

QCM-D 中的耗散因子 D 能告诉我们什么信息？



在 QCM-D 测量中，耗散因子 D 提供了与频率响应互补的信息，但是如何理解这些信息呢？在本文中，我们将更深入地研究芯片在各种负载下的振荡行为，并仔细研究耗散因子 D 所揭示的信息。

频率和质量之间的线性关系

当芯片表面负载有薄而刚性的薄膜时，振荡频率将降低，这是质量增加的标志。根据 Sauerbrey 关系式，此时的振荡频率（f）的降低与质量或厚度的增加呈线性关系：

$$\Delta m = -C \cdot \frac{\Delta f}{n} \quad (1)$$

其中常数 C 为材料特性，n 为协频数，n = 1 为基频。对于基频为 5 MHz 的石英晶体，常数 C 为 17.7 ng/(cm²·Hz)。

纯弹性薄膜 vs 粘弹性薄膜

薄而刚性的薄膜和石英芯片一样是纯弹性的。当引入粘性组分，表面会形成粘弹性膜或柔性膜，系统中就会产生能量损失。现在让我们来研究一下吸附在石英传感器上的柔性膜，如水合聚合物材料在水相中的振荡行为。图 1A-B 是振荡频率 f 和能量耗散因子 D 随薄膜厚度变化的函数。对于非常薄的薄膜（几纳米）， f 和 D 的响应都很小，且呈线性变化，Sauerbrey 方程(eq. 1)仍能很好地描述该系统。随着厚度的增加（图 1 A-B）， f 和 D 的变化进入非线性状态，且耗散因子 D 响应变得更为显著。

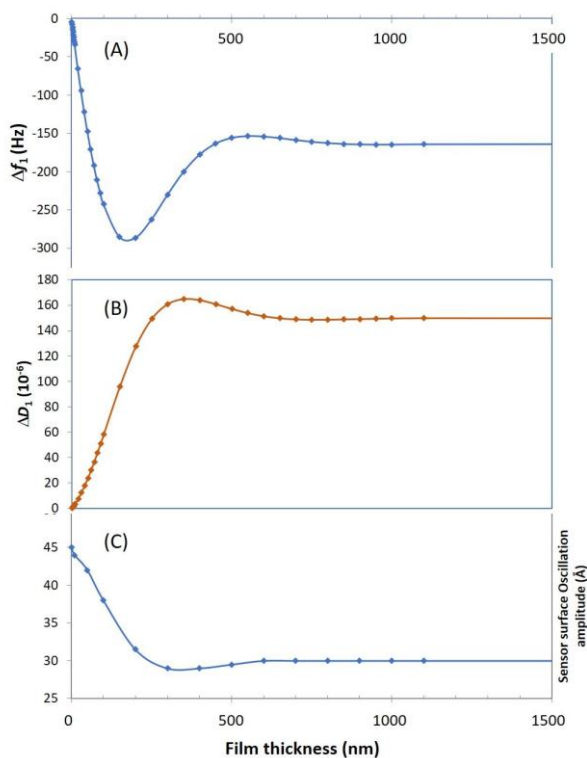


图 1: 在 $n = 1$ 时，拟合的 QCM-D 响应随薄膜厚度变化的函数。频率 f (图(A))、耗散因子 D (图(B))及传感器最大振幅 (图(C)) 随吸附层厚度的变化函数。

耗散因子 D 量化了振荡运动的衰减

当吸附层是刚性薄膜时，它会和传感器表面的振荡运动完美耦合。而当吸附层是柔性膜时，振荡所引起的粘弹性剪切波在薄膜中传播时会产生延迟运动。剪切波的这种传播以及薄膜的柔性将对振荡运动产生阻尼作用，由此引起的能量损耗可通过耗散因子 D 对其进行量化。

声波的叠加会影响传感器的振幅

由于声波在薄膜-液面界面处的反射，在入射波和反射波之间可能存在正叠加或负叠加。图 1C 为传感器振荡幅度与薄膜厚度的关系图。

在与 D 的峰值重合处，传感器表面的振荡幅度从减小变为增大趋势。由于声波的叠加，传感器表面所经历的运动阻力可以被放大或者减少。剪切阻力越小，振荡幅值越大，能量耗散系数越低。由于降低了所承受的质量负荷，负剪切阻力效应会同时减小共振频率。如图 1A 中 f 在 150 至 500 nm 之间的厚度，以及图 1B 中 D 在 350 至 650 nm 之间时厚度，就是由于上述声波叠加引起的变化。

需要注意的是，图 1A 中频率 (f) 的最小值与图 1B 中耗散 (D) 的最大斜率重合，而耗散因子 (D) 的最大值与频率 (f) 的最大向上斜率重合。后者对应于在入射声波和反射声剪切波之间具有最大反相的情况，此时得到最大的能量损失，即得到最大的 D 值。而在前者对应的时点，则是质量最大，且能量损失的导数最大。

结束语

因此，很明显， f 和 D 的形状会以不同的方式描述粘弹性情况。如图 2 所示，当绘制 $\Delta f / \Delta D$ 的函数图时，可以更为清楚地看到，在某些情况下不可能仅从 f 得出正确的结论。例如， ΔD 为 $149 \cdot 10^{-6}$ 时，则它可以对应三个不同的 Δf 值-155, -161 和-263 Hz。

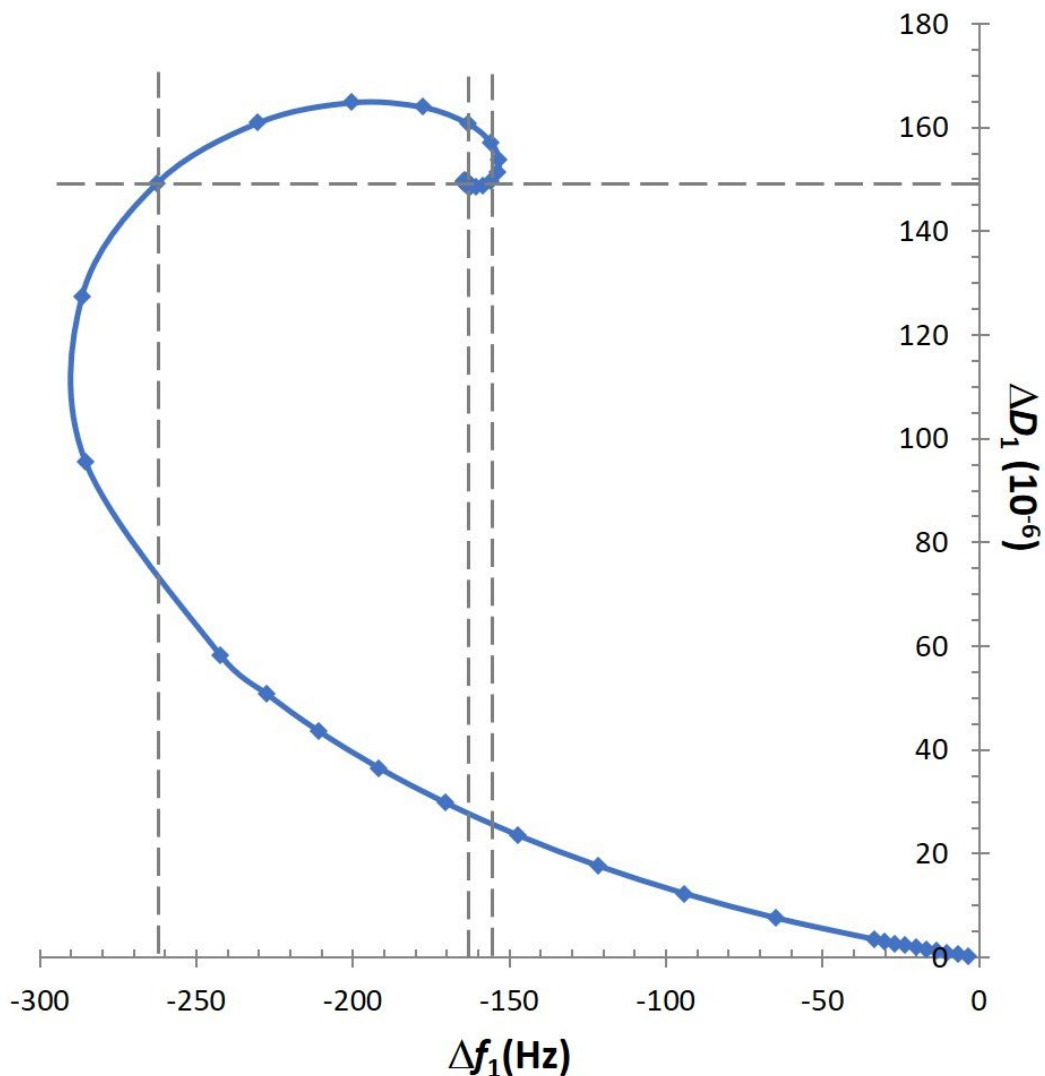


图 2. 当 $n = 1$ 时，以 Δf 对 ΔD 作图，拟合 QCM-D 的响应随薄膜厚度的变化函数。图中所示，对于粘弹性薄膜， f : s 和 D : s 可以是非唯一的。例如，在该图中， $\Delta D = 149 \cdot 10^{-6}$ 对应于三个不同的 Δf 值-155, -161 和-263 Hz。



Biolin Scientific
瑞 典 百 欧 林

瑞典百欧林科技有限公司，佰奥林（上海）贸易有限公司
上海市浦东新区祖冲之路2290弄展想广场1号1205室
电话: +86 21 68370071/72, 传真: +86 21 68370073
www.biolinchina.com www.biolinscientific.com

可下载以下 pdf 文本，供以后使用。

参考文献:

G. Ohlsson and B. Kasemo, in manuscript