

# MEMS 压阻超声传感器的设计与优化

宛克敬,何常德,廉德钦,薛晨阳

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西 太原 030051)

**摘要:**提出了一种新的压阻式超声传感器结构,该结构由主振梁和微传感梁组成,在声压的作用下,主振梁振动从而带动微传感梁的振动。通过有限元软件 Ansys 仿真分析该结构的灵敏度,并与悬臂梁结构压阻式声传感器相比,结果表明灵敏度有了一定的提高。为了实现结构的优化,仿真了结构的尺寸与共振频率的关系,对相同共振频率的结构进行了静力分析,计算并对比了不同尺寸结构的灵敏度,从而得到灵敏度最高的结构,实现了结构的优化。

**关键词:**压阻;超声传感器;微传感梁结构;Ansys;优化

**中图分类号:**TN552 **文献标识码:**A

## Designing of MEMS Piezoresistive Ultra Acoustic Transducer

YUAN Kejing, HE Changde, LIAN Deqin, XUE Chengyang

(Key Lab. of Instrument Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A novel structure for piezo-resistive ultrasonic transducer is introduced, which consists of main vibrate cantilever and mini sensing cantilever. The main cantilever vibrates under acoustic pressure and drives vibration of mini cantilever. Sensitivity has been analysis by Ansys. Result shows that the sensitivity of mini cantilever has been improved compared with piezo-resistance cantilever. To optimize the structure, relation between structure size and resonant frequency has been simulated. Static analysis on the mini cantilever with same resonant frequency has carried on. Sensitivities of different size mini cantilevers are calculated and compared to get the best sensitivity structure, and to accomplish optimization of the structure.

**Key words:** piezoresistance; ultrasonic transducer; mini sensing cantilever; Ansys; optimization

### 0 引言

超声传感器作为声电转换中的关键元件,其材料与结构是研究的热点。基于微机电系统(MEMS)技术制备的超声传感器,与传统的超声传感器相比,其具有可阵列化和频率高等优点,且在实现高精度及与 IC 工艺集成上有明显优势<sup>[1]</sup>。超声传感器分为压电式、电容式和压阻式 3 类,压电式超声传感器较成熟,而电容式是现在研究的热点,压阻式传感器在 MEMS 加速度计、测力计等惯性领域有广泛的应用<sup>[2-3]</sup>,但在声音传感器方面应用的研究很少。在国内,中北大学对压阻式的低频声音传感器作了一些研究,并取得了一定的成果<sup>[4]</sup>。随着 MEMS 工艺技术的不断提高,压阻式超声以其与 CMOS 工艺的兼容好,工艺简单等优势也会有一定

的应用前景。

与低频声音传感器相比,超声传感器灵敏度较低,提高超声传感器结构灵敏度是主要的研究问题之一。声音传感器通常采用薄膜或悬臂梁结构<sup>[5-6]</sup>,这些结构有较高的灵敏度,为进一步提高,必须设计新的更优的结构。本文从应用实际出发,研究 MEMS 压阻超声传感器,在悬臂梁和十字梁<sup>[3-4]</sup>声传感器的启发下,设计了由主振梁与微传感梁组成的传感器新结构,并期望在一定程度上提高传感器的灵敏度。

### 1 微传感梁结构的设计与工作原理

#### 1.1 结构设计

压阻式声音传感器一般采用悬臂梁结构,随着频率的提高,厚度与长度的比值增大,结构的灵敏度

收稿日期:2011-09-13

基金项目:国家自然科学基金仪器专项基金资助项目(61127008)

作者简介:宛克敬(1986-),男,河南安阳人,硕士生,主要从事超声水声传感器的设计与制造的研究。通信作者:薛晨阳,E-mail: xuechenyang@nuc.edu.cn。

下降。在共振频率不变的情况下,缩小尺寸,厚度与长度的比值减小,灵敏度随之提高<sup>[7-8]</sup>。因为电阻制作工艺的限制,尺寸不能无限小,所以灵敏度提高到一定程度受限,在高频情况下,提高灵敏度较难。声音传感器需接收声信号,所以需增大接收声音的面积,但对于悬臂梁结构来说,灵敏度跟梁的宽度无关,如果设计一种结构灵敏度与梁宽度有关就能提高灵敏度。在十字梁结构的启发下,设计一个较宽的梁接收更多的声压信号,称其为主振梁,在主振梁的中间链接 2 个微传感梁,用作感受声信号,该结构总称微传感梁结构,如图 1 所示。

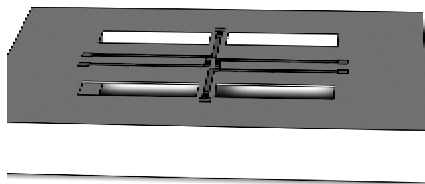


图 1 微悬臂梁结构

由于悬臂梁结构振动时,距离根部越远,振幅越大,充分利用较大的振幅是设计此微悬臂梁结构的出发点。使用较大的梁结构作为主振梁,主振梁在振动时中间位移量最大,微传感梁一端连接到中间位移量最大的地方,另一端固定,从而使微传感梁形变量较大,产生较大的应力。另外与通常的悬臂梁结构相比,由于主梁较宽,两边都与边框相连接,结构牢固,加工过程不易被损坏,提高抗冲击能力。该结构具灵敏度高,结构牢固,故选用这种结构做超声传感器。

压敏电阻的放置决定结构的灵敏度,为防止压敏电阻的温漂,采用惠斯通电桥结构<sup>[2,4]</sup>。微传感梁的两端受正应力,而主梁中间与之受力相反,2 个微传感梁的根部各放置一个电阻,主梁中间放置两个电阻。微传感梁根部的 2 个电阻,一个放在惠斯通电桥的下位,一个放在惠斯通电桥的上位,中间的 2 个电阻同样一个放在上位,另一个放置在下位,4 个电阻连接构成惠斯通电桥如图 1 所示。原理图如图 2 所示。这样既解决了温漂问题,也充分利用了结构的正负应力,在一定程度上提高了灵敏度。

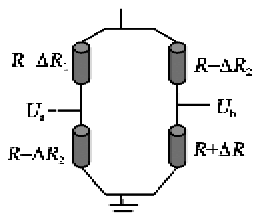


图 2 惠斯通电桥原理图

### 1.2 工作原理

图 2 为结构上放置的电阻构成的惠斯通电桥,4 个电阻均为  $R$ ,电桥两端电压  $U_a = U_b$ ,当受到压力时微传感梁上的电阻受到应力增大,主振梁中间应力减小,从而使电桥的一端  $U_a$  变小,另一端  $U_b$  增大,电桥两端产生电压差。在周期的声信号下,产生周期的电信号。电桥两端产生电压差为

$$\Delta U = U_b - U_a = \frac{R + \Delta R_1}{2R + \Delta R_1 - \Delta R_2} V - \frac{R - \Delta R_2}{2R + \Delta R_1 - \Delta R_2} V = \frac{\Delta R_1 V + \Delta R_2 V}{2R + \Delta R_1 - \Delta R_2} \approx \frac{(\Delta R_1 + \Delta R_2)}{2R} V \quad (1)$$

压敏电阻受应力作用时,电阻阻值发生变化,设计的电阻为薄膜电阻,薄膜电阻的变化仅与横向和纵向的应力有关,电阻的变化率<sup>[3,4,5]</sup>为

$$\Delta R/R = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2)$$

式中: $R$  为压阻阻值; $\Delta R$  为阻值的变化量; $\pi$  为材料的压阻系数; $\sigma$  为压阻处的应力,下标  $l$  和  $t$  分别为纵向和横向(相对于压阻条的长度方向)。压敏电阻采用 P 型电阻,晶向为  $[110]$  方向,故电阻的变化率<sup>[3]</sup>为

$$\Delta R/R = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t = (71.8 \sigma_l - 66.3 \sigma_t) \times 10^{-11} \quad (3)$$

### 2 微传感梁结构的有限元模拟

采用有限元分析软件 Ansys 对上述结构进行仿真。首先设计好结构的尺寸,然后建立有限元分析模型,通过静力分析法分析结构的应力分布,选择电阻放置的具体位置。最后计算结构的灵敏度,仿真微传感梁结构的灵敏度,与悬臂梁结构的仿真结果作对比。

#### 2.1 静力分析与灵敏度计算

为了用于加工传感器阵列,保证在共振时对应的波长为  $0.5 \text{ cm}$ ,传感器的共振频率为  $68 \text{ kHz}$ 。由于共振频率与结构尺寸的关系没有推导出相应的表达式,所以通过反复的试验,最终确定  $68 \text{ kHz}$  微传感梁结构。具体尺寸为:主振梁长  $1\ 740 \ \mu\text{m}$ ,宽  $800 \ \mu\text{m}$ ;微传感梁长  $100 \ \mu\text{m}$ ,宽  $100 \ \mu\text{m}$ ,主振梁和微传感梁厚为  $10 \ \mu\text{m}$ 。硅的杨氏模量为  $1.69 \times 10^{11}$ ,泊松比为  $0.278$ ,有限元分析的单元类型选用 Solid92,使用自由网格划分。

图 3 为结构的应力分布云图。微传感梁的两端呈红色,正应力较大,中间下凹,呈蓝色,负应力较

大。从云图上无法清楚知道电阻的具体放置位置，只有通过定义路径提取相关信息。电阻的灵敏度与  $x, y$  方向的力有关，与  $z$  方向(即为厚度方向)的力无关，所以定义贯穿 2 个微传感梁的路径，映射  $x, y$  方向( $x$  方向为主振梁宽方向， $y$  方向为主振梁的长方向)上的力到路径  $AB$  上。图 4 为  $x, y$  方向应力的分布曲线。对于 P 型电阻，电阻的变化率与纵向的力成正比，与横向的力成反比，所以作差计算应力最大的地方。

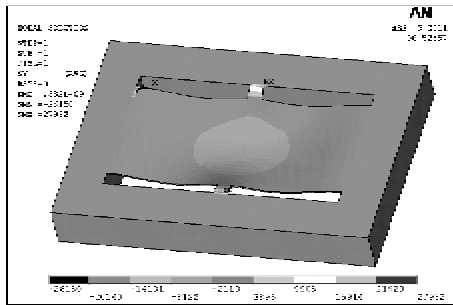


图 3 应力分布云图

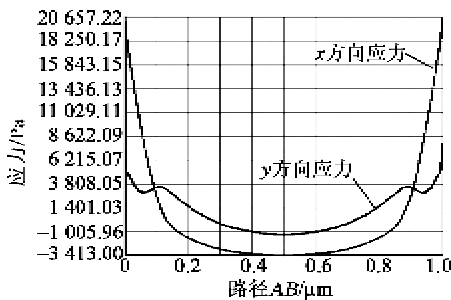


图 4 路径  $AB$  上  $x, y$  方向应力分布

由于结构对称，对称的位置放上等大小的电阻，根据以往的加工经验，设计  $10 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  电阻条放置在微传感梁的方向上记为  $y$  方向。在  $[0, 100] \mu\text{m}$  和  $[900, 1000] \mu\text{m}$  区间平均  $y$  方向应力达到最大，平均  $12\ 000 \text{ Pa}$ ， $x$  方向平均应力约  $3\ 800 \text{ Pa}$ ，在这两个区间各放置一个电阻。中间  $[450, 550] \mu\text{m}$  平均应力最小， $x, y$  方向分别为  $-1\ 000 \text{ Pa}$ 、 $-3\ 400 \text{ Pa}$ ，在该区间并排放置 2 个电阻。仿真时施加的压强为  $1 \text{ Pa}$ ，惠斯通电桥两端提供的电压为  $2 \text{ V}$ ，计算电压增量就可算出灵敏度，即

$$\Delta R_1 / R = (7.18 \times 1.2 - 6.63 \times 0.38) \times 10^{-6} = 6.1 \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$\Delta R_2 / R = (7.18 \times 3.4 - 6.63 \times 1) \times 10^{-7} = 1.78 \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$\Delta U = \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{R} \frac{V}{2} = 7.88 (\mu\text{V}) \quad (6)$$

所以灵敏度为  $7.88 \mu\text{V}/\text{Pa}$ 。

## 2.2 与悬臂梁压阻声传感结构对比

该结构是根据悬臂梁结构改进而来的，通过与悬臂梁结构对比可知该结构的优越性。为提高结构灵敏度，很多方法都被仿真验证过，结果表明结构厚度不变的条件下，悬臂梁结构灵敏度是最高的，所以设计的结构可用通常的悬臂梁结构作为评判好坏的标准。为便于比较，结构厚均为  $10 \mu\text{m}$ ，电阻条长均为  $100 \mu\text{m}$ ，工作电压均为  $2 \text{ V}$ 。

根据实际的应用设计了 4 个频率分别为  $34 \text{ kHz}$ 、 $68 \text{ kHz}$ 、 $75 \text{ kHz}$ 、 $150 \text{ kHz}$  的微传感梁结构，同样设计了 4 个频率的悬臂梁结构作为对比。表 1 为悬臂梁与微传感梁结构在不同频率下灵敏度对比，灵敏度级平均提高  $8.9 \text{ dB}$ 。当频率变大时灵敏度提高的倍数降低，主要是因为电阻条均为  $100 \mu\text{m}$  长，太长的区间包含了应力较小的区域，如果电阻可更小，灵敏度提高较多。

表 1 两种结构在不同频率下的灵敏度对比

	灵敏度/dB			
	34 kHz	68 kHz	75 kHz	150 kHz
悬臂梁结构	-224.3	-230.8	-232.4	-238.4
微传感梁结构	-215.4	-222.1	-223.9	-230.8
灵敏度提高	10.9	8.7	8.5	7.6

## 3 结构的优化

微传感梁结构的主振梁较宽，微传感梁又很小，受压力后变形奇特，很难推导出共振频率的表达式，所以不给出相关的公式。设计中可通过有限元分析软件 Ansys 进行仿真，得到共振频率与以上参数的关系。

由于参数太多，有些数据没有可行性，所以作如下简化。微传感梁宽度根据具体工艺决定，根据加工经验，确定微悬臂梁宽为  $100 \mu\text{m}$ ，长为  $100 \mu\text{m}$ ，主振梁和微传感梁厚为  $10 \mu\text{m}$ ，通过仿真得出主振梁的宽、长与共振频率的关系如图 5 所示。长为  $1\ 500 \sim 1\ 920 \mu\text{m}$ ，宽为  $700 \sim 900 \mu\text{m}$ 。

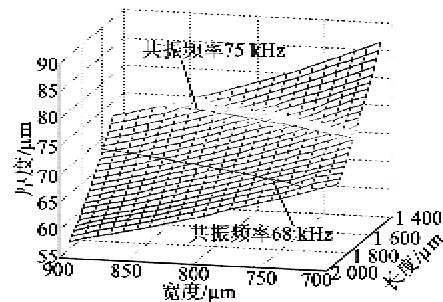


图 5 共振频率与主振梁长宽的关系

图 5 中,两条线为共振频率相同的点构成的线。为了实现结构的优化,需对同一频率曲线上的点进行灵敏度分析仿真。本文仅对 68 kHz 共振频率的结构优化,首先对提取共振频率 68 kHz 的点,如表 2 所示。

表 2 共振频率均为 68 kHz 的尺寸序列

序号	1	2	3	4	5	6
$x/mm$	1.92	1.89	1.85	1.82	1.78	1.74
$y/mm$	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80
序号	7	8	9	10	11	
$x/mm$	1.71	1.67	1.64	1.61	1.59	
$y/mm$	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	

把数据点标号为 1,2,...,N,分别仿真结构的应力分布。图 6 为以上序列中各点的最大应力构成的图形,第 4 个序列点为最大应力点。对应的结构尺寸为长 1 820  $\mu m$ 、宽 760  $\mu m$ ,该结构就是最优化的结构。

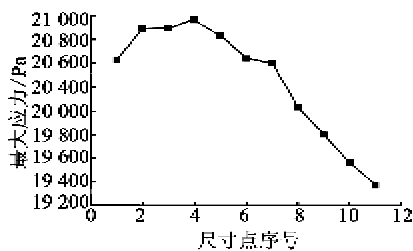


图 6 各尺寸点的最大应力

#### 4 结束语

本文设计了一种新型的压阻式超声传感结构,该结构由主振梁和微传感梁组成,结构新颖。主振梁中间和微传感梁根部的电阻构成惠斯通电桥,一方面抑制传感器的温漂,另外还可充分利用结构应力提高灵敏度。首先与悬臂梁结构作对比,仿真结果表明,在频率不变的情况下,该结构能提高灵敏

度,较悬臂梁结构提高约 9 dB,提高了传感器的性能。虽然没有给出结构的共振频率与其他参数的关系式,但通过仿真计算给出了相互间的关系,并仿真灵敏度,从而优化设计的结构。通过仿真对比,给出了优化结构的一种方法,实现了结构的优化。

#### 参考文献:

- [1] 张晋弘,马剑强,李保庆,等. MEMS 压电超声换能器的结构设计及性能表征[J]. 压电与声光,2010,32(4): 604-607.  
ZHANG Jinhong, MA Jianqiang, LI Baoqing, et al. Structure design and characterization of MEMS piezoelectric ultrasonic transducer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010,32(4):604-607.
- [2] 王大军,李淮江. 一种基于 MEMS 技术的压力传感器芯片设计[J]. 吉林师范大学学报,2011,2(2):133-136.
- [3] 陈尚,薛晨阳,张文栋,等. 压阻式硅微二维加速度计的加工与测试[J]. 纳米技术与精密工程,2008,6(4): 272-277.
- [4] 乔慧,刘俊,张斌珍,等. 一种新型压阻式硅微仿生矢量水听器的设计[J]. 传感技术学报,2008,21(2):301-304.
- [5] NATHAN S, XIAO Zhufan, DAN H, et al. Indium phosphide MEMS cantilever resonator sensors utilizing a pentacene absorption layer[J]. Journal of Microelectro Mechanical System, 2009,18(1):103-110.
- [6] Andrea Adami. Mems piezoresistive micro-cantilever array for sensing application[S]. DIT-University of Trento, 2010.
- [7] 吴强,吉爱红,王周义,等. 一种测力传感器固有频率的提高与测试[J]. 传感技术学报,2010,23(2):235-238.
- [8] 席占稳,赖百坛. 高  $g_a$  值悬臂梁式硅微加速度传感器的结构设计[J]. 东南大学学报,2000,30(6):39-43.
- [9] 刘晓为,霍明学,陈伟平,等. 多晶硅薄膜压阻系数的理论研究[J]. 半导体学报,2004,25(3):292-296.
- [8] 沈建国,李山生,辛鹏来,等. 声波测井压电换能器的一致性问题[J]. 石油仪器,2002,16(6):33-35.  
SHEN Jianguo, LI Shansheng, XIN Penglai, et al. How important the consistency of the piezoelectric transducers plays a role in acoustic logging [J]. Petroleum Instruments, 2002,16(6):33-35.
- [9] 栾桂冬,张金铎,王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 修订版. 北京:北京大学出版社,2005:280-284.
- [10] 严运国,龚义建. 微机原理与接口技术[M]. 北京:科学出版社,2005:259-260.
- [11] 吴镇扬. 数字信号处理[M]. 北京:高等教育出版社. 2004:187-191.

(上接第 727 页)

- [6] 李衍. 超声换能器特性回望[J]. 无损探伤,2006,30(2):1-5.  
LI Yan. Looking back on the characteristic of ultrasonic transducer [J]. Non Destructive Testing, 2006, 30(2):1-5.
- [7] 史峰,赵元山,黄引娣,等. 压电换能器一致性对声波测井曲线影响的探讨[J]. 石油仪器,2006,20(3):48-51.  
SHI Feng, ZHAO Yuanshan, HUANG Yindi, et al. The discussion on how the consistency of piezoelectric transducers influencing the curve of acoustic logging [J]. Petroleum Instruments, 2006,20(3):48-51.