

# MEMS 麦克风——助听器的未来

作者: Jerad Lewis 和 Brian Moss 博士

由于人口老龄化和听力丧失人群的明显增加,助听器市场不断增长,但其显眼的外形和很短的电池寿命让许多人失去兴趣。随着听力丧失现象变得更加常见,人们将寻求更加小巧、更有效、更高品质的助听器。助听器信号链的前端是麦克风,它检测语音和其他环境噪声。因此,改善音频捕捉可以提高信号链整体的性能并降低功耗。

麦克风是把声学信号转换为电信号以供助听器音频信号链处理的传感器。有许多技术可用于这种声电转换,但电容麦克风是其中尺寸最小、精度最高的一类麦克风。电容麦克风中的薄膜随着声学信号而运动,这种运动引起电容变化,进而产生电信号。

驻极体电容麦克风(ECM)是助听器中使用最广泛的技术。ECM 采用可变电容,其一个板由具有永久电荷的材料制成。ECM 在当今助听行业声名显赫,但这些设备背后的技术自 1960 年代以来并无多大变化。其性能、可重复性以及相对于温度和其他环境条件的稳定性不是非常好。助听器以及其他注重高性能和一致性的应用,为新型麦克风技术的发展创造了机会。新技术应当能改善上述缺点,让制造商生产出更高质量、更加可靠的设备。

微机电系统(MEMS)技术是电容麦克风变革的中坚力量。MEMS 麦克风利用了过去数十年来硅技术的巨大进步,包括超小型制造结构、出色的稳定性和可重复性、低功耗,所有这些都已成为硅工业不折不扣的要求。迄今为止, MEMS 麦克风的功耗和噪声水平还是相当高,不宜用于助听器,但满足这两项关键要求的新器件已经出现,正在掀起助听器麦克风的下一波创新浪潮。

## MEMS 麦克风工作原理

像 ECM 一样, MEMS 麦克风也是电容麦克风。MEMS 麦克风包含一个灵活悬浮的薄膜,它可在一个固定背板之上自由移动,所有元件均在一个硅晶圆上制造。该结构形成一个可变电容,固定电荷施加于薄膜与背板之间。传入的声压波通过背板中的孔,引起薄膜运动,其运动量与压缩和稀疏波的幅度成比例。这种运动改变薄膜与背板之间的距离,进而改变电容,如图 1 所示。在电荷恒定的情况下,此电容变化转换为电信号。

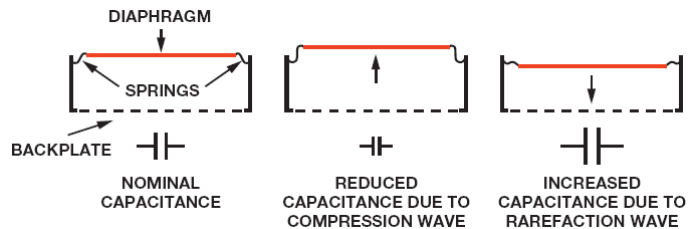


图 1. MEMS 麦克风的电容随声波的幅度而变化

在硅晶圆上制造麦克风传感器元件的工艺与其他集成电路(IC)的制造工艺相似。与 ECM 制造技术不同,硅制造工艺非常精密且高度可重复。一个晶圆上制造的所有 MEMS 麦克风元件都具有相同的性能,不仅如此,而且在该产品的多年生命周期中,不同晶圆上的每一个元件也都具有相同的性能。

硅制造是在严格控制的环境中,利用一系列沉积和蚀刻工艺,产生金属和多晶硅的形状集合以形成 MEMS 麦克风。生产 MEMS 麦克风涉及到的几何结构是微米( $\mu\text{m}$ )级。声波所经过的背板中的孔直径可以小于  $10\ \mu\text{m}$ ,薄膜厚度可以是  $1\ \mu\text{m}$  左右。薄膜与背板之间的间隙仅有数微米。图 2 所示为典型 MEMS 麦克风传感器元件的 SEM 图像,从顶部(薄膜)观看。图 3 所示为该麦克风元件中部的截面图。在该设计中,声波通过元件底部的空腔进入麦克风,并穿过背板孔以激励薄膜。

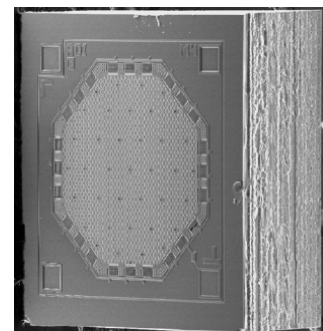


图 2. MEMS 麦克风的 SEM 图像

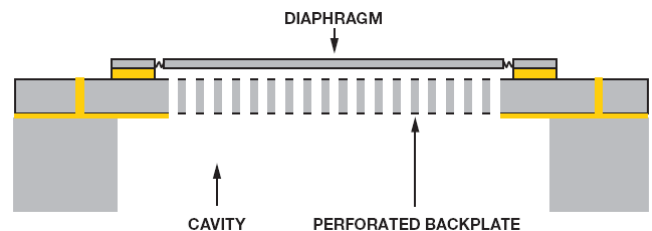


图 3. MEMS 麦克风的横截面

由于几何结构在制造工艺中受到严格控制，因此不同麦克风的实测性能具有高度可重复性。利用 MEMS 技术构建麦克风的另一个优势是薄膜极小，因此其质量非常小，相比于薄膜质量大得多的 ECM，MEMS 麦克风不易受振动影响。

### 发展、可重复性和稳定性

MEMS 麦克风已发展到很高的水平，它已成为很多要求小尺寸和高性能的音频捕捉应用的默认选择，但大部分商用级麦克风并不适合助听器行业，因为后者要求小得多的器件、更低的功耗、更好的噪声性能以及更高的可靠性、环境稳定性和器件间可重复性。MEMS 麦克风技术现在已经能够满足上述所有要求：超小型封装、极低功耗以及极低的等效输入噪声。

硅制造工艺的严格控制措施令 MEMS 麦克风的稳定性和器件间性能差异显著优于 ECM。图 4 所示为相同型号的数个 MEMS 麦克风的归一化频率响应，图 5 所示为不同 ECM 的归一化频率响应。各 MEMS 麦克风的频率响应几乎一致，而 ECM 的频率响应则显示出相当大的器件间差异，尤其是在高频和低频时。

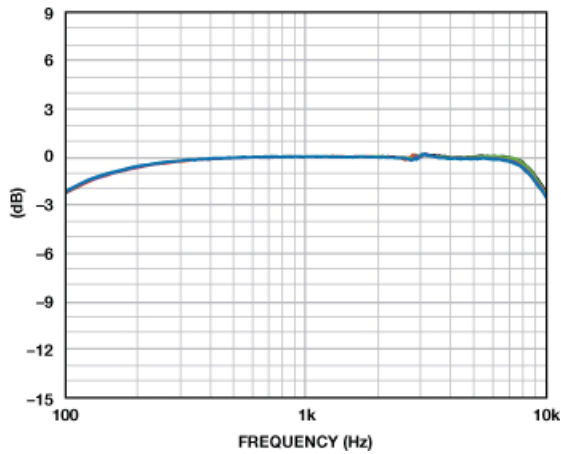


图 4. 数个 MEMS 麦克风的频率响应

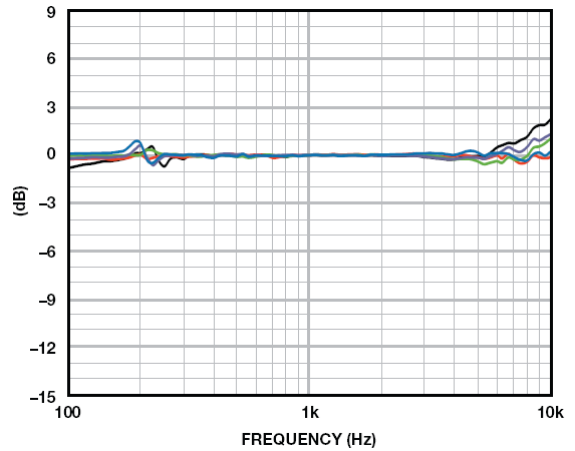
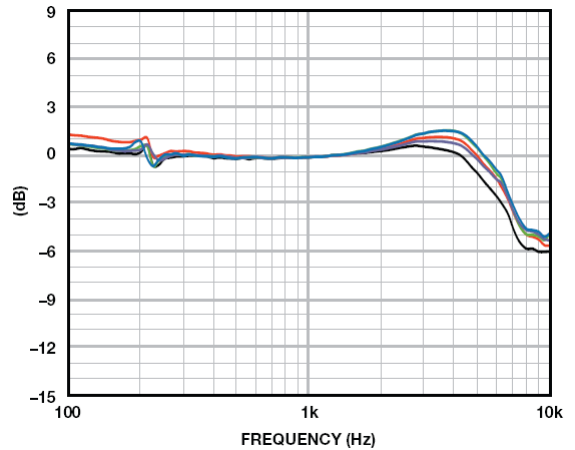
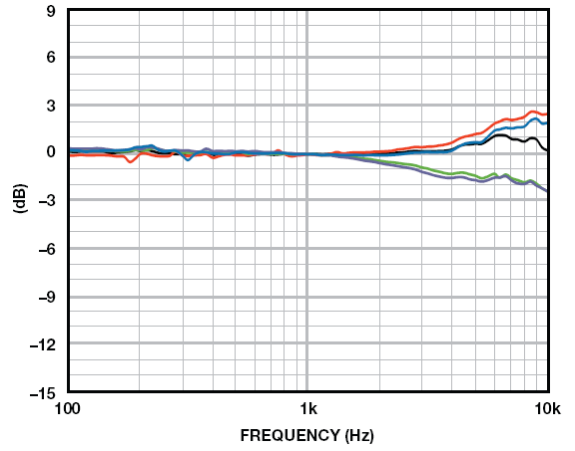


图 5. 三组 ECM 麦克风的频率响应

MEMS 麦克风还表现出卓越的宽温度范围稳定性。图 6 所示为环境温度在-40°C 至+85°C 之间改变时灵敏度的变化。黑线显示：在 MEMS 麦克风的温度范围内，灵敏度变化小于 0.5 dB；而 ECM 则表现出最多 8 dB 的变化。

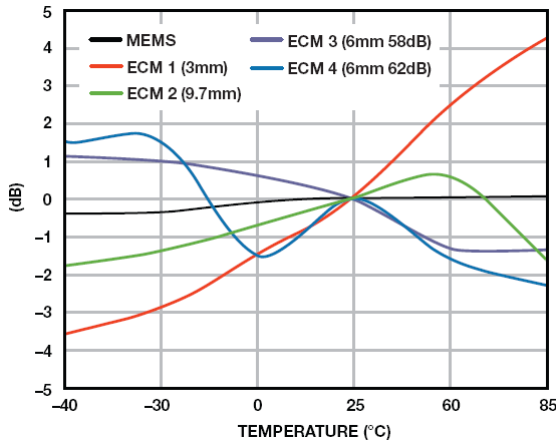


图 6. 对振动的灵敏度与温度的关系：MEMS 与 ECM

相比于 ECM，MEMS 麦克风设计的电源抑制性能显著提高，典型电源抑制比(PSRR)优于-50 dB。在 ECM 上，输出信号和偏置电压（电源）共用一个引脚，电源上的任何纹波都会直接出现在输出信号上。MEMS 麦克风优异的 PSRR 为音频电路设计提供的自由度是 ECM 无法比拟的。器件数量和系统成本得以降低。

在助听器之类电池供电的微型应用中，每毫瓦功耗都至关重要。当助听器正在工作时，麦克风无法通过周期供电来节省功耗。因此，麦克风的工作功耗极为重要。采用典型的锌空气电池电压(0.9 V-1.4 V)供电时，助听器所用典型 ECM 麦克风的功耗为 35  $\mu$ A。而在相同电压下，助听器所用 MEMS 麦克风的功耗可以降低至一半，使得助听器装一次电池可以使用更长时间。

最新一代 MEMS 麦克风拥有助听器行业要求的出色噪声和功耗性能。ADI 公司利用 20 多年的 MEMS 技术经验来打造可用于助听器市场的高性能麦克风。典型全向 MEMS 麦克风的等效输入噪声(EIN)特性为 27.5 dB SPL (A 加权、8 kHz 带宽)，适合助听应用。 $\frac{1}{3}$ 倍频程 EIN 噪声性能通常用于指定助听器用麦克风，在低频时非常出色，如图 7 所示。实现如此高的噪声性能只需 17  $\mu$ A 功耗（采用典型助听器电池电压）。麦克风提供微型封装，总体积小于 7.5 mm<sup>3</sup>，如图 8 所示。

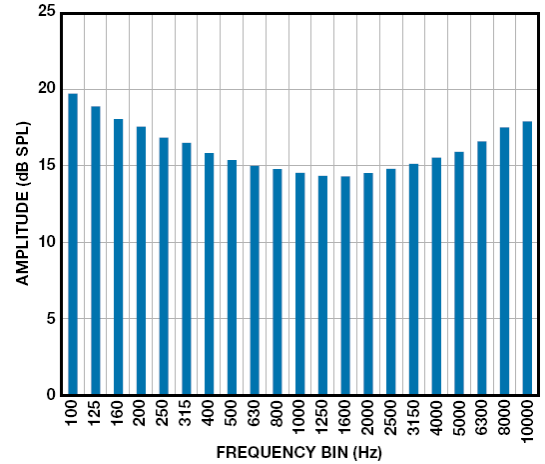


图 7. MEMS 麦克风的  $\frac{1}{3}$  倍频程噪声

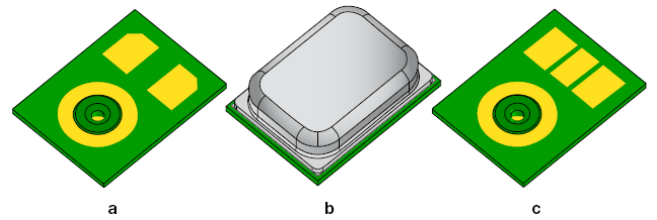


图 8. 助听器用全向 MEMS 麦克风

a) 仰视图；b) 俯视图；c) 便于手工焊接的封装俯视图

## 结论

新型高性能、低功耗 MEMS 麦克风证明它将是适用于助听器的下一代麦克风技术。MEMS 麦克风在性能上可与许多助听器 ECM 相竞争，并在很多方面超过 ECM 技术，例如可重复性、稳定性、尺寸、可制造性和功耗等。MEMS 麦克风是助听器的未来，而未来已经到来。

## 作者简介

**Jerad Lewis** [jlewis@invensense.com] 是 InvenSense, Inc. 的 MEMS 麦克风应用工程师。他于 2001 年获得美国宾州州立大学电气工程学士学位，目前正在攻读声学工程硕士学位。转职到 InvenSense 之前，Jerad 在 ADI 公司工作，负责支持各种音频 IC，包括 SigmaDSP<sup>®</sup>、转换器和 MEMS 麦克风。



**Brian Moss 博士** 是 InvenSense 的应用工程师。他于 1996 年获得英国伦敦伦敦密德萨斯大学工程学士（荣誉）学位，2011 年以题为“利用被动声学测量受约束气流温度”的研究成果获得哲学博士学位。转职到 InvenSense 之前，Brian 在 ADI 公司工作，同时兼任利默里克大学讲师。

