

以及表 1 和表 2, 可以从理论上分析任何声光信号处理系统, 并可预言声-光处理系统的新方案。

### 参 考 文 献

- [1] W. T. Rhodes, *Proc. IEEE*, 69-1 (1981), 65.
- [2] T. M. Turpin, *Proc. SPIE (Real Time Signal Processor)*, 154(1978), 196.
- [3] P. Kellman, *Proc. 1978 Int. Opt. Compu. Conf. (Digest of Paper)*, 1978, 91.
- [4] J. D. Cohen, *Proc. SPIE (Real Time Signal Processor II)*, 180(1979), 134.
- [5] P. Kellman, *Proc. SPIE (Optical Processing Systems)*, 185(1979), 130.
- [6] F. B. Rctz, *Proc. SPIE (Active Optical Devices)*, 202 (1979), 163.
- [7] R. A. Sprague and C. L. Koliopoulos, *Appl. Opt.*, 15-1(1976), 89.

# PB-1 型窄脉冲压电薄膜可逆式换能器

袁易全 邵耀梅 时炳文\*

(南京工学院)

1985 年 11 月 19 日收到

本文著者研制成 PB-1 型 PVDF 可逆式压电换能器。它的通频带较宽, 中心频率 500—900KHz, 通带  $Q$  值 1.5, 发送电压响应 [级] 148.9dB(re:1 $\mu$ Pa/V), 灵敏度 -210dB(re:1V/ $\mu$ Pa)。在水中声脉冲持续时间 7—10 $\mu$ s, 并有足够的声功率输出, 电声效率约 10%。

本文介绍了该换能器的结构、理论分析、测量结果及应用效果。证明了理论与实验的一致性。可供电声、水声、超声等其它 PVDF 传感器设计时参考。

## 一、引 言

聚偏氟乙烯 (PVDF 或称 PVF<sub>2</sub>) 压电薄膜, 自 1969 年发现以来, 各国进行了大量的基础研究和应用研究。经过十几年努力, 压电常数提高了十多倍, 广泛用于电声、水声、超声、医疗检测及各种传感器技术领域, 成为重要新型换能材料之一<sup>[1]</sup>。

PVDF 压电薄膜特点是: 压电电压  $g$  常数高,  $g_{31} = 174 \times 10^{-3} \text{V} \cdot \text{m/N}$  (80 年日本 K. F 产品指标), 比 PZT 高 17 倍; 密度只有 PZT 的四分之一; 柔性好, 机械强度高; 可一次性作成大面积阵列元件<sup>[2]</sup>; 从准直流到 500MHz 有平坦频响的可能; 振动模式单纯; 声阻抗 ( $\rho c = 3.5 \times 10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) 约仅 PZT 的十分之一。80 年代以来, 它以用来研制接收器件为主<sup>[1,3]</sup>。

但是, PVDF 能否研制发射型换能器? 仍

有争议, 多数著者<sup>[4-5]</sup>持比较否定的结论。其原因: 1. 它的介电常数低, 仅 14 (PZT1200); 2. 它的机、电损耗大, 1KHz 时温升速率 18 $^{\circ}$ C/S (PZT-5A, 仅 0.66 $^{\circ}$ C/S); 3. 它的厚向机电耦合系数  $k_t$  仅 0.11 (PZT 达 0.49)。

PVDF 可制作发射换能器, 并在窄脉冲检测领域有广泛的应用前景。其原因: 1. PZT 实心陶瓷晶堆, 当二维尺寸可以比拟时, 会遇到二维振动麻烦的耦合问题, 若采用 PVDF 就无此障碍; 2. PVDF 作水下检测用发射换能器, 水是很好的导热介质, 有利于克服温升; 3. 窄脉冲工作状态的平均电功率低, 故实际发热不严重; 4. PVDF 的声阻抗率与水接近, 故声传输效率高, 且频带宽, 相位频响线性好, 瞬态波形简单; 5. PVDF 虽介电常数低, 但通过叠层<sup>[6]</sup>, 电学上并联、声学上串联, 增加了单位电

\* 中国科学院上海有机化学研究所实验师。

表1 国内外典型 PVDF 压电薄膜性能比较

日期(年、月、日)	室温 (°C)	国产膜*		K、F膜**	
		$d_{31}$ (PC/N)	$g_{31}(10^{-3}\text{Vm}/\text{N})$	$d_{31}(\text{PC}/\text{N})$	$g_{31}(10^{-3}\text{Vm}/\text{N})$
1984.12.12	10	23.5	230	18.5	152
1985. 3.15	11	23.6	230	18.6	154
1984. 4. 6	13	24.1	230	18.7	154
1985. 6. 5	22	26.1	244	20.6	170
1984. 7.23	29	27.4	246	20.9	172
1985. 9.12	29	27.7	250	21.5	175

\* 中国科学院上海有机化学研究所 1983 年 12 月样本;

\*\* 日本吴羽公司 (K、F) 1980 年样本.

注: 表内数据系在同一测试系统上获取(测量误差  $\pm 2.5\%$ ).

压的声输出功率; 6. PVDF 压电性能近年来有了可观的提高(见表 1). 表 1 表明三点 a. PVDF 的时间稳定性很好; b. PVDF 压电性随温度升高而略有上升(指  $60^\circ\text{C}$  以下范围); c. 我国 83 年样本达到或超过日本 80 年产生的 PVDF 压电性.

综上所述, 倘采用 PVDF 作发射型窄脉冲压电换能器, 它能起到 PZT 起不到的突破作用. 本文将介绍 PVDF-BFUT-1 型(简称 PB-1 型)窄脉冲可逆式超声换能器的结构、理论及应用效果. 证明理论分析与实验结果的一致性.

## 二、换能器结构

PB-1 型换能器结构原理如图 1 所示. 它的外形照片如图 2. 图 1 中 1. 金属外壳, 2. 透声保护层, 3. 多层叠合 PVDF 压电薄膜, 4. 球冠曲面 ( $a \gg 12\text{mm}$ ) 高阻抗硬背衬, 5. 后端金属外壳, 6. 电极引线, 7. 末端电缆, 8. 绝缘架, 9. 吸声背衬, 10. “0”形橡皮圈.

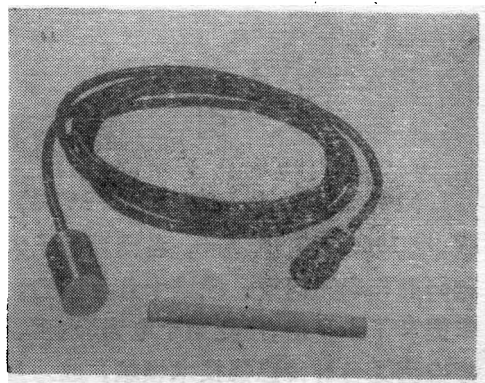


图 2 换能器外形照片

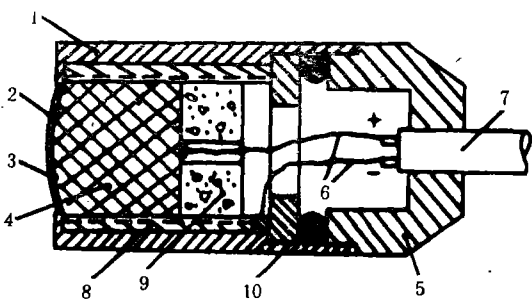


图 1 PB-1 型换能器结构

输原理知, 图 1 换能器呈  $\lambda/4$  振型, 能按梅森 (Mason) 等效图<sup>[7]</sup>描述, 如图 3 所示.

## 三、理论分析

### 1. 传递函数特性

PVDF 贴在球冠面高阻抗基底上, 当简谐电压激励薄膜时, 因压电效应, 薄膜体厚度将沿界面法向作简谐振动. 前端是水介质, 由声传

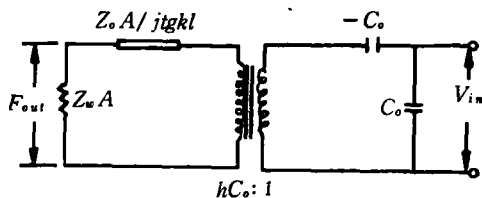


图 3 硬背衬 PVDF 发射换能器 Mason 等效图

恒压源激励时,传递函数为

$$\frac{F_{out}}{V_{in}} = \frac{hc_0}{1 - (j\bar{Z}_0/Z_w)\cot kl + (jh^2c_0/\omega Z_w A)} \quad (1)$$

输出声功率为

$$P_{out} = |F_{out}|^2 / 2Z_w A \quad (2)$$

式中:  $F_{out}$  是输出力;  $Z_w A$  是水负载的力阻抗;  $C_0$  是多层压电薄膜叠层的并联静态电容;  $\bar{Z}_0$  是压电薄膜的声阻抗率;  $h$  是压电常数;  $l$  是膜厚度;  $\omega$  是角频率;  $k$  是薄膜波数。

恒流源激励时,传递函数为<sup>[4]</sup>

$$\frac{F_{out}}{I_{in}} = \frac{h}{j\omega} \frac{1}{1 - (j\bar{Z}_0/Z_w)\cot kl} \quad (3)$$

在远低于谐振频率条件下,声输出功率为

$$P_{out} = \frac{|I_{in}|^2 \cdot R_A}{2} \quad (4)$$

式中  $R_A$  为辐射阻,  $I_{in}$  为激励电流(恒定值)。

按式(3)、(4)计算表明:当  $ka_p > 2$  ( $k$  为水中波数,  $a_p$  为球冠等效半径)辐射阻近与频率无关<sup>[8]</sup>,故在电流源激励下易获得恒定声功率,比恒压源下有更宽的平坦功率频响。即在硬背衬、 $\lambda/4$  振型及低频条件下,任何电场引起的应变,都能转变成换能器前端面的位移。

## 2. 通带特性

$\lambda/4$  振型、接近均匀活塞的 PVDF 发射换能器,在工程上可采用集中参数近似估算等效图声端等效  $Q$  值,为

$$Q_a = \frac{f}{\Delta f} = \frac{M\omega}{\rho_0 c_0 A + R_m} = \frac{\frac{\pi}{4} \rho c A}{\rho_0 c_0 A + R_m} \quad (5)$$

$$R_m = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\rho c A}{Q_m} \quad (6)$$

$$Q_m = \frac{1}{\text{tg } \delta_M + K_t^2 \text{tg } \delta_D} \quad (7)$$

式中  $\Delta f$  为 3 dB 通频带宽度;  $M$  为等效质量 ( $\lambda/4$  振型  $M = \frac{1}{4} \rho A l$ );  $A$  为辐射面积;  $l$  为薄膜总厚度;  $\rho c$ 、 $\rho_0 c_0$  分别为多层薄膜(含胶层)与水的声阻抗率;  $\text{tg } \delta_M$  为薄膜材料的机械损耗;  $K_t$  为薄膜厚向机电耦合系数;  $\text{tg } \delta_D$  为薄膜材料介电损耗;  $Q_m$  为空载时损耗换能器的

应用声学

品质因数。按文献[5]数据  $\text{tg } \delta_M = \frac{1}{14}$ ,  $\text{tg } \delta_D = 0.16-0.2$ , 计算得  $Q_m = 5.3-6$ 。

当换能器电端用恒流源激励时,发送功率频响通带  $Q$  值由  $Q_a$  决定。据上述数据,经运算  $Q = Q_a = 1.5$ , 此值与实测均值符合得相当好(见表3)。

## 3. 效率及导纳特性

电声效率为

$$\eta_{e/c} = \frac{P_A}{(P_A + P_D + P_M)} \quad (8)$$

根据文献[5]有

$$P_A = 2\pi f E^2 \epsilon' K_t^2 Q_L \left( \frac{Q_N}{Q_N + Q_L} \right) \quad (9)$$

$$P_D = 2\pi f E^2 \epsilon' \text{tg } \delta_D \quad (10)$$

$$P_M = 2\pi f E^2 \epsilon' K_t^2 Q_L \left( \frac{Q_N}{Q_N + Q_L} \right) \quad (11)$$

式中  $P_A$ 、 $P_D$  及  $P_M$  分别为 PVDF 压电元件单位体积声功率、介电损耗功率及机械损耗功率;  $E$  为电场强度;  $\epsilon'$  为静态介电常数;  $Q_N$  为由插入损耗阻折算的机械  $Q$  值;  $Q_L$  为由辐射阻与插入损耗阻折算的机械  $Q$  值。

由式(9)、(10)、(11)代入(8)经推导可得

$$\eta_{e/c} = \frac{Q_N}{(Q_N + Q_L)[1 + (\text{tg } \delta_D / K_t^2 Q_L)]} \quad (12)$$

按  $g_{31} = 174 \times 10^{-3} \text{V} \cdot \text{m/N}$  对应  $K_t = 0.11$ ; 今  $g_{31}$  已达  $240 \times 10^{-3} \text{V} \cdot \text{m/N}$ ,  $K_t$  相应提高为 0.14; 按  $Q_N$ 、 $Q_L$  的定义,

$$\frac{1}{Q_L} \doteq \frac{1}{Q_a} - \frac{\text{tg } \delta_D}{K_t^2};$$

$$\frac{1}{Q_N} \doteq \frac{1}{Q_M};$$

经简单运算,理论电声效率为 12—15%。实测结果为 8—12% (见表4)。两者基本一致。

关于输入导纳(或阻抗)可参照文献[5]计算。  $Z_{im} = \text{Re} Z_{im} + j \text{Im} Z_{im}$ ;  $\text{Re} Z_{im} = R_D + R_M + R_A$ ; 同样,  $\text{Im} Z_{im} = X_{C_0'} + X_M + X_A$ ;  $X_{C_0'} = \frac{1}{\omega C_0'}$ ;  $C_0' = C_0(1 + \text{tg}^2 \delta_D)$ ;  $C_0$  为 PVDF 静态电容。

#### 4. 输出声功率

Linvil<sup>[6]</sup> 首先提出叠层方法, 如图 4 所示. 图中压电薄膜是极性交叉叠放. 它在电学上是并联; 在声学上是串联. 其特点: a. 换能器在总叠厚的  $\lambda/4$  那样频率上谐振. b. 总厚不变, 按式 (9), 层数  $N$  越多, 恒电压下的声功率越大, 即

$$P_A \propto N^2$$

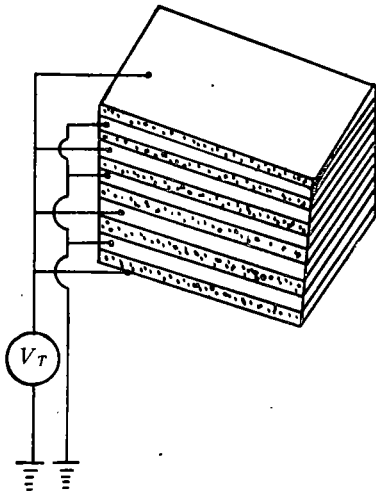


图 4 PVDF 多层叠加发射器原理

#### 5. 方向特性

PB-1 型发射换能器是一种球冠面 (见图 5) 辐射器. 它的方向特性可用球面障板上的球冠辐射器之方向特性近似计算<sup>[8]</sup>. 它为

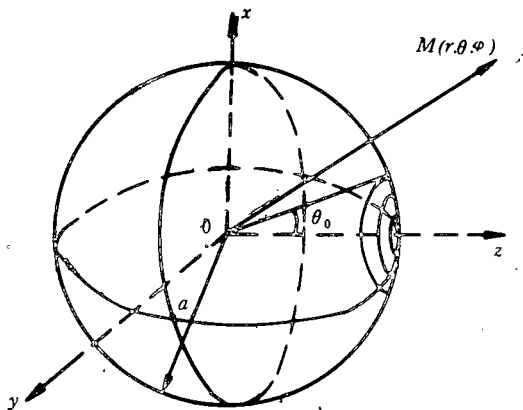


图 5 球冠辐射器示意图

$$R(\theta) = \frac{1}{ka} \sum_{m=0}^{\infty} e^{j \frac{m\pi}{2}} \cdot \left( \frac{P_{m-1}(\cos\theta_0) - P_{m+1}(\cos\theta_0)}{\frac{2dh_m^{(2)}(ka)}{d(ka)}} \right) \cdot P_m(\cos\theta) \quad (13)$$

式中  $k$  为水中波数;  $a$  球障板的曲率半径;  $S_e$

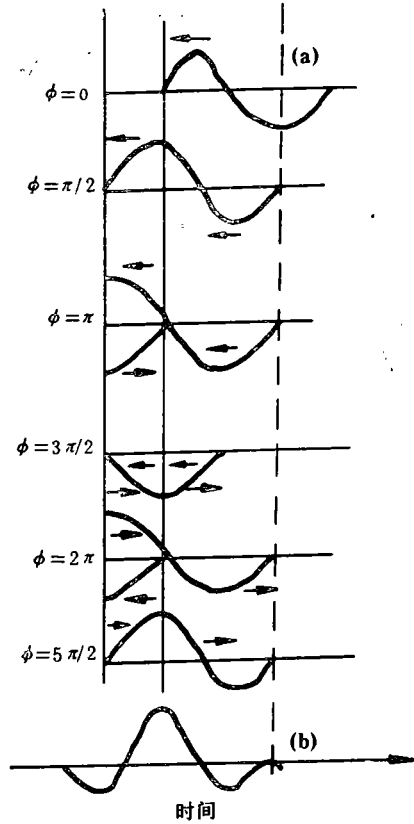


图 6 瞬态响应及应变波过程

(a) 应变波过程图, (b) 应变波电场积分分布图, (c) 窄脉冲波形图

为球冠面积 ( $S_c = 4\pi a^2 \sin(\frac{\theta_0}{2})$ );  $h_m^{(2)}$  为球汉克尔函数;  $P_m$  为勒让德函数;  $\theta$  为偏离声轴的角度. 当  $\theta_0 \rightarrow 0$  或  $a \rightarrow \infty$ ,  $R(\theta)$  可用圆盘活塞方向特性公式近似:

$$R(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (14)$$

式中:  $J_1$  为贝塞尔函数.

### 6. 接收电压灵敏度

$$M_1 = \frac{V_{out}}{T_{in}} = \left( \frac{2h}{j\omega c_0} \right) \cdot \left\{ \frac{1}{Z_w(1 - j(\bar{Z}_0/Z_w) \cot(kl))} \right\}^{[9]} \quad (15)$$

式中符号同前.

### 7. 瞬态响应特性

设辐射器正面是声匹配, 据文献 [10], 由刀刃电波形激励, 则  $\lambda/4$  谐振器的理想窄脉冲响应恰为一个周期的应变波<sup>[10]</sup>, 如图 6 所示. 图 6 (a) 是窄脉冲折回过程各时刻应变波. 应变波因压电效应直接感应出电场分布, 任一时刻总电压恰为厚度空间电场分布积分值, 如图 6 (b). 图 6(c) 表明: 背衬结构不同, 窄脉冲主波形分辨力虽相同, 但波形余振的持续时间有明显差别.

## 四、测量结果

### 1. 导纳频响曲线

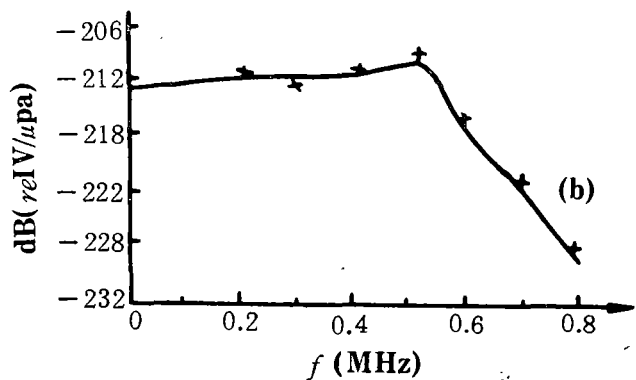
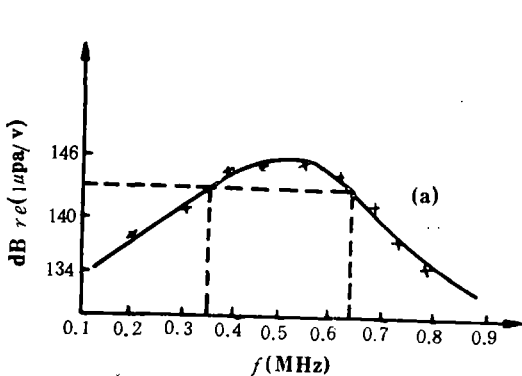


图 9 PB-1 型换能器 NO.8541 收、发频响 (a) 发送电压频响; (b) 接收电压灵敏度频响  
——理论值 ++++ 实测值

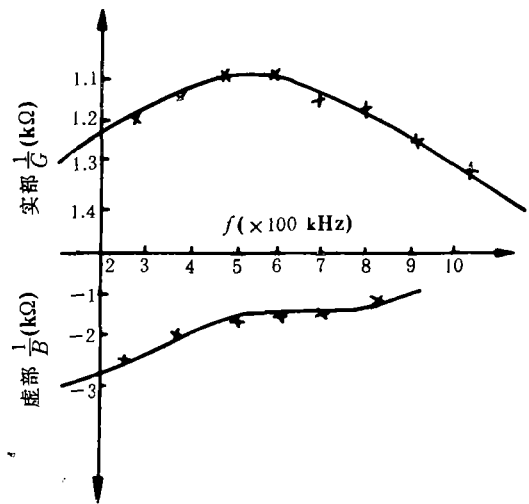


图 7 PB-1 型换能器 NO. 8522 导纳曲线  
——理论值; ++++++ 实测值

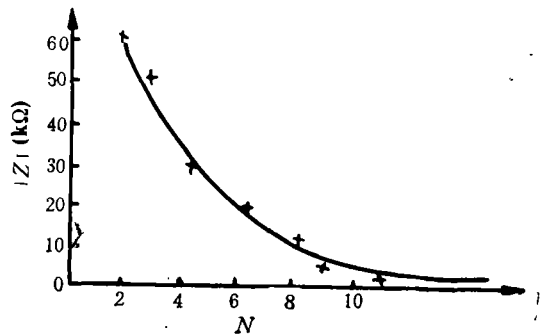


图 8  $\phi 12\text{mm}$ 、厚  $90\mu\text{m}$  PVDF, PB-1 型  $N$  与  $|Z|$  关系  
——理论值, ++++++ 实测值

PB-1 型换能器典型导纳频响曲线(计算式见文献 [5]) 如图 7 所示.

PB-1 型换能器叠层数  $N$  与谐振点输入阻抗  $|Z|$  的关系如图 8 所示。

## 2. 发送与接收频响曲线

PB-1 型换能器 NO.8541 (PVDF 9 层, 90  $\mu\text{m}$ /层) 的发送电压频响(计算式见式(2)、(3))与接收电压灵敏度频响(计算式见式(15))曲线

如图 9 所示。

## 3. 互易特性

PB-1 型换能器的互易特性见表 2。

## 4. 发送频响 $Q$ 值

PB-1 型换能器发送频响  $Q$  值见表 3 (计算式见式(5))。

表 2 PB-1 型换能器互易特性

频率 (MHz)	0.1	0.2	0.25	0.315	0.4	0.5	0.63	0.80	1.0
NO. 8541	1.1	1.5	0.8	1.9	0.8	0.9	1.1	0.9	0.8
NO. 8543	0.9	0.7	0.8	0.6	0.7	0.7	0.4	1.0	0.8
NO. 8546	1.6	1.7	1.7	1.2	1.6	1.6	1.8	1.8	1.1

注 (1) 表内为互易性偏差, 单位为 dB; (2) 数据由国家计量总局成都计量测试研究院提供。

表 3 PB-1 型换能器实测  $Q$  值 ( $\text{odB} = 1\mu\text{Pa/V}$ )

NO.	通带 $Q$ 值	厚度与直径 (mm)	背 衬	中心频率 (kHz)	发送响应 [级] dB
8522	1.5	$\phi 12 \times 1$	高阻抗	650	148.9
8526	1.5	$\phi 12 \times 1$	高阻抗	645	140.2
8544	1.0	$\phi 12 \times 0.6$	高阻抗	900	142.1
8541	1.6	$\phi 12 \times 1.15$	高阻抗	500	148.3

## 5. 方向特性

PB-1 型换能器典型方向特性如图 10 所示。图中  $f = 600\text{kHz}$ , 测定的波束开角为  $18.5^\circ$ ; 按式 (13) 计算值为  $20^\circ$ ; 按式 (14) 计算值为  $17^\circ$ 。

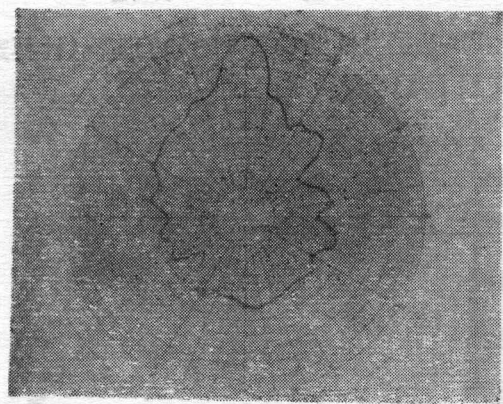


图 10 PB-1 型换能器 NO.8522 方向性图

## 五、应用举例

PB-1 型收发换能器综合指标见表 4、5、表

4 为 PVDF-DMOS NO.8504 型接收器<sup>[9]</sup>。在  $1\mu\text{s}$  宽的窄脉冲电波形, 100V 激励下 NO.8526 与 8504 在水中配合收发, 所记录的波形持续时间约  $7-9\mu\text{s}$ , 能分辨 1cm 厚石蜡板, 如图 11 所示。

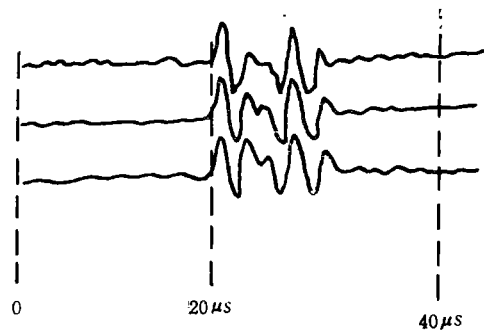


图 11 水中 1cm 厚石蜡板的检测记录

由于 PB-1 型宽带发射特性, PVDF-DMOS 接收器有更平坦的频响, 故进行窄脉冲收发, 甚至可清楚反映不同波之间的干涉现象。如在一块铝板上贴厚 10mm 有机玻璃。因水中的窄脉冲波形简单、余振短, 故绕射波与界面反射波的

表4 PB-1 NO.8526 实测指标

*探头直径 $\phi$ (mm)	12
单层 PVDF 厚度 ( $\mu\text{m}$ )	90
PVDF 层数 N	9
**阻抗 $ Z $ (k $\Omega$ )	1.8
接收电压灵敏度 (dB)	-210
谐振频率 (kHz)	640
3dB 通带 (kHz)	440
通带 Q 值	1.5
电声效率 $\eta_{ae}$	10%
600kHz 波束开角(度)	19
最大发送电压响应 (dB)	140.2
自重 (N)	1.5

\* 球冠面硬背衬,

\*\* 64kHz 测定值.

表5 PVDF-DMOS NO.8504 实测指标

圆盘接收面直径 $\phi$ (mm)	10
单层 PVDF 厚度 ( $\mu\text{m}$ )	75
PVDF 层数 N	1
DMOS 增益(倍)	18
*接收电压灵敏度 (dB)	-189.4 $\pm$ 1.3
200kHz 波束开角(度)	34
端折算自噪声 ( $\mu\text{V}$ )	<15
电缆长度 (m)	2.5
前放输出阻抗 (k $\Omega$ )	2
供电电压(直流, V)	12
自重 (N)	约 1.5

\* 指在 100kHz—1MHz 频段,由国家计量总局成都计量测试研究院测定.

干涉波分辨得非常清楚.

## 六、结 论

1. PVDF 声阻抗与水接近,采用  $\lambda/4$  振型

# 慢波导环形换能器及其指向性

陈培田

(国家海洋局海洋技术研究所)

1985年1月21日收到

本文介绍了一种慢波导环形换能器及其指向性,文中给出了该换能器的结构及其指向性实验结果.实验结果表明,利用声学慢波导能够有效地改善环形换能器的指向性.文中对该换能器指向性形成的机理做了初步分析.

应用声学

• 31 •

及恒电流源激励, PB-1 型发射换能器有宽的发送频响;

2. 采用多层 PVDF 结构后,降低了电阻抗,增大了单位电压下的声功率输出;

3. 采用球冠面的声辐射形式,除增大波束开角,还保证了多层结构工艺实施;

4. 采用窄脉冲电信号激励 ( $1\mu\text{s}$ ),在 PB-1 型换能器收发系统中实现了 7—10 $\mu\text{s}$  的水中窄脉冲波形.提高了多层地震模型实验层间的反射脉冲分辨力,甚至能观察到各种波的干涉现象;

5. 因本文 PVDF 压电性能已有提高, PB-1 型换能器电声效率已达 10—12%. 此点有特别重要实用意义.但为了更广应用,仍需继续改进性能.

## 参 考 文 献

- [1] G. M. Sessler, *J. Acoust. Soc. Am.* 70(1981), 1596.
- [2] R. G. Swartz and J. D. Plummer, *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-26-12(1978), 1921.
- [3] H. R. Gellantree, *Marconi Rev.* 45(1982), 49.
- [4] R. G. Swartz, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-27-6 (1980), 295.
- [5] Chen Wen-Hsien, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-30-4 (1983), 238.
- [6] J. G. Linvill, S. E. L, Stanford Univ., 3(1978), 83.
- [7] D. Berlincourt, "Piezoelectric Crystals and Ceramics" in *Ultrasonic Transducer Materials*, O. E. Mattiat, Ed., New York: Plenum Press, 1971, 74.
- [8] 何祚镛、赵玉芳, *声学理论基础*, 国防出版社, 1981, 212.
- [9] 袁易全、沈寿彭, *应用声学*, 4-3(1985), 25.
- [10] L. Bui, H. J. Shaw, and L. T. Zitelli, *Electron. Lett.*, 12(1976), 393.