

高性能 PZT 陶瓷双晶片制备及猫中耳拾音实验研究

康厚墉¹, 吴拥真¹, 迟放鲁¹, 郭少波², 高娜¹, 潘铁政³

(1. 复旦大学 附属上海市眼耳鼻喉科医院, 上海 200031; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050; 3. 攀特电陶科技研发有限公司, 昆山 211138)

摘要: 制备横向压电系数 d_{31} 高达 -480pC/N 和居里温度 T_c 达 280°C 的高性能 PZT 压电陶瓷材料, 再制成厚 0.3mm 、宽 1.0mm 和长度分别为 3.5 、 4.0 和 4.5mm 的压电双晶片(PCBE), 结合前置放大器制成声电换能器, 将其植入猫耳内并测试 PCBE 耦合于听骨链上的声学信号拾取能力. 结果表明: 制备的 PCBE 具有良好的声-电换能性能; 三种长度的 PCBE 均可全部植入猫耳鼓室, 拾取体外 $20\sim 20000\text{Hz}$ 声信号可获得较平坦的频响曲线, 长度为 4.5mm 的 PCBE 拾取信号最佳, 最大输出达 -13.16 dB (0dB 输入, 1.5 kHz 时). 证实 PZT 压电双晶片可以制成鼓室内全植入式传声器.

关键词: 压电陶瓷双晶片; 横向压电系数; 声电换能; 中耳

中图分类号: TM282

文献标识码: A

Fabrication of High Acoustic-Electric Efficient Piezoelectric Ceramic Bimorph Element and Pickup in Middle Ear of Cat

KANG Hou-Yong¹, WU Yong-Zhen¹, CHI Fang-Lu¹, GUO Shao-Bo², GAO Na¹, PAN Tie-Zheng³

(1. Shanghai Eye & ENT hospital, Fudan University, Shanghai 200031, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 3. Pante Electronic ceramic R&D center co. Ltd., Kunshan 211138, China)

Abstract: A novel PZT piezoelectric ceramics with high d_{31} (-480pC/N) and T_c (280°C) was developed to shape a long strip of piezoelectric ceramic bimorph element (PCBE), with 0.3 mm in thickness, 1.0 mm in width and three lengths (3.5 , 4.0 , 4.5 mm), which were assembled to the cantilever structure anchoring a Preamplifier, and were implanted totally into tympanic cavity of cat ear to analyze their ability of picking up acoustic signal. This study explores that the PCBEs have high efficient acoustic-electric performance. They can pick up $20\sim 20000\text{Hz}$ acoustic signal with an approximate flat frequency curve when they are implanted the tympanic cavity of cat. The maximal output of -13.16 dB Volt p-p value (@ 1.5kHz , 0dB input) is picked up by the 4.5mm PCBE. This validates that PCBE might be totally implanted into tympanic cavity of cat ear as a piezoelectric microphone.

Key words: piezoelectric ceramic bimorph elements; transverse piezoelectric coefficient; acoustic-electric performance; middle ear

压电陶瓷是一种能够将机械能和电能互相转换的先进功能陶瓷, 利用其压电效应可实现能量转换、传感、驱动等功能, 用途十分广泛^[1]. 在声学领域, 压电陶瓷材料广泛用于制作拾音换能器、扬声器、蜂鸣器、超声波换能器等等. 锆钛酸铅(PZT)是最重要的压电陶瓷材料之一, 为获得良好声电换能特性, 常采用掺杂改性、优化工艺条件以及独特的结构设计等方法来提高或发挥 PZT 压电陶

瓷的性能^[2-3].

文献[4-5]将压电陶瓷薄片直接植入豚鼠耳蜗以模拟毛细胞功能的研究结果, 显示了压电陶瓷在听觉医学工程方面的广阔应用前景. 将压电陶瓷制作成对称型双晶片, 利用 MEMS 集成方法将多种功能电子元件集成到单一模块中, 并采用具有良好生物相容性的材料封装, 有望制成可全部植入中耳鼓室的微型传声器(依靠拾取听骨链振动进

收稿日期: 2009-11-11, 收到修改稿日期: 2009-12-22

基金项目: 上海市科学技术委员会重点项目(06DZ22022, 08441900300); 复旦大学研究生创新基金; 短期国际访学资助项目

作者简介: 康厚墉(1975-), 男, 博士研究生. 通讯联系人: 迟放鲁, 教授, E-mail: chifanglu@yahoo.com.cn

行声电换能),以取代目前半植入式人工耳蜗系统的体外传声器^[6].

制作植入式传声器最主要的瓶颈在于保证良好拾取体外声音信号的前提下尽可能微型化,这是全植入人工耳蜗系统至今尚未攻克的难题之一^[7-8].要制备全部植入鼓室腔的微型 PCBE,提高压电陶瓷材料的横向压电系数 d_{31} 是一条重要的技术途径.本工作以 PZT 二元系压电陶瓷材料为基,采用复合取代及多元掺杂改性的方法制备出了高性能、高稳定的 PZT 压电陶瓷材料,以此制作了具有良好声电转换特性的 PCBE,再结合前置放大器将其植入猫耳内,通过拴扎固定于锤骨的方式测试其拾音能力,验证了高性能 PCBE 制作全植入鼓室的传声器的可行性.

1 实验方法

1.1 PZT 压电陶瓷材料制备及性能测试

PZT 压电陶瓷材料采用传统的电子陶瓷工艺制备.以 $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ 二元系压电材料为基,采用 Ba、Sr、Ca 进行 A 位复合取代,Nb 进行 B 位取代,再选择 Ce、Bi、Fe 等元素进行掺杂改性,其化学组成为: $\text{Pb}_{(1-a-b-c)}\text{Ba}_a\text{Sr}_b\text{Ca}_c\text{Ti}_x\text{Zr}_y\text{Nb}_{(1-x-y)}\text{O}_3+d\%\text{CeO}+e\%\text{Bi}_2\text{O}_3+f\%\text{Fe}_2\text{O}_3$.将按化学计量比配制的原料在高效振动球磨机中混合均匀,箱式实验炉中 $880^\circ\text{C}/2\text{h}$ 高温合成.再将合成的 PZT 置于高效球磨机中球磨 8h 成粉料,经干压成型、高温烧结、烧银电极、高压极化等工序加工成 0.135mm 厚度的压电陶瓷薄片.

采用 HP4284A 阻抗分析仪测量压电陶瓷样品的介电温谱,得到样品的介电常数和居里温度;采用 Agilent4294A 阻抗分析仪测量样品的谐振和反谐振频率以及谐振阻抗,计算得到机电耦合系数 k_p 、 k_{31} 和 Q_m ;采用中科院声学研究所 ZJ-3 准静态 d_{33}/d_{31} 测量仪测定样品的 d_{31} .

1.2 压电陶瓷双晶片(PCBE)的制备

在上述压电陶瓷薄片之间粘结 30 μm 厚度的弹性良好的合金薄片,制成 0.3mm 厚度的对称型陶瓷双晶片,再切割成宽度 1.0mm、长度分别为 3.5、4.0 和 4.5mm 的条状 PCBE.将放大系统电路组件微型系统与 PCBE 微焊接后,采用固化胶直接封固

该系统于 PCBE 的一端,制作成具有悬臂梁结构的 PCBE.

1.3 猫中耳植入实验

取健康普通级猫 2 只 4 耳,听性脑干诱发电位测试正常.检查外耳道通畅、鼓膜完整.全麻后选择耳廓后切口,后鼓室进路良好暴露猫耳听骨链,以 4-0 手术丝线将 PCBE 拴扎固定于猫耳内锤骨上进行测试(见图 1).

测试:实验室普通房间,背景噪声 51dB (PSJ-2B 型风雷牌声级计测量).测试声信号为 20s 时长连续渐变上升等幅值扫频信号(20~20000Hz),最大幅值 0dB.将测试信号通过与猫外耳道严密贴合的全频高保真耳麦输出以振动猫耳鼓膜及锤骨.PCBE 拾取的声信号直接传输到计算机,Cool edit pro2.1 软件录音该信号并保存.将同一 PCBE 置放于鼓室腔,其余条件相同情况下拾取信号作为对照组.

2 结果分析与讨论

2.1 PZT 材料性能

通过调节 A 位、B 位复合取代及多元掺杂元素的含量,得到一种兼具高横向压电系数和居里温度的新型 PZT 压电陶瓷,其主要电性能见表 1.从表中可以看到,该材料的压电性能高于国内外商用的压电陶瓷材料,材料的 d_{31} 和 k_{31} 分别高达-480pC/N 和 0.43,这对保证 PCBE 具有优异的声电换能特性奠定了材料基础;材料的居里温度 T_c 为 280°C ,可以提高 PCBE 的温度稳定性和抗老化性能.

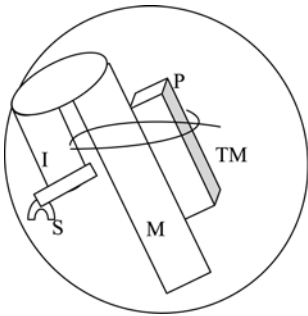


图 1 猫中耳植入实验示意图
Fig. 1 Implantation of PCBE in tympanic cavity of cat ear
P: PCBE; M: Malleus; I: Incus; S: Stapes; TM: Tympanic membrane

表 1 用于制作微型 PCBE 的改性 PZT 压电陶瓷材料的电性能
Table 1 Electric properties of modified PZT ceramic used to fabricate miniature PCBE

Properties (Sign/unit)	Dielectric constant $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	Piezoelectric constant $d_{31}/(\text{pC} \cdot \text{N})$	Piezoelectric constant $g_{31}/(\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{N})^{-1}$	Coupling factor k_p	Coupling factor k_{31}	Quality factor Q_m	Curie Temperature $T_c/^\circ\text{C}$
Modified PZT ceramic	3000	-480	-18	0.78	0.43	55	280

通过合适的掺杂取代及制备手段可以得到不同性能的 PZT 压电陶瓷^[9-11]. 实验采用 A 位 Ba²⁺、Sr²⁺ 复合取代 Pb²⁺, B 位 Nb⁵⁺ 取代得到了高性能、高稳定性 PZT 压电陶瓷材料, 这对保证 PCBE 具有优异的声电换能特性奠定了材料基础.

2.2 微型 PCBE 长度筛选与植入实验结果

限于猫中耳鼓室狭窄, PCBE 最大尺寸不宜超过 6.5mm×2.0mm×1.8mm. 在厚度 0.3mm 和宽度 1.0mm 符合上述要求并确定的情况下, PCBE 的长度是影响其谐振性能和声电转换特性的关键因素. 由于人耳的听阈范围在 20~20000Hz, PCBE 的谐振频率需设计在 20000Hz 以上方能获取平坦的线性频响曲线. PCBE 过长则不能满足此要求, 而过短则会牺牲 PCBE 的灵敏度. 为确定最佳长度, 利用有限元软件 ANSYS 建立了有限元模型, 分析了 3.5~6.0mm(0.5mm 递进)六种不同长度 PCBE 的固有谐振频率. 采用自由网格划分, 一端固定模式模拟悬臂梁结构的 PCBE 在中耳的实际工作情况以及 Block Lanczos 法模态分析, 得到了 6 种长度 PCBE 的固有谐振频率(表 2). 其中 4mm 长度的谐振频率为 23.2kHz, 因此本实验选择制备了 3.5、4.0 和 4.5mm 三种长度的 PCBE 进行植入实验.

选用 LMV1032 型前置放大器芯片 (美国国家半导体公司, 体积仅 1.18mm×1.18mm×0.35mm, 质量 1mg)作为放大系统, 可获得 27dB 左右最大增益, 提高了 PCBE 的电压输出幅值, 同时有效减小了植入空间, 确保其能完全放置于猫耳鼓室腔并能良好固定耦合于锤骨上. 由于听骨链系统具有精细的多向振动模式, 采用悬臂梁结构耦合可以最灵敏地拾取声信号^[11-12].

有研究指出, 去除砧骨后, 在锤骨上不超过 20mg 的负载对传递声学信号影响很小^[13]. 实验制作的三种 PCBE 质量 11~14mg(含前置放大系统), 满足以上要求. 其拾取猫耳锤骨振动的声信号的最大 V_{p-p} 均值见表 3, 频率响应曲线见图 2.

从图 2 可以看出, 三种长度的 PCBE 均可从耦合固定的锤骨上拾取体外声信号, 均具有较平坦的频响曲线, 输出的 V_{p-p} 值均明显大于对照组. 3.5mm 和 4.0mm 长度 PCBE 拾取信号均较弱, 而 4.5mm 长

表 2 ANSYS 有限元模拟得到的不同长度双晶片的谐振频率
Table 2 Resonant frequencies of PCBE in different length (ANSYS modal analysis)

Length /mm	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Resonance frequency/kHz	36.1	23.2	16.1	11.9	9.1	7.2

表 3 耦合于猫耳锤骨上的三种长度 PCBE 声信号拾取能力比较

Size/mm	Max value of volt peak to peak /dB	Chaos wave	Weight /mg
3.5	-39.83	weak	11.2
4.0	-28.12	weak	12.7
4.5	-13.16	weak	13.8

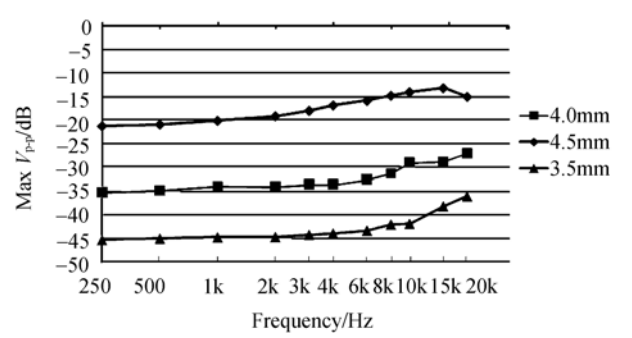


图 2 不同长度微型 PCBE 频率响应范围
Fig. 2 Frequency response curves of PCBEs with different lengths

度的 PCBE 拾取信号则较强, 其最大输出为 -13.16dB(在 15kHz 时), 这与 ANSYS 有限元方法模拟的结果基本吻合, 虽然该信号弱于原始体外测试信号, 但能经后级放大且信号基本不失真.

本实验证实了高性能 PZT 压电双晶片可以制成鼓室内全植入式传声器. 如果将集信息采集、处理、模数转换、数字传输于一体的系统集成芯片(SOC)^[14]与具有良好声电转换特性的 PCBE 集成, 可望研制出体积更小、重量更轻、可靠性更高的植入式压电传声器, 从而取代半植入式人工耳蜗的体外传声器, 成为全植入人工耳蜗的体内拾音器件.

3 结论

采用复合取代和多元素掺杂改性, 获得了一种兼具高压电性能和高居里温度的新型 PZT 基压电陶瓷材料, 其 d_{31} 和 T_c 分别为 -480pC/N 和 280℃. 该材料制作的微型 PCBE(宽度 1.0mm、厚度 0.3mm, 长度分别为 3.5、4.0 和 4.5mm)具有良好的声-电转换特性, 将其制成悬臂梁结构声电换能器, 植入猫耳鼓室内, 均能拾取 20Hz~20kHz 声信号的能力, 具有较为平坦的频响曲线, 其中 4.5mm 长度的 PCBE 在猫中耳内可将 0dB 的体外声信号转换为 V_{p-p} 达 -13.16dB 的最大输出. 首次证实了高性能 PZT 压电双晶片可以制成全植入鼓室内的微型传声器.

参考文献:

- [1] Wang S, Li J F, Wakabayashi K, *et al.* Lost silicon mold process for PZT microstructures. *Adv. Mater.*, 1999, **11**(10): 873–876.
- [2] Haertling G H. Ferroelectric ceramics: history and technology. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1999, **82**(4): 797–818.
- [3] Damjanovic D. Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics. *Rep. Prog. Phys.*, 1998, **61**(9): 1267–1324.
- [4] 董人禾, 董显林, 鲁飞, 等 (DONG Ren-He, *et al.*). 压电型人工耳蜗的实验研究. 无机材料学报(Journal of Inorganic Materials), 2002, **17**(4): 862–866.
- [5] 陈恒, 董显林, 鲁飞, 等 (CHEN Hen, *et al.*). 基于压电效应的人工耳蜗的实验研究. 无机材料学报(Journal of Inorganic Materials), 2007, **22**(1): 185–188.
- [6] 迟放鲁, 严庆波. 可植入式传声器在全植入式电子耳蜗中的研究. 中华耳鼻咽喉科杂志, 2003, **38**(3): 237–238.
- [7] Chi F L, Wu Y, Yan Q B, *et al.* Sensitivity and fidelity of a novel piezoelectric middle ear transducer. *ORL*, 2009, **71**(4): 216–220.
- [8] Cohen N. The totally implantable cochlear implant. *Ear Hear*, 2007, **28**(Supp 12): 100S–101S.
- [9] Zhang H, Jiang S, Zeng Y. B site doping effect on depinning in $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{1/3}\text{Sb}_{1/3})_{\text{x}}(\text{Zr}_{0.825}\text{Ti}_{0.175})_{1-\text{x}}\text{O}_3$ ferroelectric ceramics. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(19): 192901–1–3.
- [10] 王永龄. 功能陶瓷性能与应用. 北京: 科学出版社. 2003: 98–101.
- [11] Majdoub M S, Sharma P, Çağın T. Dramatic enhancement in energy harvesting for a narrow range of dimensions in piezoelectric nanostructures. *Phys. Rev. B*, 2008, **78**(12): 121407–1–4.
- [12] Fang H, Liu L, Ren T. Modeling and design optimization of large-deflection piezoelectric folded cantilever microactuators. *IEEE Trans Ultrason*, 2006, **53**(1): 237–240.
- [13] Zürcher M A, Young D J, Semaan M, *et al.* Effect of Incus Removal on Middle Ear Acoustic Sensor For a Fully Implantable Cochlear Prosthesis. Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., New York, 2006, **1**: 539–542.
- [14] Afridi M, Hefner A, Berning D, *et al.* MEMS-based embedded sensor virtual components for system-on-a-chip (SoC). *Solid-State Electronics*, 2004, **48**(10/11): 1777–1781.