

# 電極接面對掃描電容顯微術之影響

## Influences of Electrode Junctions on Scanning Capacitance Microscopy

張茂男、詹淙宇、陳致仰、莊詠涵

Mao-Nan Chang, Tsung-Yu Chan, Jihh-Yang Chen, Yung-Han Chuang

本文介紹電極接面對掃描電容顯微術之影響，掃描電容顯微術的微分電容訊號對樣品的電極接面十分敏感，就導電探針的接觸端而言，紫外光照射可減少樣品表面的原生化層缺陷，有效提升掃描電容顯微鏡的訊號強度。對於 P-N 接面樣品的影像分析而言，樣品電極配置對微分電容影像的對比與正確性都十分重要，樣品電極同時接觸 N 型與 P 型區，能取得可靠的微分電容影像。

In this article, we introduce the influences of electrode junctions on scanning capacitance microscopy (SCM). Differential capacitance signals of scanning capacitance microscopy are very sensitive to the electrode junctions of an SCM specimen. For the contact point of the conductive probe, UV illumination reduced defects of the native oxide layer on sample surface and obviously enhanced the signal intensity of SCM. For the image analysis of a specimen with P-N junctions, the sample electrode setup is very important to the contrast and the accuracy of differential capacitance images. The sample electrode contact with both n- and p-type regions provides reliable differential capacitance images.

### 一、前言

在半導體元件中，P-N 接面為最常見的關鍵基礎結構，為獲得半導體元件所需的 P-N 接面，半導體元件製程通常透過離子佈植 (ion implantation) 搭配適當的熱處理程序來達成，熱處理不但可以使摻雜活化，也可以消除離子佈植過程中所產生的晶格結構缺陷，恢復材料晶格結構，獲得所需要的載子濃度分布輪廓。由於載子濃度的分布與活化的摻雜 (dopant) 元素分布直接相關，而摻雜的活化分布狀況又隨熱處理的方式與時間而有明顯的差異。在

傳統上，研究人員使用二次離子質譜儀 (secondary ion mass spectroscopy, SIMS) 測量，並分析摻雜元素的縱深輪廓 (depth profile)，由於二次離子質譜儀具有高靈敏度與高元素鑑別力，可用以推知摻雜元素的分布是否符合半導體元件的需求，然而二次離子質譜儀分析為一種破壞性的量測方法，且僅能獲得一維 (1-D) 的摻雜元素縱深輪廓，此外，二次離子質譜儀的分析也無法辨識摻雜元素是否活化。為能確知半導體內載子的濃度分布情形，在 1985 年美國普林斯頓 RCA 實驗室的 J. R. Matey 與 J. Blanc 建立了掃描電容顯微鏡術 (scanning

capacitance microscopy, SCM) 的架構雛形；在 1988 年英國諾丁漢大學 (University of Nottingham) 物理系的 C. D. Bugg 與 P. J. King 為了建立掃描表面形貌的技術，提出了具實用性的掃描電容模組架構<sup>(1)</sup>；隨後在 1989 年，C. C. Williams 等人首度將電容感測模組結合接觸式 (contact mode) 原子力顯微鏡 (atomic force microscopy, AFM) 系統，成功地應用於觀察半導體內的載子濃度分布<sup>(2)</sup>，此後，掃描電容顯微術即開始實際運用於產學研各界，成為半導體材料分析的有力工具之一。

由於雙極性場效電晶體 (bipolar junction transistor, BJT)、太陽能電池 (solar cells)、雷射二極體 (laser diode, LD)、薄膜電晶體 (thin-film transistor, TFT) 與記憶體及金-氧-半場效電晶體 (MOSFET) 等半導體元件的運作效能與特性，皆取決於元件內的自由載子或電荷密度分布型態，若能正確得知元件材料中的摻雜活化情形與載子濃度的二維分布輪廓，對元件的製程設計與特性分析將有莫大助益，也有助於元件製程的失效分析，這使得掃描電容顯微術的發展受到重視。掃描電容顯微鏡藉由鎖相 (lock-in) 放大技術的輔助取得微分電容訊號 (differential capacitance signals, dC/dV)，對表面電容的微小變化具有極高的靈敏度，此亦為掃描電容顯微鏡的主要優點，其所取得的微分電容訊號之強度與相位，可用以分析二維的電荷分布與判別載子的極性，很適合應用於觀察半導體材料的 P-N 界面。

目前國內外的研究中心、檢測服務公司、國立大學與知名的晶圓代工廠皆已購置此類設備，並持續更新其功能，以期更精確分析半導體的二維載子濃度 (2-D carrier concentration) 分布與觀察 P-N 界面的影像。此外，也可以應用於高介電材料與固態太陽能電池材料的物理特性分析。對任何半導體材料的電性分析技術而言，樣品端的電極製備是理所當然的，但也是最容易被忽略的部分，掃描電容顯微術亦然，大多數量測不確定度的產生皆由此而來，以下就掃描電容顯微術的發展過程，探討掃描電容顯微術的電極界面對於量測結果的影響，以供國內相關使用者參考。

## 二、掃描電容顯微術的發展

回顧掃描電容顯微術二十年來的發展，基本上可從技術應用、系統機構、導電探針以及樣品製備等四個不同面向來看，其中導電探針與樣品製備都直接與掃描電容顯微術的接觸電極相關。

1. 在技術應用方面，掃描電容顯微術可偵測材料表面的微分電容訊號並將其成像的特性，被研究人員利用來直接觀察與分析材料的表面電性，只要材料具有壓控 (voltage-controlled) 表面電容特性，基本上都可以利用掃描電容顯微術自材料表面取得微分電容訊號，相關應用除了廣為熟知的半導體載子濃度分布與電性界面 (electrical junctions) 的觀察<sup>(3-7)</sup>，還延伸出許多特殊的應用，如微量金屬污染引致缺陷的分析<sup>(8)</sup>、鐵電材料的特性研究<sup>(9)</sup>、差排缺陷的觀察<sup>(10)</sup>、介電層崩潰研究<sup>(11)</sup> 以及摻雜活化<sup>(12)</sup> 等。這些應用面的材料分析原理不在此一一贅述，有興趣的讀者可自行參閱文末的參考文獻，其中有詳細的說明。
2. 除了開發掃描電容顯微術的應用潛力，研究人員為了能取得更可靠的微分電容訊號，在開發技術應用的同時，亦致力於探討影響掃描電容顯微鏡偵測訊號的物理因素，以期改善系統機構，有效提升其訊號的靈敏度與精確度，在先前的專文中，筆者亦曾就微分電容訊號的干擾因素加以探討說明<sup>(13-15)</sup>。隨著時間的演進與使用需求的增加，掃描電容顯微術的系統機構已有明顯改良，例如在 2007 年，第一套具有暗模式掃描電容顯微鏡 (dark-mode scanning capacitance microscope, DM-SCM) 模組的掃描探針顯微鏡系統，由國家奈米元件實驗室 (National Nano Device Laboratories, NDL) 提出設計概念，再由當時美商威科 (Veeco) 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中，目前國家奈米元件實驗室使用的 D3100 掃描探針顯微鏡，即為配置該模組的第一套系統，這也是暗模式掃描電容顯微鏡的鼻祖。至今，暗模式掃描已成為新型電性掃描探針顯微鏡的功能選

項之一，並實際應用於產業界，作為半導體元件與材料的檢測工具之一。暗模式掃描電容顯微術，除了可提供非光擾的量測結果，其另一個優點是靈敏度高、且訊號穩定度佳，在相同的調制電壓下，暗模式掃描的訊號偏差明顯較小。

由於暗模式掃描電容顯微術的開發，提供了非光擾的微分電容訊號，使研究人員能排除來自原子力顯微鏡光束偏折感測系統產生的光學干擾，除了可以大幅降低微分電容影像的失真度、增強訊號，並提升影像對比，也能進一步探討調制電壓 (modulation voltage) 對掃描電容顯微術觀察 P-N 接面的影響<sup>(16)</sup>，藉此驗證了調制電壓過大，可能引致微分電容影像失真；此外，系統機構的改善也提供了最佳的訊雜比 (signal to noise ratio) 與奈米探針的定位能力。

3. 由於掃描電容顯微術是以原子力顯微鏡的架構為基礎的奈米電性分析技術，因此亦屬於掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy) 的一環，量測時，掃描電容顯微鏡系統透過導電探針與樣品表面接觸並取得訊號，因此導電探針在掃描電容顯微術中的角色為一移動電極，為掃描電容顯微鏡系統與待測樣品間傳遞訊號的唯一橋樑，其重要性不言而喻，掃描電容顯微術解析度的高低與微分電容訊號的強弱，皆與導電探針的特性有關。近幾年來導電探針技術的發展十分快速，從初期廣泛使用的金屬鍍膜探針 (如鉑銱 (PtIr) 鍍膜探針與鈷鉻 (CoCr) 鍍膜探針)，進展到純金屬探針 (如白金探針)，而後發展到目前產學界使用的金屬矽化物探針 (如矽化鉑 (PtSi) 探針)，此一演進皆與掃描電容顯微術對導電探針的兩項基本要求相關：導電性與耐磨性。

在導電性方面，根據實際測試結果，白金探針的導電性明顯優於金屬鍍膜探針，在相同樣品上所取得的微分電容訊號強度約為 1.6 倍；在耐磨性方面，由於掃描電容顯微術的導電探針尖端必須在樣品表面以接觸模式掃描，對導電鍍膜探針而言，其金屬鍍膜很容易因接觸式掃描而磨耗，一旦導電鍍膜受損，探針的導電性就

明顯劣化，而且鍍膜品質的穩定性也導致訊號強度有所差異；後續發展出的白金探針，其主要特點在於不會因針尖磨耗而影響其導電性，因此可避免導電鍍膜探針易受損的缺點，但白金探針的硬度較差，在多次掃描後易發生針尖捲曲的現象，雖然仍可取得清楚的微分電容訊號，但也因與樣品接觸的等效接觸面積增加，導致空間解析度下降；矽化鉑探針的耐磨耗度比金屬鍍膜探針略佳，除了可降低磨耗受損的問題，也提升了空間解析度的穩定性。

4. 掃描電容顯微鏡的微分電容訊號分析，以熟知的 MOS 電容理論為基礎，亦即其樣品端的量測架構必須符合 MOS 電容模型的要求，所以導電探針與矽基待測樣品接觸，就必須構成 MOS 接面才能符合分析需求，因此，樣品掃描區域上的氧化層對分析結果就產生了直接且關鍵的影響，但在掃描電容顯微術的發展過程中，關於樣品製備的相關技術問題卻很少有文獻資料深入探討，導致樣品製備成為掃描電容顯微術中最難處理也是最容易被忽略的一環，同時也成為造成量測不確定度的主因之一。

樣品製備的首要之務就是將待測區平坦化，這對於平面樣品而言，通常不構成問題，分析樣品可以透過半導體製程的方法，迅速成長氧化層薄膜於待測樣品上，而且氧化層薄膜品質也較佳，量測時，易與導電探針構成穩定的 MOS 接面；然而大多數掃描電容顯微鏡的分析需求都需要製備橫截面樣品，傳統上常以研磨法來製備，由於掃描電容顯微鏡的分析樣品需要非常平坦的表面，才能取得較可靠的訊號，因為粗糙的表面會嚴重導致氧化層的缺陷問題，也就是微分電容訊號不佳的主因之一，此表面平坦度的要求對於以研磨法製備橫截面樣品而言，無疑是一項工藝上的挑戰，表面平坦度不佳，很容易導致微分電容圖譜上出現平帶電壓位移 (flatband voltage shift) 的現象<sup>(17)</sup>，這也意味著較差的量測再現性。另一種製備橫截面樣品的方法為劈裂法，劈裂法可獲得十分平坦的橫截面樣品表面，如此一來，可以降低氧化層與矽基材界面缺陷的影響，有效增加掃描量測的穩定性，但對於元件結構類的小試片，則無法藉由此法製備成待測樣品，因



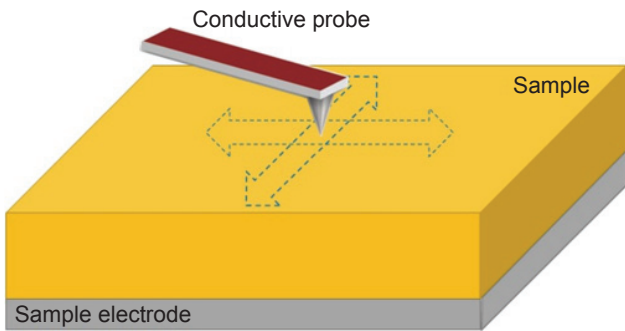


圖 1. 掃描電容顯微術的電極界面示意圖，上方的導電探針為與樣品接觸的移動電極，下方的導電層與樣品底部接觸形成樣品電極。

此，多倚賴聚焦離子束 (focused ion beam, FIB) 切割出所欲分析的樣品截面，再進行掃描分析，但仍需注意氧化層的缺陷與離子佈植效應對量測穩定性的影響。氧化層厚度愈厚或缺陷密度愈高，分析區域的等效調制電壓就愈小，微分電容訊號衰減就愈明顯，如果橫截面樣品的表面平均粗糙度在 1 奈米以上，量測再現性也將明顯變差。除了導電探針與樣品的接觸面之外，樣品製備也必須顧及樣品與系統端的電極接觸，才能將掃描電容顯微鏡的優點完整發揮。圖 1 為量測架構的電極界面示意圖，上方的導電探針為與樣品接觸的移動電極，下方的導電層與樣品底部接觸形成樣品電極。

### 三、電極界面效應

綜合上述，我們可以發現要在半導體表面取得可靠的微分電容訊號與影像，除了要有適當的系統機構與導電探針，樣品製備的重要性也不可忽視，雖然樣品製備對微分電容訊號的影響很早就被研究人員注意到，但早期的樣品製備技術發展重點，僅在於如何將特定的極小區域製作成掃描電容顯微鏡試片。一般而言，導電探針端對微分電容訊號的影響，通常有最多的研究與討論<sup>(18, 19)</sup>，但電極界面對掃描電容顯微術分析結果的影響，卻很少被系統性的探討，以下從樣品製備的技術觀點說明電極界面對掃描電容顯微術的影響。

樣品製備的目標除了提供良好的微分電容訊號，還必須注意所得訊號是否符合量測分析的目的，這點對於 P-N 接面的影像分析尤為重要，卻是很容易被忽略的環節。就移動電極界面而言，樣品表面需要品質良好的氧化層，如果以傳統製程方式在其掃描區域表面製作氧化層，在技術難度與成本上皆無法符合實務面的要求，因此，大多數分析人員都直接採用原生化氧化層 (native oxide layer) 與移動電極接觸，原生化氧化層的厚度薄，有助於調制電壓作用於半導體的空乏區，可以在掃描量測初期獲得很強的微分電容訊號，但因原生化氧化層的缺陷密度也很高，經常導致微分電容訊號隨掃描時間快速衰減，其訊號穩定期間通常不到三小時。先前研究報告指出紫外光 (UV light) 照射有助於提升矽基材表面的氧化層品質<sup>(20)</sup>，為了在待測區表面上製備一層較佳的原生化氧化層，我們採用自行設計的實驗裝置，可在紫外光照射下，於樣品表面成長原生化氧化層，圖 2 為標準 N 型矽基材樣品的掃描分析結果，從圖 2 的微分電容訊號統計分布結果，可以清楚看出搭配紫外光處理的樣品在置放數小時之後，其訊號強度明顯優於未經紫外光處理的樣品。圖 3 為表面經過蝕刻與清洗後的矽基樣品，由圖 3 (a) 與 (b) 的表面形貌影像，已可看出搭配紫外光處理的樣品具有較佳的表面平坦度；圖 3 (c) 與 (d) 為其微分電容影像，從掃描結果中已可明顯地看到其微分電容訊號強度差異更加明顯，此類樣品如未經紫外光處理，幾乎無法取得可靠的微分電容訊號。由以上結果可知，紫外光照射有助於提升原生化氧化層與矽基材的界面品質，對於掃描電容顯微術分析矽基材樣品有正面助益。

對大多數的分析應用來說，觀察 P-N 界面影像都是掃描電容顯微術的主要目的，而 P-N 界面的製作通常是將摻雜元素佈植於矽基材的圖形化區域中，再搭配熱處理將摻雜活化後形成，圖 4 展示量測平面型 P-N 界面時的兩種電極界面示意圖，圖 4(a) 為樣品電極只與 N 型區域接觸，而圖 4(b) 為樣品電極同時與 N 型及 P 型區域接觸，早期此類樣品的圖形區域尺寸較大，製備樣品時，通常可以達成如圖 4(b) 的對稱配置，當樣品的圖形區域尺寸愈來愈小，許多待測樣品在製備後，便呈現出如圖 4(a) 的配置，從等效電容的觀點，這兩種樣品電極界面的效果是截然不同的。換句話說，兩種

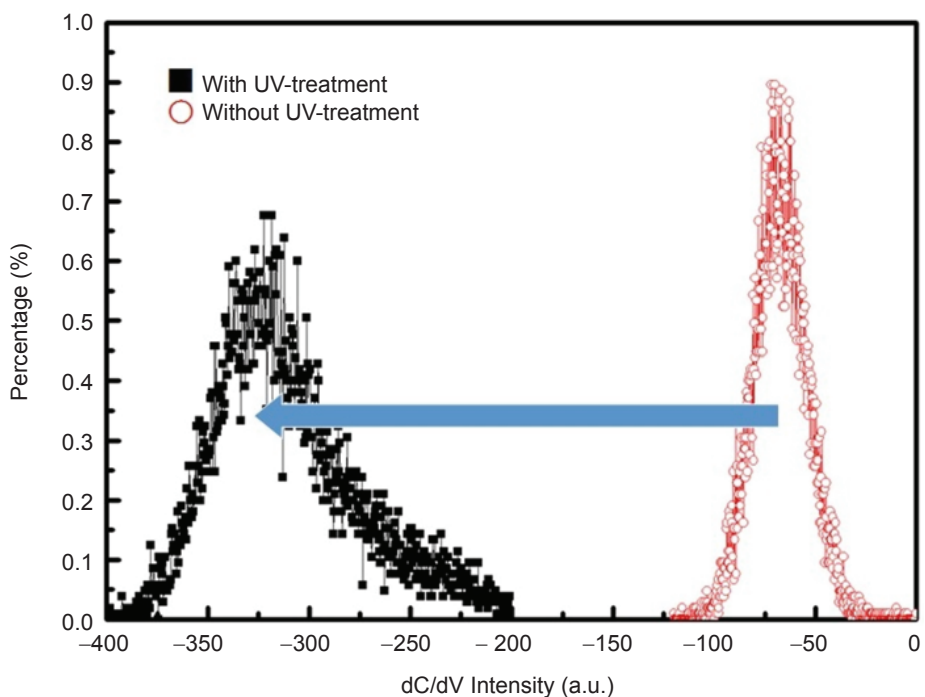


圖 2. N 型矽基樣品表面之微分電容訊號分布統計，有紫外光輔助氧化的樣品，其微分電容訊號強度明顯獲得改善。

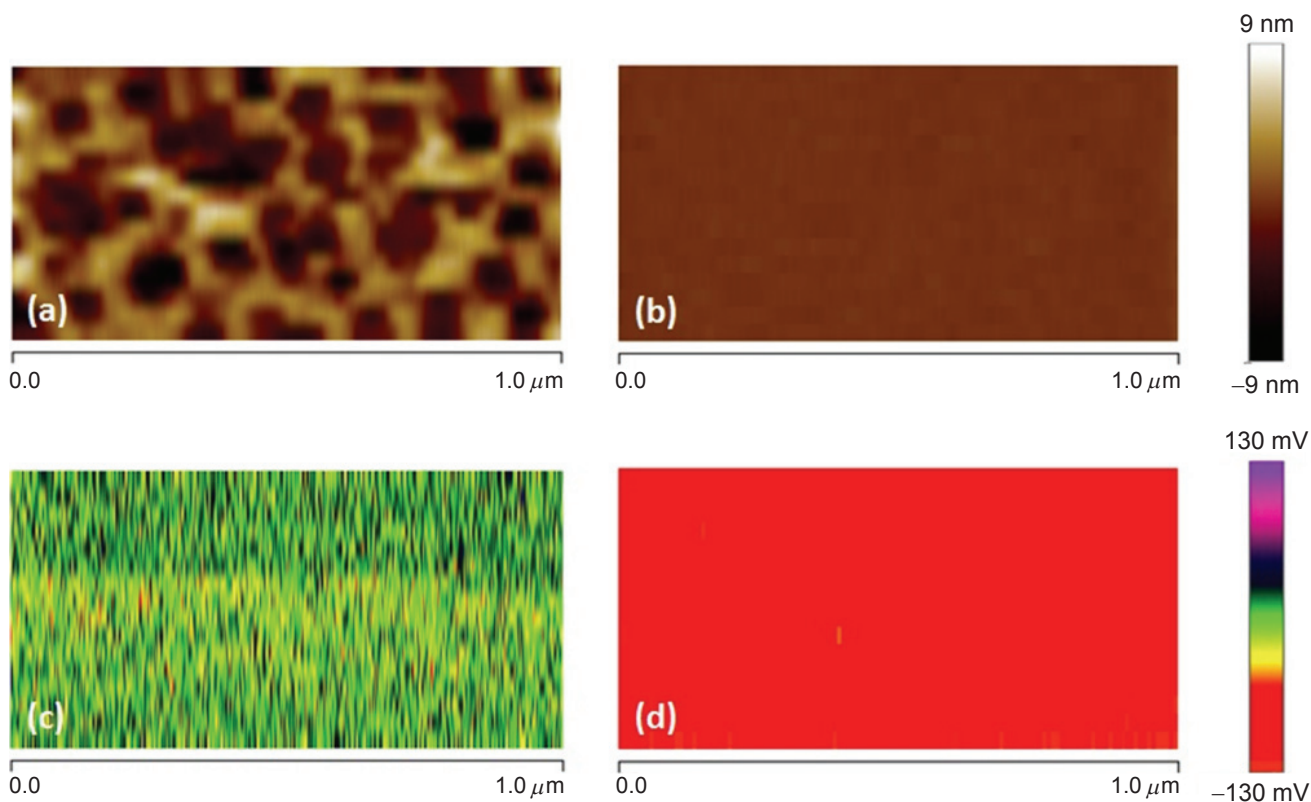


圖 3. 經蝕刻與清洗後的矽基樣品表面。(a) 無與 (b) 有紫外光輔助氧化層之原子力顯微鏡掃描影像；其對應的微分電容影像分別為 (c) 與 (d)。

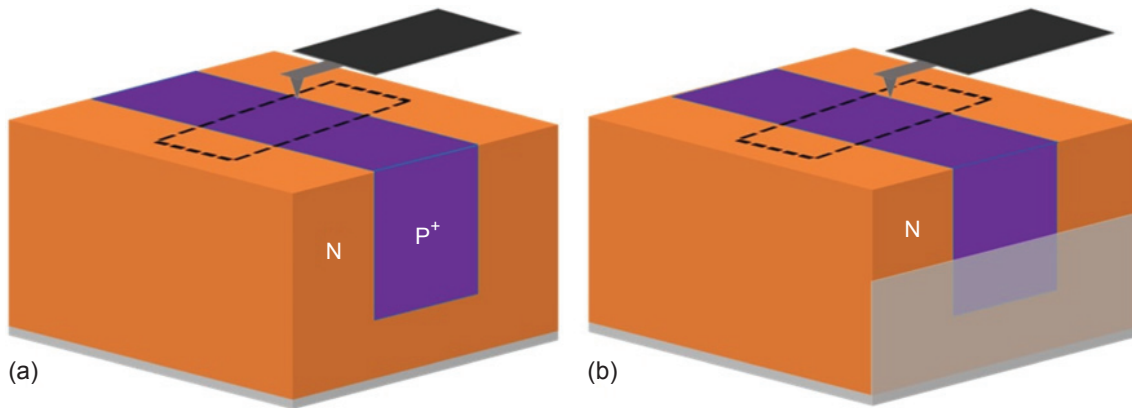


圖 4. 量測平面型 P-N 接面時的電極接面示意圖。(a) 為樣品電極只接觸 N 型區域，而 (b) 為樣品電極同時與 N 型及 P 型區域接觸。

樣品電極接面將導致不同的微分電容訊號分布，圖 5 (a) 與 (b) 的微分電容影像分別來自於圖 4 (a) 與 (b) 的配置，由圖 5 的影像比較，可以發現兩種不同的樣品電極接面，主要的影響在於 P-N 接面處的訊號分布，在圖 4(a) 的配置中，樣品電極只接觸 N 型區，所以當導電探針自 N 型區移動到 P 型區，P-N 接面的內建電場亦隨著調致電壓變化，因此，P-N 接面的影像與經由圖 4(b) 配置取得的影像不同。

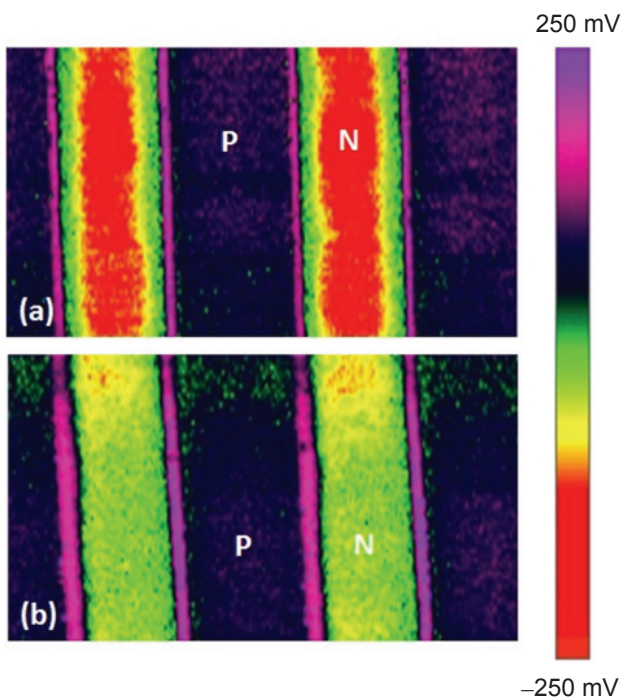


圖 5. 以 (a) 圖 4(a) 與 (b) 圖 4(b) 的樣品電極配置取得的平面型 P-N 接面微分電容影像。

圖 6 的截線分析進一步顯示，P-N 接面處的微分電容訊號呈現明顯的非單調行為 (non-monotonic behavior)，其原理可參考 2001 年由奧地利研究人員 J. Smoliner 所發表的研究報告<sup>(21)</sup>，其中說明了微分電容訊號、直流偏壓與載子濃度間的微妙關係，從圖 6 的截線圖也同時可以發現，樣品電極只接觸 N 型區時，所觀察到的 P 型區域範圍會略微縮小，對此類樣品的橫截面分析而言，由於佈植能量低，所以在截面上的 P 型區範圍通常很小，因此樣品電極接面配置對其影像的觀察將有更大的影響，掃描圖形化 P-N 接面的截面樣品，經由圖 4 (a) 與 (b) 的樣品電極配置所得的微分電容影像分別為圖 7 (a) 與 (b)，圖 7(a) 中的 P 型區幾乎看不到對比，反之，樣品電極同時接觸 N 型與 P 型區的掃描結果，呈現出清楚的區域對比，也能清楚看到空乏區的分布輪廓，再次驗證樣品電極接面的影響與重要性。

#### 四、結論

雖然樣品製備對掃描電容顯微鏡分析的重要性已是眾所周知，但鮮少使用者致力於改善樣品製備技術並深入思考樣品電極接面對其分析結果的影響。對掃描電容顯微鏡的使用者而言，樣品製備是首要之務，沒有好的樣品表面就無法取得可靠的微分電容訊號，更遑論數據分析，樣品表面的氧化層缺陷愈少，量測結果的可靠度也愈佳，另一方面，樣品電極的配置也十分重要，正確的樣品電極製



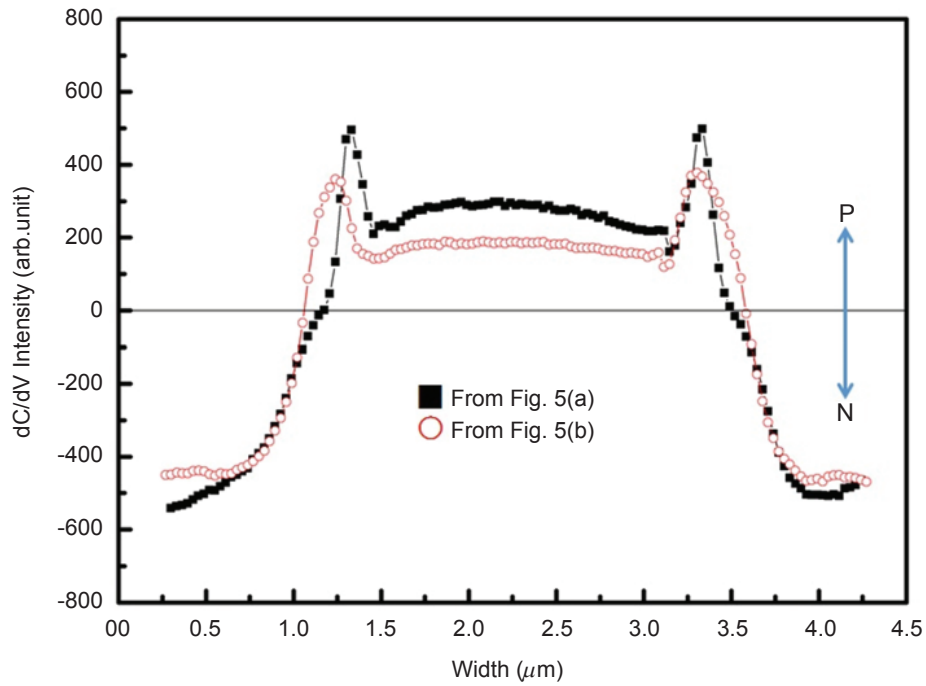


圖 6. 圖 5(a) 與圖 5(b) 的截線分析圖，正負訊號相位分別代表 P 型與 N 型訊號。

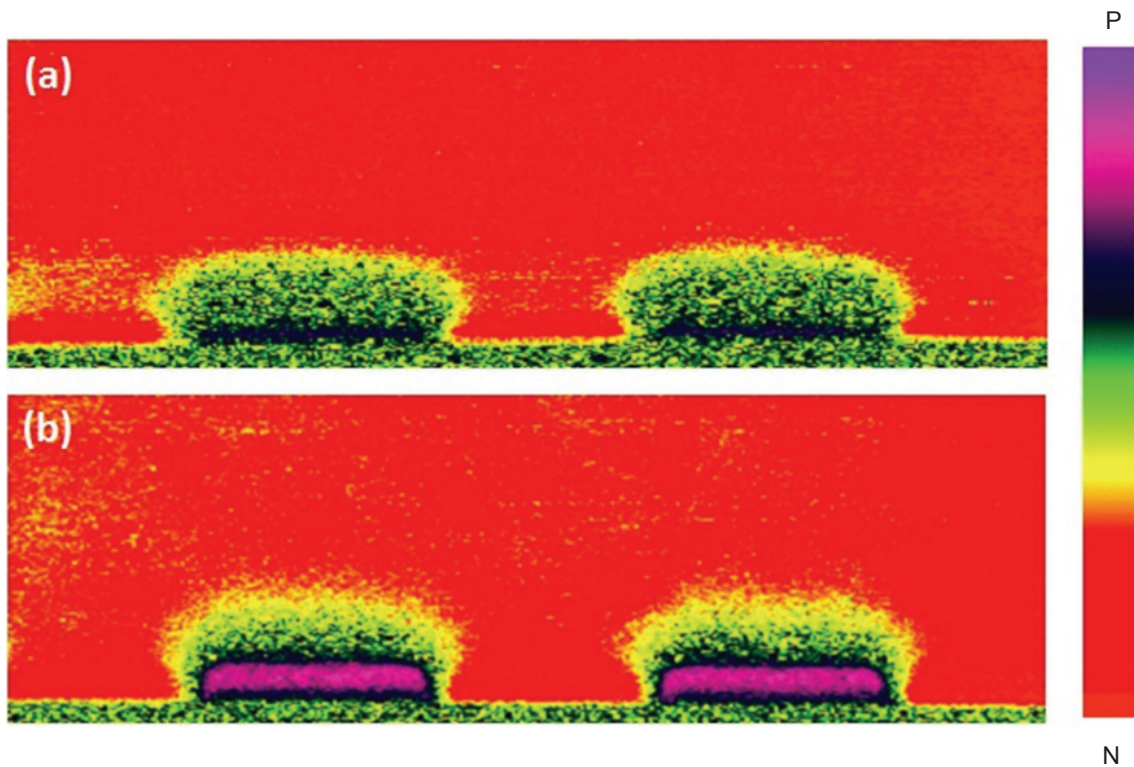


圖 7. 樣品電極 (a) 只接觸 N 型區與 (b) 同時接觸 N 型與 P 型區所得到的圖形化 P-N 界面影像。

備，除有助於提供清晰的影像，也提升了分析結果的正確性。本文以典型的分析樣品為例，說明電極接面對掃描電容顯微鏡分析結果的影響，期望所提供的實務經驗與相關資訊能讓讀者與使用者更清楚了解這一項分析技術的特性，以利更精確掌握掃描電容顯微術的功能，並將其應用於研發工作中。

## 參考文獻

1. C. D. Bugg and P. J. King, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **21**, 147 (1988).
2. C. C. Williams, W. P. Hough, and S. A. Rishton, *Applied Physics Letters*, **55**, 203 (1989).
3. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, S. D. Stiring, C. C. Williams, and H. Smith, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18**, 549 (2000).
4. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, and C. C. Williams, *J. Appl. Phys.*, **85**, 7774 (1999).
5. 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).
6. Y. Huang, C. C. Williams, and J. Slinkman, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 344 (1995).
7. J. J. Kopanski, J. F. Marchiando, D. W. Berning, R. Alvis, and H. E. Smith, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16**, 339 (1998).
8. M. N. Chang, C. Y. Chen, F. M. Pan, T. Y. Chang, and T. F. Lei, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **5**, G69 (2002).
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. P. J. Hansen, Y. E. Strausser, A. N. Erickson, E. J. Tarsa, P. Kozodoy, E. G. Brazel, J. P. Ibbetson, U. Mishra, V. Narayanamurti, S. P. DenBaars, and J. S. Speck, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2247 (1998).
11. S. D. Wang, M. N. Chang, C. Y. Chen, and T. F. Lei, *Electrochemical and Solid-State Letters*, **8**, G233 (2005).
12. E. Bruno, S. Mirabella, G. Impellizzeri, F. Priolo, F. Giannazzo, V. Raineri, and E. Napolitani, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 133110 (2005).
13. 張茂男, 陳志遠, 潘扶民, *科儀新知*, **22**, 5, 67 (2003).
14. 張茂男, 陳志遠, 張子云, 潘扶民, *半導體科技*, **24**, 72 (2002).
15. 張茂男, 萬文武, 陳志遠, 賴建宏, 梁正宏, 潘扶民, *奈米通訊*, **10**, 2, 17 (2003).
16. M. N. Chang, C. W. Hu, T. H. Chou, and Y. J. Lee, *Applied Physics Letters*, **101**, 083503 (2012).
17. D. Goghero, V. Raineri, and F. Gianazzo, *Applied Physics*

*Letters*, **81**, 1824 (2002).

18. E. Bussmann and C. C. Williams, *Review of Scientific Instruments*, **75**, 422 (2004).
19. H. Yabuhara, M. Ciappa, and W. Fichtner, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, **20**, 783 (2002).
20. V. S. W. Lim, Y. Jiang, and A. Trigg, *AIP Conference Proceedings*, **683**, 667 (2003).
21. J. Smoliner, B. Basnar, S. Golka, E. Gornik, B. Löffler, M. Schatzmayr, and H. Enichlmair, *Applied Physics Letters*, **79**, 3182 (2001).



張茂男先生為國立中央大學電機博士，現任國立中興大學物理系副教授。

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.



詹淙宇先生現為國立中興大學奈米科學研究所碩士班學生。

Tsung-Yu Chan is currently a M.S. student in the Institute of Nanoscience at National Chung Hsing University.



陳致仰先生現為國立中興大學奈米科學研究所碩士班學生。

Jhih-Yang Chen is currently a M.S. student in the Institute of Nanoscience at National Chung Hsing University.



莊詠涵小姐現為國立中興大學物理研究所碩士班學生。

Yung-Han Chuang is currently a M.S. student in physics at National Chung Hsing University.