

晶振片知识

一.什么是晶振片?

薄薄圆圆的晶振片，来源于多面体石英棒，先被切成闪闪发光的六面体棒，再经过反复的切割和研磨，石英棒最终被做成一堆薄薄的（厚 0.23mm，直径 13.98mm）圆片，每个圆片经切边，抛光和清洗，最后镀上金属电极（正面全镀，背面镀上钥匙孔形），经过检测，包装就可以出厂使用。



Inficon 晶振片及包装盒

然而，这样的小薄片是如何工作的？科学家最早发现一些晶体材料，如石英，经挤压就象电池可产生电流（俗称压电性），相反，如果一个电池接到压电晶体上，晶体就会压缩或伸展，如果将电流连续不断的快速开关，晶体就会振动。

在 1950 年，德国科学家 GEORGE SAUERBREY 研究发现，如果在晶体的表面上镀一层薄膜，则晶体的振动就会减弱，而且还发现这种振动或频率的减少，是由薄膜的厚度和密度决定的，利用非常精密的电子设备，每秒钟可能多次测试振动，从而实现对晶体镀膜厚度和邻近基体薄膜厚度的实时监控。从此，膜厚控制仪就诞生了。



Inficon 膜厚控制仪(thin film deposition controller)

二、膜厚控制仪是如何测试厚度的？

一台镀膜设备往往同时配有石英晶体振荡监控法和光学膜厚监控法两套监控系统，两者相互补充以实现薄膜生产过程中工艺参数的准确性和重复性，提高产品的合格率。

原理和精度:

石英晶体法监控膜厚，主要是利用了石英晶体的两个效应，即压电效应和质量负荷效应。

石英晶体是离子型的晶体，由于结晶点阵的有规则分布，当发生机械变形时，例如拉伸或压缩时能产生电极化现象，称为压电现象。石英晶体在 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 的压强下，承受压力的两个表面上出现正负电荷，产生约 0.5V 的电位差。压电现象有逆现象，即石英晶体在电场中晶体的大小会发生变化，伸长或缩短，这种现象称为电致伸缩。

石英晶体压电效应的固有频率不仅取决于其几何尺寸，切割类型，而且还取决于芯片的厚度。当芯片上镀了某种膜层，使芯片的厚度增大，则芯片的固有频率会相应的衰减。石英晶体的这个效应是质量负荷效应。石英晶体膜厚监控仪就是通过测量频率或与频率有关的参量的变化而监控淀积薄膜的厚度。

用于石英膜厚监控用的石英芯片采用 AT 切割，对于旋光率为右旋晶体，所谓 AT 切割即为切割面通过或平行于电轴且与光轴成顺时针的特定夹角。AT 切割的晶体片其振动频率对质量的变化极其灵敏，但却不敏感于温度的变化，在 $-40 \sim 90^\circ\text{C}$ 的整个温度范围内，温度系数大约是 $\pm 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 数量级。这些特性使 AT 切割的石英晶体片更适合于薄膜淀积中的膜厚监控。

AT 切割的石英芯片压电效应的固有谐振频率 f 为:

$$f = \frac{n}{2d_Q} \left(\frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \quad (1)$$

其中， n : 谐波数, $n=1, 3, 5, \dots$;

d_Q : 石英晶体的厚度;

c : 切变弹性系数;

ρ : 石英晶体的密度 ($2.65 \times 10^3 \text{kg/m}^3$)

显然谐振频率 f 与 d_Q 、 c 、 ρ 等量有直接关系。由于很多的外界影响，比如晶体温度、温度梯度、激发电场等都会影响到谐振频率，这是因为上述的因素会影响到 d_Q 、 c 、 ρ 等参量值。

对于我们常用的基波 ($n=1$) 来说 (1) 式可以化为:

$$f = N/d_Q \quad (2)$$

其中， $N = 0.5(c/\rho)^{1/2} = 1670 \text{Hz} \cdot \text{mm}$ (AT 切割)，称为晶体的频率常数， d_Q 为晶体的厚度。

对 (2) 式微分得:

$$\Delta f = -\frac{N}{d_Q^2} \Delta d_Q \quad (3)$$

上式的物理意义是，若厚度为 d_Q 的石英晶体增加厚度 Δd_Q ，则晶体的振动频率变化了 Δf ，式中的负号表示晶体的频率随着膜厚的增加而降低。然而在实际镀膜时，淀积的是各种膜料，而不都是石英晶体材料。所以我们需要把石英晶体厚度增量 Δd_Q 通过质量变换表示成为膜层厚度增量 Δd_m 。即：

$$\Delta d_Q = (\rho_m / \rho_Q) \cdot \Delta d_m \quad (4)$$

其中： ρ_m 为膜层的密度；

ρ_Q :石英晶体的密度($2.65 \times 10^3 \text{kg/m}^3$)

把(4)式代入(3)式中，有：

$$\Delta f = -\frac{\rho_m \cdot N}{\rho_Q \cdot d_Q^2} \cdot \Delta d_m = -\frac{\rho_m \cdot f^2}{\rho_Q \cdot N} \Delta d_m \quad (5)$$

令 $-\frac{\rho_m \cdot f^2}{\rho_Q \cdot N} = s$ ，则

$$\Delta f = s \cdot \Delta d_m \quad \text{或} \quad \Delta d_m = (1/s) \Delta f \quad (6)$$

式中 s 称为变换灵敏度。

对于某一种确定的镀膜材料， ρ_m 为常数，在膜层不很厚，即淀积的膜层质量远小于石英芯片质量时，固有频率变化不会很大。这样我们可以近似地把 s 看成为常数，于是由(6)式表达的石英晶体频率的变化 Δf 与淀积薄膜厚度 Δd_m 就有了一个线性关系。因此我们可以借助检测石英晶体固有频率的变化，实现对膜厚的监控。显然这里有一个明显的好处，随着镀膜时膜层厚度的增加，频率单调地线性下降，不会出现光学监控系统中控制信号的起伏，并且很容易进行微分得到淀积速率的信号。因此，在光学监控膜厚时，还得用石英晶体法来监控淀积速率，我们知道淀积速率稳定对膜材折射率的稳定性、产品的均匀性重复性等是很有好处和有利的保证。

最早的石英晶体膜厚监控仪就是直接用频率来读数，用频差对应厚度的。后来在数字电路发展的基础上，人们采用了所谓周期法测厚原理。公式(5)中的 f^2 ，严格一点应该表示为 $f^2 = f_Q \cdot f_m$ ，这样(6)经过简单变换可以写为：

$$\Delta T = (T_Q - T) = -\frac{\rho_m \cdot 1}{\rho_Q \cdot N_Q} \Delta d_m \quad (7)$$

其中， T :有载石英晶体振荡周期；

T_0 :空载石英晶体振荡周期。

如果仪器可以精确地测量石英晶体振荡周期的变化,那么便能准确地得到膜厚。

无论是频率法测厚,还是周期法测厚,遵循的公式都是在假定淀积的膜层没有改变石英晶体振荡模式条件下推导出来的,而实际上膜层的淀积已经改变了石英本身的振动模式,由单一材料的振动模式,变为两种材料的混合振动模式。考虑到石英晶体被膜层淀积后变成混合振动模式,推导了如下计算膜厚的公式:

$$\Delta d_m = (\rho_Q / \rho_m) (N_Q \cdot T \cdot Z_m / \pi \cdot Z_Q) \cdot \operatorname{tg}^{-1} (Z_Q / Z_m) \cdot \operatorname{tg} \pi (1 - T_Q / T) \quad (8)$$

其中, Z_m :淀积膜层的声阻抗(单位 $\text{g/cm}^3 \cdot \text{S}$);

Z_Q :石英晶体的声阻抗(单位 $\text{g/cm}^3 \cdot \text{S}$)。

这个公式比较完整和比较精确地体现了膜层厚度与石英晶体振荡周期变化之间的关系。根据这个公式设计的石英晶体膜厚控制仪常称为声阻抗法测厚仪。

石英晶体膜厚控制仪有非常高的灵敏度,可以做到埃(\AA)数量级,显然晶体的基频越高,控制的灵敏度也越高,但基频过高时,晶片会做得太薄,太薄的芯片易碎。所以一般选用的晶体片的频率范围为 5~10MHz。在淀积过程中,基频最大下降允许 2~3%,大约几百千赫。基频下降太多,振荡器不能稳定工作,产生跳频现象。如果此时继续淀积膜层,就会出现停振。为了保证振荡稳定和高的灵敏度,晶体上膜层镀到一定厚度以后,就应该更换新的晶振片。旧的晶振片在清洗后复新可以再用。另外由(6)式可知,频率和膜厚之间的变换灵敏度取决于 f^2 ,但是 f 在膜层淀积过程中是随膜厚的增加而降低的,所以在镀膜的过程中 s 不是一个严格的常数, Δf 与 Δdm 在理论上也不是一个严格的线性关系,随着膜层累积频率变化的增加, Δf 与 Δdm 的线性也在变坏,这就需要我们应用石英晶体膜厚控制仪时要考虑修正。预先计算好修正值再镀制。如果膜层比较厚,可以分几次做,或预先计算修正值,这种情况一般只有在红外光谱区才会遇到。

石英晶体监控膜厚的检测误差由绝对误差和相对误差相加而成。绝对误差决定于监控仪的频率稳定性和检测精度,而相对误差决定于监控仪灵敏度和准确性。一台石英晶体膜厚控制仪在使用中真正获得的监控精度还和使用的条件有密切联系。蒸发的薄膜的密度与固体材料的密度是不同的,薄膜的密度又与蒸发条件有关,实际膜层的密度可以用填充密度修正。同时淀积在芯片上膜层的密度、膜层的折射率与镀件上膜层的密度和折射率是不同的,这些数据都需要通过实验进行修正,而修正后的数据只有在相同的淀积条件下应用才是有确实依据的。这就是如果只采用石英晶体法监控膜厚进行镀膜时要在 Tooling 系数修正上花费较多时间与精力,并且不同产品的 Tooling 系数亦不相同。

关于采用石英晶体法监控膜厚进行镀膜,本人总结出以下三个步骤,供参考:

- a.理论膜系设计满足 Spec.要求,同时设计要有足够之余量及合理性以达到可行性;
- b.波长定位准确,并初具曲线形状;
- c. Matching 镀制曲线和设计曲线,修改 Tooling 系数达到 Spec.要求。

膜厚控制仪原理:

把晶振片放入真空室内的探头中,唯一显示晶振片正在工作的是膜厚控制仪。膜厚控制仪是如何工作的呢?

膜厚控制仪用电子组件引起晶振片的高速振动,约每秒6百万次(6MHz),镀膜时,测试每秒钟振动次数的改变,从所接受的数据中计算膜层的厚度。绝大数晶振片一秒钟可以完成多次这样的计算,实时告知操作人员晶振片上和真空室内基体膜层沉积速度。

为了确保晶振片以6MHz的速度振动,在真空室外装有“振荡器”,与晶控仪和探头接口连接,振荡器通过迅速改变给晶振片的电流使晶振片高速振动。一个电子信号被送回晶控仪。

晶控仪中的电路收到电子信号后,计算晶振片的每秒振速。这个信息接着传送到一个微处理器,计算信息并将结果显示在晶控仪上:

- 1) 沉积速率(Rate) (埃/秒)
- 2) 已沉积的膜厚 (Thickness) (埃)
- 3) 晶振片的寿命 (Life) (%)
- 4) 总的镀膜时间(Time) (秒)

更加精密的设备可能显示沉积速率与时间的曲线和薄膜的类型。我们可以将许多参数输入晶振仪以保证测量和镀膜过程的精确控制:

- 1) 薄膜序号,用于输入膜层或定义材料参数
- 2) 目标膜厚或最大沉积速率
- 3) 镀膜时间
- 4) 薄膜密度(DENS)
- 5) 校正系数(Tooling),用于校正晶振片或基片位置产生的误差
- 6) Z-Factor 值(只有当膜厚>10000A时才需要Z值,以校正膜层太厚对晶振片振动的影响,在绝大多数光学镀膜中,“Z”值输入值为1)。

频率变化与质量增加薄膜厚度关系式:

$$A_f = \left[\frac{(N_q \cdot D_q)}{(\pi \cdot D_f \cdot Z \cdot F_c)} \right] \cdot \text{arcTan} \left[Z \cdot \text{Tan} \left[\frac{\pi \cdot (F_q - F_c)}{F_q} \right] \right]$$

A_f ---薄膜厚度,单位埃(Å)

N_q --- A_f 切割晶体频率常数, 1.668×10^{13} 赫兹. 埃(Hz. Å)

D_q ---石英密度, 2.648gm/cm³

π ---常数, 3.14159265358979324

D_f ---膜材密度, 单位gm/cm³

Z---材料 Z 系数

F_q ---欲镀膜的石英晶体的频率, 该值可由制造控制

F_c ---已镀的晶体频率

靠量测接近 1.2 百万循环的振荡信号周期和稳定的超高频率的参考时钟, 获得一个极其精确的频率值 f_c , 每秒四次产生一个新值并且更新上面的公式。

密度测定:

使用块状材料的密度值通常可以提供足够的薄膜厚度精度, 如果需要额外的精度, 则使用下面的步骤得之。

使用一个新的晶振片(目的是消除 Z 系数误差)放在基底附近, 此举是获得同样的蒸镀束流, 将仪器密度设为材料的块状值, 设置 Z 系数为 1, Tooling 系数为 100%。镀 5000 埃膜材在晶振片和基底上, 蒸镀完成后取下基底用剖面仪(台阶仪)或多束干涉仪量测厚度。则正确的密度由下式得之:

$$\text{密度 } D(\text{gm/cc}) = \text{密度参数(块状密度)} \times \text{晶控读数} = \text{基底量测厚度}$$

Z 系数测定:

Z 系数由下式计算:

$$\text{Z-Factor}(Z \text{ 系数}) = \sqrt{\frac{D_q \cdot U_q}{D_f \cdot U_f}}$$

D_q ---石英密度 U_q ---石英模数 D_f ---薄膜密度 U_f ---薄膜模数

Tooling 测定:

放一基底(测试片)在伞具的通常位置然后用块状或已校正过的密度和 Z 系数值蒸镀接近 5000 埃的厚度, 确认当做 Tooling 校正时 Tooling 被设置为 100%。在密度校正方式量测基底薄膜厚度, 则用下面的公式得到正确的 Tooling 值。

$$\text{Tooling}\% = 100\% \times \text{基底厚度(测试片膜厚)} / \text{显示厚度(石英显示膜厚)}$$

探头 Sensor 高于伞具 Tooling > 100%, 低于伞具 Tooling < 100%

三、使用晶振片的注意事项

毫无疑问, 晶振片是所发明的最敏感的电子组件。用作镀膜的时候, 晶振片可以测量到膜厚 0.000000000001 克重的变化, 这相当于 1 原子 (atom) 膜厚, 而且, 晶振片对温度也很敏感, 对 1/100 摄氏温度的变化也能感知。另外, 晶振片对应力的敏感也很大, 在一些特别的镀膜过程中可以感知已镀膜的晶振片冷却后膜层原子的变化。

对于这种对应力如此敏感的芯片, 而且大规模用于光学镜片的镀膜, 我们肯定要问“那他们如何工作”。对常用 MgF_2 增透膜, 300 度时膜硬度是平时的 2 倍, 冷却时会产生巨大的应力,

我们会常常遇到这样的情况，当镀氟化镁一会儿，沉积速率或膜厚会显示不规则的跳跃，镀铬或铬时我们也常常会遇到类似的问题。

四、探头的设计和常见问题

为了使晶振片在真空室内工作，必须用一种器件来激活振荡真空室内的晶振片，并使晶振片一部分被镀膜，而且能使晶振片被方便的更换。另外，这个器件必须屏蔽晶振片，免受镀膜中高温破坏，这个器件就是探头。

现在市场上的探头设计，是将晶振片放入夹具中（一种中间有孔的金属帽）。夹具作为半个电路使晶振片振动。这个孔可使镀在晶振片上膜层直径约 7.6mm 圆形，晶振片用一个弹簧固定在夹具内，或者弹簧被固定在夹具内四周，压住晶振片的边。另外一种设计，用一个“陶瓷稳定器（Ceramic retainer）”，和镀金的弹簧在中间，压住晶振片的边。

在上述两种设计中，晶振片夹具放入探头中（一个小的金属块），另一个镀金弹簧压住晶振片或稳定器背面，以形成完整的电路。通常，探头中还有一个弹簧以稳定夹具，使夹具和探头成通路。探头的外面是拧入式微点式接头（Microdot connector），一个电缆（Microcoaxial，内有双线）联结探头和接口（Feedthrough），接口再与振荡器相连，最终联结显示仪。探头有两个细金属管向晶振片提供冷却水。冷却水管可能与探头内的管道相通或者与探头背面弯管相通。但最后总是要与接口连接。

新的探头，装入晶振片容易，大小合适，电接触好，冷却水正常。然而，反复使用以后，系统会损坏，不能或不正常显示数据，常见原因如下：

- 1) 夹具内或探头的接触弹簧断了或过分折弯，造成断路。
- 2) 探头中与电缆的连线断了，造成断路。
- 3) 探头与接头间的电缆断裂或松动，造成断路。
- 4) 冷却水内矿物太多，使水流不畅，探头过热。

五、电极对晶振片质量的影响

晶振片的电极对膜厚监控至关重要，目前，市场上提供三种标准电极材料：金、银和合金。

金是最广泛使用的传统材料，它具有低接触电阻，高化学稳定性，易于沉积。金最适合于低应力材料，如金，银，铜的膜厚控制。用镀金晶振片监控以上产品，即使频率飘移 1MHz，也没有副作用。然而，金电极不易弯曲，会将应力从膜层转移到石英基片上。转移的压力会使晶振片跳频和严重影响质量和稳定性。

银是接近完美的电极材料，有非常低的接触电阻和优良的塑变性。然而，银容易硫化，硫化后的银接触电阻高，降低晶振片上膜层的牢固性。

银铝合金晶振片最近推出一种新型电极材料，适合高应力膜料的镀膜监控，如 SiO，SiO₂，MgF₂，TiO₂。这些高应力膜层，由于高张力或堆积的引力，经常会使晶振片有不稳定，高应力会使基片变形而导致跳频。

银铝合金通过塑变或流变分散应力，在张力或应力使基体变形前，银铝电极已经释放了这些应力。这使银铝合金晶振片具有更长时间，更稳定的振动。实验室的实验表明镀 SiO₂ 用

六、如何选用最合适的晶振片？

镀膜科技日新月异，对于镀膜工程师来说，如何根据不同的镀膜工艺选择最佳的晶振片确实不易。下面建议供大家参考：

1) 镀低应力膜料时，选择镀金晶振片

最常见的镀膜是镀 Al、Au、Ag、Cu，这些膜层几乎没有应力，在室温下镀膜即可。膜层较软，易划伤，但不会裂开或对基底产生负作用。建议使用镀金晶振片用于上述镀膜，经验证明，可以在镀金晶振片镀 60000 埃金和 50000 埃银的厚度。

2) 使用镀银或银铝合金镀高应力膜层

Ni、Cr、Mo、Zr、Ni-Cr、Ti、不锈钢这些材料容易产生高应力，膜层容易从晶体基片上剥落或裂开，以致出现速率的突然跳跃或一系列速率的突然不规则正负变动。有时，这些情况可以容忍，但在一些情况下，会对蒸发源的功率控制有不良作用。

3) 使用银铝合金晶振片镀介质光学膜

MgF₂、SiO₂、Al₂O₃、TiO₂膜料由于良好的光学透明区域或折射率特性，被广泛用于光学镀膜，但这些膜料也是最难监控的，只有基底温度大于 200 度时，这些膜层才会与基底有非常良好的结合力，所以当这些膜料镀在水冷的基底晶振片上，在膜层凝结过程会产生巨大的应力，容易使晶振片在 1000 埃以内就回失效。

这时候，选用合金晶振片将是最好的选择，将大大减少调频机会。实验室显示，使用合金晶振片监视氟化镁，有效寿命比镀金的长 100%。如果把冷却水的温度从 20 度提高到 50 度，晶振片的寿命更可以再延长一倍。

2.保持晶振片的清洁。不要让镀膜材料的粉末接触晶振片的前后中心位置。任何晶体和夹具之间的颗粒或灰层将影响电子接触，而且会产生应力点，从而改变晶体振动的模式。

3.晶振座经过多次镀膜后其表面会沉积较厚的膜，如果不将其除去，由于离子轰击产生的反溅射会影响晶振片的测试精度。可以先用喷砂或用打砂纸方法将膜层除去，之后用酒精浸泡5分钟左右，如果能用超声波振荡清洗一下，效果会更好，最后再将其放入110℃烤箱中烘烤15分钟，即可使用。

4.保持足够的冷却水使晶振头温度在20-50度。如果可以将温度误差保持在1-2度范围内，效果更佳。

八.晶振片使用维护

晶振片要不要换主要看以下方面：

1.ACT大小，一般以大于400为标准；

2.Life大小，分增加与减小情况且与所镀产品有关，使用寿命是否到了，一般的使用寿命从99%左右用到90-92%就该换了；

3.Rate DEV大于10%左右就要换，蒸发速率出现明显异常，此时也该换；

4.表面质量，晶振片的表面明显出现膜脱落或起皮的现象也要换。

5.晶振片的灵敏度随着质量的增加而降低，这样在使用石英晶体监控法（晶控法）进行镀膜控制时会导致随着晶振片的Life降低而出现镀膜曲线向长波偏移之现象。原因如以下公式得之：

$$\Delta d = \left[\frac{(N_q \cdot D_q)}{\pi \cdot D_f \cdot Z \cdot F_c} \right] \cdot \tan^{-1} \left[Z \cdot \tan \left(\frac{\pi \cdot (F_q - F_c)}{F_q} \right) \right]$$

Δd : Film thickness, In angstroms ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) [薄膜厚度, 单位埃(\AA)]

N_q : Frequency constant for at cut crystal, $1.668 \times 10^{13} \text{ Hz} \cdot \text{Ang}$. [A_t 切割晶体频率常数,

1.668×10^{13} 赫兹. 埃($\text{Hz} \cdot \text{\AA}$)]

D_q : Density of quartz 2.648 g/cm^3 [石英密度, 2.648 gm/cm^3]

π : the constant Pi, 3.14159265 [π ---常数, 3.14159265358979324]

D_f : Density of film material in g/cm^3 [膜材密度, 单位 gm/cm^3]

Z : Z-factor of material, is the square root of the ratio $[(d_q \cdot u_q) / (d_f \cdot u_f)]$

d_q and d_f are the density and u_q and u_f are the shear moduli of quartz and the film, respectively. These values are available in several materials handbooks. [材料Z系数]

Fq:Frequency of sensor crystal prior to depositing film material on it. This value is a manufacturing controlled constant. [欲镀膜的石英晶体的频率, 该值可由制造控制]

Fc:Frequency of loaded sensor crystal[已镀的晶体频率]

九.晶振片的回收利用

用过的晶振片可以重新利用, 主要方法有两种:

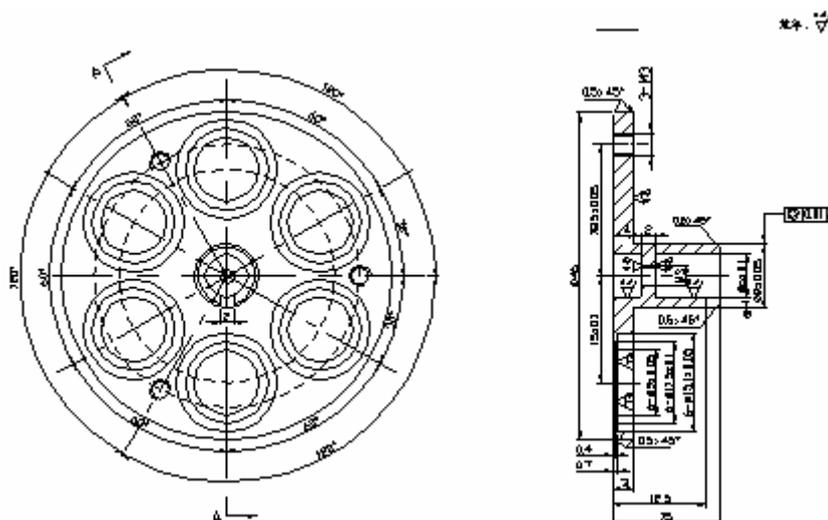
- 1) 彻底除去晶振片上的膜层和电极, 重新邮回厂家镀上电极。
- 2) 利用金电极不溶于硫酸等强酸的特点, 客户自行处理, 将晶振片上的膜层除去部分, 重新利用。

目前, 国内大部分的客户对用完的晶振片自己处理, 以节省成本。但使用再处理晶振片时注意以下事项:

- 1) 银铝合金溶于各种酸, 不适合再处理。
- 2) 酸祛除晶振片膜层时, 必然对基底或外观有一定影响, 初始频率也会改变, 放入晶控仪中会发现初始读数改变或显示寿命降低, 这些不会影响晶振片的基本功能, 但晶振片的寿命会大大降低。

晶振片清洗配方: 20%氟化氢铵水溶液, 浸泡 6 小时以上, 浸泡后投入酒精擦拭, 去水即可

十. Inficon IC/5 晶振座图纸



声明: 本文为个人搜集参考相关资料和总结自己工作中之使用经验整理而成, 仅供与业内人士交流, 请勿做任何商业用途, 多谢!

张玉东

2005 年 11 月 05 日 于中山

E-mail: hackerzyd@163.com