

石英晶体元件设计导论

潘景程译

吴展校

宇航出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了石英晶体元件(石英谐振器)的基本原理和设计问题。全书共分三章,前几章介绍石英结晶学、弹性力学、压电效应、机械振动和等效电路等理论问题;中间讲石英晶体元件与电路的结合、频率常数与温度系数、耦合模与活动性下降、非谐波泛音与滤波晶体、X射线定向和石英晶体元件的老化等设计问题;最后还介绍了一种最新的高性能的应力补偿晶体。作者在这里把基本概念应用于石英晶体元件设计和加工的改进中。附录里有习题和问题,以帮助读者深入了解本书的内容。

本书内容深入浅出,理论与实际紧密结合,可供石英晶体元件的工程技术人员,有关的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

前 言

石英晶体元件成为一种商品已有半个多世纪的历史。它最初应用于频率标准和无线电通讯，而现在则已在多种电子产品的宽阔领域中使用了。由于必须精确控制发射和接收频率以保证通讯的质量和可靠性，这种年产以百万计的元件已为长途通讯及无线电通讯所广泛采用。人们很早就利用石英晶体元件来计时，其精确度不断提高，而且用途也愈来愈多。早期的石英钟已发展为短暂时间的国家标准，并成为天文历元观测的插值钟。利用铯原子的一根共振谱线的原子钟，虽然在长期稳定度上优于石英钟，但石英钟仍可作为原子钟的“飞轮”起重要作用。就是说，精密石英谐振器的短期稳定度很高，在一秒取样时间内可达 10^{-14} ，故可充当优良的插值系统，而铯原子共振则适宜做长于几秒钟的频率和时间的最高标准。石英谐振器现在可以做到体积小、坚固、低频、成本低、温度系数小而且长期稳定度接近每年 10^{-6} ，因此成了电子手表的实用的频率控制元件。于是石英表迅速地取代了机械摆轮表，并成为石英晶体元件的最大用户。在计时方面，石英晶体元件的应用频率范围甚广，从最便宜的消费产品直至最精确的时间标准都在内。

除了计时和通讯外，石英晶体元件还可用于许多其他的工业产品，例如计算机中的时间控制元件、数字通讯中的表面波相关器、检测仪器和通讯设备中的鉴频器和滤波器，以及温度和压力传感器。

目 录

前言

序言

符号

第一章 引言	1
电磁频谱.....	1
石英晶体元件的其他应用.....	1
压电效应.....	2
晶体.....	3
石英.....	4
历史回顾.....	5
压电谐振器.....	7
制造技术.....	8
摘要.....	9
第二章 石英的物理结晶学	11
各向异性.....	11
石英晶体.....	12
晶体轴和轴系.....	13
Z轴和光双晶.....	14
X轴和电双晶.....	15
Y轴.....	17
晶体原子面的规定.....	17
人工培育的石英.....	20

人工培育石英的生长	21
定向	22
石英的缺陷	23
晶体的对称关系	24
矩阵代数初步	25
轴的旋转	30
介电常数与热膨胀	34
第三章 石英的应力和应变关系	39
应力和应变的定义	36
应力和应变关系的定义	43
广义的应力和应变关系	44
热应力和应变	49
第四章 压电效应	52
引言	52
压电理论	52
逆压电效应	57
广义压电方程式	58
石英的压电矩阵	62
第五章 机械振动	66
引言	66
振荡电路中压电振子的功能	66
一维振动	67
振动棒	76
二维振动系统	72
三维振动系统(矩形片)	75
三维振动系统(圆形片)	78
摘要	82

第六章 石英谐振器的等效电路	84
引言.....	84
石英谐振器作为振动电容器.....	85
等效电路的推导.....	88
第七章 用于电路的晶体元件	104
引言.....	104
谐振频率.....	105
谐振频率上的阻抗.....	107
等效电路的参数.....	108
电路参数 C_0 和 R 的测量.....	109
L 和 C 的测量.....	110
与电容器串联的晶体元件.....	111
振荡器相关的问题.....	114
晶体阻抗计.....	115
无源网络方法.....	117
并联电容的作用.....	119
振荡的限制条件.....	121
Q 值的重要性.....	122
石英谐振器的临界频率.....	123
零相位频率.....	123
最大和最小阻抗的频率.....	126
阻抗图.....	129
导纳图.....	128
压电谐振器的导纳图.....	133
第八章 频率常数和频率温度系数	137
引言.....	137
频率常数.....	137

线性系数	139
频率温度系数	139
第九章 耦合模与活动性下降	151
活动性	151
活动性下降	151
振动系统的耦合	153
普通电激励产生的耦合	154
机械或弹性激励产生的耦合	155
支架结构的振动	158
通过共同边界条件产生的耦合	158
温度的影响	160
修整尺寸	161
小尺寸比	161
第十章 非谐波泛音模及滤波晶体	163
引言	163
非谐波泛音模的特性	163
压电振子的几何形状	164
基模即 $n01$ 模	165
一次非谐波泛音即 $n11$ 模	166
$n02$ 模	167
修整外形的效应	168
能陷	171
第十一章 X射线与X射线定向	181
引言	181
X射线的特性及产生	182
布来格衍射	183
使用X射线的注意事项	186

单晶体 X 射线衍射系统	187
双晶体 X 射线衍射系统	188
标准晶体和准直晶体的制造	192
用 X 射线衍射法测量角度	192
测角器轴不在原子面内的角度测量	194
石英片平面的旋转效应	196
用 X 射线衍射检验双旋转石英片	197
入射束不准直造成的误差	202
(107)至(110)式的推导	203
(111)和(112)式的推导	207
第十二章 石英晶体元件的老化	211
引言	211
表面变坏引起的老化	211
表面污染引起的老化	214
与电极有关的老化	215
与物理效应有关的老化	218
与石英有关的老化	219
与盒子缺陷有关的老化	220
加速老化的测试	220
减小石英晶体元件老化的方法	222
第十三章 应力补偿的晶体元件	223
引言	223
SC切的沿革	225
SC切的制作	226
SC切的特性	230
测试SC切晶体元件	233
参考资料	235

附录1	介质的理论基础·····	237
附录2	复数·····	242
附录3	测量技术·····	245
附录4	压电耦合系数·····	249
附录5	词汇和术语·····	252
附录6	习题和问题·····	256
文献目录	·····	263

第一章 引 言

电 磁 频 谱

无线电频谱大约从15千赫至少延伸到100,000兆赫。在这整个频率范围内,必须准确控制频率,以免在同地区或相邻频道工作的发射机之间产生干扰。由于人们不断要求在可用的无线电频谱中占有一席之地,结果使所分配频率之间的间隔愈来愈小,同时对频率控制的要求也提得更高了。为了最充分利用有限的频谱,必须尽可能提高发射频率的稳定性和接收机的选择性。

使用单边带及抑制载频的通讯系统,可以在给定频段中获得更多的通讯频道,但却对发射机和接收机的频率稳定度有严格的要求。许多导航及测距系统取决于精确的频率控制和准确的时间测量。

就很大一部分频谱而言,采用石英晶体元件作为振荡器的有源元件和电气滤波器的无源元件,能够最理想地达到上述各项目的。

石英晶体元件的其他应用

石英振动元件能够划分出相等的时间间隔,因此人们自然会挑选它用来作计时装置中的等时元件。由于研制出了与

石英振动元件配合使用的适当电子元件，因而石英钟、表现在已经实现。看来，三百多年以来曾一直是制表工业基础的扭摆，现在已经为石英压电振子所代替。

利用特殊设计的石英压电振子的温度与频率关系，可以做成极方便、极准确的温度计。石英温度计几乎能及时提供远处的数字温度信息。石英压电振子的频率和应力关系，已应用于压力指示器和加速度计。石英压电振子的新应用不断涌现，而且毫无疑问还有许多用途尚未发现。

压 电 效 应

压电(Piezoelectricity)这个词照字义讲是“压力生电”。词头 Pi-e-zo 来源于希腊字 Piezein，即“压”。凯地对这个词所下的概括性的定义如下：“压电是因某些种类晶体上的机械应变而产生的电极化，这种极化的强弱与应变的大小成正比，极化的正负随应变的方向而变化”。用机械方法在晶体上引起应变而产生的电极化，称作正压电效应。用极化电场在晶体上产生机械应变的逆效应也存在。逆压电效应有时与固体介质如玻璃上发生的电致伸缩效应混淆起来，这两种效应有两个重要区别，压电应变通常比电致伸缩应变大几个数量级。压电应变与电场强度成正比，并随之改变正负号。而电致伸缩应变则与场强的平方成正比，因此与其方向无关。电致伸缩效应与压电效应同时发生，但(至少在石英上)前者在实际应用中可以忽略不计。

在某些晶体上，沿某个轴简单挤压晶体可产生电极化，例如用老虎钳来夹它。其他类型应变如弯曲、切变、扭转等，也在某些类型的晶体上产生极化。通常几种效应同时发生。

与此相反，极化电场也可以使晶体受到纵向或切变应力，而在某些情况下也能产生宽度弯曲、扭转和厚度弯曲，这就称为逆压电效应。

压电这个词也可用于电场产生机械应变的钛酸钡等材料。这些材料是多晶体，并在生产过程中使之产生永久性的偶极矩。它们也显示有磁畴结构，其特性与铁磁材料相似。后者通过磁场可产生称为磁致伸缩的机械收缩，本书将不考虑这类材料。

晶 体

从物理意义上看，晶体是一组原子、分子或离子，它们在三维空间排列成确定的几何图形。理想晶体由许多单元晶粒组成，这些晶粒是最小平行六面体，可以配置起来组成晶体。某一给定晶体的每个单元晶粒都与该晶体的每个其他单元晶粒完全相同，都包含同样的一组原子、分子或离子，以完全相同的方式排列。

构成晶体的原子、分子或离子排成行、列及平面。晶体的自然面及解理面往往平行于原子面。原子面之间的距离及不平行面间的二面角，如同其密度或化学成分一样，都是晶体的特征。结晶学家很久以前就已通过研究晶体的外形，推断出了其内部结构的大量情况。

结晶学家判明了32类晶体，其中20类表现出压电效应。因为，压电显然不是一种特别稀有的现象。虽然许多晶体具有压电效应，但大多无用，只有石英的机械、电气、化学和温度等综合性能，都满足需要，从而形成电气通讯领域用的压电元件。

石 英

晶态石英由硅和氧两种元素组成。其化学式为 SiO_2 。非晶态 SiO_2 是许多岩石和多数沙的主要成份。 SiO_2 的晶态形式，即石英，在自然界也比较丰富。但用于制造石英晶体元件的高度完整的石英，则产量不大。大部分高质量天然石英晶体出自巴西。本国也有一些石英资源，但其质量低劣，生产成本高昂，因而无法使用。

天然石英晶体从含有溶解 SiO_2 的水溶液生成。这些晶体可能是在中等温度下经过长时期生长起来的。有时可以发现原始生成状态的晶体，但多数情况是晶体赖以生长的岩洞已经风化，而较硬的石英晶体则存在于岩屑中，或所沉积的河床中。

由于天然石英的产量小，成本高，所以人工培育石英工业发展起来了。半世纪前德国做出的成果已得到改进，现在已能生产出应用广泛的石英晶体。

二氧化硅在常温下仅略溶于水，然而在高温碱性溶液中，它的溶解度显著提高。将 SiO_2 溶于接近水的临界温度的碱性水溶液，可以生长出人工培育石英晶体。为了经受可能大于1000大气压的压力，需使用高压釜。籽晶置于高压釜的较冷部位，而 SiO_2 碎块形式的培养基则置于较热的部位。温度及温度梯度以计算机程序来控制。溶液将培养基溶解，通过对流从较热部位流往较冷部位，并沉积于籽晶上面。数百克重量的晶体可以在几星期内长成。石英的质量优劣关键在于生长的条件。一般说来，生长愈慢，质量愈佳。在美国加工的多数石英(1980)是培育(人造)的石英。晶体生长的形状

和尺寸，是根据加工时尽量减少工作量及材料损失的要求来决定的。

用于压电效应的石英质量，可以用测量其红外线吸收的方法来进行预测。人们通常用这种办法来检验石英，并按不同用途分成等级。对某些最严格的要求来说，最好还是用天然石英。石英晶体样品之间的差异是由于结晶上的缺陷而产生的。其中可能包括晶格空位、填隙原子、夹杂原子和生长位错等缺陷。天然石英中常有双晶缺陷，在人造石英中则不存在。

在 573°C 温度以下的 SiO_2 的结晶形态称为阿尔法石英，或简称石英，在本书中，我们将只讨论这种材料。本书提供的很多资料当然可以用于其他材料，但直接的应用却是在石英振荡器和谐振器的设计和制造方面。对天然和人造石英的特性之间的差异，不属本书范畴，所以也不加讨论。

历史回顾

雅克·居里(Jacques Curie)和皮埃尔·居里(Pierre Curie)于1880年宣布发现了压电效应。他们不仅证明了这一现象，而且确立了它在某一已知晶体中是否存在的判断标准。居里兄弟测量了包括石英在内的几种晶体的压电常数值，并设计了能利用此现象的几种仪器。

第一次世界大战之前，压电现象除了个别几个孤立的事例外，并未得到应用。在那次大战中，法国郎之万(Langevin)使用压电激励的石英片产生水中声波，来探测潜水艇。后来郎之万又用石英片来接收声波，因而既利用了压电效应，也利用了逆压电效应。郎之万的工作当然是声纳的先驱。他的

工作使人们又重新对压电现象发生兴趣。威斯里安大学的凯地和贝尔电话实验室的尼科尔逊(Nicholson)都对这个领域感兴趣。他们的研究工作使压电谐振器发展成为频率控制的元件。

贝尔电话实验室的尼科尔逊于1918年取得了使用罗谢尔盐晶体的振荡器的专利。人们完全不知道,他是否想到了晶体的主要功能是频率控制,但无论如何,那时的控制不会是很有有效的。1920年,凯地获得了一种振荡器电路的专利,其频率肯定是用石英谐振器来控制的。他的振荡器是一种三级的放大器,而石英谐振器则位于反馈回路中。稍后,皮尔斯证明晶体控制振荡器可以只用一只真空管来做成。

第一座晶体控制的广播电台是纽约市的 WEA F。它于1926年开始运行。此后不久,多数广播电台都开始利用石英晶体来进行频率控制。1926年到1939年期间,业余无线电爱好者、广播电台及某些双向无线电设备的生产者都曾使用石英晶体元件。那时,这些元件都靠少数制造者供应,而且常常是定做的。当时还没有这类工业。

在军事通讯设备中采用晶体控制,一直到第二次世界大战前夕还不普遍。美国参战时,一些军工企业处于向晶体控制转变的过程中。1940年,人们曾估计,发生大战时军备可能需要100,000只元件之多。当所有晶体元件都在几个小车间制造,而一位技工每天只能生产10只元件的时候,这个数量看来象是异想天开。然而在战争中,通过一项花费了10亿美元以上的应急计划,生产出了3,000万只石英晶体。在战时工作达到高潮时,超过125家工厂为美国和盟国的军队生产石英晶体元件。

压电谐振器

最初的石英谐振器，只是从晶体上切下的石英片，片子的垂线与晶体 X 轴平行。●这种压电振子称作 X 切，其频率温度系数约为 -20 赫/(兆赫)($^{\circ}\text{C}$)。换句话说，温度每升高 1 度，频率降低 20 赫/(兆赫)。

E. D. 提利埃尔在二十年代末提出的 Y 切片比 X 切片有某些优点。它只有相同频率 X 切片厚度的三分之二左右。它的振动寄生模也较少，而且受潮湿空气的影响较小。制造也较简单一些。它的最重要优点是可以固定装配。然而，Y 切有两个缺点。频率系数约为 $+100$ 赫/(兆赫)($^{\circ}\text{C}$)，而且在温度变化时，这种器件常常停止工作，或突然改变频率。

1929 年，德国、日本及美国的一些小组发现 Y 切片子的温度系数可以改善。绕 X 轴旋转 Y 切平面，实际上可以使这个系数在某些温度上变为零。所发现的第一种零温度系数切割称为 AT 切。至今它仍是所有石英压电振子中用得最广的一种。所发现的第二种零温度系数切割方向称为 BT 切。就给定频率来说，BT 切比 AT 切厚百分之五十，在第二次大战中曾得到广泛应用，但现已大部分为 AT 切取代，因为在现代通讯系统需要的较宽温度范围内，AT 的频率偏移较小。

石英压电振子可制成多种不同形状。按厚度弯曲模振动的石英棒(像木琴棒)，工作于从音频到几十千赫的频段。这种元件用作手表中的等时元件。音叉形状的小型压电振子工作于 30 千赫左右，也已经研制出来供手表使用。纵向振动的石

● X 切、X 轴等名词的定义见第二章。

英棒及径向振动的石英环用于50千赫至100千赫的频率标准。在100千赫到1000千赫的频段内，面切变模振动的石英片已广泛应用。

许多其他形状的石英晶体元件已研制成功，以满足特殊要求。大部分晶体设计都是为了尽量不受温度的影响。本书的多数内容都直接涉及厚度切变模类型的压电振子，即Y切、AT切及BT切片。然而，如加以适当解释，几乎全部内容都能用于其它定向的石英片。

制 造 技 术

在早期，石英晶体元件靠手工方法制作。这种方法与今天的制造技术相比较，显得非常粗糙和原始。石英片最初是用“铁片锯”来切割。这种锯不过是在金刚砂浆及油或水中旋转的金属圆盘。片子的定向是靠石英晶体的自然面来确定。因此，定向自然不精确，制成的元件性能一致性很差。石英片装在两个既当电极又当支架用的金属片之间。

近四十年来，制造技术有了巨大的改进。铁片锯已为钻石锯所取代，后者能够以极大的速度和精确度来切割石英薄片。X射线衍射技术取代了依据天然面的定向。精密研磨机控制片子尺寸同时保持精确定向，从而能够准确按照设计制成的产品，其机械及电气性能的一致性都好。

近几年来，一种新型的砂浆锯取代了钻石锯，前者特别适用于锯人造石英。该锯是一组100条或100条以上精细又绷紧的金属带，它们穿过金刚砂浆流在若干石英棒上往复运动。这些“组合锯”能以极低的人工成本每小时切割出几百个晶体薄片。