

层叠式 PVDF 薄膜超声换能器及其频谱特性

简平, 刘玉荣, 姚若河, 苏晶

(华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640)

摘要:提出了一种利用聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜层叠的组合结构方案设计超声换能器,用以解决柔性薄膜超声换能器输入/输出信号增益低的问题;并通过理论推导及数学软件仿真给出了该结构换能器的幅频特性。利用仿真结果可估算出层叠式结构超声探头的增益、谐振频率和通频带与 PVDF 薄膜厚度及薄膜层数之间的对应关系。这对于缩短高频超声探头的设计周期,降低开发成本,提高探头转换增益及检测灵敏度都具有重要意义。

关键词:聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜;层叠;幅频特性;超声换能器

中图分类号:TP212

文献标识码:A

Laminated PVDF Ultrasonic Transducer and Its Spectral Character

JIAN Ping, LIU Yurong, YAO Ruohu, SU Jing

(The School of Electronic & Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A layer-built ultrasonic transducer based on PVDF piezoelectric film is proposed to solve one of the key technical issues concerning the low input/output gain in the piezoelectric film ultrasonic transducer. The amplitude frequency characteristics of ultrasonic transducer is deduced by theory deduction and software simulation. Moreover the dependence of its gain, resonance frequency and bandwidth on the thickness and the layer number of the film could be reasonably calculated by the simulation result, which is very important for shortening the design cycle, reducing the product cost of ultrasonic transducer, and improving its conversion gain and sensitivity.

Key words: PVDF piezoelectric film; lamination; amplitude frequency characteristics; ultrasonic transducer

0 引言

超声换能器作为声能与电能相互转换的部件已广泛用于无损探伤、遥控探测、医学成像等技术领域。超声压电材料作为各种超声应用的核心部件一直是世界各国长期研究和开发的重点。目前,压电陶瓷 PZT 以机电效率高和性能稳定等优点成为最常用的压电材料,但其带宽窄,声阻抗高和机械性能强度低等不足使基于 PZT 的超声换能器的应用受限^[1],而一种新型的高分子聚合物压电材料聚偏二氟乙烯(PVDF)越来越受关注。PVDF 具有灵敏度高;压电常数($g_{31} = 216 \times 10^{-3}$ V/N)与 PZT 的高 20 倍,其声阻抗($S = 2.7 \times 10^6$ Pa · s/m³)跟水、人体肌肉的声阻抗很接近;柔韧度高,易弯曲并能制成厚 10 μ m~1 mm 形状各异的大面积薄膜;PVDF 有很宽的频响范围,在室温下从准静态、低频、高频至超高频均能实现高效的机电转换^[2]。PVDF 不仅在

许多领域中能替代传统压电陶瓷材料,还可应用到水听器 and 柔性薄膜成像器件等 PZT 不能使用的场合。但目前 PVDF 压电应变系数($d_{33} = 21$ pC/N)不高,机电耦合系数($k_{33} \approx 14\%$)较小,从而使 PVDF 在超声换能器方面的应用中通常需要外接高压激励电路。

本文提出一种基于 PVDF 压电薄膜的层叠式结构超声换能器,并重点利用 Mathcad 软件对该结构超声换能器的幅频特性进行理论仿真分析与讨论。

1 PVDF 薄膜层叠结构

目前基于单片 PVDF 薄膜超声换能器产生的表面电荷、电压增益及机械振动幅度极其有限,通常在发射端采用高压激励电路来增加输出功率,在接收端采用集成接收放大电路^[3-4]来提高信号增益,但由此限制了换能器集成化和微型化。为了获得更好

收稿日期:2012-06-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61076113)

作者简介:简平(1981-),男,广东南海人,硕士生,主要从事薄膜超声换能器的设计与研究。E-mail: robinson_scut@sina.com

的探测效果,可通过多层薄膜晶片的不同层叠方式(见图 1)实现低驱动电压及高信号增益。

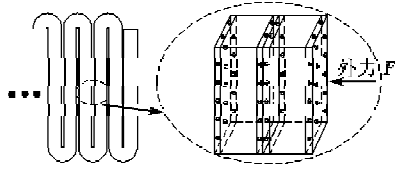


图 1 PVDF 薄膜层叠结构

对于发射端,即电声转换的逆压电效应,需将薄膜晶片并联层叠^[5],从而使声场强度线性叠加,如图 2(a)所示^[6],其等效电路如图 2(b)所示,即通过层叠来增大薄膜的有效应变面积,因为声场强度与薄膜晶片的面积成正比^[5]。而对于接收端,即声电转换的正压电效应,则需将薄膜晶片串联层叠,即将晶片的感应电压串联叠加,从而有效提高接收端电压,如图 3(a)所示^[6],其等效电路如图 3(b)所示。

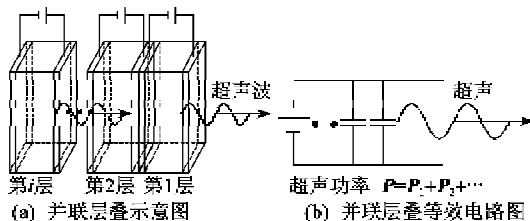


图 2 PVDF 薄膜并联层叠

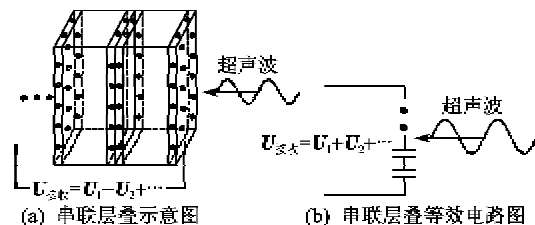


图 3 PVDF 薄膜串联层叠

因此,如果要想实现超声探头收发复用,则必须通过将薄膜晶片并联-串联结合层叠,同时满足大功率输出及高接收灵敏度等实用需求^[7]。多块晶片的并联增加了压电薄膜的表面感应电荷量,从而可提高接收端的带负载能力^[6]。

2 层叠式超声探头的幅频特性

当 PVDF 压电薄膜应用于高频(1 MHz ~ 1 GHz)范围的超声探伤时,由于在 PVDF 薄膜内传播的超声波长很短(1.5 mm ~ 1.5 μm),薄膜厚度并未远小于波长,所以超声波在薄膜中传播会产生一定的相位差且不能被忽略。假设 H_{PVDF} 为 PVDF 厚度, h_{Al} 为铝电极厚度,根据图 2(a)所示,第 i 层激发的超声波传播到换能器出射面处形成的相位差 θ_i

可表示为

$$\theta_i = 2\pi f t \times (i-1) = 2\pi f \left(\frac{2h_{\text{Al}}}{v_{\text{Al}}} + \frac{H_{\text{PVDF}}}{v_{\text{PVDF}}} \right) \times (i-1) \quad (1)$$

式中: $v_{\text{Al}} = 6\,300 \text{ m/s}$, $v_{\text{PVDF}} = 1\,400 \text{ m/s}$ 分别为超声波在铝电极和 PVDF 材料内部的传播速度; f 为超声波频率; t 为超声波穿过一层 PVDF 压电薄膜和一对铝电极层所需的总时间。根据机械波动方程和线性叠加原理可得出,对于具有 i 层的层叠结构超声换能器的超声波在换能器出射面处的总声场强度:

$$P_i = V_{\text{PV}} [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + \theta_2) + \dots + \sin(\omega t + \theta_i)] \quad (2)$$

根据三角公式,式(2)可简化表示为

$$P_i = V_{\text{PV}} \cdot A_i \cdot \sin(\omega t + \theta_{\text{总}}) \quad (3)$$

式中: V_{PV} 为单层薄膜的增益幅值; A_i 为总声场强度的幅度比例系数,可定义为具有 i 层层叠结构换能器的发射总声场强度与单层结构换能器的声场强度之比,并根据式(1)~(3)可知,其大小主要由 f 及 H_{PVDF} 决定。当 $i=2$ 或 $i=3$ 可得

$$A_2 = 2\cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \quad (4)$$

$$A_3 = \sqrt{4\cos^2\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + 4\cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right)\cos\left(\theta_3 - \frac{\theta_2}{2}\right) + 1} \quad (5)$$

并由此得

$$A_{2,\text{max}} < A_{3,\text{max}} \quad (6)$$

$$\{(A_{2,\text{max}})''_{ff}\} < \{(A_{3,\text{max}})''_{ff}\} \quad (7)$$

式中: $(A_{2,\text{max}})'_{ff} = 0$; $(A_{3,\text{max}})'_{ff} = 0$ 。

同理可得

$$A_{j,\text{max}} < A_{k,\text{max}} \quad (8)$$

$$|(A_{j,\text{max}})''_{ff}| < |(A_{k,\text{max}})''_{ff}| \quad (9)$$

式中: $(A_{j,\text{max}})'_{ff} = 0$; $(A_{k,\text{max}})'_{ff} = 0$, $j < k$ 。由此可知层叠数越多,获得的信号增益越大,但频带增益曲线变得越尖,对应的通频带宽越窄。

考虑到 PVDF 在频率($10^{-5} \sim 10^9 \text{ Hz}$)范围内响应平坦;另外铝电极与 PVDF 高聚物材料的声阻抗非常接近($S_{\text{PVDF}} = 2.7 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^3$, $S_{\text{Al}} = 1.7 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^3$),使超声波能高效传递,从而可忽略超声波在层间的反射而形成的衰减。这里可假定 $A_1 = 1$,且当 $H_{\text{PVDF}} = 50 \text{ μm}$, $v_{\text{Al}} = 6\,300 \text{ m/s}$, $v_{\text{PVDF}} = 1\,400 \text{ m/s}$ 时得到幅频特性仿真曲线如图 4 所示。

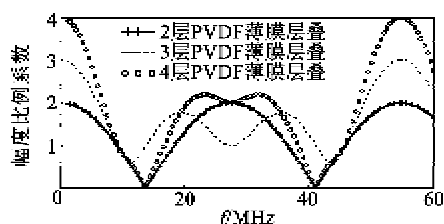


图4 厚50 μm的薄膜层叠后的幅频特性

由图4可知,层数越多增益越大,而通频带却随之减少,同时还可估算出2层薄膜层叠后所得的通频带:

$$BW_{A_2} \approx 61.6452 - 48.0674 \approx 13.5778 \text{ (MHz)} \quad (10)$$

同理可得3层、4层层叠后所得通频带分别为

$$BW_{A_3} \approx 60.3568 - 49.3558 \approx 11 \text{ (MHz)} \quad (11)$$

$$BW_{A_4} \approx 59.762 - 49.85 \approx 9.92 \text{ (MHz)} \quad (12)$$

图5为3种厚度的4层薄膜层叠后所得幅频特性曲线。由图可知,薄膜厚度不影响增益曲线的形状,但厚度越小,曲线在横轴方向上拉伸越大。由图可估算出通频带和重复周期与薄膜厚度的数值关系,如表1所示。

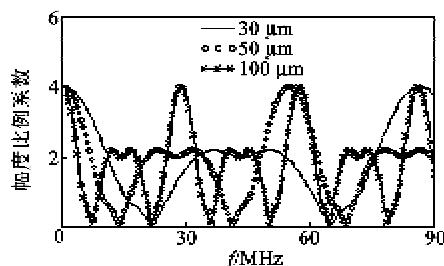


图5 4层PVDF薄膜层叠后的幅频特性

表1 通频带和重复周期与薄膜厚度关系

薄膜厚度/μm	30	50	100
通频带/MHz	15.88	9.92	5.21
重复周期/MHz	86.42	54.80	28.73

由表1可知,对于层叠式超声换能器的设计,可通过选择适当的薄膜厚度使增益峰值平移到所需工作频点上,也可根据实际增益通频带的需要选择合适的薄膜厚度,同时还能实现超声换能器的多频率段复用。如图5所示,当 $H_{\text{PVDF}} = 100 \mu\text{m}$ 时,谐振中心频率点有2.85 MHz、5.74 MHz、8.60 MHz等。

相对于铝、铜等固体金属,由于超声波在高分子聚合物材料中传播会产生一定的吸收及散射而造成较大超声波强度衰减。声波的衰减与介质特性、超声频率有很强的依赖关系,其中声波的频率越高,声

强衰减越大(对于具有一定面积的平面薄膜产生的超声波在较短距离下可近似看成平面波,声压不随距离而变化,即可忽略扩散衰减),根据平面波衰减方程^[4]:

$$\eta_i(f) = \frac{I_i}{I} \approx e^{-\alpha_0 f \cdot x} = e^{-\alpha_0 \cdot f \cdot (1-1) \cdot H_{\text{PVDF}}} \quad (13)$$

式中 α_0 为1 MHz下材料衰减系数。当 $H_{\text{PVDF}} = 50 \mu\text{m}$,第4层薄膜激发超声波的强度经衰减后得: $\eta_4(10 \text{ MHz}) \approx e^{-2 \cdot (10 \text{ MHz}) \cdot (3 \times 0.005 \text{ cm})} = 0.741$,那么每一层薄膜激发的超声波经过各自前面薄膜层衰减后再叠加而成的 P_i 可表示为

$$P_i = V_{\text{PV}} [\sin(\omega t) + \eta_2 \sin(\omega t + \theta_2) + \dots + \eta_i \sin(\omega t + \theta_i)] \quad (14)$$

图6为软件仿真所得幅频特性曲线。虽然通过多层层叠方式可提高增益,但由于超声波强度随频率及距离的增加不断衰减,从而随着超声频率不断的提高,幅度增益比例系数也最终趋于恒定值1。由图还可知,需进一步提高超声探头的使用频率就必须选择更薄的PVDF压电薄膜,目前工业上能加工10 μm的PVDF压电薄膜,使换能器工作频率延伸至G波段。

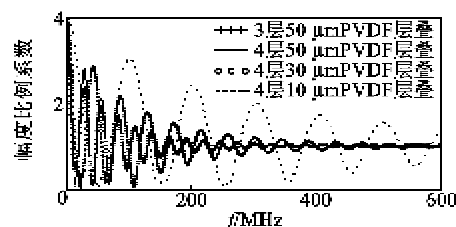


图6 考虑衰减情况下,PVDF薄膜层叠式换能器的幅频特性

3 结束语

采用基于PVDF薄膜层叠式结构的超声换能器有效提高输入/输出增益,一方面降低了换能器的功耗,特别是对于要求弱声场的无损探伤等医疗领域则更安全可靠;另一方面也节省了高压激励电路和前置接收放大电路,并减少了外围电路对超声探头幅频特性的影响^[8]。因此,该结构的换能器不但适用于多频率的应用场合,且更有利于其实现微型化和集成化。

参考文献:

- [1] 李文龙, 菅喜岐. 超声成像换能器的应用现状及其展望[J]. 中国科技论文在线, 2007(8): 1-7.
- LI Wenlong, JIAN Xiqi. The application status and

- prospect of ultrasonic imaging transducer[J]. www.paper.edu.cn, 2007(8): 1-7.
- [2] 王国力, 赵子婴, 白金星. PVDF 压电薄膜脉搏传感器的研制[J]. 传感技术学报, 2004(4): 688-692.
WANG Guoli, ZHAO Ziyang, BAI Jinxing. Design and implementation of the three-point PVDF piezo-film sphygmo-transducer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2004(4): 688-692.
- [3] 戴丽萍, 何涛. 超声波换能器的结构设计[J]. 江苏电器, 2008(4): 39-40.
DAI Liping, HE Tao. Design of ultrasonic wave transducer structure[J]. Jiangsu Dian Qi, 2008(4): 39-40.
- [4] 赵天池. 传感器和探测器的物理原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 237-238.
- [5] 王代华, 周德高, 刘建胜, 等. PVDF 压电薄膜振动传感器及其信号处理系统[J]. 压电与声光, 1999, 21(2): 122-126.
WANG Daihua, ZHOU Degao, LIU Jianshen, et al. PVDF piezoelectric-film vibrating sensors and its signal processing system[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1999, 21(2): 122-126.
- [6] 党永, 董维杰, 白凤仙, 等. 压电叠堆联接方式及低频发电特点的研究[J]. 电源学报, 2011(4): 56-61.
DANG Yong, DONG Weijie, BAI Fengxian, et al. Performance of piezoelectric stack for energy harvesting from low frequency vibration[J]. Journal of Power Supply, 2011(4): 56-61.
- [7] 沙永忠, 姜宏伟, 李盘文. 柔性压电传感器的设计[J]. 测控技术, 2011, 30(3): 1-4.
SHA Yongzhong, JIANG Hongwei, LI Panwen. Flexible piezoelectric sensor design[J]. Measurement & Control Technology, 2011, 30(3): 1-4.
- [8] 王庆锋, 吴斌, 焦敬品. 新型 PVDF 声发射传感器的设计方法及应用[J]. 仪表技术与传感器, 2006(11): 7-11.
WANG Qingfeng, WU Bin, JIAO Jingping. Application and design method of late-model PVDF acoustic emission sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2006(11): 7-11.

(上接第 378 页)

参考文献:

- [1] PARK K H, YOON K J. Application of piezo-composite actuator to control surface of small missile robot [C]//Sanya: 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007: 1591-1595.
- [2] 蒋振宇, 李伟达, 祝宇虹. 一种谐振式微型机器人移动机构[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 625-628.
JIANG Zhenyu, LI Weida, ZHU Yuhong. A micro locomotion mechanism based on the resonance[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4): 625-628.
- [3] OHMI F, CHISATO K, HISAYUKI A. Development of the orthogonal micro robot for accurate microscopic operations[C]//Harbin: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, 2007: 416-421.
- [4] 杜启亮, 张勤, 田联房, 等. 压电陶瓷驱动微小型机器人的运动分析与仿真[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 415-420.
DU Qiliang, ZHANG Qin, TIAN Lianfang, et al. Locomotion analysis and simulation of piezo-driven miniature robot[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3): 415-420.
- [5] 罗怡, 龚振邦, 孙麟治, 等. 双压电薄膜微机器人驱动器的模态分析[J]. 高技术通讯, 2001, 11(3): 85-87.
LUO Yi, GONG Zhenbang, SUN Linzhi, et al. The modal analysis of PZT bimorph actuator for microrobot [J]. High Technology Letters, 2001, 11(3): 85-87.
- [6] 刘华, 颜国正, 丁国清. 惯性冲击式压电陶瓷驱动器的研究[J]. 压电与声光, 2000, 23(4): 275-278.
LIU Hua, YAN Guozheng, DING Guoqing. Research on inertial piezoelectric actuator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000, 23(4): 275-278.