

調制電壓對掃描電容顯微鏡分析電性 接面影像之影響

The Influence of Modulation Voltage in Scanning Capacitance Microscopy on the Observation of Electrical Junctions

胡晉璋、張茂男、周棟煥、李耀仁

Chin-Wei Hu, Mao-Nan Chang, Tung-Huan Chou, Yao-Jen Lee

掃描電容顯微術可用於定性分析半導體材料中載子濃度的分布及類型、電性接面深度、空乏區寬度、通道長度以及介電層品質等。本文將首度介紹暗模式掃描電容顯微術，並探討調制電壓對電性接面影像觀察的影響。暗模式掃描電容顯微術能完全排除光擾造成的電性接面影像失真，進而能提供研究人員深入觀察調制電壓對電性接面影像所造成之影響。研究結果顯示調制電壓過大，會造成窄化的電性接面影像，同時所觀察到的載子分布區域也會有擴張的情形，因此，使用暗模式掃描電容顯微術分析電性接面影像時，需使用較低的調制電壓才可得到精確可靠的分析結果。

Scanning capacitance microscopy (SCM) can qualitatively provides the distribution of carrier concentrations and types, electrical junction depths, widths of depletion regions, channel lengths and the quality of a dielectric layer. In this article, we for the first time introduced a dark-mode SCM and demonstrated the influence of modulation voltage (MV) on SCM images of electrical junctions without photoperturbation. Dark-mode SCM can avoid junction image distortion induced by photoperturbations, allowing us to take a close look at the role of MV on SCM images of electrical junctions. Our experimental results indicated that higher MV may narrow the observed junction regions and broaden the carrier distribution. Therefore, using lower MV in dark-mode SCM is a reliable approach to precise SCM measurements.

一、掃描電容顯微術

1. 過去與現在

掃描電容顯微術 (scanning capacitance microscopy, SCM) 屬於掃描探針顯微術家族的一員，自從 1987 年第一個掃描電容顯微鏡的美國專

利發表後，掃描電容顯微術相關的研究工作也陸續擴展，至今已有超過 260 篇國際期刊論文發表。由於掃描電容顯微鏡在大氣環境下使用，空氣中的濕氣會在樣品及探針尖附著形成水膜，因此在 1996 年日本 N. Nakagiri 等人提出了樣品表面水膜層在掃描電容圖譜 (scanning capacitance spectroscopy,

SCS) 量測上造成遲滯 (hysteresis) 現象的研究報告⁽¹⁾，這意味著乾燥環境對掃描電容顯微術的重要性。在 2000 年義大利的 F. Giannazzo 等人提出藉由傾斜角度研磨試片將掃描電容顯微鏡的分析區域放大⁽²⁾，等效而言，則是提高了影像的空間解析度。在 2002 年該研究團隊的 D. Goghero 等人又進一步提出了試片表面狀況對掃描電容顯微鏡分析結果的影響⁽³⁾，試片表面若無適當處理，其表面的陷阱電荷 (trapped charge) 會影響微分電容 (dC/dV) 訊號，並且在掃描電容圖譜量測時產生與水膜影響類似的遲滯現象，顯現出試片表面處理對掃描電容顯微術的重要性。由於掃描電容顯微鏡主要用於觀察或研究電性界面與載子濃度的縱深分布，其樣品多為橫截面試片，因此上述研究內容十分具有參考價值，這也是掃描電容顯微術發展初期首先必須要克服的問題。

在 2001 年奧地利的研究人員 J. Smoliner 提出了微分電容訊號的非單調行為 (non-monotonic behavior)⁽⁴⁾，解釋了微分電容訊號、直流偏壓與載子濃度間的微妙關係，這對於之後的影像訊號分析提供了很大的幫助，特別是在分析電性界面時，可藉以說明電性界面兩側的訊號意涵。在 2003 年我國國家奈米元件實驗室 (National Nano Device Laboratories, NDL) 的材料分析團隊首先證實了掃描電容顯微鏡的光擾現象⁽⁵⁾，當原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 的紅光雷射照射至矽基樣品表面，樣品材料吸收光子後產生大量的電子-電洞對 (electron-hole pairs)，這不僅影響了微分電容訊號強度，更導致所觀察到的電性界面區域較實際為窄。同年美國國家標準技術局也提出了光擾影響掃描電容圖譜的研究報告⁽⁶⁾，同時也提到調制電壓 (modulation voltage, MV) 對掃描電容圖譜的影響。由於光擾問題對於掃描電容顯微鏡分析電性界面的影響甚鉅，因此在 2005 年國家奈米元件實驗室的 M. N. Chang 設計出具有前翼式懸臂的導電探針⁽⁷⁾，可大幅降低光擾對微分電容訊號的干擾。在 2007 年第一套具有暗模式掃描電容顯微鏡 (dark-mode SCM) 模組的掃描探針顯微鏡系統由國家奈米元件實驗室的 M. N. Chang 提出設計概念，再由美商威科公司的技術部門進行開發與組裝測

試，並首度建置於國家奈米元件實驗室的材料分析部門，這也是暗模式掃描電容顯微鏡的鼻祖。目前該掃描模式已成為新型掃描探針顯微鏡 (如封面照片) 的選購功能之一，並實際應用於半導體元件與材料的檢測工作上。

2. 調制電壓

商用化的掃描電容顯微鏡以原子力顯微鏡為基礎架構 (如圖 1 所示)，就矽基材料而言，當導電探針與試片表面接觸，即可形成金屬-氧化層-半導體 (metal-oxide-semiconductor, MOS) 的結構。在進行掃描分析時，系統必須在試片表面施加調制電壓，以產生表面電容變化，再藉由鎖相放大器取得材料表面的微分電容訊號，並將所偵測到的訊號分布繪成 (mapping) 二維的微分電容影像 (或稱為掃描電容顯微鏡影像)。微分電容影像可幫助我們分析半導體材料的許多特性，除了廣泛應用於分析半導體材料中的二維載子濃度分布與電性界面之外，還能用以研究缺陷分布⁽⁸⁾、鐵電域 (ferroelectric domain) 的結構⁽⁹⁾、金氧半場效電晶體之元件結構⁽¹⁰⁾ 與介電層特性⁽¹¹⁾ 等。由於掃描電容顯微鏡的微分電容訊號會隨著調制電壓升高而增加，一般使用者都會試著採用較大的調制電壓，以取得較強的微分電容訊號，通常只要能取得對比清晰的影像，不太會在意調制電壓值的選取。根據先前掃描電容顯微鏡在電性界面的研究報告，調制電壓的選取範圍

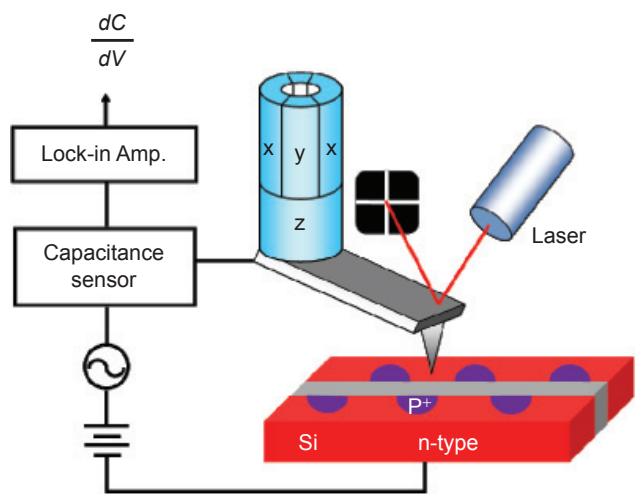


圖 1. 掃描電容顯微鏡基本架構示意圖。

甚廣，可從 0.3 V 至 5 V，但使用不同的調制電壓所取得的微分電容影像，其影像呈現出的物理意義相同與否，是一項值得深思的問題。由於調制電壓愈大，其在樣品中的調制範圍也愈大，對於半導體材料的表面分析而言，一般相信改變調制電壓的大小，只是造成影像空間解析度的差異而已。在產學研究領域，電性接面的量測與分析一直是掃描電容顯微鏡的工作重點，如果調制電壓對空間解析度會產生影響，勢必也會造成所觀察到的電性界面影像有所差異，過去的研究結果已證實光擾會導致掃描電容顯微鏡所取得的電性界面影像失真，因此，要了解調制電壓對電性界面的影響，首先就必須要完全排除光擾的干擾。

二、實驗架構

1. 暗模式掃描

為了完全排除光擾對電性界面影像的影響，我們使用國家奈米元件實驗室的掃描探針顯微鏡系統為主要的量測工具，如前所述，該系統已搭載暗模式掃描電容顯微鏡模組，其運作方式採取兩階段接觸式掃描(如圖 2 所示)。在第一階段掃描時與傳統的接觸式原子力顯微術一樣，藉由雷射光經探針懸臂反射，由光偵測器偵測其偏移量來得知樣品表面的起伏狀況，系統在這個階段同時記錄下探針的掃

描路徑。在進行第二階段掃描時，將雷射光關掉，依據先前記錄的掃描路徑來進行掃描，同時偵測樣品表面的微分電容訊號，此時所偵測到的微分電容訊號即可完全不受任何光擾影響。使用暗模式掃描電容顯微術，我們便有機會深入探討調制電壓在分析電性界面所扮演的角色。

2. 試片結構

本文所述之實驗項目，其所使用的試片基板皆為 N 型 <100> 矽晶片，摻雜濃度為 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，在國家奈米元件實驗室經由標準的微影和蝕刻製程，製作出厚度 250 奈米 (nm) 的二氧化矽 (SiO_2) 硬質光罩 (hard-mask)，光罩間的開口寬度為 0.8 微米 (μm)，光罩所遮蔽的寬度為 2 微米。接著以 BF_2^+ 分子離子進行離子佈植製程，所使用的機台為國家奈米元件實驗室的中電流離子佈植機 (Varian E220)，採用的佈植能量與劑量分別為 20 keV 與 $5 \times 10^{14} \text{ ions/cm}^2$ ，樣品結構如圖 3 所示。之後進入退火製程，使用的設備為國家奈米元件實驗室的急遽升溫退火爐 (KORONA RTP 800)，在最高溫度 1050 °C 的加熱時間約為 0.2 秒，接下來經過低溫爐管退火 (furnace annealing, FA) 處理，其溫度為 450 °C，時間為 6 小時，最後再以電漿增強化學氣相沉積法 (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 沉積一層 400 奈米的四乙氧基矽烷 (tetra-eth-oxy-silane, TEOS) 保護層。

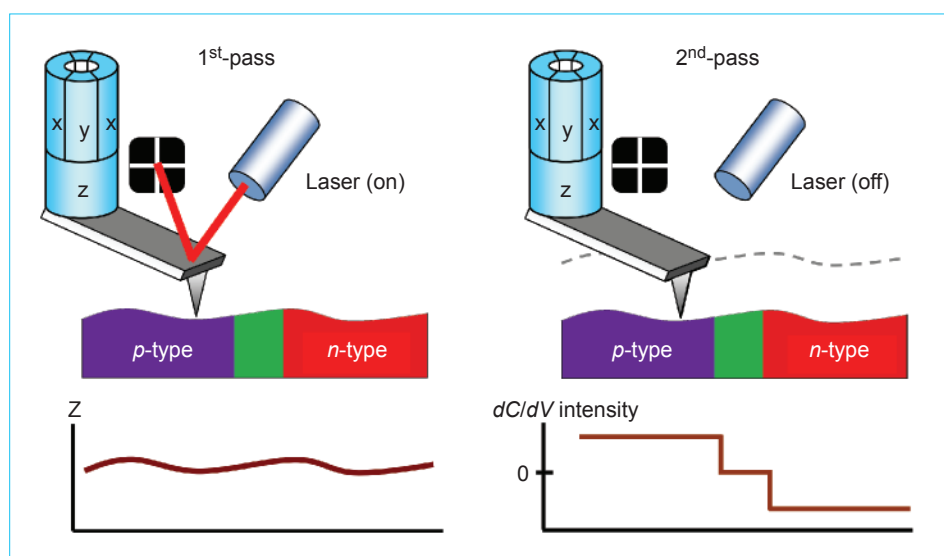


圖 2. 暗模式掃描電容顯微術的兩階段掃描架構⁽¹²⁾。

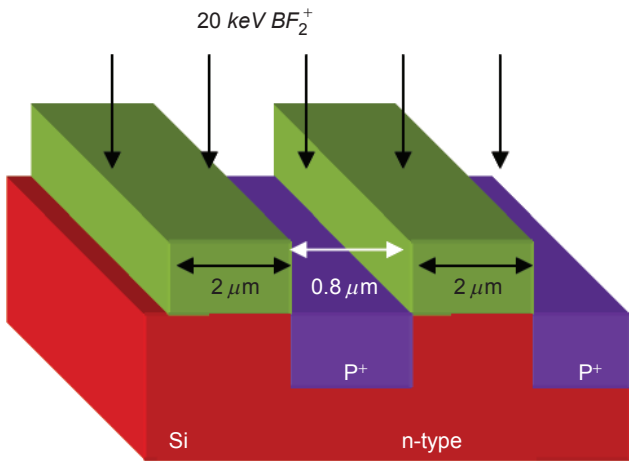


圖 3. 試片結構圖。

三、結果與討論

1. 暗模式掃描

雖然已經知道採用兩階段掃描模式可排除光擾對掃描電容顯微術的影響，但在一般原子力顯微術的接觸式掃描過程中，必須藉由光偵測器來感測懸臂反射的雷射光，並回饋至系統，以確保探針與樣品表面保持等力接觸，這對於掃描電容顯微術而言相當重要。因為在掃描過程中，接觸面積的變動會導致明顯的訊號擾動，等力接觸意味著探針與樣品表面的接觸面積也能保持一定。然而在第二階段的

暗模式掃描過程並無等力回饋機制的輔助，因此需先驗證其訊號擾動程度是否與同步掃描（第一階段掃描）的訊號擾動程度有所差異，我們在均質的 N 型矽基板上進行掃描，並由兩個階段的掃描影像中求得微分電容訊號的方均根 (root mean square, RMS) 值。由圖 4 可得知，同步掃描的訊號擾動皆大於暗模式掃描，隨著調制電壓增加，訊號擾動程度亦隨之增加，這個結果不僅驗證了暗模式掃描的穩定性，也直接看到了光擾對於微分電容訊號擾動的影響。

圖 5 為同步掃描與暗模式掃描所取得的電性接面影像，由圖中可明顯地看出光擾造成了 P 型區影像的嚴重膨脹，以及空乏區影像的窄化，此一現象與先前的研究結果一致，而此結果亦強調了暗模式掃描之重要性。

2. 探針的影響

在驗證過暗模式掃描的訊號穩定度之後，接著探討探針對所取得的微分電容訊號的影響，為此我們使用了白金 (Pt) 導電探針與一般商用的金屬鍍膜 (Ti-Pt-coated) 探針，以不同的調制電壓在 N 型矽基材區域量測微分電容訊號，結果如圖 6 所示。由圖中可清楚地看到在任何調制電壓下，白金探針所取得的微分電容訊號皆大於金屬鍍膜探針，這表示

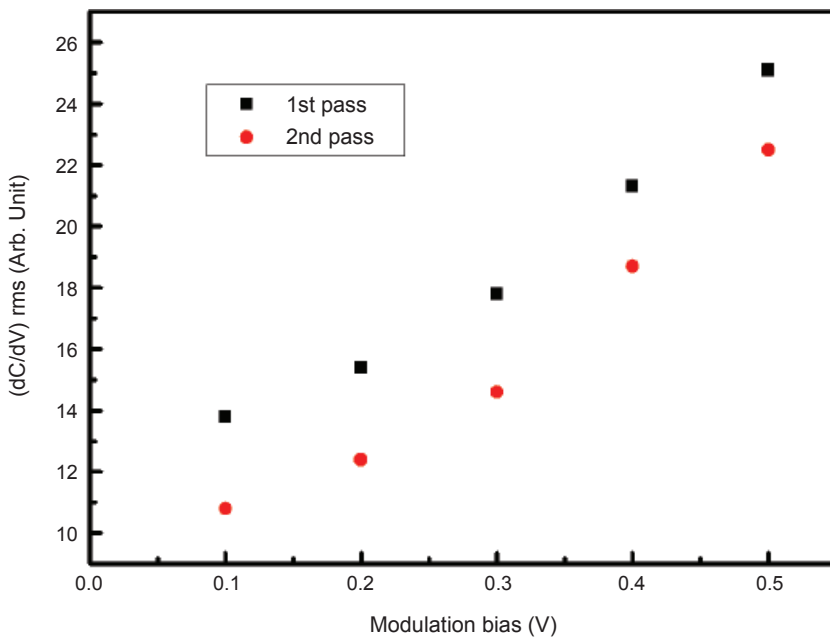


圖 4. 同步掃描與暗模式掃描的微分電容訊號擾動比較。

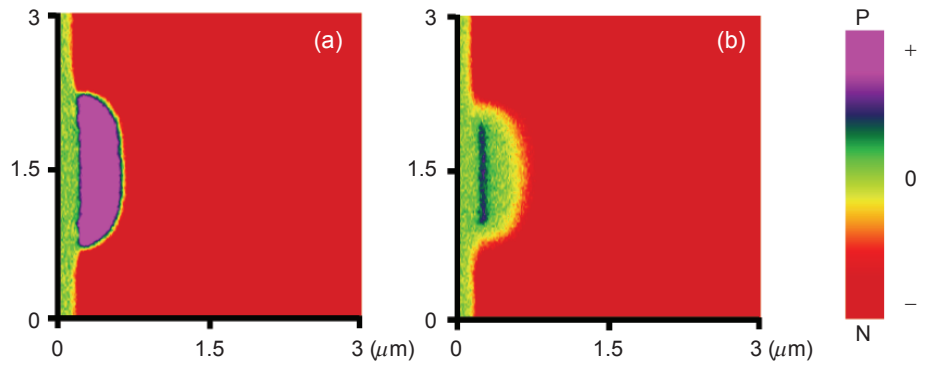


圖 5.
(a) 受光擾影響的同步掃描與
(b) 無光擾的暗模式掃描取得的電性接面區域影像。

在使用較低的調制電壓量測時，白金探針可提供較佳的微分電容訊號以利分析。由於一般的導電探針是在矽探針表面鍍上一層金屬膜，因此探針阻抗較高，會衰減掉部分的調制電壓，造成訊號值降低。

3. 調制電壓之影響

一般進行掃描電容顯微術量測時，都會發現微分電容訊號值會隨著調制電壓升高而增加。因此通常選取任一調制電壓，只要能使得微分電容影像清晰，即可進行量測分析，故在進行電性接面的量測時，往往忽略了調制電壓值的選取是否適當。本實驗利用標準半導體元件製程製作電性接面結構，並將其製備成掃描電容顯微鏡的橫截面試片，以暗模式掃描，並在直流偏壓為零的條件下，觀察微分

電容影像在不同調制電壓下的變化(如圖 7 所示)。圖 7 顯示隨著調制電壓增加，代表空乏區的綠色帶狀區域亦明顯變窄，代表所觀測到的空乏區有隨著調制電壓增加而變窄的情形，同時也可以發現代表 P 型區域的正相位訊號區塊隨著調制電壓增加而有明顯擴張的現象，這些現象恰與光擾所造成的影響類似，但因本實驗已完全排除光擾因素，因此能確定是調制電壓對掃描電容顯微鏡的量測所造成的影響。也因為調制電壓對掃描電容顯微鏡量測電性接面的影響與光擾所造成的影響趨勢相同，所以在有光擾的量測環境中，調制電壓對電性接面微分電容訊號的微妙影響一直未被觀察到。

接著我們將圖 7 中的每一張圖分別作縱深分析，並放在圖 8 中一起比較，在圖 8 中以調制電壓

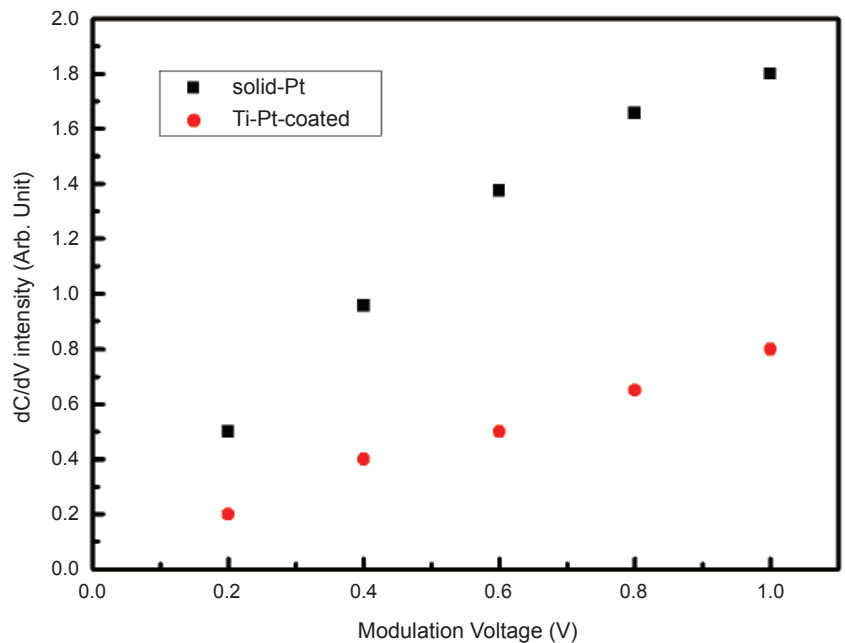


圖 6.
白金探針和金屬鍍膜探針在不同調制電壓下的訊號強度比較，前者所得到的微分電容訊號強度都明顯比後者增加一倍以上。

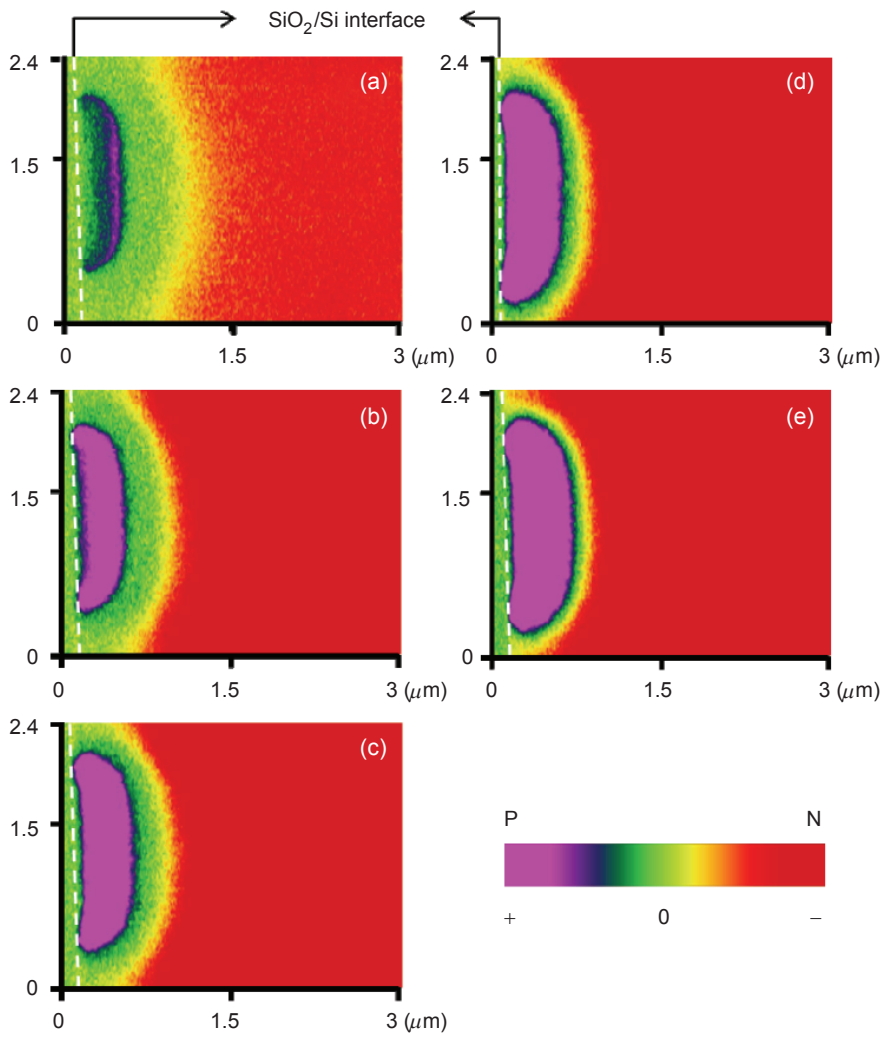


圖 7.
調制電壓為 (a) 0.1 V、(b) 0.3 V、
(c) 0.5 V、(d) 0.7 V、(e) 0.9 V 的
微分電容影像圖⁽¹²⁾。

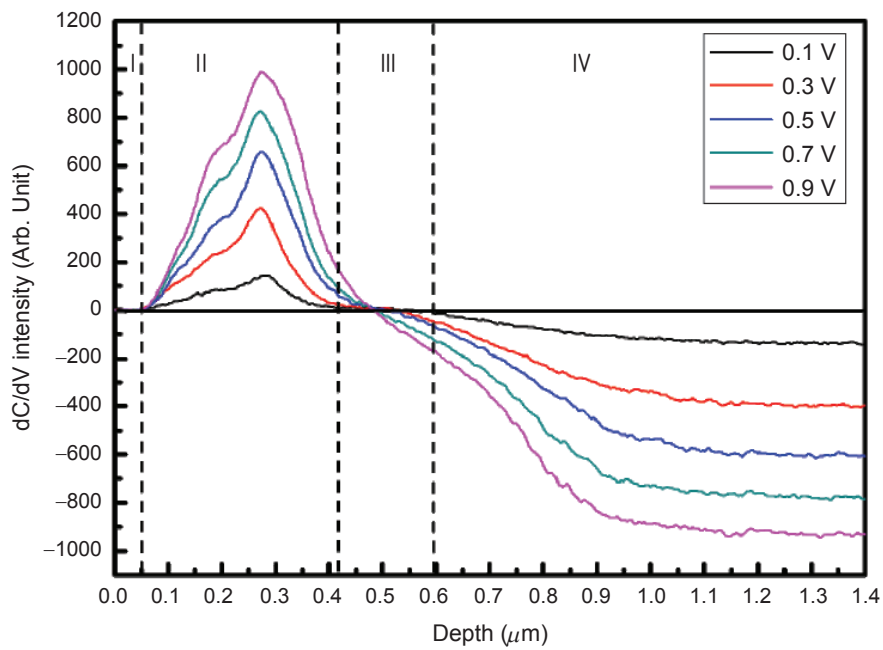


圖 8.
對應至圖 7 的微分電容訊號縱深
分析⁽¹²⁾。

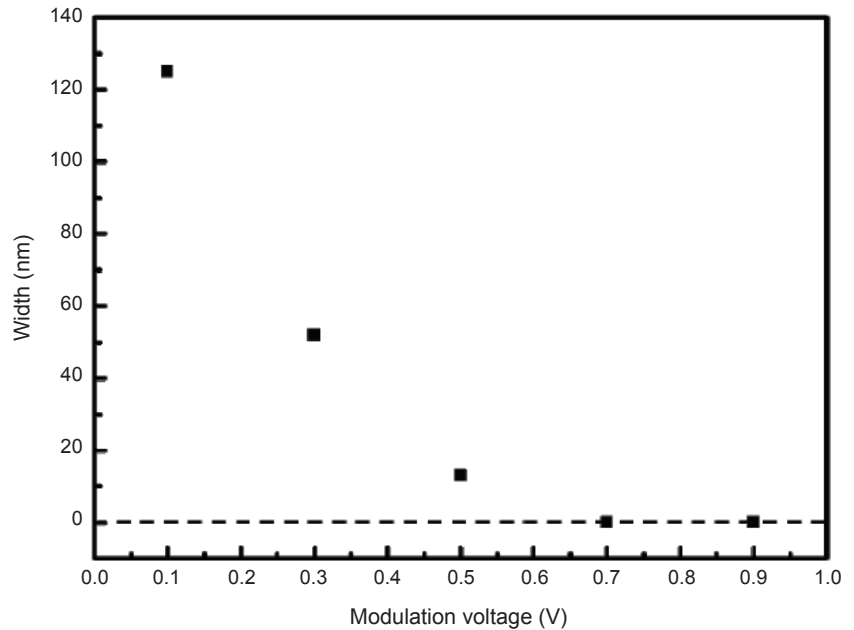


圖 9. 對應到圖 8 中 III 區的空乏區寬度變化⁽¹²⁾。

為 0.1 V 的黑色曲線為參考基準，依微分電容訊號的相位與強度分成 I、II、III 與 IV 四個區域。首先，看到微分電容訊號為零的 I 區，此為試片表面的四乙氧基矽烷保護層，而在 II 區及 IV 區的訊號分別為代表 P 型的正相位訊號和 N 型的負相位訊號。基本上在這兩個區域的訊號強度皆隨著調制電壓增加而增加，但仔細觀察後可發現 II 區的訊號變化行為不如 IV 區單純，在 II 區中的訊號強度值在達一個峰值之後又向下遞減，此現象為微分電容訊號的非單調行為⁽⁴⁾。這是因為在直流偏壓為零時，掃描載子濃度分布範圍較寬的樣品時，其所測得的微分電容訊號值會在某個濃度值達到最強，之後其微分電容訊號值則隨著濃度提高而下降，在 II 區微分電容訊號變化即符合非單調行為的趨勢，而 IV 區是 N 型矽基板區域，該區載子濃度低，且分布均勻，因此會發現在深度超過 1.1 微米後，微分電容訊號就會趨於穩定。而 III 區是調制電壓在 0.1 V 時微分電容訊號為零的區域，此區域定義為空乏區。然而隨著調制電壓的增加，可發現在此區域靠近 P 型區一側的微分電容訊號會漸漸轉變成正相位，而靠近 N 型區一側的微分電容訊號則漸漸轉變為負相位，這種現象使得所觀測到的空乏區出現明顯的窄化情形。圖 9 為調制電壓與所觀察到的空乏區寬度變化的關係，由圖中可清楚看見隨著調

制電壓的增加，其測得的空乏區寬度漸漸縮小，甚至在調制電壓大於 0.7 V 之後收縮為零。

針對在 III 區所觀察到的空乏區變化，可利用一個簡單的物理機制來解釋。我們考慮探針在空乏區上的三個位置 (如圖 10(a) 與 (b) 所示)，分別為靠近左方的 P 型區 (L)、靠近右方的 N 型區 (R) 以及中央位置 (C)，當調制電壓很小時，如圖 10(a) 所示，其調制電壓作用後的主要訊號來源皆來自空乏區，因為不論在哪一個位置上，其調制作用範圍都在空乏區內，因此其微分電容訊號就如同圖 8 中的黑色曲線 (調制電壓為 0.1 V) 上訊號為零的部分。而當調制電壓增大時，其調制作用範圍將會擴大，當探針在位置 L 時，其作用範圍可能涵蓋到 P 型區的一部分，此時探針將會測到 P 型的正相位訊號，同理在位置 R 會測到 N 型的負相位訊號。因此，可觀察到 III 區中的空乏區寬度隨著調制電壓增加而變窄，同時 P 型區域的影像亦產生擴張的現象。圖 10(c) 為探針下方所構成的等效電容單元模型，當探針於試片上掃描時，從橫截面看，其調制電壓作用範圍可視作三組等效電容並聯，分別為左側的 C_1 、中央的 C_2 與右側的 C_3 ，所以在探針與試片間的總電容 C_{total} 可寫為：

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (1)$$

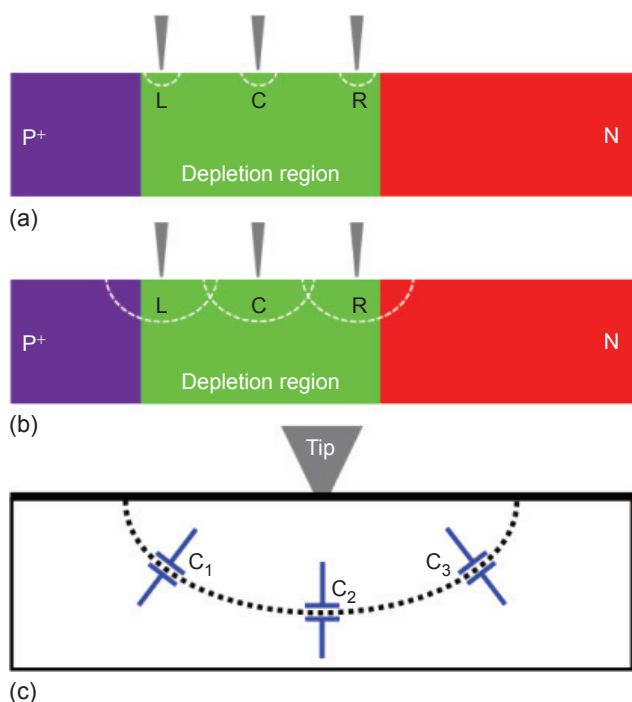


圖 10. 探針在空乏區的不同位置時，(a) 低調制電壓與 (b) 高調制電壓下的訊號來源示意圖，(c) 調制範圍 (黑色虛線) 的等效電容單元示意圖⁽¹²⁾。

由於掃描電容顯微鏡的訊號為微分電容訊號，故根據上式可知總訊號值應為三個微分電容訊號相加的結果，如下式：

$$\frac{dC_{\text{total}}}{dV} = \frac{dC_1}{dV} + \frac{dC_2}{dV} + \frac{dC_3}{dV} = C'_1 + C'_2 + C'_3 \quad (2)$$

由圖 2 可知微分電容訊號 C'_1 、 C'_2 、 C'_3 在 P 型區為正值，在 N 型區為負值。當調制電壓增大時，如在圖 10 的位置 L 進行測量，此時可將 C'_2 和 C'_3 的值視為零，但因調制區域擴展到 P 型區，故 C'_1 的訊號值為正相位，所以根據 (2) 式將微分電容訊號相加後的結果仍為正值，因此呈現出的是 P 型區域的微分電容訊號，而非代表空乏區的訊號。同理，在位置 R 會呈現出 N 型的負相位訊號，所以才導致所觀察到的空乏區隨著調制電壓增加而窄化的現象。若調制電壓更大時，探針下方所感測到的調制範圍將同時涵蓋 N 型和 P 型區，此時 C'_2 的值仍可視為零，總訊號值即為 C'_1 和 C'_3 相加後的結

果。但值得注意的是兩訊號剛好反相，因此探針可以在空乏區中找到一個訊號平衡點，使得 C'_1 和 C'_3 相加後為零，此即為觀測到的電性界面位置，也就是圖 8 中調制電壓在 0.7 V 以上時微分電容訊號為零的位置，此位置與先前研究報告利用掃描電容圖譜曲線疊加之平衡點意義相符⁽¹³⁾。

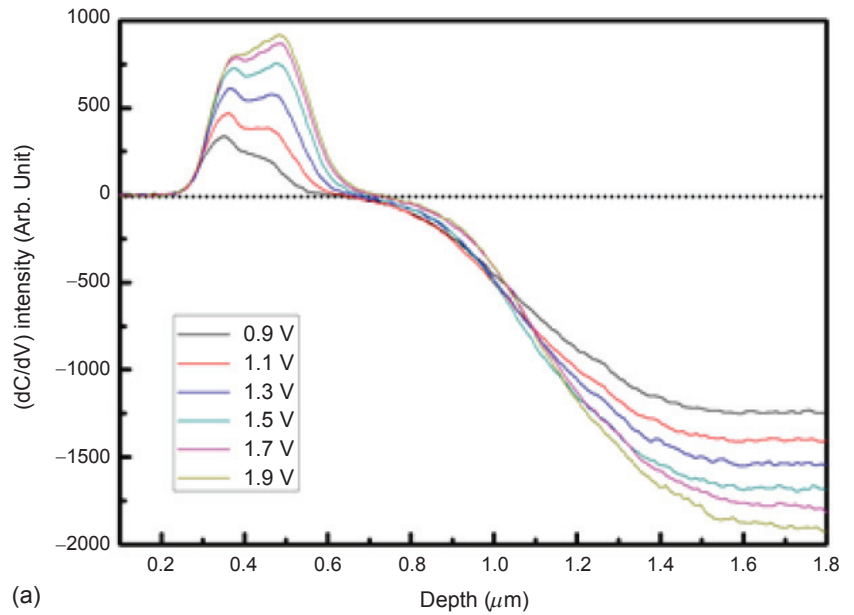
如上所述，隨著調制電壓增加，在掃描空乏區時，會發生反相訊號的互補，但由圖 8 可看出 II 區及 IV 區微分電容訊號隨著調制電壓增加的變化幅度並不相同，這意味著若持續增加調制電壓，其所偵測到的電性界面位置也可能會有變化，因此將調制電壓繼續增加至 1.9 V，其縱深分析結果如圖 11。由圖 11(a) 的結果可明顯看出微分電容訊號為零的位置，隨著調制電壓的增加而往右移動 (朝低濃度的 N 型區)，由於 P 型區訊號變化梯度明顯大於 IV 區的 N 型區訊號，因此，當調制範圍再度擴大時，為使兩個反相訊號完全互補，探針必須向右移才能達成，亦即所觀察到的電性界面深度會因調制電壓增加而增加。

四、結論

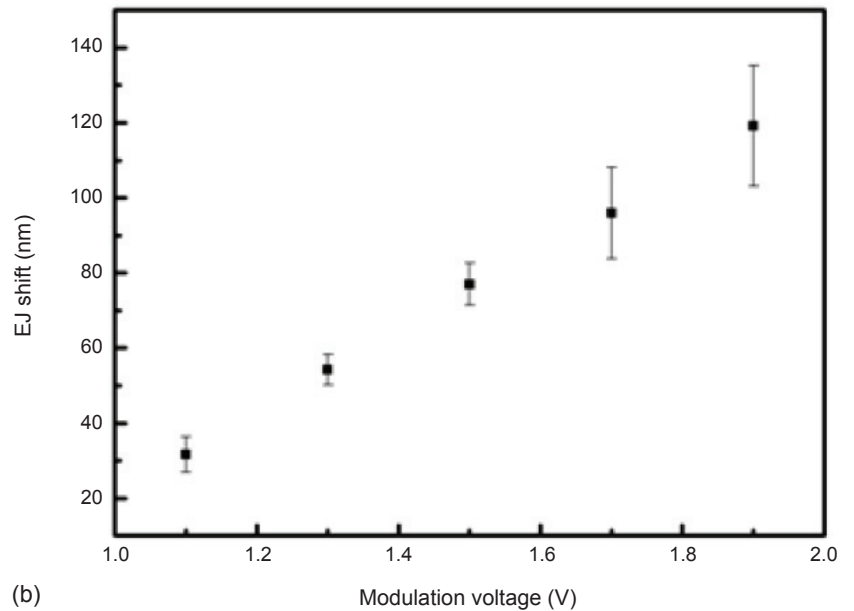
本文介紹如何以暗模式掃描電容顯微鏡搭配白金探針，建立一個無光擾且高靈敏度的掃描電容顯微術，並探討調制電壓對掃描電容顯微術在電性界面量測之影響。當調制電壓增加時，電性界面影像的 P 型區會產生擴張現象，同時觀察到的空乏區寬度亦有窄化現象，若調制電壓持續增加，可觀察到電性界面的位置，但如果調制電壓再進一步增加，會導致所觀察到的電性界面位移，而影響電性界面深度的分析。因此，使用暗模式掃描電容顯微鏡搭配低阻抗的白金探針，在較低的調制電壓下進行掃描分析，才能得到精準的微分電容訊號與影像。

參考文獻

1. N. Nakagiri, T. Yamamoto, H. Sugimura, and Y. Suzuki, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 887 (1996).
2. F. Giannazzo and F. Priolo, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2565 (2000).
3. D. Goghero, V. Raineri, and F. Giannazzo, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 1824 (2002).
4. J. Smoliner, B. Basnar, S. Golka, E. Gornik, B. Löffler, M.



(a)



(b)

圖 11.

調制電壓較大時的 (a) 微分電容訊號縱深分析；(b) 受調制電壓影響的電性界面位置偏移量。

- Schatzmayr, and H. Enichlmair, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3182 (2001).
5. M. N. Chang, C. Y. Chen, F. M. Pan, J. H. Lai, W. W. Wan, and J. H. Liang, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3955 (2003).
 6. G. H. Buh, J. J. Kopanski, J. F. Marchiando, A. G. Birdwell, and Y. Kuk, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 2680 (2003).
 7. M. N. Chang, C. Y. Chen, W. J. Huang, and T. C. Cheng, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 023102 (2005/7).
 8. M. N. Chang, T. Y. Chang, F. M. Pan, B. W. Wu, and T. F. Lei, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **4**, G69 (2001).
 9. C. C. Leu, C. Y. Chen, C. H. Chien, M. N. Chang, F. Y. Hsu, and C. T. Hu, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3493 (2003).
 10. H. Edwards, V. A. Ukraintsev, R. S. Martin, F. S. Johnson, P. Menz, S. Walsh, S. Ashburn, K. S. Wills, K. Harvey, and M. C. Chang, *J. Appl. Phys.*, **87**, 1485 (2000).
 11. Y. Naitou, H. Arimura, N. Kitano, S. Horie, T. Minami, M. Kosuda, H. Ogiso, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 012112 (2008).
 12. M. N. Chang, C. W. Hu, T. H. Chou, and Y. J. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 083503 (2012).
 13. M. Stangoni, M. Ciappa, and W. Fichtner, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **22**, 406 (2004).



胡晉璋先生為國立中興大學物理碩士。

Chin-Wei Hu received his M.S. in physics from National Chung Hsing University.



張茂男先生為國立中央大學電機工程博士，現任中興大學物理學系副教授。

Mao-Nan Chang received his Ph.D. in electrical engineering from National Central University. He is currently an associate professor in the Department of Physics at National Chung Hsing University.



周棟煥先生為國立交通大學電子物理碩士，現任國家實驗研究院國家奈米元件實驗室助理技術師。

Tung-Huan Chou received his M.S. in electrophysics from National Chiao Tung University. He is currently an assistant technician at National Nano Device Laboratories, National Applied Research Laboratories.



李耀仁先生為國立交通大學電子物理博士，現任國家奈米元件實驗室副研究員兼組長。

Yao-Jen Lee received his Ph.D in physics from National Chiao Tung University. He is currently a associate reseacher and director in NDL.