

低光擾掃描電容顯微鏡分析技術及其在載子分布分析之應用

Low-Photo-Perturbed Scanning Capacitance Microscopy and Its Applications on Analyzing Carrier Distribution

張茂男、陳志遠、萬文武、梁正宏、潘扶民

Mao-Nan Chang, Chih Yuan Chen, Wen-Wu Wan, Jenq-Horng, Liang Fu-Ming Pan

掃描電容顯微鏡能分析二維載子濃度的分布，並經由接觸模式的原子力顯微鏡提供對應的表面形貌影像，由於原子力顯微鏡雷射光束的雜散光引起光擾效應，導致微分電容—位置曲線扭曲，進而干擾微分電容影像對比。我們利用氟化硼離子佈植的橫截面試片驗證光擾效應的存在，並深入分析光擾效應對微分電容訊號的影響。此外，在本文中，也將介紹低光擾掃描電容顯微鏡技術，及其在分析熱處理程序引致載子濃度分布變化的應用。

Scanning capacitance microscopy (SCM) is capable of measuring two-dimensional carrier distribution and the corresponding surface morphology carried out from contact-mode atomic force microscope (AFM). The stray light of the AFM laser beam induces the photoperturbation effect, leads to distorted dC/dV profiles and hence perturbs the contrast of dC/dV images. Using cross-sectional samples implanted by BF_2^+ ions, we revealed the existence of photoperturbation effect in SCM and analyzed the influence of photoperturbation effect on dC/dV signals in depth. Moreover, in this article, we will introduce low-photo-perturbed SCM and its applications on analyzing the change in carrier concentration distribution induced by annealing sequence.

一、前言

1989 年 C. C. Williams 等人將掃描電容技術成功應用於觀察半導體載子濃度的分布，其操作模式為接觸式，由於二維載子濃度分布對於元件與相關製程設計十分重要，因此，掃描電容顯微鏡分析技

術開始受到世人廣泛的注意。掃描電容顯微鏡分析技術屬於掃描探針顯微術的一環，系統架構與原子力顯微鏡的架構極為相似，其量測優點在於直接取得電性相關訊息、可靠度佳及具非破壞性，主要的應用領域為金屬—二氧化矽—半導體場效電晶體 (MOSFET) 等效通道長度 (effective channel length)

與二維自由載子濃度 (2D free carrier concentration) 分布的量測⁽¹⁻⁶⁾，此外，在缺陷分析上的應用潛力也已陸續發表出來⁽⁷⁻¹²⁾。在掃描電容顯微鏡技術的諸多應用中，自由載子濃度輪廓 (carrier concentration profile) 的量測無疑是最重要也最普遍的一項，早期的研究發展皆以此為重點，因此，相關的研究報告與技術討論也最多。

自由載子濃度分布對雙極性場效電晶體 (BJT) 及 MOSFET 等元件的運作效能及電性均具有決定性的影響，若能精確得知自由載子濃度的二維分布輪廓，對元件的設計與特性分析將有莫大助益。同步取得表面形貌與對應的微分電容影像對分析工作而言是十分重要的，為同步取得表面平坦度與微分電容影像，掃描電容顯微鏡在進行表面電容掃描的同時，偵測表面形貌的光束偏折感測機制也持續運作著，光擾效應便因而產生。光擾效應不單影響微分電容影像對比，還對空乏區寬度與 $p-n$ 接面的分析結果產生明顯的影響，因此降低了分析結果的精確性。本文將簡述掃描電容顯微鏡的光擾效應與原理，並介紹低光擾掃描電容分析技術及其在載子分布量測上的應用，微分電容訊號分析的細節，請讀者自行參考文末所附相關資料，在本文中不再贅述。

二、光擾效應

2000 年韓國的 Shin 等人發現可以透過外在光強度的變化來研究少數載子的微分電容訊號⁽¹³⁾；2001 年以筆者在微量鐵污染引致缺陷分析的研究工作中，發現即使將所有外在光源隔絕，少數載子的微分電容訊號仍表現出微小的光擾行為，用以提供表面形貌的光束偏折感測機制便成為可能的光擾來源。由於光擾效應的本質為光學吸收，因此，當改變掃描區域的等效光強度，即可藉此了解光擾效應對量測結果的影響，同時也可進一步驗證掃描電容顯微鏡之光擾效應。既然光擾源自光束偏折感測機制，圖 1 為調變光擾的示意圖，改變雷射點在懸臂樑背面的位置，即改變探針下方掃描區域的等效光強度，不同的等效光強度所造成的光學吸收程度也不相同，所以圖 1 中的兩種實驗架構可用以比較

光擾效應對量測結果的影響，架構 1 與 2 分別為高光擾狀態與低光擾狀態。實驗過程中還要特別注意光學機制對懸臂樑高度的影響，如果調整不當，容易因探針與試片間接觸力過大而導致探針鍍膜的嚴重磨損，甚而影響量測結果。事實上，光擾效應可分為兩部分：光電壓效應 (photovoltaic effect) 與載子注入效應 (current injection effect)，其對量測的影響層次各不相同，但對於 $p-n$ 接面的橫截面分析而言，通常兩項因素同時存在，此一研究發現已首度發表於第八屆歐洲真空會議 (8th European Vacuum Conference (EVC-8, 2003)，地點：柏林)⁽¹⁴⁾，以下將針對這兩種不同的光擾效應加以說明。

1. 光電壓效應

在此以一具有柵狀圖形的試片為例，該試片之基板為 n 型矽，經硼離子佈植與適當的熱處理製程之後，試片橫截面呈現局部的高濃度 p 型區域，同時存在一 p^+/n 界面。圖 2 所示為不同光擾條件下的量測結果，比較圖 2(a) 與圖 2(b) 可以發現，圖 2(a) 的界面寬度較圖 2(b) 的窄，亦即在高光擾環境

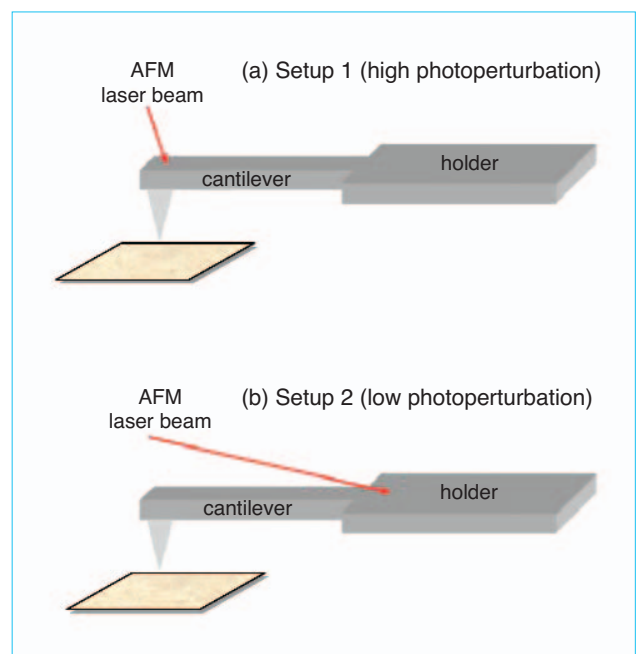


圖 1. 改變雷射點在懸臂樑背面的位置，即改變掃描區域的光擾程度，(a) 為高光擾架構，(b) 為低光擾架構示意圖。

下所測得的界面寬度較低光擾環境下所測得的為窄，其主因源自 p^+/n 界面之內建電場對載子的影響，由於光學吸收產生的電子電洞對受內建電場作用而分離，分離的載子對原空乏區的空間電荷產生補償作用，因此導致界面電位差下降與空乏區寬度變窄。圖 3 為該試片的微分電容 (dC/dV)—位置關係圖，圖中依微分電容訊號的相位分為四個區域。I 區為零訊號區，因為這個區域皆為四乙氧基矽酸鹽 (tetraethylorthosilicate, TEOS) 層，無法提供任何微分電容訊號。II 區為全 p 型訊號區，此區域不單只有 p 型區域，還包括 p^+/n 界面空乏區靠近 p 型區域的一部分。III 區為反相區，很明顯地，光擾效應已使得試片中某個區域的微分電容訊號產生相位的變化，同時也意味著電性界面的位置已受光擾效應的影響而產生位移。由於空乏區中都存在一個特殊的區域，此一特殊區域的微分電容訊號相位對探

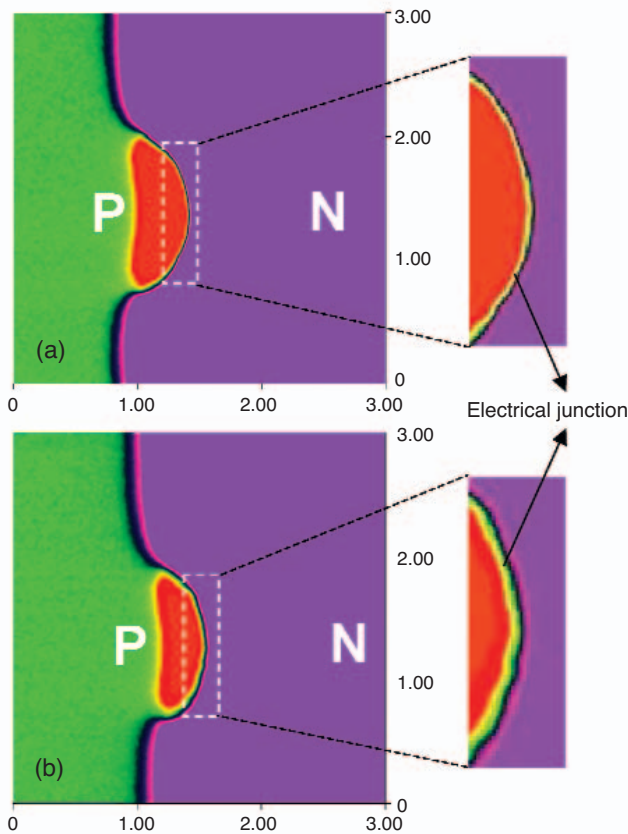


圖 2. 不同光擾條件下所測得的電性界面寬度亦不同，(a) 高光擾架構所測得的界面寬度較，(b) 低光擾架構測得的界面寬度窄。

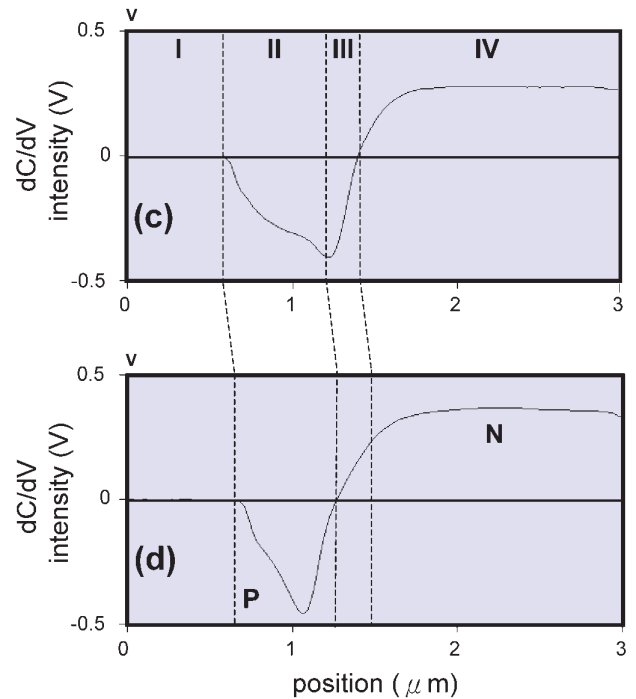


圖 3. 圖 2 之微分電容—位置關係圖，其中 III 區為光擾效應引起的反相區，同時也顯示電性界面的位置已因光擾效應而產生位移。

針偏壓的變化十分敏感，當導電探針下方的表面電場影響光學吸收所產生的載子，導致表面電位的變化，等效於造成微分電容訊號相位變化的探針偏壓。反相區的出現將使微分電容影像失真，如圖 2 所示，光擾效應所產生的反相區，造成觀測到的 p 型區域範圍擴大，此一光電壓效應嚴重影響掃描電容顯微鏡分析短載子通道長度的能力，如果 n 型區的背景載子濃度提高，此種影響將可獲得改善。IV 區為全 n 型訊號區，此區域包括 n 型區域及 p^+/n 界面空乏區靠近 n 型區域的一部分。如上所述，光電壓效應所可能作用之處為電性界面及與導電探針接觸的試片表面區域⁽¹⁵⁾。

2. 載子注入效應

此效應仍源自光學吸收，而且通常伴隨著光電壓效應一起發生。當光擾效應造成高階載子注入 (high level injection) 現象的發生時，會導致低載子濃度區的等效載子濃度提高，該區域也因此呈現出較弱的微分電容訊號，圖 4 即為一例。圖中的微分

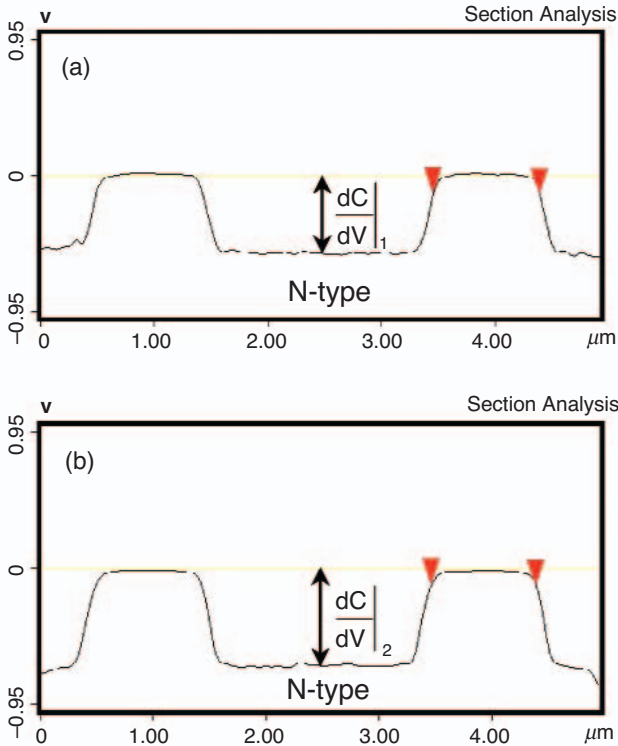


圖 4. 載子注入效應影響等效載子濃度，(a) 在高光擾架構呈現較弱的微分電容訊號，(b) 在低光擾架構呈現較強的微分電容訊號。

電容訊號強度來自 n 型基板，由於光擾所引發的載子注入程度明顯大於背景載子濃度，因此，圖 4(a) 的微分電容訊號強度小於圖 4(b) 的微分電容訊號強度。相對的，對高載子濃度區而言，由於載子注入所造成的載子濃度變化相對較小，甚至可以忽略，所以對高載子濃度區微分電容訊號強度而言，其影響不如光電壓效應來得明顯。然因高載子濃度區微分電容訊號強度原本就比較弱，高階載子注入將導致相近的微分電容訊號強度分布，所產生的直接結果便是對比較差的微分電容影像。

圖 5 為另一組測試樣品的微分電容—位置關係比較圖，從圖 5 中可以同時清楚看到載子注入效應對高、低載子濃度區的影響程度，除了零訊號區 (參考圖 3 的說明) 之外，自表面到箭號所指之處，兩種量測架構所得的微分電容訊號強度都沒有明顯的區別，因為高載子濃度區微分電容訊號不易因光擾引起的載子注入而有明顯變化，而曲線尾端的 n 型訊號區，則與圖 3 的 IV 區相似，也呈現出訊

號強度不同的結果，這是因為此處為低載子濃度的 n 型矽基板。同理，我們可以利用光擾調制的方法來判斷材料中各處的高載子濃度區之分布範圍，亦即如圖 5 箭號所指之處。

三、低光擾微分電容分析技術

在針對光擾效應進行探討之後，我們已經知道掃描電容顯微鏡的光擾來源，也可以開始採用架構 2 的低光擾操作模式來進行量測分析，但就掃描電容顯微鏡訊號的分析而言，同步取得表面形貌與其對應的微分電容影像是十分重要的。根據光束偏折感測機制的運作原理，對表面形貌偵測而言，以架構 1 最為適當，在架構 2 之下，光束偏折感測機制的運作並不理想，這是因為表面形貌變化所引起的反射面位置偏移量已不明顯。為避免表面平坦度對微分電容影像分析造成困擾，目前低光擾掃描電容顯微鏡的操作是以兩階段進行。首先，仍以架構 1 進行掃描，目的在確認表面形貌狀態與得到懸臂樑高度的參考值，同時也可與所得的微分電容影像進行初步比對，以了解光擾狀態下的微分電容訊號與表面形貌的關係。接下來採用架構 2 並適當調整懸臂樑高度，直接進行低光擾微分電容訊號的分析。如果掃描範圍遠大於系統的機械偏移量，架構 1 所取得的表面形貌與架構 2 所取得的微分電容影像，皆可視為在相同試片範圍所得的掃描結果。排除光

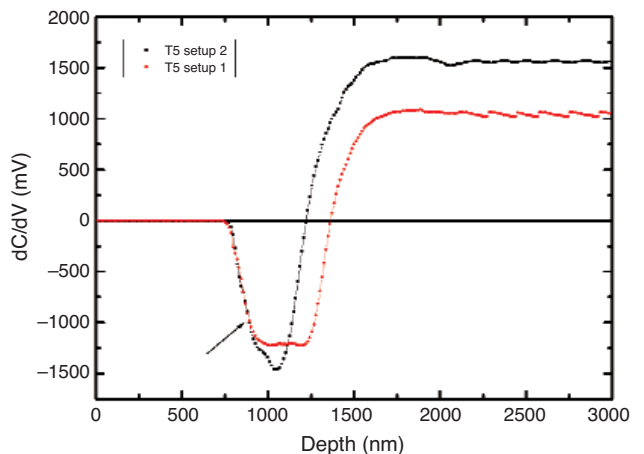


圖 5. 微分電容—位置關係比較圖，右側的 n 型區因載子注入程度不同產生明顯的訊號強度差異。

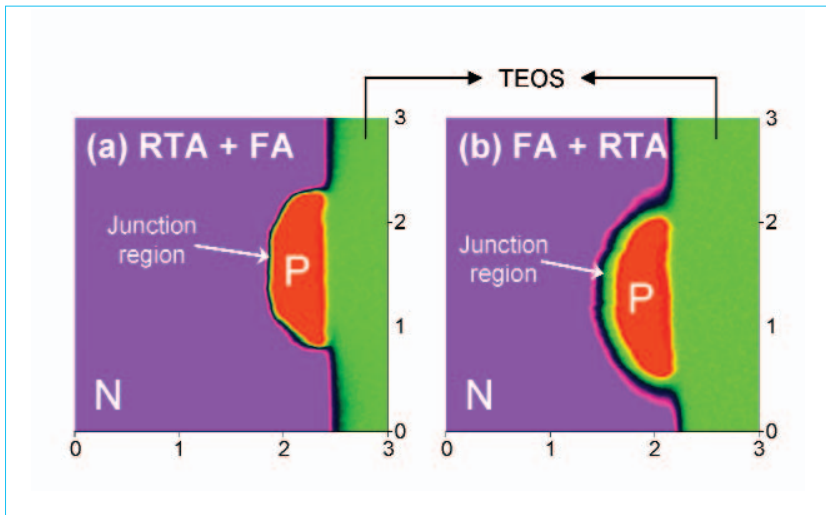


圖 6. 在相同的離子佈植與光擾條件下，(a) 以 RTA + FA 熱處理後，試片呈現出較窄的電性接面寬度，(b) 以 FA + RTA 熱處理後，試片呈現出較寬的電性接面寬度。

擾效應後的微分電容影像，在電性分析上更易與現行的電性量測及模擬結果進行整合，也更能因應奈米尺寸元件的量測挑戰。

除此之外，在試片製備上也有一些值得注意的地方。不同批次的量測，所得的光擾抑制效果也很可能不同，如果希望兩個不同的試片在相同的低光擾環境下進行比較分析，在試片製備時，應將兩個試片合併進行製備，同時，如果兩者的幾何結構相近，可在其中一者的背側加上標記以利判別。由於一般的試片都有基板可作為微分電容訊號的參考，分析時，可萃取兩者的微分電容－位置關係圖進行比對，如果基板區微分電容訊號強度相同，則可確認其結果是在相同的低光擾環境所取得，這在某些特殊的應用上是十分有效的做法。在下一節的應用實例中，將可更深入了解試片製備技巧與低光擾操作模式的搭配。

以上是關於低光擾掃描電容顯微鏡量測技術的介紹，有興趣深入瞭解掃描微分電容技術、應用與試片製備的讀者，可由參考資料中再獲得更進一步的資訊⁽¹⁶⁻²⁰⁾。

四、應用實例

不同的實驗目的，其試片的製備也有所不同，基本上，對載子濃度分布的量測而言，經常會面臨橫截面試片製備的挑戰，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，但要特別注重試片表面的平坦化程度。以一熱處理程序對載子分布的影響研究為例，由於離子佈植之後，必須藉適當的熱處理製程使摻雜元素活化，但同時摻雜元素擴散的問題也一併發生，特別是針對淺接面 (shallow junction) 元件結構的需求，濃度範圍 $10^{15} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的摻雜雜質必須分布在縱向與橫向約 100 奈米的範圍內，導致低能量離子佈植與熱處理條件的搭配成為元件製程上的挑戰。由於微分電容訊號直接與載子濃度相關，而載子濃度的分布又源自活化的摻雜元素分布，而摻雜元素的活化與分布則取決於熱處理程序，以往這類研究主要依賴二次離子質譜儀 (secondary ion mass spectroscopy, SIMS)，雖然可以藉此了解摻雜元素在熱處理後的分布行為，但卻無法直接提供電性所需要的訊息，特別是電性接面的變化。圖 6(a) 與圖 6(b) 的結果是試片在相同的離子佈植製程之後，經過不同熱處理程序的載子分布影像，熱處理程序的變化僅為快速熱退火 (rapid thermal annealing, RTA) 與爐退火 (furnace annealing, FA) 之順序對調，其結果清楚顯示電性接面出現明顯的不同，先進行爐退火的試片有較寬的接面寬度，而先進行快速熱退火的試片，其接面寬度較窄，由於所有量測皆在相同的低光擾環境下進行，因此可以確定是熱處理程序導致接面影像的不同。為達到相同的低光擾條件，試片製備、實驗流程與架構皆以上

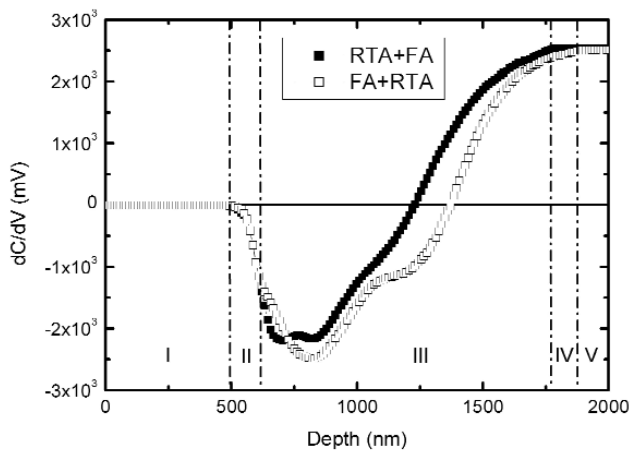


圖 7. 在圖 6 的微分電容—位置關係比較圖，V 區呈現相同的微分電容訊號強度，證明此一比較量測的光擾條件相同。

一節所敘述的方式操作。圖 7 的 V 區呈現相同的微分電容訊號強度，可證明兩試片已經具有相同的光擾條件，由圖 7 的 III 區中還可以發現兩者的電性接面深度也不相同，I 區仍為零訊號的四乙氧基矽酸鹽層，II 區為載子濃度相近的區域，在 III 區緊鄰 II 區的部分，微分電容訊號開始出現明顯的不同，先進行爐退火的試片有較小的微分電容訊號，表示該試片在此處的載子濃度比先進行快速熱退火的試片為高，IV 區則顯示兩者的空乏區延伸情形亦不相同，先進行爐退火的試片呈現出空乏區延伸較遠的現象，與圖 6 的結果一致。此外，急速升溫退火 (spike annealing) 與爐退火的搭配也是一

項有趣的課題，從圖 8(a) 到圖 8(c) 分別為急速升溫退火之後，再經過不同時間的爐退火所得的微分電容影像，在這三組結果中，依然可以發現電性接面區因不同的退火條件所導致的明顯變化，類似的研究實驗方法還可以觀察到載子分布範圍的微觀變化。以上應用實例皆利用降低光擾以增強影像對比的特性⁽²¹⁾，對材料的微觀電性變化進行比較分析，有興趣的讀者亦可參照使用。

五、結語

本文簡要的介紹了掃描電容顯微鏡的光擾效應及其作用原理，並說明低光擾掃描分析技術的基本架構、試片製備、分析應用及操作上的注意事項。光擾效應源自提供表面形貌的光束偏折感測機制，我們相信光擾效應也是掃描電容顯微鏡在定量分析上受限的主因之一。在本質上，光擾效應包括光電壓效應與載子注入效應，前者的影響主要為等效探針偏壓與電性接面影像；後者主要影響微分電容影像對比，由於掃描電容顯微鏡對載子濃度的靈敏度極佳，也因此對光學干擾特別敏感，使用者應留意量測結果是否已受光擾效應影響。利用低光擾掃描電容顯微鏡技術可避免微分電容影像失真及有效增強影像對比，目前，國家奈米元件實驗室已經首度採用此一量測技術從事微區載子濃度與分布的分析。不論如何，表面形貌仍是引起電性變化的因素之一，即使採用低光擾掃描分析技術，操作者仍不

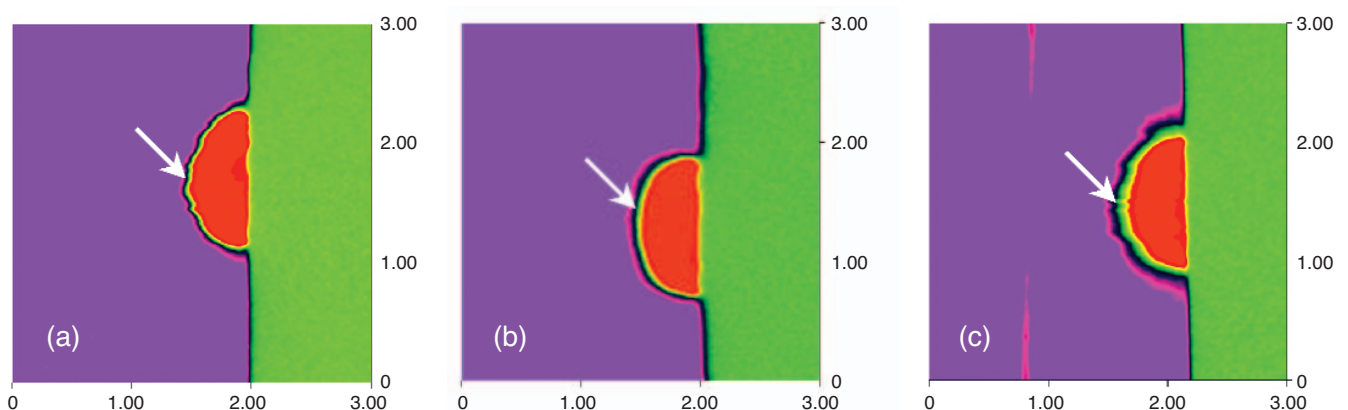


圖 8. 1050 °C 急速升溫退火搭配相同溫度、不同時間的爐退火之微分電容影像，由 (a) 到 (c) 所對應的爐退火時間漸增，其電性接面寬度呈現出逐漸變寬的現象。

可忽略表面形貌對分析結果的重要性，文中所介紹的操作方法乃一暫時性的做法，並非避免光擾效應的治本之道，我們仍希望掃描電容顯微鏡保有同步分析表面平坦度的功能，所以掃描系統與架構的重新設計確有其必要。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，除了文中所提的方法，針對不同試片與研究需求，使用者仍有必要自行開發新的試片製備方式。筆者期盼文中所傳遞的相關訊息能對使用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. S. Shin, J.-I. Kye, U. H. Pi, Z. G. Khim, J. W. Hong, S. Park, and S. Yoon, *J. Vac. Sci. Technol.* **B**, **18**, 2664 (2000).
14. M. N. Chang, J. H. Lai, C. Y. Chen, W. W. Wan, F. M. Pan, and J. H. Liang, "Studies of Photovoltaic Effect on Differential Capacitance Images of Shallow P^+ Junction Profiles", 2nd National Conference of the German Vacuum Society and 8th European Vacuum Conference, Berlin, Germany (2003/6).
15. 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).
16. M. N. Chang, C. Y. Chen, F. M. Pan, T. Y. Chang, and T. F. Lei, *Electrochemical and Solid-State Letters*, **5**, G69 (2002).
17. 張茂男, 陳志遠, 潘扶民, 科儀新知, **22** (5), 67 (2001).
18. 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).
19. 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).
20. 張茂男, 陳志遠, 潘扶民, 電子月刊, **95**, 150 (2003).
21. M. N. Chang, C. Y. Chen, W. W. Wan, J. H. Lai, F. M. Pan, and J. H. Liang, *Direct Observation of Electrical Junction Carried Out from Various Annealing Processes by Low-Photo-Perturbed Scanning Capacitance Microscopy*, 4th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (ALC'03), Kauai, Hawaii, U.S.A., (2003/10).

張茂男先生為國立中央大學電機工程博士，現任國家奈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，現任國家奈米元件實驗室助理研究員。

萬文武先生現就讀於國立清華大學工程與系統科學系碩士班。

梁正宏先生為美國威斯康辛大學麥迪遜分校核子工程與工程物理博士，現任國立清華大學工程與系統科學系教授。

潘扶民先生為美國加州大學化學博士，現任國立交通大學材料工程研究所教授。

Mao-Nan Chang received his Ph.D. in electrical engineering from National Central University. He is currently an associate researcher at National Nano Device Laboratories.

Chih Yuan Chen received his M.S. in electronic engineering from National Chiao Tung University. He is currently an assistant researcher at National Nano Device Laboratories.

Wen-Wu Wan is currently a M.S. student in the Department of Engineering and System Science at National Tsing Hua University.

Jenq-Horng Liang received his Ph.D. in nuclear engineering and engineering physics from the University of Wisconsin-Madison, USA. He is currently a professor in the Department of Engineering and System Science at National Tsing Hua University.

Fu-Ming Pan received his Ph.D. in physical chemistry from the University of California, Irvine, USA. He is currently a professor in the Department of Materials Engineering at National Chiao Tung University.