

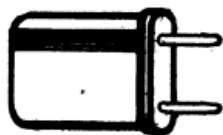
石英谐振器及应用



陈志远 王荣彬 蒋国鼎 等编
任崇贤 朱佑明 杨启凤

国防工业出版社

石英谐振器及应用



陈志远 王荣彬 蒋国鼎 等编
任崇贤 朱佑明 杨启凤

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共有四章：第一章石英谐振器；第二章石英晶体振荡器；第三章石英晶体滤波器；第四章石英器件的其它应用。书中分别对各种压电石英器件的概况、作用原理、技术特性、参数表征、测量方法及应用技术作了介绍；对如何合理地选用、充分发挥其特有效能均作了较详细的说明；书中还引入了一些有实用性的公式、图表及数据；也汇集了当前国内生产的部分石英器件的型号、性能和电路。

本书可供有关电子技术方面的专业人员在应用和设计时参考。书中除注意了专业上的系统性和完整性外，还考虑了它的科普性，因此，对具有中等文化程度的专业人员和管理干部亦可作为专业知识学习的资料。

电子元件应用丛书

石 英 谐 振 器 及 应 用

陈志远 王荣彬 蒋国鼎 等编

任崇贤 朱佑明 杨启凤

责任编辑 杨其眉

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

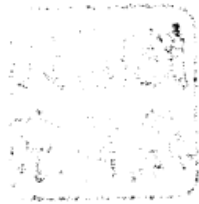
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 9 5/8 211千字

1987年3月第一版 1987年3月第一次印刷 印数：0,001—1,400册

统一书号：15034·3075 定价：2.00元



前 言

电子技术的广泛应用是现代技术进步的重要标志,是经济振兴的必要条件和重要措施。电子元件是电子整机的基础。由于电子整机线路及结构要求的不同,需要各种类型的元件,如:阻容元件、机电组件、敏感元件及传感器、混合集成电路、石英晶体、电子陶瓷与压电、铁电器件、传输线、微特电机以及新型的声光及表面波器件等。它们在电子线路中有控制、传输、耦合、转换、隔离、显示等各种不同的特定功能,满足电子整机的各种要求。随着电子设备日益提高的精确性、可靠性和多功能要求而使线路更复杂,组装密度也更高,因此对电子元件的选用变得越来越重要了。只有合理地选用电子元件,才能充分发挥它们在电子线路中应有的作用,电子线路的精确效能和整机的可靠性。

中国电子学会电子元件学会为了宣传和推广电子元件的广泛应用,组织编写了一套科普性质的电子元件应用丛书,此丛书为广大整机工作者、应用电子元件的科技人员、无线电业余爱好者乃至家用电器使用者介绍各种电子元件的一般机理、性能、结构、用途,提供合理选用的科学知识,以减少由于选用不当造成的不必要的故障和损失,进一步提高电子整机的性能和质量水平,取得更高的经济效益。

首批陆续出版的有以下十一册:

怎样选用电容器;

怎样选用电阻器;

怎样选用电位器；
怎样选用继电器；
压敏电阻器及应用；
厚薄膜混合集成电路及应用；
石英谐振器及应用；
结构陶瓷及应用；
信息传输线及应用；
电子变压器及应用；
家用微电机。

根据情况今后将增加新的书目，满足各方面读者的需要。

编辑出版电子元件应用丛书是一次尝试，缺乏经验，望广大读者提出宝贵意见，以便改进。

中国电子学会电子元件学会
主任委员 陈克恭

编 者 的 话

石英是一种具有“压电效应”的 SiO_2 结晶体，它有十分稳定的物理和化学性能。用它设计而制成的元器件有Q值高和稳定性好的特点。在电子电路中能起到很好的稳频、选频和传感的效能，已广泛地应用于通讯、雷达、测控、计量、彩电及钟表等领域中，是现代电子技术中的关键器件。

建国三十多年来，我国压电石英技术得到了迅速的发展，人造石英已取代了天然石英，各种压电石英器件的研制和生产，在品种、数量和质量上都有了很大的增长和提高，在各种电子设备的应用中已发挥了重要的作用。

为了满足广大使用者的要求，进一步推广其应用，本书对各类压电石英器件的基本作用原理、技术特性以及如何合理选用，充分发挥其应有的效能，均作了介绍。书中也选用了一些有实用性的设计公式和图表，对国产石英器件的性能也部分作了介绍。

本书第一章由王荣彬同志编写，其中高精密石英谐振器由蒋国鼎同志编写，中精密石英谐振器由徐仲梅同志编写；第二章由陈志远同志编写、李全海同志提供了修改意见；第三章由任崇贤和朱佑明二位同志编写；第四章由杨启凰同志编写。全书由陈志远同志主编、秦自楷和韩锡振同志主审。

在本书编写过程中得到了电子工业部西南电子技术研究所、东海无线电厂、晨星无线电器材厂和山东大学等单位的热情支持和帮助，在此表示感谢。

由于受水平的限制，书中必有不足和错误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 石英谐振器	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 石英谐振器的工作原理	4
一、石英晶体材料	4
二、石英晶体的压电效应	8
三、石英晶体的切型	10
四、石英片(棒)的基本振动模式	14
五、各种切型石英晶体的频率温度特性	20
§ 1.3 各类石英谐振器的设计及主要特性	22
一、中、低频石英谐振器	23
二、高频和甚(超)高频石英谐振器	32
三、手表用石英谐振器	40
四、高精密石英谐振器	44
五、中精密石英谐振器	68
§ 1.4 石英谐振器的电气特性及测量	79
一、石英谐振器的电气特性	79
二、石英谐振器等效参数的测量	87
§ 1.5 如何正确选用石英谐振器	100
一、石英谐振器的常用术语	100
二、石英谐振器的型号	104
三、石英谐振器的技术指标及产品介绍	104
四、常用石英谐振器的外形尺寸	108
五、选用石英谐振器应考虑的问题	111
第二章 石英晶体振荡器	116
§ 2.1 概述	116
§ 2.2 石英晶体振荡器的主要功能及技术特性	117
一、石英晶振的主要用途	117

二、石英晶振的主要类型及基本特点	118
三、各项技术参数的定义	120
§ 2.3 石英晶体振荡器的工作原理及使用须知	125
一、石英晶体振荡器的稳频原理	125
二、振荡及控温电路	130
三、各种晶振的设计原则及使用须知	140
四、国产晶振的性能及实用电路	149
§ 2.4 各类晶振的主要技术参数的选定及频率稳定特性的测量	161
一、各类晶振的主要技术参数	161
二、晶体振荡器的频率稳定特性及其测量	164
第三章 石英晶体滤波器	176
§ 3.1 概述	176
§ 3.2 石英晶体滤波器的工作原理和设计原则	179
一、滤波器用石英谐振器	179
二、晶体滤波器设计方法概论	182
三、晶体滤波器的工作原理	185
四、分立式晶体滤波器	193
五、单片式晶体滤波器	209
六、国产晶体滤波器性能介绍	221
§ 3.3 晶体滤波器的主要特性及其测量	224
一、晶体滤波器的主要参数及定义	224
二、晶体滤波器衰减特性的测量	227
三、晶体滤波器反射系数的测量	230
四、晶体滤波器相移特性的测量	231
五、晶体滤波器群延时特性的测量	231
§ 3.4 晶体滤波器的应用特性及使用须知	232
一、理想滤波器	232
二、常用滤波器的特点	233
三、晶体滤波器使用须知	235
§ 3.5 晶体滤波器的应用实例	237
一、无线电通信设备用的晶体滤波器	237
二、多路载波设备用的晶体滤波器	243
三、其它电子设备用的晶体滤波器	251

第四章 石英器件的其它应用	255
§ 4.1 概述	255
§ 4.2 石英钟表	257
§ 4.3 石英晶体鉴频器	263
§ 4.4 石英晶体延迟线	266
§ 4.5 石英力传感器	271
一、石英加速度传感器	273
二、石英压力传感器	275
§ 4.6 石英温度传感器	280
§ 4.7 压电石英陀螺	284
§ 4.8 石英晶体测厚仪	287
§ 4.9 石英换能器在医疗仪器中的应用	290
§ 4.10 石英表面波器件	293

第一章 石英谐振器

§ 1.1 概 述

压电效应是一八八〇年由法国物理学家居里兄弟（皮埃尔·居里和杰克·居里）发现的。起初并未获得实际应用，直到第一次世界大战期间，法国的郎之万（Langevin）利用石英的压电效应制成强力超声波辐射器，发射和接受声波来探测德国人的潜水艇和水中其他目标，获得了成功。一九二一年美国学者开吉（Cady）研究了压电石英振子的稳频作用，制成了石英晶体振荡器，并应用到许多测量仪器中，对提高测量精度起到了良好的作用。当时只有用X切型制造低频和高频石英谐振器，其频率温度系数大，非谐寄生频谱强。在其后十余年中，各国学者主要致力于石英晶体切割式的研究，相继发现了AT、BT、CT、DT、ET、FT和GT等十余种切型，其中绝大部分切型至今仍被广泛采用。

石英晶体具有稳定的物理和化学性能，用它制成的元器件在稳频方面比其他元件显示出突出的优越性，所以在第二次世界大战中得到迅速发展，产量也大幅度增加，当时美国的主要通讯设备都采用了石英谐振器。但是，由于受当时设计和工艺条件限制，其产品质量较低，等效电阻和老化特性等方面均存在一些问题。近三十多年来，无论在基础理论研究方面还是新器件设计和工艺设备改进方面均有了较大提高，某些生产工艺和测量过程也实现了自动化，产品质量稳步提高，产量迅速增加，应用范围更加广泛。

石英谐振器的稳频性能也在不断地提高。二次大战结束时,用 GT 切石英片做出了温度系数小、稳定性高的石英谐振器。当时,做成的晶体振荡器频率稳定度为 10^{-6} /周,到五十年代初达到了 10^{-8} /日。到五十年代末期,美国贝尔电话试验室发明了 AT 切五次泛音 5MHz 和 2.5MHz 高精密石英谐振器,使晶体振荡器的稳定度提高到 10^{-9} /日 $\sim 10^{-10}$ /日。以后经过多年试验和改进,目前已能批量生产满足稳定度为 10^{-10} /日 $\sim 10^{-11}$ /日应用要求的精密石英谐振器,个别好的晶体长期稳定度可以达到 $10^{-12}/\text{d}\sim 10^{-13}/\text{d}$,平均五年提高一个数量级。

随着通讯技术的迅速发展以及晶体设计与制造技术的不断提高,频率范围也在逐渐向上扩展。一九四五年石英谐振器的频率范围是 $100\text{kHz}\sim 10\text{MHz}$;一九五〇年扩展到 $50\text{kHz}\sim 50\text{MHz}$;一九六〇年低频端为 500Hz 而高频端达到 200MHz 。较长时间以来生产水平基本上稳定在 $1\text{kHz}\sim 250\text{MHz}$ 。日本一九七三年把频率上限扩展到 350MHz 。最近几年,法国首先采用离子刻蚀技术将石英片基频提高到 525MHz ,三次泛音工作的谐振器其频率可达 1200MHz (基频 400MHz)。美国利用这一技术加工的石英片五次泛音可以工作在 2GHz 。这仅仅是实验室的一些试验结果,但它表明体波石英谐振器的振荡频率范围可向千兆赫发展。

除了提高频率稳定度和扩展频率范围外,为了导弹制导、卫星通信和空间探索的应用,对高强度和高可靠石英谐振器也进行了研究,国外已做出了能承受冲击加速度为 10000g 的石英谐振器。为了适应集成电路的发展和通讯设备小型化的需要,设计制造了微型谐振器。总之,石英谐振器的发展是迅速的,与其他电子元件比较,具有很强的生命力。

近几年来,除了军事和科学研究的应用之外,民用产品也大量使用石英谐振器,像电子手表、彩色电视、民用小功率收发讯机、录相机、医疗卫生、电子玩具等,使石英谐振器产量迅猛增加。据日本统计,一九七九年四月至一九八〇年三月,日本年产量为2.4亿只,达到历史最高水平,居世界首位。其中手表用晶体占40.3%,钟用晶体占27.7%,通讯设备用晶体占16.9%,彩色电视机用晶体占10.2%,民用电台用晶体占3.6%,其他占1.3%。

在基础理论研究和切割型式的研究中也取得了很大进展。美国哥伦比亚大学的明德林(Mindlin)教授多年来对高频石英片的振动理论做了透彻的分析研究;一九六三年肖克莱(Shockley)等人提出了“能陷理论”在滤波晶体设计中的应用,使高频滤波晶体得到较快发展,石英谐振器的基本理论研究是相当广泛的。在理论研究的基础上发现了几种可用的双转角切型,其中性能比较好的有FC和SC切型,用它制成的谐振器,热冲击特性和短稳比较好,加速度的灵敏度小,高温范围频率温度系数也比较小,是有发展前途的切型。

我国石英谐振器及其器件的发展也很迅速。二十多年前只有少数人从事该项工作,目前已有成千上万的石英晶体专业科技人员、技术工人和管理人员,具有了一定的研制力量 and 生产能力。近几年来,建立了科技情报网,有组织有计划的进行技术交流和学术活动,使我国的压电晶体技术水平不断提高。目前,5MHz五次泛音高精密石英谐振器的长期频率稳定度(老化率)达到 $1 \times 10^{-11}/\text{d}$; 100MHz中精度石英谐振器的频率稳定度为 $1 \times 10^{-9}/\text{d}$; 超高频石英谐振器的频率上限扩展到350MHz,利用离子刻蚀技术加工的石英片,

基频为300~500MHz, 泛音频率可工作在1000~1500MHz。另外, 新切型的研究, 石英谐振器辐射效应的试验, 新工艺新设备的采用, 新产品的试制等方面都取得了很大成绩, 部分产品的性能接近或达到国外先进水平。但是, 由于生产技术和工艺设备还比较落后, 所以生产效率还不高。随着电子工业的迅猛发展, 对石英谐振器的质量要求已愈来愈高, 数量要求也越来越大, 必须尽快改变这种落后状况, 才能适应电子技术发展的需要。

§ 1.2 石英谐振器的工作原理

一、石英晶体材料

石英是透明的二氧化硅 (SiO_2) 结晶体, 因其形态晶莹透明如水, 所以也称“水晶”。天然石英在世界上只有很少地区生产, 而产量也很少, 是稀贵材料。在自然界中无缺陷的天然石英是极少见的, 最常见的疵病有: 裂痕、气泡或包裹体、蓝针、双晶等, 多数缺陷是在晶体生长过程中形成的。用于制造石英谐振器的材料必须保证内部没有任何缺陷, 否则会严重影响石英谐振器的性能。由于天然石英中不含缺陷的单晶体只占很少部分, 因而实际利用率相当低, 所以天然石英一直被作为稀有和贵重材料控制使用。自六十年代人工合成水晶工业生产成功以后, 大部分石英谐振器都用人造水晶制造, 从而成本降低, 性能和天然水晶差不多, 并能满足电子技术发展的需要。

下面将石英晶体的性能做简要介绍。

(一) 石英晶体的晶面和轴向

一个理想完整的石英晶体的外形如图 1-1 所示。它中间

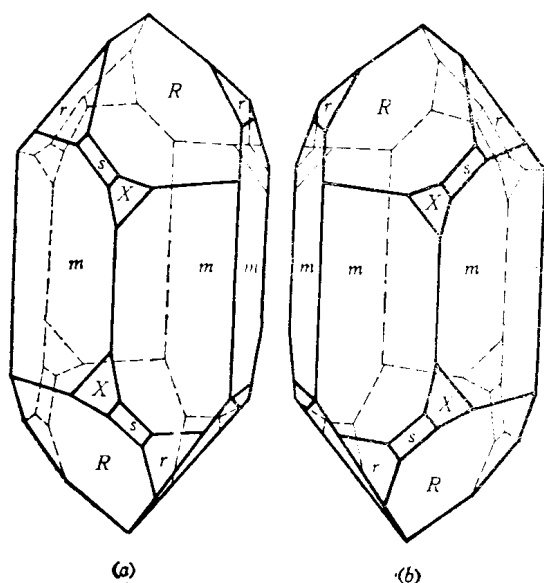


图1-1 石英晶体的外形

(a) 左旋石英晶体, (b) 右旋石英晶体。

是一个六面棱柱体, 两端为两个六面棱锥体。石英晶体有六个柱面 (m 面)、六个大棱面 (R 面)、六个小棱面 (r 面)、六个 x 面和六个 s 面, 总共有三十个晶面。在自然界中, 上述晶面完整无缺的石英晶体是少有的, 而且在多数情况下, 天然石英仅在一头有棱面体, 其晶面也不一定都显出来, 整个看来好像从中间截断一样, 这是由于晶体生长和开采造成的。

石英晶体分左旋和右旋 (见图1-1), 互成镜面对称。左、右旋石英在物理性质上也呈镜像对称关系。

晶体按其结构对称性质可分为七大晶系和三十二种对称类型 (也称为点群)。其中有十二类因其对称程度太高无压

电效应，另外二十类具有压电效应。石英晶体属于三角晶系32点群。

石英晶体的轴向是这样定义的， Z 轴通过晶体两顶点，绕它旋转一周可以得到三次完全相同的石英位形，所以称 Z 轴为三次对称轴。在垂直于 Z 轴的平面内有三个二次对称轴(x_1, x_2, x_3)。 X 轴从两柱面相交的棱上穿出，与一个二次对称轴重合。 Y 轴垂直于柱面 m ，如图1-2所示。有时根据各

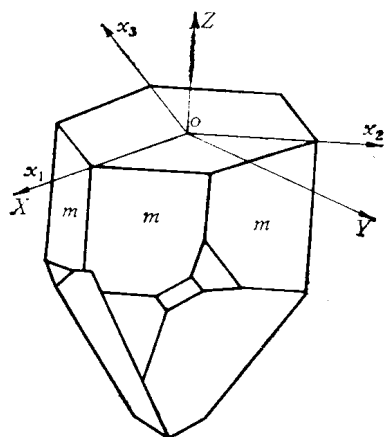


图1-2 石英晶体的轴向

轴向所表示的物理特性把 X 轴称做电轴，因为该方向具有压电效应；把 Y 轴称做机械轴，因为在 Y 轴方向只产生形变而无压电效应；把 Z 轴称做光轴，因为光线沿 Z 轴方向不产生双折射现象。

(二) 石英晶体的物理化学性能

石英是各向异性结晶体，轴向不同，物理化学性质也不同。

石英晶体的主要物理特性是：当温度为 20°C 时，它的密度是 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，一级密度温度系数为 $-36.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ；硬

度为莫氏硬度7级；平行于Z轴的线胀系数为 $7.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。垂直于Z轴的线胀系数为 $14.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ；平行于Z轴的介电常数为4.6，垂直于Z轴的介电常数为4.5。

由于石英晶体在不同温度范围内有不同的特性，在 573°C 以下称为 α 石英，它具有压电效应，通常所说的石英晶体就是指 α 石英，它是我们研究的对象；在 $573 \sim 880^{\circ}\text{C}$ 之间称为 β 石英，它也有压电效应，但在制造石英谐振器时应避免超过 573°C ； $880 \sim 1470^{\circ}\text{C}$ 称为鳞石英； $1470 \sim 1710^{\circ}\text{C}$ 称为方石英；高于 1710°C ，石英熔解变成液体，该温度（ 1710°C ）就是石英晶体的熔点温度。结晶石英熔解后再冷却变成均质熔融石英，其反应是不可逆的，熔融石英的线膨胀系数很小，约为 0.5×10^{-6} ，密度降为 $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。

石英晶体具有很强的抗蚀性，只溶于氢氟酸，因此它的化学性能是相当稳定的。另外，氟化铵溶液对石英有轻微的腐蚀作用，所以在石英谐振器制造中一般用氟化铵进行处理，以免破坏石英片表面的光洁度。

（三）人造石英晶体

天然石英晶体是稀贵物资，利用率低，价值高，不能满足电子工业对石英谐振器用量不断增长的要求。长期以来，各国科技工作者对人工合成石英晶体进行了大量的研究，生长技术已相当成熟。目前我国自行生产的人造石英晶体在质量上和数量上都有了很大的提高，已基本上取代了天然石英晶体。

人造石英晶体与天然石英晶体相比较，人造石英晶体还具有如下优点：

- （1）没有双晶，含缺陷少，利用率高；
- （2）可以控制其外形和尺寸；

- (3) 具有人为的改变其物理性质和化学性质的可能；
- (4) 半成品加工比天然石英晶体工序少；
- (5) 价格便宜。

生长最多的人造石英晶体有 Z 块和 Y 棒，其外形如图1-3所示。 Z 块是利用 Z 切向籽晶生长成的，块大，外形好，质量高，对于切割 AT 、 BT 等切型有较高的利用率。 Y 棒长度与 Y 轴平行，对半成品加工很方便。但是， Y 棒横截面上各生长区晶格畸变不同，因此性能也不一样，所以用 Y 棒制造的谐振器一致性较差，只适用一般谐振器制造。

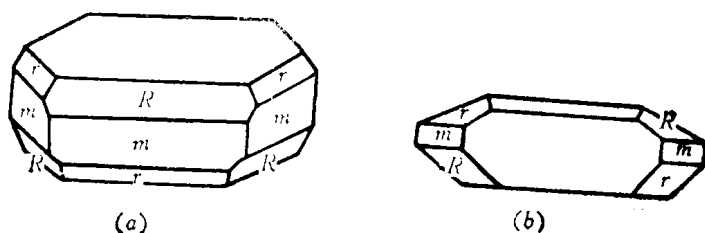


图1-3 人造石英晶体的外形

(a) Z 块；(b) Y 棒。

二、石英晶体的压电效应

石英晶体在压力作用下产生形变，同时，并产生电极化，其极化强度与压力成正比，这种现象称“正压电效应”。反之，在电场作用下，晶体产生形变，其形变大小与电场强度成正比，这种现象称“逆压电效应”。在二十类具有压电效应的晶体中，石英晶体是在无线电通讯设备应用中最满意的材料之一。它的机械强度高，物理化学性能稳定，内损耗低等，用它制成的器件被广泛地应用在频率控制和频率选择电路中。

石英晶体的压电效应是由于在外力作用下晶格变形引起

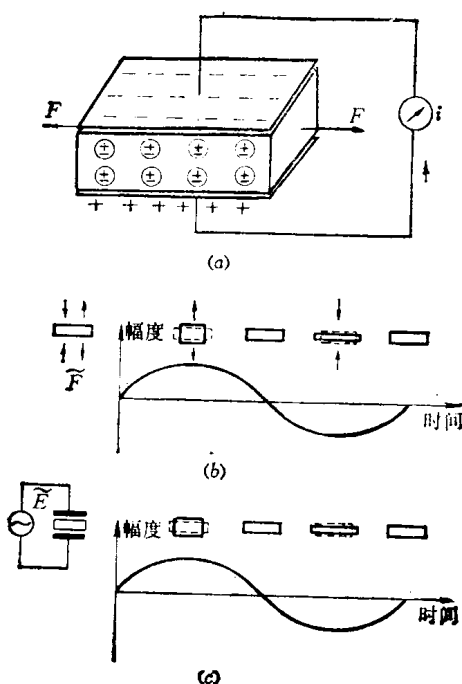


图1-4 石英晶体的压电效应

(a) 压电效应；(b) 正压电效应；(c) 逆压电效应。

正负电荷中心分离而产生的，如图1-4(a)所示。在一定取向的晶片，上下两表面加上一对金属电极板，并施一压力（相当于左右两面受拉力 F 的作用），由于形变引起石英晶体电荷中心分离，形成许多电偶极矩。如果我们在电路中接一电流表，可以看到施加应力时在一个方向产生电流脉冲，当取消应力时，在相反方向产生电流脉冲。如果在晶体上加一正弦应力，并在电路中接一电阻负载，就将有关交流电流流过