

# 纹膜结构微麦克风的动态特性: 使用 EDA/CAD 工具 进行 Top-down 设计

陈 究 刘理天 李志坚

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

**摘要:** 综合使用通用电路模拟软件 PSPICE 和有限元分析软件 ANSYS 对一种硅基微麦克风进行了系统模拟。得到了各项参数的优化值, 优化后的微麦克风在音频范围内具有平直的响应。在此基础上, 提出了一种 Top-down 的优化设计方式以准确预测系统的行为, 分析了各组件的相互作用及其对系统性能的影响。

**关键词:** MEMS; CAD; 动态特性; 微麦克风; 纹膜

**EEACC:** 1130B; 2575; 6540

**中图分类号:** O421<sup>+</sup>.4; TN402; TN641   **文献标识码:** A   **文章编号:** 0253-4177(2001)07-0951-06

## 1 引言

当前, 越来越多的 MEMS 产品正在向实用化、商品化方向发展, 为了加快产品的开发周期, 减少研发成本, 准确的预测产品的性能, CAD 技术的引入已成为必然。MEMS 产品作为一个系统, 往往涉及到力、热、声、光、电等多个领域, 这就给系统的辅助设计带来了很大的困难。MEMS 的模拟不仅需要不同层次的提取, 而且要求跨学科的综合; 在设计阶段既需要对系统进行自顶向下(Top-down)的分析与综合, 又需要对各子系统的行为进行精确的模拟与计算, 当前使用单一工具很难完成这一任务。

随着 MEMS 市场的不断增长, 已经有不少公司着手开发出相应的 MEMSCAD 产品, 但目前这些软件功能并不完备, 而且往往只针对一种或几种特定的产品或工艺, 具有很大的局限性, 其价格也十分昂贵<sup>[1]</sup>。一种经济可行的方法是综合使用成熟的商用 EDA/CAD 软件对 MEMS 系统进行合理的功能划分和参数提取, 最终完成系统的行为预测和优化设计。

电子设计自动化(EDA)软件是对 MEMS 进行

系统级模拟的最佳工具。由于传感器、执行器、信号处理电路、控制和补偿模块以及封装和环境因素都可以等效为相应的电路元件构成的电路模块, 所以使用 EDA 工具可以方便地对 MEMS 系统进行功能划分、调整和补偿, 同时预测其行为。

有限元分析(FEA)则可以模拟 MEMS 各组成元件的行为, 提取相应的等效参数。有限元分析能模拟各类静态和动态现象如传感器和应力、应变、微结构的谐振频率、功率谱密度等许多物理参数。使用 FEA, 可以在软件模式下进行设计优化, 这将真正加快设计的成功率。当前, 在 MEMS 的设计领域, FEA 的应用已十分普遍。

将 EDA 和 CAD/FEA 软件进行综合, 对加速度传感器<sup>[2]</sup>、压力传感器<sup>[3]</sup>等力学量传感器进行优化设计, 已经取得了一定的进展, 但其研究内容多为静态或准静态特性, 对动态特性则较少涉及。硅基微麦克风作为一种微声学器件, 从实用角度人们更关心其动态特性。对这一复杂的微结构, 其解析解并不存在, 如果直接进行模态分析, 其计算量和存储量都将是巨大的, 同时也不易看到各因素对性能的影响, 难以用于优化设计。为此, 我们将通用电路模拟软件 PSPICE 和有限元分析软件 ANSYS 相结合, 对纹

陈 究 男, 博士研究生, 主要研究领域为固体集成传感器和微声学器件。

刘理天 男, 教授, 主要研究领域为集成传感器和 MEMS。

2000-06-28 收到, 2000-10-27 定稿

©2001 中国电子学会

膜结构微麦克风这一声学微系统的动态特性进行了模拟,得到了各项参数的优化值,优化后的微麦克风在音频范围(20Hz—20kHz)内具有平直的频响,这种方法可进一步推广应用到整个MEMS微系统的设计。

## 2 纹膜结构电容式微麦克风的结构及制作工艺

微机械技术在传感器领域已经得到了广泛的应用,电容式硅基微麦克风就是一例。与传统麦克风相比,硅基微麦克风体积小、重量轻、工艺重复性好、抗振性好、能批量生产,并且易于与IC集成,具有很好的应用前景,引起了各国学者的普遍重视。

电容式麦克风的工作原理很简单:背极板和麦克风振膜共同组成一个平行板电容(如图1,2所示);如果在背极板和振膜之间加上一定的电压,振膜将在声压的作用下产生位移,改变两极板之间的电容,从而将声音信号转变为电信号。

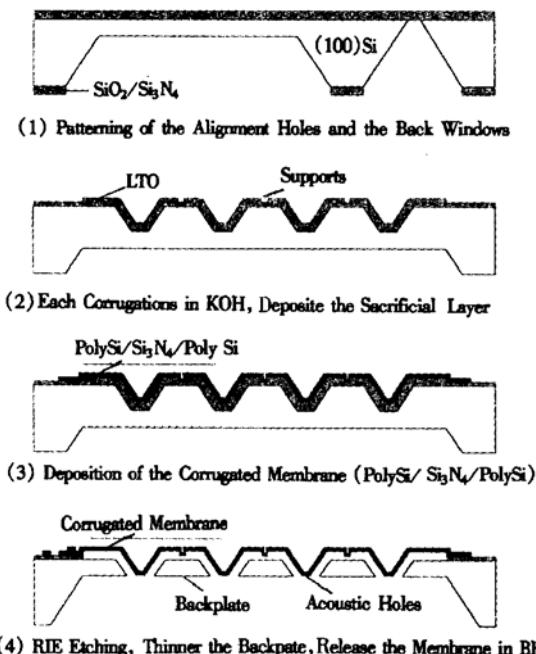


图1 纹膜结构电容式微麦克风制作工艺的简单流程

FIG. 1 Brief Fabrication Process of Miniature Microphone

图1是我所开发的一种纹膜结构电容式微麦克风的制作工艺流程,其特点是简单、重复性好,所用材料也能与IC工艺很好的兼容<sup>[4]</sup>。由于它使用单晶硅各向异性腐蚀技术形成纹槽,所以纹槽只能是方

形的;与使用RIE刻蚀出的纹槽相比,其几何参数更易控制,并且具有更平整的表面和轮廓。用上述工艺制作的微麦克风已经获得了较高的灵敏度,但其动态特性(频率响应)不够理想,相应的结构参数仍未完全优化。其设计参数如图2所示,各参数取值范围列于表1中。

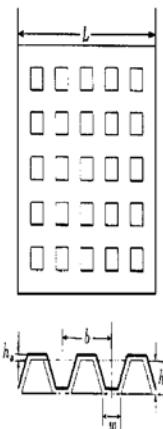


图2 微麦克风设计参数

FIG. 2 Design Parameters of Miniature Microphone

表1 微麦克风的设计参数的定义和取值范围

Table 1 Description and Range of Design Parameters

设计参数	定 义	取值范围
$L$	方纹膜的边长	1500μm
$b$	相邻声学孔中心之间的距离	60—120μm
$h_a$	纹膜与背极板之间的距离	1—5μm
$w$	声学孔底边长度	5—20μm
$h_b$	背极板厚度	5—30μm

频率带宽是麦克风最重要的性能指标之一。随着麦克风尺寸的缩小,背极板和振膜之间的气隙中的气流将直接影响麦克风的上限截止频率,为了减小气流阻力,必须在背极板上开大量的声学孔,如图1,2所示。声学孔的存在虽然在一定条件下增大了麦克风的频带,但同时也降低了背极板的刚度,形成所谓“软背极板”,影响麦克风的动态特性,所以在设计阶段需要对这一声学微系统的动态特性进行模拟和计算。

## 3 模拟和设计

### 3.1 微麦克风的动态模型

对这一复杂的声学微系统直接进行动态分析,其计算量和存储量都将是巨大的,同时也不易看到

各因素对性能的影响, 难以用于优化设计。如果将复杂的声学结构简化为由若干宏模型构成的系统, 那么系统的自由度将从数百万个降为有限的几个, 从而极大地方便了分析和求解<sup>[5]</sup>。

在麦克风等电声器件中, 声学部分可以用集总参数声学线路(声-电类比)进行描绘。在声学线路中, 声压等效为电压, 速度等效为电流, 声质量等效为电感, 声顺等效为电容, 声损耗等效为电阻。

所有声学系统, 严格地讲, 都是具有分布参数的系统; 但在一定条件下, 将某些声学问题按“集总”参数处理, 仍然十分准确。将分布参数的问题按集总参数进行处理的条件是, 该声学问题所涉及的尺寸必须比声波波长小很多, 而微麦克风是符合这种条件的。

纹膜微麦克风的等效线路如图 3 所示<sup>[6]</sup>。

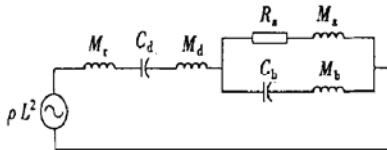


图 3 电容式微麦克风的等效线路

FIG. 3 Lumped-Element Equivalent Circuit of Miniature Microphone

其中  $\rho$  是作用在边长为  $L$  的方形膜上的声压。声质量  $M_r$  为膜的辐射阻抗(微麦克风辐射声阻  $R_r$  极小, 可忽略不计),  $C_d, M_d$  和  $C_b, M_b$  分别代表膜和背极板的声顺和声质量,  $R_a, M_a$  为气隙中的气流引起的机械阻抗。上述等效集总参数多数没有精确的解析解, 如果要预测系统的行为, 必须对相应的微结构进行三维模拟以提取相关参数。

$$M_r \text{ 可近似按平膜进行计算: } M_r = \frac{2.67L^3\rho_0}{\pi\sqrt{\pi}} \quad (1)$$

其中  $\rho_0$  是空气密度。

膜和背极板的声质量可近似为:

$$M_d = \rho_d h_d L^2 \quad M_b = \rho_b h_b L^2 (1 - A) \quad (2)$$

其中  $\rho_d$  和  $\rho_b$  是膜和背极板的密度;  $A$  是声学孔等效面积与背极板总面积之比。

$C_d$  和  $C_b$  分别代表膜和背极板的声顺, 它们与膜和背极板的灵敏度  $S_d$  和  $S_b$  成正比:

$$C_d = \frac{S_d}{L^2}, \quad C_b = \frac{S_b}{L^2} \quad (3)$$

对于这种复杂的结构,  $S_d$  和  $S_b$  只能由有限元静力分析求得<sup>[7]</sup>。

小尺寸下, 可将空气视为不可压缩流体,  $R_a$  可以由流体力学有限元分析得出<sup>[8]</sup>,  $M_a \propto h_a^2 R_a$ 。

计算中其它参数为: 膜的杨氏模量  $E = 200\text{GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ , 密度  $\rho = 2500\text{kg/m}^3$ , 初始应力为  $100\text{MPa}$ , 膜厚为  $1\mu\text{m}$ , 均为实际工艺参数。

电路分析使用的是 MicroSim PSpice 8.0, 有限元分析使用的是 ANSYS 5.5。

首先使用 PSPICE 分析各集总参数对系统频率曲线的影响, 得出集总元件的合理取值, 然后使用 ANSYS 数值模拟的结果对各项设计参数进行相应的调整, 最后对优化后的动态特性进行验证, 完成 Top-down 的设计。

### 3.2 系统模拟

对于微麦克风, 将实际参数代入计算可得到相关声质量、声阻及声顺的近似值为:  $M \approx 10^{-9}\text{kg}$ ,  $R \approx 10^{-3}\text{N} \cdot \text{s/m}$ ,  $C \approx 10^{-4}-10^{-3}\text{m/N}$ 。粗略地估算, 只有当频率  $f > 10^6\text{Hz}$  时, 声质量对应的阻抗  $M\omega$  才大于  $\frac{1}{C\omega}$  和  $R$ 。实际的模拟结果也表明, 声质量对音频范围内的频响曲线影响很小, 声顺  $C$  和声阻  $R$  是影响微麦克风中低频动态特性的主要因素。为了简化分析, 计算时可以不考虑声质量随参数的变化<sup>[9]</sup>。

PSPICE 模拟结果示于图 4, 其中图 4(a)、(c)、(e) 的 Y 轴为膜的机械灵敏度, 单位为 dB,  $0\text{dB} = 1\text{nm/Pa}$ 。从图 4(a) 中可以看出, 在低频段, 气隙中的气流在振动时受到的摩擦很小, 系统灵敏度由膜的刚度决定, 这段曲线称为刚度/劲度控制(Stiffness-Control)区。随着振动频率的提高, 气隙阻尼逐渐增大, 灵敏度随之下降, 曲线进入力阻控制区。电容式麦克风工作频带应基本处于刚度控制区内。

传统麦克风由于振膜和背极板之间的空气间隙较大( $> 20\mu\text{m}$ ), 一般很少在背极板上开孔或只开少量孔, 背极板也可以做得很厚, 可以视作完全刚性。微麦克风由于工艺的原因, 背极板不可能做得很厚, 同时微麦克风空气间隙极小( $1-3\mu\text{m}$ ), 空气阻尼很大。为了减小阻尼, 需要在背极板上开大量的声学孔, 这也将大大降低背极板的刚度, 形成“软背极板”, 在中高频产生新的谐振峰, 影响系统动态特性。从图 4(a) 中可以看出, 背板刚度越大,  $C_b$  越小, 谐振峰逐渐向高频转移, 对中低频的影响就越小。在图 4(b) 中, 当  $C_b < C_d/5$  时, 谐振峰大于  $40\text{kHz}$ , 对音频范围内频率响应影响较小。在图 1 所示的工艺中,

RIE 刻蚀减薄背极板这一步很难控制, 同时, 由于 KOH 腐蚀不均匀, 圆片上各器件的膜厚不一致。为了提高成品率, 往往需要进行一定的过刻蚀, 所以在设计时应取  $C_b < C_d/10$ 。

图 4(c) 为不同  $R_a$  下系统的频响 ( $C_b = 0.01C_d$ , 此时由  $C_d$  引起的共振峰大于 100kHz), 从图中可以看出, 当  $R_a$  较大时, 频响曲线呈现过阻尼,  $-3\text{dB}$  截止频率严重下降; 当  $R_a$  很小 ( $< 0.0005 \text{N} \cdot \text{s/m}$ ) 时, 由于欠阻尼, 又会在低频段形成共振峰, 同样影响系统的动态特性。从图 4(d) 中可以看出, 当  $R_a < 0.002 \text{N} \cdot \text{s/m}$  时, 系统  $-3\text{dB}$  截止频率大于 20kHz; 当  $R_a$  过小 ( $< 0.0008 \text{N} \cdot \text{s/m}$ ) 时, 又会产生

欠阻尼, 在低频段形成共振峰, 由于 PSPICE 计算  $-3\text{dB}$  截止频率时是以系统最大值为参考, 所以在图上体现为  $-3\text{dB}$  截止频率反而下降。 $R_a$  合适的取值应当在  $0.0008\text{--}0.002 \text{N} \cdot \text{s/m}$  之间。

图 4(e) 是不同  $C_d$  下的频率响应曲线, 从图中可以看出,  $C_d$  (振膜静态机械灵敏度) 是影响系统增益的主要因素, 但随着  $C_d$  的增加,  $-3\text{dB}$  截止频率也随之下降, 所以有必要在灵敏度和频响两项指标之间作出调整。从图 4(f) 中可以看出, 当  $C_d < 0.0067 \text{m/N}$  时, 系统的  $-3\text{dB}$  截止频率才大于 20kHz。 $C_d$  一般设计为  $0.004\text{--}0.005 \text{m/N}$  之间。

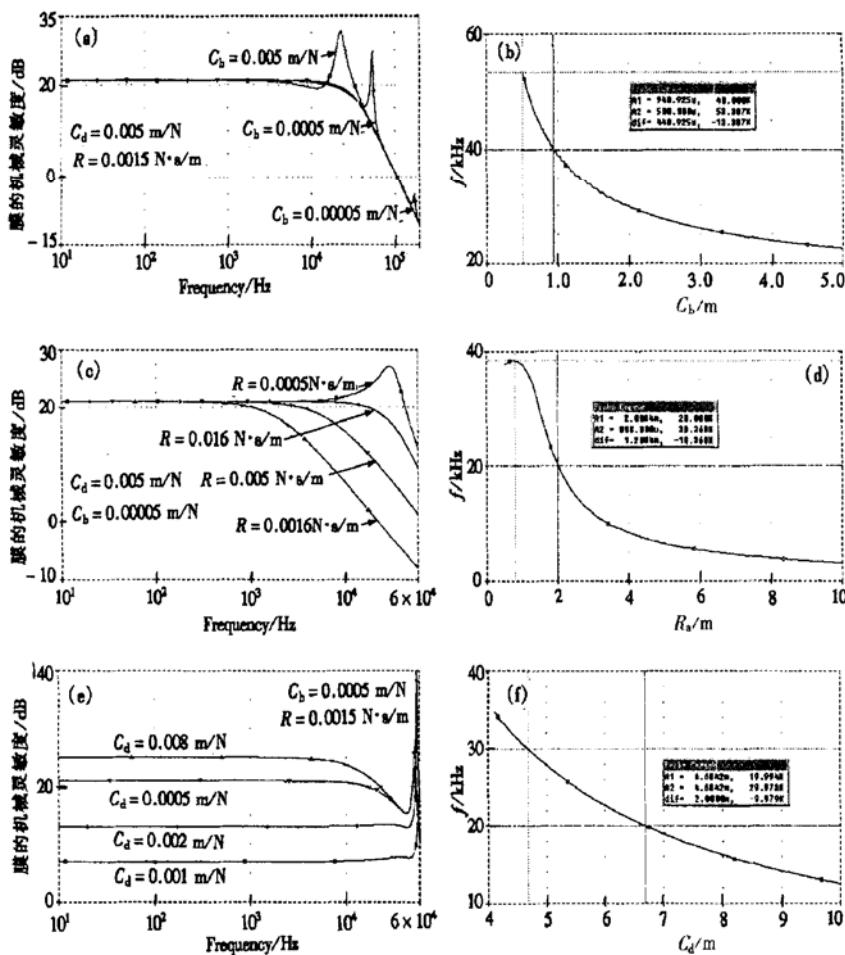


图 4  $C_b$ 、 $R_a$ 、 $C_d$  与系统频率响应的关系 (a) 不同  $C_b$  下的频率响应曲线; (b) 第一谐振频率与  $C_b$  的关系; (c) 不同  $R_a$  下的频率响应曲线; (d)  $-3\text{dB}$  截止频率与  $R_a$  的关系; (e) 不同  $C_d$  下的频率响应曲线; (f)  $-3\text{dB}$  截止频率与  $C_d$  的关系

FIG. 4 Relations Between Frequency Response and  $C_b$ 、 $R_a$ 、 $C_d$ , Respectively (a) Frequency Response Versus  $C_b$ ; (b) Resonance Frequency Versus  $C_b$ ; (c) Frequency Response Versus  $R_a$ ; (d) Cut-off Frequency Versus  $R_a$ ; (e) Frequency Response Versus  $C_d$ ; (f) Cutoff Frequency Versus  $C_d$

### 3.3 声学集总元件参数设计

#### 3.3.1 振膜声顺 $C_d$

有限元模拟表明,  $C_d$  与  $b, h_b$  密切相关, 而  $w$  对其影响不大。如果要将  $C_d$  控制在  $0.004\text{--}0.005\text{m}/\text{N}$  范围内, 那么相应的纹膜灵敏度应为  $9\text{--}11\text{nm}/\text{Pa}$ 。从图 5 可以看出, 纹膜的灵敏度在  $b=80\mu\text{m}$  时最高, 如果  $b$  进一步增大, 不仅膜的灵敏度会减小, 而且牺牲层腐蚀时间增加, 会给释放时保护带来困难。 $h_b$  应在  $10\text{--}25\mu\text{m}$  之间。

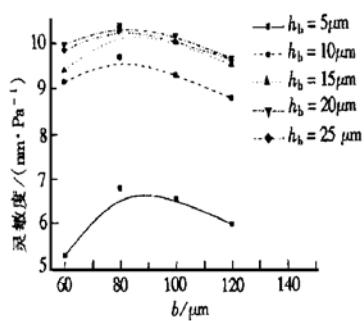


图 5 纹膜灵敏度与  $b$  和  $h_b$  的关系

FIG. 5 Sensitivity of Corrugated Membrane as Function of  $b$  and  $h_b$

#### 3.3.2 气隙阻尼 $R_a$

当相邻声学孔中心之间的距离  $b$  一定时, 气隙阻尼随声学孔底边长度  $w$  增加而减少, 随纹膜与背极板之间的距离  $h_a$  增加而增加。根据流体力学有限元的计算, 可以得到如图 6 所示的结果。当  $b$  和  $h_a$  取值在曲线右上方时,  $R_a$  小于  $0.0015\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ; 当  $b$  和  $h_a$  的取值在曲线左下方时,  $R_a$  取值均大于  $0.0015\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 。

$h_a$  的增加会使微麦克风电容量减小, 这时杂散电容的影响将加大, 从而分散极板上的电荷, 降低麦克风的电学灵敏度。而  $w$  的增加将减小背板的刚度。综合考虑上述因素, 可取  $h_a=2.4\mu\text{m}$ ,  $w=8\mu\text{m}$ 。

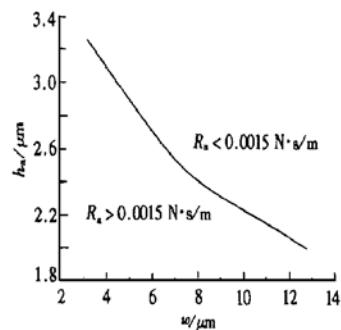


图 6 气隙声阻  $R_a$  与  $h_a$ 、 $w$  之间的关系

FIG. 6 Acoustic Resistance of Air Gap as Function of  $h_a$  and  $w$

#### 3.3.3 背极板声顺 $C_b$

当  $b=80\mu\text{m}$ ,  $w=8\mu\text{m}$  时, 背板刚度只与背极板厚度  $h_b$  有关。为了满足  $C_b < C_d/10$ , 背板必须具有一定厚度。

我们使用 ANSYS5.5 计算了背极板的机械灵敏度, 其中设计变量为厚度  $h_b$ , 状态(约束)变量为灵敏度  $S_b \leq 0.1S_d = 1\text{nm}/\text{Pa}$ ,  $A = w^2 + \sqrt{2}wh_b + \frac{2}{3}h_b^2$ , 目标函数为背极板灵敏度  $S_b$ 。计算结果表明, 当背极板厚度  $h$  大于  $6.5\mu\text{m}$  时, 其灵敏度小于  $1\text{nm}/\text{Pa}$ , 即为了保证微麦克风的频率特性, 背极板厚度需大于  $6.5\mu\text{m}$ 。 $h_b$  过厚会对光刻造成不利影响, 综合考虑  $h_b$  对  $C_d$  的影响,  $h_b$  可以取为  $15\mu\text{m}$ 。

使用薄膜淀积法形成的微麦克风背极板, 由于淀积薄膜内应力很大而且难以控制, 所以很难做得很厚。而如果使用单晶硅衬底形成的微麦克风的背极板, 其力学性质均匀稳定, 并且没有厚度的限制, 所以其频率特性可以比前者好得多。

优化后的各项参数和系统截止频率如表 2 所示, 该声学系统在音频范围内具有平直的频响, 其  $-3\text{dB}$  截止频率可达  $33.4\text{kHz}$ , 完全满足设计要求。

表 2 微麦克风各项参数的最优值

Table 2 Optimized Design Parameters of Miniature Microphone

$b/\mu\text{m}$	$h_a/\mu\text{m}$	$w/\mu\text{m}$	$h_b/\mu\text{m}$	$C_d/(\text{m} \cdot \text{N}^{-1})$	$C_b/(\text{m} \cdot \text{N}^{-1})$	$R_a/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$F_{-3\text{dB}}/\text{kHz}$
80	2.4	8	15	0.0045	0.000086	0.0015	33.4

## 4 结论

CAD 的引入是 MEMS 技术发展的必然要求。由于 MEMS 种类繁多, 涉及的学科面很广, 目前尚

无通用的系统级辅助设计工具。一种有效的方法是采用 Top-down 的设计方式: 首先使用 EDA 软件对 MEMS 进行系统级模拟, 再使用其他 CAD 工具如有限元分析模拟器件/子系统的行为, 得到系统的优化参数。

我们将通用电路模拟软件 PSPICE 和有限元分析软件 ANSYS 相结合, 使用 Top-down 的设计方法对纹膜结构微麦克风这一声学微系统的动态特性进行了模拟, 得到了各项参数的优化值, 优化后的微麦克风工作于刚度控制区, 在音频范围内具有平直的频响。这种方法具有较高的精度和很强的可扩展性。在进一步的研究中, 可以方便地将片上集成的前置放大模块以及封装引起的各种效应引入系统, 完成整个 MEMS 产品的设计。

**致谢** 中国科学院声学研究所的陶中达老师、李晓东老师与作者进行了有意义的讨论, 在此表示感谢。

#### 参考文献

- [ 1 ] D. J. Nagel, SPIE, Paris, France, March–April 1999, **3680**: 20.
- [ 2 ] O. Nagler, M. Trost, B. Hillerich and F. Kozlowski, Sensors and Actuators A, 1998, **66**: 15.
- [ 3 ] A. Gotz, H. Krassow, M. Zabala, J. Santander and C. Cane, Journal of Micromechanics and Microengineering, 1999, **9**: 109.
- [ 4 ] ZOU Quan-bo, LI Zhi-jian and LIU Li-tian, Chinese Journal of Semiconductors, 1996, **17**( 12) : 907—913 (in Chinese) [ 邹泉波, 刘理天, 李志坚, 半导体学报, 1996, **17**( 12) : 907—913].
- [ 5 ] H. A. C. Tilmans, Journal of Micromechanics and Microengineering, 1996, **6**: 157.
- [ 6 ] CHEN Jing, LIU Li-tian and LI Zhi-jian, Micro-and Nanometer Science & Technology, 2000, **5**( 1) : 109—111 (in Chinese) [ 陈兢, 刘理天, 李志坚, 微米/纳米科学与技术, 2000, **5**( 1) : 109—111].
- [ 7 ] J. Bergqvist, Sensors and Actuators A, 1993, **39**: 191.
- [ 8 ] Z. Skvor, Acustica, 1967/1968, **19**: 295.
- [ 9 ] C. Thielemann and G. M. Sessler, Acustica, 1997, **83**: 715.

## Dynamic Behaviour of Miniature Microphone with Corrugated Membrane: Top-down Design with EDA/CAD

CHEN Jing, LIU Li-tian and LI Zhi-jian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The optimization of a fabricated miniature microphone is presented by collecting the electrical network simulator PSPICE and the FEA (Finite Element Analysis) program ANSYS. After the simulation of the dynamic behaviour of miniature microphone with corrugated membrane by using EDA/CAD tools, optimal values of the related parameters are obtained. The optimized miniature microphone shows a flat frequency response in the audio frequency. The top-down approach is also introduced to analyse the behaviour of the complex system and the interactions between different components in the design process.

**Key words:** MEMS; CAD; dynamic behaviour; miniature microphone; corrugated membrane

EEACC: 1130B; 2575; 6540

Article ID: 0253-4177(2001)07-0951-06

CHEN Jing PhD candidate. His major research focuses on the development of solid-state integrated sensors and micro-acoustic devices.

LIU Li-tian professor. His present research focuses on the development of integrated sensors and MEMS.

Received 28 June 2000, revised manuscript received 27 October 2000

© 2001 The Chinese Institute of Electronics