

# 石英、硅、陶瓷及 LC 振荡器的材料特性与特征

## 石英晶体振荡器与全硅 MEMS 振荡器的比较

### 【序文】

各种电子设备需要基准信号。为获得基准信号可以使用石英晶体振荡器，也可以通过其它元器件，例如 LC 振荡器、CR 振荡器、陶瓷振荡器或全硅 MEMS 振荡器等。LC 振荡器利用电感（L）和电容（C）组合后产生的谐振现象起振频率；CR 振荡器使用电容（C）和电阻（R）所构成的充放电电路起振基准频率；陶瓷振荡器则使用以锆钛酸铅（PZT）为主要材料的压电陶瓷；而全硅 MEMS 振荡器则是应用了 MEMS（Micro Electro Mechanical Systems，微机电系统）加工技术的硅基振荡器。从以上列举的多种类型的振荡器中选择时应当基于用途进行。

通常用于微机时钟信号等情况时，其频率较低且频率精度要求也不太高，所以经常使用具有低价特征的陶瓷振荡器。陶瓷振荡器的振荡频率约为 200kHz-100MHz，室温条件下的频率公差一般在 0.1%-0.5% 左右。它虽然具有价格低廉之优势，但振荡频率随温度的变化大，且精度低，综合性的频率稳定度约为  $\pm 1.1\%$ 。

无线通信设备等要求振荡器具有高频和高频率精度的特征，在这些用途方面大多使用石英晶体振荡器。近年来，硅基振荡器（全硅 MEMS 振荡器）等的性能也有所提高。但是，种类各异的振荡器因其起振方式的不同而在性能方面存在着根本性的差异。本篇就不同类型的振荡器的特征进行解说。

### 【1】振荡单元和谐振单元的比较

产生基准信号的振荡器中使用的振荡单元和谐振单元有很多种类，例如利用对压电晶体施加电压而产生机械应力的现象（逆压电效应）的压电驱动型，或者利用施加高电压时产生的静电的静电驱动型等。振荡单元和谐振单元的特性与其使用的材料、结晶或电路性质有着密切的关系。

爱普生所提供的是石英晶体部件。《序文》中已经提到存在着各种类型的振荡单元和谐振单元。表 1 汇总了一般特征。我们将在下文中说明各自特征。

表 1：各类振荡单元、谐振单元特性比较

振荡单元或谐振单元	初始频率公差	频率温度特性	Q 值
石英	◎	◎	◎
硅	×	×	○
陶瓷	△	△	△
LC、CR	×	×	×

#### 【1-1】LC、CR 谐振单元

LC 谐振单元的谐振电路名副其实由电感（L）和电容（C）组成。它比较适用于需要较高频率和较宽频率可变范围的用途。与此相反，它的精度和稳定度并不出色。

而且，它在低频条件下需增大电感才能满足谐振条件，导致不得不使用较大的线圈，因此不适于小型化。如果需要小型化，也可以改为不使用电感的 CR 谐振电路，但这又引发了难以应对高频的问题。

#### 【1-2】陶瓷谐振单元

《序文》中介绍的陶瓷谐振单元使用的是以锆钛酸铅（PZT）为主要材料烧结而成的压电陶瓷。它的精度优于 LC 振荡器，但初始频率公差较大（约  $\pm 0.5\%$ ），所以经常被用于频率较低且频率精度要求并不太高的

应用领域。

它的温度特性随陶瓷烧结材料的成份组合而变，因此能够灵活应对。相反，材料组合成份的微小误差或生产工艺中的差异将导致产品特性不均，由此被认为极难保证产品均一性。

陶瓷谐振单元的特征中尤为突出的是上升时间快。虽然上升时间将受振荡电路中的元器件的影响，但一般情况下，当频率越高、负载电容越小且谐振单元的 Q 值越低时，起振速度越快。如表 1 所示，陶瓷谐振单元的 Q 值与石英和硅相比较低，因此它在上升时间方面相对有利。基于上述因素，陶瓷谐振器多用于不太注重精度，但要求上升时间快的应用领域。

### 【1-3】硅谐振单元

硅谐振器使用单晶硅，这种材料的 Q 值比陶瓷的要好，但比水晶的要差。在制造过程中使用半导体生产技术与晶圆进行一次性处理，从而能够生产廉价、小型的产品。与此相对，生产效率好反而妨碍了对每只谐振单元的调节，致使生产工艺中的微小差异直接影响初始频率公差。在目前情况下，每只谐振单元频率精度依靠补偿电路进行一定程度的调整。

而且，单晶硅所具有的温度特性在-20 至-30ppm/°C 的范围内呈线形，变化量随温度而增加。因此，市场上供应的是进行了温度补偿并达到了一定精度的全硅 MEMS 振荡器。

### 【1-4】石英晶体振荡单元

最后所述的石英晶体振荡单元将石英（SiO<sub>2</sub>）作为材料。由于石英的结晶性高，因此它具有 Q 值高、特性阻抗好的优点。因为它是各向异性晶体，可以通过切割方法而获得在常温范围内有拐点的呈三次曲线的温度特性。这表示它在较宽的温度范围内保持稳定。

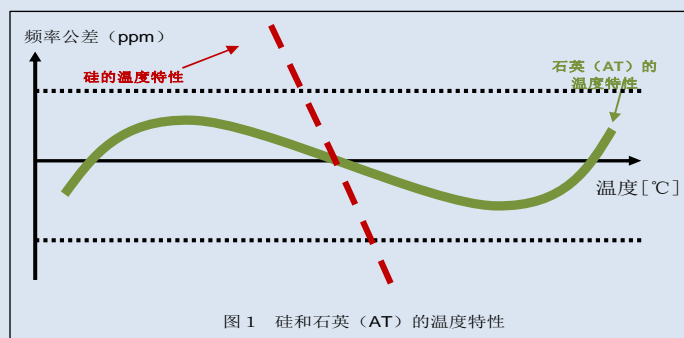
而且，对每只振荡单元的频率调整可通过改良生产工艺而实现，从而使初始频率公差也达到几 ppm（百万分之一）程度的高精度，被广泛地应用于无线通信设备等要求高精度的领域。只从振荡单元来看，可被誉为具有极高精度的部品。

综上所述，我们在决定使用的振荡器时应当根据各类型的特征而选择符合用途的产品。在下一章中，我们将说明使用硅谐振单元的振荡器（全硅 MEMS 振荡器）与使用石英晶体振荡单元的振荡器的区别。

## 【2】石英晶体振荡单元和硅谐振单元的温度特性比较

关于上述【1】中已提及的频率温度特性，在此进行详细讲解。

石英和硅的温度特性如图 1 所示。从图 1 可以看到，石英的温度特性在较宽的温度范围内保持稳定，并在常温范围内有拐点（AT 型石英晶体的温度特性）。这表明石英晶体振荡单元无需调整也能在温度变化大的条件下保持稳定的精度，意味着它有能力应对极为广泛的应用领域。



与此相对，硅谐振单元的温度特性在-20至-30ppm/°C的条件下呈线形。这说明，如果使用具有线性特性的谐振单元组建振荡器，就必须对晶体本身所具备的温度特性进行补偿。而且，石英晶体振荡单元在生产过程中对每只产品进行频率调节，使得初始频度公差保持在 ppm 程度的差异之间；硅谐振单元为提高生产效率在生产过程中对晶圆进行一次性处理，这省略了个别调节的时间，却造成了初始频度公差的差异幅度大的情况。根据上述原因，使用硅谐振单元的全硅 MEMS 振荡器必须带温度补偿电路，与石英相比电路耗电量可能更多。以上说明了振荡单元和石英单元之间的特性差异，在下一项中说明实际市场中销售的振荡器之间的性能差别。

### 【3】石英晶体振荡器和全硅 MEMS 振荡器的特性

基准信号的要求规格随用途而变，通常将振荡初始频率公差、频率对温度的稳定度及噪音和抖动特性等参数作为选择时的指标。

全硅 MEMS 振荡器通过内建电路对硅谐振单元的温度特性进行温度补偿，以此确保稳定性。这种用于补偿的电路被称为“小数分频锁相环（Fractional-N PLL，以下简称为‘Frac-N PLL’）”电路。

Frac-N PLL 指使用了小数分频器的锁相环电路，它可以产生输入频率的小数倍的输出频率。全硅 MEMS 振荡器使用这种方法改变硅谐振单元在各温度点的分频比，以此控制输出信号的起振频率进行温度补偿。图 2 是使用这种方法进行了温度补偿之例。

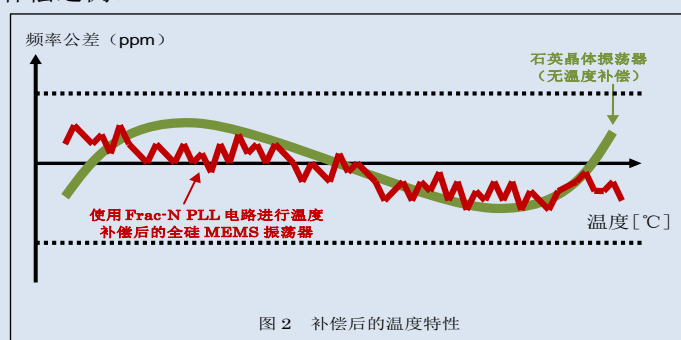


图 2 中红线表示用 Frac-N PLL 电路进行温度补偿后的温度特性。

如上述所示，硅谐振单元的温度特性因其材料性质而呈线形，因此能够以简单的补偿公式进行温度补偿。

但是，与石英晶体振荡单元的温度特性相比，其变化量非常大，所以不能进行模拟式的温度补偿。

因此，全硅 MEMS 振荡器按照使用的温度范围进行细分，针对各温度范围转换不同的分频比，使用 Frac-N PLL 等数字电路进行更精密的温度补偿。然而，在转换分频比时有可能产生图 2 所示的间断性频率跳动的情况，振荡频率在不连续的温度点的输出信号相位出现变化，使噪音与抖动特性遭受不良影响。无线通信设备基于相位调制技术进行通信，若在无线通信设备中使用硅谐振单元，则无法在产生噪音时准确调制，导致不能进行正确的数据收发。

使用石英晶体振荡单元的振荡器无需温度补偿也可应对较宽的温度范围，并且没有使用进行温度补偿的锁相环电路（在使用锁相环电路改变分频比的产品中也仅限于波源）。因此，它可以保持石英本身所具有的针对温度变化而相对稳定的温度特性，即不出现频率间断性跳动的情况。

这就不会对噪音和抖动造成不良影响，刚才所提到的无线通信设备中的问题的发生可能性极小。

当然，硅谐振单元也可以通过尺寸管理、更换电极材料等方法个别进行温度补偿，而只改变初始值的分频比。但这将导致全硅 MEMS 振荡器生产效率下降、单价上升的后果，有损于其自身优势（晶圆一次性处理所产生的高产效和廉价等）。

鉴于当前通信设备行业的发展趋势，将使用更多的石英晶体振荡单元和硅谐振单元。

在这种变化潮流之中，我们认为无需调整、特性稳定的石英晶体振荡单元的需求更高。用户在选择电子部品时需要充分理解元件特性并基于用途进行选择。爱普生将不断充实石英元器件产品阵容，提供高可靠的产品，以回应顾客需求。