

纹膜结构用于电容式硅微麦克风的研究*

邹泉波 刘理天 李志坚

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

摘要 本文提出的一种纹膜结构单硅片微麦克风,采用了硅微机械技术,且实现了麦克风电容两电极之间的自对准,大大提高了麦克风的生产效率,降低了成本。纹膜结构有降低和消除膜内应力的作用,而纹膜的三维结构使麦克风电容的有效面积有所增加,这些都显著地提高了麦克风的灵敏度,是该项新结构的关键。本文从理论和实验上对纹膜结构机械性能与结构尺寸参数之间的关系,及结构的优化进行了研究。通过对制作出的不同结构参数 q 值的麦克风的测试,得到了与初步理论分析基本相符的实验结果。实验证明,纹膜结构具有比相应的平膜结构高得多的机械灵敏度和麦克风灵敏度,是一种硅麦克风走向实用化的很有效的结构。

EEACC: 7320W, 7810C

1 引言

自 1983 年 Royer^[1] 在硅片上制作出了第一个麦克风以来,由于具有体积小,重量轻,用光刻工艺容易精确控制设计图形的形状和尺寸,重复性高,批量生产,成本低,抗振性能好和易于与 IC 集成等优点,引起了各界重视,各类麦克风陆续在硅片上被开发实现。其中,最主要最热门的一种即电容式麦克风。经过十年努力,已经研制出了频率响应比较平坦,噪声比较低(这两项与传统麦克风接近)的硅麦克风,但在灵敏度方面一直难以突破(一般硅电容式麦克风灵敏度 S 小于 10mV/Pa),距实用化较远。而其它类麦克风,包括电阻式,压结式,压电式,压阻式,FET 式等,在灵敏度方面都低于电容式麦克风,且噪声较大,频率响应不平坦^[2]。一般认为,硅电容式麦克风灵敏度低有两个主要原因:一是电容可动膜内应力太大,导致膜机械灵敏度太小,因而灵敏度也就较小;二是几乎所有的硅电容式麦克风均需要双/多芯片粘接或键合,这不仅对电路性能和器件稳定性有影响,而且也不可能避免地引进了较大的寄生电容,从而对信号有相当大的衰减,降低了麦克风的灵敏度。另外,膜内应力的重复性也不可能太好,导致麦克风性能分散。双/多芯片粘接或键合以及封装要手工操作,使生产效率不高。本文针对这些问题,采用了纹膜结构来消除应力,并同时采用了复合膜技术进一步降低应力,从而改善了膜机械性能的重复性,使膜的机械灵敏度比平膜有较大的改观;另

* 国家自然科学基金资助项目

邹泉波 男, 1968 年生, 博士生, 从事半导体传感器和微电子机械等研究

刘理天 男, 1947 年生, 教授, 从事半导体器件, 集成传感器和微电子机械等研究

李志坚 男, 1928 年生, 中国科学院院士, 从事半导体器件, 集成电路和微电子机械等研究

1995 年 9 月 20 日收到初稿, 1995 年 11 月 15 日收到修改稿

外,采用单硅片制作,克服了寄生电容等效应,从而将硅微麦克风灵敏度提高到实用化的程度^[3].

本文对纹膜结构进行了优化设计,其机械灵敏度与平膜作了比较.结果表明,可以将纹膜机械灵敏度提高到实用化的程度.灵敏度的测量结果表明,纹膜结构电容式麦克风的灵敏度也大于平膜结构,证明了新结构设计的正确性和可行性.

2 纹膜结构设计、优化及与平膜结构的比较

2.1 薄膜的挠曲方程

为简单起见,我们考虑固支周边的圆形薄膜.纹膜结构的剖面图示于图1.其中,正弦波纹遍布膜径向.众所周知,无初始应力的圆平膜的挠曲方程为^[3]

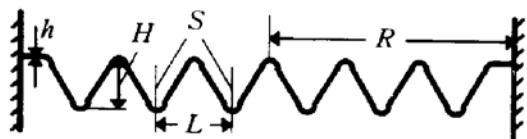


图1 圆纹膜径向剖面及结构参数示意图

其中 $E' = E/(1-\nu^2)$, E 为膜材料的杨氏模量; ν 为材料的泊松比; h, R 和 w_0 分别为膜的厚度,半径和中心挠度, P 为均匀加压.无初始应力的圆纹膜的挠曲方程为^[3]

$$P = A_p E \frac{h^4}{R^4} \left(\frac{w_0}{h} \right) + B_p E' \frac{h^4}{R^4} \left(\frac{w_0}{h} \right)^3 \quad (1)$$

$$A_p = \frac{2(q+1)(q+3)}{3(1-\nu^2/q^2)} \quad (2)$$

$$B_p = 32 \frac{1-\nu^2}{q^2-9} \left[\frac{1}{6} - \frac{3-\nu}{(q-\nu)(q+3)} \right] \quad (3)$$

$$q^2 = \frac{S}{L} \left(1 + 1.5 \frac{H^2}{h^2} \right) \quad (4)$$

$$q^2 = \frac{S}{L} \left(1 + 1.5 \frac{H^2}{h^2} \right) \quad (5)$$

其中 S, L, H 分别为纹一个周期中的弧长,径向长和纹深.(1),(2)式中第一项分别为由弯曲应力引起的膜的弹性回复力(小挠度情况只考虑这一部分),而第二项分别为由中面伸张引起的弹性回复力,这一项中两膜比例为 $2.83/B_p$. 中面伸张也可看作是具有初始应力的行为.因而两膜初始应力引起的弹性回复力的比例也应为 $2.83/B_p$ 倍.对具有大的张应力 σ_0 的平膜来讲,有^[4]

$$P = 4 \frac{h^2}{R^2} \left(\frac{w_0}{h} \right) \sigma_0 \quad (6)$$

而对有大的张应力 σ_0 的纹膜则有

$$P = 4 \frac{h^2}{R^2} \left(\frac{w_0}{h} \right) \sigma_0 \left(\frac{B_p}{2.83} \right) \quad (7)$$

进而得到有初始应力 σ_0 的固支圆膜的挠曲方程分别如下:

$$P_{\text{flat}} = 5.33E' \frac{h^4}{R^4} \left(\frac{w_0}{h} \right) + 2.88E' \frac{h^4}{R^4} \left(\frac{w_0}{h} \right)^3 + 4 \frac{h^2}{R^2} \left(\frac{w_0}{h} \right) \sigma_0 \quad (8)$$

$$P_{\text{corr}} = A_p E' \frac{h^4}{R^4} \left(\frac{w_0}{h} \right) + B_p E' \frac{h^4}{R^4} \left(\frac{w_0}{h} \right)^3 + 4 \frac{h^2}{R^2} \left(\frac{w_0}{h} \right) \sigma_0 \left(\frac{B_p}{2.83} \right) \quad (9)$$

其中 P_{flat} 和 P_{corr} 分别为平膜和圆膜的加压.

2.2 麦克风的灵敏度值

对一般电容式麦克风而言，定义膜机械灵敏度

$$S_m = \frac{dW_0}{dP} \quad (10)$$

对如图 2 所示的测试电路，麦克风的灵敏度

$$S = \frac{dV_0}{dP} = \frac{dV_0}{dV_1} \frac{dV_1}{dV_0} \frac{dW_0}{dP} = H_0 S_e S_m \quad (11)$$

其中 $S_e = dV_1/dW_0$ ； V_1 为开路输出电压； H_0 为传输因子； $H_0 = dV_0/dV_1$ 取决于前置放大器。一般 $H_0 \leq 1$ 。可见，要提高麦克风的信噪比，首先应提高 S_m 。对如图 2 电路，当声音频率 f 满足 $2\pi f R_p C_m \gg 1$ 时，有

$$V_1 = V_p \frac{\delta C_m}{C_m + C_i} \quad (12)$$

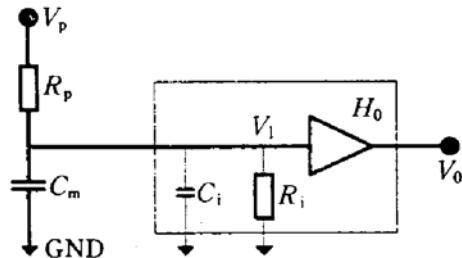


图 2 典型电容式麦克风测试电路

其中 C_m 为麦克风电容的变化量。可见，要提高灵敏度 S ，可提高 V_p ，但是 V_p 不是可以无限增加的，它受麦克风电容膜电极的下榻所限，下榻后麦克风就不能工作，因此 $V_p < V_{PI}$ ，其中 V_{PI} 是膜的下榻电压。

对有大的张应力的圆膜^[4]（将膜视为活塞），

$$V_{PI} = \left(\frac{64\sigma_0 h d_0^3}{27\epsilon_0 R^2} \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{S_m} \frac{16d_0^3}{27\epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (13)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数； d_0 为麦克风初始空气间隙。 $S_m = R^2 / 4\sigma_0 h$ 。灵敏度为

$$S = \frac{S_m}{2} \frac{V_p}{d_0} \quad (14)$$

灵敏度的最大值 S_{max} 为

$$S_{max} = \left(\frac{4}{27\epsilon_0} d_0 S_m \right)^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{27\epsilon_0}} R \left(\frac{d_0}{\sigma_0 h} \right)^{1/2} \quad (15)$$

因此， S_{max} 正比于膜机械灵敏度的平方根，也正比于静态电容间隙 d_0 ，但 d_0 太大时，由(13)式可见， V_{PI} 也将变大，这就需要提高极化电压 V_p ，才能得到高的灵敏度，这对硅麦克风系统的微型化显然是不利的。因此，一般可通过降低 σ_0 的方法来提高机械灵敏度，从而达到提高麦克风灵敏度的目的。上述讨论不仅适于平膜，也同样适于纹膜结构。纹膜结构能大幅度降低 σ_0 ，因而可望有较大的机械灵敏度。

2.3 机械灵敏度 S_m

对测量声音信号的麦克风而言，其一般工作于小挠度情况，因而(8)，(9)式中第二项都可忽略。由(10)式得

$$S_{m(\text{flat})} = \frac{R^2}{4h \left(\sigma_0 + \frac{4}{3} E' \frac{h^2}{R^2} \right)} \quad (16)$$

$$S_{m(\text{corr})} \approx \frac{R^2}{4h \left(\sigma_0 + \frac{B_p}{2.83} + \frac{A_p}{4} E \frac{h^2}{R^2} \right)} \quad (17)$$

一般当 q 增加时， A_p 增加而 B_p 减小。由(17)式可见，纹膜结构机械灵敏度 $S_{m(\text{corr})}$ 对 q 有一个

优化的选择^[5]. 适当选取纹膜的深度/厚度比和纹的周期数及其分布, 可以得到机械灵敏度的最优值.

2.4 方纹膜的修正

为了简单起见, 实验制作了方纹膜. 为了制作出单硅片纹膜结构电容式麦克风, 背面电极必须要有硬性支撑才能保证麦克风的高频响应不下来. 我们设计了三种支撑结构的麦克风, 如图 3 所示, 其中(b)、(c) 中相当于在纹膜上加了紧固梁, 其纵向刚度略有增加, 可以粗略认为应力降到 $(B_p / 2.83 + b/2a)$, 其中 b 为所加梁的有效宽度, $2a$ 为正方形膜边长. 图 3 (a)、(b)、(c) 中 $b/2a$ 分别为 0.5, 0.2, 0.1. 用等效面积法^[6], 将公式(17)中的 R^2 改为 $4a^2/\pi$, 得到所设计纹膜的机械灵敏度近似为

$$S'_{m(\text{corr})} \approx \frac{a^2}{\pi h \left(\sigma_0 + \left(\frac{B_p}{2.83} + \frac{b}{2a} \right) + \frac{\pi A_p E}{16} \frac{h^2}{a^2} \right)} \quad (18)$$

在已知内应力和弹性模量时, 可由上式大致确定优化的 q 值以取得最高的机械灵敏度. 上述讨论是在理想模型的基础上进行的, 对本文提出的模型仅有定性的指导意义, 精确分析计算应该用 FEM 方法进行.

3 工艺制作

经过七次光刻和多次腐蚀, 得到麦克风结构. 工艺步骤略述如下(如图 4):

- (1) 生长 KOH 抗腐蚀层; 对版窗及背面孔光刻及腐蚀.
- (2) 正面纹槽光刻及腐蚀(深为 $6 \sim 20 \mu\text{m}$ 不等); 去抗腐蚀层, 再热氧化 SiO_2 , 生长 PSG ($1 \mu\text{m}$)/LTO-I($0.1 \mu\text{m}$).
- (3) 刻凸起; 刻牺牲层区; 生长 LTO-II 以防膜与衬底粘连.
- (4) 生长复合膜 $\text{polySi}/\text{Si}_x\text{N}_y/\text{polySi}$, 掺杂并退火, 刻蚀纹膜.
- (5) 刻接触孔; 蒸 Al, 刻 Al, 合金.
- (6) 背面 RIE 刻单晶硅到纹槽底部, 再 BHF 腐蚀牺牲层($\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{LTO}$); 清洗, 释放膜, 划片, (封装), 测试.

详细工艺将另文发表^[6]. 工艺中, 凸起是为了防止在牺牲层腐蚀后的烘干时膜与衬底粘接在一起而设计的. 麦克风的膜尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\mu\text{m}$. V 型纹槽可使相应区域电容有效面积增加 $(\sqrt{3} - 1)$ 倍, 对本文设计的结构, 电容量共增加约 12% 左右, 提高了麦克风的灵敏度.

4 实验结果及讨论

实验是在圆片上进行全部初测的. 测试内容主要包括加压 P -挠度 W 试验, 麦克风灵敏度 S 测试及麦克风频率响应的测试等. $P-W$ 关系是通过光学显微镜聚焦法测定 W (测试样

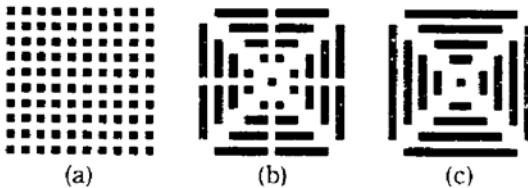


图 3 三种麦克风纹膜结构的正视图

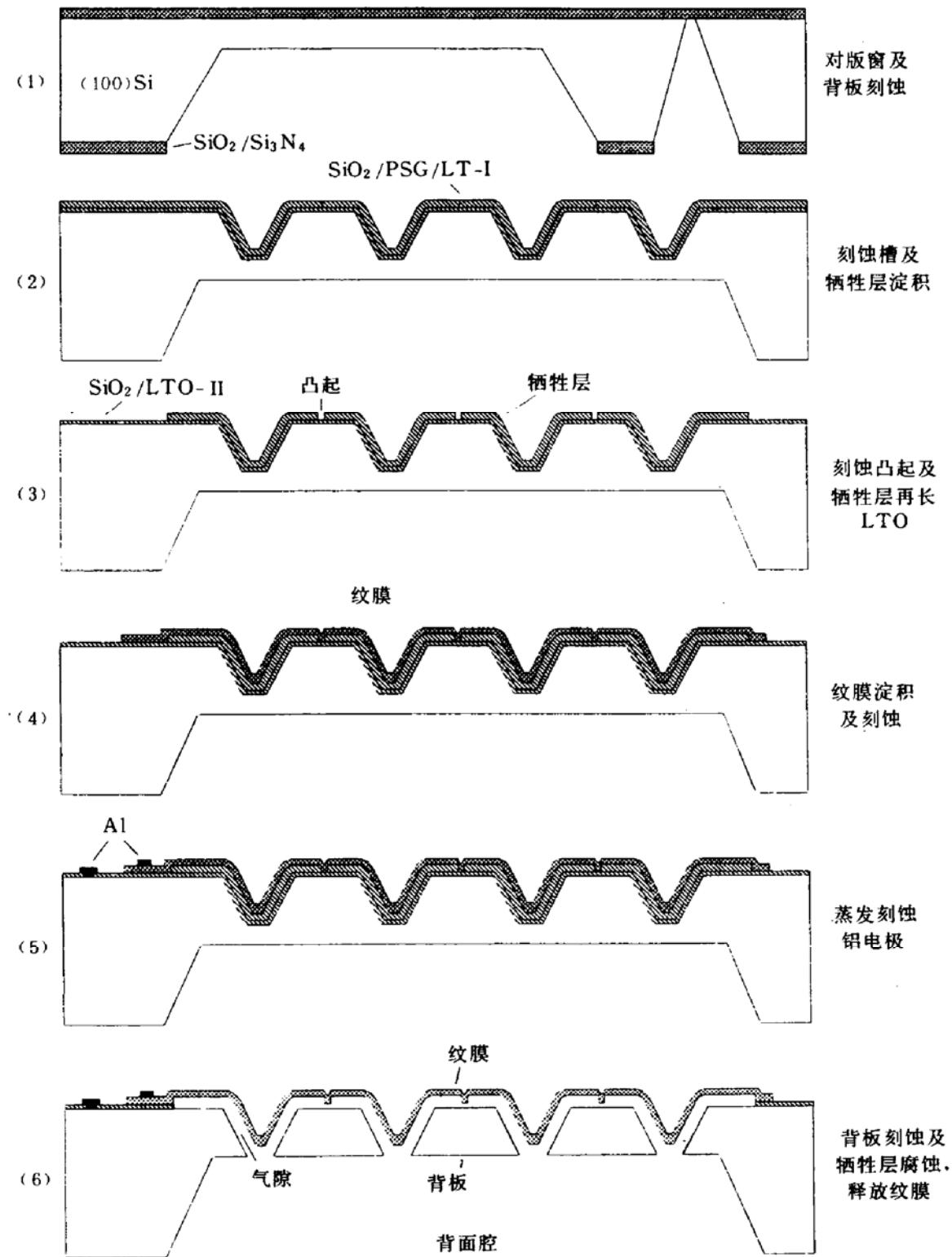


图 4 麦克风工艺流程

品是将硅背板腐蚀掉的纹膜结构,最大挠度超过 $\pm 20\text{m}\mu$),U型管水柱测定 P 的。 P 精度在5Pa, W 精度在 $0.5\mu\text{m}$ 左右。而灵敏度 S 及频率响应等的测试是在普通实验室用比较法测量的。图5示出了 $P-W$ 曲线及与平膜的比较($q=7$)。图中计算与测量结果对(a)类纹膜基本一致,而对(b),(c)类纹膜,其计算灵敏度都小于测量值,说明计算公式精度有限。但三种纹膜结构的机械灵敏度都远大于平膜。图6为机械灵敏度 S_m 与结构参数 q 的理论与实测值(图3(c)结构)。可见其基本趋势相符,都表明 q 有一个设计优值。表1示出了纹膜结构尺寸

参数与测试结果的关系,其中,灵敏度 S 是在考虑到信号衰减后的修正值。可以看到,三种结构麦克风的灵敏度比平膜的大;且纹膜结构麦克风中,膜的机械灵敏度是按图 3 中(a) < (b) < (c) 的次序依次增大的,说明纹膜的紧固梁越宽,膜的横向刚度就越大。表 2 列出了几种麦克风灵敏度。实验发现,一般麦克风的灵敏度在 $5 \sim 28 \text{ mV/Pa}$, 频率带宽约为 $10 \sim 20 \text{ kHz}$, 而即使当所测声音信号的频率高到 40 kHz ,一些麦克风仍然有较高的灵敏度。

表 1 机械灵敏度 S_m 比较 (a, b, c 三类膜, exp: 实测, th: 理论) $S_m [\text{nm/Pa}]$

q	6	8	10	15	20	28
S_m -th a)	1.36	1.86	1.06	0.739	0.522	0.381
b)	2.32	1.93	1.57	0.955	0.621	0.432
c)	3.04	2.41	1.87	1.06	0.663	0.451
S_m -exp a)	1.0	1.2	1.1	1.0	0.9	0.5
b)	2.3	2.2	2.6	1.6	1.0	0.5
c)	6.6	6.8	3.6	1.9	1.1	0.6

表 2 几个麦克风在 4 kHz 时的灵敏度

编号	mpa-8	mpa-2	mpa-3	mpb-3
bias voltage / V	10	5	15	7
$S / (\text{mV} \cdot \text{Pa}^{-1})$	11.9	5.76	28.3	6.50

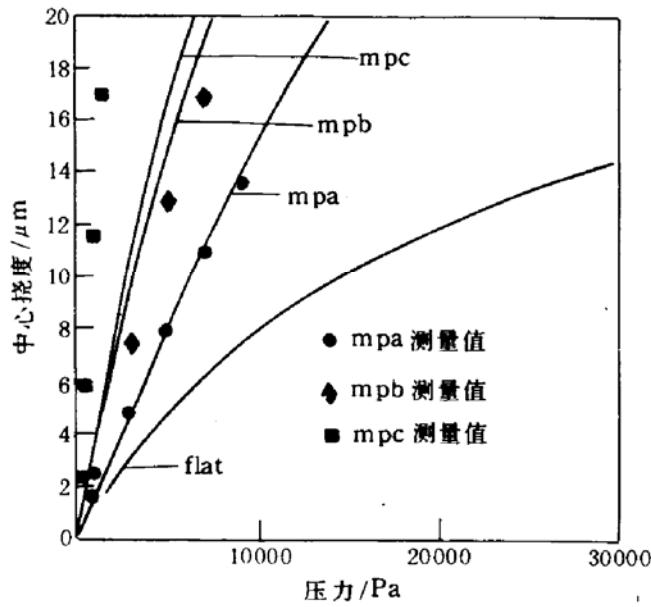


图 5 P - W 关系理论与实测比较

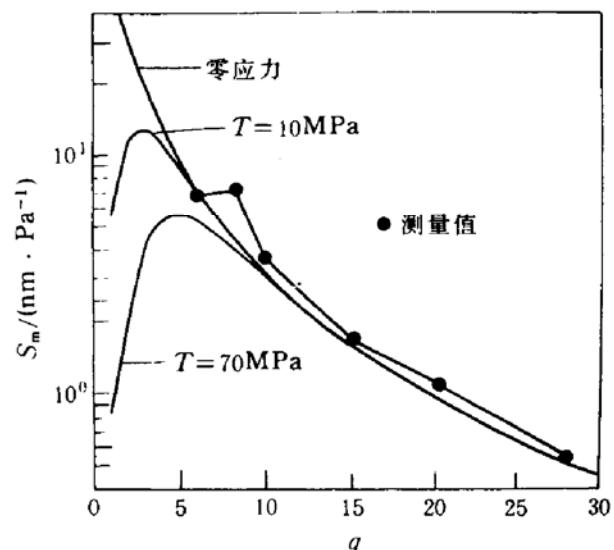


图 6 S_m - q 实测与理论比较

5 结论

纹膜结构在降低膜的内应力和提高膜的机械灵敏度以及麦克风的灵敏度等方面有着独特之处。本文对纹膜结构进行了初步的分析,实验证明分析是基本正确的。为此类器件的设计优化提供了基础。进一步的分析将采用有限元的方法。用纹膜结构已经制造出了单硅片电容式微型硅麦克风,这种麦克风具有制造工艺简单,重复性好,生产效率高,成本低,信号衰减小,灵敏度高,频带宽以及易与 IC 集成等诸多优点,有极好的实用前景。

致谢 作者非常感谢清华大学微电子学研究所器件物理室 $3\mu\text{m}$ 工艺线所有老师和师傅的大力支持, 以及 $1\mu\text{m}$ 工艺线张树红等老师和 SEM 室马淑兰同志和中国科学院声学所的康锡泉同志的热情帮助.

参 考 文 献

- [1] M. Royer, J. O. Holmen *et al.*, Sensors and Actuators, 1983, 4: 357~362.
- [2] G. M. Sessler, Sensors and Actuators, 1991, A25~27: 323~330.
- [3] M. Di Giovanni, Flat and Corrugated Diaphragm Design Handbook, New York: Marcel Dekker, 1982, 255~262.
- [4] P. R. Scheeper, W. Olthuis and P. Bergveld, Sensors and Actuators, 1994, A40: 179~186.
- [5] P. R. Scheeper *et al.*, J. Microelectromechanical Systems, 1994, 3(1): 36~42.
- [6] 邹泉波, 刘理天, 李志坚, 电子学报, (待发表).

Study of Corrugated Diaphragms Used in Silicon Condenser Microphones

Zou Quanbo, Liu Litian and Li Zhijian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 20 September 1995, revised manuscript received 15 November 1995

Abstract Silicon condenser microphone with corrugated diaphragm has been designed and tested. The introduction of a well-performed corrugation has deeply increased the mechanical sensitivity of the microphone diaphragm due to the reduction of the initial stress in thin films. Corrugations with different q values have been investigated, showing a strong relationship between the ratio of the depth of the corrugation to the diaphragm thickness and the mechanical sensitivity of the diaphragm. Three types of corrugation placements and five corrugation depths in a diaphragm area of $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ have been designed and fabricated. Microphones with a flat frequency response between 300Hz and 10kHz and a sensitivity of typically $5\sim 28.3\text{mV/Pa}$ under a relatively low bias voltage of about $5\sim 15\text{V}$ have been fabricated.

The application of corrugated diaphragms to silicon condenser microphone offers the possibility of reducing the initial stress and controlling the sensitivity of thin diaphragms accurately by geometrical parameters due to the eliminating of the effect of the initial stress. Therefore, high performance microphones with high sensitivities and high reproducibility are available. The experimental results also proved that the corrugation technique is promising for silicon condenser microphone.

EEACC: 7320W, 7810C