

水下声成像 PVDF-DMOS 换能器

袁 易 全

沈 寿 彭

(南 京 工 学 院)

(中国科学院上海有机化学研究所)

1983 年 8 月 5 日收到

本文通过研制水下声成像 PVDF-DMOS 集成接收换能器,分析了高分子压电薄膜在水声中应用的新途径及其组成换能器的振动模式,建立了机电等效电路图。并分析了影响器件灵敏度的诸因素。介绍了本工作的测量结果,评价了器件的特性。本文可供设计各种 PVDF 压电换能器、传感器时参考。

表 1 不同材料的声学特性^[1]

物 质	密度 10^3kg/m^3	声速 10^3m/s	声阻抗率 $10^4 \text{Pa} \cdot \text{s/m}$
水	1.00	1.50	1.5
PVDF	1.80	2.10	3.7
PZT-5A	7.75	4.35	33.7
黄铜	8.5	4.40	37.0
环氧树脂	1.20	2.50	3.0
瓷	2.41	4.88	11.7
聚四氟乙烯	2.20	1.38	3.05

一、引 言

近年来,由于海洋开发的需要,国内外正在加紧研制一种可在浑浊水中显物像的声全息装置^[1]。它们通常采用 PZT 压电陶瓷单元组成阵列。因 PZT 元件有很高的有效机电耦合系数、低阻抗和价格便宜等优点,故目前仍然是水下声成像经常使用的元件。但 PZT 的声阻抗率比水介质的 20 多倍,从而产生声阻抗严重失匹,招致灵敏度降低,带宽变窄。这虽可采用前、后匹配层获得改善^[2],但并不能从根本上给予解决,反而增加了工艺上一系列麻烦。

倘采用聚偏二氟乙烯 (Polyvinylidene fluoride) 即简称 PVDF 作换能材料,因它有较低的声阻抗率,见表 1^[3],故它不需要前、后匹配

层,就可获得较好的灵敏度、带宽;它柔顺性好,不易破碎和压电常数 g 高,见表 2^[4];它可实现准静态、音频、超声直至 100MHz 的机电换能,并耐湿度,时间稳定性好^[5];它从低频至 17MHz (30 μm 厚的薄膜)接收灵敏度频响变化不超过 6dB^[6]。它已成功地应用于 2.5MHz 医疗成像线列阵。本工作则是为研制低频段 200—400

表 2 PVDF、压电晶体和压电陶瓷的一些物理常数^[4]

物 质	切 向	密 度 10^3kg/m^3	弹性模量 10^9Pa	介电常数 ϵ/ϵ_0	压 电 常 数		耦合系数 $k\%$
					$d(10^{-12} \text{C/N})$	$g(10^{-3} \text{V} \cdot \text{m/N})$	
石 英	X	2.65	77.2	4.5	2	50	10
罗 歇 盐	45° X	1.77	17.7	350	275	90	73
BaTiO ₃	Z	5.7	110	1700	78	5.2	21
PZT	Z	7.5	83.3	1200	110	10	30
PVF ₂ /PZT	Z	3.5	4.0	55	69	47.1	6.6
PVDF	Z	1.76	3.0	13	20	174	19

kHz 水下声成像线、面阵列,而进行的换能单元件试验.本文分析了单元结构的振动模式,建立了机电等效电路图.并综述了影响换能器灵敏度的诸因素.通过预研,初步获得了理论与实验的一致性.

二、换能器单元结构

本工作的 PVDF-DMOS 换能器与高频器件^[6]相似,有声学结构和 DMOS 集成电学结构.但此处因是低频,阵元尺寸大,已分成完全独立的两部分组装.它的优点是工艺简化、灵活性大和接收灵敏度高.

PVDF-DMOS 换能器声学结构原理见图 1. PVDF 前面沉积一层铝电极并电学接地,背

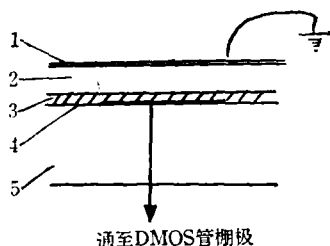


图 1 声学结构原理图

1. 铝电极层, 2. PVDF 层, 3. 胶粘层,
4. 下电极, 5. 陶瓷衬底层.

后用胶贴在陶瓷板上,该陶瓷板厚度近似满足刚性障板物理边界条件;并在瓷板上先敷设好极薄的金属下电极,电极尺寸和形状根据声成像的声学方向特性要求,设计成直径为 3.5mm 的圆盘.下电极通至 DMOS 管栅极.当声波传输至压电薄膜上,交变的纵波声讯号调制着压电薄膜体;由于压电效应,在压电薄膜下电极上感应出相应的、线性的交变电讯号,并直接馈送给 DMOS 管栅极.

DMOS 管具有 $10^8 \sim 10^{10} \Omega$ 的高输入电阻,并集成具有 20 多倍电压放大的线性电路.该 DMOS 集成电学系统具有输入电阻抗高、体积小、自噪声低和输出电阻抗低等特点.经南京工学院半导体研究室试制 DMOS 管,后由半导体工厂集该电学器件成微片系统.

三、换能器振动模式及等效图

由于 PVDF 质地柔韧,它的弹性模量比 PZT 小 28 倍,见表 2. 故产生横向切应变甚微,激发和传感的振动模式极单纯.图 2 为中国科学院上海有机化学研究所提供的 PVDF 压电薄膜在阶跃压力作用下,获得的电波形.因此,倘用单面沉积好电极的整张 PVDF 压电薄膜,复盖(密合)数百个小电极阵列后,有下电极部位,因而被激活;且阵列间横向切变耦合甚微,可忽略.故真正有压电响应的仅是那些下电极与上电极所组成的圆盘振子阵列.

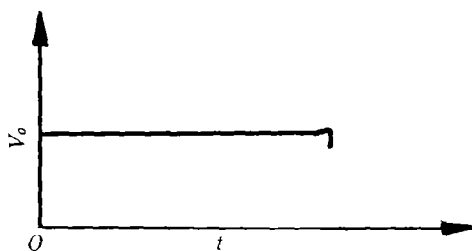


图 2 阶跃压力作用下的电波形

另外,被激活的圆盘振子,厚 ($30 \mu\text{m}$) 与直径 (3.5mm) 相比甚小,故可简化计算为厚向一维纵波模式,采用标准薄板的“厚度”模型,即 Mason 模型^[7]. 又因膜粘贴在高阻抗陶瓷板上,接收声波端是低声阻抗水介质(暂略去胶层和保护层影响).相当于一端固定、一端自由的边界条件,从声传输线原理分析,必呈四分之一波长振型.它的机电等效电路图如图 3 所示.

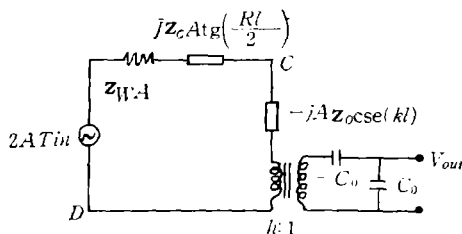


图 3 四分之一波长振型 Mason 模型等效图

图 3 中, Z_w 为水介质的声阻抗率; A 为下电极表面积; T_{in} 为声学输入应力; k 为 PVD_F

中的波数; l 为压电薄膜厚度; $\bar{Z}_0$ 为 PVDF 的声阻抗率; C_0 为薄膜圆盘的静态电容; V_{out} 为戴维宁等效输出电压; h 为电力转换系数。由图 3 可得接收灵敏度表达式:

$$M_1 = \frac{V_{out}}{T_{in}} = \left(\frac{2h}{j\omega C_0} \right) \left\{ \frac{1}{Z_w(1 - j(\bar{Z}_0/Z_w)\cot(kl))} \right\} \quad (1)$$

$$h = \frac{A}{l} e_{33} \quad (2)$$

式中: e_{33} 为压电常数(本工作 $e_{33}=0.15\text{C/m}^2$); $\omega = 2\pi f$ (f 为工作频率 200kHz); $k = 2\pi/\lambda = \omega/C$ (C 为 PVDF 中的声速); $C_0 = \epsilon_p(A\epsilon_0/l)$ (ϵ_p 为 PVDF 的介电常数); $A = \pi d^2/4$ ($d = 3.5\text{mm}$); $l = 30\mu\text{m}$ 。

由方程(1)并将以上参数代入,以薄膜厚向 $\lambda/4$ 谐振峰值(约 17MHz)处作归一化处理,经计算机计算出的灵敏度随频率变化的理想响应曲线示于图 4,在 200kHz 处的计算值为 $0.10\text{V}\cdot\text{cm}^2/\text{N}$ 。

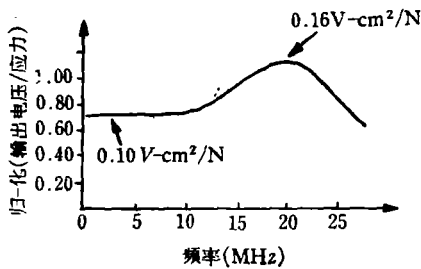


图 4 接收灵敏度随频率变化的理想曲线

四、接收灵敏度的实际修正

实践证明, PVDF 薄膜靠胶粘剂密合在陶瓷板上,因自身极薄,胶层厚度应远小于它,否则对灵敏度影响极大。胶层减薄工艺对性能的优劣起着十分关键的作用。主要原因为:

1. 声学原因 主要是胶粘层的声阻抗率,既不同于瓷板,又不同于 PVDF。从声传输原理看,相当于在图 3 上的 C 点对 D 点插入一个

振速“分流”的声阻抗元件,它的数值为

$$Z_d = (AZ_i/j\text{tg}kl) + jA\bar{Z}_0\text{tg}(kl/2) \quad (3)$$

式中 Z_i 为胶粘层的声阻抗率; l 为胶粘层厚度; k 为胶粘层中的波数。

当 l 越薄、 Z_i 越高,则分流作用越小,灵敏度损失越少。当 $l = \lambda/4$ (λ 为胶层中的波长),若胶层为环氧, l 厚为 2.6mm ,式(3)的第一项等于零,这时振子将呈现半波长振型,灵敏度将达到最大限度的下降值。

2. 电学原因 主要是胶粘层的串联耦合电容 C_B 产生分压作用,因而降低接收灵敏度。

$$C_B = \epsilon_B \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot A}{l} \quad (4)$$

式中 ϵ_B 为胶粘层的介电常数

当 l 越薄、介电常数 ϵ_B 越大,则 C_B 越大,分压作用将减小,灵敏度损失亦少。实践体会到,当 $l \gg 30\mu\text{m}$,由 C_B 带来的损失最为严重。

3. 力学原因 主要是胶层的弹性模量与 PVDF 不同;并且胶层越厚,等价于振子非激活成份比例增加,会降低有效机电耦合系数,需对 K_{eff}^{*2} 加以修正:

$$K_{eff}^{*2} = K_{eff}^2/[1 + (1 - K_{33}^2)S_0/S_t] \quad (5)$$

式中 K_{eff}^{*2} 为修正后的有效机电耦合系数; K_{eff} 为修正前的有效机电耦合系数; $S_0 = l/AE_{33}$, E_{33} 为 PVDF 的弹性模量; $S_t = l/AE_t$, E_t 为胶层的弹性模量。

$$K_{33}^2 = d_{33}^2/S_{33}^E\epsilon_{33}^T \quad (6)$$

式中 K_{33} 、 d_{33} 、 S_{33}^E 、 ϵ_{33}^T 分别为纵向机电耦合系数、纵向压电系数、纵向顺性常数、纵向自由介电常数。

倘粗略估计,用环氧作胶层,厚度达 PVDF 的 $1/3$,有效机电耦合系数将下降 10% 左右。

其次, DMOS 管栅、源间电容 C_g ,会影响接收灵敏度。低频较高频要好些;由于本研制方案将电学和声学结构分立组装,可大大改善“POSFET”型^[6]结构的缺点,提高灵敏度约 6 倍,因本工作的 DMOS 集成器件 C_g 仅为 $10\sim 20\text{PF}$ 。

综合上述各种电学影响,可采用图 5 模型,修正值为

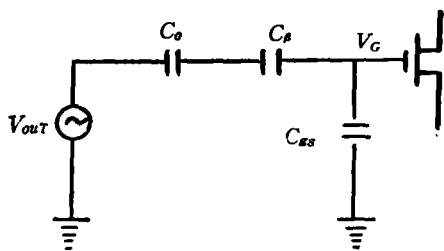


图5 PVDF-DMOS 结构等效图

$$V_G/V_{out} = C_0 C_B / [C_0 C_B + C_0 C_{gs} + C_B C_{gs}] \quad (7)$$

式(7)对于从直流至 17MHz 谐振点频段内都是有效的。综上所述,可得出如下结论:减小 C_{gs} , 增大 C_B , 提高 Z_d 以及提高 K_{eff}^2 , 是提高该器件系统接收灵敏度之关键。而主要决定因素是减低胶层的厚度。最后,整个系统灵敏度完整的表达式可近似写成

$$M = M_1 \cdot \frac{K_{eff}^*}{K_{eff}} \cdot \left[\frac{C_0 C_B}{C_0 C_B + C_0 C_{gs} + C_B C_{gs}} \right] \cdot K \cdot K_d \cdot K_p \quad (8)$$

式中 K 为集成放大器电压增益(K 约 20 左右);

K_d 为振速“分流”带来的修正系数(通常 $K_d = 1-0.5$); K_{eff}^*/K_{eff} 约为 $1-0.8$; K_p 为修正 PVDF 薄膜的保护层厚度不同时的系数(K_p 约为 $1-0.5$)。令总的修正系数为

$$G = (K_{eff}^*/K_{eff}) \cdot \left(\frac{C_0 C_B}{C_0 C_B + C_0 C_{gs} + C_B C_{gs}} \right) \cdot K_d \cdot K_p \quad (9)$$

则式(8)可写成

$$M = M_1 \cdot K \cdot G \quad (10)$$

经测定,本工作的 PVDF-DMOS 换能器的 G 值最大可达 0.33,实测值见本文后面表 4。

五、测试结果

表 3 列出了由比较法测定的平面等间隔四元阵的各 PVDF-DMOS 换能器特性。平面四元阵的中心间距为 9mm,基元直径为 3.5mm,测施频率为 200kHz。该四只基元的胶层厚度不全相同,故相应换能器特性差别很显著。

表 4 的测定值,为附加 1mm 厚度的聚四氟乙烯保护层及胶层用钟表油耦合的 PVDF-DMOS 换能器特性指标。其余结构同前。

表 3 胶层厚度不同时的性能比较

换能器编号	胶层厚度 (μm)	放大倍数 (K)	未经放大器接收值 (mv)	经放大器接收值 (mv)	灵敏度 (dB)
1	22	20	0.038	21.6	-224.0
2	15	22	0.030	34.4	-220.0
3	8	22.5	0.083	82.2	-212.3
4	15	21.5	0.029	31.2	-220.7

注:标准水听器在消声水池内的测量值为 60mv [水听器灵敏度 200kHz 时为 -215dB (0dB = 1V/ μPa)]; 测定比较时均为垂射方向和相同距离处,四只换能器其余条件均相同。

表 4 PVDF-DMOS 换能器实测性能指标

项目	基元直径 (mm)	胶层厚度 (μm)	工作频率 (kHz)	灵敏度 (dB)	38°视角内灵敏度 起伏 (dB)	集成放大器带宽 (MHz)	电学串漏 (dB)	折算至输入端自 噪声 (μv)
指标	3.5	4	200	-205	< ± 1.2	1.5 以下平坦	< -50	18

注:用比较法测定时标准水听器测量值 70mv(水听器在 200kHz 时的灵敏度为 -215dB); DMOS 集成电学系统放大倍数 K 为 21.5; 电学参数测量方法略。

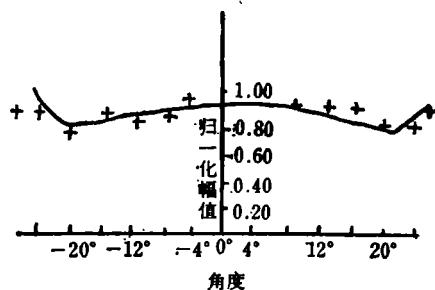


图6 理论与实测方向性图

——理论值, ++++实测值

图6为该换能器的实测方向性图。测量方法为发射换能器固定,旋转被测PVDF-DMOS换能器。图6上的理论值,详见文献[9]。

六、结 论

1. PVDF-DMOS单元结构简单,性能优良,安装方便,重量轻,适合制作水下声成像接收阵列;2. 该接收单元的主要特点是:频响较宽^[6],实际接收灵敏度与PZT单元相当,性能稳定^[5]。但器件的自噪声较PZT单元高(因PVDF薄膜介电损耗大,有待今后改善);胶层减薄工艺要求极严格,但较之PZT单元易于达到一致性;3. 由于本工作PVDF与DMOS集成电路分头组装,形成输出电阻抗很低的传感系统,并且从低频(准直流)至高频(甚至100MHz)均能实现声和电、压力和电的转换。可以预言,它的应用将越来越扩大。

参 考 文 献

- [1] J. L. Sutton, *Proceedings of the IEEE*, 67-4 (1979), 554.
- [2] C. Desilers, J. Fraser, *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, SU-25-3 (1978), 115.
- [3] H. R. Gallantree, *Marconi Rev.*, 45(224) (1982), 49.
- [4] N. Muragama, K. Nakamura, *Ultrasonics*, 14-1 (1976), 15.
- [5] 陈秉启等,有机化学, 3(1983), 191.
- [6] R. G. Swartz and J. D. Plummer, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-26-12(1979), 1921.
- [7] D. Berlincourt, "Piezoelectric Crystals and Ceramics" in *Ultrasonic Transducer Materials*, O. E. Mattiat, Ed. New York: Plenum, 1971, 74.
- [8] R. S. Wollett, *J. Acoust. Soc. Am.*, 40(1966), 1112.
- [9] 袁易全,郑汶辉,南京工学院学报, 1(1985), 81.

(上接第37页)

参 考 文 献

- [1] E. Mori, et al., *The Eighth International Congress on Acoustics*, Vol. II, 1974, 426.
- [2] 日本音响学会讲演论文集, 1976, 375—376.
- [3] 日本音响学会讲演论文集, 1977, 423—424.
- [4] H. Bannv, et al., *Ultrasonics*, 17 (1979), 63—66.
- [5] 林仲茂等, 第三届全国功率超声学术会议论文摘要, 1981.
- [6] 牛勇, 第三届全国功率超声学术会议论文摘要, 1981.
- [7] L. Filipczynski and Lin Dzon-mou (林仲茂), *Proceedings of vibration problems*, Warsaw, 2-4 (1963), 155—174.
- [8] E. G. Richardson, et al., *Technical Aspects of Sound*, Vol. II, 1957, 80—81.