

电容式微传声器的性能模拟与优化设计

宁 瑾 刘忠立

(中国科学院半导体研究所 微电子中心, 北京 100083)

摘要: 针对所研制的电容式微传声器在理想模式下的工作原理, 建立了有限元分析模型和声-电模型, 从理论上分析了器件的机械性能、灵敏度以及频响特性, 得出了结构优化的设计原则, 即要想得到高灵敏度的微传声器器件, 必须考虑采用尽可能小的空气隙厚度和声学孔尺寸以及具有较小内应力的声学振膜。为采用 MEMS 技术制备出高性能的电容式微传声器提供了理论基础。

关键词: 电容式微传声器; MEMS; 有限元分析; 性能模拟

EEACC: 2575; 0296T; 7810

中图分类号: TN402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)08-0877-05

1 引言

基于不同的工作原理, 目前研制的微传声器大致分为压电式、压阻式和电容式几种^[1], 其中电容式微传声器以其优越的性能成为研究的主流。电容式微传声器又有驻极体微传声器和外置偏压式微传声器之分, 驻极体微传声器的灵敏度较高, 可达到 $25\text{mV/Pa}^{\text{[2]}}$, 但在工作过程中, 驻极体上的电荷会逐渐消退, 使微传声器的性能大受影响, 而且传统的驻极体均由有机材料如 Teflon FEP 制备, 与大部分硅微机械加工工艺难以兼容, 而驻极体采用无机材料如 SiO_2 的尝试也不尽人意。因此, 外置偏压式微传声器仍是研究工作的重点。尽管硅微机械加工技术已经成功应用到电容式微传声器的制备过程中, 但总的看来, 采用硅微机械加工技术制备的电容式微传声器, 普遍存在灵敏度较低的缺点, 为了能与采用传统工艺制备的微传声器竞争, 必须进行结构的优化设计, 并改进现有的工艺条件。本文将对我们研制的电容式微传声器进行系统的性能模拟, 并提出最佳的设计方案。

2 理论分析

如图 1 所示, 电容式微传声器主要包括声学振膜、背极板、空气隙和背板腔四部分。为了使电容式微传声器能够工作在较低的偏置电压下, 空气隙的厚度不能太小, 而狭窄气隙中空气流阻抗较大, 将使得微传声器在高频情况下灵敏度降低, 该问题的解决办法就是在背极板上开大量背板孔以降低空气流阻抗^[3]。微传声器的性能参数主要包括灵敏度、频率响应和噪声特性。由于噪声特性受前置放大器的性能影响较大, 本文不予分析。

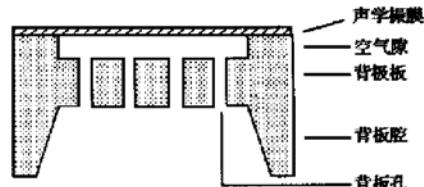


图 1 电容式微传声器的结构原理图
Fig. 1 Cross-sectional view of condenser microphone

2.1 灵敏度

电容式微传声器的工作模式为: 在声压的作用

宁 瑾 女, 1976 年出生, 博士研究生, 现从事微传声器器件及其外围电路的研制工作。

刘忠立 男, 1940 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为抗辐射 CMOS 电路、特种器件以及 MEMS 器件。

2002-10-14 收到, 2003-02-18 定稿

©2003 中国电子学会

下, 振膜运动使微传声器输出交流信号. 电容式微传声器的开路灵敏度包括两部分: 机械灵敏度 S_m 和电学灵敏度 S_e . 机械灵敏度描述了作用在振膜上的声压与振膜的运动之间的关系, 可定义为振膜在变化的声压 dP 作用下发生的形变 dw , 即:

$$S_m = \frac{dw}{dP} \quad (1)$$

微传声器的电学灵敏度则描述了开路输出电压与振膜的运动之间的关系, 可定义为由于气隙的厚度变化 ds_{a0} 而引起相应的气隙两极板之间的电压变化 dV , 即:

$$S_e = \frac{dV}{ds_{a0}} \quad (2)$$

对于活塞式薄膜, 气隙中的电场强度 E_a 是均匀的. 对于快速的薄膜运动, 微传声器的两极板上的电荷保持不变; 相应地, 极板间的电场强度也保持不变. 则电学灵敏度 S_e 又可表示为:

$$S_e = E_a = \frac{V_b}{s_{a0}} \quad (3)$$

其中 V_b 是微传声器的偏置电压. 但是, 实际计算时还要考虑振膜对极板间的电场强度值的影响, 有效电场强度可以定义如下:

$$E = K \frac{\epsilon_d V_b}{\epsilon_d h_a + h_d} \quad (4)$$

其中 ϵ_d 是振膜材料的介电常数; h_d 是振膜的厚度; h_a 是空气隙的高度; K 是一个常数, 表示由于背板孔的存在使得有效电场值减小.

电容式微传声器的静态开路灵敏度 S_{open} 可定义为:

$$S_{open} = - S_m S_e \quad (5)$$

由于 $d_{s_{a0}} = - dw$, 所以 S_m 为负值, 则 S_{open} 也相应为负值. 不过, 我们比较传声器的灵敏度大小时, 往往采用它们的绝对值.

2.2 频率响应

要分析微传声器的动态特性, 普遍采用的方法是先用一个模拟电路把声学系统描述出来, 然后再计算它的频率响应. 具体说来就是用电压源模拟声压, 用电流源模拟声流, 而声学系统的特性如声质量、声阻和声容则分别用电感、电阻和电容来表示^[4]. 运用该原理, 可得出描述图 1 所示结构的电容式微传声器的电路系统, 如图 2 所示^[5].

电阻 $R_r(\omega)$ 描述声辐射到周围媒质时所受到

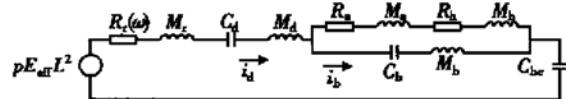


图 2 电容式微传声器的电学模型

Fig. 2 Mechanical equivalent circuit of the condenser microphone

的阻力, 电感 M_r 则描述声膜附近与声膜同相振动的空气的质量, C_d 和 C_b 分别描述声膜和背板的声容, M_d 和 M_b 则描述了声膜和背板的声质量, 它们可分别定义如下^[4, 5]:

$$R_r(\omega) = \frac{\rho_0 L^4}{2\pi c} \omega^2 \quad (6)$$

$$M_r = \frac{2.67 L^3 \rho_0}{\pi \sqrt{\pi}} \quad (7)$$

$$C_d = \frac{1}{30 \sigma_d h_d} \quad (8)$$

$$C_b = \frac{1}{30 \sigma_b h_b \sqrt{1 - \frac{4a^2}{b^2}}} \quad (9)$$

$$M_d = \rho_d h_d L^2 \quad (10)$$

$$M_b = \rho_b h_b L^2 \sqrt{1 - \frac{4a^2}{b^2}} \quad (11)$$

其中 L 是正方形振膜的边长; ρ_0 是空气密度; ω 是角频率; c 是空气媒质中的声速, σ_d 和 σ_b 分别是振膜和背板的初始应力, 足够厚度的背板, 初始应力接近零; C_b 可看成无限大; h_d 和 h_b 则分别是振膜和背板的厚度; $2a$ 是背极板上方形声孔的边长; b 则是两声孔的中心距离; ρ_d 和 ρ_b 分别是声学振膜和背板的密度.

声膜和背板之间空气隙中空气流的声学特性由 R_a 和 M_a 描述, 根据 Skvor^[6] 的推导, 可定义如下:

$$R_a = \frac{1.22 \eta \pi L^2 b^2}{h_a^3} B \quad (12)$$

$$M_a = \frac{0.102 \rho_0 \pi L^2 b^2}{h_a} B \quad (13)$$

式中 η 是空气媒质中的粘滞系数; h_a 是气隙的高度; B 可由下式给出:

$$B = \frac{1}{4} \ln\left(\frac{0.160 b^2}{a^2}\right) - \frac{3}{8} + 3.133 \frac{a^2}{b^2} - 4.907 \frac{a^4}{b^4} \quad (14)$$

此外, 背极板上背板孔中的空气流的声学特性可由 R_h 和 M_h 描述, 这时把背板孔当作毛细管来

处理。根据声音在毛细管中的传播原理, 它们可由以下两个公式给出:

$$R_h = \frac{12 \eta h_b L^2}{b^2} \quad (15)$$

$$M_h = \frac{24 \rho_0 h_b a^2 L^2}{5 b^2} \quad (16)$$

由于背板室的存在, 有动态压差通过振膜, 该声学特性可用声容 C_{bc} 描述, 此处假定背板室内的气体为理想气体, 气压不随外加声压的变化而变化:

$$C_{bc} = \frac{V}{\rho_0 c^2 L^4} \quad (17)$$

其中 V 是背板室的体积。然而, 在计算微传声器的频率响应时, 常常认为背板室的体积 V 为无限大, 相应地, C_{bc} 也被假定为无限大。

3 模拟结果与讨论

3.1 性能模拟

首先对研制的电容式微传声器进行性能模拟。该微传声器设计参数如下: 采用正方形低应力氮化硅膜作声学振膜, 边长为 2.5mm, 厚 0.6μm, 杨氏模量为 200GPa, 泊松系数为 0.3, 其上淀积 0.2μm 的铝膜作上电极, 电极尺寸为 2mm × 2mm, 淀积铝膜后膜应力假定为 150MPa。空气隙厚度为 4μm, 背板孔尺寸为 60μm × 60μm, 间距也是 60μm。工作时其外接 9V 的偏置电压。

运用有限元分析软件计算声学振膜的机械特性, 得出该膜在 1Pa 的压力作用下, 最大中心形变为 3.78nm。Ansys 的分析结果如图 3 所示。

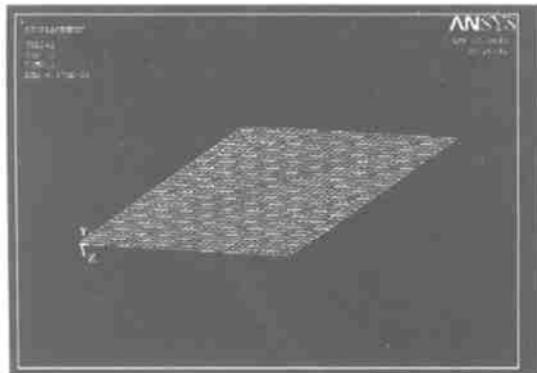


图 3 振摸在 1Pa 压力作用下形变的 Ansys 数值模拟结果

Fig. 3 Deflection distribution of diaphragm under pressure of 1Pa

一般说来, 振膜的平均形变值是最大中心形变值的 1/3, 这样, 上述振膜的平均形变值可考虑为 1.26nm, 从而可以得出振膜的机械灵敏度为 1.26nm/Pa。同时, 根据 2.1 节的分析可计算出微传声器的电学灵敏度为 $1.045 \times 10^6 \text{ V/m}$ 。运用该方法对我们所制备的微传声器进行计算, 可得出其静态开路灵敏度的模拟值为 1.32mV/Pa, 与 1.2mV/Pa 左右的测试值基本一致。

根据第 2 节的分析, 可以计算出所制备的微传声器的频响特性曲线, 如图 4 所示。从图中可以看出, 微传声器的截止频率为 24kHz, 在 0~15kHz 的频率范围内, 可以获得较为平坦的频率响应。在 24kHz 的频率下, 微传声器的频响曲线中出现较高的共振峰, 峰值高于工作时灵敏度 35dB, 主要是由所设计的背板孔尺寸和密度较大所致, 不过微传声器的工作频率低于 15kHz, 所以设计的结构满足实际应用需要。

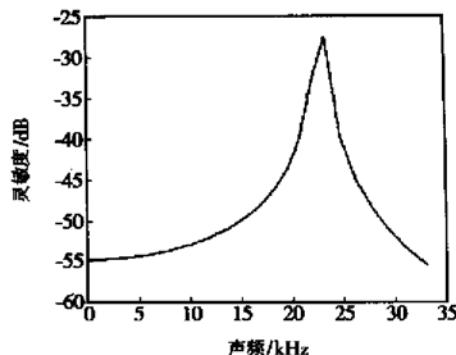


图 4 电容式微传声器的频响特性模拟结果

Fig. 4 Simulated frequency response of the condenser microphone

3.2 结构参数对性能的影响

电容式微传声器的结构对性能有直接的影响, 采用硅微机械加工技术制备的电容式微传声器, 普遍存在灵敏度较低的缺点, 因此, 为了与采用传统工艺制备的微传声器竞争, 必须进行结构的优化设计。微传声器的主要结构参数包括背板孔上背板孔的尺寸与密度、振膜的尺寸和初始应力以及空气隙的高度。

图 5 所示为背板孔尺寸对微传声器频响特性的影响。在保持其他结构参数与研制出的器件一致的前提下, 只改变背板孔的边长, 从 20μm 增至 100μm。从图中可以明显看出, 随着背板孔尺寸的增加, 微传声器灵敏度逐渐降低, 但截止频率增加。不

过一般说来只要在 12kHz 的范围内获得较为平坦的频响就可满足实用要求。因此，设计时应该考虑尽可能小的背板孔尺寸，但由于必须保证一定的背板厚度，尺寸过小的背板孔在现行工艺条件下难以实现。

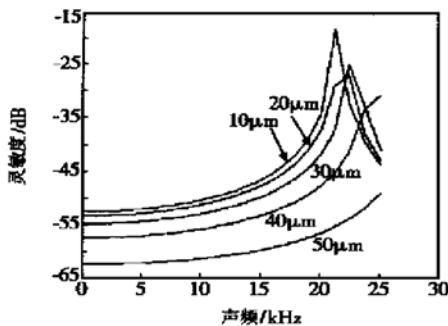


图 5 背板孔对频响特性的影响

Fig. 5 Simulated frequency response for various acoustic holes

图 6 所示为声学振膜对微传声器性能的影响。图中自上而下 4 条曲线分别模拟了微传声器的振膜边长为 2.5、2.1.5 和 1mm 时，在不同初始内应力情况下的频响特性。从图中可以看出，随着振膜尺寸的增加，微传声器的灵敏度显著增加，但随着振膜内应力的增加，微传声器的灵敏度显著下降。因此，在确定薄膜尺寸和材料的前提下，制备出低应力的振膜也是研制出高灵敏度电容式微传声器的关键。通过大量实验证明，富硅的 Si_3N_4 膜应力较低，随着膜中硅含量的增多，薄膜应力可以由张应力变为压应力，但是振膜表面淀积的金属电极膜应力较大，目前制备出的混合膜的内应力最低只能达到 150MPa。因此，设计时应该考虑采用纹膜结构和复合膜结构来降低振膜的内应力^[7]，提高微传声器的灵敏度。

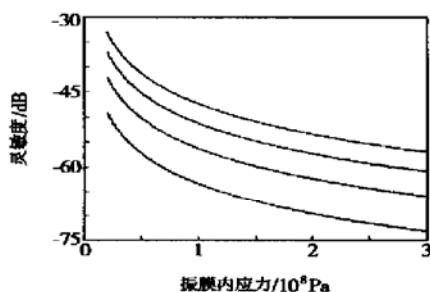


图 6 振膜内应力对微传声器灵敏度的影响

Fig. 6 Simulated open-circuit sensitivity versus initial stress of the diaphragm for the microphone

图 7 所示为微传声器空气隙厚度对微传声器性能的影响。从图中可以看出，微传声器的灵敏度随着空气隙厚度的降低而明显增加。但是从工艺的可行性角度出发，空气隙厚度只能设计为 1~2μm，因为假如空气隙厚度过小，牺牲层释放时会发生粘连现象。

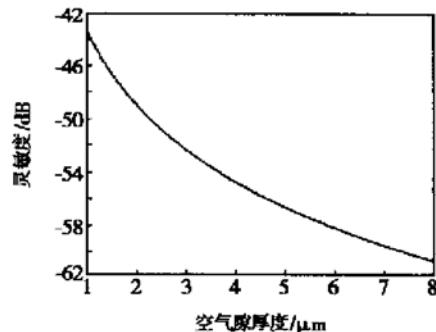


图 7 空气隙厚度对微传声器灵敏度的影响

Fig. 7 Simulated open-circuit sensitivity versus the distance of the air gap for the microphone

4 结论

本文根据所研制的电容式微传声器在理想模式下的工作原理，建立了有限元分析模型和声-电模型，从理论上分析了器件的机械性能、灵敏度以及频响特性。并通过不同结构参数的电容式微传声器进行性能模拟，得出了结构优化的设计原则，即要想得到高灵敏度的微传声器器件，在满足工艺可实现性的条件下，必须考虑尽可能小的空气隙厚度和背板孔尺寸以及具有较小内应力的声学振膜。本文的工作为采用 MEMS 技术制备出高性能的电容式微传声器提供了理论基础。

参考文献

- [1] Scheper P R, Van der Donk A G H, Olthuis W, et al. A review of silicon microphone. Sensors and Actuators A, 1994, 44: 1
- [2] Sprenkels A J, Groothengel R A, Verloop A J, et al. Development of an electret microphone in silicon. Sensors and Actuators A, 1989, 17: 509
- [3] Bergqvist J. Finite element modeling and characterization of a silicon condenser microphone with a highly perforated backplate. Sensors and Actuators A, 1993, 39: 191
- [4] Olson H F. Acoustical engineering. D Van Nostrand Company, 1957
- [5] Pedersen M, Olthuis W, Bergveld P. A silicon condenser micro-

- phone with polyimide diaphragm and backplate. Sensors and Actuators A, 1997, 63: 97
- [6] Skvor Z. On the acoustical resistance due to viscous losses in the air gap of electrostatic transducers. Acustica, 1967/1968, 19: 295
- [7] Chen Jing, Liu Litian, Li Zhijian. Dynamic behaviour of miniature microphone with corrugated membrane: top-down design with EDA/CAD. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(7): 951 [in Chinese] [陈兢, 刘理天, 李志坚. 纹膜结构麦克风的动态特性: 使用 EDA/CAD 工具进行 Top-down 设计. 半导体学报, 2001, 22(7): 951]

Simulation of Performance and Optimal Design of Condenser Microphone

Ning Jin and Liu Zhongli

(Microelectronics R&D Center, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The finite element method and electro-mechano-acoustic method are used to analyse the mechanical performance, sensitivity, and frequency response of the condenser microphone. The results of simulation are in good agreement with those of the measured. An optimal principle can be concluded that the highly sensitivity microphone must consist of relatively narrow air gap, small acoustic hole, and low initial stress membrane.

Key words: condenser microphone; MEMS; FEA; performance simulation

EEACC: 2575; 0296T; 7810

Article ID: 0253-4177(2003)08-0877-05

Ning Jin female, was born in 1976, PhD candidate. Her research interest is in the development of micro-acoustic devices and integrated circuit.
Liu Zhongli male, was born in 1940, professor. His research interest is in integrated circuit, radiation hardness devices, and semiconductor devices.

Received 14 October 2002, revised manuscript received 18 February 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics