

# 掃描電容顯微鏡分析技術 及其在矽晶圓表面分析之應用

掃描電容顯微鏡為掃描探針顯微鏡的一種，具備二維載子濃度分析的優異能力，近年來更因商業產品問世而被廣泛使用。除了微區載子濃度分佈影像的取得之外，我們將原子力顯微鏡 (AFM) 上加設的 SCM 系統應用於矽晶圓表面微區電性的定性分析上，並得到高解析度的正電荷捕獲 (positive trapped charges) 微區分佈影像。由於正電荷捕獲是導致漏電流與介電層崩潰的主因之一，因此 SCM 量測技術對介電層可靠度的分析而言極具應用潛力。本文將介紹 SCM 的基本架構、量測原理與一般的橫截面 SCM 試片製備方法，此外，大試片 SCM 量測技術少了一般 SCM 試片製備的繁瑣與困難，其應用也將在文中一併討論。

張茂男、陳志遠、潘扶民

## 一、前言

目前就表面分析技術而言，掃描探針顯微鏡 (scanning probe microscopy, SPM) 可說是發展極為快速的一項表面微區量測技術，其特點為操作簡單、維護容易，且能直接而快速地提供關於材料表面特性的資訊，如硬度、平坦度及電磁場強度等，所得的資訊具有大範圍及高解析度等優點。在掃描

探針顯微鏡的各項應用之中，最為人熟知的就是用於材料表面形貌觀察及平坦度分析的原子力電子顯微鏡 (atomic force microscopy, AFM)。近年來，由於掃描電容顯微鏡 (scanning capacitance microscopy, SCM) 的出現，使得掃描探針顯微鏡技術在二維電荷分佈分析方面也具有極佳的應用潛力，特別是二維自由載子濃度的分佈<sup>(1-6)</sup>。自由載子濃度的分佈對雷射二極體、DRAM、MOS 及雙極性場效電晶體等半導體元件的特性均有十分顯著的影響，而自由載子濃度 (free carrier concentration) 的分佈通常隨摻雜 (dopant) 與熱處理方式而有明顯的改變，在目前的量測工具中，常用來測量摻雜輪廓 (dopant profile) 的儀器，如二次離子質譜儀 (secondary ion mass spectroscopy, SIMS) 及穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscopy, TEM)，

---

張茂男先生為國立中央大學電機博士，現任國家毫微米元件實驗室副研究員。

陳志遠先生為國立交通大學電子工程碩士，現任國家毫微米元件實驗室助理研究員。

潘扶民先生為美國加州大學化學博士，現任國家毫微米元件實驗室研究員兼副主任。

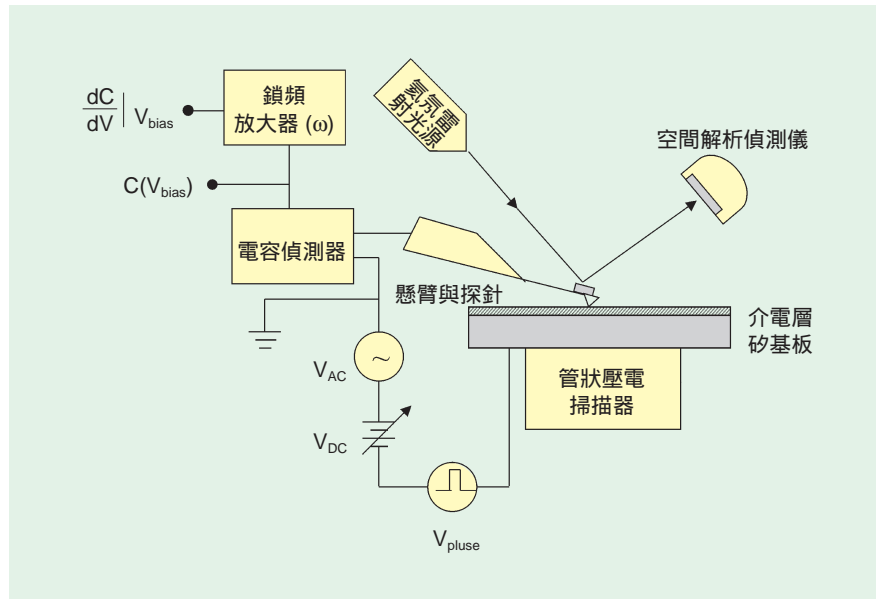


圖 1. 掃描電容顯微鏡系統架構示意圖。

兩者皆為破壞性的量測技術，唯一的非破壞性測量方法是傳統電性量測中的電容 - 電壓 (C-V) 量測技術，而將電容 - 電壓量測技術的觀念引入掃描探針顯微鏡即發展為掃描電容顯微鏡，如此一來，不但可以在非破壞性的要求下進行量測，更可以用來測量微區載子濃度的分佈，此外，其他極具潛力的應用也已被發表出來<sup>(7-12)</sup>。本文將針對掃描電容顯微鏡的基本架構與量測原理作一個概要的說明，並介紹橫截面試片製備時的注意事項，此外，文中還將

介紹掃描電容顯微鏡在矽晶圓表面分析上的應用，期使讀者對掃描電容顯微鏡技術能有更進一步的認識。

## 二、基本架構

掃描電容顯微鏡 (SCM) 系統類似原子力顯微鏡 (AFM) 的操作原理，差異在於探針和材料表面之間的交互作用力場，原子力顯微鏡為一般利用探針及樣品間原子的吸引力或排斥力，而掃描電容顯微鏡，顧名思義，為探針與樣品表面間的電容變化值。因此在系統架構上而言，直接在原子力顯微鏡設備中加裝一電容偵測系統 (如圖 1) 即成掃描電容顯微鏡。掃描電容顯微鏡可同時進行實體表貌觀察與樣品電容在樣品內的變化，對於掃描電容顯微鏡的訊號分析技術而言，除了電容訊號的擷取之外，也需要有樣品表面的微觀形貌訊號，將兩種訊號互相比較，才能真正解析出電容訊號的實際物理意義。因此我們先對原子力顯微鏡及掃描電容顯微鏡的探針、力場感測與訊號擷取裝置做一簡述。

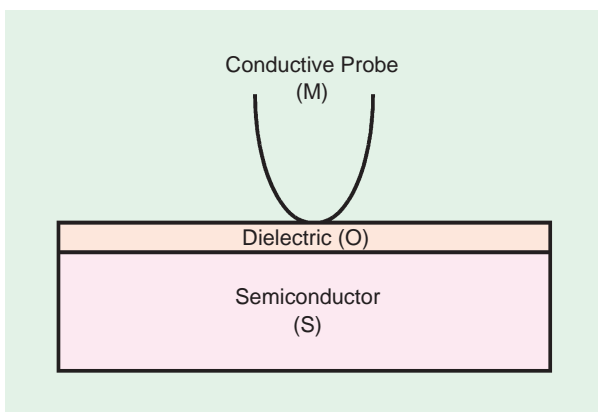


圖 2. 導電探針端與矽晶片表面接觸所形成的微小 M-O-S 結構，探針端與試片表面的接觸面積大小對掃描電容顯微鏡的解析度有絕對的影響。

### 1. 掃描探針

原子力顯微鏡的掃描探針，依探針與試片的接觸方式而區分為接觸式 (contact mode)、非接觸式

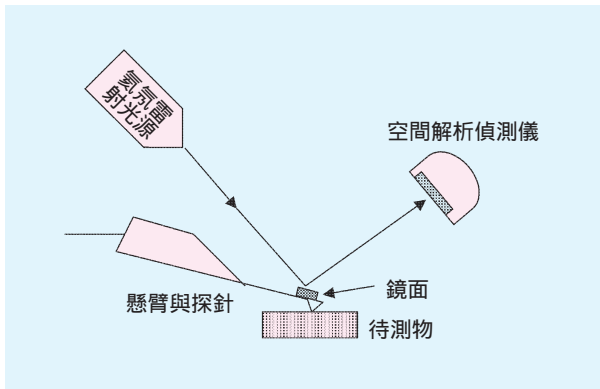


圖 3. 以光束偏折法偵測力場變化示意圖。

(non-contact mode) 與敲觸式 (tapping mode) 三種。本實驗室所使用的多為敲觸式，因其具有接觸式的精確度，同時又可避免非接觸式較難操作的缺點。然而對掃描電容顯微鏡而言，為了增加電容訊號的敏感度及避免空氣環境的影響，因此採用接觸式的掃描方式。本實驗室所使用的掃描電容顯微鏡探針，為矽探針鍍上鉑 / 鈦 (Pt/Ir) 合金膜而成的導電探針，當掃描電容顯微鏡的導電探針與矽晶片表面接觸就形成了微小的「金屬 - 二氧化矽 - 半導體」(MOS) 結構 (如圖 2)，金屬鍍膜的材質要有良好的導電性，避免在探針上有過大的壓降。由於探針會在樣品表面不斷的來回掃描，探針表面的耐磨損能力，為金屬鍍膜材料的一大考慮因素，其他常見的

探針金屬鍍膜還有鉻 / 鈷 (Cr/Co) 合金膜、 $W_2C$  與  $TiO$  等，由於鍍膜材質的不同，導電探針所造成的串聯電阻值也隨之不同。

## 2. 力場感測與訊號擷取

在力場感測及訊號擷取裝置方面，本實驗室之原子力顯微鏡採用光束偏折法偵測樣品表面微觀訊號變化，圖 3 為光束偏折法 (optical deflection measurement method) 偵測力場變化的配置圖。目前大多數的掃描作用力顯微鏡都使用光學法偵測懸臂探針微小的偏移，其中最簡單的就是雷射光束偏移法。樣品表面的微觀變化引起力場作用力的改變，因而產生懸臂探針的偏移，此一偏移導致雷射光束反射方向的改變，經由測量雷射反射光束的位移量 ( $L$ ) 即可得知對應的表面形貌變化程度，即使反射角只有微小角度 ( $\theta$ ) 的改變，當乘上由反射點 (簧片後表面) 到光度偵測元件之距離 ( $R$ ) 後， $L = R \times \theta$ ，微小的簧片偏移與力場的變化還是能被偵測到。

在電容訊號的感測擷取系統方面，主要有探針、超高頻共振電容偵測器及電容計算電子系統等部分 (如圖 4 所示)，圖 5 為電容計算電子系統的詳細電路圖示，電容計算電子系統主要的功能是提供樣品的偏壓，並且將電容偵測器得到的訊號解析出來。其訊號解析的基本流程如下：加在樣品的偏壓

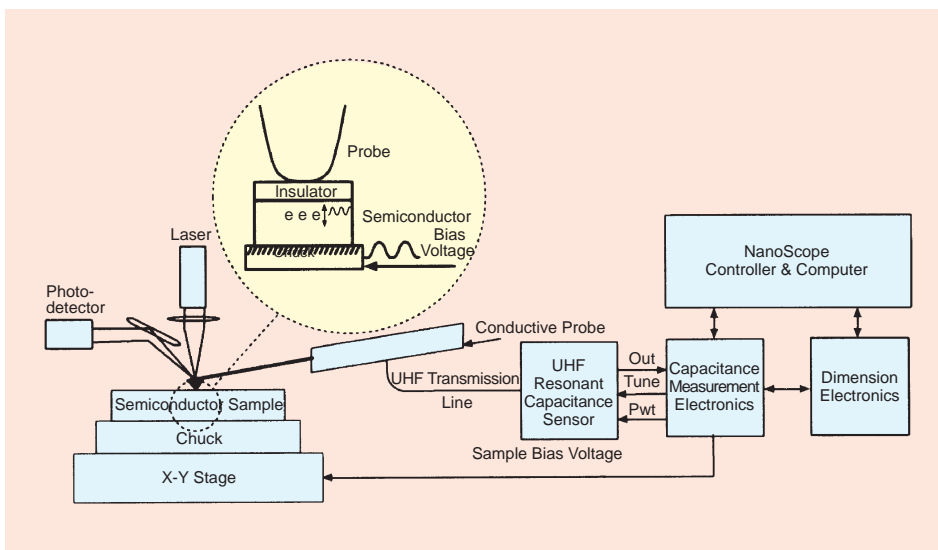


圖 4. 電容訊號的感測擷取系統基本架構示意圖<sup>(13)</sup>。

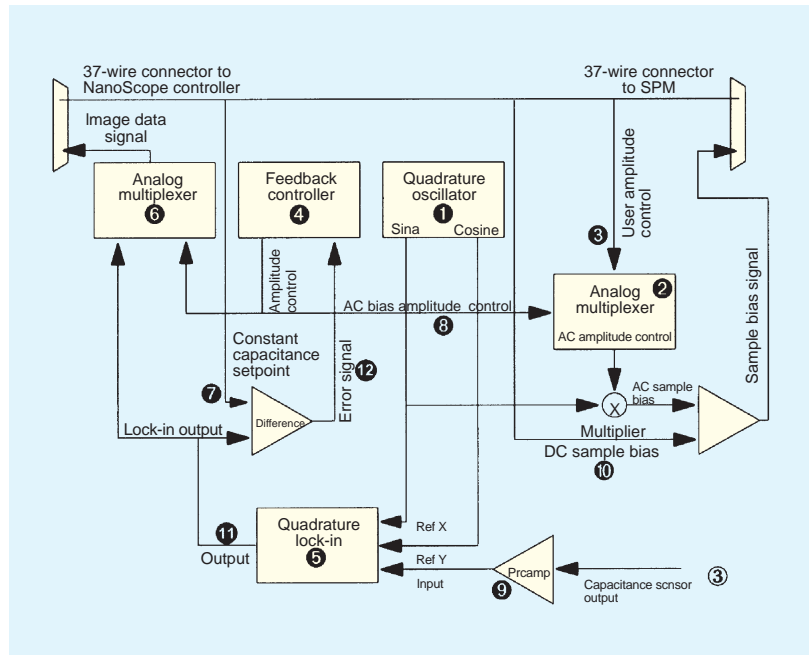


圖 5. 電容計算電子系統之詳細電路圖示<sup>(13)</sup>。

包括一個提供操作偏壓的直流電壓及調變空乏區域深度的交流電壓。交流電壓是由四分之一象的振盪器提供，這個訊號的振幅可經由訊號多工器選擇以下兩種方式控制：(1) 藉由使用者本身經操作介面設定的電壓值；(2) 經由電容計算電子系統本身內部的回饋控制器控制。和大多數偵測小訊號的系統一樣，掃描電容顯微鏡也是利用鎖頻放大器把偵測到的微小訊號放大出來。在掃描電容顯微鏡中使用的調制源是電壓，正交鎖頻放大器負責將電容偵測器偵測到的訊號解析出來，它輸出一個和正交振盪器提供的交流訊號相同頻率，但振幅正比於電容偵測器偵測到的訊號。對開迴路模式而言，經由鎖頻放大器輸出的訊號將被多工器選擇為影像訊號輸出；然而對於閉迴路模式，多工器將選擇直流偏壓振幅控制訊號當作影像訊號輸出。由於鎖頻放大器的輔助，使得掃描電容顯微鏡具有極高的訊號靈敏度，其所能感測到的微小電容變化量可達 atto-farads (即  $10^{-18}$  法拉第)<sup>(13)</sup>。因此掃描電容顯微鏡也可說是一種利用電壓調制技術來偵測材料表面電容微小變化的分析量測系統。

實驗操作方法：將待測物品置於避震平台上，經由適當的下針步驟，避免探針未能接觸或猛烈撞

擊樣品表面，在適當的接觸力道下，經由介面控制面板選擇適當的操作直流偏壓點，改變交流偏壓的振幅及鎖頻放大器的相位角，以得到最佳的電容變化訊號，同時亦可得到相對應區域的表面微觀形貌。

### 三、量測原理

長久以來，研究人員利用半導體材料的電容 - 電壓關係已瞭解許多半導體的重要特性，其中由電容 - 電壓曲線的變化而得到關於載子濃度的訊息是最為人熟知的，所以掃描電容顯微鏡的主要用途也在載子濃度分佈方面。

由於導電探針與矽晶片表面接觸形成了微小的 MOS 結構，掃描電容顯微鏡系統在導電探針端所加的偏壓就相當於 MOS 元件的閘極電壓 (gate bias)，所偵測的訊號為探針和樣品表面間的電容訊號變化量 ( $\Delta C$ ) 與引起該變化的電壓 ( $\Delta V$ ) 比值，也就是 C-V 曲線的斜率 (即  $dC/dV$ ，其代表的物理單位為電荷)。由圖 6 的傳統 C-V 曲線可以發現，在一個固定的直流偏壓點上，可以由電壓的變化得到相對應的電容變化，一般而言， $dC/dV$  訊號的變化

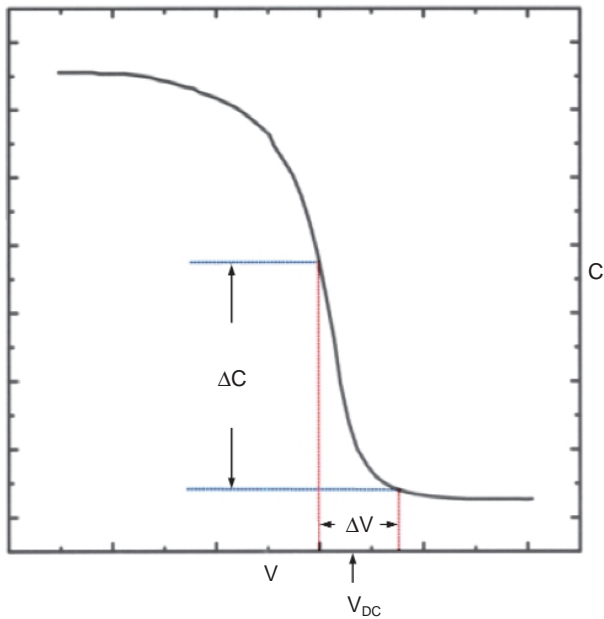


圖 6. P 型半導體的傳統電容 - 電壓曲線， $V_{DC}$  為所選擇的偏壓操作點。

可能導因於樣品表面形貌的微觀變化，或是樣品內部電性的變化，因此我們必須搭配樣品表面的微觀形貌來做判讀。藉由在探針上提供一個交流訊號，使得探針和樣品間產生一個交互電場，自由載子被交互的吸引或排斥（如圖 7），產生累聚 (accumulation) 或空乏 (depletion) 的現象。對矽基材料而言，材料的空乏區電容主要受下列四個因素影響：(1) 載子濃度，(2) 電場，(3) 介電層的厚度，及 (4) 介電層本身的性質，所以這四個因素也成為掃描電容

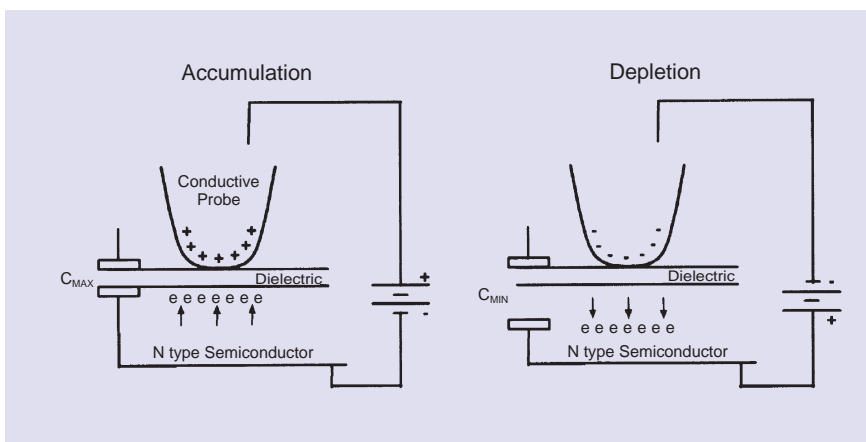


圖 7. 在交互電場影響下，載子分佈呈現累聚與空乏狀態，表面電容的大小也跟著相對改變。

顯微鏡在矽基材料上的基本應用方向。

以載子濃度變化為例，試片中載子濃度不同的區域，在相同的調制電壓下會反應出不同的電容變化量，圖 8(a) 與 (b) 分別為 N 型與 P 型半導體典型的高頻電容 - 電壓關係圖，在相同的電壓變化下，高載子濃度區所對應的電容變化量比低載子濃度區的變化量來得小，利用這種方式而得到載子濃度分佈狀況就是掃描電容顯微鏡的定電壓量測模式，這也是較常使用的操作模式；反之，若要產生相同的電容變化，則高載子濃度區比低載子濃度區需要更大的電壓變化，由這種方式所進行的量測則稱為定電容量測模式。簡而言之，掃描電容顯微鏡可說是對半導體材料電容 - 電壓曲線斜率的一種度量，並將訊號值以影像的方式呈現出來，使操作者能很快的由影像對比瞭解表面的載子濃度分佈狀況或 PN 介面。

對於摻雜均勻但介電層（如  $\text{SiO}_2$ ）厚度不同的情況而言，若以相同的交流偏壓調制（即定電壓模式），在介電質較厚的區域，其對應的空乏區電容變化量較小，所測得的  $dC/dV$  訊號也較小；反之，在介電質較薄的區域，其對應的空乏區電容變化量較大，所測得的  $dC/dV$  訊號也較大。為方便舉例說明，我們設計了介電層厚度與表面形貌相關的標準試片，該試片表面凸起的部分為二氧化矽較厚的區域，其他部分則為二氧化矽較薄的區域，圖 9(a) 與 (b) 分別為該試片的 AFM 與 SCM 影像，由 AFM 影像與 SCM 影像的比較，可以看出在二氧化矽較厚的區域，其對應的 SCM 訊號較弱。

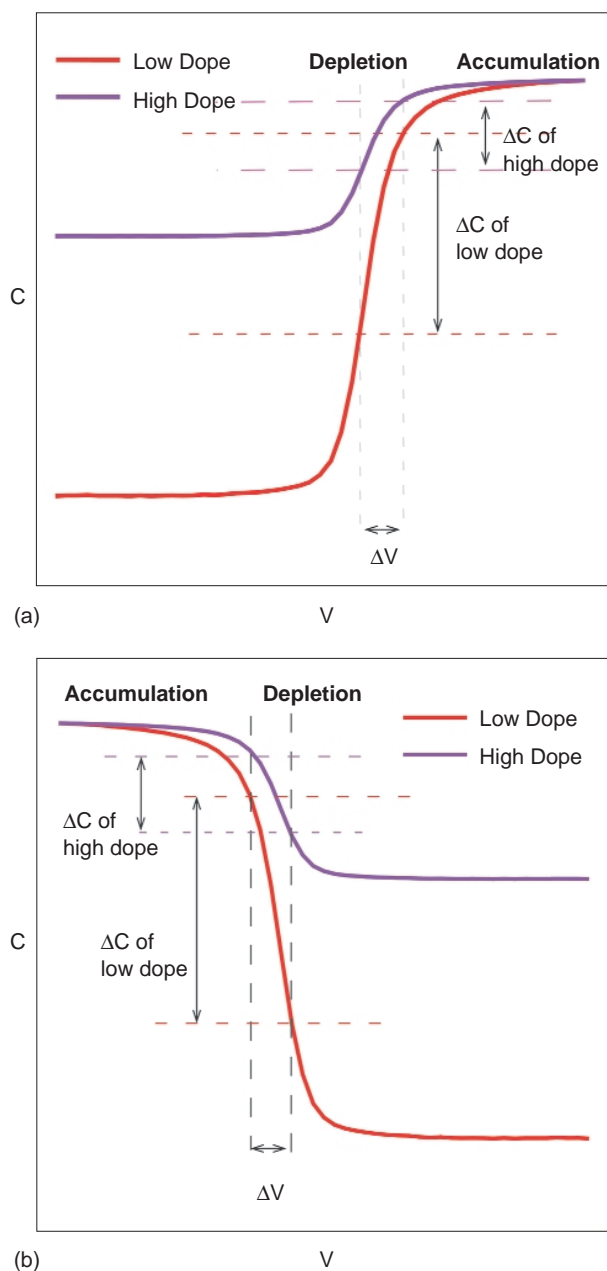


圖 8. 不同載子濃度的 (a) N 型半導體的電容 - 電壓關係圖與 (b) P 型半導體的電容 - 電壓關係圖。

除此之外，如果二氧化矽介電層與矽基材界面處有缺陷存在導致正電荷捕獲 (positively trapped charges)，此一區域的存在將使電容 - 電壓曲線產生變化，導致在某個偏壓操作點上的  $dC/dV$  訊號強度不同，當掃描電容顯微鏡的導電探針掃描過這個區域時，便可以由影像的對比變化來辨識出該區

域的分佈範圍。

以上是關於掃描電容顯微鏡量測原理的基本介紹，有興趣深入瞭解掃描電容顯微鏡的讀者可由參考文獻中再獲得更進一步的資訊。

#### 四、試片製備

由於不同的實驗目的，其試片的製備也有所不同，基本上，依觀測目的的不同，可將試片種類分為橫截面試片及平面試片兩大類。以平面試片來說，在試片的準備上最為簡單，只要注意試片基板的串聯電阻是否過大以及電極接觸是否良好即可，因為這兩者都會造成偏壓參數設定及調整上的困難，更甚者將導致無法偵測到任何訊號。橫截面試片的製備較為繁複，但原則上必須要能將試片的橫截面平坦化，再將電極接好即可。橫截面試片的製作方法與傳統的穿透式電子顯微鏡 (TEM) 橫截面試片製備方式類似，至於平坦化的方法，除了一般的研磨拋光方法之外，還可再配合化學機械研磨 (chemical mechanical polishing, CMP) 法以達到更好的效果。

載子濃度分佈狀況的量測可說是掃描電容顯微鏡目前最被看好的應用，相關的研究報告也最多，此類試片的製備方式多屬於橫截面試片，其製備流程大致有以下五個步驟：

1. 首先將試片對貼，對貼的膠材用市售的 AB 膠即可，這個步驟的目的在維持切片時的穩定度並增加量測區域。
2. 以鑽石切割機 (diamond saw) 將對貼好的試片切片。
3. 研磨橫截面，同時將試片適度薄化，薄化的程度依試片需求而定，其目的主要在降低串聯電阻。
4. 拋光處理。由於研磨時在表面產生的刮痕會影響量測結果，所以此步驟十分重要，尤其對於觀察微區載子濃度分佈或摻雜輪廓的試片，通常最後還要加上化學機械研磨的步驟，以便得到更平整的表面。
5. 最後以銀膠將試片固定於一小鐵片上即可用來進行量測。

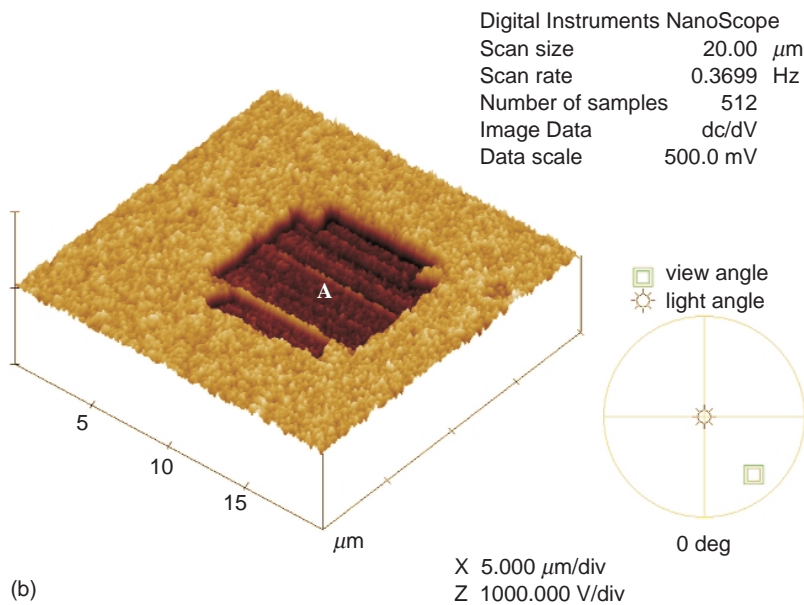
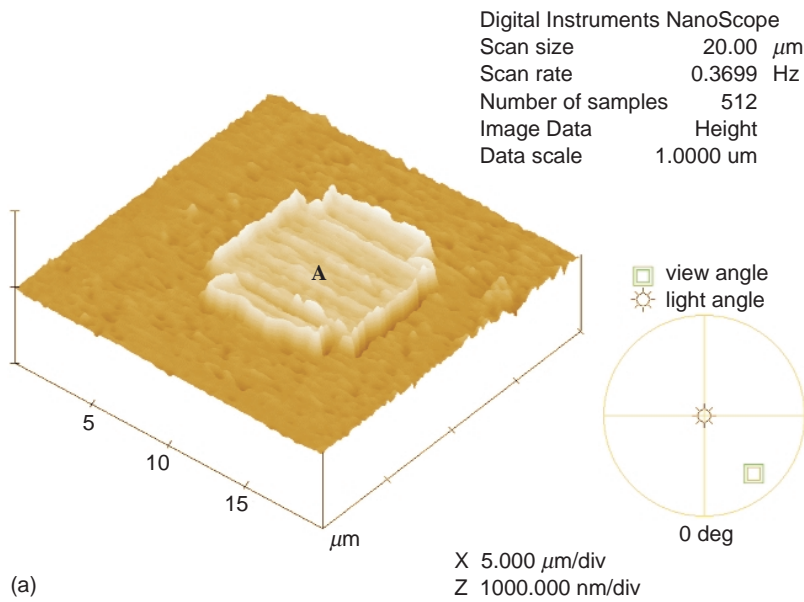


圖 9.

(a) 標準試片的 AFM 影像與 (b) SCM 影像，其中 A 區為介電層較厚的區域，由圖中可以明顯看出其相對應的電容變化訊號較弱。

對於有表面圖樣或研究平面缺陷分佈這類型的試片，其試片製備方式多屬於平面試片，可能的話，建議使用 P 型或 N 型基板做為這類試片的基板以降低串聯電阻，操作時，直接將整個 4 吋或 6 吋晶片放到機台的基座上吸住，再接好導線即可；如果非用阻值高的基板不可，就要設法將基板薄化以降低串聯電阻，至於基板薄化與試片置放的方法，可以配合上述橫截面試片的製備方式來完成。

## 五、分析與應用

掃描電容顯微鏡在實際操作上，還可以加上直流偏壓以改變交流偏壓的操作點，此舉有助於得到較佳的影像對比，不過在偏壓參數的設定上，則需十分謹慎，以免影響量測時的判斷與結果的準確度。偏壓參數的設定通常受以下兩個因素影響：

1. 導電探針的材質。由於導電探針材質的不同，導電探針的電阻值也隨之不同，對  $\text{W}_2\text{C}$  與  $\text{TiO}$

鍍膜的導電探針而言，通常必須設定較高的偏壓參數，才能得到較佳的影像，相較於這兩者，CrCo 與 PtIr 鍍膜的導電探針所需設定的偏壓參數就比較低。

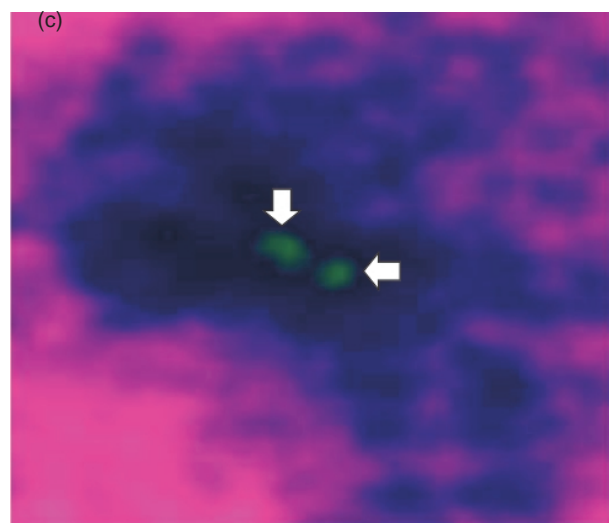
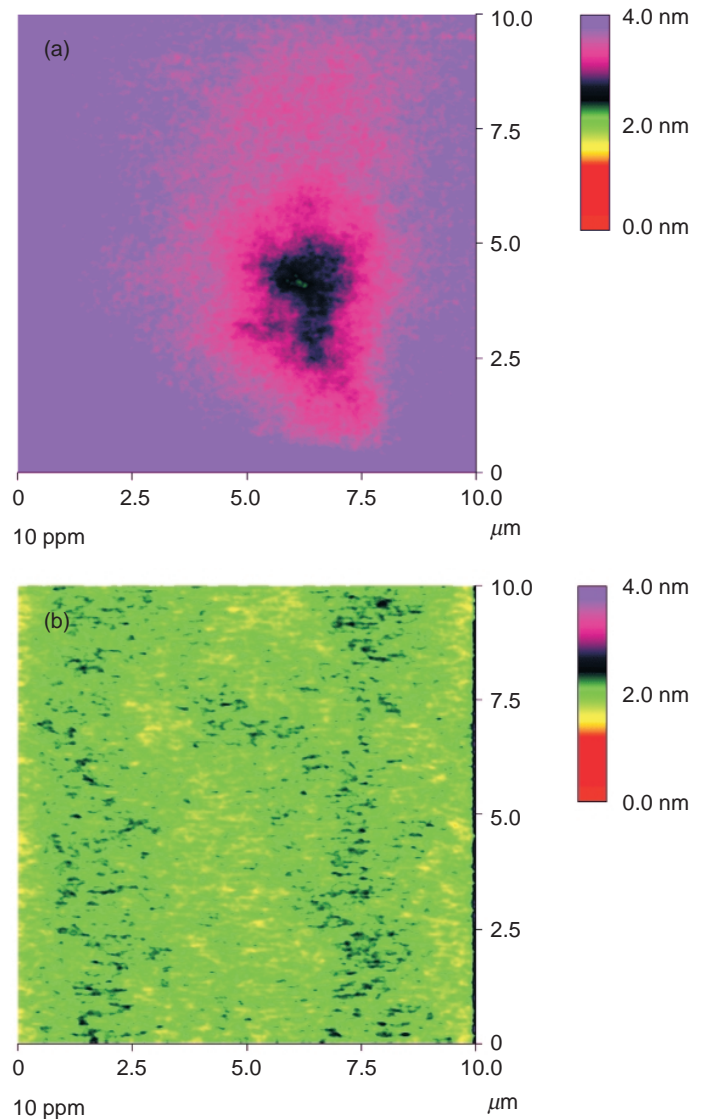
- 試片本身。試片上性質不同的區域，電容-電壓的關係也不一樣，而電容 - 電壓的關係直接影響了偏壓參數的設定，為求最佳的對比，通常將交流偏壓的操作點定在電容 - 電壓曲線斜率 ( $\Delta C/\Delta V$ ) 差異較大處。一般而言，由於系統靈敏度極佳，用來作為調制源的交流偏壓振幅都在 0.02 - 0.3 V 之間。

除了一般的載子濃度分佈分析應用之外，掃描電容顯微鏡在電荷捕獲 (trapped charges) 分佈的分析應用也開始受到重視<sup>(14-16)</sup>，最近我們將掃描電容顯微鏡應用於微量鐵污染的矽晶圓表面分析上，所用的試片為覆蓋 40 Å 厚二氧化矽的矽基板，該基板為事先經過微量鐵污染處理的 P 型矽晶片，實際的 SCM 與 AFM 量測結果分別為圖 10(a) 與 (b)，圖 10(a) 的特殊二維影像對比來自正電荷捕獲分佈，若將該特殊區中央部分加以放大，可以發現正電荷捕獲濃度最大的位置 (圖 10(c) 中的箭號處)，由於正電荷捕獲分佈區與其他正常區域的電容 - 電壓關係明顯不同，所以可以由 SCM 看出正電荷捕獲分佈區域所對應的分佈範圍，而整個區域表面的平坦度並沒有明顯地變化 (如圖 10(b))，由此量測結果可以看到微區電荷的分佈情形。

## 六、結語

本文簡要的介紹了掃描電容顯微鏡技術的基本原理、系統架構、試片製備、分析應用及操作上的注意事項。掃描電容顯微鏡經由導電探針掃描試片表面，藉由偵測表面電容的變化而得到試片表面各個區域自由載子濃度分佈的相對大小，並將之成像

圖 10. 10 ppm 鐵污染試片的 (a) 掃描電容影像與 (b) 表面平坦度影像，圖 (c) 為放大的掃描電容影像，白色箭號所指處為正電荷捕獲濃度最大之處，其範圍介於 0.1 微米到 0.11 微米之間。





以利分析，因此能夠直接而快速地偵測出半導體材料中自由載子濃度的二維分佈狀況。此外，由於掃描電容顯微鏡仍保有一般掃描探針顯微鏡的優點，也具有分析表面平坦度的功能，所以能在進行表面微區電容量測的同時，以接觸式原子力電子顯微鏡的模式，提供該區域的表面形貌資訊，對於因表面形貌而引起的電性變化而言，掃描電容顯微鏡也是一項極有力的分析工具。另一方面，由於試片製備與量測結果息息相關，所以在試片製作方面，除了文中所提的基本方法，針對不同的試片需求，仍有必要自行開發新的試片製備方式<sup>(14)</sup>，目前探討試片製備方法與量測結果的研究報告已有多人發表，對於掃描電容顯微鏡而言，試片製備方法的改良也是一個值得努力的方向。文中側重基本觀念與筆者在這方面的實務經驗，如實驗原理、試片製備方法與操作注意事項，目的是希望本文不單只是一篇介紹性的文章，也期盼文中所傳遞的相關訊息能對剛接觸這項技術的讀者有實質上的幫助，並發揮拋磚引玉的功用，讓掃描探針分析技術的應用更上一層樓。

## 參考文獻

1. V. Raineri and S. Lombardo, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 18**, 545 (2000).
2. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, S. D. Stiring, C. C. Williams, and H. Smith, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 18**, 549 (2000).
3. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, and C. C. Williams, *J. Appl. Phys.*, **85**, 7774 (1999).
4. M. L. O'Malley, G. L. Timp, W. Timp, S. V. Moccio, J. P. Garno, and R. N. Kleiman, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3672 (1999).
5. Y. Huang, C. C. Williams, and J. Slinkman, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 344 (1995).
6. J. J. Kopanski, J. F. Marchiando, D. W. Berning, R. Alvis, and H. E. Smith, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 16**, 339 (1998).
7. K. Gotto and K. Hane, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 544 (1998).
8. R. Mahaffy, C. K. Shih, and H. Edwards, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 18**, 566 (2000).
9. V. Raineri and S. Lombardo, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 18**, 545 (2000).
10. J. W. Hong, S. M. Shin, C. J. Kang, Y. Kuk, Z. G. Khim, and Sang-il Park, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1760 (1999).
11. K. V. Smith, X. Z. Dang, E. T. Yu, and J. M. Redwing, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 18**, 2304 (2000).
12. J-K. Leong, J. McMurray, and C. C. Williams, and G. B. Stringfellow, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 14**, 3113 (1996).
13. Digital Instrument Inc. *Support Note No. 224 Rev. D*, 224-5 (1999).
14. Filippo Giannazzo and Francesco Priolo, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2565 (2000).
15. Filippo Giannazzo, Francesco Priolo, Vito Raineri, and Vittorio Privitera, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 598 (2001).
16. V. Raineri and S. Lombardo, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 18**, 545 (1999).