

技術支援

- 技術辭典

- 應用問答集

- 技術文件

- 產品製程

技術辭典

- [一. 石英晶體與頻率控制元件](#)

- [二. 石英晶體的壓電特性](#)

- [三. 石英的切割角度](#)

- [四. 石英晶體的振動模態](#)

- [五. 石英晶體的頻率與溫度特性](#)

- [六. 石英晶體共振子的等效線路及參數](#)

- [七. 共振頻率\(Resonance Frequency \)](#)

- [八. 專有名辭](#)

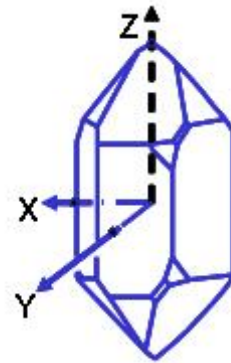
- [九. 石英晶體發振器\(CRYSTAL OSCILLATORS \)](#)

任何相關問題歡迎 [E-mail](#) 給我們

一. 石英晶體與頻率控制元件

石英是由矽原子和氧原子組合而成的二氧化矽 (Silicon Dioxide, SiO₂)，以32點群的六方晶系形成的單結晶結構 (圖一)。單結晶的石英晶體結構具有壓電效應特性，當施加壓力在晶體某些方向時，垂直施力的方向就會產生電氣電位。相對的當以一個電場施加在石英晶體某些軸向時，在另一些方向就會產生變形或振動現象。掌握單結晶石英材料的這種壓電效應，利用其發生共振頻率的特性，發揮其精確程度作為各類型頻率信號的參考基準，就是水晶震盪器的設計與應用。因為石英晶體具有很高的材料Q值，所以絕大部份的頻率控制元件，如共振子及振盪器，都以石英材料為基礎。以石英為基礎的頻率控制元件可以依其壓電振動的屬性，可以分為體波(bulk wave)振動元件及表面聲波(surface acoustic wave)振動元件。體波振動元件如石英晶體共振子，石英晶體濾波器及石英晶體振盪器，表面波振動元件如表面波濾波器及表面波共振子。當石英晶體以特定的切割方式，以機械加工方式予以表面研磨，完成特定的外型尺寸就是通稱的石英晶片(quartz wafer 或 quartz blank)。將這個石英晶片放置在真空環境中，于表面鍍上電極後，再以導電材料固定在金屬或是陶瓷基座上，並加以封裝，就成為一般所謂的石英晶體共振子。

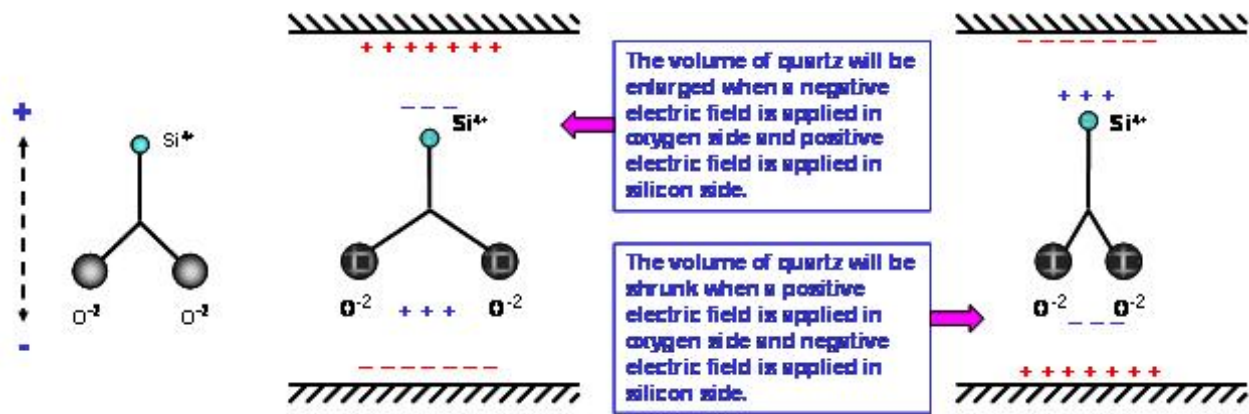
(quartz crystal resonator). 利用石英共振子在共振時的低阻抗特性及波的重疊特性, 用鄰近的雙電極, 可以做出石英晶體濾波器. 將石英振盪子加上不同的電子振盪線路, 可以做成不同特性的石英振盪器. 例如: 石英時脈振盪器(CXO), 電壓控制石英晶體振盪器(Voltage Controlled Crystal Oscillator, VCXO), 溫度補償石英晶體振盪器(Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO), 恆溫槽控制石英晶體振盪器(Oven Controlled Crystal Oscillator, OCXO)...等. 相對於體波諧振的是表面聲波的諧振. 將石英晶體表面鍍以叉狀電極(inter-digital-transducer, IDT)方式所產生的表面振盪波, 可以製造出短波長(高頻率)諧振的表面聲波共振子(SAW Resonator)或表面聲波濾波器(SAW Filter).



(Fig.1) Crystallized quartz material

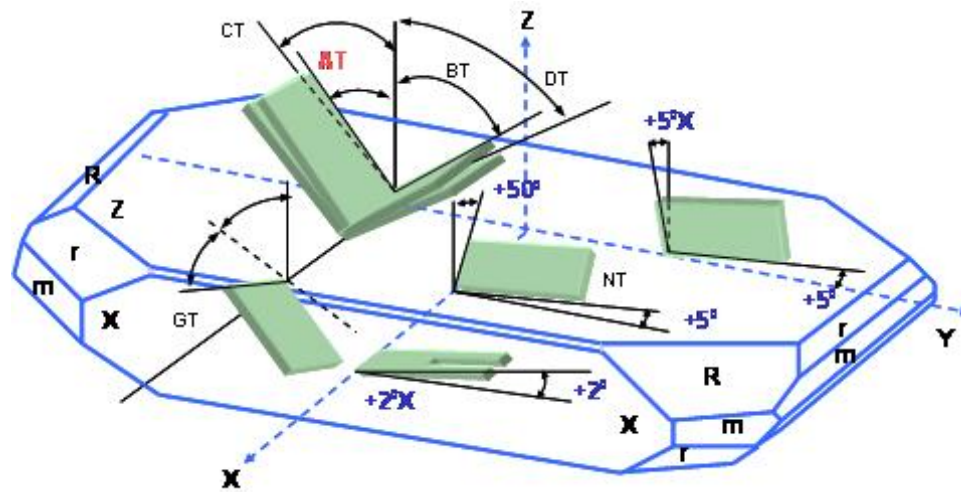
二. 石英晶體的壓電特性

石英材料中的二氧化矽分子(SiO_2) 在正常狀態下, 其電偶極是互相平衡的電中性. 在(圖二左)的二氧化矽是以二維空間的簡化圖形. 當我們在矽原子上方及氧原子下方分別給予正電場及負電場時, 空間系統為了維持電位平衡, 兩個氧原子會相互排斥, 在氧原子下方形成一個感應正電場區域, 同時在矽原子上方產生感應負電場區域. 相反的情況, 當我們在矽原子上方及氧原子下方分別給予負電場及正電場時, 兩個氧原子會相互靠近, 氧原子下方產生感應負電場, 矽原子上方產生感應正電場. (圖二). 然而, 氧原子的水平位置變化時, 鄰近的另一個氧原子會相對的產生排斥或吸引的力量, 迫使氧原子回到原來的空間位置. 因此, 電場的力量與原子之間的力量會相互牽動, 電場的改變與水平方向的形變是形成交互作用狀態. 這個交互作用會形成一個在石英材料耗能最小的振動狀態, 祇要由電場持續給與能量, 石英材料就會與電場之間維持一個共振的頻率. 這個壓電效應下氧原子的振幅與電場強度及電場對二氧化矽的向量角度有相對應的關係. 在實際的應用上, 電場是由鍍在石英晶片上的金屬電極產生, 電場與二氧化矽的向量角度則是由石英晶棒的切割角度來決定.

(Fig. 2) Simplified one dimensional piezoelectricity of SiO₂

三. 石英的切割角度

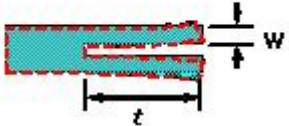
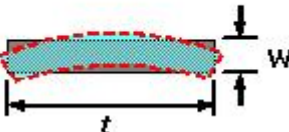
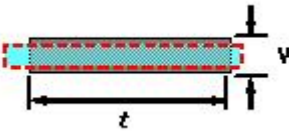
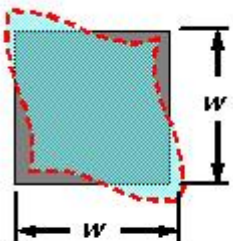
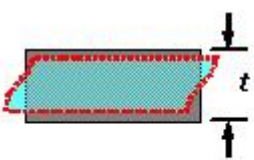
依據不同的應用領域及工作溫度需求，因應了許多不同的石英切割角度種類。例如AT-，BT-，CT-，DT-，NT，GT.....等不同的切割板片。不同的切割方向的板片具有不同的彈性常數張量(elastic constant tensor)，不同的壓電常數張量(piezoelectric constant tensor)及不同的介電常數張量(dielectric constant tensor)。這些張量在石英元件的設計及應用上展現了不同的振盪及溫度特性。(圖三)表現了在Z-plate石英結構上，幾種不同方向的石英板片切割方式。



(Fig. 3) Orientation angle of a Z-plate quartz crystal.

四. 石英晶體的振動模態

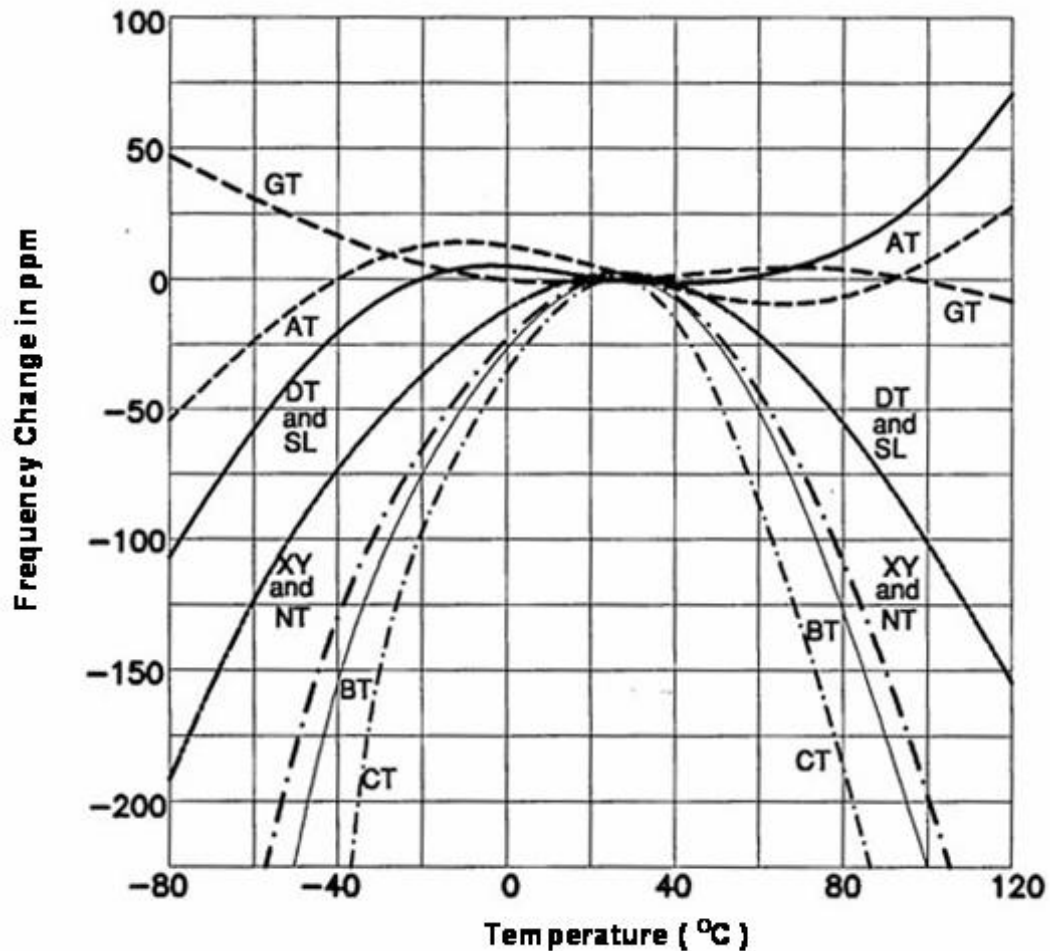
經由不同的石英切割角度及不同電極型狀的電場效應，石英晶片展現了各種不同的振動模態。以經常產生的振動模態可以概分為擾曲模態 (flexure mode)，伸縮模態 (extension mode)，面剪切模態 (face shear mode) 和 厚度剪切模態 (thickness shear mode)。這幾種振動模態以簡單的方法在表一中可以看到。在實際狀況中，石英晶片並不是一定祇有單一種振動模態，而可能有多種模態同時存在在一個石英晶片的振盪中，經由適當的設計，可以壓制其他不希望產生的振動模態 (unwanted mode)，來達到主要振動模態的最佳化。

Vibratoion Mode	Orientation Angle
Tuning Fork 	$+ 2^\circ X$
Flexure 	XY NT
Extension 	$+ 5^\circ X$ $- 18.5^\circ X$
Face Shear 	DT CT SL
Thickness Shear 	AT Fundamental AT 3 rd Overtone AT 5 th Overtone BT Fundamental

(Table 1) Vibration Mode and Cut Angle.

五. 石英晶體的頻率與溫度特性

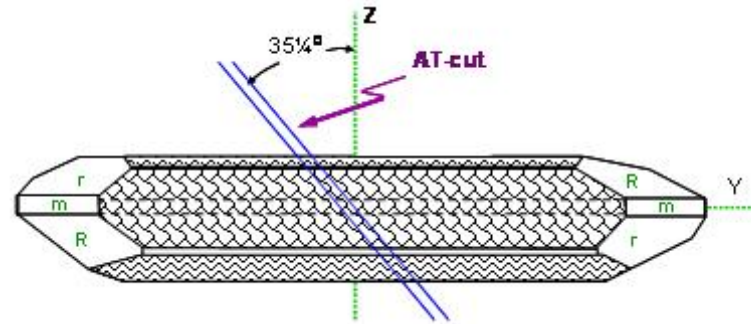
大部份的石英晶體產品是用於電子線路上的參考頻率基準或頻率控制元件，所以，頻率與工作環境溫度的特性是一個很重要的參數。事實上，良好的頻率與溫度(frequency versus temperature)特性也是選用石英做為頻率元件的主要因素之一。經由適當的定義及設計，石英晶體元件可以很容易的就滿足到以百萬分之一 (parts per million, ppm) 單位等級的頻率誤差範圍。若以離散電路方式將LCR零件組成高頻振盪線路，雖然也可以在小量生產規模達到所需要的參考頻率信號誤差在ppm或sub-ppm等級要求，可是這種方式無法滿足產業要達到的量產規模。石英元件的頻率對溫度特性更是離散振盪線路無法簡易達成的。在(圖四)中提供了數種不同的石英晶體切割角度的頻率對溫度特性曲線。



(Fig.4) Frequency-temperature characteristics of various quartz cuts.

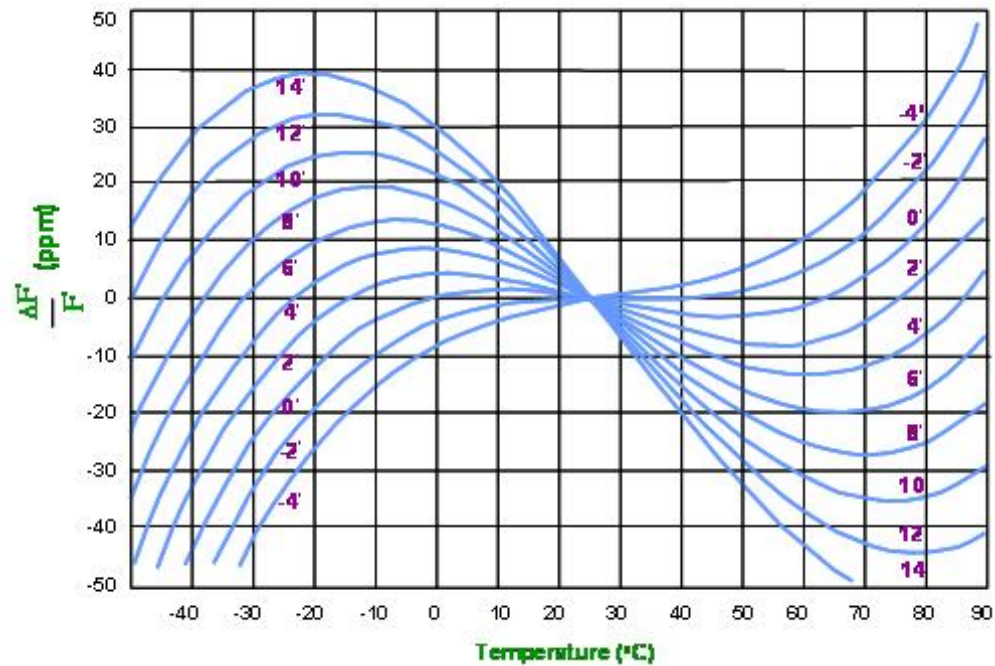
在各種不同種類的切割角度方式中，AT角度切割的石英晶片適用在數MHz到數百MHz的頻率範圍，是石英晶片應用範圍最廣範及使用數量最多的一種切割應用方式。在(圖五)中，從石英晶棒X-軸向的上視圖，可以看到對Z-軸向旋轉約35度的AT方向。這在大量生產的技術上也是很好達

成的一種作業方式。



(Fig.5) Orientation of AT plat

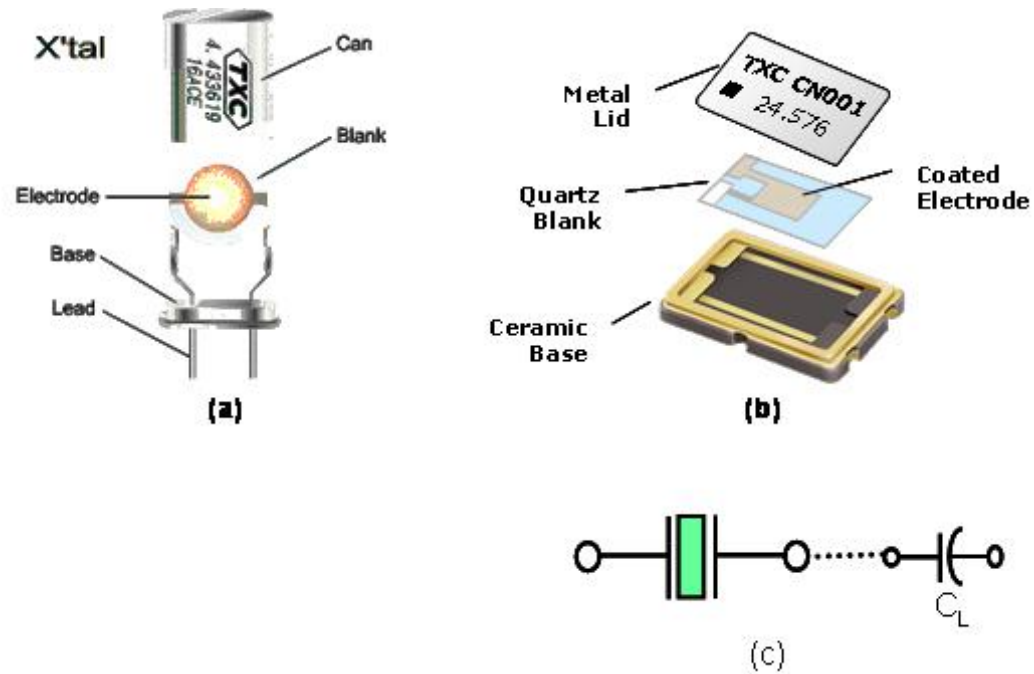
(圖六)是以AT切割角度變動在厚度振動模態的頻率對溫度特性的展開圖。圖中以常用的室溫攝式25度作為相對零點，AT切割的最大優點是頻率對溫度變化為一元三次方曲線。這個特性，從(圖六)中可以看到，在相當寬廣的溫度範圍下，AT切割的溫度曲線的第一階及第二階常數為零，第三階的常數便決定了頻率對溫度的變化值。



(Fig. 6) AT - cut frequency-temperature characteristics.

六. 石英晶體共振器的等效線路及參數

(圖七)(a)及(b)分別是DIP型式及SMD型式的石英振盪子的基本結構圖。(圖七)(c)是電子電路上所使用代表石英振盪子的電子符號。當石英晶體共振器處在遠離振盪頻率區域時，石英晶體共振器僅是一個電容性的元件，當頻率接近石英晶體的振盪頻率時，就接近是一個電感性的等效LCR振盪線路。

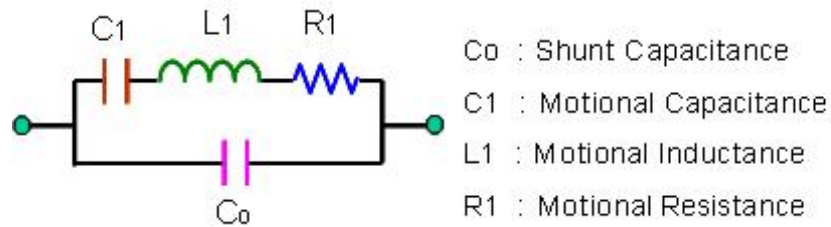


(Fig. 7) (a) Metal can type resonator

(b) Ceramic SMD type resonator

(c) Symbol of crystal unit

(圖八) 就是將石英晶體共振器轉換成振盪頻率附近的Butterworth-Van Dyke (BVD)等效電路。在這個圖中，有四個主要參數：靜態電容- C_0 ，動態電容- C_1 ，動態電感- L_1 及動態電阻- R_1 。



〔 Fig.8 〕 Effective Circuit of Crystal

七. 共振頻率 (Resonance Frequency)

在技術文獻及產品應用上, 石英晶體共振子的共振有三組不同定義及特性的共振頻率.

(1) 串聯諧振頻率及並聯諧振頻率 (f_s , f_p)

(series resonance frequency and parallel resonance frequency)

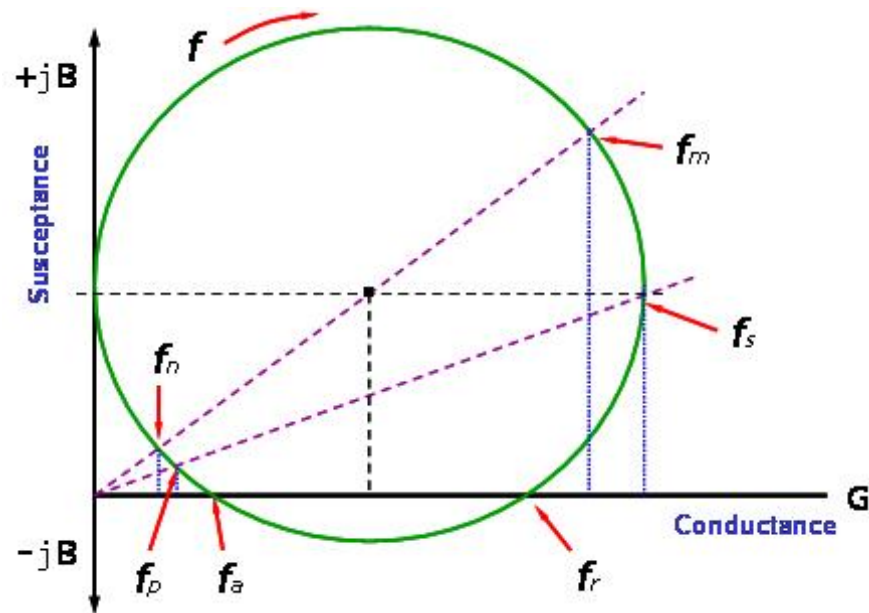
(2) 諧振頻率及反諧振頻率 (f_r , f_a)

(resonance frequency anti-resonance frequency)

(3) 最大電導頻率及最小電導頻率 (f_m , f_n)

(maximum admittance frequency minimum admittance frequency).

這三組頻率的導納(admittance)圖, 可以從(圖九)複數座標清楚的看到



〔 Fig.9 〕 Complex Admittance of Resonators

串聯共振頻率及並聯共振頻率, f_s 和 f_p , 是分別由電導(real part of the admittance)最大和阻抗(real part of the electric input impedance)最大時的頻率。

諧振頻率及反諧振頻率, f_r and f_a , 分別是當電導等於零(純電阻特性)的二個頻率。在這個時候, f_r 的阻抗為 $1/R_r$ 而 f_a 的阻抗為 $1/R_a$ 。

在評估共振時的等效線路時, 串聯諧振頻率及並聯諧振頻率, f_s and f_p , 是最重要的二個頻率參數。對於串聯諧振頻率及並聯諧振頻率 (f_s and f_p) 二者的關係, 我們可以用下列公式來表達:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \text{ ----- (1)}$$

$$f_p = f_s \sqrt{1 + (C_1/C_0)} \text{ ----- (2)}$$

公式中的 C_1 及 L_1 分別是(圖七)中的動態電容(motional capacitance)及動態電感(motional conductance); C_0 是靜態電容(shunt

capacitance).

八. 專有名辭

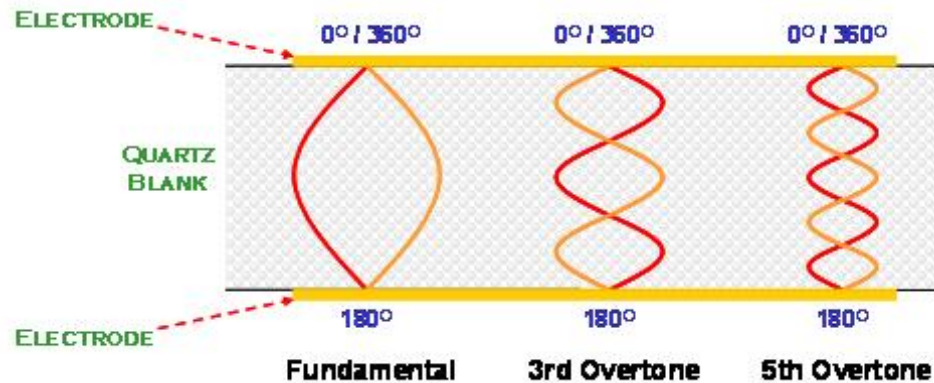
(1) 公稱頻率及容許誤差 (Nominal Frequency and Tolerance)

在正確的振盪線路匹配下，從振盪線路輸出的頻率，稱之為“公稱頻率 (normal frequency)”。頻率單位一般是以兆赫 (megahertz, MHz) 或 仟赫 (Kilohertz, KHz) 表示。

實際的批量生產及振盪線路應用上，產品在室溫環境 (25°C) 中都會有一些相對於中心頻率的頻率散佈誤差。這類型的頻率容許誤差的最大散佈值，一般是以 ppm (parts per million) 或 % (percent) 來表示。

(2) 基本波振盪及倍頻振盪模態 (Fundamental and Overtone Vibrations)

在 AT 切割角度的石英晶體共振器主要是以厚度剪諧振盪模態存在。石英晶體在共振時，除了基本波頻率振盪之外，高階的倍頻共振也與基本波振盪同時存在於石英晶體的電極區域之間。但是，由於壓電材料的電極是電氣相位相反的振動環境，所以，祇有基數倍 (odd number) 的高頻倍頻可以發生，偶數倍 (even number) 的倍頻共振在石英晶體共振器是不會存在的 (圖十)。



(Fig. 10) Only odd number harmonic vibrations can be excited in crystal resonator

(3) 負載電容 (Load Capacitance, CL)

振盪線路上的“負載電容 (load capacitance)”定義為：從石英晶體共振器的兩個端子看向振盪線路所遭遇到的所有電容值。負載電容在線路上可以與石英晶體共振器以並聯(parallel)或以串聯(series)的方式連接。以並聯方式連接的振盪線路中，負載電容(CL)的大小會影響公稱頻率的特性。

這種負載電容並聯線路的共振頻率以 f_L 表示：

$$f_L = f_s \sqrt{1 + C_1 / (C_0 + C_L)} \quad \text{----- (3)}$$

(4) 頻率對溫度穩定性 (Frequency-Temperature Stability)

石英頻率因溫度變化而改變，這是因起於石英材料在各個座標軸向的熱膨脹係數不同，當溫度變化時，各軸向晶格距產生些許變化。當引用不同的切割角度時，不同振盪模態的之變化也會不同。

以AT切割角度的厚度剪力振盪模態的設計，一般是採用攝式25度作為參考溫度點的頻率來定義在工作環境溫度範圍內的頻率變動的穩定性。在定義這項頻率對溫度穩定性參數的同時，也應該一同規範出相對應的工作環境溫度範圍(Operation Temperature Range)

石英頻率元件頻率對溫度穩定性的特性，亦如同公稱頻率誤差一樣，是以ppm或是以% 為計量單位。元件的頻率溫度特性曲線與石英的切割角度，振盪模態，表面處理及外型尺寸都有很大的關係。除此之外，振盪線路上的負載電容(CL)，驅動功率(drive level)的特性，也會影響到振盪線路輸出頻率對溫度變化的穩定性。

(5) 等效串聯阻抗 (Equivalent Series Resistance , ESR)

當石英晶體串聯振盪在 f_s 時， C_1 及 L_1 是相反相位而互相抵消，整個共振器的動態支臂 (motional arm) 的導納(admittance)是接近最小阻抗值 R_1 。這時候整個石英晶體共振器的表現僅是一個電阻性的元件。電阻值 R_1 是整個元件的機械性能量損耗。其中包含了石英材料，接著材料及封裝材料上所有的能量損耗。

(6) 動態電容 (Motional Capacitance C1) 及動態電感 (Motional Inductance L1)

在公式一中，動態電容 C_1 及動態電感 L_1 與串聯共振頻率， f_s ，是相互關聯的。

在實際的量測系統中，我們祇能測到動態電容 C_1 及串聯協振頻率 f_s 。動態電感 L_1 是由公式(4)計算得到。

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 C_1} \text{----- (4)}$$

(7) 靜態電容 (Static Capacitance or Shunt Capacitance, C_0)

靜態電容 C_0 ，主要來自自由以石英晶片為介電材料與兩個電極所形成的電容為主；另外一小部份的靜態電容來自連接石英晶片與接線的導電接著材料之間的電容和封裝外殼的電容。

靜態電容是在遠低於振盪頻率的範圍量測出來的，以避免在受到振盪頻率附近的動態電容影響。公式(5) 是靜態電容的數學表示式。

$$C_0 = \epsilon_{ij}^s \cdot \frac{A}{d} + C_{m+p} \text{----- (5)}$$

在公式(5)中， A 代表電極的面積； d 代表石英晶片的厚度； ϵ 是石英晶片的相對應介電值； C_{m+p} 是其他由材料產生的電容值

(8) 驅動功率 (Drive Level)

石英晶體的驅動功率是指石英晶體共振子的消耗功率。一般是以微瓦(microwatte)表示。振盪線路的設計上必須提供適當的功率讓石英晶體共振子開始起振並維持振盪。石英晶體的振盪是屬於物理上的高頻機械振動，振盪時的電氣阻抗值約在10~100歐姆以下(依頻率範圍及尺寸大小有差異)。振盪線路若提供過高的驅動功率，會使石英晶體的非線性特性變化及石英/電極/接著材料的介面惡化，進而造成振盪頻率 f_L 及等效阻抗 R_1 的過度變化。石英晶體在長時期的過高驅動功率下工作，會有不穩定的現象。隨著各類應用面的低消耗功率需求及產品小形化趨勢，加上近幾年石英產品的技術大幅提昇，石英晶體共振子的電氣阻抗值整體都下降而且穩定。振盪線路的設計不需要，也不應該提供過高的驅動能量在石英晶體共振子上面。對於絕大部份的應用面而言，振盪線路提供 10 ~ 100 微瓦(microwatte)的最大功率(視石英共振子的尺寸及頻率而定)給石英共振子已足夠了。

(9) 電氣品質因子 (Quality Factor, Q)

對於石英晶體共振子，電氣品質因子 Q 是很重要的一個特性。電氣品質因子可以用下列公式(6)表示

$$Q = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1} = \frac{1}{2\pi f_s C_1 R_1} \text{-----(6)}$$

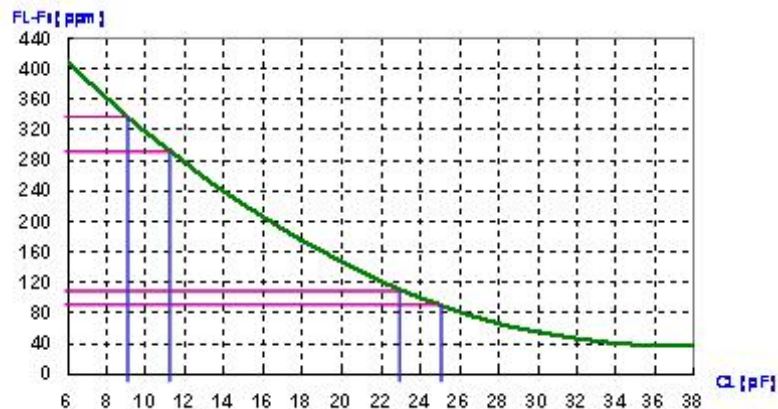
石英晶體的共振子的品質因子可以達到數百萬以上。

(10) 牽引率 (Pullability) 及 敏感度 (Trim Sensitivity)

石英晶體共振子應用在並聯振盪線路上，振盪頻率與負載電容CL有很大的關係。這在前面的公式(3)就可以看到。(圖十一)是以並聯振盪線路上FL頻率對負載電容CL的變化曲線示意圖。

頻率的“牽引率”指的是負載電容CL1的頻率FL1到負載電容CL2的頻率FL2的頻率變化。在(圖十一)中可以是FL1(CL=24pF)與FL2(CL=10pF)的頻率變化值。在這個例子中的頻率牽引率是 220 ppm。若我們將CL1與CL2的負載電容值趨近極小化(曲線作數學上的微分)，就會得到曲線的切線值。這個切線值就是用某一個負載電容的敏感度(trim sensitivity)。

在(圖十一)中，CL=24 pF 時的頻率敏感度是10 ppm/pF，及CL=10 pF時的頻率敏感度是20 ppm/pF。在並聯線路中，負載電容越小，頻率對負載電容變化的敏感度越高。相反的，負載電容越大，頻率對負載電容變化的敏感度越低。這就是石英晶體共振子用於VCXO線路上時，線路設計上會選用較小負載電容。反之，在要求較準確的頻率信號時，線路設計上會選用較高的負載電容。



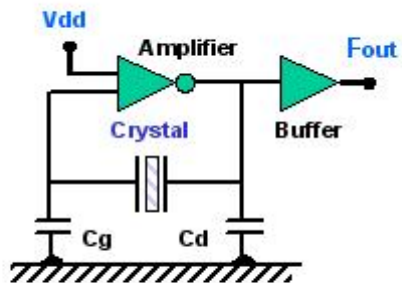
(Fig. 11) Frequency variation vs. load capacitance

(11) 老化 (AGING)

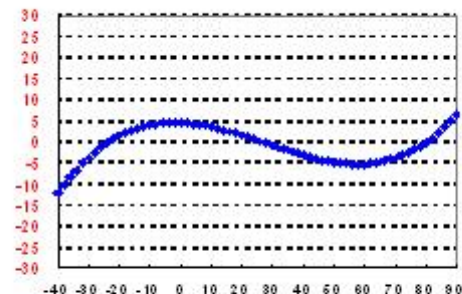
在(圖十二)提供了數種石英振盪器輸出頻率對溫度變化的穩定性示義圖



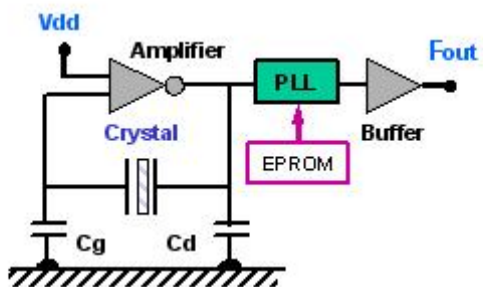
(a) Simple Package Crystal Oscillator



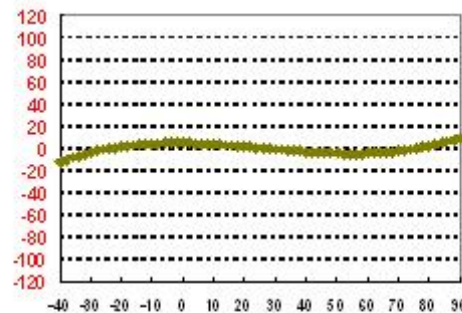
Frequency Stability



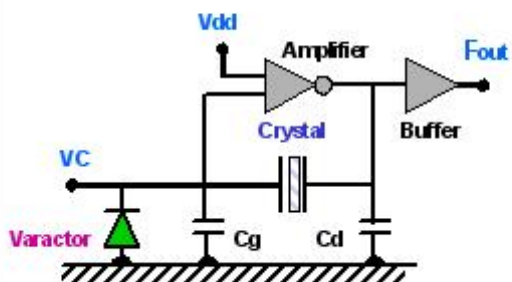
(b) Programmable Crystal Oscillators



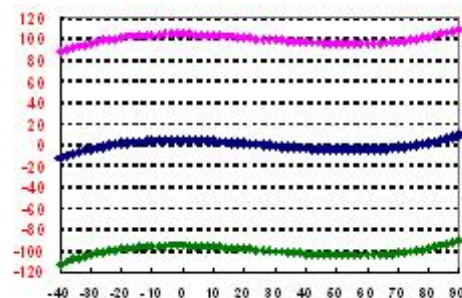
Frequency Stability



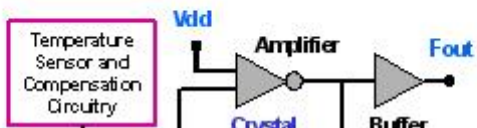
(c) Voltage Controlled Crystal Oscillator



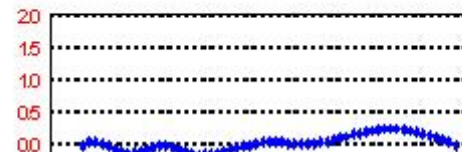
Frequency Stability

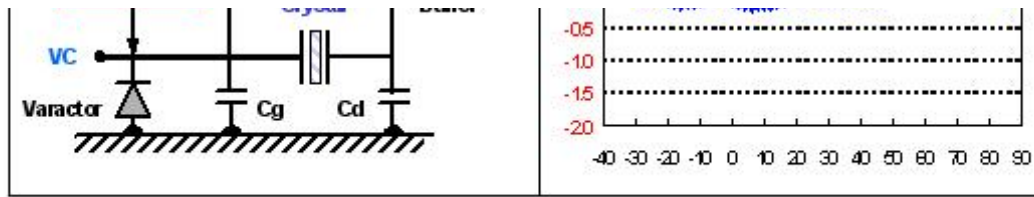


(d) Temperature Compensated Crystal Oscillator (TCXO / VC TCXO)



Frequency Stability





▲ TOP

[聯絡我們](#) | [網路地圖](#) | [法律及商標](#)

台灣晶技股份有限公司 TEL: 886-2-2894-1202 FAX: 886-2-2894-1206 台北市北投區中央南路二段16號4樓 (總公司)

TEL: 886-3-469-8121 FAX: 886-3-469-6954 桃園縣平鎮市平鎮工業區工業六路4號 (工廠)