

压电铁电应用

——285 例——

张福学 等编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书简述了压电铁电基础,全面地介绍了压电、热电和铁电性能的应用,是迄今第一本全面论述压电铁电应用的专著,本书深入浅出地论述了285个典型产品的原理、结构、性能和应用。全书分五编。第2~4章为第一编,简述晶体的压电、铁电和光学性能。第5~21章为第二编,全面系统地论述压电效应的应用。第22章即第三编,论述热释电效应的应用。第23~25章为第四编,论述电光和声光效应的应用。第26章即第五编,论述生物压电学的应用。

本书可供研究、生产和使用压电铁电产品的工程技术人员,以及高等院校固体物理、电介质物理、超声和微声技术、红外技术、电子元件与材料、电子技术等专业的师生参考。

压 电 铁 电 应 用

— 285 例 —

张 函 学 等编著

责任编辑 杨其刚

国防工业出版社

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张31¹/₂ 732千字

1987年3月第一版 1987年5月第一次印刷 印数: 0,001—1,460册

统一书号: 15034·3079 定价: 6.40元

前 言

近年来,随着压电电理论不断完善,人造晶体性能价格比不断提高,以及有机和无机压电薄膜不断实用化,压电电应用的发展日新月异。为了开发压电电应用,国内外许多学者每年花了大量时间调查研究压电电应用的进展和发展趋势,并发表了许多大同小异的只能反映某个侧面的文章,而全面系统论述压电电应用的专著至今还未见到。为了减少研究、生产和使用压电电产品的工程技术人员的重复劳动,并能了解压电电应用的全貌,北京信息工程学院、四川大学、西安交通大学、北京工业大学、山东大学、南京工学院、中国科学院声学研究所,四川压电与声光技术研究所、哈尔滨敏感技术研究所和北京国营晨星无线电器材厂等厂所院校熟悉压电电应用的十四位同志,合作编著了本书。

压电电应用已遍及现代科学技术、工业、国防的每个角落,在发达国家,每个人每天都离不开压电电应用。在许多技术领域(如水声、超声、声表面波和声光技术)的压电应用已成为一门新的学科,并已有了专著。所以,压电电应用难于精确统计和分类,本书介绍的285例产品仅是它们的代表,读者可在典型产品的基础上开发新产品。

本书的执笔分工:姚熹第2~4章,张福学第1、9、14、15、18和26章,施仲坚第5、19章,武以立、金羽第6章,林江第7、13章,袁易全第8章,何芳钧第10章,梁业威第11章,许祖谦第12章 § 12.1、§ 12.2、§ 12.4、§ 12.5、§ 12.7和第24章,王世蕃第12章 § 12.3、§ 12.6和第20、21章,刘一声第16、17章,肖定全第22、25章,徐介平第23章。全书的主编工作由张福学承担,各编著者相互技审,并请孙谦同志技审了七章。

翁文生、王佐卿、郭宝玉、姜连生等同志对部分章节提出了修改意见。周远兴同志描绘了全书插图。在此一并表示衷心感谢!

由于编著者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请同志们批评指正。

编 著 者

目 录

第一章 绪论	1	§ 5.9 气体中应用的大功率超声换能器	47
§ 1.1 压电应用的历史	1	§ 5.10 超声硬度计	49
§ 1.2 当今日常生活中离不开压电应用	1	§ 5.11 超声粘度计	50
§ 1.3 压电效应应用在现代科学技术中的地位	2	§ 5.12 超声流量计	51
§ 1.4 压电材料的现状	3	§ 5.13 超声液位计	53
§ 1.5 压电应用的现状	5	§ 5.14 半穿孔结构的宽频带夹心换能器	54
§ 1.6 展望	6	§ 5.15 压电超声乳化装置	56
参考文献	7	§ 5.16 功率超声	57
第一编 压电电学基础		§ 5.17 超声显微镜头	58
第二章 晶体的压电效应	8	§ 5.18 声子产生器	60
§ 2.1 晶体的压电性	8	§ 5.19 超声延迟线	61
§ 2.2 压电振子	15	§ 5.20 多种多样的压电超声器件及装置	63
参考文献	18	参考文献	64
第三章 晶体的铁电性质	19	第六章 压电声表面波器件	65
§ 3.1 铁电现象	19	§ 6.1 SAW 非色散延迟线	65
§ 3.2 铁电材料及其应用	25	§ 6.2 SAW 带通滤波器	66
参考文献	29	§ 6.3 SAW 振荡器	68
第四章 铁电、压电晶体的光学性质	30	§ 6.4 SAW 相位编码油头延迟线	70
§ 4.1 折射率与双折射	30	§ 6.5 SAW 色散延迟线	71
§ 4.2 热光效应	32	§ 6.6 SAW 卷积器	73
§ 4.3 电光效应	32	§ 6.7 SAW 压力传感器	74
§ 4.4 弹光效应	34	§ 6.8 SAW 热敏传感器	76
§ 4.5 非线性光学效应	35	§ 6.9 SAW 气敏传感器	77
参考文献	36	§ 6.10 SAW 加速度传感器	79
第二编 压电效应的应用		§ 6.11 SAW 陀螺	80
第五章 压电超声器件及装置	37	参考文献	82
§ 5.1 超声检测探头	37	第七章 压电浅体声波器件	83
§ 5.2 超声波探伤仪	38	§ 7.1 浅体声波延迟线 (SBAWDL)	83
§ 5.3 聚焦探头	40	§ 7.2 窄带SBAW带通滤波器 (SBAWF)	86
§ 5.4 超声波测厚仪	41	§ 7.3 宽带SBAW带通滤波器	88
§ 5.5 声阻法	42	§ 7.4 浅体声波能量收集器	90
§ 5.6 液体流速仪	43	§ 7.5 浅体声波振荡器	92
§ 5.7 超声波风速仪	45	§ 7.6 浅体声波谐振器 (SBAWR)	94
§ 5.8 超声对位仪	47	参考文献	97
		第八章 压电水声器件	98
		§ 8.1 深水复合棒发射换能器	98
		§ 8.2 圆柱式增压水听器	100

§ 8.3 弯曲圆盘换能器	101	§ 9.2 压电耳机	156
§ 8.4 弯曲伸张换能器	103	§ 9.3 压电传声器	157
§ 8.5 深井换能器	104	§ 9.4 无噪声压电传声器	159
§ 8.6 混合圆环低频宽带声源	105	§ 9.5 压电拾音器	161
§ 8.7 低频宽带大功率喇叭换能器	107	§ 9.6 电话机用压电送话器	163
§ 8.8 F27 型标准测量发射换能器	109	§ 9.7 抗噪声压电送话器	165
§ 8.9 F30 型标准测量发射换能器	112	参考文献	166
§ 8.10 水力学换能器	113	第十章 压电滤波器和鉴频器	168
§ 8.11 浅海声学应答释放器	114	§ 10.1 单个压电振子的滤波和陷波	168
§ 8.12 FQ-20 型水声指令发射换能器	115	应用	168
§ 8.13 地声、地震水听器	117	§ 10.2 压电滤波器	169
§ 8.14 压电圆管水听器及其系列	118	§ 10.3 低频压电陶瓷滤波器	171
§ 8.15 宽带压电圆管水下校准声源	120	§ 10.4 中频陶瓷滤波器	173
§ 8.16 耦合腔低频率易校准测量装置	121	§ 10.5 高频陶瓷滤波器	175
§ 8.17 辐射压力浮沉子测量声功率的	122	§ 10.6 能陷型多重滤波滤波器	176
装置	122	§ 10.7 压电晶体振子与晶体滤波器	178
§ 8.18 空化阈激光检测装置	123	§ 10.8 压电鉴频器	180
§ 8.19 水下成像 PVF ₂ 宽带接收换能器	124	§ 10.9 宽带晶体鉴频器	182
§ 8.20 声联管压电聚合物水听器	125	参考文献	183
§ 8.21 水下声全息压电换能器布阵	127	第十一章 压电振荡器	184
§ 8.22 701 型多波束测深仪	128	§ 11.1 石英晶体振荡器 (XO)	184
§ 8.23 MX-600 型多普勒声纳	130	§ 11.2 组件晶体振荡器 (PXO)	187
§ 8.24 组合多圆管宽带水声换能器	131	§ 11.3 恒温控制晶体振荡器 (OCXO)	188
§ 8.25 浅海通讯声参量阵列阵	133	§ 11.4 电压控制晶体振荡器 (VCXO)	191
§ 8.26 圆环形自由液浸型发射换能器	134	§ 11.5 温度补偿晶体振荡器 (TCXO)	192
§ 8.27 半空间无指向性发射换能器	135	§ 11.6 石英钟	194
§ 8.28 远程传压水下声源	136	§ 11.7 石英手表	196
§ 8.29 小余响换能器	137	参考文献	197
§ 8.30 声速仪	138	第十二章 压电发电机、电动机和	198
§ 8.31 海底地貌仪	140	变压器	198
§ 8.32 测深仪	141	§ 12.1 压电电源	199
§ 8.33 压电船舶防垢装置	142	§ 12.2 压电点火器	200
§ 8.34 压电壳壳球形接收换能器	143	§ 12.3 压电静电发电机	201
§ 8.35 压电圆锥喇叭换能器	145	§ 12.4 爆电换能器	203
§ 8.36 潜艇声纳	147	§ 12.5 压电振动电动机	206
§ 8.37 舰壳声纳	148	§ 12.6 压电线性电动机	207
§ 8.38 拖曳式声纳	149	§ 12.7 压电变压器	207
§ 8.39 探雷声纳	150	参考文献	212
§ 8.40 声纳浮标	151	第十三章 压电压力传感器	213
§ 8.41 航空吊放声纳	151	§ 13.1 电荷输出式压电汽缸压力传	213
参考文献	153	感器	213
第九章 压电电声器件	154	§ 13.2 压电爆震传感器	215
§ 9.1 压电扬声器	154	§ 13.3 振膜式压电压力传感器	216

§ 13.4	振梁式压电压力传感器	218
§ 13.5	振筒式压电压力传感器	219
§ 13.6	振筒式压电差压传感器	220
§ 13.7	音叉式压电压力传感器	221
§ 13.8	检测切削状态的压电力传感器	223
§ 13.9	压电硬币传感器	225
§ 13.10	电压输出式压力传感器	227
§ 13.11	频率输出式压力传感器	229
§ 13.12	压电式真空传感器	230
§ 13.13	压电应变传感器	231
§ 13.14	压电触觉传感器	232
参考文献		234

第十四章 压电惯性传感器 235

§ 14.1	振梁型压电角速度陀螺	235
§ 14.2	双晶片型压电角速度陀螺	238
§ 14.3	圆管型压电角速度陀螺	241
§ 14.4	半球型压电角速度陀螺	244
§ 14.5	射流型压电角速度陀螺	247
§ 14.6	压电角加速度陀螺	251
§ 14.7	压电增稳器	254
§ 14.8	有角速度输出的压电倾侧仪	255

参考文献		257
------	--	-----

第十五章 压电加速度和力传感器 258

§ 15.1	压电过载加速度表	258
§ 15.2	压电倾侧仪	261
§ 15.3	静电陀螺的压电力敏传感器	262
§ 15.4	压电振动和冲击加速度表	265

参考文献		267
------	--	-----

第十六章 压电计测器 268

§ 16.1	压电车辆自动识别器	268
§ 16.2	微波压电车辆自动识别器	269
§ 16.3	石英晶体温度计	270
§ 16.4	石英晶体膜厚监控器	271
§ 16.5	数字厚度监控器	273
§ 16.6	压电蒸汽探测器	274
§ 16.7	压电氟化物探测器	275
§ 16.8	检测氮的压电探测器	276
§ 16.9	检测 SO ₂ 的压电探测器	278
§ 16.10	测量液体密度的压电传感器	280
§ 16.11	李生林压电陶瓷传感器	282

参考文献		283
------	--	-----

第十七章 压电致动元件 284

§ 17.1	压电双晶片喷墨打印机	284
§ 17.2	压电微滴喷嘴打印机	285
§ 17.3	压电彩色喷墨打印机	286
§ 17.4	压电振动风扇	289
§ 17.5	压电电控百叶窗	290
§ 17.6	压电陶瓷继电器	291
§ 17.7	压电高速大流量转换阀	292
§ 17.8	压电双晶片微型泵	294
§ 17.9	压电开关	294
§ 17.10	压电双晶片驱动的光纤开关	296
§ 17.11	压电双晶片驱动的摆式 CCD 图像摄象器	297

参考文献		298
------	--	-----

第十八章 在医疗技术中应用的压电 299

力敏传感器 299

§ 18.1	压电血压传感器	299
§ 18.2	筒便式压电血压计	301
§ 18.3	压电脉搏计	302
§ 18.4	听诊器用的压电微音器	303
§ 18.5	用压电微音器的肺音诊断装置	304
§ 18.6	胎儿心音压电传感器	305
§ 18.7	加速度型心音计	307
§ 18.8	宫收缩监视压电传感器	308
§ 18.9	监视小儿呼吸的压电传感器	309
§ 18.10	检测啮力的压电传感器	309
§ 18.11	检测手指机械阻抗的压电传感器	311
§ 18.12	测量人体能量消耗的便携式加速度装置	312
§ 18.13	检测人手迹和声特性的压电传感器	313
§ 18.14	检测小生物心音的压电传感器	315
§ 18.15	压电助听器	317
§ 18.16	用压电电源的可携式 X-射线机	317
§ 18.17	压电鞋	318
§ 18.18	电控压电胰岛素泵和阀	319
§ 18.19	人造压电心脏	322

参考文献		323
------	--	-----

第十九章 压电超声诊断和治疗器件 325

及装置		325
-----	--	-----

§ 19.1 压电超声诊断探头	325
§ 19.2 B型快速显象探头	326
§ 19.3 压电超声多普勒探头	327
§ 19.4 压电 DBDU 血流速度测定仪	328
§ 19.5 PVF ₂ 超声换能器	330
§ 19.6 测量人体组织声速的压电共振法	331
§ 19.7 超声全息压电换能器	332
§ 19.8 哺乳动物组织的超声性质	333
§ 19.9 压电超声治疗装置	333
§ 19.10 穴位超声治疗机	335
§ 19.11 超声治疗肿瘤	336
§ 19.12 压电超声换能器粉碎肾结石	338
§ 19.13 压电超声盲人导行装置	338
§ 19.14 超声显微镜	339
§ 19.15 我国压电超声诊断、治疗装置的进展	340

参考文献	341
------------	-----

第二十章 复合压电振子的应用 343

§ 20.1 录象机磁头自动跟踪用压电致动器	345
§ 20.2 压电双晶片旋转马达	345
§ 20.3 压电双晶片高速脉冲阀	347
§ 20.4 压电微电机驱动器	348
§ 20.5 压电蜂鸣器	349
§ 20.6 压电音叉	351
§ 20.7 机械滤波器	354
§ 20.8 压电耦合器	356
§ 20.9 压电双晶片光束扫描器	358
§ 20.10 电-声倍频器和混频器	360

参考文献	361
------------	-----

第二十一章 微位移器 363

§ 21.1 压电陶瓷位移发生器	363
§ 21.2 压电步进位移器	366
§ 21.3 压电流量阀	367
§ 21.4 铁电-铁氧体定位器	370
§ 21.5 电致伸缩微位移器	372
§ 21.6 电致伸缩微角度调节器	373

参考文献	375
------------	-----

第三编 热释电效应的应用

第二十二章 热释电效应的应用 376

§ 22.1 热释电探测器	376
---------------------	-----

§ 22.2 热释电红外成像(I)——利用探测器的热成像	379
§ 22.3 热释电红外成像(II)——热释电振象管	381
§ 22.4 热释电高温计	382
§ 22.5 热释电微温计	383
§ 22.6 热释电辐射计——空间技术中的应用	384
§ 22.7 电学定标热释电辐射计	384
§ 22.8 热释电反射计	385
§ 22.9 光度计与光谱仪接收器	386
§ 22.10 热释电光谱基准探测器	387
§ 22.11 热释电激光探测器	389
§ 22.12 入侵报警器	389
§ 22.13 廉价温控开关	390
§ 22.14 火情报警器	390
§ 22.15 热释电型分选装置	391
§ 22.16 热释电火车热轴检测器	391
§ 22.17 气体分析与污染监测仪	392
§ 22.18 热释电差热分析仪	393
§ 22.19 热释电风速计	394
§ 22.20 热释电快速中性粒子束探测器	395
§ 22.21 热释电外差探测	395
§ 22.22 激发态极化探测器	396
§ 22.23 微秒级强电脉冲发生器	397
§ 22.24 热释电能量转换器	398
§ 22.25 热释电型热机	399
§ 22.26 热释电电光型红外辐射转換器	400
§ 22.27 热释电过滤除尘器	402
§ 22.28 热释电复印机	404
§ 22.29 绝热去极化致冷机	405
§ 22.30 热释电记忆元件	407
§ 22.31 确定晶体的非中心对称结构	408
§ 22.32 研究晶体的相变特性	409
§ 22.33 确定铁电晶体的极化状态	410
§ 22.34 计算铁电晶体的居里常数	411
§ 22.35 观察铁电晶体的电畴结构(热释电探针技术)	411
§ 22.36 研究晶体的表面效应	412
§ 22.37 确定晶体中原(离)子的相对位移	413

§ 22.38	测量热释电晶体的热扩散率	414
§ 22.39	地球与行星内部的铁电性研究	415
§ 22.40	生物热释电性研究	416
参考文献		418

第四编 电光和声光效应的应用

第二十三章 压电声光器件

§ 23.1	声光调制器	421
§ 23.2	声光移频器	424
§ 23.3	正常声光偏转器	425
§ 23.4	反常声光偏转器	428
§ 23.5	声光可调谐滤波器	430
§ 23.6	多功能声光器件	432
§ 23.7	多信道声光器件	434
§ 23.8	表面(或薄膜)声光器件	435
§ 23.9	声光功率谱分析器	436
§ 23.10	空间积分声光相关器(卷积器)	438
§ 23.11	时间积分声光相关器	439
§ 23.12	声光富氏变换	440
参考文献		441

第二十四章 压电铁电光学器件

§ 24.1	电光强度调制器	442
§ 24.2	电光相位调制器	445
§ 24.3	克尔盒	446
§ 24.4	行波调制器	447
§ 24.5	电光开关	449
§ 24.6	电光偏转器	450
§ 24.7	光学频移和脉冲压缩器	452
§ 24.8	光倍频器	453
§ 24.9	光混频器	456

§ 24.10	光参量放大和振荡器	457
§ 24.11	铁电存储器	459
§ 24.12	铁电显示器	462
§ 24.13	电控双折射器件	462
§ 24.14	铁电费匹克	465
§ 24.15	光逻辑电路	468
§ 24.16	电控光散射器件	469
§ 24.17	反射式表面畸变型存储显示器	470
§ 24.18	压电可变形反射镜	471
参考文献		475

第二十五章 光铁电效应的应用

§ 25.1	小功率高压发生器	476
§ 25.2	光折变全息存储器件	477
§ 25.3	X射线全息存储器件	479
§ 25.4	实时双曝光全息干涉量度计	479
§ 25.5	集成光学器件	480
§ 25.6	四波混频	481
§ 25.7	产生相位共轭波	482
§ 25.8	放大相干图像	483
§ 25.9	分析极性晶体的杂质中心特性	484
§ 25.10	离子注入 PLZT 光铁电图像存储显示器	485

参考文献	487
------	-----

第五编 生物的压电性及其应用

第二十六章 生物的压电性及其

应用

§ 26.1	生物聚合物的压电性	489
§ 26.2	生物压电性的应用	490
§ 26.3	电场治疗仪	491
参考文献		494

第一章 绪 论

§ 1.1 压电应用的历史

1880年居里兄弟发现电气石的压电效应,从此开始了压电学的历史。1881年居里兄弟实验验证了逆压电效应,给出石英相同的正逆压电常数。1894年沃伊特(Voigt)指出,仅无对称中心的二十种点群的晶体才有可能具有压电效应。石英是压电晶体的代表,它一直被广泛采用。利用石英的压电效应可构成振荡器和滤波器等频控元件。第一次世界大战中,居里的继承人郎之万为了探测德国的潜水艇,利用石英的压电效应制作了水下超声探测器,从而揭开了压电应用史的光辉篇章。

除石英外,罗息盐、ADP、EDT、DKT等压电晶体也有种种用途,但压电材料及其应用取得划时代的进展是开始于第二次世界大战中发现的 BaTiO_3 陶瓷。美国、日本和苏联分别独自发现 BaTiO_3 后,1947年美国的罗伯特(Roberts)在 BaTiO_3 陶瓷上加高电压进行极化处理,获得了压电陶瓷的压电性。随后,日本积极开展应用 BaTiO_3 压电陶瓷制作超声换能器、音频换能器、压力传感器等计测器件、滤波器、谐振器等压电应用的研究,这种广泛的应用研究进行到五十年代中期。

1955年美国B.贾菲(B. Jaffe)等人发现比 BaTiO_3 的压电性优越的PZT压电陶瓷及其实用化,大大加快了应用压电陶瓷的速度, BaTiO_3 时代难于实用化的一些应用,特别是压电陶瓷滤波器和谐振器,以及机械滤波器等,随着PZT的出现而迅速实用化。应用压电SAW的滤波器、延迟线和振荡器等SAW器件,七十年代末期即已实用化。

聚合物压电性的研究开始于木材、羊毛和骨头等生物材料,后来研究合成聚合物的压电性。1969年报导的聚偏氟乙烯(PVF₂)已实用化。七十年代在治疗骨折时,应用骨头的压电性治疗能加快痊愈速度。

§ 1.2 当今日常生活中离不开压电应用

当今社会,压电材料及其应用已遍及日常生活的每个角落,每人每天都离不开压电应用。香烟、煤气炉、汽车发动机等点火要用压电点火器;电子手表要用压电谐振器;声控门、报警器和儿童玩具等要用压电蜂鸣器;银行、商店、超净厂房和安全保密场所的管理,以及侦察、破案等要用能验证每个人笔迹和声音特征的压电力敏传感器。家用电气产品要用压电器件,如电视机要用压电陶瓷滤波器、压电SAW滤波器、压电变压器和压电风扇;收录机要用压电微音器、压电扬声器和压电马达;收音机要用压电陶瓷滤波器和高保真压电喇叭;电唱机要用压电拾音器和压电马达;闪光灯要用压电高压发生器。

生物制品具有压电性。生物纤维和皮毛制成的衣、帽和鞋都是压电材料,当受力作用时,它们都会产生“压电”。“压电”触击皮肤,可促进血液循环,消除疲劳。因此,人们还专门研制了压电鞋。

更有趣的是,生物都具有压电性,压电效应伴随和引导万物生长。人就是一个复杂的压电体,人的各种感觉器官实际上是生物压电传感器。应用生物压电学的原理既可防

病、治病,使人延年益寿,还可弄清人的生理功能。过去人们对中医与西医某些对立的观点不可理解,如治疗骨折,西医主张患者静,中医主张患者动,以致有的人认为中医不科学。当今根据生物压电学的原理得知,骨头具有压电性,压电效应引导骨头生长,因此运动能加速骨头的痊愈。根据正压电效应治疗骨折,不仅可加快痊愈速度,还可治愈骨头已干燥的西医不能治愈的骨折。根据逆压电效应,将骨头通电可矫正畸形腿骨、髌骨等,还可使断骨长长。

§ 1.3 压电铁电应用在现代科学技术中的地位

利用压电铁电材料可构成压电、铁电、热释电、光铁电和光学等器件,本书列举了它们中的 285 例,表 1-1 例举其中部分产品在电子学各个领域中的应用。由表可知,压电产品已是电子学各个领域中的关键元器件(或部分),它是现代电子学的重要组成部分。

表 1-1 压电铁电在电子学中的应用

电子学领域	压电产品	作用
信号处理	滤波器、变频器、放大器、衰减器、延迟线、混频器、卷积器;光电调制器、弹光调制器、光偏转器、光开关、热光开关、可调滤波器、光倍增器、光混频器、光频移和脉冲压缩器;声光偏转器、声光调制器、声光可调滤波器、声光频谱分析仪。	电 $\longleftrightarrow$ 声 处理光信号
存储显示	铁电存储器、铁电显示器;光铁电存储显示器、光折变全息存储器、X射线全息存储器。	存储显示信息和图像
接收发射	声的、鱼探仪、超声测声仪、水下扬声器和传声器;超声探伤仪、超声厚度计、混凝土探伤仪、地质结构探测仪;拾音器、传声器、耳机、扬声器、电视遥控仪。	发射与接收水中、地下和固体中的超声波
计测	加速度表、陀螺、声阻抗检测器、微位移器、微量天平、热释电探测器、压力计、方位探测器、车辆识别器、计数器、流量计、流速计、风速计、声速计、液面计、诊断仪。	计测和自动控制
信号发生器	电信号发生器——压电振荡器	标准信号源
	电声换能器	送受话器、拾音器、传声器、扬声器、蜂鸣器。
	声信号发生器	水声换能器
	超声换能器	超声换能器
	工业超声换能器	清洗,切割,焊接,探伤
电声	压电发电机	压电打火机、汽车点火器、压电引信、X光机高压电压
	压电电源	引燃,引爆,高压源
	静电除尘器、负离子发生器、静电复印机、静电涂覆机	电视显像管、电场治疗仪等的电源

人类已进入信息社会,而信息要通过传感器才能获得。在信息社会,如果没有良好的传感器,微处理器就不能很好地发挥作用。因此,八十年代美、日等发达国家在安排开发新技术的计划时,列在首要地位的是传感器技术。传感器种类繁多,各有优缺点,而压电传感器具有高灵敏度和高可靠等其它传感器不可相媲美特点,它属优质高档传

感器。八十年代欧洲传感器产值为 38 亿美元, 其中压电传感器占很大比例。表 1-2 列出压电力敏、声敏、热敏、光敏、湿敏、气敏等各类型传感器中的部分产品。

表 1-2 压电传感器

传感器类型	生物功能	转 换	压 电 传 感 器 名 称	压电材料
力敏	接触传感	力→电	微音器、应变仪、声纳、拾音器、压电发电机、 血压计、压电射流陀螺、压电加速度表	BaTiO_3 PZT PMS ZnO PVF_2 石英
		电→机 机械形变	位移器、继电器、注射器、压电风扇、压电笔、 机械手、压电电动机	
声敏	听觉传感	声→电	振荡器、微音器、超声探测器、助听器、	石英, PZT
		声→力	盲人导行仪	PMS, PVF_2
		声→光	声光偏转器、声光调制器	LiNbO_3 , PbTiO_3 PbMoO_4
热敏	接触传感	热→电	高温计、计数器、防盗报警器	BaTiO_3 , PZT TGS, PbTiO_3 LiTaO_3 , PVF_2
光敏	视觉传感	光→电	热电红外探测器、热电显象管、光调制器、光偏 转器	LiTaO_3 PbTiO_3 PLZT
气(湿)敏	嗅觉传感	湿度→电 气→电	湿度指示器、井下瓦斯和大气污染等有害气体 浓度报警器	石英

压电学是介于生物、医学和电子学之间的一门边缘科学。研究生物的压电和热电性, 弄清生物功能的机理, 这是生命科学。从理论上弄清人的生理功能, 特别是人体特异功能, 可进一步开发人的智能, 并促进医学的发展。因此, 如果说下一个世纪是生物、医学和电子学的世纪, 那么, 开发生物压电学将具有深远的意义。

§ 1.4 压电材料的现状

1.4.1 压电单晶

压电应用的发展取决于压电材料种类的更新和性能的提高。为了开发压电新应用, 在石英之后研制出了罗息盐、ADP、KDP、EDT、DKT 和 LH 等压电单晶。但由于它们的性能存在某些缺陷, 如罗息盐易水解等, 故随着人造石英的大量生产和压电陶瓷性能的提高, 这些晶体大多数都已基本不用。至今石英仍是最重要的也是用量最大的振荡器、谐振器和窄带滤波器等频控元件的压电材料。除石英外, 性能好而用量也大的压电单晶是铌酸锂和钽酸锂, 它们大量用作 SAW 器件, 而 LiNbO_3 还是高耦合压电晶体, 可用作谐振器和换能器。此外, 氧化锌和氮化铝等压电薄膜已是当今微波器件的关键材料。

1.4.2 压电陶瓷

BaTiO_3 是最早发现的压电陶瓷, 早在 1949 年日本就研究应用它的压电性设计鱼群

探测器,其最大缺点是谐振频率的温度特性差。但用 Pb 和 Ca 部分取代 BaTiO₃ 中的 Ba 可改善频率温度特性,故在广泛使用 PZT 压电陶瓷的今天,仍有部分压电换能器用 BaTiO₃ 陶瓷生产。象 BaTiO₃ 那样的单元系压电陶瓷,还有用 Mn、W、Ca、Bi、La 和 Nb 等改性的 PbTiO₃, 它有良好的压电性能,是当前生产高频滤波器用的良好压电陶瓷。

用石英作滤波器、谐振器和换能器难于实现宽带,用 BaTiO₃ 构成的频控元件温度性能差。PZT 的机械耦合系数高,温度特性好,并有高的居里温度(约 300°C),用 Sr、Ca、Mg 等元素部分取代 Pb,或添加 Nb、La、Sb、Cr、Mn、Fe、Co、Ni 等元素改性,可得到不同用途的许多 PZT 系压电陶瓷,如 PZT-4, PZT-5, PZT-6, PZT-7, PZT-8 等。PZT 的出现是压电陶瓷发展史上的一件划时代的大事,许多在 BaTiO₃ 时代不可能或非常难于实现的新器件随 PZT 的实用化而随之出现。二元系压电陶瓷材料,除 PZT 外,可适用的还有 Pb_{0.8}Ba_{0.4}Nb₂O₆、Na_{0.5}K_{0.5}NbO₃ 和 Na_{0.8}Cd_{0.2}NbO₃ 等。

在 PZT 的基础上,日本 1965 年研制成功性能更好的 PbZrO₃-PbTiO₃-Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ 三元系压电陶瓷(简称 PCM),至今在日本广泛采用。我国压电与声光技术研究所 1969 年研制成功的 Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O₃-PbZrO₃-PbTiO₃ 三元系压电陶瓷(简称 PMS)的性能比 PZT 和 PCM 的优越,获国家发明奖。用 PMS 先后研制成功压电陀螺、压电陶瓷滤波器、压电变压器、压电超声换能器、压电传感器和压电蜂鸣器等,其中压电陀螺获国家发明奖。表 1-3 列出 PMS 的常用配方及其性能。

表 1-3 PMS 部分配方的组成及其性能

主 成 分 (mol%)			添加杂质 (Wt%)	R (Ω)	C (pF)	K _p (%)	Q _m	Δf/f _m (%)	
X	Y	Z						-55°C	+85°C
4.0	43.50	52.50	0.25Nb ₂ O ₅ 0.5La ₂ O ₃ + 0.25Cr ₂ O ₃ + 0.3Bi ₂ O ₃	11	369	45.8	932	+ 0.020	- 1.583
4.5	47.16	48.34		2.7	1075	70.0	600	< ± 0.30	
5.0	46.00	49.00		5.3	500	61.2	730		
5.5	45.00	49.50		6.6	540	57.1	740		
5.5	46.10	48.40		4.0	450	60.7	940		
6.0	48.8	45.2		9.7	1127	56.6	1108		
6.0	62.6	31.4		16.0	320	22.0	3585	+ 0.173	- 0.396
6.5	62.3	31.2		16.6	308	20.0	3102	+ 0.242	- 0.203
7.0	50.0	43.0		5.0	690	48.4	1580	- 0.260	- 0.100
7.0	49.0	44.0		4.0	656	52.7	1458	- 0.203	- 0.303
7.0	47.5	45.5		2.0	1086	63.9	945	+ 0.395	- 0.319
7.0	55.0	38.0		4.5	770	30.7	2050	- 0.077	- 0.164
7.0	60.0	33.0	0.15Cr ₂ O ₃	16	377	26.0	1947	+ 0.070	- 0.160
7.0	45.5	47.5		3.4	370	52.6	2340		
7.0	48.25	44.75		1.5	893	60.3	1847		
7.0	10.0	83.0		44	249	14.0	3249	- 1.90	+ 0.034
7.0	24.0	69.0		7.8	369	25.0	7000		
7.0	50.00	43.0		2	960	44.6	1500		
7.0	75.0	18.0		128	157	12		+ 0.847	- 1.868
8.0	43.5	48.5		7.2	383	49.9	1430		
8.0	47.8	44.2		1	1052	63.4	1960		
8.25	47.59	44.16		2	1023	63.3	1370	- 0.021	- 0.216
8.5	47.36	44.14		1	1375	66.3	1420		
8.5	47.36	44.14		2	1400	68.0	1000	+ 0.210	- 0.258
8.75	47.33	43.92		1	1245	65.9	1192	+ 0.013	- 0.152
9.0	47.2	43.8		1.3	1035	64.3	1502	+ 0.852	- 1.753
10.0	43.5	46.5		4.3	459	43.7	2335		
10.0	60.0	30.0		12.7	314	23.0	3035		
10.0	46.2	42.8		6.6	530	52.9	791	- 0.389	+ 0.357
11.0	23.5	65.5		13.4	436	16.3	4490	+ 0.825	- 0.196
12.0	23.2	64.8		15.0	444	15.0	4400	- 1.80	- 0.419
12.5	43.5	44.0		4.0	539	46.0	1563	+ 1.263	- 2.210
15.0	41.0	44.0		21.0	412	37.0	939	+ 1.414	- 1.683
18.0	58.0	24.0		13.2	670	22.3	1530	+ 0.23	- 0.46

1.4.3 压电高聚物薄膜

以PVF₂为代表的压电高聚物薄膜的压电性强、柔性好,特别是其声阻抗与空气、水和生物组织的接近。所以PVF₂在许多技术领域都有适用性,特别是用它制作用于液体、生物体及气体的换能器,可获得比用其它压电材料制作的换能器好的阻抗匹配。用PVF₂可构成各种换能器,如微音器、耳机和扬声器等用的声换能器;用于固体、液体和气体的超声换能器;声和超声范围用的医疗换能器;用作打字机的按键和计算机末端的开关换能器。此外, PVF₂薄膜的热电性还有许多用途,如摄象管等。

§ 1.5 压电应用的现状

当前压电应用的趋势是已实用化产品的产值产量迅速增加,新产品不断出现。表1-4列出部分压电产品的市场情况。

表1-4 压电产品的市场情况

年产量(件)	压 电 器 件	备 注
>10 ⁶	谐振滤波器(不组装)	日本1981年仅陶瓷滤波器的产量达
	谐振滤波器(组装)	3.2亿只,产值达70亿日元
	各类压电蜂鸣器	日本1981年产量达1亿只,产值达40亿日元
>10 ⁷	留声机喇叭	
	固定式和袖珍式气体点火器	日本1978年销售量达2.1×10 ⁷ 只
>10 ⁸	闪光灯驱动器	
	空气中超声换能器	日本1978年销售量8.2×10 ⁸ 只
	音频高音喇叭	
	欧洲电视用延迟线换能器	
	压电延迟线	美国1978年年产量>10 ⁸ 件
年产量大,但 <10 ⁸ 件	用于声纳系统的各类水听器的换能器	
	声场辐射器	
	超声清洗和焊接换能器	老产品
	无损试验用换能器	
	加速度表等力敏传感器	
	霍义之类的特种滤波器	
	喷雾换能器	
	电调频调频收音机用SAW滤波器 各种类型的位移发生器	
特种用途的压 电产品	压电心脏起搏器	已实用化
	人造心脏用压电泵	
	盲人导行仪	已实用化
	电场治疗仪	已实用化
	压电惯性器件	已实用化

1916年研制成功压电超声换能器，八十多年来它一直是压电应用的重要领域。空中用电磁波通讯，而在水下、地下和固体中通讯则要用超声波。压电超声换能器是水下发射和接收超声波的水声器件，它在水声通讯中的地位相当于雷达的天线，是各类舰船必不可少的水声传感器，还广泛用它作海上浮标。压电超声换能器在工业中广泛应用的是超声清洗、超声精密加工（画线、切割、精磨、塑料焊接等）、超声加湿、超声探伤和超声诊断等。当今压电超声换能器的另一广泛应用的领域是遥测和遥控系统，它广泛用于遥控电视频道开关系统，也可用于停车时间记录器的自动控制系统，还广泛用于防盗报警系统和儿童玩具。

其次，目前最普及的压电应用是声换能器中的压电蜂鸣器，从手表、计算器、小型警铃，以及许多需要警铃的民用产品都离不开它。带有晶体管振荡电路和直流电源的蜂鸣器可发出连续声音，带有开关电路的蜂鸣器可发出断续声音。因此，压电蜂鸣器既可直接应用，亦可组合成发声部件，故市场需求量极大。另外，属于声换能器的水下微音器和扬声器亦已获得广泛应用，它们能用作短距离的水下对话器，大功率的水下扬声器还可用来驱赶或引诱鱼群。

第三方面的应用是计测用压电器件。目前测量压力和加速度的压电力敏传感器和压电加速度传感器已大量生产，利用超声换能器进行超声测深、超声测厚、超声测流速、超声诊断等的压电超声计测装置亦已普及。

第四方面的应用是滤波器、谐振器和延迟线等频控元件。调谐音叉滤波器、机械滤波器、陶瓷滤波器、晶体滤波器、SAW滤波器和延迟线，在产值产量方面居压电应用的首位。

第五方面的应用是压电发电机和压电变压器。点燃煤气的压电发电机1965年开始批量生产，目前发达国家几乎所有煤气灶、浴室煤气锅炉、煤气房间加热器、煤气热水器和香烟都用压电发电机。压电变压器具有结构简单、尺寸小、变压比大和次级电路上的负载变化稳定等优点，故可用于静电除烟器、负离子发生器、静电涂覆设备、静电复印机、电场治疗仪和空气净化器等。压电变压器已用于输入功率只需几W的黑白电视机。

§ 1.6 展 望

当今世界各国普遍采用的二、三元系压电陶瓷都含有铅，用这种压电陶瓷生产压电产品会污染环境。因此，开发性能良好的象 $(\text{NaLi})\text{NbO}_3$ 那样的无铅压电陶瓷，这是压电陶瓷材料发展的方向。有机和无机压电薄膜的出现，使得许多用压电陶瓷和压电单晶难于实现的器件实用化了。今后几年，有机压电薄膜 PVF_2 等的器件将在电声、超声和水声领域取代相当多的压电陶瓷器件，而 ZnO 和 AlN 等无机压电薄膜则能实现压电陶瓷不可能实现的体声波、SAW微波器件和平面集成微波器件。毫无疑问，开发压电薄膜不仅弥补了压电陶瓷的不足，还填补了压电陶瓷难于实现的领域——微波平面器件，元器件平面化是发展方向。

压电应用的发展趋势，一方面不断提高已实用化压电产品的性能价格比，从而扩大市场销售量，其中压电发电机、电动机、变压器及各种压电发声器件的年销售量将迅速增加。另一方面为适应现代科学技术的发展而不断开发新的压电应用，其中压电声敏、力敏、热敏和气（湿）敏等优质高档传感器是开发的重点。开发能验证每个人笔迹和声

有特征的压电力敏传感器, 对电脑的广泛应用, 特别是声控电脑的普及将具有深远的意义。

开发生物压电学。一方面, 利用生物压电学的原理防病、治病, 使人延年益寿, 特别是在骨折普及利用压电效应治疗骨折和利用逆压电效应矫正畸形骨, 将大大促进我国中医理论的健全和建立。另一方面, 研究人的生理功能(包括特异功能), 发掘人的智能, 这是生命科学的重要组成部分。

参 考 文 献

- [1] W. G. Cady, Piezoelectricity, McGraw Hill, New York, First Edition, Third Impression (1946).
- [2] W. P. Mason, Piezoelectric Crystals and their Application to Ultrasonics, D. Van Nostrand Company, Inc. Princeton, New Jersey New York (1950).
- [3] 田中哲郎著, チタン酸バリウムとその応用, オーム社, 昭和30年。
- [4] General Post Office Selected Engineering Reports, Piezoelectricity, Printed and Published by Her Majesty's Stationary Office (1957).
- [5] И. А. Глазман, Пьезокерамические материалы в электронной технике, Издательство «Энергия», Москва (1965).
- [6] H. F. Tiersten, Linear Piezoelectric Plate Vibrations, Plenum Press, New York (1969).
- [7] B. Jaffe, W. R. Cook Jr., H. Jaffe, Piezoelectric Ceramics, Academic Press (1971).
- [8] 桥谷 三郎, 藤本 三治, 强誘電体とその応用, 株式会社朝倉書店, 昭和36年11月25日初版発行。
- [9] 田中哲郎, 岡崎 清, ソノ断界共編, 压電セラミツク材料, 株式会社学蔵社, 昭和48年12月10日初版発行。
- [10] 陶修 電子材料工業会, 压電セラミツクスとその応用, 電波新聞社, 昭和49年4月15日初版発行。
- [11] J. Van Randerat, R. E. Settrington, Piezoelectric Ceramics, Mullard Limited (1974).
- [12] В. В. Малов, Пьезорезонансные Датчики, Издательство «ЭНЕРГИЯ» (1978).
- [13] 许逸寰等编, 铁电与压电材料, 科学出版社, 1978年7月第一版。
- [14] 秦自群等编, 压电石英晶体, 国防工业出版社, 1980年1月第一版。
- [15] 中国科学院有机化学研究所十二宅编, 压电高聚物, 上海科学技术文献出版社, 1980年2月第一版。
- [16] 何芳岗等编著, 压电陶瓷滤波器, 科学出版社, 1980年7月第一版。
- [17] 张福学编著, 压电晶体陀螺, 国防工业出版社, 1981年1月第一版。
- [18] 中华人民共和国国家标准, 压电陶瓷材料性能测试方法, GB2114-81, 标准技术出版社, 1982年7月第一版。
- [19] 张沛霖, 张仲渊 编, 压电测量, 国防工业出版社, 1983年4月第一版。
- [20] 武以立, 邓盛烈, 王永德编著, 声表面波原理及其在电子技术中的应用, 国防工业出版社, 1983年8月第一版。
- [21] 张福学著, 压电晶体力和加速度传感器, 四川科学技术出版社, 1985年3月第一版。
- [22] 孙慷, 张福学主编, 压电学, 上册, 国防工业出版社, 1984年5月第一版。
- [23] 张福学, 孙慷主编, 压电学, 下册, 国防工业出版社, 1984年9月第一版。

第一编 压电铁电学基础

第二章 晶体的压电效应

§ 2.1 晶体的压电性

对于晶体构造中不存在对称中心的异级晶体，加在晶体上的张应力、压应力或切应力，除了产生相应的应变以外，还将在晶体中诱发出介电极化或电场。这一现象被称为正压电效应；反之，若在这种晶体上加上电场，从而使该晶体产生电极化，则晶体也将同时出现应变或应力，这就是逆压电效应。两者统称压电效应。

晶体的压电效应可用图 2-1 来表示。图 2-1 (a) 是压电晶体的示意图。当晶体不受外力作用时，晶体中的正负电荷重心重合，晶体对外不呈现极性，单位体积中的电矩（即极化强度）等于零。但是，在外力作用下，晶体在发生形变的同时，正负电荷的重心在应力作用下分离，重心不再重合，这时单位体积的电矩不再等于零，故晶体对外表现出极性。在图 2-1 (b) 中，由于晶体构造中的对称中心，无论有无外力的作用，晶体中的正负电荷重心总是重合在一起，因此不会出现压电效应。晶体构造中不存在对称中心是产生压电效应的必要条件。

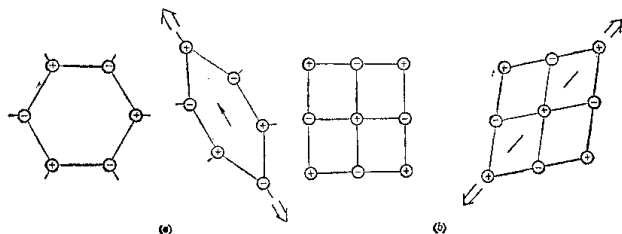


图2-1 晶体压电效应的示意图

(a)无对称中心的异级晶体；(b)有对称中心的异级晶体。

在晶体的 32 种点群中，有 21 个没有对称中心，其中除 432 点群因为对称性很高不能出现压电效应外，其余 20 个点群都有可能产生压电效应。这 20 个点群是：1，2，m，222，2mm，4， $\bar{4}$ ，422，4mm， $\bar{4}2m$ ，3，32，3m，6， $\bar{6}$ ，622，6mm，6m2，23， $\bar{4}3m$ 。此外，对压电陶瓷、复合材料和生物材料，描写其对称性的 7 种居里点群中，有

3 种可能产生压电效应, 它们是 ∞m 、 $\infty 2$ 和 ∞ 。

晶体的压电效应由应力 T 和应变 S 等机械量与电场强度 E 和电位移 D (或极化强度 P) 等电气量之间的耦合效应产生。压电效应是一种机电耦合效应。因此在讨论晶体的压电效应之前, 有必要回顾一下晶体的介电性质和弹性。

2.1.1 晶体的介电性质

晶体的介电性质可用电场强度 E 和电位移 D 来描述, 其单位分别为 V/m 和 C/m^2 。根据静电场的基本性质, 对于各向均匀的媒质, 它们之间的关系:

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2.1)$$

式中, ϵ 是晶体的介电常数, 单位是 F/m ; ϵ_0 是真空介电常数, 其值为 $8.85 \times 10^{-12} F/m$; $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ 是一个无量纲的量, 称为相对介电常数。在实际工作中, 当不致发生混淆时, 足标 “ r ” 和 “相对” 二字可略去。 ϵ_r 有时也用 K 来表示。

压电晶体和压电陶瓷是各向异性的。它们的电位移 D 和电场强度 E 都需要用矢量来表示。在直角坐标系中, D 和 E 沿三个轴向的分量分别为 D_i 和 E_j , 足标 i , $j = 1, 2, 3$ 表示轴向。故 D 和 E 之间的线性关系需要用二阶介电常数张量来描述:

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

介电常数张量共有 9 个分量。不难证明, 介电常数张量是一个对称张量, $\epsilon_{12} = \epsilon_{21}$, $\epsilon_{13} = \epsilon_{31}$, $\epsilon_{23} = \epsilon_{32}$, 因而共有 6 个独立分量。式 (2.2) 也可写成

$$D_i = \sum_{j=1}^3 \epsilon_{ij} E_j, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.3)$$

按照广泛接受的爱因斯坦惯例, 式 (2.3) 右边对足标重复项 j 的求和记号 $\sum_{j=1}^3$ 可略去, 即

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j, \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2.3a)$$

介电常数张量的独立分量还受晶体结构对称性的制约。按照诺曼原则, 晶体物理性质的对称素应该包括晶体点群的对称素, 这就使高对称性材料的介电常数张量的非零独立分量数大为减少, 对于已极化的压电陶瓷 (∞m), 只有 $\epsilon_{11} = \epsilon_{22}$ 和 ϵ_{33} 。

考察压电材料的介电常数时, 还需要注意到边界条件。在恒应力下的介电常数称为自由介电常数 ϵ^T , 上标 T 表示恒应力的边界条件。在恒应变下的介电常数则称为受夹介电常数, 用 ϵ^S 表示。对于压电体, $\epsilon^T > \epsilon^S$ 。

2.1.2 晶体的弹性

一、应力张量

应力 T 是二阶对称张量, 其分量 $T_{ij} = T_{ji}$ ($i, j = 1, 2, 3$), 因而在 9 个分量中只有 6 个是独立的。应力张量的分量 T_{ij} 的第一个足标 i 表示应力所指的轴向, 如图 2-2 所示。由图可见, 6 个独立的应力分量可分二类: T_{11} , T_{22} 和 T_{33} 为法向应力; $T_{23} = T_{32}$, $T_{13} = T_{31}$, $T_{12} = T_{21}$ 为切向应力。应力的单位是 N/m^2 , 表示单位面积上受力的大