

# NSA 离线软件中文手册

---

NanoScope Analysis 离线软件中文手册

文件格式

分析命令

处理命令

力谱离线分析

时间相关分析

MIRO离线分析

接触共振离线分析

# 文件格式

## 1 介绍

完成AFM成像后，Nanoscope软件会保存图像文件，在文件中记录了原始数据以及所有的相关参数。本章内容会详细讲解文件格式。了解文件格式可以帮助用户更全面的应用AFM数据，包括：

- 了解文件的兼容性，以便在新版软件中处理老版本软件下采集的数据文；
- 进行数据导出。

尤其是后者，很多时候需要将AFM原始数据导出进行专门化的分析和处理，例如将\*.spm文件中的AFM数据导出在Excel中制作表格以对某些部分进行统计分析；或将数据导出利用专业作图软件进行定制化的图像绘制。通常数据导出的步骤是在AFM文件中找到原始数据，并按一定规则进行导出，最后进行处理。这就需要了解整个文件的架构以及相关参数定义。

## 2 文件兼容性

进行软件更新时，布鲁克已经考虑到了兼容性问题。绝大多数新版软件都可以打开旧的数据文件。当然新软件生产的数据文件在旧版本软件上打开时可能会发生错误，需要用新版本的软件打开。

请注意，旧的文件在新版软件上载入并保存时，会以新的文件格式保存下来。所以当需要用新版软件分析旧版数据文件时，最好进行备份。

## 3 数据文件解析

Nanoscope软件会将采集到的AFM图像以二进制文件保存下来，根据图像数据内容的不同，文件大小也会有区别。但无论大小，所有的Nanoscope数据文件都包含两部分：

- 头文件。包含进行数据采集时相关的所有参数以及一些随机数据构成的填充。头文件数据部分以Ctrl-Z符号结束。
- 数据，每个采样点的数据以16位（即两个字节）的二进制补码保存下来。

整个数据如图3.1所示：

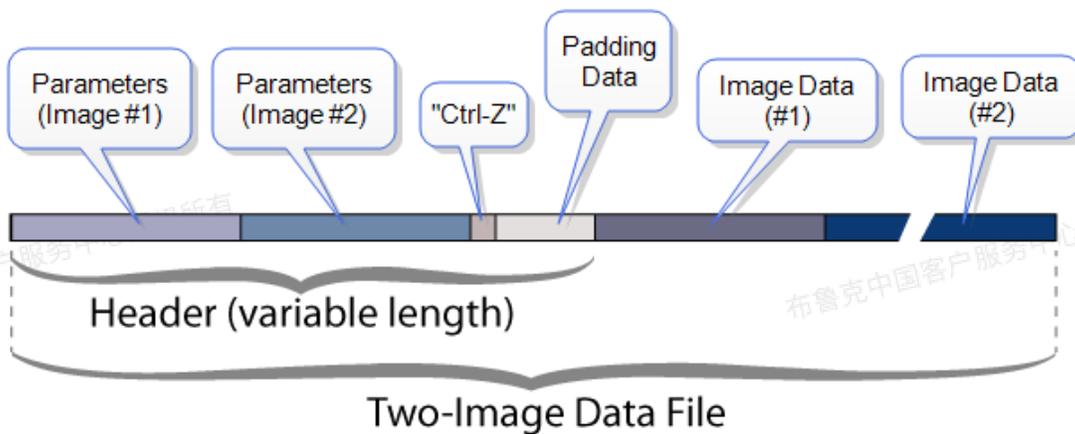
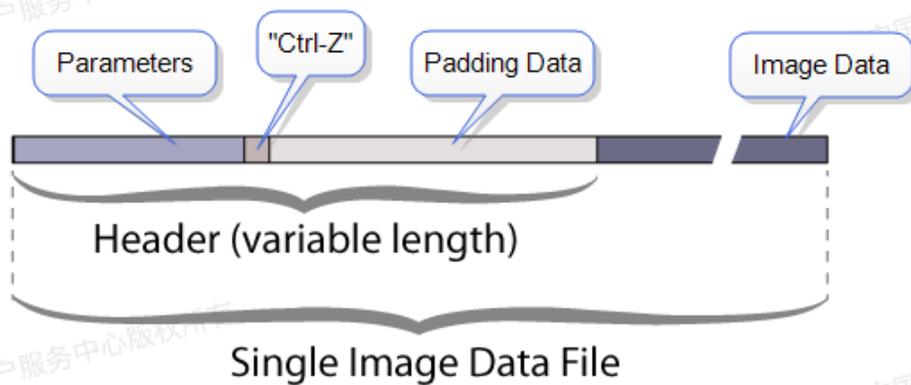


图3.1 单通道和双通道数据文件结构

即数据文件由头文件参数、Ctrl-Z符号、填充和数据按序组成。其中头文件参数和数据部分则按序列出图像中每个通道。头文件参数以一个Ctrl-Z符号（ASCII码值为26）结尾。用户可以搜索这个符号来找到头文件参数的结尾以方便导出所有头文件参数。Ctrl-Z符号之后是一串长度不定的随机数据——填充，目的是为了使头文件大小（由头文件参数中的\Date Length决定）固定。填充数据不包含任何信息。

### 3.1 头文件

每个AFM文件的第一部分是头文件，它会“告诉”分析软件文件中的数据是如何采集的。头文件的大小决定于数据采集时所用到的参数数目。另外，不同版本的Nanoscope软件所生成的头文件大小也会不同，有时其包含的参数甚至会超过2000个。

头文件被分成了一系列单独的列表（每个列表以\\*符号开始）记录这些参数。用户通常只会用到其中一部分参数。常用的参数列在[参数部分](#)以作参考。

头文件对于解析数据非常重要，它能提供用户进行数据导出时所需的参数和设置。

#### 3.1.1 头文件实例

双通道图像文件如图3.1.1.1所示：头文件参数首先列出一系列通用参数，然后列出通道1相关参数，接着是通道2相关参数，Ctrl-Z结尾后是一串填充，最后开始列出通道1数据和通道2数据。

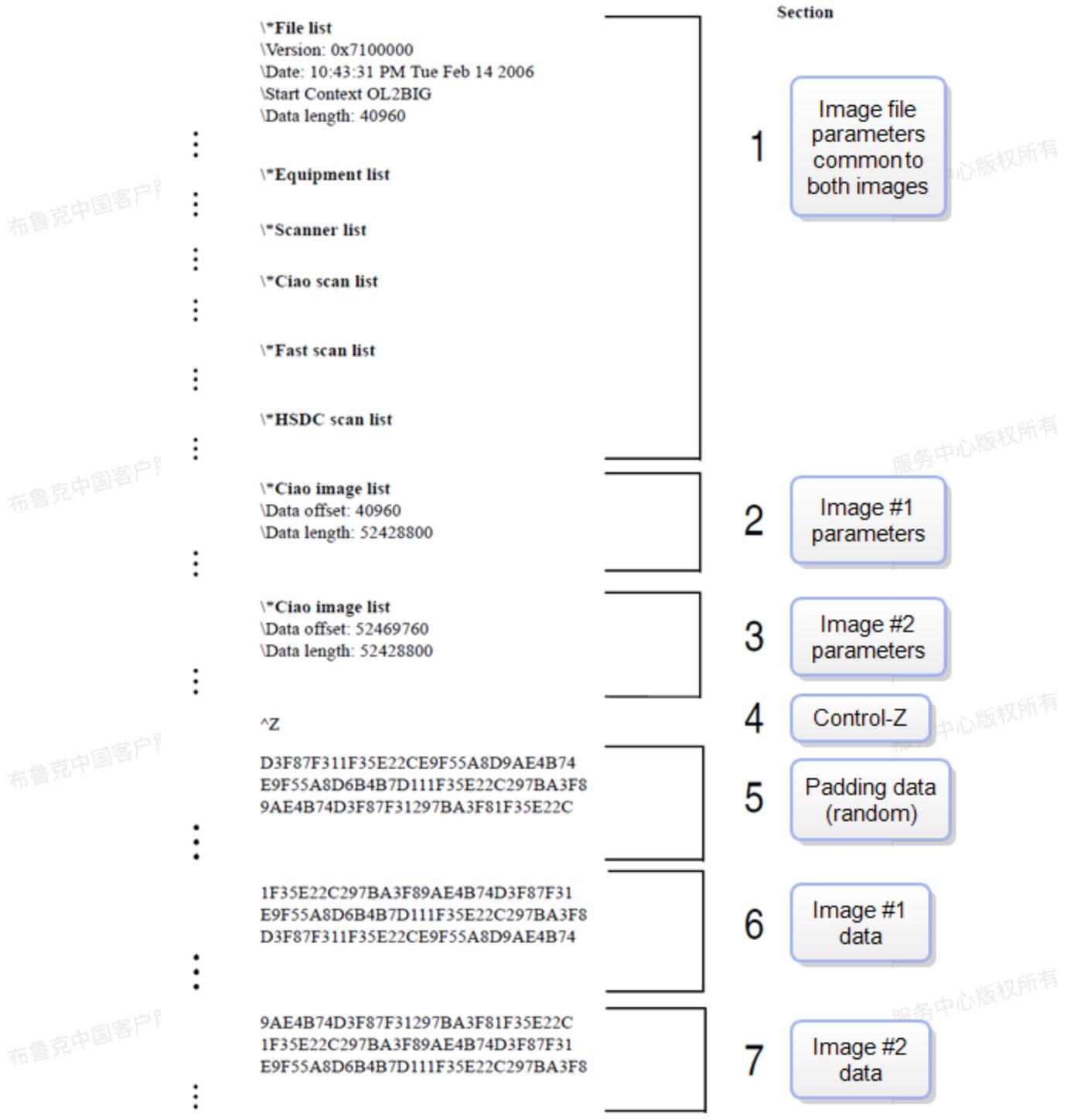


图3.1.1.1 双通道图像文件结构

### 3.1.2 双通道图像头文件描述

图3.1.1.1所示文件包含七个部分，分别为：

- 第一部分，头文件通用参数，适用于所有通道。这部分包含一系列列表，每个列表以“\*”开始。例如，\\*File list系列下的\Data length定义了整个头文件长度，一般为40960。不同的图像类型和Nanoscope软件版本所生成的文件中，这个部分的参数也会不同。

- 第二部分，通道1专用的头文件参数。图中列出两个参数为例：`\Data offset`指出通道1数据从第几个字节开始（例中为40960）；`\Data length`指出通道1数据长度（例中为52428800）。这样`\Data offset`和`\Data length`之和即可指出通道2从第几个字节开始。
- 第三部分，通道2专用的头文件参数。与通道1一样，`\Data offset`指出通道2数据从第几个字节开始（例中为52469760）；`\Data length`指出通道2数据长度（例中为52428800）。
- 第四部分，`Ctrl-Z`符号，指出头文件参数部分的结尾。
- 第五部分，填充。一串随机数使头文件长度等于第一部分中的`\Data length`，即40960。一个图像文件中，通道越多，填充会越短。
- 第六部分，通道1数据。本例中从第40960个字节开始，长度为52428800个字节。图像采样数不同，整个数据长度也会不同。
- 第七部分，通道2数据。本例中从第52469760个字节开始，长度为52428800个字节。该部分的最后一个数据即为整个文件的结尾。

## 3.2 常用参数

根据图像形式和软件版本，头文件中会有数目不等的参数，有时甚至会有数千个。以下列出一些Nanoscope数据文件头文件常见的参数。

表3.2.1 头文件常用参数

头文件参数	描述
<code>\* File list</code>	一系列参数列表以 <code>\*</code> 开始。 <code>\*File list</code> 是头文件参数的第一个参数系列，会记录数据保存时间，软件版本，头文件长度等一些列通用参数
<code>\Version</code>	描述软件版本
<code>\Data length</code>	数据长度。在 <code>\* File list</code> 系列下的该参数描述的是头文件长度
<code>\*Scanner list</code>	记录扫描管的型号和各项参数，即Nanoscope软件中的扫描管文件，Scanner File
<code>\Sens. Zsens</code>	其数值用来描述当前图像文件中扫描管Z部分移动范围，即Z Limit由下式定义：  其中440 V（即± 220 V）为施加在扫描管Z部分电压全范围。
<code>\*Ciao scan list</code>	记录扫描成像模式的各项参数，即Nanoscope软件中Scan界面的各类参数
<code>\Samps/line</code>	每个通道中每行的数据点数目。对应于Nanoscope扫描参数中的Samples/line

头文件参数	描述
\Scan size	扫描范围，即图像宽度或每个扫描线的长度。 对应于Nanoscope扫描参数中的Scan size
\Sens. Deflsens	该数值即为Deflection Sensitivity（请注意，该参数格式与\Sens. Zsens相同，事实上各类系数都会以\Sens.形式开始）
\*Ciao force list	记录Ramp的相关参数。并不只是力曲线，包括所有Ramp操作（IV曲线，电滞回线等）的参数均在这个系列下
\*Ciao image list	记录某成像通道的相关参数
\*Ciao image list	记录某Ramp通道的相关参数
\Data offset	指出文件中数据位置，即相应的数据从整个文件的第几个字节开始
\Data length	指出文件中数据长度。在\*Ciao image list系列下的该参数定义了相应通道数据的长度
\@2:Image Data	指出该通道数据类型
\Z scale	用于数据显示标尺量程的参数，例如Height通道下的\Z scale: 20000 nm，表示Height通道显示在Nanoscope软件时标尺量程为20000 nm。
\Z magnify	用于调整相应通道数据在Nanoscope软件中显示的标尺量程，即对Z scale的一个比例系数。例如这个参数为1.0时，Nanoscope显示相应通道时不做任何修改直接渲染。 这个参数只在Nanoscope软件中 useful，不适合于其它软件。

### 3.3. Ctrl-Z结束符

头文件参数以一个Ctrl-Z符号（ASCII码值为26）结尾。用户可以搜索这个符号来找到头文件参数的结尾以方便导出所有头文件参数。

### 3.4 填充

Ctrl-Z符号之后是一串长度不定的随机数据——填充，目的是为了头文件大小（由头文件参数中的\Date Length决定）固定。填充数据不包含任何信息。

### 3.5 原始数据

数据文件的主体部分。每个采样点的数据以16位（即两个字节）的二进制补码保存下来。则其允许的数字分辨率为32767。

## 4 CIAO参数

数据文件头文件中有些参数以“\@”开头而不是简单“\”，这个符号即是告诉软件相应的参数是CIAO参数（Control Input And Output，输入/输出控制）。有些时候CIAO参数前会在“@”后紧跟一个“:”和一个数字，这个数字被称为“组数”，这个数字不代表明确物理意义，可以忽略。

在组数之后，还有一个字母（“V”，“C”或“S”）用来表示CIAO参数类型：

- V表示数值（Value），该参数是由一个双精度浮点数，一个单位和一个比例系数构成；
- C表示比例（Scale），该参数是一个比例系数。
- S表示选择（Select），该参数描述某些选择关系。

### 4.1 数值CIAO参数

数值CIAO参数格式为：V [软件比例系数] (硬件比例系数) 硬件数值。例如图6.1.1所示。

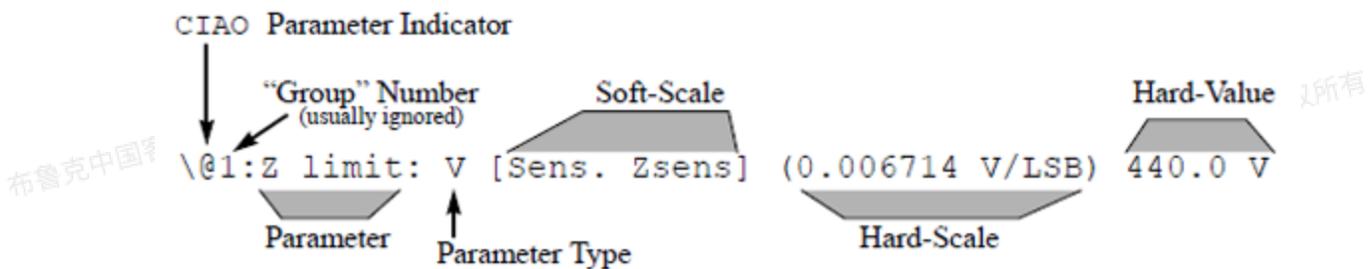


图4.1.1 数值CIAO参数图解

如前所述，Nanoscope是数字化的控制器，数据计算均是以数字化信号进行处理的。最底层的原始数据是一系列16位的二进制数据，表示为LSB倍数。这些二进制数据表示了Nanoscope系统所测定的所有电压和频率信号。

实际AFM系统所测得的信号均以模拟信号表示，即电压或者频率信号（STM中有些信号为电流）。这些模拟信号即是在Nanoscope控制器或者扫描器等部件中实际测得的信号。这些模拟信号数值在数值CIAO参数中以“硬件数值”记录下来。一个数值CIAO参数可能没有“软件比例系数”或“硬件比例系数”，但一定会有“硬件数值”。

“硬件比例系数”即是在Nanoscope控制器中数/模和模/数转换器中的比例系数，将LSB信号转换为“硬件数值”。这个比例系数由硬件系统决定，无法在软件中进行更改。

而我们在软件中读到的数值（通常为具有真实物理意义的数据，具有各自相应的单位）即为对“硬件数值”乘上一个特定的比例系数将其进行转换，这个比例系数即为“软件比例系数”。

我们以悬臂弯曲量为例，悬臂弯曲量由光电检测器测得，测得的原始信号经过光电转换在Ebox中进行运算最终到达Nanoscope控制器中，即为VERTICAL值，这个以电压为单位的VERTICAL即为一个“硬件数值”。VERTICAL会在Nanoscope控制器中进行模/数转换变为二进制数在数字处理器上进行运算，

VERTICAL与其相应的LSB数据转换由“硬件比例系数”实现。我们最终希望检测悬臂弯曲量有多长，完成 Deflection Sensitivity 校准后，即可将VERTICAL值转换为以nm为单位的弯曲量，这里的 DeflectionSensitivity即是一个“软件转换系数”。

请注意：在不同的原子力显微镜系统和软件版本中，“软件转换系数”的命名可能会不同，请真正理解所处理的信号，这样进行数据导出时则更加准确。

## 4.2 比例CIAO参数格式

比例CIAO参数格式为：C [进行比例运算的参数]硬件数值。例如图4.2.1所示。

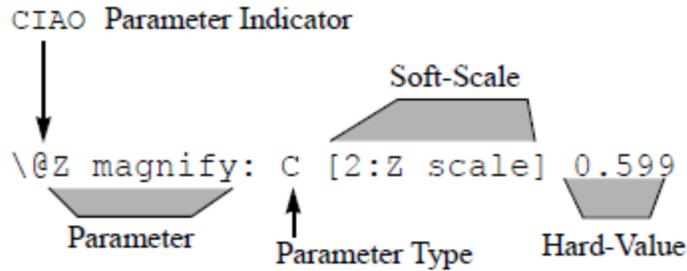


图4.2.1 比例CIAO参数图解

比例CIAO参数具有如下特点：

- 其中的硬件数值通常是一个无量纲量。
- 其中的[进行比例运算的参数]为需要进行比例运算的参数。例如图4.2.1中的Z magnify，就是指这个系数将来要作用到“Z scale”上以对标尺量程进行缩放。
- 比例CIAO参数所用到的参数通常都不会影响数据本身，例如图4.2.1中距离的Z magnify，它只是用于调整Nanoscope Analysis中的高度显示，并不影响高度数据本身。

## 4.3 选择CIAO参数

选择CIAO参数格式为：S [系统内部参数]“软件显示选项”。例如图4.3.1所示。

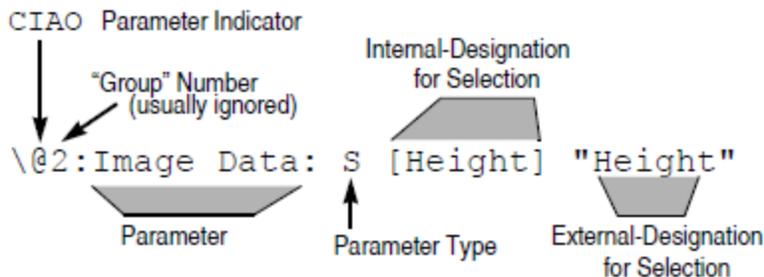


图4.3.1 选择CIAO参数图解

这个参数通常用来描述图像采集时所进行的一些选项数据，例如：

"\@4:HsdCChanDDataType: S [HsdCDataTypeHeight] "Height""

“Height”即为在软件中显示的HSDC数据类型，而在系统内部进行的选择指令为[HsdCDataTypeHeight]。

## 4.4 CIAO参数解释举例——Z Scale

下面我们以Height图像标尺为例来解析如何使用CIAO参数解析原始数据。

参考图4.4.1，找出在Nanoscope软件中保存Height图时所使用的Z标尺量程：

```
\File list
Version: 0x07200000
Date: 06:47:11 PM Fri Apr 20 2007
Start context: OL2BIG
Data length: 40960
\@Sens. Zsens: V 12.50000 nm/V
.
\Ciao scan list
Scan Size: 2000 nm //Scan Size
X Offset: 0 nm
Y Offset: 0 nm
Rotate Ang.: 1.5708
Samps/line: 512 // # Pixels in each image line
Lines: 512 // # of lines
Y disable: Enabled
Aspect Ratio: 1:1
Bidirectional Scan: Disabled
Scan line shift: 0
Scan Rate : 0.498246
.
\Ciao image list
Data offset: 40960 // Offset from file start to binary data for this channel
Data length: 524288 // Length of data in this image channel
Bytes/pixel: 2
.
\@Z magnify: C [2:Z scale] 0.5987848
\@2:Z scale: V [Sens. Zsens] (0.006713765 V/LSB) 5.344157 V
\@2:Z offset: V [Sens. Zsens] (0.006713765 V/LSB) -21.60000 V
```

图4.4.1 一个图像文件中的头文件部分

- 找到Height通道对应的\*Ciao image list*参数系列，然后在其中找到Z Scale参数：*\@2: Z scale*。这是一个数值CIAO参数。其中用到的软件比例系数为Sens. Zsens，即扫描管Z部分灵敏度（即扫描管z部分移动驱动电压与其位移的比值。）
- 在\*Scanner list*系列中找到\*@Sens. Zsens*，这也是一个数值CIAO参数，请注意，这个参数中没有“软件比例系数”和“硬件比例系数”均空却，但仍然有扫描管Z部分灵敏度。在组数之后，还有一个字母（“V”，“C”或“S”）用来表示CIAO参数类型。

*\@2: Z scale*中的硬件比例系数（0.006713765 V/LSB）即是该数据保存时Z比例尺量程的最原始数据（整个硬件比例系数即相应模/数转换器的系数）。为减小进行软件运算时由于数据四舍五入导致的误差，软件存储该数据时直接使用扫描管Z部分灵敏度（Sens. Zsens）将Z比例尺量程转换为了这里的硬件数值5.344157 V，并将其存储在头文件中。同时，在数字系统中处理该数据时直接用16位数全程（即65536 LSB或者16位每个数字为1的二进制数）记录该数据。

也就是说，我们利用软件强行提高了模/数转换器的灵敏度，根据硬件数值，我们可以计算出软件改进后的硬件比例系数为：

$$\text{Corrected hard scale} = \frac{\text{hardvalue}}{65536} = \frac{5.344157 V}{65536} = 0.00008154536 V/(LSB)$$

在高度图像中的Z比例尺量程为：

$$Z \text{ Scale} = 5.344157 \text{ V} \times 12.50000 \text{ nm/V} = 66.80 \text{ nm}$$

我们发现\Ciao image list中还有一个参数\@Z magnify，表示在Nanoscope软件中保存Height图像时还对Z比例尺进行了修改，即存储图像时真正的比例尺量程为 $66.80 \times 0.5987848 = 40.00 \text{ nm}$ 。

在新的Nanoscope软件版本中（9.0及其之后的版本），Z Scale参数进行了简化，例如图4.4.2中，

```
"\?File list"  
"\Version: 0x09010300"  
"\Date: 05:48:58 PM Fri Jan 15 2016"  
"\Start context: OL2BIG"  
"\Data length: 80960"  
"\Text: "  
"\History: "  
  
"\Tip x width correction factor sigma: 1"  
"\Tip y width correction factor sigma: 1"  
"\@2:Image Data: S [ZSensor] "Height Sensor"  
"\@Z magnify: 0.876375"  
"\@2:Z scale: 39.9374 nm"  
"\@2:Z offset: V [Sens. ZsensSens] (0.0000000000557798 V/LSB) 0.000000 V"
```

图4.4.2 一个9.0版本图像文件中的头文件部分

Z scale直接以带对应单位的实际数值形式给出，无需再进行任何计算。

## 5 原始数据导出

### 5.1 介绍

Nanoscope数据可以导出给第三方软件进行图像处理或者数据统计，这里描述大概的操作过程。

#### 5.1.1 导出原始数据进行图像处理

Nanoscope数据可以导出给第三方图像处理软件（例如Photoshop，CorelDraw等）进行图像处理：

1. 将数据导出成TIFF格式。在Nanoscope Analysis软件数据浏览窗口中选中等待转化文件，点击鼠标右键，在右键菜单中选择Export > Tiff > 8-bit Color（也可以选择8-bit Gray Scale或者16-bit Gray Scale）。
2. 在第三方软件中载入导出的图像文件。
3. 在第三方软件中进行处理。例如进行裁剪、过滤、调整对比度、亮度等。

## 5.1.2 导出原始数据到数据列表

Nanoscope数据可以导出给第三方数据处理软件（例如Excel, Igor Pro, Mathematica等）进行处理：

1. 将数据导出成ASCII格式。在Nanoscope Analysis软件数据浏览窗口中选中待转化文件，点击鼠标右键，在右键菜单中选择Export > ASCII。导出的ASCII格式文件大小可能会比原文件大得多。
2. 从ASCII文件中导出数据部分，并根据头文件参数对数据进行相应换算。
3. 在第三方软件中载入处理过的原始数据
4. 在第三方软件中进行处理。

## 5.2 数据排列形式

数据导出后，通常需要对原始数据进行处理，将其转化为常用的测量单位的数值，然后再导入到第三方软件。

图像文件中左下角的像素点，对应于数据文件中列出的第一个数据点；然后从左至右，依次对应于数据文件中的数据点。完成一行后，再前往其上一行的最左侧数据，依次排列。如图4.2.1所示。



图5.2.1 图像数据点排列方式

利用头文件中的参数，我们可以将数据进行转换和分析。用户需要理解常用参数意义。下面介绍如何利用这些参数进行数据转换。（在现在的软件中导出时已经可以直接导出显示的数据，即直接具有相应物理意义的数值，而不是原始二进制相关数据。但了解相关数据是如何换算的总是有帮助的）

## 5.3 计算像素宽度

XY方向上的像素宽度可以用下式计算：

$$X = \frac{\text{Scan Size}}{\text{Samps/line} - 1}$$
$$Y = \frac{\text{Scan Size}}{\text{Number of lines} - 1}$$

其中，Scan Size可以在\*\Ciao scan list中找到。Samps/line和Number of lines分别为一条扫描线上的采样点数目和扫描线数目，都可以在\*\Ciao scan list中找到。当然我们也可以去相应通道的\*\Ciao image list中找到。

## 5.4 计算原始数据数值

使用现在Nanoscope Analysis软件（1.5及其之后的版本）进行导出时，数据格式可以选择LSB, Native或者Display，如图5.4.1所示，

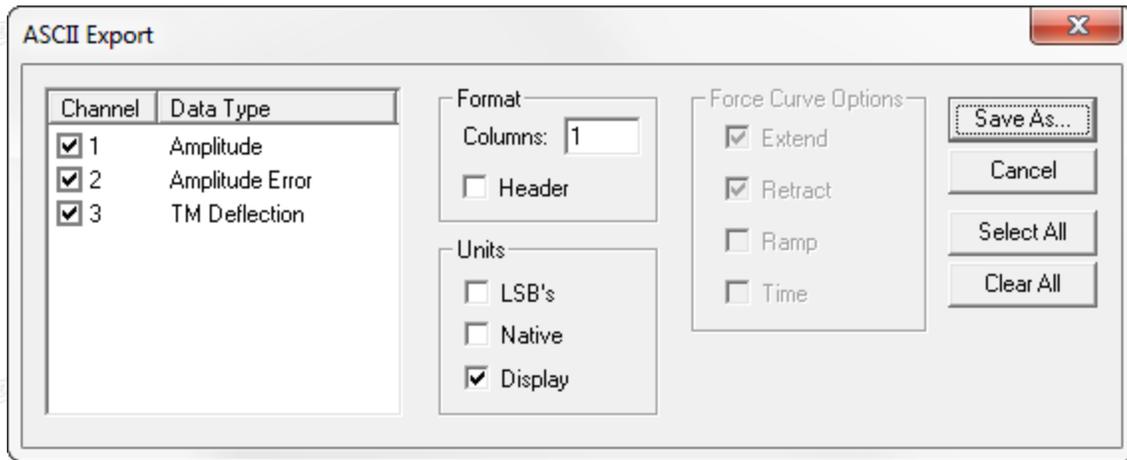


图5.4.1 Nanoscope Analysis进行数据ASCII导出界面

- LSB，即以二进制形式在数字处理器中进行处理的数据，单位为LSB
- Native，即AFM系统电路中进行处理的模拟信号数值，单位通常为V或者Hz
- Display，显示在软件界面上的，具有准确物理意义的各个物理量，单位为相应物理量的单位

例如对于Height Sensor数据，选择LSB即为最原始的二进制形式数据，只在数字处理器界面进行处理；Native，单位为电压，即在AFM系统电路中读到的Sensor信号处理后的电压值；Display，即为实际的Sensor的位移量，单位为nm。

各物理量的运算通常由数值CIAO参数定义。欲计算某通道数据中LSB，Native和Display直接进行换算的系数，即只需在相应通道的\\*Ciao image list中找到\@2:Z offset，在这个参数中即可找到相应的硬件比例数值和软件比例数值名称。

例如，对于Height Sensor通道，

- 我们在Nanoscope Analysis软件中看的它是第一个通道。
- 打开导出的ASCII文件中，在头文件中找到第一个\\*Ciao image list，并在\@2:Image Data确认通道类型的确是Height Sensor。
- 在这个\\*Ciao image list下找到\@2:Z offset，其显示为  
`\@2:Z offset: V [Sens. ZsensSens] (0.000000000557798 V/LSB) 0.000000 V`
- 其中0.000000000557798 V/LSB为硬件比例系数，即：

$$\text{Height Sensor in Native} = 0.000000000557798 \text{ V/LSB} \times \text{Height Sensor in LSB}$$

- \@2:Z offset还告诉我们软件比例系数名称是Sens. ZsensSens，所以我们继续搜索头文件，在\\*Ciao scan list中找到，\@Sens. ZsensSens: V 166.7023 nm/V，那么：

$$\text{Height Sensor in Display} = 166.7023 \text{ nm/V} \times \text{Height Sensor in Native}$$

对于其它通道数值都可以按照相同办法进行。

## 5.5 Ramp数据

使用现在Nanoscope Analysis软件（1.5及其之后的版本）进行Ramp文件的导出时，接近段和回撤段是分开导出的，在导出的ASCII文件中，接近段（以Ex标记）和回撤段（以Rt标记）分成两栏记录。当然我们可以选择部分导出即只导出接近段或只导出回撤段。

导出时，如图5.5.1所示，还可以选择导出时间和Ramp物理量的数据：

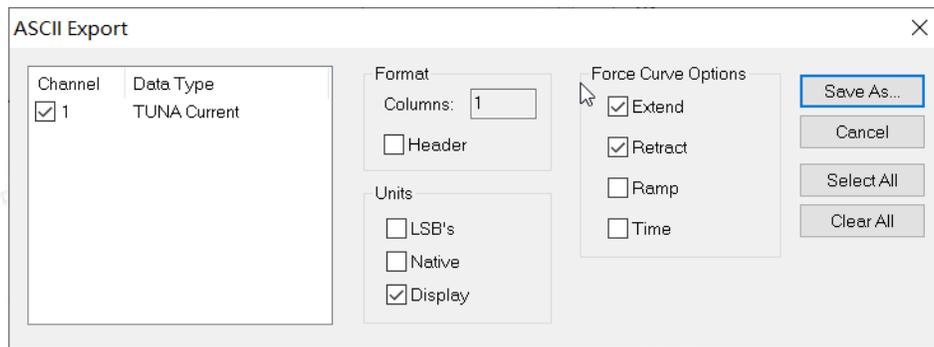


图5.5.1 Ramp数据导出ASCII文件界面

请注意，导出的时间和Ramp物理量并不是实时采集的数据点，而是通过Ramp Rate和Ramp Size，结合采样点数目（即头文件中的Samps/line）计算出来的。

与扫描图像文件相比，Ramp文件的头文件中多了一个叫做\\*Ciao force list系列，它记录了采集Ramp曲线时所用的参数。各个Ramp通道的相关参数记录在\\*Ciao force image list中。文件的头文件参数位于\\*Ciao force list系列中。例如在\\*Ciao force list中能找到\Samps/line中能找到两个数字，分别为回撤段和接近段力曲线中数据点数目（通常是相等的）；还能找到\Scan rate，即Nanoscope中Ramp界面的Ramp Rate。所以据此我们就可以算出导出的时间数据中的间隔：

$$\text{Time Step} = \frac{1/\text{Scan Rate}}{2 * \text{Samps/line}}$$

与图像文件类似，Ramp各通道物理量在相应的\\*Ciao force image list查找，值得注意的是，\\*Ciao force image list中有三个\offset形式的数值CIAO参数，分别为

- o \@4:Z input offset
- o \@4:Volume offset
- o \@4:Ramp offset

前两个对应于相应通道中记录的物理量，而\@4:Ramp offset是被Ramp的物理量，即Nanoscope软件中Ramp Output的选项，例如力曲线中即为Z，扫描管z部分驱动电压。

因此，根据相应数值CIAO参数给出的物理量，我们即可得到LSB，电压值（即Native）和实际值（即Display）的换算关系。例如，对于接触模式下力曲线中的弯曲量Deflection Error通道，

- a. 我们在Nanoscope Analysis软件中看的它是第一个通道。
- b. 打开导出的ASCII文件中，在头文件中找到第一个\\*Ciao force image list，并在\@4:Image Data确认通道类型的确是Deflection Error。
- c. 在这个\\*Ciao image list下找到\@4:Z input offset（或者\@4:Volume offset），其显示为  
 $\backslash@4:Z \text{ input offset: } V [\text{Sens. DeflSens}] (0.0003750000 \text{ V/LSB}) \quad 0 \text{ V}$
- d. 其中0.0003750000 V/LSB为硬件比例系数，即：

$$\text{Deflection Error in Native} = 0.0003750000 \text{ V/LSB} \times \text{Deflection Error in LSB}$$

- a. \@4:Z input offset还告诉我们软件比例系数名称是Sens. DeflSens（即Deflection Sensitivity），所以我们继续搜索头文件，在\\*Ciao scan list中找到，\@Sens. DeflSens: V 53.05307 nm/V，那么：

$$\text{Deflection Error in Display} = 53.05307 \text{ nm/V} \times \text{Deflection Error in Native}$$

当然，Deflection Error in Display有一个我们更喜欢的名字，即力“Force”。

对于其它通道数值都可以按照相同办法进行。

## 5.6 力阵列数据

力阵列数据由两部分构成，第一部分是形貌图，即每一个XY数据点上达到Relative Trigger时的高度（可以是Height，由施加在扫描管z部分电压得到；或者Height Sensor，扫描管z部分传感器直接读得扫描管位置）。紧接着是第二部分，即每一个XY数据点对应的力曲线。

相应得，力阵列数据的头文件也会有相应的变化：

- 在头文件中能同时找到\\*Ciao scan list和\\*Ciao force list分别记录扫描参数和Ramp参数。
- 接着头文件开始记录各通道的参数信息。第一个头文件参数系列为\\*Ciao image list，记录的是进行力阵列成像是XY方向扫描的相关信息。
- 接下来是各个Ramp通道的参数信息，这些与Ramp数据是一样的。
- 对于接触共振数据（包括DCUBE-CR-PFM和AFM-nDMA力阵列数据），在\\*Ciao force list和\\*Ciao image list之间还有一个\\*Probe list记录与悬臂的接触共振性质相关的参数。

与图像文件一样，力阵列图像左下角的数据点对应于数据文件中的第一个数据，从左至右，从下至上，与图5.2.1一致。

力阵列分辨率由以下参数决定：

- \\*Ciao image list中的\Samps/line定义力阵列XY方向上一条扫描线所进行的Ramp次数，即一条扫描线上力曲线数目；\Numbers of lines则定义了扫描线的数目。
- \\*Ciao force list或者\\*Ciao force image list中的\Samps/line定义了力曲线上采样点数目。

实时采集力阵列图像和在Nanoscope Analysis进行分析时看到的力学性质图像，例如FV Modulus等，均是由软件处理得到的，并不会保存在数据文件中。

## 5.6 电化学数据

电化学数据文件结构如下：

1. 头文件：长度为80960字节。记录每个电化学通道的参数，起始位置和长度也在头文件中指定。头文件中会包含图像和电化学数据的相关参数。
2. 图像数据：电化学图像每个采样点数据，每个数据为4字节（9.3之前的版本为2字节）。
3. 电化学数据：电势对时间图，每个数据为2字节。
4. 电化学数据：电流对时间图，每个数据为2字节。

### 5.6.1 头文件

电化学数据中的头文件除了包含扫描参数和各图像通道的参数外，还包含了电化学部分。在头文件中可以找到：

- \\*Universal Potentiostat list：记录电位仪基本信息，位于\\*Fast scan list系列之后。这个系列参数取决于所用的电位仪。如果是在MultiMode 8系统上使用了Universal Potentiostat，则会出现这个参数系列。如果所用的是第三方电位仪，则不会出现。有时在Dimension ICON系统上进行电话学实验

时，会加上Lakeshore控温系统，那么在\\*Fast scan list会出现控温系统的参数系列\\*Temperature Controller list。

- \\*EC Potentio AFM list：记录采集电化学数据使用的参数。如何进行Ramping，采用恒电位还是恒电流等都可以在这个参数系列中找到。
- 
- 在最后一个通道的\Ciao image list系列后，即会列出电化学通道的参数，首先是电势，列在\\*EC AFM plot V vs. T list系列中；然后是电流，列在\\*EC AFM plot I vs. T list。
- 与图像、Ramp和力阵列不同，电化学数据头文件中电势和电流头文件参数中的\Date type都是STM，即电化学数据是以STM形式记录的。

## 5.6.2 数据

与图像、Ramp和力阵列稍有不同，电化学数据的数值CIAO参数并不在相应的\Ciao image list中，而是列在\\*EC Potentio AFM list中，例如：

```
"\@EC Galv Output: V [Sens. ICellSens] (0.0003051758 V/LSB) 0 V"
```

```
"\@2:EC Pot Output: V [Sens. EPotSens] (0.0003051758 V/LSB) 0 V"
```

其中\@EC Galv Output为电流数据；\@2:EC Pot Output为电势数据。

而电流与电势的软件比例系数，Sens. ICellSens和Sens. EPotSens则可以在\Ciao scan list中找到。

以上式中的电流为例：

$$\mathbf{Current\ in\ Native = 0.0003051758\ V/LSB \times Current\ in\ LSB}$$

在\Ciao scan list系列中找到：

```
\@Sens. ICellSens: V 100.0000 ~A/V
```

其中~A/V即为 $\mu\text{A}/\text{V}$ ：

$$\mathbf{Current\ in\ Display = 100.0000\ \mu A/V \times Current\ in\ Native}$$

# 分析命令

## 1 分析功能介绍

分析功能用来对Realtime模式下获得的图像进行材料表面行为的分析。这些命令也被称为图像处理或分析命令。它们包括图像化、分析选项及配置、修改以及结果保存。这些分析可以自动进行（例如在自动化程序中），也可以手动完成。一般来说，这些分析功能提供了定量描述样品表面性质的方法。

分析功能可以在菜单栏中打开，或者在工具栏中点击相应图标打开。这些图标与NanoScope软件中的一致。



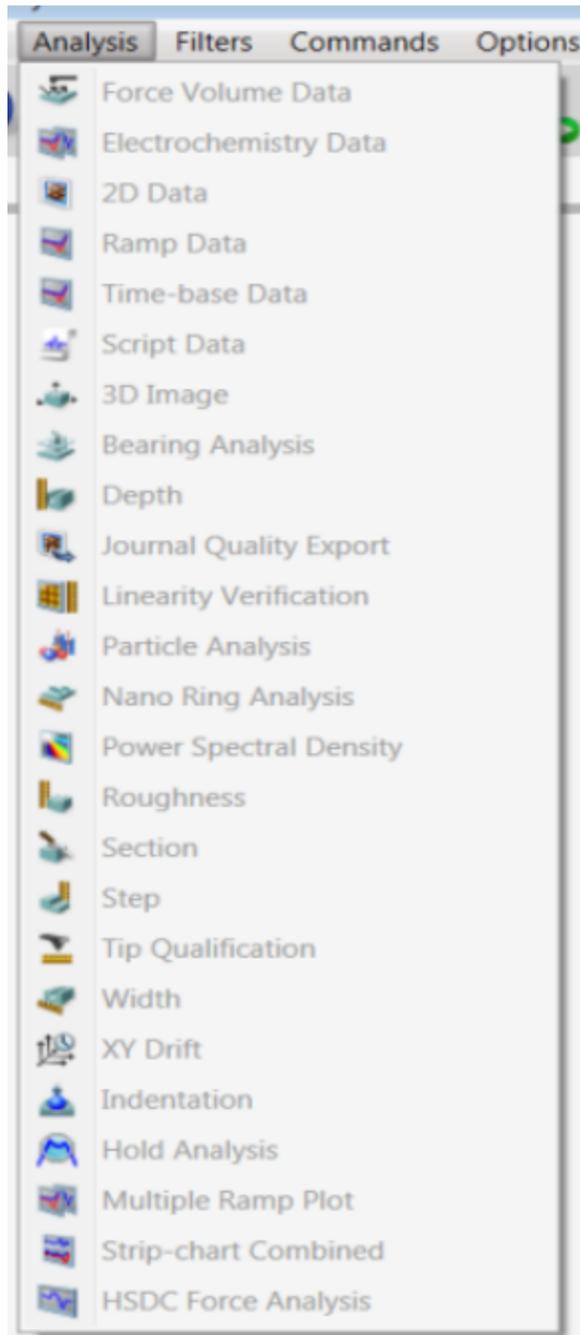


图1.1 分析功能工具栏和菜单栏

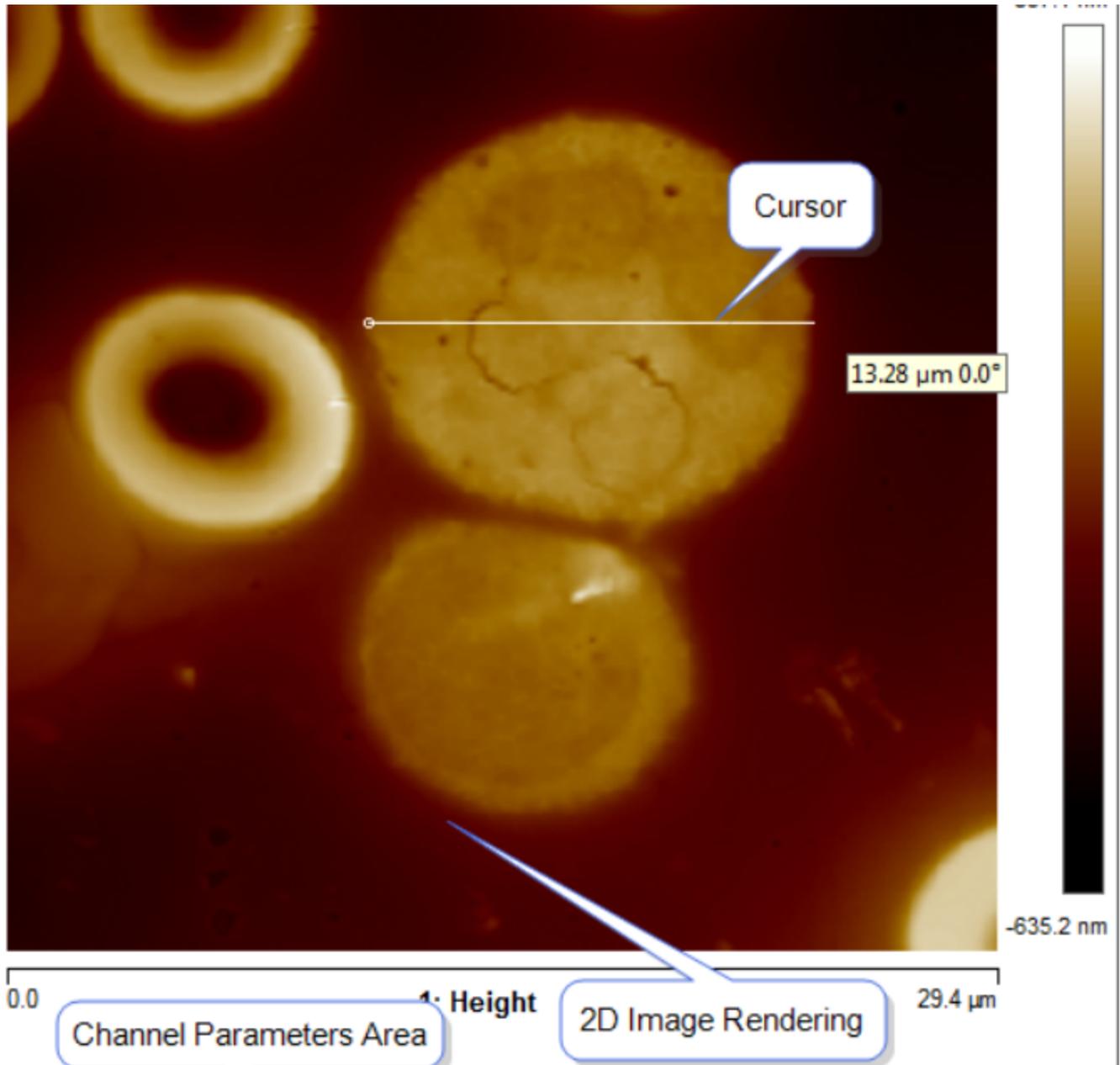
## 2 二维数据 (2D Data)

二维数据分析展示选定图像在二维视角下结果，其高度信息由特定颜色表示。二维数据分析界面是在NanoScope Analysis 打开图像的默认初始界面。

### 2.1 二维数据步骤

1. 在工具菜单中选择Analysis > 2D Data或者在工具栏中点击二维数据图标进入其界面。
2. 图像在二维数据界面中打开，如图2.1 所示。





Channel 1	
Scan Size	29.4 $\mu\text{m}$
Scan Rate	1.66 Hz
Samples/Line	256
Lines	256
Line Direction	Trace -
Data Type	Height
Scan Line	Main
Date	11:20:24 PM Tue Feb 02 1993
Tip Serial Number	
Aspect Ratio	1.00
Capture Direction	
Amplitude Setpoint	0.00 mV
Drive Amplitude	0.00 mV

图2.1 二维数据菜单和界面

3. 在Channel Parameters界面空白处右键单击，然后选择Show All。则Chanel Parameters界面中每个参数左侧会出现一个复选框。用户可以通过勾选或取消勾选这些复选框，决定哪些通道参数显示或隐藏。这也是一个方便的隐藏不常用参数的方法。完成后，在Check Parameters界面空白处右键单击，再次选择Show All，则只有选中的参数会在Check Parameters界面中显示。

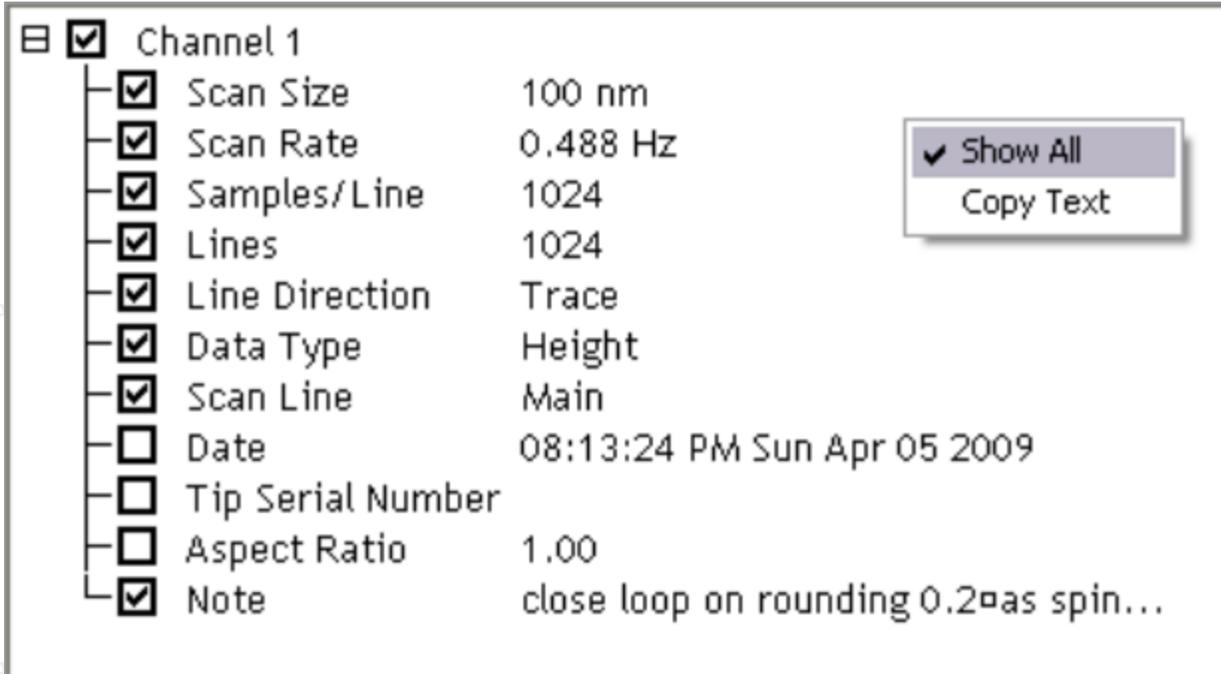


图2.2 Channel Parameters界面隐藏/显示复选框

4. Channel Parameters界面空白处右键单击选择Copy。

5. 如图2.3所示，一个对话框出现，告知用户Channel Parameters中的数据已经被复制到了剪贴板。用户可以将这些数据存在想要的界面。

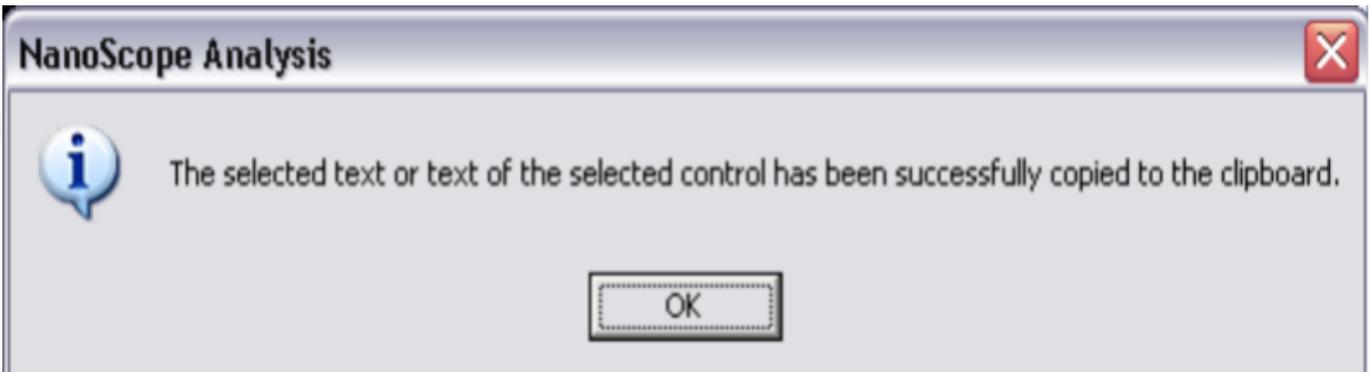


图2.3 对话框提示数据已被复制到粘贴板。

6. 若要进行长度和角度测量，则在图像当中指定区域用鼠标做出选区游标。

7. 当鼠标停在所划选区游标上时，长度和角度测量结果显示在鼠标光斑附近。

8. 做好游标后，用户可以得到更多的长度及角度信息。如图2.4所示，在二维图像界面上点击鼠标右键，选择Tooltip Level > Basic, Medium, Advanced, or None。

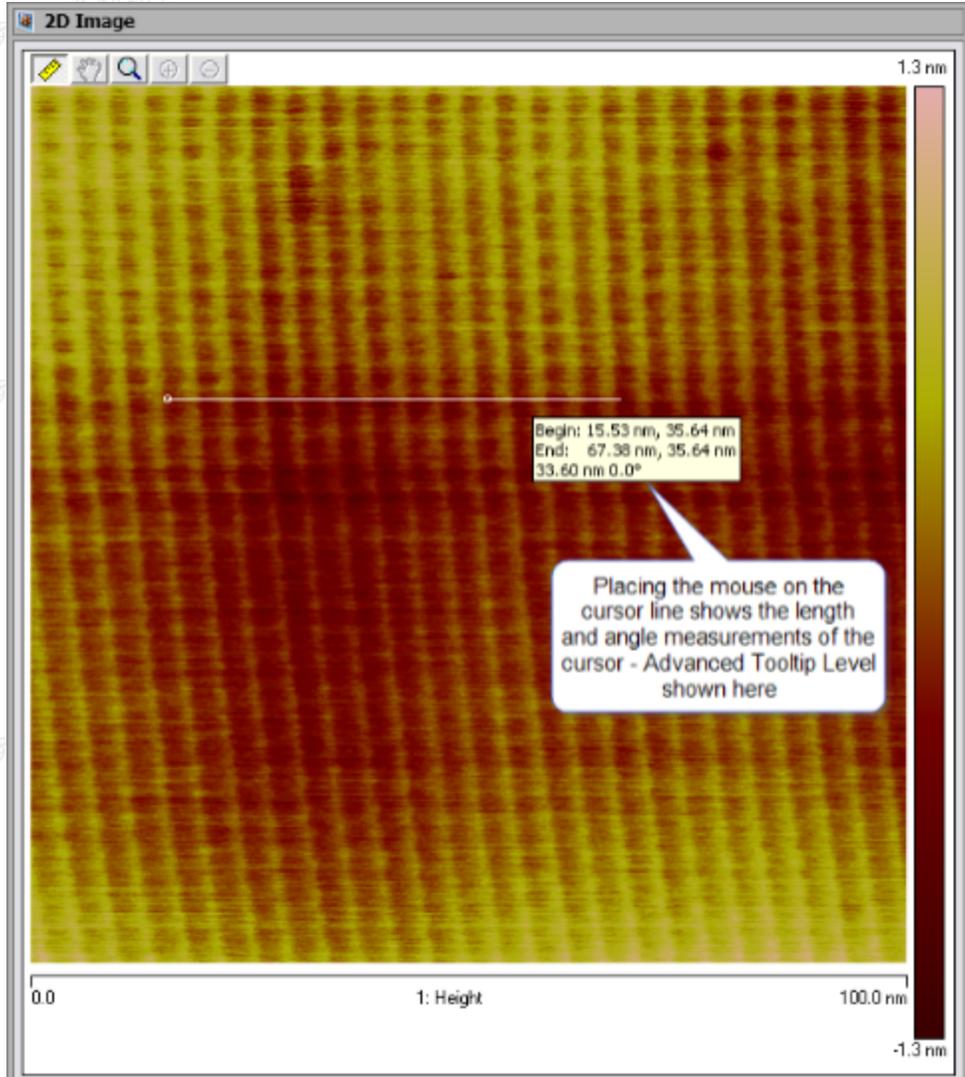


图2.4 游标长度和角度测量。

9. 为导出二维数据结果，右键在图像上单击选择Export > Screen Display，命名，选择路径保存。建议保存图像格式为.bmp，如图2.5所示。

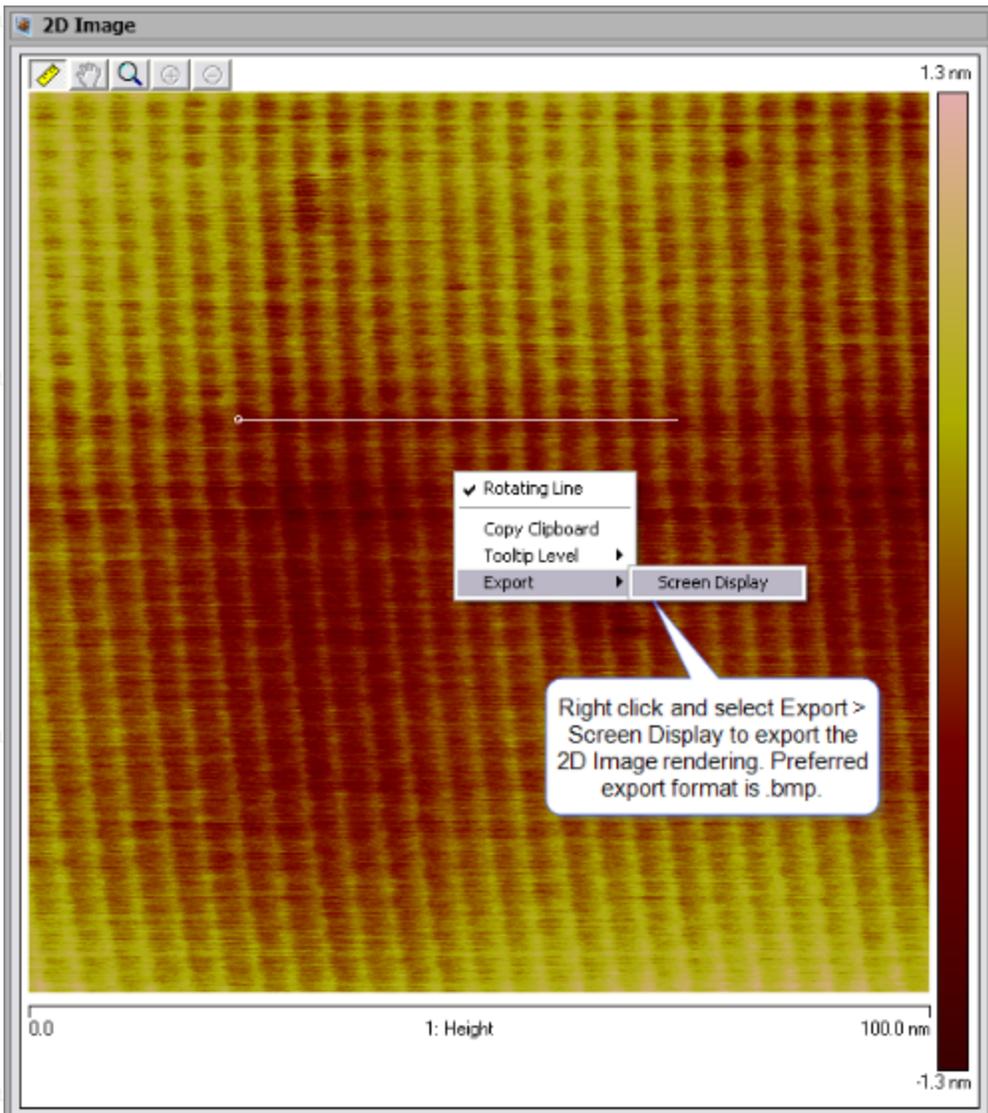


图2.5 导出菜单。

## 2.2 控制参数

表1. 二维图像参数

参数	描述
Scan Size	图像中每条扫描线的长度
Scan Rate	每秒扫描的来回线数目
Samples/Lines	每条扫描线上的取样点数目
Lines	每幅图像包含的扫描线数目
Line Direction	图像采集的线的方向：去（由左至右）或回（由右至左）
Data Type	图像采集时所选通道
Scan Line	图像采集时选用扫描线类型，Main（主扫描）或Interleave（交织扫描）

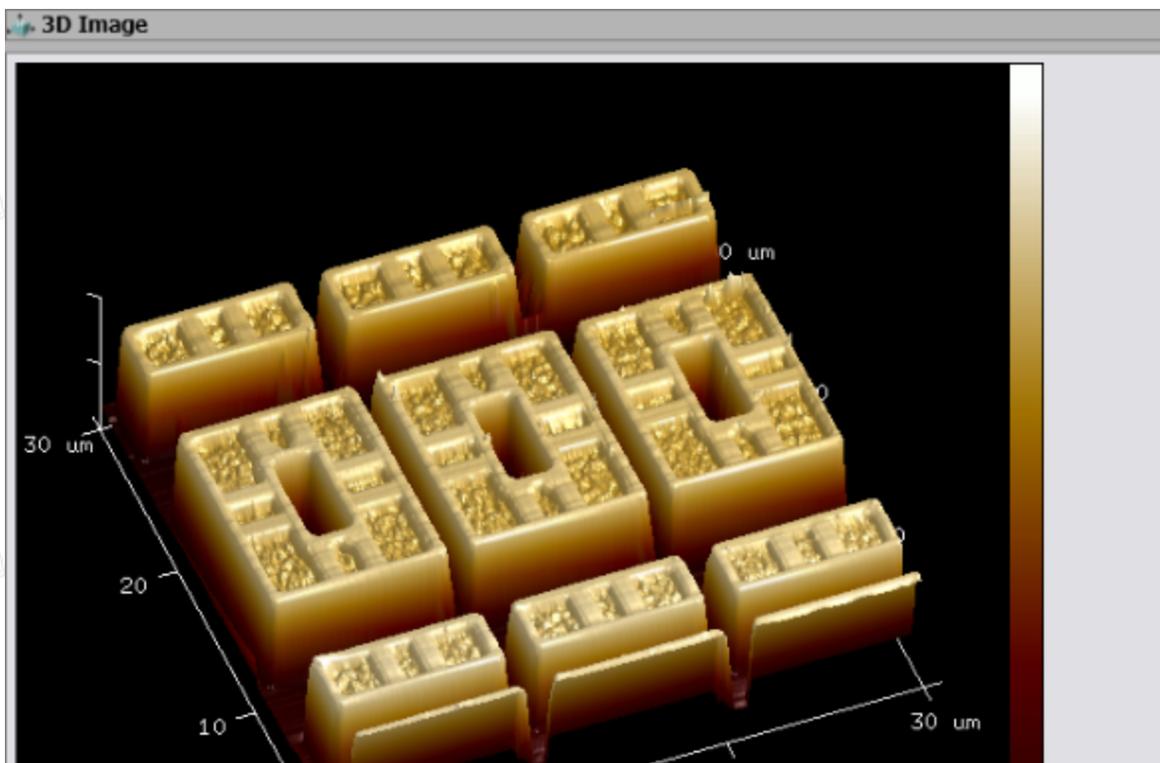
Date	采集日期和时间
Tip Serial Number	探针序列号，须由操作者在采集图像时手动输入
Aspect Ratio	图像高宽比
Note	用户添加的说明或描述

## 3 三维图像 (3D Image)

三维图像展示了所选图像在三维倾斜视角下的结果，其高度信息由特定颜色表示。三维图像允许用户选择观察角度和模拟光源的照射角度。

### 3.1 打开三维图像的步骤

1. 在工具菜单中选择Analysis > 3D Image或者在工具栏中选择三维图像的图标进入三维图像分析。
2. Projection, Plot Type, Skin Type, Label Type, and Background Color等参数可以在相应窗口中点击选中，通过下拉菜单进行调节。其它参数都可以在相应窗口中输入或用鼠标键盘进行改变。
3. 要对图像进行放大或缩小，按住Ctrl键并按住鼠标左键上移或下移。
4. 要平移图像，按住Shift键并按住鼠标左键进行移动。
5. 按住鼠标右键左右移动鼠标可以改变虚拟照明光源的Light Rotation（水平角度）。这个功能只有当Plot Type选为Mixed时才能使用。
6. 按住鼠标右键上下移动鼠标可以改变虚拟照明光源的Light Pitch（Z方向角度）。这个功能只有当Plot Type选为Mixed时才能使用。



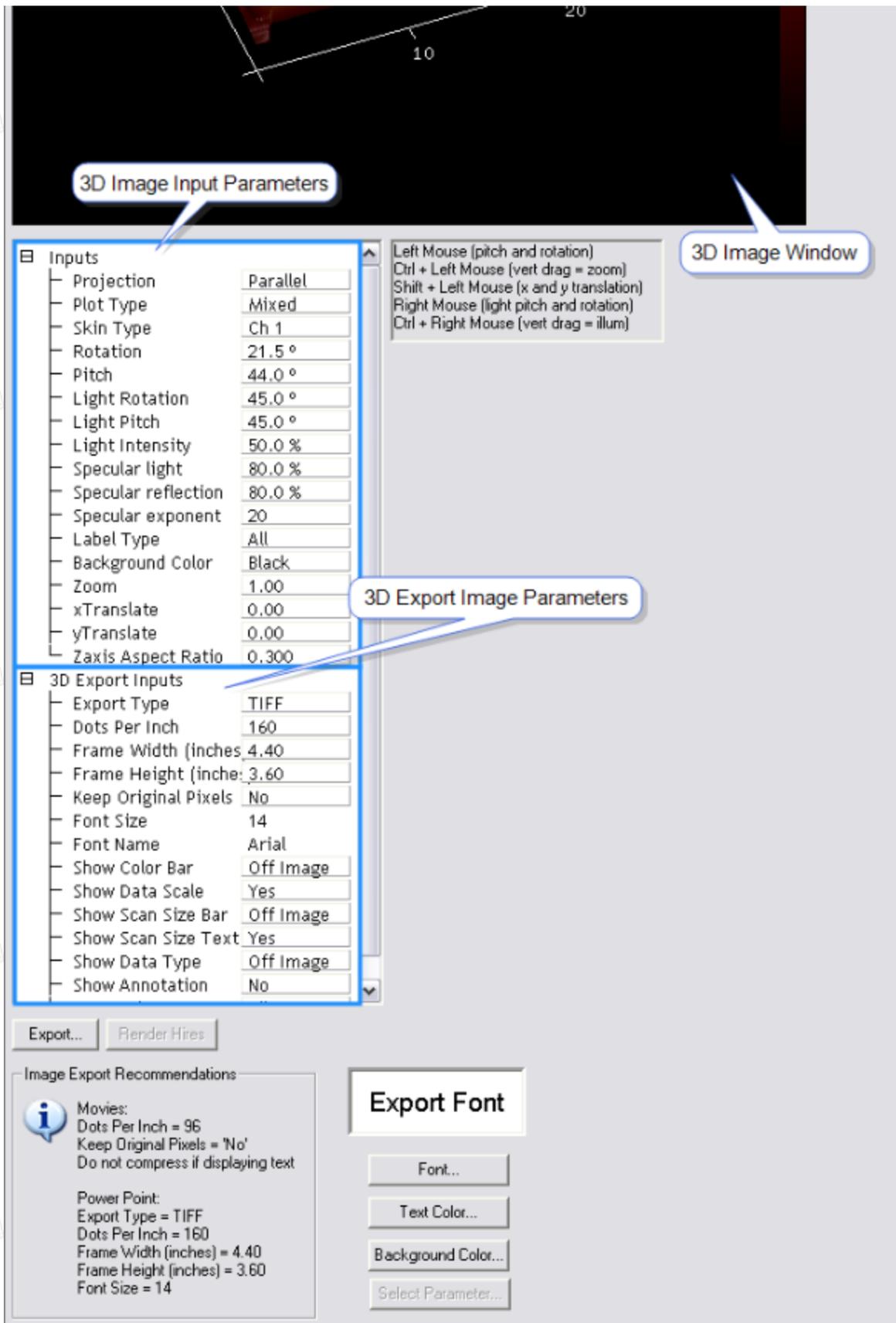


图3.1 三维图像菜单界面

注：V1.30之前版本的NanoScope Analysis只能渲染处理点数/线数小于512的图像。V1.30之后的版本默认可以处理点数/线数不超过2048的图像，若选择Render Hires可以处理更高分辨率的图像。

### 3.2 皮肤类型举例

Skin Type（皮肤类型）可以用来绘制高度图三维图像，而其表面颜色来自于其它的通道。这对于对比表面形貌和性质结果非常有用。下面以SRAM样品的扫描电容显微镜结果为例演示如何使用Skin Type、Color Scale和其它参数。

1. 打开图像后，进入二维数据界面，在左侧标签栏中点击选中想要渲染到三维图表面的通道，更改Color Scale，如这里使用#17色标。

注：该色标中，色标图顶部44.1°所示颜色为紫色，底部-18°为红色。

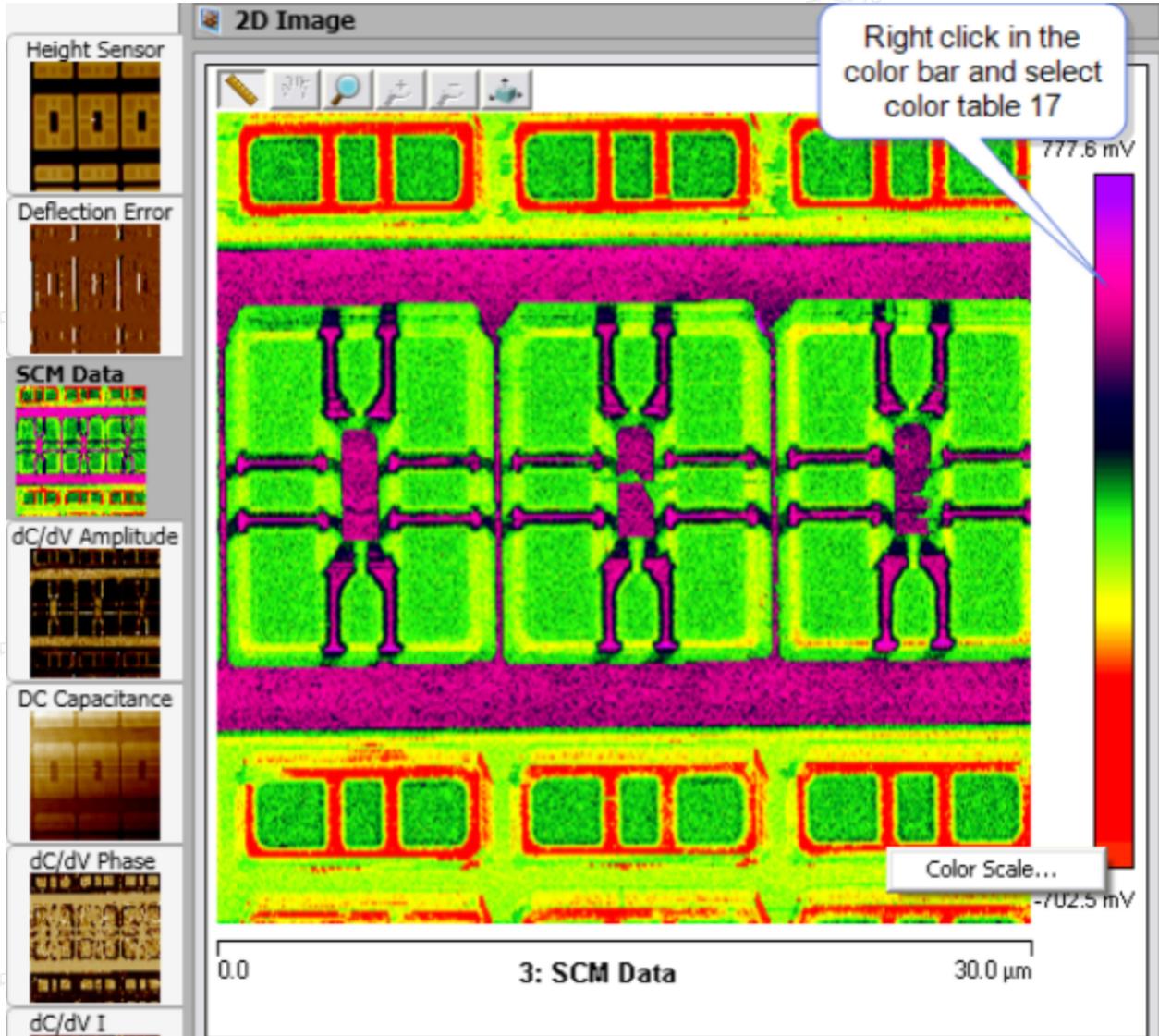


图3.2 以#17色标表示的SCM Data通道

2. 进入三维图像界面，将Projection设为Perspective，Plot Type设为Height。

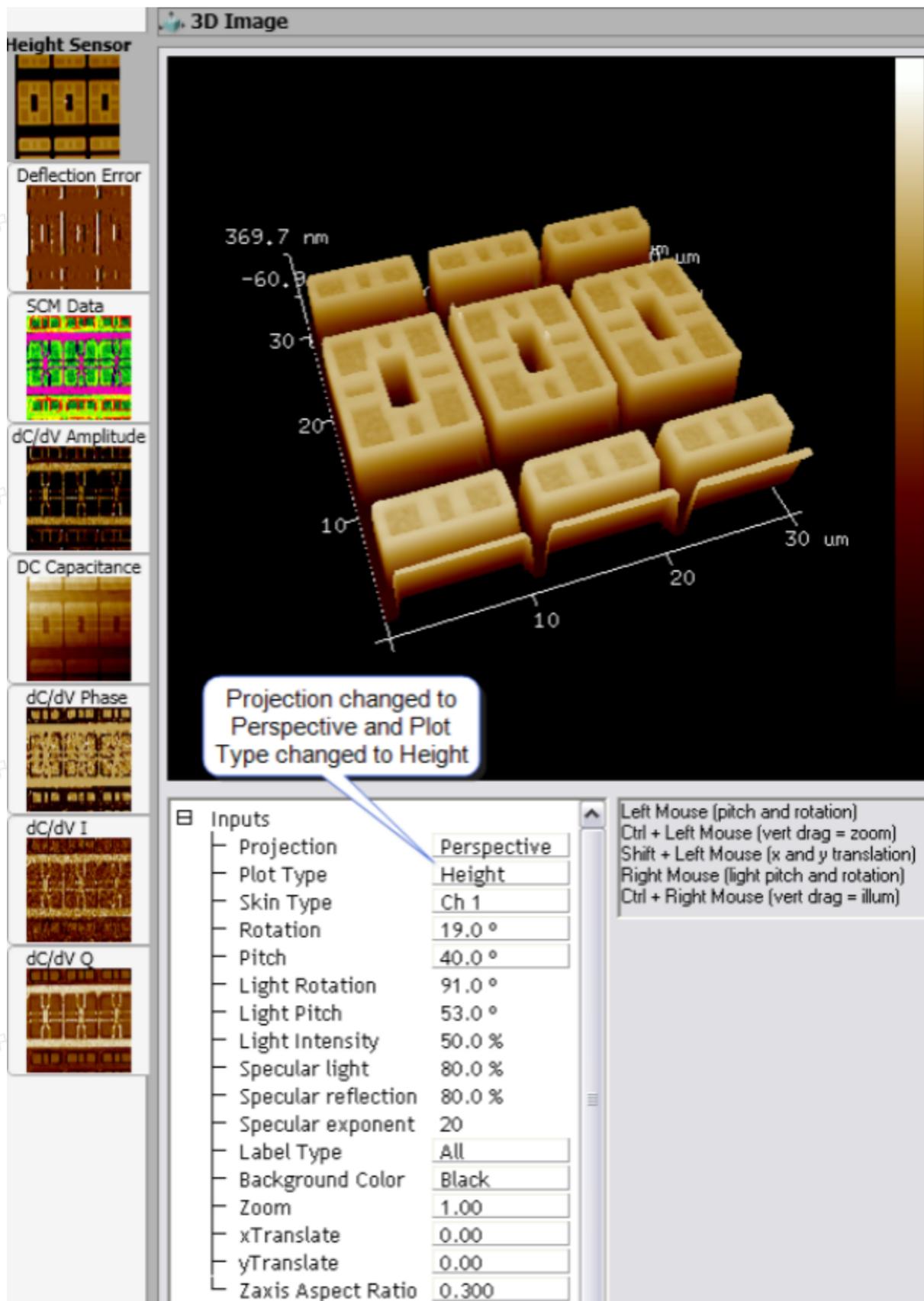


图3.3 三维图像界面中打开的图像结果。

3. 回到原通道，Projection设为Parallel，Plot Type设为Mixed，在Skin Type中下拉菜单选择想要渲染的通道，则它就会覆盖在三维图像的表面。

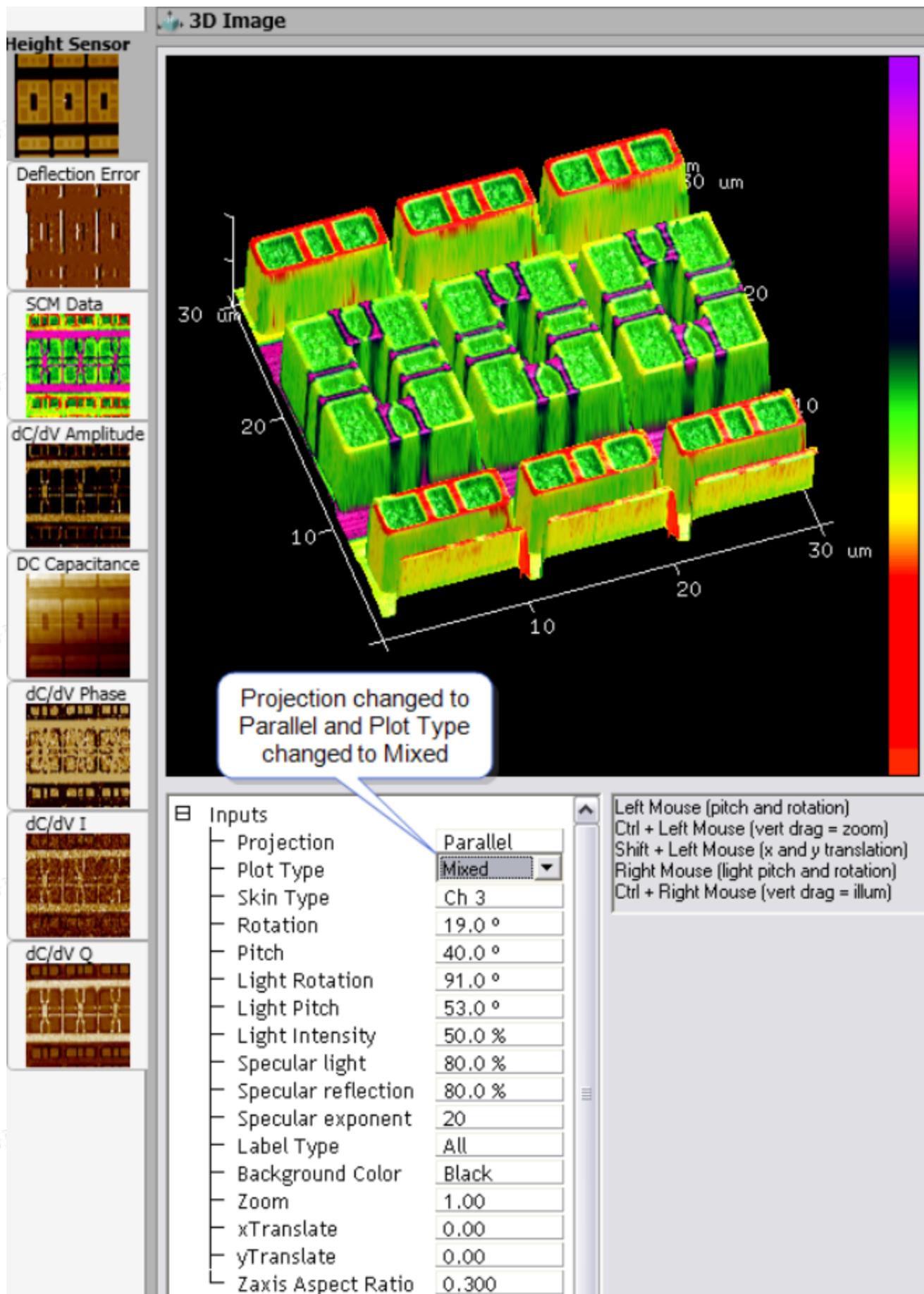


图3.3 渲染完成的三维图像。

### 3.3 控制参数

表2. 三维图像参数

参数	描述
Projection	设置： · 在Parallel模式中，所示图像体积不变，能保持三维视野中的物体大小角度。 · 在Prospective模式中，三维图像中的物体符合透视法，近大远小。
Plot Type	设置： · 在Height模式中，显示三维图像的表面颜色决定于所选择皮肤通道 · 在Wire模式中，三维图像呈现扫描区域的扫描线总和。 · 在Mixed模式中，加入了虚拟光源照射的效果。
Skin Type	Skin Type默认是当前所选择的通道。选择其它通道，就会把其它通道结果涂覆在当前三维图表面。其颜色和范围由选择的Skin通道决定。
Rotation	三维图像的观察角度，改变Rotation会使图像沿着Z轴转动。0°为图像采集时的方向。
Pitch	三维图像的观察角度，改变Pitch会使图像沿着Y轴转动。0°为俯瞰方向。
Light Rotation	虚拟光源的位置，改变Light Rotation会使光源在水平面上旋转。只在Mixed的Plot Type下有用。90°使光源在右边。
Light Pitch	虚拟光源的位置，改变Light Pitch会改变光源在Z轴的间隔。只在Mixed的Plot Type下有用。90°使光源在正上方。
Light Intensity	调节虚拟光源在颜色编码的高度信息中所占的百分比。
Specular Light	Specular Light, Specular Reflection和Specular Exponent都是用来调节三维图像中的反射光（光泽）
Label Type	设定三维图像中坐标轴或者标签显示与否。 选定All，所有的轴和标签都会显示。 选定Axis，只有轴显示，标签不会显示。 选定None，轴和标签都不会显示。
Background Color	设定背景颜色是黑或白。
Zoom	放大图像。越大的数，放大程度越高。设为1.5时，图像大约占满整个画幅。
xTranslate	使图像在窗口中上下移动。
yTranslate	使图像在窗口中左右移动。
Zaxis Aspect Ratio	调节Z轴显示高度。

范围：0.0 – 1.0。设为0.0，图像为扁平；设为1.0时，显示Z轴长度与X轴Y轴相等。

表3. 三维图像按键

参数	描述
Export	导出高质量可发表的图文件。Export功能能够制作三维电影。参考Journal Quality Export。
Load Skin	导入一个文件或通道作为三维显示皮肤。只对于NanoDrive文件起作用。
Unload Skin	卸载皮肤文件。
Render Hires	以更高分辨率重新渲染图像。适用于点数/线数超过2048的图像。

## 4 外观分析 (Bearing Analysis)

Bearing Analysis是用来分析样品表面高度分布的办法。它可以适用于整个图像，也可以做选区分析。并且，还可以利用“stop bands”功能实现反选。

### 4.1 Bearing Analysis原理

Bearing Analysis显示在某一高度之上或之下表面的多少。这种分析相较于标准的粗糙度分析提供了更多有用的信息（粗糙度分析通常是用统计数据来表示，而Bearing Analysis可以给出表面的高度分布）。使用Bearing Analysis能够得到指导高度之上或之下样品表面的百分比（bearing ratio）。对于工业中抛光或化学刻蚀的样品分析尤其有用。例如，bearing analysis经常用在硅刻蚀过程中观察刻蚀特征在一定时间内的变化。

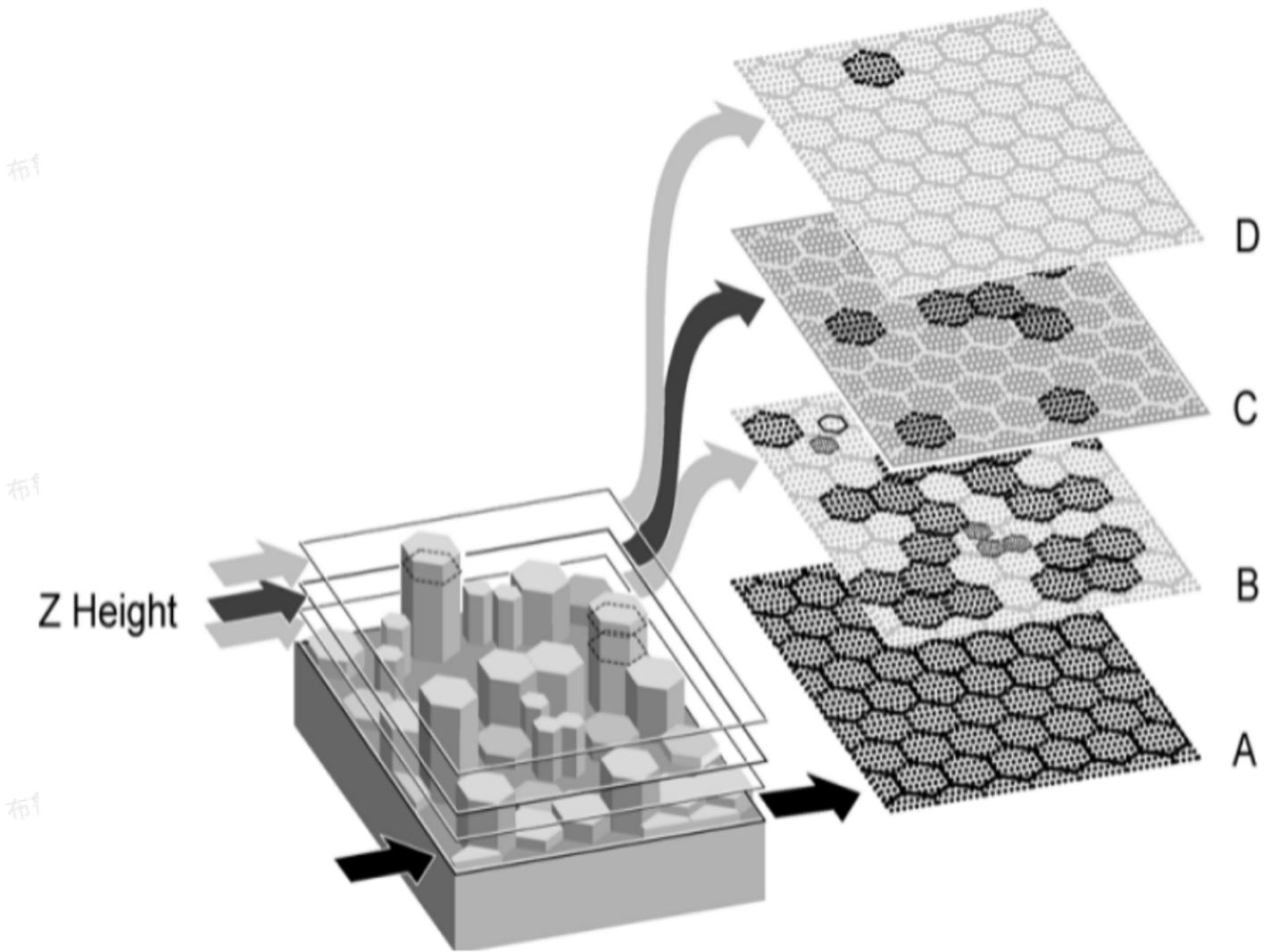


图4.1 Bearing Analysis原理阐释

图4.1展示了Bearing Analysis如何根据图像中各高度像素点的分布得到特征高度的柱方图。在高度为“A”的平面上，所有的像素点都被包括，对应于Bearing ratio为100。在高度为“D”的平面上，像素点数目大大减少，对应的Bearing ratio也大大减小（约为2 - 5%）。

## 4.2 Bearing Analysis步骤

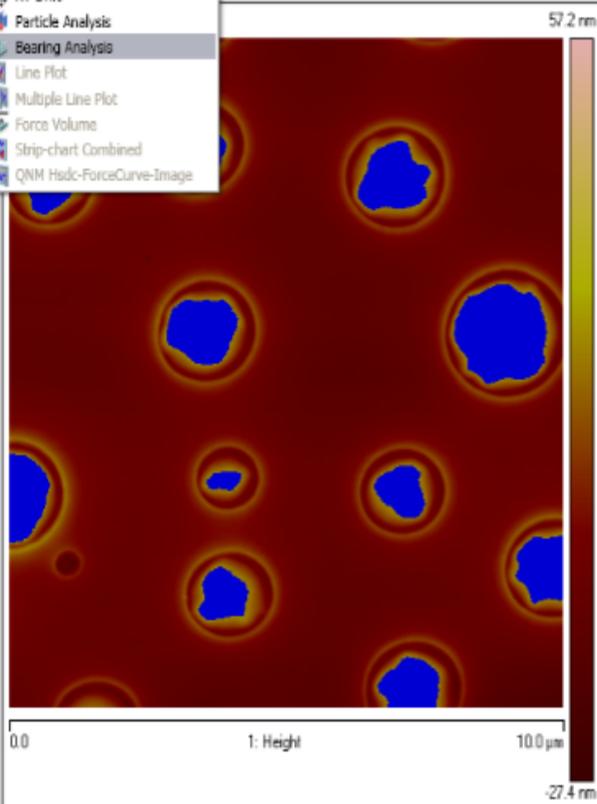
1. 在右侧浏览菜单中双击打开选中的图像，或者将其拖入窗口中打开。
2. 在菜单栏中旋转Analysis > Bearing Analysis或者在工具栏中点击Bearing Analysis 图标打开Bearing Analysis窗口。
3. 在进行Bearing Analysis之前先使用Filters > Plane Fit功能消除图像倾斜。

Bearing Analysis功能展示了数据的二维结果，然后计算并显示Bearing面积曲线和图像（面或线）像素点的深度分布柱方图，如图4.2所示。





- Roughness
- Section
- Step
- Tip Qualification
- Width
- XY Drift
- Particle Analysis
- Bearing Analysis
- Line Plot
- Multiple Line Plot
- Force Volume
- Strip-chart Combined
- QNM Hdc-ForceCurve-Image

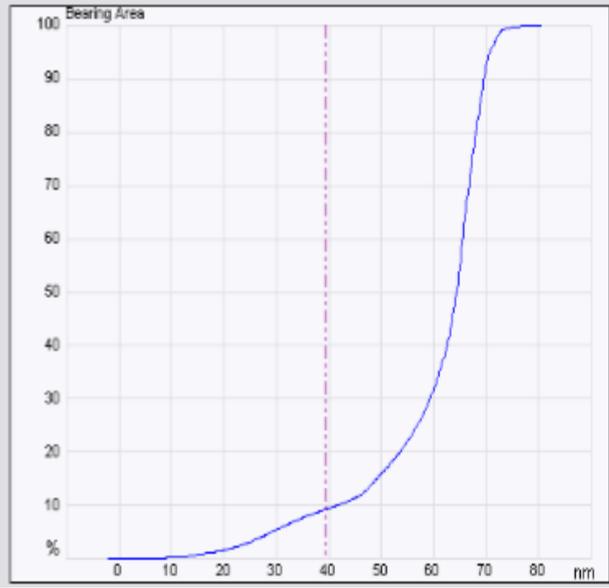
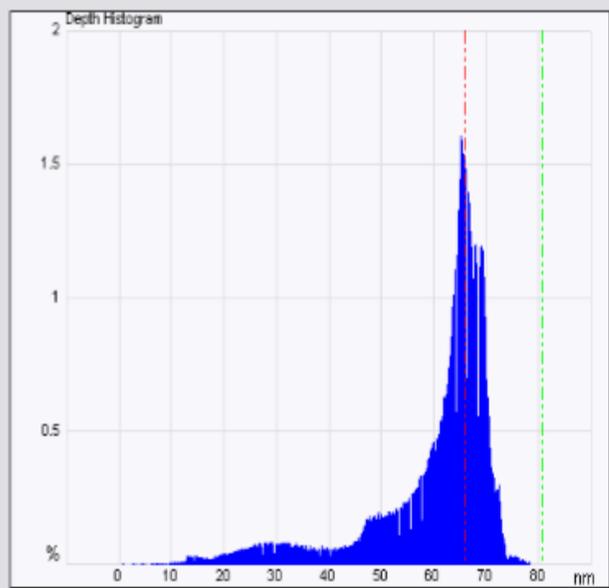


Inputs | Area Percent

Inputs	
Histogram Depth	65.8972 nm
Bearing Depth	39.3175 nm
Number Histogram Bins	512
X Axis	Relative
Threshold	On
Histogram Cursor	On

Results

Box Area	100.000 μm <sup>2</sup>
Center Line Average	64.4430 nm
Bearing Area	9.25522 μm <sup>2</sup>
Bearing Area Percent	9.25522 %
Bearing Depth	39.3175 nm
Bearing Volume	0.492078 μm <sup>3</sup>
Histogram Area	0.00000 μm <sup>2</sup>
Histogram Percent	0.00000 %
Histogram Relative Depth	-14.7037 nm



	Area Percent (%)	Depth (nm)
Bearing Area 1	5.000	29.057
Bearing Area 2	10.000	41.660
Bearing Area 3	25.000	57.010
Bearing Area 4	50.000	64.443
Bearing Area 5	75.000	67.351
Bearing Area 6	95.000	70.906

图4.2 Bearing Analysis界面

Bearing这个词是指在表面上高和低面积的相对粗糙状态。Bearing area曲线是样品表面高度柱方图的积分结果功能展示了数据的二维结果，然后计算并显示Bearing面积曲线的积分并对参考平面之上面积百分比对图像深度作图。

4. 绘图结果包含了所有的数据点和噪音。如果要过滤掉噪音，则需要在进行Bearing Analysis之前执行过滤指令（例如高斯、低通和中位数等功能）。
5. 使用鼠标左键点击拖拽框住图像中待分析区域。深度柱方图会展示所选区域的深度信息。
6. 移动游标去选择Bearing深度并设置X轴、阈值以及柱方图等输入参数。

注：如果未框选区域，则软件会默认分析整个图像。

### 4.3 Bearing Analysis界面

Bearing Analysis界面如上图所示，包含一张待分析图像、输入参数、结果参数、一副柱方图和一副Bearing Area曲线图。

表4. Bearing Analysis输入参数

参数	描述
Histogram Depth	用户输入参数，对应于Depth Histogram深度柱方图中的红色游标横坐标，也显示在结果参数中的红色方格中。在深度柱方图上拖拽移动红色游标会改变这个参数，同时，更改这个参数，柱方图中的红色游标也会跟着移动。
Bearing Depth	Bearing Depth参考平面深度值。用户输入参数，对应于Bearing Area图中的品红色游标。在Bearing Area图上拖拽移动品红色游标会改变这个参数，同时，更改这个参数，图中的品红色游标也会跟着移动。
Number of Histogram Bins	过滤运算所得的数据点数目。 注：柱方图饼数不需要比像素点数目多。
X Axis	Relative：以最高点为参考进行做图。比最高点低的点，深度越大。 Absolute：以实际深度进行做图。
Threshold	On：Bearing Area图中比Bearing Depth（品红色游标）高的像素点将会在图象中被蓝色覆盖标注出来。 Off：Bearing Area图中比Bearing Depth（品红色游标）高的像素点不在图象中标注出来。

Histogram Cursor

切换绿色的柱方图游标显示与否。

注：点击图象会重置所有游标 和相应的输入参数。

表5. Bearing Analysis结果参数

参数	描述
Box Area	选定分析区域的面积
Center Line Average	高度中位数，高于这个高度和低于这个高度的像素点各占一半
Bearing Area	高于设定Bearing Depth的像素点的面积
Bearing Area Percent	高于设定Bearing Depth的像素点的面积百分比
Bearing Depth	Bearing Analysis参考平面，与输入参数中的Bearing Depth相同
Bearing Volume	高于选定的Bearing Depth平面的样品体积
Histogram Area	柱方图中红色游标所选定的柱方饼的面积
Histogram Percent	柱方图中红色游标所选的柱方饼占有所有像素点的百分比
Histogram Depth	柱方图中红色游标相对于图象最高点的深度
Histogram Relative Depth	当Histogram Curse选为on时，柱方图中红色游标相对于绿色游标的深度值

#### 4.3.1 图案样品分析结果

如果之前进行过图案样品分析（PSA），则如图13和表6所示，输入Bearing Analysis输入参数底部会提供PSA相应参数，结果参数底部会显示PSA相应结果。

Results	
Box Area	100.000 $\mu\text{m}^2$
Center Line Average	-0.166521 $\mu\text{m}$
Bearing Area	58.8912 $\mu\text{m}^2$
Bearing Area Percent	58.8912 %
Bearing Depth	-0.255155 $\mu\text{m}$
Bearing Volume	35.4818 $\mu\text{m}^3$
Histogram Area	0.163518 $\mu\text{m}^2$
Histogram Percent	0.163518 %
Histogram Depth	0.226066 $\mu\text{m}$
PSA Bottom Depth	-0.255155 $\mu\text{m}$
PSA Bottom Area Percent	58.8912 %
PSA Top Depth	0.717355 $\mu\text{m}$
PSA Top Area Percent	2.33241 %

图4.3.1.1 包含图案样品分析的Bearing Analysis结果界面

表6. Bearing Analysis输入参数栏中的PSA参数

参数	描述
PSA Bottom Depth	Bottom Depth面积
PSA Bottom Area Percent	Bottom Depth像素点所占面积百分比
PSA Top Depth	Top Depth面积
PSA Top Area Percent	Top Depth像素点所占面积百分比

### 4.3.2 面积百分比

Area Percent（面积百分比）标签用于Bearing比例的输入：

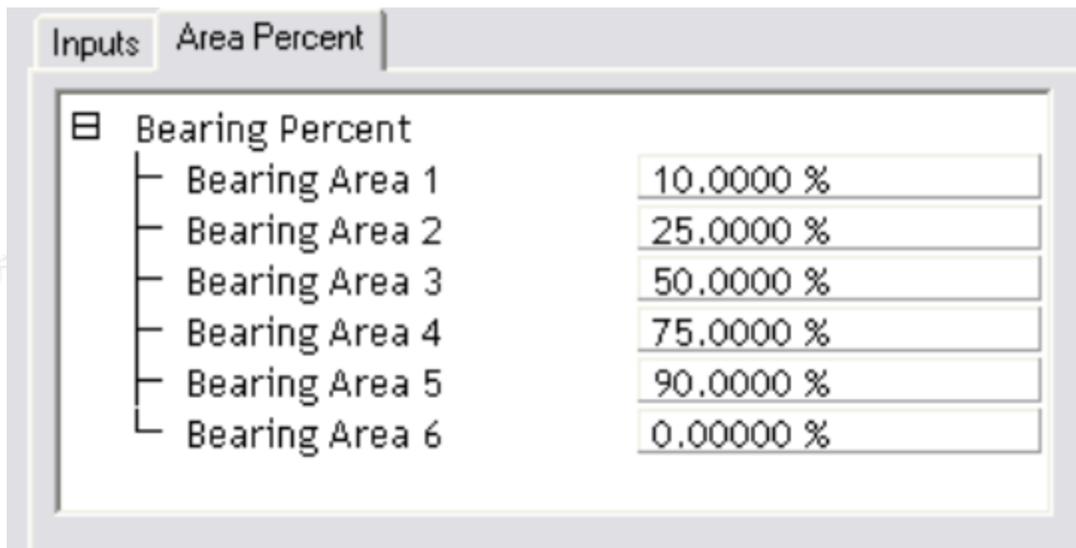


图4.3.2.1 面积百分比输入

面积百分比输入标签最多允许输入6个不同Bearing比例。例如：在输入栏中输入50%，则如图4.3.2.1所示，Bearing Area结果窗口中会显示计算出的对呀的高度值，说明高于它的像素点所占比例为50%。

	Area Percent (%)	Depth (nm)
<b>Bearing Area 1</b>	<b>10.000</b>	<b>14.931</b>
<b>Bearing Area 2</b>	<b>25.000</b>	<b>23.833</b>
<b>Bearing Area 3</b>	<b>50.000</b>	<b>37.187</b>
<b>Bearing Area 4</b>	<b>75.000</b>	<b>196.323</b>
<b>Bearing Area 5</b>	<b>90.000</b>	<b>219.693</b>
<b>Bearing Area 6</b>	<b>0.000</b>	<b>-6.770</b>

图4.3.2.2 面积百分比输入

### 4.3.3 使用格框表示

在做图区域右键单击能显示格框参数菜单：



图4.3.3.1 格框参数菜单

这些参数调整能改变做图显示。

表7. 作图形式参数

参数	描述
Color	能改变游标、文字、背景、格框以及记号的颜色
Filter	通常用来进行Profiler扫描 Type: 选择None, Mean (默认值), Maximum或者Minimum Points: 选择4k, 8k (默认值), 16k或者32k
Minor Grid	显示背底框格
Scale	运行用户调节坐标轴, 可在 auto scale (自动调节坐标轴)、curve mean (标尺平均值) 或自定义范围中选择
Line Style	改变曲线显示形式, 可在connect (连接)、fill down (向下填充)、点、圈、三角、方格、菱形或十字叉等形式
User Preference	Restore: 恢复为软件初始设定 Save: 保存用户设定, 这个设定会变为新的默认值
Copy Clipboard	复制图线至剪贴板
Print	将当前界面图象输出到打印机
Export	将数据以bitmap、JPEG或者数据点形式导出
Active Curve	决定当前分析的图线

## 5 深度 (Depth)



分析样品表面两种明显高度差特征区域的高度差异，可以有多种方法实现，其中深度分析就是主要设计来自动比较特征区域高度差。

### 5.1 原理

深度指令收集指定区域的深度数据，然后用高斯低通滤波器滤去噪音，得到不同特征区域的高度差异。

虽然高度分析方法不适用于直接分析样品截面，但它提供了两个类似位点深度差异进行统一的统计分析。

深度分析窗口包含一副俯视图象和一副柱方图；深度数据展示在结果窗口和柱方图中。鼠标能用来更改选定区域的大小和位置。柱方图展示了原始深度数据以及高斯滤波处理之后的结果。

#### 5.1.1 高度柱方图

图5.1.1.1展示了原始数据柱方图。数据点A和B分别表示两个最显著的特征区域，可以在深度分析中进行比较。根据所选区域大小和范围不同，滤波之后的曲线会表现出锯齿状噪音。

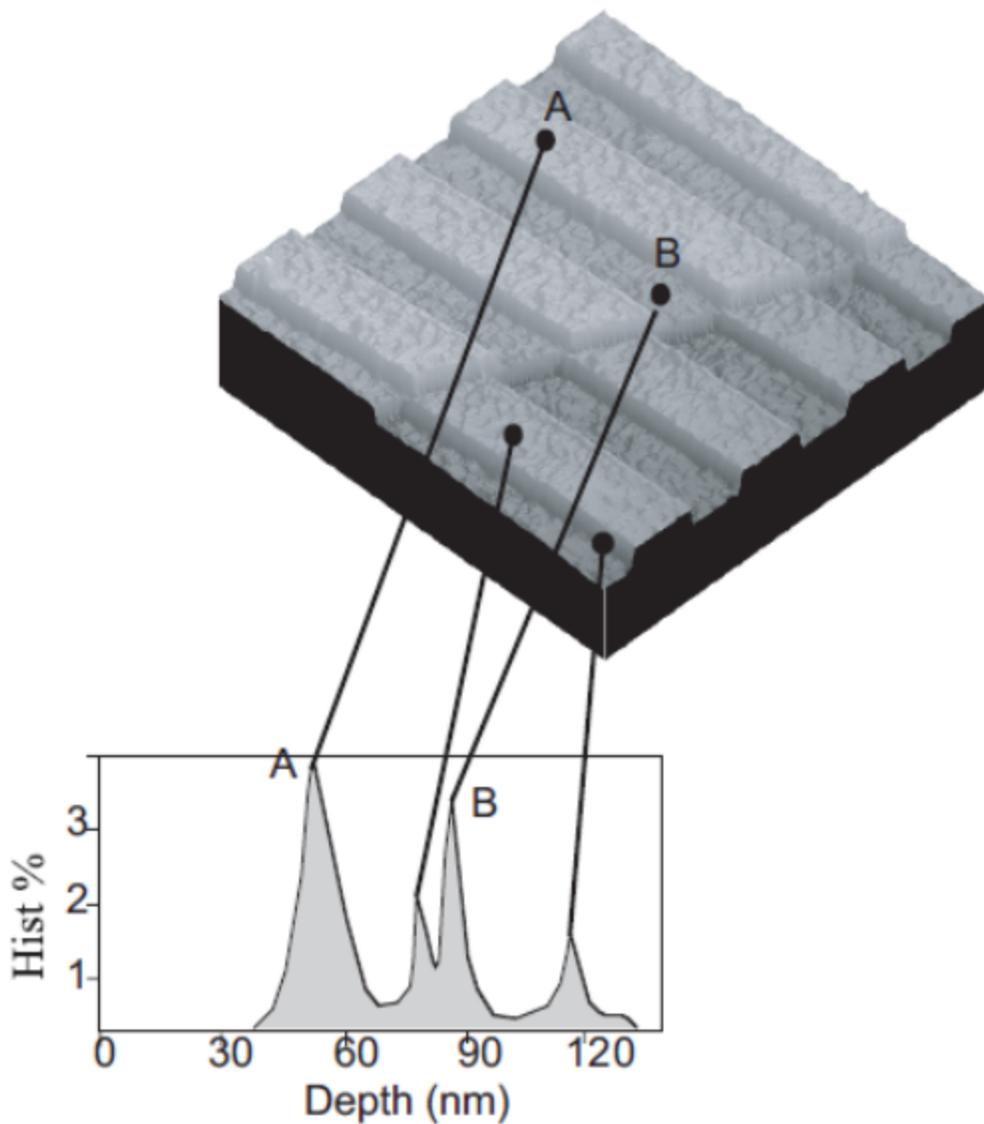


图5.1.1.1 深度图象和相应的柱方图

注：游标、数据和格框的颜色可根据用户设定更改。在图象上右键点击选择Color可以进行更改。

### 5.1.2 相关曲线

相关曲线是深度柱方图原始数据滤波处理后的结果，在柱方图上以红色曲线显示。滤波处理由输入参数栏中的Histogram Filter Cutoff（柱方图滤波截止频率）参数进行调节。截止频率越大，越多的数据会被过滤成钟形的高斯波形。大的截止频率会造成更大的平滑处理，数据的差异性就越不显著；相反，如果截止频率太小，滤波后的曲线会表现出很多噪音。

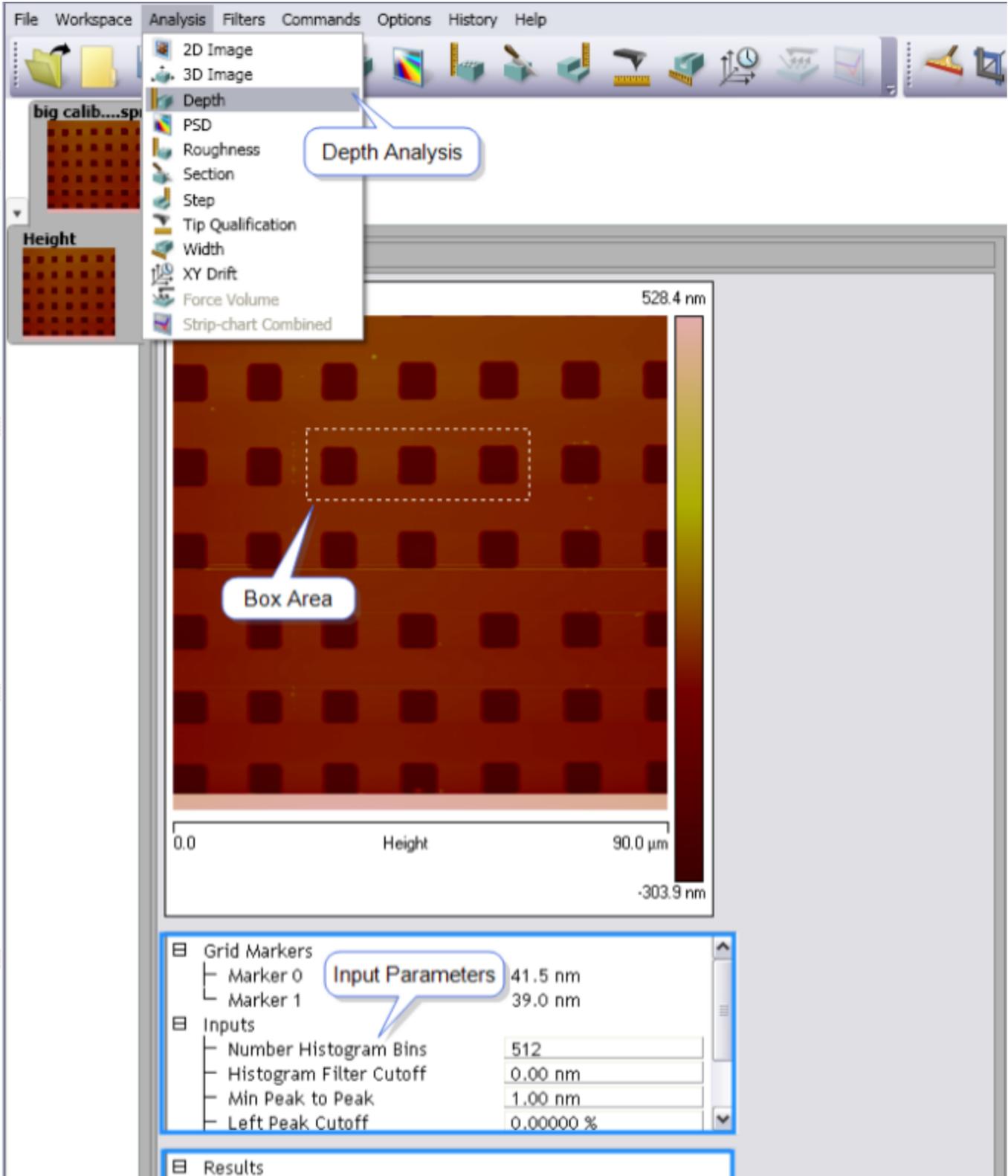
柱方图中的相关曲线展示出对原始数据进行低通滤波处理后的结果。滤波处理会消除噪音使结果更为平均。曲线上的峰则对应图像中不同高度的特征。

拟合曲线呈现出来的并不是离散孤立的突起峰，而是连续的、有高低不同区域的峰的集合。这就反映出来实际特征是连续的，而不是在各种深度下离散地分布。

当使用深度分析时，滤波处理后的柱方图上地各个峰是以其统计中心（即统计重心）进行测量的。

## 5.2 深度分析步骤

1. 在主窗口右侧的浏览 (Browse) 窗口中选择待分析的图象文件，双击选中并打开。
2. 在菜单栏中选择Analysis > Depth或图标工具栏中点击深度图标打开深度分析。
3. 使用鼠标左键在图象上拖拽以框选待分析的区域，柱方图中则会显示相应区域的深度相关曲线。
4. 调整Minimum Peak to Peak以排除非相关峰。
5. 调整Histogram Filter Cutoff参数去滤除噪音。在结果窗口中得到数据。



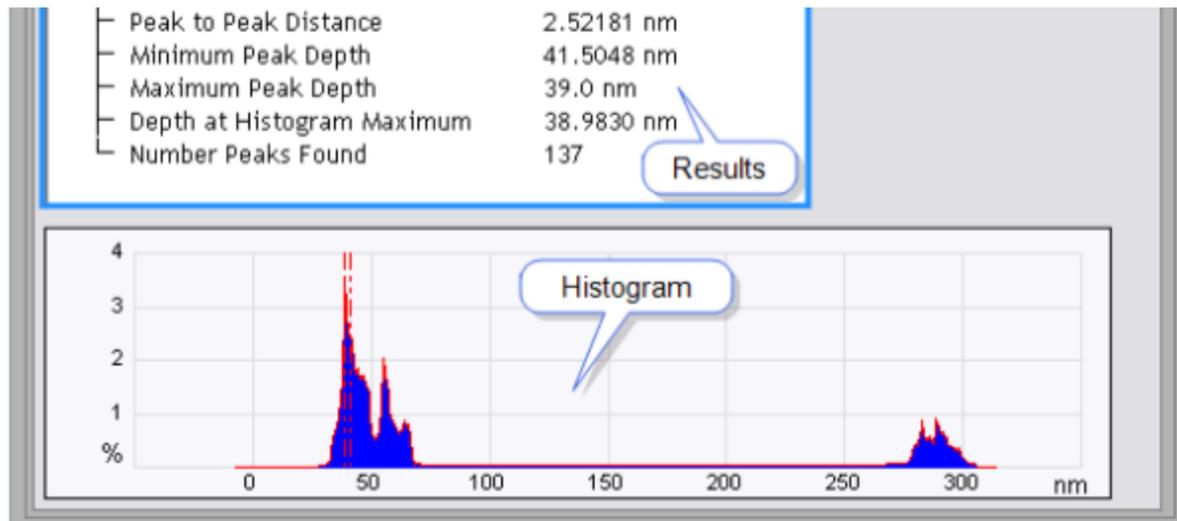


图5.2.1 深度分析菜单和窗口

### 5.3 深度分析界面

如图5.2.1所示，深度分析界面包含待分析图象，格框记号，输入参数，结果参数和柱方图。

表8. 深度参数

参数	描述
Number of Histogram Bins	滤波处理后柱方图上数据点数目。 注：不必比像素点数目多。
Histogram Filter Cutoff	低于截止波长以下数据在低通滤波中被去掉以实现平滑处理。
Minimum Peak to Peak Distance	设定最高峰与游标设定的第二个峰之间距离的最小值。则第二个峰是符合这个距离标准的次高峰。
Left Peak Cutoff	游标选定的峰形的左边界（对应于小的深度值），用来界定参与峰形重心值的左半部分峰面积。 注：当设为0%时，只有曲线最高点被包括。设为25%时，只有峰形上最高的25%部分被包括。
Right Peak Cutoff	游标选定的峰形的右边界（对应于小的深度值），用来界定参与峰形重心值的右半部分峰面积。 注：当设为0%时，只有曲线最高点被包括。设为25%时，只有峰形上最高的25%部分被包括。
Data Range Pad	在柱方图的一端设定缓冲区域
X Axis	Relative：以最高点为参考进行做图。比最高点低的点，深度越大。 Absolute：以实际深度进行做图。

表9. 深度结果参数

参数	描述
Peak to Peak Distance	所选两个峰重心值的深度差
Minimum Peak Depth	两个特征区域中更深者的深度
Maximum Peak Depth	两个特征区域中更浅者的深度
Depth at Histogram Maximum	柱方图上最高峰的高度
Number of Peaks Found	柱方图中峰的数目

### 5.3.1 使用格框表示

在做图区域右键单击能显示格框参数菜单：



图5.3.1.1 格框参数菜单

这些参数调整能改变做图显示。

表10. 作图形式参数

参数	描述
----	----

Color	能改变游标、文字、背景、格框以及记号的颜色
Filter	通常用来进行Profiler扫描 Type: 选择None, Mean (默认值), Maximum或者Minimum Points: 选择4k, 8k (默认值), 16k或者32k
Minor Grid	显示背底框格
Scale	运行用户调节坐标轴, 可在 auto scale (自动调节坐标轴)、curve mean (标尺平均值) 或自定义范围中选择
Line Style	改变曲线显示形式, 可在connect (连接)、fill down (向下填充)、点、圈、三角、方格、菱形或十字叉等形式
User Preference	Restore: 恢复为软件初始设定 Save: 保存用户设定, 这个设定会变为新的默认值
Copy Clipboard	复制图线至剪贴板
Print	将当前界面图象输出到打印机
Export	将数据以bitmap、JPEG或者数据点形式导出
Active Curve	决定当前分析的图线

## 6 刊物质量图象导出 (Journal Quality Export)

刊物质量图象导出功能允许用户从NanoScope Analysis软件中导出可发表的高质量图象。图象会导出到指定位置, 并被命名为“原始文件名\_通道号.文件类型”。

刊物质量图象导出功能会套用上次使用该功能时的设置。

### 6.1 图像导出步骤

1. 点击分析工具栏中的刊物质量图象导出图标, 或从菜单栏中选择Analysis > Journal Quality Export。
2. 如表11所示, 在输入栏中选择合适的导出选项。
3. 点击“导出”, 图象会导出到原文件所在位置或者指定位置。

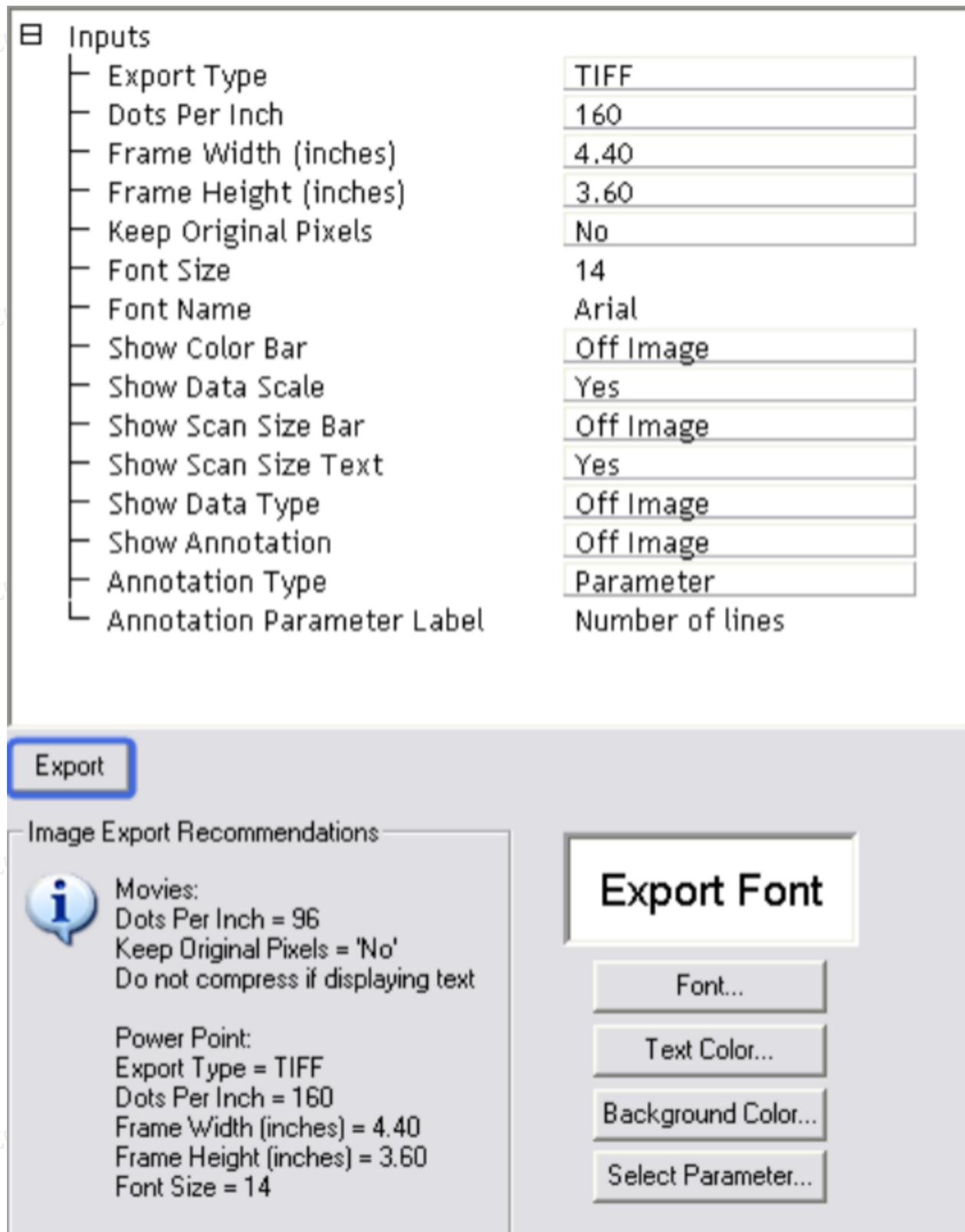


图6.1.1 导出图象选项

## 6.2 控制参数

表11. 导出选项

参数	描述
----	----

Export Type	设置： · Bitmap · Tiff · Jpeg · Png
Dots Per Inch	导出图象文件的分辨率。
Frame Width (inches)	以英寸为单位的导出图象文件宽度。 注：宽度包含色标和相关的标尺
Frame Height (inches)	以英寸为单位的导出图象文件高度。 注：高度包含比例尺、图象类型和附注
Keep Original Pixels	设置： · No · Yes
Font Size	设置颜色标尺、比例尺以及图象类型中的文本字号大小。 注：对于包含文本的图象文件布鲁克推荐使用无损格式（Tiff或Png）或者无压缩格式（Bitmap）导出。
Show Color Bar	设置： · No · Off Image：在图象右侧展示色标 · On Image：在图象上展示色标
Show Data Scale	设置： · No · Yes：展示色标标尺 注：Show Color Bar 中必须选择 Off/On Image，才能设置 Show Data Scale
Show Scan Size Bar	设置： · No · Off Image：在图象下方展示比例尺 · On Image：在图象上展示比例尺
Show Data Type	设置： · No · Off Image：在图象下方展示数据类型 · On Image：在图象上展示数据类型
Show Annotation	显示用户选择的注释 · No · Off Image

	· On Image
Annotation Type	选择注释类型： · 文件名 · 时间 · 日期 · 参数
Annotation Parameter Label	如图21所示，点击“Select Parameter”按钮，打开参数选择窗口如图22所示，允许用户选择一项在注释中显示的参数。点击“+”去展开列表，选择参数。关闭窗口以设定选择，
Font	打开窗口选择文本字体类型及大小。
Text Color	打开窗口选择文本颜色。
Background Color	打开窗口选择图象周围背景图案的颜色。

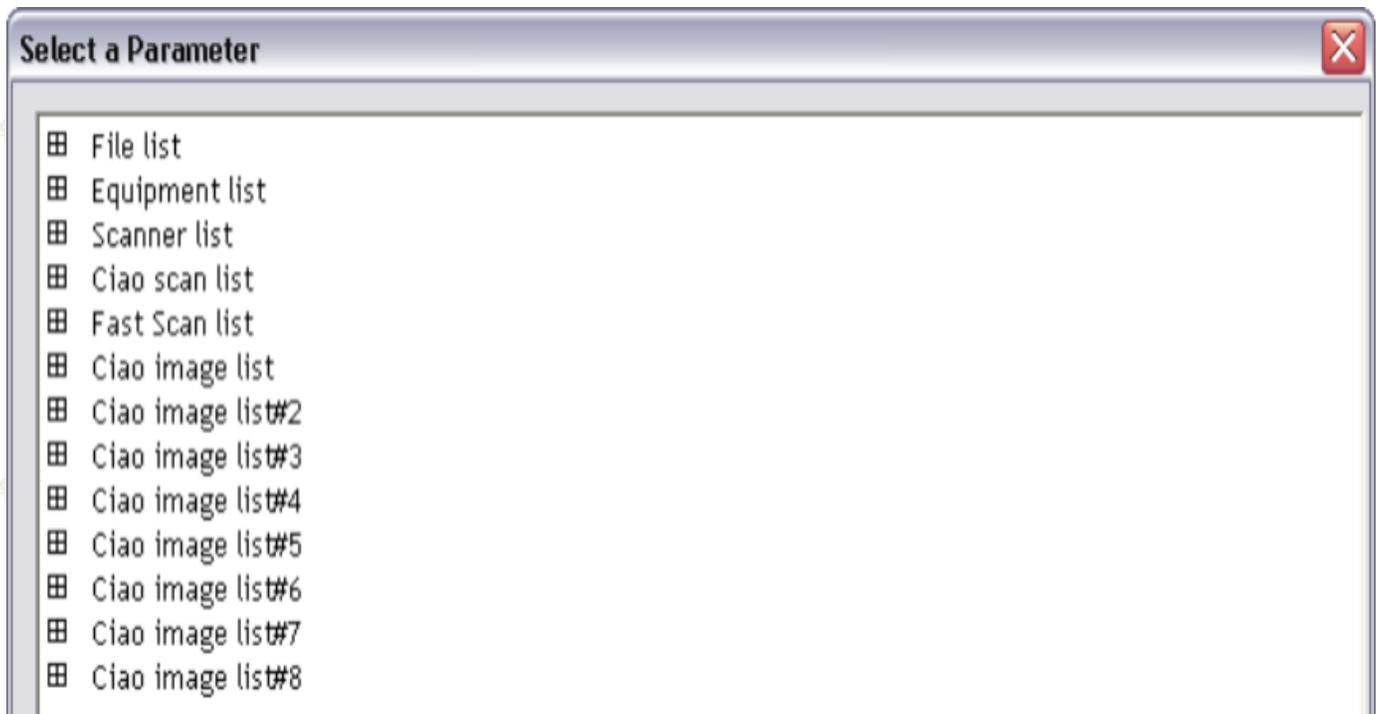


图6.2.2 选择参数窗口

图22展示了导出的图象文件。

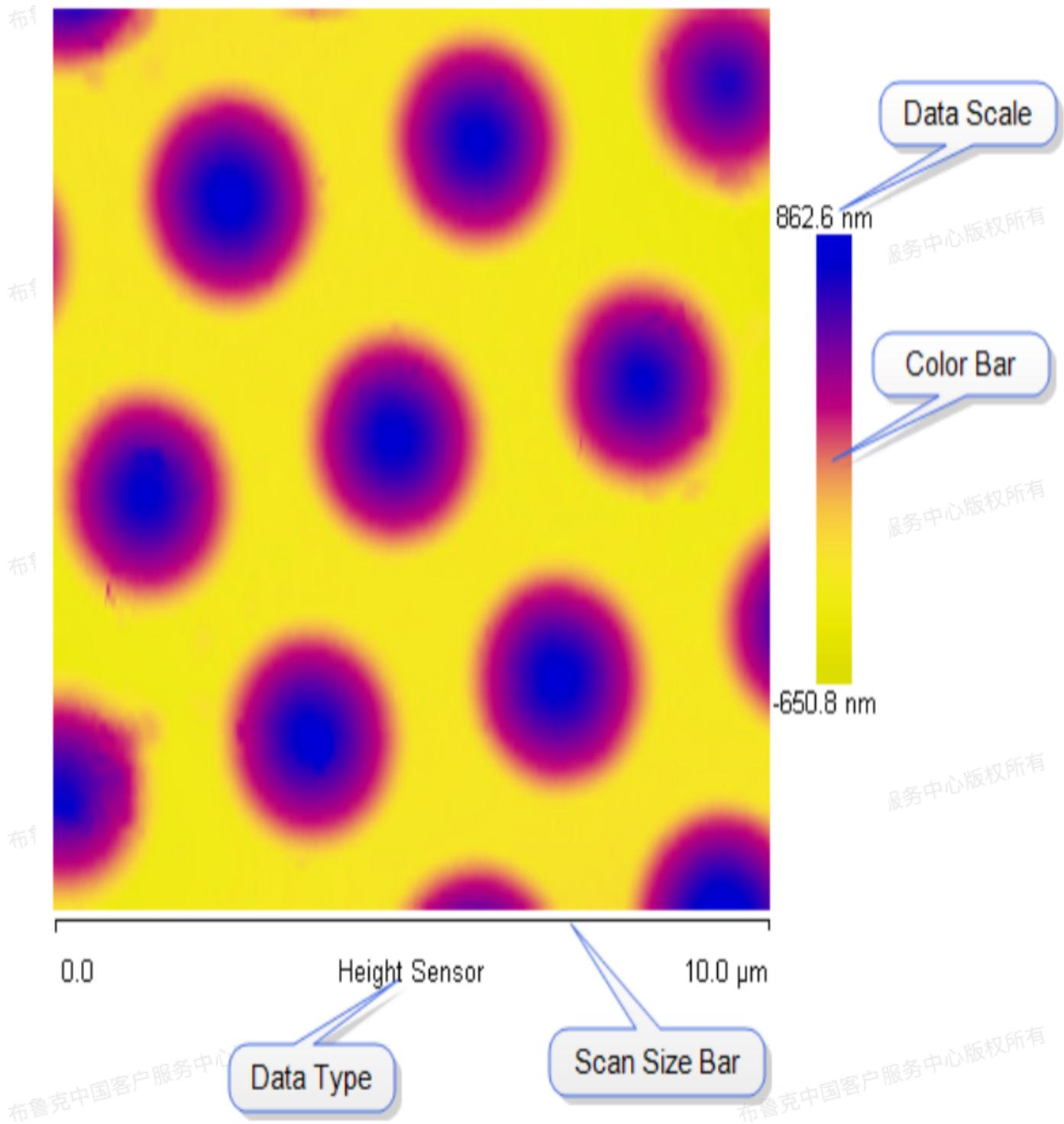
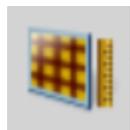


图6.2.3 无注释的导出图象文件

## 7 线性验证 (Linearity Verification)



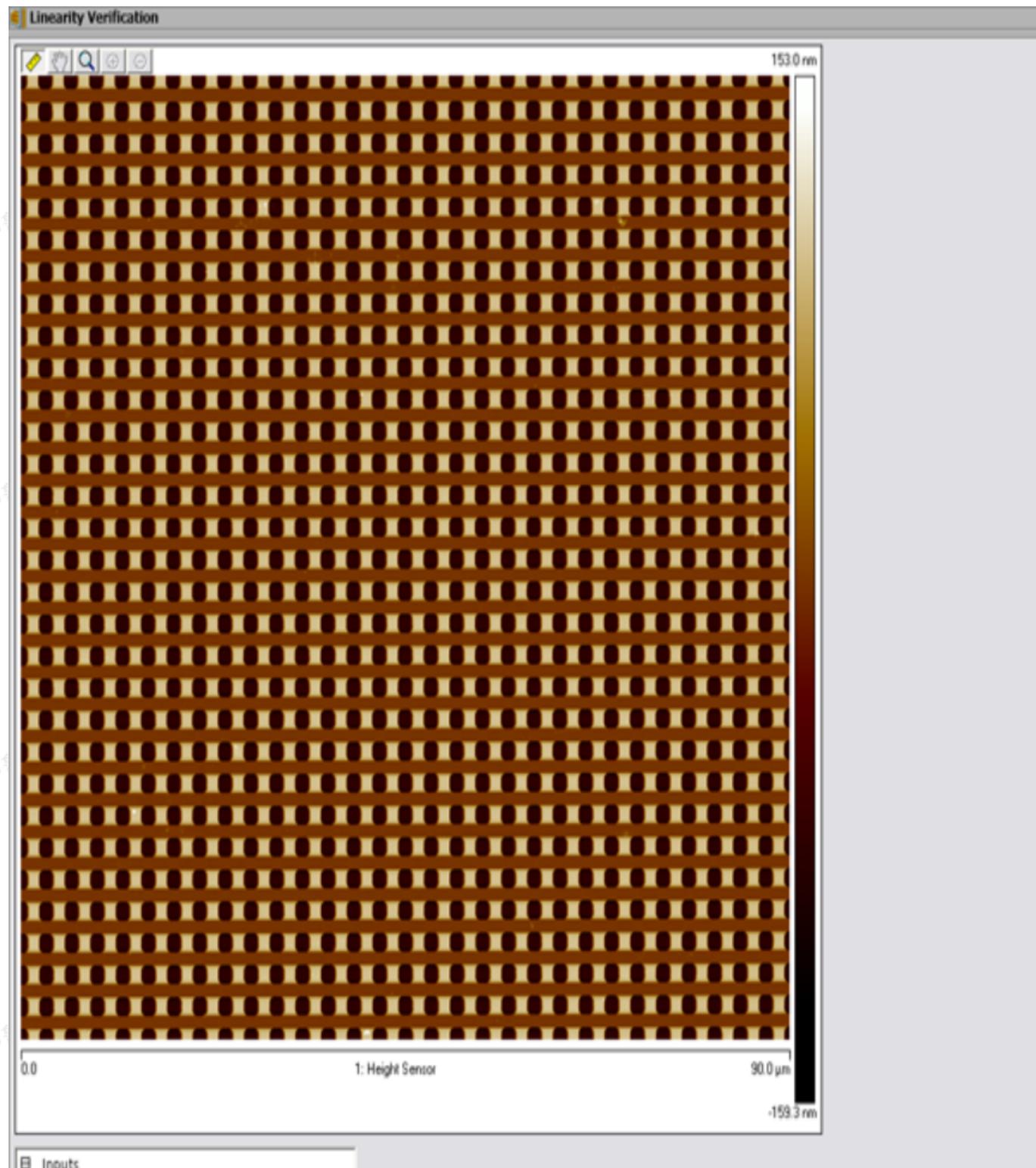
线性验证功能需要布鲁克校准标样的图象。如果在不合适的文件上进行线性验证，一条错误窗口会弹出，显示“线性验证功能需要校准标样的图象”。

线性验证功能由布鲁克工作人员用来检验成像质量。

注：线性验证功能要求图象倾角小于3度。

## 7.1 线性验证步骤

1. 打开图象，在菜单栏中点击Analysis > Linearity Verification。
2. 如图7.1所示，线性验证窗口会被打开。
3. 在输入窗口中输入栅格周期。



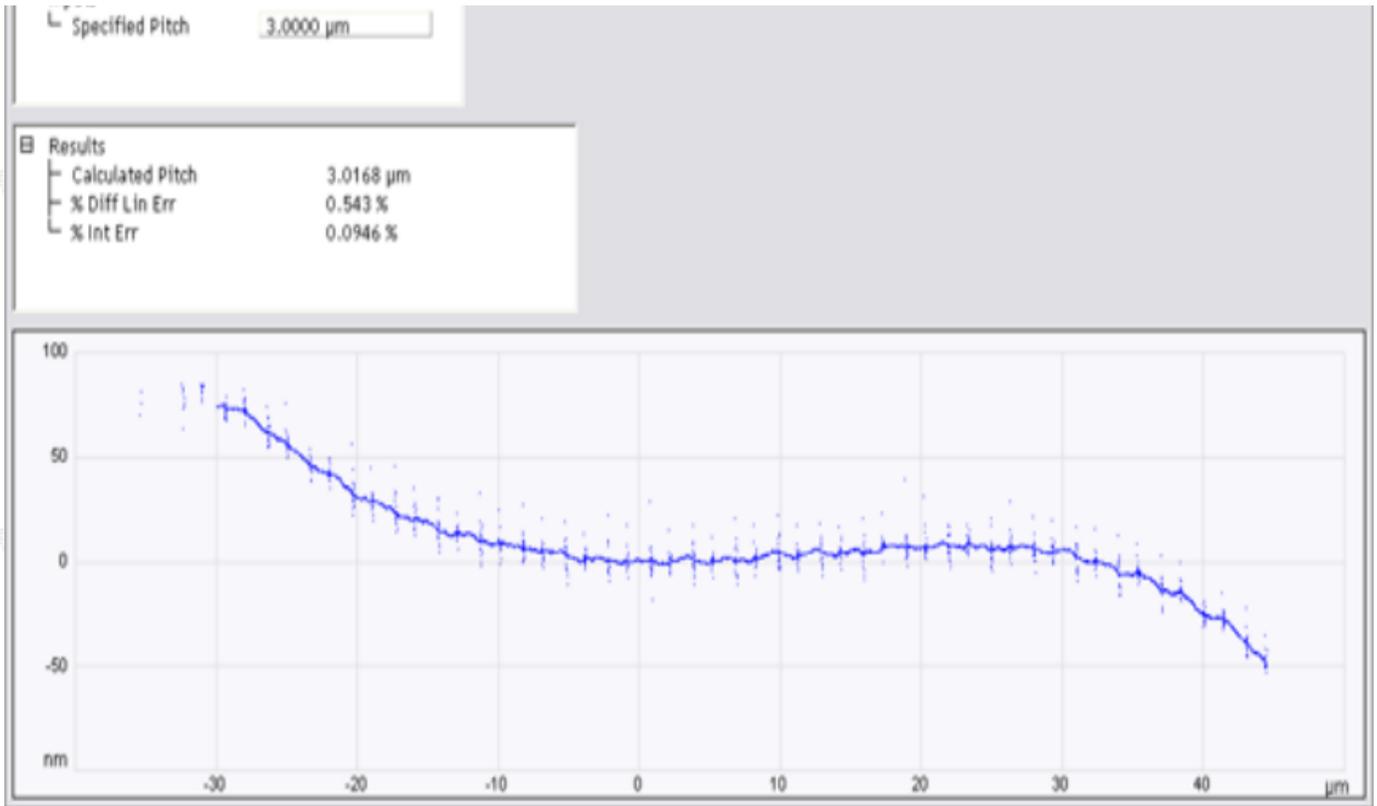


图7.1.1 线性验证窗口

4. 周期计算结果、微分及积分误差百分比如图25所示列于结果窗口中。

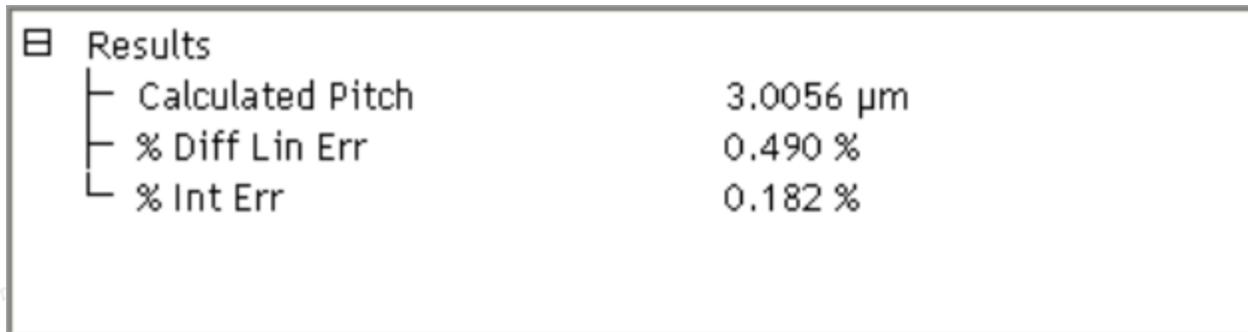


图7.1.2 线性验证结果窗口

## 7.2 线性验证结果

线性验证功能生成验证结果和一副拟合图：

表12. 线性验证结果

参数	描述
Calculated Pitch	平均周期
% Diff Lin Err	微分误差（即，第 <i>i</i> 点相对于 <i>i + 1</i> 或 <i>i - 1</i> 点的误差）均方根平均值误差占平均周期的百分比
% Int Err	最大绝对误差（即最大的单一误差值）占图象范围的百分比

## 8 颗粒分析 (Particle Analysis)

颗粒分析功能根据高度来界定感兴趣的特征结构。这个功能是用来分析各个被隔离的颗粒或者特征结果。颗粒能逐个分析，或者成群分析。在这个情况下，颗粒是高于或低于某个阈值高度的像素点集合。

颗粒分析功能包含颗粒尺寸柱方图，它能用来按尺寸指定某个特定颗粒。该分析功能测量结果包括平均面积、颗粒尺寸标准偏差、粒子总数、相关柱方图和深度柱方图。

如图8.1所示，颗粒依据高度被界定出来。这种分析功能适用于尺寸或类型与高度相关的材料分析中。

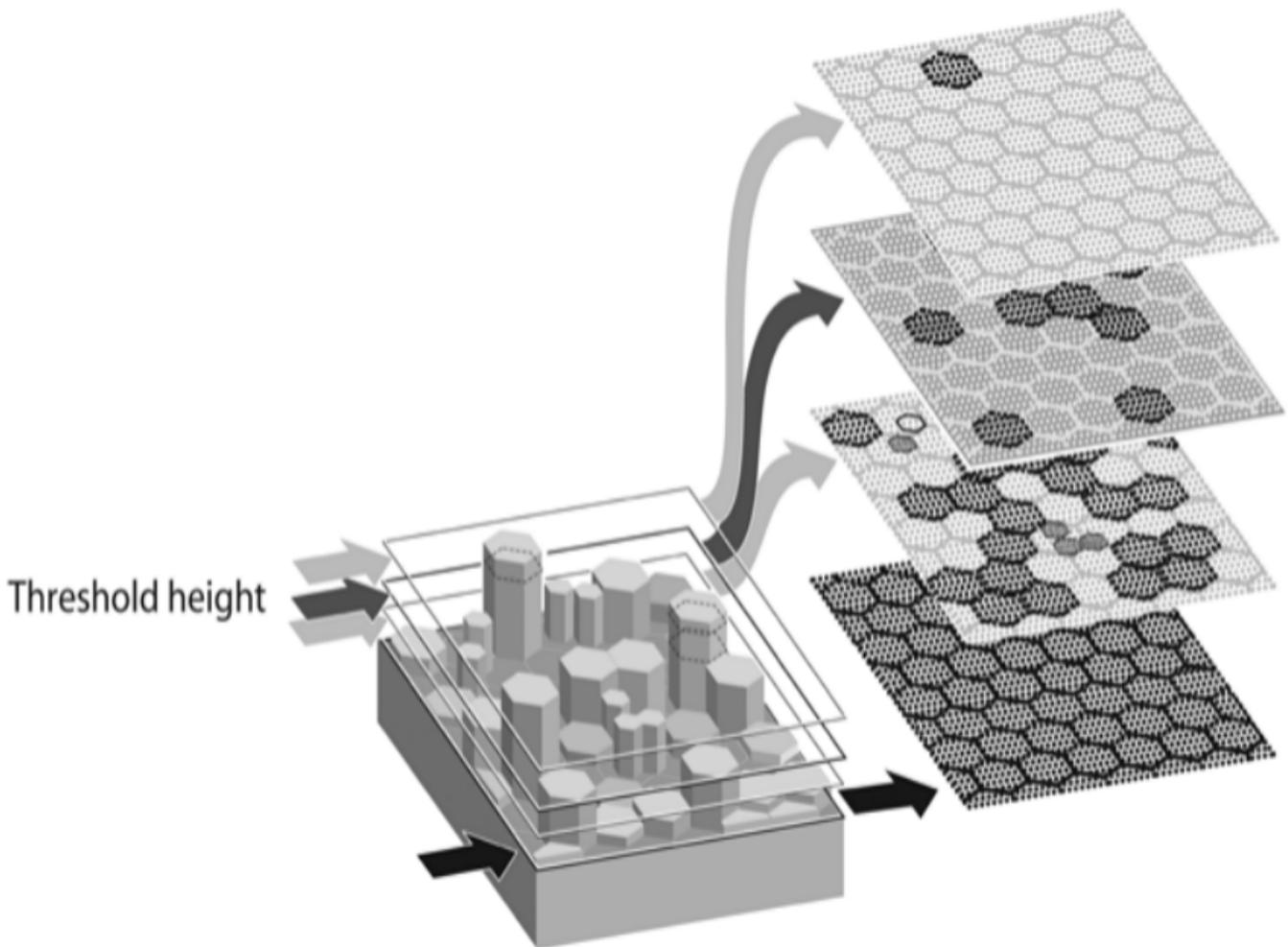


图8.1 依据高度隔离颗粒

### 8.1 膨胀和侵蚀

在颗粒分析中，膨胀 (Dilate) 是用来使颗粒集合，而腐蚀 (Erode) 是用来使颗粒分离。构成图象的像素点集合用正方矩阵来量化，其大小可以由相邻像素点矩阵大小 (Neighborhood Size) 像素点缺失

数目 (Number Pixels Off) 参数来改变。执行膨胀命令会增大选定的颗粒大小，反之，腐蚀会使它减小。

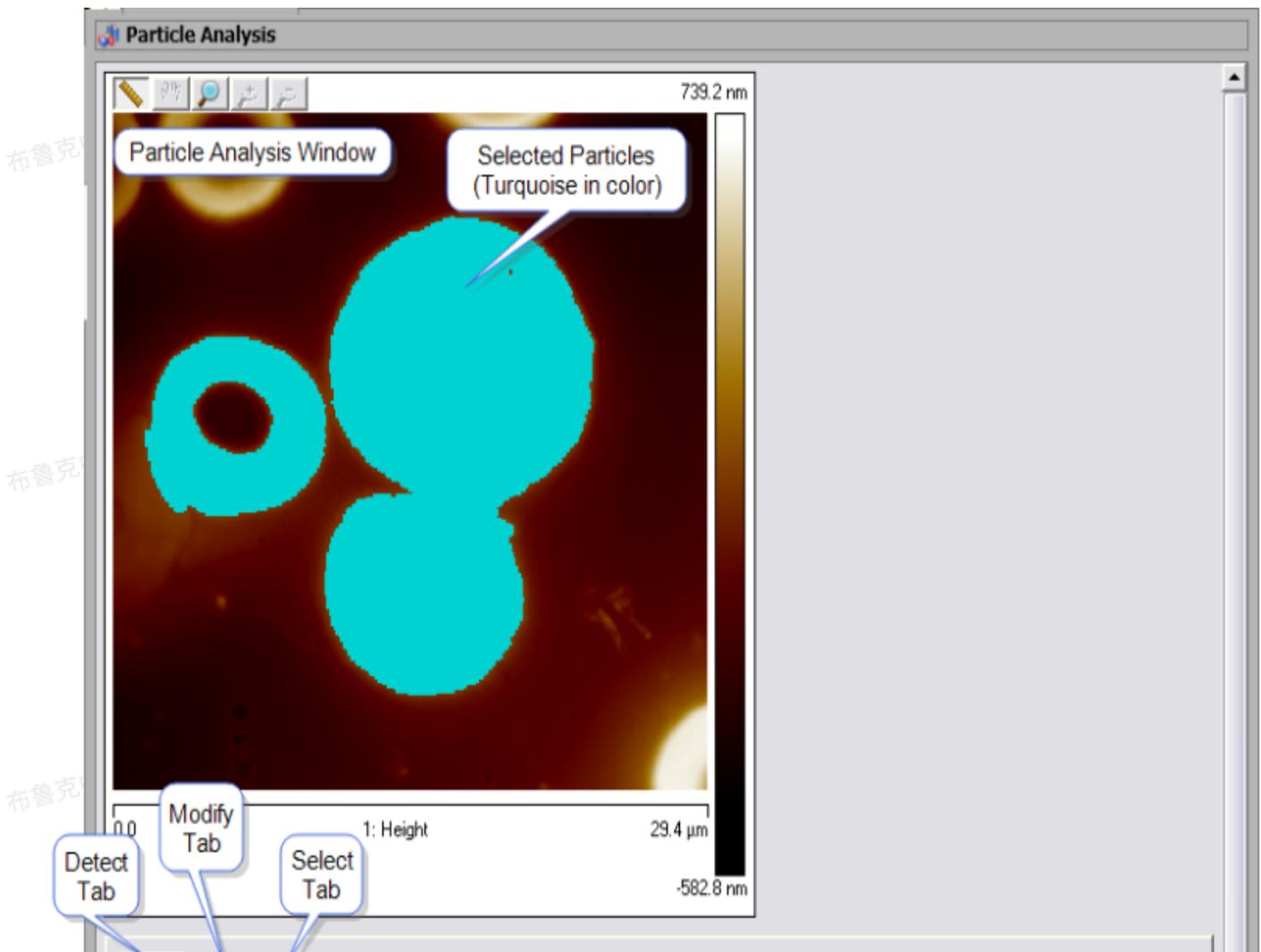
膨胀的作用是使分散的粒子聚集在一起，并修补破损的粒子。如果Number Pixels Off 设定为1，则中心像素点相邻点缺1个也会触发膨胀命令，即设为1时最灵敏。而且，如果Neighborhood Size设定值很大，则膨胀指令会作用于更广泛的范围。因此，大的Neighborhood Size和小的Number Pixels Off值会使膨胀作用最显著。反之，小的Neighborhood Size和大的Number Pixels Off值会实现微弱的膨胀作用。

腐蚀的作用是使粒子分散。如果Number Pixels Off 设定为1，则中心像素点相邻点多1个也会触发腐蚀命令，即设为1时最灵敏。而且，如果Neighborhood Size设定值很大，则膨胀指令会作用于更广泛的范围。因此，大的Neighborhood Size和小的Number Pixels Off值会使腐蚀作用最显著。反之，小的Neighborhood Size和大的Number Pixels Off值会实现微弱的腐蚀作用。

## 8.2 颗粒分析步骤

颗粒分析功能是用来检测并测量样品表面隔离颗粒的横向即纵向尺寸。其步骤如下所示：

1. 打开图象。
2. 在菜单栏中点击Analysis > Particle Analysis或在图标工具栏中点击颗粒分析图标则下列窗口会出现，默认显示检测 (Detect) 标签。



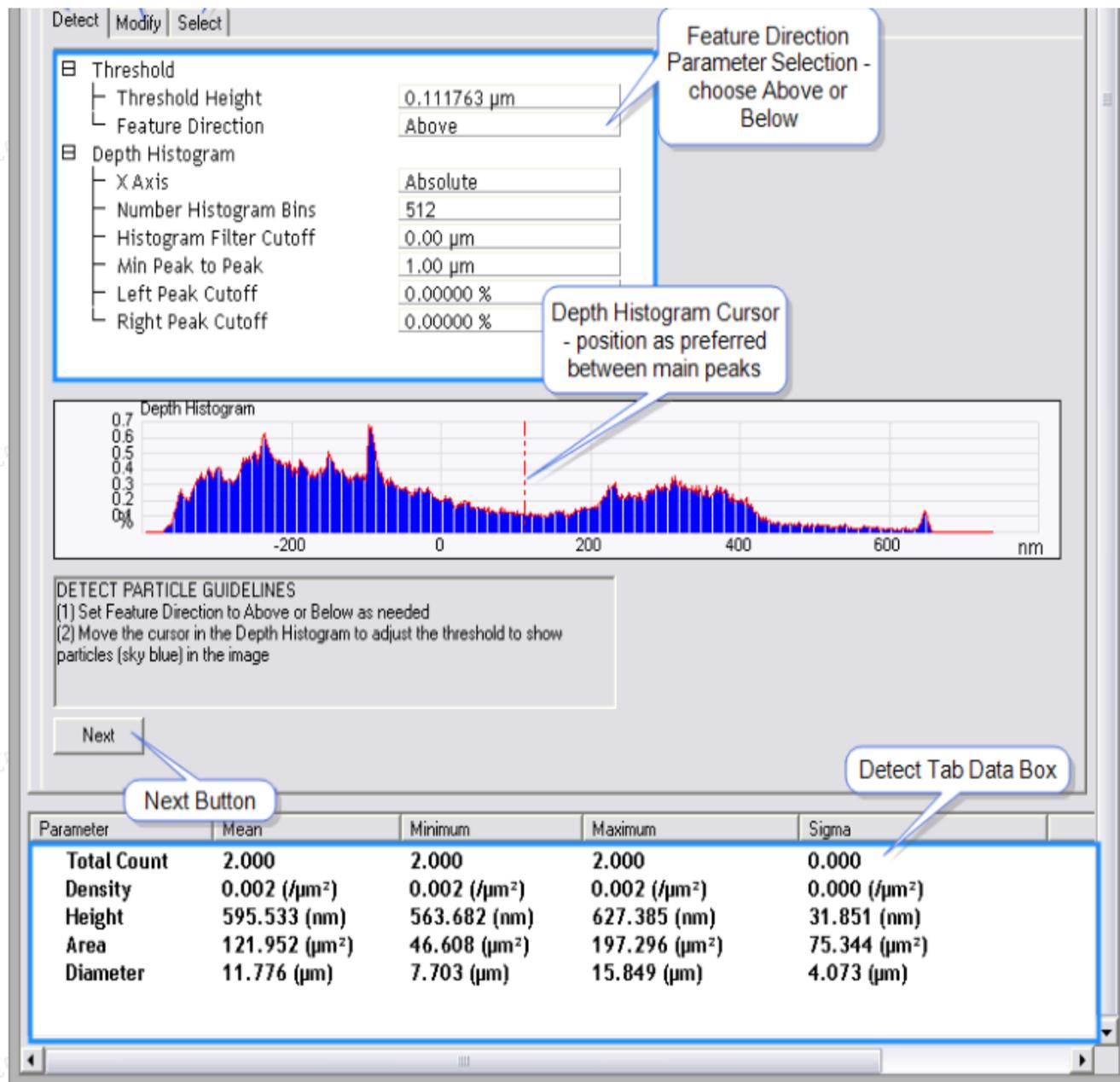


图8.2.1 颗粒分析菜单和窗口

3. 在检测标签的特征方向（Feature Direction）参数中选择上（Above）或下（Below），如果待分析特征在表面之上，则选择上；反之，选下。
4. 在深度柱方图中移动红色竖直游标以调整阈值，通常将其至于两个显著的峰之间。选定的特征在颗粒分析图象中以松绿色显示。选定的颗粒分析数据显示在窗口底部的数据栏中。
5. 当选定颗粒后，点击检测标签底部的下一步（Next）按钮，切换到修改（Modify）标签。

Detect | Modify | Select

Dilate Erode

└ Neighborhood Size

3

└ Number Pixels Off

1

Dilate

Erode

#### MODIFY PARTICLE GUIDELINES

Optional step to increase or decrease the size of the detected particles to correct for tip bias

(1) Press the Dilate button to increase the size of the particles

(2) Press the Erode button to decrease the size of the particles

Next

	Mean	Minimum	Maximum	Sigma
<b>Total Count</b>	<b>3.000</b>	<b>3.000</b>	<b>3.000</b>	<b>0.000</b>
<b>Density</b>	<b>0.003 (/μm<sup>2</sup>)</b>	<b>0.003 (/μm<sup>2</sup>)</b>	<b>0.003 (/μm<sup>2</sup>)</b>	<b>0.000 (/μm<sup>2</sup>)</b>
<b>Height</b>	<b>0.817 (μm)</b>	<b>0.681 (μm)</b>	<b>0.893 (μm)</b>	<b>0.096 (μm)</b>
<b>Area</b>	<b>77.521 (μm<sup>2</sup>)</b>	<b>44.321 (μm<sup>2</sup>)</b>	<b>122.216 (μm<sup>2</sup>)</b>	<b>32.823 (μm<sup>2</sup>)</b>
<b>Diameter</b>	<b>9.718 (μm)</b>	<b>7.512 (μm)</b>	<b>12.474 (μm)</b>	<b>2.063 (μm)</b>

图8.2.2 修改标签

6. 根据需要调整膨胀或者腐蚀参数。完成后，点击下一步，进入选择（Select）标签。

**SELECT PARTICLE GUIDELINES**  
 (1) Filter the particles by moving the two cursors to select a range on the Diameter, Height or Area plots  
 (2) Select, add or remove particles by clicking on the image particles with the left mouse button

Parameter	Mean	Minimum	Maximum	Sigma
<b>Total Count</b>	2.000	2.000	2.000	0.000
<b>Density</b>	0.002 (/μm <sup>2</sup> )	0.002 (/μm <sup>2</sup> )	0.002 (/μm <sup>2</sup> )	0.000 (/μm <sup>2</sup> )
<b>Height</b>	928.692 (nm)	888.404 (nm)	968.979 (nm)	40.288 (nm)
<b>Area</b>	124.853 (μm <sup>2</sup> )	52.662 (μm <sup>2</sup> )	197.045 (μm <sup>2</sup> )	72.192 (μm <sup>2</sup> )
<b>Diameter</b>	12.014 (μm)	8.188 (μm)	15.839 (μm)	3.825 (μm)

图8.2.3 选择标签

7. 调整选择标签中的参数得到想要的结果。其中，包含三个柱方图：直径、高度和面积。每一种提供了不同的颗粒分析方法。平移柱方图中的游标去高亮相应的颗粒。相应的分析结果展示在窗口底部的数据栏中。

8. 当进行自动程序（Run AutoProgram）时，在导出颗粒柱方图（Export Particle Histogram）选择框中点击是导出结果。

### 8.3 颗粒分析界面

表13. 检测标签参数

参数	描述
Threshold	
Threshold Height	设定阈值高度。与滑动游标不同，这里可以精确设定阈值。
Feature Direction	根据颗粒形状，选择Above或者Below
Depth Histogram	
X Axis	选择相对值（相对于最高深度）或绝对值
Number of Histogram Bins	滤波处理后柱方图上数据点数目。 注：不必比像素点数目多。
Histogram Filter Cutoff	低于截止波长以下数据在低通滤波中被去掉以实现平滑处理。
Minimum Peak to Peak Distance	设定最高峰与游标设定的第二个峰之间距离的最小值。则第二个峰是符合这个距离标准的次高峰。
Left Peak Cutoff	游标选定的峰形的左边界（对应于小的深度值），用来界定参与峰形重心值的左半部分峰面积。 注：当设为0%时，只有曲线最高点被包括。设为25%时，只有峰形上最高的25%部分被包括。
Right Peak Cutoff	游标选定的峰形的右边界（对应于小的深度值），用来界定参与峰形重心值的右半部分峰面积。 注：当设为0%时，只有曲线最高点被包括。设为25%时，只有峰形上最高的25%部分被包括。

表14. 检测标签数据栏

参数	Mean	Minimum	Maximum	Sigma
Total Count	颗粒数目的平均值	最小值	最大值	标准偏差
Density	选定范围中平均颗粒密度	最小颗粒密度	最大颗粒密度	颗粒密度标准偏差
Height	颗粒相对于阈值的高度值的平均值	颗粒高度的最小值	颗粒高度的最大值	颗粒高度的标准偏差
Area	平均颗粒面积	颗粒面积最小值	颗粒面积最大值	颗粒面积的标准偏差
Diameter	平均颗粒直径	颗粒直径最小值	颗粒直径最大值	颗粒直径的标准

表15. 修改标签参数

参数	描述
Dilate Erode	
Neighborhood Size	在图象上执行膨胀/腐蚀时设定 $N \times N$ 的方形像素矩阵，其中 $N$ 即为 Neighborhood Size。
Number Pixels Off	为触发膨胀/腐蚀命令时，偏离于设定的 Neighborhood Size 的方形矩阵的像素点数目。

表16. 选择标签参数

参数	描述
Particle Selection	
Image Cursor Mode	选 Particle Select 去选定一个颗粒。 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 初始状态下所有颗粒都被选中</li> <li>· 要使用 Particle Accumulate，需要首先用 Particle Select 或者 Particle Remove 选项取消选择颗粒。</li> </ul> 注：选定的颗粒用松绿色高亮，未选中的用蓝色高亮。
Boundary Particles	设定： <ul style="list-style-type: none"> <li>· Yes——包含图象边缘的颗粒</li> <li>· No——不包含</li> </ul>
Non-Representative Particles	设定： <ul style="list-style-type: none"> <li>· Yes——所有阈值高度上的颗粒都被包含</li> <li>· No——过滤掉小于比平均面积低3倍标准偏差值的颗粒</li> </ul>
Output	
Height Reference	选择相对于阈值或相对于最高值
Number of Histogram Bins	滤波处理后柱方图上数据点数目。 注：不必比像素点数目多。

## 8.4 图案样品分析

如果之前进行过图案样品分析，则如下图所示，TopResult作为颗粒分析的输入参数，计算得到的PSA Top Width列于结果栏中。

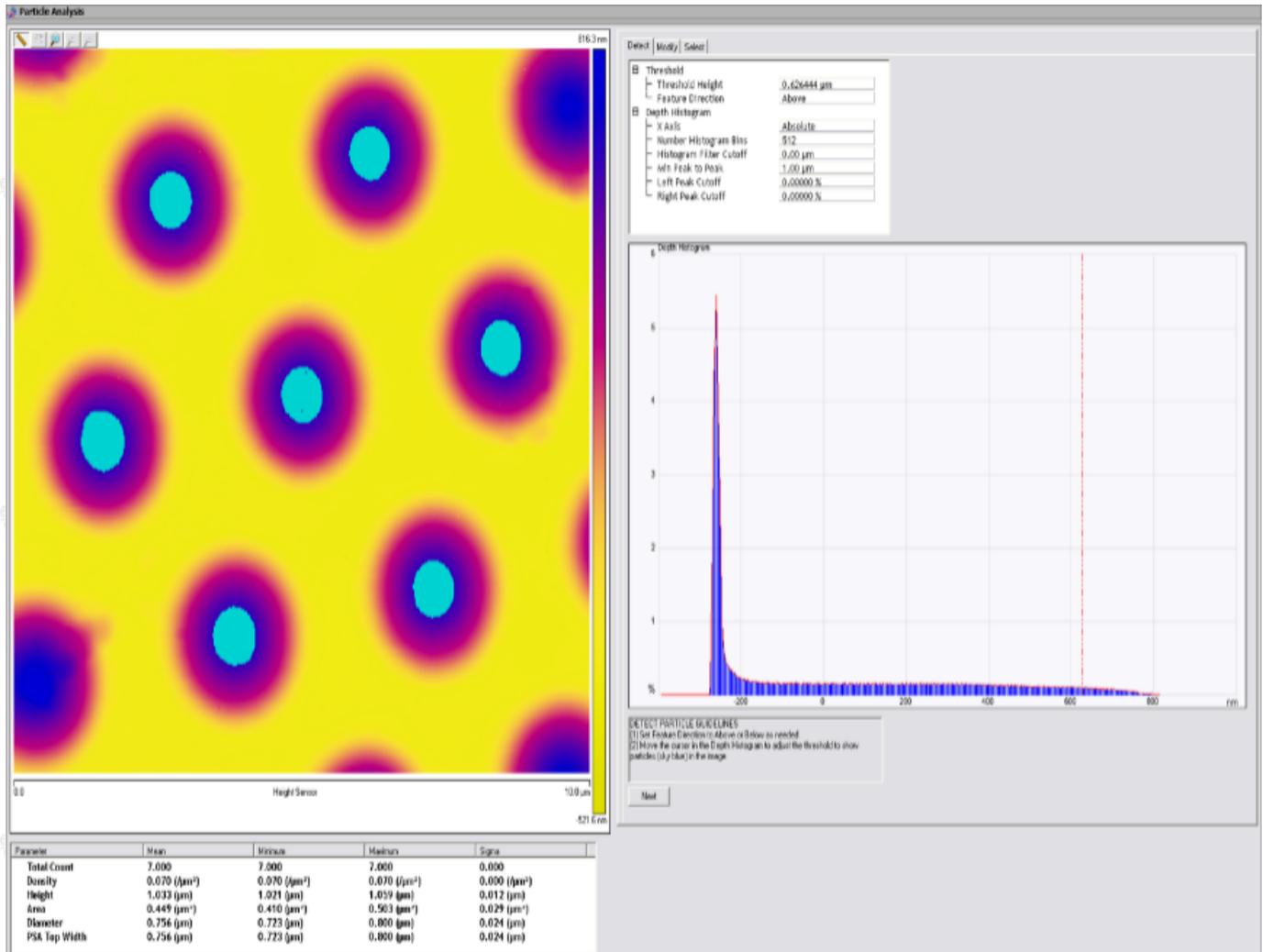


图8.4.1 含PSA输入的颗粒分析窗口

## 9 功率谱密度 (Power Spectral Density)

功率谱密度 (PSD) 功能对于表面粗糙度分析非常有用。这个功能给出了表面粗糙度对于表面空间频率的函数关系。空间频率是特征粗糙度的周期值的倒数。

PSD功能给出了周期性表面特征结构分布的图像化结果。对于有条纹结构表面，这个功能对于判断噪音源等有帮助。对于较平坦表面，这个功能助于揭示材料的特征形貌，例如颗粒或纤维。而且，PSD还能用来判断原子周期或者晶格结构。

### 9.1 PSD和表面特征

如下图所示，表面上沿着X方向上有长周期结构，Y方向上有短周期结构。

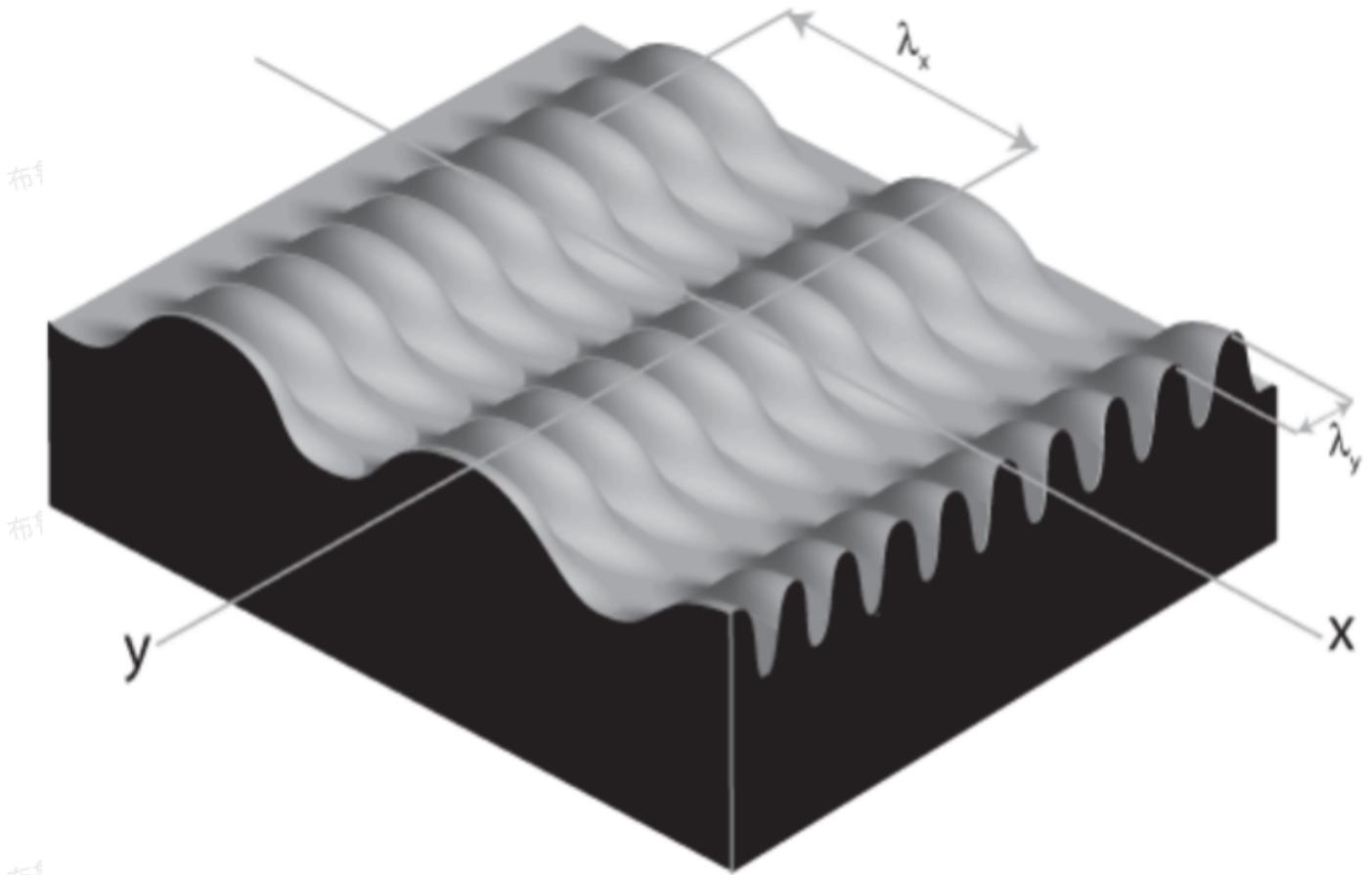


图9.1.1 周期描述

则在二维功率谱密度图能看到两个尖峰（分别对应两种周期），和一些与图象参数有关的峰（这些峰来自于样品表面的精细结构或者周期结构的边带峰）。

因为这些周期结构表现出正弦波形性质，为描述整个表面结构只需要相对少量的光谱频率。相比较而言，当一副图象，其对应的PSD呈现出锯齿状的波形，则其中会包含更多频率成分。

## 9.2 PSD和平坦度

PSD在评估超平面（例抛光或外延硅）的计量研究中发挥越来越重要的作用。通常来说，达标表面需要达到某些PSD阈值要求，表面其满足了平坦度标准。

PSD平坦度标准优于传统的RMS指标之处就在于其量化研究了整个频率范围。例如，在PSD谱中观察到原子级周期对应的频率，可以确保表面由规则的晶格组成。目前，对于各类材料该如何设定阈值仍存在争议。

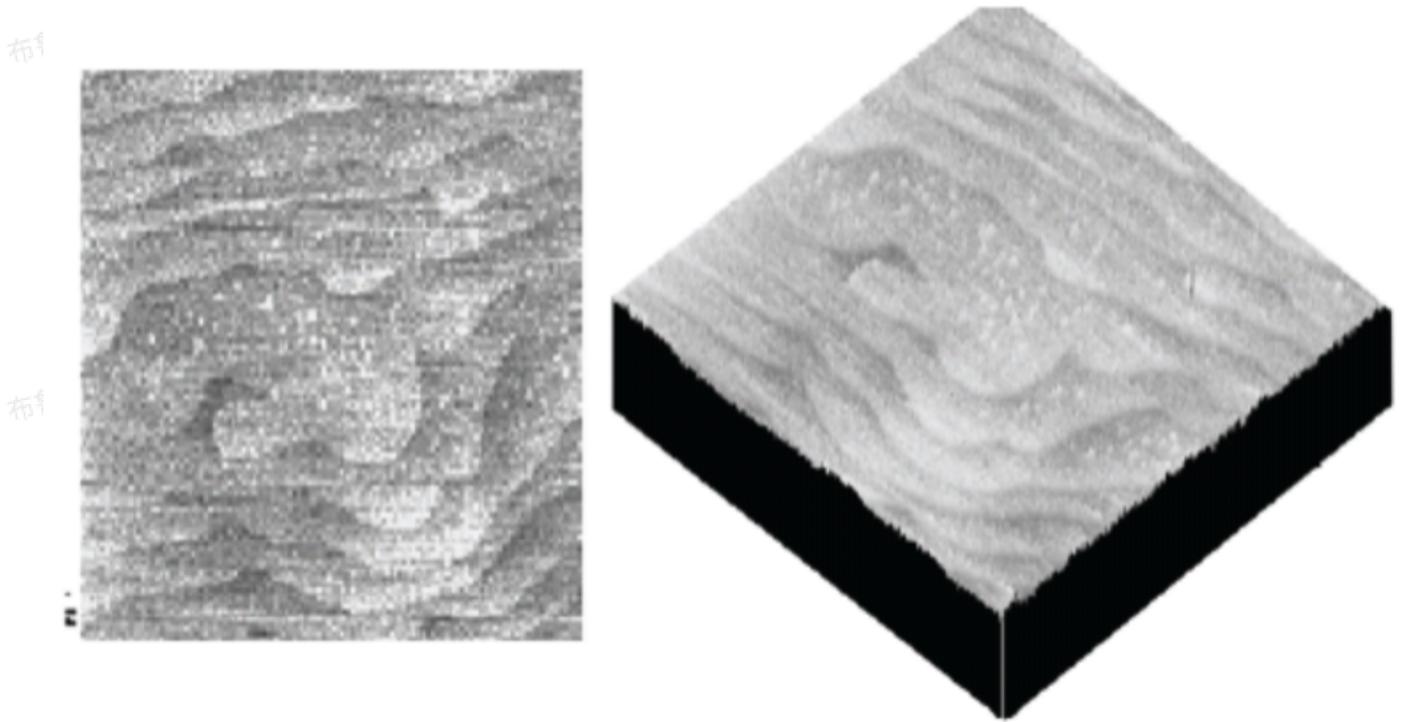


图9.2.1 外延砷化镓

图9.2.1中的表面呈现出外延砷化镓的晶格台阶，每层台阶高度为一层原子的厚度，并以相对规则的形式排列。这个表面的平坦度可由PSD进行系统的表征，如图9.2.2所示，晶格台阶在谱图中对应于一个尖峰。

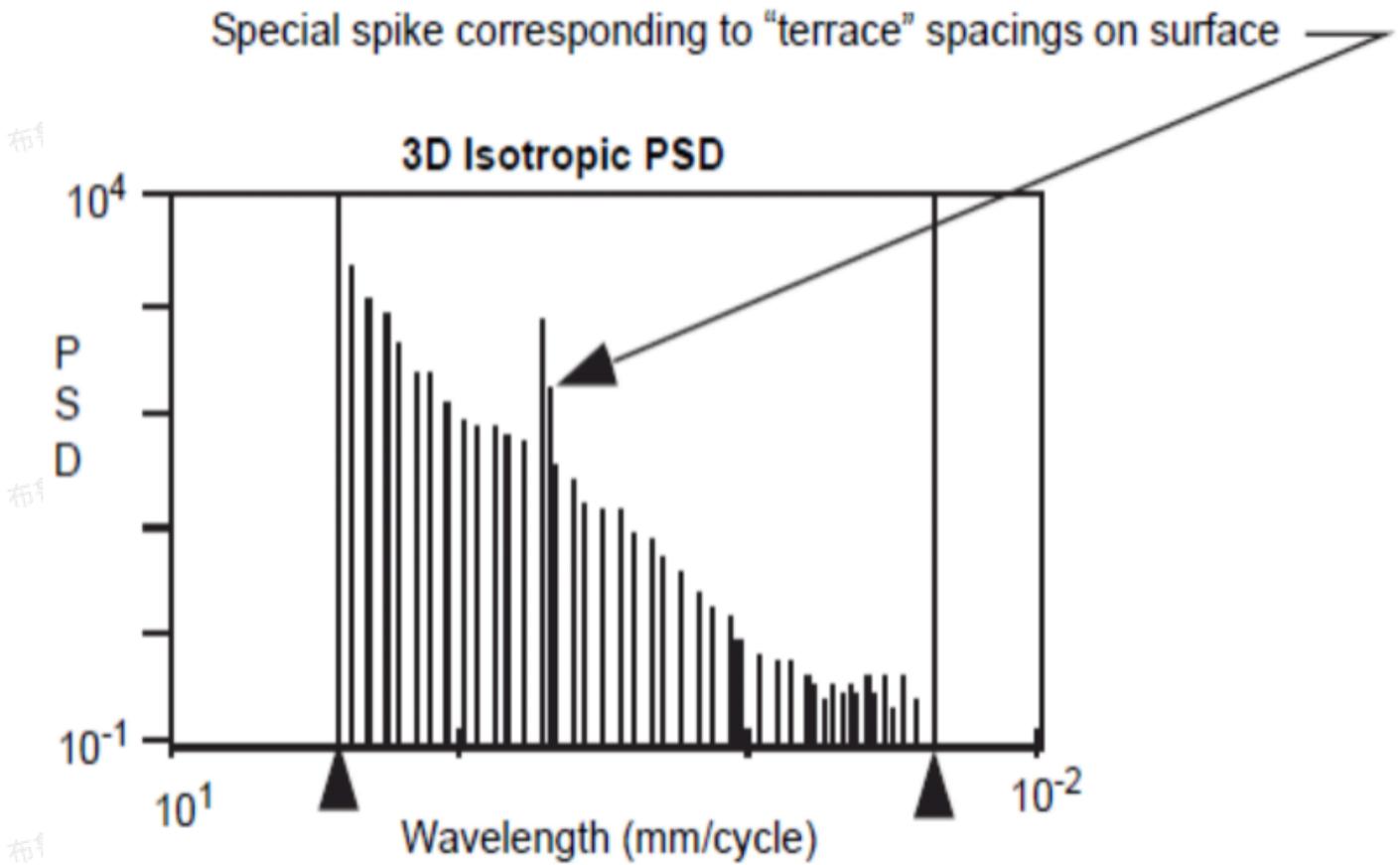


图9.2.2 外延砷化镓的PSD分析结果

平坦各向同性的表面会呈现出随空间周期增大PSD逐渐变低的谱图。PSD谱图中最大周期对应于图象的扫描范围，最小周期对应于两个像素点长度，从小周期到长周期功率密度逐渐减小。谱图中突出的尖峰对应于晶格台阶。根据评判标准的不同，这个PSD谱图可能超出了相应的平坦度阈值。

### 9.3 PSD算法

在给定的空间频率范围内，表面总功率等于其均方根平均值（RMS）粗糙度。

对于给定长度L的数字化采样曲线，采样点数目为N，采样间隔为d<sub>0</sub>，第n个像素点的高度值为z(n)，则空间频率f = (m - 1)/Nd<sub>0</sub>下的PSD为

$$PSD(f) = \frac{2d_0}{N} \left| \sum_{n=1}^N e^{i2\pi(n-1)(m-1)} z(n) \right|^2$$

其中频率f的范围为1/L到N/2L。实际应用中，PSD算法利用对图象快速傅里叶变化（FFT）结果进行平方运算求得功率。当完成功率P计算后，P可用来导出如下各种PSD结果：

$$1D \text{ PSD} = \frac{P}{\Delta f}$$

$$1D \text{ isotropic PSD} = \frac{P}{2\pi f}$$

$$2D \text{ isotropic PSD} = \frac{P}{2\pi f(\Delta f)}$$

分母中的各项用图象二维FFT中心数据进行渐进采样推导出来。

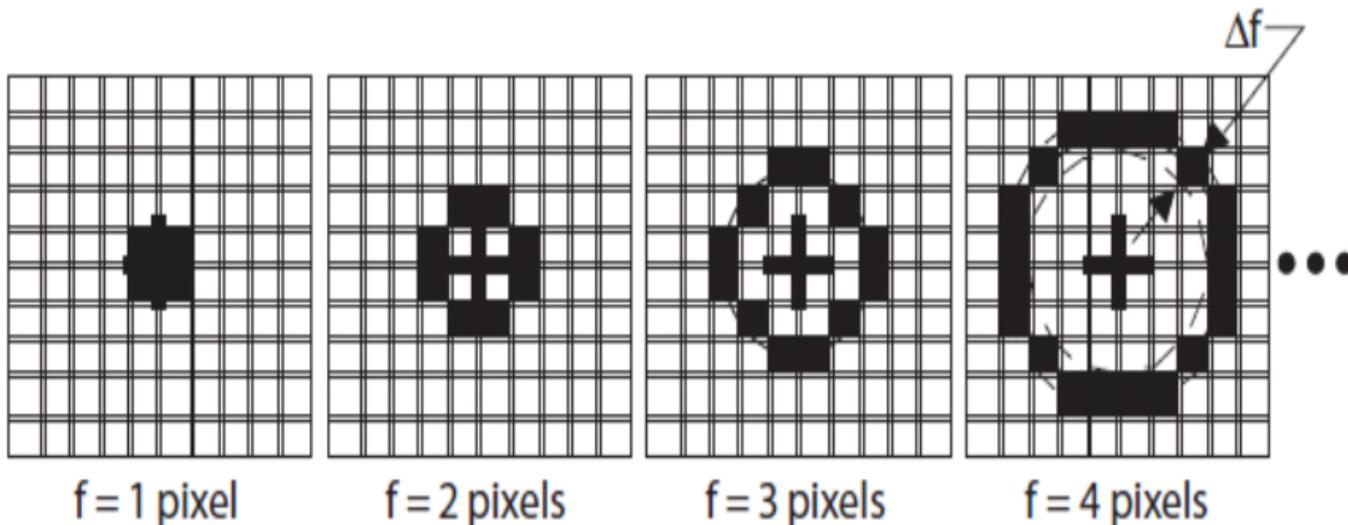
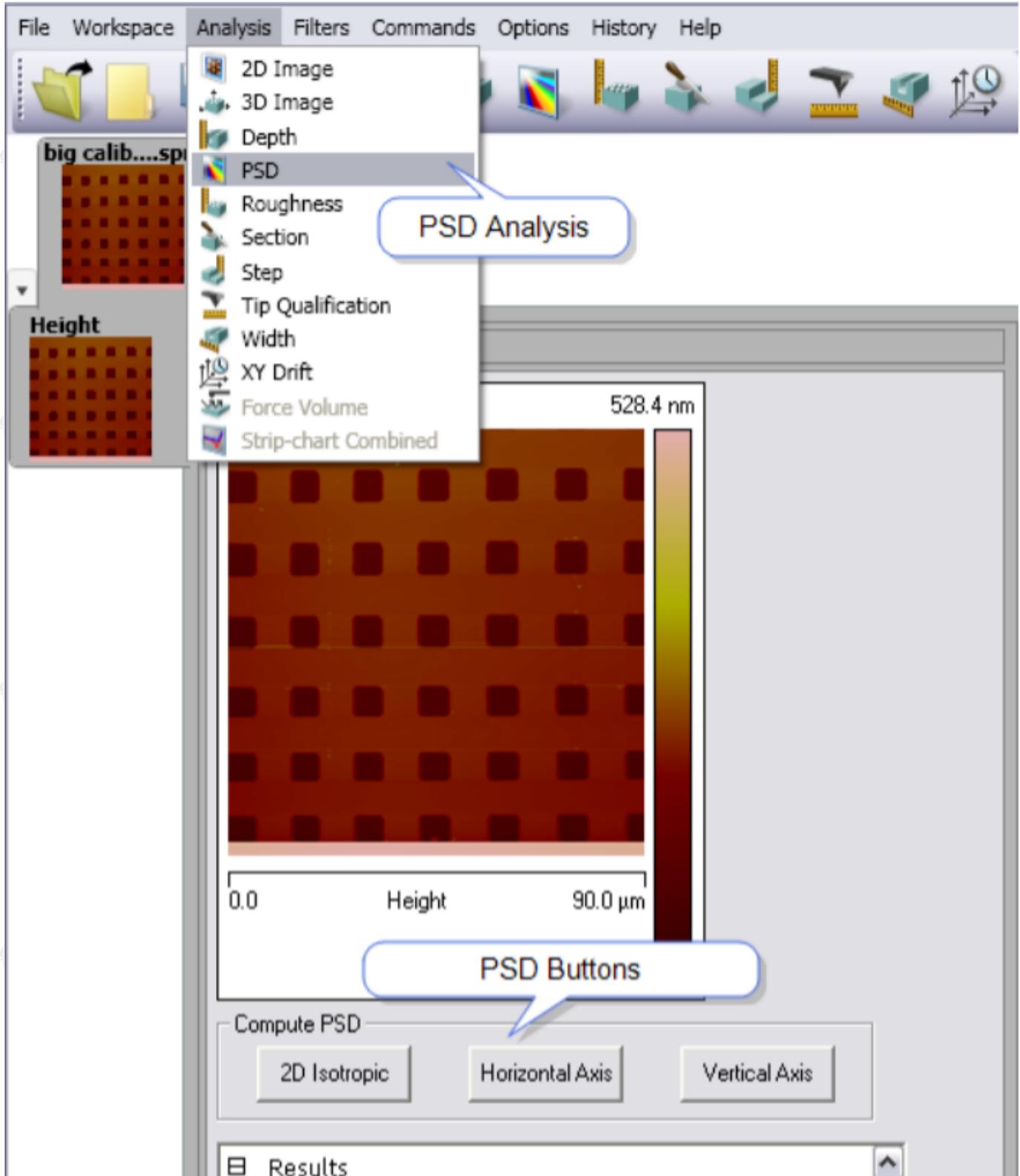


图9.3.1 渐进数据采样

每次采样都会遍历给定频率 $f$ 下的“数据桶”。由于采样在图象中心进行，因此最高采样频率限定为 $N/2L$ ，从而设定了PSD谱图的带宽上限（即能奎斯特频率）。带宽下限为 $1/L$ 。注

## 9.4 PSD分析步骤

1. 在主窗口右侧的浏览窗口中选择待分析文件，双击打开。
2. 在菜单栏中选择Analysis > PSD或在图标工具栏中点击PSD图标，如图34所示，打开PSD窗口。



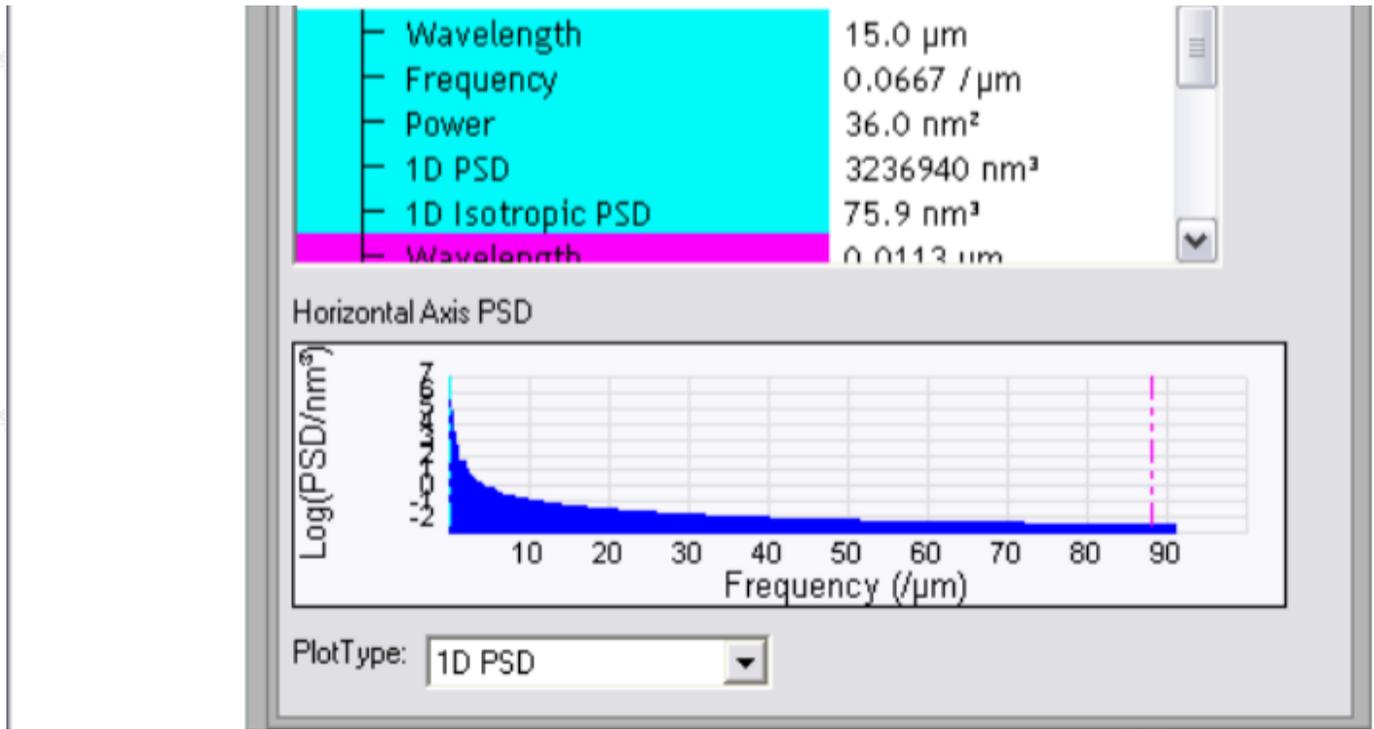


图9.4.1 PSD菜单和窗口

## 9.5 PSD界面

### 9.5.1 计算 PSD

打开PSD分析窗口后，点击计算PSD栏中的相应按钮选择想要进行的PSD分析类型。

- 2D Isotropic——执行二维PSD分析
- Horizontal Axis——执行沿着X轴方向的一维PSD分析
- Vertical Axis——执行沿着Y轴方向的一维PSD分析

选定后即开始计算，显示出得到的PSD柱方图，并将相关结果列于其下的结果窗口中。

### 9.5.2 结果展示

结果窗口中列举了PSD分析中得到的参数及其结果。靛青色背景的参数对应于PSD柱方图中相同颜色游标所指定的区域。同理，粉色背景的参数对应于粉色游标。用户可以在结果窗口空白处点击鼠标右键，选择Copy Text将分析结果复制到剪贴板，并可粘贴到其它应用中。

在窗口空白处点击鼠标右键，菜单中选择Show All，则会显示所有的参数，同时，在每个参数之前有一个勾选框，可以决定在非Show All状态下是否显示这些参数。

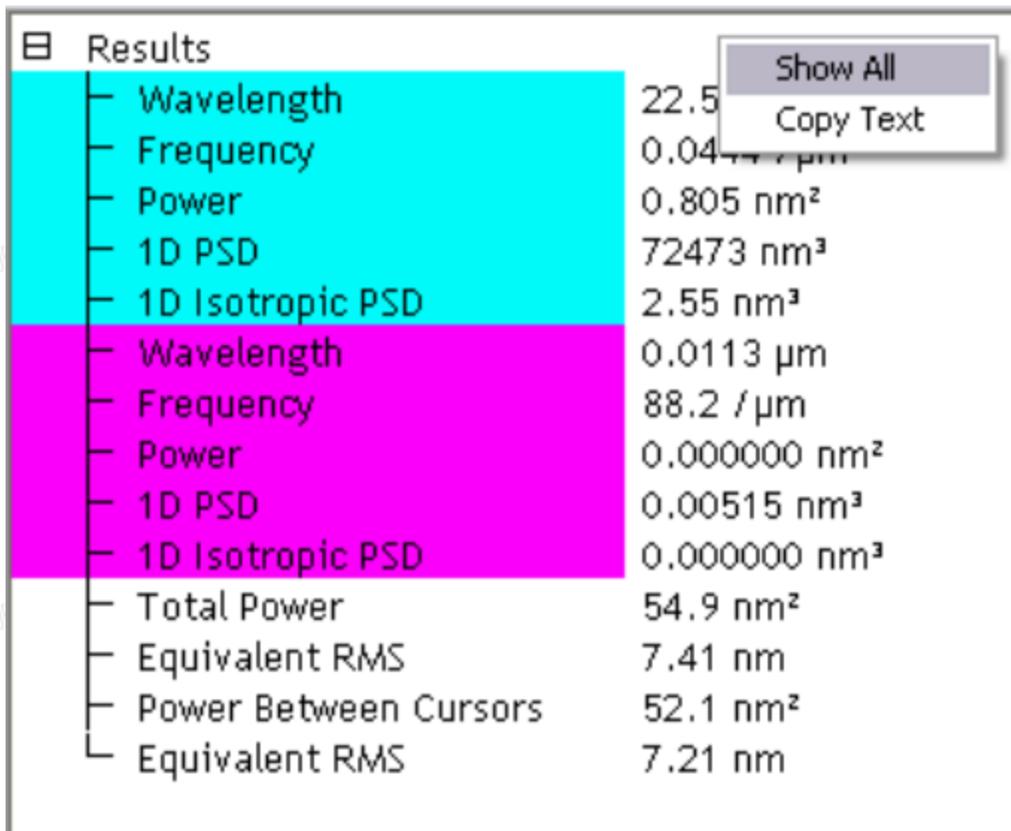


图9.5.2.1 PSD结果窗口

表17. PSD参数

参数	描述
Wavelength	柱方图上当前游标位置对应的波长（周期）
Frequency	柱方图上当前游标位置对应的空间频率
Power	柱方图上当前游标位置对应的功率值（nm <sup>2</sup> ）
1D PSD	一维PSD（nm <sup>3</sup> ）
1D Isotropic PSD	一维各向同性PSD（nm <sup>3</sup> ）
2D Isotropic PSD	二维各向同性PSD（nm <sup>4</sup> ）
Total Power	全谱的总功率
Equivalent RMS	全谱功率的均方根平均值
Power Between Cursor	柱方图上两游标直接框选谱图区域的总功率
Equivalent RMS	柱方图上两游标直接框选谱图区域的功率均方根平均值

### 9.5.3 更改PSD谱图显示

PSD柱方图图形化显示了PSD分析的结果。谱图中有两个颜色不同的游标分别对应结果参数中相应背景颜色的数值。在谱图中点击游标按住鼠标左键可以左右拖拽游标从而改变其位置。在两条游标之间任意区域按住鼠标左键可以同时左右拖拽两条游标。在柱方图上点击鼠标右键可以打开谱图显示窗口，进行自定义修改。

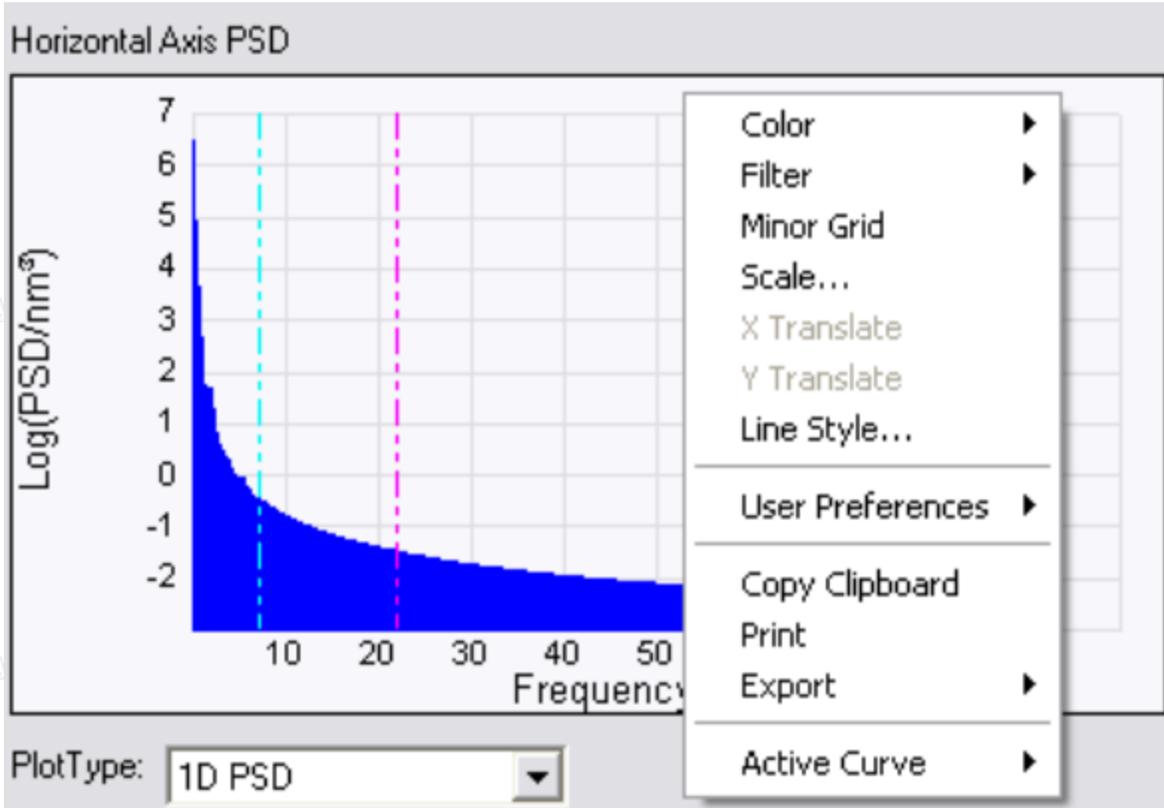


图36. PSD谱图窗口

## 10 粗糙度 (Roughness)

粗糙度分析能获得一些列表面的统计结果，包括经典的粗糙度数值、高于阈值区域的粗糙度数值 (Peak) 以及基平面分析 (Zero Crossing)。分析结果中以“Image”开头的参数表示全图的粗糙度结果，相应的无“Image”开头的参数表示选定区域的结果。

绝大多数粗糙度测量都要求对图像进行拉平处理。参考拉平 (Flatten) 和面拟合 (Plane Fit) 部分。

### 10.1 粗糙度理论

粗糙度分析，会计算图像中每个像素点高度值的统计结果。面拟合和拉平操作重新定向了各像素点，这种操作会剧烈影响表面粗糙度结果，尤其是在包含宽的共平面的特征结构。更多信息请参考面拟合部分。

当对全图或某一部分进行粗糙度分析后，依据ASME和ISO计量标准，软件会自动进行一阶面拟合，然后计算粗糙度 (只有Image Raw Mean和Raw Mean是从原始数据计算得到的)。为了避免不合适的面拟合造成错误的粗糙度分析，用户应该选择感兴趣的区域进行分析，或只扫描该区域。

许多粗糙度结果会受到在图像采集过程中离线面拟合参数（OL Plane Fit）的影响。这个参数有三个选项：None，Offset和Full。None选项代表对存下来的数据不做任何处理，则Raw Mean和Mean相同。Offset选项代表对存储数据进行零阶面拟合处理，即每点扣除同一数值使所有像素点的高度平均值为0。Full代表对存储数据进行一阶面拟合处理。

平均粗糙度（Ra）是最常用的粗糙度参数。图10.1.1展示了两个Ra值相同的表面形貌。

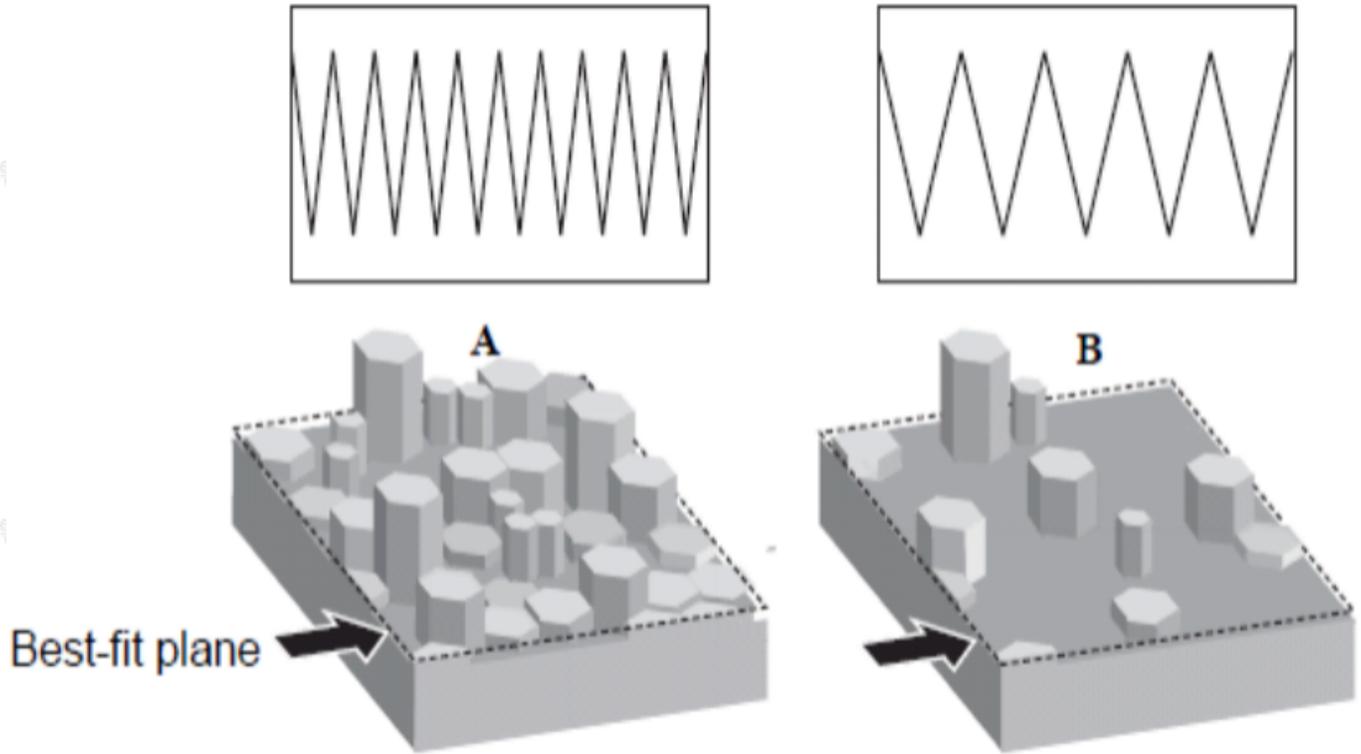


图10.1.1 粗糙度

类似的，另一个基于像素点高度均方根平均值的粗糙度参数，Rq，也更多地表征了各点高度分布，而没有考虑具有空间频率的表面特征分布。

如图37所示，A图像中的表面有更密集的凸起，即特征的空间频率更高。B图像中的表面平均高度虽然与A相同，但凸起分布要稀疏得多，即空间频率低。两个表面得Ra或Rq都相等。若要区分两种表面，需要使用PSD分析。

## 10.2 粗糙度参数

### 10.2.1 反选框输入参数

反选框可用于在图像中剔除不想包括的部分。

表18. 反选框输入参数

参数	描述
Use Thresholds	使用设定的阈值高度剔除不想包括的数据 注：当图样分析开启时，Use Thresholds默认为开启（On）

Threshold Height	<p>阈值高度</p> <p>注：在深度柱方图上移动游标可修改阈值高度</p> <p>注：当图样分析开启时，PSA中的Bottom参数会被用作阈值高度</p>
Feature Direction	依据表面形貌凸起或凹陷，选择方向为上（Above）或下（Below）
Number Histogram Bins	<p>滤波处理后柱方图上数据点数目。</p> <p>注：不必比像素点数目多。</p>
X Axis	<p>Relative：以最高点为参考进行做图。比最高点低的点，深度越大。</p> <p>Absolute：以实际深度进行做图。</p>
Boundary Particles	<p>设定：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Yes——包含图象边缘的颗粒</li> <li>· No——不包含</li> </ul>
Non-Representative Particles	<p>设定：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Yes——所有阈值高度上的颗粒都被包含</li> <li>· No——过滤掉小于Particle Filter Sigma的颗粒</li> </ul>
Particle Filter Sigma	用于对颗粒进行过滤处理，数值越小，过滤掉的颗粒越多

### 10.2.2 峰值输入参数

粗糙度指令中有两种非常重要的统计方法：峰值（Peak）和零截面（Zero Crossing）。

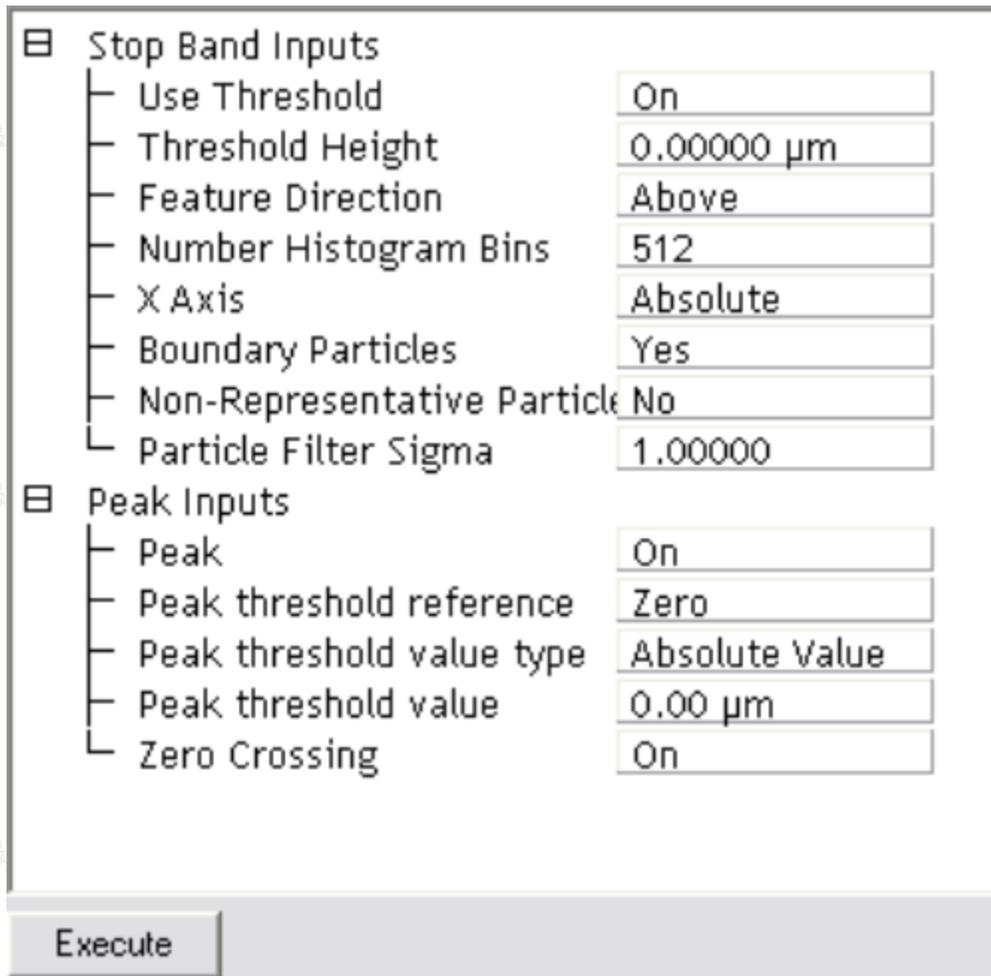


图10.2.2.1 粗糙度输入参数

当被设为开启时，峰值功能将图像中的高的部分从背景中分离出来进行分析。峰值特征用峰阈值 (Peak Threshold) 参数确定，开启后，下列参数将被激活：

表19. 峰值设置

参数	描述
Peak threshold reference	设置阈值参考，是相对于最低点 (Zero)，还是最高峰 (tallest)
Peak threshold value type	设置阈值类型，是绝对距离值 (Absolute value)，还是高度RMS值得百分比 (RMS%)
Peak threshold value	阈值数值

当峰值模式被激活时，如下统计结果将被计算：

- Rz

- Rz count
- Peak Count
- Valley Count
- Max peak ht (Rp)
- Av. Max ht (Rpm)
- Max depth (Rv)
- Av. max depth (Rvm)

### 10.2.3 零截面

零截面是指图中Z值为0的点，激活后结果中的线密度值（Line Density）则统计零截面点总数占选区总点数的百分比。

## 10.3 结果参数

本部分将介绍粗糙度分析的结果参数，这些参数的定义是依据美国机械工程学会（American Society of Mechanical Engineers）的ASME B46.12（“Surface Texture: Surface Roughness, Waviness and Lay”）。

表20. 粗糙度结果

参数	描述
Image Raw Mean	除去反选区域的素点Z值的平均值，该值只有在存图时OL Plane Fit选为None时才会被计算
Image Mean	除去反选区域的像素点Z值的平均值，该值在存图时OL Plane Fit不为None时就会被计算
Image Z Range	进行一阶面拟合前图像最高点和最低点的高度差
Image Surface Area	全图的表面面积，又图上邻近三个点组成的三角形的面积之和
Image Projected Surface Area	扫描范围面积
Image Surface Area Difference	Image Surface Area和Image Projected Surface Area之差
Image Rq	像素点Z值的均方根平均值 $R_q = \sqrt{\frac{\sum Z_i^2}{N}}$
Image Ra	像素点Z值的绝对值平均值

	$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  Z_i $
Image Rmax	进行一阶面拟合后图像最高点和最低点的高度差
Raw Mean	选定区域像素点Z值的平均值，该值只有在存图时OL Plane Fit选为None时才会被计算
Image Mean	选定区域像素点Z值的平均值，该值在存图时OL Plane Fit不为None时就会被计算
Z Range	进行一阶面拟合前选定区域图像最高点和最低点的高度差
Surface Area	选定区域的表面面积，又图上邻近三个点组成的三角形的面积之和
Projected Surface Area	选定区域的扫描范围面积
Surface Area Difference	Surface Area和Projected Surface Area之差
Rq	选定区域的像素点Z值的均方根平均值 $R_q = \sqrt{\frac{\sum Z_i^2}{N}}$
Ra	选定区域像素点Z值的绝对值平均值 $R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  Z_i $
Rmax	进行一阶面拟合后选定区域最高点和最低点的高度差
Skewness	偏度表征图像像素点关于平均值数据的对称性，其值定义为： $\text{Skewness} = \frac{1}{R_q} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^3$ 其中Rq为均方根粗糙度。偏度是一个无量纲量，通常是以其符号来进行评估。当其为0时，则数据点在平均值附近均匀分布。偏度极大地偏离0，说明数据点分布不对称，例如在一个平面上有一小的尖峰（偏度>0）或小的深坑（偏度<0）

Kurtosis	峰度是一个无量纲量，用来评估数据在平均值附近分布的形状。其值定义为： $\text{Kurtosis} = \frac{1}{R_q^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^4$ <p>图像上来说，峰度说明了数据在平均值附近是平滑地或尖锐地分布</p>
Rz	最高点和最低点的Z值之差的平均值，样本数目由Rz Count定义
Rz Count	用来计算Rz的最高点和最低点的样本数目
Peak Count	波峰即最高点的数目
Valley Count	波谷即最低点的数目
Max Peak ht (Rp)	分析区域内最高峰的Z值
Average Max Height (Rpm)	峰值的平均值
Maximum Depth (Rv)	分析区域内最低峰的Z值
Average Max Depth (Rv)	谷值的平均值
Line Density	零截面点的线密度。一个零截面点是指Z值为0的像素点。这个线密度值是指选定区域的零截面点数目除以选定区域的线数。
Box X Dimension	选定区域的X方向长度
Box Y Dimension	选定区域的Y方向长度

### 10.3.1 S参数（表面粗糙度参数）

S参数描述表面的三维性质。参考ISO 25178获得更多信息。

表21. S参数-高度

参数	描述
Sa	整个三维表面的绝对值平均值 $S_a = \frac{1}{A} \iint_A  Z(x, y)  dx dy$

Sk <sub>u</sub>	整个三维表面的峰度。 $S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \frac{1}{A} \iint_A (Z(x,y))^4 dx dy$
Sp	三维表面最高点的Z值
Sq	三维表面的均方根平均值 $S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A (Z(x,y))^2 dx dy}$
Ssk	整个三维表面的偏度 $S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \frac{1}{A} \iint_A (Z(x,y))^3 dx dy$
Sv	三维表面最低点的Z值
Sz	三维表面像素点Z值的极差，即Sp - Sv

表22. S参数-功能

参数	描述
Sbi	Sbi是表面Bearing指数，定义为： $S_{bi} = \frac{S_q}{TrueHeight(0.05)}$
Sci	Sci是核心流体保留系数 $S_{bi} = \frac{\left( \frac{V_v(h_{0.05}) - V_v(h_{0.8})}{A} \right)}{S_q}$
Svi	Sci是波谷流体保留系数

	$S_{bi} = \frac{\left(\frac{V_v(h_{0.8})}{A}\right)}{S_q}$
Sm	<p>Sm是表面材料体积，即从波峰至10%bearing面积处的体积</p> $S_{bi} = \frac{\left(\frac{V_m(h_{0.10})}{A}\right)}{S_q}$
Sc	<p>Sc是核心体积</p> $S_{bi} = \left(\frac{V_v(h_{0.05}) - V_v(h_{0.8})}{A}\right)$
Sv	<p>SV是表面体积，即从80%bearing面到100%bearing面的体积</p> $S_{bi} = \left(\frac{V_v(h_{0.05}) - V_v(h_{0.8})}{A}\right)$

表23. S参数-混合

参数	描述
Sdq	<p>Sdq是表面斜率均方根平均值，评估各个方向，定义为：</p> $S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \left( \left( \frac{\partial Z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right) dy dx}$
Sdr	<p>Sdr是发展界面面积比，表示由表面结构贡献的表面积相对于平面面积的百分比：</p> $S_{dr} = \frac{(TextureSurfaceArea - CrossSectionalArea)}{CrossSectionalArea}$
Sds	<p>Sds是峰密度，表示单位面积内峰的数目。峰值来源于波峰，波峰定义为在相邻8个像素点中的最高点。而峰值是指三维表面内分开至少1%选定面积的波峰，同时，峰值要比平均值高Sz的5%：</p>

	$S_{ds} = \frac{\text{Number of Peaks}}{\text{Area}}$
Ssc	<p>Ssc是平均峰曲率：</p> $S_{bi} = \frac{1}{N} \int \int_{\text{SummitArea}} \left( \frac{\partial^2 Z(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z(x, y)}{\partial y^2} \right) dy dx$

表24. S参数-空间

参数	描述
Sal	<p>Sal为自动相关长度。它是一种表面距离，使得新的位置与初始位置有最小的相关性。</p> <p>Sal = Length_Of_Fastest_Decay_Of_Auto_Correlation_Function_To_0.2_In_Any_Direction</p>
Std	<p>Sdr是结构方向，由表面角功率谱密度函数绝对。它测量了表面结构区域的相对于y轴的方向。</p>
Std Minor	<p>它表示表面结构分布中第二多的方向。</p>
Str	<p>结构长宽比，用来表征表面结构的各向同性和方向性。</p>

## 11 截面 (Section)

截面功能展示二维图像上最多六条参考线的数据图。每条参考线上数据点的图像以及快速傅里叶转换 (FFT) 结果将在一个新的窗口中展示。每条参考线图像的粗糙度也会被分析。

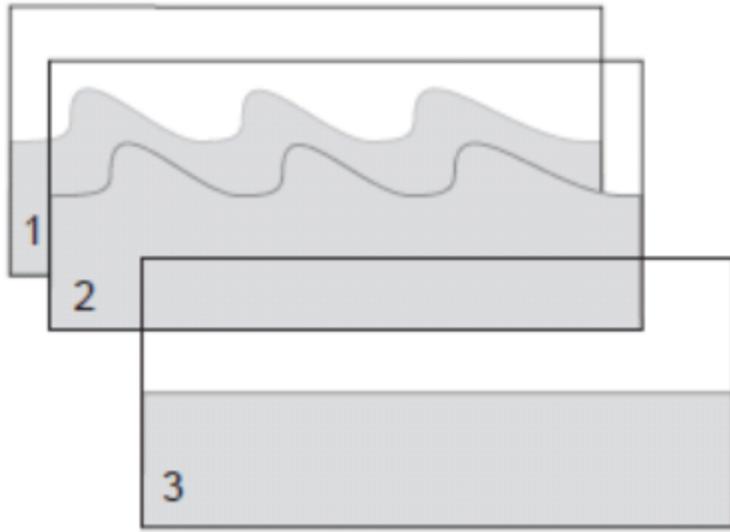
截面功能可能是使用频率最高的也是最易进行的分析功能。为了得到准确的结果，确保在截面分析前正确地进行拉平、滤波等处理。

### 10.1 表面截面

为进行样品表面分析，可进行切截面操作。截面功能并不是用来分析表面之下的样品内部信息，而是用来分析表面本身。在进行截面分析时，拿到合适的表面形貌非常重要。表面形貌以及取向的不同，截面分析结果会大不相同。

布鲁克中国客户服务

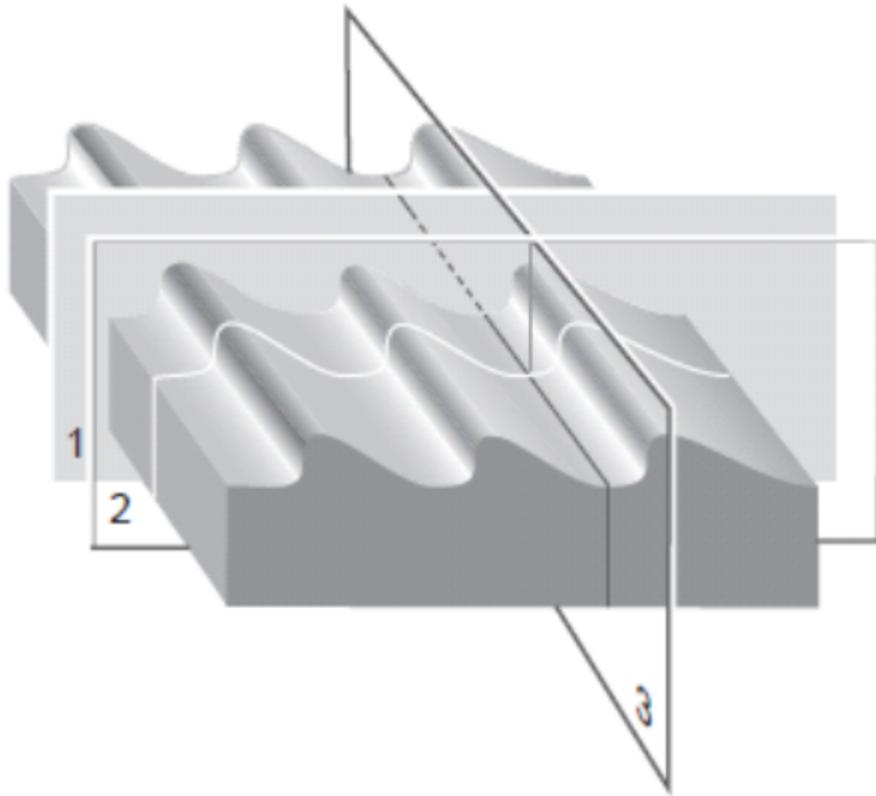
51711



布鲁克中国客户服务

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务



布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

图10.1.1 截面分析

布鲁克中国客户服务中心版权所有

图10.1.1中的光栅表面被沿着三个轴进行切割。截面1和截面2沿着垂直光栅方向切割，展示光栅的凸起和周期（截面1和截面2利用两条截面线进行比较，或在表面移动截面线游标进行比较）。截面3沿着光栅方向，由于其取向，获得的截面图要平坦得多。

截面功能获得表面上的特定的线信息，并在截面图中进行展示。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

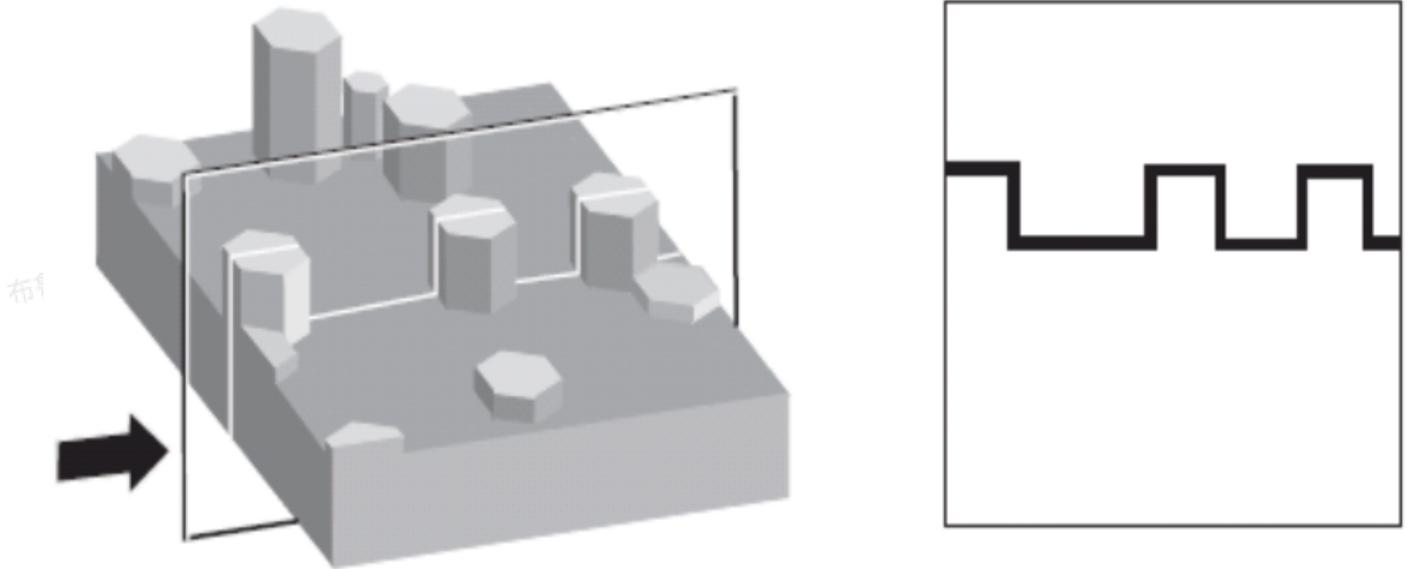


图10.1.2 截面图

通常来说，截面分析能用来直接测量表面特征结构的深度。选择游标类型（线、框或者水平线），调整其取向,用户可以得到：

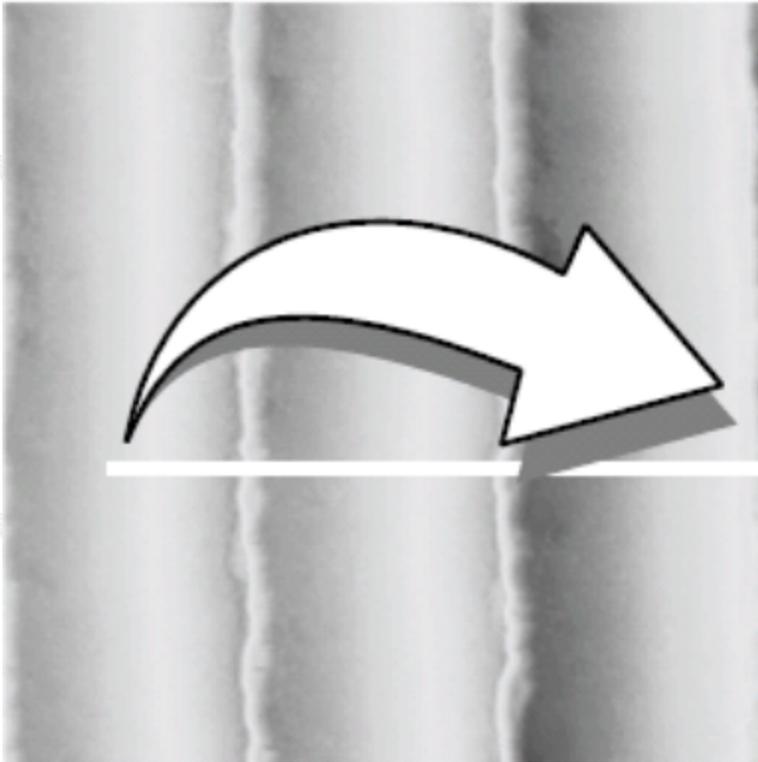
- 竖直距离（深度）、水平距离以及指定的两点或多点间的角度。
- 截面线上的粗糙度，包括，RMS， $R_a$ ， $R_{max}$ 以及 $R_z$ 。
- 截面线的FFT结果。

## 10.2 截面步骤及界面

在进行截面分析之前，确保图像已经进行了合适的拉平处理以去除倾斜和扭曲。这个步骤对于角度测量中尤其重要。请参考拉平处理及面拟合操作。

截面操作步骤为：

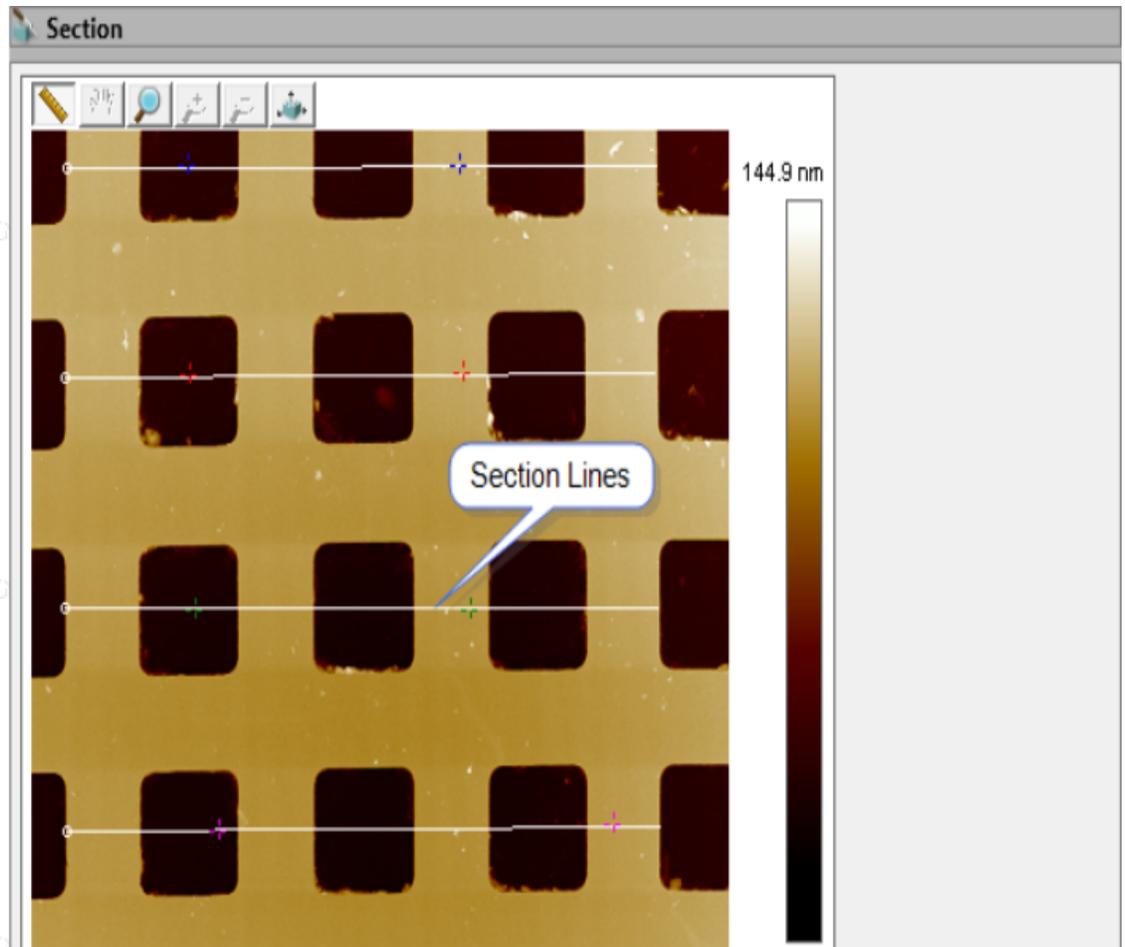
1. 在浏览窗口中打开待分析的图像文件。进行合适的拉平或面拟合处理。
2. 在菜单栏中点击Analysis > Section或工具栏中点击截面分析图标。
3. 在图像上感兴趣区域按住鼠标坐标进行拖拽以画出截面线游标。



Use the mouse to drag a line cursor across the image.

图10.2.1 利用鼠标拖拽创建截面线

4. 画好游标后，图像下方会出现所画游标处的截面图线以及FFT谱图。



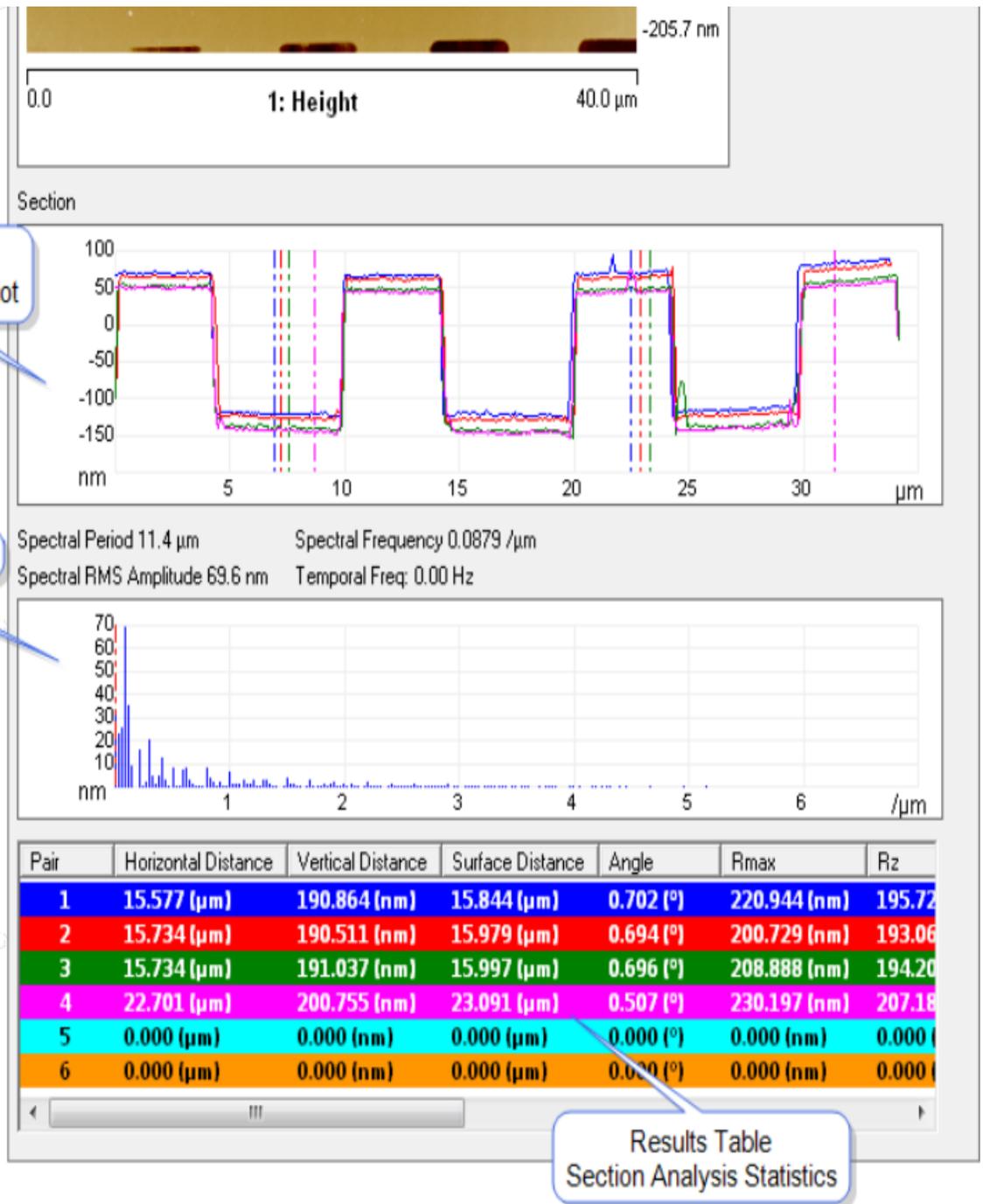


图10.2.2 截面分析菜单及窗口

- 左右移动纵向游标至感兴趣位置。
- 截面图线中有两个带颜色的游标，对应于图像中游标线上相同颜色的游标点。
- 同理，可以在图像上画其它的截面线。通过左键拖拽可以移动游标线，右键点击可以删掉选中的游标线。
- 右键点击截面图线的游标线点击设定记号宽度（Set Marker Width）能够用来计算选定游标处周围多个像素点的平均值。将鼠标左键置于两游标中间能够成对地移动游标。

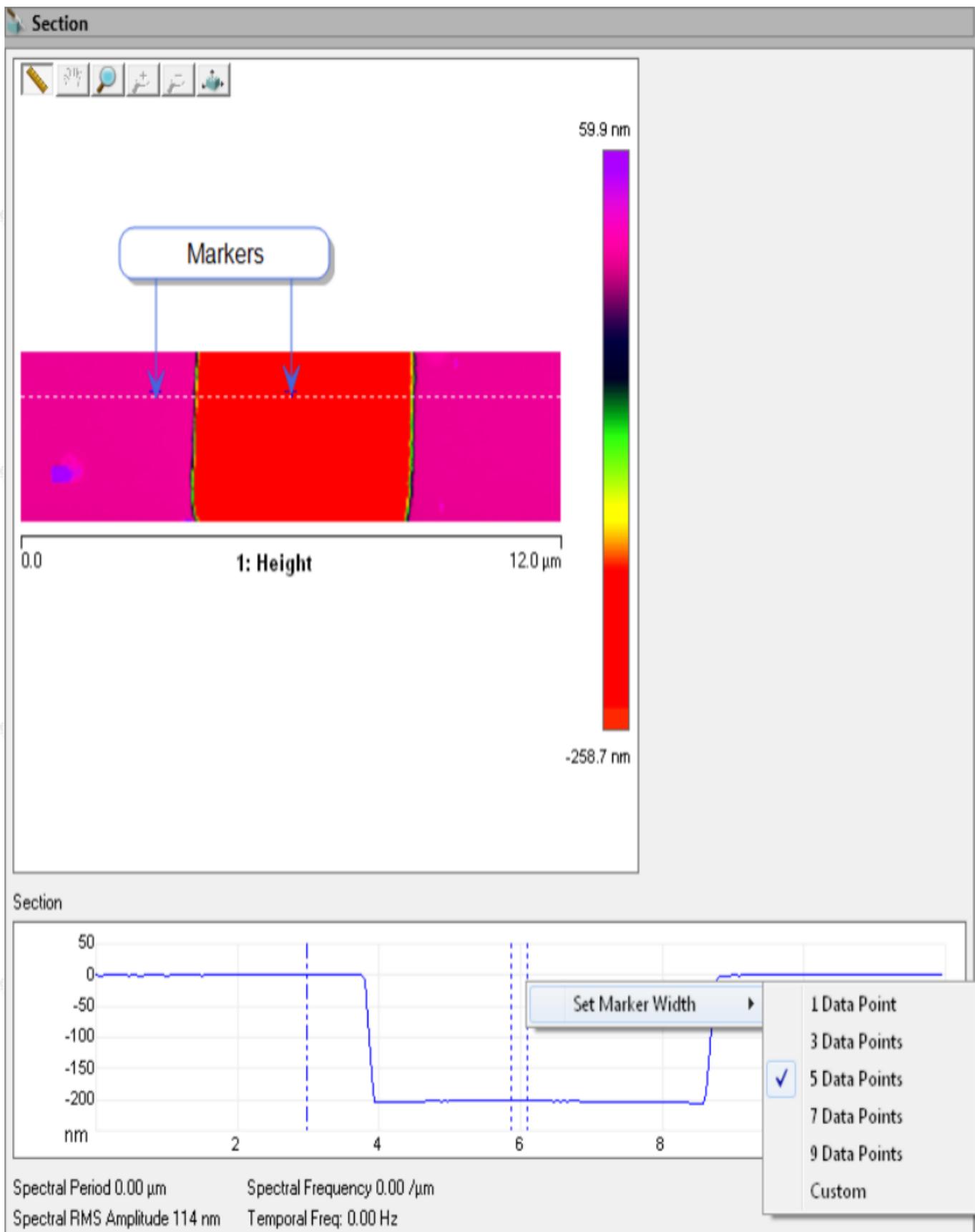


图10.2.3 设置截面数据平均结果

### 10.3 截面分析结果

图像窗口下方中会显示游标所选择的截面线区域的粗糙度结果。每一对游标选中区域的数据结果以相同颜色在数据栏中显示。

在结果栏点击鼠标右键会弹出如下窗口，用来自定义所显示的结果参数类型。

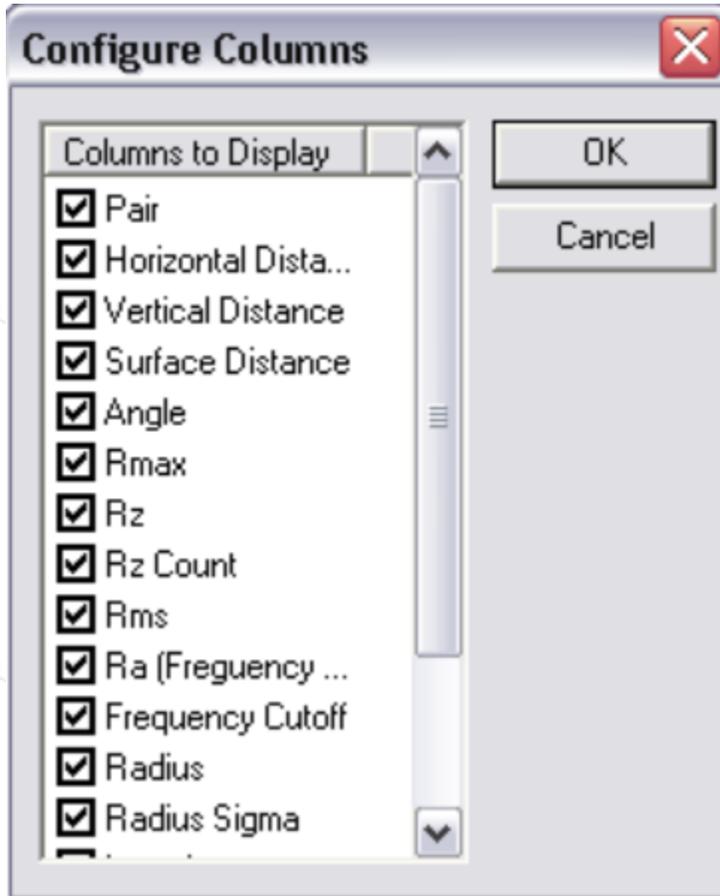


图10.3.1 设置结果栏

表25. 截面分析结果

参数	描述
Horizontal Distance	两游标间的水平距离。
Vertical Distance	两游标间的垂直距离。
Surface Distance	两游标间沿着截面线行走的距离。
Angle	两游标交点处虚拟连线相对于水平线的角度。
R <sub>max</sub> (Maximum Height)	两游标间截面线的最高点与最低点高度差。
R <sub>Z</sub> (Ten-Point Mean Roughness)	两游标间五对最高点与最低点高度差之平均值。若不足五对，则取能取到的最多的值。
RMS(Standard Deviation)	两游标间截面线Z值的标准偏差。

	$RMS = \sigma = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_{ave})^2}{N}}$
Rz Count	用来计算Rz的最高点和最低点的样本数目。
Ra(Mean Roughness)	两游标间截面线的绝对值平均值。
Frequency Cutoff(μm)	截止频率指在FFT上使用的高通滤波器的截止频率。改变FFT图上的游标会影响高通滤波器的截止长度，因而会影响计算的粗糙度结果。
Radius	游标间截面线用圆拟合的圆半径。
Radius Sigma	半径拟合的均方根误差。
Length	粗糙度线的长度。
Spectral Period	FFT图上游标对应的空间周期。
Spectral Frequency	FFT图上游标对应的空间频率。
Spectral RMS Amplitude	FFT图上游标对应的RMS振幅值。

### 10.3.1 游标线的鼠标操作

- 按住鼠标左键，拉——设定游标线起点，拖拽后沿指定方向移动。
- 放下鼠标左键——松开鼠标后即设定游标终点。则游标线上的截面线以及相应的FFT结果显示在下图中。
- 在游标线中心处点击按住鼠标左键可以整体移动游标线。
- 在游标线两端处按住鼠标左键可以旋转游标线。

### 10.3.2 矩形选框的鼠标操作（鼠标右键点击可进行选择切换至矩形选框）

- 第一次点击——设定矩形选框的中点，进行拖拽后可以沿鼠标移动方向扩展此选框。
- 点击选框——在选框内进行点击可以移动此选框，在选框边缘处点击可以重新更改选框范围。
- 按住Shift键并在选框内按住鼠标左键选择可以使矩形选框以中点为心进行旋转。

### 10.3.3 水平线的鼠标操作

- 按住鼠标左键——在鼠标处画一条水平游标线。
- 点击游标线上下拖拽可以在图像中上下移动游标线。

### 10.3.4 使用格框表示

截面线图和FFT图中的测量游标可以左右移动。在测量游标上按住鼠标左键，则鼠标游标变为左右双向箭头，指示可以左右拖拽游标改变测量游标的位置。在做图区域右键单击能显示格框参数菜单：这些参数调整能改变做图显示。

表26. 作图形式参数

参数	描述
Color	能改变游标、文字、背景、格框以及记号的颜色
Filter	通常用来进行Profiler扫描 Type: 选择None, Mean (默认值), Maximum或者Minimum Points: 选择4k, 8k (默认值), 16k或者32k
Minor Grid	显示背底框格
Scale	运行用户调节坐标轴, 可在 auto scale (自动调节坐标轴)、curve mean (标尺平均值) 或自定义范围中选择
Line Style	改变曲线显示形式, 可在connect (连接)、fill down (向下填充)、点、圈、三角、方格、菱形或十字叉等形式
User Preference	Restore: 恢复为软件初始设定 Save: 保存用户设定, 这个设定会变为新的默认值
Copy Clipboard	复制图线至剪贴板
Print	将当前界面图象输出到打印机
Export	将数据以bitmap、JPEG或者数据点形式导出
Active Curve	决定当前分析的图线

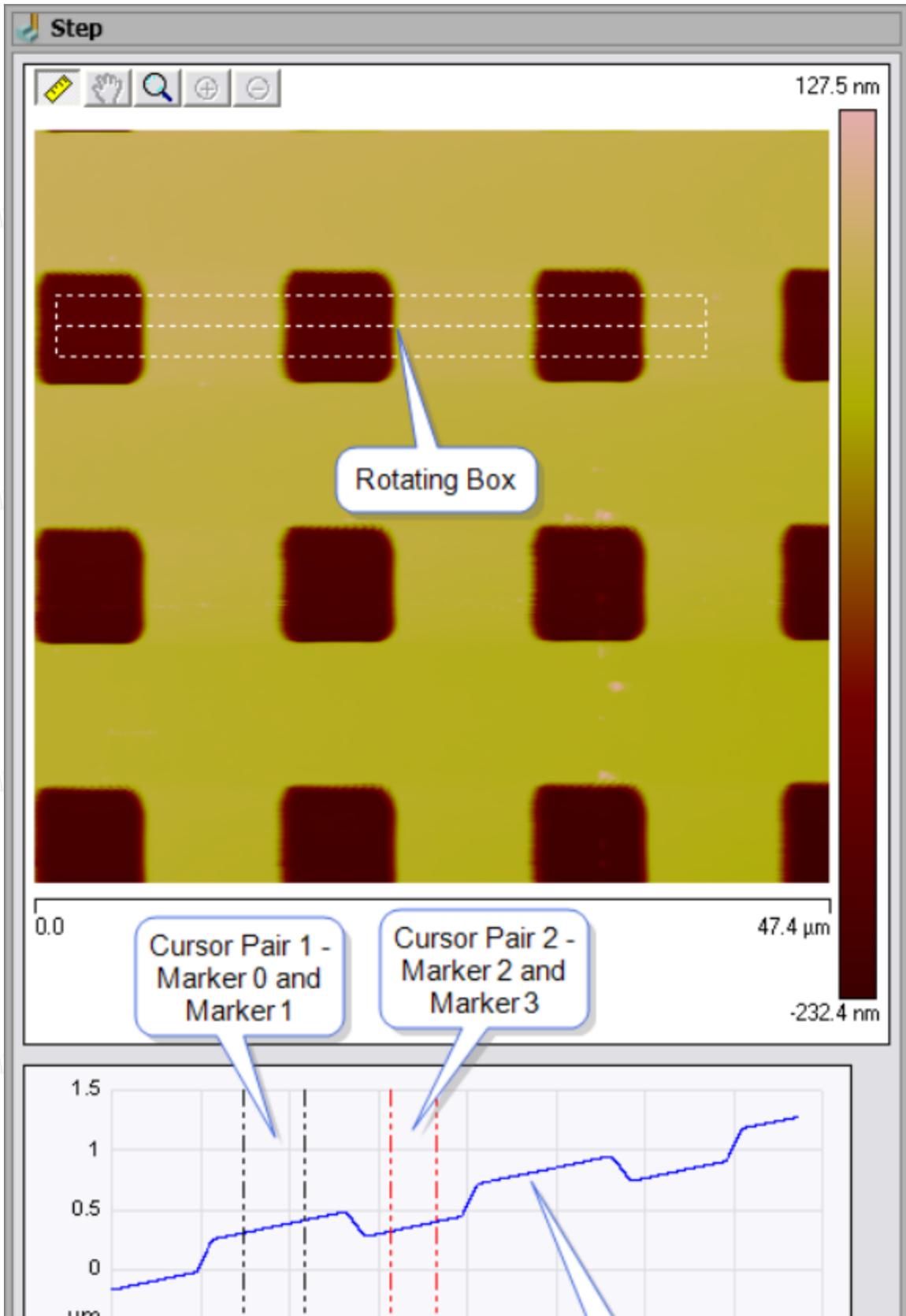
## 12 台阶 (Step)

台阶分析测量样品表面两处区域（台阶）的相对高度差，例如测量薄膜厚度或刻蚀深度。台阶分析与截面分析类似，但操作上更加简便。在台阶分析界面中的二维图像上用鼠标画上选框，软件会绘制选框区域内沿参考线的高度分布图。

### 12.1 台阶分析步骤

1. 在软件窗口右侧的浏览窗口中双击欲分析的样品打开。
2. 在菜单栏中选择Analysis > Step或在工具菜单栏中点击台阶分析图标，进入台阶分析界面。
3. 分析结果界面包括打开的二维图像和高度线图，用鼠标在图像上框选出矩形选框，则高度线图中则会显示选框内的平均高度分布。

4. 按住Shift键并在选框内按住鼠标左键选择可以使矩形选框以中点为心进行旋转。
5. 在图像下方的高度图中，可插入两对游标线（一对红色，一对黑色）在图中移动，用来定义两个台阶。将鼠标移至Y轴处按住鼠标左键向右拖拽可调出游标。可用个此法调出另一个游标，一对游标中间处的高度图即为一个台阶。再用同样的方法定义另一个台阶。
6. 当个台阶由两对游标定义好后，系统会在结果窗口中显示两台阶间的高度差。



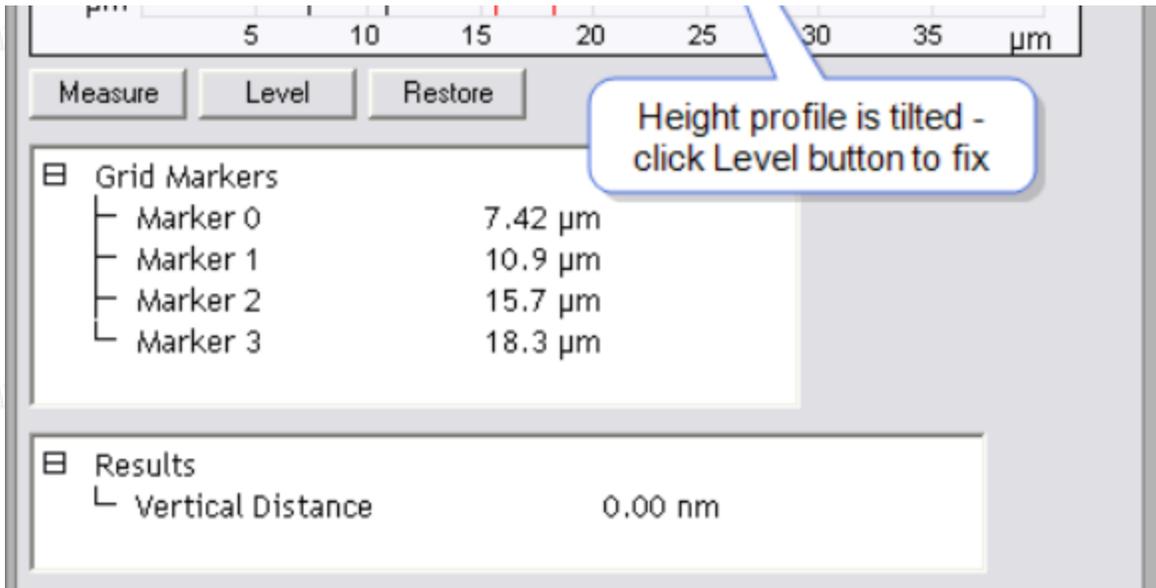
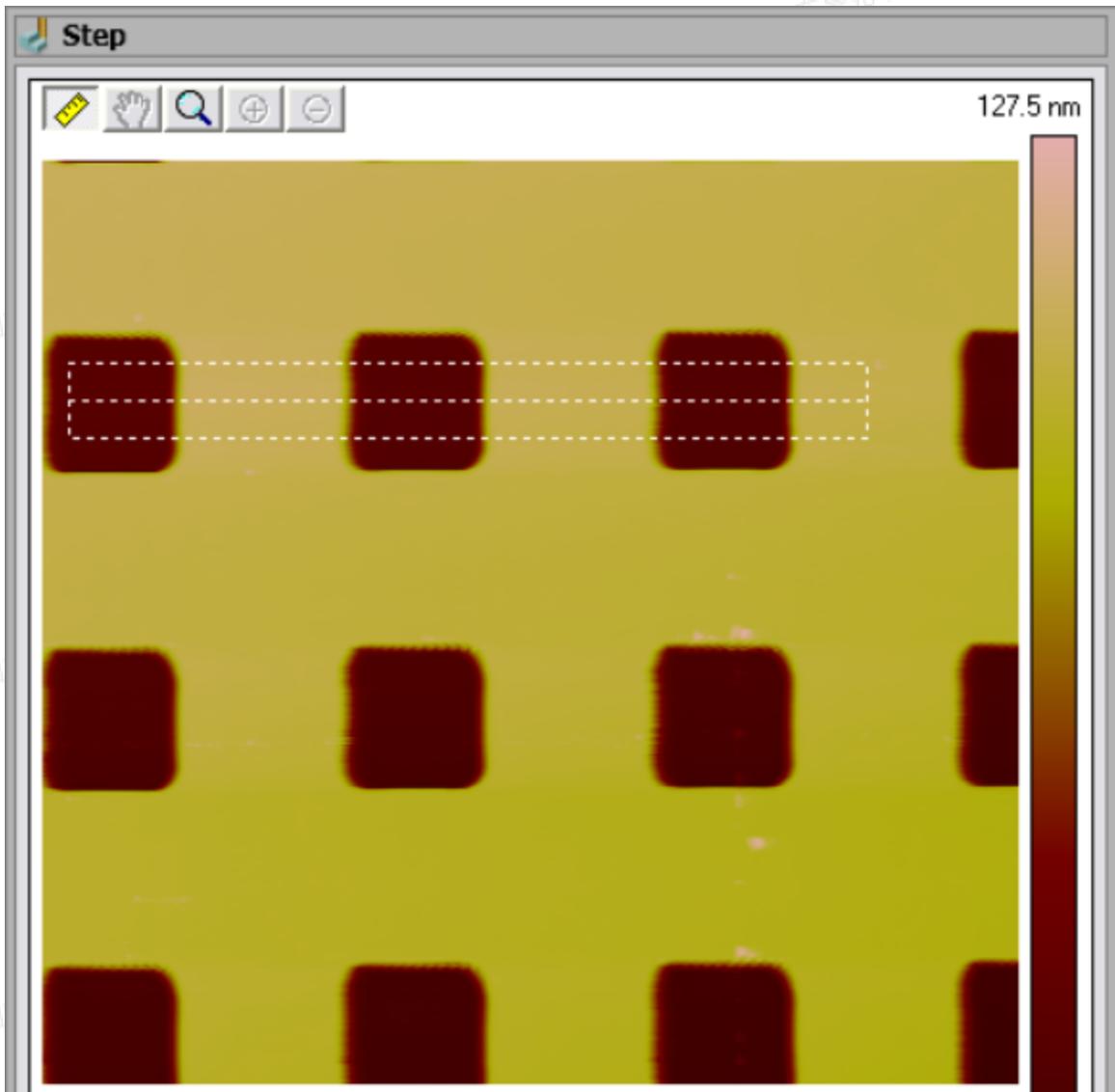


图12.1.1 未拉平的台阶分析窗口

7. 如果高度线图是倾斜的，则将两对游标移至两高度理应相同的台阶上，点击Level（拉平）按钮，图线斜率被拉至水平。



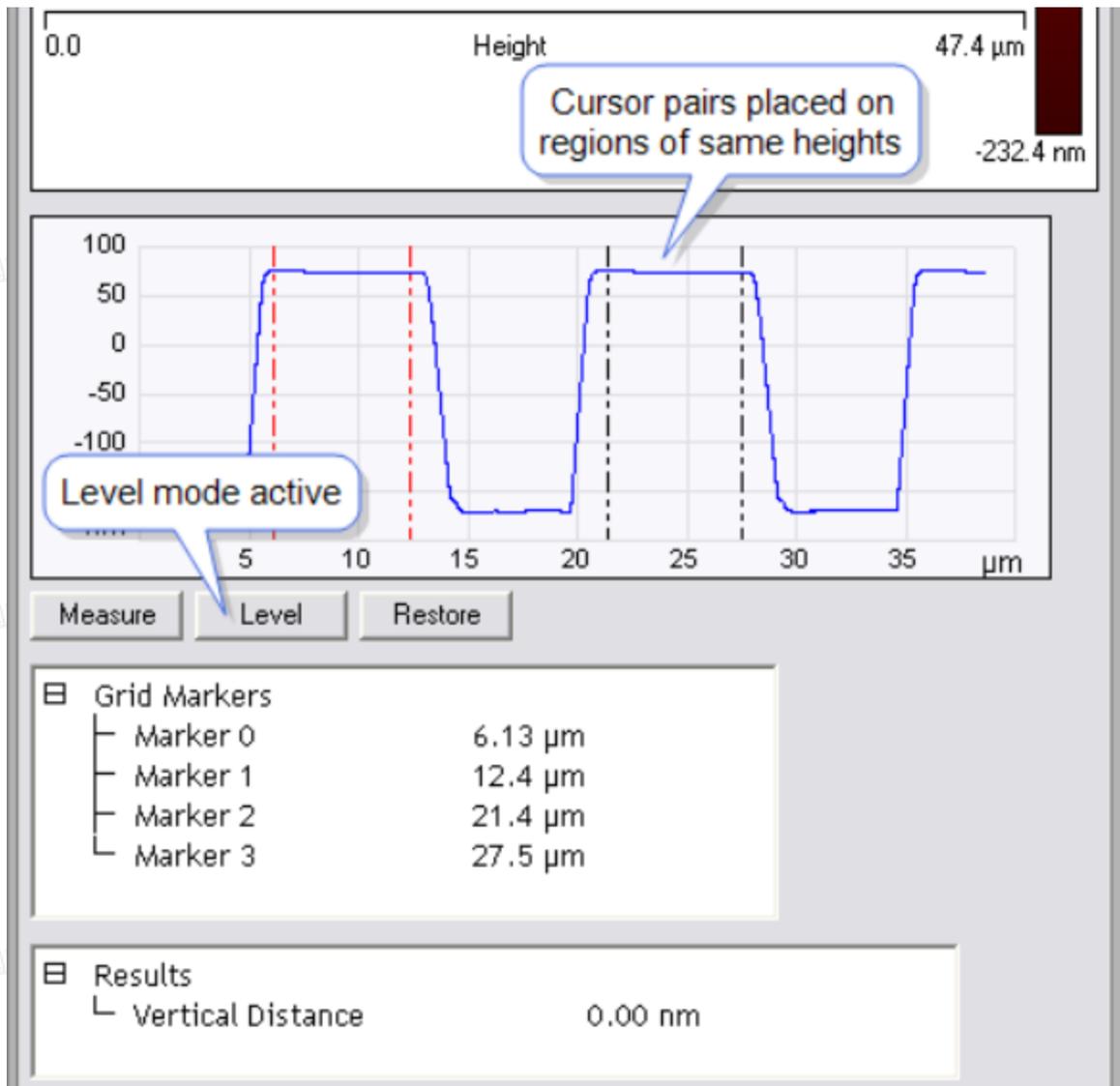
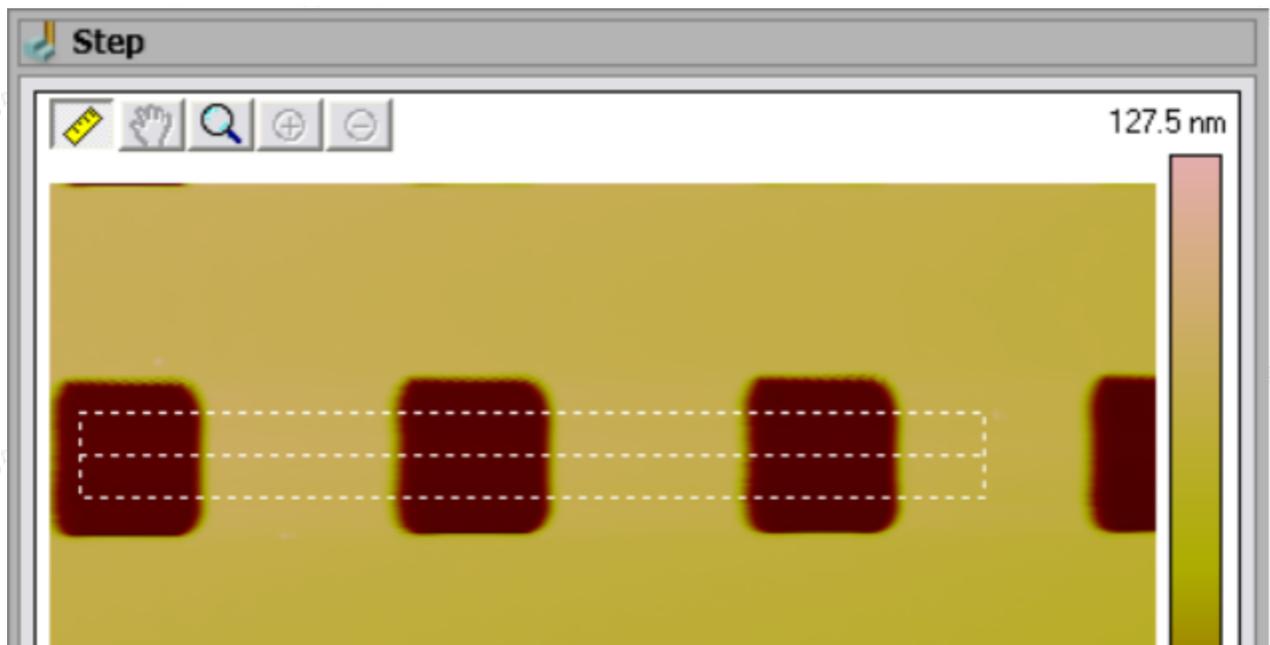


图12.1.2 拉平后的台阶分析窗口

8. 点击Measure，调整两对曲线，在结果中显示选定两台阶间的高度差。





## 台阶分析命令和结果参数

表27. 台阶分析结果参数

参数	描述
Measure	显示出选定台阶间的高度差
Level	拉平台阶，使每一个台阶内的点在同一高度上
Restore	撤消拉平处理的结果
Step Results	
Vertical Distance	选定台阶间的高度差

## 13 针尖分析 (Tip Qualification)

针尖分析功能是从合适的表征样品中估算针尖形状，并评判针尖状态。该功能包含两个部分，针尖估测和针尖分析。

### 13.1 针尖估测

针尖估测利用一个探针量测标准样品的图像模拟出针尖形貌。在估测时，形貌图上的区域峰结构被依此分析，最终给出针尖的三维模型。在每个峰上，各个方向的斜率都被计算出来，用来决定最小的针尖锋利程度（因为AFM高度图上的陡坡都比针尖斜率要缓）。这个过程遍及每一个区域尖峰，最终估算出一个最锋利的针尖。

#### 针尖分析

针尖分析利用针尖估测结果来决定探针是否可用。这个功能可以用来定期检查针尖磨损。利用针尖分析可以提高测量结果的可比性，保证长期稳定的样品测试。

### 13.2 针尖分析理论

当成像质量不佳或结果与实际不相符合时，需要进行针尖分析。尤其是当无法分辨比针尖更细的线或者拐角形特征时（注意，即使是钝针，也可以提供浅特征的Z向分辨率）。选择一根细的针尖对于分辨感兴趣的特征非常重要。

#### 针尖假象

AFM成像依赖于尖锐的针尖。针尖假象是指由于实际探针偏离于半径为0的理想值，不该出现特征的出现或应该出现特征的消失。例如，钝的针尖无法对窄的深沟槽进行成像。

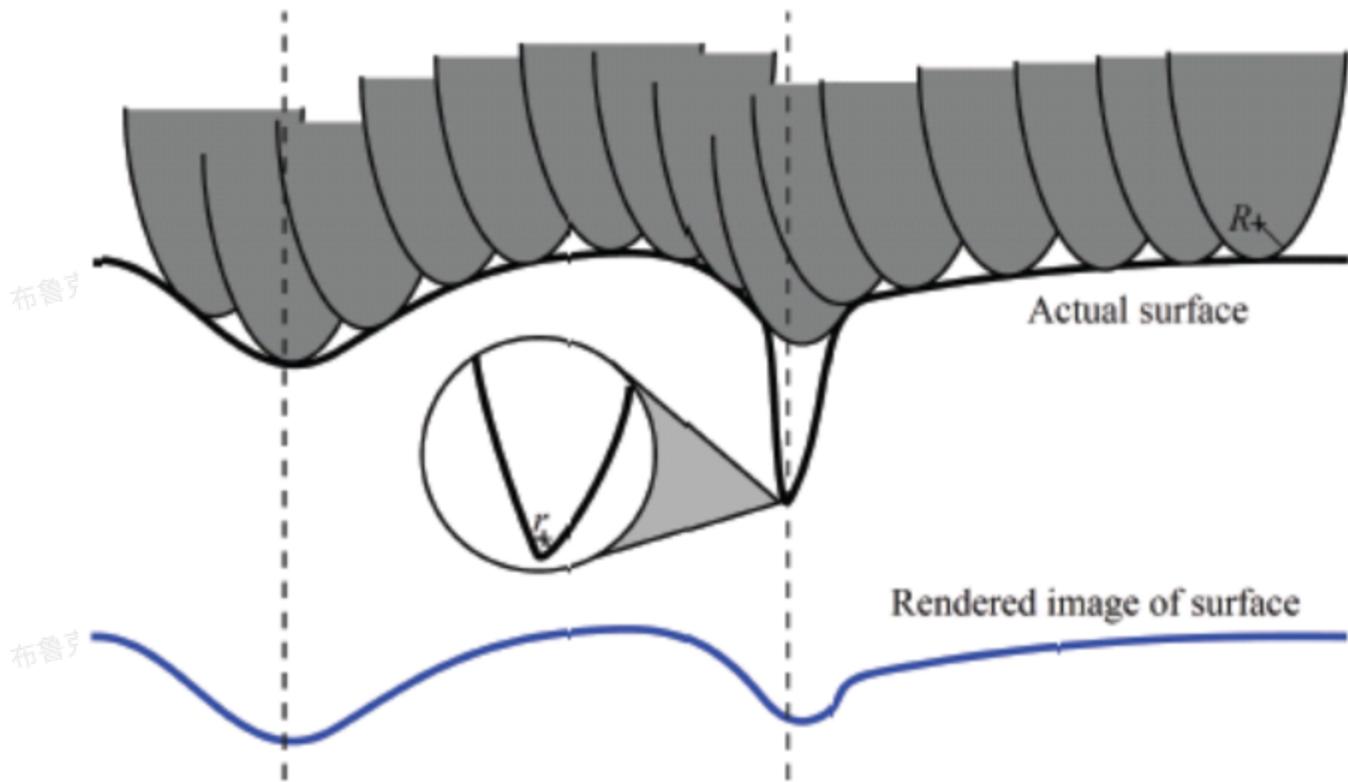


图13.2.1 针尖假象

同时，尖锐的样品在AFM成像中会由于钝的针尖成像而展宽。因此，表面的一些特征，例如粗糙度和表面积在AFM成像中依赖于针尖形状。用尖锐的针尖所得到的AFM结果会表现出更大的粗糙度和更大的表面积。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

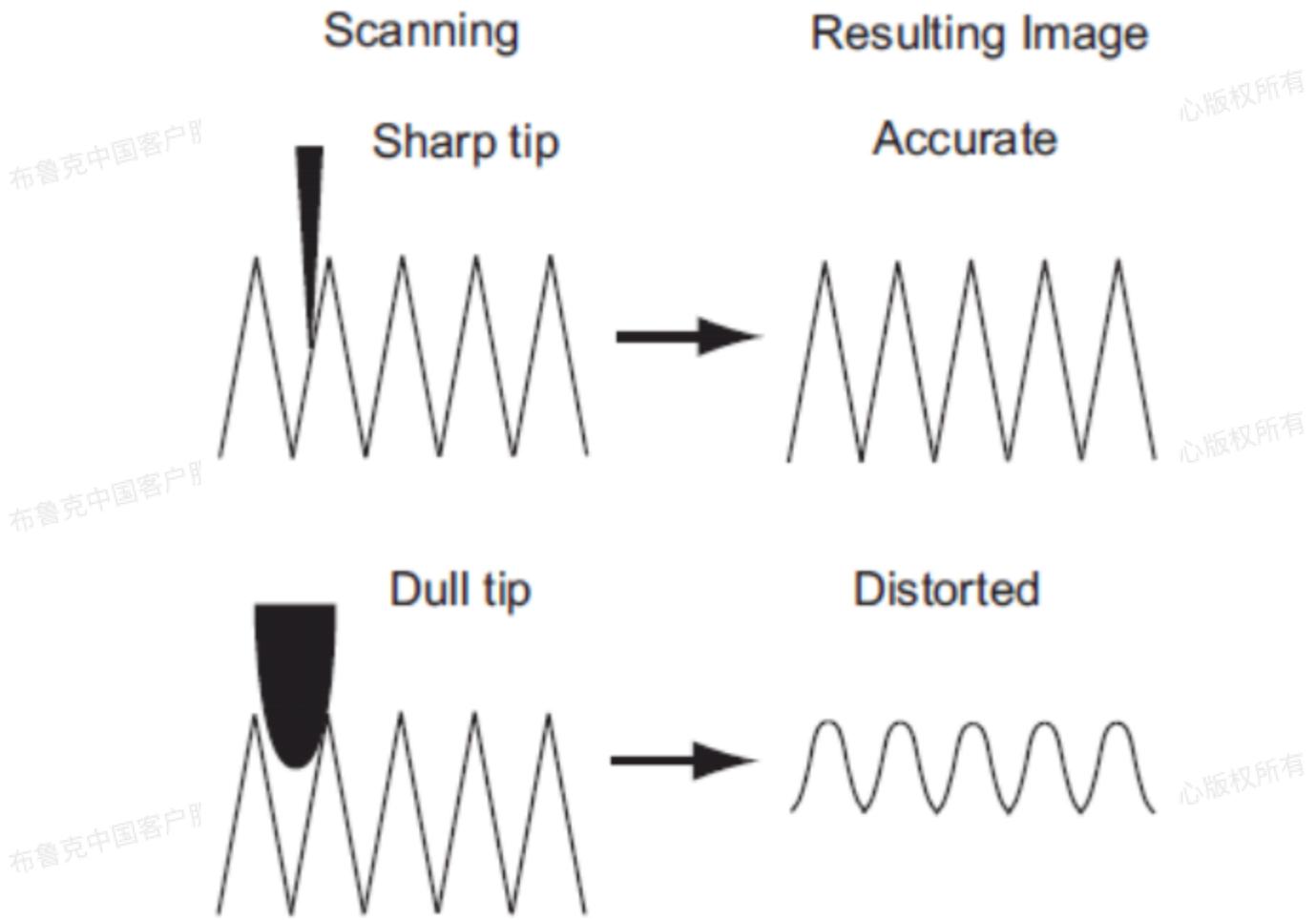


图13.2.2 针尖锋利程度的影响

### 13.2.1 针尖分析的样品依赖性

针尖估算得到的探针模型通常都不是探针的真实形状。因为针尖模型是利用图像中的峰形状模拟重构得到的，所以模型的可靠性很大地依赖于样品的尖锐程度。最合适探针表征样品应该是表面布满很细的突起，这样才能获得有很细的形貌特征。

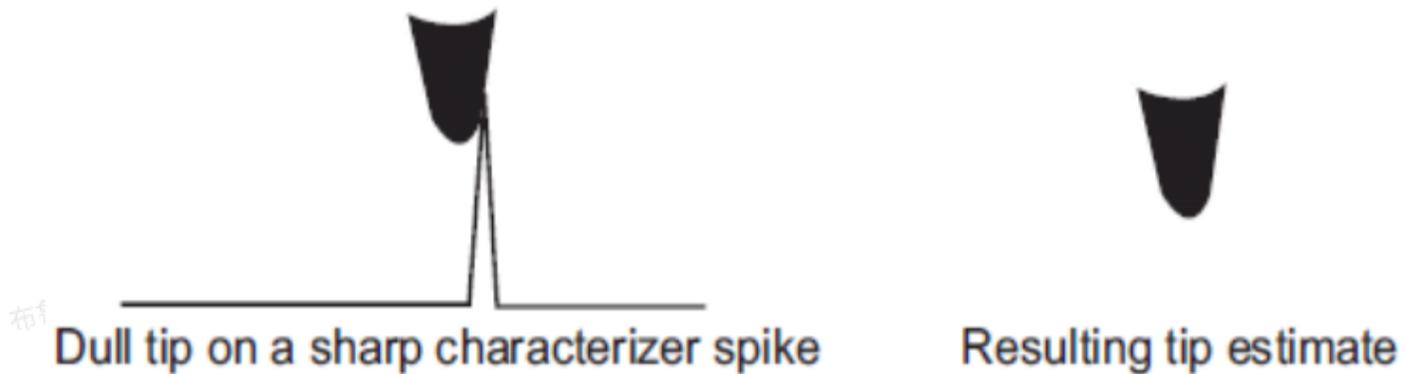


图13.2.1.1 探针表征样品

平滑的表面最合适：



图13.2.1.2 平滑样品用来表征探针

当探针和样品的尺寸类似时，得到的针尖模型事实上是样品和探针形貌的综合。

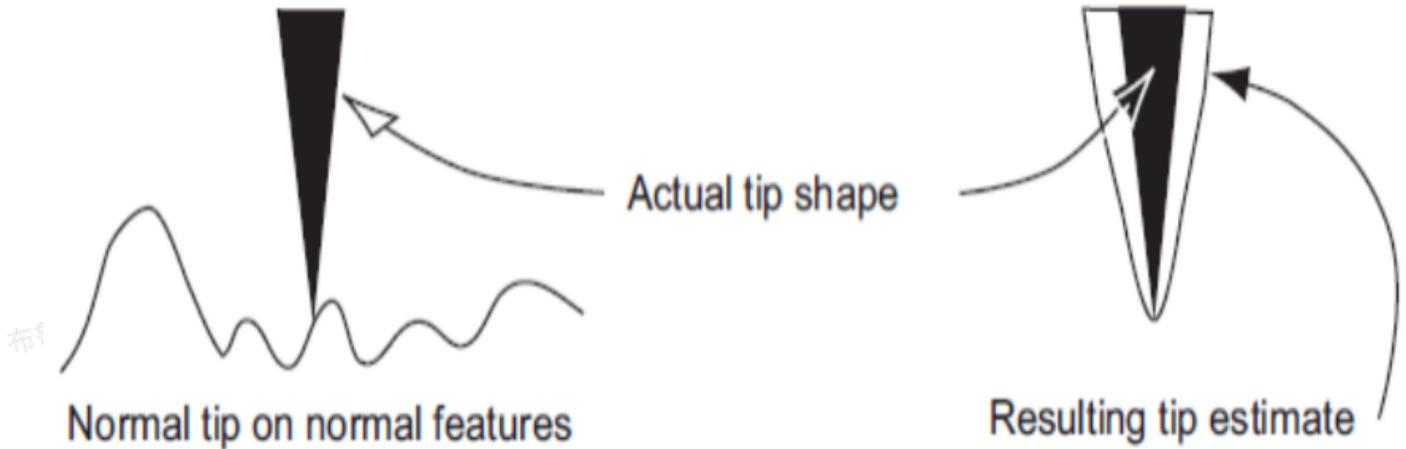


图13.2.1.3 探针与样品形貌的综合（卷积）

尽管针尖表征依赖于样品，针尖估算和针尖分析功能依然能为针尖模式提供可靠的分析结果。例如，在合适的粗糙表面上，针尖分析功能可以提供重复性好的针尖尺寸及形状的估算，随着探针磨损其结果是可预期的。

### 13.2.2 针尖质量阈值

根据使用者所设定的标准阈值，针尖分析功能能给针尖给出三种状态：好、受损、损坏。

好，表示针尖还足够锋利，得到的图像仍然可靠。

受损，表示针尖已经变钝了，需要更换，但之前得到的图像仍然可用。

损坏，表示需要立刻换针，而当前得到的图像以不可用了。

当图像分析出错时，针尖分析功能给出的针尖状态是可疑或者无针尖。

### 13.2.3 表征样品

一个理想的针尖分析表征样品应该是有分立的非常尖锐的结构。布鲁克提供了一个表征样品，命名为RS（可在<http://www.brukerafmprobes.com>上查到），其表面是多晶钛针，非常适合用来表征针尖状态。

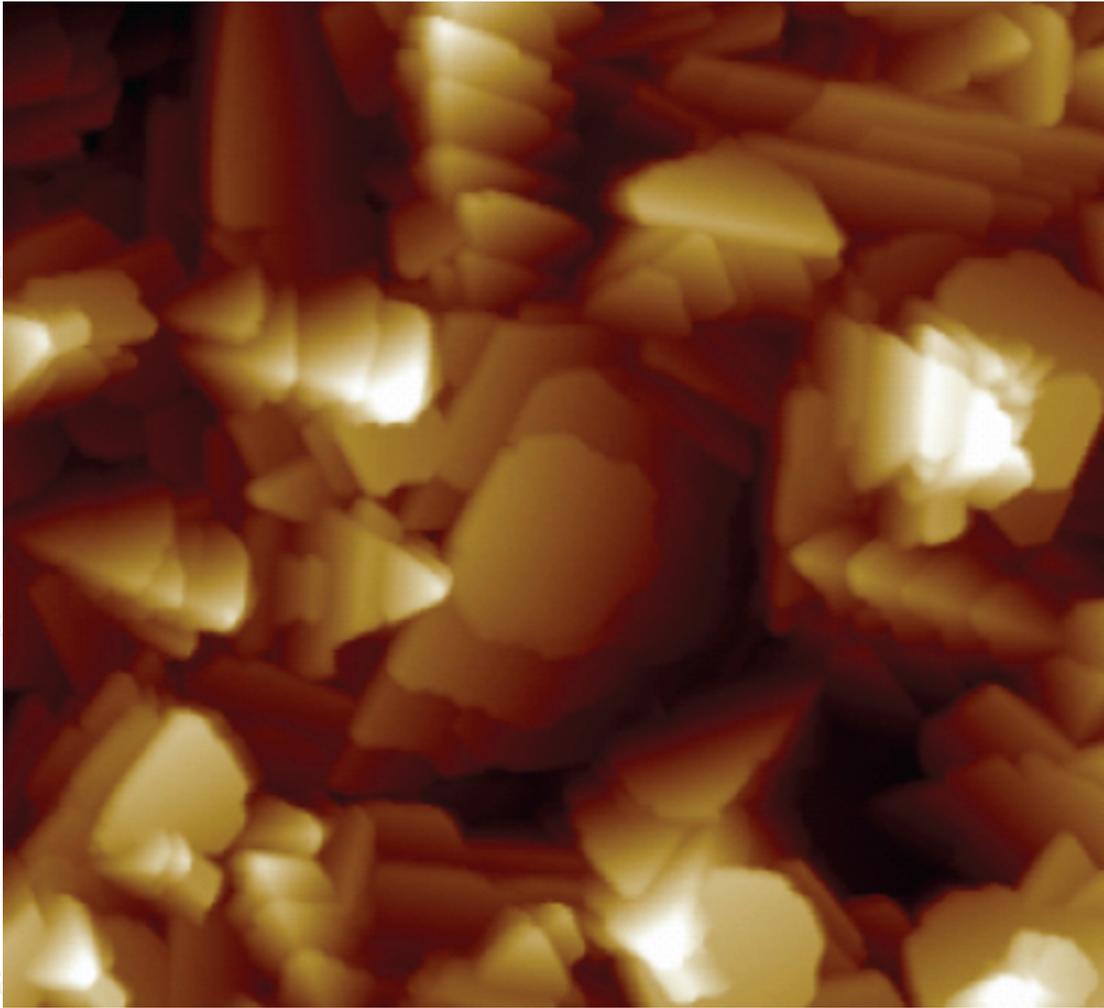


图13.2.3.1 多晶钛粗糙样品

### 13.3 针尖分析操作原理

针尖分析界面如下图所示。

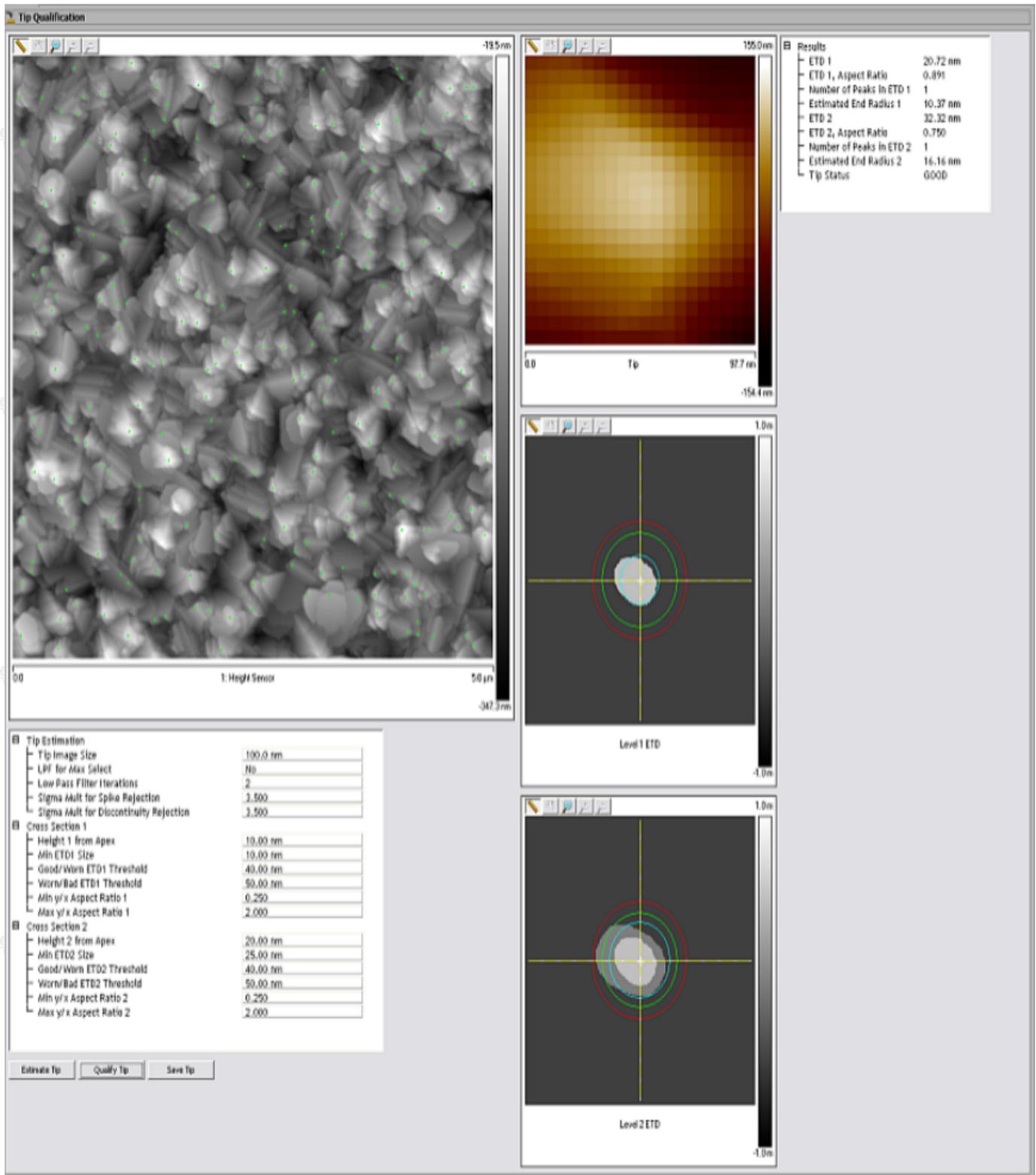


图13.3.1 针尖分析界面

左上角是用来分析针尖状态的样品形貌图。右上角标记为Tip的图像是软件模拟的针尖模型俯瞰图。针尖模型建立后，针尖估算功能计算出不同高度处的针尖截面几何尺寸，如图55所示。

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户服务中心版权所有

版权所有

版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

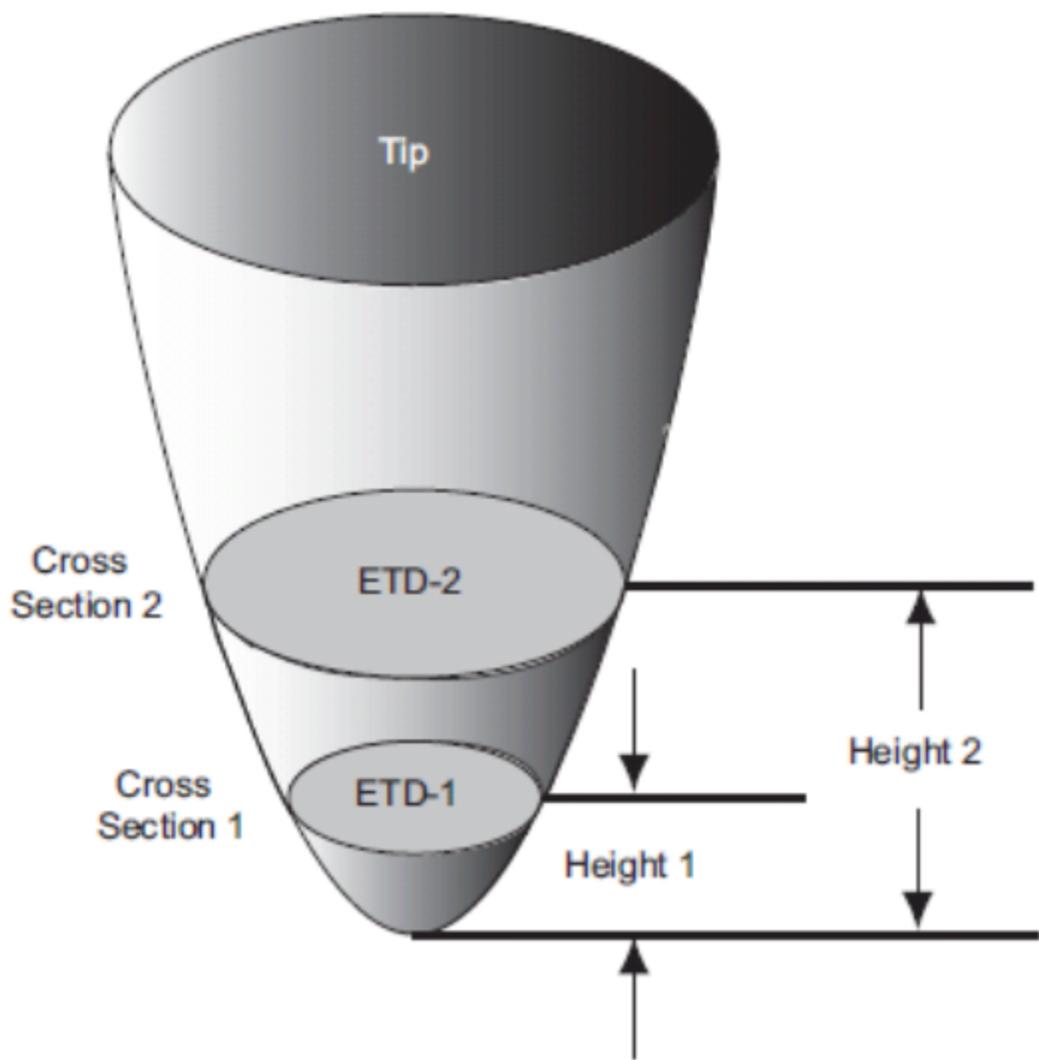


图13.3.2 针尖截面估算

针尖截面模型图给出两个高度下的针尖截面几何尺寸（分别标记为Level 1 ETD和Level 2 ETD）。对于Level 1，估算的截面直径用浅灰色圈标记。在右下图中，Level 1截面依然用浅灰色标记，而Level 2截面用深色标记（具体颜色可在色标中定义）。

接下来，针尖估算给出在每个截面下的针尖几何尺寸：有效针尖直径（ETD）和高宽比（AR）。有效针尖直径定义为与截面面积相等的圆的直径，如图56所示。

### Tip Cross Section

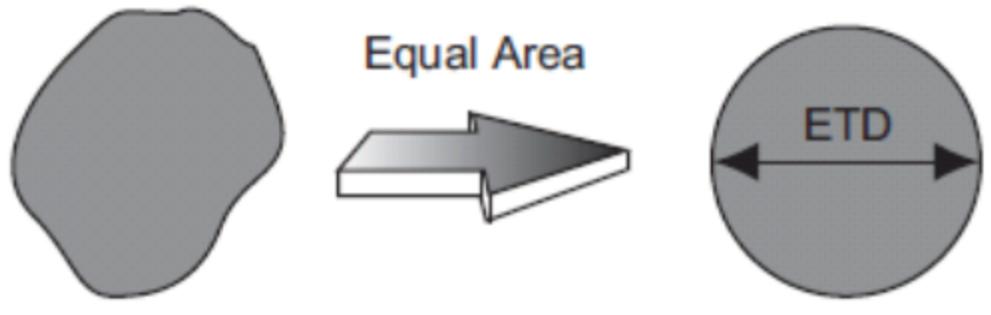


图13.3.3 ETD描述

而AR定义为截面在纵向的最长长度与横向的最长长度之比，如图57所示。

## Tip Cross Section

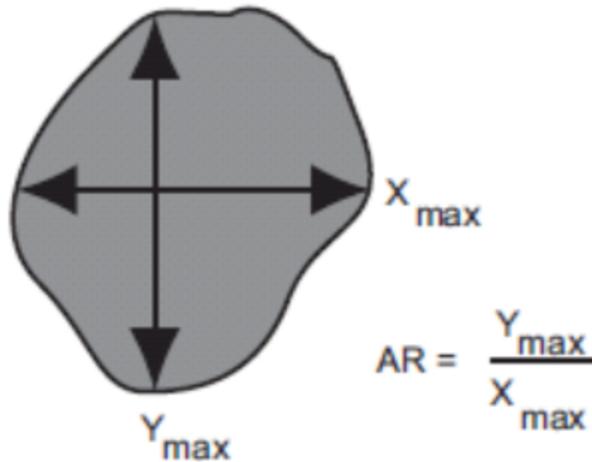


图13.3.4 高宽比描述

### 13.3.1 针尖分析状态的控制

针尖分析能够根据ETD，AR和设定的阈值给出针尖状态。软件中有两个影响针尖状态判断的ETD阈值：

好/磨损ETD阈值—如果ETD小于这个值，针尖状态为好。这个数值在ETD图像窗口中以绿圈标记。

磨损/损坏ETD阈值—如果ETD小于这个值，但大于好/磨损ETD阈值，针尖状态为磨损。这个数值在ETD图像窗口中以红圈标记。

在两个Level下有不同的ETD阈值。对于AR，同样也有上下限来判断针尖状态。这些阈值用来判断针尖模型是否为拉长状的，通常这种错误模型来自于图像的假象，例如图像上的断面处未被去除的噪音条带。AR阈值不应该被调整。

要找到合适的阈值需要使用探针在样品上进行多次成像，找出最钝的针对应的ETD最大值，从而设定磨损/损坏ETD阈值，然后把好/磨损ETD阈值设定为稍微小一些的数值。同时还需要设定一个ETD最小值。这个值是为针尖分析用来舍弃一些异常小的ETD值。这些异常值通常来自于未被去除的噪音峰。在绝大多数情况下，ETD最小值就可以设定为截面对应的高度值。

注：由小于ETD最小值所舍弃的针尖，针尖状态会被注明为可疑。

在扫描时只有针尖与样品接触才能估算出针尖模型。因此，截面高度不能超过样品的高度极差，否则软件给出的ETD会严重偏大并出现多个值。

## 13.4 针尖分析步骤

1. 扫描探针表征样品。为确保得到足够的形貌特征，需要设置足够大的扫描范围。使用布鲁克提供的RS样品时，扫描范围设置为1.5  $\mu\text{m}$ 左右，高宽比可设置为2。
2. 在浏览窗口中选中并打开扫描结果。
3. 在菜单栏中选择Analysis > Tip Qualification或在工具菜单栏中选择针尖分析图标，进入界面。
4. 在 Tip Image Size中输入当前所用探针的尺寸（详见下述针尖分析参数）。

5. 在LPF for Max Select中选择是否对图像进行低通滤波处理以选定合适的点进行针尖估算。在进行针尖估算前，建议使用低通滤波处理以除去图像中的微小噪音。大的噪音可以通过调节Sigma Mult for Spike Rejection和Sigma Mult for Discontinuity Rejection。
6. 若LPF for Max Select选为No，则在Low Pass Filter Iterations中输入对图像进行滤波处理的次数，以对图像进行处理除去噪音，而后针尖估算会根据滤波后的图像进行分析。
7. 在Cross Section中输入全部参数。
8. 点击Estimate Tip进行针尖估算。
9. 点击Qualify Tip进行针尖分析。
10. 浏览结果窗口获得针尖状态。
11. 如果需要获得针尖半径，则点击Save Tip保存针尖模型图像文件。打开图像文件后进行截面分析，沿着针尖中心画截面线，则在截面分析窗口中有用球形拟合的针尖半径结果。具体请参考截面分析部分。

## 13.5 针尖分析界面

表28. 针尖分析按键

按键	描述
Estimate Tip	进行针尖模型建立，得到的模型图在针尖分析界面的右上角。在左上角图像中绿色的高亮点指示用来建立针尖模型的图像特征。
Qualify Tip	结果： <ul style="list-style-type: none"> <li>· 点击后，若更改了任何针尖估算参数或分析参数，则会重新进行针尖估算。</li> <li>· 点击后，在结果界面中显示探针截面。</li> <li>· 给出针尖状态。</li> </ul>
Save Tip	保存针尖模型为图像文件，可以用Nanoscope Analysis软件打开。

表29. 针尖估算面板参数

分组	参数	描述
Tip Estimation	Tip Image Size	<p>设定右上角针尖模型图像文件的大小。计算得到的针尖直径不应该超过这个值。例如，Tip Image Size为120 nm，则得到的图像文件大小为120 nm × 120 nm。得到的ETD值为图像分辨率的最小奇数倍，它会大于或等于针尖直径。</p> <p>Tip Image Size也会被用来在针尖表征样品形貌图中定义用来进行针尖估算的高点周围区域的最大范围。例如，Tip Image Size为120 nm，则图像中选定高点周围120 nm的区域被用来进行针尖估算。因</p>

此，Tip Image Size越大，越多的像素点就会被用来进行针尖估算，也会减少选定的最高点数目。在满足以下条件基础上，Tip Image Size应该越小越好：

- 1) Tip Image Size应该超过探针与样品接触点处的ETD。改变Tip Image Size观察ETD结果来进行判断。一个好的初始值为针尖直径与样品特征宽度之和。
- 2) 若由于针尖磨损，形貌图中出现双针尖形貌，则针尖分离距离应小于Tip Image Size的一半，这样能够保证不会被单独进行分析，导致错误结果。

LPF for Max Select

决定是否在针尖估算进行选点之前进行低通滤波操作。该低通滤波操作只是为选点进行，并不作用于最终的针尖计算。

Low Pass Filter Iterations

进行针尖估算前对图像进行低通滤波操作的此时

Sigma Mult for Spike Rejection

除去凸起的噪音峰而设定的阈值。在图像上每个像素点(x, y)，计算该点的Z值与周围八个点Z值平均值之差 $\Delta(x, y)$ 。之后计算全图所有 $\Delta(x, y)$ 的平均值 $\mu$ 以及标准偏差 $\sigma$ 。由 $\mu$ 和 $\sigma$ 定义的正态分布被用来进行凸起噪音峰的去除。设定Sigma Mult for Spike Rejection为M，则 $\Delta(x, y)$ 超过 $\mu + M \sigma$ 的像素点在针尖估算中被当作局部噪音去除。  
当Sigma Mult for Spike Rejection设为0时，噪音去除功能不执行。

Sigma Mult for Discontinuity Rejection

与Sigma Mult for Spike Rejection类似，用来除去图像中的断面。对于每一列y，计算其上各点Z值的绝对值平均值与相邻两条线绝对值平均值之差 $\delta y$ ，之后计算出全图所有线 $\delta y$ 的 $\mu$ 和 $\sigma$ ，设定Sigma Mult for Spike Rejection为M，则 $\delta y$ 超过 $\mu + M \sigma$ 的线在针尖估算中被当作局部断面去除，并在图中以红色线标出。

Cross Section  
1

针尖会在两个不同高度上进行截面分析，分别对应于Cross Section 1和Cross Section 2，数据分析时分别使用下标1和下标2。

Height 1 from Apex

截面1到针尖的距离。

Min ETD1 Size

截面1上可信ETD的最小值

	Good/Worn ETD1 Threshold	截面1上判定针尖状态为好的最大ETD
	Worn/Bad ETD1 Threshold	截面1上判定针尖状态为磨损的最大ETD
	Min y/x Aspect Ratio1	当ETD1小于Worn/Bad ETD1 Threshold时，可接受的AR1最小值，否则针尖状态为可疑
	Max y/x Aspect Ratio1	当ETD1小于Worn/Bad ETD1 Threshold时，可接受的AR1最大值，否则针尖状态为可疑
Cross Section 2	Height 2 from Apex	截面2到针尖的距离
	Min ETD2 Size	截面2上可信ETD的最小值
	Good/Worn ETD2 Threshold	截面2上判定针尖状态为好的最大ETD
	Worn/Bad ETD2 Threshold	截面2上判定针尖状态为磨损的最大ETD
	Min y/x Aspect Ratio2	当ETD2小于Worn/Bad ETD2 Threshold时，可接受的AR2最小值，否则针尖状态为可疑
	Max y/x Aspect Ratio2	当ETD2小于Worn/Bad ETD2 Threshold时，可接受的AR2最大值，否则针尖状态为可疑

表30. 针尖状态结果

针尖状态	结果
1. Suspect	针尖状态在如下几种调节下会被标记为可疑： <ul style="list-style-type: none"> <li>· 图像中有超过Sigma Mult for Discontinuity的断面线。</li> <li>· 一个高宽比超出了Min AR和Max AR的范围。</li> <li>· ETD1或ETD2小于了Min ETD1或Min ETD2。</li> </ul>
2. Good	两个ETD均小于Good/Worn ETD Threshold
3. Bad	至少有一个ETD超过了Worn/Bad ETD Threshold
4. Worn	至少有一个ETD落在了Good/Worn和Worn/Bad ETD Threshold之间

## 14 宽度 (Width)

分析AFM图上特征的宽度有多种方法可以选择，例如利用截面分析两种不同高度的特征的横向宽度。宽度分析是专门来进行自动分析表面上具有相似深度特征的宽度（例如硅片上的刻蚀沟槽）。不同深

度的特征使用截面命令更加合适。

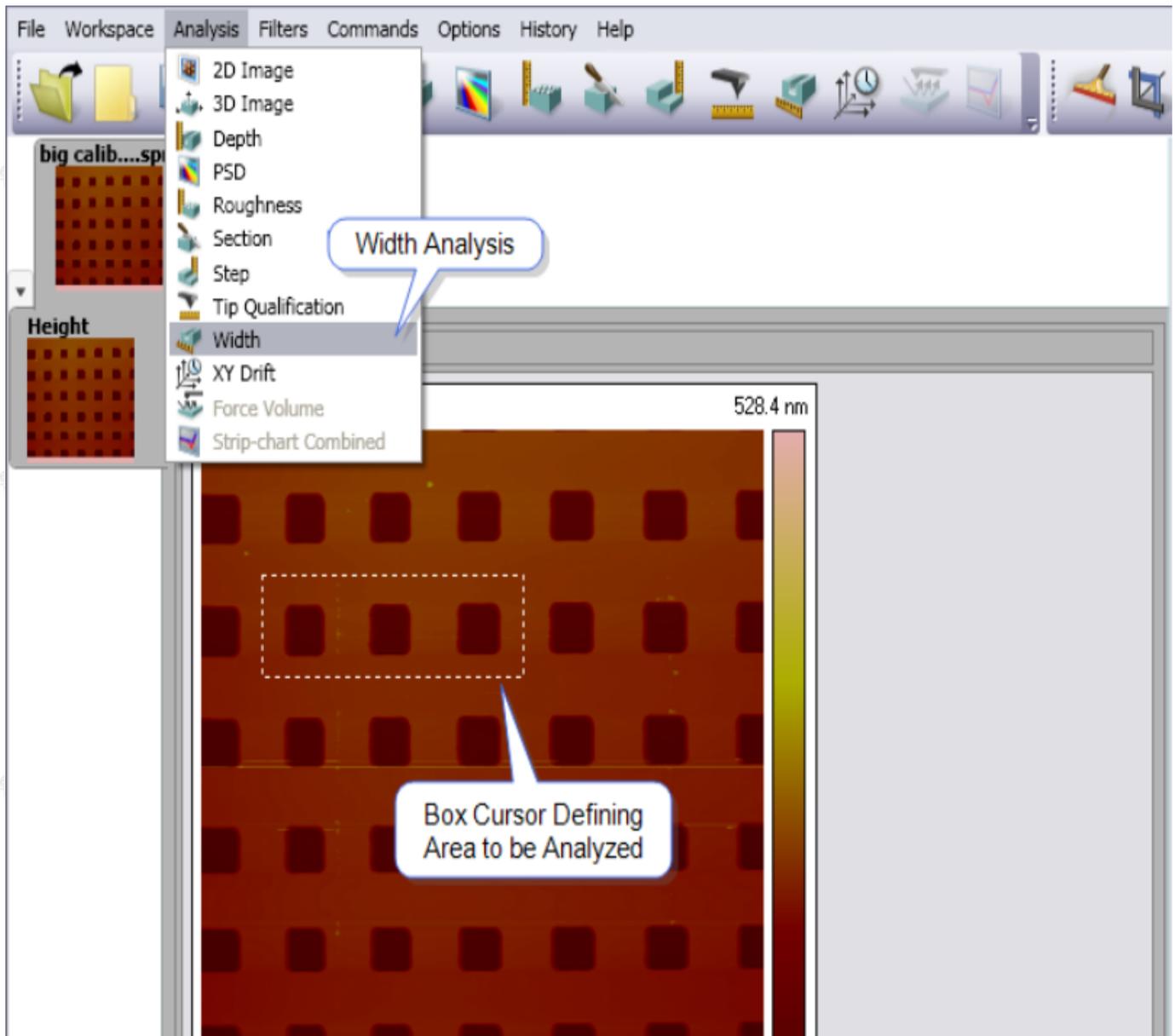
## 14.1 宽度分析理论

宽度分析利用深度分析中的算法（得到像素点的Z值分别，进行低通滤波处理后得到不同特征之间的高度差）得到两个或多个特征区域的高度对比，进而进行统一的宽度统计计算。

宽度分析界面包括一个二维图像、深度柱方图以及结果栏。可用鼠标在图像上进行框选选定待分析区域。深度柱方图与深度分析界面相同，包含所有像素点Z值分布的柱方图以及高斯低通滤波后的拟合结果。

## 14.2 宽度分析步骤

1. 在浏览窗口中找到待分析图像双击鼠标左键打开。
2. 在菜单栏中点击Analysis>Width或在工具菜单栏中点击宽度分析的图标打开进入宽度分析界面。
3. 宽度分析界面如下所示：



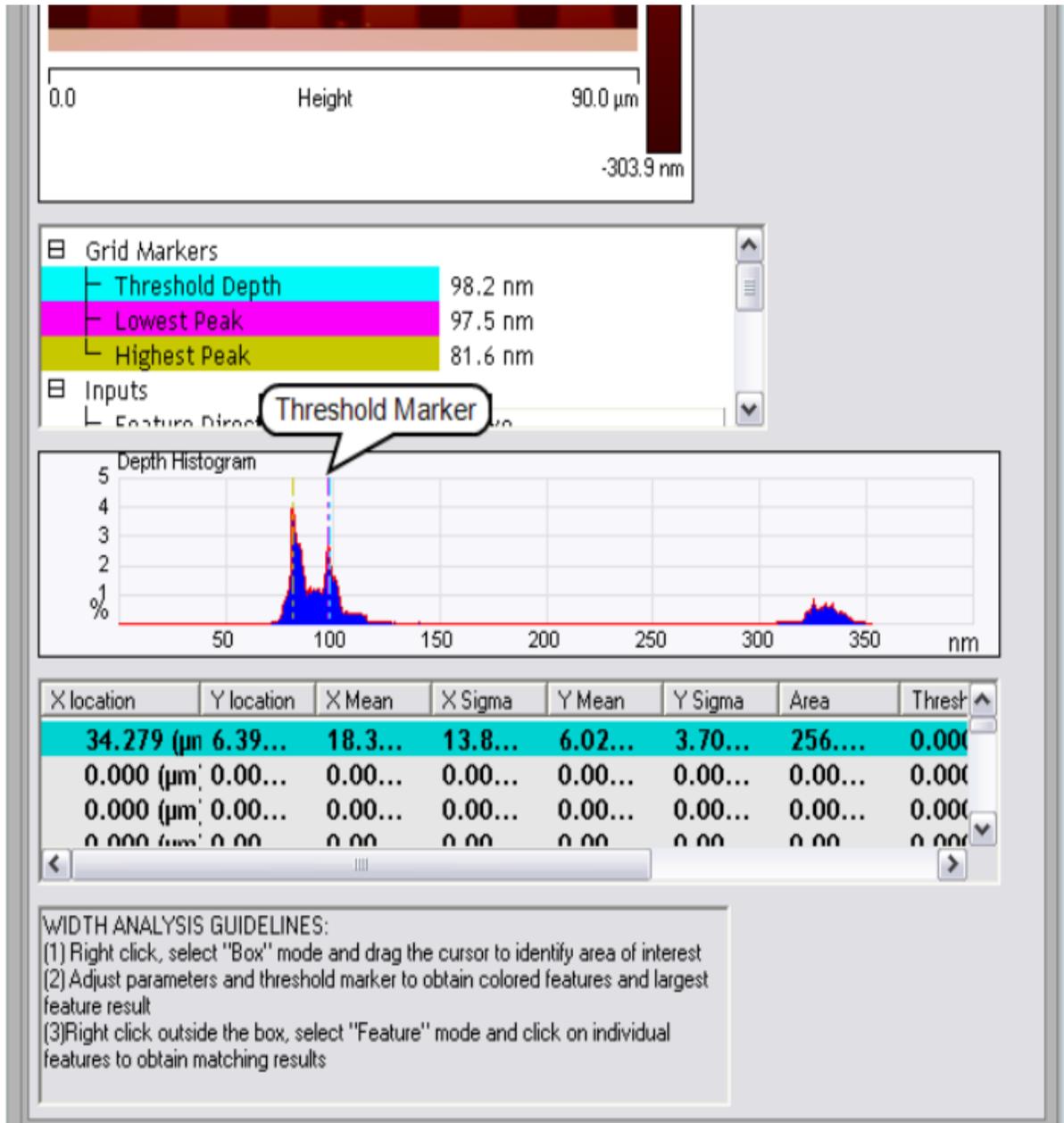


图14.2.1 宽度分析界面

4. 用鼠标左键在图上框选出选定分析区域。若无框选，默认进行全图分析。
5. 调整Minimum Peak to Peak排除不相关的深度峰差。
6. 在深度柱方图上拖拽靛青色游标调整阈值深度，根据特征方向，高于或低于这个阈值的特征被同一颜色（默认蓝色）高亮。
7. 回到二维AFM图像上，在选定框外单击右键，在弹出框中点击Select Feature选择进行宽度统计的特征。
8. 点击框中被高亮的蓝色区域，选中后该区域变为靛青色，其宽度统计结果将在结果表格中显示。
9. 右键点击结果表格，选择Copy Text复制表格数据至剪贴板，然后可以粘贴至指定文件中。

### 14.3 宽度分析参数

宽度分析界面中包含深度柱方图的输入参数，与深度分析类似。

表31. 深度参数

参数	描述
Feature Direction	选择待分析的特征是凸起 (above) 还是凹陷 (below)。
Threshold Plane	待分析特征的高度阈值，根据Feature Direction，高于 (above) 或者低于 (below) 该阈值的像素点被选中作为待分析特征。
Number of Histogram Bins	滤波处理后柱方图上数据点数目。 注：不必比像素点数目多。
Reference	阈值平面 (Threshold Plane) 的参考平面，可选择深度图上的最大值 (即图像上最低的特征区域) 或最小值 (即最高区域)。
Histogram Filter Cutoff	低于截止波长以下数据在低通滤波中被去掉以实现平滑处理。
Minimum Peak to Peak Distance	设定最高峰与游标设定的第二个峰之间距离的最小值。则第二个峰是符合这个距离标准的次高峰。
Distance from Peak Type	选择Threshold Plane相对Reference的高度之差计算类型为绝对高度值或最低最高高度差的百分比。
Distance from Peak	Threshold Plane相对于选定的Reference的高度之差。

柱方图上有三个颜色不同的游标，分别对应于最高特征 (Lowest Peak, 品红色)、最深特征 (Highest Peak, 金色) 和阈值高度 (Threshold Plane, 靛青色)。

宽度分析结果包括：

表32. 结果参数。

参数	描述
X location	选定特征在X方向上的位置
Y location	选定特征在Y方向上的位置
X mean	选定特征的平均宽度 (X方向)
X sigma	选定特征宽度值的标准偏差
Y mean	选定特征的平均长度 (Y方向)
Y Sigma	选定特征长度值的标准偏差
Area	选定特征的面积

Threshold to Local Minimum

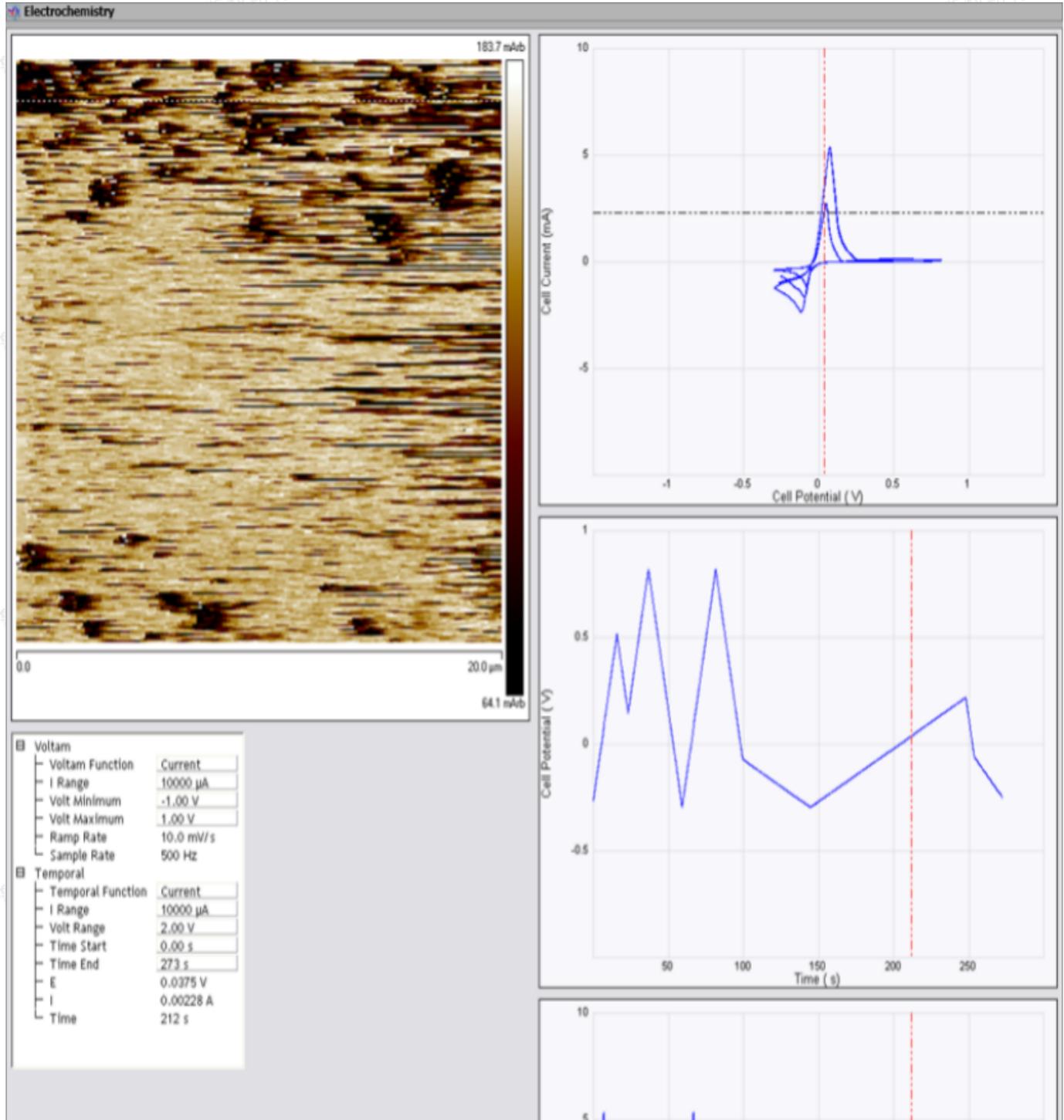
选定区域最低点相对于阈值平面的距离

Threshold to Local Maximum

选定区域最高点相对于阈值平面的距离

## 15 电化学数据 (Electrochemical Data)

电化学数据分析窗口如下图所示，包含二维图像、三个电化学线图和一个控制界面。



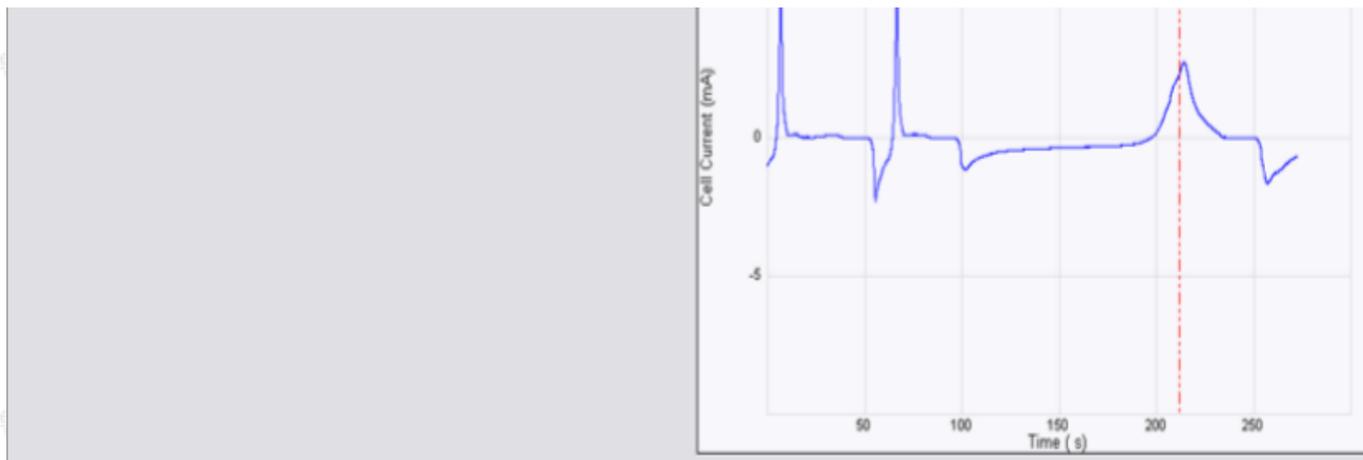


图15.1 电化学窗口

其中最上方为伏安曲线，可显示STM中的 $I_{tip}$  vs  $E_{tip}$ 曲线，或电化学中的 $I$  vs  $E$ 曲线。下方的两个时域曲线表示电压（电化学电压 $E$ 或者STM电压 $E_{tip}$ ）和电流（电化学电流 $I$ 或STM电流 $I_{tip}$ ）对时间的关系。

时域图中的横轴时间不一定与AFM或STM图像采集时间正好对应，因为：

1. 可存储数据点数目上限为62254，因此采集时间受采样率影响，例如采样率为62 Hz时，最长时间即为1004 s。
2. 当超过最长采集时间时，只有最后62254个数据点会被记录，因此时域图的零点会因此改变。
3. 时域图的起始点受控制界面中的Time Start和Time End参数控制。

## 15.1 游标

在时域图上可用鼠标左键拖拽划出一段区域进行显示，画好游标后，该区域会在所有三个图上同时被显示出来。伏安曲线上的记号标记指定点的电压和电流值。时域图上的红色虚竖线指示采集SPM图像第一条线的时间点。移动红色虚线游标，SPM图像上会以横线标记对应改时间下的数据线。同时，可在SPM图像上拖拽这个横线游标，则电化学图线会更新显示该扫描线处的数据。

注意，SPM图采集时间可能会少于采集62254个电化学数据点所需要的时间，因此时域图上可能会有部分数据点与SPM图像上的点无对应关系。

按住Ctrl键在图线上拖拽可放大指定区域，放大后点击左上角的放大镜即可回复到原图。

## 15.2 电化学图线控制界面

电化学图线参数如下图所示：

☐ Voltam	
Voltam Function	Current
I Range	10000 $\mu$ A
Volt Minimum	-1.00 V
Volt Maximum	1.00 V
Ramp Rate	10.0 mV/s
Sample Rate	500 Hz
☐ Temporal	
Temporal Function	Current
I Range	10000 $\mu$ A
Volt Range	2.00 V
Time Start	0.00 s
Time End	273 s
E	0.0375 V
I	0.00228 A
Time	212 s

图15.2.1 电化学图线控制界面

表33. 控制界面参数

分组	参数	描述
Voltam	Voltam Function	设定伏安曲线纵坐标类型： · Charge电荷 · Chrg Dens电荷密度 · Current电流 · Cur Dens电流密度 · Log Cur电流对数值 · Lg Cur Dens电流密度对数值 · Tip Current STM针尖电流 当横坐标为Tip Current时，横坐标为STM电压Etip。其它时候横坐标均为电化学电压E。
	I Range	纵坐标电流的范围
	Volt Minimum	横坐标最小值
	Volt Maximum	横坐标最大值
	Ramp Rate	进行伏安曲线采集时电压变化的速率

	Sample Rate	伏安曲线的采样率
	Tip Reference	仅对STM，指在进行伏安测试时，是保持STM针尖电压Etip还是针尖偏压Ebias不变
	Ramp Electrode	指示进行伏安测试时改变的电压为工作电极电压E还是STM针尖电压Etip
<b>Temporal</b>	Temporal Function	指时域图中纵坐标类型： <ul style="list-style-type: none"> <li>· Charge电荷</li> <li>· Chrg Dens电荷密度</li> <li>· Current电流</li> <li>· Cur Dens电流密度</li> <li>· Log Cur电流对数值</li> <li>· Lg Cur Dens电流密度对数值</li> <li>· Tip Current STM针尖电流</li> </ul>
	I Range	时域图中电流图纵坐标范围
	E Range	时域图中电压图纵坐标范围
	Time Start	时域图中最小时间点
	Time End	时域图中最大时间点
	E	时域图中游标对应处的工作电极电压值
	Etip	仅对STM，时域图中游标对应处STM针尖相对于参比电极的电压值
	Ebias	仅对STM，时域图中游标对应处STM针尖相对于样品的电压值
	I	时域图中游标对应处的电流值
	Time	时域图中游标对应处的时间点

# 处理命令

## 1 处理功能

处理功能对原始数据进行修改，进而影响其可视界面。用户可以在Nanoscope Analysis界面右侧的History中浏览所有的处理步骤，并直接返回到之前的某一步处理结果；也可以点击撤消图标，返回上一步。处理功能可以点击菜单栏中的相应选项，或者在工具菜单栏中点击相应图标进入界面。

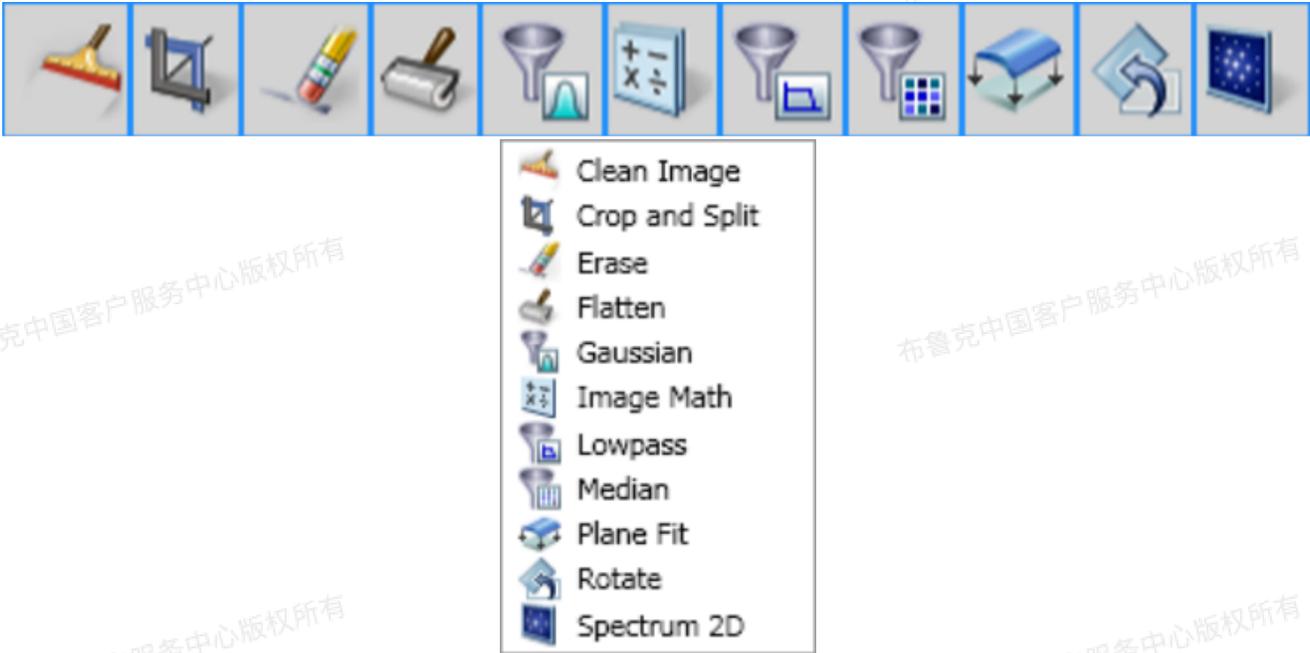


图1.1 处理功能工具栏和菜单栏

## 2 图像清理

图像清理功能是用来对有毛刺的图像进行平滑处理的。所用的两个参数Spike cut off和Streak cut off分别定义了对图像上的尖刺和条带进行滤波的截止频率。超出局域平均值  $\pm$  标准偏差范围的数据点被平均值代替，如下图所示。

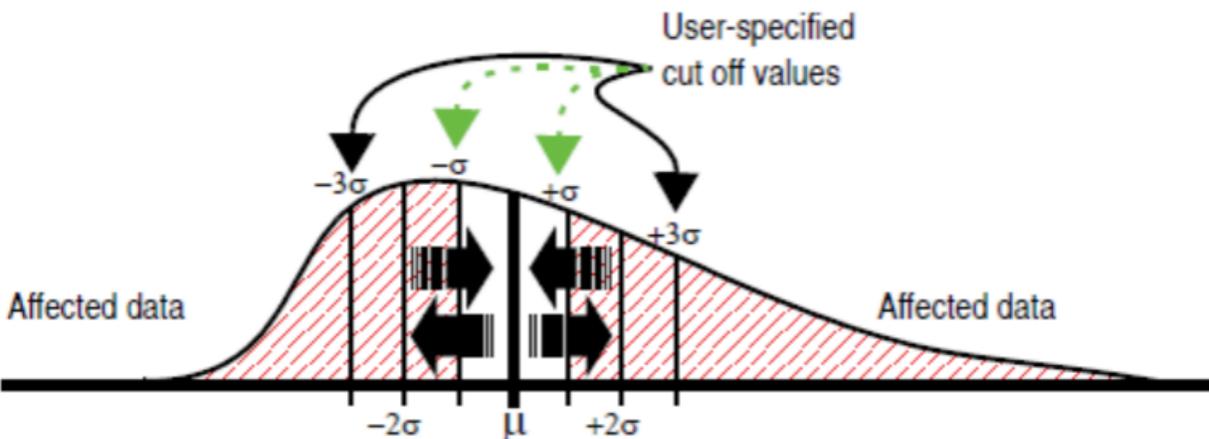
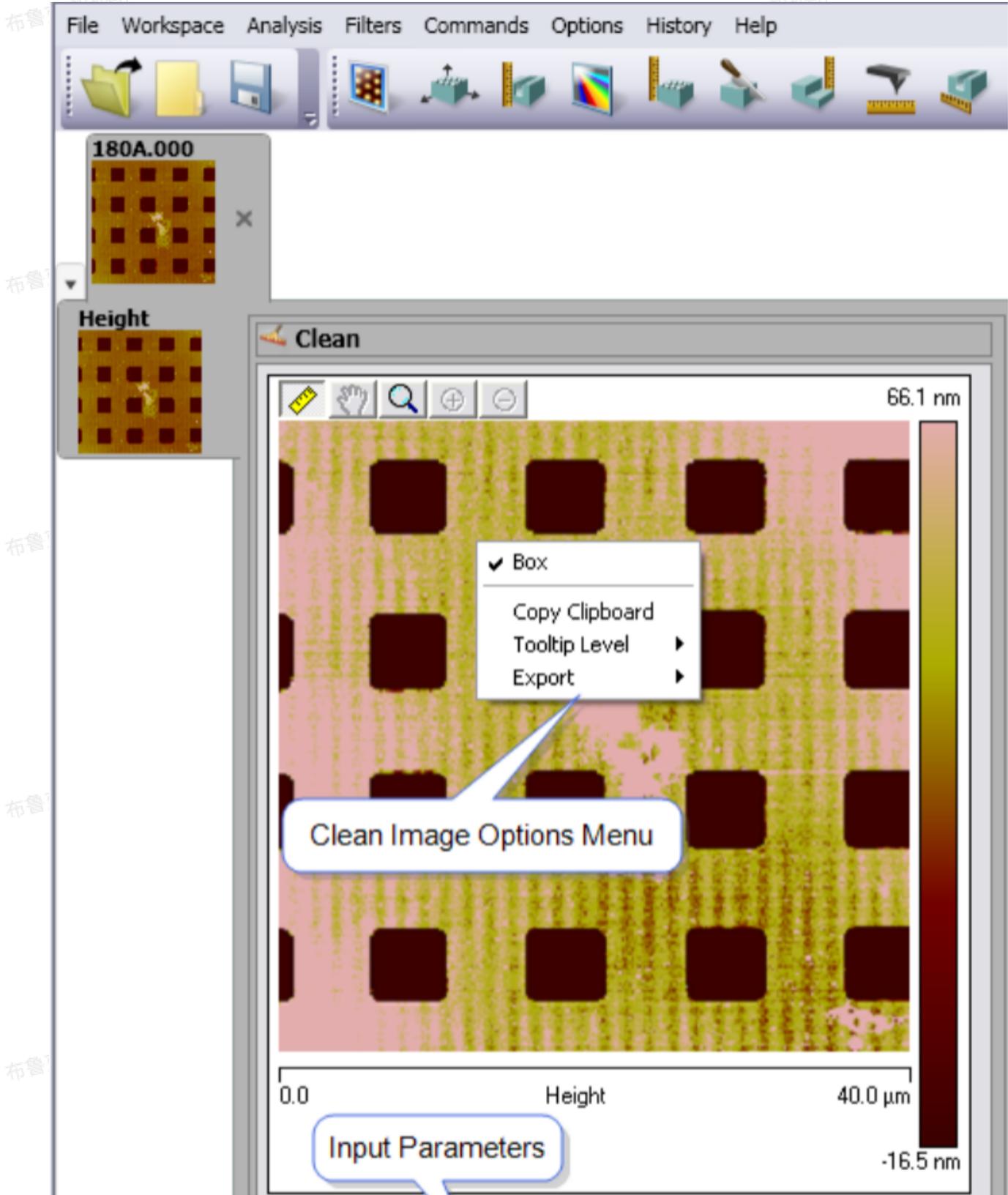


图2.1 截止值设定

## 2.1 图像清理步骤

1. 在浏览窗口中打开预分析的图像文件。
2. 点击菜单栏中的Filter > Clean Image或者工具菜单栏中的图像清理图标，进入界面。



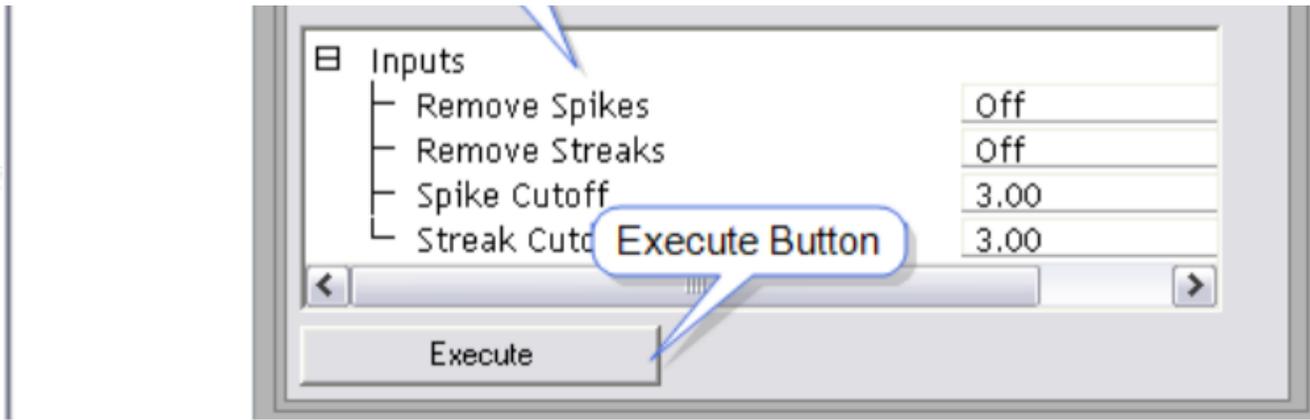


图2.1.1 图像清理界面

3. 在界面中的二维图像用鼠标框选想要清理的区域。
4. 在Input栏中输入参数。
5. 点击Execute执行图像清理。
6. 若不满意处理，可以在History中回到未处理的图像，或点击Undo进行撤消。

## 2.2 图像清理参数

表2.2 图像清理参数

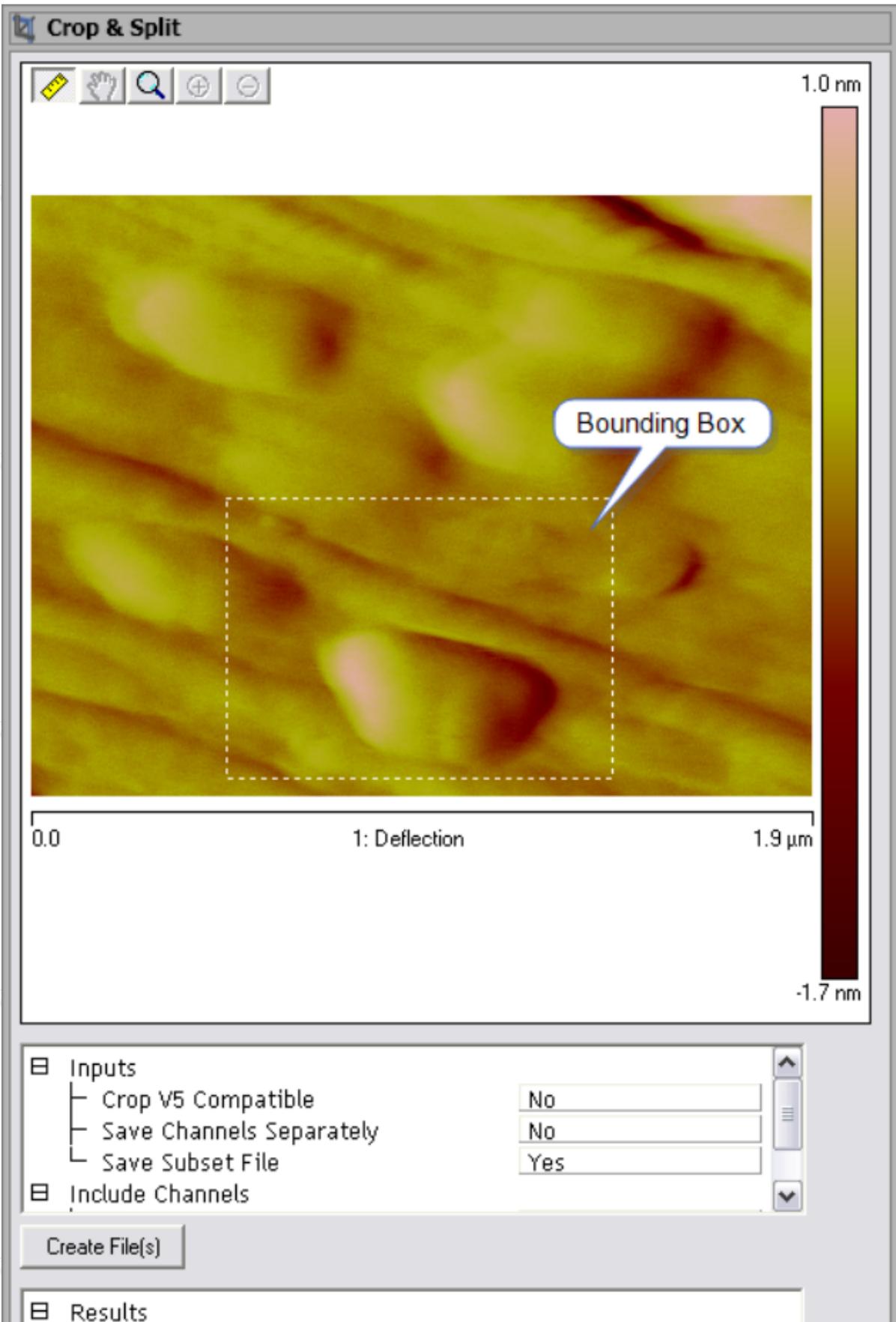
参数	描述
Remove Spikes	设置： · On，激活Spike cut off参数，可移除图像上的尖刺凸起 · Off，不进行尖刺凸起的移除
Remove Streaks	设置： · On，激活Streak cut off参数，可移除图像上的条带 · Off，不进行条带的移除
Spike Cutoff	用来移除尖刺凸起所用的滤波截止范围，该值设置的是标准偏差的倍数。该数值越大，所平滑处理的范围也就越小。可在0到10之间选择。
Streak Cutoff	用来移除条带所用的滤波截止范围，该值设置的是标准偏差的倍数。该数值越大，所平滑处理的范围也就越小。可在0到10之间选择。

## 3 裁剪和分割

裁剪和分割功能可以提取图像中的一部分进行分析。为保证裁剪出的图像分辨率，建议原始图像分辨率高于 $512 \times 512$ 。

### 3.1 步骤

1. 在浏览窗口中选中待分析文件双击打开。
2. 点击菜单栏中的Filter > Crop & Split或工具菜单栏中的裁剪和分割图标。
3. 裁剪和分割界面如下。



Number of X Points	484
Number of Y Lines	352
Aspect Ratio	1.37
Scan Size	0.945 $\mu\text{m}$
Error	No Error

图3.1.1 裁剪和分割界面

4. 在图像上用鼠标左键框选住欲分割出来的部分。
5. 点击Create File(s)完成裁剪。
6. 在弹出的窗口中设置裁剪出的新文件的文件名和保存路径。

### 3.2 裁剪和分析界面

表3.2 裁剪和分割参数

参数	描述
Crop V5 Compatible	设置裁剪出的文件是否兼容Version 5软件。设置为Yes时，生成V5兼容性的文件（分辨率只能是128 × 128，256 × 256或512 × 512）；设置为No时，可生成任意分辨率的文件。
Method	当Crop V5 Compatible设为Yes时，出现改参数，用来设置生成算法。设置为Interpolate时，用插值法进行裁剪文件生成；设置为Replicate时，会复制缺失的数据点来生成剪裁文件。
V5 Number of Samples	设置V5兼容文件的分辨率，可设置为128 × 128，256 × 256或512 × 512
Save Channels Separately	设置为Yes时，每个通道单独保存成一个文件；设置为No时，所有通道合并保存成一个多通道文件。
Save Subset Files	没有意义。但Save Channels Separately和Save Subset Files必须有一个设为Yes。
Include Channels	设置保存的文件中是否包含该通道。
Number of X Points	新图像中X方向上的点数。
Number of Y Lines	新图像中Y方向上的点数。
Aspect Ratio	新图像的高宽比
Scan Size	新保存图像宽度
Error	可能出现的报错为： <ul style="list-style-type: none"> <li>· No Error</li> <li>· Invalid Aspect Ratio，指放大的部分高宽比超过了256：1</li> </ul>

- File Write, 硬盘错误
- Unknow, 未知错误

## 4 擦除

擦除功能可以重新编辑图像，可以用插值法擦除一条扫描线或一片区域。其步骤如下：

1. 在浏览窗口中选中待分析文件双击打开。
2. 点击菜单栏中的Filter > Erase或工具菜单栏中的裁剪和分割图标。

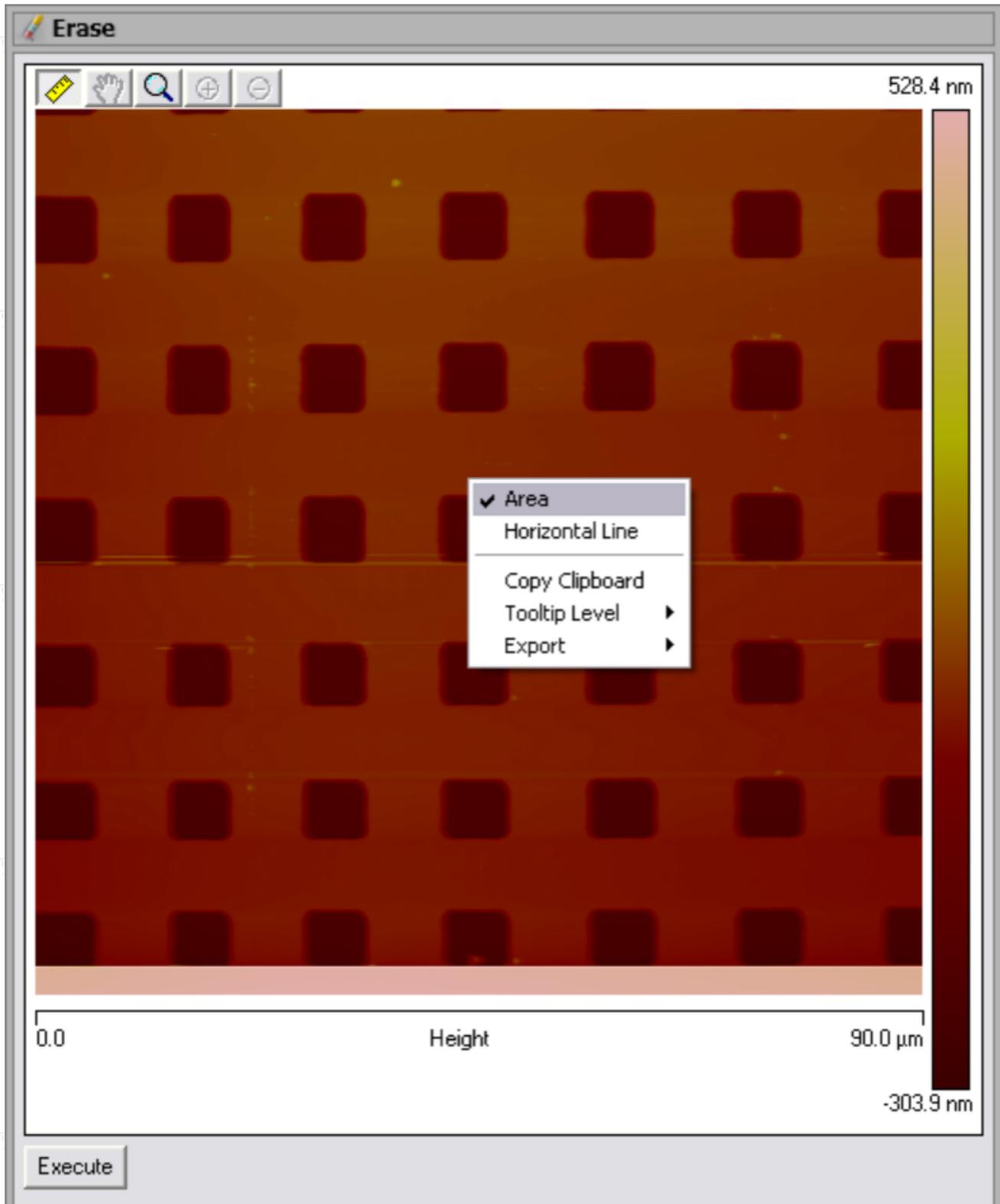


图4.1 擦除界面

3. 在图像上点击鼠标右键打开右键下拉菜单。擦除功能可选择擦除一条扫描线（Horizontal Line）或者一块区域（Area）。
4. 当要擦除某几条扫描线时，用鼠标点击欲擦除部分，点击一次就会出现一条游标横线；当要擦除一块区域时，用鼠标框选住欲擦除的部分。
5. 点击Execute完成擦除。

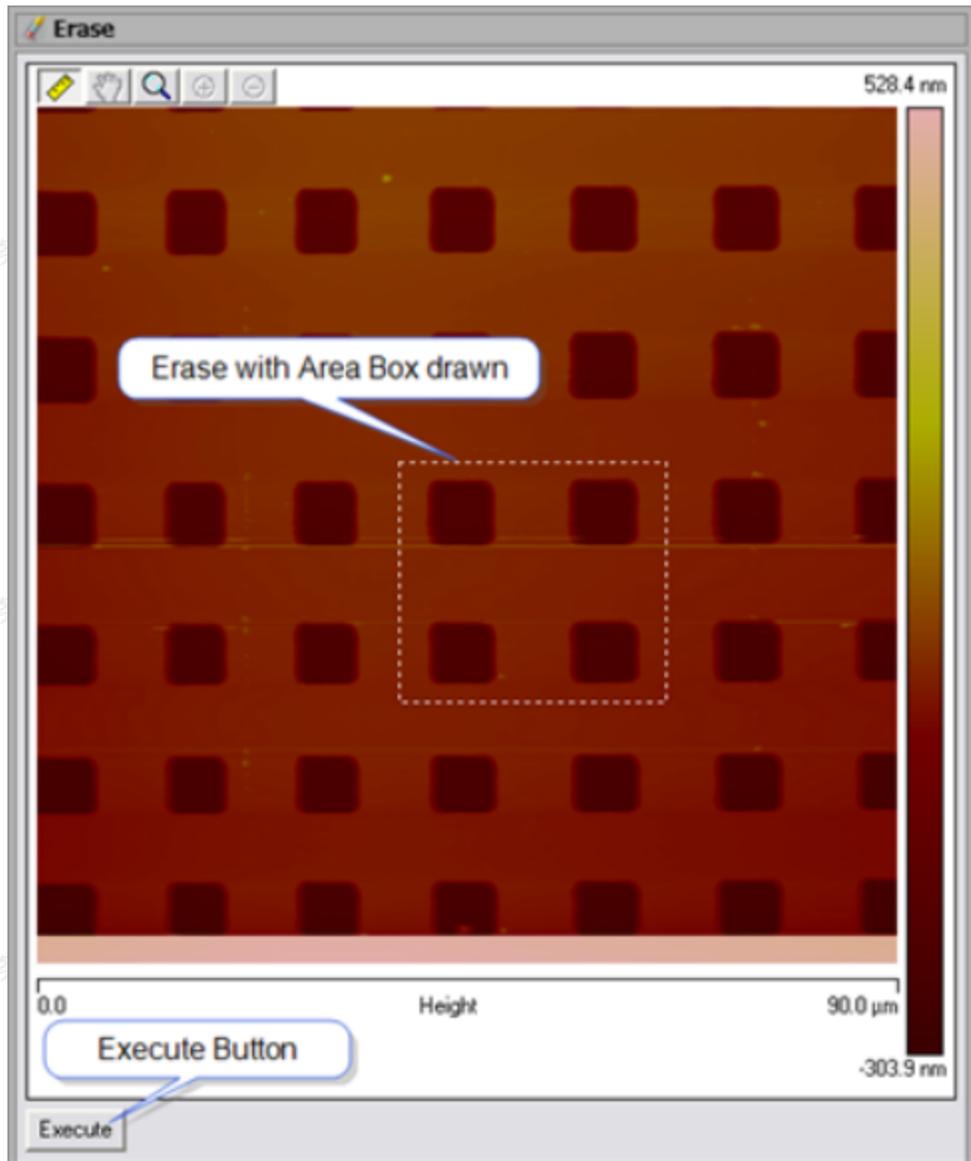


图4.2 选框擦除

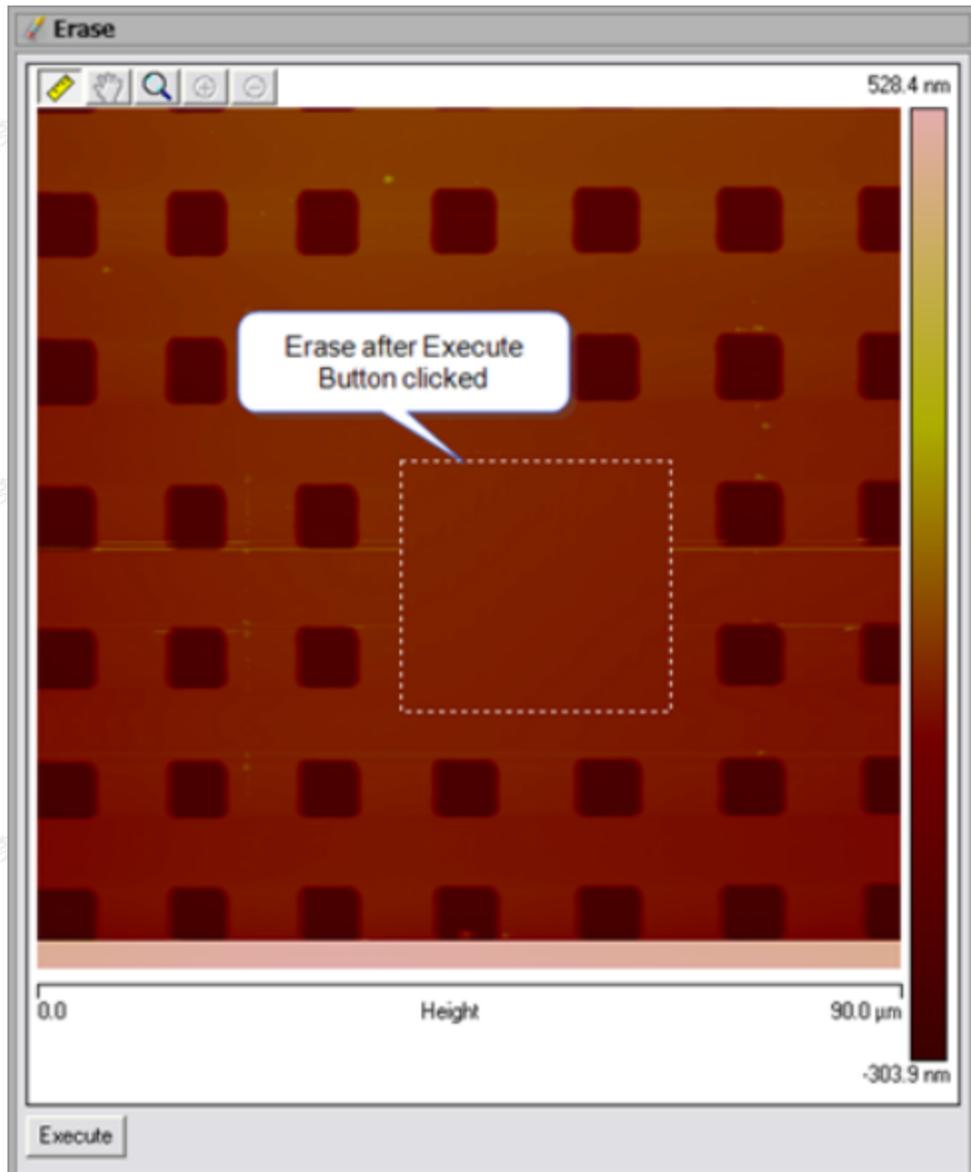


图4.3 线擦除

6. 在选定的擦除局域点击鼠标右键可以打开右键下拉菜单。点击Delete删除擦除选区；点击Clear All清除所有擦除选区。
7. 若不满意擦除结果，可以点击Undo撤消擦除操作。

## 5 拉平

拉平操作消除由扫描线引起的各种假象特征，包括噪音、倾斜和弯曲等。对每条扫描线，它用线上所有未覆盖住的像素点进行最小二乘法多项式拟合得到基线，并扣除基线实现拉平。在图像分析前（例如深度分析、粗糙度分析和截面分析等）进行拉平操作是非常有用的，尤其是图像有倾斜、弯曲或包含低频噪音。

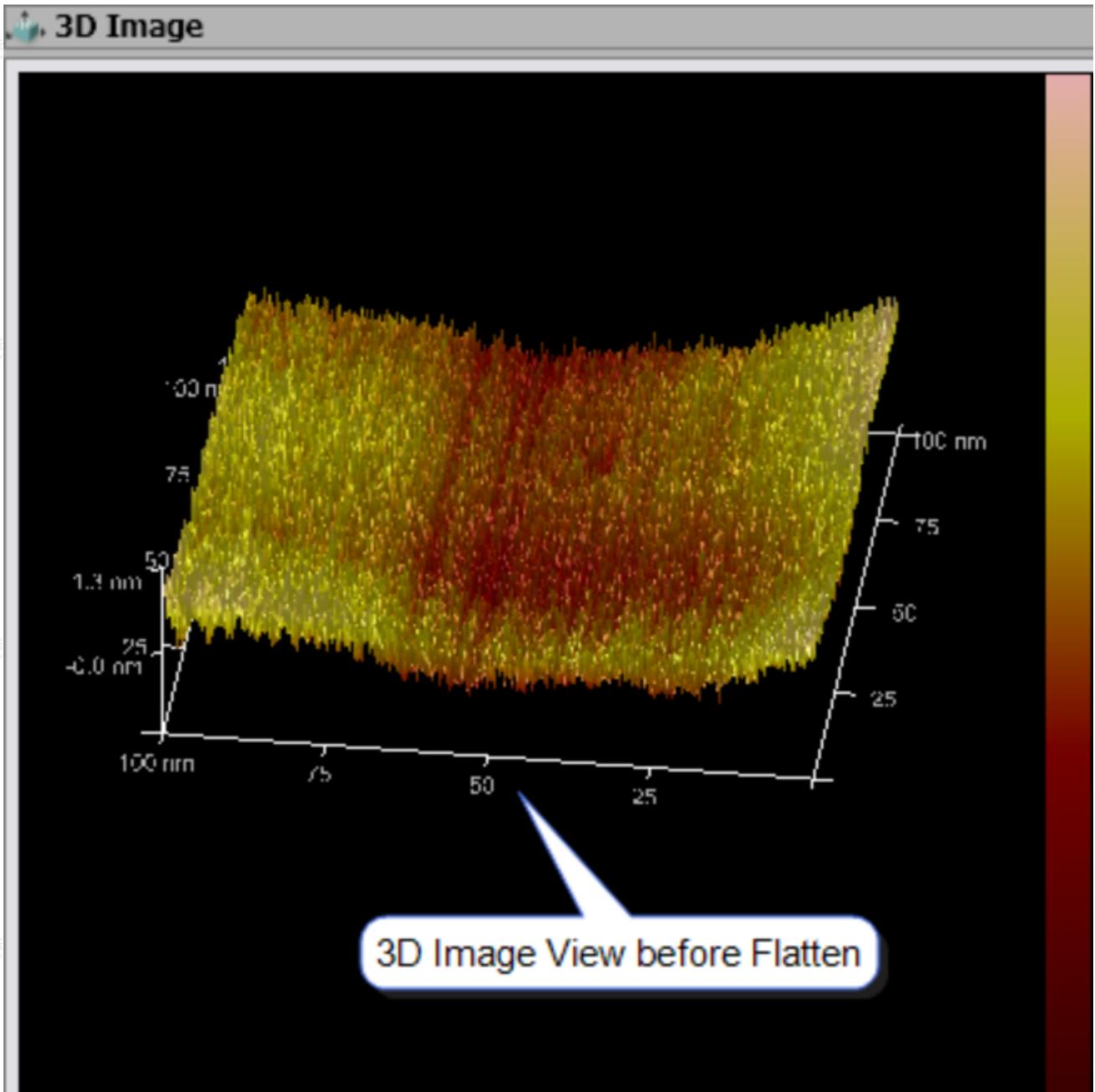


图5.1 包含弯曲的图像

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

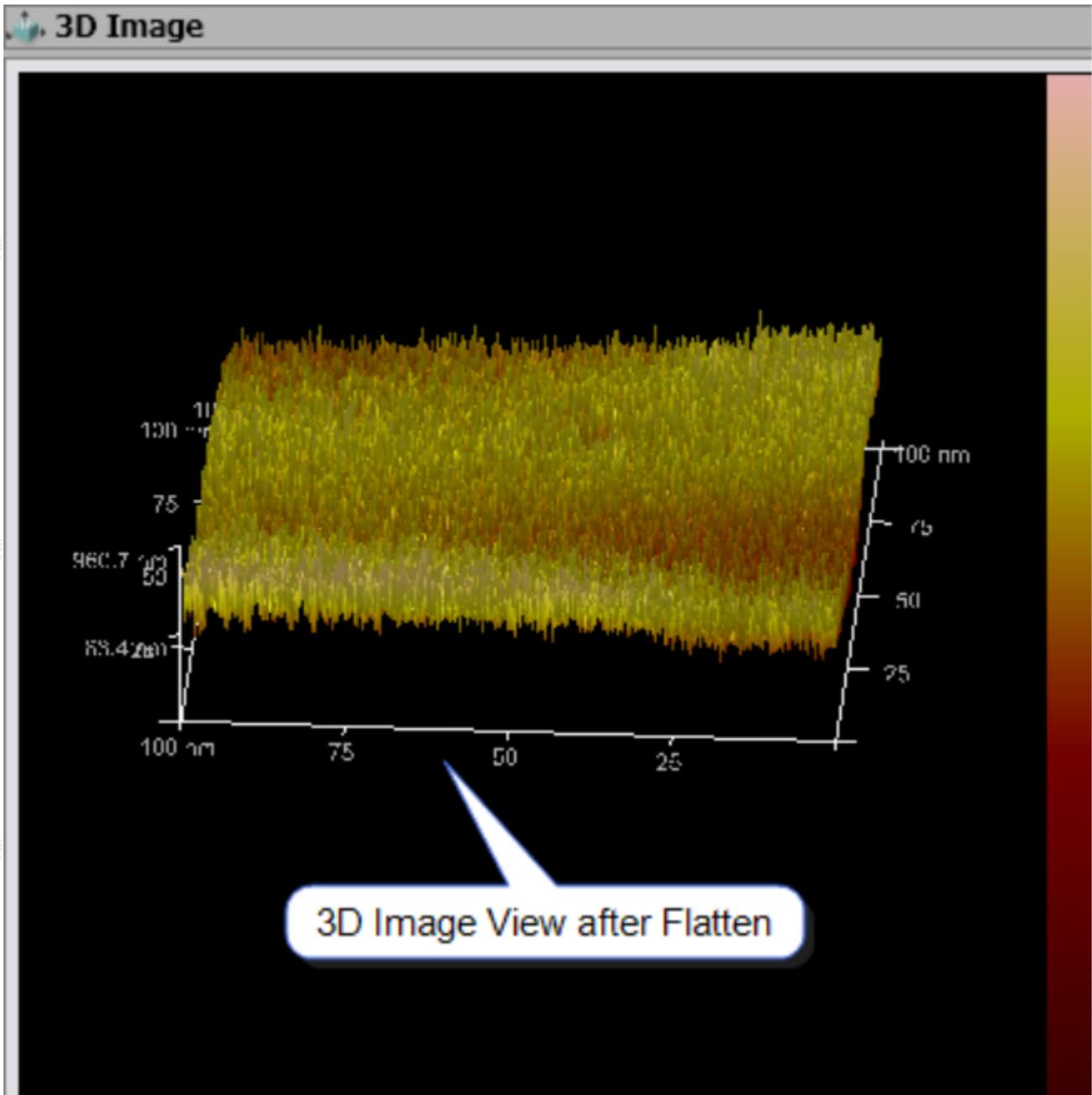


图5.2 拉平处理后的图像

## 5.1 拉平处理理论

拉平处理可以消除图像中的低频噪音并纠正图像的倾斜。每条扫描线都被单独拟合以将其位置平移至0附件（0阶操作），纠正倾斜（1阶）并除去图像的弯曲（2阶）和扭曲（3阶及以上）。每条线用最小二乘法多项式拟合得到拟合曲线并扣除后实现拉平。有时，需要用stopband（在图上画框表示该部分区域不参与基线运算）覆盖图像上的某些形貌特征再进行拟合。多项式拟合中，0阶所用为 $z = a$ ；1阶为 $z = a + bx$ ；2阶为 $z = a + bx + cx^2$ ；3阶为 $z = z = a + bx + cx^2 + dx^3$ ；4，5，6阶依此类推。

## 5.2 拉平处理步骤

图像包含扫描线引起的噪音时，选用拉平处理进行去除，其步骤如下：

1. 在浏览窗口中打开欲处理的图像文件。例如下图，图中扫描线在Z方向上并未对齐，而且在Y方向上还有弯曲。

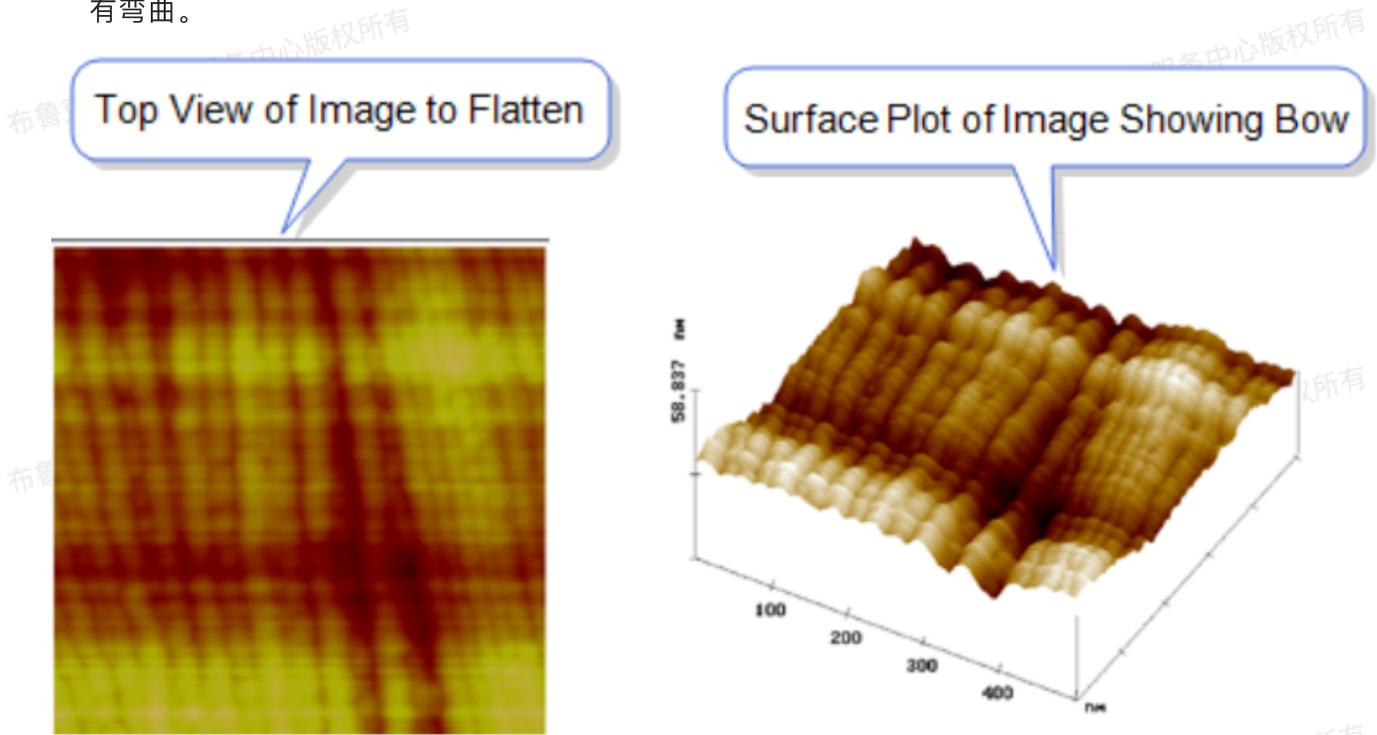
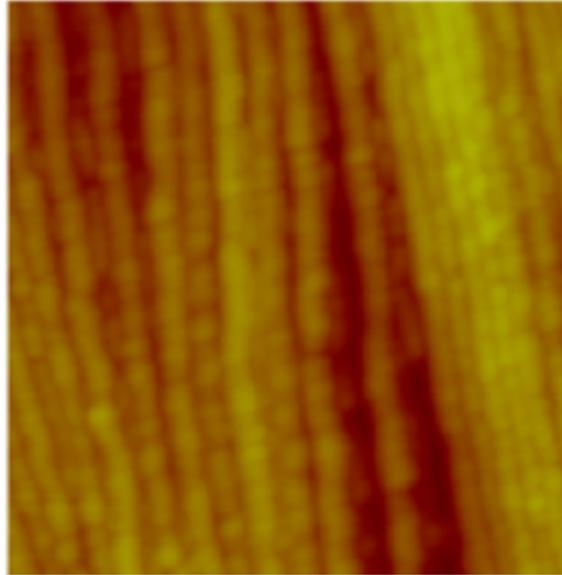


图5.2.1 间同立构聚苯乙烯AFM图像，未拉平

2. 点击菜单栏中的Filters > Flatten或者工具菜单栏中的拉平图标进入拉平处理界面。
3. 将拉平阶数选为0阶以移除扫描线在Z方向的错位。
4. 点击Execute进行拉平处理。处理后的图像如图。

Top View of Flattened Image



Surface Plot View of Flattened Image

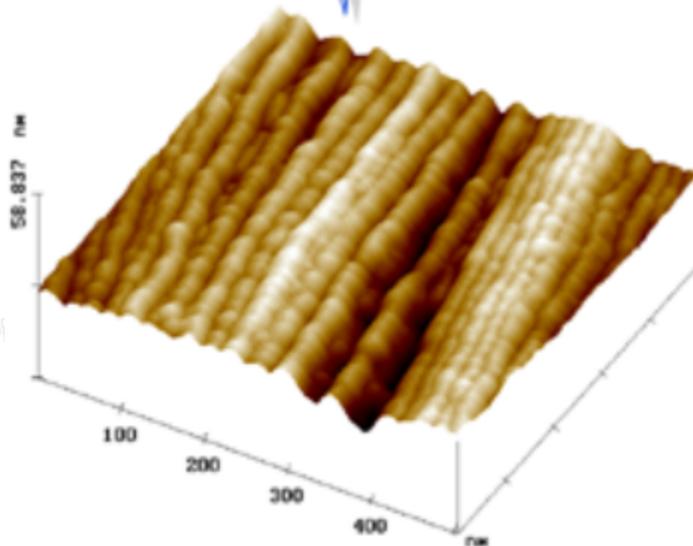


图5.2.2 间同立构聚苯乙烯AFM图像，拉平后

5. 可以选择其它阶数的拉平处理相比较。点击Undo图标或者在操作历史菜单中可以返回上一部操作。

### 5.3 拉平处理界面

表5.3 拉平处理界面输入参数

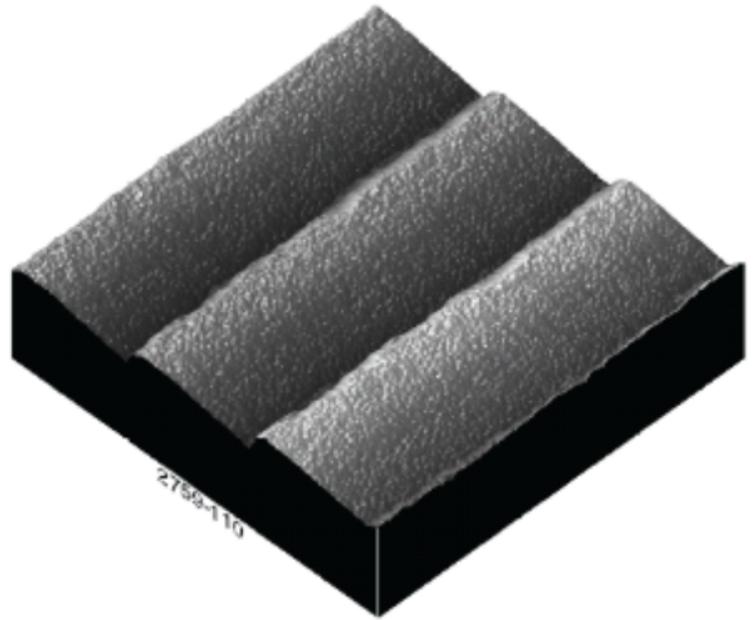
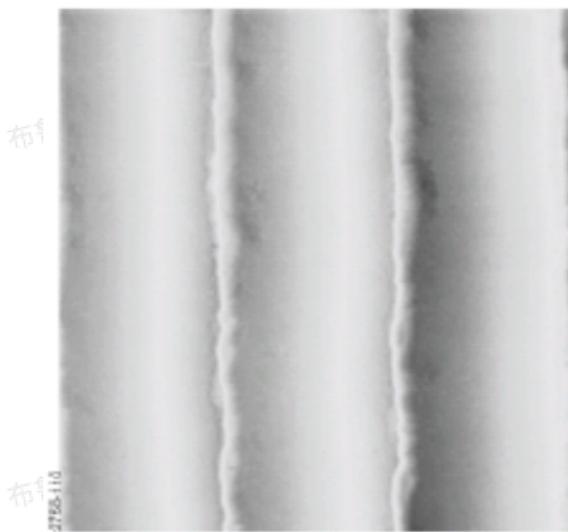
参数	描述
Flatten Order	最小二乘法多项式拟合的阶数。可选择从0阶到6阶
Flatten Z Thresholding Direction	定义用最小二乘法多项式拟合的像素点 <ul style="list-style-type: none"> <li>· Use Z&gt;=: 使用高于等于某个阈值高度的像素点</li> <li>· Use Z&lt;: 使用低于某个阈值高度的像素点</li> <li>· No Thresholding: 使用所有像素点</li> </ul>
Find Threshold for	选择阈值是作用于整个图像还是每条扫描线单独使用
Mark Excluded Data	将所有被覆盖住的像素点标记为蓝色
Number Histogram Bins	高度柱方图中的柱方bin的数目
Threshold Height	阈值高度值（定义为相对于最低点的高度）
Use Histogram	选择是否显示高度柱方图方便调整阈值高度

## 6 高斯滤波

高斯滤波处理对图像沿着横轴或纵轴方向进行低通或者高通的高斯滤波处理。高斯滤波处理可以只去除Y方向的噪音而不影响X方向，或者反过来只处理X方向而不影响Y方向，与二维图谱功能具有类似的功能。

### 6.1 低通滤波

低通滤波处理消除了图像中沿着X轴或Y轴方向的高频噪音，其对图像处理的结果是细节的丢失或模糊化处理。例如对于如下的沿着X方向的光栅结构，



**A. Original Image.**

图6.1.1 沿X方向的光栅结构AFM图像

沿Y方向做低通滤波处理后，光栅上的高频噪音（细小凸起）被去除



**B. Filter axis = Y.**

图6.1.2 沿Y轴进行低通滤波处理

布鲁克中国客户服务中心版权所有

而沿着X方向进行低通滤波处理后，光栅结构被去除。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

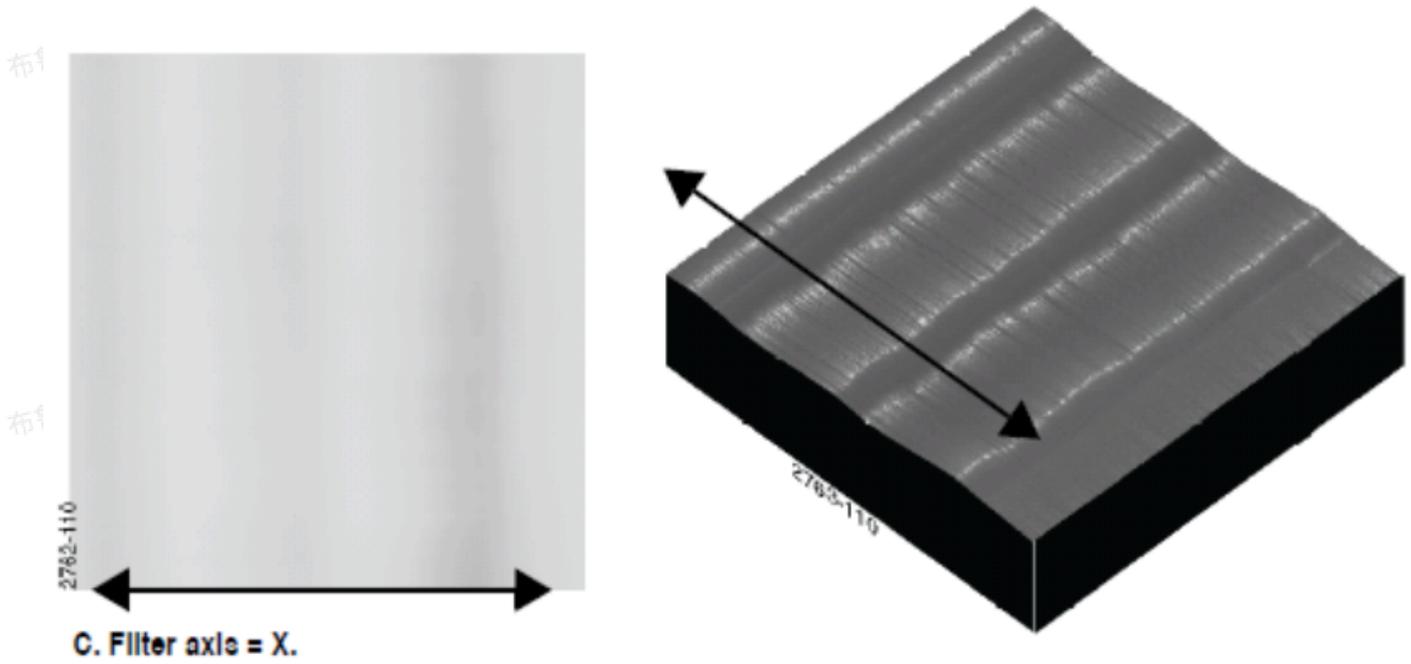


图6.1.3 沿X轴进行低通滤波处理

## 6.2 高通滤波

高通滤波处理去除了图像在横向或纵向上的低频噪音，且“直流”信号（即平均值）也被去除，去除后的图像上保留了图像区域中特征的变化。高通滤波处理通常用来找出图像上各特征的边缘。

一个例子是坡莫合金的磁性畴区，其AFM图像如下所示。

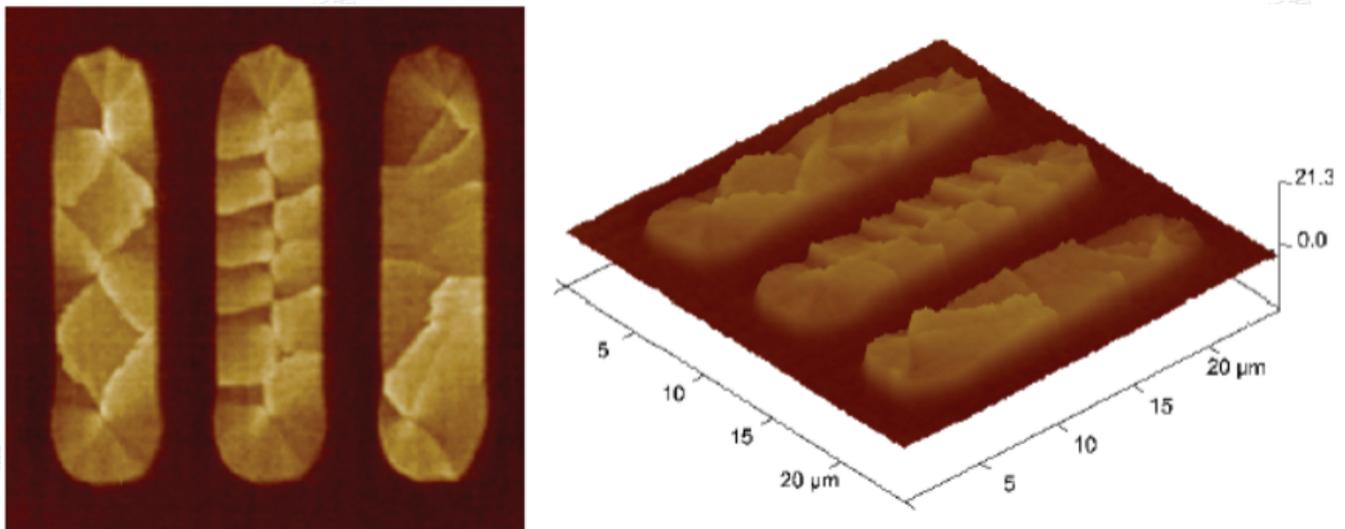
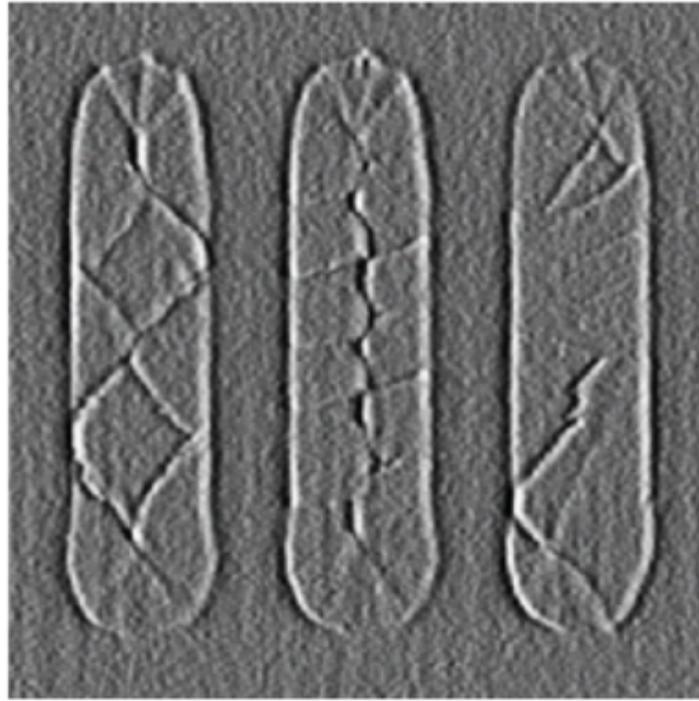


图6.2.1 坡莫合金

对改图进行沿X方向的高通滤波处理后，X方向畴区界面的特征被高亮出来。



A

图6.2.2 进行X方向的高通滤波处理

对改图进行沿Y方向的高通滤波处理后，Y方向畴区界面的特征被高亮出来。



B

图6.2.3 对Y方向进行高通滤波处理

两幅图的加和则清晰显示了畴区界面。



C

图6.2.4 两种处理的加和

### 6.3 高斯核函数算法

高斯滤波利用了  $1 \times N$  的矩阵（ $N$  由 Filter Size 参数定义），其矩阵元由高斯函数定义，将该二维矩阵作用于图像的像素点上以实现滤波处理。

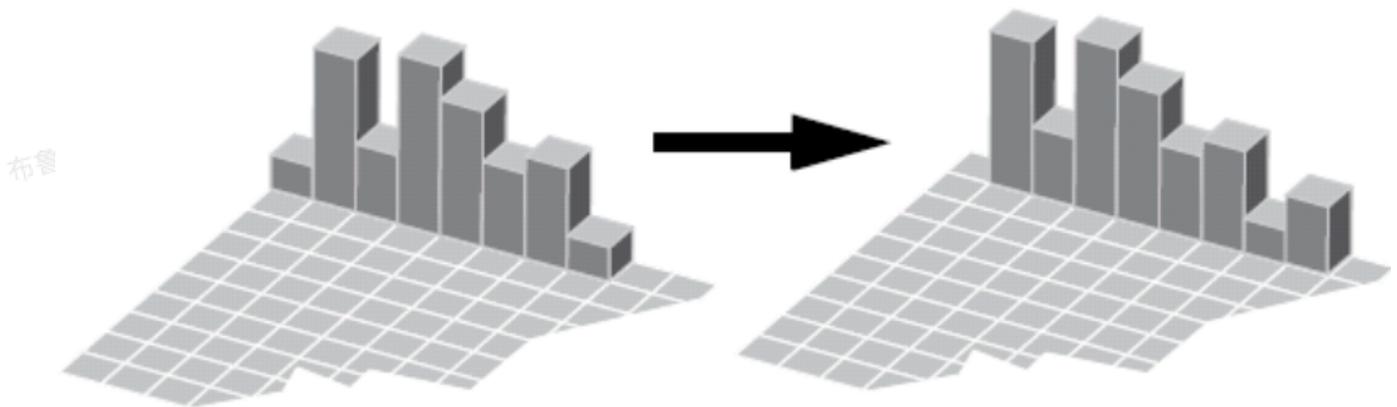


图6.3.1 高斯滤波

第  $i$  个矩阵元高斯核函数为：

$$f_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{i}{\sigma}\right)^2}$$

其中  $\sigma$  由 Filter Size 决定。利用该核函数，低通滤波处理可表示为

$$a_0^L = \sum_{-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} a_i f_i$$

高通滤波可表示为

$$a_0^H = a_i - \sum_{-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} a_i f_i$$

## 6.4 高斯滤波范围

Filter Size参数对应于高斯函数中的 $\sigma$ 值，大概能包含住高斯曲线上以中心左右对称约68%的范围。越大的Filter Size定义的高斯曲线越宽。低通滤波处理中，它会更强调更远离高斯曲线中心的数据点从而加强低通滤波的平均效果；而在高通滤波中，大的Filter Size则会削弱其效果。

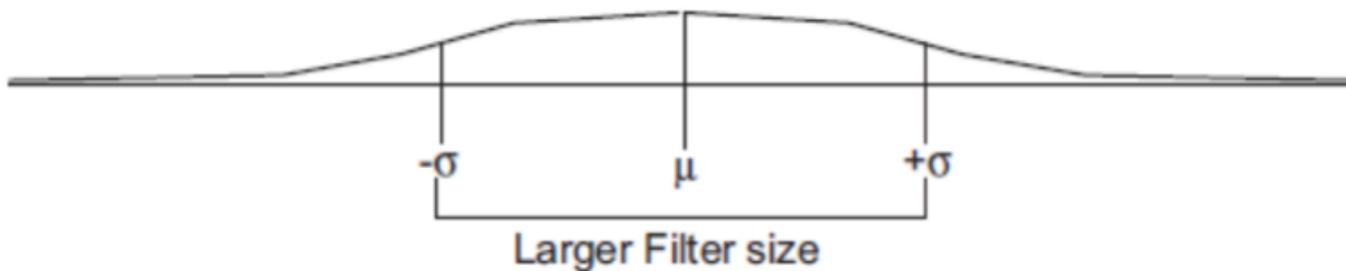


图6.4.1 大的滤波范围

越小的Filter Size定义的高斯曲线越尖，使得低通滤波效果削弱；而高通滤波效果更强。

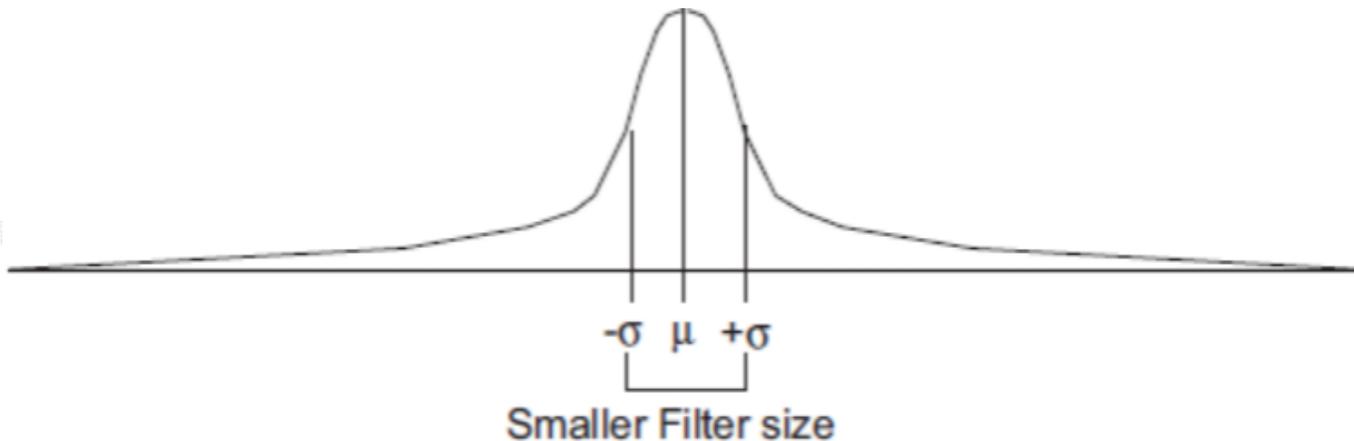


图6.4.2 小的滤波范围

## 6.5 高斯滤波步骤

1. 在浏览窗口中双击打开欲处理的图像。
2. 在菜单栏中点击Filter > Gaussian或者点击工具菜单栏中的高斯滤波图标进入界面。

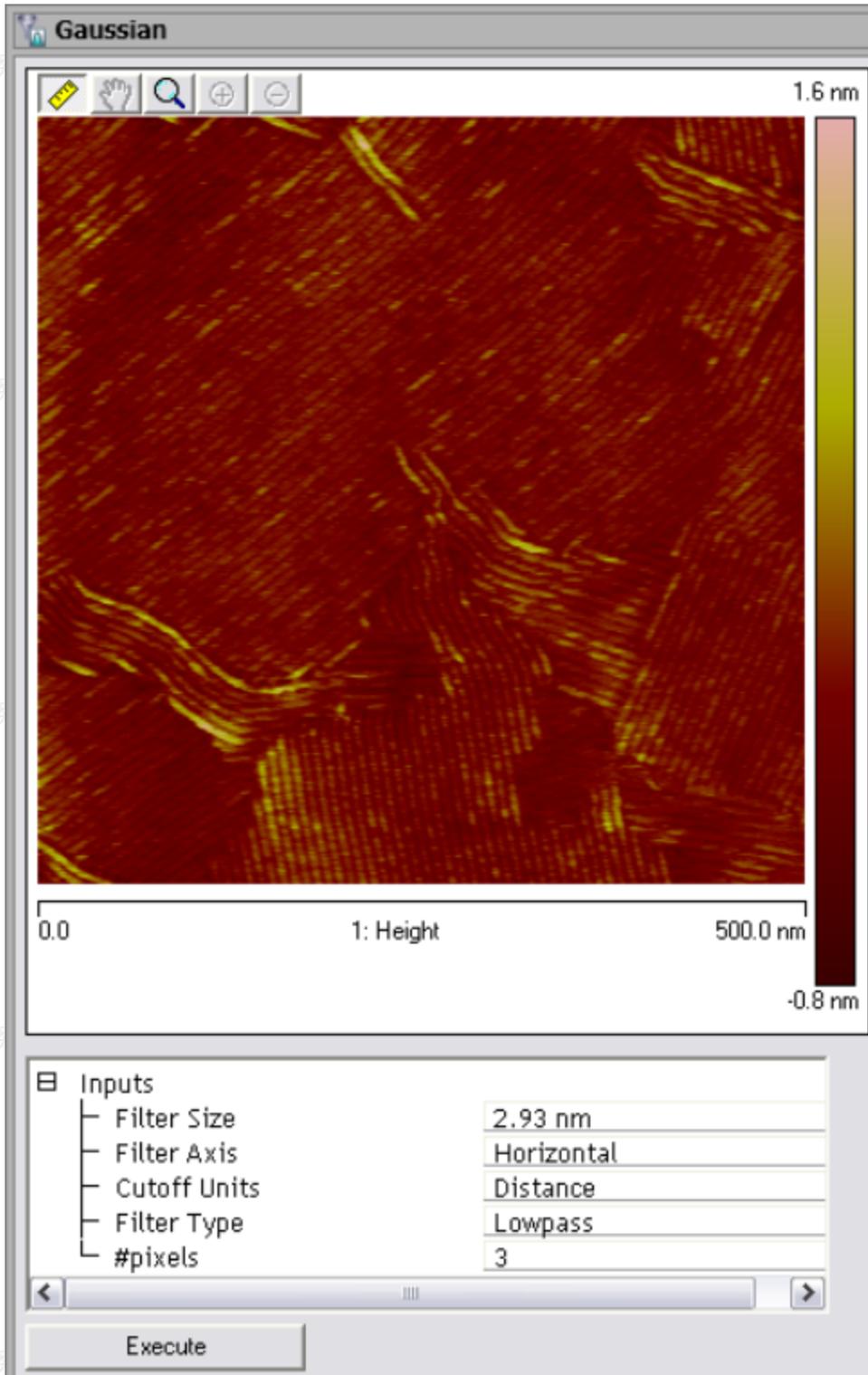


图6.5.1 高斯滤波界面

3. 设置输入参数。
4. 点击Execute完成高斯滤波。

5. 点击Undo图标或者在操作历史菜单中可以返回上一部操作。

## 6.6 高斯滤波参数

表6.6 高斯滤波参数

参数	描述
Filter Size	高斯滤波核函数的 $\sigma$ 值。其数值决定于截止频率选的表达方式。其最小值为3个像素点，最大值为扫描范围的一半。
Filter Axis	<ul style="list-style-type: none"><li>· Horizontal, 对图像X轴方向进行一维高斯滤波</li><li>· Vertical, 对图像Y轴方向进行一维高斯滤波</li></ul>
Cutoff Units	截止频率的表达方式, 可选择 <ul style="list-style-type: none"><li>· 距离</li><li>· 空间频率</li><li>· 时间</li><li>· 频率</li></ul>
Filter Type	选择低通或是高通滤波
#pixels	Filter Size的相应像素点数目。其最小值为3个像素点, 最大值为扫描范围的一半。

## 7 图像运算



图像运算功能将图像中的每一个像素点数据与另一个扫描范围相同点数相同的图像中相应的数据进行加减乘除四则运算。例如, 图像减法运算对于比较样品在不同时间下的性质或形貌变化非常有用。图23展示了图像减法功能, 图1是图2减去图3的结果。

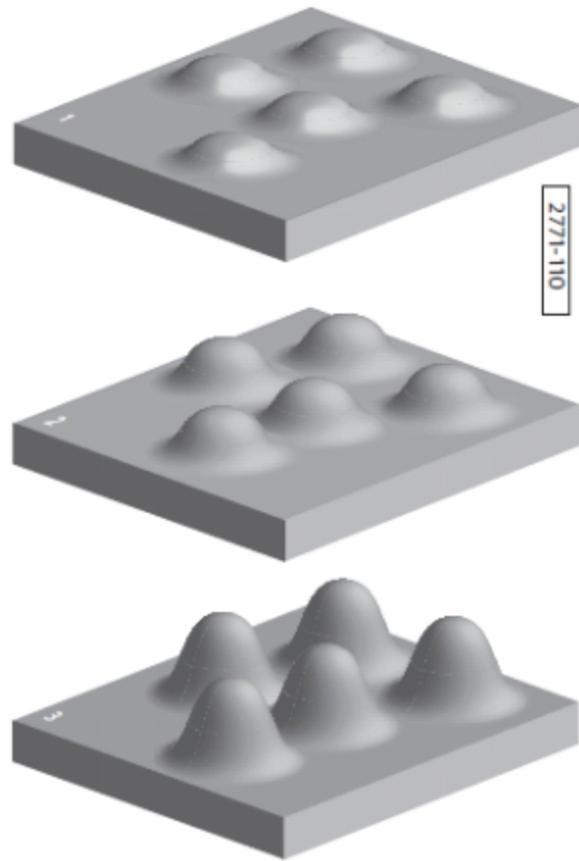
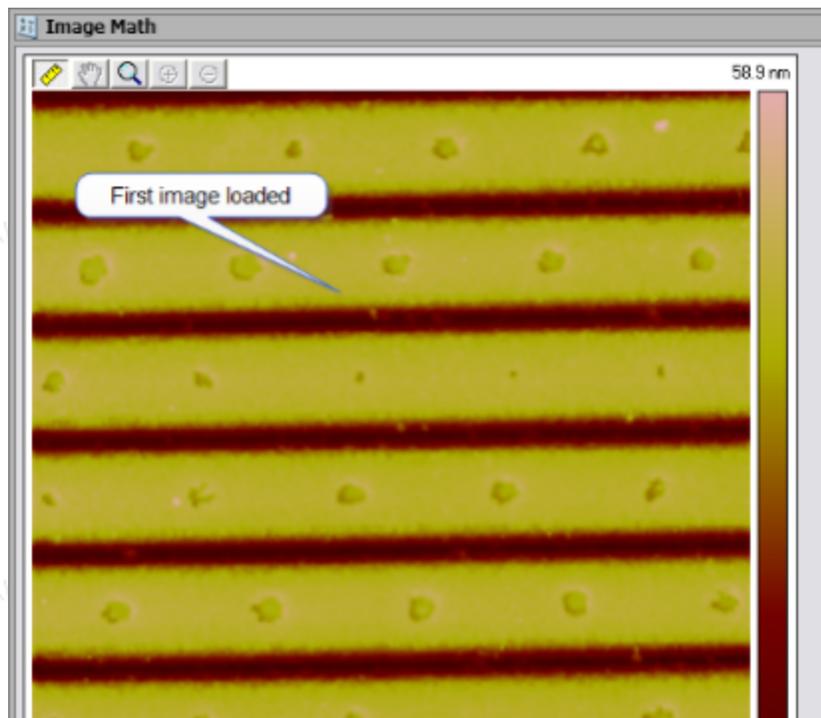


图7.1 图像减法举例

### 7.1 图像运算步骤

1. 在浏览窗口中双击打开欲处理的图像。
2. 在菜单栏中点击Filter > Image Math或者点击工具菜单栏中的图像运算图标进入界面。最初载入的图像为图像A，此时图像B是一个单位矩阵。



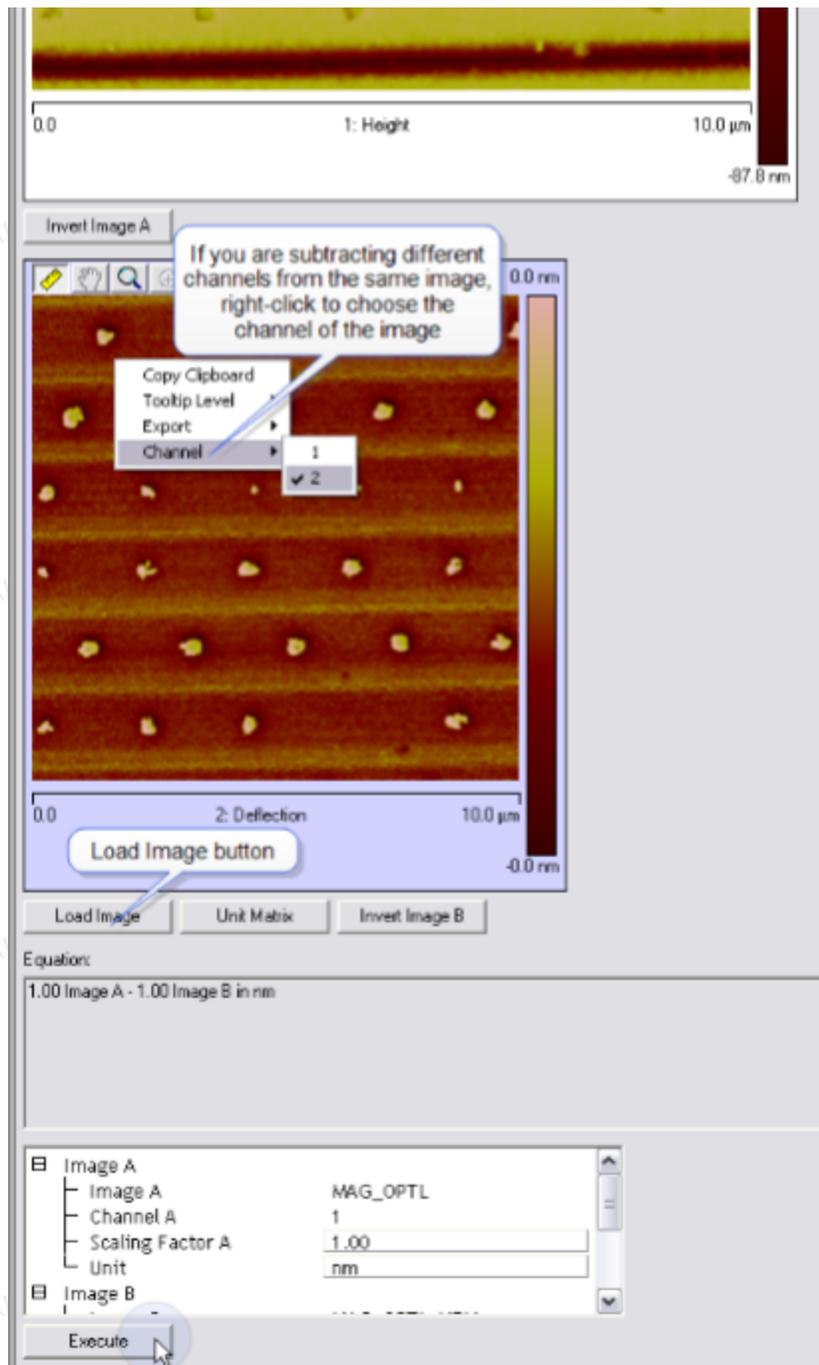


图7.1.1 图像运算窗口

3. 点击Load Image载入欲进行运算的另一张图像，即为图像B。
4. 在图像上点击鼠标右键在下拉菜单中选择Channels即可更改通道，或者在图像运算输入窗口中的Channels中更改。
5. 在Operator中选择运算方式，Scaling Factors中可为每个图像设置一个系数。

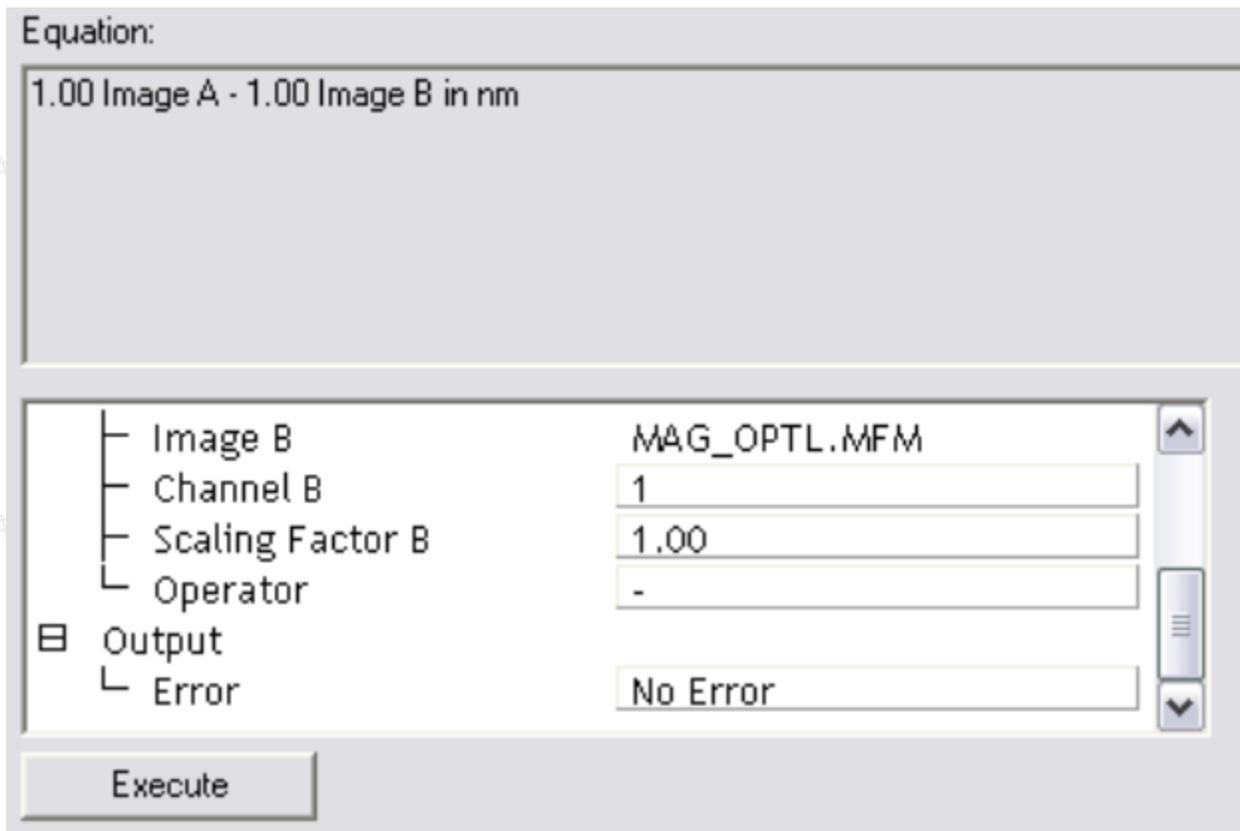


图7.1.2 图像运算输入窗口

6. 点击Execute完成运算。运算后的图像显示在图像A中。
7. 点击Invert Image可以将相应图像中每个像素点数据乘以-1。
8. 点击Undo图标或者在操作历史菜单中可以返回上一部操作。

## 8 低通滤波

低通滤波操作将每个像素点数值由其周围 $3 \times 3$ 范围内的8个像素点平均值代替，从而能有效消除图像中的高频噪音。

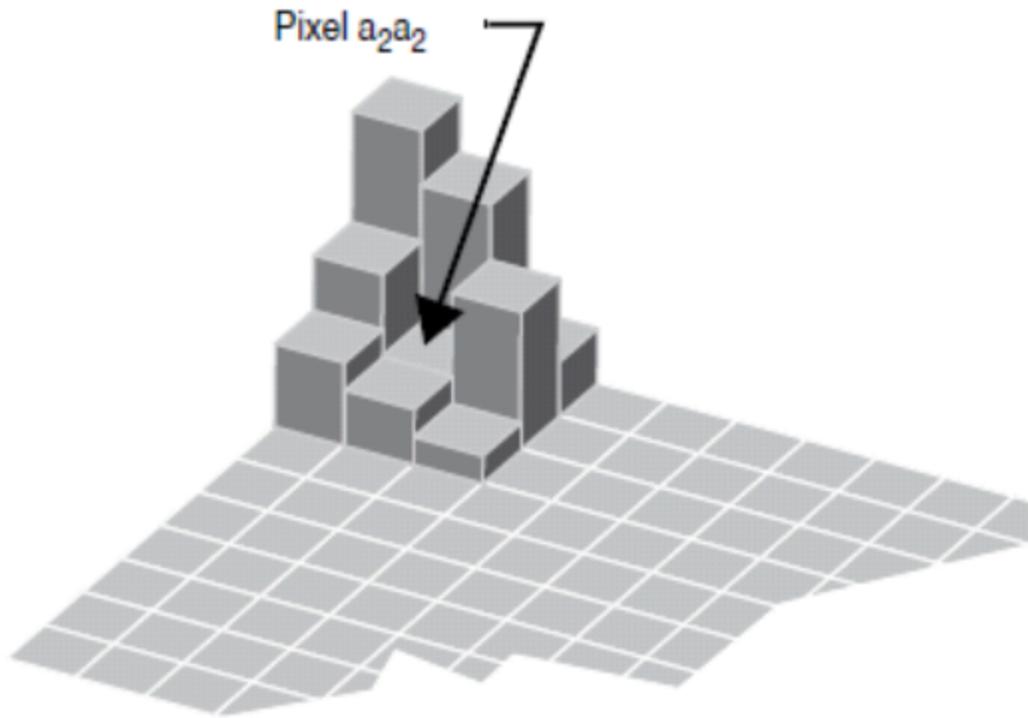


图8.1 低通滤波描述

由于历史遗留原因，该处理方式仍被称作“低通滤波”，虽然从现在来看，叫做均值滤波要更加合适。真正的“低通滤波”处理，请参考高斯滤波和二维谱图。

## 8.1 低通滤波步骤

1. 在浏览窗口中双击打开欲处理的图像。
2. 在菜单栏中点击Filter > Lowpass 或者点击工具菜单栏中的低通滤波图标进入界面。

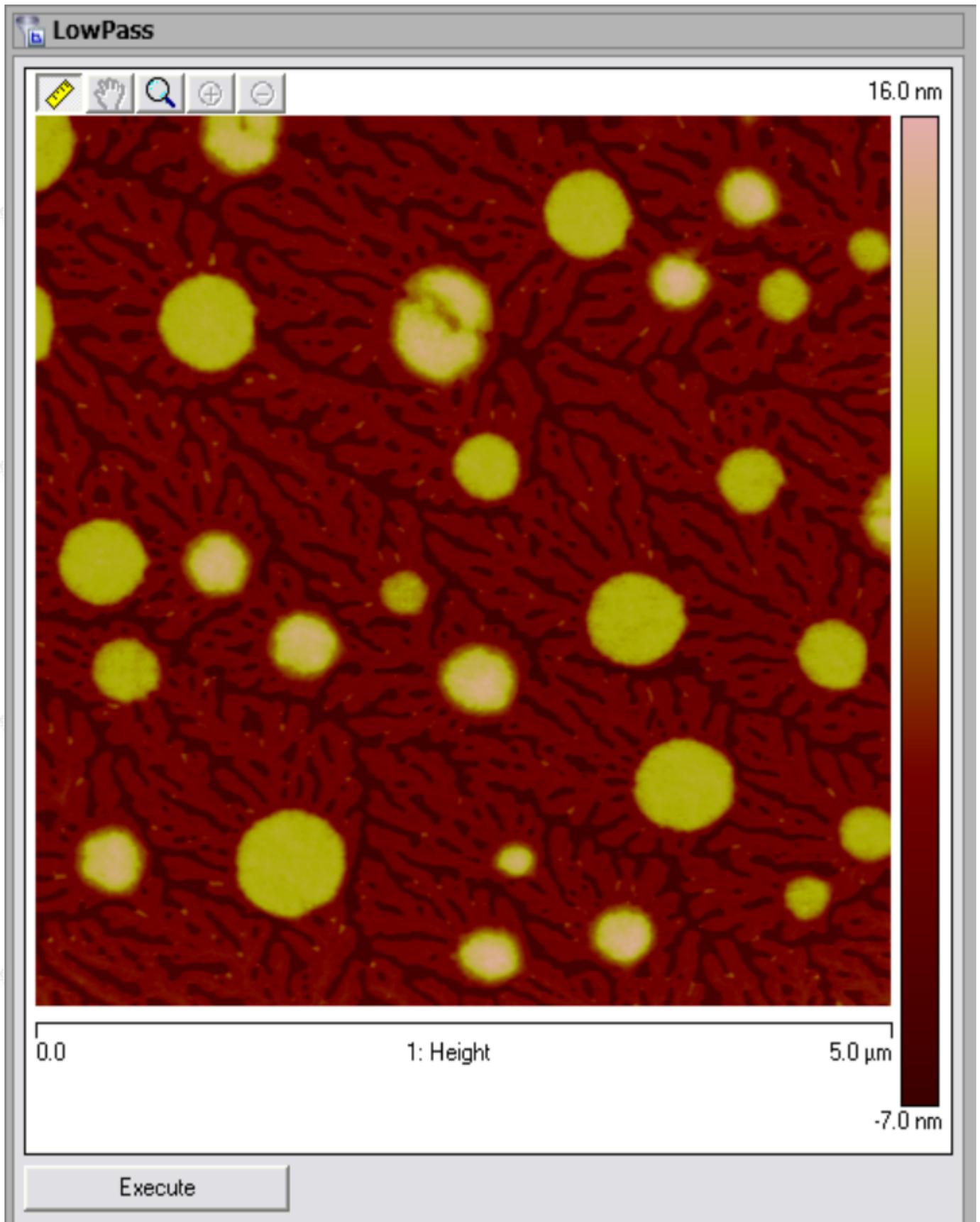


图8.1.1 低通滤波窗口

3. 点击Execute完成滤波处理。
4. 点击Undo图标或者在操作历史菜单中可以返回上一部操作。
5. 可以进行多次滤波处理以实现图像模糊化处理。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

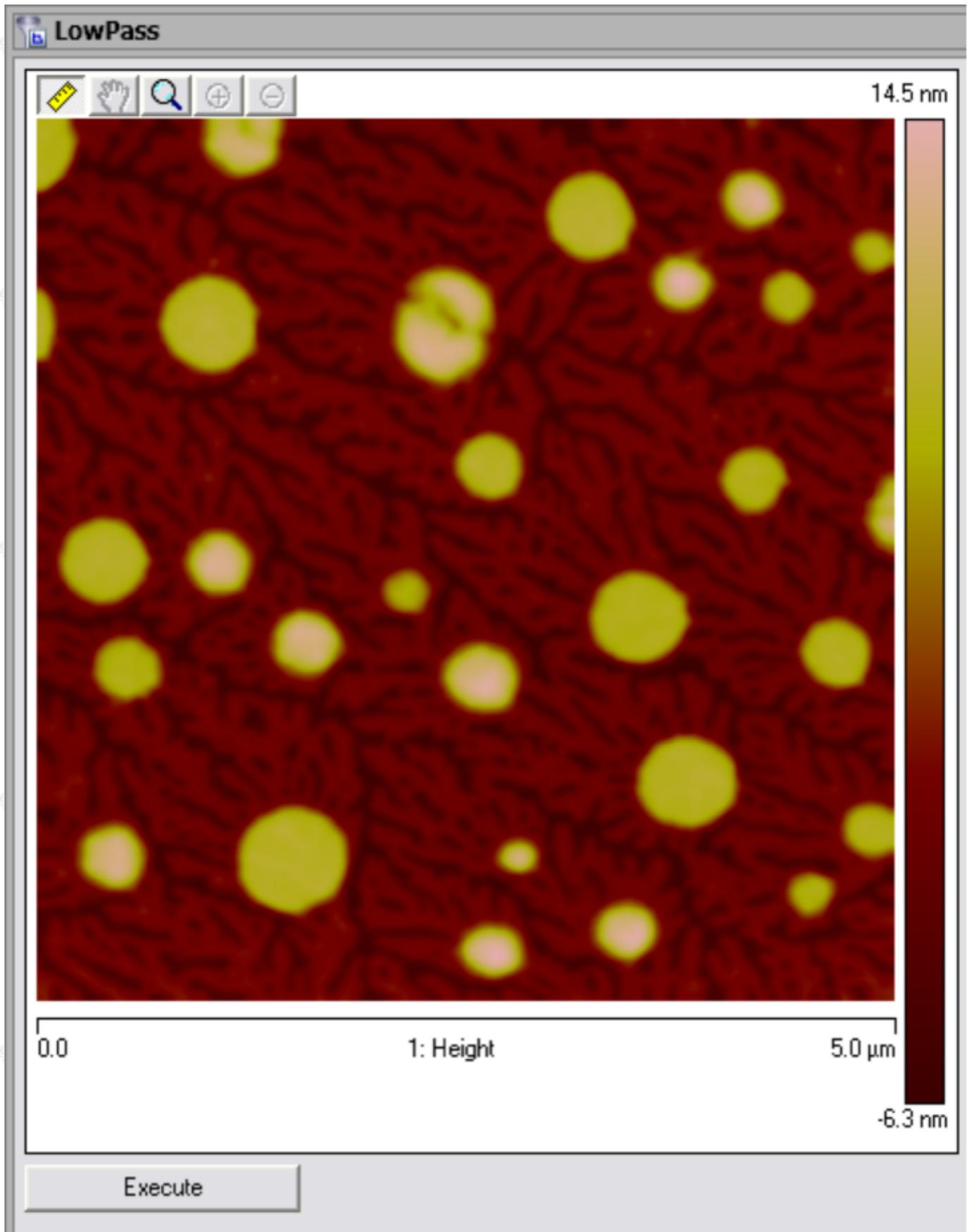


图8.1.2 低通滤波处理后的图像

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

## 9



# 中位数滤波

中位数滤波与低通滤波类似，都能减小图像中高频信号的影响，降低高对比度区域的对比度。相比于低通滤波，中位数滤波的优势是能够去除孤立的坏点而不会严重影响图像分辨率。中位数滤波中，每个像素点数据由周围的一定范围内数据点中位数重新代替，实现滤波处理。滤波范围由Median Order定义，包括 $3 \times 3$ ， $5 \times 5$ ， $7 \times 7$ ， $9 \times 9$ 和 $11 \times 11$ 。

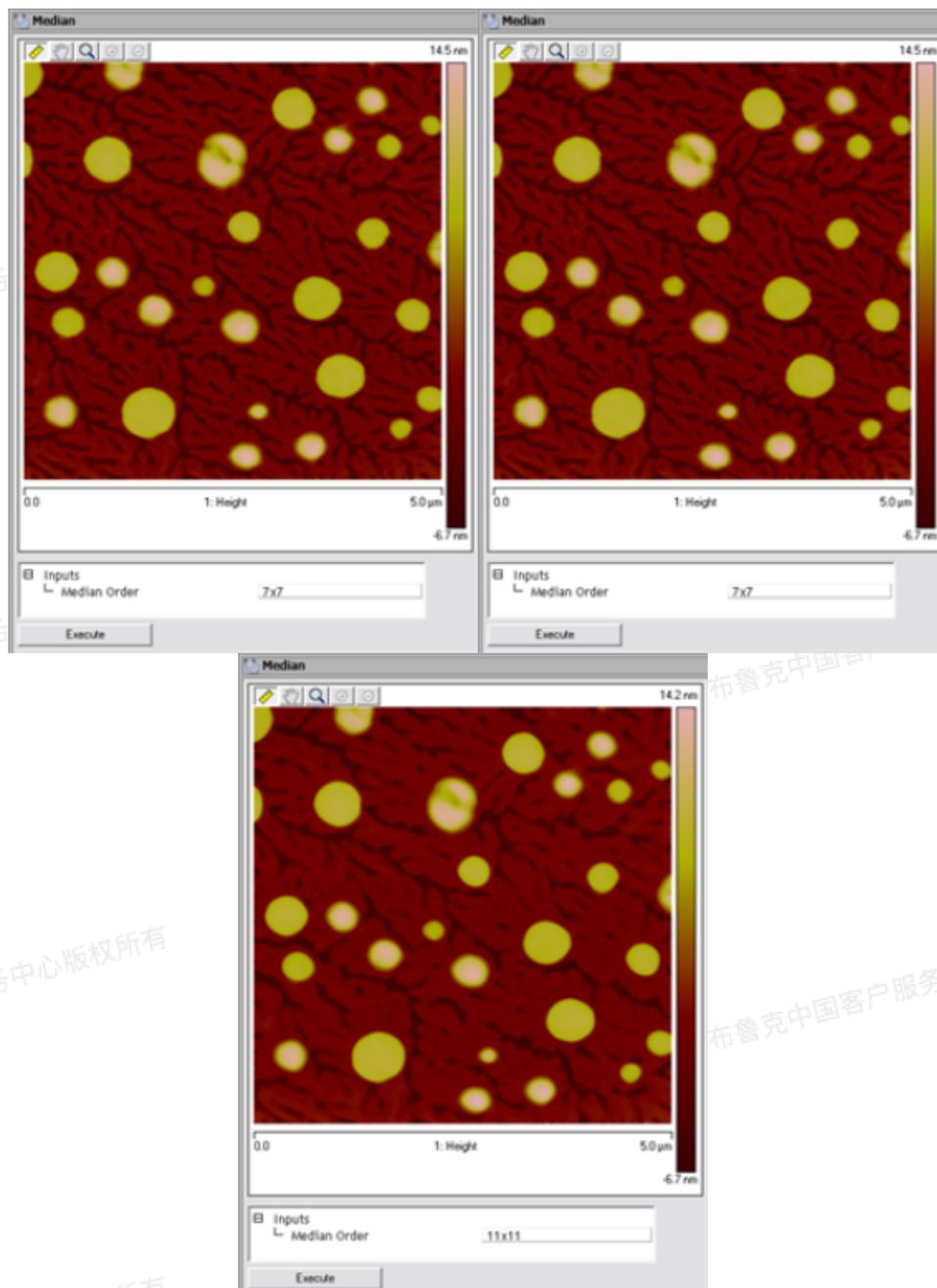


图9.1 中位数滤波效果

### 9.1 中位数滤波步骤

1. 在浏览窗口中双击打开欲处理的图像。

2. 在菜单栏中点击Filter > Median或者点击工具菜单栏中的中位数滤波图标进入界面。
3. 选择Median Order。
4. 点击Execute完成滤波处理。

## 10 面拟合

面拟合处理对图像计算出一个指定阶数的多项式拟合平面并将其从图像中扣除，它可以计算X方向，Y方向或XY方向的拟合平面。选框或反选可以实现对图像中指定区域的像素点进行拟合。图10.1描述了面拟合的处理结果。

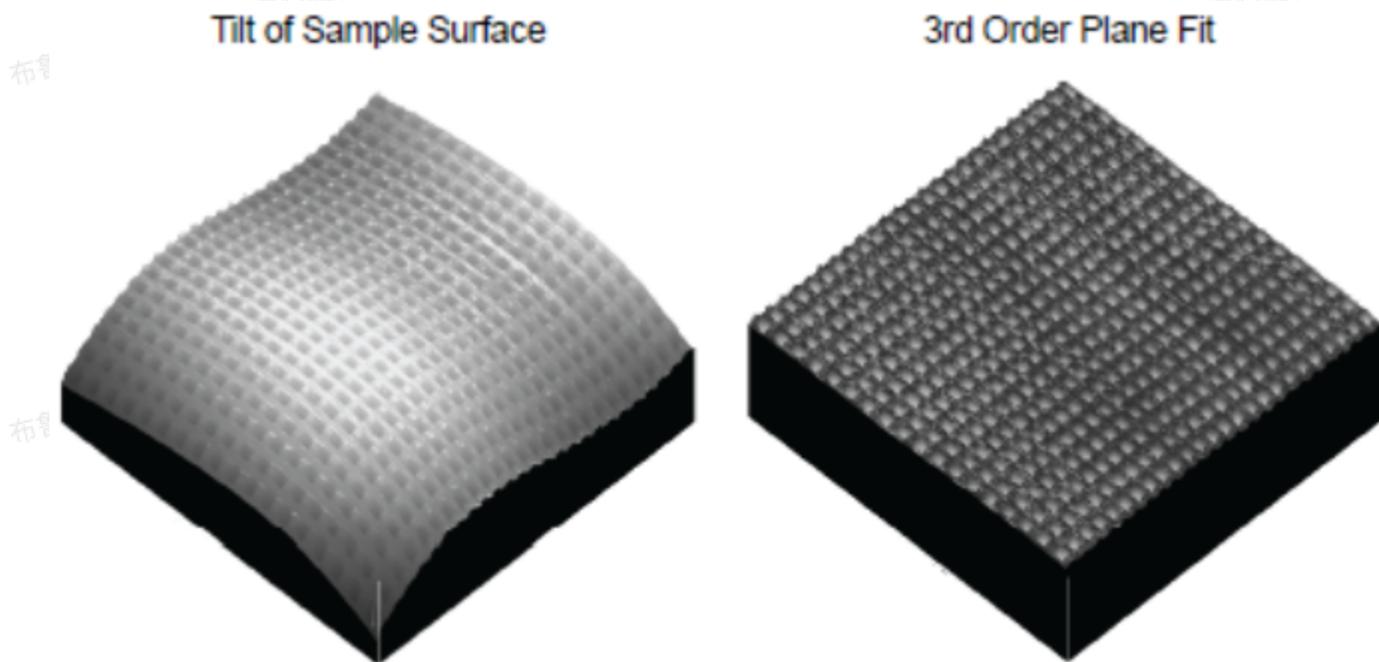


图10.1 面拟合

### 10.1 面拟合步骤

1. 在浏览窗口中双击打开欲处理的图像。
2. 在菜单栏中点击Filter > Plane Fit或者点击工具菜单栏中的面拟合图标进入界面。
3. 在Plane Fit Mode选择X，Y或XY决定拟合平面的方向。
4. 在Plane Fit Order中选择多项式拟合平面的阶数。
5. 点击Execute完成面拟合。

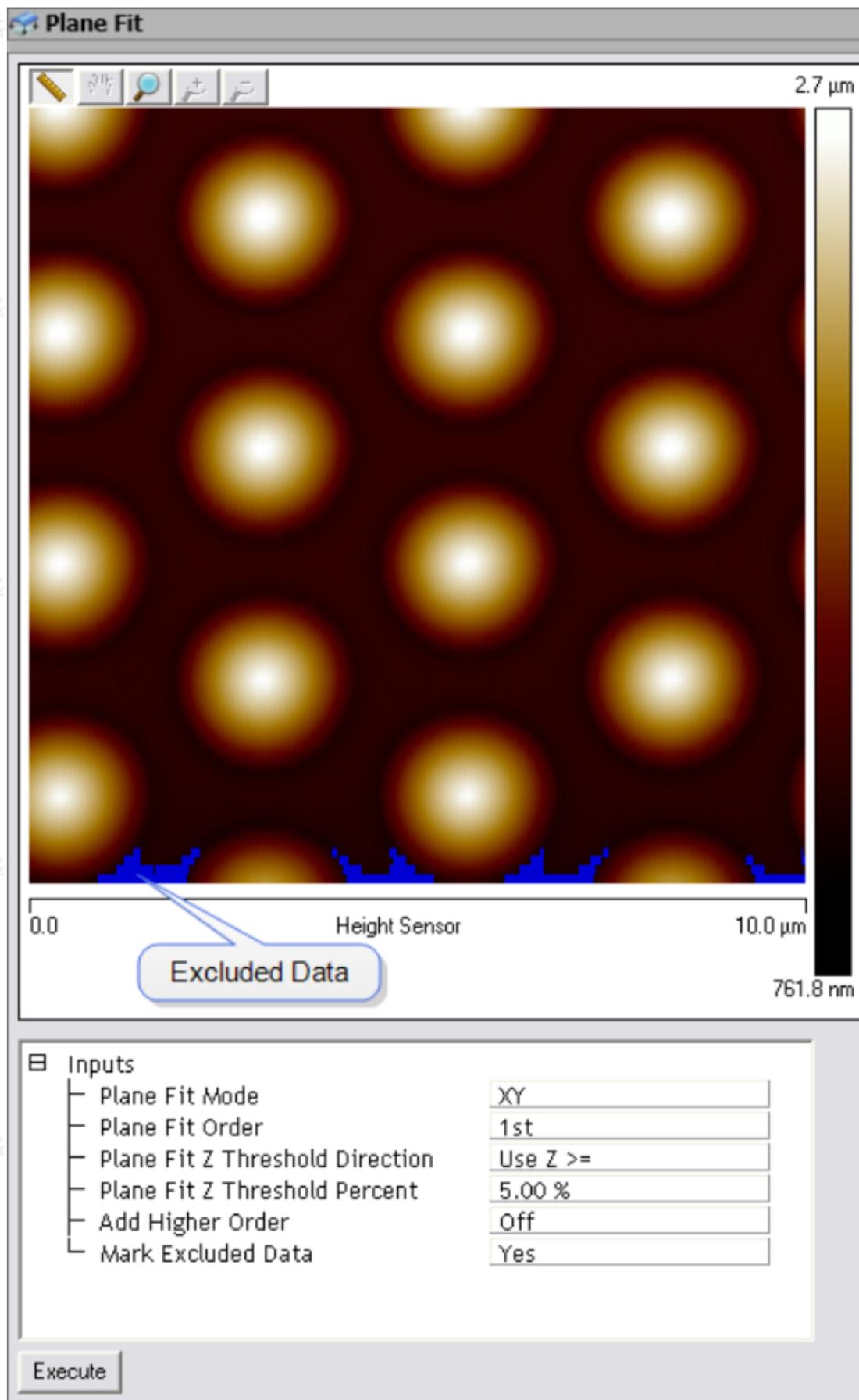


图10.1.1 面拟合窗口

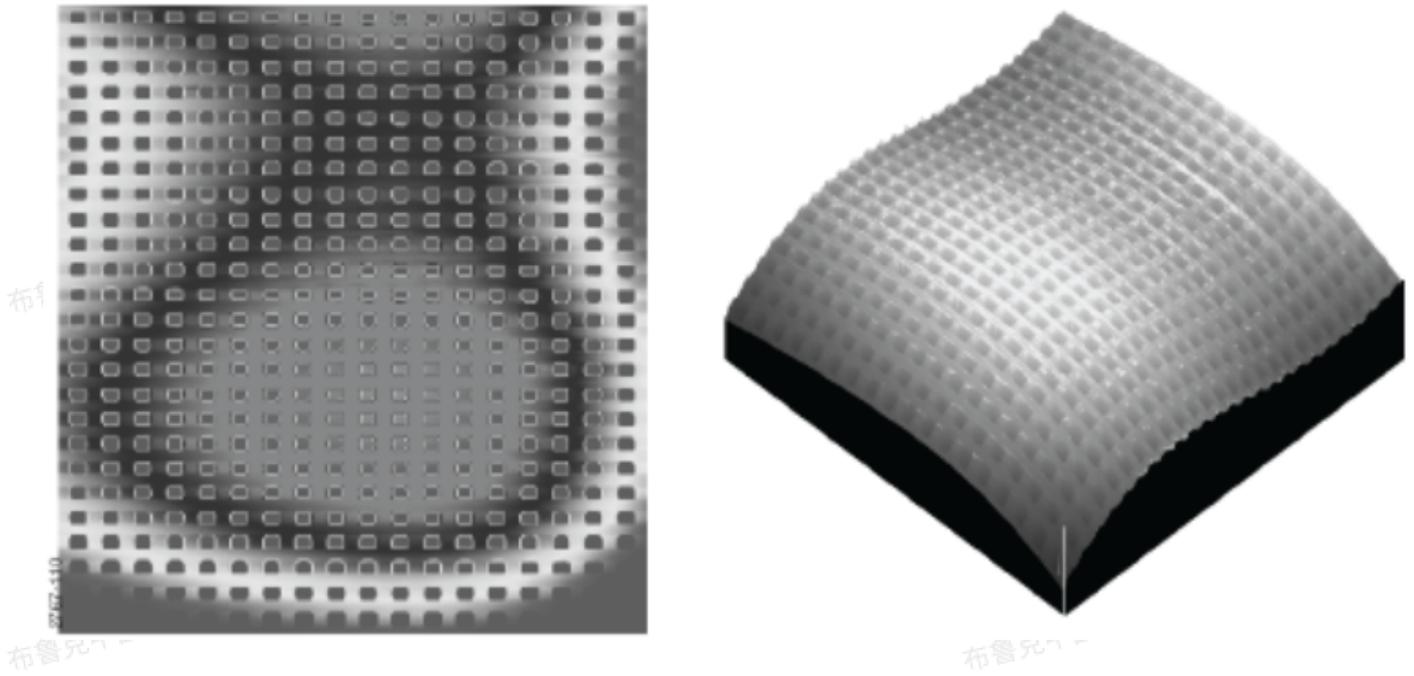


图10.1.2 处理前，马鞍形平面

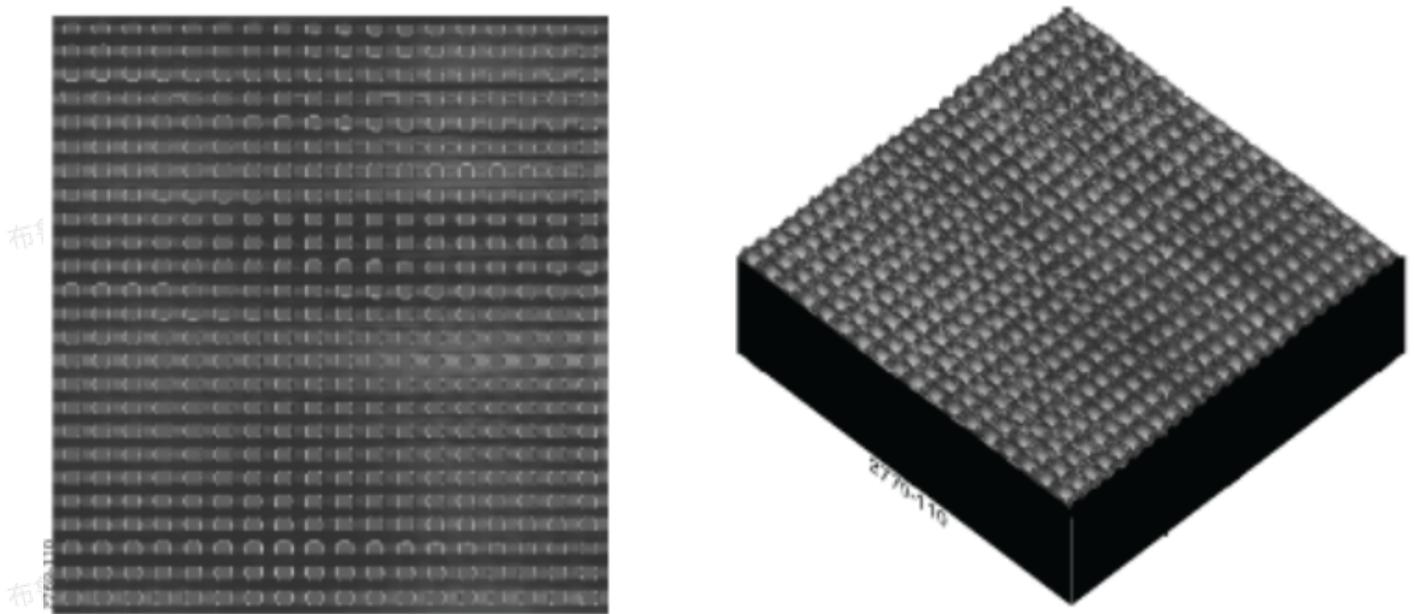


图10.1.3 处理后

要得到好的面拟合处理结果，可以尝试如下处理方式：

- 选择不同的面拟合阶数，比较处理结果。
- 考虑只对某一个方向进行面拟合处理，即选择X或Y而不是XY。
- 考虑对X方向和Y方向进行不同阶数的面拟合处理。
- 比较拉平和面拟合的处理结果。

## 10.2 面拟合参数

表10.2 面拟合参数

参数	描述
Plane Fit Mode	可选X, Y或XY
Plane Fit Order	拟合平面多项式方程的阶数, 可选择从0阶直到6阶
Plane Fit Z Thresholding Direction	定义用面拟合的像素点 <ul style="list-style-type: none"> <li>· Use Z&gt;=: 使用高于等于某个阈值高度的像素点</li> <li>· Use Z&lt;: 使用低于某个阈值高度的像素点</li> <li>· No Thresholding: 使用所有像素点</li> </ul>
Plane Fit Z Threshold Percent	Z向阈值, 以整个图像Z方向范围的百分比表示
Mark Excluded Data	将所有被覆盖住的像素点标记为蓝色

## 11 旋转

实现图像旋转, 其操作步骤如下:

1. 在浏览窗口中双击打开欲处理的图像。
2. 在菜单栏中点击Filter > Rotate或者点击工具菜单栏中的旋转图标进入界面。

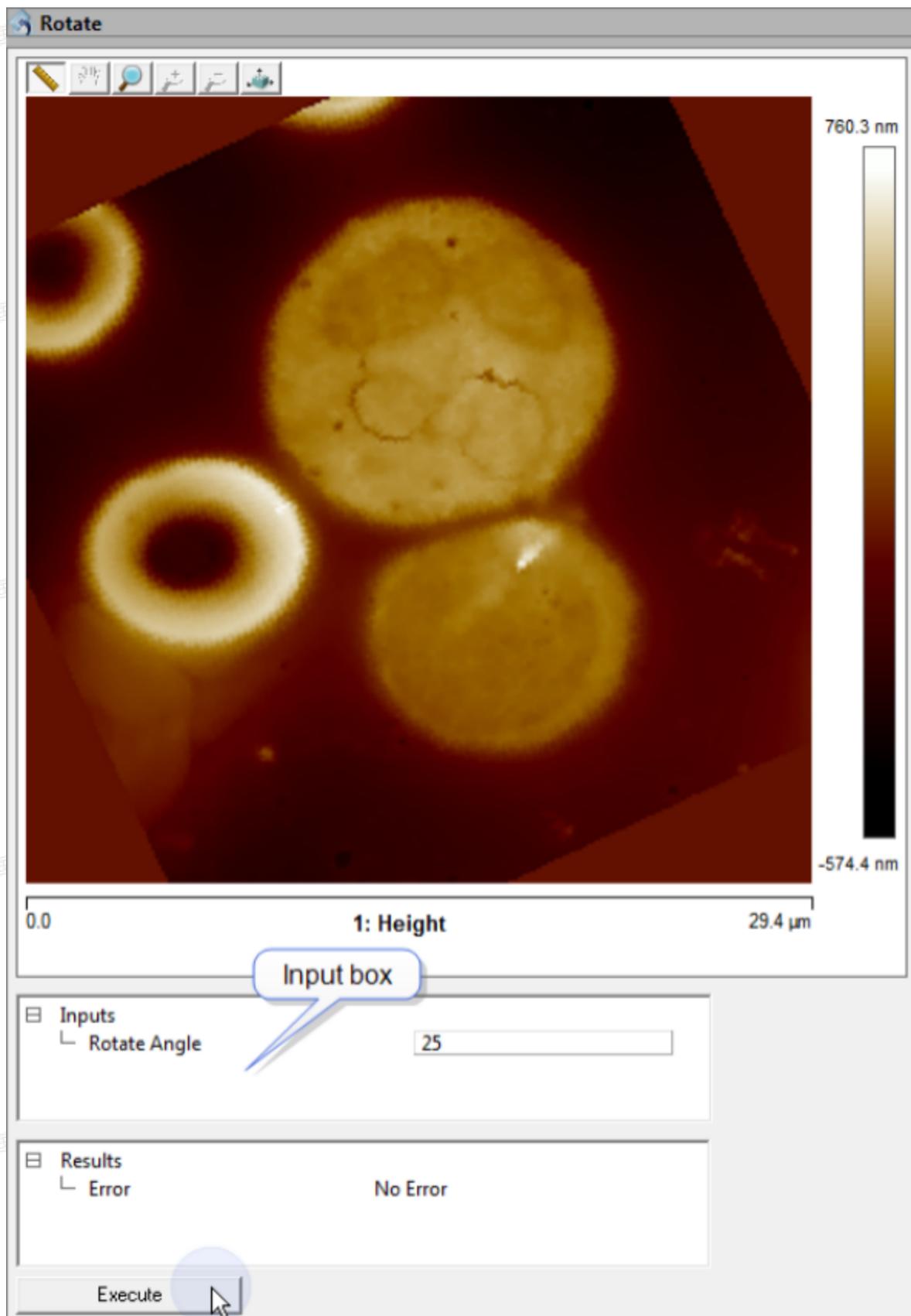


图11.1 旋转窗口

3. 在Rotate Angle中输入欲旋转的角度，点击Execute完成旋转。

## 12



## 二维图谱

二维图谱功能能将图像文件（空间上的）使用二维快速傅里叶变换（FFT）转换到空间频率上的谱图。旋转或反选指定的空间频率可以实现对图像特定的滤波处理。因此，二维图谱可以对图像做低通、高通、带通或是陷波滤波处理，其应用包括除去图像中的电磁噪声或提取特定的结构信息。

### 12.1 利用二维图谱实现低通滤波

有时需要对图像进行低通滤波处理以消除一些高频噪声的影响。通常，这可以在二维图谱中框选住图谱中央区域（即低空间频率区域），表示只有低频信号被保留下来，谱图外围的高频信号被去除。当重构至图像文件时，图像看起来会更平滑，噪点和跳线减少，图像的长空间波长特征更显著。

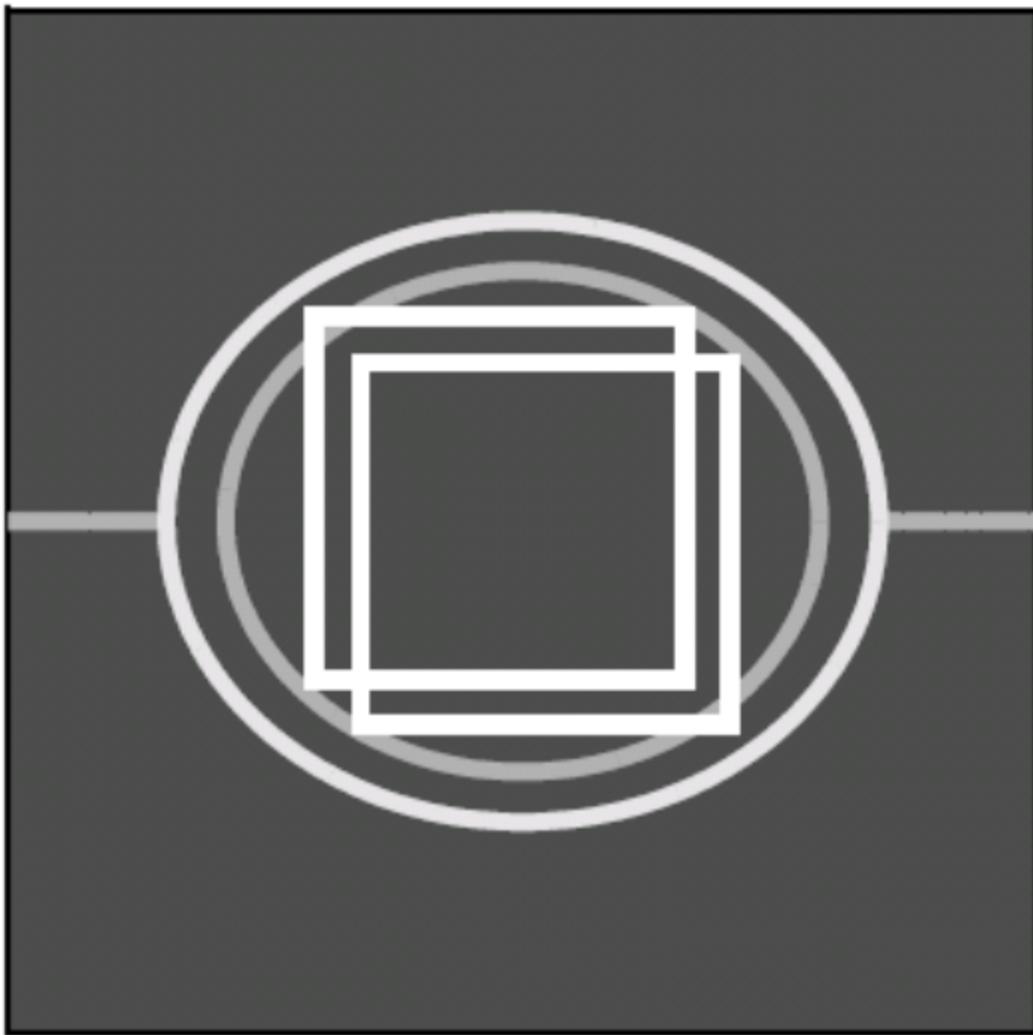


图12.1.1 低通滤波举例

### 12.2 利用二维图谱实现特征高亮（即带通滤波处理）

二维图谱功能能够用来高亮图像中某一特定频率的特征。在谱图中框选住某一特定频率的信号，即可实现。要找出垂直方向的特征信号，应该在二维图谱上横向框选信号。反之要找横向的信号需要纵向框选。

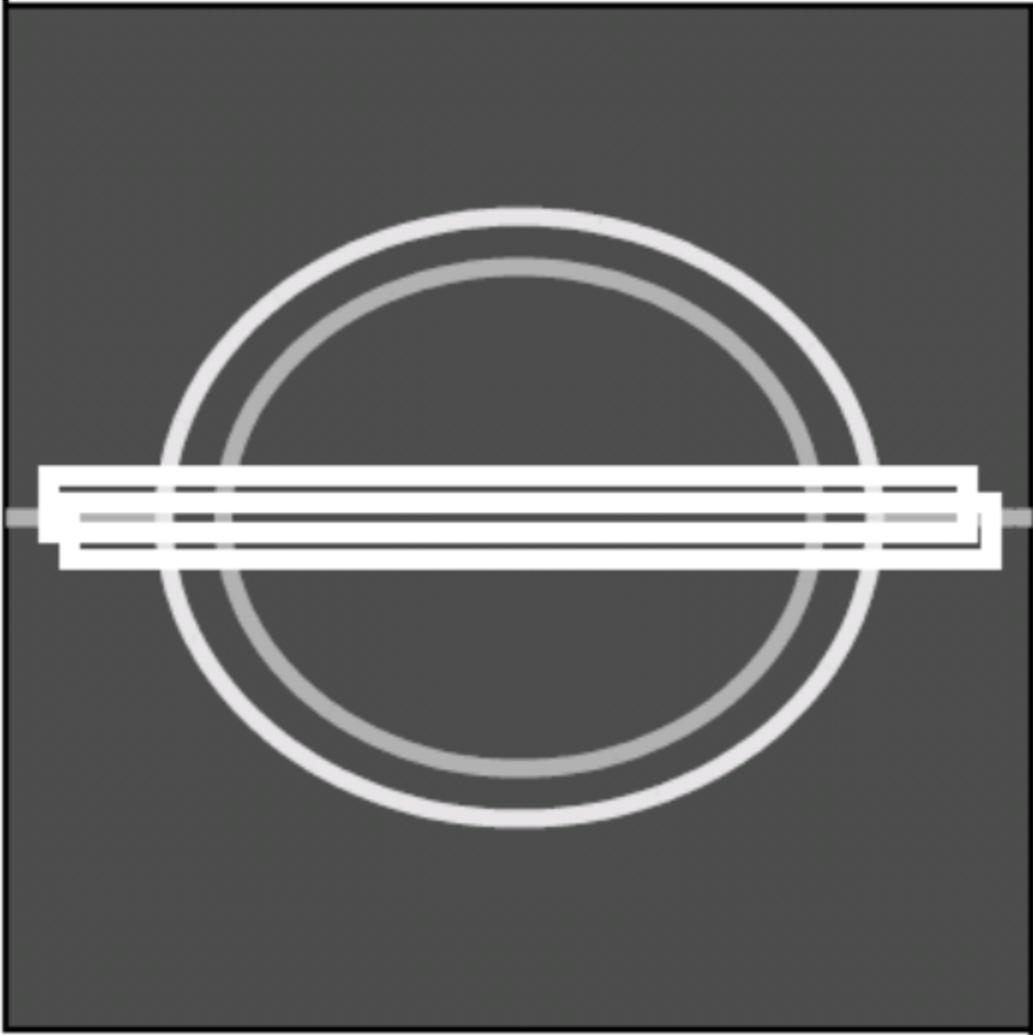
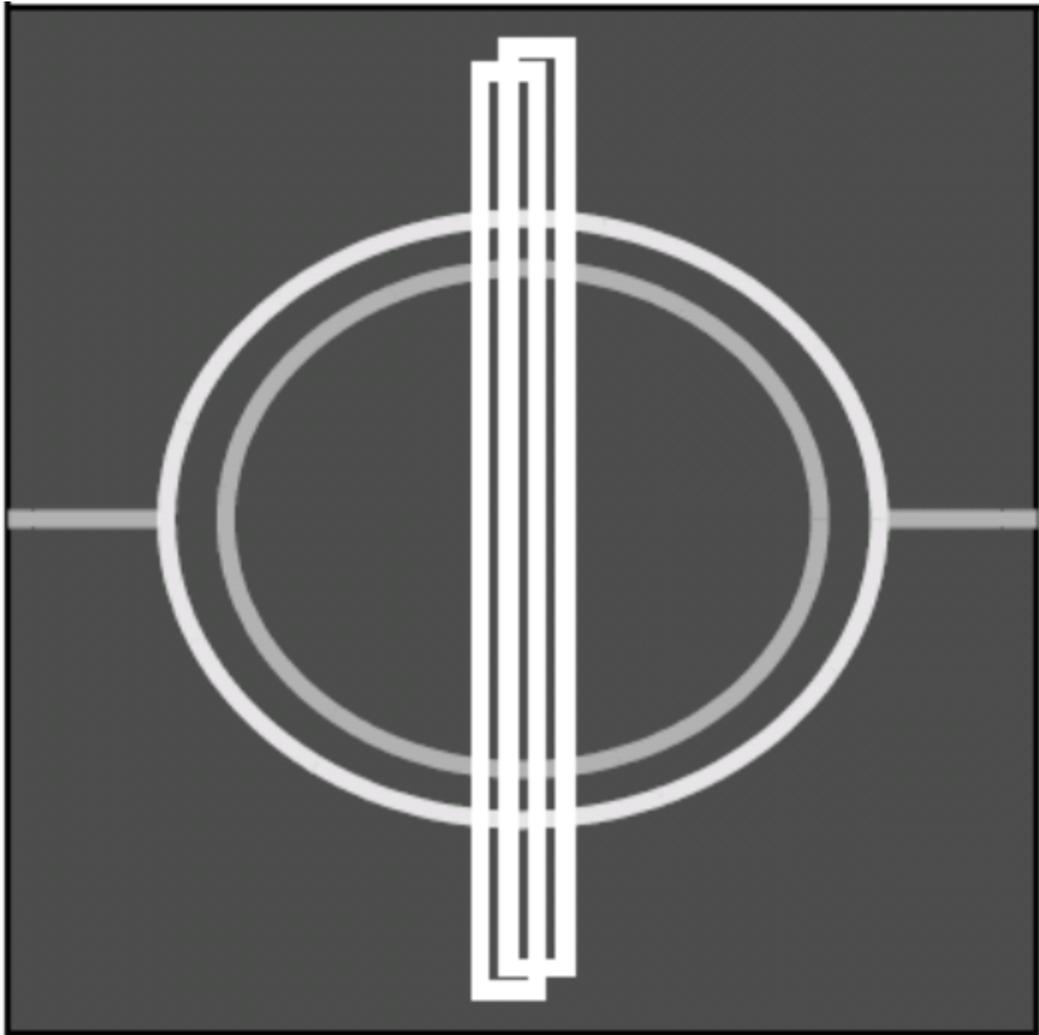


图12.2.1 横向带通滤波

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户



版权所有

版权所有

图12.2.2 纵向带通滤波

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

### 12.3 利用二维谱图去除噪音（陷波滤波）

当图像某一空间频率的特征中包含高频噪声，可以使用陷波滤波去除特定的干扰频率。通常这类特定的电磁或者振动噪声在谱图上表现为一些“热点”，使用反选框框选住这些热点即可去除。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

## Spectral "Hot Spots"

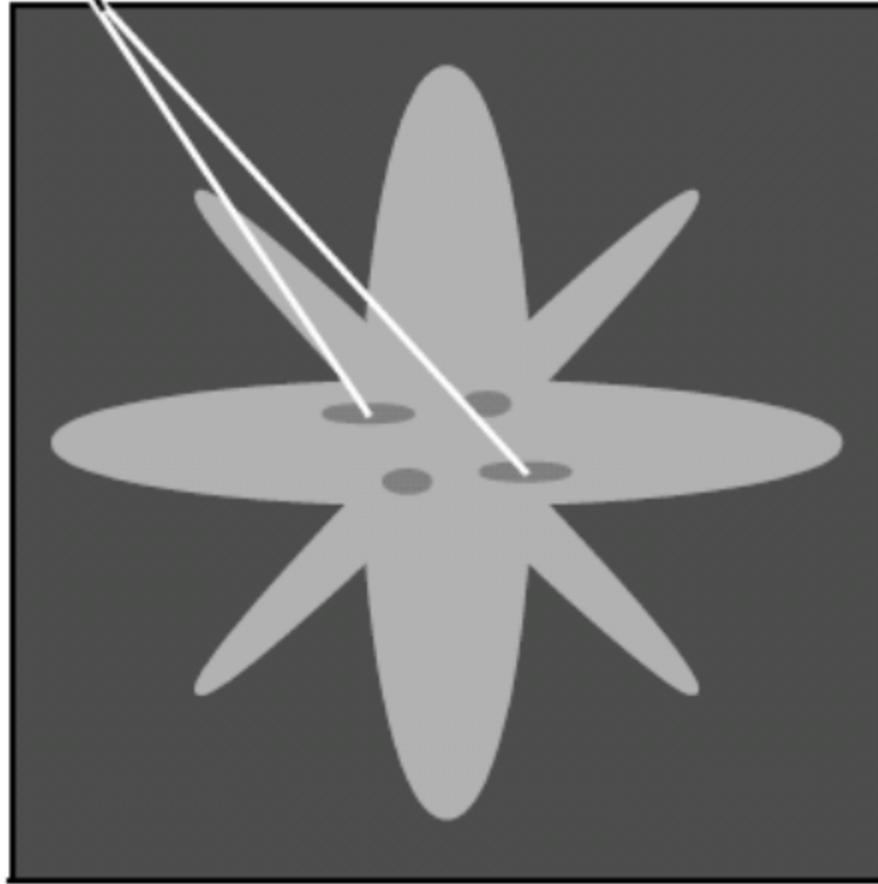


图12.3.1 陷波滤波器

根据噪音带在图像中的取向和分布，热点在谱图中沿着同样的角度分布。有可能噪音和某一图像特征空间频率相同，但大多数情况下其分布取向不同。如果图像呈各向异性，且包含特定空间频率的特征，噪音带通常较难除去，尤其是其取向与图像特征取向平行时。

## 12.4 二维图谱操作步骤

二维图谱功能能够得到图像的空间频率谱图并对图像进行特定的滤波处理。其处理步骤为：

1. 在浏览窗口中双击打开欲处理的图像。
2. 在菜单栏中点击Filter > Spectrum 2D或者点击工具菜单栏中的二维图谱图标进入界面。

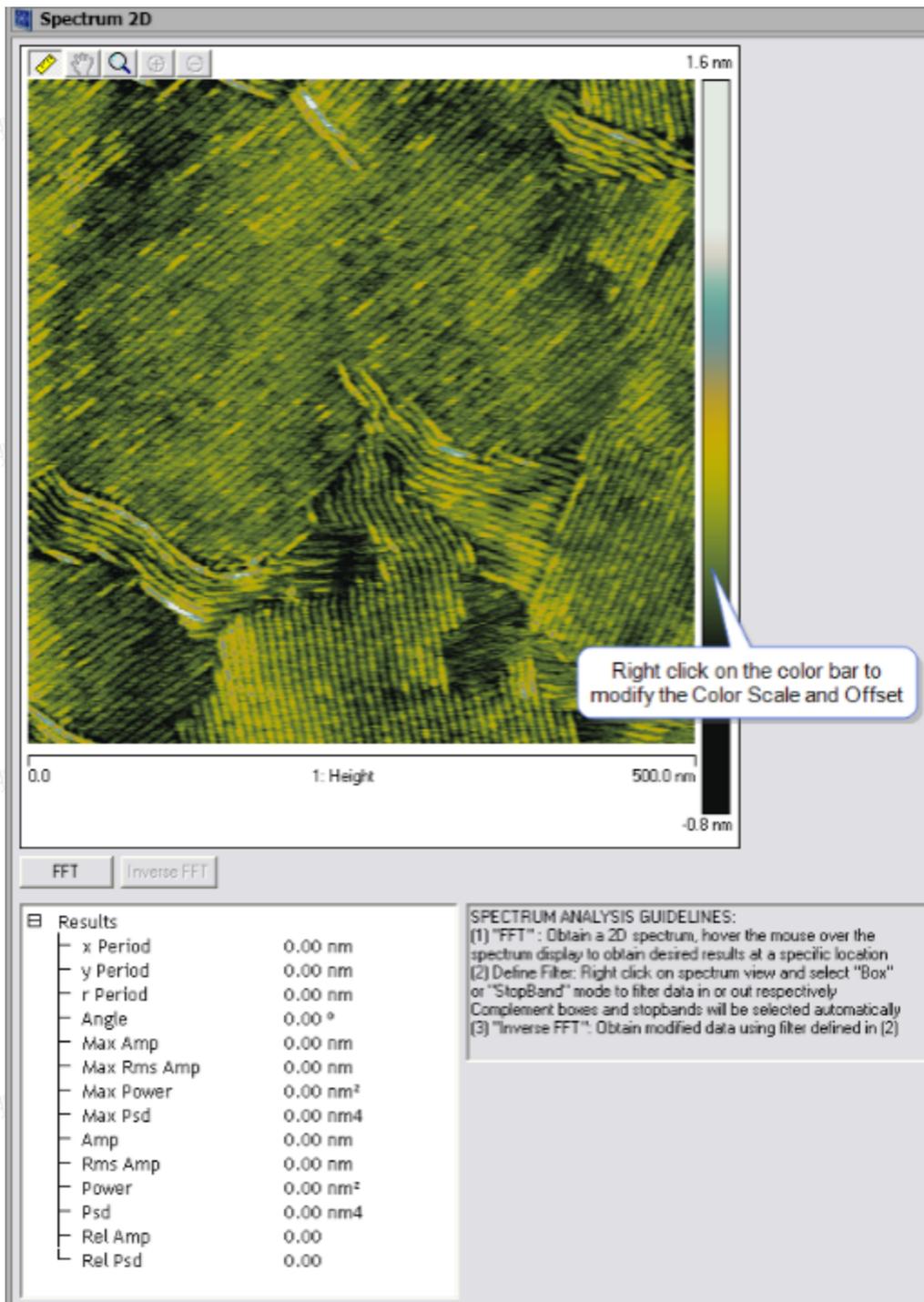


图12.4.1 二维图谱界面

3. 点击FFT进行二维快速傅里叶变换得到空间频率谱图。

4. 有时一些高频信号在谱图中并不可见，此时可以调整图像的色标。

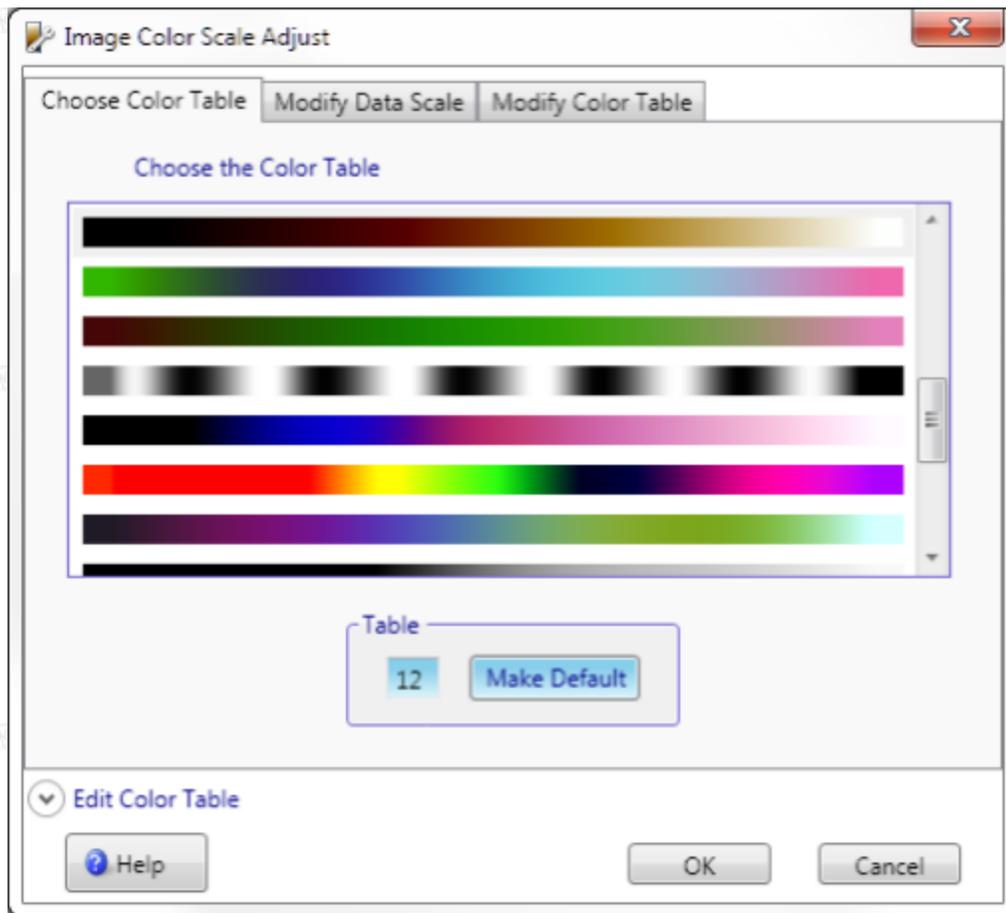
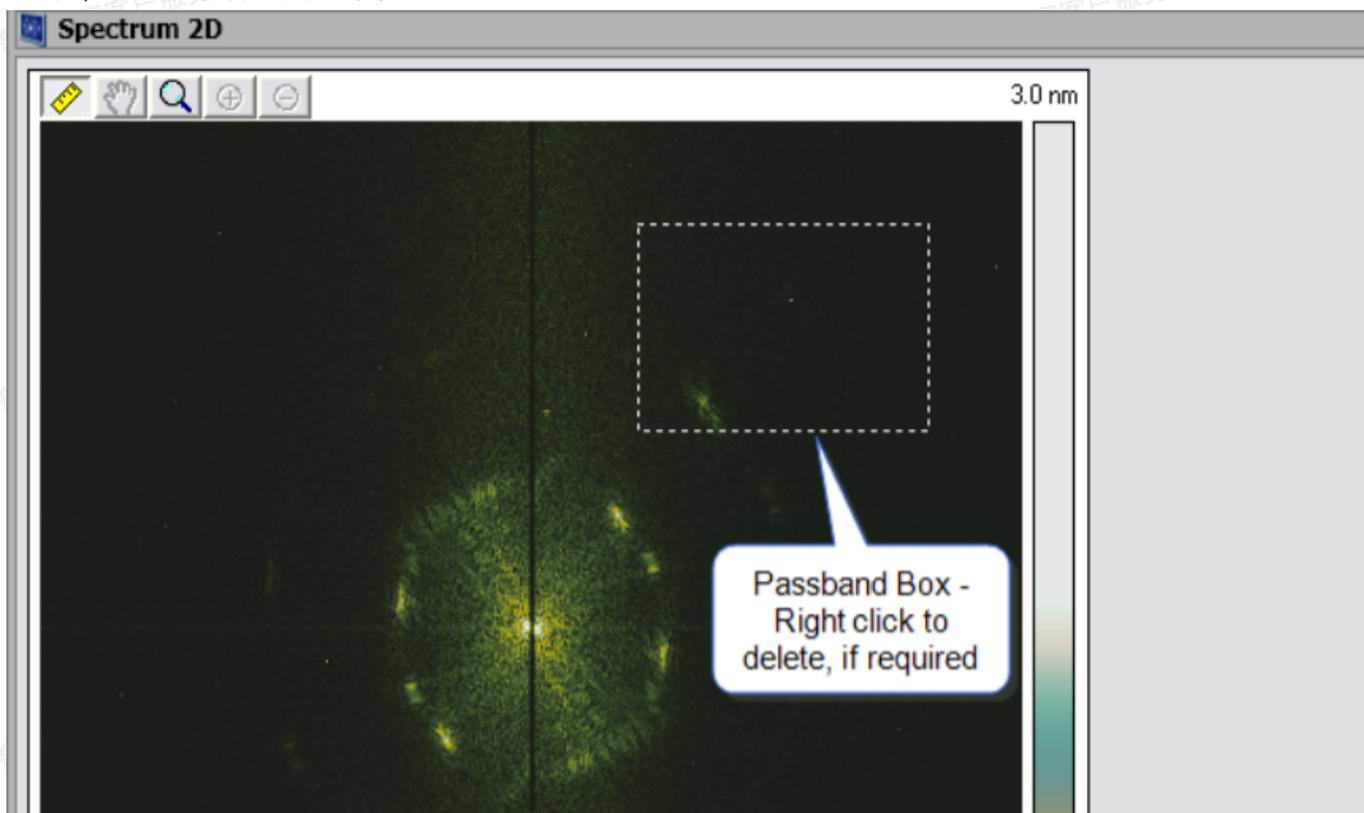


图12.4.2 色标窗口

5. 在谱图上画框框选欲保留的空间频率，或者点击鼠标右键，在右键菜单中选择Stop Band切换至反选框，框选住欲除去的频率。



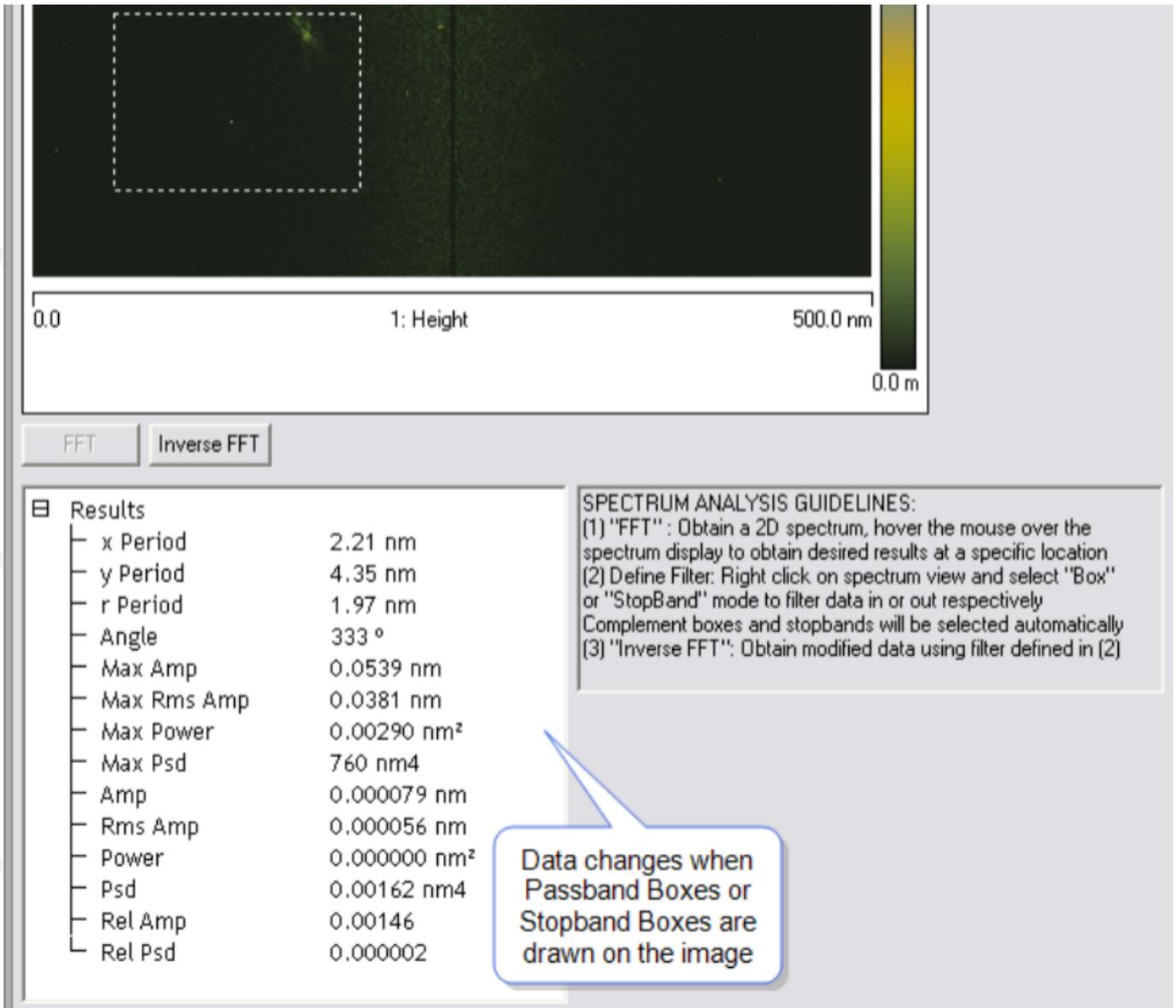


图12.4.3 框选界面

6. 基于傅里叶变换结果的对称性，所有的选择框或反选框都会自动将其对称的信号选中。
7. 一旦谱图中有选中的信号，选择框外的所有信号都被除去。
8. 在选择或反选框上点击鼠标右键，在右键菜单中点击Delete除去特定选择或反选框，或者点击Clear All除去所有选择和反选框。
9. 当选择住想要保留的信号后，点击Inverse FFT返回图像。

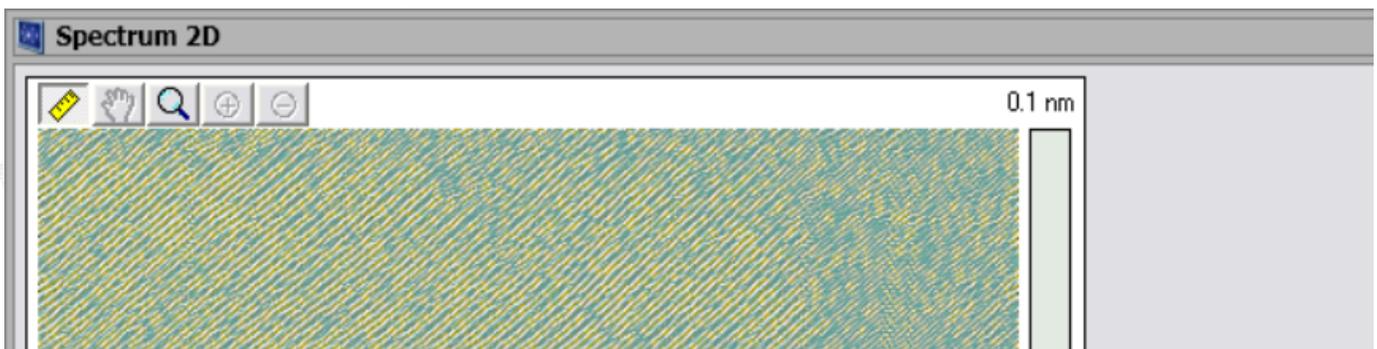




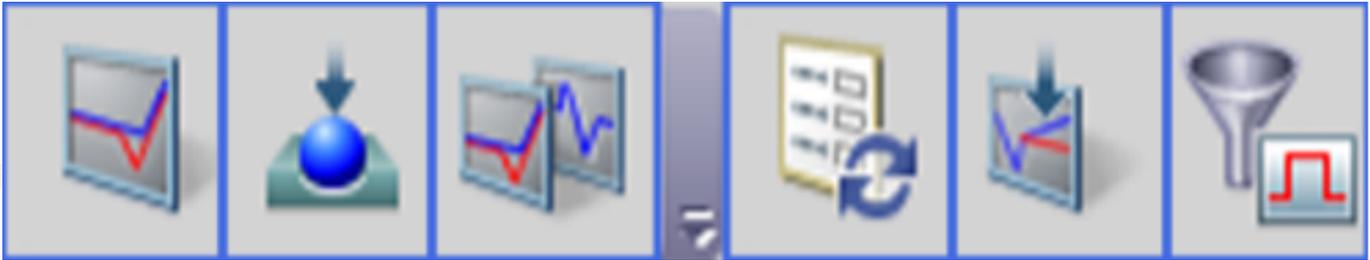
表12.5 二维图谱参数

参数	描述
X Period	X方向上的空间频率，越低越接近谱图中间
Y Period	Y方向上的空间频率，越低越接近谱图中间
R Period	径向上的空间频率，越低越接近谱图中间
Angle	角度值，等于Y/X的反正切
Max Amp	空间频率谱图上最大振幅值
Max RMS Amp	空间频谱谱图上的最大均方根振幅值
Max Power	空间频率谱图上的最大功率
Max PSD	空间频率谱图上的最大功率谱密度
Amp	空间频率谱图上游标处的振幅值
RMS Amp	空间频谱谱图上游标处的均方根振幅值
Power	空间频率谱图上游标处的功率
PSD	空间频率谱图上游标处的功率谱密度
Rel Amp	空间频率谱图上游标处的相对振幅值 (Amp/Max Amp)
Rel PSD	空间频率谱图上游标处的相对功率谱密度 (PSD/Max PSD)

# 力谱离线分析

## 1 介绍

力分线记录改变针尖-样品间距离时探针弯曲量的变化。力曲线属于Ramping分析的一种，它还包括改变其它物理量（例如Sample Bias, Tip Bias等）时，记录欲分析物理量（最多记录三种）的变化。在进行力曲线和其它Ramping操作时，探针相对样品的XY位置不变。Ramping分析可以点击菜单栏中的相应选项或者直接点击工具菜单栏中的相应图标打开。



布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

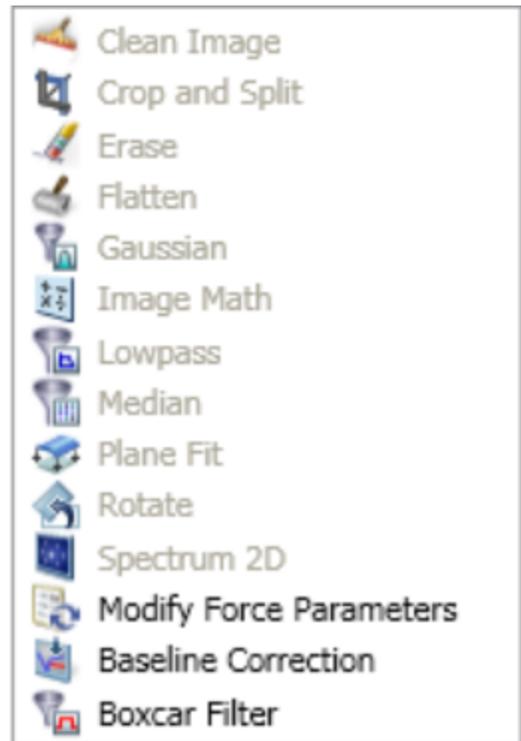
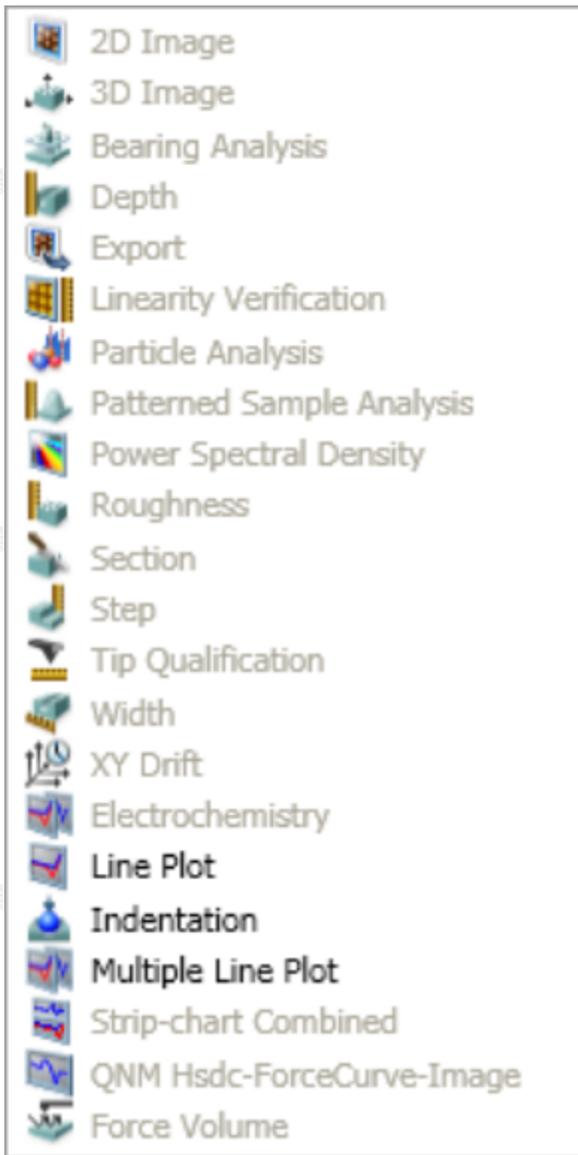
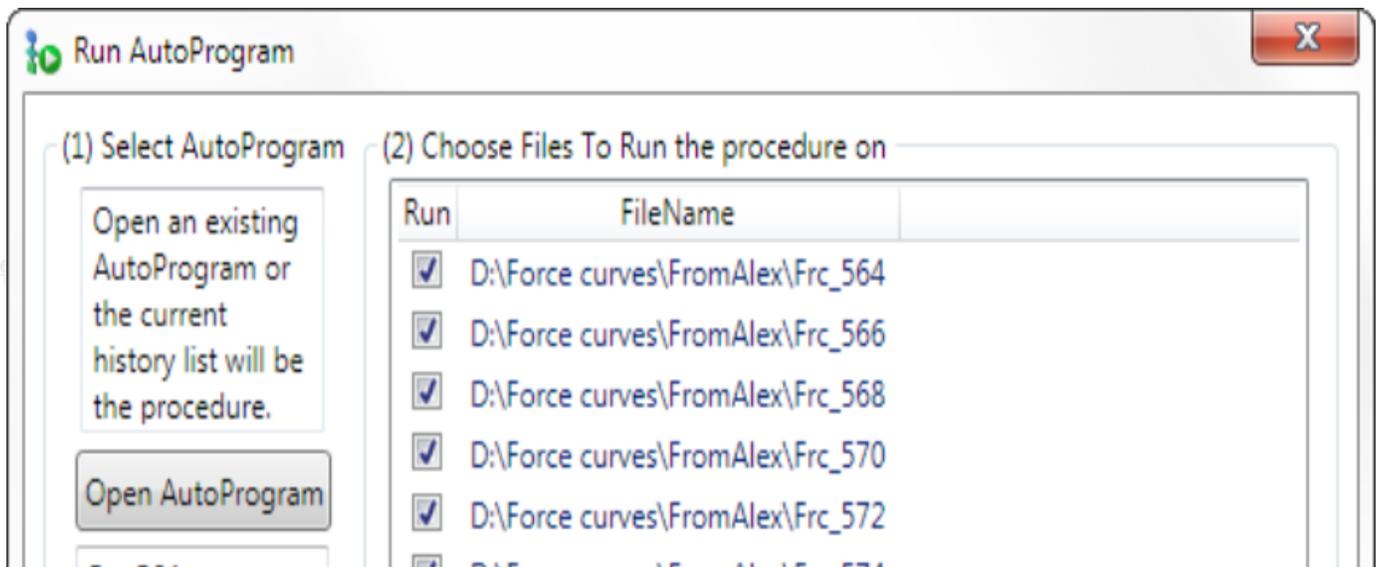


图1.1 工具菜单栏和菜单栏

用户可以使用批量分析功能分析一系列的力曲线。例如，用户可以对一系列的力曲线设定针尖半角和样品泊松比，再进行基线校正，最后进行压入分析。



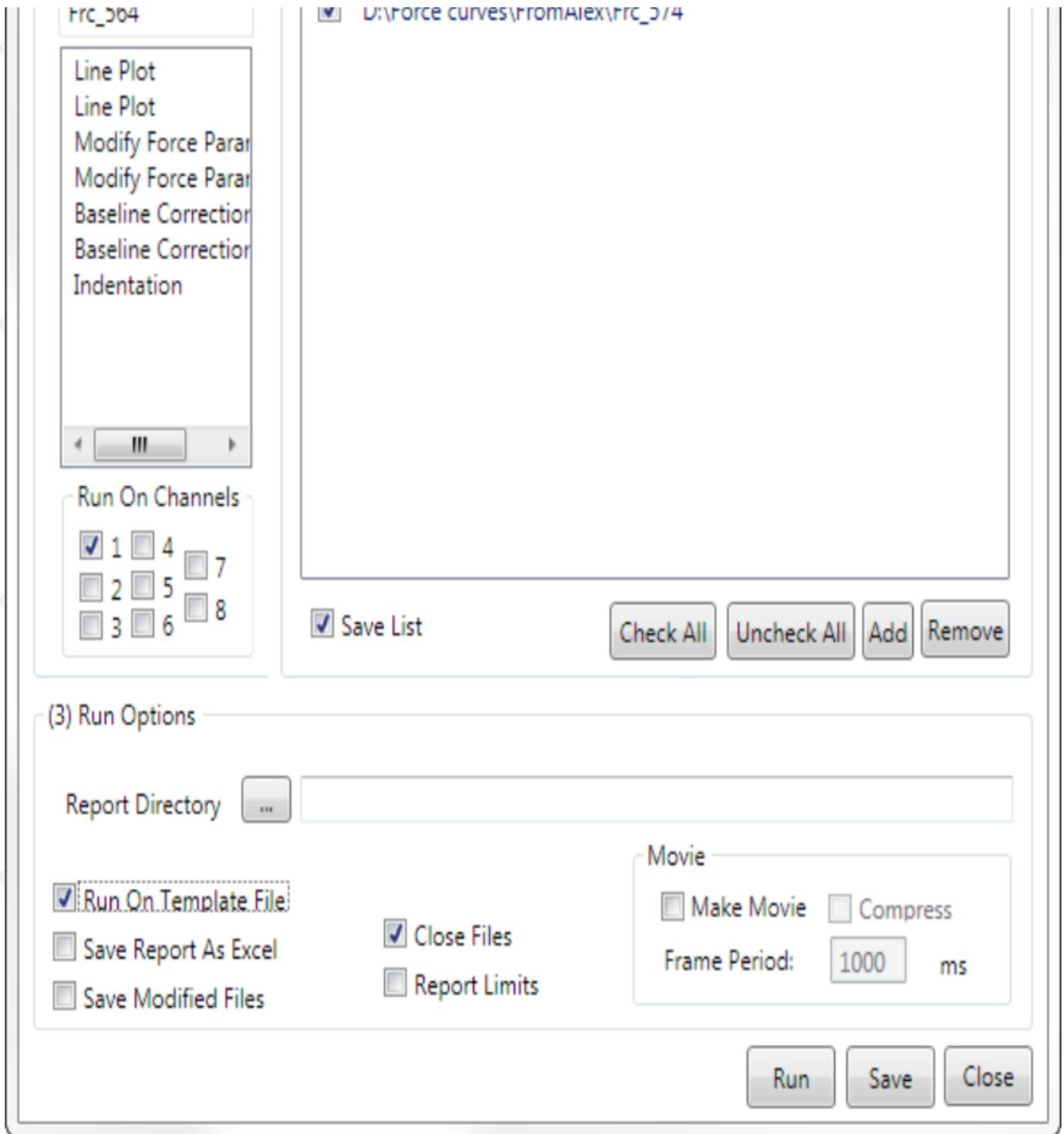


图1.2 批量分析力曲线

## 2 Ramp曲线和多通道Ramp曲线分析

### 2.1 理论

线形图以及多通道线形图分析会展示二维的数据图线，包括Ramp，带状表（Strip Chart）以及高速数据抓取（High Speed Data Capture, HSDC）。带状表记录最多八个通道的物理量随时间的变化；

HSDC记录两条高采样率通道和两条低采样率通道随时间的变化。

力曲线时一种Ramp，记录悬臂弯曲量或者悬臂振幅随探针-样品距离的变化。其它类型的Ramp包括STM中隧穿电流随样品偏压的变化、SCM中dC/dV随样品偏压的变化以及PFM中压电信号随针尖或样品偏压的变化等。

## 2.2 Ramp曲线步骤

使用Ramp曲线进行分析，可以在右侧浏览窗口中打开欲分析的曲线：

1. 打开后会出现如下界面

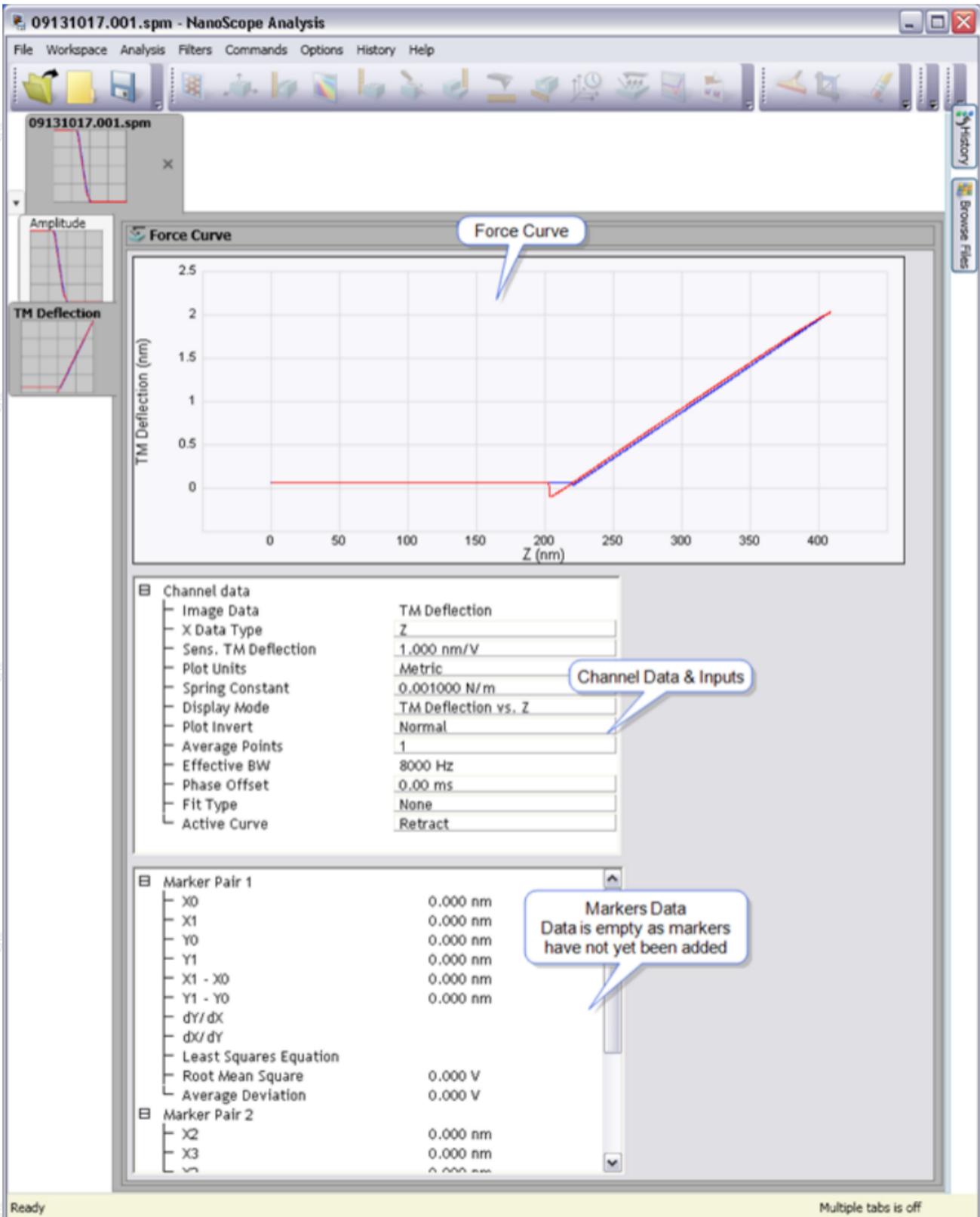


图2.2.1 Ramp曲线窗口

- 将鼠标移至曲线左侧标尺处按住鼠标左键向右拖拽即可调出游标，将游标拖拽至曲线上感兴趣的地方，则其对应点的坐标将在下方的结果栏中更新。

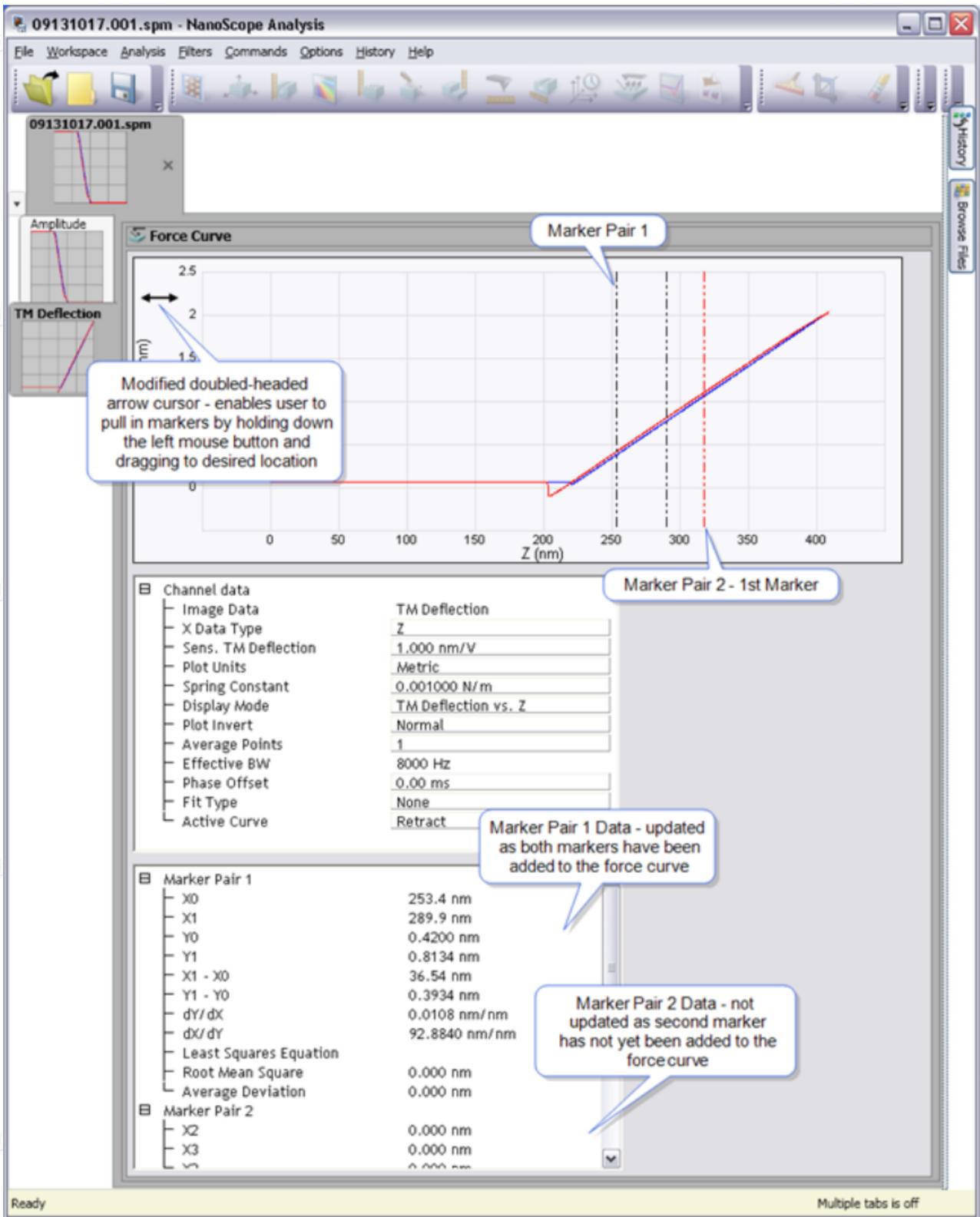


图2.2.2 在曲线上添加游标

3. 要进行多条曲线分析，在工具菜单栏中点击Multiple Line Plot图标，如下图所示。

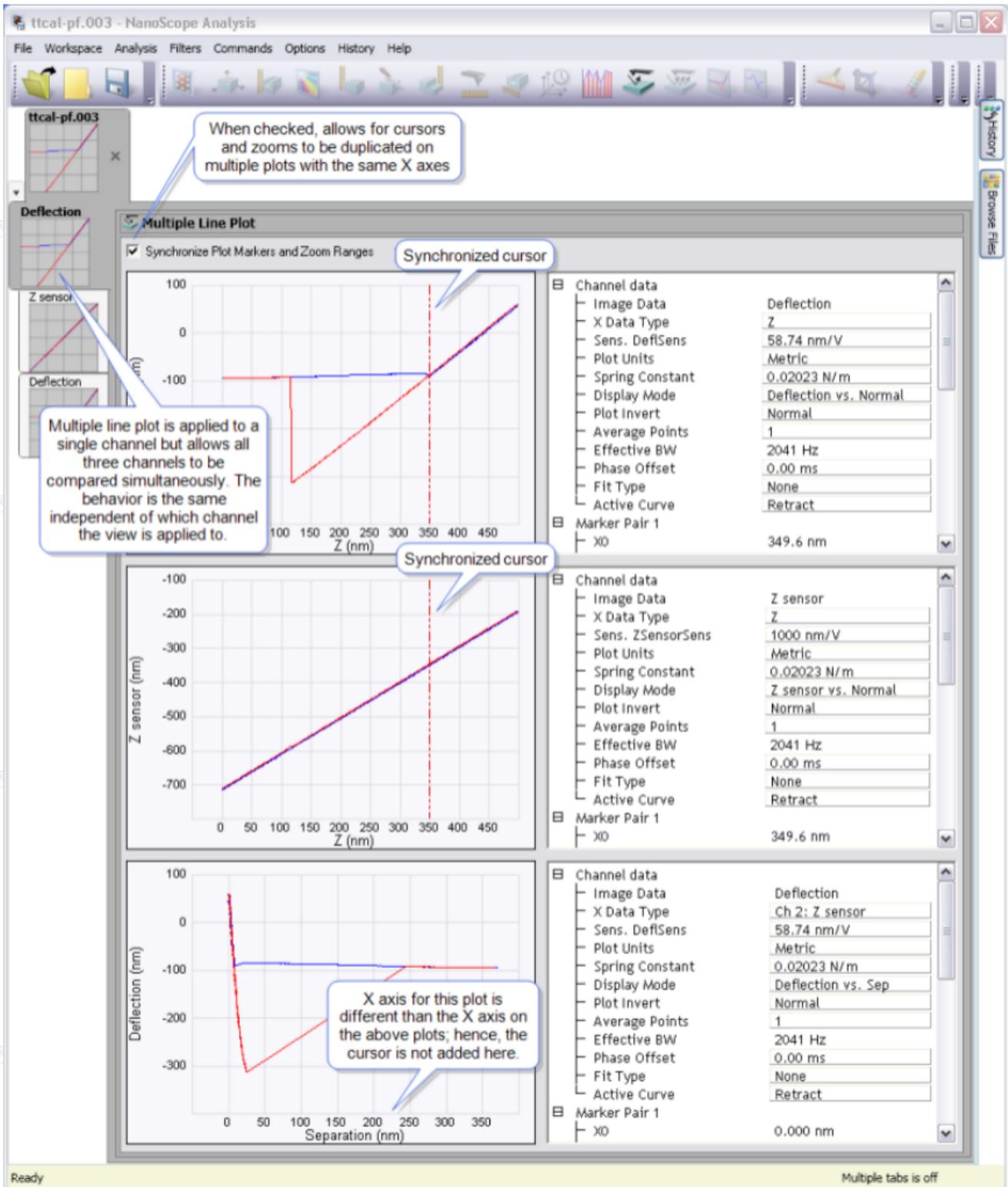


图2.2.3 多条曲线分析窗口

4. 欲测量粘附力，将Active Curve参数设为Retract（回撤）段，设定Plot Units为Force。将第一对游标中的Marker 0移至粘附力挣脱点的左侧，将Marker 1移至挣脱点的右侧，如下图所示。

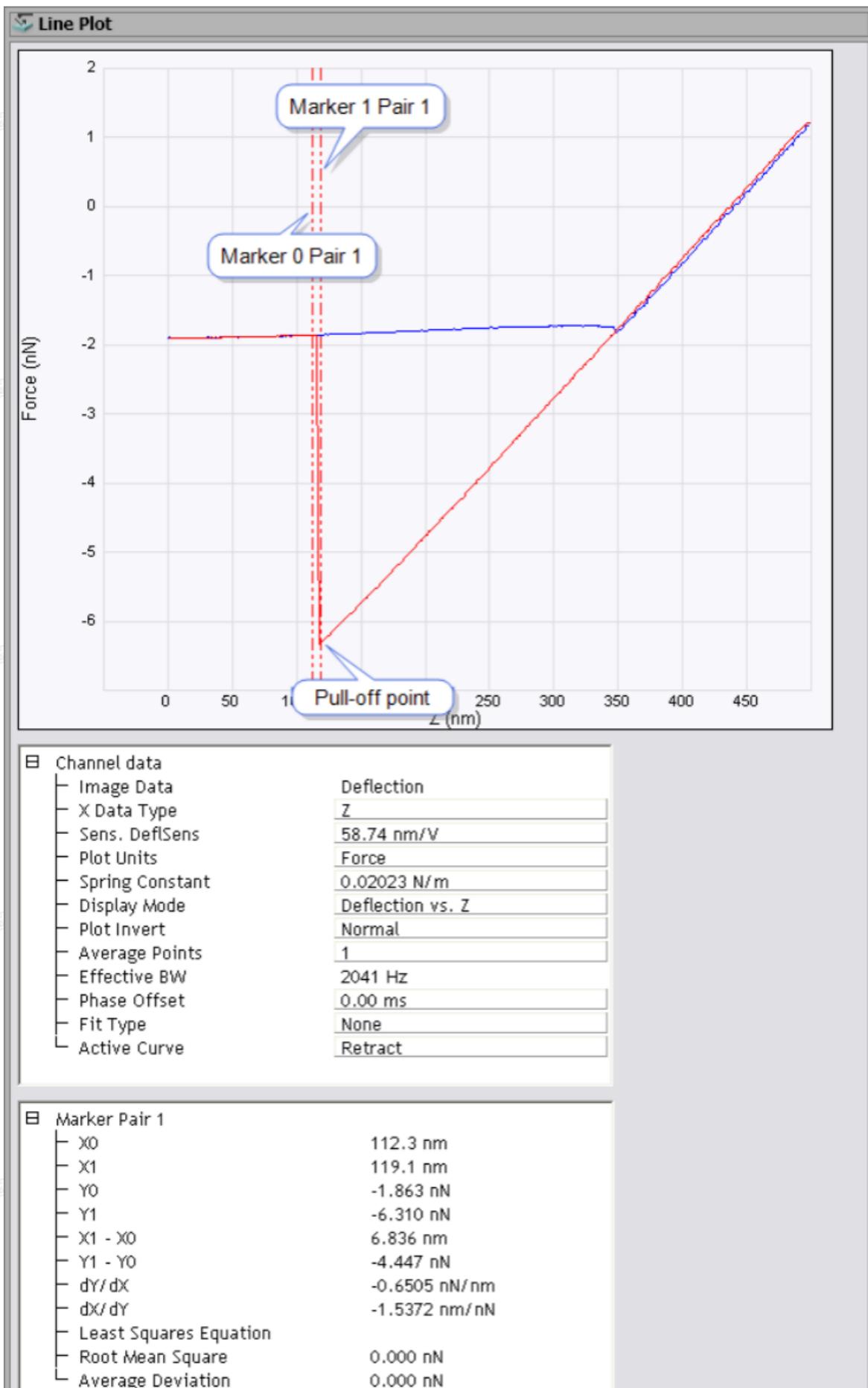


图2.2.4 举例：测量粘附力

5. 按住Ctrl键，在想放大的地方用鼠标左键画框即可进行放大。要返回原界面，双击图像或者点击放大后的放大镜图标即可。

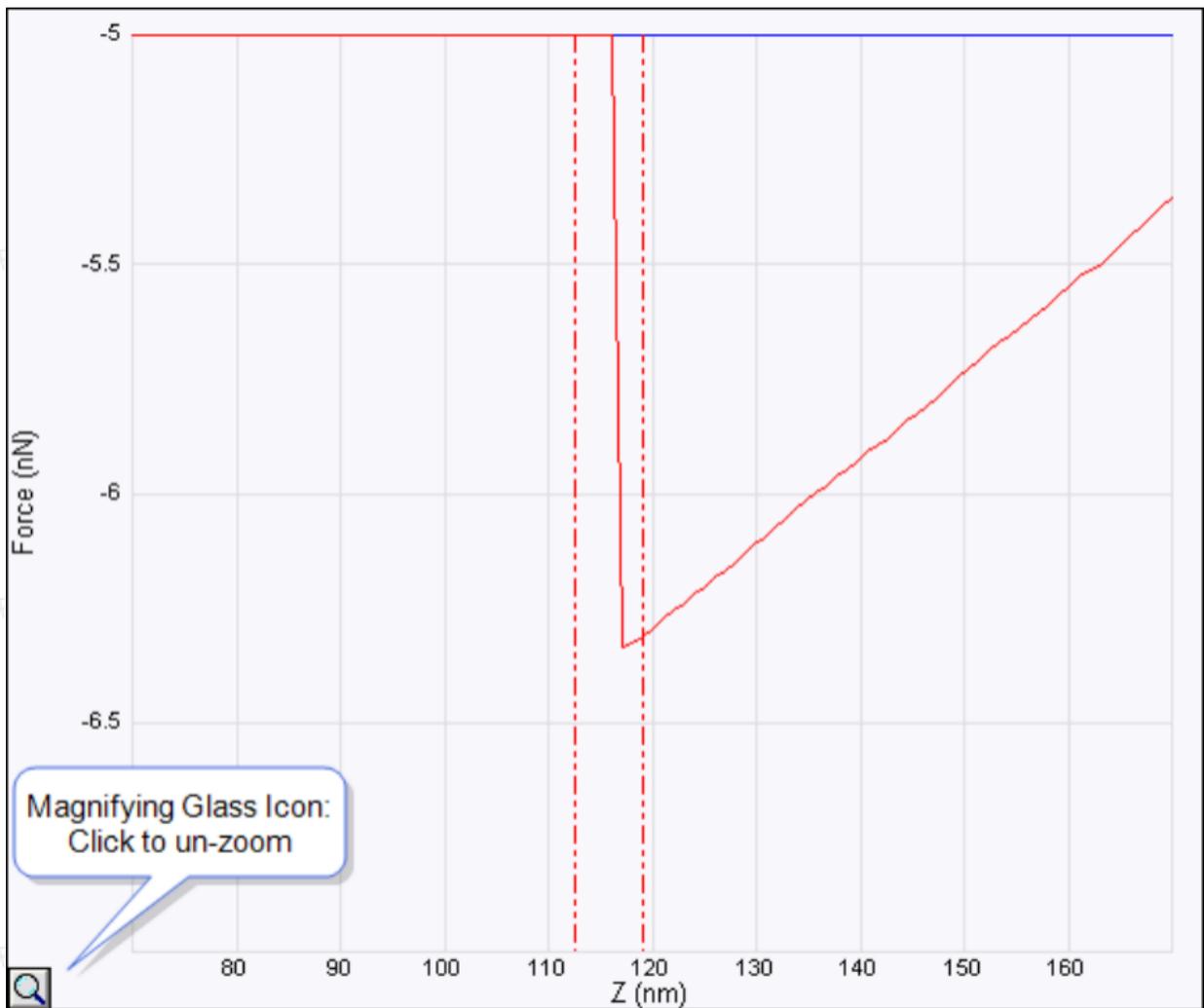


图2.2.5 放大窗口

6. 欲调整图像在Y方向的位置，从曲线图顶部或底部按住鼠标左键上下移动拖拽出横向游标，移至预想的位置，然后点击鼠标右键，选择Y-Translate，即可实现。

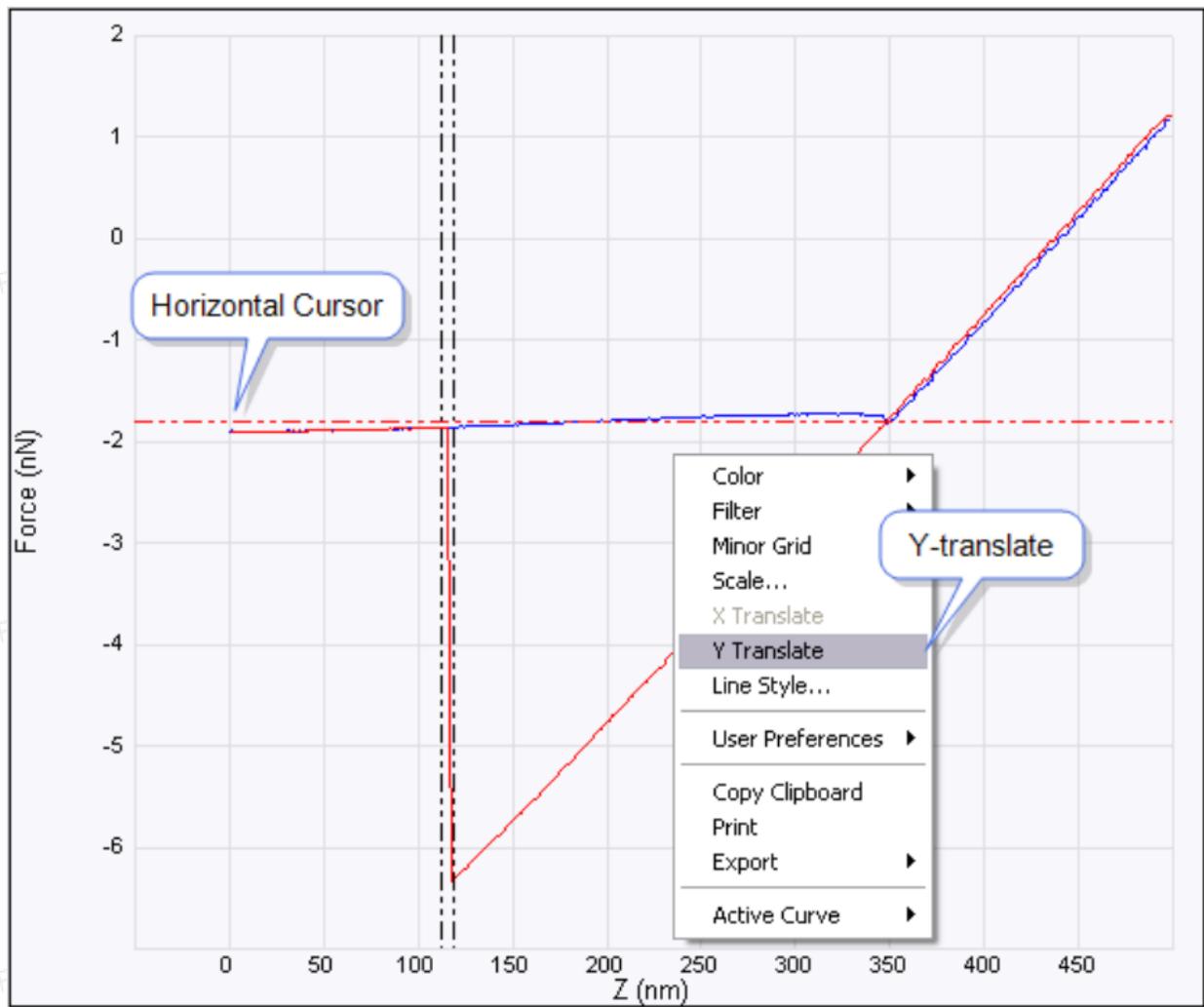


图2.2.6 Y-Translate应用

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

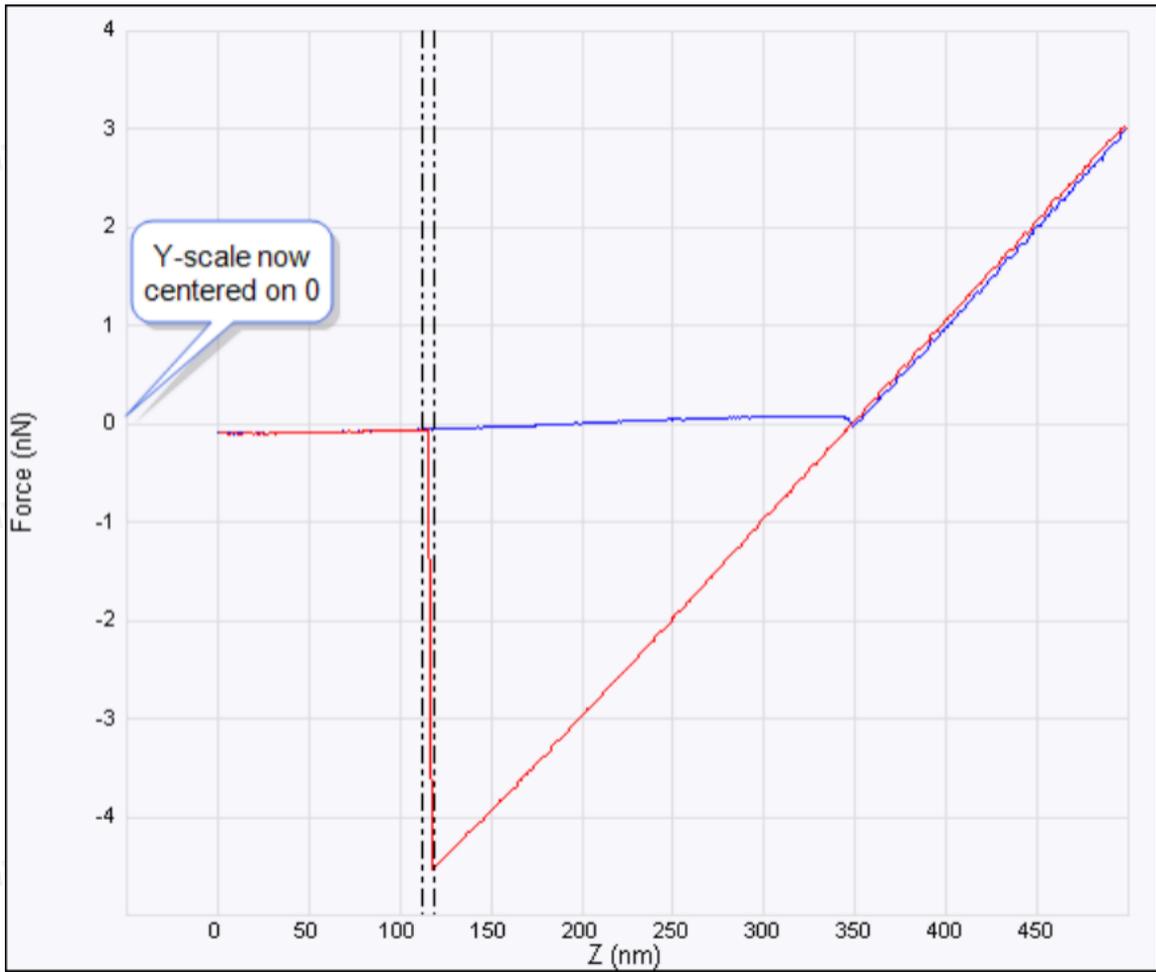


图2.2.7 Y-Translate效果

7. 游标颜色可以更改以进行区分。在曲线上点击右键，下拉菜单中即可进行更改。（注：Curve 1为接近段，Curve 2为撤回段）

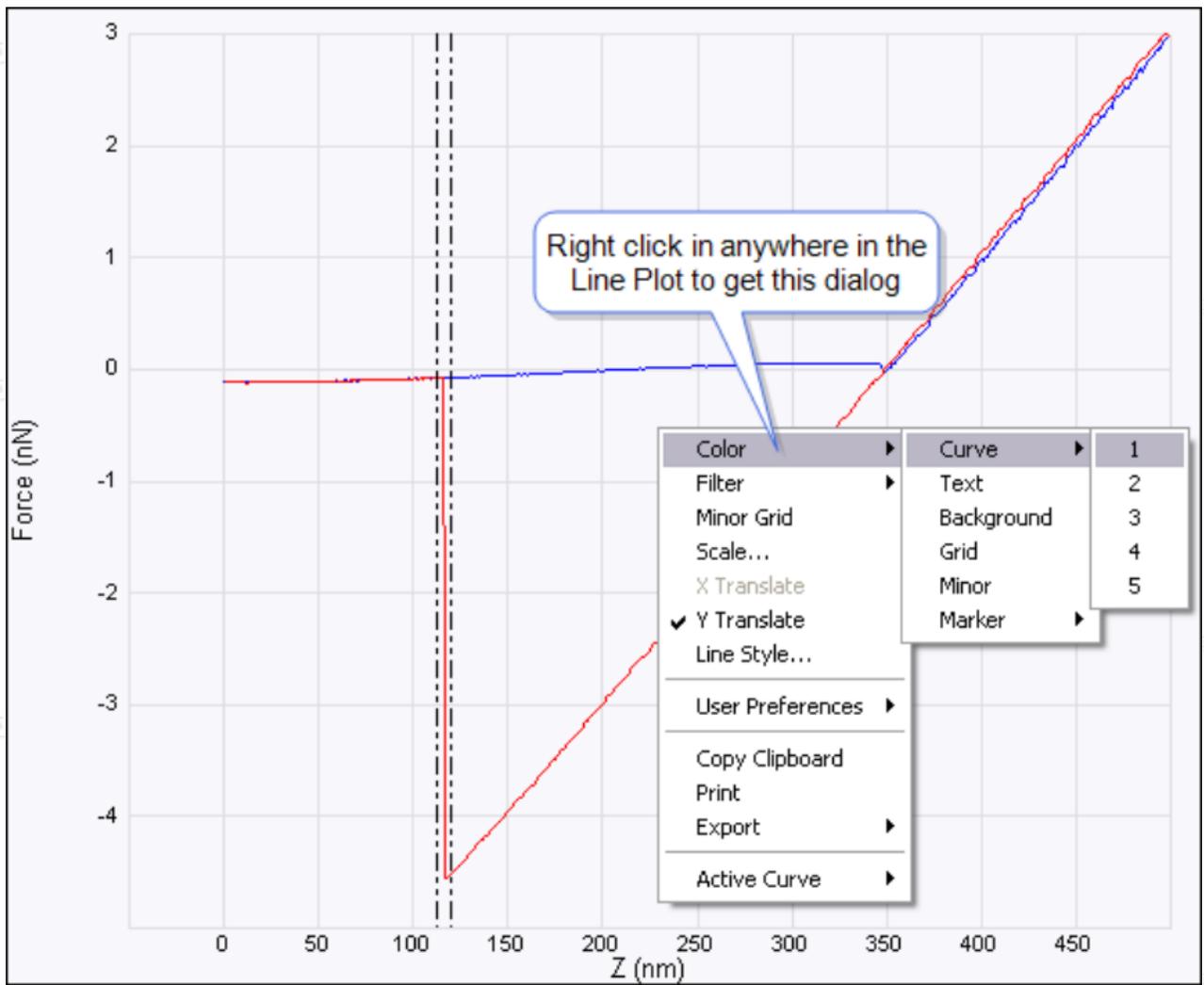


图2.2.8 进行颜色更改

8. 有时可以在曲线图背景上添加栅格方便定位，与更改颜色类似，在曲线上右键菜单中选择。

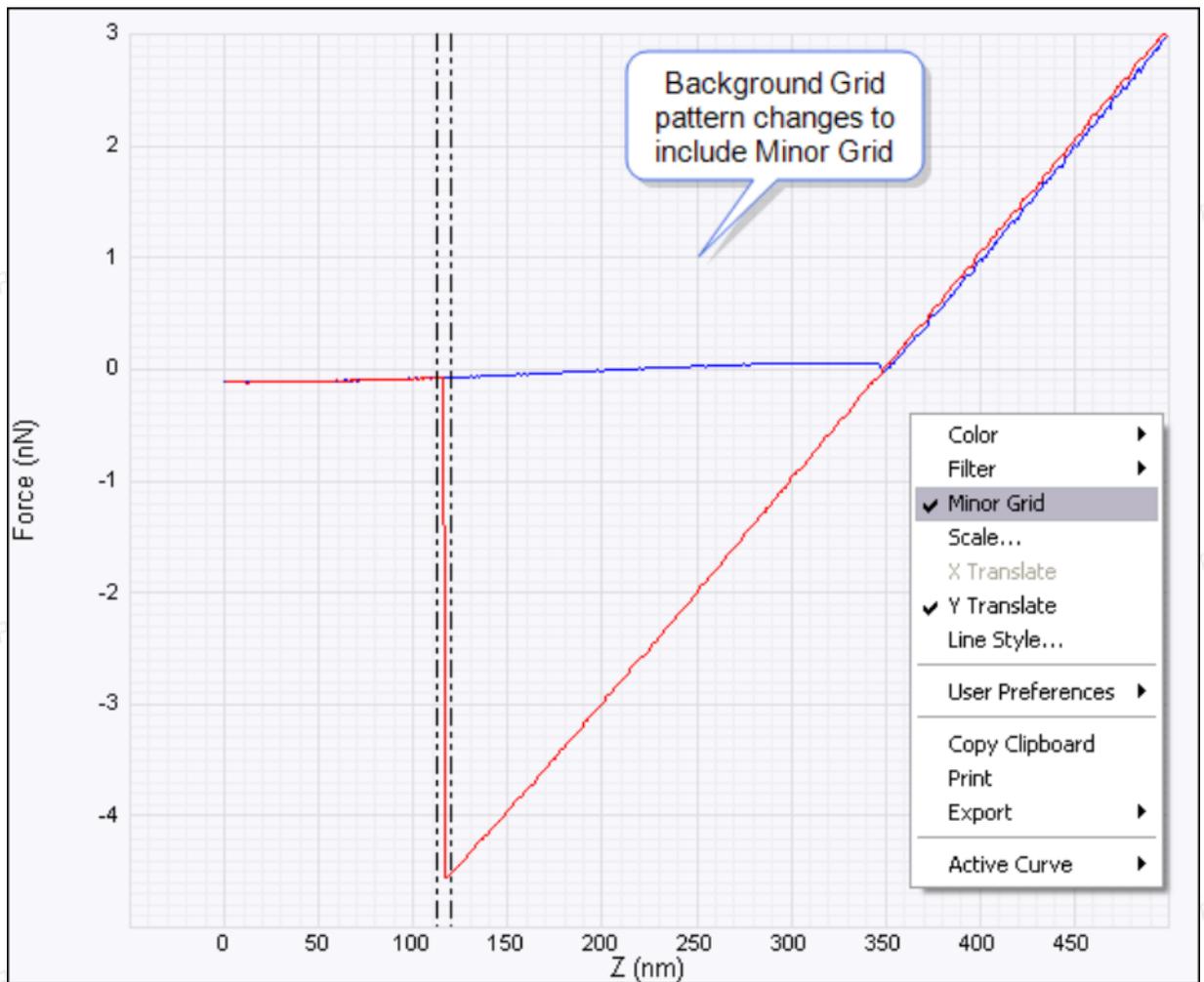


图2.2.9 栅格

9. 用同样的办法，曲线外形也可进行更改。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

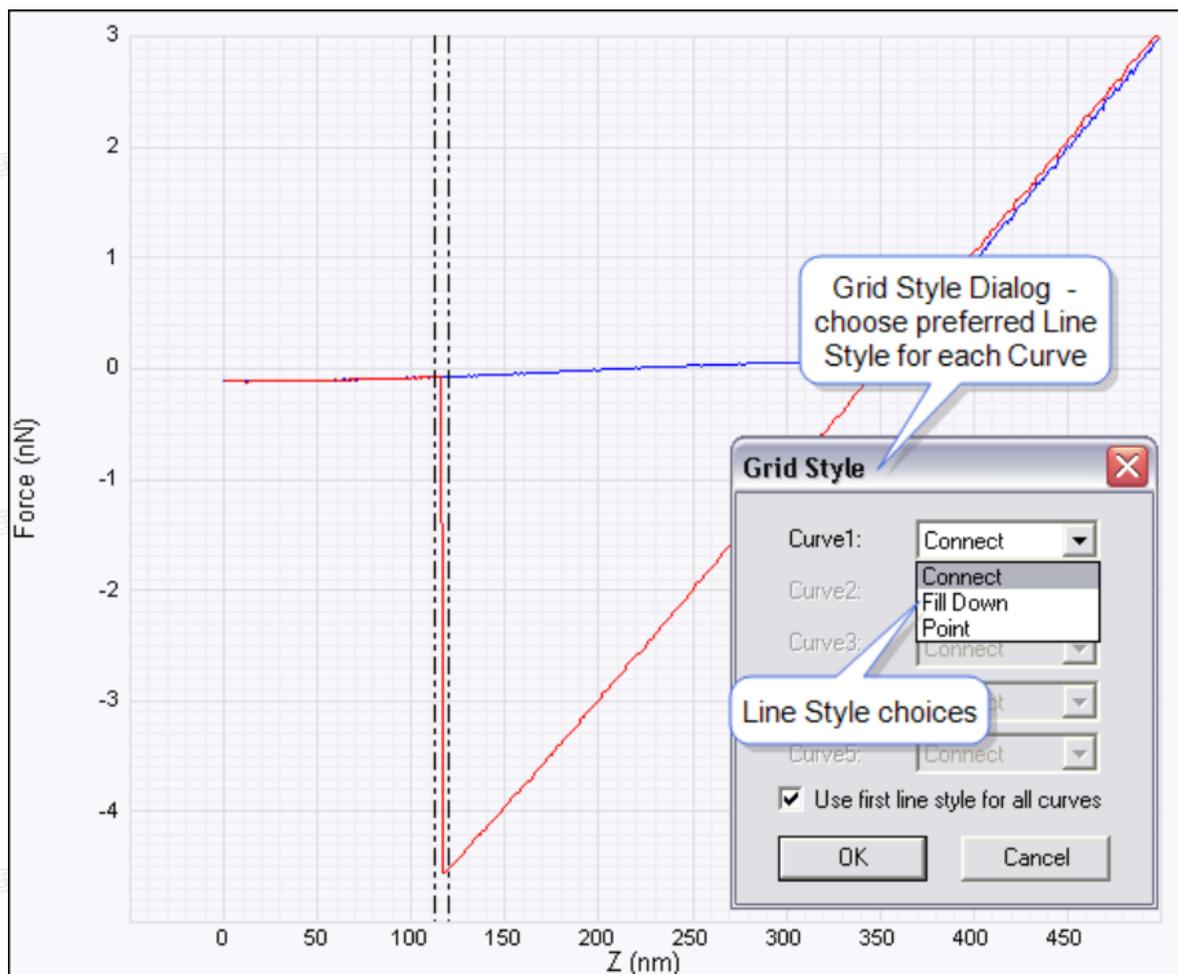


图2.2.10 曲线形貌类型

10. 曲线数据可以以图片格式或者原始数据格式进行导出，同样在右键菜单中进行选择。

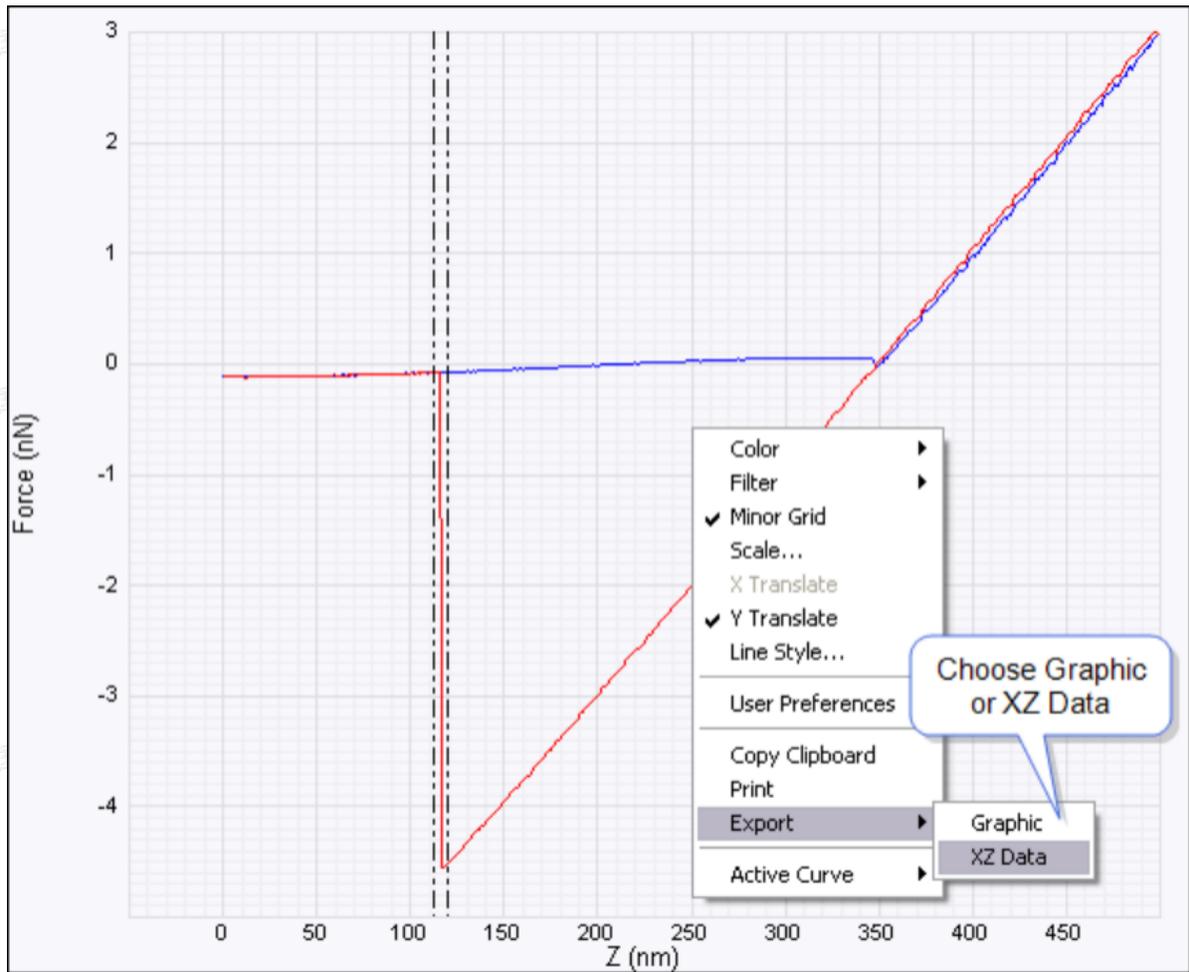


图2.2.11 曲线导出

### 2.3 显示类型和拟合举例：Hertzian模型

分离 (Separation) 曲线的目的是获得探针-样品作用力与探针-样品分离距离的关系。这种曲线对于探针-样品接触力学的拟合研究非常重要。得到分离曲线，需要准确校准弯曲量灵敏度并保证有一条数据通道类型为Deflection或者TM Deflection。

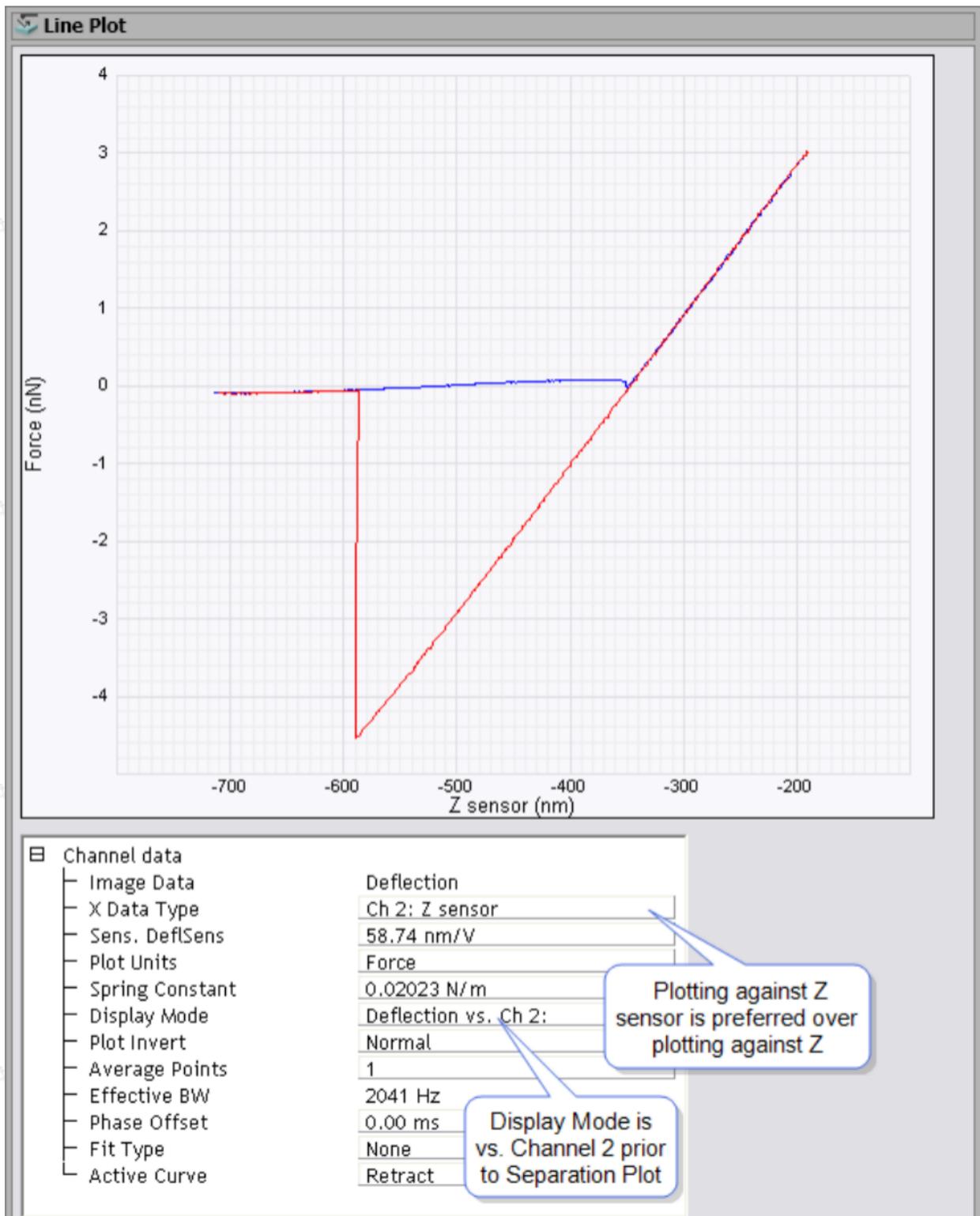


图2.3.1 弯曲量与Z的关系曲线

1. 将Display Mode选为Separation。

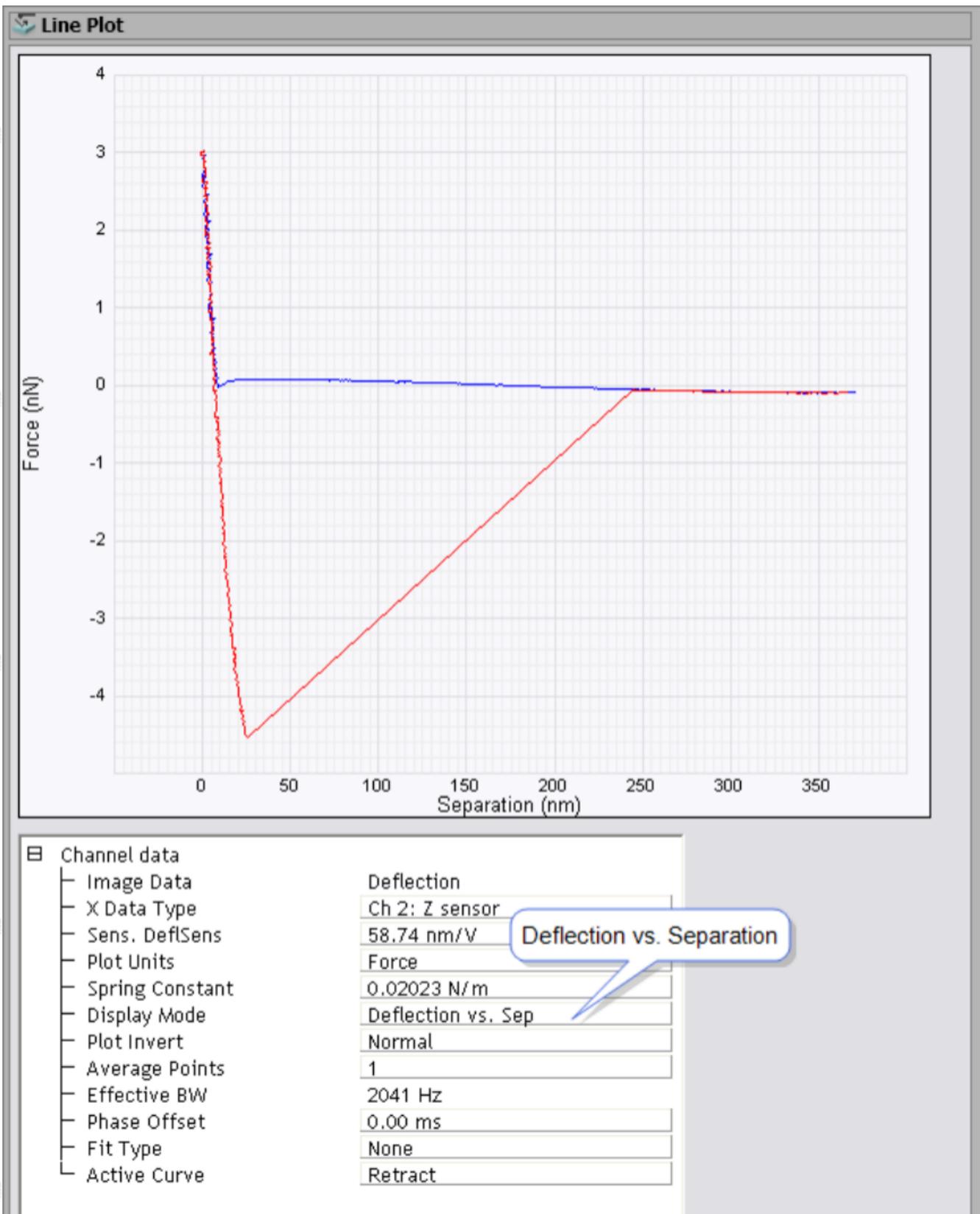
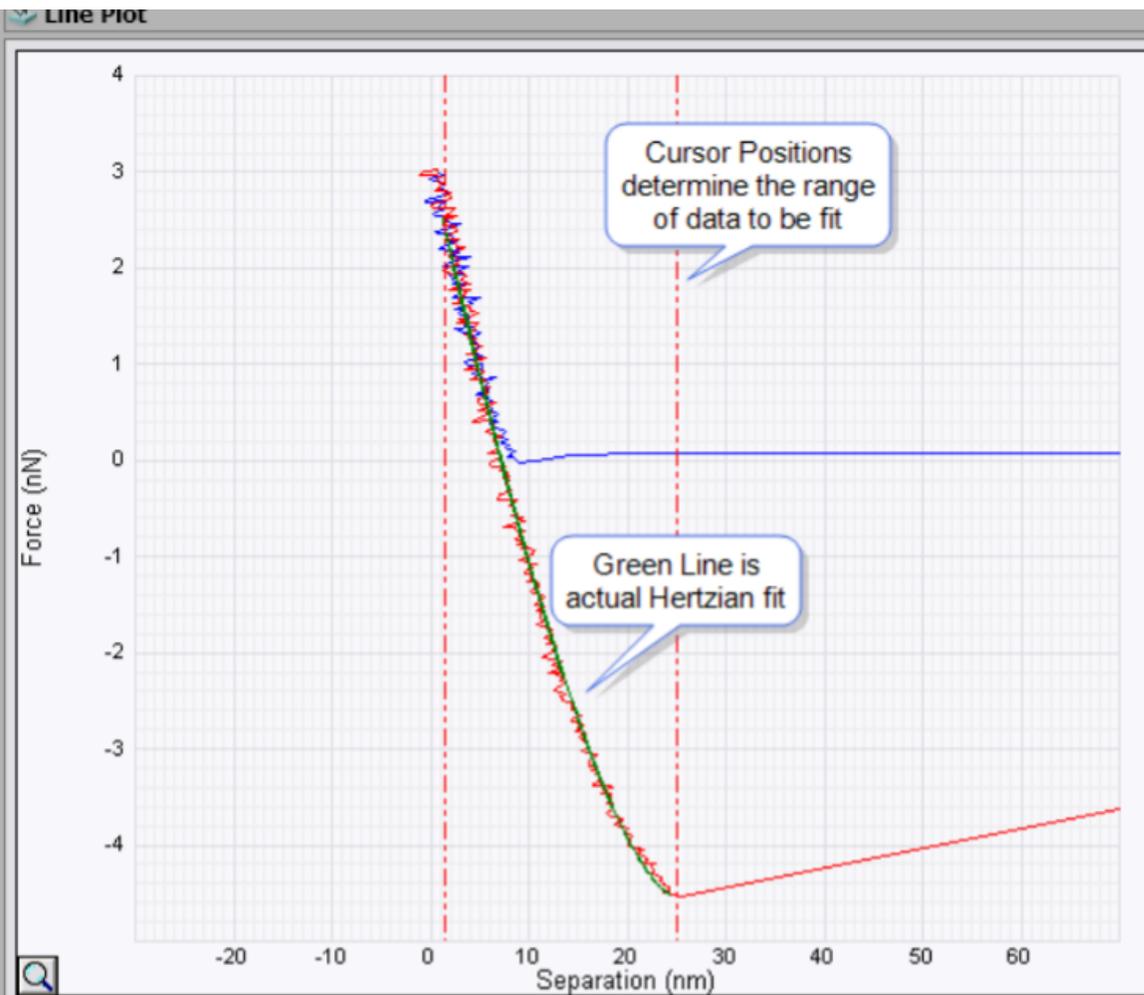


图2.3.2 分离曲线

2. 将游标放置在力曲线上的卸载段，即撤回段。
3. 将Active Curve选为Retract。
4. 选择拟合类型为Hertzian。



Channel data	
Image Data	Deflection
X Data Type	Ch 2: Z sensor
Sens. DeflSens	58.74 nm/V
Plot Units	Force
Spring Constant	0.02023 N/m
Display Mode	Deflection vs. Sep
Plot Invert	Normal
Average Points	1
Effective BW	2041 Hz
Phase Offset	0.00 ms
Fit Type	Hertzian
Active Curve	Retract

Marker Pair 1	
X0	1.222 nm
X1	24.95 nm
Y0	0.6470 nN
Y1	-6.325 nN
X1 - X0	23.73 nm
Y1 - Y0	-6.971 nN
dY/dX	-0.2938 nN/nm
dX/dY	-3.4032 nm/nN
Least Squares Equatio	$y = (0.0630(\text{nN}/\text{nm}^2)) \cdot \sqrt{1 \text{ nm}} \cdot \dots$
Root Mean Square	0.2148 nN
Average Deviation	0.1629 nN

Hertzian Fit - this is a contact mechanics model for elastic deformation

Hertzian Fit Equation - use to calculate Young's Modulus ( $y = (0.0630 (\text{nN}/\text{nm}^2)) \cdot \sqrt{1 \text{ nm}} \cdot (x \text{ nm})^{3/2}$ )

图2.3.3 Hertz模型

## 2.4 Ramping举例：PFM

PFM Ramping是研究材料铁电性质的重要手段。在PFM图中，匀速改变针尖或样品偏压观察探针振动的振幅以及相位的变化。在这个例子中，针尖偏压由-5 V匀速增至5 V。

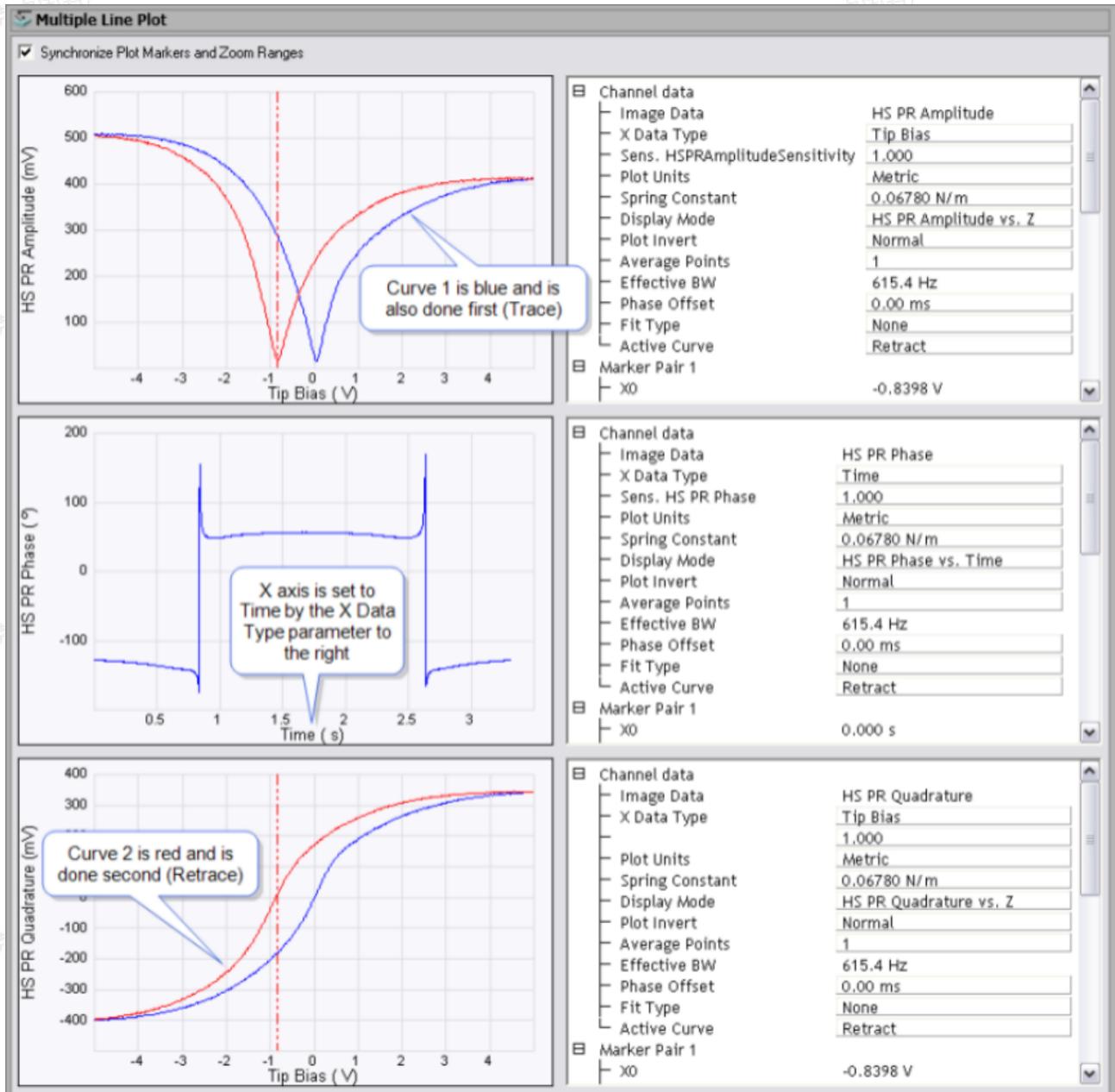


图2.4.1 PFM举例

## 2.4 力曲线界面参数

表2.4.1 输入参数

参数	描述
Image Data	曲线通道类型 (Y轴类型)

X Data Type	曲线X轴类型，包括时间和Ramp通道（例如Z）等
Sens. Deflection	Y轴通道的灵敏度。命名由实际通道类型决定，例如 Sens. TM Deflection, Sens. Deflection等
Plot Units	Y轴数据通道的单位，可在Volts (V)、Metric (nm或 $\mu\text{m}$ ) 或Force (nN)
Spring Constant	力常数，当Plot Units选为Force时用来计算力
Display Mode	提供力曲线类型，包括 1) Image Data对Z 2) Image Data对分离距离。在Image Data为Deflection时，分离距离 = Deflection - Z position + constant（常数大小由实际曲线决定，使得在Z轴掉头点处的分离为0） 3) Z对时间 4) 分离距离对时间
Plot Invert	将图线沿Y = 0即X轴翻转
Average Points	调节平均化的点数以对曲线做平滑处理
Effective BW	根据Average Points计算出的平滑处理有效带宽，其值不可输入， Effective BW = 力曲线点数/Average Points
Phase Offset	横向平移曲线接近段和撤回段以调节Z轴掉头处的位置（即接近段和撤回段的交点）
Fit Type	选择曲线拟合类型：不拟合（None）、线性（Line）、Hertzian模型或者蠕虫链模型（Worm-like Chain拉伸模型）
Active Curve	选择接近段（Approach）或撤回段（Retract）

表2.4.2 Marker参数

参数	描述
Marker Pair 1	
X0	第一对游标中第一条游标线的横坐标
X1	第一对游标中第二条游标线的横坐标
Y0	第一对游标中第一条游标线的纵坐标
Y1	第一对游标中第二条游标线的纵坐标
X1-X0	第一对游标中两条游标线的横坐标之差
Y1-Y0	第一对游标中两条游标线的纵坐标之差
dY/dX	$(Y1-Y0)/(X1-X0)$

dX/dY	$(X1-X0)/(Y1-Y0)$
Least Squares Equation	根据Fit Type选定的拟合类型，得到的第一对游标线间拟合曲线公式
Root Mean Square	拟合曲线的RMS偏差
Average Deviation	拟合曲线的平均偏差
Marker Pair 2	
X2	第二游标中第一条游标线的横坐标
X3	第二对游标中第二条游标线的横坐标
Y2	第二对游标中第一条游标线的纵坐标
Y	第二对游标中第二条游标线的纵坐标
X3-X2	第二对游标中两条游标线的横坐标之差
Y3-Y2	第二对游标中两条游标线的纵坐标之差
dY/dX	$(Y3-Y2)/(X3-X2)$
dX/dY	$(X3-X2)/(Y3-Y2)$
Least Squares Equation	根据Fit Type选定的拟合类型，得到的第二对游标间拟合曲线公式
Root Mean Square	拟合曲线的RMS偏差
Average Deviation	拟合曲线的平均偏差

### 3 力曲线数据：计算灵敏度

Nanoscope Analysis软件能够计算力曲线中的相应通道的灵敏度，其目的是为了校准Y轴通道的数值。其步骤如下：

1. 计算灵敏度时，最好将X轴类型设为Height Sensor，并将Active Curve设为回撤段。然后在力曲线上放上两条游标，两游标位置不应离粘附力挣脱点和峰值点太近，且保证两游标分离尽量大。
2. 设好游标后，在菜单中点击Command > Update Sensitivity。

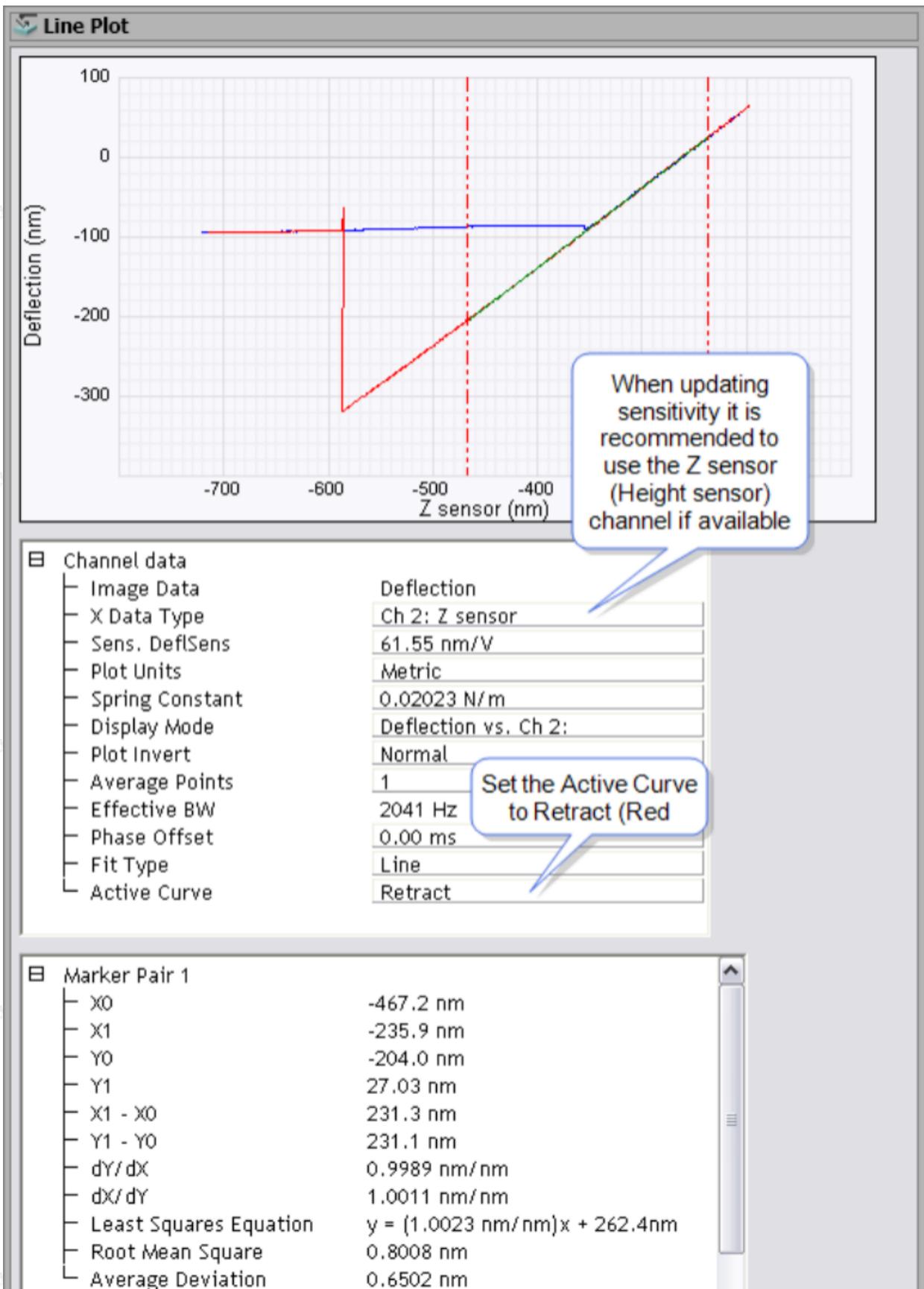


图3.1 计算灵敏度

3. 弹出窗口中选Yes以计算灵敏度。

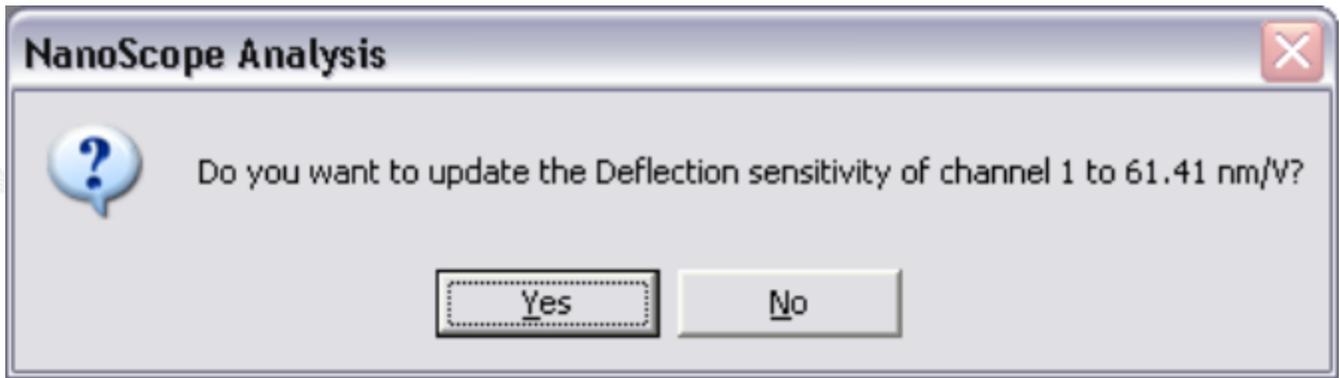


图3.2 灵敏度窗口

4. 灵敏度数值会更新在输入参数窗口中。

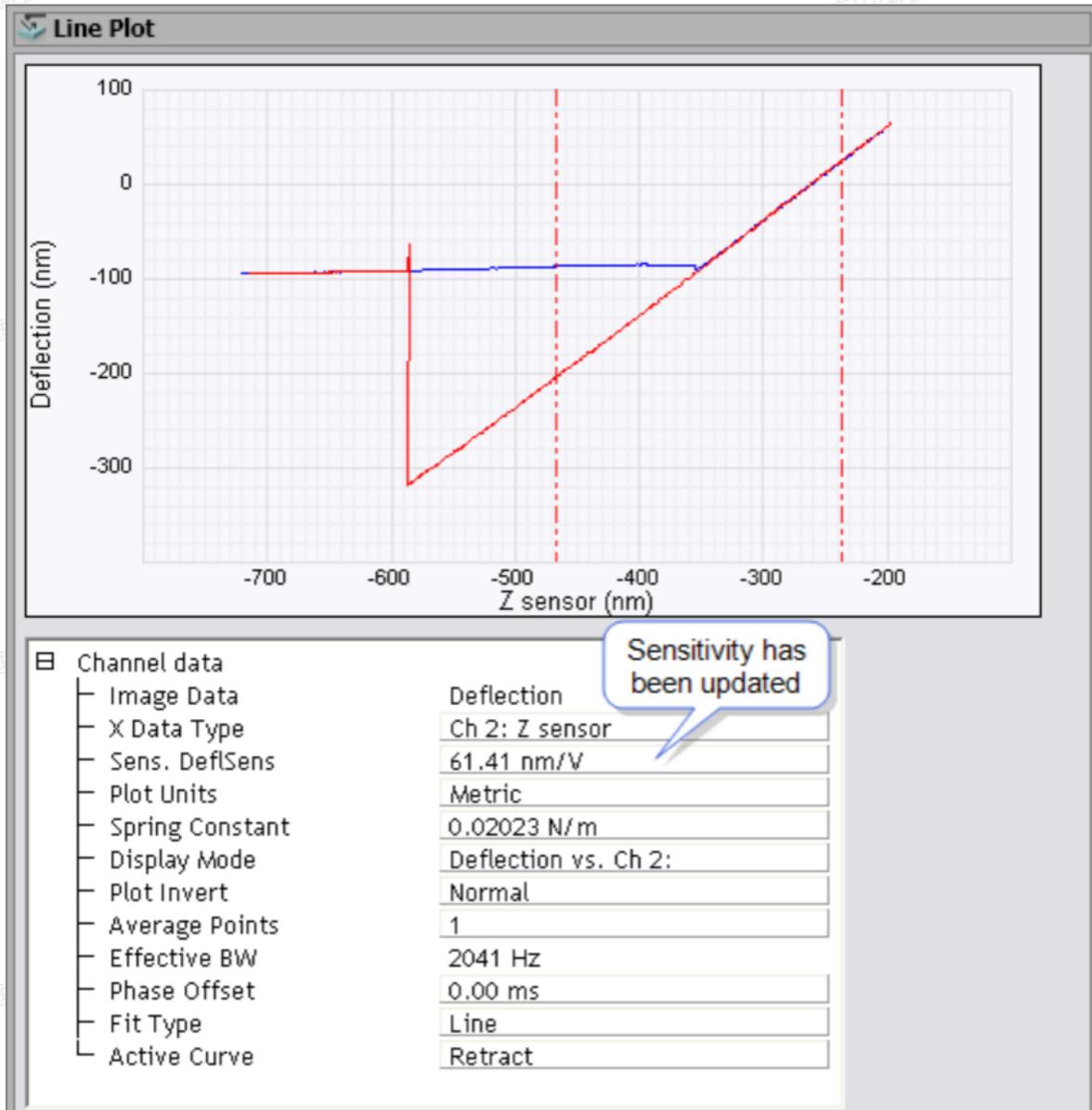


图3.3 完成灵敏度更新

## 4 力阵列数据

力阵列 (FV) 成像将力曲线测量与形貌成像结合起来。经典的AFM成像利用反馈回路保持探针-样品间相互作用不变得到样品表面形貌。而力阵列成像则是获得一系列的力曲线并从其中同时得到样品形貌以及力学性质。

### 4.1 理论

力曲线记录探针接近并远离样品表面过程中探针-样品作用力的变化。当作用力达到设定的“触发值”后，系统记录下扫描管位置并将探针回撤远离样品表面。力阵列成像中在设定的范围内每一个 (X, Y) 位置上进行力曲线测试，且每一条的回撤高度都是一致的。通过对每一点力曲线进行拟合，能够得到在每个高度下探针作用力在这个范围的分层图。而高度图是由探针在每一点达到触发力值时的高度组成。力阵列数据能够对探针-样品作用力进行二维或三维成像。其应用包括弹性、粘附力和电磁场研究。

### 4.2 力阵列数据分析步骤

1. 打开力阵列数据后，点击Force Curve Mode窗口中的Single钮，展示力阵列图像中选定点的单点力曲线。力阵列图像中的白色十字游标指示选定的像素点。
2. 力阵列窗口中的形貌图下方的Slice图显示在设定Z高度下的弯曲量分布图，通过调整力曲线中的红色游标竖线位置，可以调整Slice图结果。

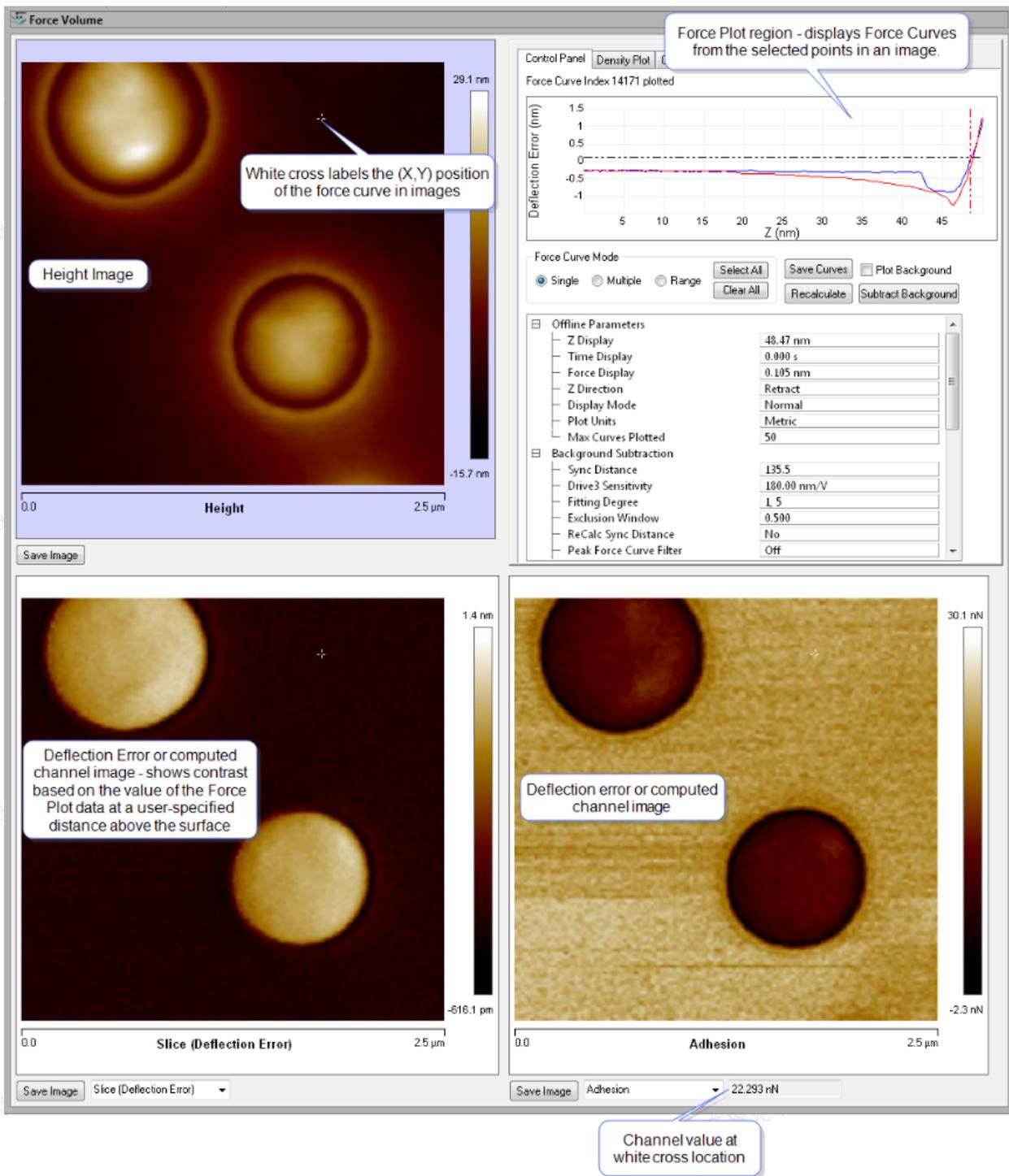


图4.2.1 力阵列窗口

3. 在Force Curve Mode窗口中选择Multiple可以同时展示多个点的力曲线。点击Clear All按钮可以取消选择。如果选择高度图像中不同位置的像素点，即可由力曲线中明显看出形貌不同对应不同的力曲线。

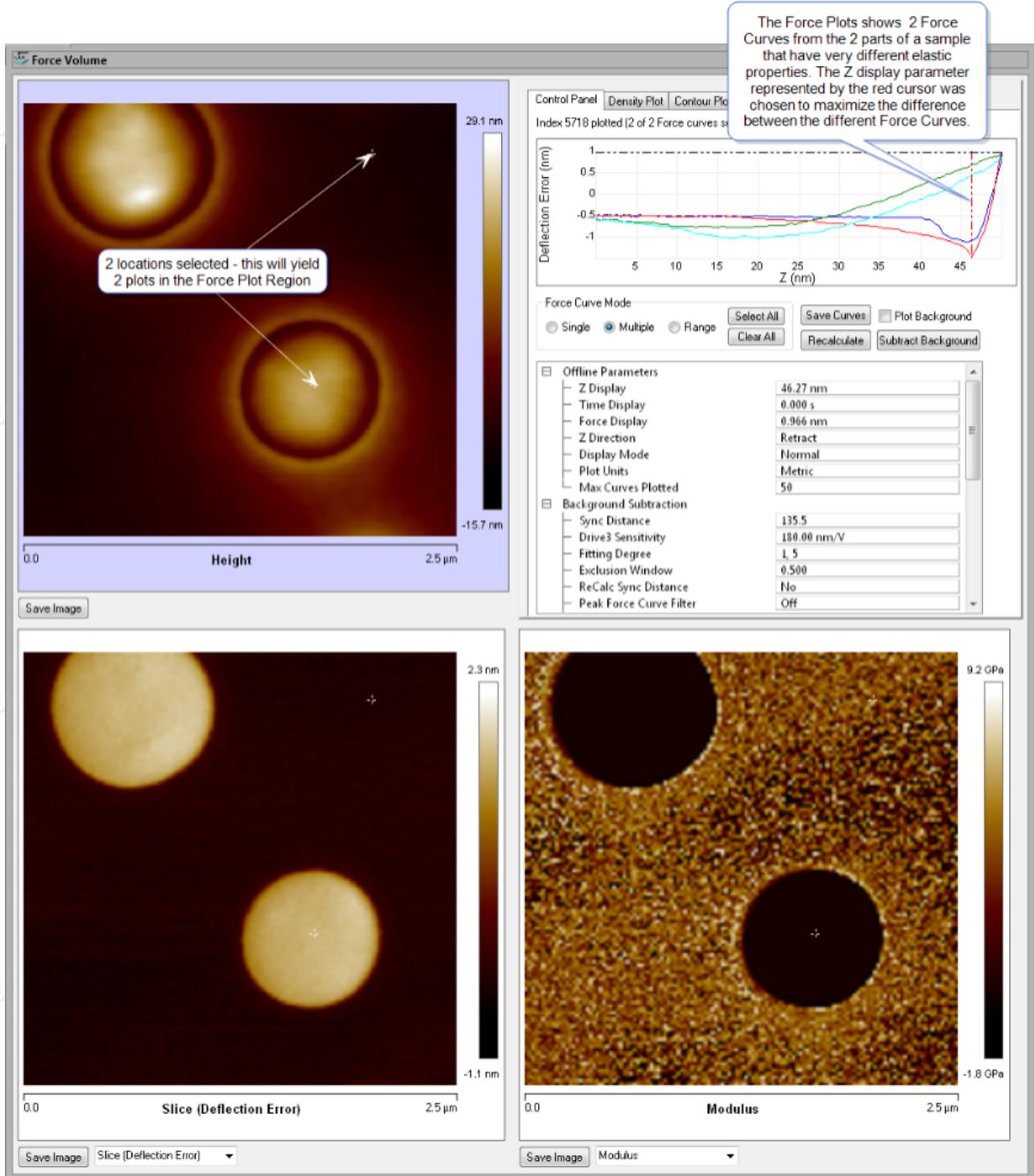


图4.2.2 多个像素点力曲线展示

- 在Force Curve Mode窗口中选择Range即可展示一个区域内所有像素点的力曲线。在高度图上感兴趣的区域用鼠标左键画一个选框，则选框内的所有像素点力曲线同时显示出来。
- 除此之外，单条力曲线也可进行分析。点击Save Curves即可将选定的力曲线分别以力曲线文件保存下来，可以分别进行分析。
- 点击Save Images即可以.spm文件保存所有处理好的通道的图像。

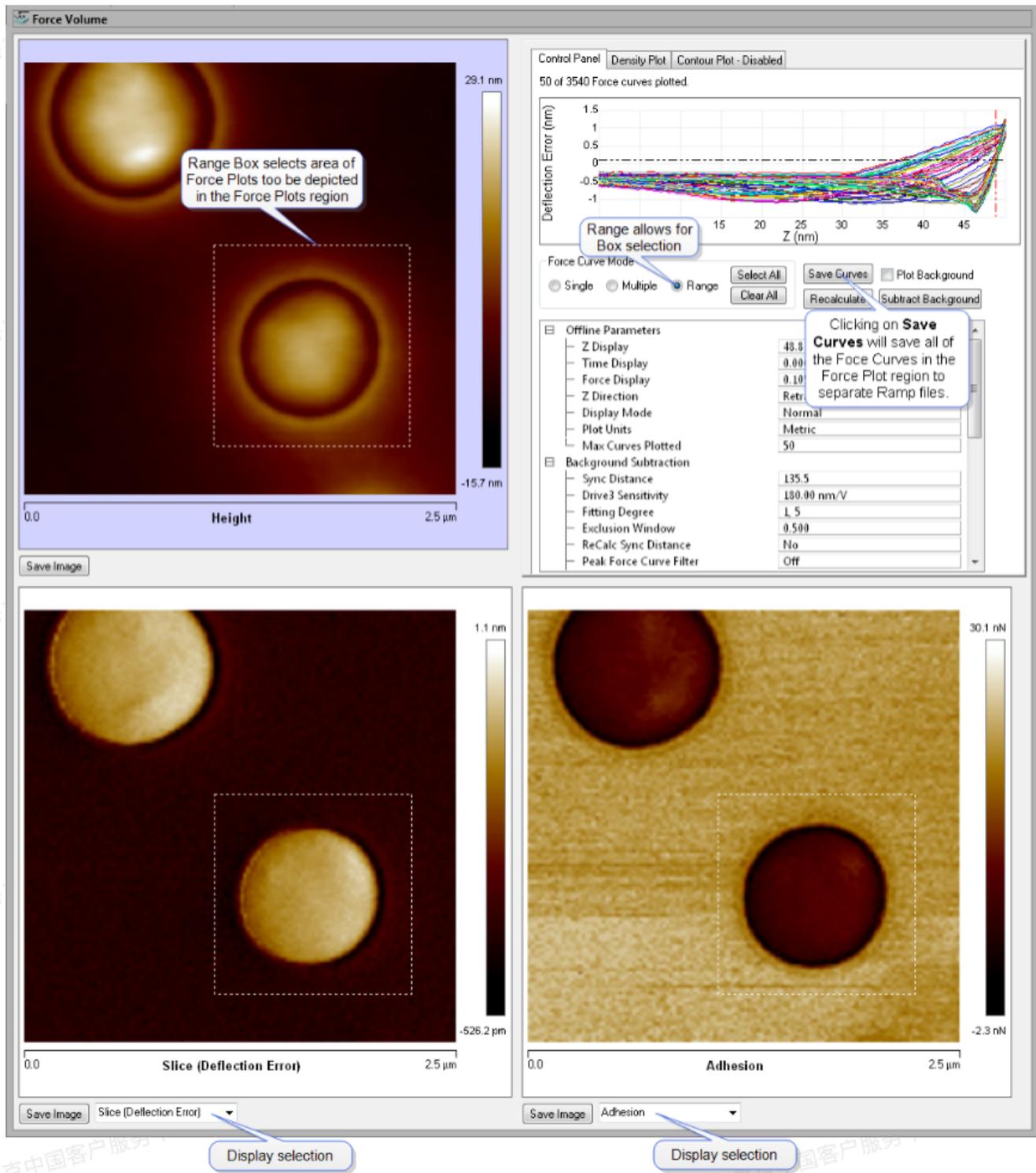


图4.2.3 区域力曲线显示

### 4.3 力阵列界面

力阵列界面可保存的图像类型包括：

- Height或者Height Sensor，指触发力（即Relative Trigger模式力曲线中的Trig Threshold）那一点的高度数据
- Slice (Deflection Error, 即弯曲量, 或者说力)

- Modulus
- Log Modulus
- Stiffness
- Adhesion
- Force Section
- Real Height, 指力曲线上刚接触样品那一点的高度数据。当样品表面不同区域刚性变化很大时, 应使用Real Height

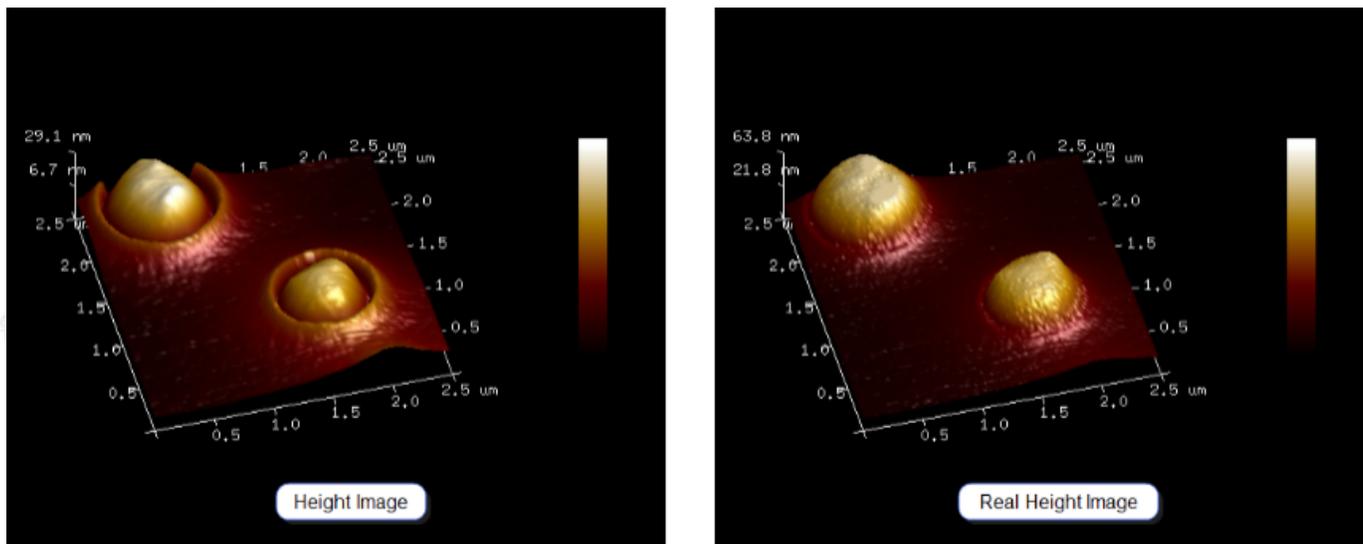


图4.3.1 Height和Real Height的对比

### 4.3.1 力曲线选择窗口按钮

Single, 选择并展示单一像素点的力曲线。

Multiple, 选择并展示多个像素点的力曲线。

Range, 选择并展示选定区域内的所有像素点的力曲线。

Select All, 展示全图所有像素点的力曲线。

Clear All, 取消选择。

Save Curve, 分别保存选定的力曲线文件。

Recalculate, 改变设定参数后重新计算力曲线和相应图像数据。

Plot Background, 展示原始力曲线、计算的基线和扣除基线后的力曲线。

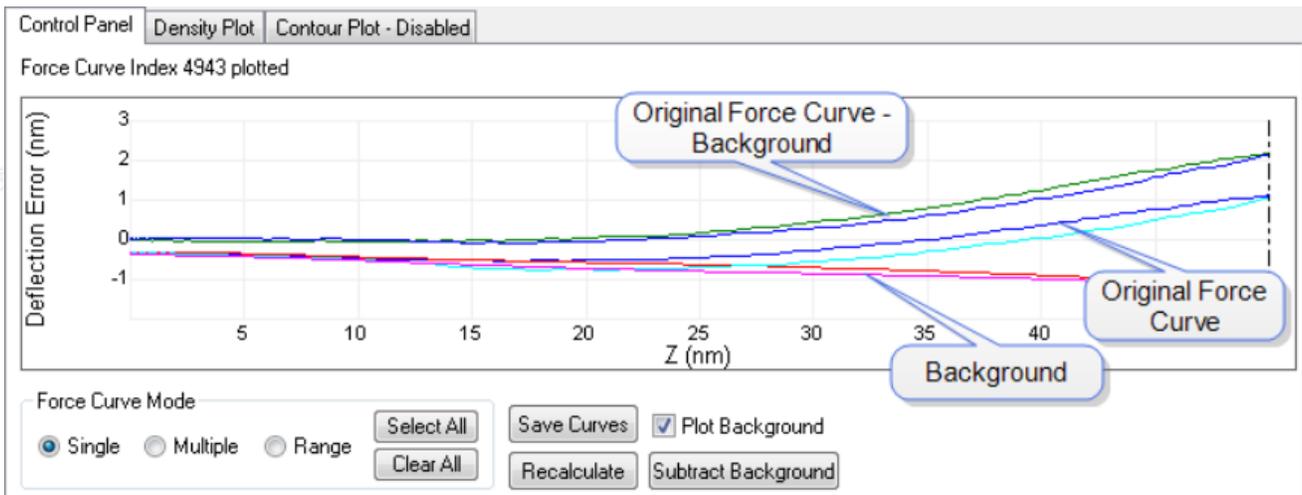


图4.3.1.1 Plot Background勾选后的界面

Subtract Background，展示基线扣除后的力曲线。

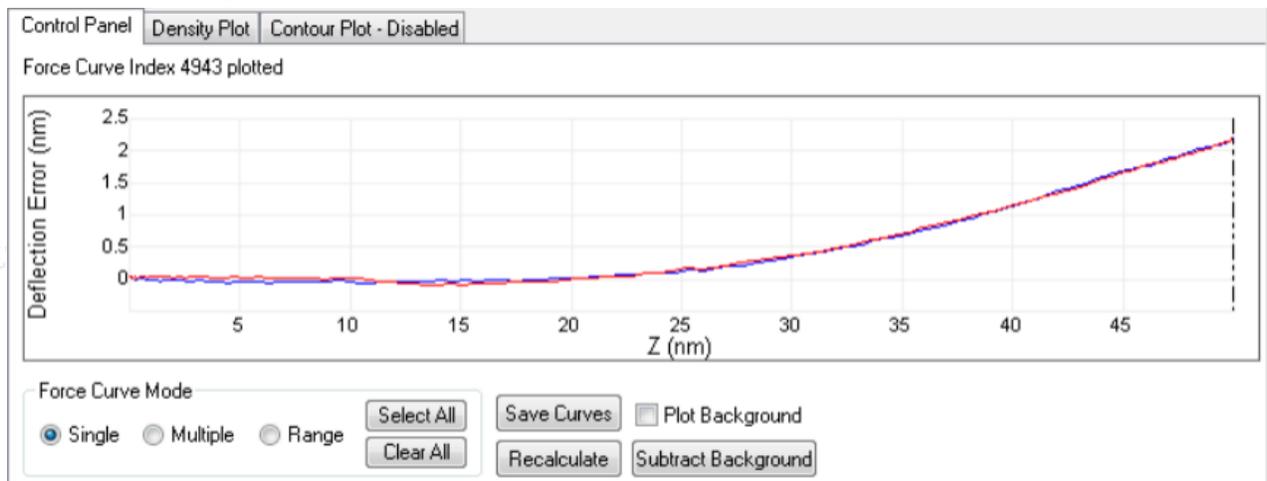


图4.3.1.2 基线扣除后的力曲线

Density Plot，展示多条力曲线的二维柱方图。像素点越黑，表明该像素点下的力曲线数目越多。该柱方图横轴和纵轴的柱方饼数目都是可调的。

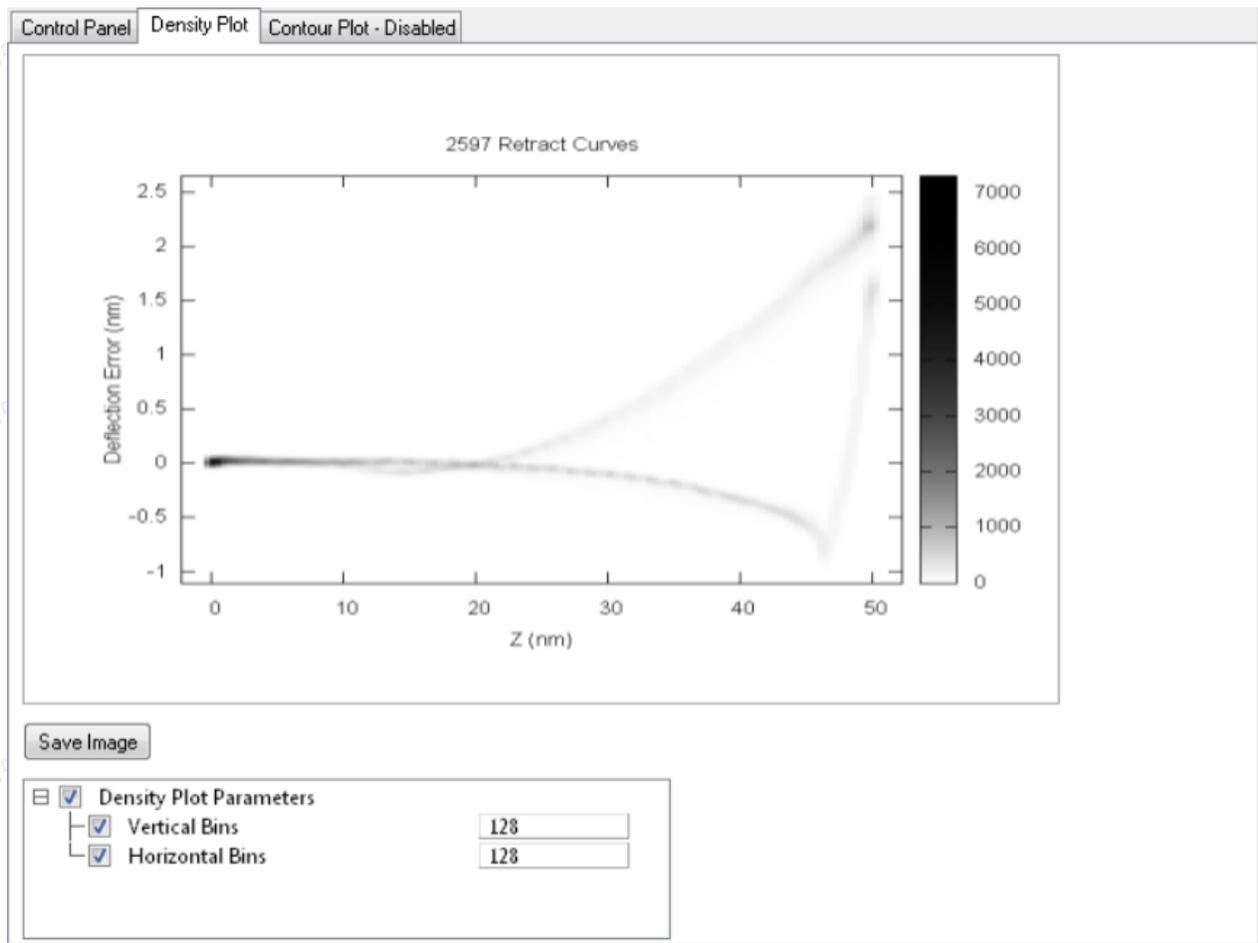


图4.3.1.3 Density Plot窗口

Contour Plot, 指FV图上选定截面线不同高度下弯曲量的变化。为使用该功能, 用户需要在高度图右键菜单中选定Rotating Line并画出游标截面线才能实现。

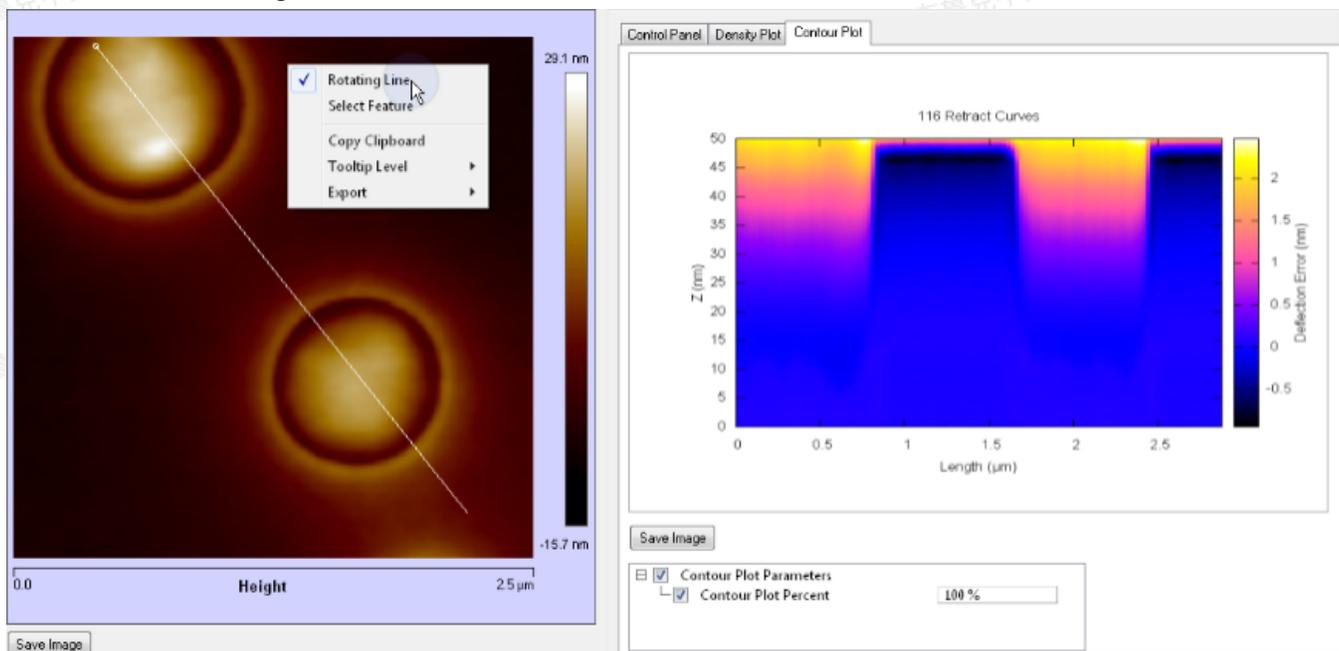


图4.3.1.4 Contour Plot窗口

### 4.3.2 离线参数

Z display, 决定Slice图像中显示弯曲量的高度值, 调节力曲线窗口中的红色游标竖线, 或直接在窗口中改变数值大小, 可对Z display进行调节。该数值是指离开触发点的Z高度。例如, Z display为30 nm, 是指探针远离触发点30 nm。

Time Display, 指力曲线横坐标为时间时游标竖线所对应的横坐标。

Force Display, 指力曲线图中游标横线对应的纵坐标。

Z direction, 决定FV性质图中计算结果所使用的力曲线段为接近段或回撤段。例如, 当做粘附力图使, 应选则回撤段。

Display Mode, 选择力曲线中横坐标为高度或分离距离。

X Data Type, 选择力曲线中横坐标类型为Height、Height Sensor或时间。

Plot Units, 选择力曲线单位为Volts (V)、Metric (nm或 $\mu\text{m}$ )或Force (nN)。

Max Curves Plotted, 决定拟合的力曲线数目的最大值。

### 4.3.3 基线扣除参数 (在pfc文件中出现)

Sync Distance, 是指力曲线时间图上起点到峰值力间的时间 (计时步长为2  $\mu\text{s}$ )。注意: 这里的参数Sync Distance与Nanoscope软件进行数据采集时的Sync Distance QNM相等。

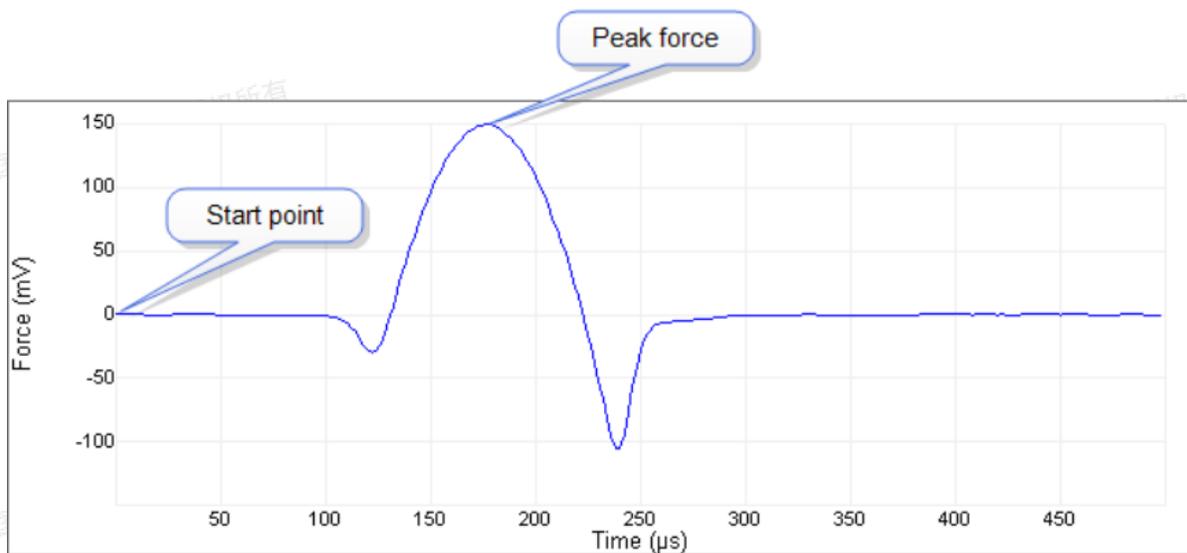


图4.3.3.1 Sync Distance定义

Drive3 Sensitivity, 指在DDS3驱动下压电陶瓷Z方向振动的灵敏度数值。

Fitting Degree, 指在力曲线中扣除的谐波频率。例如, 想扣除一倍和二倍谐频, 输入1, 2。

Exclusion Window, 指不进行基线校准的力曲线部分, 是以峰值为中心定义的。

ReCalc Sync Distance, 设为Yes, 对每条力曲线进行Sync Distance计算; 设为No, 对所有力曲线使用同一个Sync Distance。对于活细胞和其它粘弹性样品, 应选为Yes。

Peak Force Curve Filter, 设为On或Off, 决定是否进行Peak Force Curve滤波处理。

Signal/Noise, 当Peak Force Curve Filter设为On时, 若某一点力曲线的信噪比低于该设定值时, 则该点的模量值设为0。

Modulus Cutoff Value, 当Peak Force Curve Filter设为On时, 当某一点拟合得到的模量值大于该设定值时, 该点模量设为0。

#### 4.3.4 Force Volume参数

Baseline Fit, 调整力曲线基线校准设置, 可设置为:

- None, 不进行基线校准。

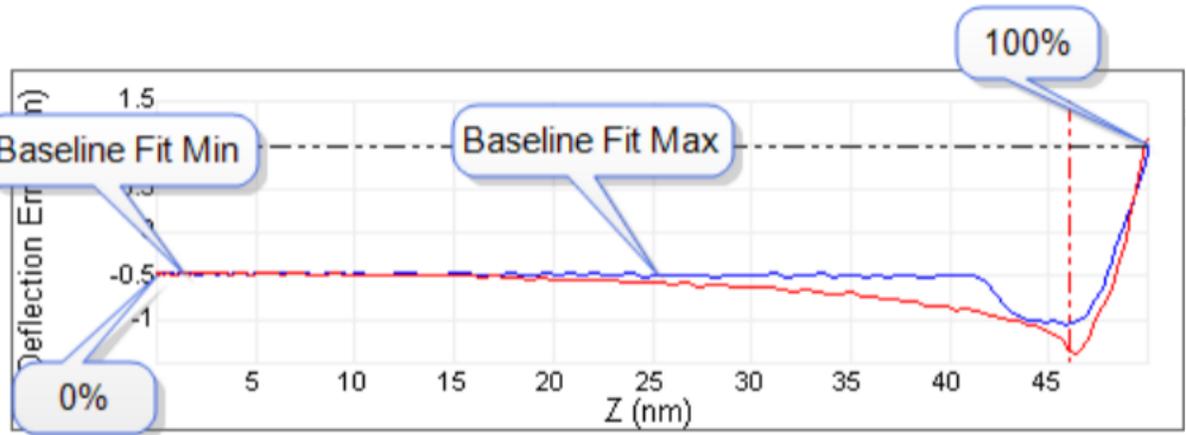


图4.3.4.1 Baseline Fit设为None

- Offset, 力曲线上每个点扣除Baseline Fit Min和Baseline Fit Max之间的基线部分平均值。

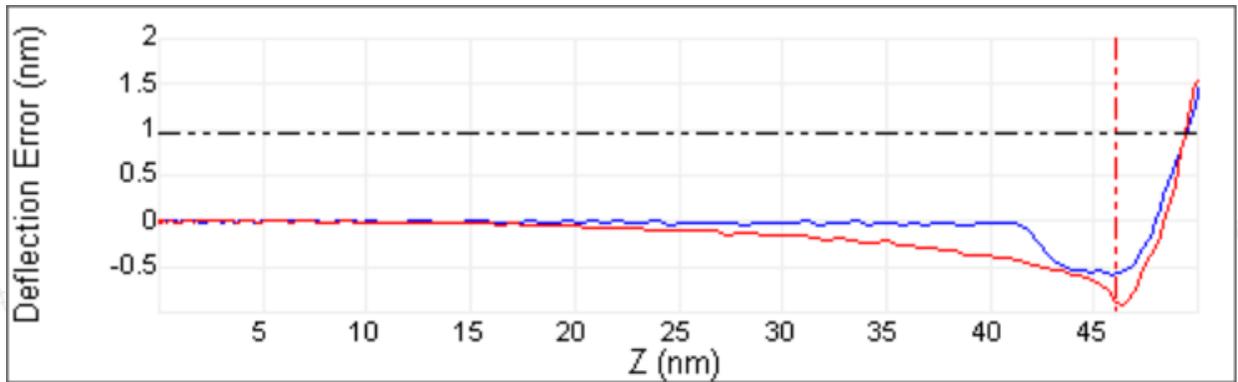


图4.3.4.2 Baseline Fit设为Offset

- Line, 力曲线上每个点扣除Baseline Fit Min和Baseline Fit Max之间的基线部分的线性拟合回归曲线。

Baseline Fit Min, 定义进行基线校准的起点。

Baseline Fit Max, 定义进行基线校准的终点。

Modulus Fit Model, 选择对力曲线进行拟合的模型。

Deflection Sensitivity, 悬臂的弯曲量灵敏度。

Spring Constant, 悬臂的力常数。

Tip Half Angle, 探针针尖的等效圆锥半角。

Tip Radius, 探针针尖的等效球半径。

Poisson Ratio, 样品的泊松比。

Include Adhesion Force, 选择在探针-针尖作用力计算中是否包含粘附力。

Adhesion Algorithm, 选择粘附力计算的算法, 包括

- Threshold Crossing, 基于粘附力的性质, 它应该是力曲线上最大压入深度之后的力的极小值。为找到这个极小值:

- 找出力-时间曲线上的峰值A, 和曲线最低点之上30%的点B, 连接AB并延长与力曲线交于C点, 则粘附力应该是C点左边区域的最小值。
- 该算法对于极软样品不适用。

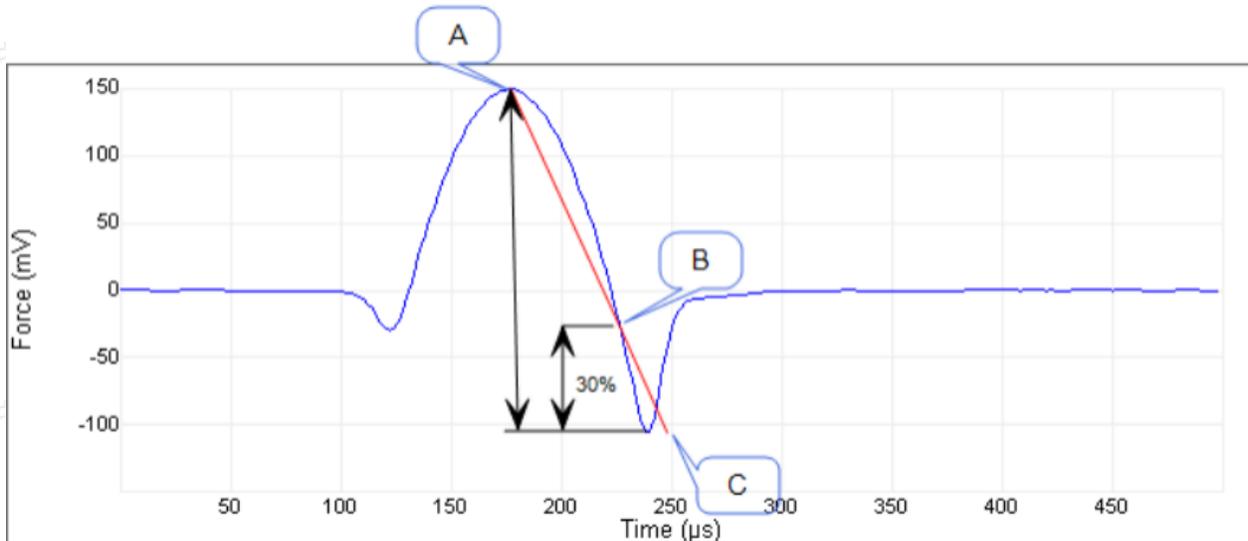


图4.3.4.3 Threshold Crossing法计算粘附力

- Absolute Minimum, 力-时间曲线上斜率变正之前的力的最小值即为粘附力。该算法在有严重光干涉噪音的情况下会失效。

- Positive Slope

- 设定Slope Fitting %值, 从峰值力开始, 到达该设定值后, 对该段力-时间曲线进行最小二乘法拟合, 得到拟合曲线的斜率。
- 从峰值力下一点开始, 按同样办法进行拟合, 得到斜率。
- 重复上述步骤, 直到斜率为正时停止, 则该起始点对应的力即为粘附力。
- 布鲁克认为该方法是最准确的粘附力计算算法。

Minimum Force Fit Boundary, 定义为 $[(\text{Maximum Force}) - (\text{Minimum Force})]$ 的一个百分比, 用来进行模量拟合。

Maximum Force Fit Boundary, 定义为 $[(\text{Maximum Force}) - (\text{Minimum Force})]$ 的一个百分比, 用来进行模量拟合。

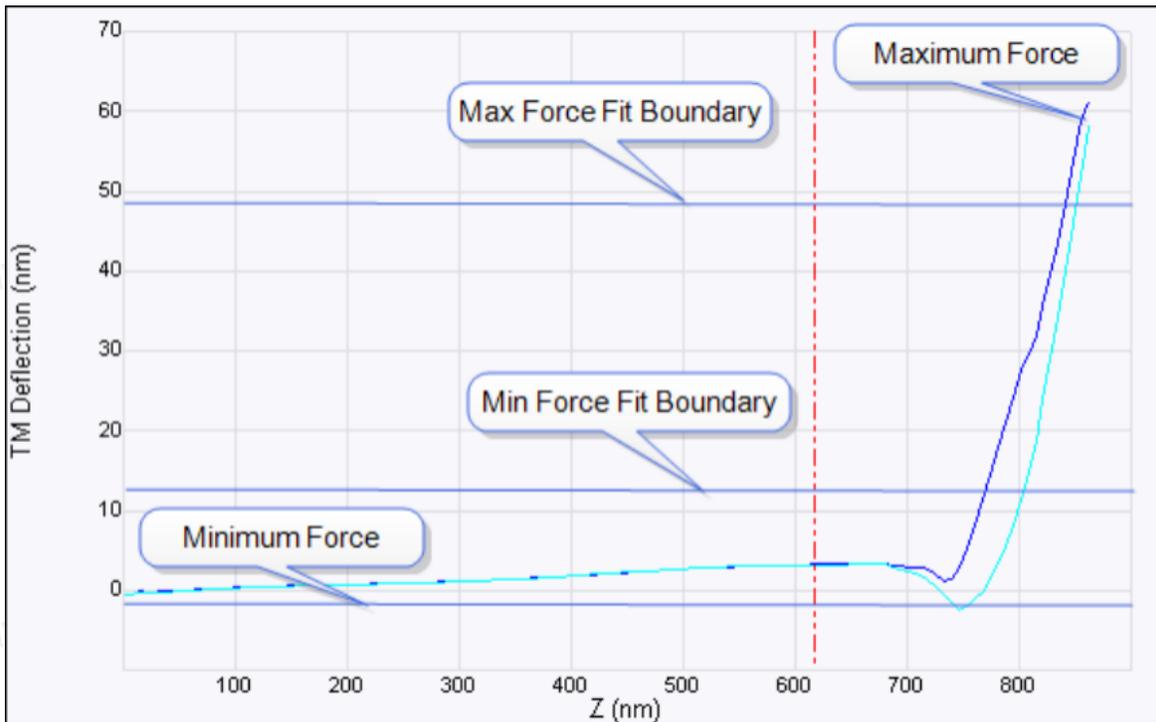


图4.3.4.4 Minimum和Maximum Force Fit Boundary定义

Data Limits, 可设置为:

- Auto Scale, 利用自动调节坐标尺移除超过量程的数据点。
- Full Scale, 由数据最大和最小点定义标尺。

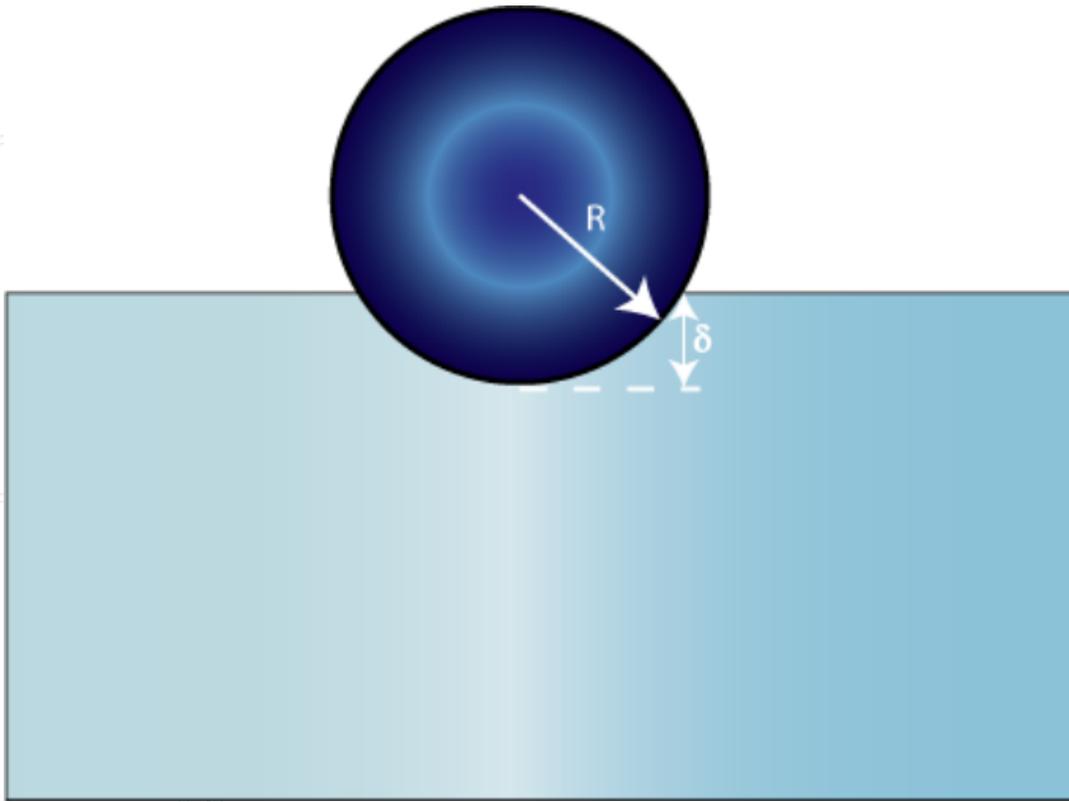
## 4.4 纳米力学成像参数

力阵列中的纳米力学成像参数定义了根据所选的模型对所有的力曲线进行拟合所需的参数。可使用的模型包括:

### 4.4.1 Hertz模型 (球形压入体)

布鲁克中国客户

版权所有



布鲁克中国客户

版权所有

图4.4.1.1 Hertz模型

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

其相互作用力为：

$$F = \frac{4}{3} \frac{E}{1 - \nu^2} \sqrt{R} \delta^{3/2}$$

其中F为力（由力曲线得到），E为样品的杨氏模量， $\nu$ 为样品的泊松比，R为球形压入体的半径， $\delta$ 为压入深度。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

#### 4.4.2 Sneddon模型（圆锥形压入体）

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户

布鲁克中国客户

版权所有

版权所有

版权所有

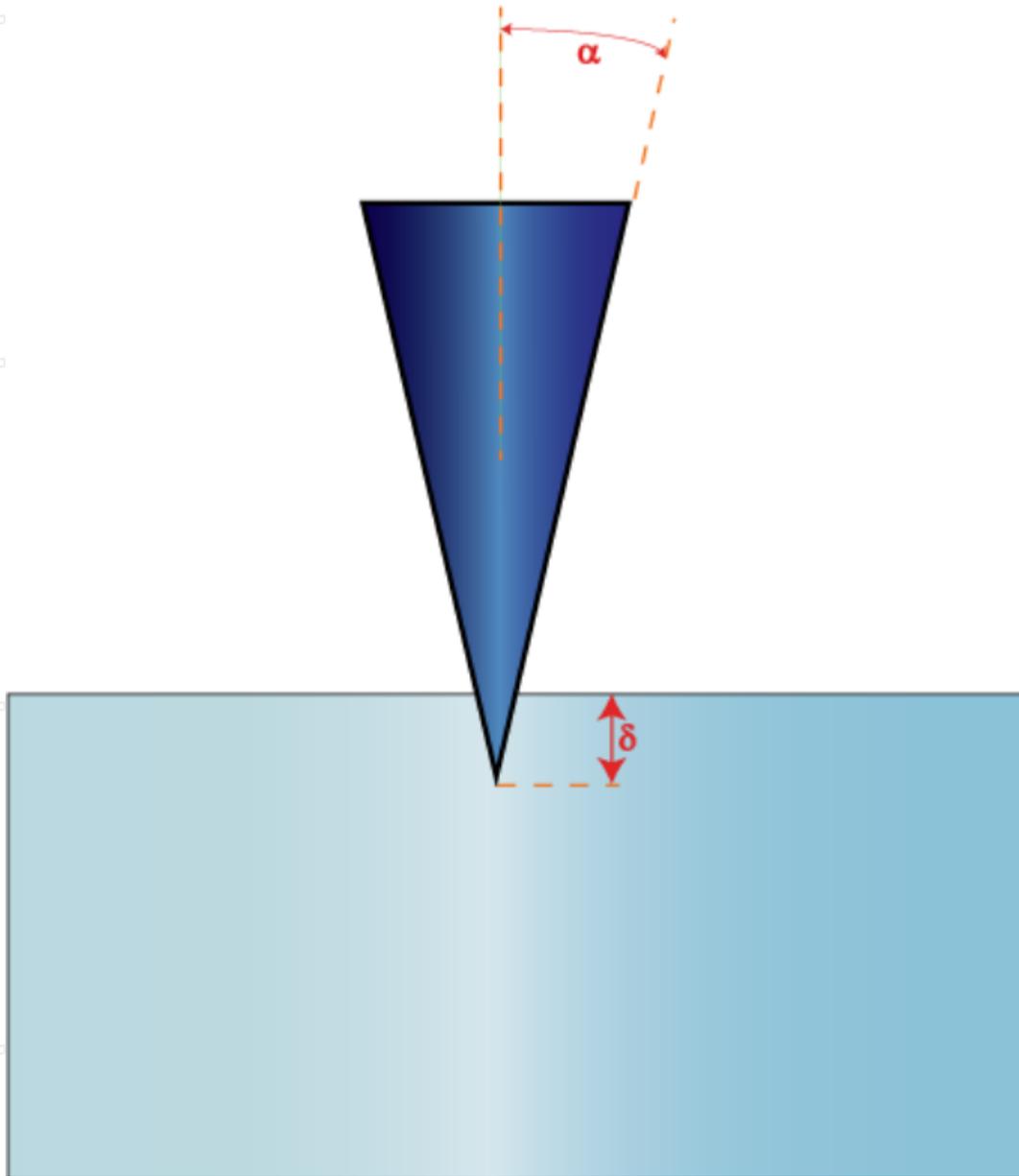


图4.4.2.1 Sneddon模型

其相互作用力为：

$$F = \frac{2}{\pi} \pi \frac{E}{1 - \nu^2} \tan(\alpha) \delta^2$$

其中F为力（由力曲线得到），E为样品的杨氏模量， $\nu$ 为样品的泊松比， $\alpha$ 为圆锥压入体的半角， $\delta$ 为压入深度。

### 4.4.3 Cone Sphere模型

该模型由Briscoe, Sebastian和Adams发明，描述一个尖端为球形的刚性椎体压入过程，如下图所示。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

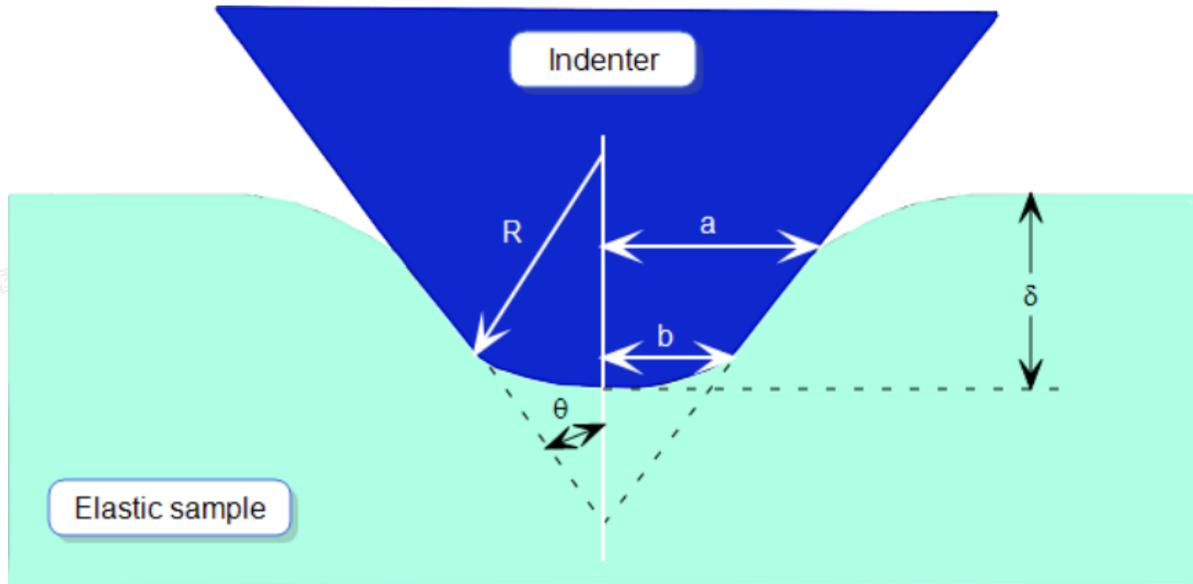


图4.4.3.1 Cone Sphere模型

其作用力为：

$$F = 2 \frac{E}{1 - \nu^2} \left\{ a\delta - \frac{a^2}{2 \tan \theta} \left[ \frac{\pi}{2} - a \sin \frac{b}{a} \right] - \frac{a^3}{3R} + \sqrt{(a^2 - b^2)} \left( \frac{b}{2 \tan \theta} + \frac{a^2 - b^2}{3R} \right) \right\}$$

其中 $F$ 为力（由力曲线得到）， $E$ 为样品的杨氏模量， $\nu$ 为样品的泊松比， $R$ 为球形针尖体的半径， $\delta$ 为压入深度， $b$ 为接触半径：

$$b = R \cos \theta$$

压入点半径 $a$ 可通过如下方程计算得到：

$$\delta + \frac{a}{R} \left( \sqrt{a^2 - b^2} - a \right) - \frac{a}{\tan \theta} \left( \frac{\pi}{2} - a \sin \frac{b}{a} \right) = 0$$

当 $b \geq a$ 时，该模型即退回为Hertz模型。

#### 4.4.4 JKR模型

该模型由Johnson, Kendall和Roberts发明，适用于考虑粘附力的软样品压入测量。JKR模型描述如下：

$$a^3 = \frac{3R}{4E^*} \left[ F + 3\pi R\Delta\gamma + \sqrt{6\pi R\rho\Delta\gamma + (3\pi R\Delta\gamma)^2} \right]$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} \left[ 1 - \frac{2}{3} \left( \frac{a_0}{a} \right)^{3/2} \right]$$

其中 $a$ 为接触半径， $F$ 为力（由力曲线得到）， $E^*$ 为折合杨氏模量（考虑探针的模量贡献）， $R$ 为球形针尖体的半径， $\delta$ 为压入深度， $\Delta\gamma$ 为粘附力做功， $a_0$ 为粘附力为0时的接触半径，即：

$$a_0^3 = \frac{9\pi R^2 \Delta\gamma}{2E^*}$$

$F_{adh}$ 为最大粘附力，即：

$$F_{adh} = -\frac{3}{2}\pi\Delta\gamma R$$

Nanoscope Analysis提供了三种JKR模型的拟合方法：

#### 4.4.4.1 JKR Full

JKR Full利用所指定的所有数据点拟合计算折合杨氏模量和杨氏模量。对于每个数据点，有下列线性关系：

$$\delta - \delta_{contact} = \frac{a}{a_0} \left( \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{F}{F_{adh}}}}{2} \right)^{\frac{4}{3}} - \frac{2}{3} \frac{a}{a_0} \left( \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{F}{F_{adh}}}}{2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

利用所有数据点进行最小二乘法线性拟合得到 $a_0$ ，然后根据 $a_0$ 计算得到折合模量：

$$E^* = \frac{9\pi R^2 \Delta\gamma}{2a_0^3}$$

#### 4.4.4.2 JKR 2 Point

JKR两点法利用粘附力最大的点 ( $\delta_1, F$ ) 和力为0的点 ( $\delta_0, 0$ ) 计算力常数K，从K计算折合模量和样品杨氏模量。软件会指定这两个点的位置，同时也可以移动游标进行修改。

$$K = - \left( \frac{1 + \sqrt[3]{16}}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{F}{\sqrt{R(\delta_0 - \delta_1)^3}}, F < 0$$

$$E = \frac{3}{4} K (1 - \nu^2)$$

#### 4.4.4.3 JKR 2 Point – Stiffness

JKR 2 Point – Stiffness模型利用粘附力最大点的力F和力为0的点 ( $\delta_0, 0$ ) 处的斜率 $S_{JKR}$ 计算力常数K，从K计算折合模量和样品杨氏模量。软件会指定这两个点的位置，同时也可以移动游标进行修改。

$$K = \sqrt{-3.42936 \frac{S_{JKR}^3}{RF}}, F < 0$$

#### 4.4.5 纳米力学拟合步骤

1. 如果用户使用的是Hertzian, Cone Sphere或者JKR model, 在Tip Radius中输入针尖的等效球半径。
2. 如果使用的是Sneddon或者Cone Sphere模型, 在Tip Half Angle中输入针尖的等效圆锥半角。
3. 输入样品的泊松比。
4. 决定是否考虑粘附力。对于Cone Sphere和JKR模型, 默认为Yes。考虑粘附力时, 用来拟合的力扣除了粘附力。
5. 输入Minimum Force Fit Boundary。
6. 输入Maximum Force Fit Boundary。
7. 在Modulus Fit Model中选择拟合模型。
8. 在Z direction中选则拟合使用接近段还是回撤段。
9. 在Spring Constant中输入悬臂的力常数。
10. 在力阵列下方的两个通道窗口中选择想展示的力学性质通道。
11. 点击Save Image保存结果。

## 5 预览力曲线

一次单分子力谱实验可以得到数十条甚至上百条力曲线, 要一次浏览这些力曲线, 可以使用预览力曲线功能。

1. 在菜单栏中点击Commands > Review Curves进入预览力曲线界面。
2. 如图所示, 预览力曲线窗口如下:
  - 在Directory中输入想预览的力曲线文件夹路径。
  - 选择进行分类标准: 按日期 (Date), TMR (接近段与回撤段之差, 正比于两段包围的面积) 和名字 (Name)。
  - 选择按升序 (勾选Ascending) 或降序排列 (不勾选Ascending)。
  - 选择图线的单位为Volts (V)、Metric (nm或 $\mu\text{m}$ ) 或Force (nN)
  - 选择预览的通道。
  - 选择预览的曲线段为接近段、回撤段或两者。

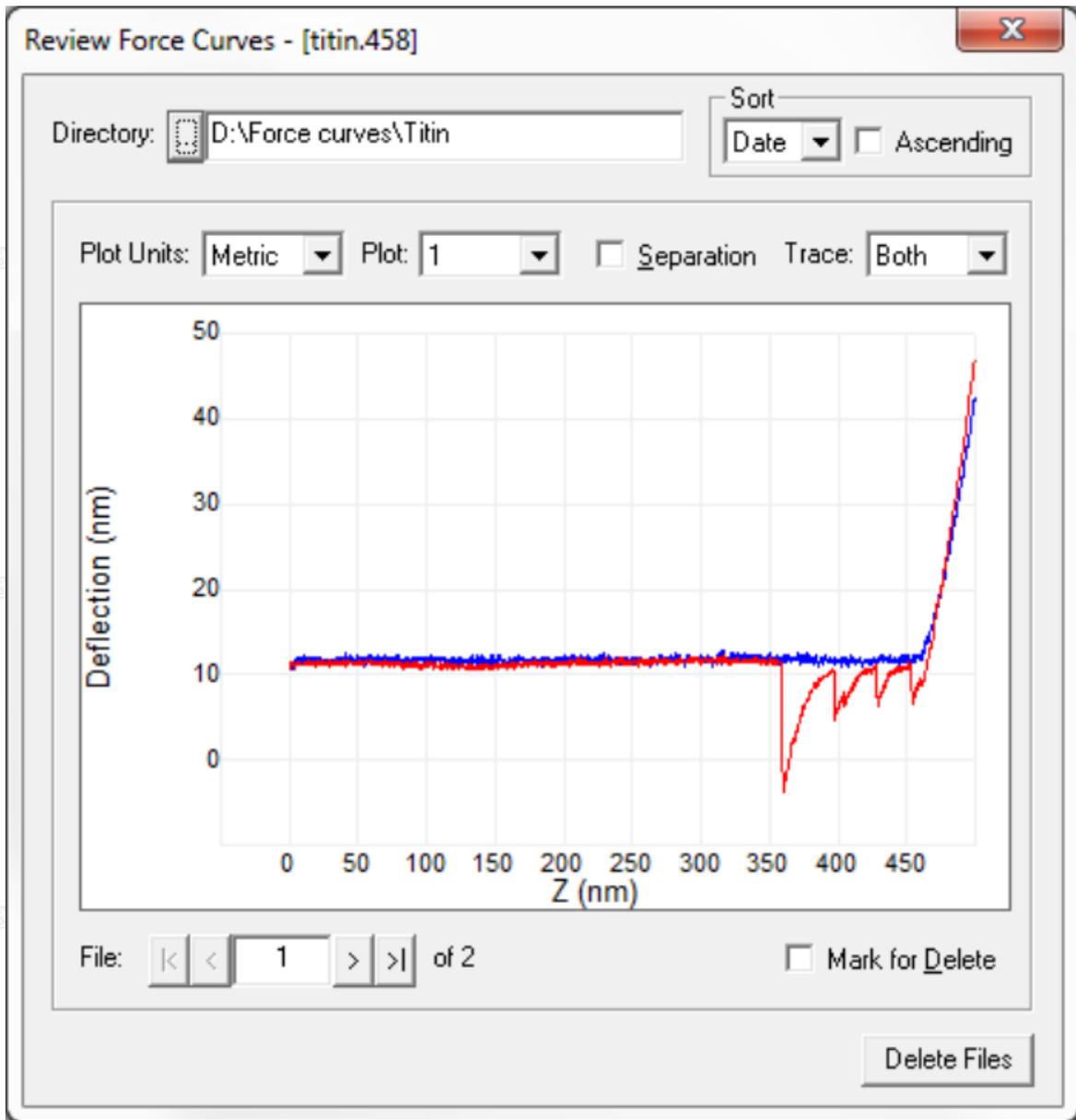


图5.1 预览力曲线

3. 点击图线下方的File旁的箭头逐一浏览文件夹内的力曲线。勾选Mark for Delete框或按键盘上的d，标记要删除的力曲线。点击Delete Files按钮后，这些力曲线文件被删除之回收站。
4. 按住Ctrl键，在想放大的地方用鼠标左键画框即可进行放大。要返回原界面，双击图像或者点击放大的放大镜图标即可。

## 6 过滤力曲线

另一种快速删除力曲线的办法是使用过滤力曲线功能，操作步骤如下：

1. 在菜单栏中选择Commands > Filter Curves。
2. 过滤力曲线窗口如图所示。
  - 在Directory中输入想预览的力曲线文件夹路径。
  - 在Plot中输入想预览的通道。

- 在Minimum Distance中输入数值，以接触点为起点之后的Minimum Distance距离内的数据点被忽略。
- 在Minimum Force中输入有效峰判定的阈值。
- 在Average Points中输入参数，则极大值前后各Average Points/2个点，这些数据点数值的平均值作为峰值，从而对曲线进行降噪处理。

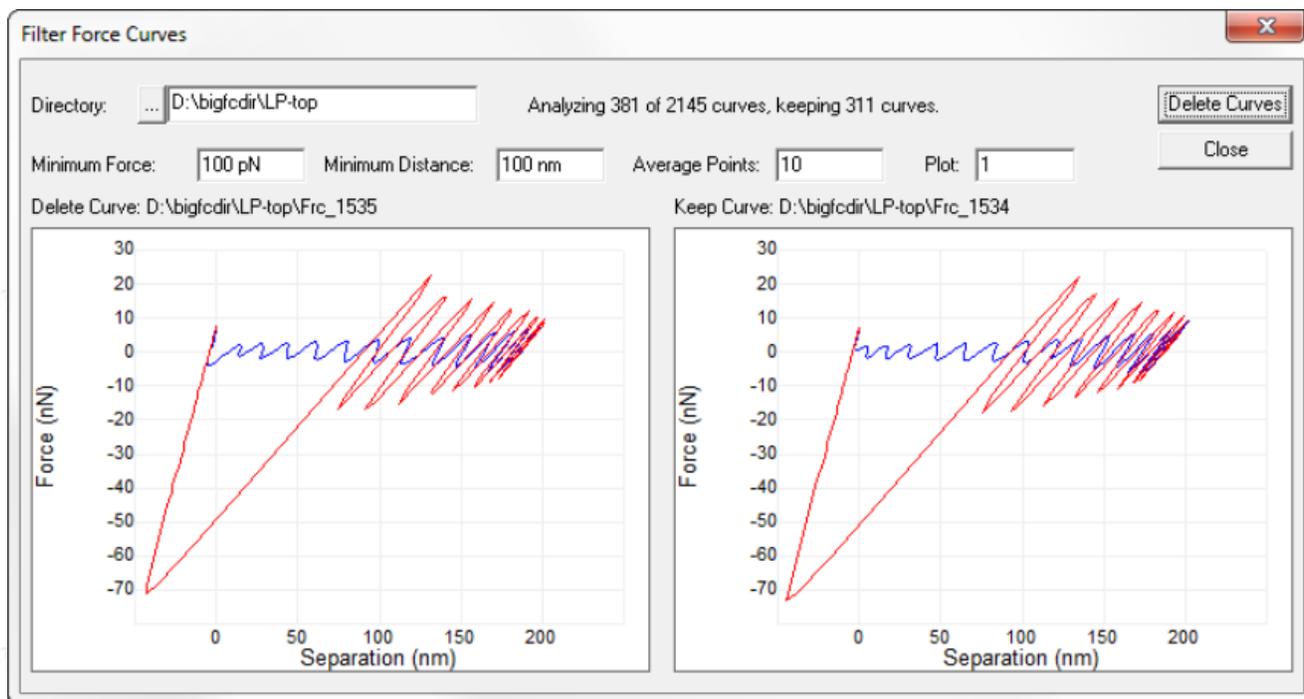


图6.1 过滤力曲线

3. 点击Delete Curves，对选定文件夹内的力曲线按上述所设参数进行过滤。点击Cancel可以放弃处理。
4. 满足删除标准的力曲线会显示在左边的窗口中，并给出弹框窗口Confirm File Delete，询问是否删除这些力曲线文件至回收站。

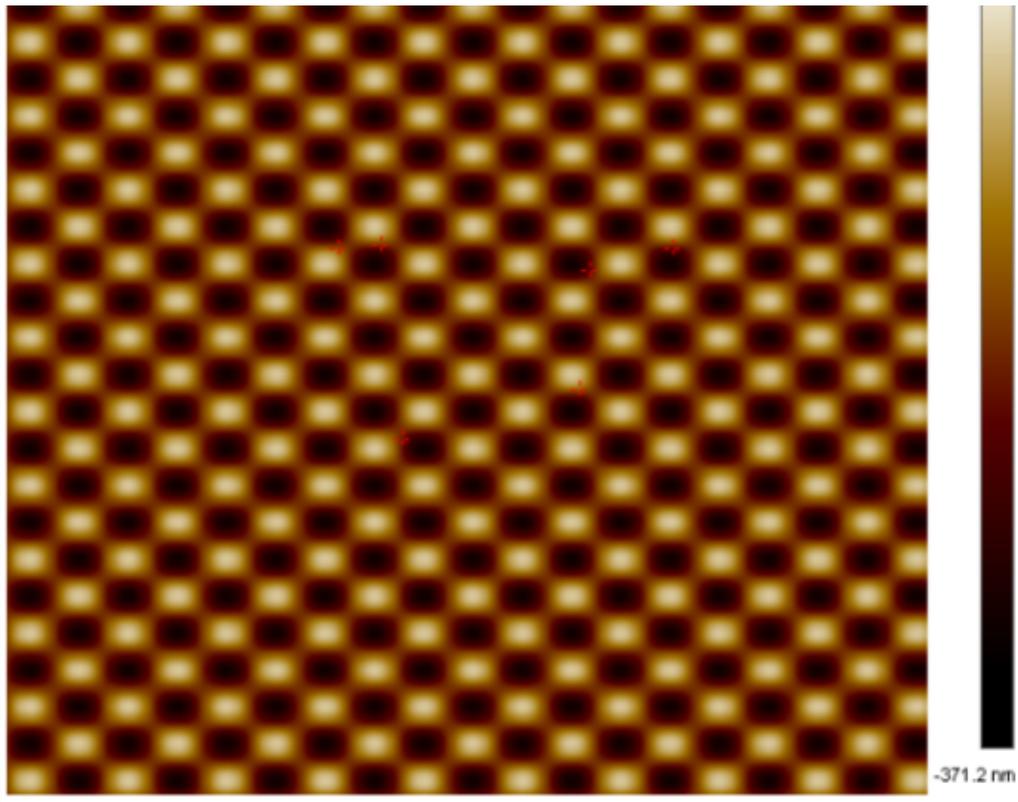
## 7 多条曲线分析

多条曲线分析功能（MCA）能够对一个图线中的多条力曲线进行分析。

### 7.1 分析步骤

在浏览窗口中找到多条曲线文件（.MCA），鼠标左键双击打开。在MCA窗口中点击Add Files...按钮，打开文件选择窗口选择待分析的Ramp文件，点击Add添加。这些文件被添加至MCA窗口中的文件清单中。点击这些曲线文件的名字可以单个或多个进行移除。这些Ramp曲线可以通过点击文件清单中Plot栏下相应位置选择性地显示或隐藏。

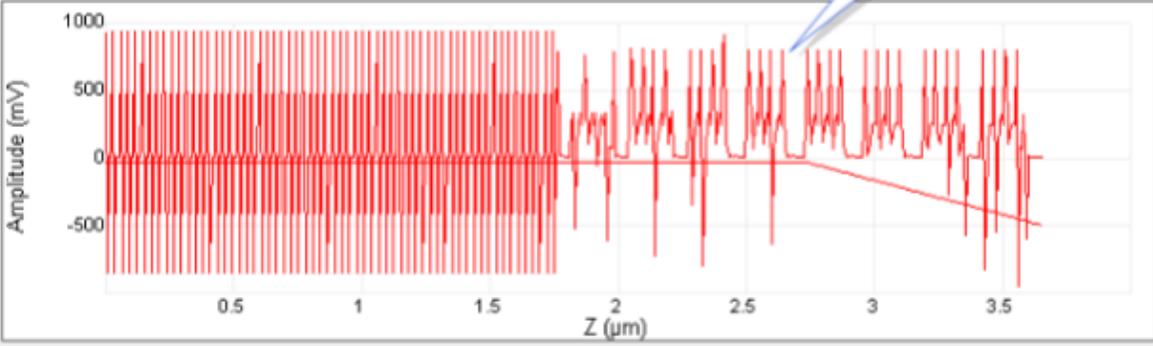




**Image Cursor Mode Selections & Buttons**

Image Cursor Mode  
 Select Box  Unselect Box  Measure Line

**Plot Window**



**Input Parameters**

Display	
Plot Units	Force
Direction	Both
Type	Separation
Invert	No
Plot	1
Select Mode	Off
Peak Detection	
Minimum Size	0.100 nN
% of Maximum	70.0 %
Minimum Width	5.00 nm

File Name	Plot	Plot Offset (nm, mV)	Image Offset (m, m)	Peak Number	X Value (nm)
pointandshoot0000...	X	[0.00, 0.00]	[4.047397e-005, 4...	0	0.000
pointandshoot0000...	X	[0.00, 0.00]	[6.244558e-005, 4...	0	0.000
pointandshoot0000...	X	[0.00, 0.00]	[6.167468e-005, 5...	0	0.000
pointandshoot0000...	X	[0.00, 0.00]	[4.278677e-005, 6...	0	0.000
pointandshoot0000...	X	[0.00, 0.00]	[...e-005, 4...	0	0.000
pointandshoot0000...	X	[0.00, 0.00]	[7.169678e-005, ...	0	0.000

**MCA File Information Register & Associated Buttons**

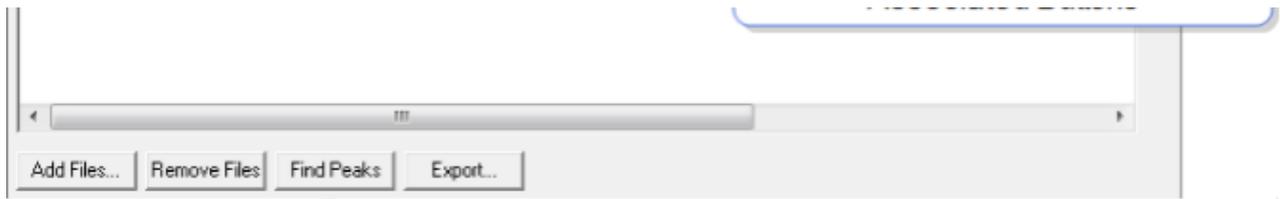


图7.1.1 MCA窗口

右键点击文件清单窗口中的文件打开右键下拉菜单，可以选择预览或隐藏所有的Ramp曲线，

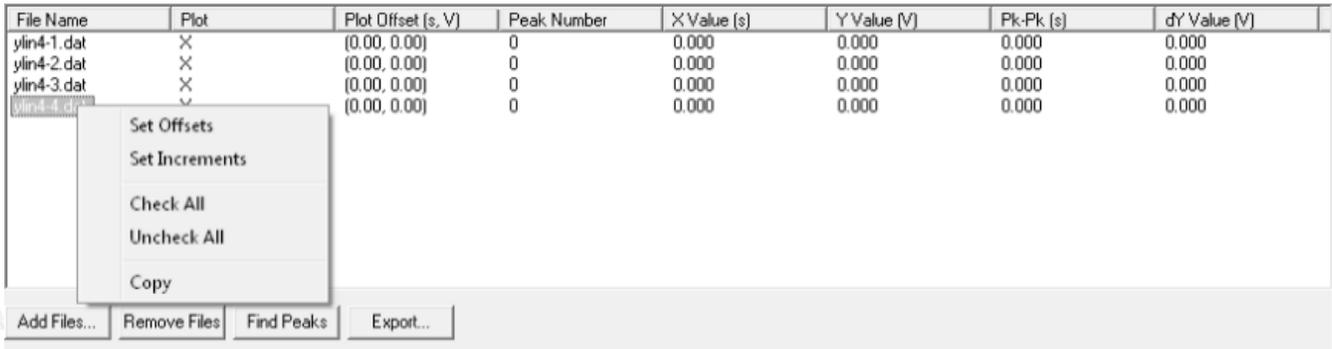


图7.1.2 右键下拉菜单

还可以调节Ramp曲线的位移和增量。

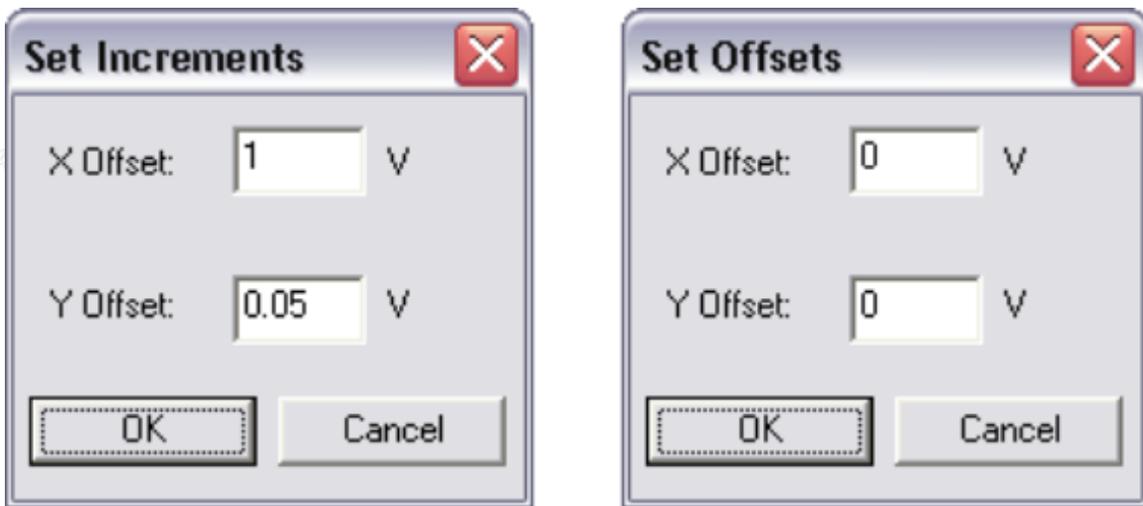


图7.1.3 右键下拉菜单中设置位移和增量功能

鼠标左键双击清单中的文件可以在新的窗口中打开相应的Ramp文件，进行Ramp曲线分析。

## 7.2 MCA界面

表7.2.1 MCA界面Image Cursor Mode按钮

参数	描述
Select Box	显示选框内的所有数据点的Ramp曲线
Unselect Box	显示选框外的所有数据点的Ramp曲线
Measure Line	测量所画游标线的长度

Check All	显示图像内所有Ramp曲线
Uncheck All	隐藏图像内所有Ramp曲线

表7.2.2 MCA参数

分组	参数	描述
Display	Plot Units	选择图线的单位为 Volts (V)、Metric (nm 或 $\mu\text{m}$ ) 或 Force (nN)
	Direction	选择显示图线的接近段或回撤段
	Type	选择
	Invert	将图线沿Y = 0即X轴翻转
	Select Mode	设为On后, 在图像上选中的数据点会被红圈高亮, 同时Ramp曲线中接近段为蓝色, 回撤段为红色, 其它未被选中的曲线为灰色
Peak Detection	Minimum Size	设定选峰阈值, 高于这个值的峰被选中
	Percentage of Max	一个峰Y方向数值变化超过该数值, 则被判定为一个有效峰
	Minimum Width at % Max	一个峰的宽度超过该数值, 则被判定为一个有效峰
Auto Align Curves	X-axis auto-zero	选择是否将Ramp曲线横坐标平移至0点
	Y-axis auto-zero	选择是否将Ramp曲线纵坐标平移至0点
	Cascade Offset	当Y-axis auto-zero选为Cascade时, Y轴的平移量由该数值定义

表7.2.3 MCA文件栏

参数	描述
Add Files	将Ramp曲线添加至MCA文件清单
Remove Files	将选定Ramp曲线从MCA文件清单中移除
Find Peaks	根据Peak Detection设定的参数找出力曲线中的峰
Export	导出力曲线中的峰统计结果

## 7.3 创建MCA文件

Nanoscope软件中的Point and Shoot功能可以自动生成MCA文件，也可以将Nanodrive中的多条Ramp曲线.dat文件合并成一个MCA文件。按住Shift或者Ctrl同时选定多个.dat文件，点击鼠标右键，下拉菜单中选择Curve Analysis，

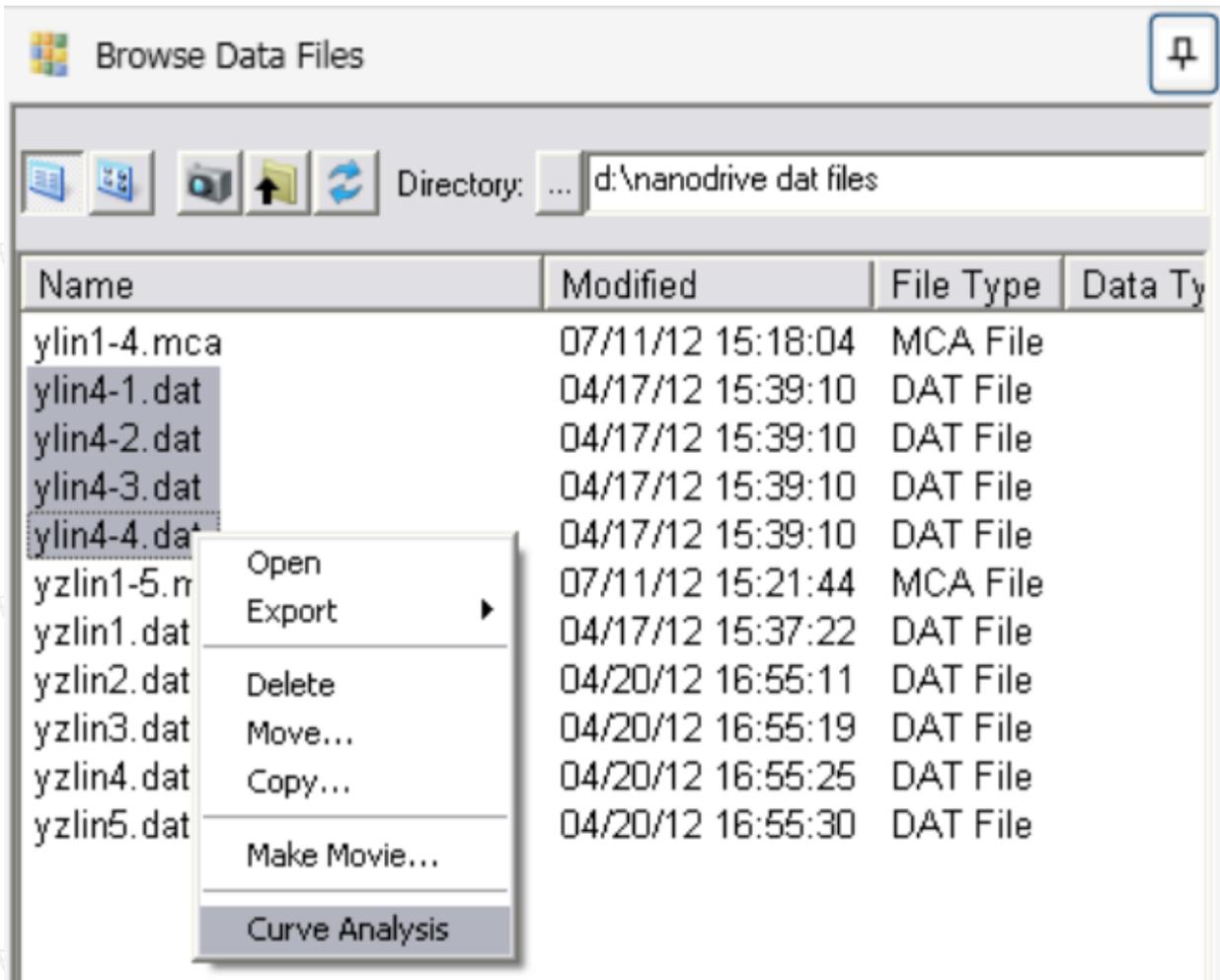


图7.3.1 选择Curve Analysis

在弹出窗口中，设置保存的.mca文件的文件名和保存路径。

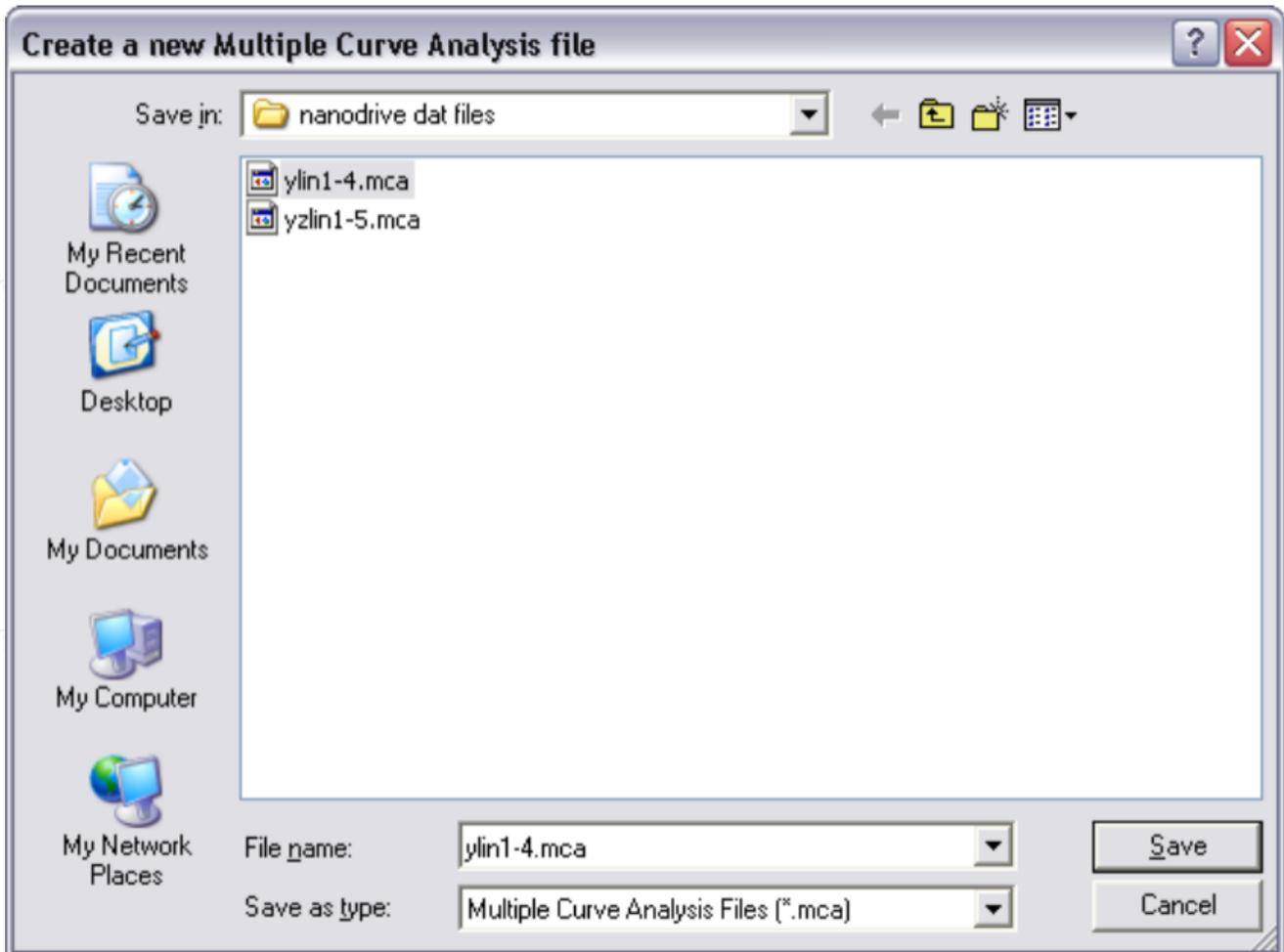


图7.3.2 创建MCA文件

## 8 更改力参数

更改力参数功能能够实现弯曲量灵敏度、力常数、针尖等效球半径、针等效圆锥半角和样品泊松比。当用户在获得力曲线前未能保存这些力参数，或者使用的是修饰后的探针，需要经常更改弯曲量灵敏度时，需要使用这个功能。点击工具菜单栏中的更改力参数图标，在界面中勾选欲更改的参数左侧的Change，在New Value中输入新的数值，然后点击Execute完成更改。这些参数会作用到后续的力学模拟中，但并不会保存至文件中，除非点击Save保存更改。

Change	Current Value	New Value
<input type="checkbox"/> Sensitivity	36.7 nm/V	0.00 nm/V
<input type="checkbox"/> Spring Constant	0.496 N/m	0.00 N/m
<input checked="" type="checkbox"/> Tip Radius	7.00 nm	7.00 nm
<input type="checkbox"/> Tip Half Angle	0.00 °	0.00 °
<input type="checkbox"/> Sample Poisson's Ratio	0.00	0.00

Execute

New values will be used in subsequent analysis views but will not be saved to the file unless specifically saved using 'Save' or 'Save As...'

图8.1 更改力参数窗口

## 9 压入分析

压入分析可以用来拟合力曲线得到样品的杨氏模量，其可使用的拟合模型包括Hertz模型、Sneddon模型、Cone Sphere模型和JKR模型。其分析步骤如下。

1. 在右侧浏览窗口中打开选定的文件，点击菜单栏中的Analysis > Indentation或者点击工具菜单栏中的压入分析图标。
2. 在Active Curve中选择分析力曲线的接近段（蓝色）或回撤段（红色）。
3. 在X Data Type中选择分离距离（Ramp）或时间（Time）。
4. 在Fit Method中选择拟合类型，包括
  - Contact Point Based/Max Adhesion Point Based，Hertz和Sneddon模型对力曲线进行过零点的非线性最小二乘法拟合，Cone Sphere模型对力曲线进行过零点的抛物线拟合，因此这些模型依赖于接触点；JKR Two Point和JKR Two Point - Stiffness模型对力曲线强行进行过最大粘附力点的拟合，因此不能进行Fit Method的选择；JKR Full模型对力曲线进行过最大粘附力点的拟合。
  - Linearized Model，Hertz模型可以实现如下线性拟合，

$$F^{2/3} = \left( \frac{4}{3} \frac{E}{1-\nu^2} \sqrt{R} \right)^{2/3} \delta$$

Sneddon模型可实现如下线性拟合，

$$F^{1/2} = \left( \frac{2}{\pi} \pi \frac{E}{1-\nu^2} \tan \alpha \right) \delta$$

JKR Full模型为线性拟合。JKR 2 Point和JKR 2 Point - Stiffness模型不能使用线性拟合。

这些线性拟合模型不要求拟合曲线通过零点，因此无需准确决定接触点的位置。杨氏模量由斜率决定。拟合过程需要力曲线上力的最小值，其由如下步骤决定：

- 从分离曲线零点开始，对力曲线5%的数据点进行线性拟合，计算其斜率。

- 然后从零点的下一点开始，对接下来5%的数据点进行拟合，得到斜率。
- 重复这个步骤，当斜率变正时，该点即为力的最小值点。
- 对力曲线进行线性拟合时，需要对每个数据点的力扣除该最小值。

同时，在分离曲线中，力最小值点以蓝色横虚像标记，可以上下拖动该游标线。注：在JKR Full模型中，力的最小值即为最大粘附力。

5. 当Fit Method选为Contact Point Based时，在Contact Point Algorithm中选择接触点计算算法，包括：

- Best Estimate，连接力曲线的第一个点和最后一个点，然后从力曲线中扣除这条线，从而实现力曲线的旋转，则旋转后的力曲线最低点即为接触点。这个方法强调了接触点是力曲线上的最低点，同时也尽量消除了非接触部分力曲线的噪音。
- Treat as Fit Variable，这个办法以Best Estimate为起始点，然后沿分离曲线增大的方向去寻找（直到增加了整个力曲线Z的5%）力学拟合最好（ $R^2$ 最接近1）的点，作为接触点。

力曲线上蓝色虚竖线指示接触点。

6. 当Fit Method选为JKR时，在Max Adhesion Algorithm中选择最大粘附力点计算算法，包括：

- Best Estimate，与上述寻找接触点的算法一样。
- Absolute Minimum，力曲线上的最低点即为最大粘附力点。

力曲线上蓝色虚竖线指示最大粘附力点。

7. 决定是否考虑粘附力。对于Cone Sphere和JKR模型，默认为Yes。考虑粘附力时，用来拟合的力扣除了粘附力。

8. 输入Minimum Force Fit Boundary或者移动最上方的红色横虚线游标调节拟合上限点。

9. 输入Maximum Force Fit Boundary或者移动下方红色横虚像游标调节拟合下限点。

10. 在Modulus Fit Model中选择拟合模型，对于JKR，选择相应的模型。

设定参数后，结果窗口中给出在Maximum和Minimum Fit Boundary之间力曲线的拟合相关系数 $R^2$ 。同时给出从最大力至最小力（如果不包括粘附力，则最小力为0）之间的拟合曲线。具体每种拟合模型下的参数选择示例如下：

Inputs	
Active Curve	Extend
X Data Type	Ramp
Fit Method	Contact Point Based
Contact Point Algorithm	Best Estimate
Include Adhesion Force	Yes
Max Force Fit Boundary	70 %
Min Force Fit Boundary	20 %
Fit Model	Sneddon (Conical)

Results	
R <sup>2</sup>	0.8847
Young's Modulus	0.598 MPa
Reduced Modulus	0.797 MPa
Mean Indentation Tip Velocity	1602 nm/s
Mean Indentation Loading Rate	23.2 nN/s
Minimum Force	0.01075 nN
Contact Point	36.2 nm

图9.1 基于接触点的Hertz和Sneddon模型拟合

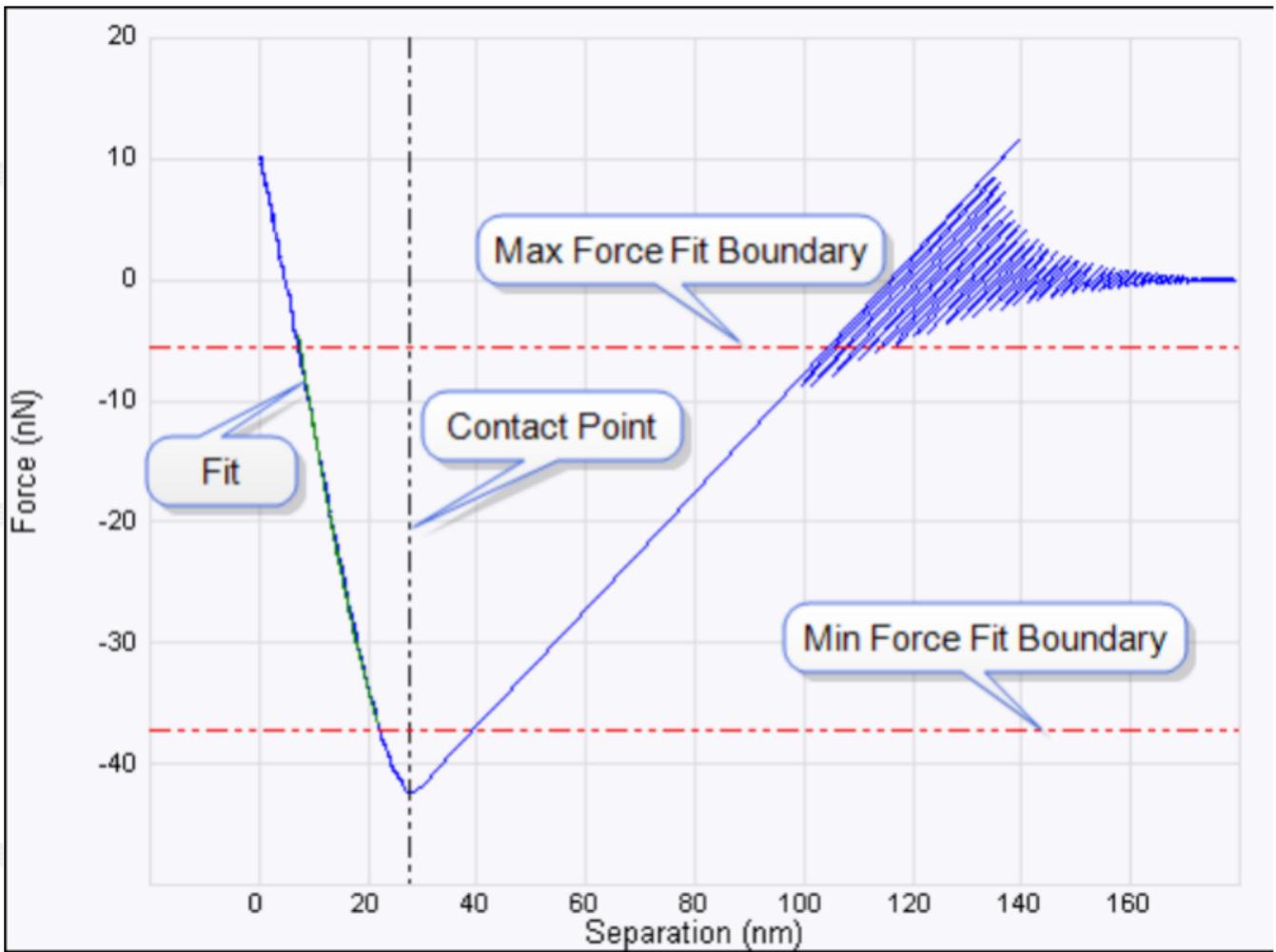


图9.2 基于接触点的Hertz模型拟合结果

布鲁克中国客户服务中心版权所有

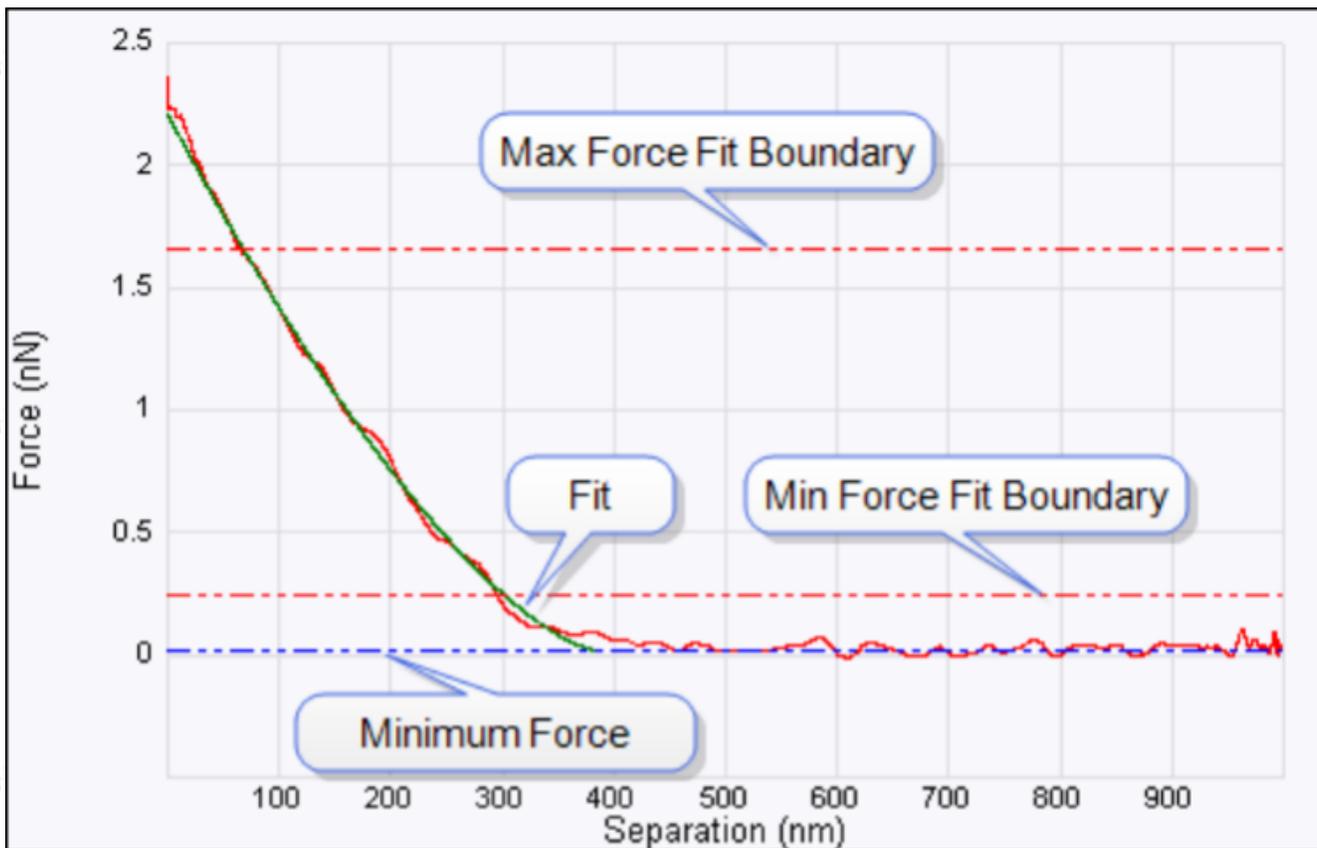
布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有



Inputs	
Active Curve	Retract
Fit Method	Linearized Model
Include Adhesion Force	Yes
Max Force Fit Boundary	70 %
Min Force Fit Boundary	10 %
Fit Model	Hertzian (Spherical)

Results	
R <sup>2</sup>	0.9963
Young's Modulus	0.0361 MPa
Reduced Modulus	0.0481 MPa

图9.3 基于线性拟合方程的Hertz或Sneddon拟合窗口

Inputs	
Active Curve	Extend
X Data Type	Ramp
Fit Method	Contact Point Based
Contact Point Algorithm	Best Estimate
Max Force Fit Boundary	70 %
Min Force Fit Boundary	20 %
Fit Model	Cone Sphere

Results	
R <sup>2</sup>	0.000
Young's Modulus	0.113 MPa
Reduced Modulus	0.151 MPa
Mean Indentation Tip Velocity	1602 nm/s
Mean Indentation Loading Rate	23.2 nN/s
Minimum Force	0.01075 nN
Contact Point	36.2 nm

图9.4 Cone Sphere模型参数

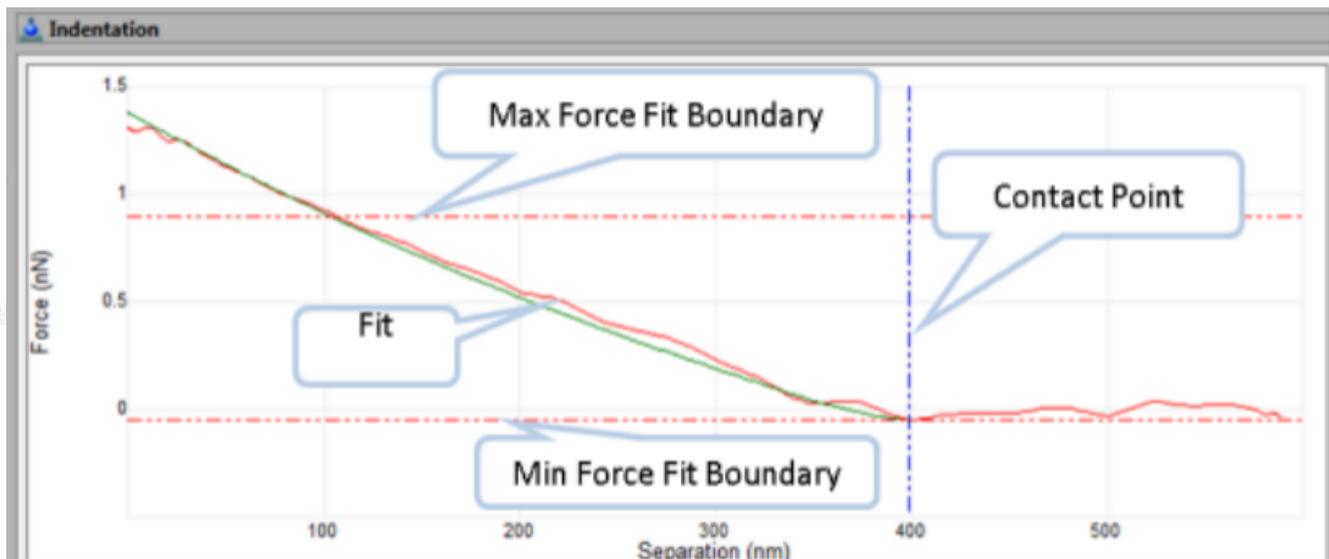


图9.5 Cone Sphere拟合结果

Inputs	
Active Curve	Retract
X Data Type	Ramp
Fit Method	Max Adhesion Point Based
Max Adhesion Point Algorithm	Best Estimate
Max Force Fit Boundary	90 %
Min Force Fit Boundary	30 %
Fit Model	JKR
JKR Method	Full

Results	
R <sup>2</sup>	0.5676
Young's Modulus	20.1 MPa
Reduced Modulus	22.1 MPa
Mean Indentation Tip Velocity	-233 nm/s
Mean Indentation Loading Rate	-179 nN/s
Minimum Force	5.472 nN
JKR Max Adhesion Point	25.4 nm

图9.6 基于最大粘附力的JKR Full模型

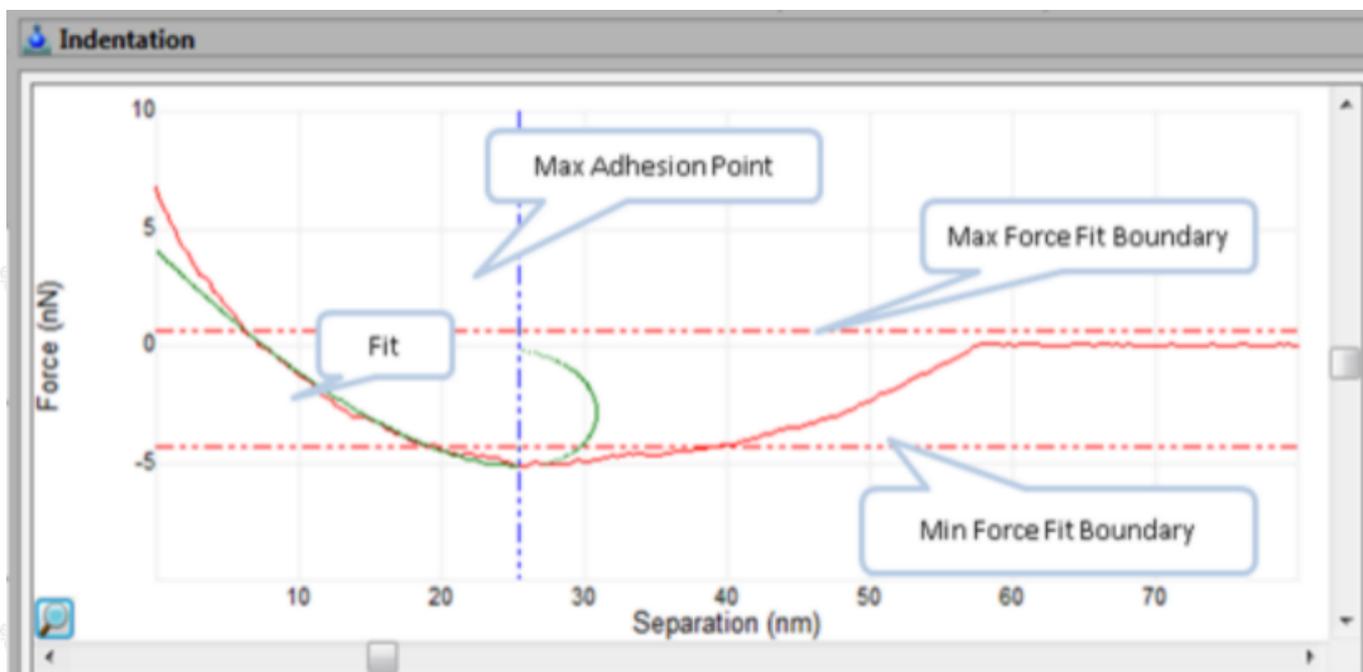


图9.7 基于最大粘附力的JKR Full拟合结果

Inputs	
Active Curve	Retract
X Data Type	Ramp
Fit Method	Linearized Model
Max Force Fit Boundary	90 %
Min Force Fit Boundary	30 %
Fit Model	JKR
JKR Method	Full

Results	
R <sup>2</sup>	0.9904
Young's Modulus	23.8 MPa
Reduced Modulus	26.2 MPa
Mean Indentation Tip Velocity	-233 nm/s
Mean Indentation Loading Rate	-179 nN/s
Minimum Force	5.472 nN

图9.8 基于线性拟合的JKR Full模型

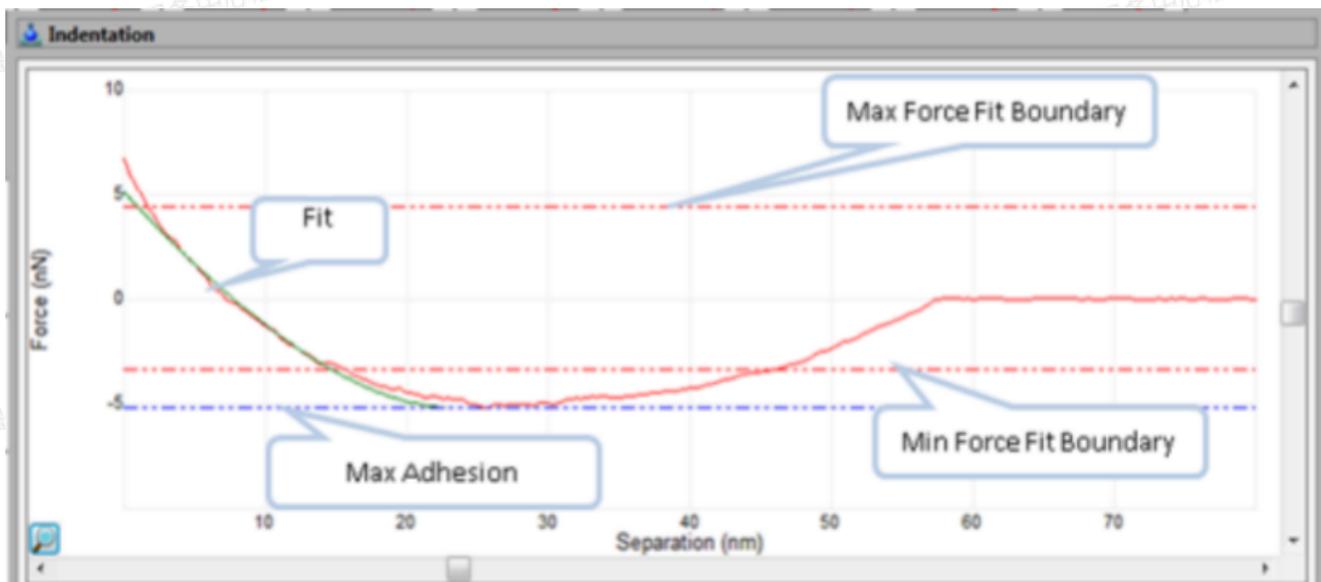


图9.9 基于线性拟合的JKR Full模型拟合结果

Inputs	
Active Curve	Retract
X Data Type	Ramp
Max Adhesion Point Algorithm	Best Estimate
Fit Model	JKR
JKR Method	2 Point

Results	
R <sup>2</sup>	0.9577
Young's Modulus	14.8 MPa
Reduced Modulus	16.3 MPa
Mean Indentation Tip Velocity	-231 nm/s
Mean Indentation Loading Rate	-210 nN/s
Minimum Force	5.146 nN
JKR Zero Force Point	7.20 nm
JKR Max Adhesion Point	25.4 nm

图9.10 JKR 2 Point模型

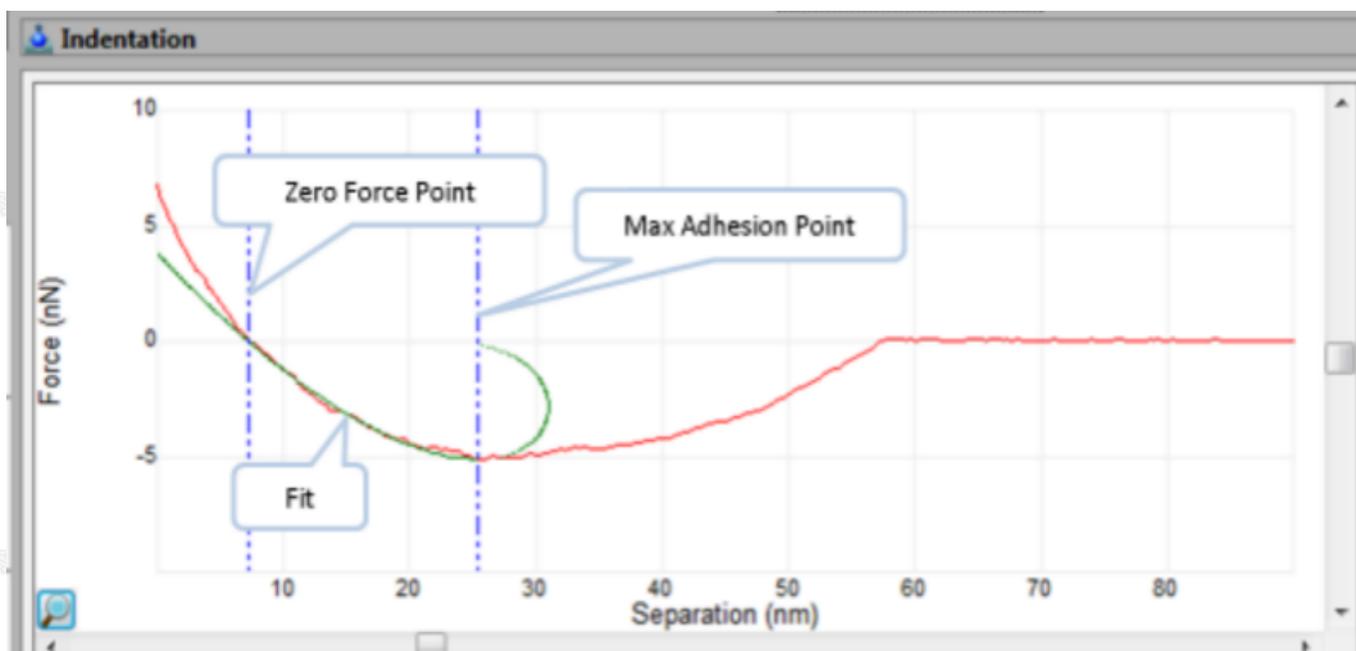


图9.11 基于JKR 2 Point模型的拟合结果

## 10



## 基线校正

基线校准功能测量力曲线基线的倾斜和对水平线的偏移后对基线进行校正。有所检测器设置会引起力曲线基线的倾斜，对于大多数测量来说，这些小的倾斜并不重要，但对于微小力的测量来说，进行基线校正也是必须的。其步骤如下：

1. 选择想校正的力曲线段，蓝色为接近段，红色为回撤段。
2. 选择力曲线单位为Volts (V)、Metric (nm或 $\mu\text{m}$ ) 或Force (nN)。
3. 选择力曲线中横坐标为高度或分离距离。
4. 选择进行基线拟合的方程次数， $0^{\text{th}}$ 为零阶，仅校正偏移； $1^{\text{st}}$ 为一阶，校正倾斜和偏移。
5. 在Extend Baseline Source中选择接近段的基线为接近段或回撤段。
6. 在Retract Baseline Source中选择回撤段的基线为接近段或回撤段。
7. 在力曲线中移动两条游标竖线选中要进行基线拟合的部分。
8. 点击Execute进行基线校正。

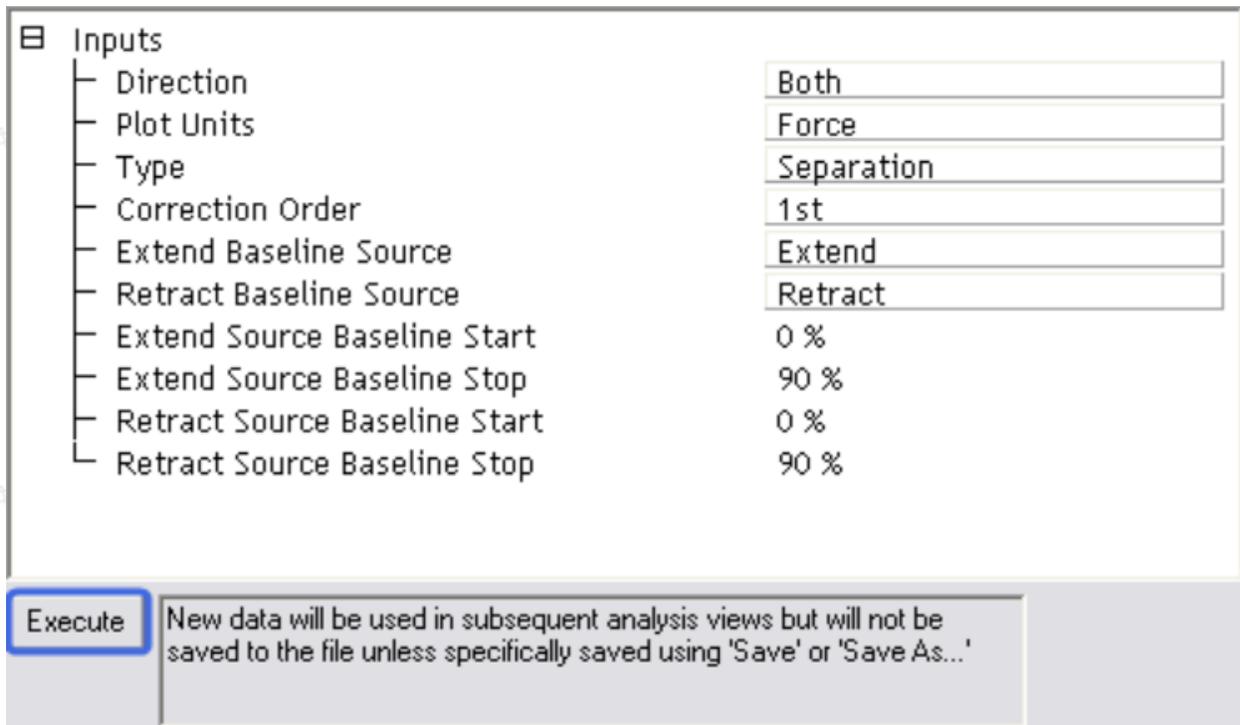
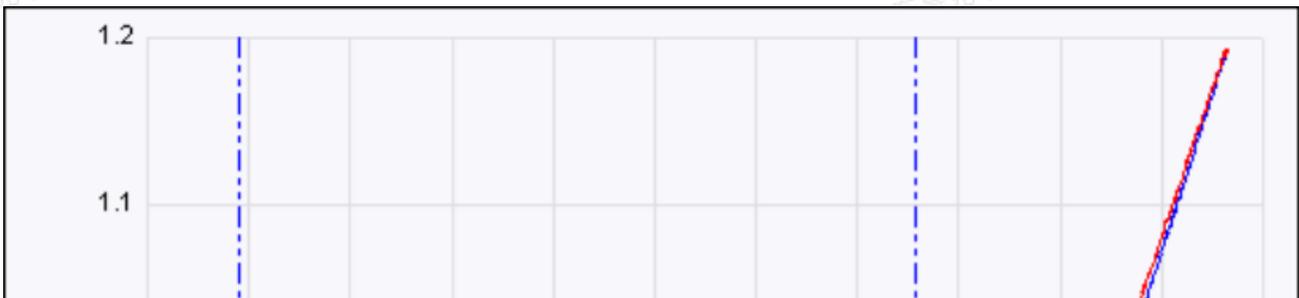


图10.1 基线校正

校正后的基线会作用到后续的力学模拟中，但并不会保存至文件中，除非点击Save保存更改。



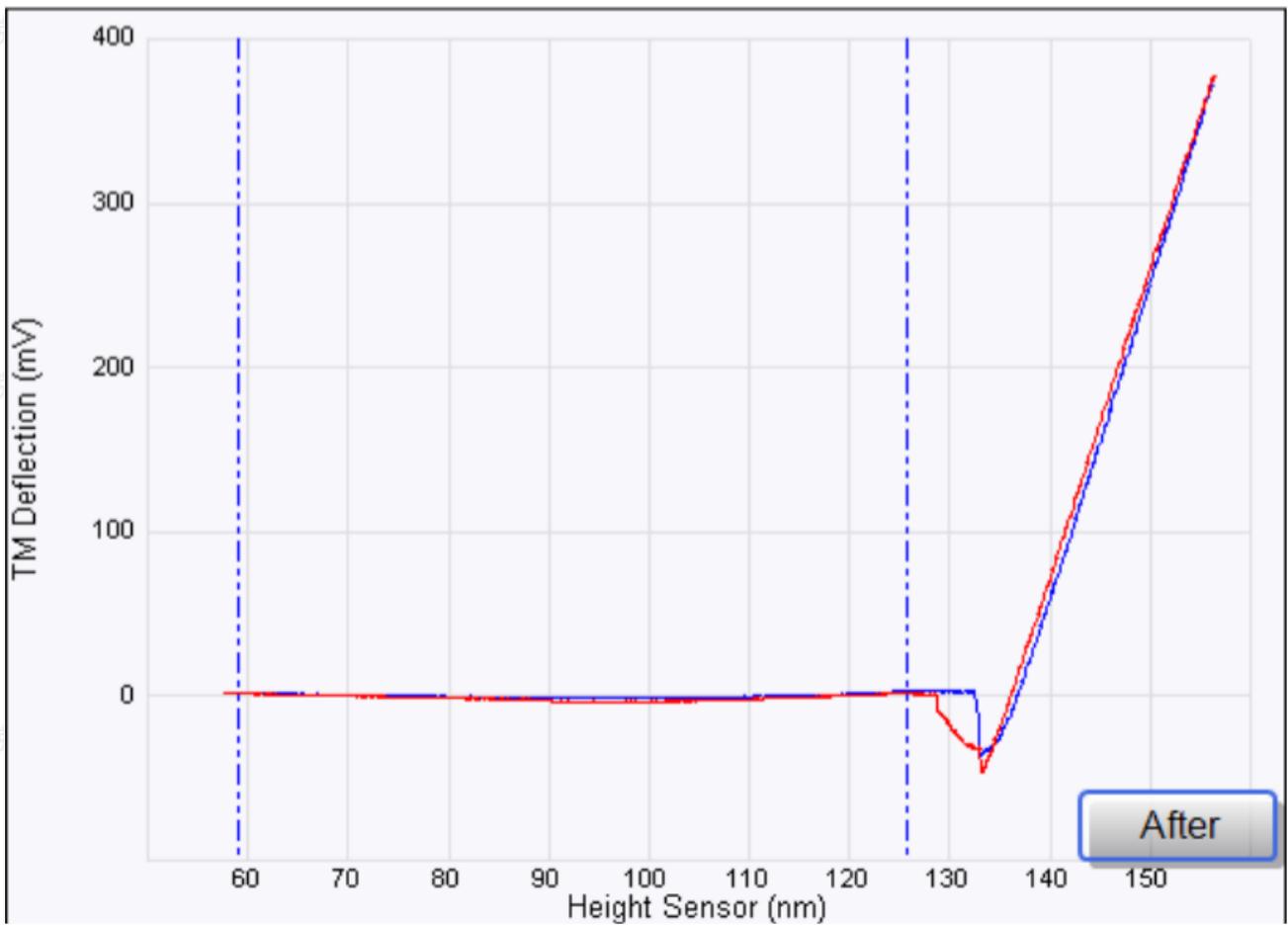
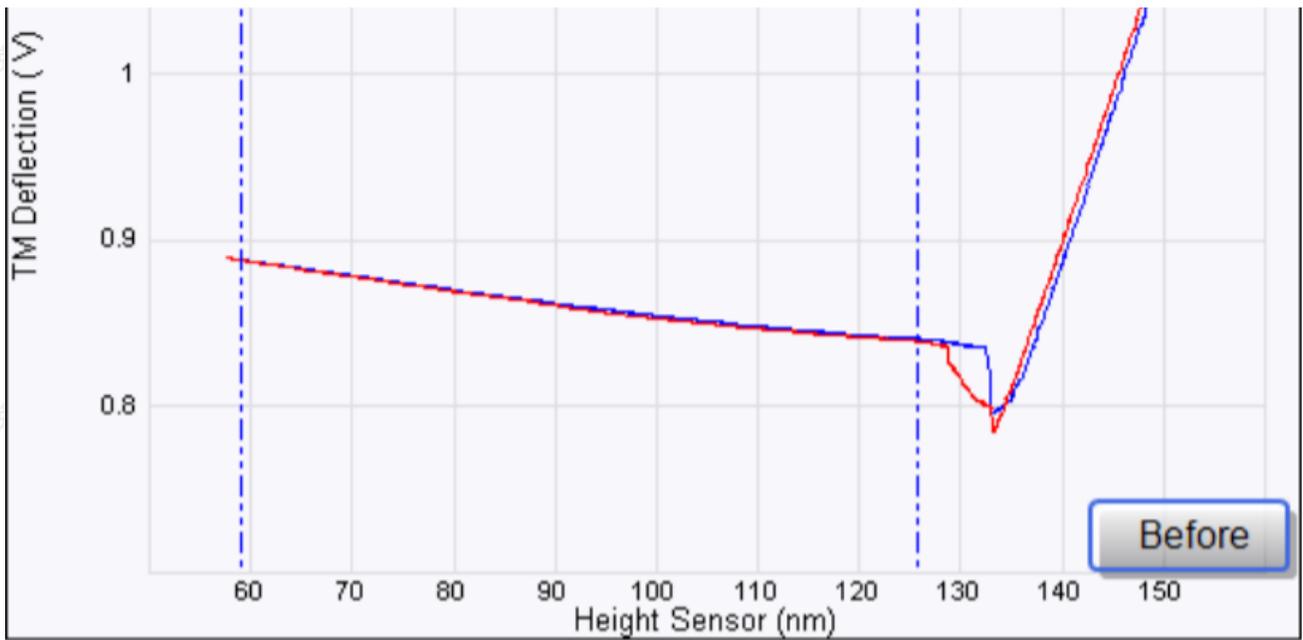
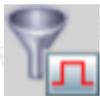


图10.2 基线校正效果

11



矩形波过滤器

矩形波过滤器对Ramp曲线进行滤波处理，常用来减小曲线上的噪音。其步骤如下：

1. 选择想校正的力曲线段，蓝色为接近段，红色为回撤段。
2. 选则进行平均处理的点数目，点数越大，处理后的曲线越平滑。

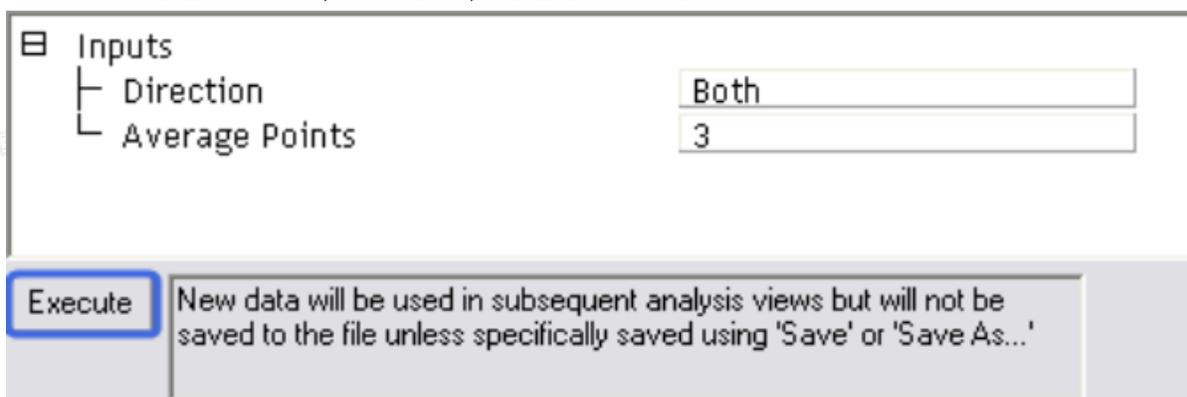
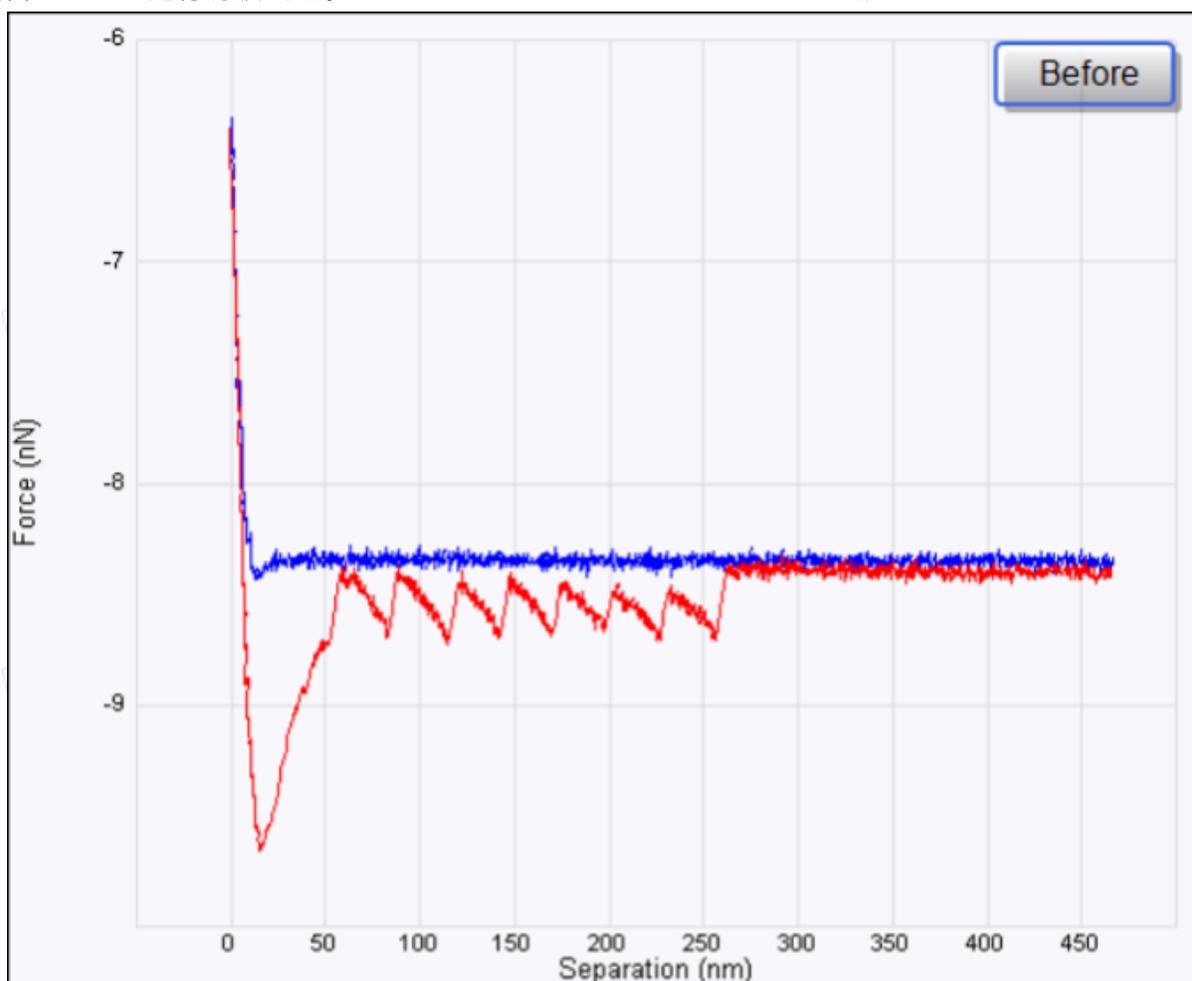


图11.1 矩形波过滤器参数

3. 点击Execute进行滤波处理。



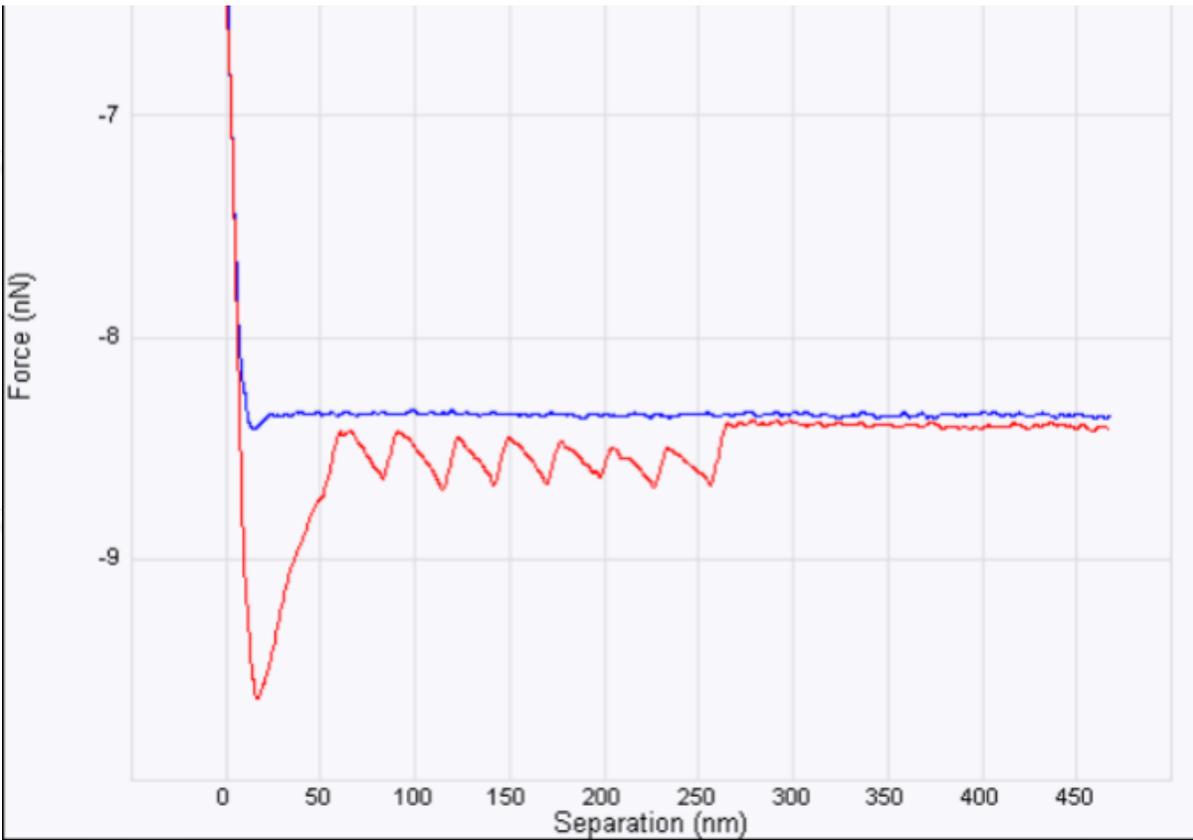


图11.2 进行10点平均的矩形波过滤器处理效果

## 12 Hold分析

Hold分析是Nanoscope Analysis的一个新功能，能够分析Ramp曲线中的Hold段。Hold是指Ramp过程中在到达触发值后，维持某个物理量一段时间不变记录各通道物理量的变化。其分析步骤如下：

1. 在浏览窗口中打开含Hold段的Ramp文件；或者打开Ramp脚本分析文件，选中其中的Hold段。
2. 在菜单栏中点击Analysis > Hold Analysis或在工具菜单栏中选择Hold分析图标，进入Hold分析界面。若Ramp文件中不包含Hold段，软件在此步会报错。

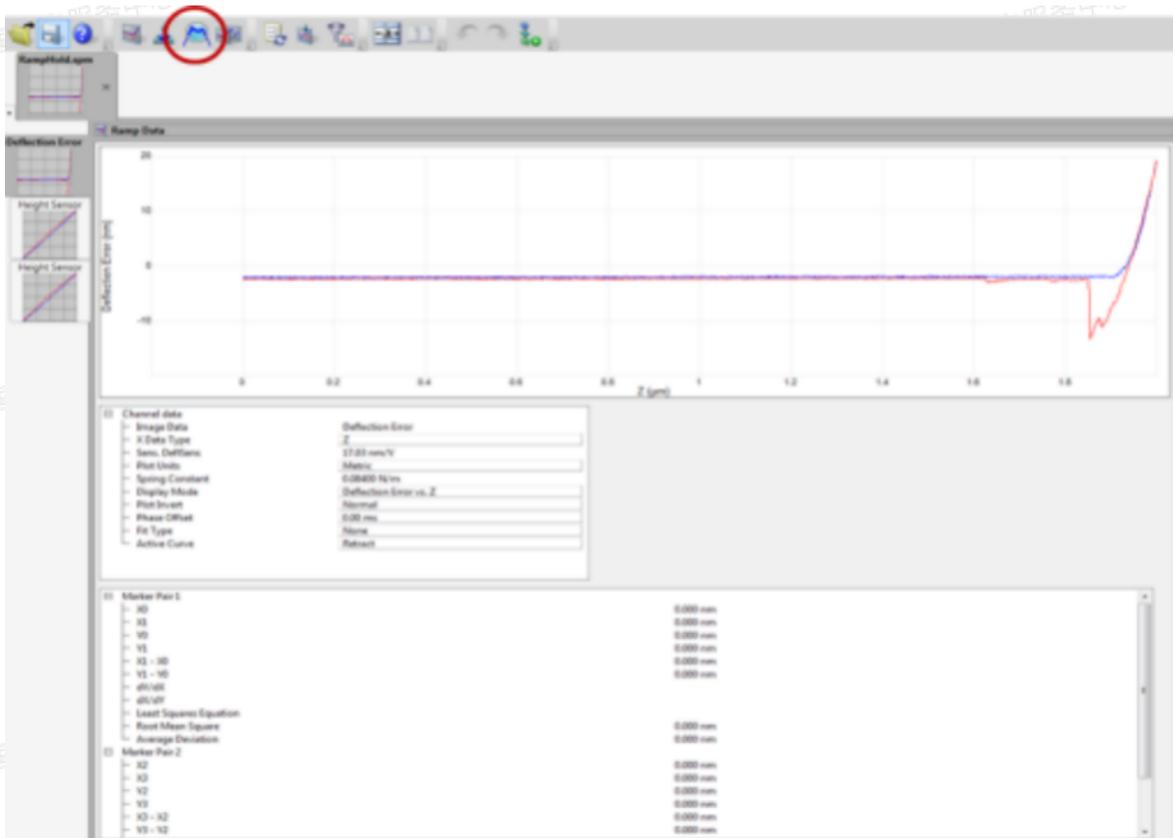


图12.1 含Hold段Ramp文件

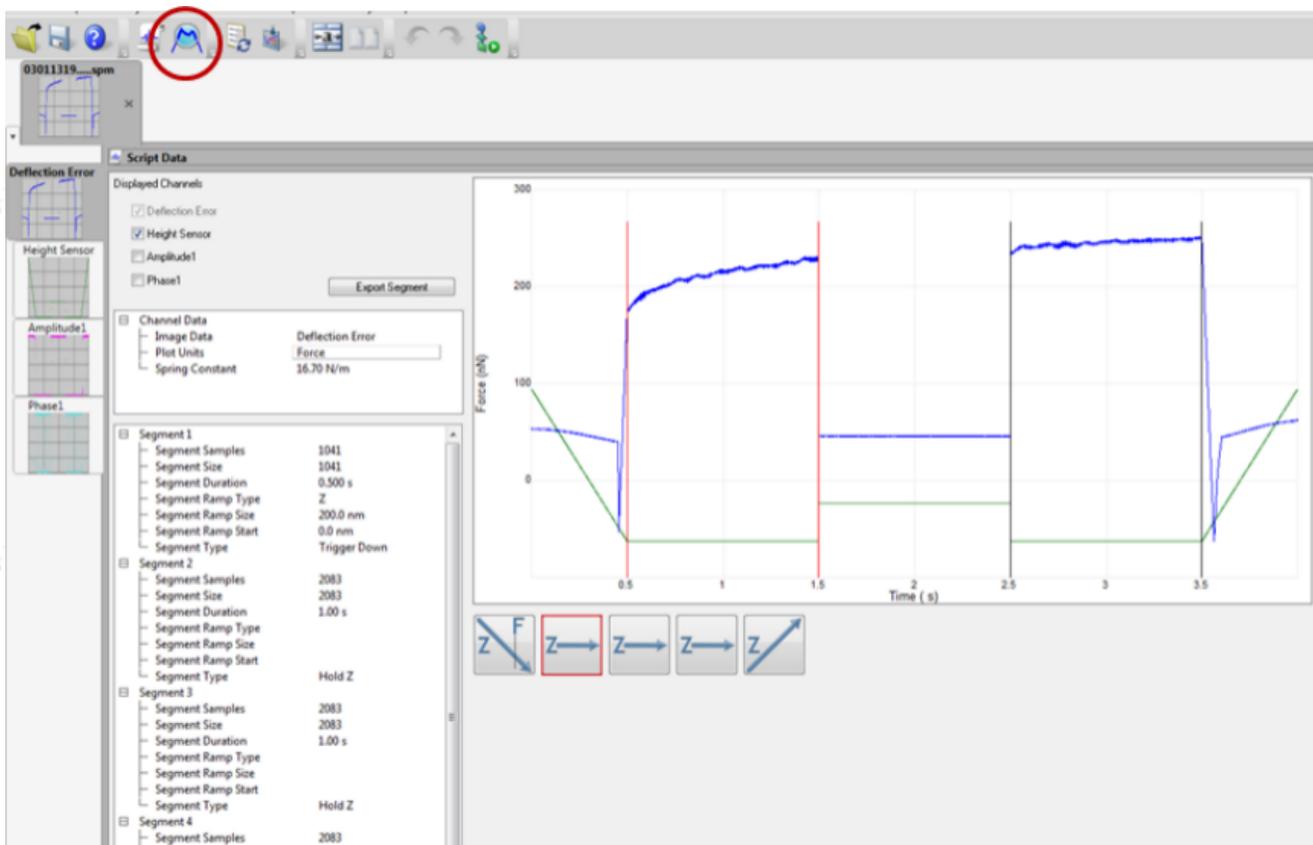


图12.2 含Hold段的Ramp脚本文件

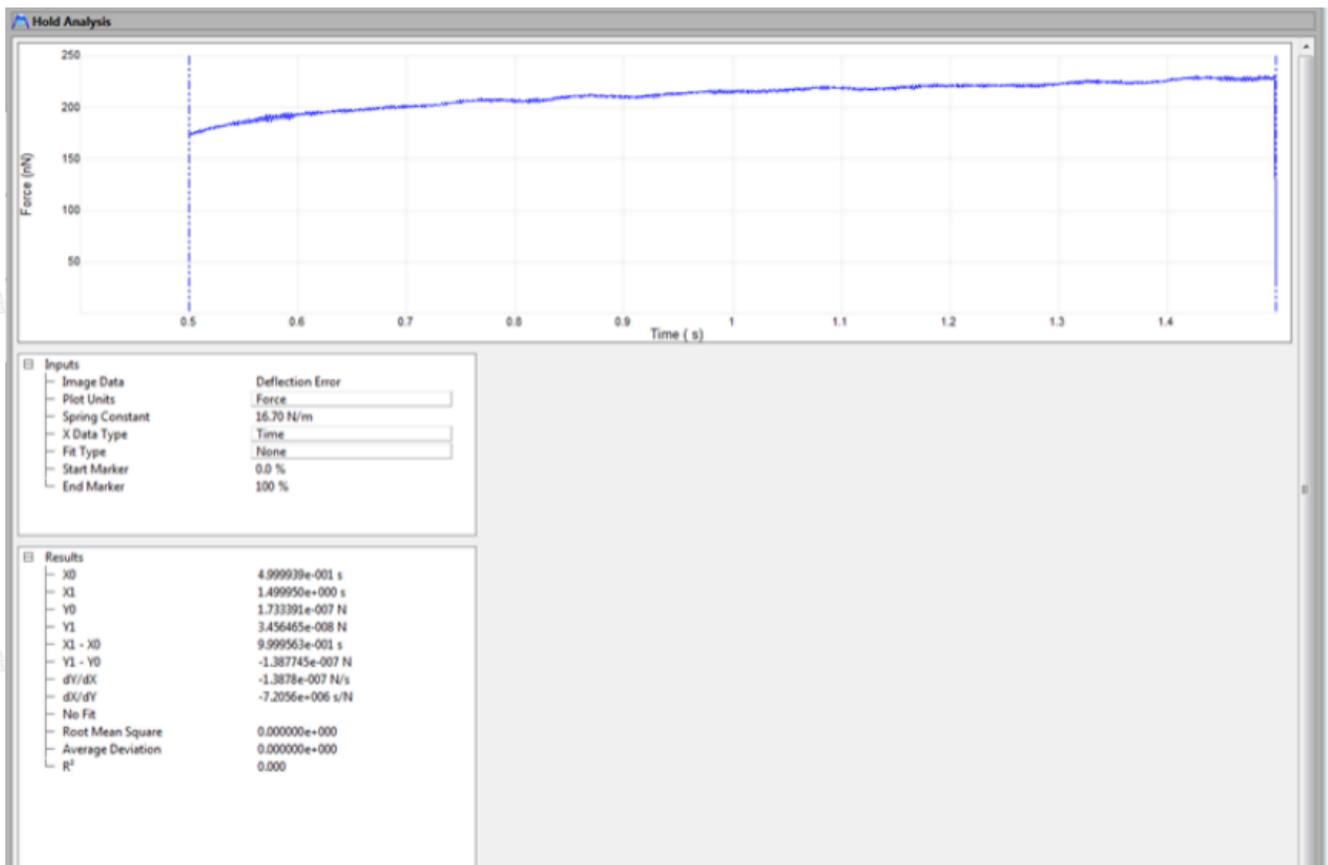


图12.3 Hold分析界面

## 13 脚本数据

脚本数据分析是Nanoscope Analysis的一项新功能，对Ramp脚本文件进行分析，目前Ramp脚本包含六种基本类型：带触发值的接近段，带触发值的回撤段，保存探针弯曲量不变的Hold段，保持扫描器位置的Hold段，移动一段距离的接近段和移动一段距离的回撤段。脚本分析步骤如下：

1. 在浏览界面中打开待分析的Ramp脚本文件。点击菜单栏中的Analysis > Script Data或者工具菜单栏中的脚本分析图标。
2. 脚本分析界面如下：

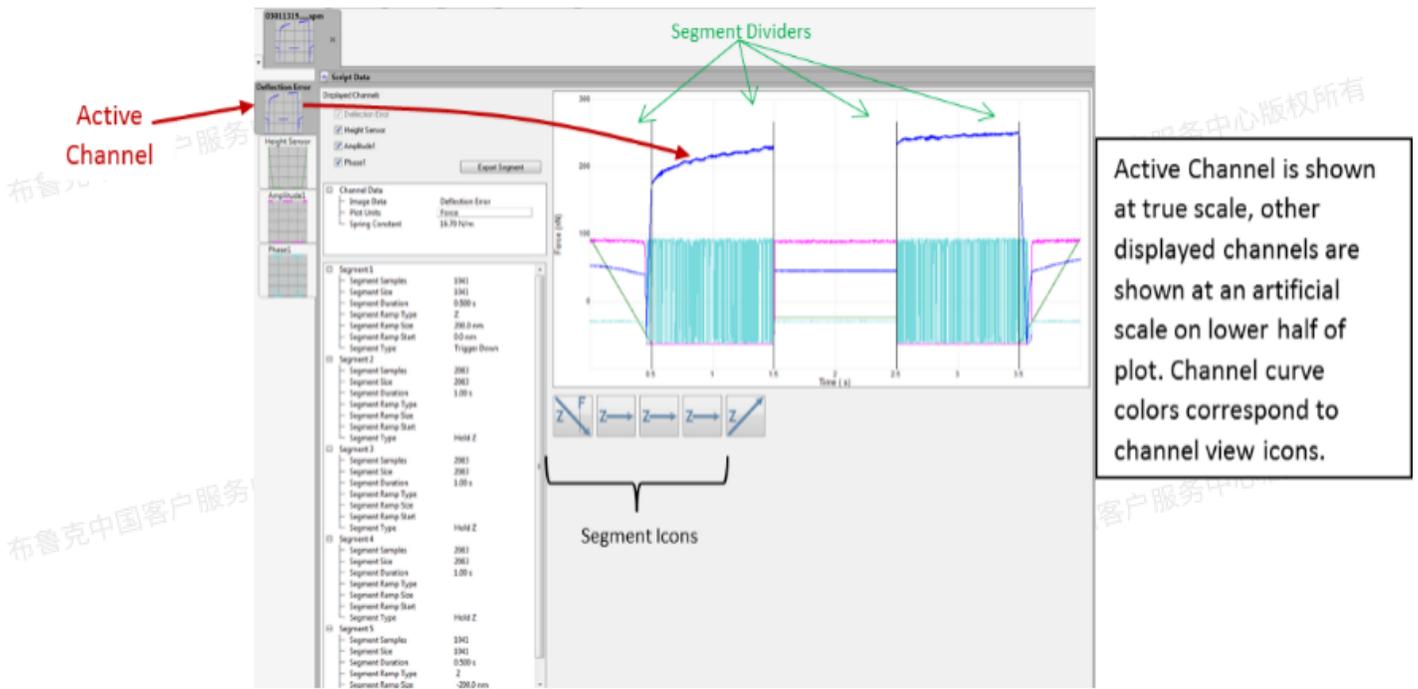


图13.1 脚本数据界面

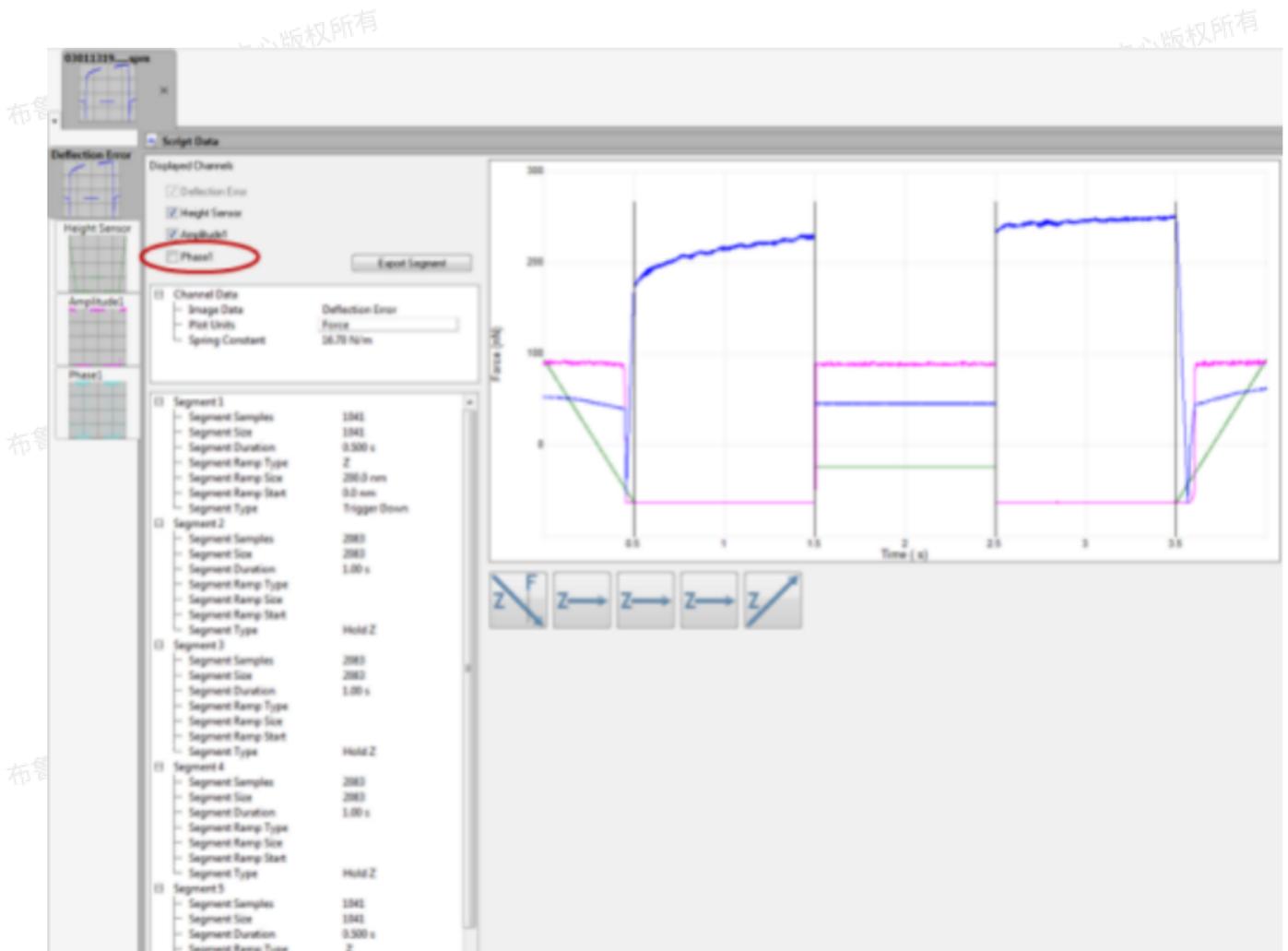


图13.2 取消选择某一段Ramp数据

3. 点击Ramp段图标对某一段进行分析。对于Hold段，选中后点击Hold分析图标进行分析。若需进行基线校正，应选中带触发值的接近段或带触发值的回撤段，点击基线校正图标进行。

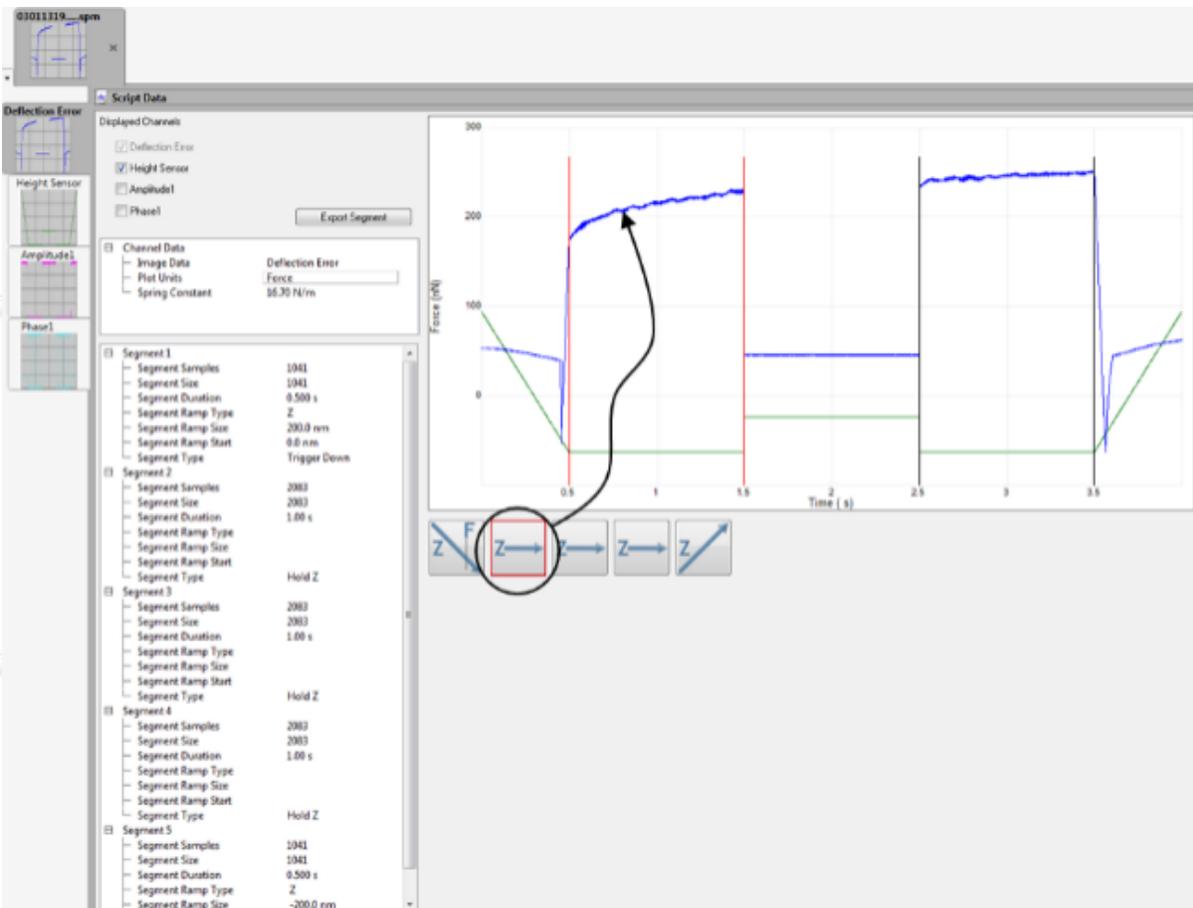


图13.3 选中某一Ramp段进行分析

# 时间相关分析

时间相关分析功能用来分析如下数据类型：高速数据采集力分析、高速数据采集和带状图及其相关通道。

## 1 HSDC Force Analysis (高速数据采集力分析)

实时的峰值力QNM模式会保存处理好的力学性质图像，例如模量和粘附力。有时实验者想去分析比较这些图像及其原始力曲线。针对此类分析，Nanoscope Analysis软件开发了峰值力QNM模式离线分析功能。该功能的主要目的是实现感兴趣的区域中力曲线的可视化及其分析。操作者可以进一步导出力曲线在使用力曲线功能或第三方软件进行分析。

在进行图像采集时，当扫描到感兴趣的区域，点击“Capture Line”图标。这会触发数字信号处理器（DSP）在其缓存中存下来一段高速数据采集原始文件，然后在高速数据采集界面中点击“Upload Data”将缓存中的数据保存到计算机硬盘中。

### 1.1 QNM力曲线分析步骤

1. 打开峰值力QNM高速数据采集文件
2. 点击高速数据采集力分析图标，打开如图1所示界面：

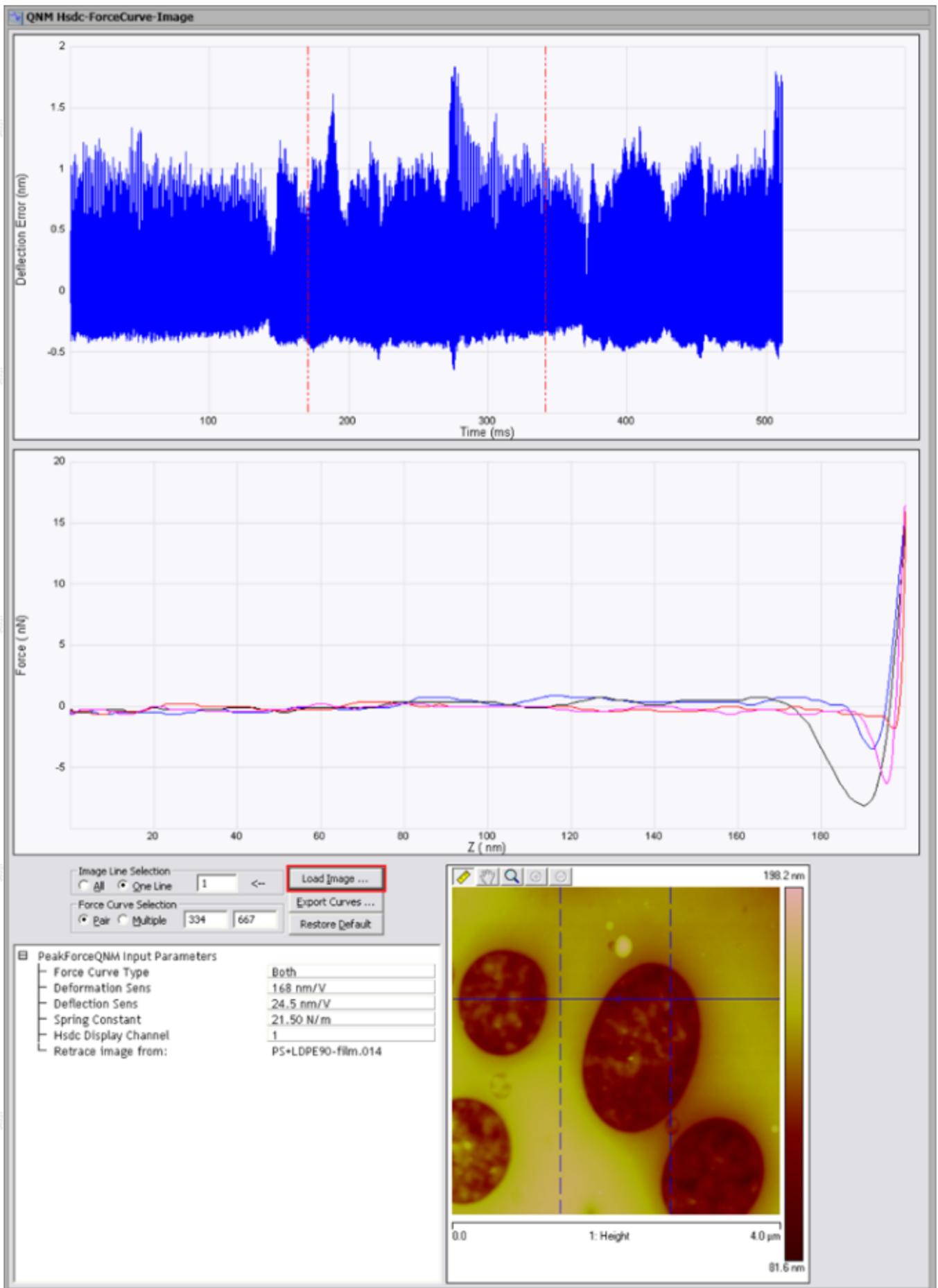


图1.1.1 高速数据采集力分析界面

3. 点击“Load Image”图标，选择与这段高速数据采集文件相关的图像文件。

4. 图2中所示蓝色水平实线表示采集的扫描线。

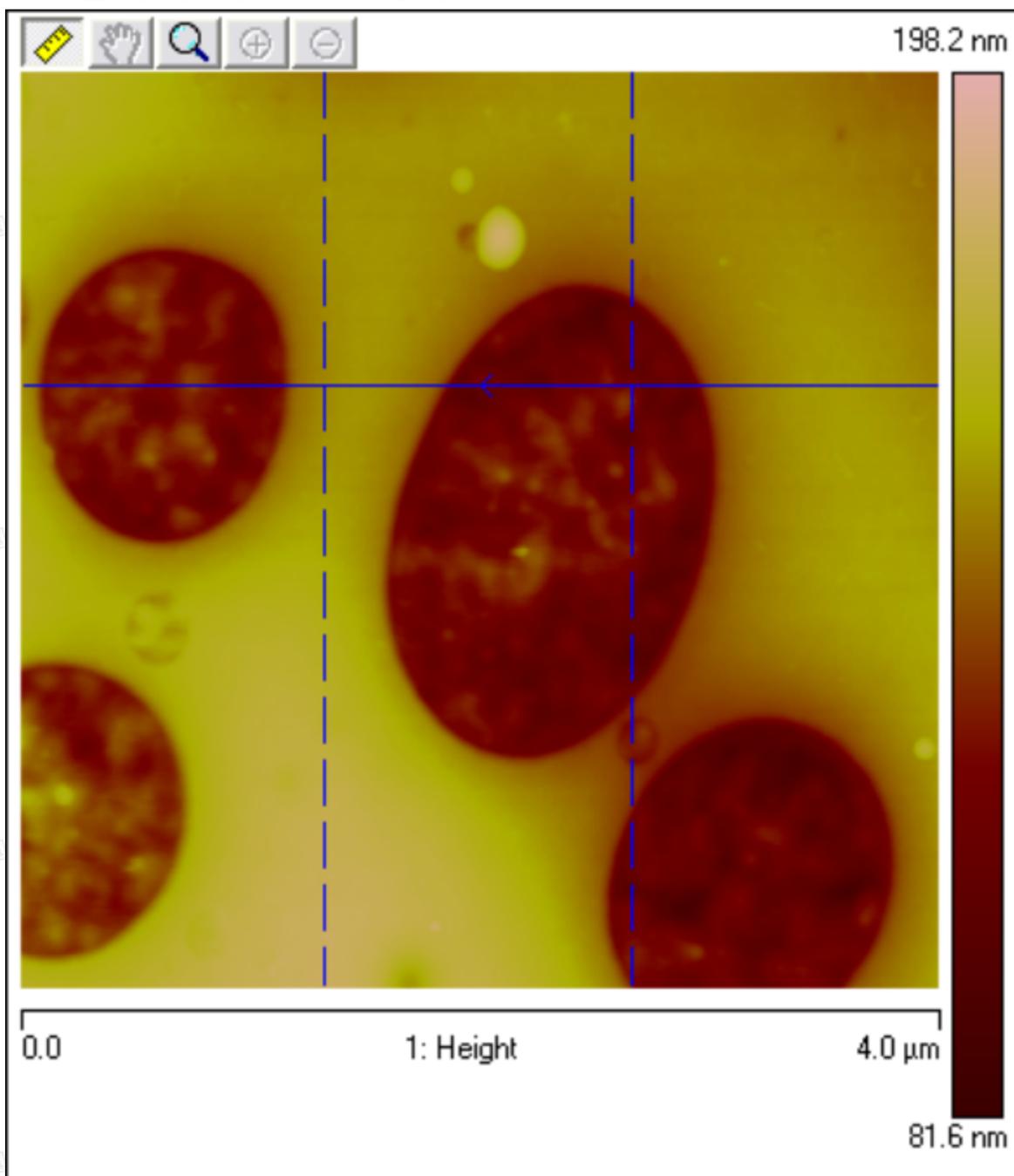


图1.1.2 与高速数据采集线所对应的图像

5. 图3中所示的两条蓝色竖直虚线指示在高速数据采集通道中选中的两条力曲线所在AFM图像中的位置。图像左侧的参数框中的数字指示这两条力曲线的序号。手动输入这两个数字或则拖动虚线即可更改所选择的力曲线。AFM图像所显示的通道可以在右键下拉菜单中更改。

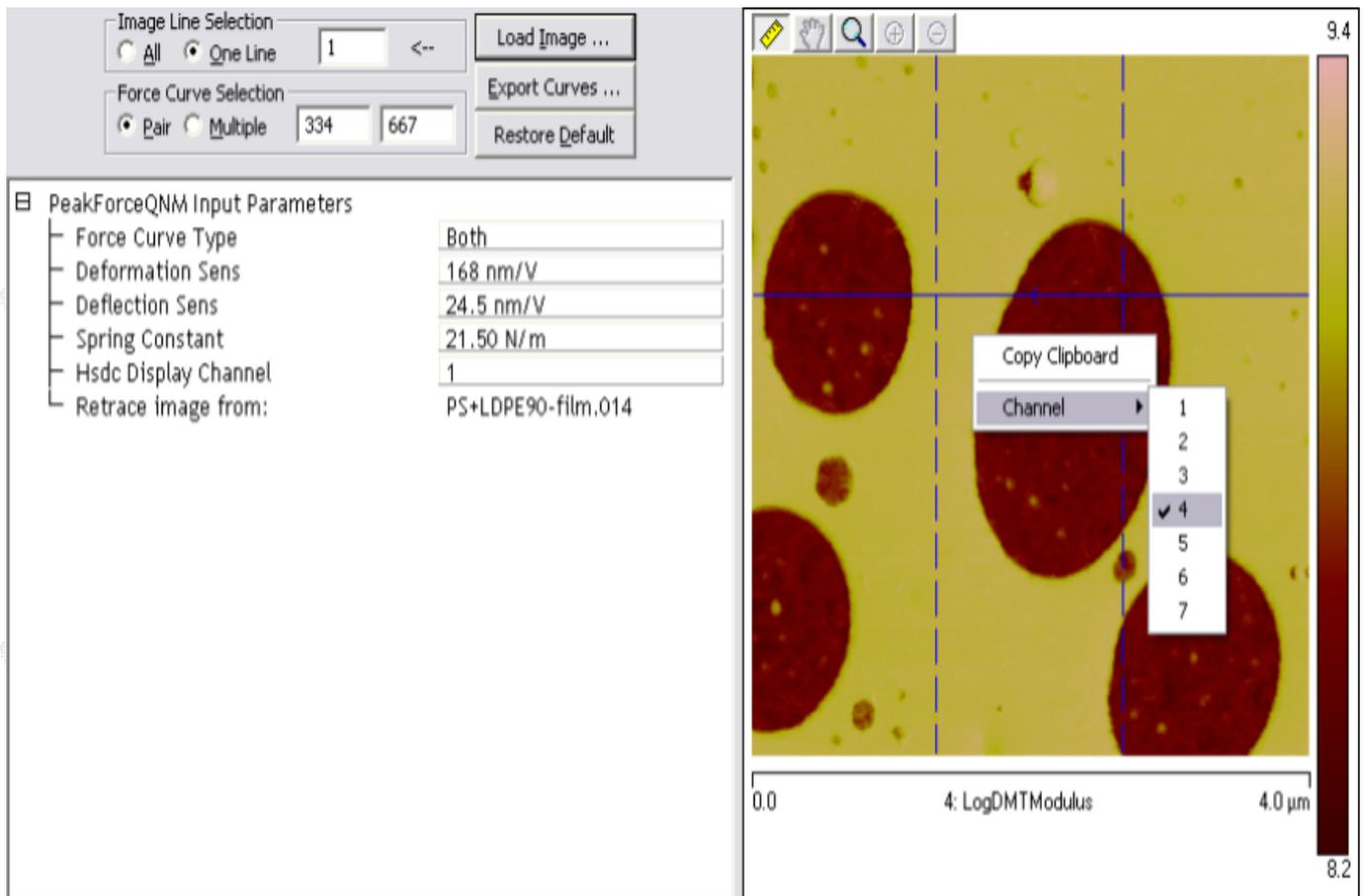
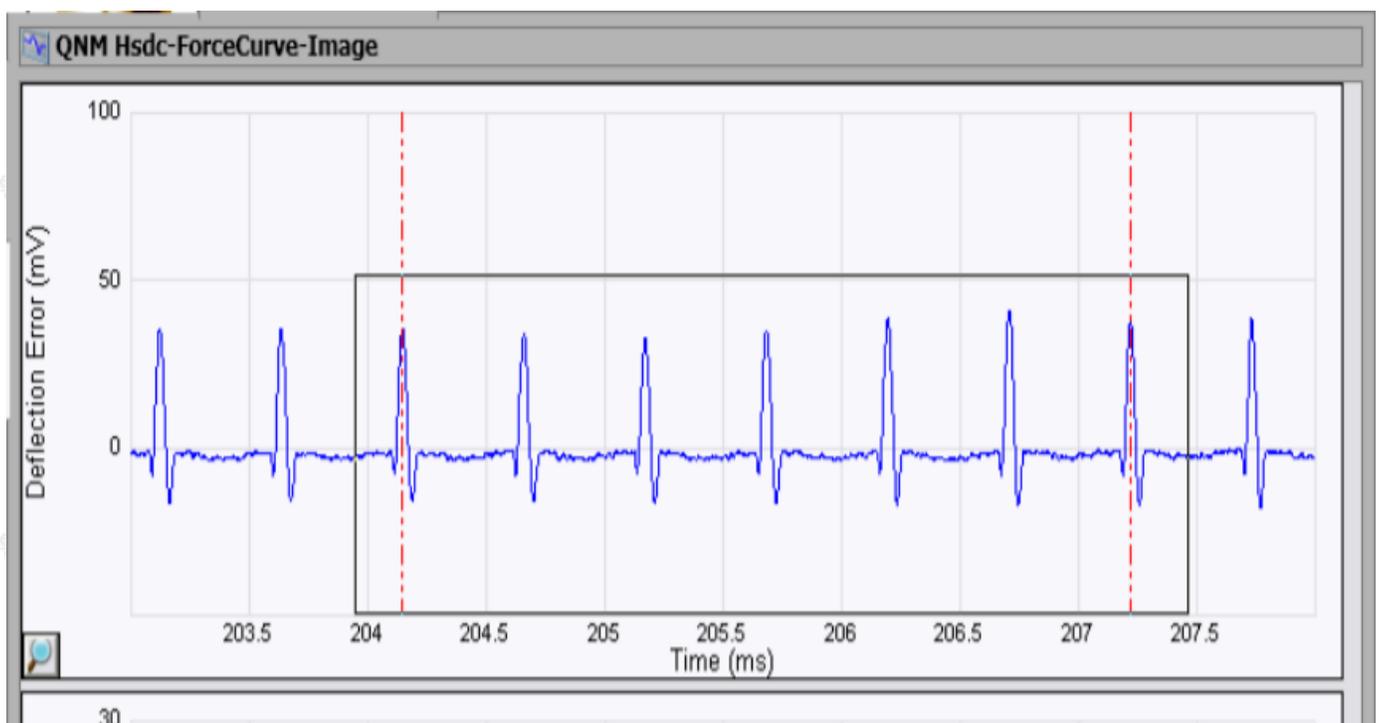


图1.1.3 力曲线所在图像中位置示意

6. 所选择的力曲线也在弯曲量对时间（Deflection Error vs. Time）图中以红色虚线显示，如图4中所示。按住Ctrl键在图中用鼠标拖拽即可放大相应区域，按住放大后图像左下角放大镜图标即可退回原图像。



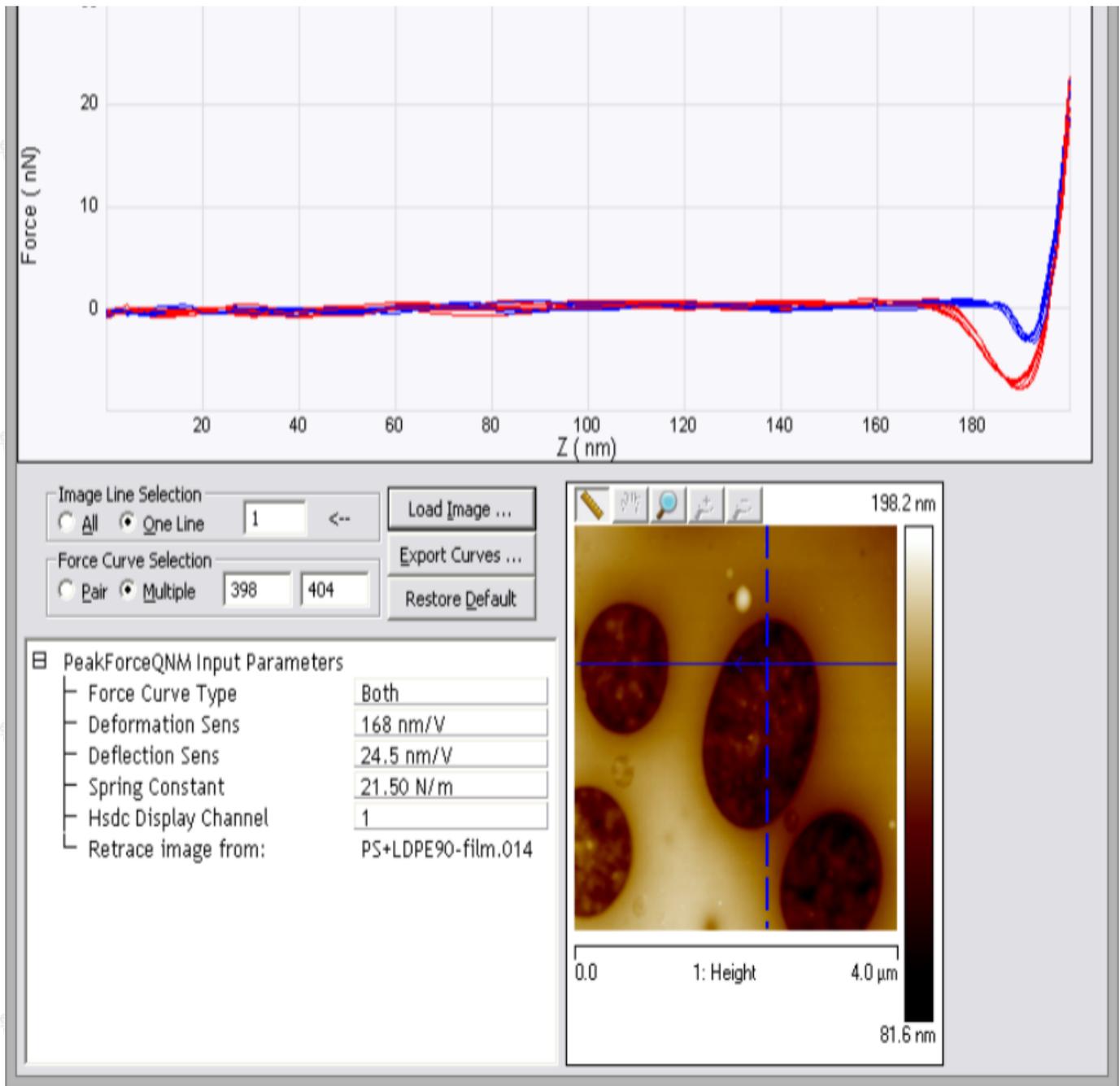


图1.1.4 高速数据采集力曲线分析窗口

## 1.2 图像线选择

设置：

- All：显示采集的所有扫描线。
- One Line：显示所采集的一条扫描线。

窗口中和图像上蓝色实线上的箭头表示所选择的扫描线的扫描方向。其序号显示在力曲线选择面板中。

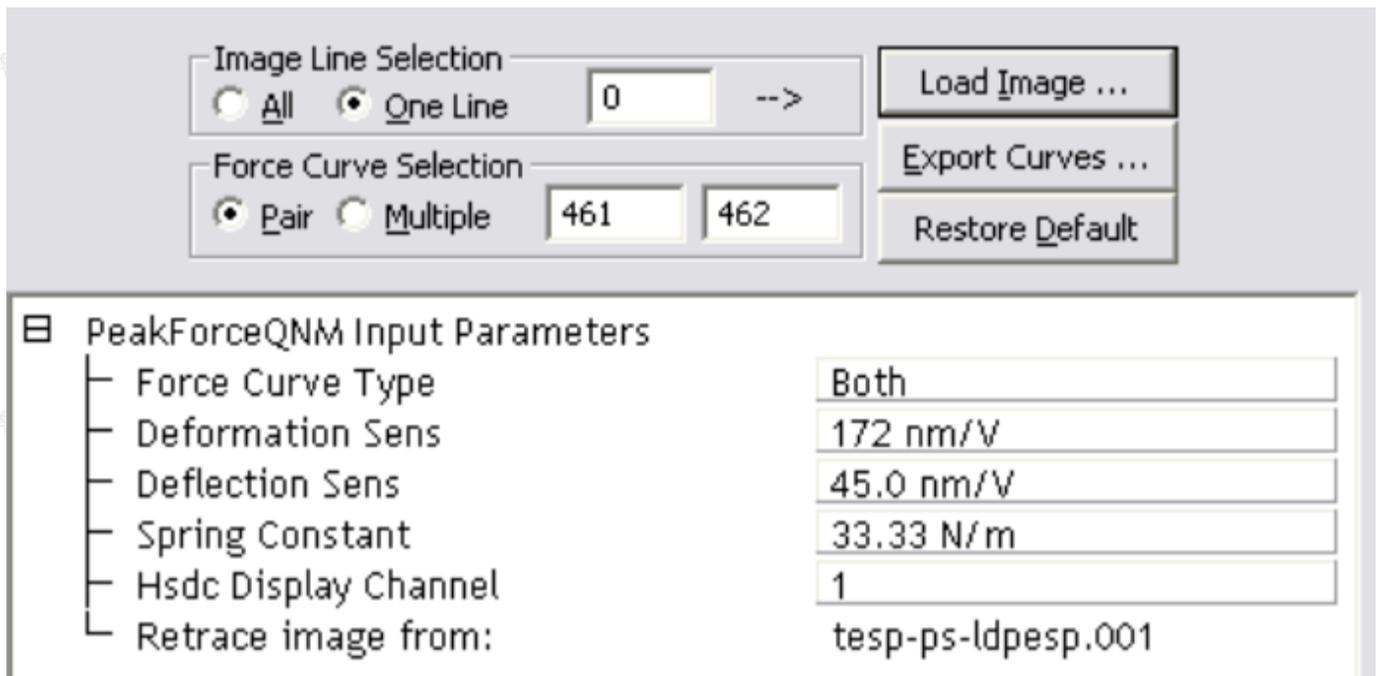
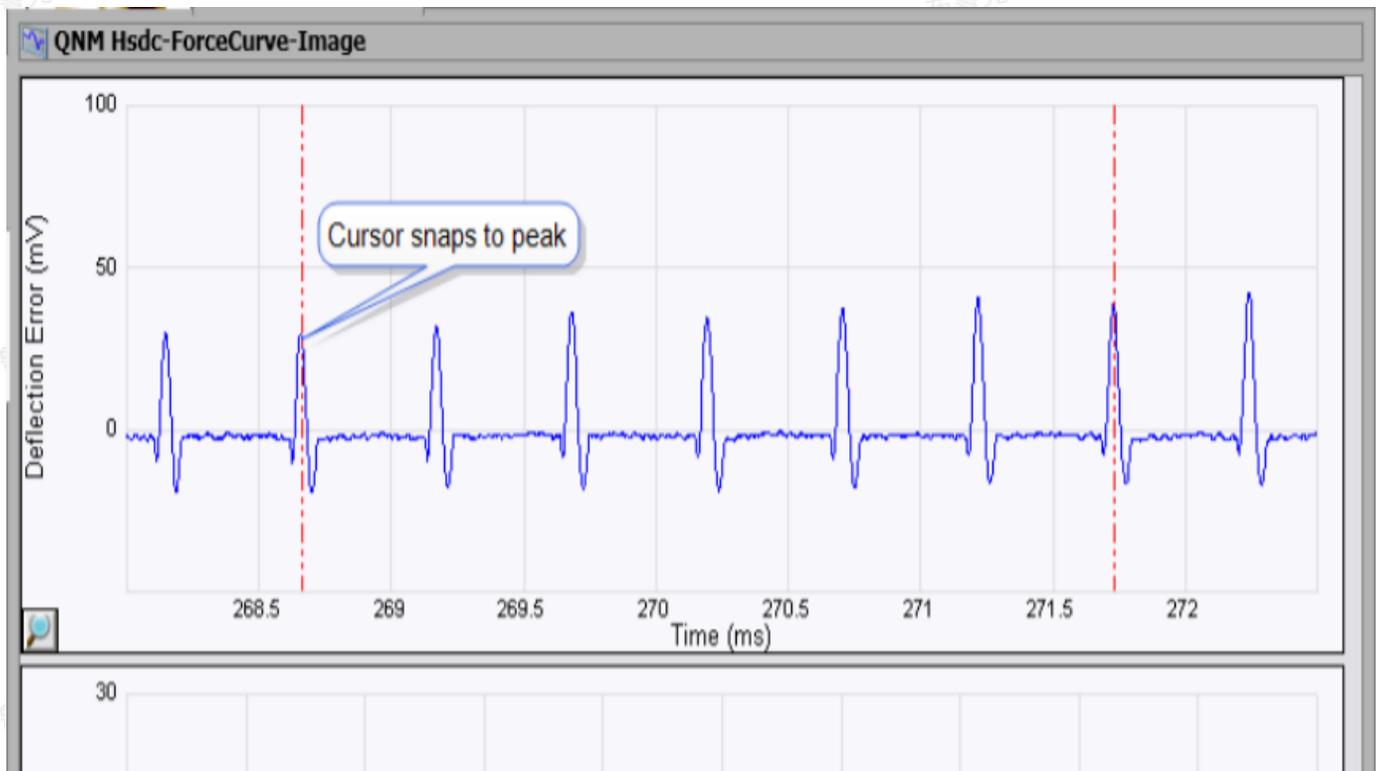


图1.2.1 峰值力QNM控制界面

### 1.3 力曲线选择

设置：

- 两条：显示一对游标处所对应的力曲线，如图6所示。红色虚线所在位置在弯曲量对时间曲线图中相应的峰值处。导出的力曲线对应于红色虚线对应峰值力所在的一个完整震动周期。第一条力曲线对应于第一个完整周期，它可能是弯曲量对时间曲线中的第二个峰值。
- 多条：显示一对游标所包含的所有力曲线。



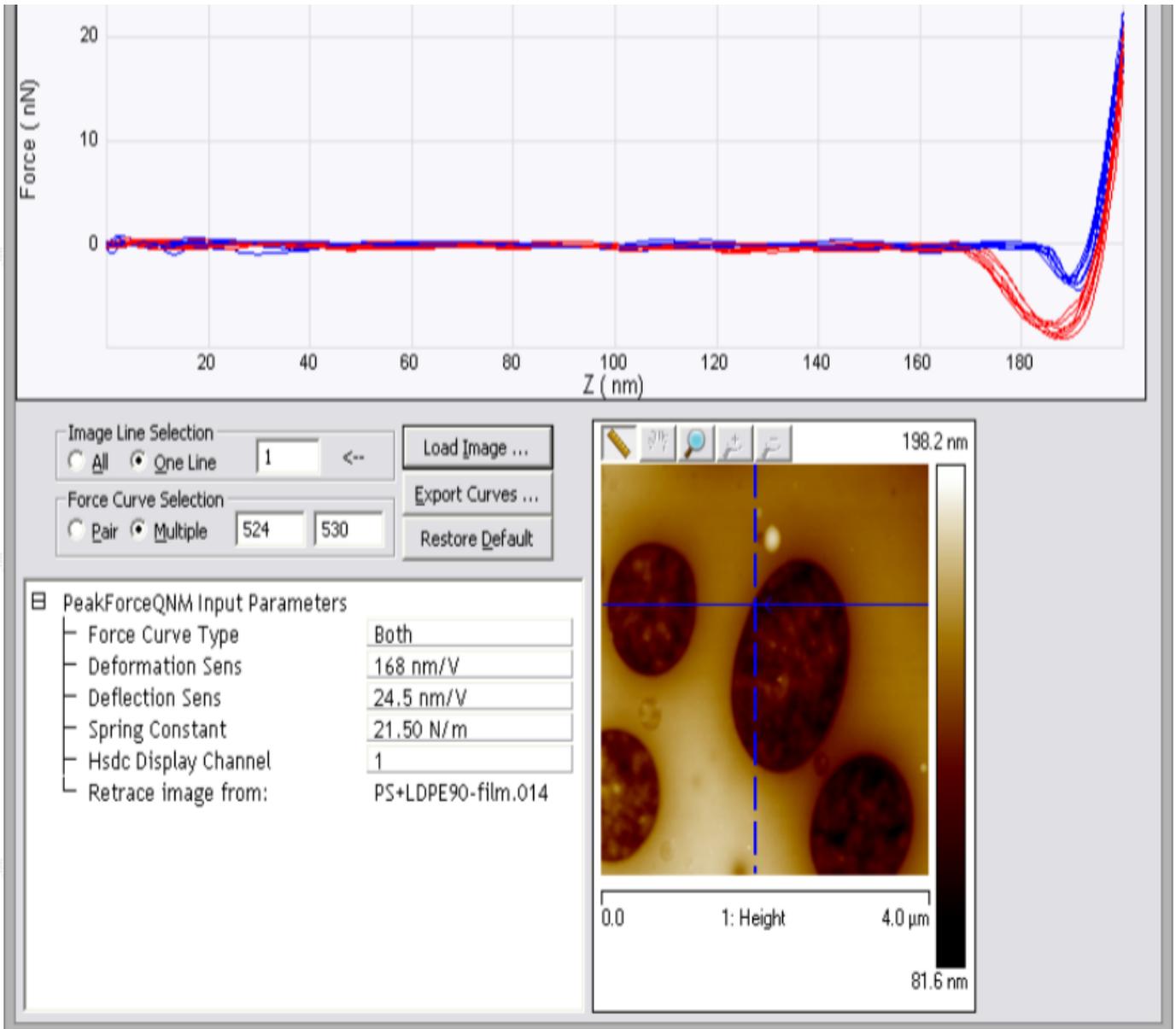


图1.3.1 选择多条力曲线显示

## 1.4 力曲线类型

设置：

- 全选：同时显示接近段和回撤段
- 去程：仅显示接近段
- 返程：仅显示回撤段

## 1.5 力曲线导出

点击力曲线导出可以：

- 导出两条力曲线（注：将两条游标线放在同一位置即可导出一条力曲线）
- 导出多条力曲线

每条导出的力曲线对应于一个ASCII文件，可以在Nanoscope Analysis中进行分析。

## 1.6 峰值力QNM输入参数

峰值力QNM输入参数界面中显示的参数是在数据采集时所输入的参数，可以在此中进行修改，参数包括：

- 形变量灵敏度（一般由DDS3 Sensitivity获得，不建议修改）
- 弯曲量灵敏度
- 力常数
- 高速数据采集通道序号（仅改变显示的HSDC信号，不会影响导出的力曲线）

## 2 HSDC（高速数据采集）

双击高速数据采集文件或者在软件界面右侧的预览窗口中点击相应文件打开。高速数据采集分析界面如图7所示。将鼠标移植图像左侧的Y轴按住鼠标左键即可拖拽出游标线，结果窗口中即显示对应游标线所处的数据信息。

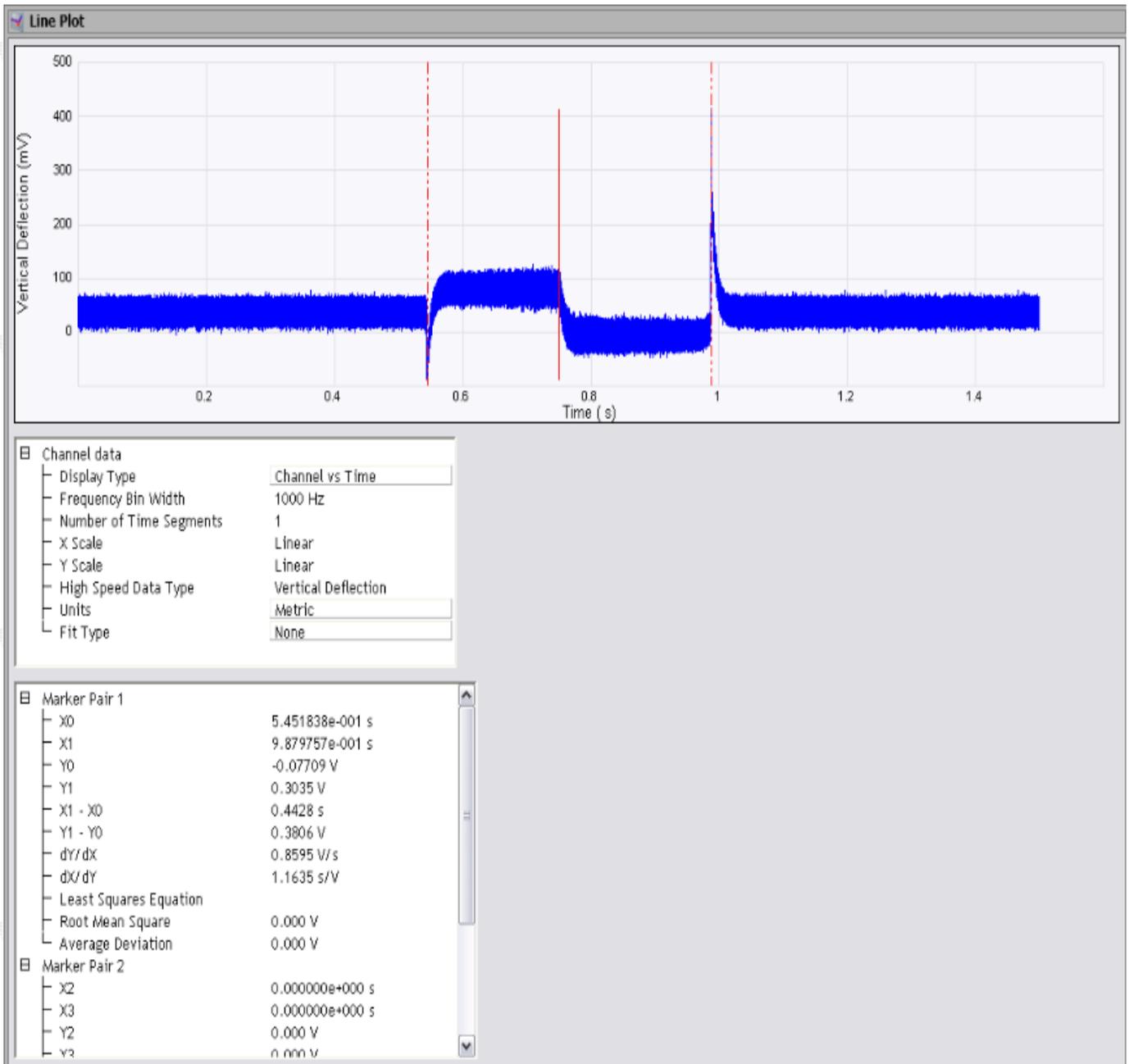


图2.1 高速数据采集分析窗口

## 2.1 高速数据采集界面

表2.1.1 通道数据参数

参数	描述
Display Type	显示类型。设置： · 所选通道数据对时间谱图 · 振幅对频率谱图
Frequency Bin Width	频谱图横轴频率柱方图的饼宽
Number of Time Segmen	由饼宽决定，代表一个饼宽所对应的数据采集个数

ts	
X scale	横轴类型，可选择线性或对数
Y scale	纵轴类型，可选择线性或对数
High Speed Data Type	高速数据类型
Units	单位，可选择V（原始信号）或者所设定的公制单位
Fit Type	拟合类型，可选择不做拟合或者线性拟合

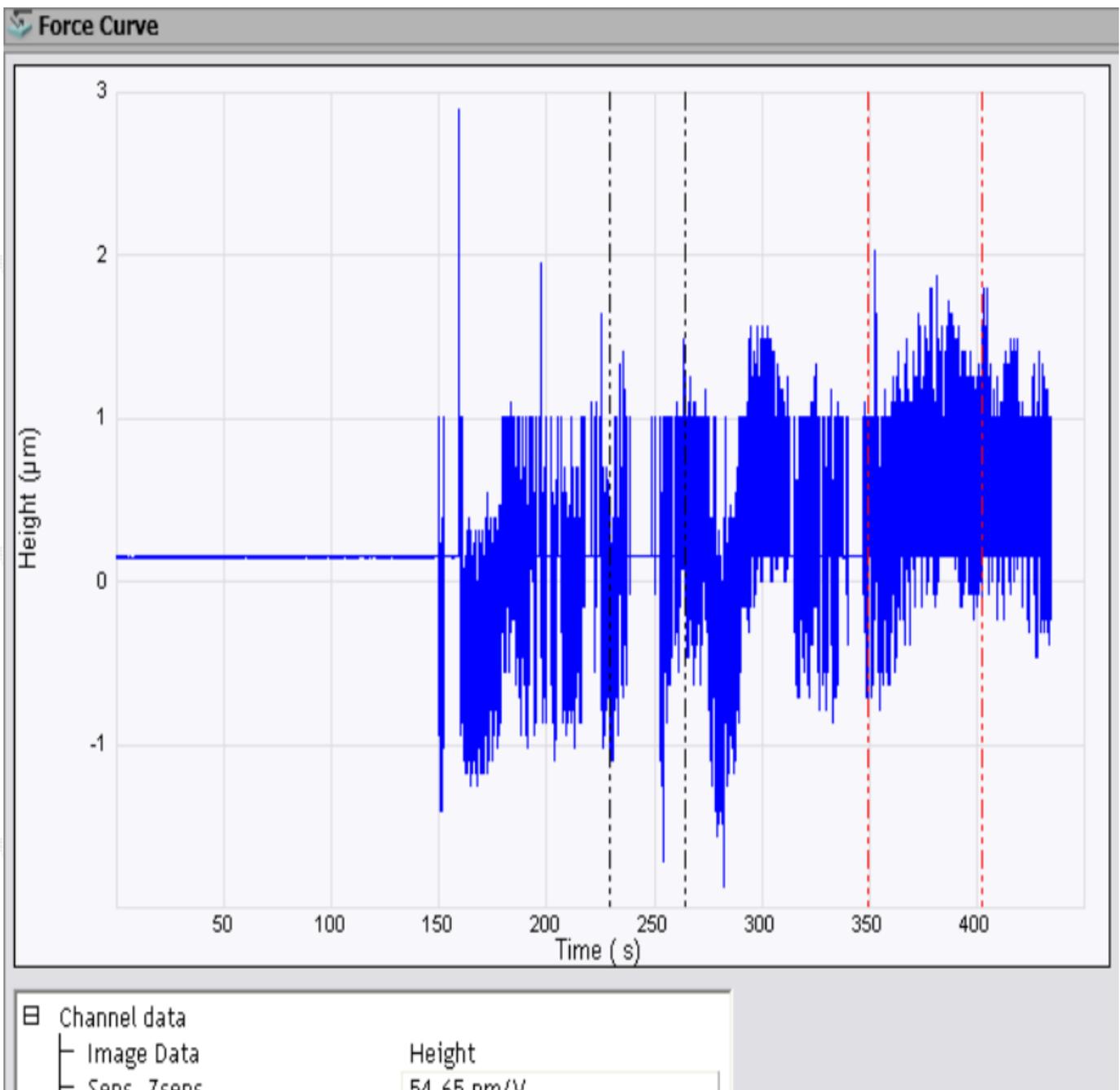
表2.1.2 游标线分析结果

参数	描述
第一对游标	
X0	第一对游标中第一条游标线所对应的横轴上的位置
X1	第一对游标中第二条游标线所对应的横轴上的位置
Y0	第一对游标中第一条游标线所对应的纵轴上的位置
Y1	第一对游标中第二条游标线所对应的纵轴上的位置
$X1 - X0$	第一对游标中两条游标线横轴之差
$Y1 - Y0$	第一对游标中两条游标线纵轴之差
dY/dX	第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的斜率
dY/dX	以上斜率的倒数
Least Square Equation	当Fit Type选择线性拟合时，第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的线性拟合方程
Root Mean Square	拟合线的标准差
Average Deviation	拟合线的平均偏差
第二对游标	
X0	第二对游标中第一条游标线所对应的横轴上的位置
X1	第二对游标中第二条游标线所对应的横轴上的位置
Y0	第二对游标中第一条游标线所对应的纵轴上的位置
Y1	第二对游标中第二条游标线所对应的纵轴上的位置
$X1 - X0$	第二对游标中两条游标线横轴之差
$Y1 - Y0$	第二对游标中两条游标线纵轴之差
dY/dX	第二对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的斜率

dY/dX	以上斜率的倒数
Least Square Equation	当Fit Type选择线性拟合时，第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的线性拟合方程
Root Mean Square	拟合线的标准差
Average Deviation	拟合线的平均偏差

### 3 Strip Chart (带状图)

双击带状图文件或者在软件界面右侧的预览窗口中点击相应文件打开。带状图界面如图8所示。将鼠标移植图像左侧的Y轴按住鼠标左键即可拖拽出游标线，结果窗口中即显示对应游标线所处的数据信息。



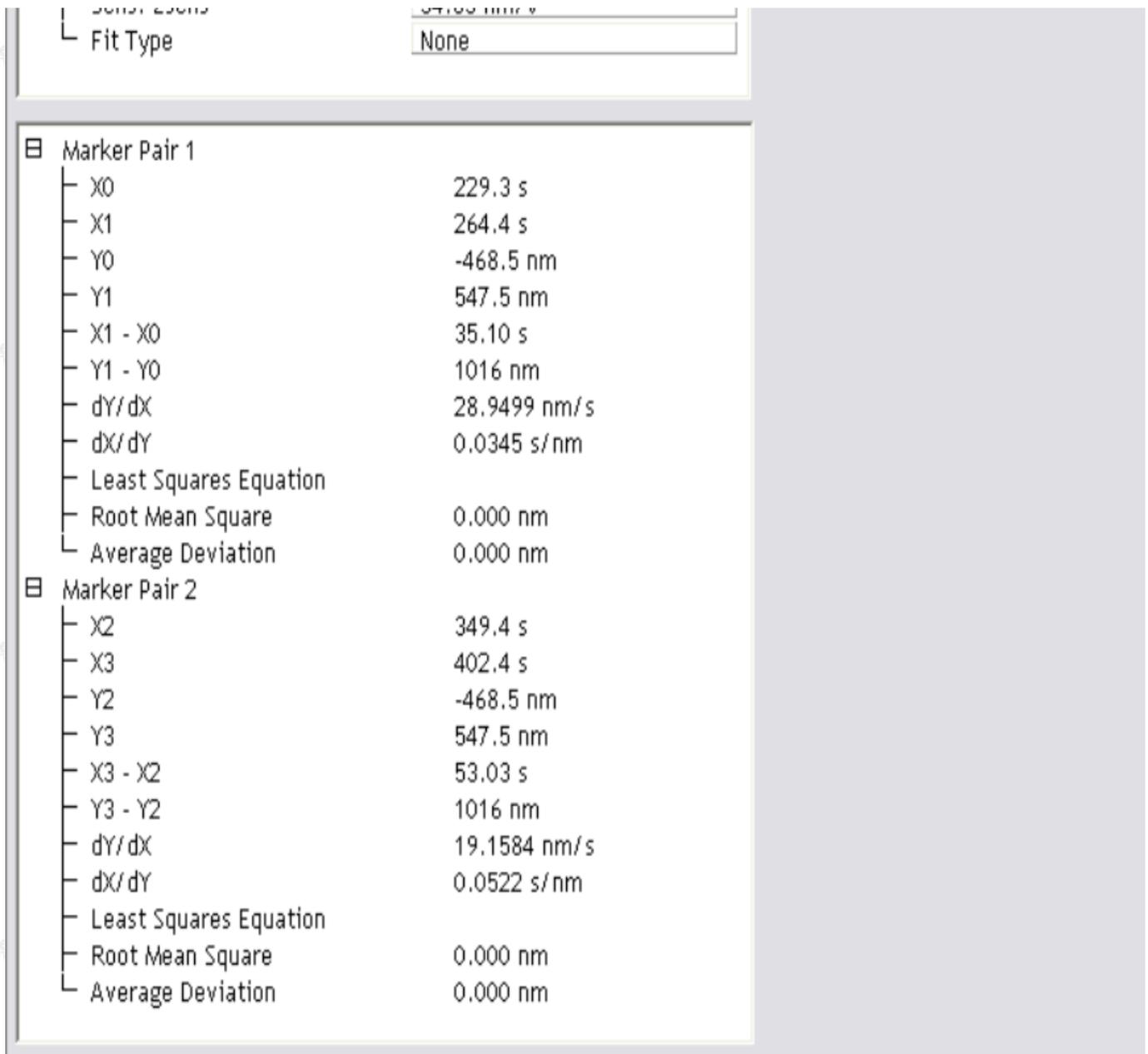


图3.1 带状图分析窗口

### 3.1 带状图界面

表3.1.1 通道数据参数

参数	描述
Image Data	图像类型
Sens. Zsens.	Height Sensor通道灵敏度
Fit Type	拟合类型，可选择不做拟合，线性拟合，赫兹模型拟合、蠕虫链模型

表3.1.2 游标线分析结果

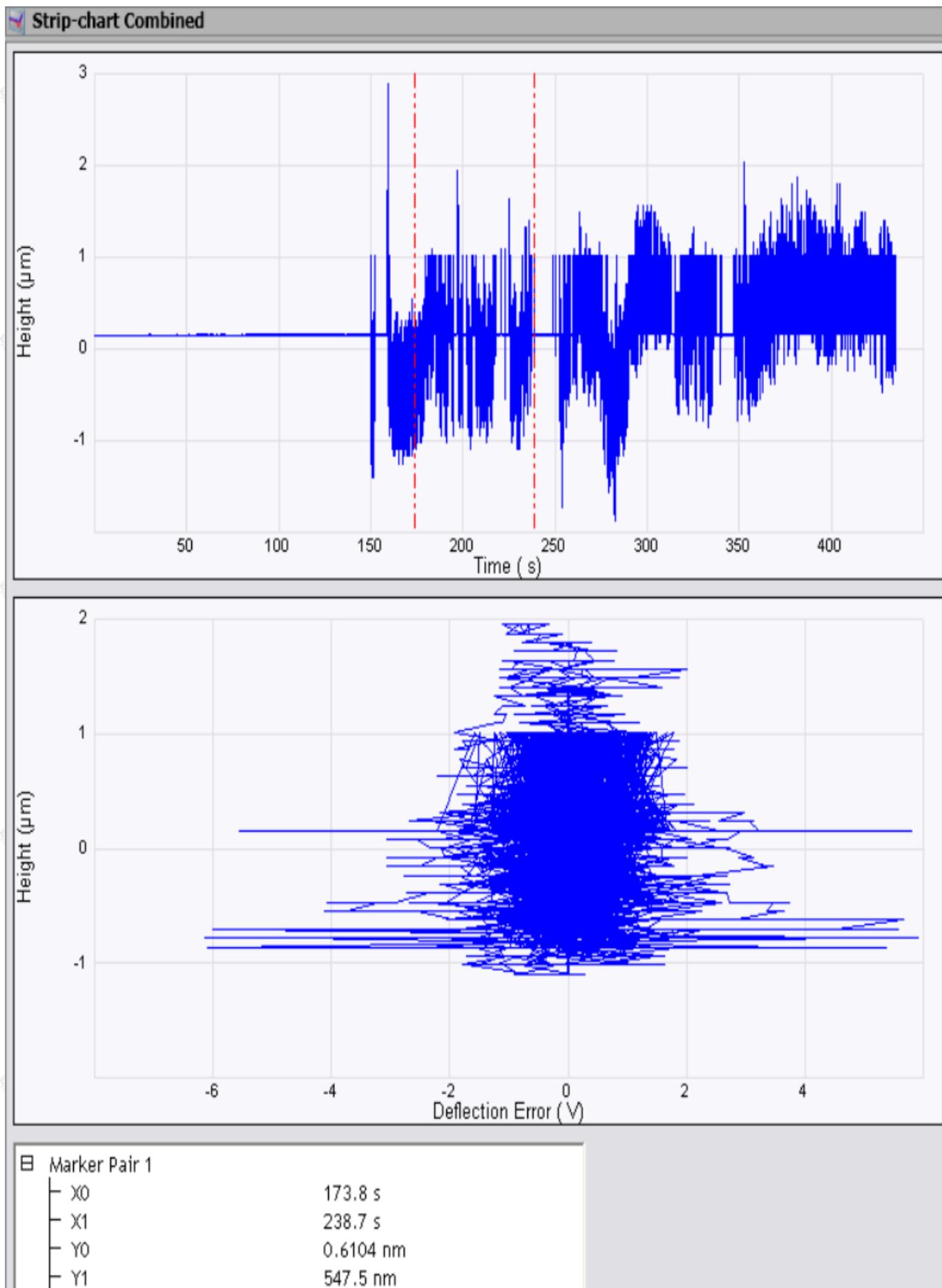
参数	描述
第一对游标	

X0	第一对游标中第一条游标线所对应的横轴上的位置
X1	第一对游标中第二条游标线所对应的横轴上的位置
Y0	第一对游标中第一条游标线所对应的纵轴上的位置
Y1	第一对游标中第二条游标线所对应的纵轴上的位置
$X1 - X0$	第一对游标中两条游标线横轴之差
$Y1 - Y0$	第一对游标中两条游标线纵轴之差
dY/dX	第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的斜率
dY/dX	以上斜率的倒数
Least Square Equation	当Fit Type选择线性拟合时，第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的线性拟合方程
Root Mean Square	拟合线的标准差
Average Deviation	拟合线的平均偏差
第二对游标	
X0	第二对游标中第一条游标线所对应的横轴上的位置
X1	第二对游标中第二条游标线所对应的横轴上的位置
Y0	第二对游标中第一条游标线所对应的纵轴上的位置
Y1	第二对游标中第二条游标线所对应的纵轴上的位置
$X1 - X0$	第二对游标中两条游标线横轴之差
$Y1 - Y0$	第二对游标中两条游标线纵轴之差
dY/dX	第二对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的斜率
dY/dX	以上斜率的倒数
Least Square Equation	当Fit Type选择线性拟合时，第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的线性拟合方程
Root Mean Square	拟合线的标准差
Average Deviation	拟合线的平均偏差

## 4 Strip-chart Combined Channels (带状图相关通道)

双击带状图相关通道文件或者在软件界面右侧的预览窗口中点击相应文件打开。带状图相关界面如图8所示，除去数据对时间作图外，还有另外两个通道对彼此作图。将鼠标移植图像左侧的Y轴按住鼠标左键即

可拖拽出游标线，结果窗口中即显示对应游标线所处的数据信息。



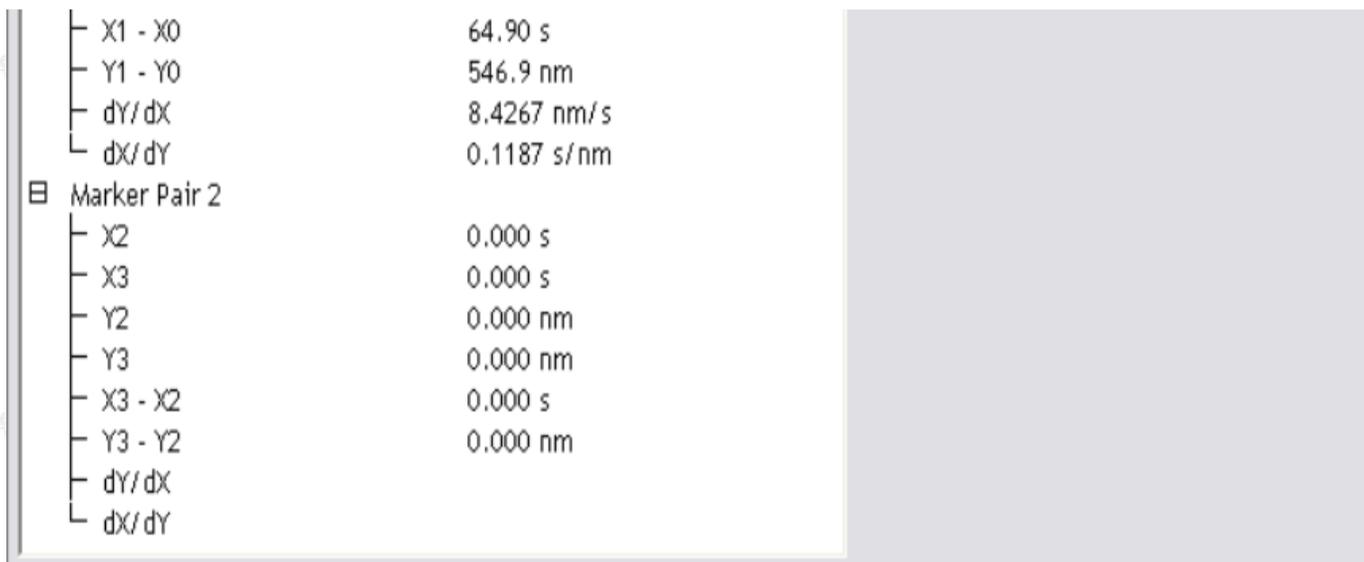


图4.1 带状图分析窗口

## 4.1 带状图界面

表4.1.1 游标线分析结果

参数	描述
第一对游标	
X0	第一对游标中第一条游标线所对应的横轴上的位置
X1	第一对游标中第二条游标线所对应的横轴上的位置
Y0	第一对游标中第一条游标线所对应的纵轴上的位置
Y1	第一对游标中第二条游标线所对应的纵轴上的位置
X1 - X0	第一对游标中两条游标线横轴之差
Y1 - Y0	第一对游标中两条游标线纵轴之差
dY/dX	第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的斜率
dY/dX	以上斜率的倒数
Least Square Equation	当Fit Type选择线性拟合时，第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的线性拟合方程
Root Mean Square	拟合线的标准差
Average Deviation	拟合线的平均偏差
第二对游标	
X0	第二对游标中第一条游标线所对应的横轴上的位置
X1	第二对游标中第二条游标线所对应的横轴上的位置
Y0	第二对游标中第一条游标线所对应的纵轴上的位置

Y1	第二对游标中第二条游标线所对应的纵轴上的位置
X1 - X0	第二对游标中两条游标线横轴之差
Y1 - Y0	第二对游标中两条游标线纵轴之差
dY/dX	第二对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的斜率
dY/dX	以上斜率的倒数
Least Square Equation	当Fit Type选择线性拟合时，第一对游标线两条游标线所对应位置数据点直线连线的线性拟合方程
Root Mean Square	拟合线的标准差
Average Deviation	拟合线的平均偏差

# MIRO离线分析

## 1 介绍

布鲁克的显微镜图像注册及叠加（MIRO）软件可以实现AFM图像和光学显微镜图像的整合。这个选配的软件可以实现图像的自动导入和大小调整，用来指定AFM成像和力曲线的具体位置。相关联的数据可以在Nanoscope Analysis软件中进行分析。

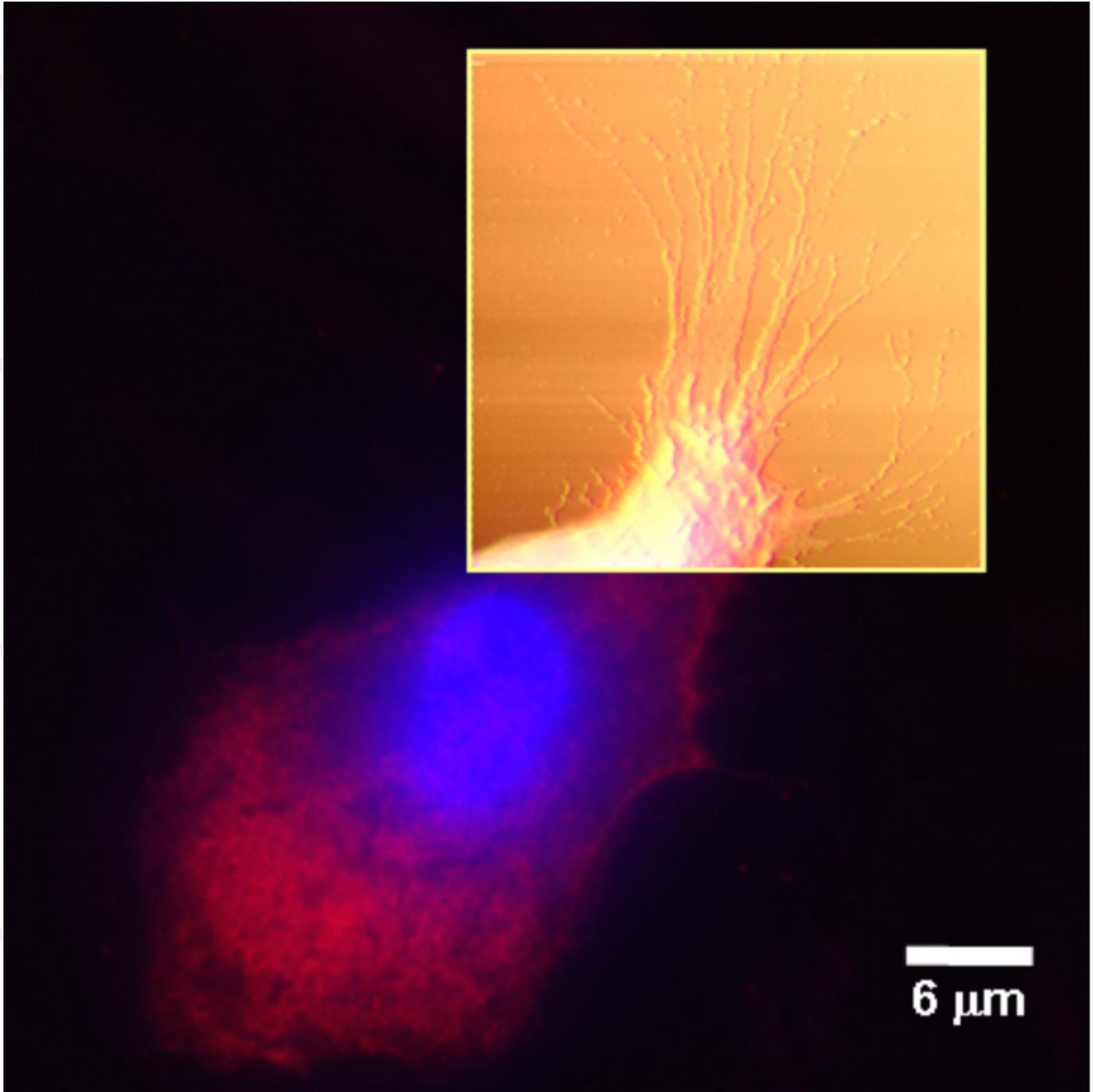


图1.1 MIRO界面

MIRO文件是一类xml（基于ASCII）文件，含有所有的MIRO信息，包括图像叠放结构、导入设置、画板设置、兴趣区域（ROI）设置等，MIRO文件后缀名为.iro。在Nanoscope Analysis右侧的浏览窗口中双击相应的\*.iro文件即可打开。

## 2 MIRO画板

打开MIRO文件后显示如下MIRO画板。

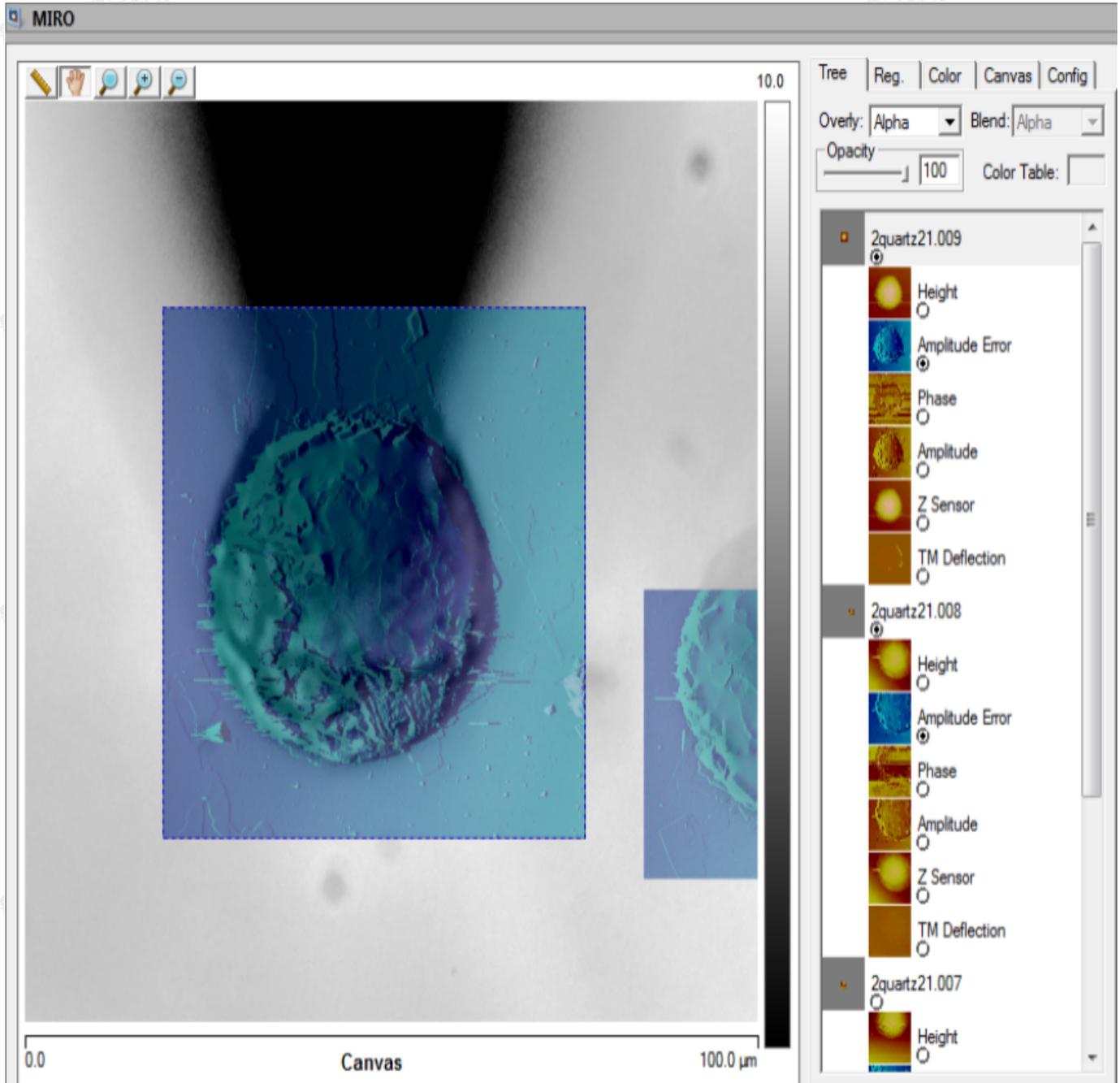


图2.1 MIRO画板

在画板界面上有如下图像调节按键：

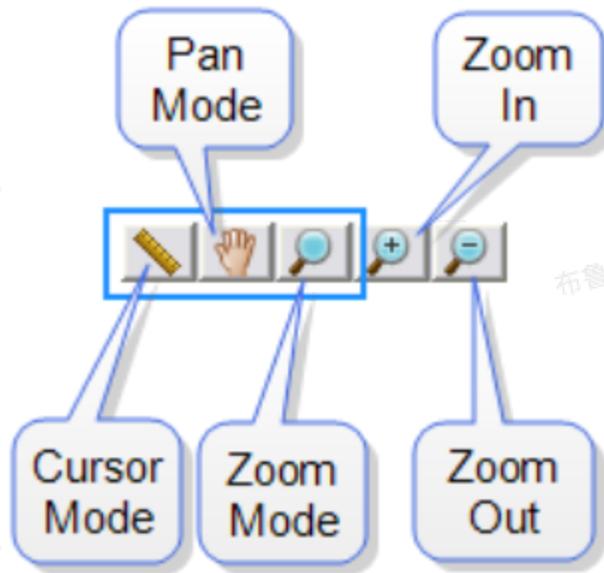


图2.2 MIRO画板图像调节按键

前三个图标代表更改图像的不同模式：

-  游标模式：用户能够在画板上的图像上画选框、线或者放置记号来进行测量。

- 进入游标模式后，点击鼠标右键选择游标形式：选框、自定义线和水平线
  - 用鼠标左键在用户欲分析的图像上画选框和自定义线，或者放置水平线
  - 框选后，选框的尺寸或者线长度角度会在画板左下角显示

-  拖拽模式：在放大的窗口中，用户能够将在画板上的拖拽图像。

- 进入游标模式后，点击鼠标左键拖动即可拖拽图像选

-  缩放模式：用户能够在画板上选定区域进行缩放。

- 进入游标模式后，点击鼠标左键创建缩放区域
  - 缩放后的选框会被置于画板中心

其它的按键和鼠标操作功能如下：

- Zoom In：放大40%，仅能放大一次
- Zoom Out：缩小40%，仅能缩小一次
- Mouse Wheel：向远离你的方向或者接近你的方向滚动鼠标滚轮可以放大或者缩小图像，每次改变20%。滚轮操作在任何模式下都可以起作用
- Mouse Double Click：将双击的位置移到画板中心

## 2.1 序列树参数栏

序列树参数是用来选择待叠置的AFM和光学图像，改变叠置顺序，调整叠置的颜色、透明度等参数。

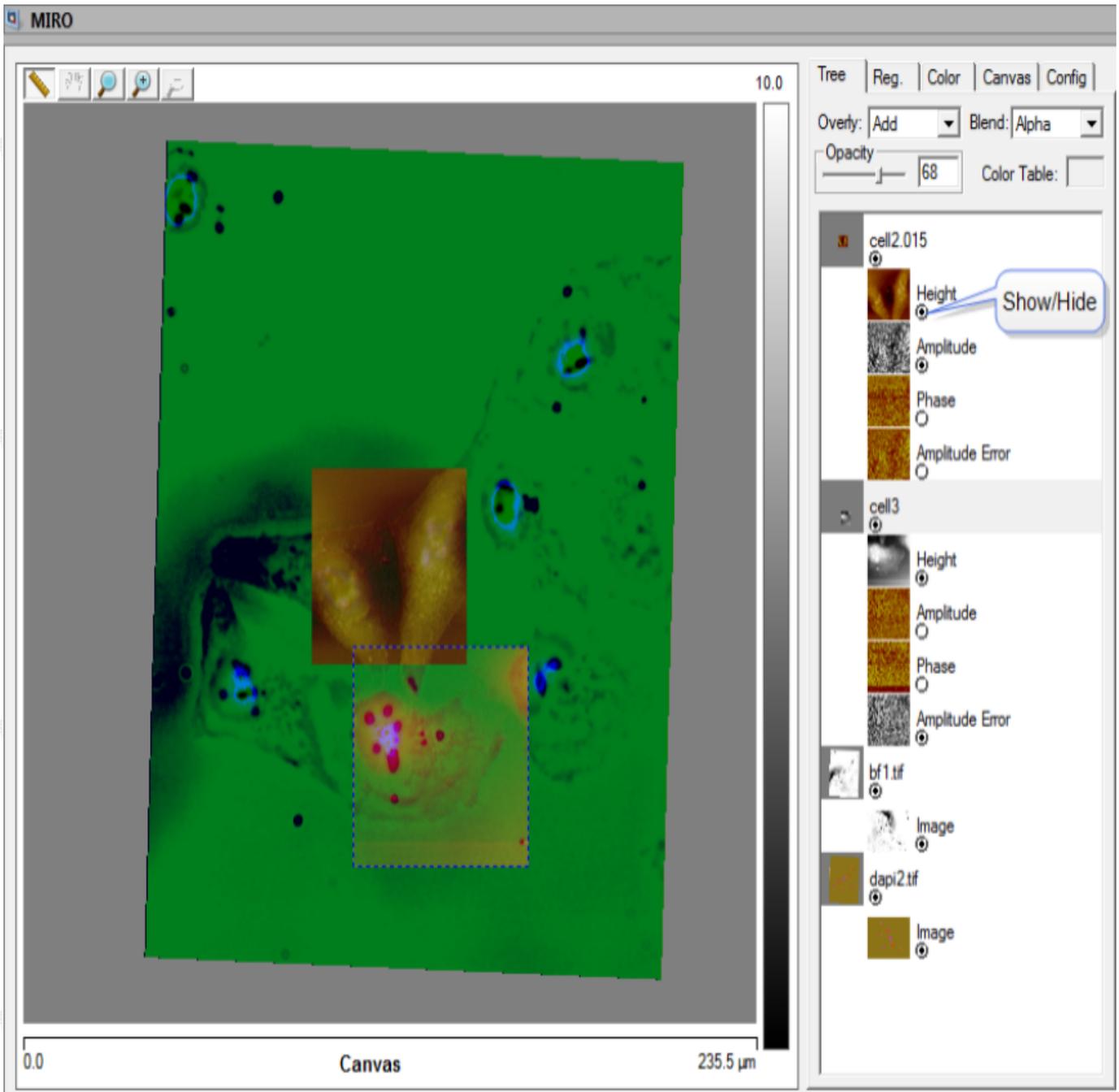


图2.1.1 MIRO序列树参数栏

这些参数对于选定的图像其功能为：

- Show/Hide： 点击图像文件名下方的图标切换显示或隐藏该图像。
- Change Order in tree： 拖拽图像改变它在叠置中的序列。
- Overlay： 图像叠置方法，由透明度 $\alpha$ 和叠置序列数 $n$ 决定。设定如下：
  - Alpha:  $Color_n = Color_{nOriginal} * \alpha_n + Color_{n-1} * (1 - \alpha_n)$
  - Add:  $Color_n = Color_{nOriginal} * \alpha_n + Color_{n-1}$
  - Max:  $Max[Color_{nOriginal} * \alpha_n, Color_{n-1}]$
- Blend： 通道叠置方法，由透明度 $\alpha$ 和叠置序列数 $n$ 决定。设定如下：
  - Alpha:  $Color_n = Color_{nOriginal} * \alpha_n + Color_{n-1} * (1 - \alpha_n)$

- Add:  $Color_n = Color_{nOriginal} * a_n + Color_{n-1}$
- Max:  $Max[Color_{nOriginal} * a_n, Color_{n-1}]$
- Opacity: 图像或通道的透明度，可通过输入数字或拖动箭头改变。
- Color Table: 色标参数

### 2.1.1 画板设定参数

用鼠标右键点击画板空白处可激活画板设定参数：

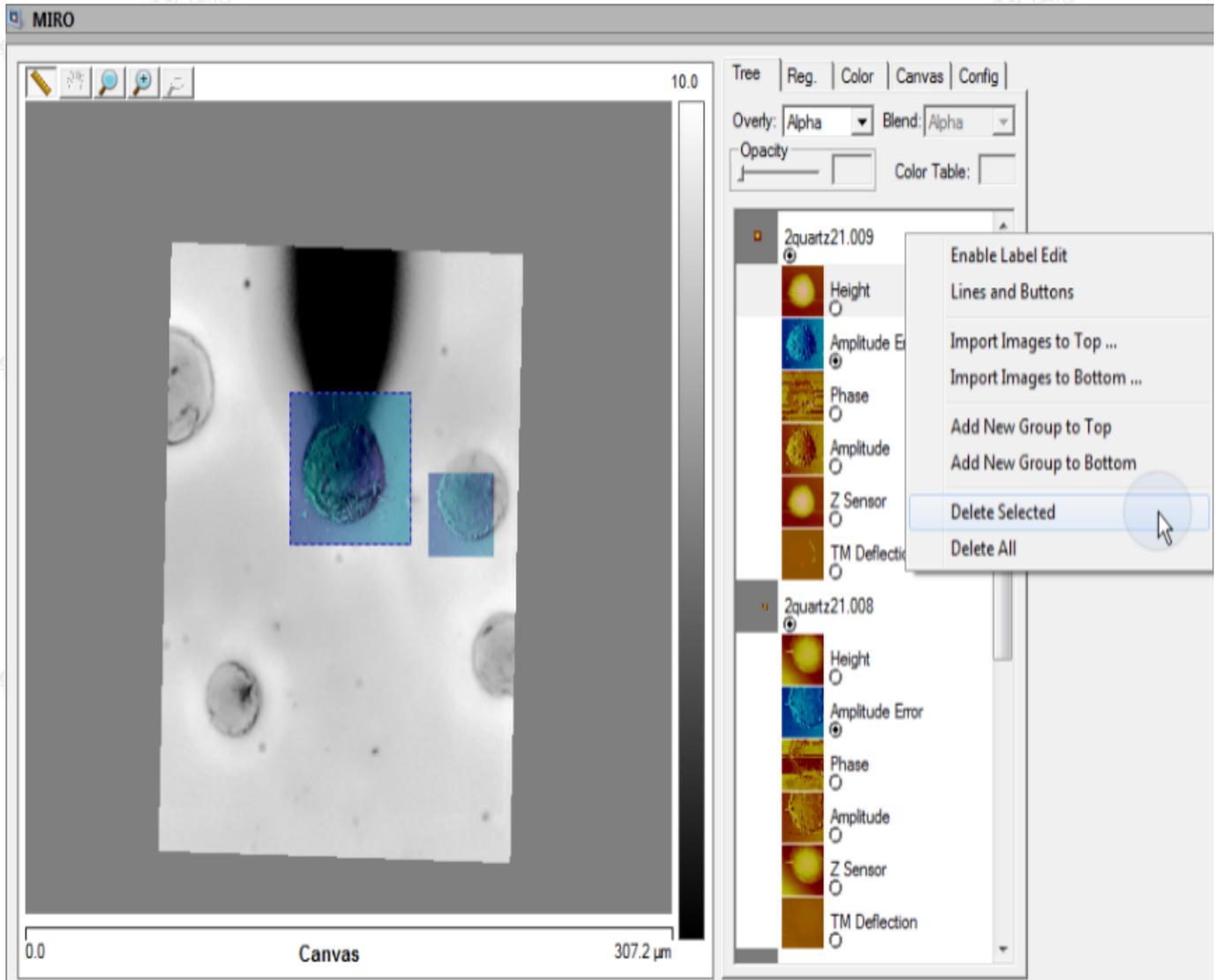


图2.1.1.1 MIRO画板设定参数

- Enable Label Edit: 选中时可改变图像标签。
- Lines and Buttons: 激活画板序列树图标。
- Import Images to Top: 选中时，导入的图像置于画板最上层。
- Import Images to Bottom: 选中时，导入的图像置于画板最底层。
- Add New Group to Top: 在图像最上层添加一组图像。
- Add New Group to Bottom: 在图像最底层添加一组图像。
- Delete Selected: 从MIRO中删除选中的图像。

- Delete All: 删除MIRO中的所有图像。

## 2.2 注册参数栏

注册参数是用来调整每层叠置图像的相对位置。当初始注册完成时，可以通过这些参数放大、缩小、平移或是旋转选中的图像，以保证准确的叠置。

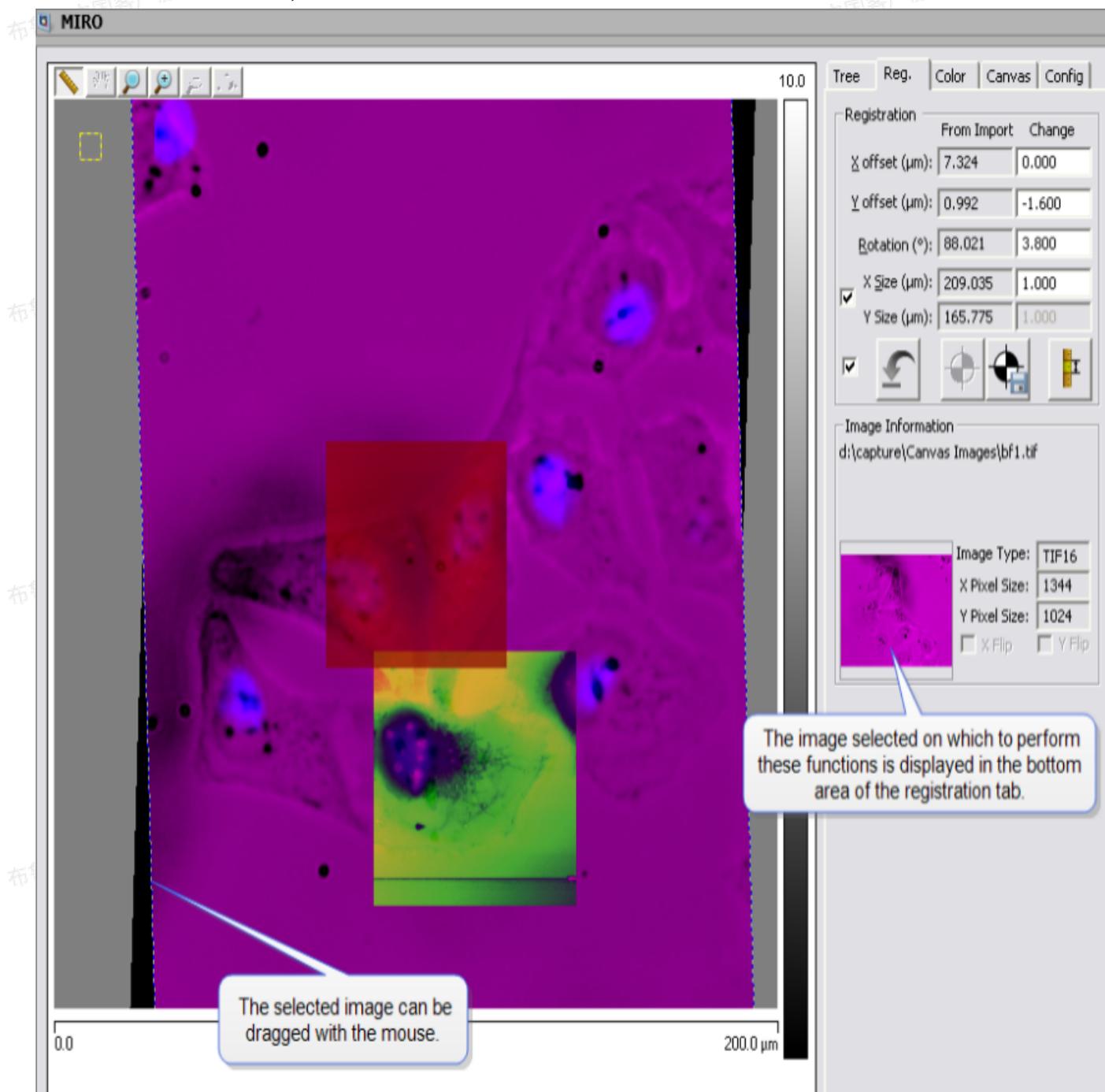


图2.2.1 注册参数栏



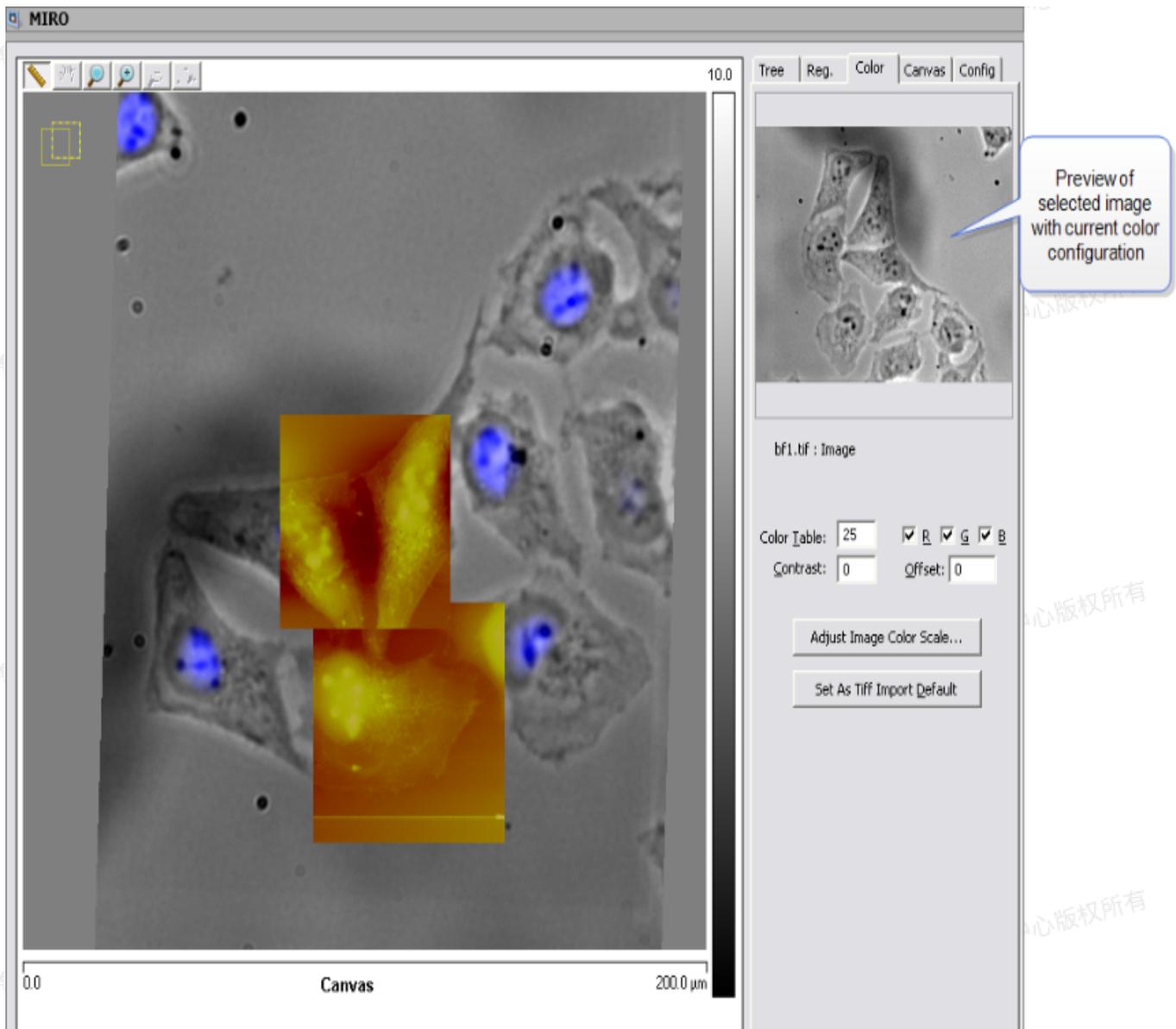


图2.3.1 颜色参数栏

用户可以通过更改参数来调整色标、对比度和色差，或者勾选红色（R）、绿色（G）、或蓝色（B）勾选框来更改颜色。

1. 色标参数：

从Nanoscope的色标中选择：0 – 25。

2. RGB：

切换是否使用红绿蓝色，如图2.3.2 – 2.3.5所示。

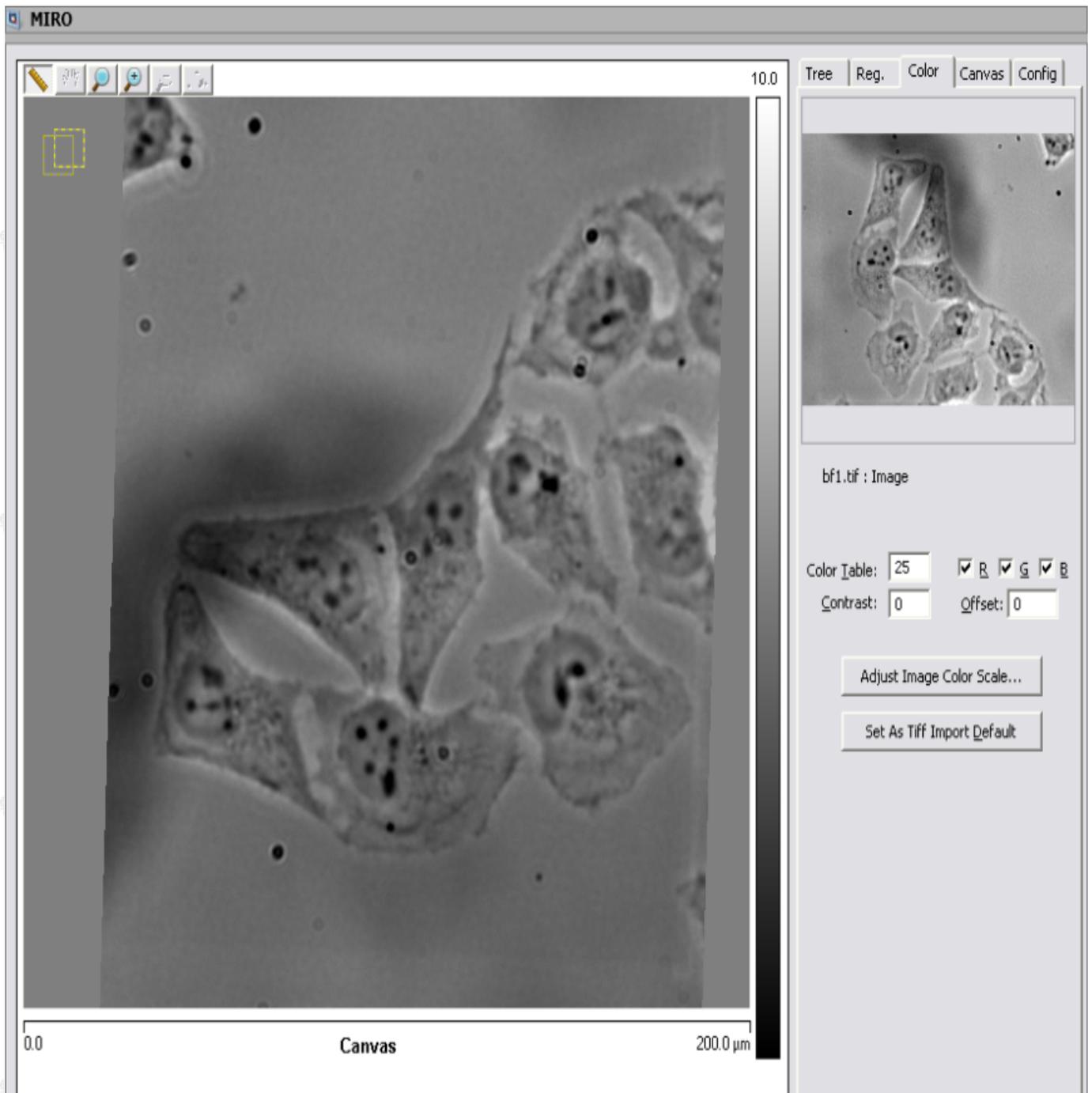


图2.3.2 使用25号色标的原始图像

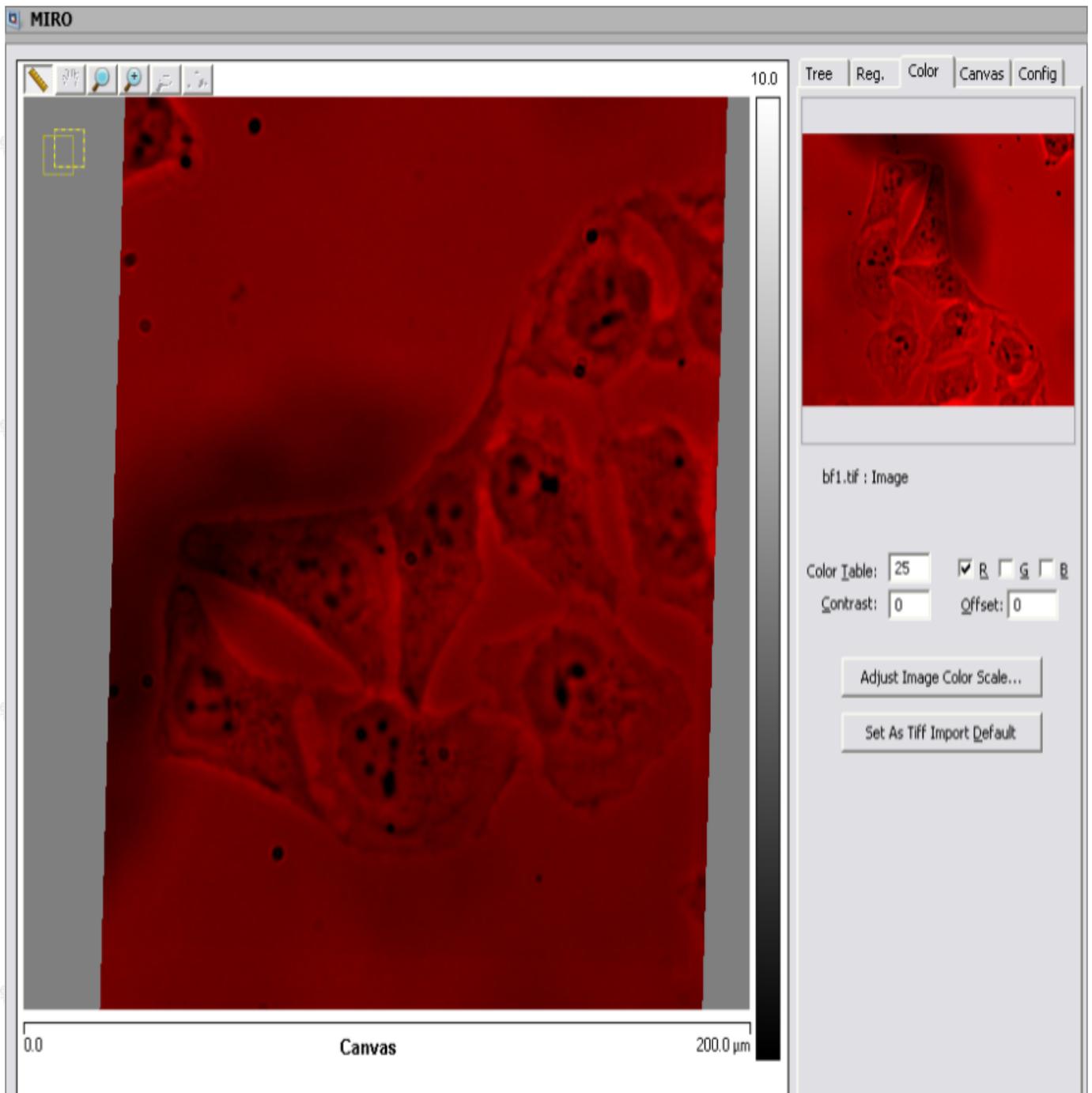


图2.3.3 开启红色 (R)

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

中心版权所有

中心版权所有

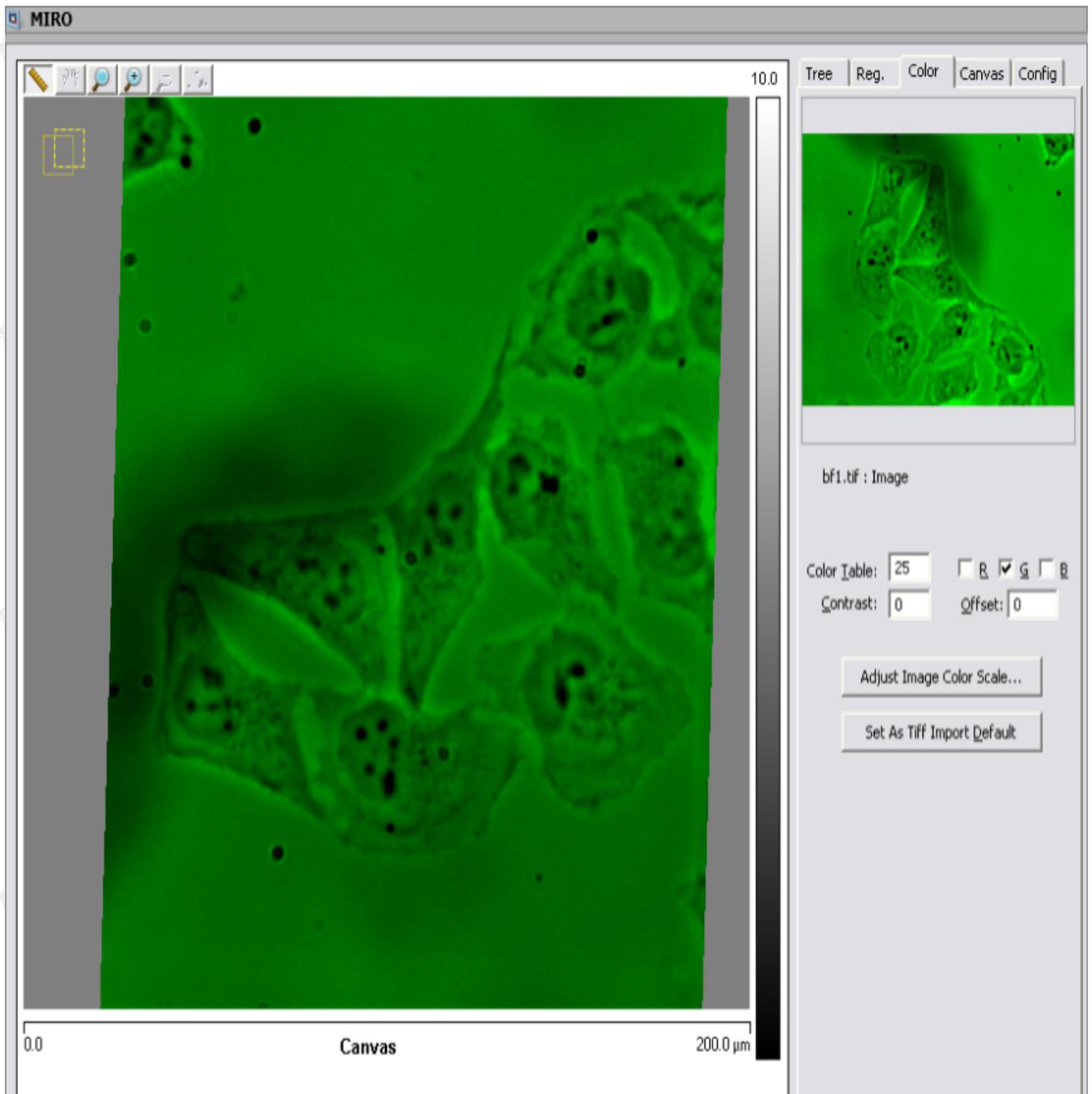


图2.3.4 开启绿色 (G)

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

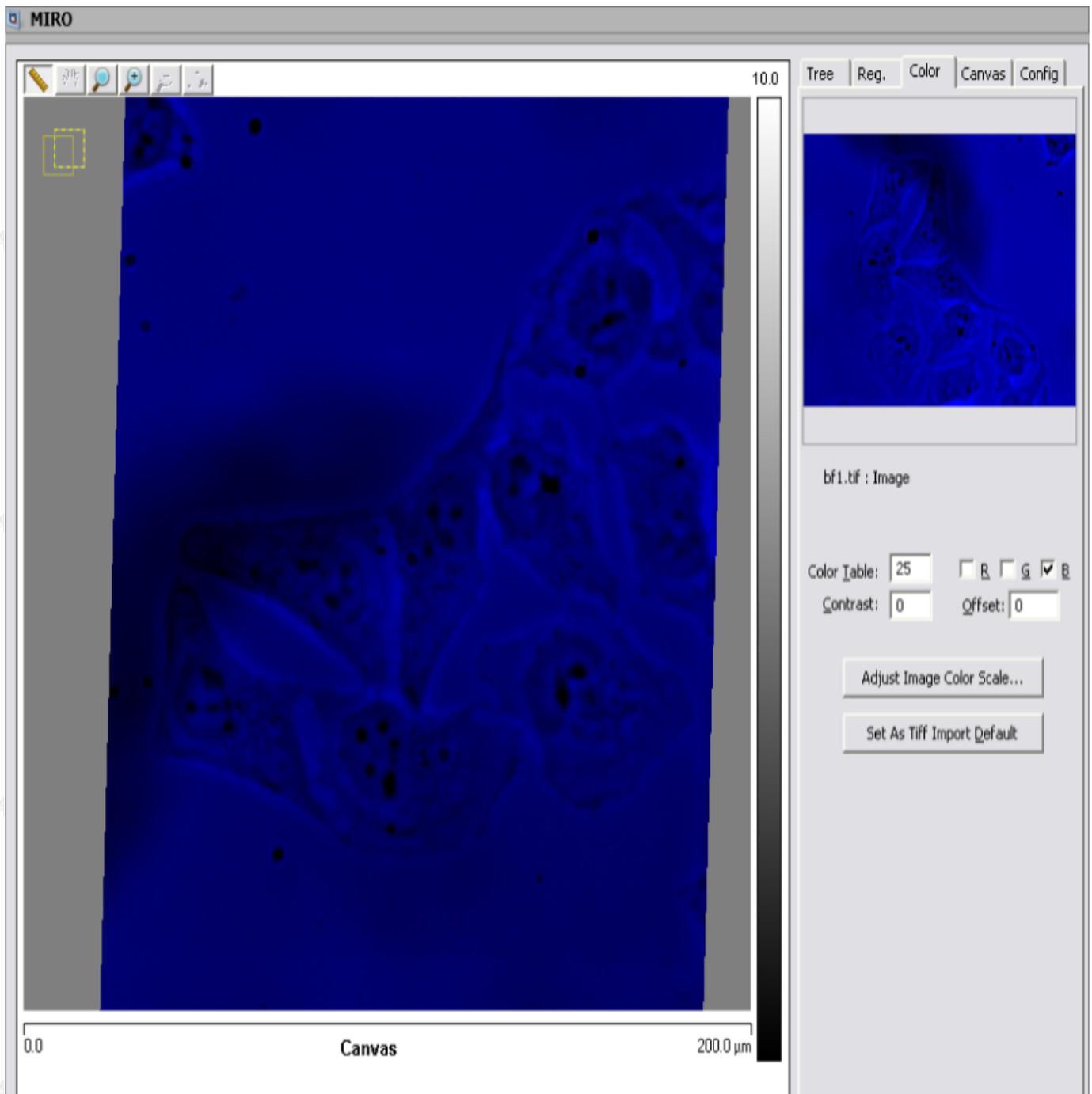


图2.3.5 开启蓝色

### 3. 对比度参数：

调整图像对比度，调节范围：-10 - 10，如图2.3.6 - 2.3.8所示。

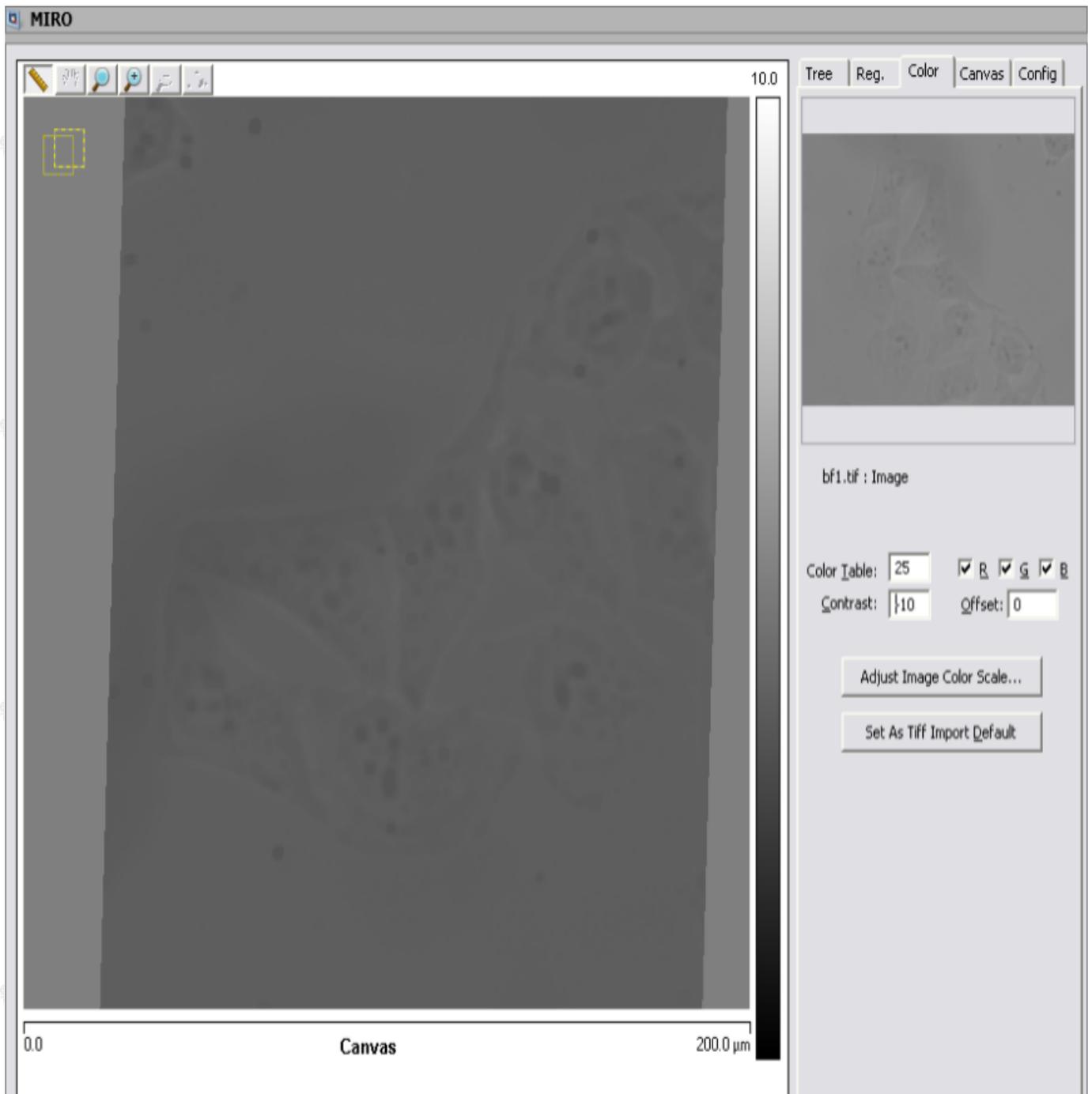


图2.3.6 对比度调为-10

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

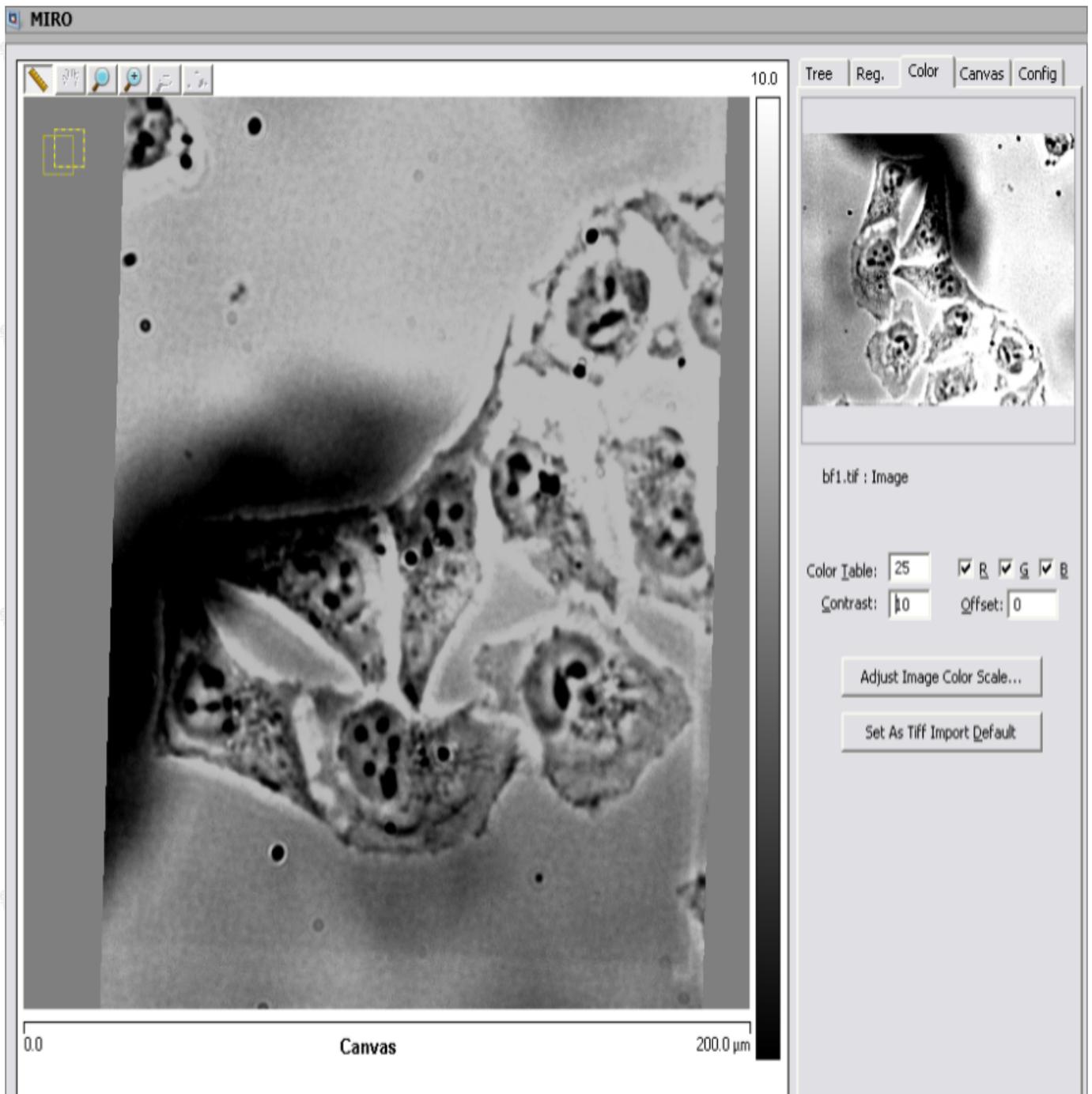


图2.3.7 对比度为10



图2.3.8 图2.3.6和图2.3.7强度对比

#### 4. 色差参数:

调整图像色差，即平移颜色值在色标中的位置，调节范围：-128 - 128，如图2.3.9 - 2.3.11所示。



图2.3.9 色差调为-128

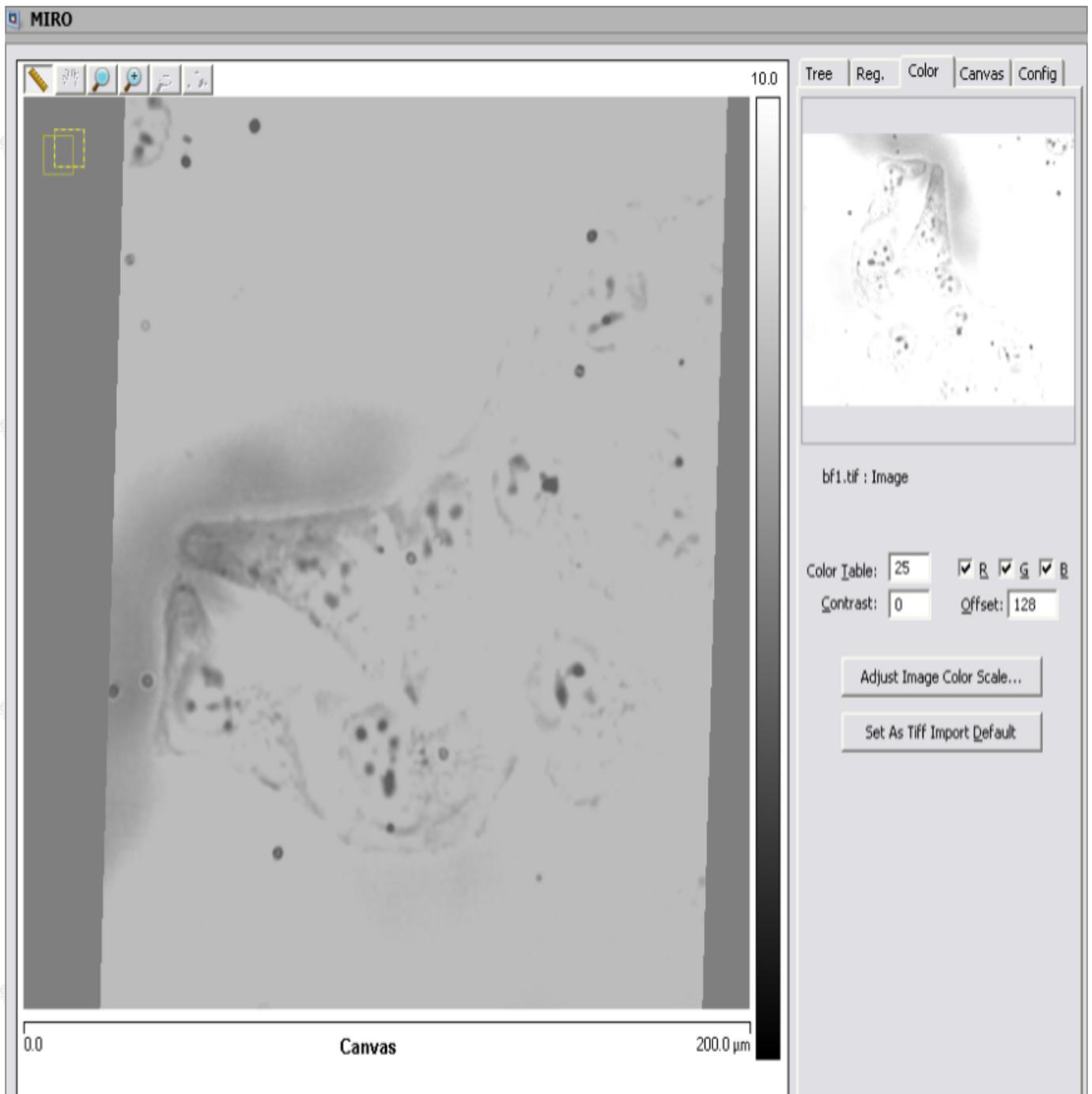


图2.3.10 色差为128



图2.3.11 图2.3.9和图2.3.10强度对比

5. 调节图像色标:

打开色标功能。

6. 设置为Tiff图像导入默认参数：

将上述参数设置为导入Tiff图像后的默认显示参数。

## 2.4 画板参数栏

画板参数用来调整画板的尺寸、位置和旋转角度。

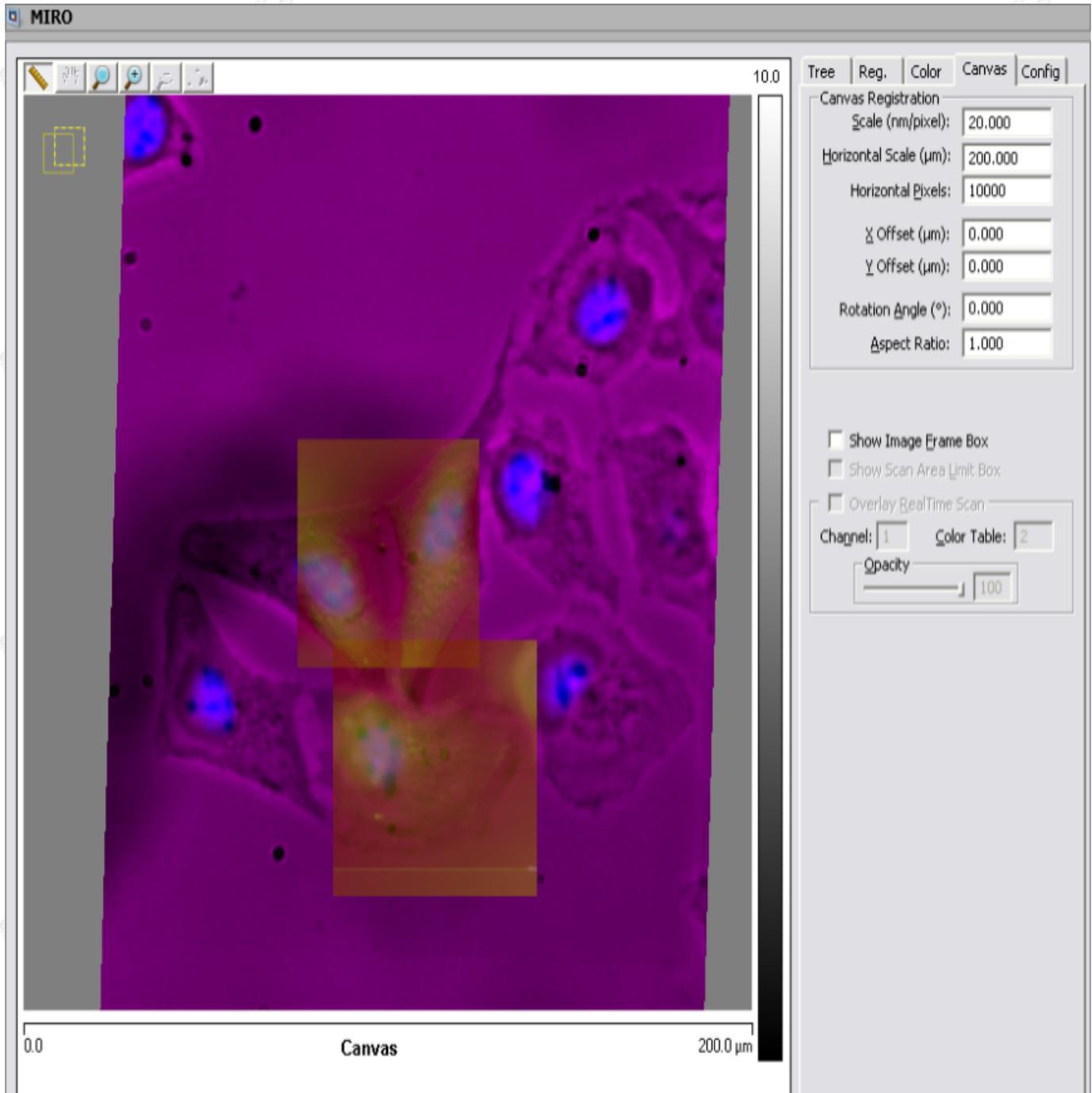


图2.4.1 画板参数栏

勾选上“显示图像边框”时，被选中的图像（被蓝色虚线框框住）可以用鼠标进行拖拽移动。否则不能用鼠标进行拖拽。

## 2.5 配置参数栏

配置参数用来选择相机类型和叠置方法。

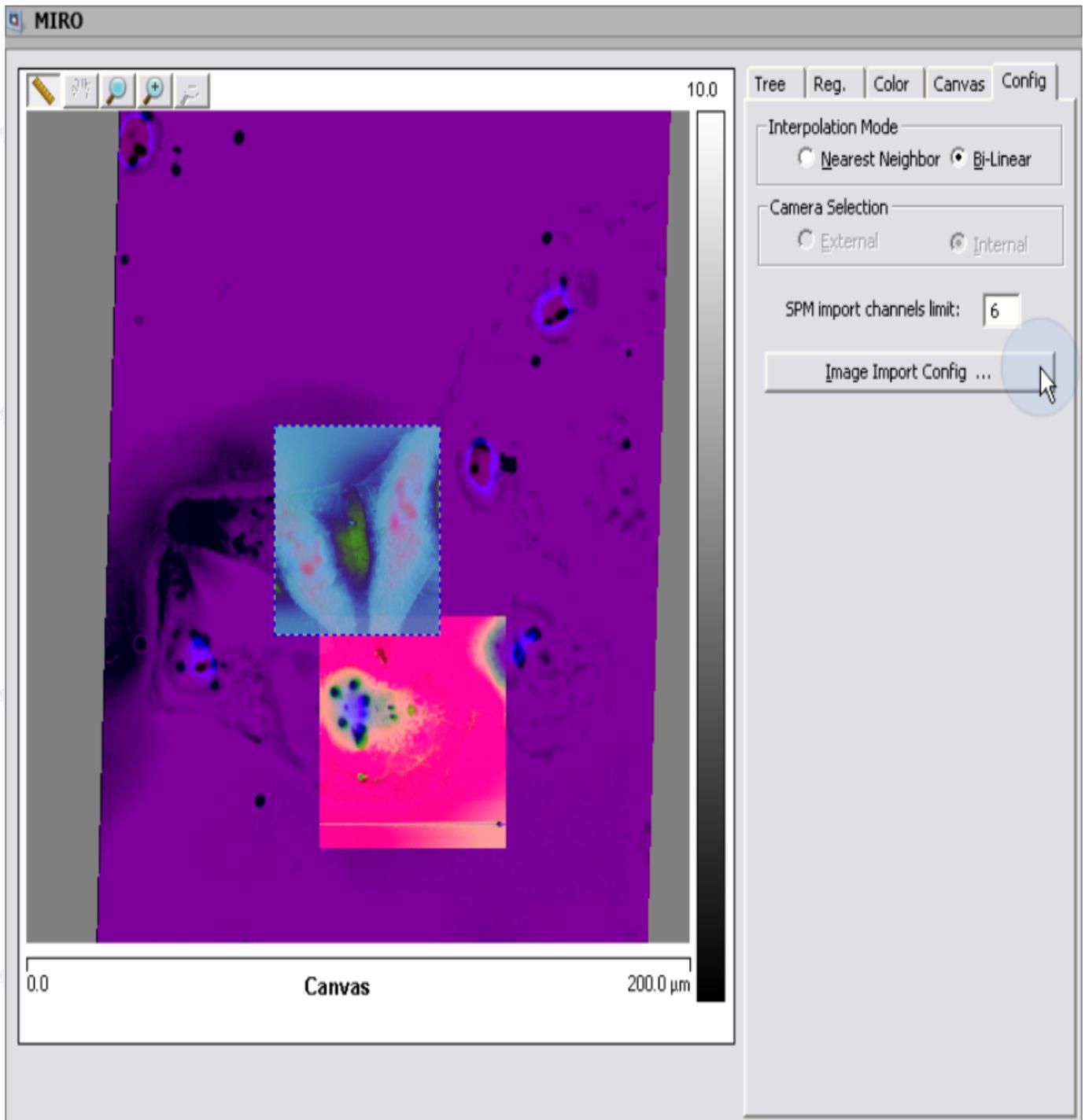


图2.5.1 配置参数栏

### 1. 插值模式：

- Nearest Neighbor：插值时选择最近的像素点数值
- Bi-Linear：插值时采用二维线性插值法

### 2. 导入SPM图像文件通道上限：

设置.spm图像文件可导入的通道上限，可选1 - 8。

### 3. 图像导入配置：

点击后即进入图像导入配置。

## 3 MIRO操作

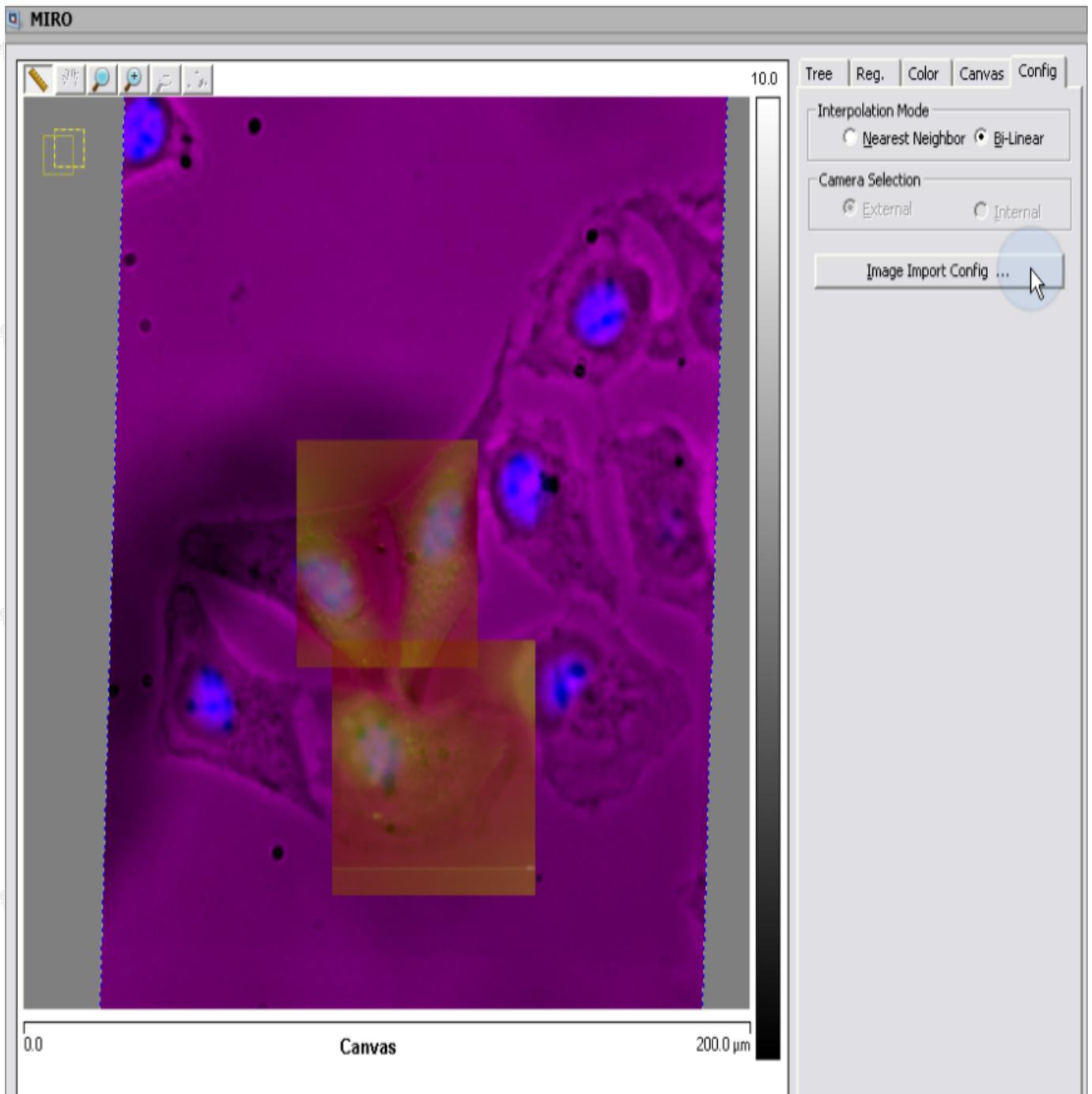
### 3.1 光学图像注册介绍

在MIRO画板中导入并叠置光学图像时，如下参数是必须的：

- 旋转角度
- X方向标尺
- Y方向标尺
- X方向位置
- Y方向位置
- 图像是否翻转
- 图像非线性校正

MIRO会把这些参数以.irc文件保存在数据文件夹中，当导入相关光学图像时，选中的irc文件中相应参数被用来设定该图像的位置。

用户可以在图像导入设置窗口中浏览、编辑甚至删除irc文件打开MIRO文件。在MIRO窗口中进入配置参数栏，点击图像导入设置：



布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

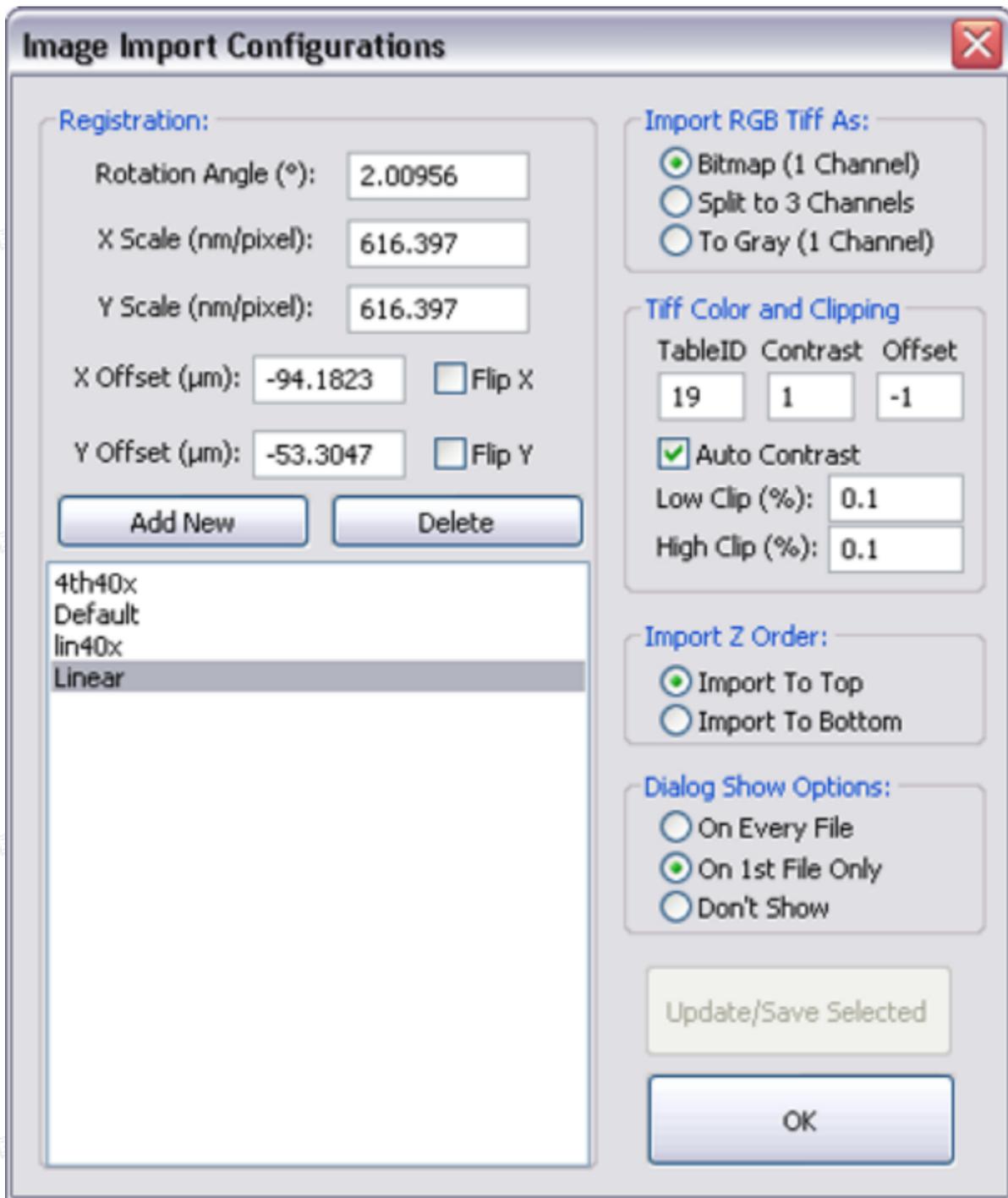


图3.1.1 图像导入设置窗口

修改irc文件方法如下：

1. 计算图像注册参数，并填入图像导入设置中

2.  调整完图像位置后，在注册参数栏中点击设置当前值为导入注册值按键后即可保存注册参数。

图像导入设置窗口中还可以设置导入图像叠置顺序和对话框弹出选项：

1. 图像叠置顺序：

- Import To Top：新导入的图像在最上层
- Import To Bottom：新导入的图像在最底层（可能不可见）

2. 对话框弹出选项：

- On Every File：每次导入图像文件时均弹出导入设置窗口
- On 1<sup>st</sup> File only：当导入多个图像文件时，只在导入第一个文件时均弹出导入设置窗口
- Don't Show：不弹出导入设置窗口

## 3.2 放置图像

在MIRO画板中放置图像，方法如下：

- 导入图像（后有详述）
- 导入画板文件

### 3.2.1 导入图像

1.  点击导入图像图标。



2. 选择图像，点击打开。

- 如果导入的是AFM图像文件，系统会假设采集图像时并未移动样品台，而根据其扫描范围和扫描位置将其放置在画板中相应的位置。
- 如果导入的是光学图像文件，系统会弹出导入配置窗口（除非在图像导入设置中选择为“Don't Show”）

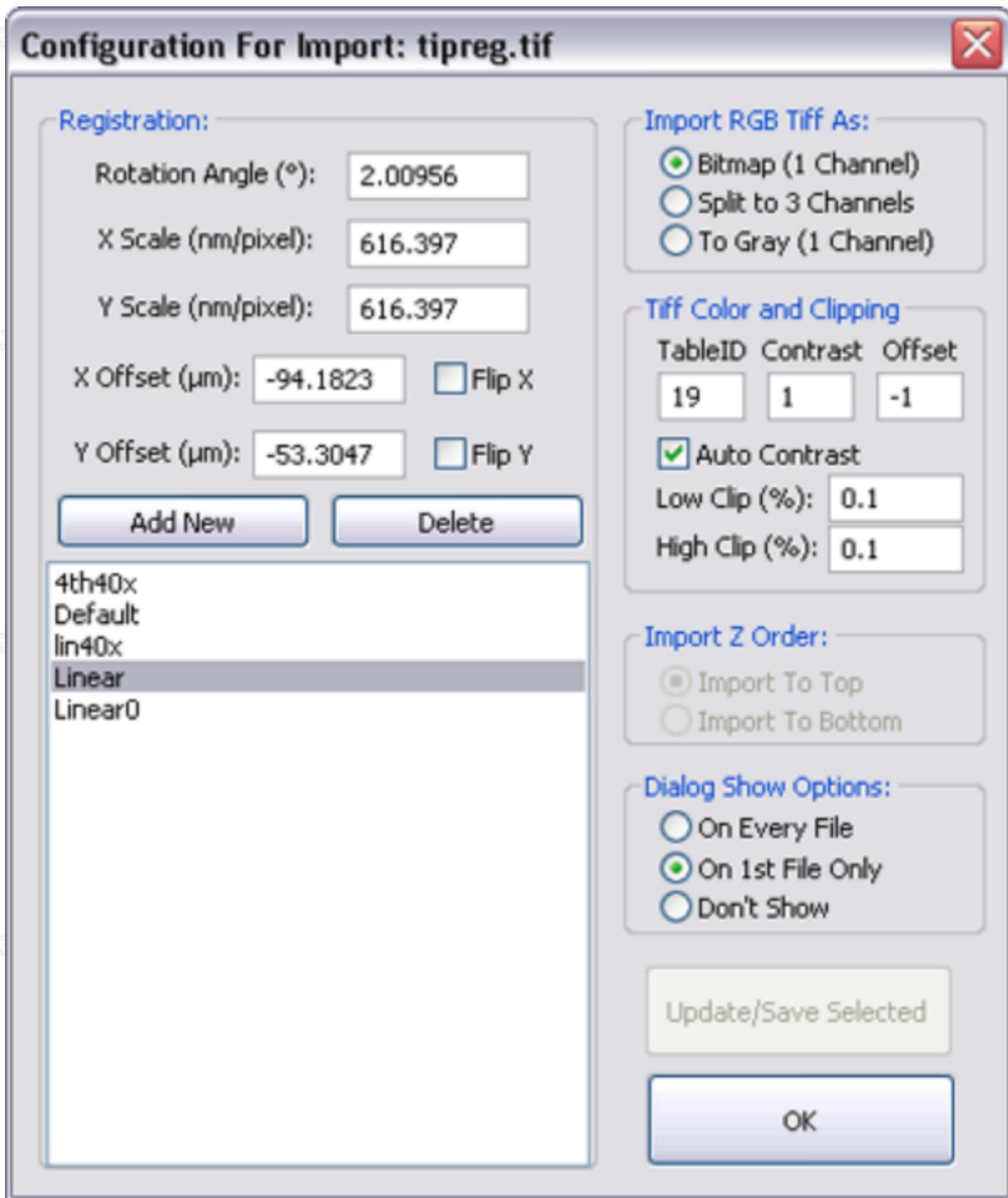


图3.2.1.1 导入设置窗口

用户可以调整如下参数：

- 旋转角度
- X方向标尺
- Y方向标尺
- X方向翻转
- X方向位置
- Y方向位置
- Y方向翻转

除此之外，用户还可以通过以下勾选框对图像进行调节：

1. 导入RGB Tiff图像参数：

- Bitmap：导入tiff图像显示为位图。

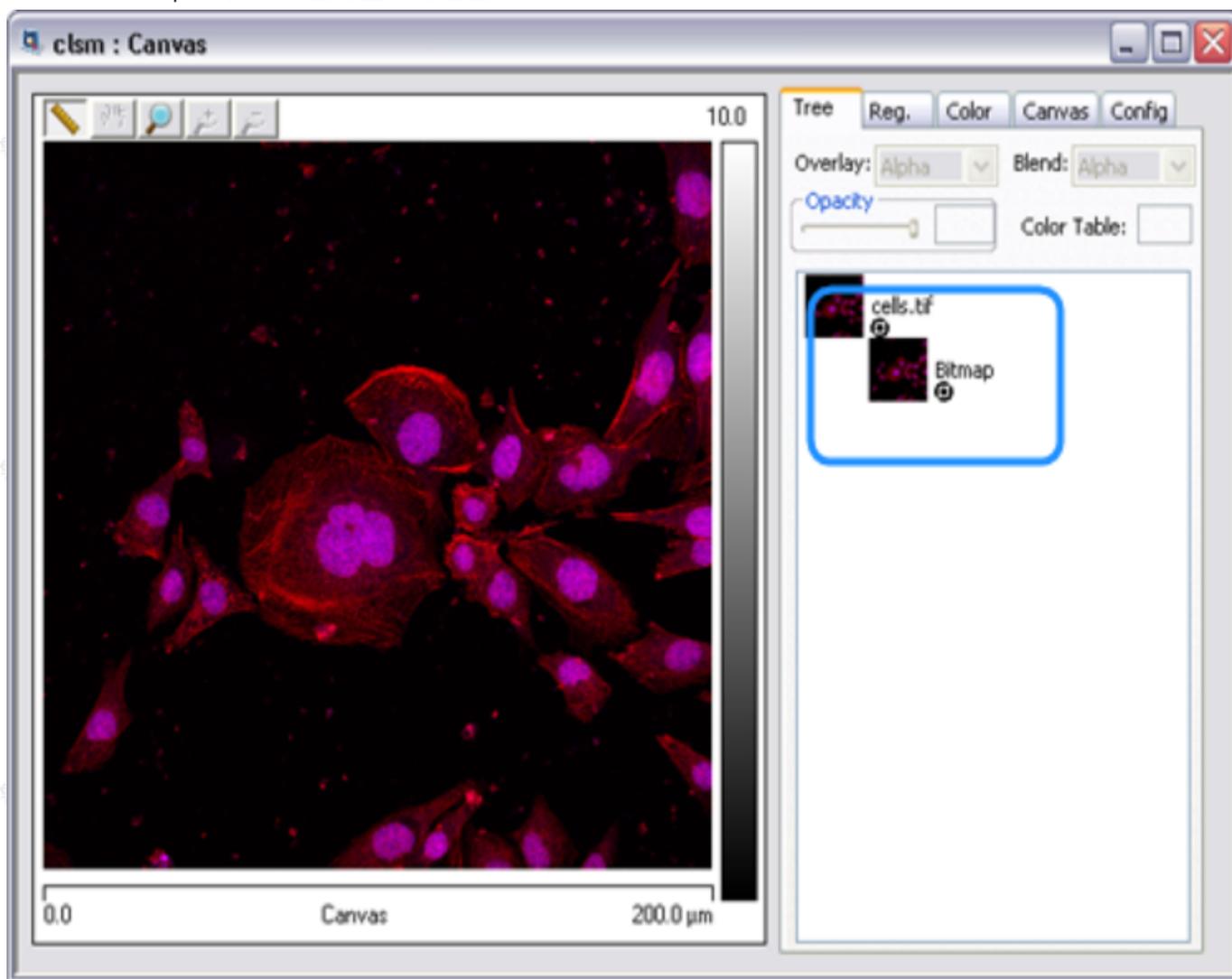


图3.2.1.2 Bitmap

- Split to 3 Channels：将tiff格式的RGB光学图像分为红、绿、蓝三个通道，运行用户独立调节每个通道。

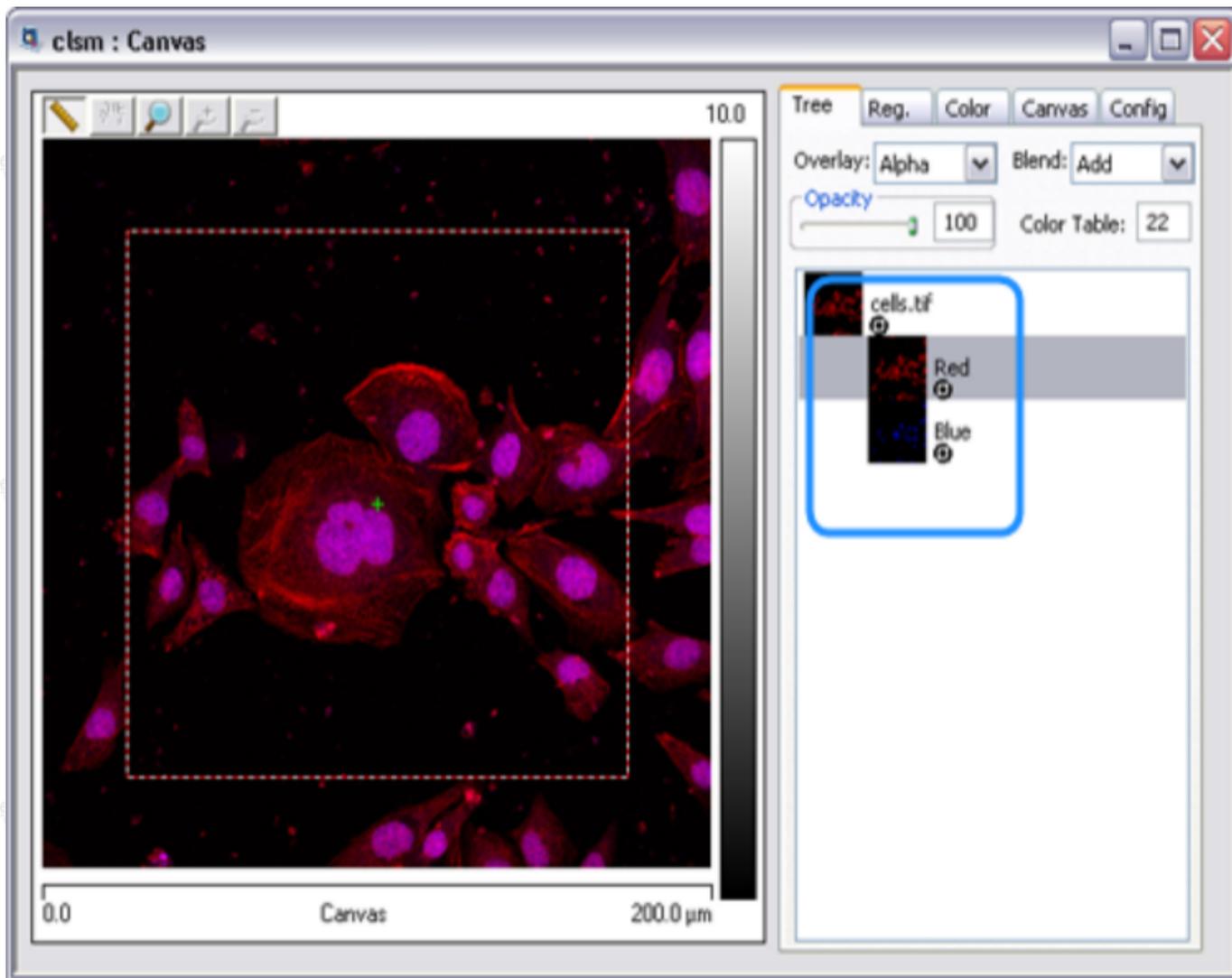


图3.2.1.3 三通道展示

- To Gray: 将tiff格式的图像导入为16位灰度图。

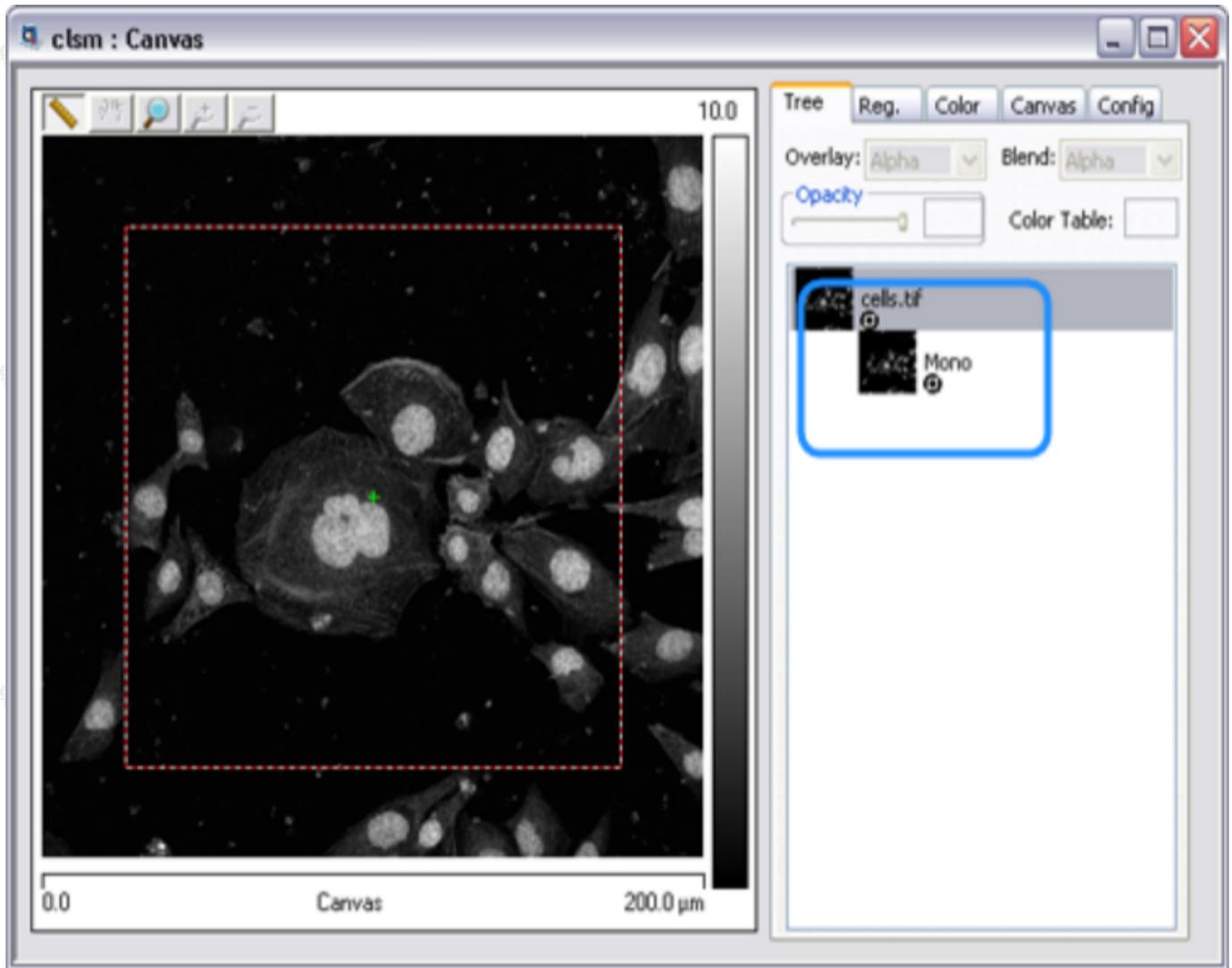


图3.2.1.4 灰度图

## 2. Tiff图颜色和剪裁参数：

- Color Table ID：所选的Nanoscope色标编号，可选值0 – 25。
- Contrast：图像对比度，可选值-10 – 10。
- Offset：图像色差，可选值-128 – 128。
- Auto Contrast：自动调节对比度。通过自动剪裁掉图像强度分析谱中的两端长尾分布（如图24、25所示），以优化对比度。

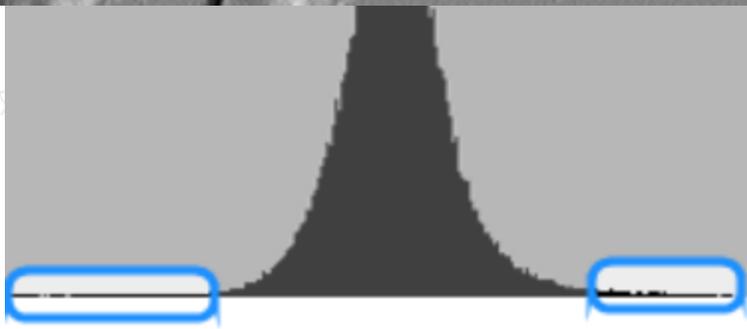
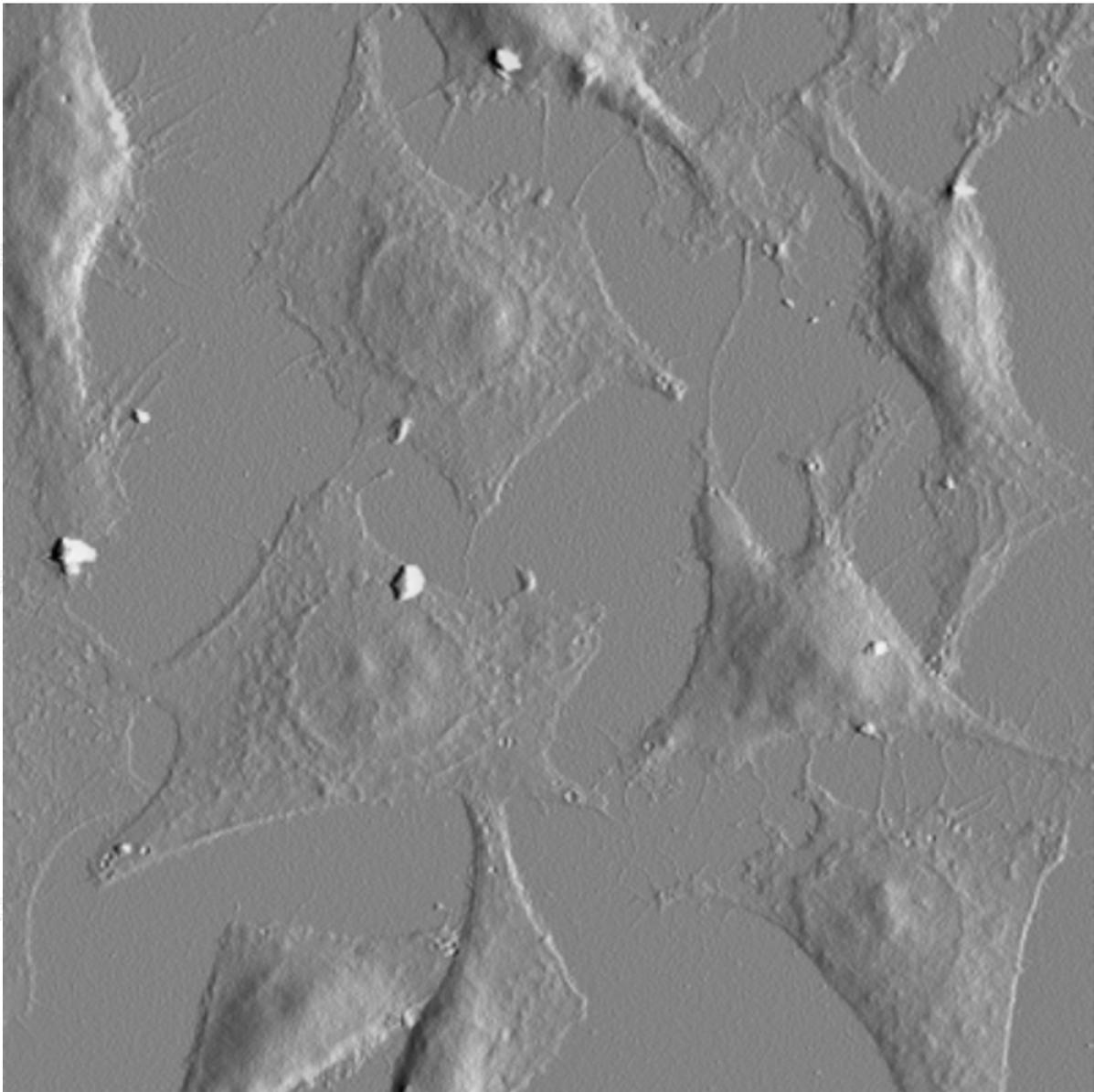


图3.2.1.5 原始tiff图像及强度分布

自动对比度控制会自动去除强度分布图中的长尾端，然后调节动态显示范围以最优化图像显示。

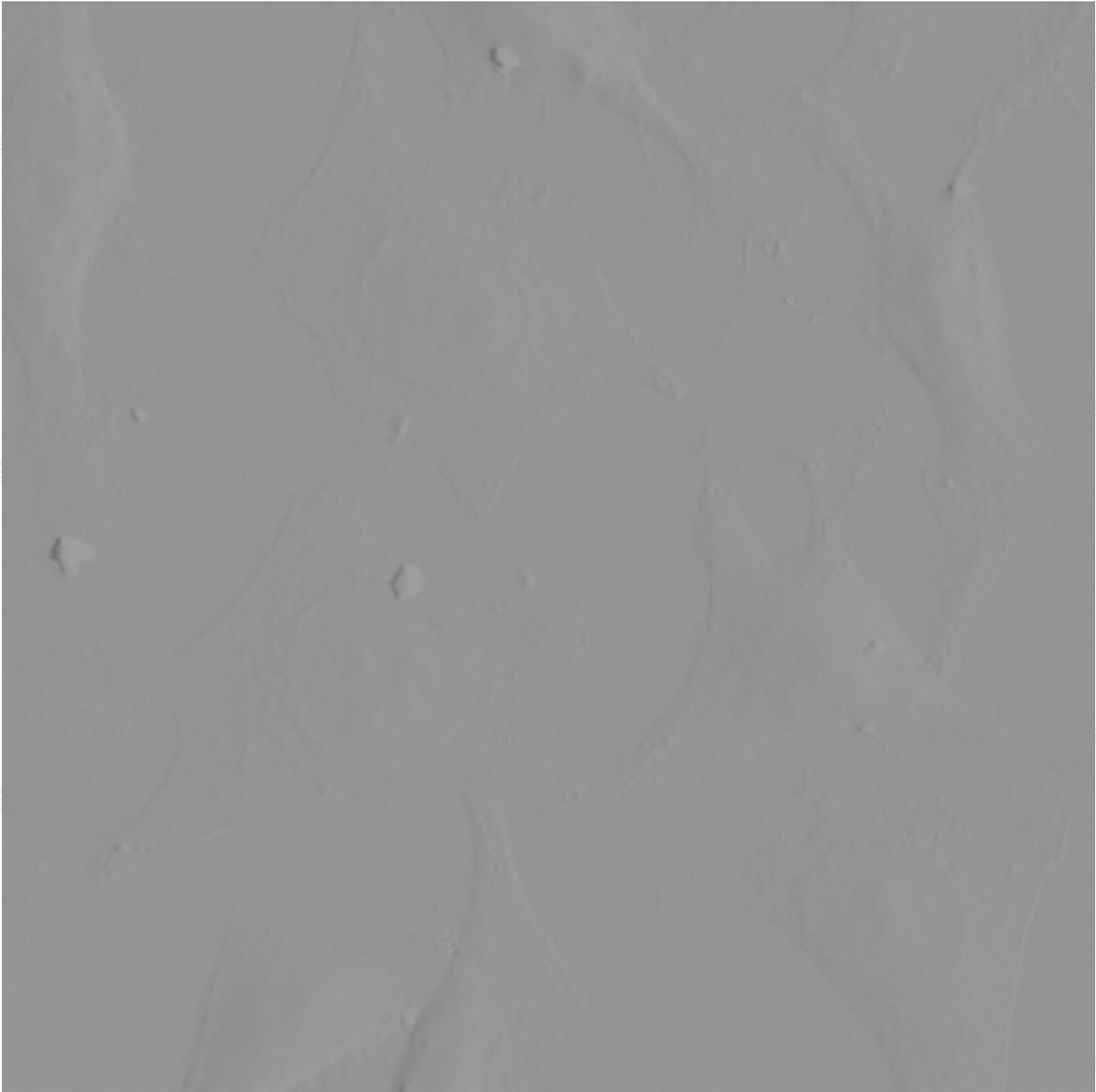


图3.2.1.6 原始tiff图像及强度分布

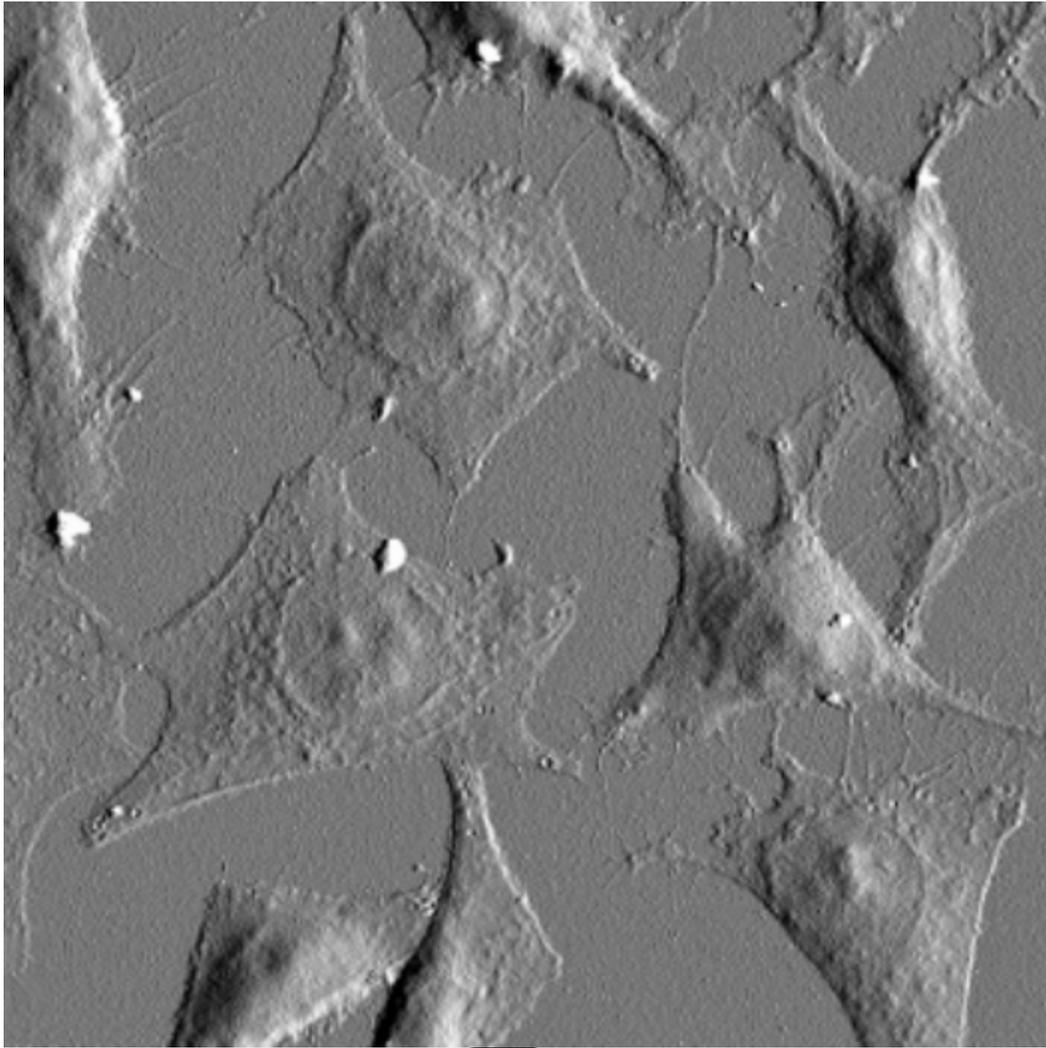


图3.2.1.7 自动调整后的图像及强度分布

### 3.3 感兴趣区域

用户可以自由创建多个感兴趣区域进行比较或导出可发表的图像。

#### 3.3.1 创建感兴趣区域

1.  使用直尺工具，在MIRO画板上画选框。

2.  点击创建感兴趣区域图标打开ROI窗口，在选框中能最多展示8层图像。叠置图像数目可以在

ROI配置设定窗口中的层数上限参数进行调节。

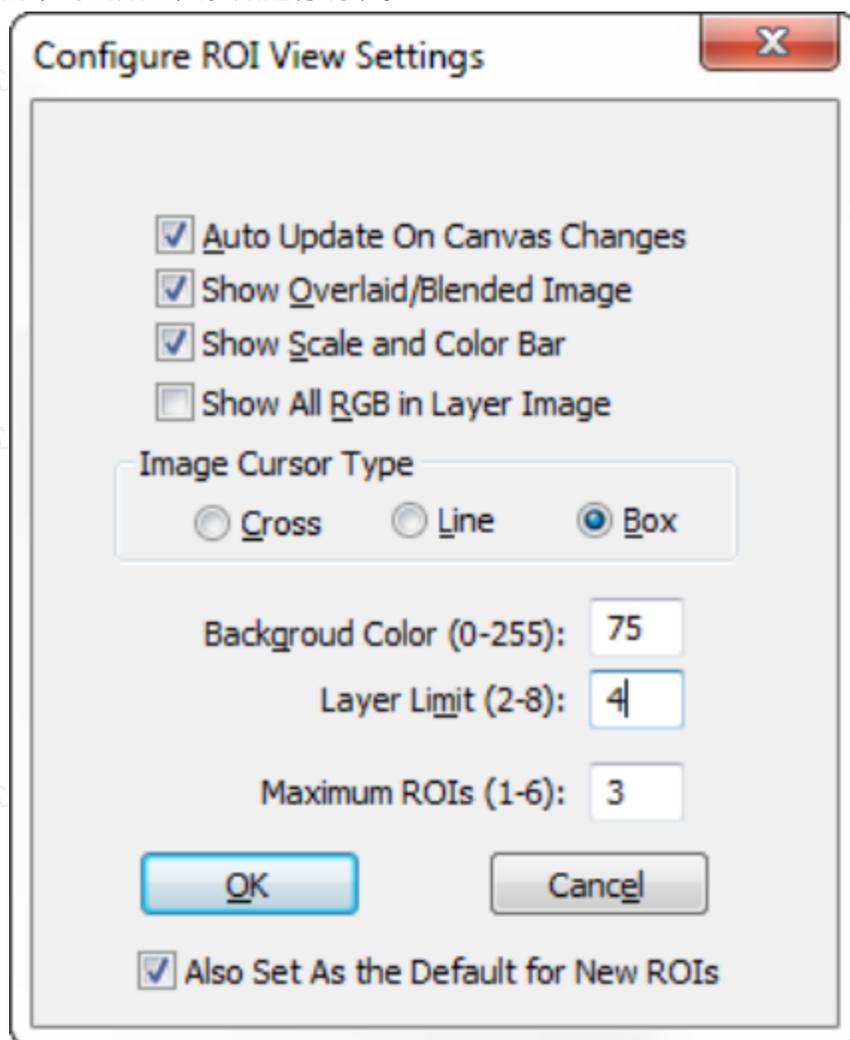


图3.3.1.1 ROI配置设定窗口

在MIRO序列树参数栏中在勾选Show/Hide按键，可以选择在ROI视窗中是否显示相应的图层。默认的最大ROI个数为1，用户可设置的该参数最大值为6。激活的ROI会在MIRO画板中用黄色虚线框高亮，未激活的为白色虚线框。

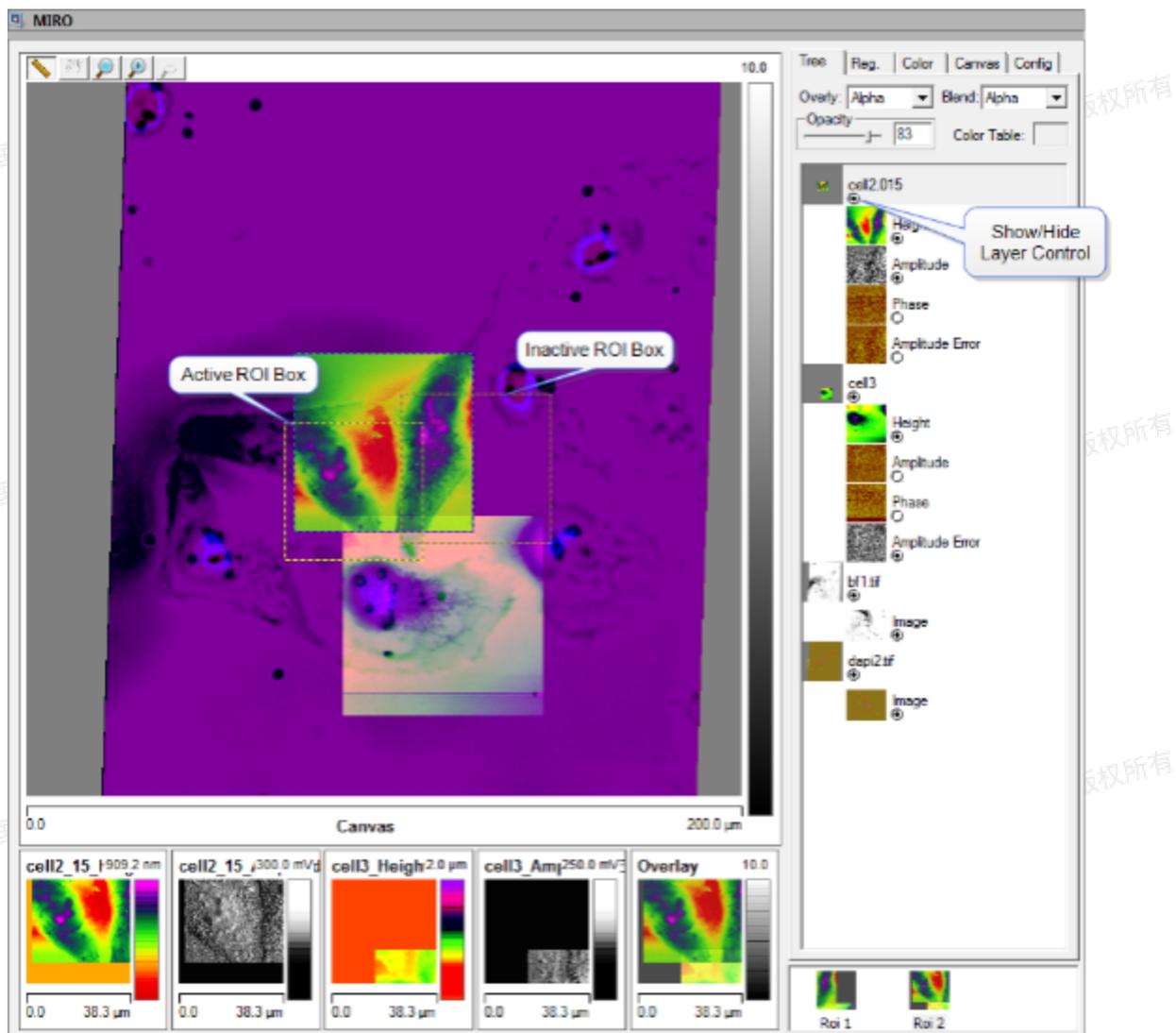


图3.3.1.2 激活ROI

默认的ROI视窗展示两个图层和其叠加图：

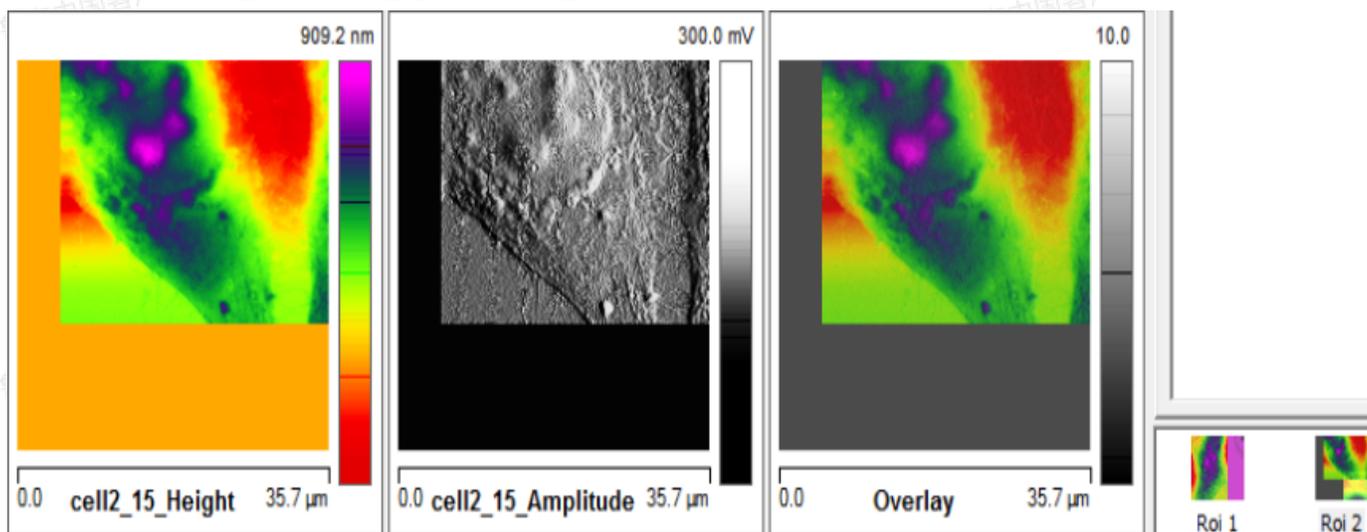


图3.3.1.3 默认ROI视窗

### 3.3.2 配置感兴趣区域

用户可以通过更改激活的黄色虚线框尺寸来调节ROI区域。点击配置ROI图标  或者在空白处单

击鼠标右键，在下拉菜单中选择Configure View，即可打开配置感兴趣图标设置窗口：

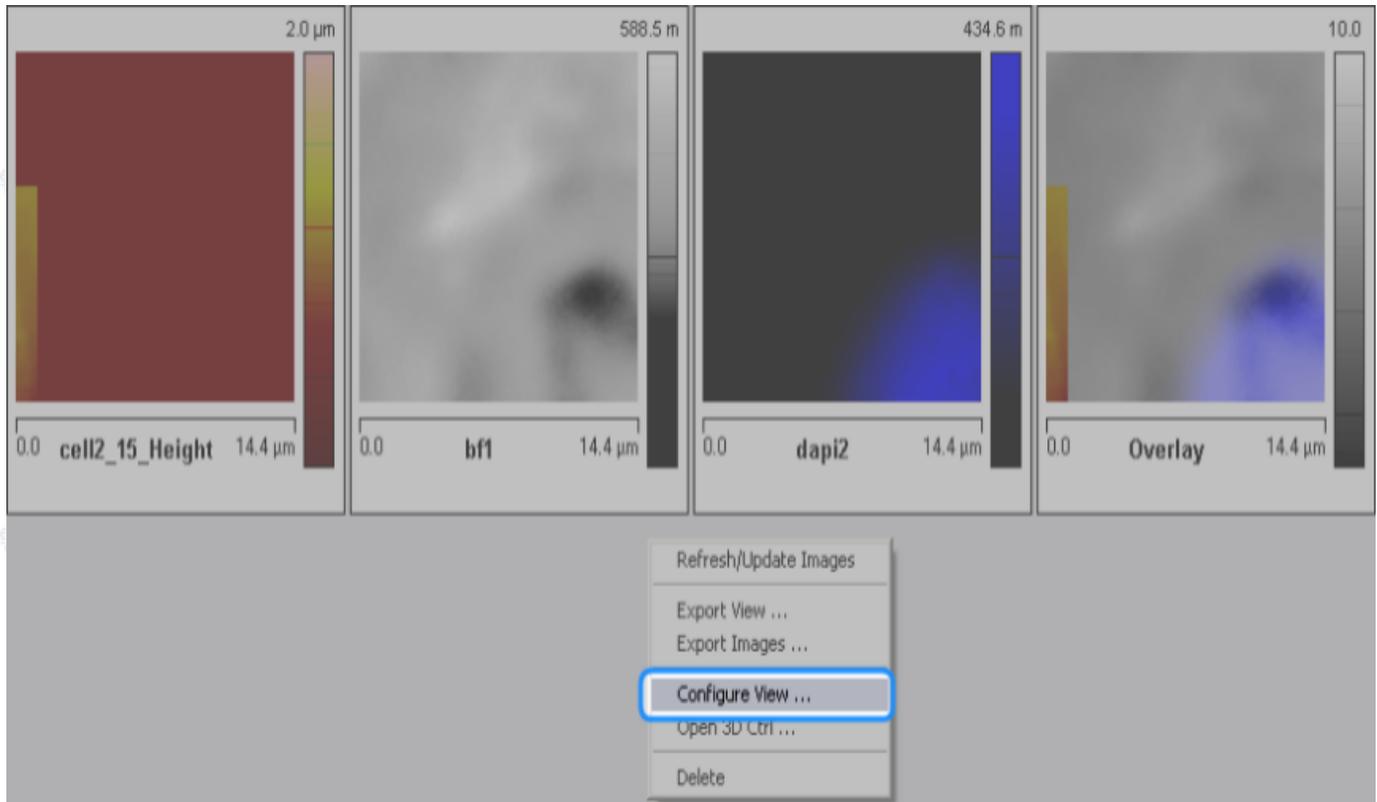


图3.3.2.1 配置ROI

用户可以通过更改激活的黄色虚线框尺寸来调节ROI区域。点击配置ROI图标  或者在空白处单

击鼠标右键，在下拉菜单中选择Configure View，即可打开配置感兴趣图标设置窗口  ：

- Auto Update On Canvas Change: 激活后，用户在MIRO画板做改动时ROI显示会自动更新。取消勾选后，ROI显示会冻结。用户可以利用这个功能来实现改变画板时保持ROI显示不变。勾选该选项框后（或在右键下拉菜单中选择Refresh/Update Images），即可实现ROI显示更新。
- Show Overlaid/Blended Image: 勾选后，在MIRO画板窗口中会显示叠置后的最终图像。
- Show Scale and Color Bar: 勾选后，显示ROI的尺寸、色标和图层类型。

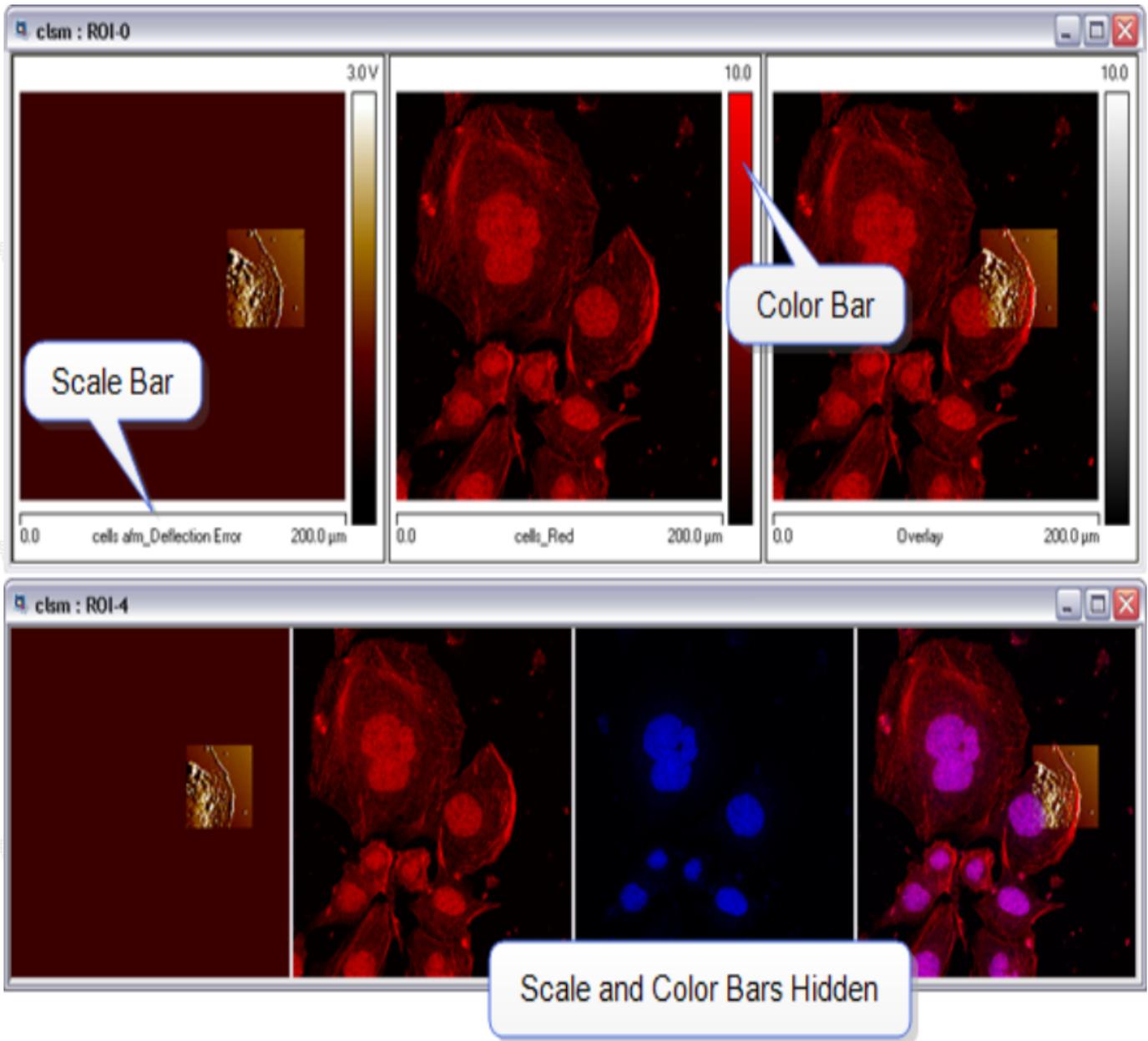


图3.3.2.2 设置ROI

- Show All RGB in Layer Image: 点击后，不论颜色参数栏设置如何，图层以红绿蓝（RGB）显示。
- Image Cursor Type: 图像游标类型，可选水平线、游标线或选框（默认为选框），游标会出现在ROI窗口中的所有图像上。
- Background Color: 背景颜色，设置ROI中无图像的区域为最暗（0）或最亮（255）。
- Layer Limit: ROI窗口中能显示的最大图层数，最大为8。
- Maximum ROIs: ROI的最大数目。
- Also Set As the Default for New ROIs: 勾选后，将当前参数设定为新ROI设置的默认参数。

点击OK保存更改或者Cancel放弃更改，然后退出ROI窗口。保存MIRO（.iro）文件时ROI也会保存下来，当再次打开保存的MIRO文件时，ROI会自动弹出。

### 3.4 调整图像

用户在MIRO画板上可进行图像调整，可调节包括对比度、颜色、透明度等参数。除了美学方面的考虑，这些参数调节可以方便用户确证AFM图像与光学显微镜图像是否完美重叠：先选好一个AFM图像通道（通常使用Error通道），调节好参数，然后设置其透明度为0，最后慢慢增加直到能看清AFM图像。

完成光学显微镜图像调整后， 点击该图标，保存注册文件。

该方法另一个很重要的应用是将两个AFM图像通道叠置（例如amplitude error和phase），然后通过调节透明度，交替检查两个通道。

获得AFM和光学显微镜图像的高精度叠置有以下两种方法：

- 在注册参数栏中调整参数数值使AFM图像和光学显微镜图像完美叠置。
- 用鼠标在画板上拖拽、旋转或者缩放图像。

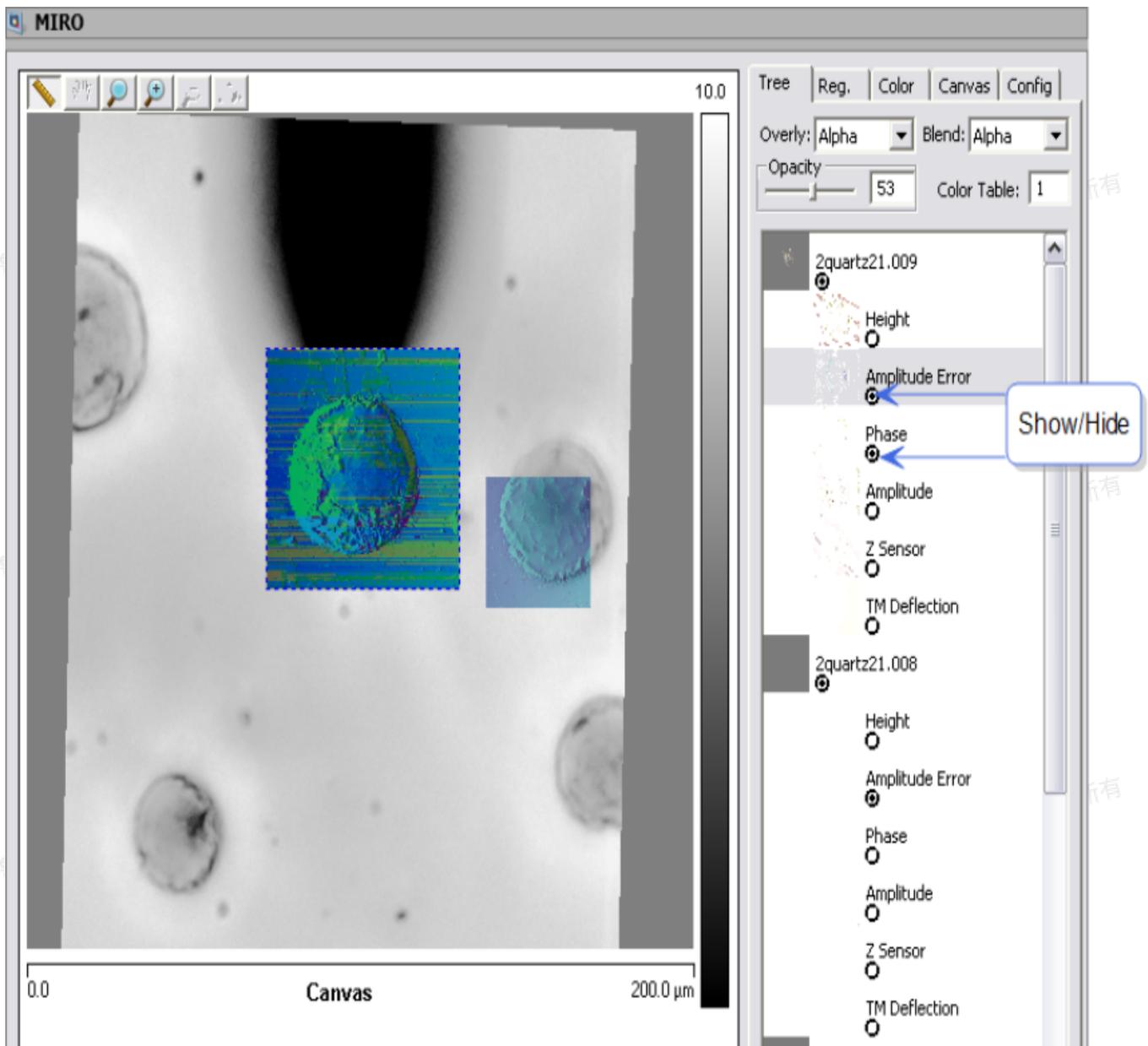
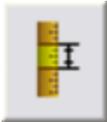


图3.4.1 MIRO图像调整窗口

### 3.5 移动图像

点击注册窗口中的注册参数调节步长图标 ，即可打开参数和步长调节窗口：

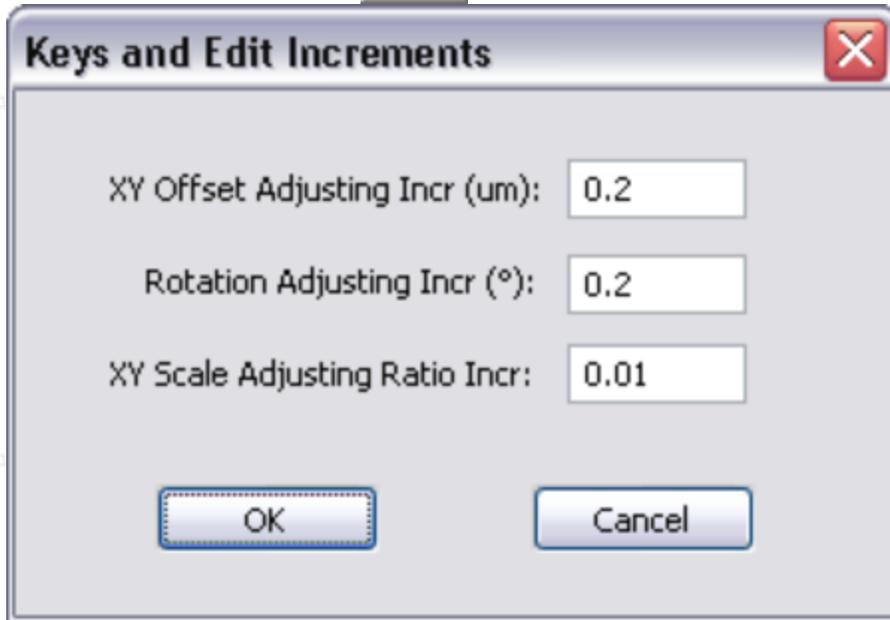


图3.5.1 参数和步长调节窗口

更改XY Offset Adjusting Incr, Rotation Adjusting Incr, 和XY Scale Adjusting Ratio Incr, 点击OK。

在序列树窗口中选择想要操作的图像后, 它会被蓝色虚线框高亮, 接着就可以在注册窗口中进行修改。如想独立修改XY参数, 取消勾选X-Y Size。

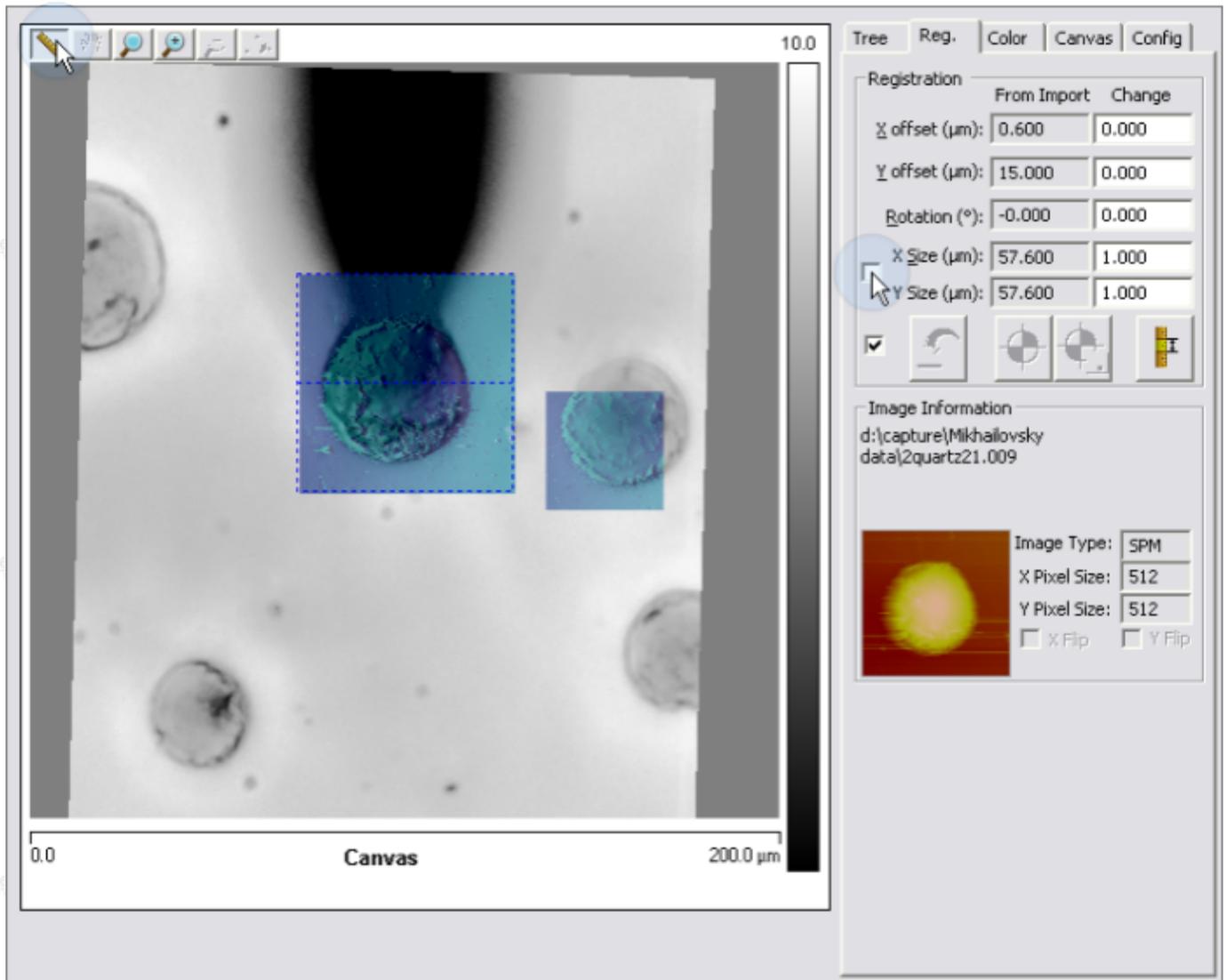


图3.5.2 图像移动实例

按住Shift，将鼠标移至图像一个角落，按住鼠标左键拖拽即可旋转图像。

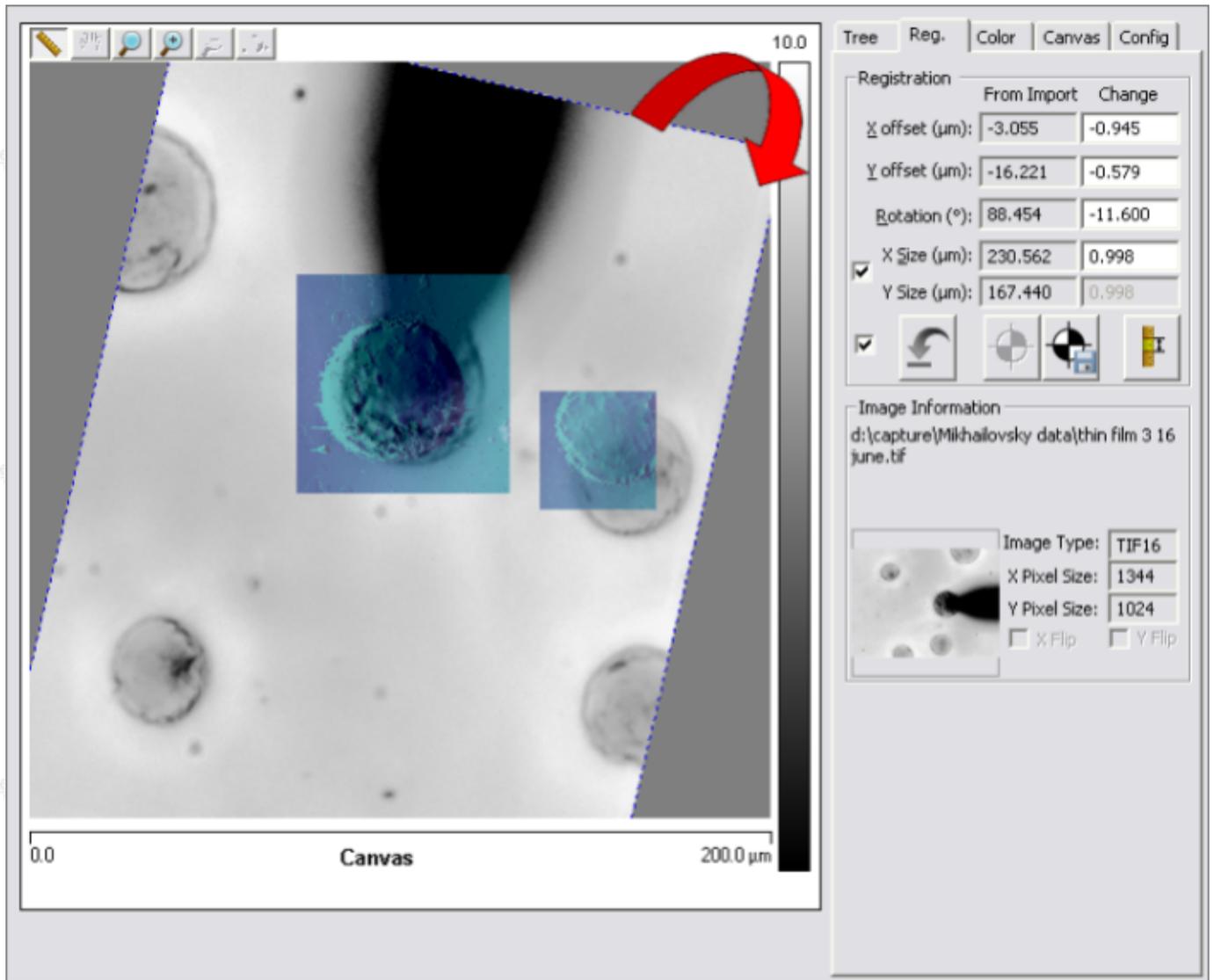


图3.5.3 旋转操作

仅按住鼠标左键拖拽即可平移图像。

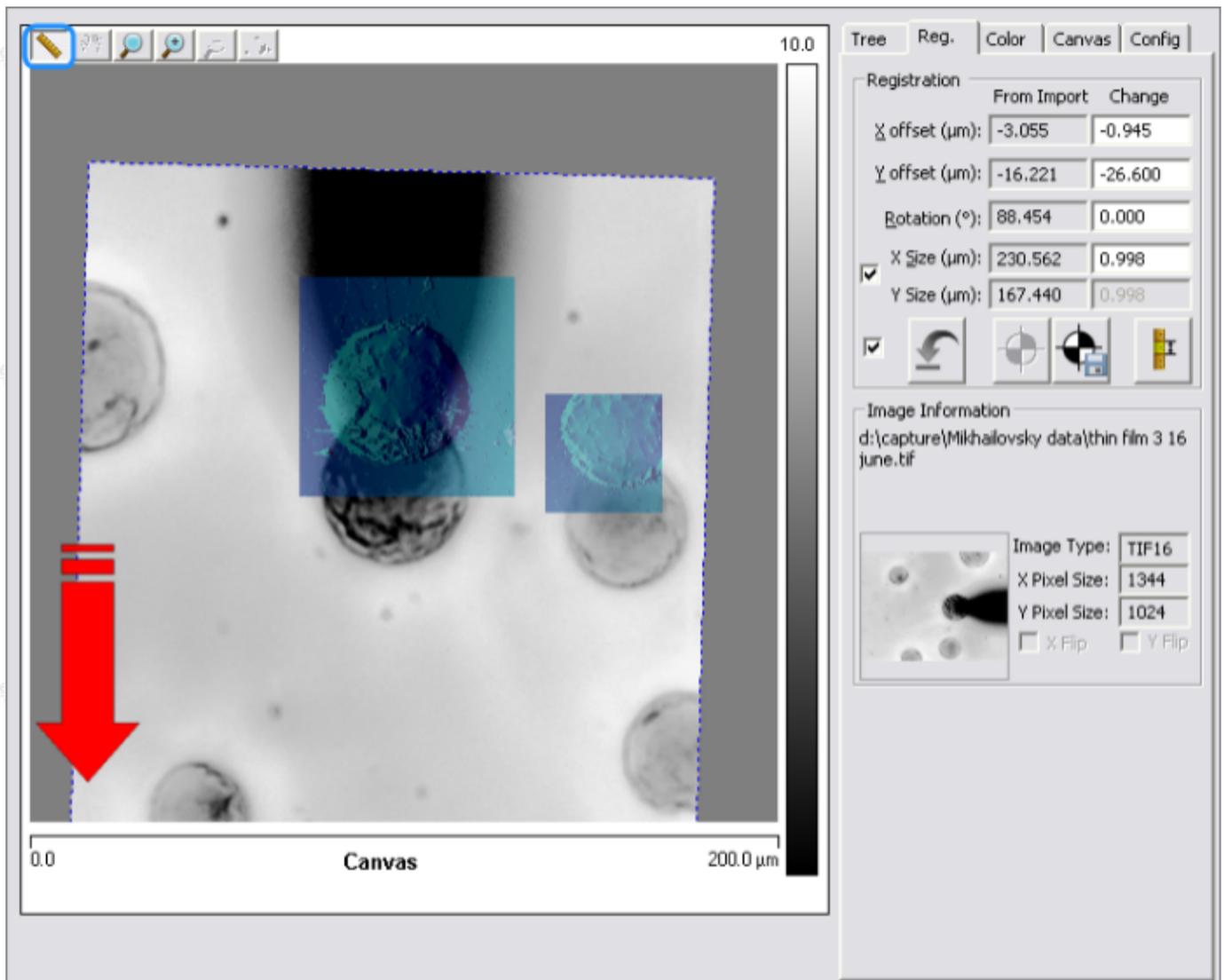


图3.5.4 平移操作

将鼠标移至图像一边，按住鼠标左键拖拽即可缩放图像。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

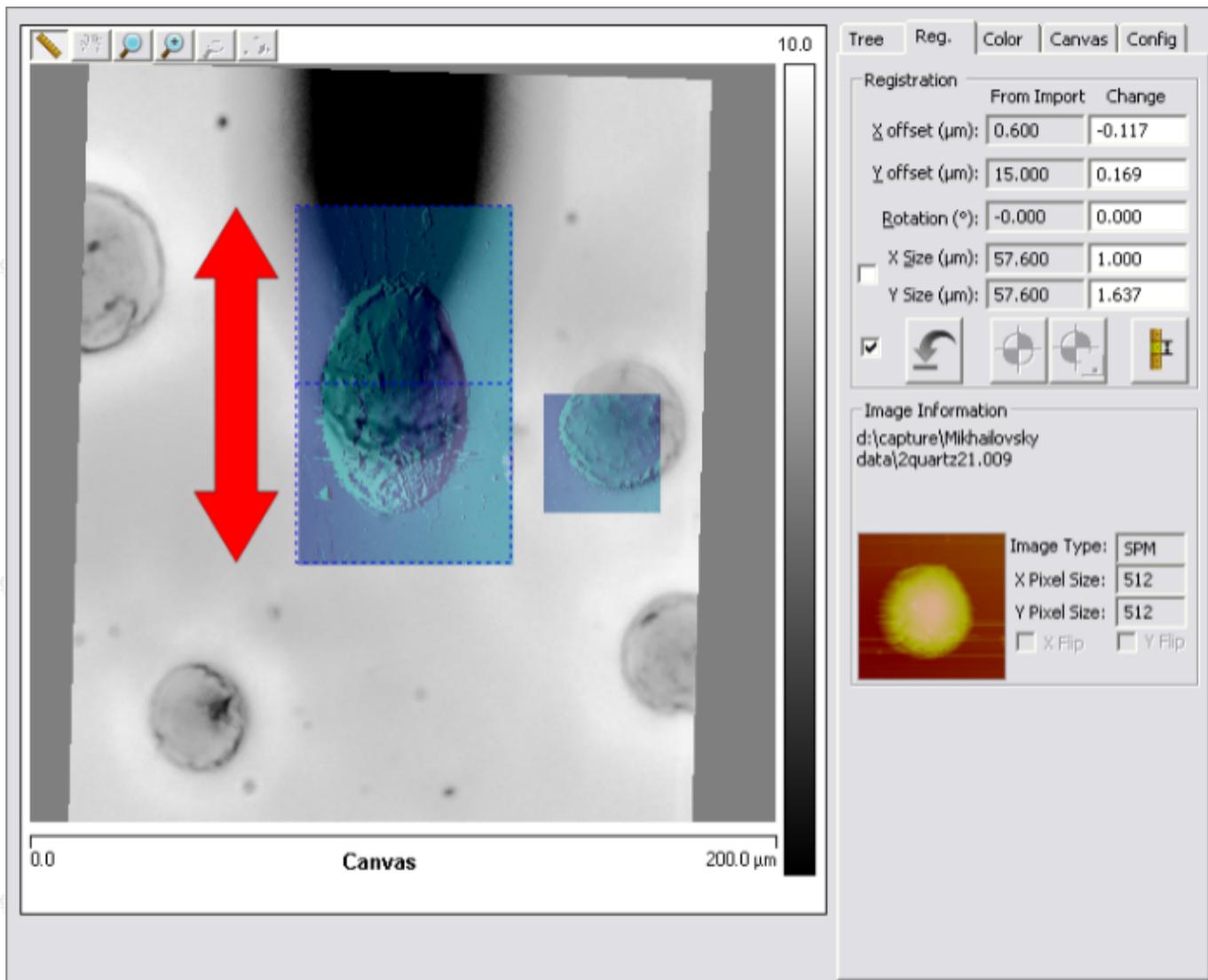


图3.5.5 拉伸操作

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

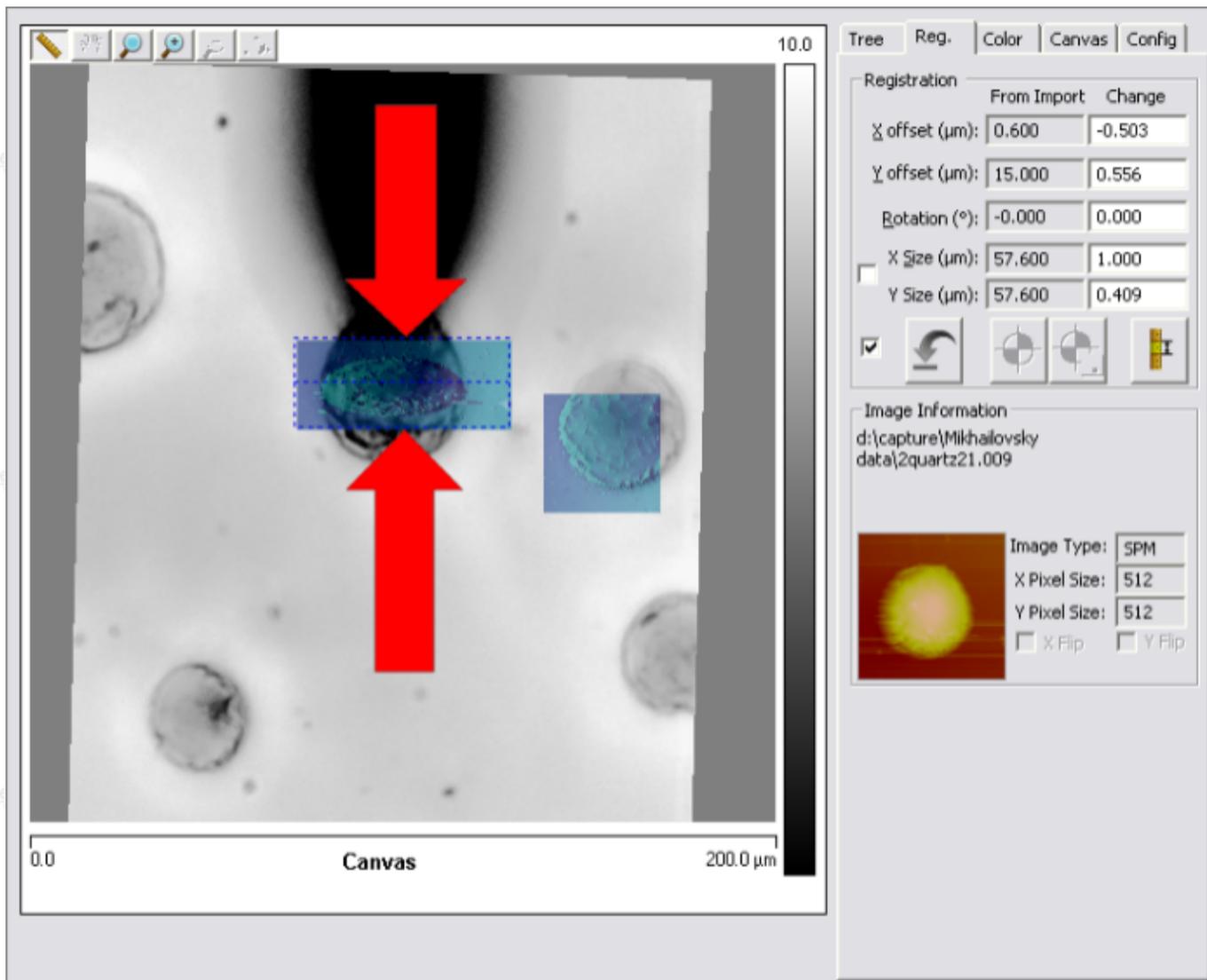


图3.5.6 收缩操作

### 3.6 撤销/重置操作

撤销 、重置  操作允许用户对以下操作进行撤销或重置：

- 图像注册，包括位置、大小、旋转角度、平移、缩放等。
- 图像颜色：包括叠置类型、透明度、对比度、RGB色标等操作。
- 图层或通道选择。

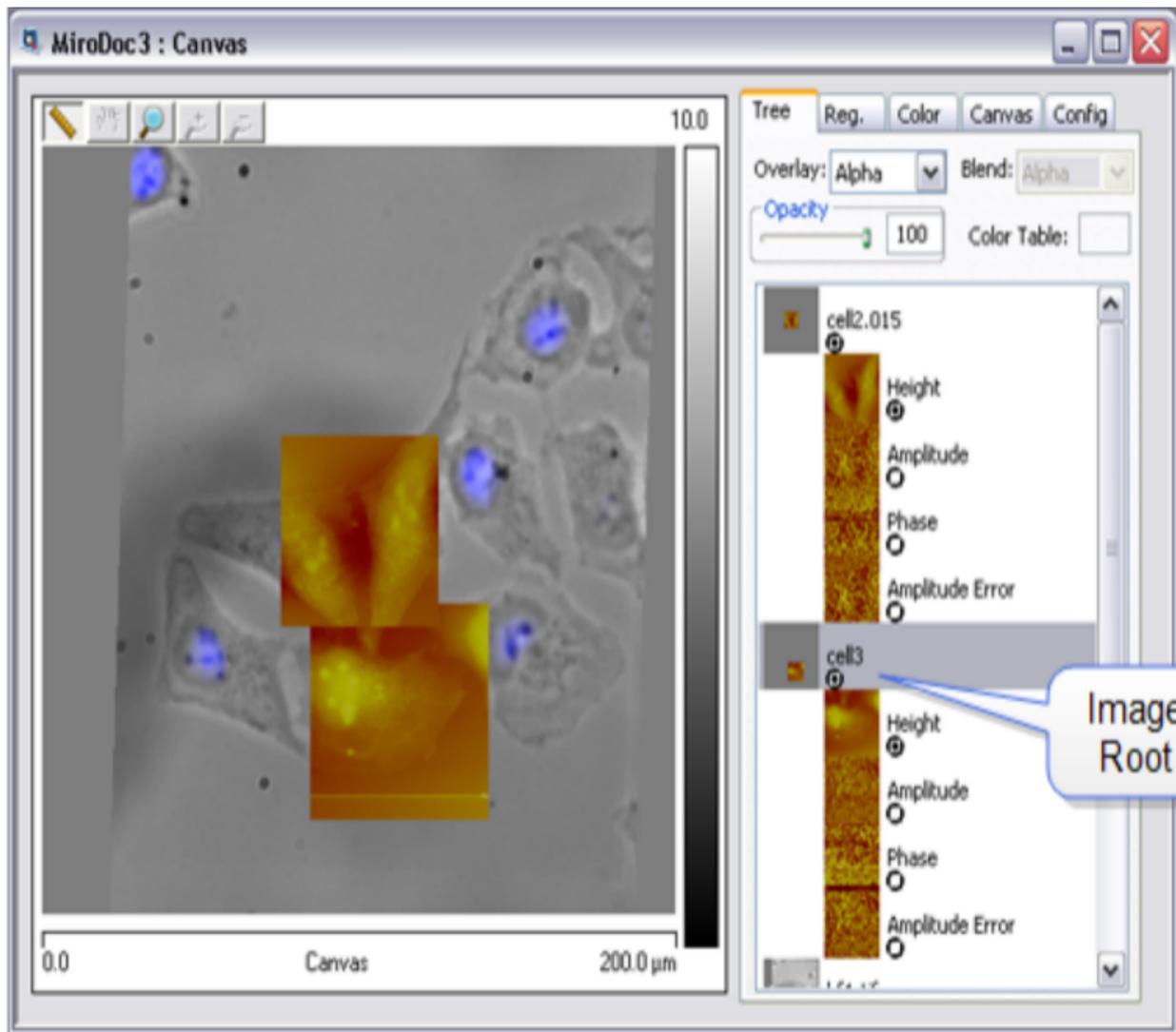


图3.6.1 撤销/重置操作

### 3.7 MIRO导出/导入

在MIRO窗口边缘点击鼠标右键，在右键下拉菜单中可选择导出/导入MIRO文件或导出MIRO窗口。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

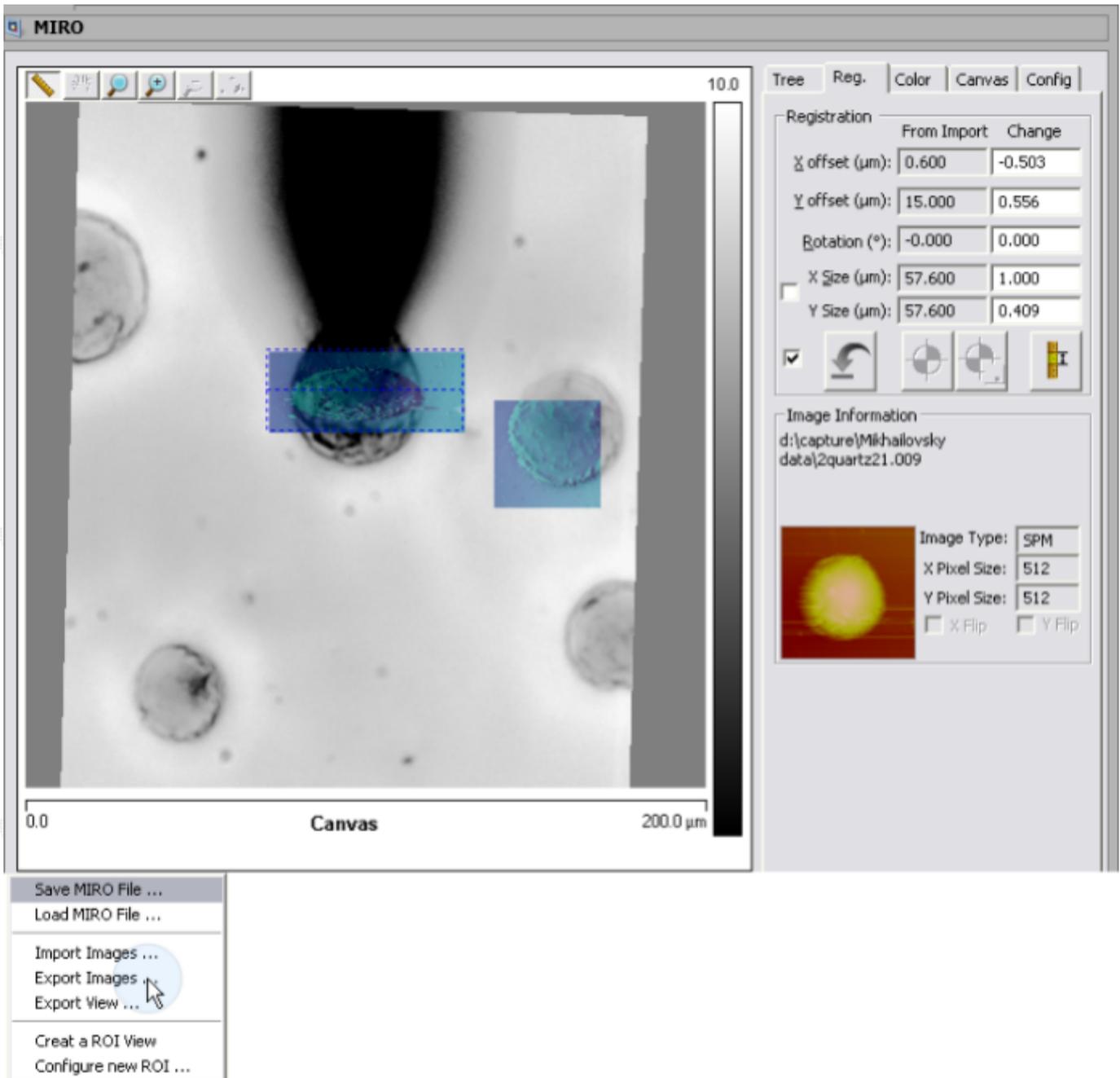


图3.7.1 MIRO导出/导入窗口

Save MIRO File功能，将整个图像序列树保存为.iro文件，该文件可以将来使用Load MIRO File指令或在Nanoscope浏览窗口双击进行导入。

- Import Images功能，用来将图像放置于MIRO画板上。
- Export Images功能，用来将ROI导出。
- Export View功能，将整个MIRO画板导出为JPEG文件。

### 3.7.1 从画板导出

点击导出图像按钮，打开从画板导出窗口：



图3.7.1.1 从画板导出窗口

该设置中三种导出选项：

1. Export the View

将整个MIRO窗口导出为JPEG文件：

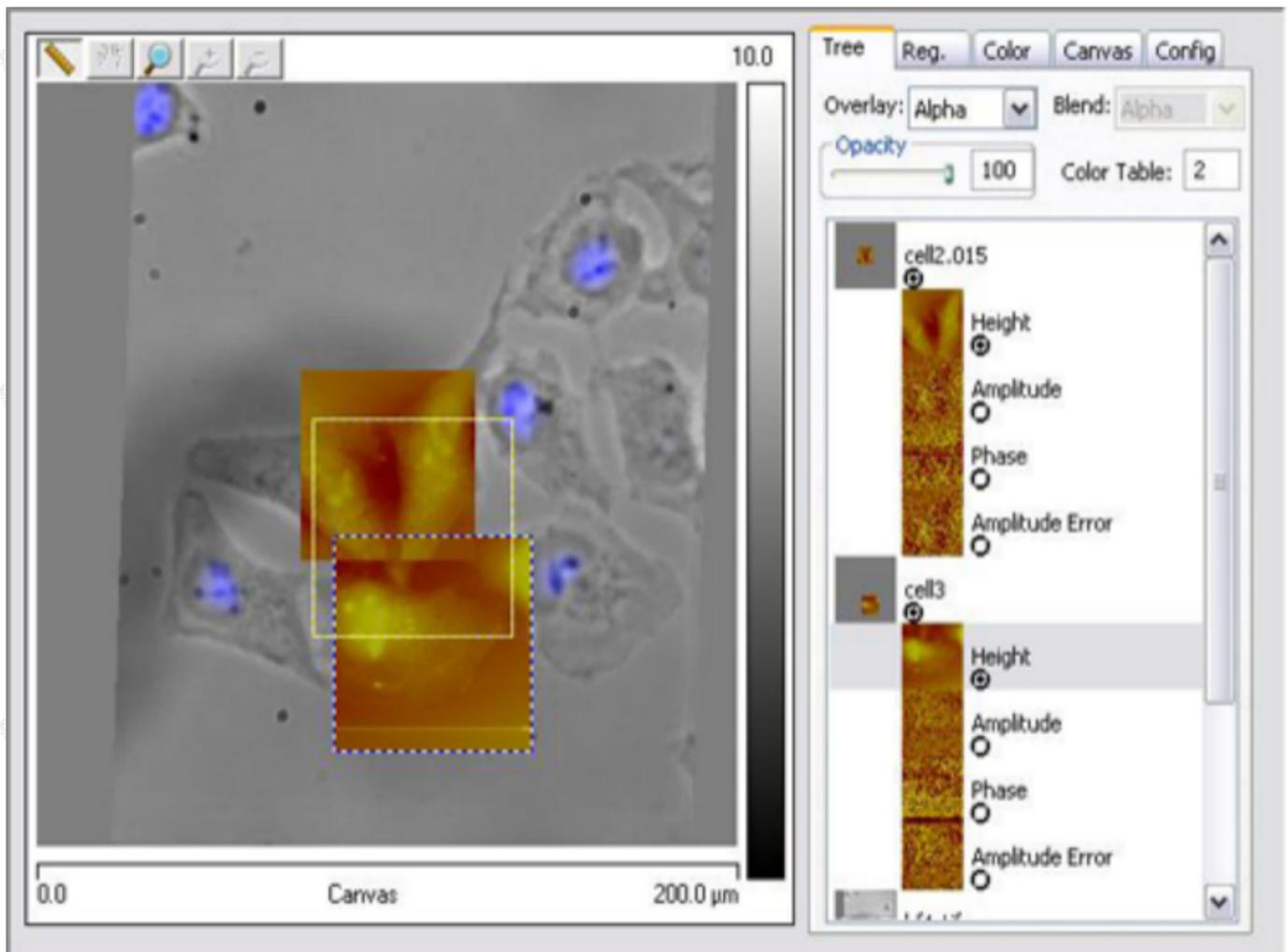


图3.7.1.2 导出窗口

## 2. Export the Canvas Overlay

将MIRO画板上的图像导出为单层的图像文件（Tiff, BMP, PNG或者GIF格式）。

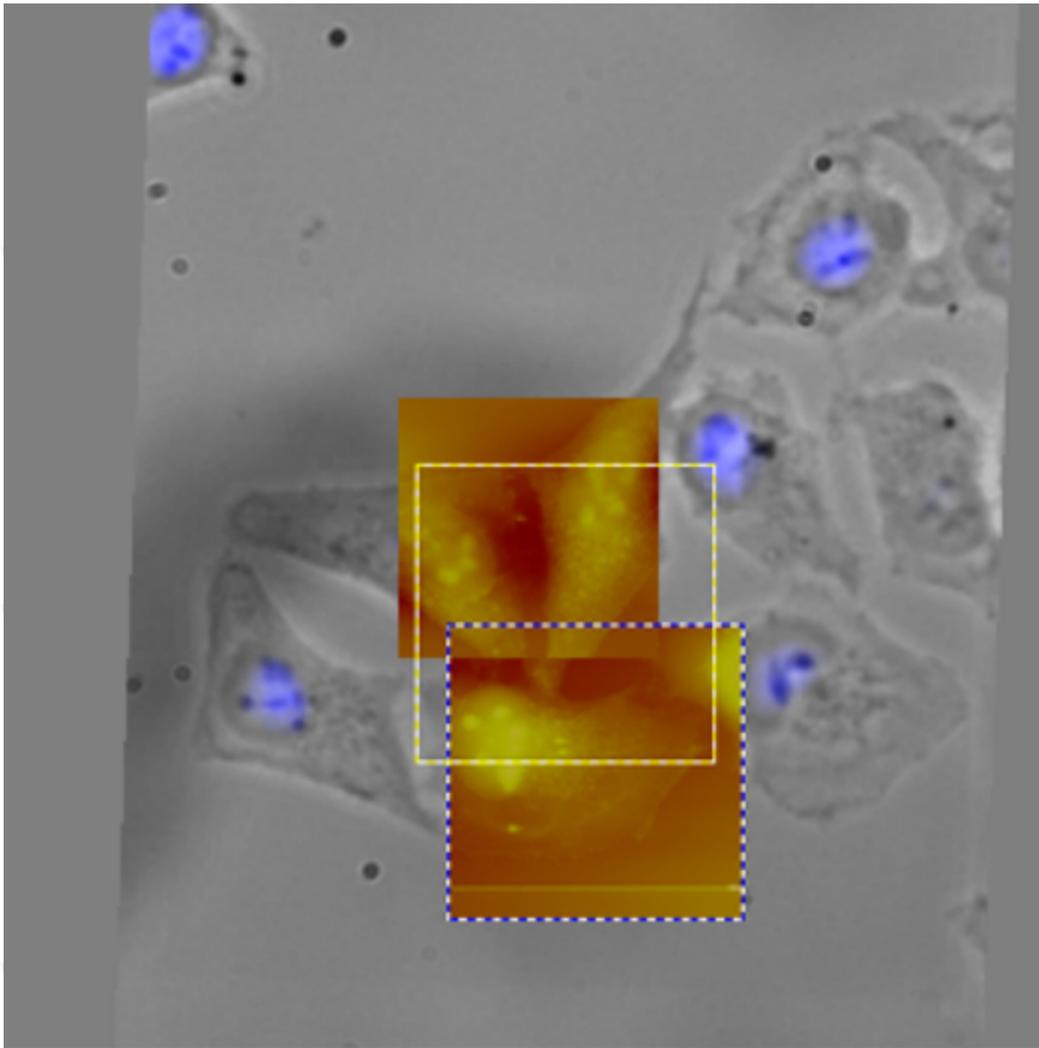


图3.7.1.3 导出画板

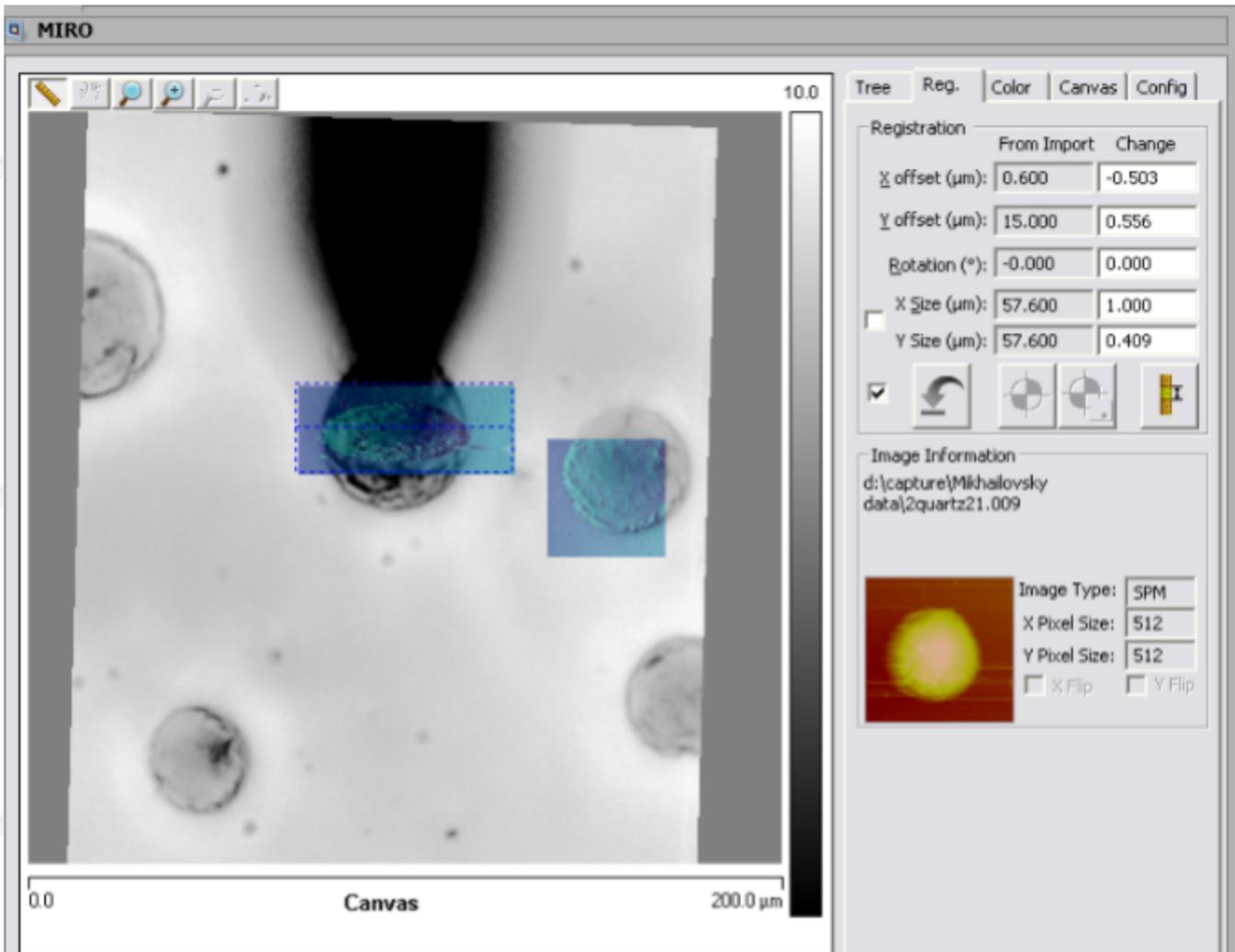
### 3. 导出图层

将选定区域的图层按优先级导出为图像文件，使用Show/Hide按键控制哪些图层会被导出。通过更改尺寸参数可以调节导出图像的尺寸。图像插值模式可以通过配置参数栏中的插值模式设定更改。导出选项包括：

- 导出为8位的RGB未压缩Tiff文件
- 导出为16位灰度未压缩Tiff文件
- 导出为.spm文件

### 3.7.2从ROI导出

ROI窗口激活时，点击导出图像按钮，或者在界面边缘点击右键，从右键下拉菜单中选择导出图像，即可打开从ROI导出窗口：



- Save MIRO File ...
- Load MIRO File ...
- Import Images ...
- Export Images
- Export View ...
- 
- Create a ROI View
- Configure new ROI ...

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

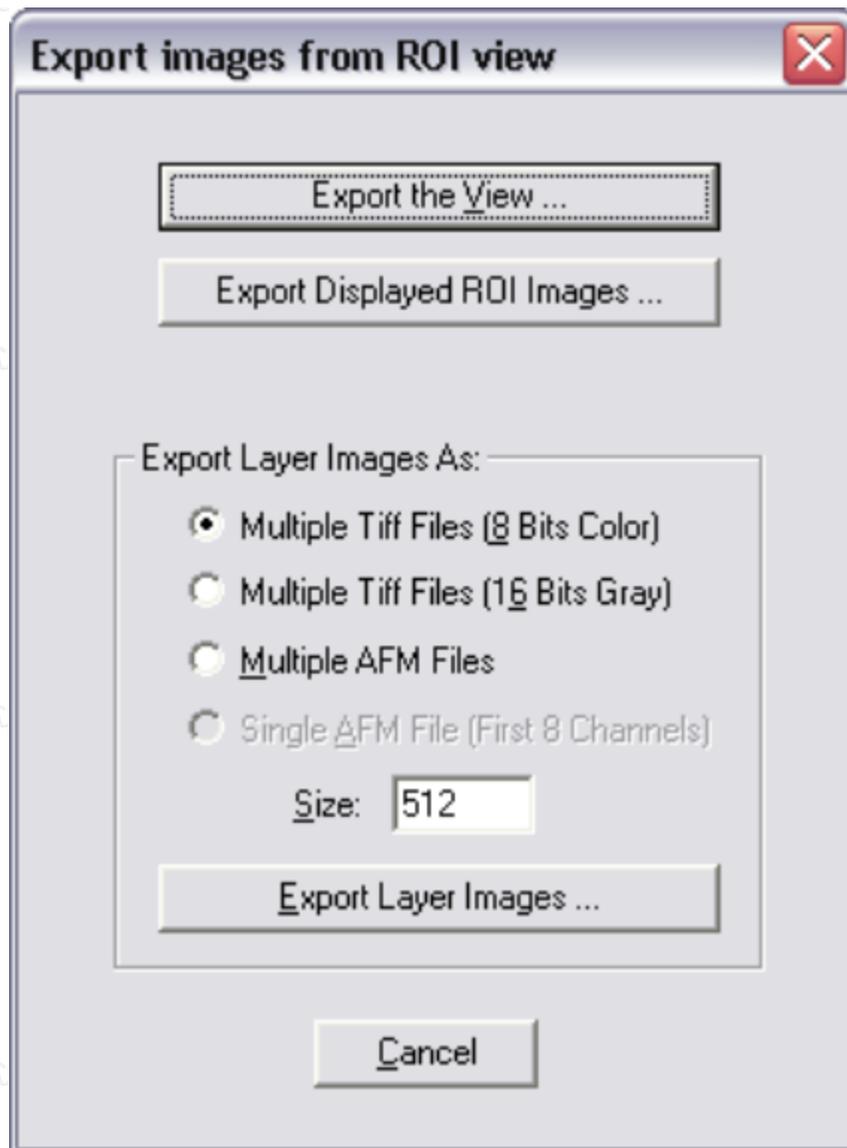


图3.7.2.1 从ROI导出窗口

该设置中三种导出选项：

1. Export the View

将整个ROI窗口导出为JPEG文件：

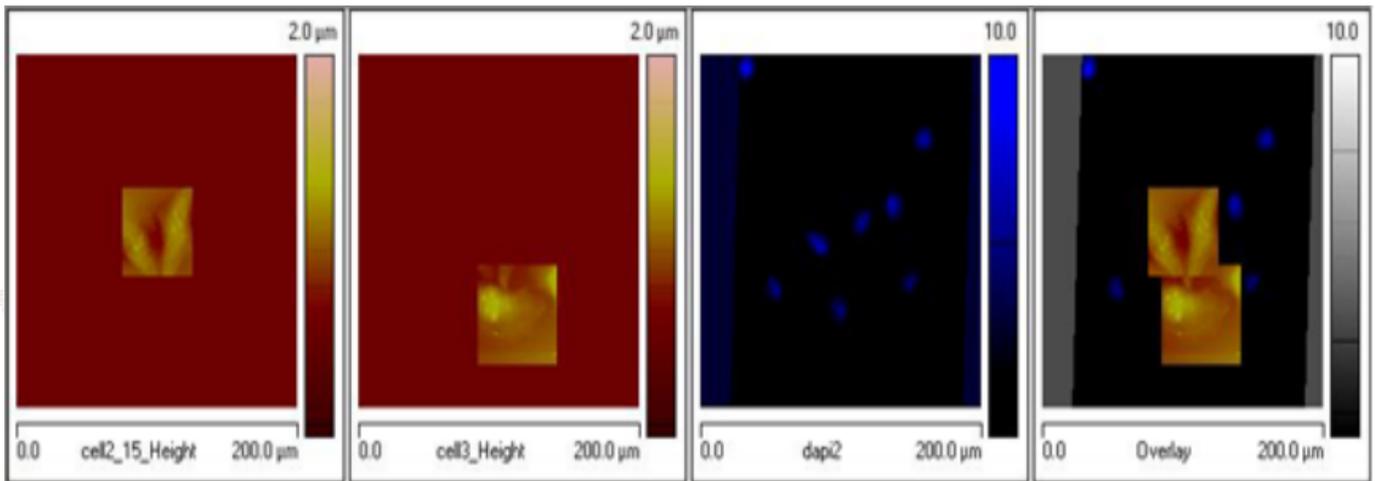


图3.7.2.2 导出ROI窗口

## 2. Export Displayed ROI Images

将ROI中的图像导出为原尺寸的单层图像文件（Tiff, BMP, PNG或者GIF格式）。

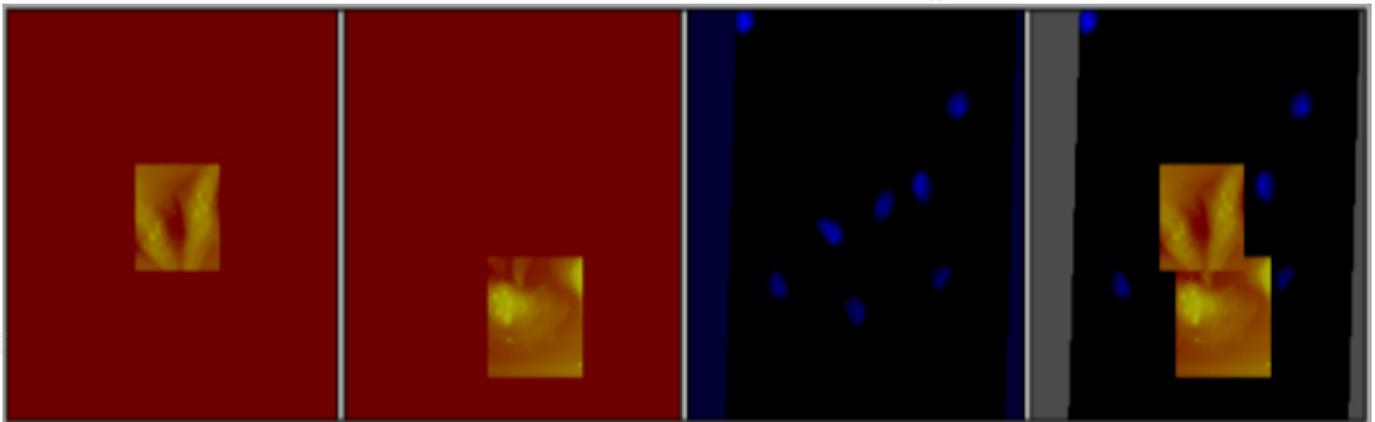


图3.7.2.3 导出ROI图像

## 3. 导出图层

将ROI的图层按优先级导出为图像文件，多层图像可以导出为单独的多个文件或者一个多通道文件。通过更改尺寸参数可以调节导出图像的尺寸。图像插值模式可以通过配置参数栏中的插值模式设定更改。导出选项包括：

- 导出为8位的RGB未压缩Tiff文件
- 导出为16位灰度未压缩Tiff文件
- 导出为.spm文件

# 4 MIRO总结

## 1. 导入：可导入下列文件类型

- Tiff
- BMP
- JPG (JPEG)
- PNG

- GIF
- 2. 画板：画板界面可进行如下操作
  - 放大
  - 拖拽
  - 更改尺寸
  - 更改比例
  - 平移
  - 更改像素点大小
  - 更改文件序列树
- 3. 叠置和颜色控制：
  - 切换序列树中文件的显示或隐藏
  - 更改序列树文件序列
  - 更改图像的透明度
  - 更改图像的色标或对比度和色差
  - GB开启关闭控制
  - 插值法：双线性法或临近数据点法
- 4. 图像注册：
  - 使用游标选中后即可进行拖拽、缩放或旋转图像来更改图像注册
  - 注册参数栏中参数可手动编辑
  - 可以通过导入注册参数来更新或保存非AFM图像的注册文件
- 5. 导出：
  - 可导出画板窗口，导出格式为Tiff, BMP, JPG, PNG或者GIF图像
  - 可导出选定通道
  - 可导出画板界面
- 6. 感兴趣区域（ROI）：
  - 最多可选5个RO
  - 尺寸可更改
  - 自动更新和冻结功能
  - 显示或隐藏坐标尺和色标
  - 配置背景颜色
  - 同步游标
  - 在画板中显示ROI
- 7. ROI导出：
  - 导出为JPEG文件
  - 导出为8位Tiff文件
  - 导出为16位Tiff文件
  - 以原尺寸和颜色导出
  - 导出为多通道AFM文件
- 8. 撤销/重置：可对如下操作进行
  - 无限次图像级别更改

- 图像注册
- 图像颜色更改
- 图册或通道选择的更改

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

# 接触共振离线分析

## 1 介绍

基于AFM的接触共振方法用来获得样品在纳米尺度下的弹性模量和粘弹性性质。实验中，AFM探针悬臂通过针尖与样品接触，在一个已知力的作用下，悬臂保持与样品的牢固接触。悬臂或者样品受外界驱动控制在某一个频率下震动。通过扫描震动的频率，使用锁相放大器监测悬臂的共振，共振频率 $f$ 和品质因子 $Q$ 被记录下来，根据动态欧拉-伯努利方程推算探针与样品的接触刚度及阻尼，最终能得到样品的弹性和粘弹性性质。

这个理论的更多细节可以参考很多已发表的文章。Wagner等在他们发表在Cellulos (2016) 23: 1031 – 1041 上的文章“Mechanical Properties of Cellulose nanomaterials studied by contact resonance atomic force microscopy”中有很好的阐述。

## 2 离线分析接触共振图像

### 2.1 在Nanoscope Analysis软件中打开接触共振图像文件

Nanoscope Analysis软件可以对接触共振数据进行丰富的分析。双击图像文件或者在软件右侧的浏览窗口中点击接触共振图像文件将其打开。

接触共振图像文件与力体积文件类型相似。每个像素点上包含力曲线及扫频率数据。在Nanoscope Analysis中打开时，每一条曲线如图1所示。基于接触共振分析的性质图像（最多3个）也可以显示。

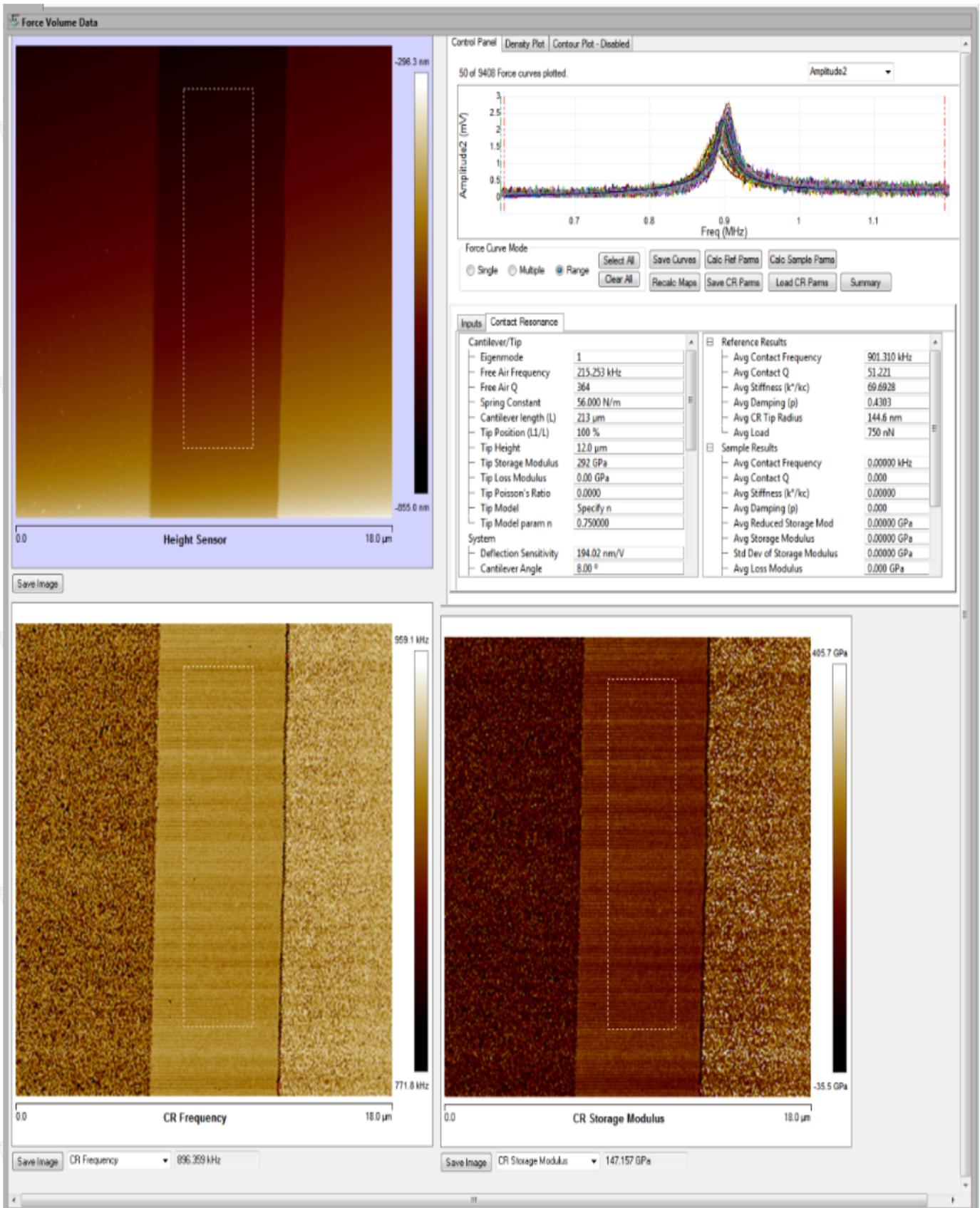


图2.1.1 接触共振分析界面

## 2.2 用参考样品校准探针

接触共振测量的准确度受探针针尖的很多性质的影响。尤其是针尖的形状会对计算得到的模量有巨大的影响。但在实际测量中很难得到针尖的确切形状。但好在，这个困难可以用一个已知其性质的标准样品来进行克服。从这个已知样品的测量结果中，针尖的等效半径可以从这个样品的模量计算得到。求得的针尖半径又可以用来计算未知样品的模量。

在参考样品的成像结果中选定区域即可进行校准。在接触共振分析中我们常用Al-Si-Cr标准样品中的Si区域做参考样品进行校准，其步骤如下：

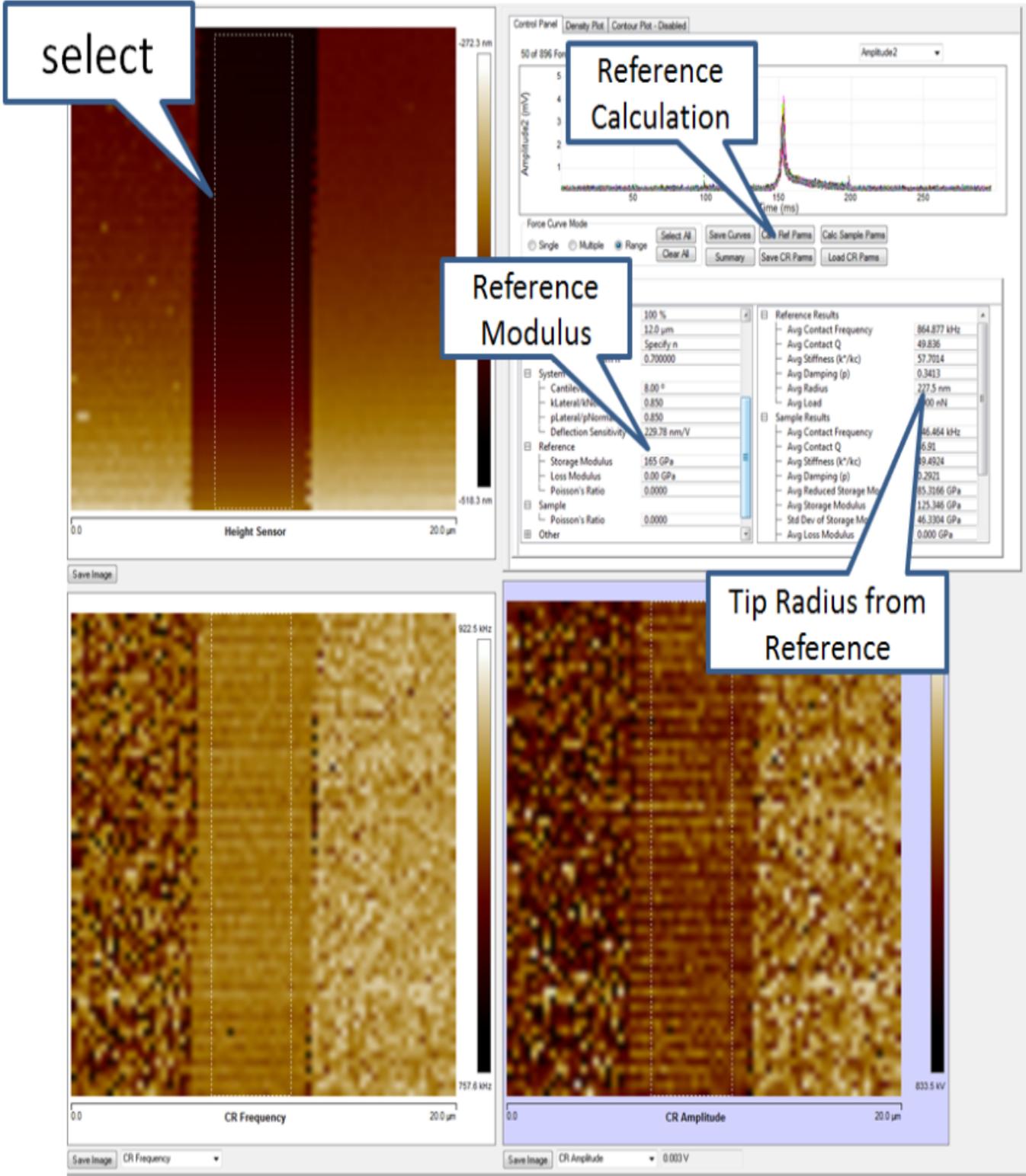


图2.2.1 接触共振参考样品校准

1. 在控制界面中选择“Range”
2. 用鼠标左键在Si区域中画框选定欲用来校准的区域
3. 在振幅对频率谱图中拖动两条纵向虚线调制拟合边界
4. 在参考区域的“Storage Modulus”参数框中输入样品的标准模量，对于Si，该数值为165 Gpa
5. 点击“Calc Ref Parm”图标进行参考样品的校准，得到的针尖半径显示在“Avg Radius”中。

## 2.3 未知样品分析

完成校准后，Nanoscope Analysis可以用来进行未知样品的模量计算。其步骤如下：

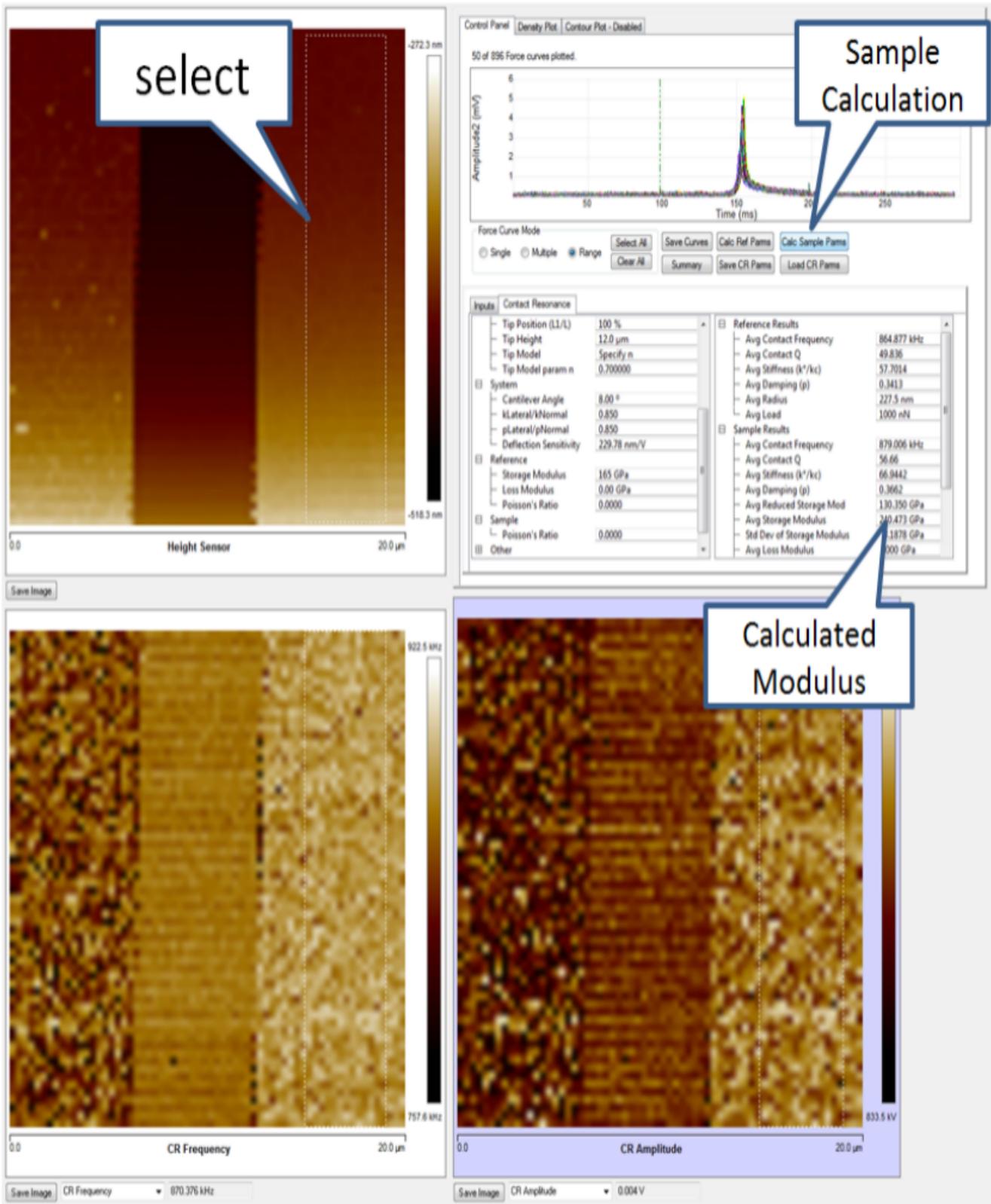


图2.3.1 进行未知样品的模量分析

1. 在控制界面中选择“Range”
2. 用鼠标在未知样品的图像中选择欲进行计算的区域

3. 在振幅对频率谱图中拖动两条纵向虚线调制拟合边界

4. 点击“Calc Ref Parm”图标进行参考样品的校准，得到的模量显示在“Avg Storage Modulus”中。

### 3 接触共振相关参数

通过分析接触共振文件中每一个像素点的ramp数据中的hold（停留）段的频率扫描数据，我们可以计算样品每一点的力学性质。在每一个像素点的停留段的悬臂振幅对频率谱图中，做洛伦兹峰拟合，拟合得到峰值频率和品质因子，使用动态欧拉-伯努利方程计算得到悬臂样品接触的接触刚度和阻尼。接着利用接触模型，通过参考样品得到的针尖参数，我们能够得到样品每一点的储能模量和损耗模量。

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

布鲁克中国客户服务中心版权所有

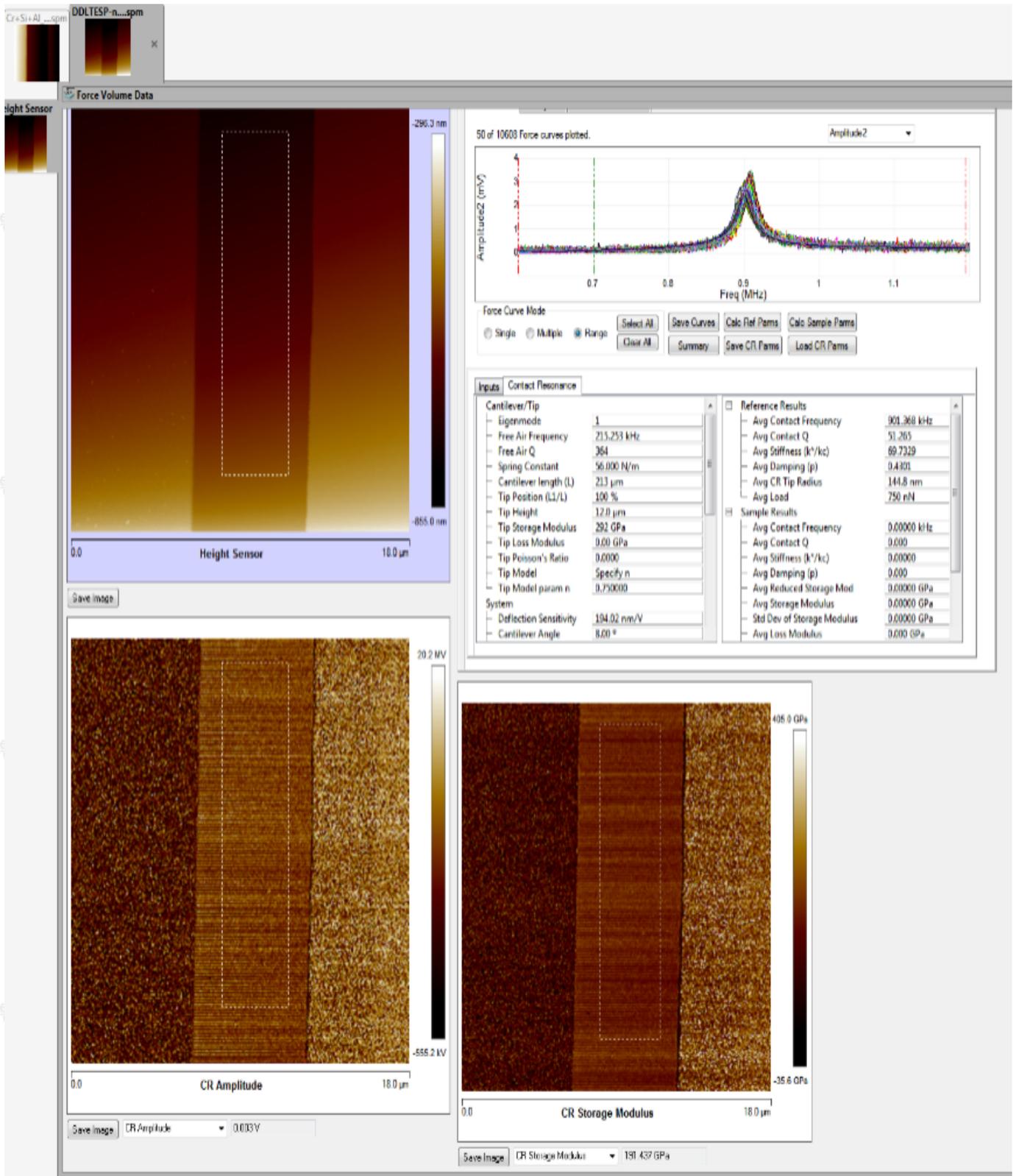


图3.1 在参考样品上进行校准

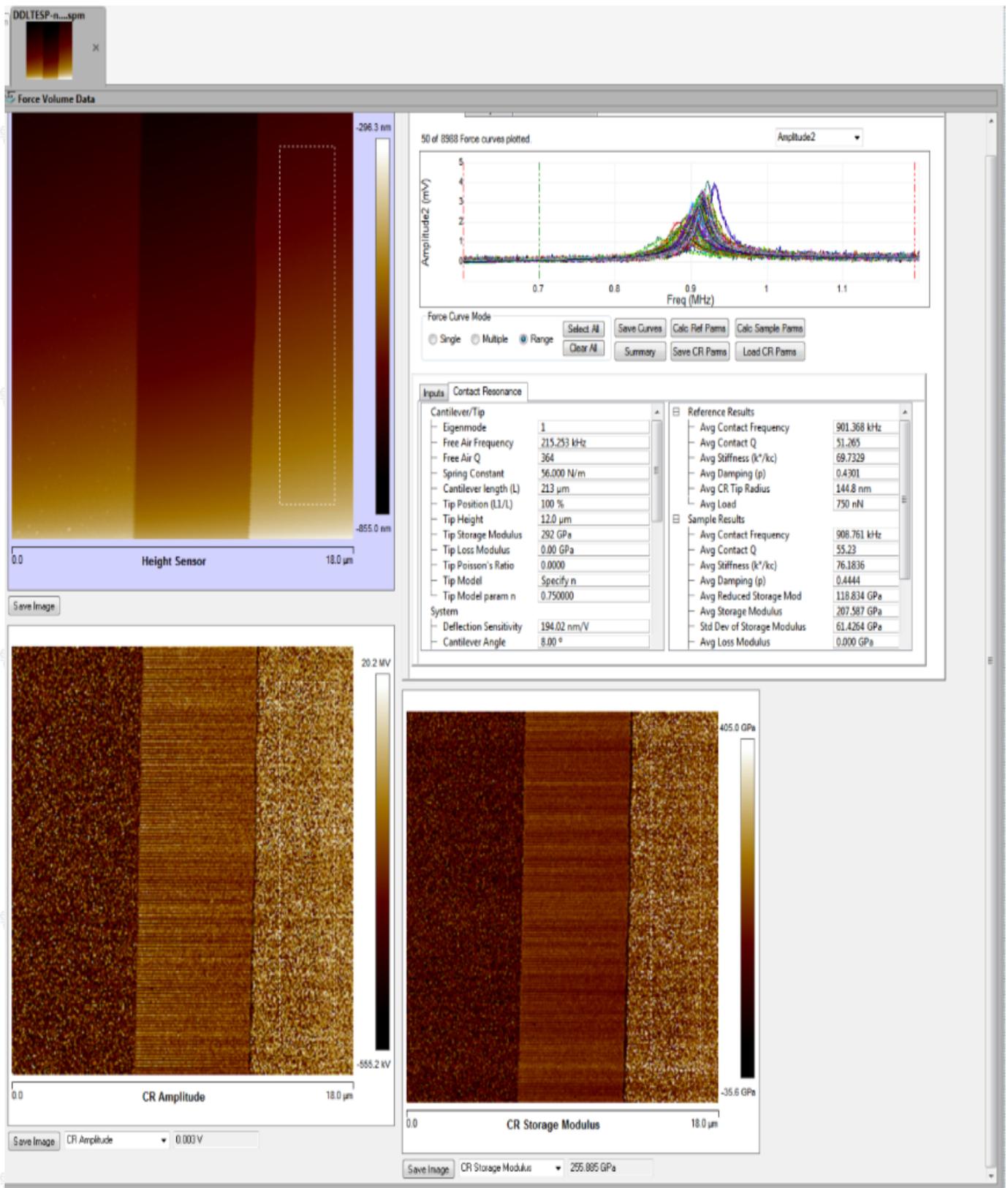


图3.2 在未知样品上进行力学性质分析

通过拖动游标的位置，可以选择洛伦兹峰拟合的范围，如图6所示。

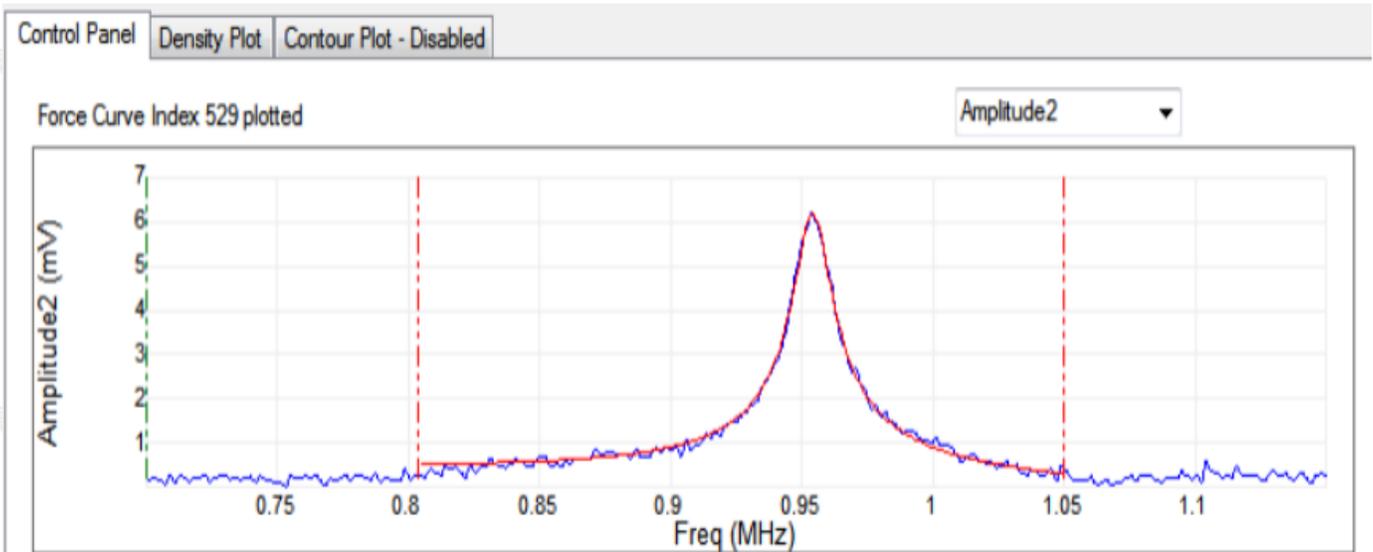


图3.3 洛伦兹峰拟合

在力曲线选择模式界面中，可以选择一点、多点或范围进行计算。当点击Calc Ref Parmns按键后，所选曲线被用来进行参考样品校准；当点击Calc Sample Parmns按键后，所选曲线被用来计算未知样品的力学性质。

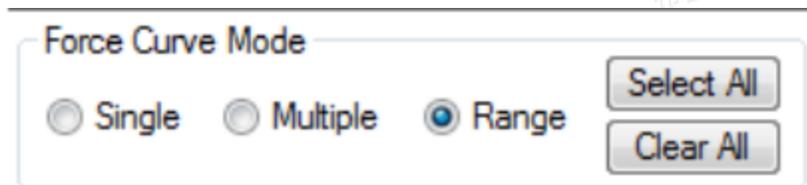


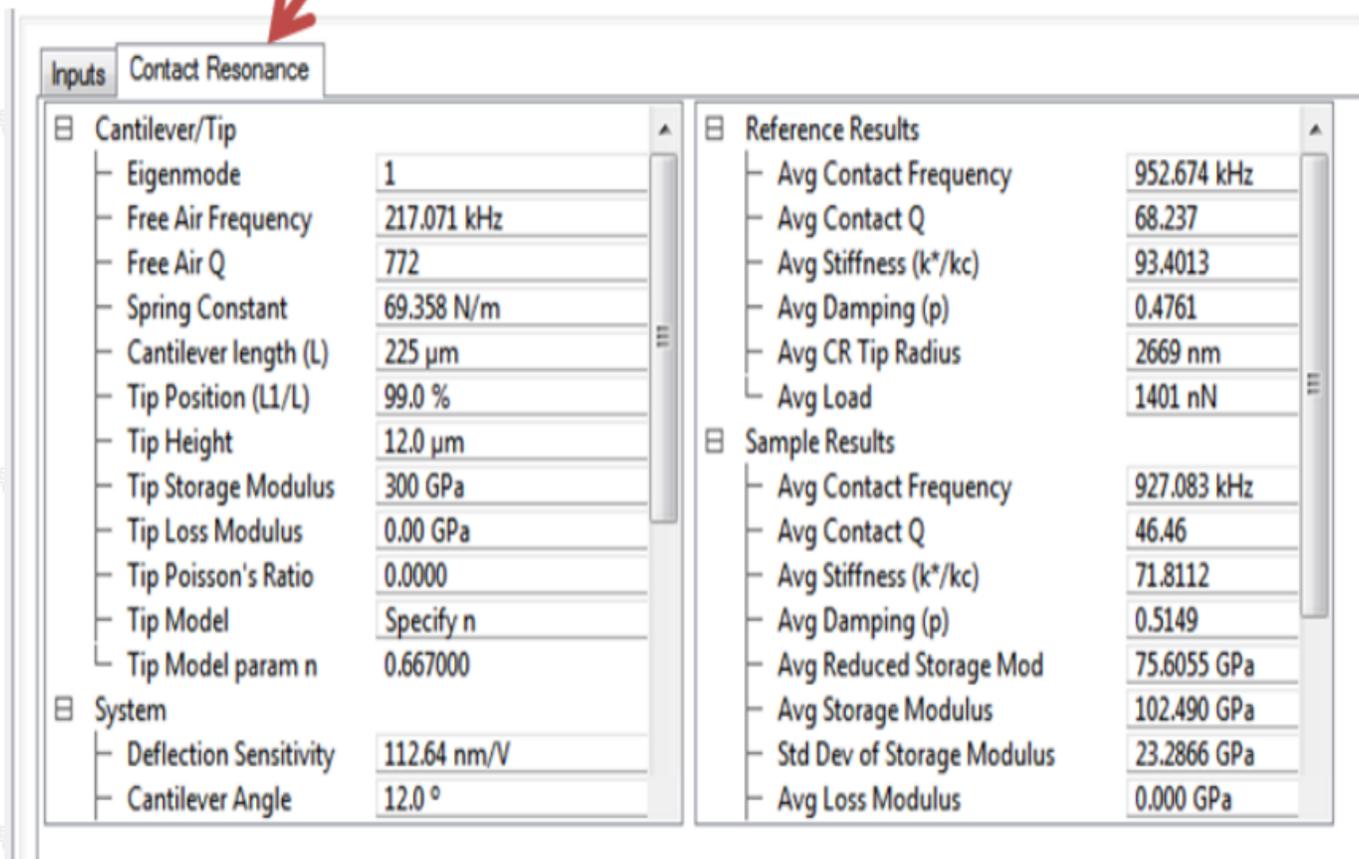
图3.4 力曲线选择模式界面

### 3.1 接触共振按键

- Calc Ref Parmns: 点击这个按键，即通过接触模型利用参考样品的模量计算出参考样品的针尖参数，所得结果显示在Reference Results中。
- Calc Sample Parmns: 点击这个按键，即通过接触模型利用针尖参数计算出未知样品的力学性质，所得结果显示在Sample Results中。
- Save CR Parmns: 点击这个按键，即保存系统、参考样品和针尖参数，生成一校准参数文件。
- Load CR Parmns: 点击这个按键，即载入已经保存的校准参数文件。

### 3.2 接触共振参数系列

## Contact Resonance Tab



Category	Parameter	Value
Cantilever/Tip	Eigenmode	1
	Free Air Frequency	217.071 kHz
	Free Air Q	772
	Spring Constant	69.358 N/m
	Cantilever length (L)	225 $\mu\text{m}$
	Tip Position (L1/L)	99.0 %
	Tip Height	12.0 $\mu\text{m}$
	Tip Storage Modulus	300 GPa
	Tip Loss Modulus	0.00 GPa
	Tip Poisson's Ratio	0.0000
System	Deflection Sensitivity	112.64 nm/V
	Cantilever Angle	12.0 $^\circ$
Reference Results	Avg Contact Frequency	952.674 kHz
	Avg Contact Q	68.237
	Avg Stiffness (k*/kc)	93.4013
	Avg Damping (p)	0.4761
	Avg CR Tip Radius	2669 nm
	Avg Load	1401 nN
Sample Results	Avg Contact Frequency	927.083 kHz
	Avg Contact Q	46.46
	Avg Stiffness (k*/kc)	71.8112
	Avg Damping (p)	0.5149
	Avg Reduced Storage Mod	75.6055 GPa
	Avg Storage Modulus	102.490 GPa
	Std Dev of Storage Modulus	23.2866 GPa
	Avg Loss Modulus	0.000 GPa

图3.2.1 接触共振参数系列

与力体积文件类似，接触共振文件参数中也包含Input参数系列，包含力曲线相关参数，具体请参考力体积部分。

接触共振图像文件还包括接触共振参数系列，其中包括Cantilever/Tip、System、Reference、Sample和Other五组。

### 3.2.1 Cantilever/Tip (悬臂/针尖) 组

Eigenmode，接触共振数据采集所用的接触共振震动阶数，可选值为1，2和3。

Free Air Frequency：悬臂在空气中的一阶自由震动频率，在做Thermal Tune时决定。

Free Air Q：悬臂在空气中的一阶自由振动品质因子，在做Thermal Tune是决定。

Spring Constant：悬臂的力常数。

Cantilever Length (L)：悬臂长度

Tip Position (L1/L)：针尖位置，定义为L1/L，其中L1为悬臂固定端到针尖所在位置的距离。

Tip Height：针尖高度

Tip Storage Modulus：针尖材料的储能模量

Tip Loss Modulus：针尖材料的损耗模量

Tip Poisson's Ratio: 针尖材料的泊松比

Tip Model: 基于所选接触模型的参数:

Tip Model	Tip Model Parm (n)
Spherical	2/3
Flat Punch	1
Specify n	n可取2/3到1之间的任意值

这个n用来描述针尖形状对接触刚度 $k^*$ 和接触半径 $a$ 的影响:

$$k^* = 2^{(n+2)/3} R^{2n-1} F^{1-n} E^{*n}$$
$$a = \frac{k^*}{2E^*} = 2^{(n-1)/3} R^{2n-1} F^{1-n} E^{*n-1}$$

其中, R为针尖等效半径,  $E^*$ 为折合模量, F为探针施加在样品上的平均作用力。用Hertz模型描述刚性接触时, 压入体为球形, n为2/3; 刚性接触中压入体为圆柱体时, n为1。根据实际针尖形状, n可在2/3至1直接取值。

### 3.2.2 System (系统) 组

Deflection Sensitivity: 悬臂弯曲量灵敏度

Cantilever Angle: 悬臂的倾斜角度

$k_{\text{Lateral}}/k_{\text{Normal}}$ : 横向接触刚度与法向接触刚度之比, 通常为0.85

$p_{\text{Lateral}}/p_{\text{Normal}}$ : 横向阻尼与法向阻尼之比, 通常为0.85

### 3.2.3 Reference (参考样品) 组

Storage Modulus: 参考样品的储能模量

Loss Modulus: 参考样品的损耗模量

Poisson's Ratio: 参考样品的泊松比

### 3.2.4 Sample (未知样品) 组

Poisson's Ratio: 未知样品的泊松比

### 3.2.5 Other (其它) 组

Hold Force: 探针停留在样品表面上时所施加给样品的力, 这个力用来计算针尖拟合半径和未知样品的模量

Use Adhesion in Load: 计算Hold Force时是否包含粘附力, 可选择“Yes”或者“No”。其数值由Input参数中的设置在力曲线中计算得到

Sigma Rejection Factor: 舍弃因子 $F_{SR}$ , 这个参数用来判定, 根据所选区域的平均接触共振频率 $f_{\text{mean}}$ 和标准偏差 $\sigma$ 是否舍弃某些数据点 $i$ , 判据如下:

$$(f_i - f_{mean}) > F_{SR} \cdot \sigma$$

当 $\sigma$ 为0时，即所有数据点均被保留用来进行接触共振数据分析。

Modulus calc. method: 储能模量计算方法，可选Fixed avg radius，指在未知样品储能模量计算时采用固定的拟合半径值；或者Fixed avg  $k^*/kc$ ，指在未知样品储能模量计算时采用固定的归一化接触刚度值。

Loss modulus method: 损耗模量计算方法。可选择YHT 2008 (Yuya, Hurley, 和Turner) , Rabe 2006, PKAS 2016 (Phani, Kumar, Arnold, Samwer) 三种方法。

### 3.3 输出结果参数

#### 3.3.1 Reference Results (参考样品结果) 组

当点击Calc Ref Parmes按键后，软件对所有被选中的像素点振幅-频率曲线进行洛伦兹拟合并计算探针样品的接触刚度，再根据输入力曲线以及参数中参考样品的力学性质推算出针尖的形状参数。

Avg Contact Frequency: 所选定参考样品区域的平均接触共振频率

Avg Contact Q: 所选定参考样品区域的平均品质因子

Avg Stiffness ( $k^*/kc$ ): 所选定参考样品区域的平均归一化接触刚度

Avg Damping ( $p$ ): 所选定参考样品区域的平均阻尼系数

Avg Radius: 所选定参考样品区域的平均等效针尖半径 (赫兹模型)

Avg Load: 所选定参考样品区域的平均力

#### 3.3.2 Sample (未知样品结果) 组

当点击Calc Sample Parmes按键后，软件对所有被选中的像素点振幅-频率曲线进行洛伦兹拟合并计算探针样品的接触刚度，再根据软件所存储的参考样品结果计算出未知样品的力学性质。

Avg Contact Frequency: 所选定未知样品区域的平均接触共振频率

Avg Contact Q: 所选定未知样品区域的平均品质因子

Avg Stiffness ( $k^*/kc$ ): 所选定未知样品区域的平均归一化接触刚度

Avg Damping ( $p$ ): 所选定未知样品区域的平均阻尼系数

Avg Reduced Storage Modulus: 所选定未知样品区域的平均折合储能模量

Avg Storage Modulus: 所选定未知样品区域的平均储能模量

Std Dev of Storage Modulus: 所选定未知样品区域的储能模量标准偏差

Avg Loss Modulus: 所选定未知样品区域的平均损耗模量

Std Dev of Loss Modulus: 所选定未知样品区域的损耗模量标准偏差

Avg Loss Tangent: 所选定未知样品区域的平均损耗角

Std Dev of Loss Tangent: 所选定未知样品区域的损耗角标准偏差

Avg Load: 所选定未知样品区域的平均力

### 3.4 性质图像

当使用接触共振模型完成每一点的力学性质计算后，Nanoscope Analysis软件还可以生成相应性质的图像。性质图像中可能会包含无效点，即其力学性质无法计算。Nanoscope Analysis软件能够给出的性质图像如下：

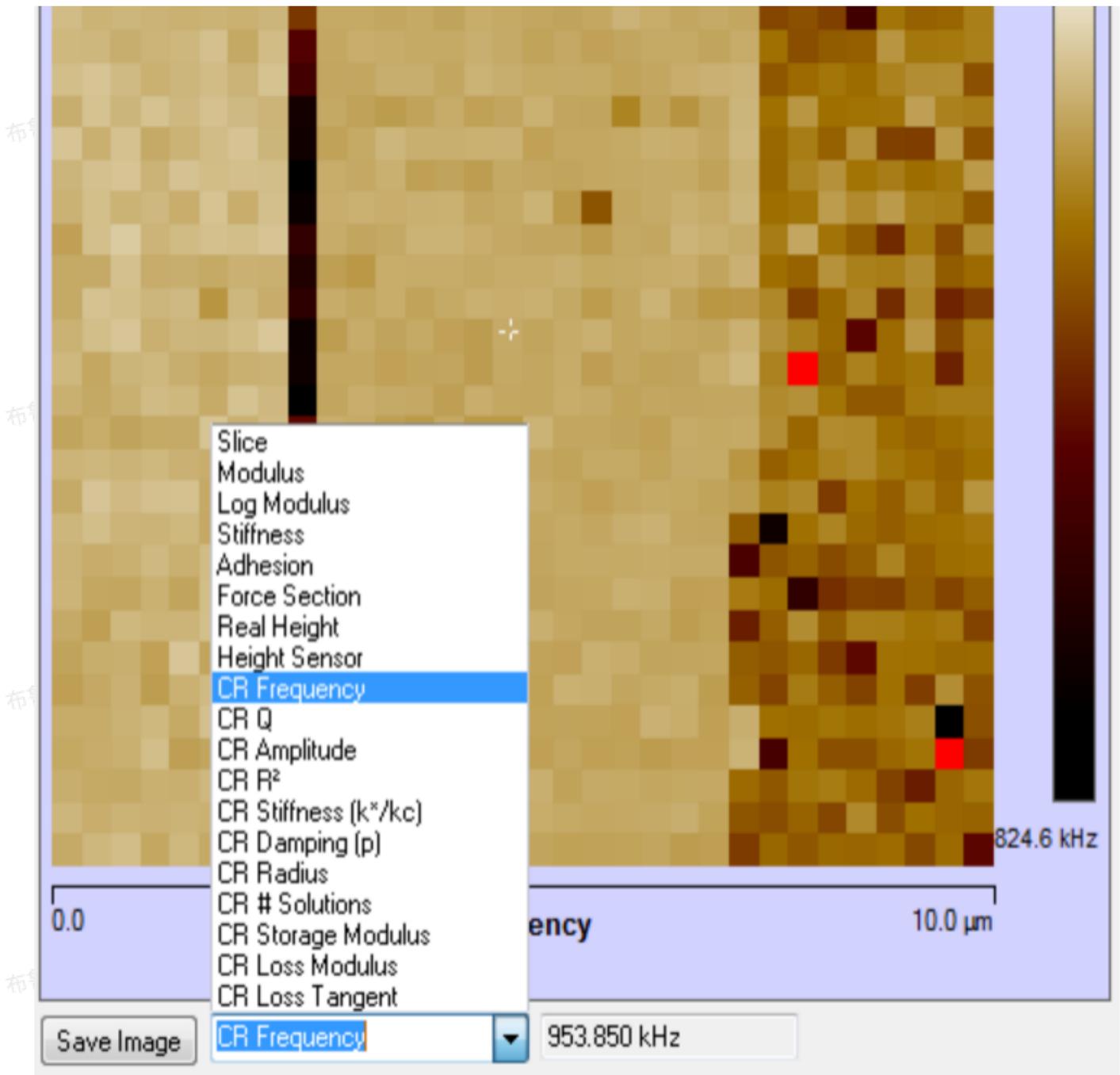


图3.4.1 性质图像

CR Frequency: 洛伦兹拟合找出的接触共振频率

CR Q: 洛伦兹拟合找出的品质因子

CR Amplitude: 洛伦兹拟合找出的接触共振峰振幅值

CR R: 洛伦兹拟合的相关系数

CR Radius: 将样品认作是参考样品，根据参考样品参数算出的等效针尖半径（赫兹模型）

CR Stiffness ( $k^*/kc$ ): 根据CR Frequency计算出的归一化接触刚度

CR Damping ( $\rho$ ): 根据CR Q计算出的阻尼因子

CR # Solution: 计算接触刚度和阻尼因子时所用的边界条件特征方程（由动态欧拉-伯努利方程得出）的解的数目。

CR Storage Modulus: 储能模量

CR Loss Modulus: 损耗模量

CR Loss Tangent: 损耗角