

# 用多孔硅作牺牲层制备硅基电容式微传声器

宁 瑾 刘焕章 葛永才 刘忠立

(中国科学院半导体研究所微电子中心, 北京 100083)

**摘要:** 提出了一种新的硅基电容式微传声器的制备方法, 即采用多孔硅牺牲层技术制备声学孔, 采用聚酰亚胺膜作声学振膜. 采用该方法制备出的电容式微传声器器件, 开路灵敏度为  $-107.8$  dB, 在  $400 \sim 10$  kHz 之间, 频率响应较为平坦, 可以实现语音通信.

**关键词:** 硅基电容式微传声器; 多孔硅; 牺牲层; 聚酰亚胺

EEACC: 2575F; 7820; 7230M; 2520

中图分类号: TN402 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2003)S0-0187-05

## 1 引言

采用硅机械电子系统(MEMS)加工工艺制备硅基电容式微传声器, 正在成为微传感器领域关注的热点. 尽管人们采用各种各样的方法, 制备出性能各异的电容式微传声器, 而且从报道的结果看, 已经具备了实用的性能, 但是, 截至目前, 仍然没有实现批量生产, 也没有成本低的制备工艺出现. 我们在综合各种制备方法的基础上, 提出一种新的制备方法, 即采用多孔硅牺牲层技术制备声学孔, 采用聚酰亚胺膜作声学振膜. 运用该方法制备的电容式微传声器, 已经实现了语音通信.

性能优良的微传声器, 背极板应尽可能接近刚性, 不能随着外加声压振动. 可以应用淀积方法制备背极板<sup>[1,2]</sup>, 但通过淀积方法制备的背极板往往较薄, 因为淀积材料过厚的话, 材料本身的内在张力容易引起材料断裂, 且往往淀积时间过长. 另外, 沉积材料的表面平滑度不够好, 从而影响其上淀积的金属层的附着力. 也可以应用电镀方法制备背极板<sup>[3]</sup>, 但普通金属耐高温和耐酸碱腐蚀特性较差, 所以与整个制备工艺的兼容性较差. Kronast<sup>[4]</sup>采用体硅腐

蚀方法, 得到  $20 \mu\text{m}$  的单晶硅作为背极板, 但制备声学孔时, 光刻表面位于深背极板腔内, 需要用到非标准的光刻工艺, 光刻难度较大. 我们在体硅腐蚀前先把声学孔部分的硅变成多孔硅, 体硅腐蚀后再将多孔硅释放, 即采用多孔硅牺牲层工艺, 使该问题得到解决. 微传声器的声学振膜一般采用氮化硅膜, 但目前制备的氮化硅膜, 应力最低可控制在  $10^7 \sim 10^8$  Pa 范围内<sup>[5]</sup>, 而低应力的声学振膜是制备性能优良的微传声器的保证, 因此, 综合整个工艺的特点, 选用应力低的聚酰亚胺材料制备声学振膜. 本文将详述该电容式微传声器的制备工艺, 以及对制备出的微传声器进行性能测试和结果分析.

## 2 电容式微传声器的制备

衬底选用 p 型  $\langle 100 \rangle$  硅, 电阻率为  $8 \sim 12 \Omega \cdot \text{cm}$ .

实验制备工艺流程如图 1 所示. 首先进行高温氧化, 然后在声学孔的部分进行单面浓硼深扩散  $15 \mu\text{m}$ , 最高扩散浓度达到  $3 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ , 因为多孔硅的优先生长顺序为  $n^+ > p^+ > p > n$ , 这样可以更好的控制声学孔的尺寸. 接着进行双面浓硼浅扩散, 正

宁 瑾 女, 1976 年出生, 博士研究生, 现从事微传声器器件及外围集成电路的研制工作.

刘焕章 男, 1944 年出生, 高工, 主要研究领域为微波半导体器件以及 MEMS 器件.

葛永才 男, 1943 年出生, 高工, 主要研究领域为微波半导体器件以及 MEMS 器件.

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.

面的扩散区形成微传声器的背板电极,背面的扩散区作为阳极氧化的接触电极. LPCVD 生长富氮氮化硅 500~600nm,以作为阳极氧化的掩膜. 在 HF : 水 : 无水乙醇=4 : 6 : 10 的溶液中进行阳极氧化 60min, 电流密度为 40mA/cm<sup>2</sup>. 生成的多孔硅要在 300℃ 的氮气环境中热处理. 然后再 LPCVD 双面生长富氮氮化硅 500~600nm, 背面的氮化硅用作体硅刻蚀的掩膜, 硅片正面在声学振膜的区域要干法刻蚀去除氮化硅. 正面蒸铝 2μm 作微传声器的空气隙的牺牲层, 然后甩聚酰亚胺膜作为声学振膜. 最后从背面进行体硅刻蚀, 释放多孔硅牺牲层和铝牺牲层, 蒸铝 300nm 作为电极, 至此, 硅基电容式微传声器即制备完成.

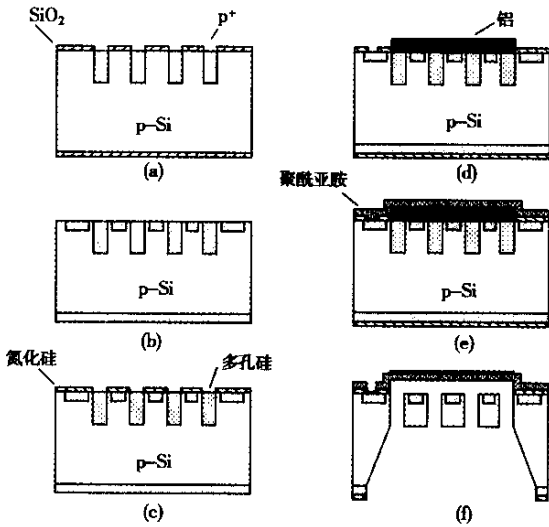


图 1 电容式微传声器实验制备工艺流程

Fig.1 Fabrication process of condenser microphone

该制备方法的主要特点在于使用多孔硅作为形成声学孔的牺牲层. 多孔硅可以在 1% 的 KOH 溶液中迅速释放, 作为一种新型的牺牲层材料, 受到 MEMS 界的普遍关注. 多孔硅的优先生长顺序为  $p^+ > p^-$ , 因此, 要保证一定的背板厚度, 需要制备高掺杂的 P 型深扩散层, 以形成多孔硅作为声学孔的牺牲层. 先后使用几种杂质源, 采用开管扩散和箱法扩散在多种条件下进行了实验, 并用扩展电阻法测量了扩散层的杂质分布. 图 2 和图 3 分别是开管扩散和箱法扩散在深结扩散时的典型结果, 开管扩散的杂质分布为高斯分布, 箱法扩散的杂质分布是余误差分布, 可以看出用开管扩散难以制备出高浓度的深扩散层, 而用箱法扩散可以得到结深 25μm (其

中  $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  以上的高掺杂区约 14μm) 表面浓度达  $10^{20}$  的高浓度深扩散层, 目前, 它已被有效地用于微传声器制备中, 获得了约 15μm 厚的背板. 同时, 利用选择性扩散可以很容易地制备出任意形状和尺寸的声学孔.

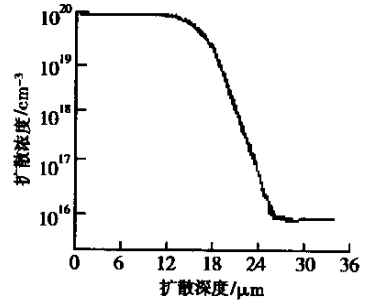


图 2 箱法扩散样品浓度测试结果

Fig. 2 Measured concentration of the sample diffused boron with box method

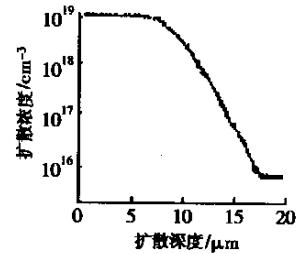


图 3 开管扩散样品浓度测试结果

Fig. 3 Measured concentration of the sample diffused boron with open pipe method

该制备方法的另一个主要特点在于采用聚酰亚胺作声学振膜, 与其它膜材料相比, 聚酰亚胺的内应力较低, 机械灵敏度较高, 从而制备出的电容式微传声器, 有可能取得较好的性能. 但是, 由于体硅刻蚀要在 80℃, 30% 的 KOH 溶液中进行, 正面的聚酰亚胺膜在腐蚀时极有可能遭到破坏, 为此我们特制了密闭性和耐强碱性能很好的聚四氟乙烯夹具, 腐蚀时放在该夹具中的硅片, 只有背面暴露在 KOH 溶液中, 正面可以得到有效的保护.

### 3 电容式微传声器的性能测试及讨论

为了有效地测试出微传声器的性能, 首先, 应当通过测试微传声器的 C-V 特性, 得出它在工作电压下的固定电容值. 在 10kHz 的工作频率下, 外置偏

压从 1V 加到 20V,同时加一个 10mV 的交流小信号,测试得出的微传声器的  $C-V$  特性如图 4 所示.从图中可以明显看出,当偏压较小时,该电容值随着偏压的增加变化不太明显,但当电压增大到一定值后,微传声器的静电容值有一个突然的增加,该值称为微传声器的失稳电压.当外置偏压达到失稳电压以后,微传声器的两个极板在静电吸引力的作用下贴到一起,器件失效.从图 4 可以明显看出,我们所制备的微传声器,失稳电压值为 6.6V,一般微传声器的工作电压值应为其失稳电压的 60%,因此,我们所制备的微传声器,工作电压应为 4V 左右,其在工作电压下的静态电容值为 8.9pF.

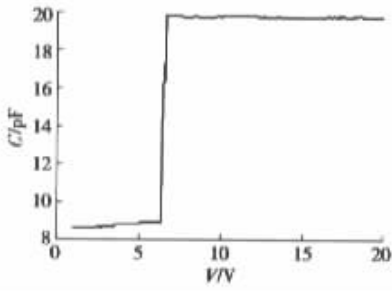


图 4 电容式微传声器的  $C-V$  特性

Fig. 4 Measured  $C-V$  curve of a condenser microphone

对圆片级硅微传声器测试的目的是在研制阶段中,对由于工艺的不稳定所造成的成品特性不一致进行选分,对基片进行最初级的选测,可以缩短工艺条件的优化周期.但测试微传声器时需要注意电磁场的影响,而电容式微传声器的阻抗变换器电路屏蔽的优劣,对测试结果尤为重要.当硅微传声器的灵敏度过低时,测试系统的电磁噪声高过可接收到的声信号.

为了实现初步的电声测量,将研制出的微传声器分割成各个单元,压焊在定型的管座上,然后将管座固定在金属密封腔内,这样,电屏蔽效果较好,信噪比性能提高,使测量具有可操作性.

微传声器的测试仪器设备设置框图如图 5 所示.

测试方法采用消声室同时比较法.用标准电容式传声器 B&K4189 作为比较传声器,该传声器在 1kHz 的频率下的灵敏度的校正值为  $-26.8\text{dB}$ .分别在 3V、4.5V 和 6V 的直流偏置电压下进行测试,得到硅微电容传声器的灵敏度频率响应曲线如图 6

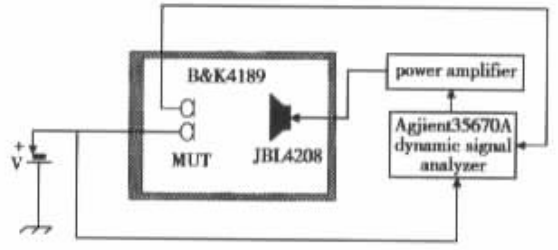


图 5 微传声器测试仪器设备框图

Fig. 5 Block diagram of the microphone measurement setup

所示.在 4.5V 的偏置电压下微传声器的灵敏度最高,1kHz 频率下的灵敏度为  $-107.8\text{dB}$ ,其次为 3V 和 6V.在 6V 的偏置电压下灵敏度最低,分析原因因为由于振膜的机械灵敏度较高,当外加直流电压增大时,振膜下塌,部分振膜与背板吸附在一起,出现微传声器性能失稳.

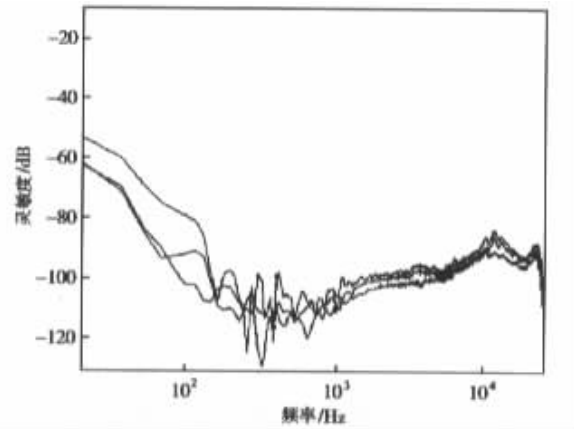


图 6 电容式微传声器灵敏度频率响应测试曲线

Fig. 6 Measured frequency responses of condenser microphone

从图 6 可以看出,在低于 1kHz 的声频下,微传声器频响特性不好,经分析主要有以下两个原因,其一可能是因为微传声器本身的低频噪声特性不好,其二可能是因为测试时采用的偏置电阻值偏低,仅为  $47\text{M}\Omega$ ,微传声器的电容量  $C=8.9\text{pF}$ ,其低频截止频率估算约 380Hz,通过改进测试装置,增加偏置电阻,应该能在更宽的频率范围内获得较为平坦的频率响应.

总的看来,我们研制的微传声器,灵敏度尚不够高,但 4.5V 的偏置电压下,仍然可以实现语音通信.该微传声器的性能不够理想,究其原因主要是结

构设计尚不够合理,所设计的电容式微传声器的结构原理图如图 7 所示.

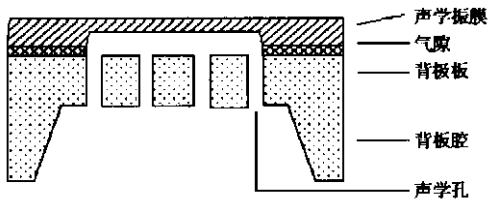


图 7 电容式微传声器结构原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the condenser microphone

声学振膜尺寸为  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ , 采用聚酰亚胺材料, 膜厚为  $2.7\mu\text{m}$ , 空气隙为  $2\mu\text{m}$ , 由于上电极蒸发在聚酰亚胺膜上, 所以等效空气隙达到了约  $3\mu\text{m}$ , 另外, 该微传声器的声学孔尺寸偏大, 为  $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ , 密度为  $144/\text{mm}^2$ , 使背极板的有效面积减小了 23%, 这样的结构大大减小了微传声器的静态电容值, 从而降低了微传声器的灵敏度. 上电极置于聚酰亚胺振膜下的微传声器结构, 其等效空气隙等同于实际设计的空气隙高度, 同时提高声学孔密度, 减小声学孔尺寸, 使背极板的有效面积得到相应提高. 通过这些结构设计上的改进, 将能大大提高所研制的微传声器的灵敏度. 改进工作正在进行中.

## 4 小结

本文提出了一种新的制备电容式微传声器的方法, 即采用多孔硅牺牲层技术制备声学孔, 采用聚酰亚胺膜做声学振膜. 运用该方法已经制备出初步的器件, 灵敏度最高达到  $-83\text{dB}$  (相对于  $1\text{V}/\text{Pa}$ ), 实现了语音通信.

该制备方法有两个主要特点: 其一是利用多孔硅做牺牲层制备声学孔, 从而可以获得较厚的硅背

极板. 其二是用聚酰亚胺做声学振膜, 与其它膜材料相比, 聚酰亚胺的内应力很低, 机械灵敏度较高. 这样, 采用该方法制备的电容式微传声器, 有可能取得较好的性能. 而且, 该方法与 CMOS 工艺完全兼容, 声学膜可在低温 ( $<350\text{C}$ ) 下制备, 利于微传声器与其外围电路的集成. 由于该方法在工艺上还存在一些难点需要克服, 器件结构设计也没有完全优化, 所以制备出的第一批器件性能尚不够理想. 通过改进器件结构, 优化工艺参数, 采用该制备方法应该能够制备出具有较好性能的微传声器. 另外, 通过提高偏置电阻值, 也能相应提高微传声器的低频性能.

致谢 微传声器的测试工作由中国科学院声学研究所的马军、李伯权同志完成, 在此表示感谢!

## 参考文献

- [ 1 ] Altti Torkkeli, Outi Rusanen, Jaakko Saarilahti, et al. Capacitive microphone with low-stress polysilicon membrane and high-stress polysilicon backplate. *Sensors and Actuators A*, 2000, 85: 116
- [ 2 ] Ning Y B, Mitchell A W, Tait R N. Fabrication of a silicon micromachined capacitive microphone using a dry-etch process. *Sensors and Actuators A*, 1996, 53: 237
- [ 3 ] Kabir A E, Bashir R, Bernstein J, et al. High sensitivity acoustic transducers with  $\text{p}^+$  membranes and gold backplate. *Sensors and Actuators A*, 1999, 78: 138
- [ 4 ] Kronast W, Müller B, Siedel W, et al. Single-chip condenser microphone using porous silicon as sacrificial layer for the air gap. *Sensors and Actuators A*, 2001, 87: 188
- [ 5 ] Chen Dapeng, Ye Tianchun, Xie Changqing, et al. Stress in  $\text{SiN}_x$  film embedded with silicon nanocrystals preparing by LPCVD. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(12): 1529 [陈大鹏, 叶甜春, 谢常青, 等. LPCVD 制备纳米硅镶嵌结构氮化硅膜及其内应力. *半导体学报*, 2001, 22(12): 1529]

# Fabrication of Silicon Condenser Microphone Using Porous Silicon as Sacrificial Layer

Ning Jin, Liu Huanzhang, Ge Yongcai and Liu Zhongli

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

**Abstract:** A new technology for the fabrication of silicon condenser microphones is presented. The technology is based on the use of porous silicon as sacrificial layer for the acoustic holes and the polyimide diaphragm for the acoustic membrane. The microphone with an open-circuit sensitivity of  $-107.8$  dB and a flatter frequency response between 400 Hz and 10 kHz has been fabricated with this technology. The microphone can be used for acoustic communication.

**Key words:** silicon condenser microphone; porous silicon; sacrificial layer; polyimide

**EEACC:** 2575F; 7810; 7230M; 2520

**Article ID:** 0253-4177(2003)S0-0187-05

---

Ning Jin female, was born in 1976, PhD candidate. She is engaged in the research on condenser microphone devices and its integrated circuits.

Liu Huanzhang male, was born in 1944. He is engaged in the research on semiconductor microwave devices and MEMS devices.

Ge Yongcai male, was born in 1943. He is engaged in the research on semiconductor microwave devices and MEMS devices.

Liu Zhongli male, was born in 1940. He is engaged in the research on hardness antiradiation CMOS devices and MEMS devices.

Received 16 September 2002, revised manuscript received 14 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics