

内 部

7 8 0 0 5

电子技术会议录

——压电晶体技术专辑

第四机械工业部第一研究所

一九七八年十月

压电晶体技术专辑

编辑者：第四机械工业部第一研究所

(内 部)

出版者：第四机械工业部第一研究所

7 8 0 0 5

一 九 七 八 年 十 月 出 版

发 行 者：北 京 7 5 0 信 箱 2 1 分 箱

目 录

一、石英谐振器

高频石英谐振器的设计.....	(1)
手表石英谐振器.....	(18)
5MHz高精密石英谐振器的设计与制造.....	(28)
超小型玻壳高频中精度石英谐振器的试制.....	(41)
伽玛辐射对石英谐振器的影响.....	(44)
伽玛射线对5MHz精密晶体的辐照试验.....	(53)
石英谐振器的 γ 射线辐照试验.....	(66)

二、石英晶体滤波器

中心频率1.75MHz带宽为13KHz带通晶体滤波器的研制.....	(80)
1.75MHz单边带晶体滤波器试制总结.....	(83)
1552KHz窄带晶体滤波器.....	(92)
100KHz晶体滤波器的设计.....	(96)
四晶体并感展宽高频带通晶体滤波器的设计与制作.....	(108)
窄带晶体滤波器的衰减特性及其自动测量.....	(119)
无电感变压器的晶体滤波器.....	(132)
鉍酸锂表面波带通滤波器.....	(136)

三、石英晶体振荡器

自动增益控制交流负反馈的高稳定度晶体振荡器概述.....	(145)
晶体控制的多谐振荡器.....	(156)
100MHz压控石英晶体振荡器.....	(163)
10~25MHz混合集成电路晶体振荡器的研制.....	(173)
寄生模式对晶体振荡器的影响.....	(180)
石英谐振器用小型恒温器的研制.....	(186)

四、石英晶体测试

石英谐振器参数的测量.....	(192)
零相位测频法.....	(218)

五、新工艺及其它

石英晶体薄片自由式抛光.....	(224)
超小型玻壳中精度高频石英谐振器封口试验.....	(232)
关于石英谐振器的可靠性摸底试验.....	(234)

鉬酸鋰压电晶片的定向与加工.....	(244)
簧圈式结构石英谐振器组装 (主) 工艺.....	(249)
铜焊技术在高精密晶体中的应用.....	(255)
水晶外元无心磨床.....	(258)

高频石英谐振器的设计

六〇七厂 杨金观整理

一、概述

近代，随着无线电技术的发展，压电技术这门科学得到了飞速发展，第二次世界大战以前，主要对压电理论和石英片各种切型进行了广泛研究，AT切型即在1934年发明的，现在各国应用的石英谐振器基本上还是当时发明的各种切型。50年代到60年代各国主要对石英谐振器的设计与工艺进行了大量的研制工作，使石英谐振器获得了初步完善的设计、工艺。进入了70年代的今天，由于电子技术广泛地应用于各部门，石英谐振器不论是频率范围的扩展，频率公差的小，还是外形结构、小型化、高可靠、高强度等方面都有了很大的进展，石英谐振器的产量也与日俱增，世界年产量达上亿量级。

长期以来，大部分石英谐振器都是应用在军事通讯设备中作为振荡器的频率稳定或滤波器中的频率选择元件，民用的数量并不多。最近，随着电子工业的发展，石英谐振器的应用范围愈来愈扩大，特别是民用产品对石英谐振器需用量一天天增加。例如采电中使用的石英谐振器，其频率为4433.61875KHz，以及民用对话机中使用的石英谐振器，其频率为几十兆赫至上百兆赫，其结构一般为JA8或JA12型外合（国外采用HC-18/U）。我国74系列民用电台，随着我国国民经济的发展，象我们这样幅员辽阔广大的社会主义国家，今后民用电台用石英谐振器将为翻翻增加。在这日新月异、广泛发展的石英谐振器领域里，世界各国中应用最广的是AT切高频石英谐振器，这是由于其具有良好的电气性能、极高的频率稳定度、高强度、小型化等特点，在加工上具有机械化生产的条件，适合大量生产。因此，AT切石英谐振器获得广泛应用是理所当然的。

高频石英谐振器一般都是采用厚度控制频率，因厚度可以磨得很薄，故可以得到很高的频率。获得高频石英谐振器的切割也是较多的，如X切厚度伸缩振动，基频频率可达30000KHz，常用于超声技术中；Y切厚度切变振动，基频频率也可达30000KHz，常用于延迟线、测温元件等；AT切的厚度切变振动模式，除了基频振动外，还可激励泛音振动，应用频率范围约600KHz~300MHz，甚至更高；BT切也可以获得较高的振荡频率，由于在宽温度范围内有较大的频率温度系数，故应用较少。总之，就高频石英谐振器设计而言，其内容也是非常广的，在此仅对厚度切变振动模式中AT切通用石英谐振器的设计，作一基本介绍，重点介绍AT切元形石英片的设计原理、方法，并提供一些设计参考数据、曲线图表。

二、AT切石英谐振器的基本设计

AT切型是厚度切变振动中最广泛使用的一种切型，它不但用于通用的高频石英谐振器，频率稳定度达 10^{-6} 量级，而且用于高稳定度石英谐振器，例如5MHz高稳定度石英谐振器，频率稳定度可达 10^{-10} /天量级。AT切应用频率范围很宽，基频可从500KHz直至30000KHz，

激励其奇次泛音, 频率可达350MHz。AT切用IRE标准符号表示为 $(y \times l) \varphi_1$, $\varphi_1 \cong +34^\circ 20' \sim 36^\circ 20'$, 即是说AT切角可有约 2° 范围变化, 可以根据不同工作条件, 设计获得所需要的频率温度特性, 高温端最高转折点温度(通常称零温度系数点)可达 200°C 。

AT切通常都是在厚度 y' 方向加电场 E_2' 的作用下, 通过压电常数 e_{26}' 和弹性常数 C_{66}' 而产生沿 xy' 面的厚度切变振动。这种通常称为垂直电场的激励, 由于生产方便、工艺简单、性能很好, 是目前广泛采用的一种激励方法。总之, AT切的设计, 必须注意到根据不同频率点、不同产品技术要求, 采取不同的设计手段, 即选择不同的外形尺寸、曲率半径 R 及切角。石英谐振器的良好性能的获得, 与石英片规格的良好设计、石英片装架结构的合理选择, 以及完善的石英片加工工艺是密切相关的。这里着重介绍AT切元形石英片的基本设计原理、方法及设计参数对电性能的影响。

(一) AT切700~1500KHz双凸石英片的设计

本频率段的设计, 在AT切石英片设计中最为困难的一段, 石英片加工也较麻烦, 产品性能一致性较差, 合格率是较低的, 尤其是某些频率点。这频率段因是面切变(CT、DT)与厚度切变(AT、BT)切型的交接处。若采用CT、DT, 石英片太小, 性能不稳定, 加工困难, 电气性能差; 若用AT切, 则石英片太厚, φ/t 太小, 同样存在上述缺点, 但是如果规格设计得好, 采用合适的加工工艺, 可以获得较面切变切型好得多的电气性能。

为什么AT切低频段不好设计与较难生产呢? 主要因为一方面其面切变或其它振动形式的低次泛音就可能与主振发生寄生耦合, 引起某温度下的活力突变或频率跳跃, 这主要与石英片外形尺寸、曲率半径 R 有密切关系; 另外由于边界条件引起的装架损耗及大气阻尼, 在AT低频段产生极为明显的影响。这主要因为在低频段整个石英片几乎处于振动状态, 不但电极区域内振动强烈, 而且石英边缘同时处于振动状态, 一般在设计中采用尽可能大的直径与厚度之比, 选取合适的外形和支架结构。但当石英谐振器的外形大小给定的情况下, 如定为JA5外形, 那末石英片尺寸并非越大越好, 这主要是在某直径下会产生寄生耦合之故, 应设法取其最佳直径。

最近我们结合同步广播中所需600~850KHz高频石英谐振器, 进行了一些初步试验, 试验表明, 要装入JA5外壳中, 只要反复试验, 有可能找到较合适的设计规格, 其电性能指标要比面切变的好。因此我们把这段设计情况作一介绍, 不太成熟, 供需要时设计参考。

1. 石英片直径 ϕ 的确定

对于700~1500KHz AT切石英片, 其 φ/t 都很小了, $700 \sim 850\text{KHz} \varphi/t < 7$; $850 \sim 1500\text{KHz} < 12$ 。若采用JA5外壳结构, 石英片直径大都在很窄的范围内选取, 一般在 $\phi 13 \sim 15.5\text{mm}$; 对于600~700KHz建议改用DT切(SL切), 或者AT取大规格, 其直径大于 $\phi 16$ 。目前国外在600~800KHz也是空挡, 我们国内JA5型一般做到850KHz, 800~850KHz总觉得困难。这说明这段是较麻烦的。主要是其它振动模式的低次泛音就能产生耦合, 如面切变、伸缩振动、弯曲振动的某次泛音与厚度切变主振频的耦合。直径 ϕ 与这些寄生振动(通常主振以外的振动, 统称寄生振动)存在着一定的关系。因此需要进行一些计算, 以避开这些直径, 对于元形石英片, 这三种振动的经验公式为:

$$\left. \begin{aligned} f_s &= \frac{3760}{\phi} n_s \\ f_e &= \frac{2900}{\phi} n_e \\ f_F &= \frac{1380}{\phi} n_F \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: ϕ : 石英片直径

f_s : 面切变振动频率

f_e : 伸缩振动频率

f_F : 弯曲振动频率

n_s : 面切变振动泛音次数, 当 n_s 为奇数时, 主振与面切变有较强耦合;

n_e : 伸缩振动泛音次数, 当 n_e 为整数时, 主振与伸缩振动有较强耦合;

n_F : 弯曲振动泛音次数, 当 n_F 为偶数时, 主振与弯曲振动有较强耦合;

通过计算后, 进行直径选择, 力求避开上述三种直径。

例如: 需要频率为765KHz的石英谐振器, 外形为JA5外壳, 直径取多大呢?

首先根据公式(1), 取不同的泛音次数, 计算出每一振动形式的直径系列值, 经过运算, 分别获得以下三组值:

ϕ_s :	ϕ_e :	ϕ_F :
$n=1, 4.91\text{mm}$	$n=1, 3.79\text{mm}$	$n=2, 3.60\text{mm}$
$n=3, 14.73\text{mm}$	$n=2, 7.58\text{mm}$	$n=4, 7.60\text{mm}$
$n=5, 24.55\text{mm}$	$n=3, 8.37\text{mm}$	$n=6, 10.8\text{mm}$
	$n=4, 15.16\text{mm}$	$n=8, 14.40\text{mm}$
	$n=5, 18.95\text{mm}$	$n=10, 18.00\text{mm}$

以上这些直径都是应尽量不采用的, 根据所规定的合形大小, 选取 $\phi 14$ 为好, 而不选 $\phi 14.5$ 、 $\phi 15$ 等一些数据, 这是取小规格的直径; 如取大规格, 则取 $\phi 16.5$ 可能较好, 当然这样大的直径, 采用JA5外壳已很难装配了。

这里必须说明的, 这样计算的值, 只供试验用, 因为不同的R能改变其寄生状态。目前适于JA5型的700~850KHz, 尚无完整的设计资料, 可用上述方法计算石英片直径, 以供试用。

总之, 石英片直径大小对700~1500KHz频段的电气性能影响是很大的, 归纳起来如下:

第一, 影响石英谐振器的寄生耦合状态;

第二, 影响其频率常数 K_f 值, 对于同一厚度 t 及曲率半径R, 则直径 ϕ 越大, K_f 则减少;

第三, 当在其它规格选择合适时, 石英片直径 ϕ 越大, 则边缘效应、支架影响也小, 等效电阻较小;

第四, 直径 ϕ 对频率温度系数的影响, 当其它规格不变时, 石英片直径 ϕ 增大, 相当于增大了切角 ϕ_1 , 若要保持温度特性不变, 则切角应稍减少;

第五, 为了获得较好的电性能, 设计时, 设法取尽可能大的 ϕ/t 值。

2. 双凸石英片曲率半径R的选择

对于700~1500KHz石英片设计, 通常都是采用双球面形石英片, 这是为了限制石英片

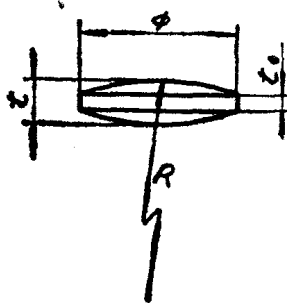
的活动面积，减少石英片在支架上能量的损失和当直径对厚度比很小时控制它的耦合振动形式。

双凸石英片（或平凸）的设计问题，实质上就是确定石英片在某一频率下它的曲率与直径的一个恰当的组合，当 ϕ/t 值越小，这种组合要求就越严格。实践证明，采用适当的曲率可以改变石英谐振器的寄生状态及电气性能，因此在生产中往往经过初步计算后，在某一频段内，选取某一固定直径 ϕ 值，然后采用不同的曲率 R ，这样把直径规格品种减少了，便于生产及管理。

石英片的曲率通常用mm或英寸为单位的曲率半径 R 或屈光度来表示，国外资料常以屈光度表示，两者关系为：

$$R = \frac{530}{\text{屈光度}} \quad (\text{mm})$$

下面把如图一双凸石英片曲率半径 R 计算方法介绍如下，供原始设计参数。



图一

(1) 根据已知频率，求出石英片近似厚度 t ，按经验公式：

$$t = \frac{1648 \text{ KHz} \cdot \text{mm} + 5210/R_{\text{mm}} + 111000/f_{\text{KHz}}}{f_{\text{KHz}}} \quad (2)$$

在式中，因 R 未知，先设 R 无穷大，则上述 $5210/R \cong 0$ ，则求出

$$t_{\text{近似}} = \frac{1648 \text{ KHz} \cdot \text{mm} + 111000/f_{\text{KHz}}}{f_{\text{KHz}}} \quad (3)$$

(2) 由(3)式求得 t 值，代入下式：

$$R = \frac{\phi^2 + (t - t_0)^2}{4(t - t_0)} \quad (4)$$

式中：

- ϕ ：石英片的直径
- t ：石英片的厚度
- t_0 ：石英片边缘厚度
- R ：曲率半径

按(4)式求得的 R 值为近似值。

(3) 将求得的 R 近似值代入(2)式，求得 t 值，将比 t 值（称第二次近似值）代入

4) 式, 求得R值, 如果按上述方法重复一次, 可求得更精确的R值。所计算得到的R值, 必须大于R最小。

$$R_{\text{最小}} = \frac{\phi^2 + t^2}{4t}$$

这样通过计算得的R值, 再经试验后确定。

曲率半径R对石英谐振器性能影响, 归纳起来为:

第一, 曲率半径R能改变其寄生耦合状态;

第二, 当石英片其它规格不变时, 采用不同的R值, 影响其频率常数 K_f , 若R越大, 则 K_f 愈小;

第三, 合适的R值, 能减少支架能量损耗, 得到较高的活动性 (即有小的等效电阻 R_1);

第四, 曲率半径R影响频率温度系数, 当R越大, 温度系数往正方向变化, 若要保持频率温度特性不变, 则切角 ϕ_1 应稍有增加。

3. 双凸石英片厚度t的计算

众所周知, 石英片的振动形式, 对应着它有一定的振动方程式, 通常AT切的振动频率方程式如下:

$$f_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_{66}'}{\rho} \left(\sqrt{\frac{n^2}{t^2} + K_1} \frac{m^2}{l^2} + K_2 \frac{(p-1)^2}{\omega^2} \right)} \quad (5)$$

式中:

C_{66}' : 称弹性系数, 是切角 ϕ_1 的函数

$$C_{66}' = C_{66} \cos^2 \phi_1 + C_{44} \sin^2 \phi_1 + 2C_{14} \sin \phi_1 \cos \phi_1$$

其中: $C_{66} = 40.4 \times 10^9$ 牛顿/米²

$C_{44} = 57.8 \times 10^9$ 牛顿/米²

$C_{14} = -17.8 \times 10^9$ 牛顿/米²

ρ : 石英片密度, 约2.654克/厘米³

n、m、p: 分别为厚度t、长度l、宽度w方向的泛音次数

K_1 、 K_2 : 修正系数;

(5) 式中, 当 $n=m=p=1$, 则称为基频

当 $m=p=1$, $n=3, 5, 7, \dots$ 则称泛音频率

当m、p不为1时的整正数时, 称为非谐波频率。

(5) 式中, 当长度l、和宽度w远大于厚度t (或者直径远大于厚度) 时, 并令 $m=p=1$ 时, 则(5)式可简写成:

$$f_n = \frac{n}{2t} \sqrt{\frac{C_{66}'}{\rho}} = \frac{n \cdot K_f}{t} \quad (6)$$

当基频时, 则 $n=1$, (6) 式可写成:

$$f = \frac{K_f}{t} \quad (7)$$

(7) 式为AT切石英片厚度计算的实用工程计算式。然而, 对于AT低频段双凸石英片来说, 由于 ϕ/t 值较小, 因此频率常数 K_f 不是一个常数, 是随着频率、直径 ϕ 、曲率半径R的变化而

变化的。可按下面经验公式进行厚度 t 的计算:

$$t = \frac{1648 \text{ KHz} \cdot \text{mm} + 5210 / R_{\text{min}} + 111000 / f_{\text{KHz}}}{f_{\text{KHz}}} \quad (8)$$

实践表明,当元形石英片时, $\phi/t \geq 50$ 时, K_f 才接近常数 $1660 \text{ KHz} \cdot \text{mm}$ 对双凸石英片厚度 t 的计算问题,实质上就是先求出频率常数 K_f 的问题。

为了对频率常数问题有一综合性认识概念,现简述一下影响频率常数的主要因素:

(1) 从(5)式可知,频率常数与切角 ϕ_1 有关,如果切角 ϕ_1 改变了频率常数应起变化,如果在加工中把切角方向搞反了,如应 $AT + 35^\circ 15'$, 切成 $AT - 35^\circ 15'$, 则频率常数发生明显变化,实践表明 K_f 增大了;

(2) 频率常数对泛音而言,通常可取基频 K_f 的几倍,即与泛音次数有关。

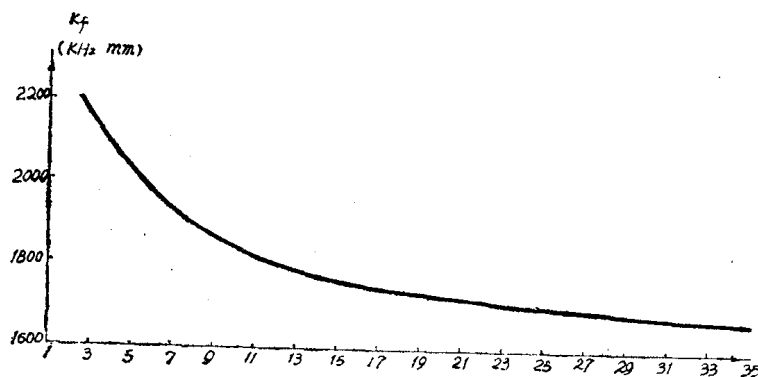
(3) 为了进一步分析,将(5)式演变成下式:

$$f_n = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{C_{66}}{\rho}} \sqrt{n^2 + K_1 m^2 \left(\frac{t}{l}\right)^2 + K_2 (p-1)^2 \left(\frac{t}{w}\right)^2} \quad (9)$$

从(9)式可以看出,当石英片切角确定后,对于基频而言,即当 $n=m=p=1$ 时,式中 $K_2(p-1)^2 \left(\frac{t}{w}\right)^2 = 0$ 。这时频率就与 $\frac{t}{l}$ 有关, t 是石英片厚度, y 轴方向; l 是石英片长度 X 轴方向,也就是说 K_f 与 y/x 之比有关,与 Z' 轴无关,从中看出,对于长方形石英片加工中将石英片电轴 X 与 Z' 轴搞错了,就导致频率常数的变化,这当频率较低时尤为明显。

(4) 对元形石英片而言,某石英片的频率常数与其石英片 ϕ 大小有关,与其表面曲率有关,与其频率高低有关。而倒边却对其频率常数影响很小。

图二,表示 ϕ/t 与 K_f 的关系,供设计参考。



图二 ϕ/t 与 K_f 关系曲线

4. 切角 ϕ_1 的选择

石英谐振器的频率不仅与石英片的外形尺寸有关,而且受定向角 ϕ_1 ($\widehat{zz'}$)的影响。不同温度对应着石英谐振器的不同频率,这种频率与温度的关系,通常称为频率温度特性,人们把它画成曲线形式,称为频率温度特性曲线,AT切的频率温度特性曲线为三次曲线,如图三所示。切角 ϕ_1 主要影响石英谐振器的频率温度特性曲线,可以通过试验得出所选切角的最佳值。一般AT切角增加 1° 时,其平均向负方向增加 $5.15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$; 切角每增加 $1'$,则零温度系数点上升约 $3-4^\circ\text{C}$ (指高温零温度系数点)。一般频率较低时则上升稍小点;频率

较高时，上升稍大点。图三表示不同切角时的频率温度特性曲线，对AT而言，曲线基本上在27℃左右为对称，27℃这一点称为拐点，图三中以AT35°20'为例，有两个零温度系数点，一是称高温零温度系数点（约在70℃）；另一称负温零温度系数点（约在-20℃）。若切角太小了，如图三中“A”曲线，便出不了零温度系数点；若切角太大了，如“B”曲线，则两个零温度系数点分别向高、低温延伸。对于双凸石英片而言，切角很难保持一致，球面容易磨僻，故频率温度特性曲线一致性较差。

图四表示 ϕ/l 与 ϕ_1 角的关系，基本上按此曲线规律，但通过试验予以适当修正。尤其是当 $\phi/l < 12$ ，曲线斜率很大，这一段也是双凸的设计，影响因素较多；当 $\phi/l > 50$ 时，基频石英片一般取 ϕ_1 角为AT35°20'，三次泛音 ϕ_1 角为AT35°28'，五次泛音以上取 ϕ_1 角为AT35°30'，以上是指一般通用宽温石英谐振器的设计。对于有零温度系数点要求的石英谐振器，则在选择切角时应根据零温度系数点而定，例如基频5000KHz，切角 ϕ_1 为AT35°35'时，高温零温度系数点约为115℃；切角 ϕ_1 为AT35°57'时，高温零温度系数点约为150℃。图五、图六分别表示平凸石英片和平面石英片的切角和零温度系数点的关系，供设计时参考用，对于不同的生产条件，需要有适当的修正。

综上所述，AT切石英谐振器的频率是温度和切角 ϕ_1 的函数，常用下式表示：

$$f = f_0 \left[1 + a_0(T - T_0) + b_0(T - T_0)^2 + C_0(T - T_0)^3 + \dots \right]$$

$$\text{或： } \frac{\Delta f}{f} = a_0(T - T_0) + b_0(T - T_0)^2 + C_0(T - T_0)^3 + \dots \quad (10)$$

当切角选得合适， a_0 、 b_0 两项系数接近零值，即公式（10）就由立方项组成，即为三次曲线 C_0 系数约为 110×10^{-12} ，对某一石英谐振器画出它的频率温度特性曲线后，系数 C_0 可用下式近似计算：

$$C_0 = 2 \frac{\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_{\min} - \left(\frac{\Delta f}{f} \right)_{\max}}{(T_{\min} - T_{\max})^3} \quad (11)$$

下面摘引有关系数典型数据，供有关计算数参考用。

当AT35°15'、 $T_0 \cong 20^\circ\text{C}$

$$a_0 \cong 0$$

$$\frac{\partial a_0}{\partial \phi_1} = -5.15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, ^\circ\phi_1$$

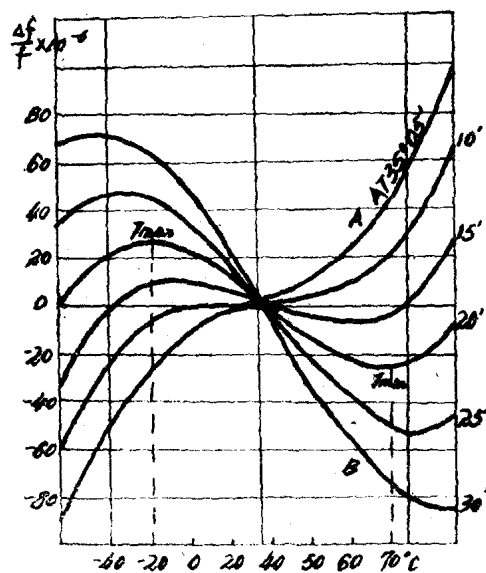
$$b_0 = 0.39 \times 10^{-9} / (^\circ\text{C})^2$$

$$\frac{\partial b_0}{\partial \phi_1} = -4.7 \times 10^{-9} (^\circ\text{C})^2, ^\circ\phi_1$$

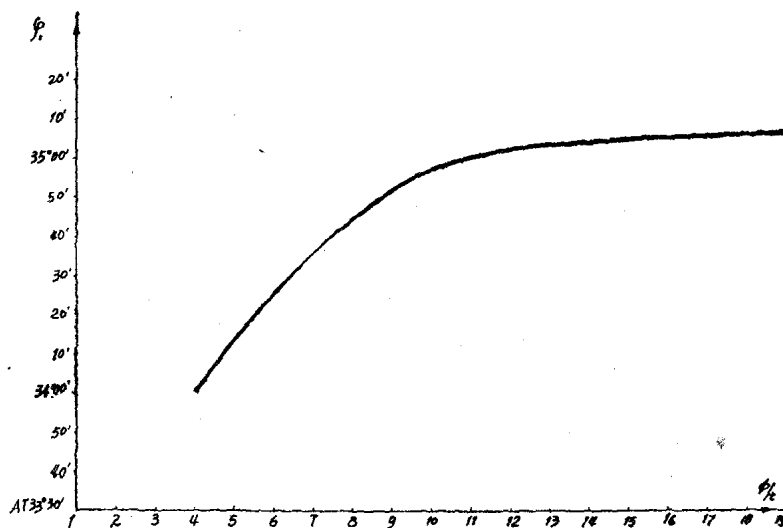
$$C_0 = 109.5 \times 10^{-12} / (^\circ\text{C})^3$$

$$\frac{\partial C_0}{\partial \phi_1} = -2 \times 10^{-12} / (^\circ\text{C})^3, ^\circ\phi_1$$

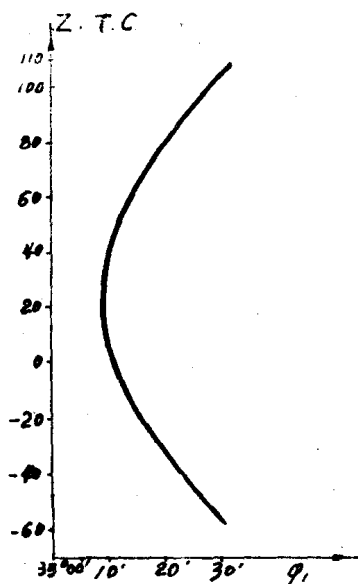
(12)



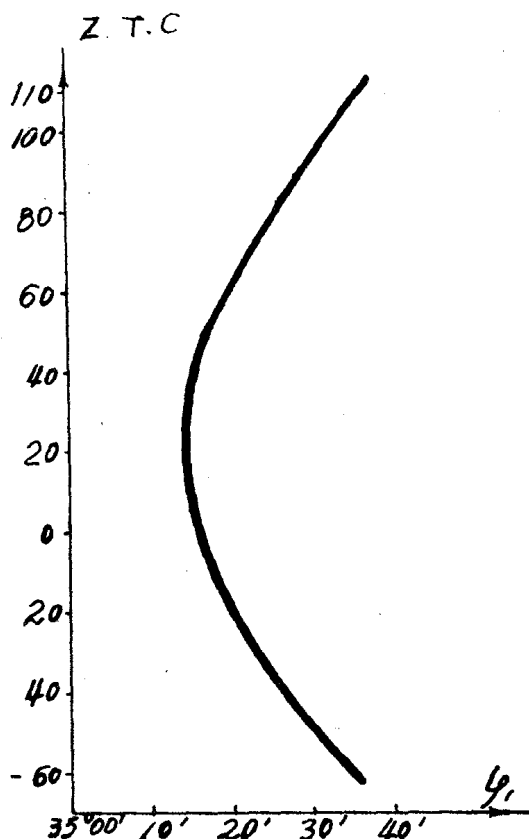
图三 AT 典型频率温度特性曲线



图四 ϕ/t 切角 ϕ_1 的关系曲线 (基频)



图五 4 ~ 7 MHz基频平凸片Z.T.C.
与 ϕ_1 角关系曲线



图六 7 ~ 25MHz平片基频Z.T.
C.与 ϕ_1 角关系曲线

5. 石英片电极的选择

石英片电极的选择是否适当, 对于获得性能良好的石英谐振器, 其关系极为密切。因为它不仅起到加电场、引出导电的作用, 而且电极膜与石英片一起参加了运动, 此石英片电极选择也是石英谐振器设计、工艺中的一个关键, 必须引起充分注意。

(1) 电极膜材料的选择:

用于石英谐振器中的电极材料要求具有良好的导电性、稳定性, 并且与石英片有较牢固的附着力。常用的材料有银、金、铝等材料。目前应用情况是:

第一, 对于一般通用石英谐振器, 目前广泛采用银, 银调频等工艺较方便, 适合大量生产;

第二, 对于高稳定度石英谐振器, 一般都采用金电极, 因为金具有良好的物理、化学性能, 尤其金随时间的稳定性良好, 这对减少高精度石英谐振器的老化, 改善其长期频率稳定度, 很有好处;

第三, 对于超高频石英谐振器, 由于石英片极薄, 一般应采用轻金属铝, 以减少机械负荷, 尤其是频率在125MHz以上; 另外, 据有关资料介绍, 铝电极石英谐振器对 γ 辐照试验有最好的稳定性, 其次为金, 最差的是银; 目前, 由于工艺上的原因, 国内大量应用铝电极较少, 某些研究单位应用铝电极较多, 作为大量生产, 需要作更多的工作, 使其工艺逐步完善。对铝电极在核爆炸时, 能对 γ 辐照有较小的影响, 必须引起重视。

(2) 电极大小的选择:

电极大小对石英谐振器的影响,主要有以下几方面:

第一,电极面积愈大,则等效电阻愈小,对频率较低的频率尤为明显;

第二,电极面积愈大,容易产生寄生、跳频等现象;

第三,电极面积大小,影响石英谐振器的等效参数 L_1, C_1 ,即影响电容比 γ 值 ($\gamma = \frac{C_0}{C_1}$)

第四,电极面积愈大,静电容 C_0 愈大, C_0 的分流作用愈严重;

由上所述,对于通用石英谐振器的 C_0 大小,必须综合考虑,一般石英谐振器的静电容 $C_0 < 7\text{pf}$,其中主要由有效电极面积决定,支架及晶体合分布电容约为 1pf 。

通常 C_0 的计算公式为:

$$C_0 \cong \frac{\epsilon \cdot s}{4\pi t} \quad (13)$$

式中: C_0 : 静电容 pf

ϵ : 石英介电系数,一般取4.5

t : 石英片厚度 cm

s : 石英片被电极面 cm^2

当采用圆形电极时,可将B式变换一下,则电极直径 ϕ_e 可用下式计算:

$$\phi_e = \sqrt{3.555 C_0 t} \quad (14)$$

式中: ϕ_e : 电极直径 cm

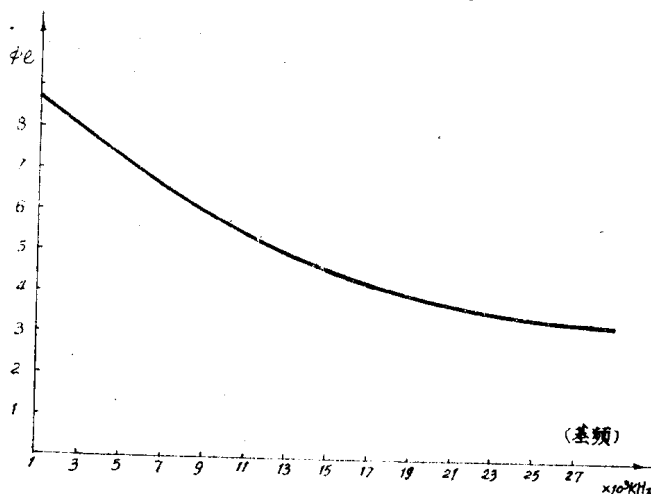
C_0 : 静电容 $\text{pf} \times 0.9$

t : 石英片厚度 cm

因一般振荡用石英谐振器 $C_0 < 7\text{pf}$,并考虑支架等分布电容约 1pf ,故用 6pf 作设想 C_0 值,代入(14)式,则(14)式改写成:

$$\phi_e = \sqrt{29.1 t} \quad (15)$$

图七为通用石英谐振器基频 $f \sim \phi_e$ 关系曲线,供参考。



图七 基频 $f \sim \phi_e$ 关系曲线 (通用石英谐振器)

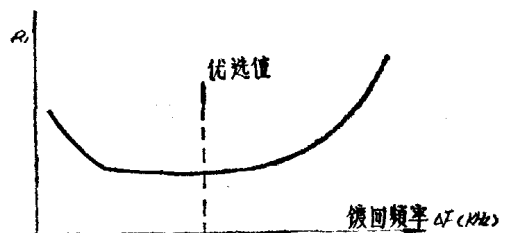
(3) 电极膜的形成:

目前主要采用真空蒸发被基膜(为了提高电极膜牢固度,一般先用路打底),频率调整可用真空微调法和化学电镀、电解法,酸液腐蚀法等,可根据不同情况,分别采用。

(4) 电极膜厚度的选择:

电极膜厚度主要影响有:

第一,太薄的电极膜会影响导电性,因金属本身电阻大,使石英谐振器 R_1 增大;太厚的电极膜,由于金属膜引起的机械负荷所产生的动态电阻增大。在某一电极膜厚度范围内,等效电阻基本上无变化,可用图八示意。



图八 镀回频率与 R_1 的关系曲线

第二,电极膜厚度也会影响寄生状态。

总之,对电极膜厚度应有一最佳选取,一般用“镀回频率”表示,不同电极材料有不同的镀回频率,应通过试验得出,下表一为不同频率时的镀回频率,供参考。

表一

频 率	镀回频率(KHz)	备 注	频 率	镀回率频(KHz)	备 註
700~4000KHz	$1.4f^2_{MHz}$ *	被	15~ 40MHz	$1.0f^2_{MHz}$	被
4000~7000	$1.2f^2_{MHz}$		40~ 75	$0.8f^2_{MHz}$	
7000~14000	$1.0f^2_{MHz}$	银	75~250	$0.6f^2_{MHz}$	银
14000~25000	$0.8f^2_{MHz}$		75~250	$0.2f^2_{MHz}$	
					被 铝

* f^2_{MHz} ——用基频以MHz为单位的平方,得KHz单位。

(二) AT切1500~6000KHz平凸石英片的设计

本频率段石英片的设计也是较困难的,尤其是低端,石英片振动过程中的边缘效应还是有一定的影响,在设计中,低端尽量采用平凸,高端尽量采用平面倒边,以前常规设计1750~7000KHz为平凸,现将两端进行压缩,改为1500~6000KHz为平凸石英片,对半成品加工等有一定意义。以上是对于采用 $\phi 12.5 \sim 14$ 的大规格设计而言,若采用小规格,($\phi 8 \sim 7$),则在1500~4000KHz需设计成双凸,而且1500~2500KHz双凸也相当困难了,主要 ϕ/r 太小了。这里着重介绍大规格的设计:

1. 石英片直径 ϕ 的确定

石英片直径 ϕ 的设计原则可以参照上面介绍过的双凸石英片,这里不作重复了,一般1500~4000KHz可取 $\phi 14$; 4000~6000KHz可取 $\phi 12.5mm$ 。原则上直径规格不宜太多,尽量在某频率范围内固定一直径,通过适当选择曲率半径 R ,改善其电性能,并达到方便生产、减少工艺装置的目的。

2. 平凸石英片曲率半径 R 的选择

R 的计算方法、步骤同上面介绍过的双凸石英片一样,只是代入公式不同而已。

(1) 根据已知频率求出近似厚度 t ,按经验公式:

$$t = \frac{1648\text{KHz} \cdot \text{mm} + 2230/R_{\text{mm}} + 164200/f_{\text{KHz}}}{f_{\text{KHz}}} \quad (16)$$

在(16)式中, 因R还未知, 设R无穷大, 则式中 $2230/R_{\text{mm}} = 0$

求出:
$$t_{\text{近似}} = \frac{1648\text{KHz} \cdot \text{mm} + 164200/f_{\text{KHz}}}{f_{\text{KHz}}} \quad (17)$$

(2) 由(17)式求得的t近似值, 代入下式, 求出R近似值:

$$R = \frac{\phi^2 + 4(t - t_0)^2}{8(t - t_0)} \quad (18)$$

式中: ϕ : 石英片直径

t: 石英片厚度

t_0 : 石英片边缘厚度, 一般平凸取 $t_0 = 0.2 \sim 0.3\text{mm}$

(3) 将求得的R近似值代入(16)式中求出t值, 将此t值(称第二次近似值)代入(18)式中, 求得R值。如再按上述方法重复一次, 可求得更精确的R值。通过上述计算得的R值必须大于R最小。

$$R_{\text{最小}} = \frac{\phi^2 + 4t^2}{8t} \quad (19)$$

3. 平凸石英片厚度t的计算

按经验公式:

$$t = \frac{1648\text{KHz} \cdot \text{mm} + 2230/R_{\text{mm}} + 164200/f_{\text{KHz}}}{f_{\text{KHz}}}$$

从公式可以看出, 平凸石英片的频率常数Kf也是个变数, 因其 $\phi/t < 44$ 。前面已讲过当 $\phi/t \geq 50$ 时, Kf才接近常数。频率常数Kf与 ϕ/t 的关系可参考图二。

4. 切角 ϕ_1 的选择

平凸石英片切角 ϕ_1 的影响, 设计原则、方法, 基本上与双凸的一样, 只是由于采用了平凸一个面是平面, 因此切角容易保证, 它的温度特性曲线的一致性较好, 并且容易达到预定设计的目的。设计时根据具体要求而定, 可参考图四、图五。

(三) AT切6000~10000KHz平面倒边石英片的设计

本频率段的设计已较简单了, 由于有较大的 ϕ/t 值, 采用平面倒边基本上有消除边缘效应的影响。

1. 石英片直径 ϕ 的确定

一般6000~7500KHz取 $\phi 14\text{mm}$; 7500~10000KHz取 $\phi 12.5\text{mm}$ 。

2. 倒边曲率半径R

6000~7000KHz取R70mm, 倒边宽度约1.5mm。

7000~10000KHz取R65mm, 倒边宽度约1.5mm。

3. 石英片厚度t的计算

按公式:

$$t = \frac{1660\text{KHz} \cdot \text{mm} + 61800/f_{\text{KHz}}}{f_{\text{KHz}}} \quad (20)$$

4. 切角 ϕ_1 的选择

可参考图四、图六进行设计

(四) AT切10000~25000KHz平面石英片的设计

本频段基频设计已不存在什么问题了, 由于石英片的 $\phi/t \geq 50$, 石英片振动区基本上限制在电极区域内, 边缘已处于静止状态, 装架不产生阻尼作用。因此石英片设计只要考虑经济性、便于生产, 在满足技术要求的前提下, 尽量简单。石英片直径根据需要, 可在 $\phi 7 \sim 12.5\text{mm}$ 任意选择; 石英片外形无需倒边, 平面即行; 频率常数取 $1660\text{KHz}\cdot\text{mm}$; 切角可取 $\text{AT}35^\circ 20'$ 即可。本频段产品性能好坏, 主要由生产中的加工工艺而定, 如石英片的平行度和表面光洁度等。

(五) 泛音石英片的设计

以上我们对厚度切变AT切型的基频设计作了基本介绍, 所谓基频, 则是某振动模式的最低谐振频率, 基频石英谐振器以KHz为单位标志; 所谓泛音频率, 则是某振动模式的高于基频的谐振频率, AT切型的泛音频率是厚度切变基频的近似整数倍, 此整数倍通称为泛音次数, AT切泛音频率只能在奇次泛音上产生, 泛音频率以MHz为单位标志。

下面将泛音石英片的基本设计简介如下:

1. 石英片直径大小的选择及倒边R的确定

用于泛音石英片的直径尺寸, 根据技术要求可任意选取, 由于频率都较高, 有较大的 ϕ/t 值, 边缘效应无明显影响, 当然在频率较低时应予考虑, 尽可能取较大的直径。当前一般设计是这样的:

15~30MHz: $\phi 12.5\text{mm}$, 平面倒边R 65mm,

30~75MHz: $\phi 7 \sim 8\text{mm}$, 平面石英片,

75~250MHz: $\phi 7\text{mm}$, 平面抛光石英片,

2. 泛音石英片厚度 t 的计算

$$t = \frac{n \cdot 1.660\text{MHz}\cdot\text{mm}}{f_n} \quad (21)$$

式中: t : 石英片厚度mm

f_n : 泛音频率MHz

3. 切角 ϕ_1 的选择

通用泛音石英谐振器的切角一般为:

三次泛音: $\text{AT}35^\circ 28'$

五次以上: $\text{AT}35^\circ 30'$

4. 泛音次数 n 的选择

15~75MHz: $n = 3$

75~150MHz: $n = 5$

150~210MHz: $n = 7$

210~270MHz: $n = 9$

总之, 对高频泛音石英片的设计而言, 是较简单的, 因为在高频、超高频泛音振动中, 其它振动形式的耦合是不易产生的, 因为不论是面切变、伸缩振动或弯曲振动, 都需要很高次泛音才能与主振耦合, 已是很弱很弱了, 因此超高频泛音石英谐振器的寄生或单频性差等