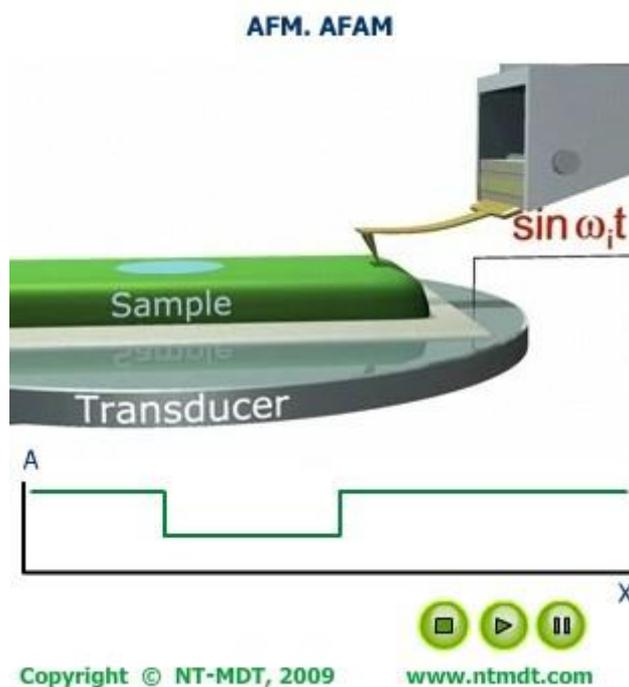


## NT-MDT 原子力声学显微镜（超声原子力显微镜）-AFAM 介绍

### 一. 什么是原子力声学显微镜

原子力声学显微镜是基于福朗霍夫非破坏性测量研究所(Saarbrücken, Germany) Walter Arnold 教授的工作研制的。Hirsekorn 等精辟地描述了常规的 AFM 与 AFAM 之间的差别。在常规 AFM 中，当扫描材料表面时，悬臂（cantilever）振动，样品和仪器顶端产生力。而在 AFAM 中，一个声学调制器被放在样品的下面，产生垂直和水平的振动。系统利用悬臂产生的屈曲和扭转，基于样品局部的弹性、粘性和摩擦性质产生图象。这种分析类型叫做接触共振光谱学（contact resonance spectroscopy），并同时产生拓扑结构光谱和 AFAM 图象。NT-MDT 网站上有动画来解释真实的实验以及衍生出来的图象和测量结果。



<http://www.ntmdt.com/spm-principles/view/afam>

<http://www.ntmdt.com/spm-principles/view/afam-resonance-spectroscopy>

将仪器的先端（tip）靠近样品的表面，样品就受到一个压电转换器产生的声学作用。连在同步放大器上的四组光电二极管就会分析悬臂的运动。这个运动依赖于先端和样品接触的硬度系数以及接触半径，这两者都是样品和先端的杨氏模量、先端半径以及先端负载力矩

(the load exerted by the tip) 和表面的几何尺寸的函数。应用一个夹紧的弹簧的 Hertz 模型可得到接触硬度系数  $k^*$ 。通过测量参考品及未知样品的  $k^*$  可计算出杨氏模量及齿痕模量。垂直的和侧面的弹力、粘力及摩擦力与距离的关系是非线性的。但是, 如果先端与样品之间的振动足够小, 他们之间的关系可近似为线性, 杨氏模量就可以以几十纳米的分辨率计算出来。

另外, 原子力声学显微镜的结果通过一定的数值计算是可以得到样品的硬度及杨氏模量数值。NT-MDT 的独特的原子力声学的算法也正是基于 Walter Arnold 教授。(With AFAM it is possible to perform numerical calculations of hardness and Young's modulus. This unique opportunity is included in the software as an option based on the theory of Prof. Walter Arnold.)

2009年10月份, Walter Arnold 受到中科院声学所的邀请, 期间专门介绍了原子力声学显微镜。他通过一些实验结果展示了应用这一技术可以对检测的样品进行高分辨率成像, 并且还可以应用不同振动模式的特点识别材料的衰减、杨氏模量及压电材料的结构等。

Walter Arnold 声学所报告: [http://www.ioa.cas.cn/xwzx/zhxw/200910/t20091014\\_2551114.html](http://www.ioa.cas.cn/xwzx/zhxw/200910/t20091014_2551114.html)

## 二. 原子力声学显微镜的应用

在迅速发展的高聚物、薄膜、纳米技术及高级材料领域中, 粘弹力变得越来越重要。各种各样的原子力显微镜 (AFM) 如相位、调制力、脉冲及动态力显微镜皆基于这一性质进行成像, 但用这种方法定量还有一定的困难, 特别是在直接测量杨氏模量时更是如此。原子力声学显微镜 (AFAM) 扫描探针显微镜 (SPM) 家族的新成员提供了一种简单的解决办法, 它使得用其它方法无法测定的薄膜的弹力性质及区分高聚物的不同相等一些长期存在的问题得以解决。

如图 1 所示, AFAM 解决了长期存在的一种聚合相与另一种聚合相难以区分的问题。一种样品是由高密度聚乙烯 (HDPE) 层、低密度聚乙烯 (LDPE) 层以及它们的混合相组成。左边的拓扑图没有给出样品的清晰图象。但是 HDPE 比 LDPE 硬度大, 它产生的 AFAM 信号更亮, 因此 AFAM 不但清晰地展现出这两个区域的区别, 还给出了 HDPE 区域内的精细结构。

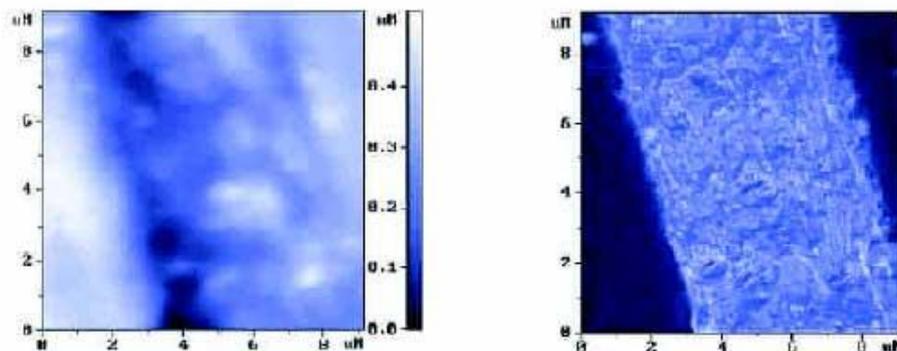


图1: 聚合物不同区域的区分。左: 拓扑图像。右: HDPE区的AFAM图。暗区: LDPE区, 亮区: HDPE区。(样品由芬兰TU/Eindhoven的Joachim Loos提供, 图片由NT-MDT提供)

图 1

AFAM 还可以为其它聚合物的细微结构成像。图 2 显示了聚乙烯单晶的精细结构。



图2 聚乙烯单晶的精细结构 (图片由 NT-MDT提供)。扫描区域:  $7 \times 7 \mu\text{m}$ 。

图 2

AFAM 是分析柔软材料以及非常硬的材料表面弹性的新技术。如图 3

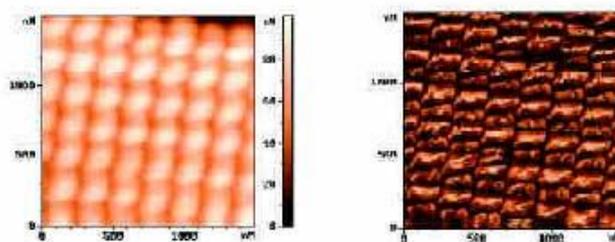
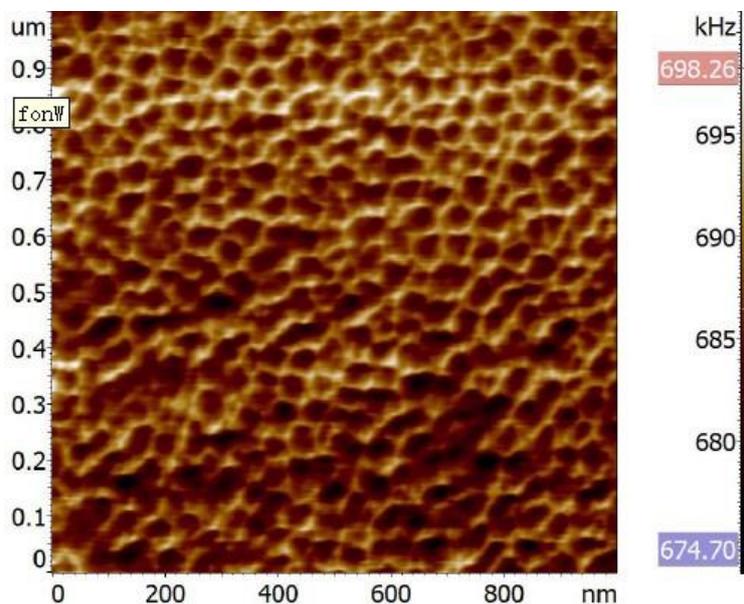


图3: 常规的AFM拓扑图(左)与增加清晰度的AFAM图(右)的对比。物体: 镍材料上的镍铁导磁合金纳米颗粒。(福朗霍夫非破坏性测量研究所提供图片)。

图 3

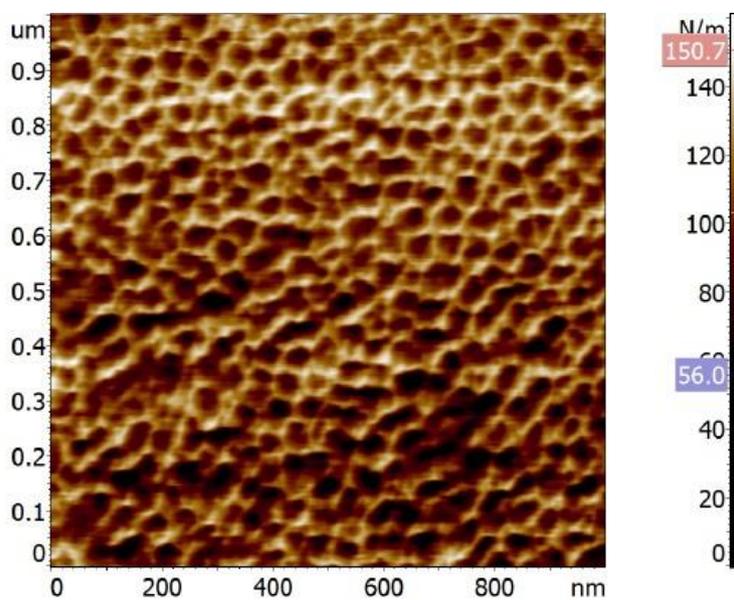
### 三. NT-MDT 原子力声学显微镜是定量表征弹性模量

a.先在超声模式下得到 AFAM Frequency Image



a. AFAM Frequency Image

b.待得到 AFAM Frequency Image 通过软件计算自动转换成 Stiffness Calculation Image



b. Stiffness Calculation Image

需要指出的是 Stiffness 转换成杨氏模量，可以根据下列公式换算：

$$E_s^* = (k_s/k_R)^{3/2} E_R^*$$

$E_s^*$  is the sample Young's modulus,

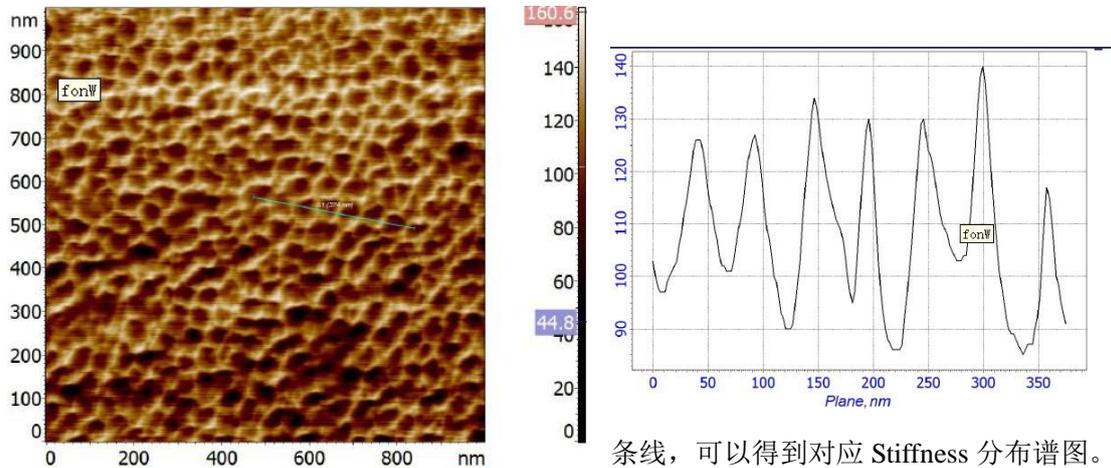
$E_R^*$  is the reference Young's Modulus,

$K_s$  is the contact stiffness of the sample,

$K_R$  is the contact stiffness of the reference sample

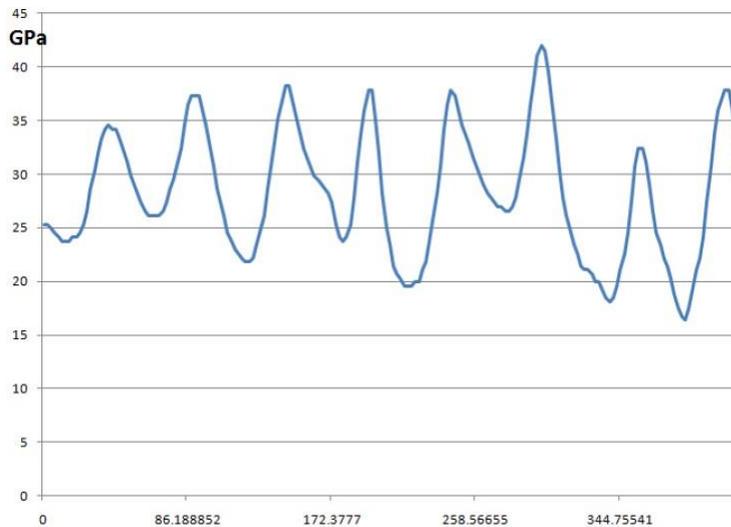
(Reference: Walter Arnold, Atomic Force Microscopy with Lateral Modulation, Applied Scanning Probe Methods, P75,)

c. 在 Stiffness Calculation Image 图像上划一

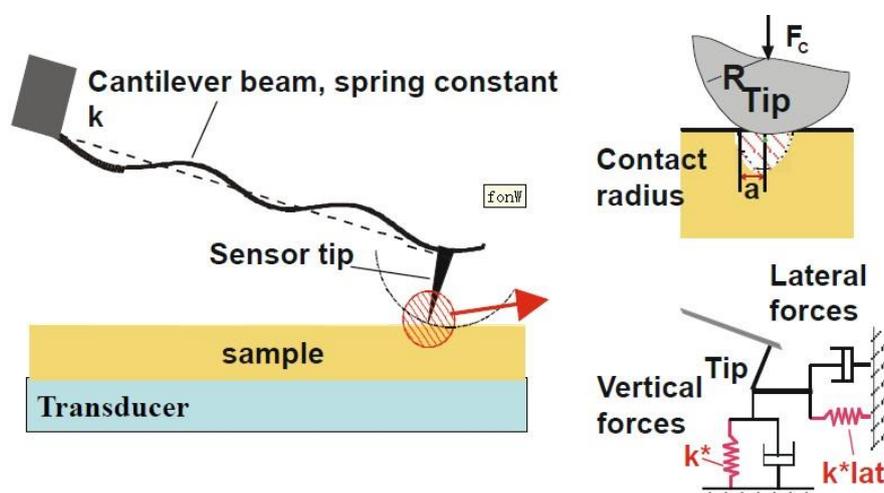


条线，可以得到对应 Stiffness 分布谱图。

d. 通过上述公式计算可以得到杨氏模量的数值。下图样品的在划线区域内的定量的杨氏模量分布谱图（16 to 40 GPa，平均的杨氏模量约为 30 GPa）



NT-MDT 原子力声学显微镜可以定量测量垂直方向及杨氏模量水平方向的剪切模量。弹性模量其实是包含了杨氏模量，剪切力模量，体积模量等等。但是杨氏模量作为最常描述物理刚性的物理量，因此大多情况下把杨氏模量看作是弹性模量了。确切的来说杨氏模量只能反映正交应力（垂直于截面）所带来的弹性模量。而同截面相切（水平方向）的切应力所带来的。由于 AFAM 扫描方式是接触式（DFL 反馈+LF 反馈）而且换能器可以提供垂直方向及水平方向的超声源。因此，探针可以“感知”到垂直方向及水平方向上作用力。因此，AFAM 是可以测量杨氏模量（垂直方向）及剪切模量（水平方向）。而 Peak Force 由于只是在轻敲的扫描方式下工作，故探针只能感知正交力（垂直方向），因此只能探测杨氏模量，而无法探测水平方向的剪切模量。



NT-MDT AFAM 工作结构图

#### 四. 原子力声学显微镜同其他表征技术的优势

AFAM 是不仅可分析柔软材料，还能非常硬的材料表面弹性的新技术。不仅如此，AFAM 可以探测水平及垂直方向的杨氏模量。而其它的 AFM 技术如力调制（force modulation）显微镜或者 Peak Force 等功能则无法做到这些。AFAM 的图象改善了衬度，能显示出其它相图或拓扑图无法显现的精细结构。与纳米压痕（nanoindentation）不同，它的破坏力极小。而且它还可在纳米尺度给出杨氏模量的定量的测量。

更多 NT-MDT AFAM 的应用图片或文献可以浏览以下网址或联系 [jiming@shnti.com](mailto:jiming@shnti.com)!

图片: <http://www.ntmdt.com/scan-gallery?do=search&keywords=AFAM>

文献: <http://www.ntmdt.com/publications?do=search&category=&keywords=Acoustic>