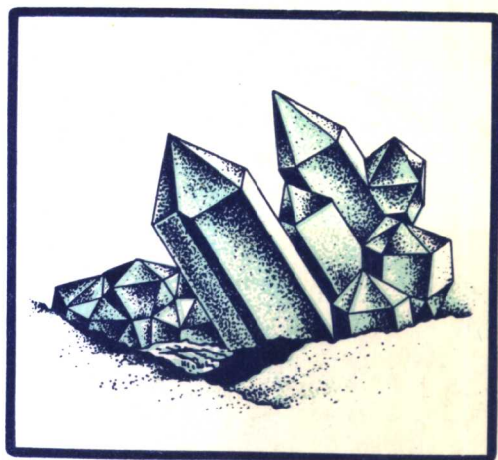
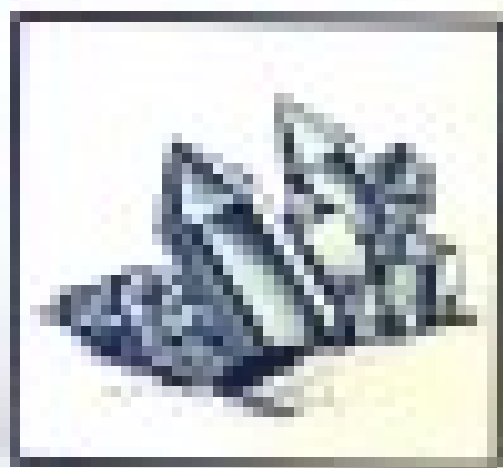


石英諧振器



人民郵電出版社

石英諧振器



人民廣播出版社

石 英 諧 振 器

蘇聯 A. Ф. 普隆斯基 著

人 民 郵 電 出 版 社

А. Ф. ПЛОНСКИЙ
КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

內 容 提 要

本書敘述了在業餘無線電愛好者實際採用壓電石英諧振器的問題。簡單地介紹了石英片的型式，石英支架的結構及諧振器調整的方法。也敘述了各種石英穩定式振盪器及石英濾波器的線路。並提出在業餘條件下選擇石英片及調整石英片頻率的實用參考意見，以及設計、調整及試驗研究石英振盪器和濾波器的參考意見。

本書適合於熟悉一般無線電原理及從事短波無線電通信或頻率測量器械的讀者。

石 英 諧 振 器

著 者:	蘇聯 А. Ф. 普 隆 斯 基
譯 者:	毛 源
出版者:	人 民 郵 電 出 版 社 北京東四六條13號
印刷者:	郵 電 部 供 應 局 南 京 印 刷 廠 南京太平路戶部街15號
發行者:	新 華 書 店

書號:101 1955年10月南京第一版第一次印刷 1—3,500 册
850×1168 1/32 47頁 印張:2 $\frac{9}{16}$ 字數: 66,000字 定價:(8)0.52元
★北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號★

序 言

無線電廣播事業和無線電通訊事業的發展，在設計者面前提出了一系列的任務，如怎樣改善發信設備和收信設備及提高這些設備在工作中的效率及可靠性等。在這些任務中，首先是提高發射頻率的穩定性；其次是改善收信設備的選擇性能。這兩個問題的解決，需要創造新型的振盪裝置；即這種振盪裝置要比通常的由集中電感和電容組成的振盪槽路要優越與穩定許多倍。這種振盪裝置即為壓電石英諧振器；目前這種諧振器不僅廣泛用於無線電通信與無線電廣播方面，也廣泛應用於天文學與氣象學等方面。

壓電石英技術的發展奠基於蘇聯學者與工程師們的工作，在這些學者與工程師中有：斯大林獎金獲得者蘇聯科學院正式院士А·В·舒伯尼科夫及Н·Г·科法林克，Б·К·申別利以及其他等人。А·И·別勒格院士、А·А·羅善斯基教授、Г·А·基揚得斯基教授等曾研究了具有石英穩定的振盪器。帶域石英濾波器是А·И·愛弗露西在1931年發明的。應當指出，在發明了石英濾波器以後過了三年，在美國才發表了美國人姆遜關於“發明”石英濾波器的消息。上面所提到的“發明”的“作者”事實完全是抄襲1931年А·И·愛弗露西發表的線路圖。

А·И·愛弗露西所設計的線路圖直到如今尚無本質上的改變。發明者本人以及其他蘇聯學者的工作中，使該線路圖更進一步地加以研究，並使它獲得了進一步的發展。

壓電石英技術科學的發展進行得十分迅速。人們進一步改善了

石英諧振器的構造；並創造了新的振盪器和濾波器的線路，以及新的頻率校準（度量）器的線路圖等等。

本書的目的是向無線電愛好者介紹關於壓電石英技術的原理以及石英諧振器在通信機械及測量儀器中的運用。

作 者

目 錄

序 言

第一章 石英諧振器	(1)
壓電效應	(1)
壓電石英的一般知識	(2)
石英諧振器	(2)
石英片的振動形式	(6)
石英片的切割型式	(6)
石英諧振器的計算	(8)
石英支架的構造	(9)
石英諧振器的主要參數	(12)
壓電石英生產的簡單知識	(14)
業餘條件下石英片的調諧	(15)
第二章 石英穩定式振盪器	(19)
石英振盪器的工作情況	(19)
石英振盪器振盪電路的工作機構	(21)
石英振盪器頻率的穩定性	(22)
以振盪線路工作時石英振盪器的活動度	(24)
石英穩定式振盪器的實用線路	(25)
連續調諧式石英振盪器	(32)
超高频的石英穩定	(37)
石英振盪器的設計	(41)
石英振盪器的調整	(42)

第三章 石英濾波器	(44)
濾波器的一般知識	(44)
在業餘無線電通訊中的石英濾波器	(48)
在帶通濾波器裏石英諧振器的工作情況	(49)
石英濾波器的類型	(51)
石英濾波器的實用線路	(53)
石英濾波器的結構	(59)
石英濾波器的調整	(61)
第四章 測量器械	(69)
在業餘條件下石英頻率的測量	(69)
更精確地測量振盪頻率用的儀器	(71)
標本振盪器及頻率標準	(76)
工業上石英校準器的型式	(85)

第一章

石英諧振器

壓電效應

某些結晶體(石英, 電石, 酒石酸鉀鈉等)具有所謂壓電效應, 該效應就是作用於晶體某一稜的機械力, 使在該稜上出現電荷; 電荷的數值與作用力成比例, 其符號決定於力的性質(拉力或壓力)。這種壓電效應稱作正向壓電效應。同樣還有一種反向壓電效應。這種效應在晶體發生極化作用時, 同時發生變形——收縮或拉長——而這種變形是隨電荷的符號而定。

應用如圖 1 所示的線路圖即可以發現壓電效應。被研究的晶體放在平滑的金屬電極 A 上, 並用具有尖端形狀的另一電極進行試探。當用尖端急促地在晶體的表面加以壓力時, 在電子管 V 的屏極電路中即產生直流脈衝, 這脈衝使微安表 (ma) 的指針發生偏轉。如果在尖端加以壓力時形成正電荷, 因而, 電子管的柵極亦帶正電荷, 屏極電流增加, 微安表的指針偏向右方; 當形成負電荷時, 使屏極電流減小, 指針則偏向左方。

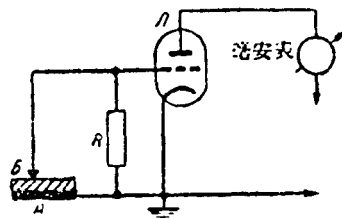


圖 1. 觀察壓電效應儀器的線路圖

因此, 具有壓電效應(壓電)的物體可認為是一個由機械能變為電能或由電能變為機械能的轉換器。

壓電效應用於聲電方面(壓電拾音器, 送話器及揚聲器), 機

械製造方面（壓力測量儀器），以及應用於無線電工程方面（機電振盪系統——諧振器）。本書只研究上述各壓電應用中的無線電工程應用方面。

壓電石英的一般知識

用作機電振盪系統的壓電片多半由晶體石英製成。

石英是氧化矽 SiO_2 的同素異形體。氧化矽約佔地殼的12%。只有所謂“低溫”石英才具有壓電效應，此種石英在自然界中呈結晶狀態或不定形的矽礫狀態。當加熱超過 $573^{\circ}C$ 時，石英轉變為“高溫”的同素異形體，同時壓電性能消失。

石英的化學性穩定，除了氫氟酸以外，石英在任何酸中均不溶解。石英的硬度在十度制中為7度。

石 英 諧 振 器

由壓電石英片、電極及支架構成的機電振盪系統稱為石英諧振器。

如把低溫結晶用一定方式切割成石英片，置於金屬的平板電極間，且用支架加以固定，並向電極加一交變的電位差，則由於壓電效應，石英內將被激起振盪。

如同任何機械振動系統（擺，彈簧等等）一樣，石英片具有固有的諧振頻率。如果加至石英片的交流電壓的頻率與石英片的諧振頻率一致，則振盪的振幅急速增長。石英片的機械諧振的本質即是在片內產生彈性駐波，而片的大小（振盪沿着他的方向傳播的）應恰為此波半波長的倍數。在預定振盪頻率下，彈性波的波長與傳播速度成正比，而該速度又決定於石英的密度和彈性。晶體石英的密

度與彈性應這樣，即使調諧至射頻的石英片的尺寸是用公厘和公分來測量的。

如果用機械的壓力阻礙石英片內發生振盪，則此石英片轉變為普通的電容器，該電容器的電容將決定於電極的面積、兩極間的距離以及石英的介電常數。此電容器構成了無功電容性電納，而與石英壓電效應所引起的電導同時存在。除了諧振頻率以外，所有頻率下的壓電電導值均很小（比電容性電納要小許多倍）。在諧振時那時石英的變形很大，諧振器的電阻急速降低，而通過石英的壓電電流增長。因此，石英諧振器是等效於一個 $L_1, r_{\kappa\theta}, C_1$ 串聯的振盪電路，而被電極、石英支架及其它裝置的振盪電路的靜電電容 C_0 分路着。此石英諧振器的等效電路圖如圖 2 所示。

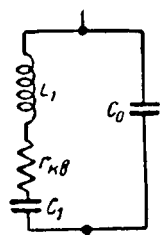


圖 2. 石英諧振器的等價線路圖

由於石英諧振器的能量消耗較小，所以它相當於一個品質因數很高的電氣振盪電路。如果普通迴路的品質因數不超過 100—300；則在石英諧振器的情況下，此因數可達 1,000,000。

石英的良好機械性能、化學性穩定及絕緣性極良好等保證了石英諧振器的頻率不變，這種優良的性能使石英廣泛地應用於無線電工程方面。

現在研究如何畫石英的電抗與頻率的關係曲線。等效電路的串聯（壓電）分路可用兩個符號不同而串聯的電抗來代替。感抗用已知公式表示為：

$$X_{L_1} = \omega L_1,$$

而容抗則為：

$$X_{C_1} = -\frac{1}{\omega C_1}.$$

圖3. a所示為電抗曲線。在圖3. b中，用圖解法將兩曲線相加，得到串聯振盪迴路的總電抗曲線。此曲線說明存在着頻率為 f_1 的串聯諧振。當頻率低於 f_1 時，迴路電抗具有電容性（負的），而當頻率高於 f_1 時，迴路為電感性，其電抗為正值。

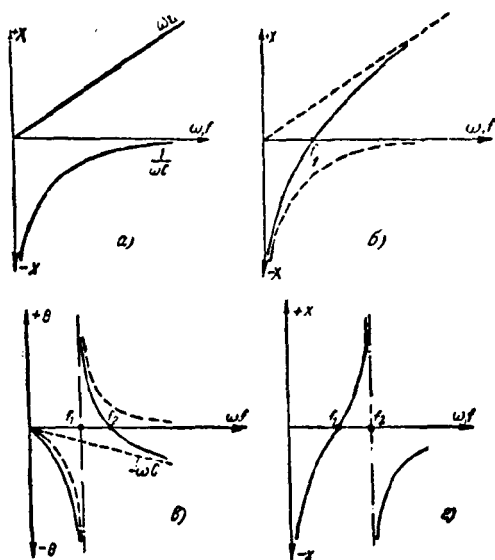


圖 3. 石英諧振器等效線路的圖解分析

a—諧振器支路的電抗曲線；b—電抗曲線的圖解加合；c—諧振器支路的電納曲線及總曲線；d—石英諧振器的總電抗特性曲線。

所畫曲線沒有考慮靜電電容的影響。爲了得到整個石英諧振器的總電抗曲線，需要把諧振器兩個並聯分路阻抗用圖解法相加。因爲這些電抗不是串聯（如上述情況），而是並聯的，所以需要畫它們的倒數圖（即電導），以後把它們相加（相加的結果，得到石英諧振器的電納曲線），然後畫倒數曲線，此曲線將爲整個石英諧振器的電抗特性曲線。

圖3.6所示為石英等效電路分路的電納 $B = \frac{1}{X}$ 曲線。在此圖上畫出了石英諧振器的總電納曲線。此曲線有兩個特性頻率 f_1 和 f_2 。在頻率 f_1 時，電納為無限大，在頻率 f_2 時，電納為零。因為在該點時，電容性電納與電感性電納彼此相等。頻率 f_1 相當於石英諧振器的串聯諧振，頻率 f_2 相當於石英諧振器的並聯諧振（或反諧振）。由 L_1 、 C_1 分路決定的串聯諧振頻率可以由下列已知公式表示：

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}。$$

由 C_1 、 C_0 的串聯電路與等效電感 L_1 並聯所定出的並聯諧振頻率可用下列公式表示：

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}}。$$

由此

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}}。$$

因此，並聯諧振頻率與串聯諧振頻率的比值決定於石英的動電容及靜電容。當然，比值 $\frac{f_2}{f_1}$ 愈高兩頻率間的間隔 $\Delta f = f_2 - f_1$ 的數值也愈大， Δf 的大小決定於許多因素：如石英片的型式，石英片的尺寸，電極的面積等等。實驗證明，石英諧振器的串聯及並聯諧振頻率的最大差數趨近於 f_1 的0.4%，該值實際上相當於石英靜電容與動電容比值可能達到的最小值（ $\frac{C_0}{C_1} = 125$ ）。

圖3.7所示為石英諧振器的總電抗特性曲線。曲線上任意點的電抗就是電導的倒數值。因而在串聯諧振頻率 f_1 時石英的電抗等於零，而在並聯諧振頻率 f_2 時為無限大。

在畫曲線時，我們沒有考慮石英有效電阻 r_x 的作用。在串聯諧振頻率 f_1 時，石英諧振器的總阻等於有效電阻 r_x 。

石英片的振動形式

石英諧振器的振動可以按決定諧振頻率的石英片的尺寸和按石英變形的型式來分類。

變形可能有四種最簡單的形式：彎曲，剪切，扭轉，壓縮（或拉伸）。有時也遇到複雜的變形，例如：外形變形。

實際上，振動的形式通常按決定振盪頻率的石英片的尺寸來分類。根據這種分類，振動形式可分成兩個基本的組別：1) 在厚度方向的振動（有時也稱做橫向振動）；2) 在長度和寬度方向的振動（也稱做縱向振動）。石英諧振器也相應地分為按厚度方向振動的諧振器及按長度方向振動的諧振器。厚度方向振動所應用的頻率高於300—400千週，長度方向振動應用於較低的頻率。頻率低於300千週的應用橫向振動是不好的，因為在這些頻率時，按厚度方向振動的石英片的尺寸過大，且原料消耗過多，縱向振動應用於頻率高於400千週時也是不好的；因為在這些頻率時，按長度方向振動的石英片的尺寸過小。

石英片的切割型式

石英內發生的壓電現象藉助於座標軸系來研究時極為方便，座標軸系的位置對於晶體格是不變的。在圖4中繪出這些軸。應該指出；在此情況下，“軸”的概念不只是指一根或幾根一定的直線，而是指無限多的平行方向線，因為在同一方向的晶體性質完全相同。

經過晶體頂端的軸線叫 Z 軸或光軸。與 Z 軸垂直處有三個 X 軸（電軸）。在任一電軸方向上晶體受壓縮或拉伸時，則由壓電效應所產生的電荷值為最大。在電軸相對二端產生符號相反的電荷。 Y

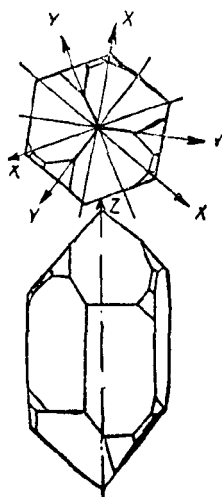


圖 4. 理想石英的結晶

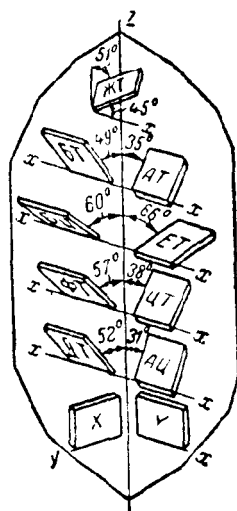


圖 5. 對晶體成不同切割的取向

軸垂直 XZ 平面，也稱為力軸。

在對晶體軸的不同角度下切出石英片。在大多數的切割中，使片的寬度方向與電軸平行。此時，計算切割角係以光軸為準（所謂切割角即石英片平面與 Z 軸之間的角度）。

實際上切割所採用的字母符號有： X ， Y ， AT ， BT ， DT ， CT 等等。某些最常用的切割對結晶軸和晶體格的方向在圖5中繪出。歷史上第一批石英片係垂直於電軸切製的（ X —切割或《標準》垂直切割）且振動是縱向的。這類石英片為矩形，且長度方向與 Y 軸重合。選擇這種方向是因為與 X 軸成 90° 切製成的石英片，其壓電效應最大。以後才開始應用“標準”切割的橫向振動石英片。

但 X —切割的諧振器具有嚴重的缺點即具有大量的寄生（附帶的）諧振，且熱穩定性較差。目前這類諧振器用得較少。

在改善石英諧振器方面的工作已完成了所謂《斜》切割的方法。《斜》切割在製造上較複雜，但這種切割有許多優點，由於這些優點這種切面用得很廣。

在按厚度方向振動的石英片中， AT 及 BT 切割的諧振器最為普遍。在按長度方向振動的情況下，則採用 XT ， YT 及 DT 切割的諧振器。上述斜切割型的特點是熱穩定性高及寄生諧振的數量較小。

石英諧振器的計算

決定諧振器振盪頻率的各個尺寸，按下列公式計算：

$$h = \frac{N}{f},$$

式中 h —決定諧振器頻率的尺寸（按長度方向振動時的長、寬或直徑；按橫向振動時的厚度），以毫米計；

N —頻率係數；

f —諧振器的固有頻率，以千週計。

最常用切割的頻率係數在表 1 中列出。

表 1

切割	石英片的形狀	振動形式	頻率係數千週·毫米
X	矩形	橫向	2870
AT	矩形	橫向	1662
BT	矩形	橫向	2550
DT	圓形	縱向	2470
DT	正方形	縱向	2073
DT	正方形 45° *	縱向	2341
YT	圓形	縱向	3766
YT	正方形	縱向	3087

AT	正方形45° *	縱向	3583
MT	矩形	縱向	3293

* (註) 在AT及MT切割的正方形石英片中，有時其切割方向與電軸成45°。

表1中所列頻率係數的數值是近似值；當石英片的輪廓尺寸及切割角度的偏差變化時，該數值可在某一範圍內變動。但是利用該表，可以在相當的程度內確定石英片的切割型式（如果石英片的頻率已知）或頻率（若切割角度已知）。

石英支架的構造

按長度方向振動的石英片及按厚度方向振動的石英片用不同的方法固定。橫向振動諧振器最老的固定方法是把石英片壓在金屬平板（電極）之間。具有夾板電極的石英支架構造如圖6.a所示。該類固定方法使諧振器中所引起的衰減作用顯著增加，並強烈地影響到諧振器的頻率。諧振器等效有效電阻的增加是由於石英的振動表面與金屬極間的摩擦損失所引起的。

由於想要減少由固定所引起的損失，創製了具有間隙的石英支架結構，在此支架結構中，石英片不承受明顯的機械壓力，而活動地放在兩金屬平板（電極）之間（圖6.6）。具有間隙的諧振器的等效電路圖如圖6.6所示。電容 C_0 是間隙的電容。這種諧振器的等效電路可以化成普通石英的等效電路。在某種程度上，串聯諧振的頻率與間隙的大小有關（與石英的等效迴路串聯的間隙電容可提高諧振頻率），因此，使數值一般等於十分之幾毫米的間隙保持不變，乃是這種諧振器工作穩定的最重要的條件之一。

在某些結構中，間隙的大小可以用移動一個電極的方法來加以調整，電極的移動係利用能保證兩電極表面平行的螺釘。螺釘具有