 Q 值。品质因数 Q 值的大小取决于谐振子结构，材料的内部摩擦以及周围空气的压力[39]。利用硅微机械加工技术，可以制作出非常薄的、非常对称的谐振子结构，这样的结构是获得高 Q 值的因素之一。另外，谐振子工作周围的压力较低，或者真空，可以获得非常高的 Q 值[39]。既然 Q 值是如此受谐振子工作环境压力的影响，因此，为了减小阻尼，获得高 Q 值，应当对传感器的敏感结构进行真空封装。

硅微谐振式压力传感器是一种敏感应力的传感器,因此,传感器设计时,尽可能地保证谐振梁敏感压力所引起应力的变化,而尽量减少外界其它因素的影响。因此,在对硅微谐振式传感器进行封装时,应当考虑采取合适的措施尽量减小由于封装所引入的应力,从而需要对封装所涉及的材料和结构尺寸进行合理的设计,以便减小传感器和封装结构之间的相互影响。

为了对传感器实现真空封装,在已加工好的传感器敏感结构的硅片上键合另一片真空密封用的封盖,这样不仅可以达到真空封装的目的,而且也可保护谐振梁结构不受损坏。由于封盖键合是在传感器敏感结构完成以后进行的,所以实现的难度比较大。要完成芯片级封装,封盖键合要达到如下要求:(1)键合温度要低,键合工艺要与 MEMS 器件制造工艺兼容;(2)要有足够的键合强度,能满足 MEMS 器件结构完成以后切成分立器件的要求(对于常压工作器件);(3)键合过程不能损坏 MEMS 器件结构。键合的方法有很多,但是有些键合无法应用于封盖保护。例如硅-硅直接键合(SDB)技术,它是将两硅片高温处理直接键合在一起,键合效果很好,但是长时间的高温会使金属化连线失效。最常用的是硅与玻璃静电键合,利用外加电场使硅/玻璃界面发生化学反应形成牢固的化学键,其键合强度要比硅或玻璃本身牢固,键合温度也不高(180~500℃)[40],但是键合过程中的高电压会使 MEMS 可动的硅结构(硅谐振梁)产生变形,使器件失效。解决的办法可以采用金/硅键合或者采用玻璃烧结键合[40],这两种技术都与制造工艺兼容,有足够的键合强度(切片成品率超过 80%),又不损伤器件结构,实现了 MEMS 器件的芯片级封装。

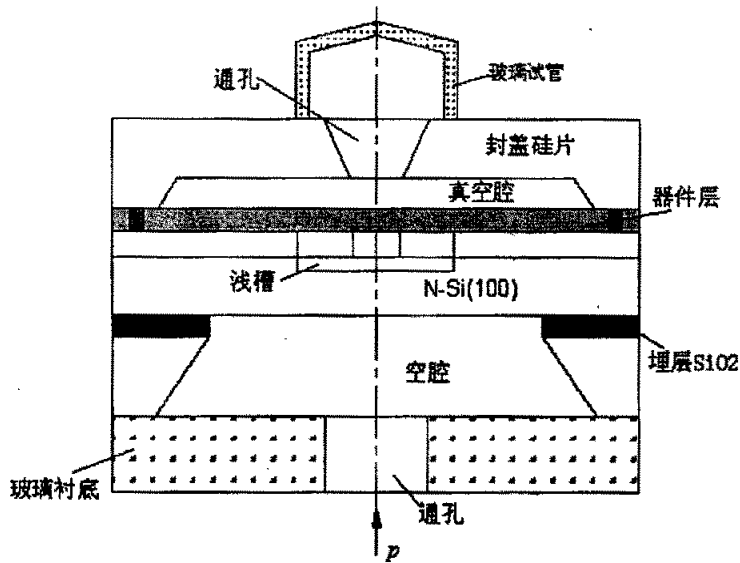


图 3.83 传感器敏感结构初始阶段的封装结构

硅片初始阶段的封装结构如图 3.83 所示。工艺步骤为[41]：首先利用玻璃烧结技术（金/硅键合技术）将传感器硅片与另一片加工有封盖阵列的硅片进行键合，阵列上的每一个封盖都有一个孔，以便抽真空，实现真空封装。封盖阵列硅片可通过传统的各向异性湿法腐蚀技术（腐蚀剂可采用 KOH）来制作。键合之后，对整个硅片结构进行切片，释放出单片芯片结构。接着，利用静电键合在密封孔上面键合一只玻璃试管，然后从试管对空腔抽真空，满足要求之后，即可将试管熔化，密封空腔，这样实现了传感器的真空密封。最后，将传感器芯片结构的衬底与玻璃进行静电键合。或者将传感器芯片的衬底与另一片单晶硅片进行静电键合，这样由于使用相同的材料，从而使热不匹配问题降到最小[7]。

为了尽量延长传感器的寿命，在封装时尽量不要引入环氧树脂、松香和焊接材料等[7]。

整个封装过程可归结为如下步骤[7]：

- 真空封装；
- 将整个传感器芯片衬底与玻璃或者单晶硅立柱（stud）键合；
- 将玻璃或者单晶硅立柱与封装键合；
- 引线键合或者采用倒装焊工艺；

- 密封。

§3.4 小结

本章主要针对论文中特定的硅微谐振式压力传感器的敏感结构，利用硅微机械加工工艺，设计了其加工工艺流程，并对相关工艺步骤进行了研究和分析，为选择合适的工艺进行了探讨。另外，在本章的开始，对传感器的衬底材料进行了选择，并且对传感器涉及的一些关键工艺进行了分析和总结。

第四章 硅微谐振式压力传感器的开环特性测试

§4.1 硅微谐振式压力传感器的开环特性测试原理

§4.1.1 谐振式传感器频率特性和 Q 值的测试原理

实际应用的谐振敏感元件多为弹性敏感元件。在讨论其振动特性时,可以用一个等效的单自由度有阻尼系统来描述(见图 4.1) [4]。图中 k, m, c 分别是等效刚度、等效质量和等效阻尼。其自由振动的运动方程是:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4.1)$$

式中 $m\ddot{x}, c\dot{x}, kx$ 分别表示系统的惯性力、阻尼力和弹性力,它们分别表征维持系统运动状态的能力、消耗系统能量的程度和改变系统运动状态的能力。

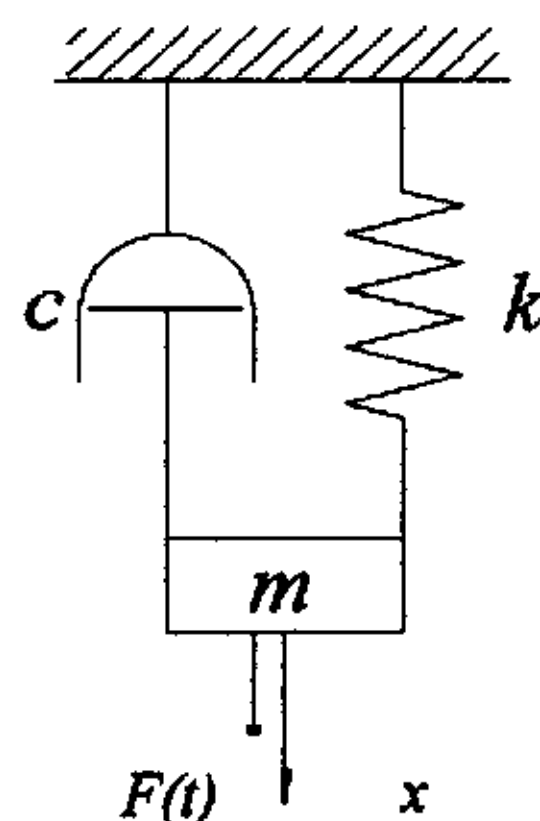


图 4.1 单自由度振动系统

当图 4.1 所示系统受到激励力 $F(t)$ 作用时,系统受迫振动的运动方程是:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (4.2)$$

当将激励力 $F(t)$ 当作系统输入,位移 $x(t)$ 当作系统输出时,该系统的系统框图如图 4.2 所示。

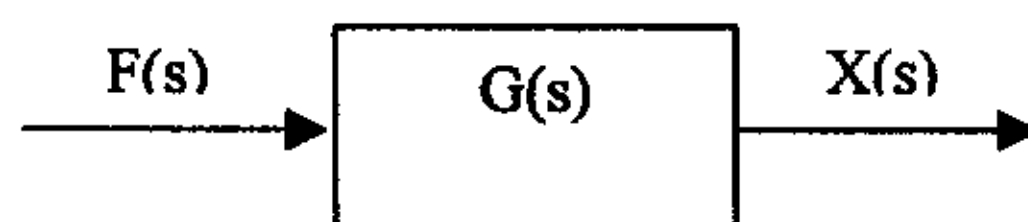


图 4.2 系统框图

其中 $G(s)$ 是系统的传递函数, $F(s)$ 、 $X(s)$ 分别是激励力 $F(t)$ 和位移 $x(t)$ 的复频域表达式。

系统的传递函数是

$$G(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} = \frac{\omega_n^2/k}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.3)$$

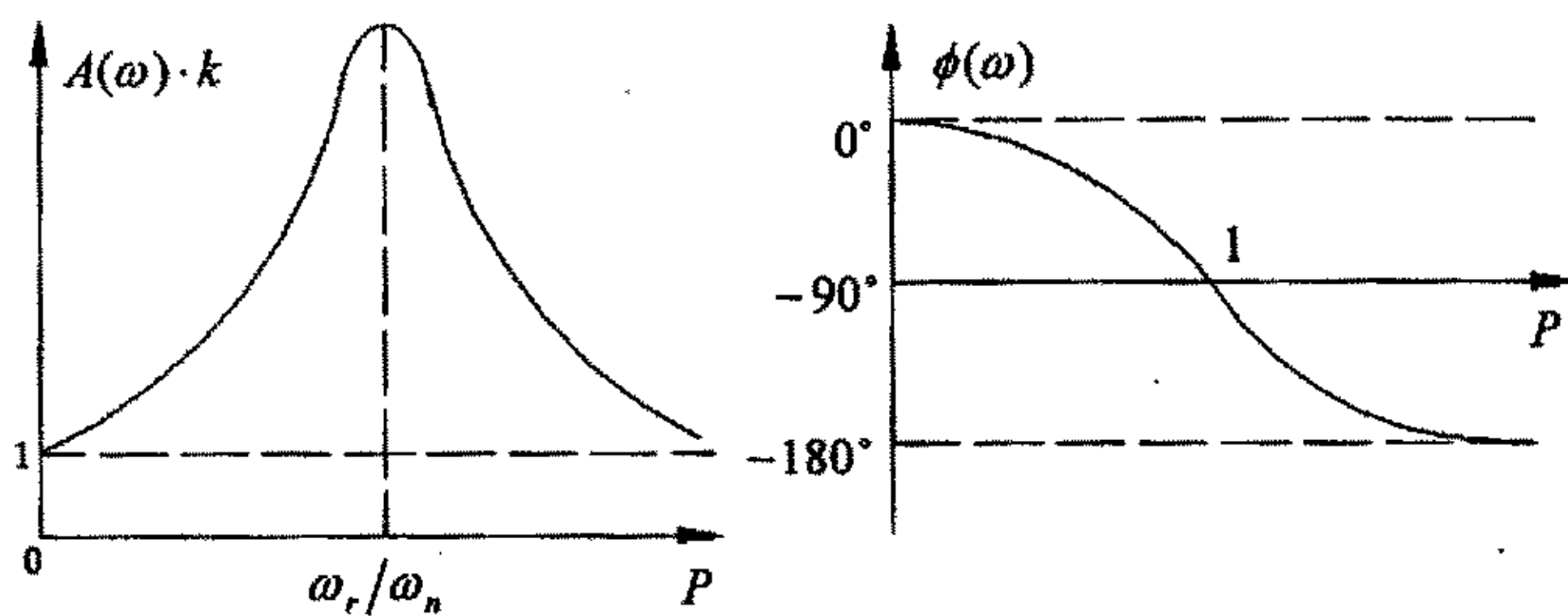
式中 ξ 是系统的等效阻尼比系数; ω_n 是系统的固有频率,取决于敏感元件的固有特征。

系统的频率特性是

$$G(j\omega) = \frac{1}{m(j\omega)^2 + cj\omega + k} = \frac{\omega_n^2/k}{(j\omega)^2 + 2\xi\omega_n j\omega + \omega_n^2} \quad (4.4)$$

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= \frac{1/k}{\sqrt{(1-P^2)^2 + (2\xi P)^2}} \\ \phi(\omega) &= -\arctg \frac{2\xi P}{1-P^2} \\ P &= \omega/\omega_n \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

式中 $A(\omega)$, $\phi(\omega)$ 分别是图 4.1 所示系统的幅频特性和相频特性; 图 4.3 给出了它们的示意图。



(a) 幅频特性 (b) 相频特性

图 4.3 幅相特性

当 $P = \sqrt{1-2\xi^2}$ 时, $A(\omega)$ 达到最大值, 有

$$A_{\max} = \frac{1}{2\xi k \sqrt{1-\xi^2}} \approx \frac{1}{2\xi} \quad (4.6)$$

这时系统的相角是:

$$\phi \approx -\arctg \frac{1}{\xi} \approx -90^\circ \quad (4.7)$$

通常, 对应于 $A_{\max}$ 的频率称为系统的谐振频率, 系统的谐振频率 (ω_r) 是:

$$\left. \begin{aligned} f_r &= \frac{\omega_n}{2\pi} \sqrt{1-2\xi^2} \\ \omega_r &= \omega_n \sqrt{1-2\xi^2} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

对于硅谐振式压力微传感器，谐振子的品质因素 Q 是一个非常重要的指标，可用如下计算式表达[42]：

$$Q = 2\pi \frac{\text{谐振结构的总能量}}{\text{每循环耗散的能量}} \quad (4.9)$$

对于弱阻尼系统， $1 \gg \xi > 0$ ，利用图 4.4 所示的谐振元件的幅频特性可给出：

$$Q \approx \frac{1}{2\xi} \approx A_m \quad (4.10)$$

$$Q \approx \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{1}{P_2 - P_1} \quad (4.11)$$

ω_1, ω_2 (P_1, P_2) 对应的振幅增益为 $A_m/\sqrt{2}$ ，称为半功率点。

显然 Q 值反映了谐振元件振动中阻尼比的大小及消耗能量快慢的程度。同时也反映了幅频特性曲线谐振峰陡峭的程度，即谐振敏感元件选频能力的强弱。

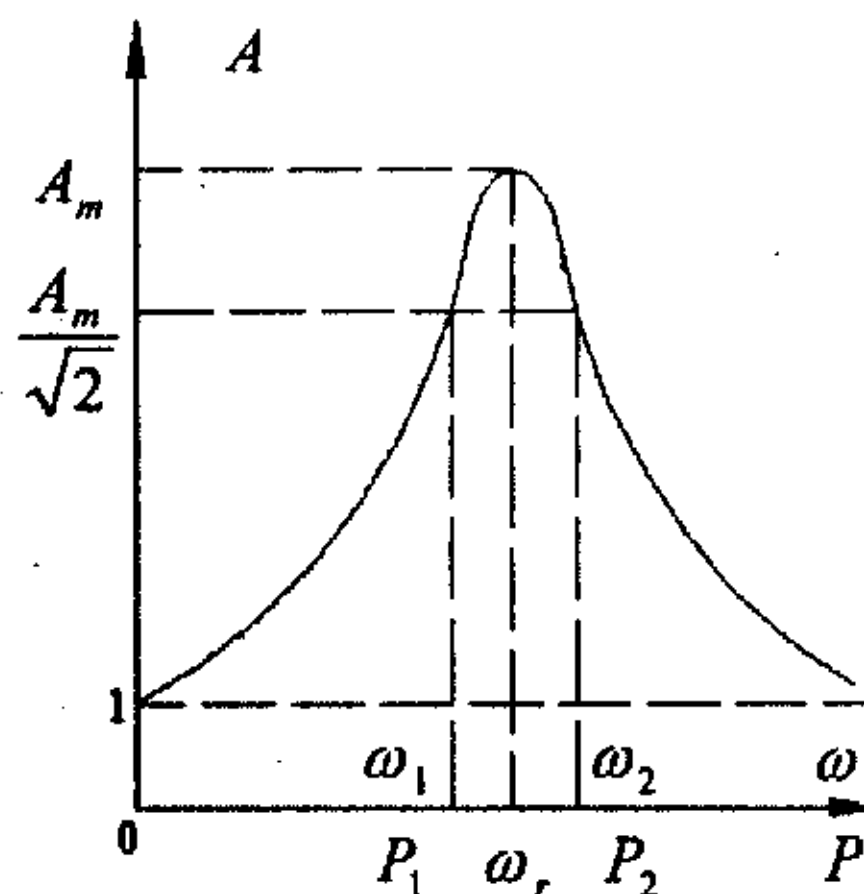


图 4.4 求解 Q 值示意图

由谐振式传感器敏感元件的理论模型可知只要能够确定谐振频率 f_r (ω_r) 及两个半功率点所对应的频率 f_1 (ω_1) 和 f_2 (ω_2)，就可以测出敏感元件的谐振频率和品质因数。而要想确定 f_r (ω_r)、 f_1 (ω_1) 和 f_2 (ω_2)，必须求出包括这三个频点在内的频带上系统的频率特性。

由系统结构图（图 4.2）可知

$$G(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} \quad (4.12)$$

式中 $X(j\omega)$, $F(j\omega)$ 分别是激励信号（激励力）和输出信号（位移）的频谱。

理论上，由公式(4.12)可知，在系统零状态下，选用开环测试方法，只要有一个频谱包含 f_r (ω_r)、 f_1 (ω_1) 和 f_2 (ω_2) 的信号作为激励，求出激励信号和输出信号的频谱，就可以求出敏感元件在这段频带上的频率特性。

实际上，要想使敏感元件振动起来，必须保证激励信号在要求的频带内有足够的功

率。并且不同的传感器具有不同的谐振频率，同一个传感器除基模态外也有多个高阶模态。所以在选择激励信号时，必须同时满足信号的功率集中于所要求的频带内，在频域上可以方便的移动信号的频带所在位置。因此，激励信号的选择是非常关键的[43]。

对系统频率特性传统的测试方法是利用频域扫描的方法，即用正（余）正弦信号以一定的频率步长测试系统每个频点上的频率特性，从而求出整个系统的频率特性。这种方法的缺点是效率，尤其是在频带较宽、频率分辨率较高的情况下，测试速度慢。其优点是能在稳定状态下测出每点的频率特性，结果较为准确。因而在本课题中选用这种方法作为传感器的特性测试方法。

§4.1.2 锁相放大器的测试原理

锁相放大器的原理框图如图 4.5 所示。信号通道由低噪声前置放大器，各种功能有源滤波器等组成，其作用是把微弱信号放大到足以推动相关器的工作电平，并兼有抑制和滤掉部分干扰和噪声、扩大仪器动态范围的性能；参考通道由触发电路、相移电路、正弦波形成电路和驱动级等组成，其作用是产生一定频率的正弦信号输给相关器；相关器（PSD）由乘法器和积分器组成，是锁相放大器的核心部件，其中乘法器通常采用开关乘法器，积分器通常由低通滤波器构成[44]。

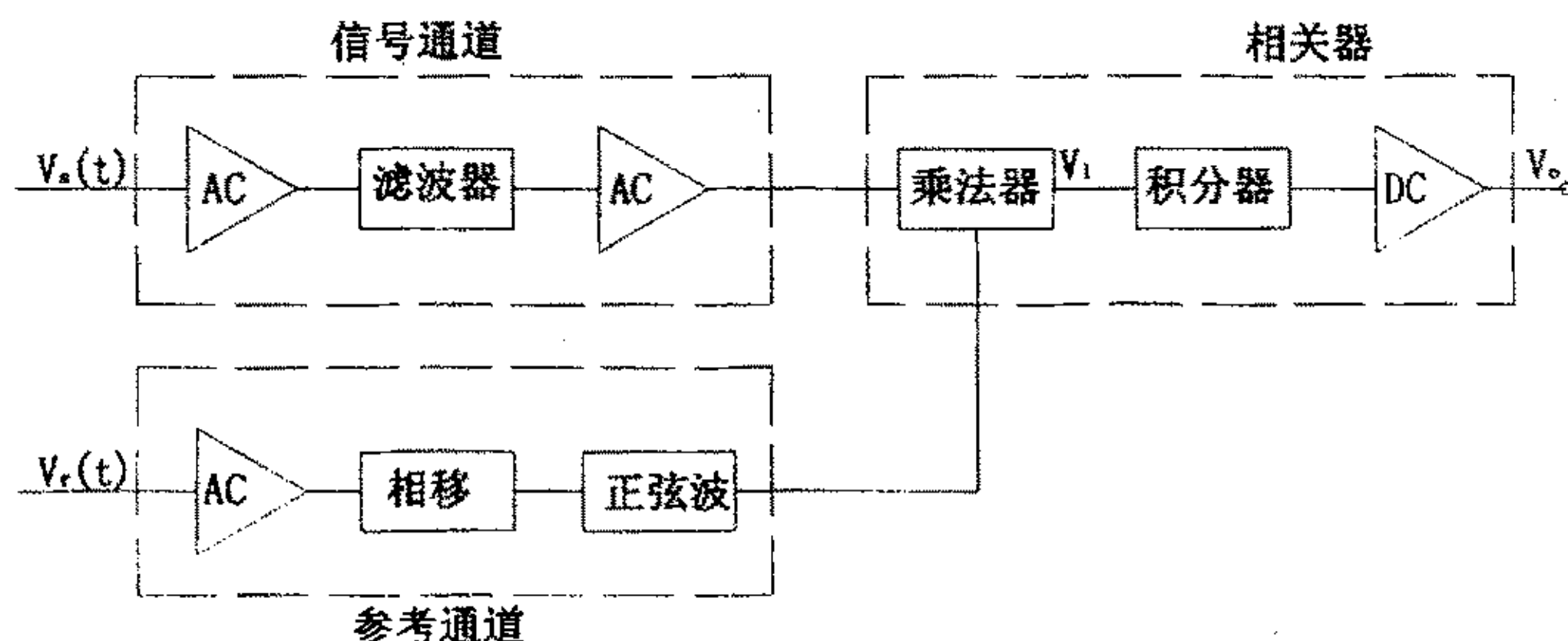


图 4.5 锁相放大器的原理框图

设待测信号 $V_s(t) = V_{s1}(t) + n(t) = V_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) + n(t)$ ，其中 $V_{s1}(t)$ 为待测信号的有效信号， $n(t)$ 为噪声。参考信号为 $V_r(t) = V_r \cos(\omega_r t + \varphi_r)$ ，则经乘法器输出的信号为

$$V_i = V_s(t) \cdot V_r(t) \quad (4.13)$$

则积分器的输出信号为

$$\begin{aligned}
 V_o &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V_s(t) \cdot V_r(t) dt \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left[\int_{-T}^T V_{s1}(t) \cdot V_r(t) dt + \int_{-T}^T V_r(t) \cdot n(t) dt \right] = R_{sr}(\tau) + R_m(\tau) \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

(4.1.14) 式中, $R_{sr}(\tau)$ 、 $R_m(\tau)$ 分别为待测有效信号与参考信号及参考信号与噪声之间的相关函数。对于 $R_m(\tau)$, 由于噪声的频率和相位都是随机量, 可以认为参考信号和噪声之间是相互独立的, 则相关函数 $R_m(\tau)$ 为零。然而实际情况下, 时间常数 T 并不为无穷大, 也即 $R_m(\tau)$ 不可能为零, 表现为剩余噪声, 但剩余噪声对测量结果的影响已极大地降低。因此, 输出信号的决定项为 $R_{sr}(\tau)$, 即

$$\begin{aligned}
 R_{sr}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V_{s1}(t) \cdot V_r(t) dt \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \left\{ \frac{1}{2} V_s V_r \cos[(\omega_s + \omega_r)t + (\varphi_s + \varphi_r)] + \frac{1}{2} V_s V_r \cos[(\omega_s - \omega_r)t + (\varphi_s - \varphi_r)] \right\} dt \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

有上式可知, 若 $\omega_s = \omega_r$ 时, 并且已知参考信号与噪声信号的相关函数 $R_m(\tau)$ 为零, 则积分器的输出信号可以表示为

$$V_o = K V_s V_r \cos(\varphi_s - \varphi_r) \quad (4.16)$$

其中, K 为低通滤波器的传输系数。

因此, 当待测信号与参考信号同频率时, 相关器的输出信号与待测信号的幅度有关, 也与待测信号和参考信号的相位差有关, 若调整参考信号的相位 φ_r , 使得 $\varphi_s = \varphi_r$, 此时相关器的输出只与待测信号的幅度成正比。

综上所述, 由于输入信号 $V_s(t)$ 中的噪声 $n(t)$ 与参考信号不相关, 经锁相放大器的积分器输出后, 噪声被抑制, 而有效信号的幅值得到了放大, 因而提高了测量精度。

§4.2 测试系统组成

§4.2.1 系统工作原理

传感器频率特性的测试方案可以采用传统的频率扫描方法, 工作时, 锁相放大器的内部参考信号采用倍频方式, 即是信号发生器频率的一倍, 这样克服了同频干扰等问题。通过在激励电阻 R_e 上加载交变的正弦激励电压 $U_e \cos(\omega t)$, 则在谐振梁上将产生一个常应力 σ_s 和一个频率为 2ω 的交变应力 σ_d 。 σ_d 激励谐振梁产生振动, 当 2ω 等于梁的谐振频率时, 梁产生谐振。拾振电阻通过一个恒流源, 将电阻的变化量转变为电压信号。通过测量以激励电压为输入、拾振电阻的输出电压为响应的特性曲线, 即可以解算出传感器的谐振频率和品质因数。

§4.2.2 硬件系统结构

系统的硬件组成如图 4.6 所示。其中锁相放大器是整个测试系统的核心部分, HP 33120A 信号发生器用来产生激励信号。PC 机通过串口控制 HP 33120A 发生所需的激励信号; 通过 COM2 控制锁相放大器检测传感器的输出信号; 通过 NI PCI6111E 采集卡提供的 12 位高速 ADC 来采集锁相放大器测出的数据及 HP 33120A 发生的激励信号。

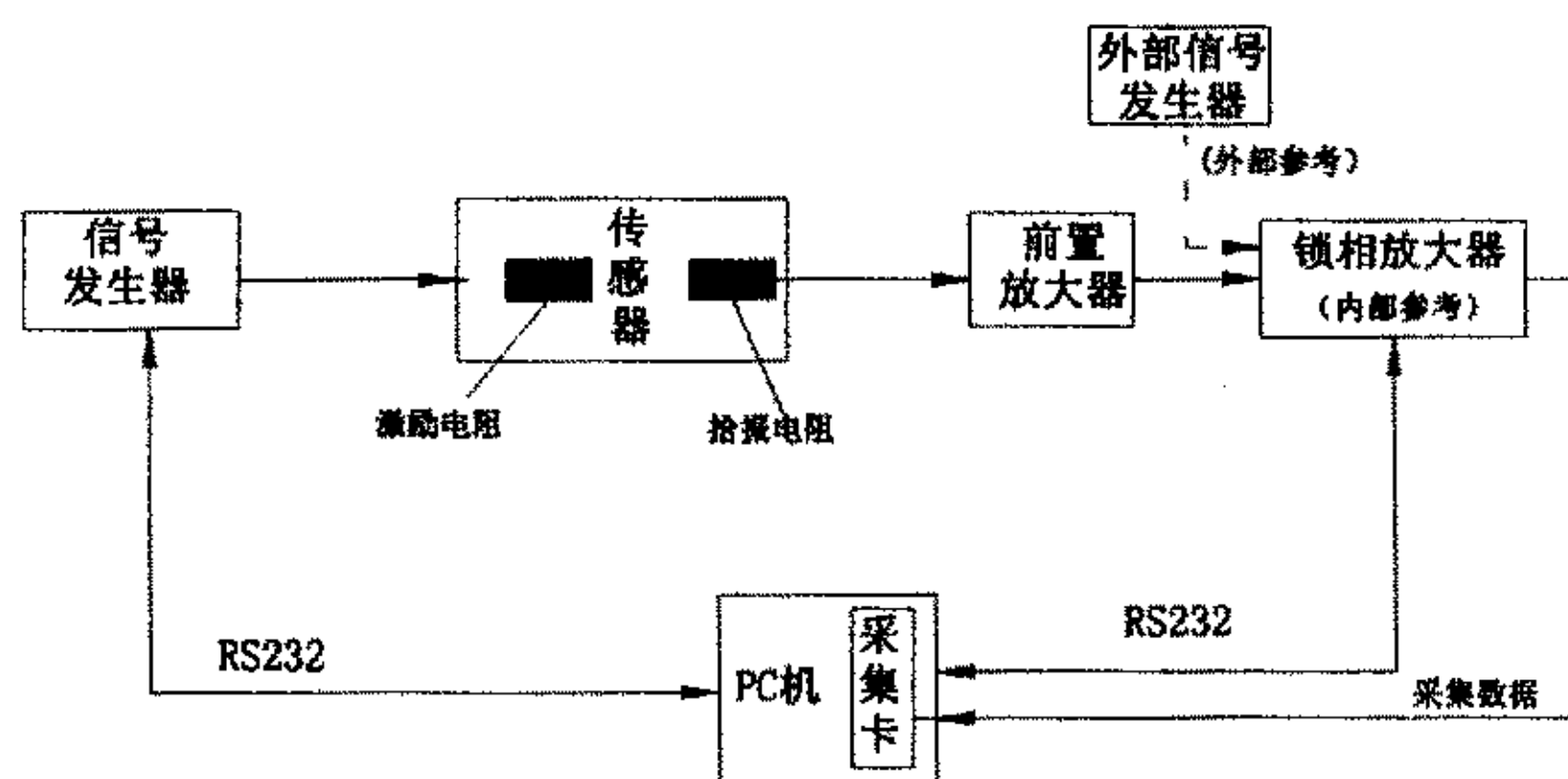


图 4.6 测试系统的硬件框图

§4.2.3 软件系统编制

开环特性测试系统的程序流程图如图 4.7 所示，首先对仪器初始化，对仪器的一些参数进行修改，使其满足测试要求。然后执行程序，读测量值看是否正常，若正常，则进行数据的存储和作图，否则，需对仪器进行检查，或者利用程序对仪器进行调节。

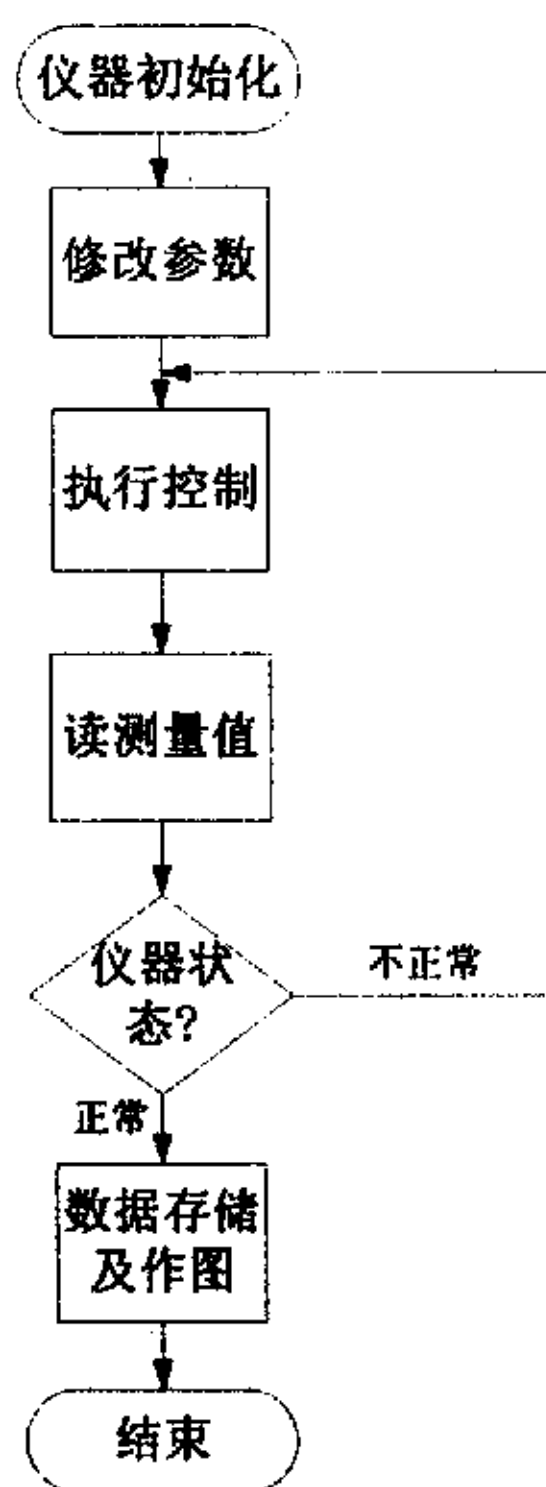


图 4.7 开环特性测试的程序流程图

§4.3 实验结果及其分析

利用开发的开环特性测试系统首先对标准的振膜式压力传感器进行了测试，测试结果如图 4.8 所示。

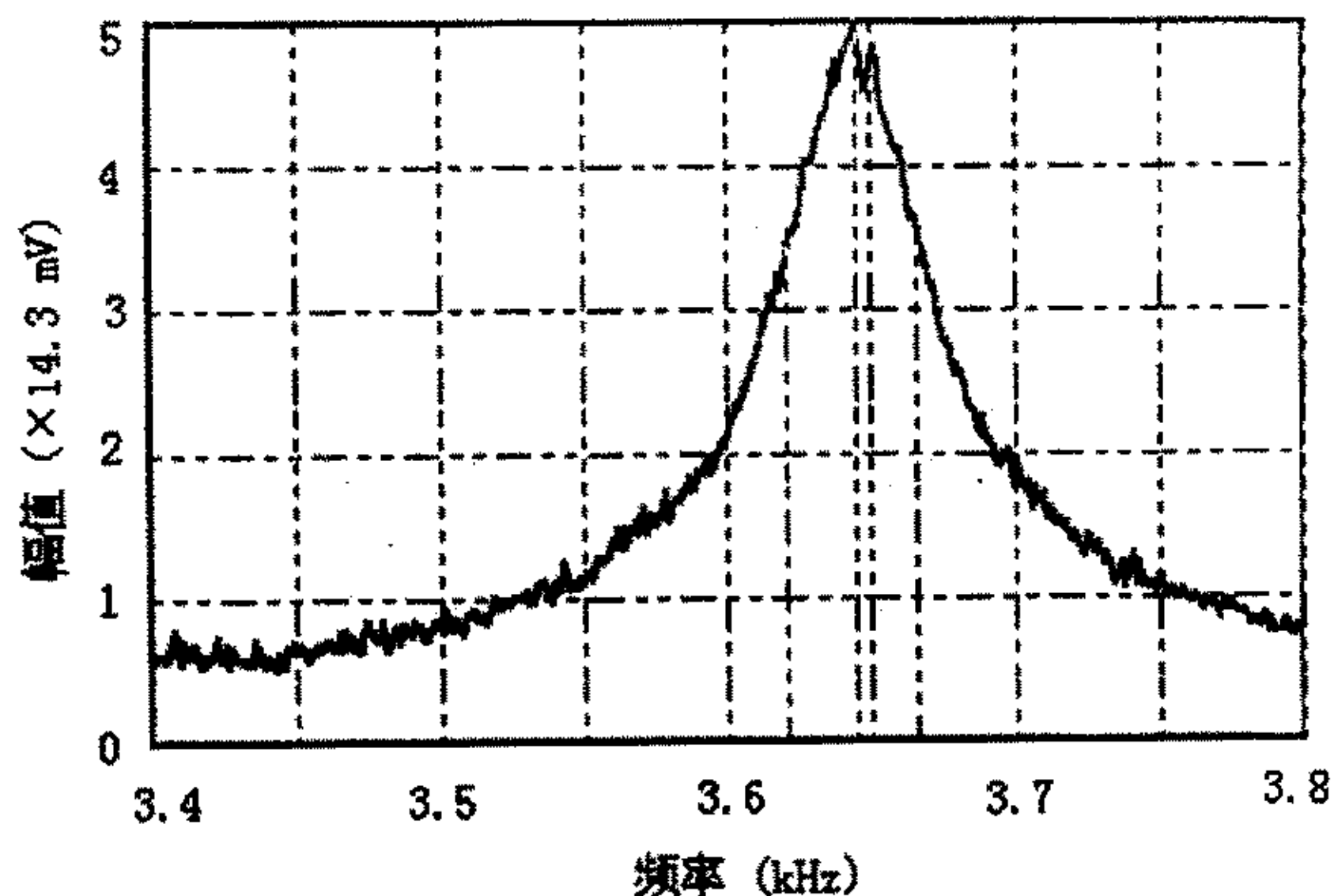
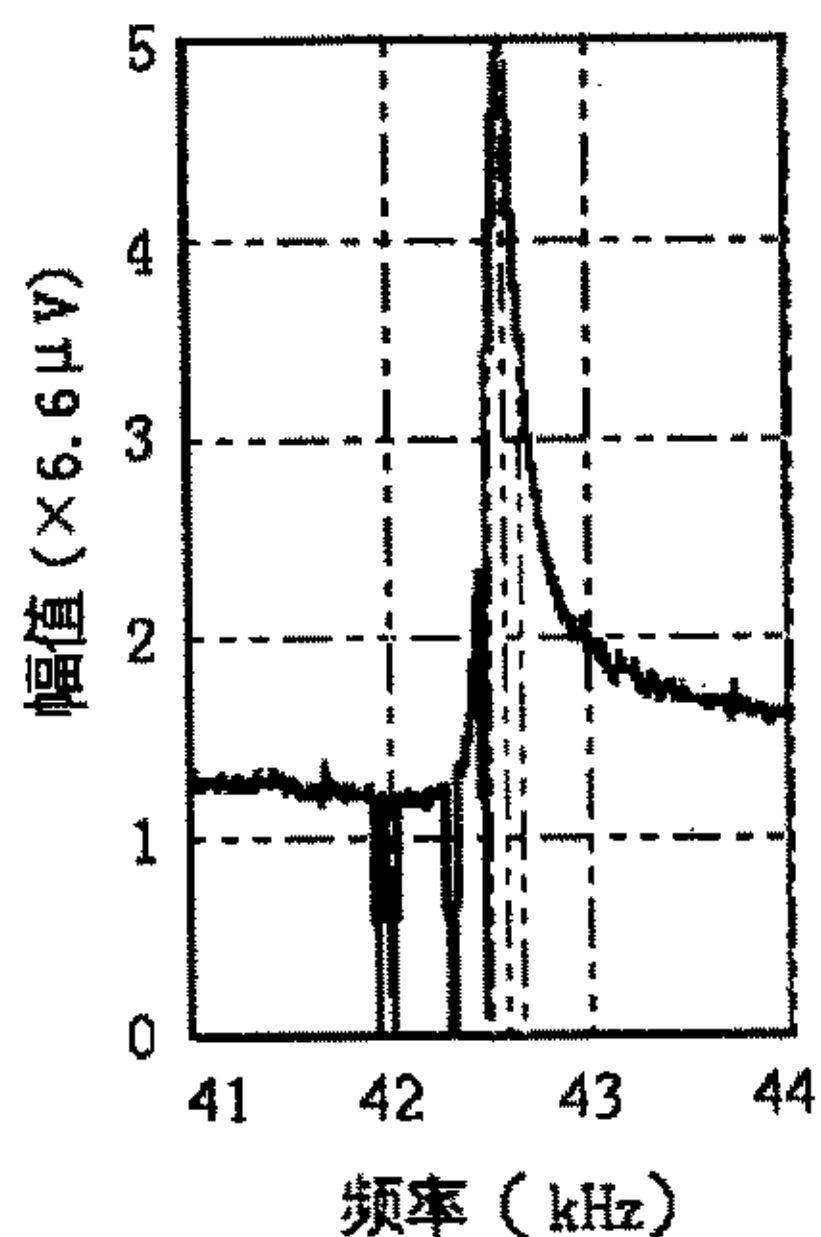


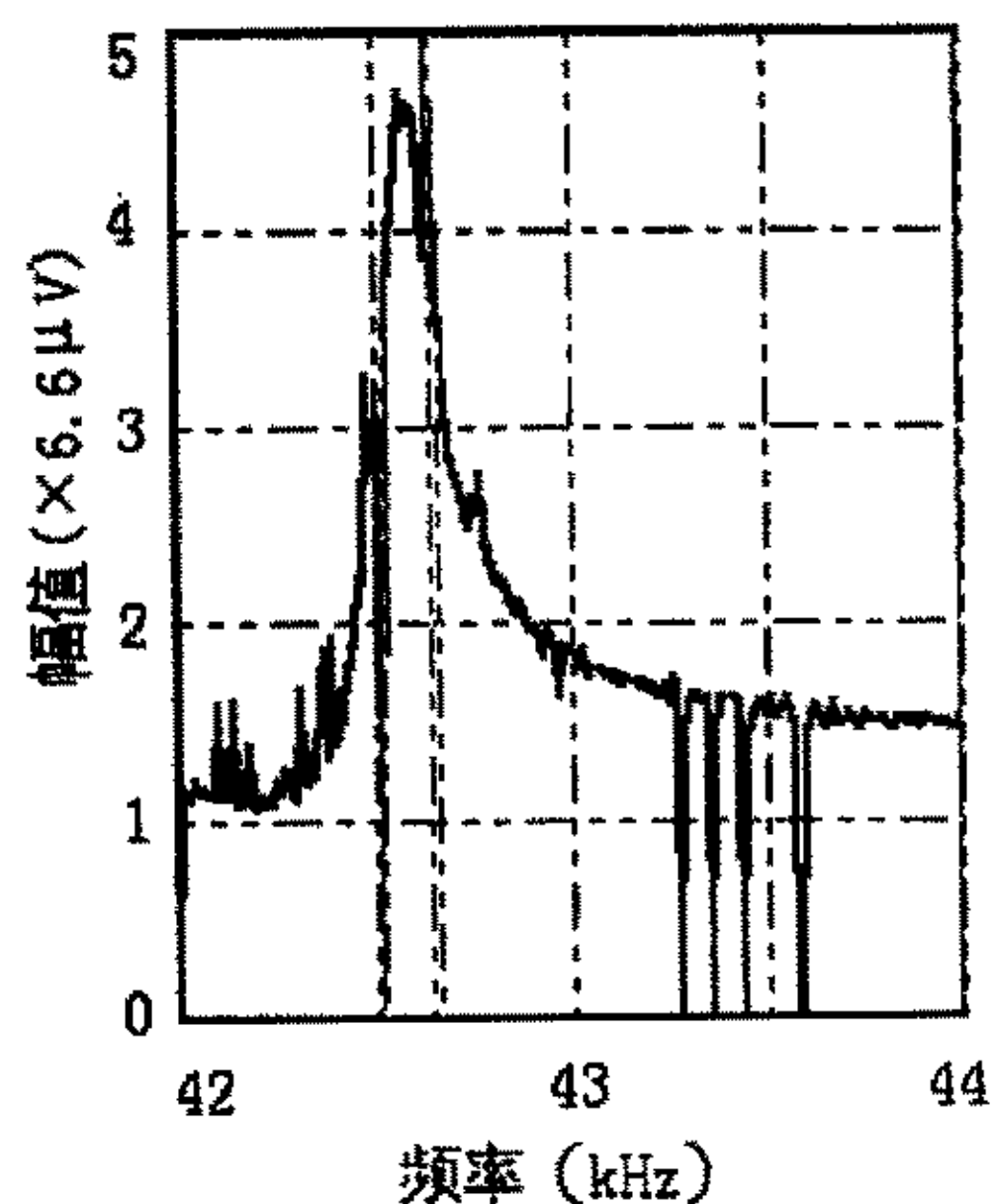
图 4.8 振膜式压力传感器的幅频特性

从图 4.8 中可得出传感器的谐振频率为 3645Hz，两个半功率点的频率分别为 3621.5Hz 和 3666.5Hz，从而可计算出振膜式压力传感器的品质因数约为 81。

另外，对硅微谐振式压力传感器的测量结果如图 4.9(a) 和图 4.9(b) 所示。



(a) 没有尖峰干扰



(b) 有尖峰干扰

图 4.9 硅谐振式压力微传感器的幅频特性

第五章 总结与展望

§5.1 总结

1. 在论文的第二章对硅谐振式压力微传感器敏感结构进行了总体设计。

(1) 提出辅助传感器设计的构想, 解决了硅谐振式压力微传感器闭环自激系统研制过程中频率跟踪的问题;

(2) 对硅谐振式压力微传感器的敏感结构建立了力学模型, 分析了敏感结构表面上的应力、应变分布, 同时也对梁谐振子的特性进行了分析;

(3) 对压敏电阻的布置及其补偿方案进行了设计, 并考虑了压敏电阻与主谐振式压力微传感器敏感结构的兼容性。

2. 在论文的第三章设计了硅微谐振式压力传感器加工工艺流程, 并对工艺流程的每一步骤的具体工艺条件、工艺中出现的问题及其对策、以及相应工艺选择在论文第三章都比较详尽地进行了研究和总结。

3. 在论文的第四章开发出了基于锁相放大器的开环特性测试系统, 并且进行了硅微谐振式压力传感器和振膜压力传感器的测试, 同时对其实验结果进行了分析。

总之, 论文对硅谐振式压力微传感器敏感结构的总体设计、硅微谐振式传感器的加工工艺以及传感器的开环特性测试等方面进行了详尽的论述和研究, 为设计和实现这类传感器提供了一定的理论和实验依据, 具有一定的参考价值。

§5.2 展望

1. 对压敏电阻的兼容性考虑有待进一步深入。

压敏电阻与主谐振式压力微传感器的敏感结构的兼容性是一个非常复杂的问题, 不仅涉及到电学、力学、半导体、微电子学等方面的知识, 而且涉及到实验环节, 另外, 对其研究的方法也很多, 引申出来包括与 CMOS 等电路集成化方面的研究, 本文分析的结果和方法只起抛砖引玉的作用, 需要进一步深入研究。

2. 对硅微谐振式压力传感器加工工艺的研究和流程设计需要与实践的紧密结合。

本论文对硅微谐振式压力传感器加工工艺的研究和流程设计，都是基于理论上而作的考虑，但在实际的工艺加工过程当中，可能出现很多问题，而且工艺过程也很复杂，难度也较大。特别对一些参数的确定需要根据具体的设备而进行考虑，有些步骤可能要往复进行。因此，为了加工出满足要求的硅微谐振式压力传感器，需要与具体设备和工艺进行考虑。

参 考 文 献

- [1] Roger T.Howe, "Applications of silicon micromachining to resonator fabrication", 1994 IEEE international frequency control symposium. pages: 2-7.
- [2] Harada K, Ikeda K, Kuwayama H, *et al.* Various applications of resonant pressure sensor chip based on 3-D micromachining[J]. *Sensors and Actuators A*, 1999, 73: 261—266.
- [3] Patrik Melvas, Edvard Kalvesten, and Goran Stemme. A surface-micromachined resonant-beam pressure-sensing structure[J]. *IEEE*, 2001, 10(4): 498—502.
- [4] 刘广玉, 陈明, 吴志鹤, 樊尚春编著, 新型传感器技术及应用, 北京航空航天大学出版社, 1995;
- [5] 郝一龙, 张大成, 李婷, 硅基 MEMS 技术, 测试技术学报, 2002 年第 16 卷 933—936
- [6] 刘广玉, 传感器的现状和未来, 测控技术, 1999.3, 1~4
- [7] P.Parsons, A.Glendinning and D.Angelidis, Resonant sensors for high accuracy pressure measurement using silicon technology, *IEEE AES MAGAZINE*, July, 1992, pages: 45-48.
- [8] V.Mosser, J.Suski and J.Goss, Piezoresistive pressure sensors based on polycrystalline silicon, *Sensors and Actuator A*, 28(1991) 113-132.
- [9] 李乃平, 微电子器件工艺, 华中理工大学出版社, 1995
- [10] D.Tanasković *et al.*, Influence of impurity distribution on thermal coefficients of resistivity and piezoresistivity of diffused layers in silicon, *Proc. 20th international conference on MIEL'95*, VOL 2, 1995
- [11] 王阳元, T.I.卡明斯, 赵宝瑛等. 多晶硅薄膜及其在集成电路中的应用. 科学出版社, 2000
- [12] P.Parsons, A. Glendinning and D. Angelidis. Resonant sensors for high accuracy pressure measurement using silicon technology, *IEEE AES*, 1992, p45—p48.
- [13] Deyong Chen, Dafu Cui, Li Wang, Xiaotong Gao. SiN beam resonant pressure sensors with a novel structure, *IEEE*, 2002, p994—997.

攻读硕士学位期间发表的论文

樊尚春、彭春荣, 硅压阻式传感器的温度特性及其补偿, 微纳电子技术, 2003 年第 7/8 期, 484-488

樊尚春、彭春荣, 谐振式硅微传感器的加工工艺研究, 第八届敏感元件与传感器学术会议 (STC 2003), 2003 年 11 月, 788—792

- [30] Marc Madou, Fundamentals of microfabrication, CRC press, 1997.
- [31] Irena Barycka, Irena Zubel. Silicon anisotropic etching in KOH-isopropanol etchant, Sensors and Actuators A 48 (1995) 229-238.
- [32] M. Elwenspoek, and H.V. Jansen. Silicon micromachining, Cambridge University Press, 1998.
- [33] 阙端麟、陈修治, 硅材料科学与技术, 浙江大学出版社, 2000
- [34] 刘玉岭等, 超大规模集成电路衬底材料性能及加工测试技术工程, 冶金工业出版社, 2002
- [35] 王敬, 屠海令等, SOI 键合材料的 TEM 研究, 稀有金属, 1998 年 7 月, 第 22 卷第 4 期, p274—276
- [36] 樊瑞新, SOI 结构制备工艺进展, 材料科学与工程, 2000 年 6 月, 第 18 卷第 2 期, p100—104
- [37] 雷红等, 化学机械抛光 (CMP) 技术的发展、应用及存在的问题, 润滑与密封, 2002 年第 4 期, p73—76
- [38] JJ.van Baar, RJ. Wiegerink and *et al.* Combined π -pirani/bending membrane pressure sensor, IEEE, 2002, 328-331.
- [39] Masayoshi Esashi. Resonant sensors by silicon micromachining, IEEE international frequency symposium, 1996, 609-614.
- [40] 刘雪松、闫桂珍、郝一龙、张海霞, 用于 MEMS 器件芯片级封装的金-硅键合技术研究, 微纳电子技术, 2003 年第 7/8 期, p238—248
- [41] Christopher J. Welham, John Greenwood, Michael M. Bertoli. A high accuracy resonant pressure sensor by fusion bonding and trench etching, Sensors and Actuators 76 1999 298—304.
- [42] 刘广玉、樊尚春、周浩敏, 微机械电子系统及其应用, 北京航空航天大学出版社, 2002
- [43] 蔡晨光、樊尚春, 基于 Polytec 激光测振仪的微振动测试分析系统. STC 2003, 2003: 545~550
- [44] 赖发春、瞿燕, 用锁相放大器测量热敏电阻的温度特性, 福建师范大学学报, 2002 年 6 月, 第 18 卷第 2 期, p45—47
- [45] PerkinElmer. Model 7265 DSP lock-in amplifier instruction manual, 2000

攻读硕士学位期间发表的论文

樊尚春、彭春荣, 硅压阻式传感器的温度特性及其补偿, 微纳电子技术, 2003 年第 7/8 期, 484-488

樊尚春、彭春荣, 谐振式硅微传感器的加工工艺研究, 第八届敏感元件与传感器学术会议 (STC 2003), 2003 年 11 月, 788-792

致 谢

本论文是在导师樊尚春教授的指导与关心下完成的。在近三年的研究生学习过程中，导师不仅在课题上对我给予了认真的指导，而且从生活、思想、治学态度等方面均给予了关心和指导，相信一定会让我受益终身。

导师严谨的工作作风、踏实的治学态度以及对我的关心、帮助都深深地感动了我，尤为重要是从导师那里学到了发现问题、分析问题和解决问题的方法，使自己的理论和实践能力得以提高，在此向导师表示衷心的感谢！

另外，在硕士期间，也得到了也得到了刘广玉教授、周浩敏教授在学术上的教诲；同时还得到了实验室全体成员热情的帮助，尤其是邢维巍、龙德帆、蔡晨光以及李晓蕾等师兄师姐的帮助和指点，在此一并表示深深的谢意！