

# 掃描探針顯微儀的電性應用 及原理

掃描探針顯微儀是原子力顯微儀 (atomic force microscope, AFM) 應用系列的總稱，主要是應用於表面物性的量測。其最早僅是應用於表面三維影像的量測，如原子力顯微儀及掃描穿隧電子顯微儀 (scanning tunneling microscope, STM)。然而時至今日，表面的物性量測諸如聲、光、力、電、磁，皆可藉由適當的機制修改原子力顯微儀以利於表面物性的量測。本文將著重於掃描探針顯微儀在表面電性的定性與定量的應用說明。

許朝雄、張明義、李仲、張家榮、曾增吉

## 一、前言

奈米 (nanometer,  $10^{-9}$  m) 科技的來臨，使得從事技術開發工作的人都急於想知道「奈米尺度下微觀物性的表現」。目前掃描探針顯微儀是最廣為應用在奈米尺度 (nano order) 至微米尺度 (micro order)

許朝雄先生為國立中正大學物理所碩士，現任科榮股份有限公司襄理應用工程師。

張明義先生為國立台北工專電子科畢業，現任科榮股份有限公司第二事業部部長。

李仲先生為國立交通大學光電研究所碩士，現任台灣積體電路公司經理。

張家榮先生為國立台灣大學材料所碩士，現任科榮股份有限公司業務應用工程師。

曾增吉先生畢業於中原大學化工系，現任科榮股份有限公司應用維修工程師。

的表面量測儀，當然此範疇的電性也是眾人急於窺視的。目前掃描探針顯微儀的電性量測功能可區分為定性及定量兩種。定性量測有四種，分別為電場式顯微儀 (electric field microscope, EFM)、表面電位式顯微儀 (surface potential microscope, SP)、掃描電容顯微儀 (scanning capacitance microscope, SCM) 及掃描延伸電阻顯微儀 (scanning spreading resistance microscope, SSRM)；而定量量測則為導電式原子力顯微儀 (conductive atomic force microscope, CAFM)。其原理與應用領域將如下所述。

## 二、儀器原理

儀器原理將以定性及定量的量測機制來分別說明之。定性量測的應用可分為：(1) 電場式顯微儀，(2) 表面電位式顯微儀，(3) 掃描電容顯微儀，以及 (4) 掃描延伸電阻顯微儀。其說明如下。

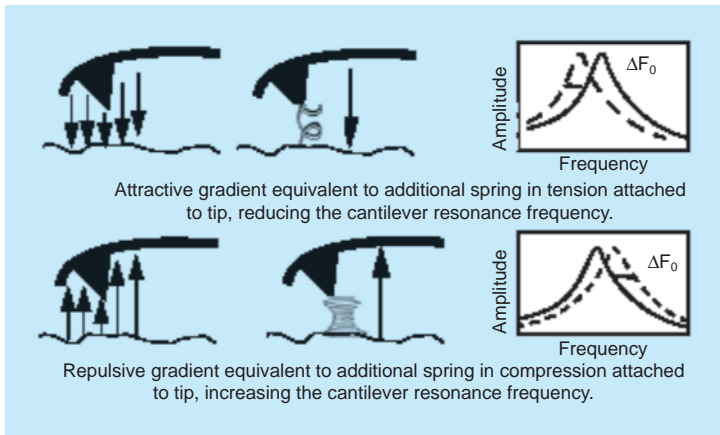


圖 1. 顯示探針是在非接觸模式下工作，並比較當探針感測到引力及斥力時所對應的頻率偏移。

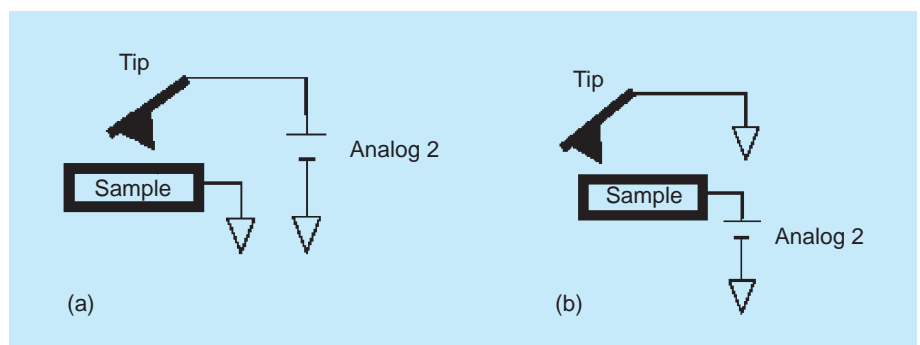
## 1. 定性量測機制

### (1) 電場式顯微儀

電場式顯微儀是對映 (mapping) 出樣品表面  $z$  軸方向的「電場梯度」，而此「電場梯度」的測得是藉由一帶有靜電荷的導電探針在電性樣品表面上掃描取得的。其中梯度的變量記錄是藉由觀察探針的振幅、相位及頻率變量而得的。而探針與局部區域間的作用原理，則如圖 1 所示。從圖中可知懸臂的頻率偏移量是來自樣品  $z$  軸方向的電場梯度。在引力作用時，懸臂等效於「軟」，會將共振頻率往「左移」。反之，斥力作用時，懸臂等效於「硬」，會將共振頻率往「右移」。而藉由電腦記錄此偏移量便可獲得  $z$  軸的電場梯度的影像。值得注意的是，若此「電場梯度」太微弱時，可在探針與樣品間加一 DC 偏壓來增強靜電力的對比，如圖 2 所示。

圖 2.

由 (a) 與 (b) 可知偏壓可作用於探針上或作用於樣品上，而 analog 2 為一可變的直流電壓。



### (2) 表面電位式顯微儀

表面電位影像是藉由調變探針的 DC 電壓以獲得樣品表面上的等效電位，同時可用一已知純金屬樣品的功函數來校正所測得的等效電位以達到半定量的量測。而表面粗度較大的樣品或表面電位變量較小的樣品皆可適用。感測原理及接線圖 (如圖 3 所示) 說明如下。

以一靜止之探針 (具導電) 連結一交流訊號 ( $V_{ac} \times \cos \omega t$ )，當探針與樣品在極近的距離時，便會感應出一靜電力 ( $F$ )，且其懸臂震盪的頻率為  $\omega$ 。其中靜電力 ( $F$ ) 如下所示：

$$F = \frac{dC}{dz} (V_{dc} \times V_{ac})$$

$dC/dz$  是探針與樣品間所形成的電容微分量。

$$V_{dc} = V_{tip} - V_{sample}$$

此  $V_{dc}$  是探針與樣品表面的直流電位差， $V_{ac}$  是作用在探針上的交流訊號振幅值，而當  $V_{dc} = V_{tip} - V_{sample} = 0$  時，則懸臂並無偏移量  $F = 0$ ，即可得知  $V_{tip} = V_{sample}$ 。且藉由回饋控制來取得樣品上方每一點的等效電位  $V_{sample}$ ，並由電腦記錄以描繪出表面電位的影像。

### (3) 掃描電容顯微儀

掃描電容顯微儀具有對映出樣品內隱含的載子濃度或摻雜濃度的二維分佈對比影像。而本文中 SCM 原理係引自 David W. Abraham 等人的文章，

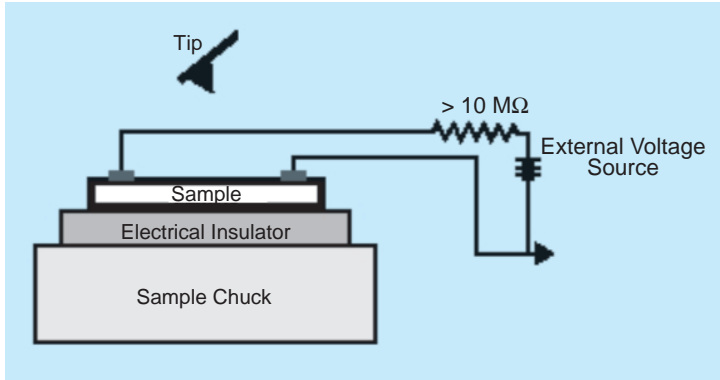


圖 3. 表面電位式顯微儀操作模式中樣品與外加電源的接線示意圖。

其機制圖 (如圖 4 所示) 及 SCM 模型的建立需符合以下的假設：(1) 如圖 5 所示，探針與樣品間所形成的等效電容需是  $C_{air}$ 、 $C_{ox}$  和  $C_d$  的串聯，而  $C_{air}$  為空氣隙縫所形成的電容量， $C_{ox}$  是厚度為  $t_{ox}$  的氧化絕緣體 (oxide insulator) 所形成電容量， $C_d$  是厚度為  $t_d$  的半導體空乏層 (semiconductor depletion layer) 所形成的電容量。(2) 半導體內部空乏層的電容量，僅與最接近探針尖端的局部材料表面摻雜濃度有關。(3) 所有的電容均假設為平板電容，故忽略所有的邊際效應。

由以上的假設可知被儲存於電容內的電能為

$$U = \frac{1}{2} C_{eff} V^2 \quad (1)$$

而  $C_{eff}$  為等效電容， $V$  為作用在探針與樣品間的電壓。

$$\frac{1}{C_{eff}} = \frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \quad (2)$$

$$C_{air} = \frac{\epsilon_{air} A}{z} \quad (\epsilon_{air} \text{ 為空氣的電介質係數})$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} A}{t_{ox}} \quad (\epsilon_{ox} \text{ 為氧化物的電介質係數})$$

$$C_d = \frac{\epsilon_d A}{t_d} \quad (\epsilon_d \text{ 為矽的電介質係數})$$

$A$  為探針的等效面積 (或 project size)， $z$  為探針與

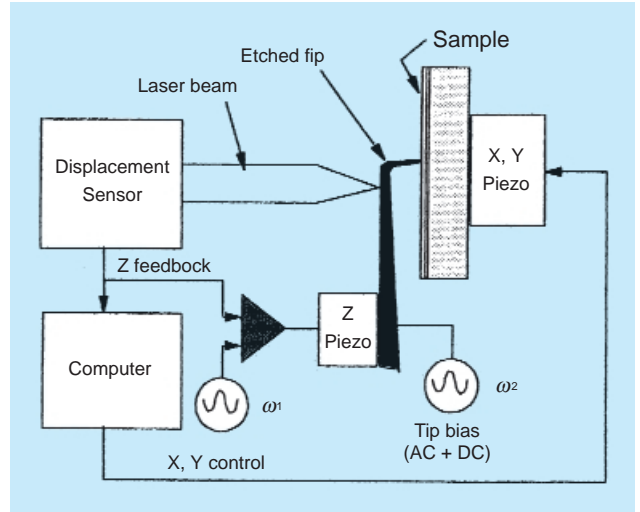


圖 4. SCM 的工作機制圖。

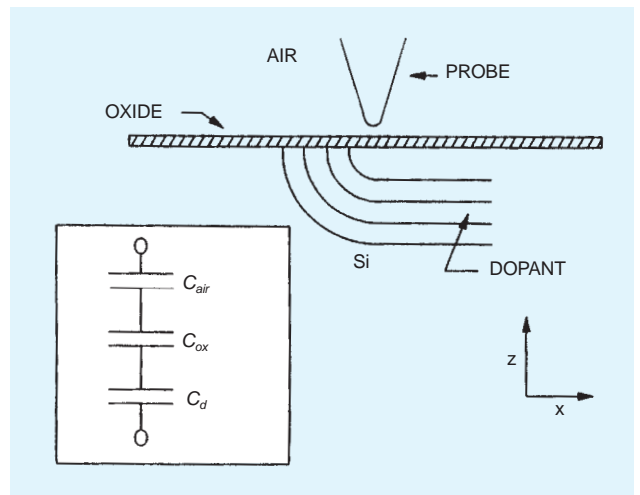


圖 5. SCM 理論模型的建立，乃將等效電容視為串聯形式。

樣品間的垂直距離。而探針與樣品間的作用力為

$$F = \frac{dU}{dz} \quad (3)$$

從 (2) 式中可得知僅有  $C_{air}$  項與  $z$  軸有關，因此就  $p$  型 ( $p$ -type silicon model) 可得

$$F = -\frac{1}{2} V^2 \left( \frac{C_{eff}}{C_{air}} \right)^2 \frac{dC_{air}}{dz} \quad (4)$$

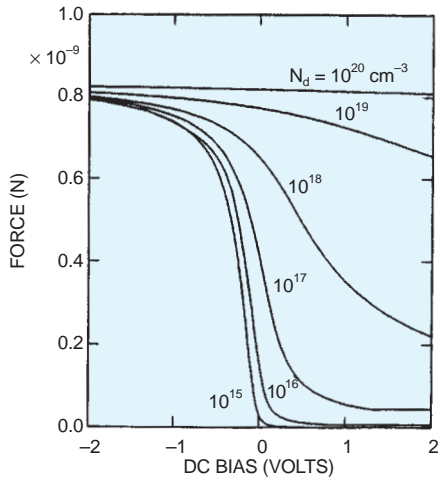


圖 6. 作用力對 DC 偏壓的曲線，由圖中可得知， $F$  隨著  $N$  而增加，隨著  $V_0$  而漸少。

而  $V = V_0 + \delta V \cos(\omega_2 t)$ ， $V_0$  為直流偏壓， $\delta V$  為交流感測偏壓，且於感應時鎖頻在  $2\omega_2$ ，故由 (4) 是可得探針與樣品間的作用力  $F(2\omega_2)$  為

$$F(2\omega_2) = \frac{\delta V^2 C_{\text{eff}} \cos(2\omega_2 t)}{4\epsilon_{\text{air}} A} \quad (5)$$

其中  $C_{\text{eff}}$  的大小與摻雜濃度有關，而摻雜濃度與空乏層厚度 ( $t_d$ ) 的關係如下：

$$t_d = t_{\text{ox}} \left[ \left( 1 + \frac{V_0}{V_d} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (6)$$

$$V_d = \frac{q\epsilon_{\text{Si}} t_{\text{ox}}^2 N}{2\epsilon_0 \epsilon_{\text{ox}}^2} \quad (7)$$

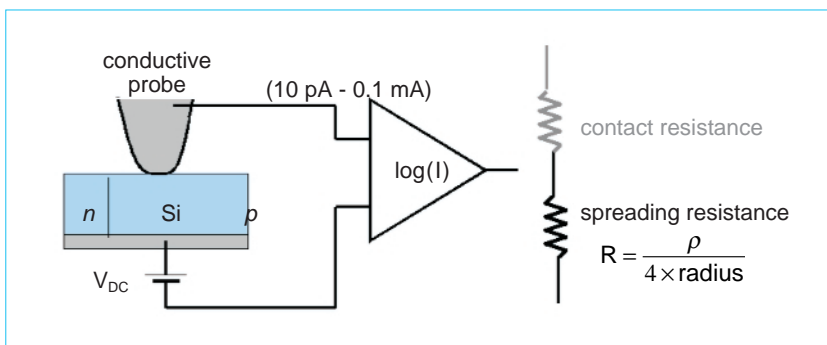


圖 7. SSRM 的機制圖示意圖。

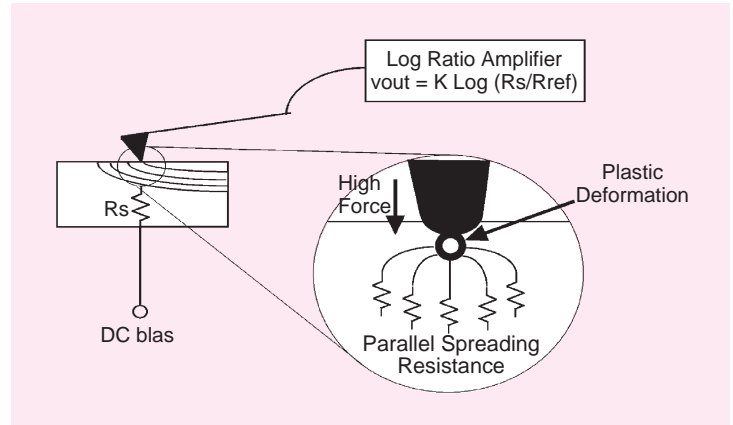


圖 8. 延伸電阻 (或延伸電流) 在探針前端的分佈狀況。

$N$  為局部體積的摻雜濃度。從 (5)、(6) 及 (7) 式可得作用力與 DC 偏壓間的曲線圖，如圖 6 所示。

#### (4) 掃描延伸電阻顯微儀 (SSRM)

掃描延伸電阻顯微儀是對映出樣品內隱含的電導率或電阻率的二維分佈對比影像，且有極佳的空間解析 (奈米尺度，約 15 nm)。當然另一重要之應用為對映出半導體內的載子濃度分佈。其機制如圖 7 所示，而圖 8 為施以一重載 (large load) 的力在探針上時，延伸電阻 (或延伸電流) 在探針前端的分佈狀況。

SSRM 的工作機制即在導電探針與樣品間施以一可調節的直流電壓，並擷取出流經樣品的電流為  $i_{\text{sample}}$ ，而流經參考電阻的電流為  $i_{\text{reference}}$ ，其中參考電阻為  $10^6$  歐姆，已知  $R_{SR} = 1M \times \log\left(\frac{i_{\text{sample}}}{i_{\text{reference}}}\right)$ ； $R_{SR}$  為延伸電阻 (spreading resistance)，故經由對數運算即可求得  $R_{SR}$ 。

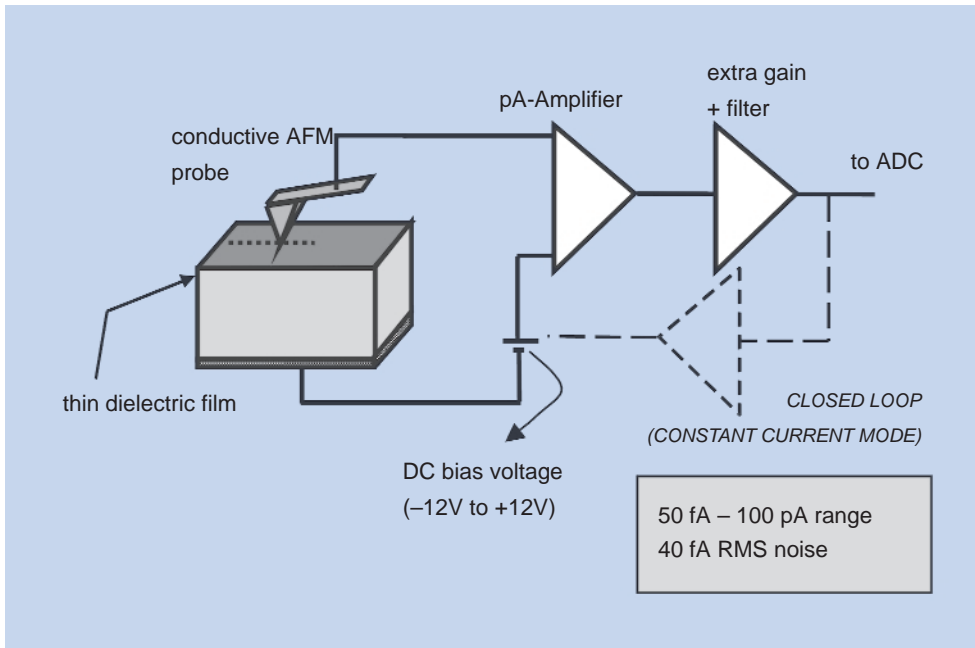


圖 9. 為導電式顯微儀的結構示意圖及工作電流的區間。

## 2. 定量量測機制

定量量測的應用為導電式原子力顯微儀，其說明如下：導電式顯微儀是直接擷取出流經樣品的極小電流 (ultra current, 約  $10^{-15}$  A)，其適用在電性極差或厚度為奈米尺度的絕緣性樣品。導電式顯微儀的結構圖及工作電流的區間如圖 9 所示，而工作模式有定電壓 (constant bias mode) 及定電流 (constant current mode) 兩種。

### (1) 定電壓操作模式

定電壓操作模式係加一固定偏壓至樣品，而藉由一導電探針擷取出表面的電流訊號，此電流訊號的大小隨樣品表面的導電性之差異而有所變化。也就是說定電壓操作模式為一開迴路的設計。

### (2) 定電流操作模式

定電流操作模式之回饋電流值是固定的，但作用在樣品上的偏壓是可變的，也就是說定電流操作模式為一閉迴路的設計。

## 三、儀器的應用領域

掃描探針顯微儀的應用領域將以定性及定量來分別說明之。定性分析所能告知的僅是一個趨勢或有無的區別，而定量分析能明確的取得量測的物理量。接下來將逐一說明儀器的應用範疇。

### 1. 定性量測掃描探針顯微儀

#### (1) 電場式顯微儀的應用

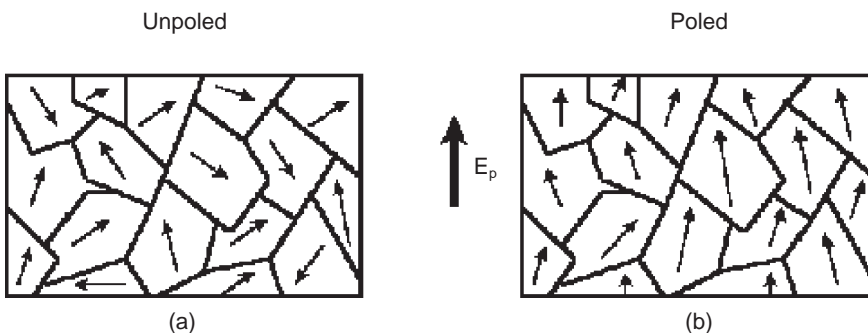


圖 10. 壓電陶瓷的極化 (poling) 過程 (a) 在「無」電場作用下，其極化 (polarization) 方向是任意的，(b) 在「有」電場的作用下，其極化方向是朝著外加電場的方向。



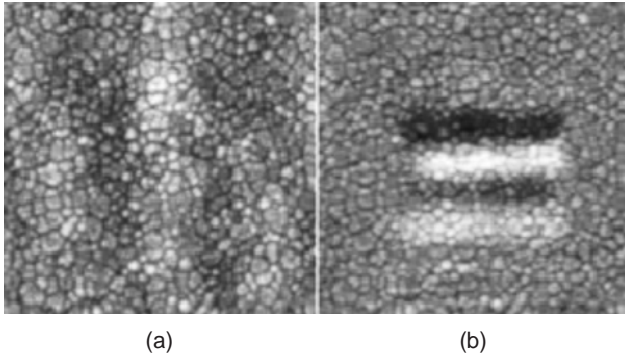


圖 11. (a) 「無」電場作用下的鐵電薄膜的表面形貌，(b) 「有」電場作用後的鐵電薄膜的表面形貌，其作用電壓分別是 +3 V、-3 V、+2 V 及 -2 V。(方向的對應是由「上」往「下」)。

電場式顯微儀可應用於高分子 (polymer) 中摻雜金屬原子、鐵電陶瓷 (ferroelectric ceramic)、IC 元件的漏電檢測 (leakage detect) 等有關於局部電場的加入或局部電場梯度的量測皆可應用。以下的應用是以鐵電陶瓷為例子，在鐵電陶瓷的晶粒尺寸 (grain size) 小於  $1 \mu\text{m}$  時，每顆晶粒都是具有一個「域壁 (domain wall)」的單一域 (single domain)。若晶粒尺寸大於  $1 \mu\text{m}$  時，一個晶粒內可能有數個「域」所組成的。

圖 10(a) 為鐵電陶瓷在燒結冷卻後，其並不具任何的鐵電特性 (piezoelectricity)，主要是因為「鐵電域 (ferroelectric domains)」的方向是任意的，可藉由極化 (poling) 鐵電陶瓷的動作而將其壓電特性 (ferroelectric behavior) 給感應出來。其整個過程是藉由一導電探針通以 DC 電壓，當作用點的電場強度大於鐵電陶瓷的矯頑場強度 (coercive field strength)，且小於居禮點 (Curie point)，則每顆晶粒內的偏極 (polarization) 方向將被轉向至作用電場的方向，如圖 10(b) 所示。

將電場式顯微儀應用在上述的鐵電特性的量測其方法如下所述：即利用一通以 DC 電壓的導電探針，並藉由此局部電場去扭轉鐵電薄膜內的極化方向，而此極化方向的改變將導致樣品表面形貌的改變，從圖 11(b) 可知當施以 +3 V 時對應到「凹」(暗)，施以 -3 V 時對應到「凸」(亮)，施以 +2 V

時對應到「凹」(暗)，施以 -2 V 時對應到「凸」(亮) (方向的對應是由「上」往「下」)。

## (2) 掃描電位顯微鏡的應用

掃描電位顯微鏡可取得微觀 (局部) 的表面電位差 (功函數)，故可將此技術應用在瑕疵樣品的檢測或量測樣品表面的功函數。而以下的應用是掃描電位顯微鏡技術在商品化的無機 CD-RW 光碟片上的應用。

CD-RW 在經高功率雷射寫入後，會在記錄層形成結晶態與非結晶態，而此結晶態與非結晶態的功函數並不相同，如此 SP 即可探測得在結晶區與非結晶區的表面電位差是有不同的，而取得的影像及說明如圖 12 所示。

## (3) 掃描電容顯微儀

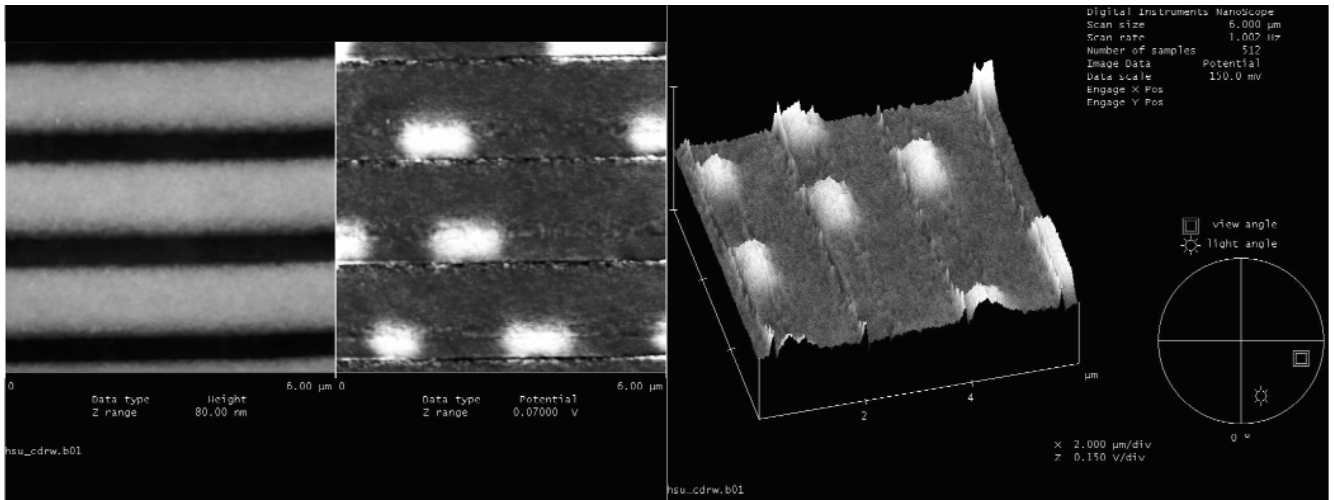
掃描電容顯微儀藉由偵測  $dC/dV$  的變量以對映出樣品內隱含的載子濃度 (carrier concentration) 或摻雜濃度 (doped concentration) 的二維分佈對比影像，可應用於 MOSFETs、diodes 或 laser-structures 等的檢測。而以下的應用是針對 MOSFET 電晶體在正確的操作偏壓下電晶體從「OFF」到「ON」時，源極 (source) 與汲極 (drain) 間的通道 (channel) 變化的情形。當供給閘極 (gate) 的 DC 偏壓為「0.0 V」時，通道是完全分開的，隨著偏壓的增加，通道將逐漸形成，圖 13(e) 可知源極與汲極間的通道已完全「短路 (shorting)」，故電流可在源極與汲極間流通。

## (4) 掃描延伸電阻顯微儀

掃描延伸電阻顯微儀是對映出樣品內隱含的電導率或電阻率的二維分佈對比影像，可應用於半導體性及 III-V、II-VI 半導體，如 LEDs、photo-detectors 及 laser diode 等。而以下應用是基材為 InP，並摻雜有不同濃度的  $n$ - and  $p$ -type 層，從分析數據圖 14(b) 可知 SSRM 對微小變量的摻雜濃度有極佳的解析能力。

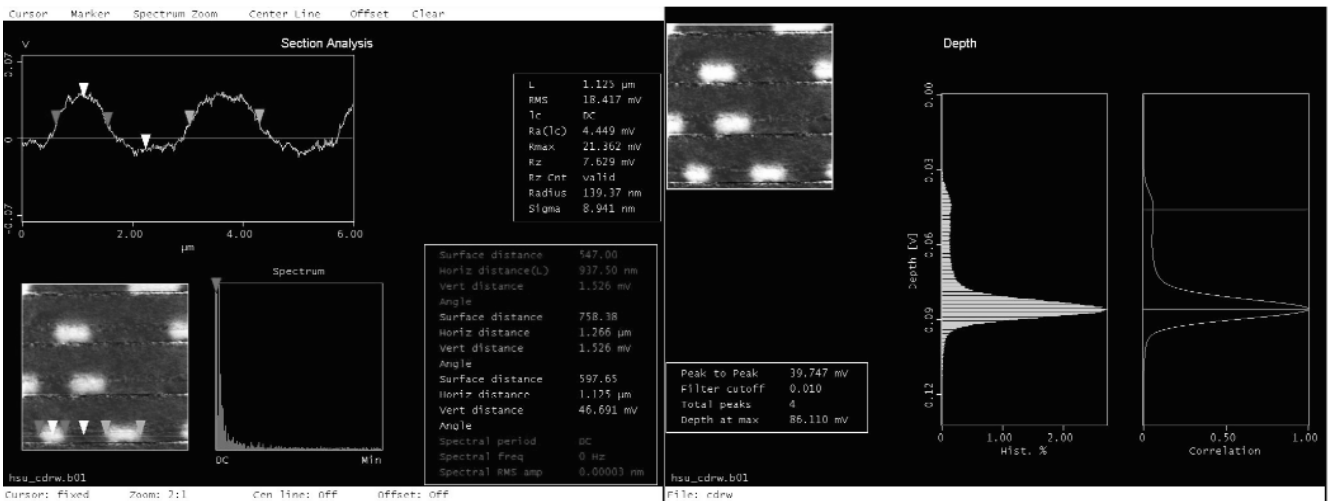
## 2. 定量量測掃描探針顯微儀

導電式顯微儀的電流感測靈敏度極佳 (為  $10^{-15}$



(a)

(b)



(c)

(d)

圖 12. 此樣品為 CD-RW 碟片，於圖 (a) 左為 AFM 影像，右為表面電位影像，圖 (b) 三維的表面電位影像，圖 (c) 為所形成之資料區 (domain wall) 大小的量測，紅色箭頭所標示的大小為 937.5 nm，而綠色箭頭所標示的大小為 1.266  $\mu\text{m}$ ，其高度差 (即表面電位差) 為 46.59 mV。圖 (d) 為資料區的平均高度差 (即表面的平均電位差) 為 39.747 mV。(感謝 Digital Instrument 的應用工程師 Debra Cook 提供此 surface potential images)。

ampere order)，故可應用於電性極差或厚度為奈米尺度的絕緣性樣品，如半導體、DLC 薄膜、生醫材料 (bio-materials)、導電高分子 (conductive polymer)、氧化物 (oxides) 及鐵電材料 (ferro-electric material)，而本節將以兩個例子來說其應用。

**(1) 導電式顯微儀應用於檢測介電層薄膜的電性瑕疵在樣品  $\text{SiO}_2$  薄膜中箝入量子點 ( $\text{SiO}_2$  with**

embedded quantum dots)，從圖 15 可知隨著負偏壓的增加，則出現的瑕疵亮點就越多，而可藉由此方法來判斷薄膜的均勻性或介電層的崩潰電壓。

**(2) 導電式顯微儀應用於檢測導電性高分子薄膜的電性**

此導電高分子的組成為 PANI，並覆蓋局部的 PPV 層，其中 PPV 層的電性是不佳的，PANI 高

SCM on active device

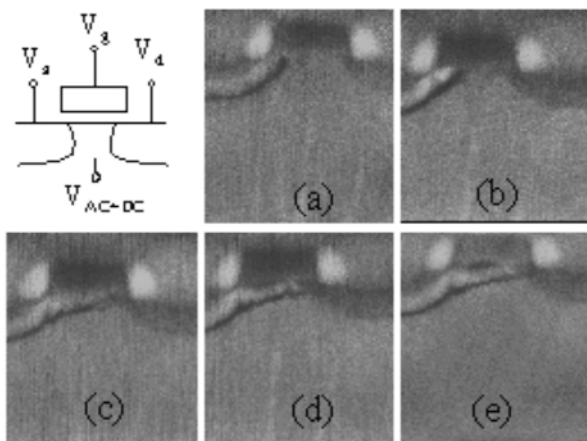
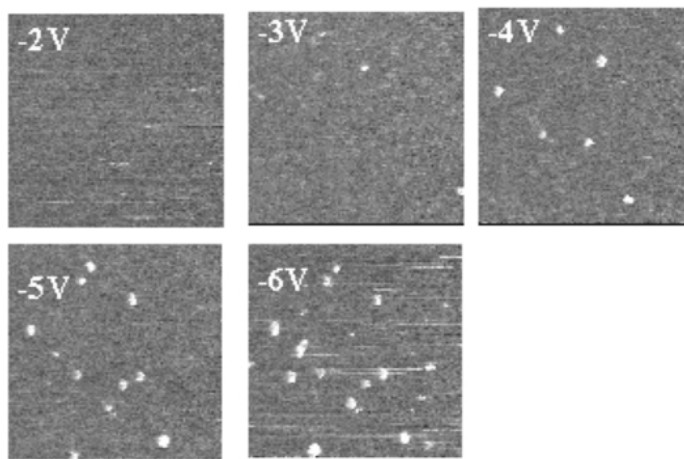


圖 13. 如同教科書所說的，閘極的電壓是可控制 MOSFET 的導通，從圖 (a) 的不導通，(b)(c)(d) 通道的逐漸成形，到 (e) 通道的完全形成，且電流已可流通於源極與汲極之間。

子的電性是較佳的。從圖 16 可得知此現象。

#### 四、結論及應用展望

掃描穿隧電子顯微儀 (STM, 1986 年獲得 Nobel prize) 及原子力顯微儀 (1986 年誕生)，其在科學上的應用已非侷限於奈米尺度表面影像的量測，其中 AFM 更廣為應用於探索奈米尺度下微觀的物性 (光、力、電、磁)，而以定量形式取出奈米尺度的



Scan size:  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$

圖 15. 導電式顯微儀測得隨著負偏壓的增加，則出現的瑕疵亮點就越多。某些瑕疵亮點出現在小的負電壓，而某些亮點的出現是隨著負電壓的增加而增加的。其成因與瑕疵點的大小有關或瑕疵點與上表面的距離大小有關。

電性，更是對奈米科技有直接的助益。以解析局部電壓電流訊號 (I-V curve) 為例，其可鑑別出尺度小於 10 nm 時所對映出的電壓電流訊號。而相較於其它形式的表面物性量測 (probing) 儀器 (如 SEM 儀器)，因受限於聚焦電子束 (electron beam) 的大小 (微米尺度， $\mu\text{m}$ )，是難以從事於奈米尺度定量的應用。故掃描探針顯微儀在奈米科技的定量量測，甚至生醫、生物技術開發將有其明顯的助益。

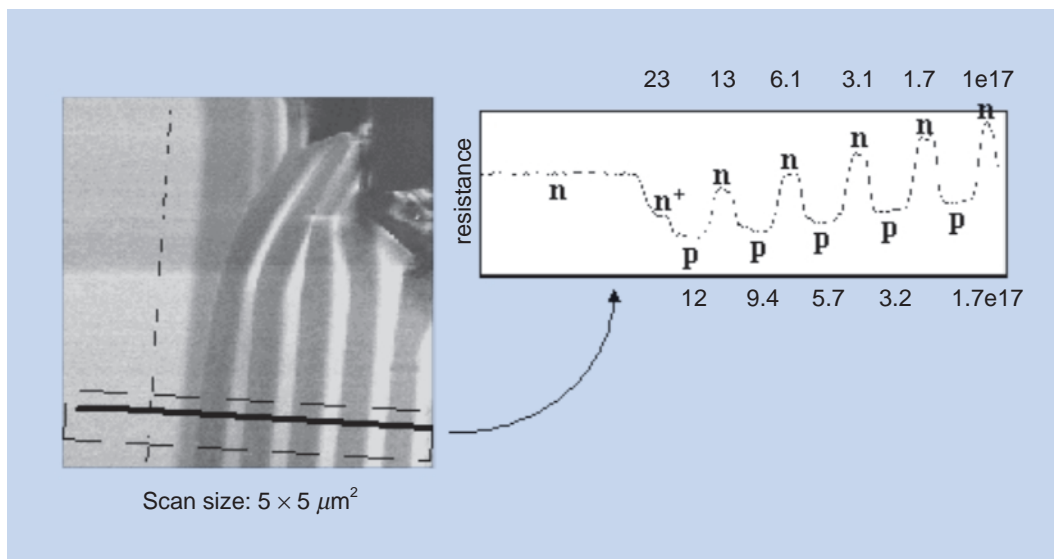
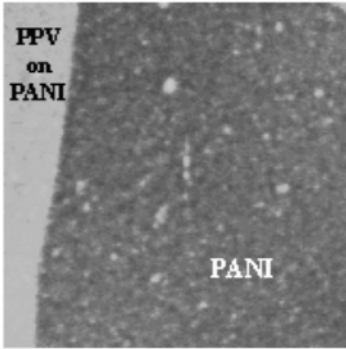


圖 14. (a) 為 SSRM 的二維影像圖，(b) 為摻雜濃度的切面分析圖 (section analysis)。

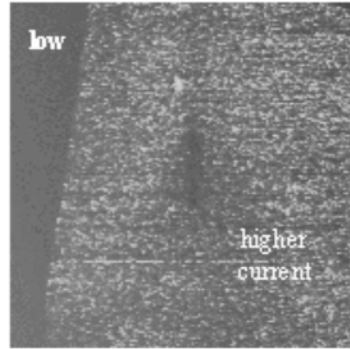


Topography:  
50  $\mu\text{m}$   $\times$  50  $\mu\text{m}$



(a)

Current:  
bias voltage: -6V  
RMS current: 190 fA - 1.6 pA



(b)

圖 16.

(a) AFM的表面形貌，且其基材為 PANI 並覆蓋以局部的 PPV 層，(b) 可看出其導電性在 PPV 區其導電性不佳，在 PANI 區其導電性是有所差異的。

### 參考文獻

1. Digital Instrument Inc. Operation Manual.
2. Y. Martin, D. W. Abraham, and H. K. Wickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1103 (1988).
3. H. O. Jacobs, H. F. Knapp, S. Mller, and A. Stemmer, *Ultramicroscopy*, **69**, 39 (1997).
4. Application note about Electric Force Microscopy, Surface Potential Imaging and Surface Electric Modification with Atomic Force Microscope (AFM) from Digital Instrument Company.
5. *Ferroelectric Ceramics : Processing, Properties & Applications*, Ahmad Safari, Rajesh K. Panda, and Victor F. Janas, Department of Ceramic Science and Engineering, Rutgers University, Piscataway NJ 08855, USA.