

14171

全国铁电压电陶瓷材料第二届专业会议

论 文 选 集



一 九 八 二 年

1980

全国铁电压电陶瓷材料第二届专业会议 论 文 选 集

目 录

前 言.....	(1)
简 报.....	(2)
论文报告	
压电陶瓷材料在大功率高静压下的性能测试研究..... .....中国科学院声学研究所 赵春山 金亨煥 陈宋久 (4)	
纯 TGS 的电滞回线的测量和讨论..... .....中国科学院上海技术物理研究所 朱中权 刘兴海 (19)	
压电陶瓷园板振动特性分析..... .....中国科学院武汉物理研究所 王四德 王玉海 徐贞玉 贺安珠 六机部七〇六所 俞锁龙 (24)	
声表面波延迟时间温度系数的精确测量方法..... .....四机部一四二六所 朱洪兴 肖声质 (39)	
一种高 g_{33} PZT 型压电陶瓷材料..... .....五机部二一二所 赵玉琴 (46)	
XJY—7 超声断面仪线阵多晶换能器..... .....武汉市无线电研究所 胡兴源 (55)	
压电陶瓷晶片厚度振动参数的测试..... .....汕头超声仪器研究所 蔡恒辉 陈汝权 董尊成 (62)	
掺 Mn 量对 $PbTiO_3$ 陶瓷的介电、铁电性能的影响..... .....中山大学物理系 许煜寰 李仲荣 (67)	
原料对 $BaTiO_3$ 基陶瓷半导化影响问题的探讨..... .....天津大学化工系 沈继耀 谈家琪 (72)	
压电陶瓷真空烧结..... .....上海科技大学一系 魏敬敬 孙振鹤, 陆云芳 姚文沛 (77)	

伽玛射线对压电陶瓷性能的影响.....	.....
.....	.....山东大学物理系 钟维烈 张沛霖 (82)
添加物对高介钛酸钡瓷料介电性能的影响.....	.....
.....	.....华南工学院材料所 张 光 吴柏源 赵宗竟 (87)
化学液相共沉淀法制备超细钛酸钡粉体.....	.....
.....	.....成都电讯工程学院电子材料教研室 游文南 董译槐 李 兰 (92)
钙钛矿型晶体的介电各向异性.....	.....
.....	.....中山大学物理系 史隆培 (101)
超小型压电音叉的研制.....	.....
.....	.....三二九厂 刘业清 (108)
厚度切变模压电振子的制备和 K_{16} 的测量.....	.....
.....	.....六一二厂 徐荆琴 尤全汉 潘学蕃 (121)
声表面波器件用压电陶瓷基片的初步试制.....	.....
.....	.....七九八厂 王 璞 (125)
中频陶瓷滤波器用低 K_p 压电陶瓷材料的研制.....	.....
.....	.....七九九厂 刘润光 王廷银 何明柱 (129)
轴式冲击压缩铁电陶瓷电特性的理论计算.....	.....
.....	.....林其文 王维钧 (136)
压电陶瓷材料在医用超声领域的应用.....	.....
.....	.....上海医用仪表厂 王建华 (150)
MnO_2 改性的 $Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})O_3$ — $PbZrO_3$ — $PbTiO_3$ 三元系 滤波器用压电陶瓷.....	.....
.....	.....上海无线电一厂 徐银忠 金开友 徐金麟 (154)
高 K_p 高稳定性的多元系压电陶瓷材料.....	.....
.....	.....无锡七二一厂 于德祥 (157)
高稳定发射型锆钛酸铅陶瓷材料的研究.....	.....
.....	.....中国科学院上海硅酸盐所 赵梅瑜 温保松 金行运 朱梅根 成海君 赵余星 (167)
论文报告小结.....	(182)
分组专题讨论情况汇报.....	(184)
论文报告总目录.....	(194)

前 言

1980年5月10日在无锡市召开的第二次全国铁电压电陶瓷材料专业会议,拟出论文集,陆续收到论文报告共85篇,经反复研究,考虑到以下种种因素,和经费限制,现准备选登一部分报告,出版论文选集。其余的论文报告均列题目和作者,未选用的原因分别为:

1. 作者自提不予发表。
2. 在其它刊物或内部资料上已经刊登。
3. 涉及保密内容。
4. 属于文献总结或综述报告。
5. 主要内容与刊登在“论文摘要汇编”中的内容基本相同。
6. 篇幅太长。
7. 与“铁电压电陶瓷材料专业”内容关系较远。
8. 单位、作者、文字或图表写得不夠清楚。
9. 其它不符合出版要求者。

凡选用的文章,内容未经审查,一律由各单位作者自己负责。此外,本选集还刊登了会议简报与论文报告小结等。

会议编辑组

简 报

第二次全国铁电压电陶瓷材料专业会议

由中国科学院和六机部联合召开的第二次全国铁电压电陶瓷材料专业会议，于一九八〇年五月十日至十六日在江苏省无锡市举行。参加单位120多个，代表约200名。有各部的有关生产单位，大专院校，科研机关，以及地方单位参加了会议。各有关方面的领导同志也参加了会议。中国科学院四局领导江峰同志和六机部科研局领导章光坚同志出席了会议，并在开幕式上讲了话，无锡市科委领导到会祝贺，七二一厂总工程师柳先同志主持开幕。特邀中国科学院上海硅酸盐所殷之文教授在会上作了铁电压电陶瓷国际动态报告。

会议分二个阶段进行：第一个阶段学术报告；第二个阶段专题讨论。由于报告较多，按内容分四个组进行交流，共宣读了120篇文章，会前印发了140篇文章摘要。内容包括铁电压电基础、压电材料工艺、水声超声应用，滤波器、引燃引爆、各类电声换能器、透明铁电陶瓷及其电光应用等等。在会上进行了广泛的交流，使与会代表对我国铁电压电陶瓷材料及其应用的现状，有了比较清楚的了解。

从铁电压电陶瓷的发展过程来看，四十年代发明了钛酸钡陶瓷，开辟了这一领域。到五十年代又研究成了锆钛酸铅铁电陶瓷，从而使铁电陶瓷在压电领域的应用大大地推进了一步，我国在六十年代初也相继研制成功这类材料，主要用作电容介质和压电器件。并于1965年12月召开了第一次全国压电陶瓷学术会议。十五年来铁电陶瓷在国外有了较大的发展，特别是材料的品种多了，应用面广了，研究工作也深了。因此召开这次专业会议，在会上充分地体现出这种发展。

压电陶瓷是当前铁电陶瓷领域中应用最广的一类材料。从压电陶瓷材料的用途来看，在水声领域（即声纳、俗称水下雷达）利用这类材料，既作声发射源，又作接收器件，军用上它们是各类水面舰艇和潜艇的眼睛和耳朵，在工业和民用上用作鱼探器，海底石油勘探电缆等海洋开发用收发器件。在超声应用方面，作为收发换能器，它们在无损探伤、超声清洗、乳化等功率超声，已被普遍应用。最近在医学实时诊断上用作超声扫描探头有了很大发展。在通讯方面、压电陶瓷是各种宽窄带滤波器、100兆赫以下表面波器件的材料。利用其电声转换功能，还可用它们来制作各种扬声器和蜂鸣器。压电陶瓷

还是一类极好的敏感元件,对极小的应力或形变变化,都能探测出来,因而可以用它们来制作各种在尖端技术上应用的传感器和加速度计等器件、压电陀螺和各种测力系统。利用在其压力作用下产生高电压和大电流的特点,更可用作压电变压器和引爆器件。目前已在导弹、炮弹引爆触发以及煤气点火等方面大量应用。铁电陶瓷除去压电应用外,利用它们的热释电效应,还可在红外技术和热电直接转换等领域发挥应用,利用其电光特性可用作各种电光开关(例如立体电视镜和核闪光护目镜等)和图象显示等。最近国外又研究出了一类名叫 PTC 的铁电半导体材料,它们具有发热体和自动控温的双重效应。目前已在工业和民用各方面大量应用,是一类量大面广的产品,很有发展前途。总之铁电压电陶瓷材料的应用已渗透到了军民各部门的每个角落,其前途会随着我国四个现代化的前程更大发展。

为了满足各方面的应用,铁电压电陶瓷品种繁多,不断地在试制推广、生产。目前我国已经建立了不少专业生产单位,初步建立了这类材料的工业体系,并且具有相当生产能力。但总的来看,应用面尚未完全打开。特别是“四人帮”的十年破坏非常严重,从材料本身来看,性能不够稳定,一致性也不好,需要加强应用基础研究工作。原材料的供应现在还很乱,严重影响产品的质量。今后必需解决原材料定点供应问题,保证原材料的质量和稳定性。

为了统一测试方法,会议建议国家标准总局尽快成立国家标准压电陶瓷性能测试组,以利于控制产品质量提高材料性能。

会议期间,科学院图书馆与硅酸盐所进行了书刊展出,有些单位带来了展品,也进行了展览交流。

与会代表认为这次会议是成功的,通过交流既看到了成绩又发现了问题,同时指出了方向,大家信心百倍,有决心为早日实现我国四个现代化,作出更大的努力。

会议秘书组

压电陶瓷材料在大功率高静压力下的性能的实验研究

赵春山 金享煥 陈宋久

一、引言

近年来,无论在国外还是在国内,压电陶瓷材料都被大量应用在换能器中。这主要是由于这种材料与其它类型的换能材料相比具有许多优点,例如:机电耦合系数高,功率容量大,容易做成所需要的形状,电场方式可灵活选择等。但是,压电陶瓷材料的参数并非常数,而是时间、温度、应力、电场等诸因素的函数。特别对于水声换能器应用而言,随着大功率、深水换能器的研制,压电陶瓷材料在大功率高静压力下的性能是人们十分关心的。因此,我们在前人工作(1)-(6)的基础上,对几种常用压电陶瓷材料的参数随电功率及静压力的变化情况进行了实验研究。

二、原理

根据压电换能器原理,如果不计介电损耗,则在谐振频率附近,典型压电振子的导纳随频率变化的轨迹为一圆图,如图1所示。振子在谐振频率附近的等效电路如图2所示。在图1中, f_s 称为串联谐振频率, $f_{-\frac{1}{2}}$ 和 $f_{+\frac{1}{2}}$ 称为半功率频率。在图2中, C_0 称为静态电容, C_1 、 L_1 、 R_1 分别称为动态电容、动态电感和动态电阻。

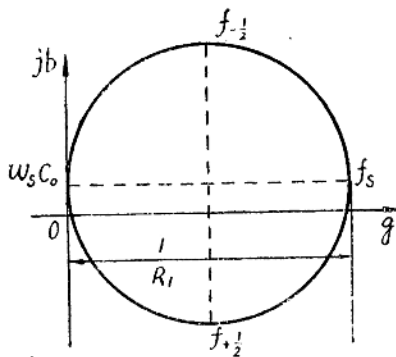


图1 在谐振频率附近,典型压电振子的导纳随频率变化的轨迹。

特别,对于横向模压电振子(形如图3),材料的弹性、介电、压电参数可分别表

示如下:

$$N_i = f_s \cdot l$$

$$S_{11}^E = \frac{1}{4\rho f_s^2 l^2}$$

$$\text{tg} \delta_M = \frac{1}{Q_M} = \frac{\Delta f_s}{f_s}$$

$$\frac{e_{33}^T}{\epsilon_0} = \frac{tC^T}{lW\epsilon_0}$$

$$K_{eff} = \sqrt{\frac{C_1}{C^T}} = \sqrt{\frac{\Delta f_s}{2\pi f_s^2 R_1 C^T}}$$

$$d_{31} = \sqrt{K_{31}^2 S_{11}^E \epsilon_{33}^T}$$

其中, l 、 W 、 t 分别为振子的长度、宽度和厚度; ρ 为材料密度; $\Delta f_s = f_{+\frac{1}{2}} - f_{-\frac{1}{2}}$; $C^T = C_0 + C_1$, 为振子的自由电容; $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 法/米。同时, 材料的机电耦合系数 K_{31} 可由有效机电耦合系数 K_{eff} 求得(7)。

因此, 只要测得振子的导纳圆图, 并测出其自由电容, 便可求出材料的参数。进而, 当加到振子上的电功率逐步增大、静压力逐步升高时, 就能测得材料参数随电功率及静压力的变化。

严格说来, 上述诸关系式仅在线性范围内才能成立, 对于非线性范围而言, 它们只是一种近似表达式。我们暂且用它们同时处理包括线性范围和非线性范围的问题, 因为压电换能器的非线性理论还未成熟。

三、方 法

为了测得压电陶瓷材料参数随(1)静压力、(2)电功率、(3)静压力和电功率的变化关系, 我们使用了本所自制 YZ-1A 型导纳—阻抗轨迹图示仪(8)和高静压容器(9)。其中, 图示仪采用手控频率微调(可微调频率 2Hz), 以便自由选取扫描速度。高静压容

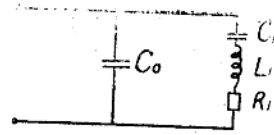


图 2 在谐振频率附近, 典型压电振子的等效电路。

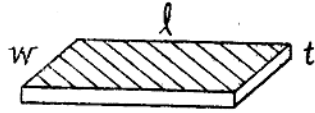


图 3 横向模压电振子的形状 ($l \gg w > t$)

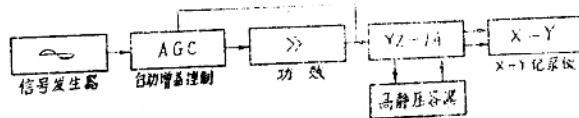


图 4 测量系统的框图

器内设有吸声壁, 基本上消除了反射声的影响。整个测量系统的框图如图 4 所示。使用的样品为横向模振子, $l = 3\text{ cm}$, $W = 0.3\text{ cm}$, $t = 0.15\text{ cm}$ 。其中发射型样品由铁钙类材料制成, 配方为 $\text{Pb}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + 1.5\text{ 克分子}/\% \text{CaFeO}_{5/2}$ 。

收发型样品由镍铬类材料制成，配方为 $Pb_{0.005}Sr_{0.005}(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3 + 0.1Wt\%$
 $(NiO + Cr_2O_3)$ ；接收型样品由铋三元系材料制成，配方为 $Pb[(Li_{\frac{1}{3}}Sb_{\frac{2}{3}})_{0.005}$
 $Ti_{0.46}Zr_{0.54}]O_3$ ，均为本所产品。所有样品均经过三个月的时间老化。测量时，样
 品用点接触型支架支承在节点上，浸入高静压容器内的机油中。测量的过程是：

1. 材料参数随静压力的变化；
2. 材料参数随电功率密度的变化；
3. 材料参数随电功率密度与静压力的变化；
4. 介电性能随静压力的变化；
5. 介电性能随电场的变化；
6. 介电性能随电场与静压力的变化。

介电性能用本所自制高压电桥⁽¹⁰⁾测量。

这里，有必要说明一个问题：考虑到样品处于油负载中，应该说，测得的 $tg\delta_M$ 已经不再是材料本身的机械损耗因子，而是这种特定形式的换能器的机械损耗因子了。不过，从 $tg\delta_M$ 的相对变化情况仍然可以反映材料的机械损耗的变化规律。因为此时机械损耗因子成为：

$$tg\delta_M = \frac{\Delta f_s}{f_s} = \omega_s C_1 R_1 = \omega_s C_1 (R_1' + R_L) = \omega_s C_1 R_L + \omega_s C_1 R_1'$$

其中 R_1' 是材料的机械损耗阻， R_L 是负载阻，而 R_L 是常量。

四、结 果

按照上述测量程序，对于选定的横向模样品，得到了如下结果：

1. 发射型、收发型、接收型样品的串联谐振频率 f_s 、以及材料的频率常数 N_1 、弹性柔顺常数 s_{11}^E 、机械损耗因子 $tg\delta_M$ 、压电应变常数 d_{31} 和横向机电耦合系数 K_{31} 随静压力的变化，如图 5 至图 10 所示。静压力由 $1Kg/cm^2$ 逐步增加到 $600Kg/cm^2$ 。可以看出，机械损耗因子、压电应变常数和横向机电耦合系数随静压力增加略有增大，其余参数变化不大。为排除电功率的影响，这项测量使用的电功率密度为 $0.001W/cm^2 \cdot KHz$ 。

2. 发射型、收发型样品的串联谐振频率 f_s 、以及材料的频率常数 N_1 、弹性柔顺常数 s_{11}^E 、机械损耗因子 $tg\delta_M$ 、压电应变常数 d_{31} 和横向机电耦合系数 K_{31} 随电功率密度的变化，如图 11 至图 16 所示。电功率密度由 $0.001W/cm^2 \cdot KHz$ 逐步增加到 $0.5W/cm^2 \cdot KHz$ 。测量是在常气压下进行的。实验表明，在大功率下，压电陶瓷材料的参数变化很大。收发型材料的参数随电功率密度的变化尤为显著，这说明收发型材料不适宜工作在大功率密度条件下。表 I 给出了上述两种材料在小功率与大功率下的性能对比。

表 I 发射型、收发型材料在小功率与大功率下的性能对比

材 料	电 功 率 密 度 ($w/cm^2 \cdot KHz$)	N_1 ($Hz \cdot m$)	S_{11} ($10^{-12} m^2/N$)	$tg\delta_M$	d_{31} ($10^{-12} C/N$)	k_{31}
发射型	0.001	1742	10.85	0.0045	94	0.299
	0.3	1725	11.05	0.0067	108	0.333
收发型	0.001	1620	12.60	0.0070	100	0.315
	0.3	1520	14.20	0.0433	173	0.510

3. 在不同静压力下 ($1Kg/cm^2$ 、 $200Kg/cm^2$ 、 $600Kg/cm^2$) 发射型、收发型材料参数随电功率密度的变化。实验结果, 与静压力的关系不大, 只不过在高静压力作用下, 材料参数随电功率密度变化的变化率稍有增大。

4. 发射型、收发型材料的介电性能随静压力的变化。在维持中等电电场 (对于发射型材料为 $3kv/cm$, 对于收发型材料为 $1.5kv/cm$) 的条件下, 静压力由 $1Kg/cm^2$ 逐步增加到 $600Kg/cm^2$, 工作频率为 $1KHz$ 。实验结果如图17和图18所示。

5. 发射型、收发型材料的介电性能随电场的变化。测量是在常气压下进行的, 工作频率为 $1KHz$ 。结果如图19和图20所示。可以看到, 材料的介电性能随电场的变化是相当大的。

6. 在不同静压力下 ($1Kg/Cm^2$ 、 $200Kg/Cm^2$ 、 $600Kg/Cm^2$) 发射型、收发型材料的介电性能随电场的变化。实验结果, 在高静压力作用下, 材料介电性能随电场的变化率稍有增大。

以上, 是对实验结果的概述。下面对测量误差略作分析。本实验的测量误差主要由下面两个因素决定: 1. 图示仅有小于5%的测量误差; 2. 样品支架对样品动态电阻的影响, 有小于5%的误差。因此确定总的测量误差为10%左右。

五、讨 论

1. 关于若干技术问题

(1) 由于实验涉及振子动态工作, 高压容器内必须采取吸声措施, 否则由于反射声的影响, 将使图圆不圆, 测量误差变大。本实验使用了共约 $1.5CM$ 厚的多层玻璃布作为吸声壁, 样品处于容器中间位置, 横放, 效果效好。图21和图22给出了有吸声措施和无吸声措施时的导纳圆图, 以资对比。

(2) 在单纯考查高静压力对材料性能的影响时, 只能使用功率密度甚小的电激励信号, 本实验中使用的电功率密度为 $0.001W/Cm^2 \cdot KHz$ 。

(3) 在大功率条件下, 当样品处于严重的非线性工作状态时, 会有“跳跃”现象出现。图23给出了在谐振频率附近发射型样品的导纳频响, 此时样品工作在大功率密度

下。图给出了发射型样品的导纳园图自小功率到大功率的全过程。压电陶瓷材料的这种特性相似于弹性振动问题中的“软化弹簧”的非线性振动，随着振幅加大，振子的谐振频率可低漂移。根据这种特点，确定实验中频率扫描一律从高频扫向低频。

(4) 在本实验中， K_{eff} 的计算用到了样品的自由电容 C^T ，其值乃由精密电容电桥CCJ-1B测得，所加电场为200v/cm，1KHz。由于动态实验中电激励信号的幅度为10v/cm到400v/cm，而在这个范围内的 C^T 值与200v/cm时的 C^T 值相差约1%；此外，当工作频率由1KHz上升到谐振频率时， C^T 值约增大2%（以RFT公司的L-C-R测量电桥测出样品在80Hz、800Hz、8000Hz的 C^T 值之后再外推到谐振频率证明了这一点）。因此，可对 C^T 值考虑修正。

当然，也可以根据

$$K_{eff}^2 = \frac{\Delta f_s}{2\pi f_s^2 R_1 C^T} = \frac{tg^2 M}{\frac{\omega_s C_0}{1} + tg^2 M}$$

用园图上的线段长度之比计算 K_{eff} ，但那时误差将更大，因为 $\omega_s C_0$ 所对应的线段长度太小。

(5) 在测量发射型、收发型材料参数随电功率密度的变化时，随着电功率密度的增加，样品将由线性工作范围进入非线性工作范围。这一点表现在园图上就是导纳园图从园形过渡到带有“跳跃”区间的园。其变化过程已显示在图24中（这种现象在大功率测量中是不可避免的，也是不可缺少的。因为如果没有这种从线性范围到非线性范围的过渡也就无所谓大功率测量。当然，这种过渡的“转变点”会由于具体条件的差异而有所不同。浸没在油中的样品的“转变点”所对应的电功率密度，要比它在空气中为大；假如给予样品较重的负载，则发生这种转变所需要的电功率密度会更大）。如果样品在非线形范围连续工作在谐振频率，那么，由于机械损耗较大，将使样品产生较多的内热，这种内热又将使样品的机械损耗继续增大，其效果表现在园图上是园的直径的收缩，图25便是一例。为了正确地反映材料的性能，应当避免这种情况。解决的办法是不使样品连续工作。在一次扫描记录园图轨迹之后，等待几分钟再第二次扫描取得所需数据。

2. 为了避免样品自身的“历史相关性”，每次测量的样品必须是“新鲜样品”（极化后只经过三个月的时间老化，未受任何高温、高压、高电场的作用），并且，应当将所加电功率（或电场）及静压力的步长适当地选择大一些。

3. 根据实验所得数据，可以给出发射型、收发型材料参数随动态应变的变化情况，如图26所示。动态应变 s_1 的计算公式为(11)

$$s_1 = \frac{E_s d_{s1}}{tg^2 M} = E_s d_{s1} Q_M$$

这里 E_s 为电激励信号的有效值， d_{s1} 、 Q_M 取相应于 E_s 的值。此外，根据有效动态应力

T_1 的计算公式 $T_1 = \frac{s_{11} E}{s_{11}}$ (式中 $s_{11} E$ 取相应于动态应变 S_{11} 的值) 还能算出发射型、收

发材料参数随有效动态应力的变化情况。

4. 关于使用发射型材料的换能器的功率容量的估算。压电换能器的机械功率容量为⁽¹¹⁾。

$$P_M = \nabla \omega_s E_{33}^2 R_{11}^2 \varepsilon_{33}^T Q_M = \nabla \omega_s \frac{1}{S E} \frac{1}{Q_M} s_{11}^2 = \nabla \omega_s s_{11} \frac{E}{Q_M} V$$

其中 V 为换

能材料的体积。于是, 可以使用本实验所得结果, 在某一确定的动态应变 S_{11} (或某一确定的有效动态应力 T_1) 下, 估算具有不同机械品质因数 Q_M 的换能器的机械功率容量。

5. 关于材料的压电性和柔顺性随电功率密度的增加而变大的机理。这可能与压电陶瓷材料内部的电畴结构有关: 在小功率工作时, 材料的压电性和柔顺性主要由电畴的伸缩贡献; 在大功率工作时, 对材料的压电性和柔顺性有贡献的就不仅是电畴的伸缩, 并且包括部分电畴的转向。那么, 能否由此得出在大功率下材料性能更加优越的结论呢? 不能。原因是, (1) 正如前面已经提到的, 材料的机械损耗因子随着电功率的增加也要变大, 这对发射型换能器来说是不利的; (2) 在大功率下, 材料的参数发生的变化较大, 而这一点往往是换能器的使用者所不希望的; (3) 当电激励功率过大时, 压电陶瓷元件将发生部分去极化。

6. 本工作以研究测量方法为主。由横向模样品所得到的关于材料参数的实验结果可供材料研究及换能器研究与设计参考。要确切地反映材料的性能, 须对相当多的标准样品的测量结果取平均。

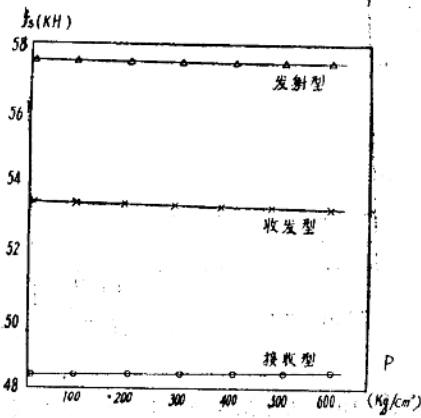


图 5 谐振频率随静压力的变化

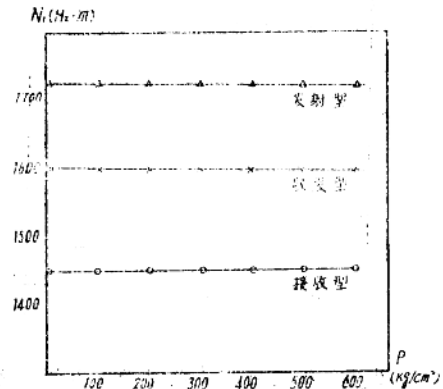


图 6 频率常数随静压力的变化

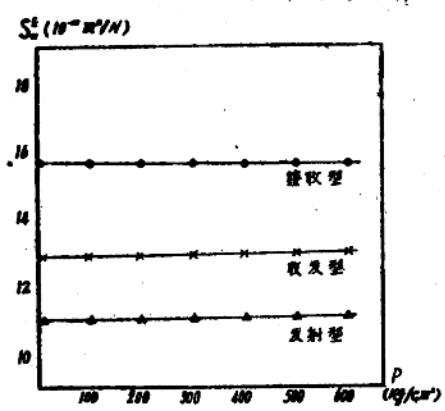


图 7 弹性柔顺常数随静压力的变化

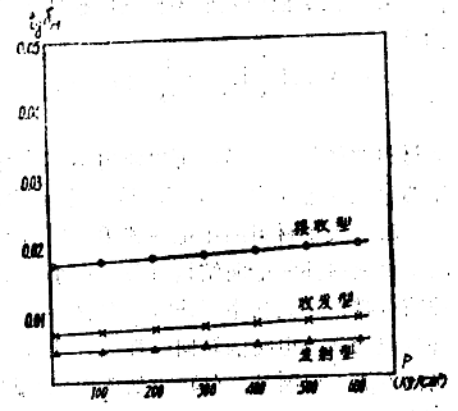


图 8 机械损耗因子随静压力的变化

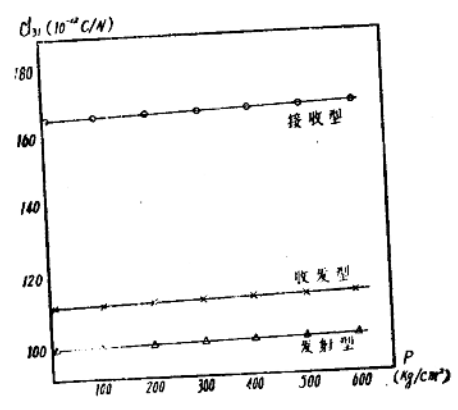


图 9 压电应变常数随静压力的变化

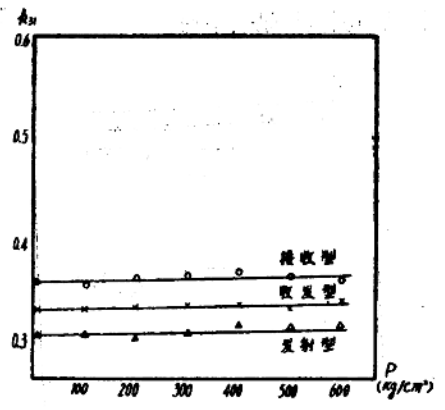


图 10 机电耦合系数随静压力的变化

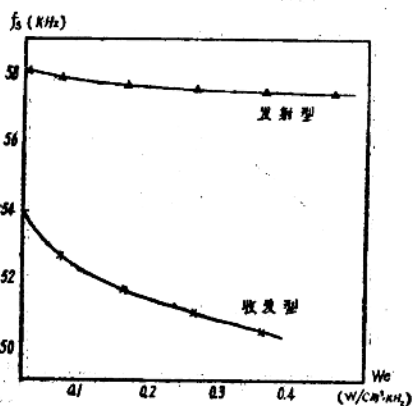


图 11 谐振频率随电功率密度的变化

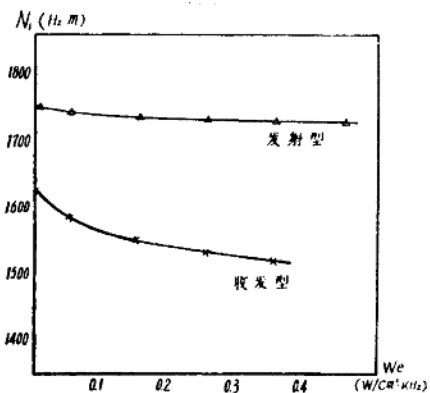


图 12 频率常数随电功率密度的变化

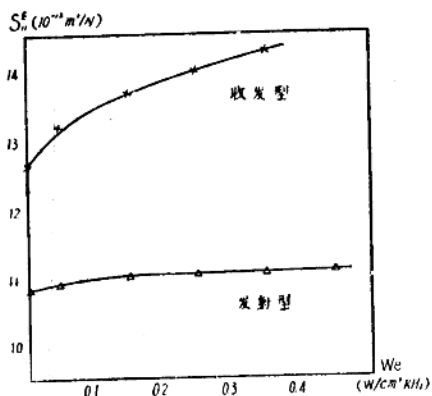


图 13 弹性柔顺常数随电功率密度的变化

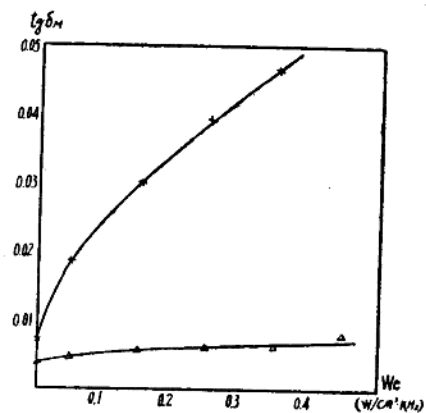


图 14 机械损耗因子随电功率密度的变化

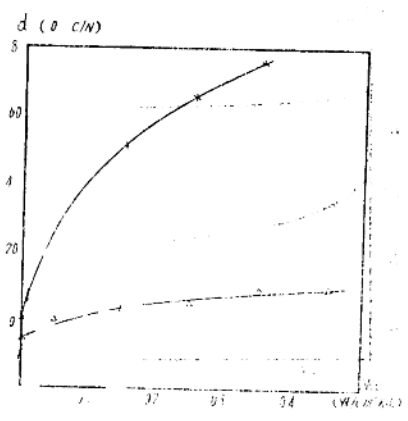


图15 压电应变常数随电功率密度的变化

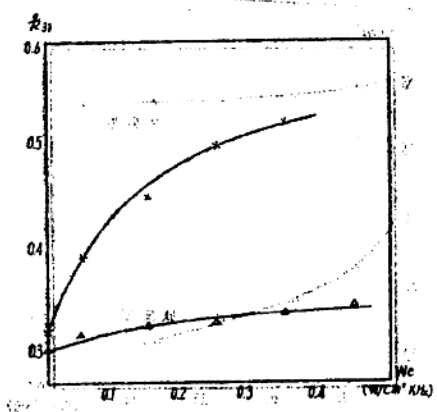


图16 机电耦合系数随电功率密度的变化

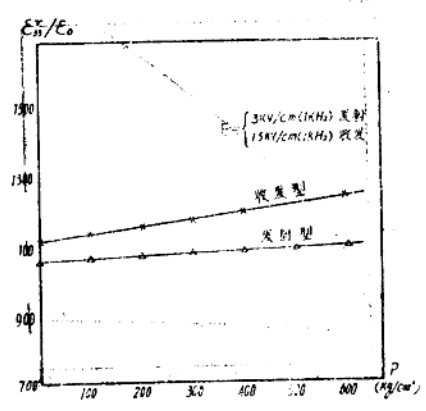


图17 介电系数随静压力的变化

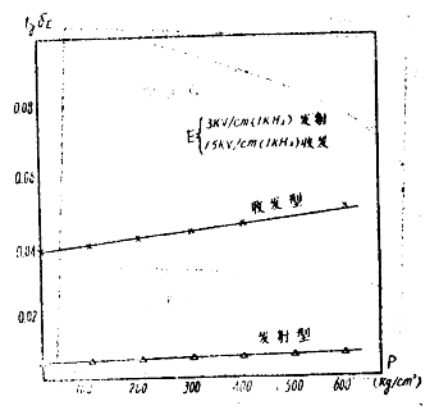


图18 介电损耗因子随静压力的变化

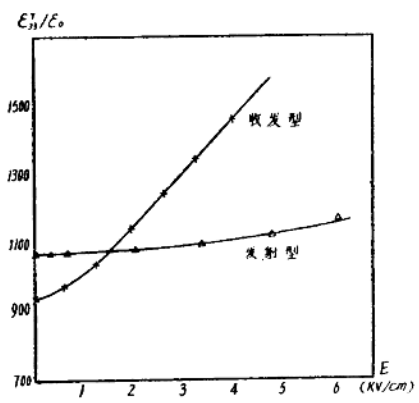


图19 介电系数随电场的变化 (1KHz)

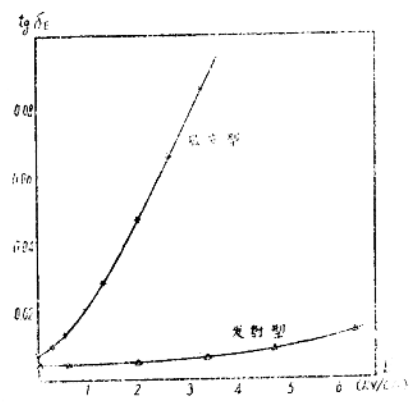


图20 介电损耗因子随电场的变化 (1KHz)

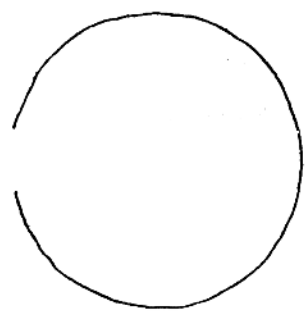


图21 有吸声措施时的导纳圆图



图22 无吸声措施时的导纳圆图

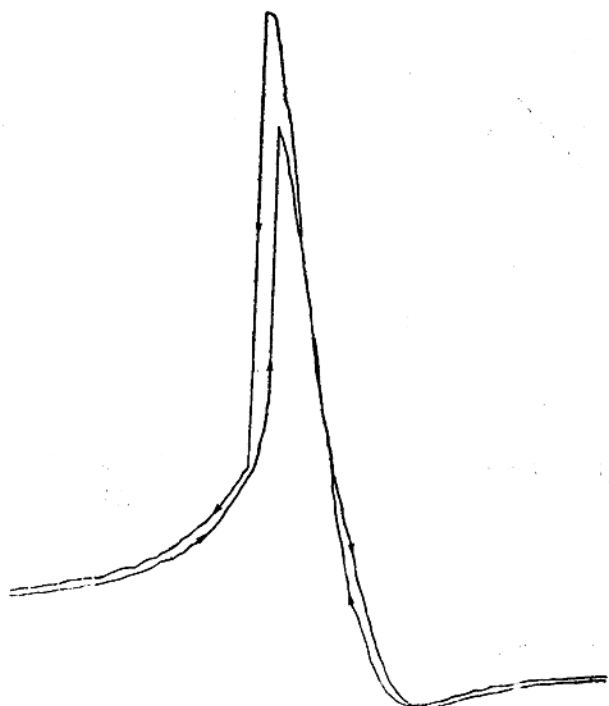


图23 发射型样品在大功率密度下的导纳频响