

電性掃描探針顯微術簡介

Introduction to Electric Scanning Probe Microscopy

張茂男、陳志遠、潘扶民

Mao-Nan Chang, Chih Yuan Chen, Fu-Ming Pan

電性掃描探針顯微鏡 (包括掃描電容顯微鏡與掃描電流顯微鏡) 為分析超薄介電層電性的重要工具之一，藉由導電探針直接在薄介電層上進行掃描，可以獲得奈米區域的載子濃度分布、漏電流行為與界面缺陷等電性相關訊息，本文介紹電性掃描探針顯微鏡的基本量測架構、原理與應用實例，此外，相關的研究課題也將在文中一併討論。

Electrical scanning probe microscope (E-SPM), including scanning capacitance microscope (SCM) and conductive atomic force microscope (C-AFM), is one of the important tools for analyzing the electric properties of ultrathin dielectric layers. Working on bare gate dielectric layer, the conductive tip of the E-SPM allows us to obtain the electric characterization of nanometric areas, such as carrier concentration profile, leakage behavior and interface defects. In this article, we introduce the experimental set-up, the mechanism and the applications of E-SPM. Moreover, E-SPM related research fields have also been discussed.

一、前言

掃描探針顯微鏡 (scanning probe microscope, SPM) 分析技術可說是近幾年來發展極為快速的一項表面分析技術，除了操作簡單與維護容易之特點外，最主要的優點在於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、電磁場、微小電容變化、漏電流、光學性質及壓電特性等高解析度訊號。隨著奈米科技時代的來臨，許多表面分析需求已進入奈米尺度，掃描探針顯微鏡自然成為奈米科技時代不可或缺的表面分析工具之一，其各項應用之中，以應用於材料表面形貌觀察及平坦度分析的原子力顯微鏡 (atomic force microscope,

AFM) 最為人所熟知。由於電子元件尺寸的微縮以及先進薄膜製程的研發，電子材料的微區電性分析對電子元件的設計與特性掌握便成為一項重要的檢測工作，電性掃描探針顯微鏡可用以分析二維載子濃度分布、進行界面缺陷研究、分析介電薄膜性質以及壓電薄膜特性，近幾年來更因成熟的商業產品問世而被廣泛使用在電子材料的電性分析上。掃描電容顯微鏡 (scanning capacitance microscope, SCM)、電力顯微鏡 (electric force microscope, EFM)、掃描穿隧顯微鏡 (scanning tunneling microscope, STM)、掃描展阻顯微鏡 (scanning spreading resistance microscope, SSRM) 與掃描電流顯微鏡 (conductive atomic forcemicroscope, C-AFM, 或直譯為導電原

子力顯微鏡)等皆屬電性掃描探針顯微鏡。掃描電容顯微鏡可提供微分電容影像,能感測小於 10^{-18} 法拉第的電容變化,適用於觀察二維自由載子濃度的分布,其在光電材料上的分析應用能力也已逐漸顯著。就表面微小電流分布而言,掃描電流顯微鏡可偵測小至 10^{-15} 安培的電流訊號,在介電薄膜電性分析的研究上極具潛力。本文將針對以上兩種不同特色的電性掃描探針顯微鏡,介紹其基本架構、原理與應用實例,此外,相關的研究課題也將在文中一併討論,期使讀者對電性掃描探針顯微術能有更進一步的認識。

二、掃描電容顯微鏡

1985年美國普林斯頓RCA實驗室的J. R. Matey與J. Blanc首度建立了掃描電容顯微鏡的雛形,並將之用於表面形貌的觀測上,但靈敏度與空間解析度都尚待提昇。1988年英國諾丁漢大學(University of Nottingham)物理系的C. D. Bugg與P. J. King提出具實用性的掃描電容技術與做法,其操作模式為非接觸式,主要目的仍為表面形貌掃描。C. C. Williams等人於1989年首度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,從此以後掃描電容顯微鏡分析技術才開始受到世人廣泛的注意。由於掃描電容顯微鏡分析技術亦屬於掃描探針顯微術的一環,所以其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,該技術可說是傳統電容-電壓(C-V)量測技術的延伸,透過奈米尺寸的導電探針尖端,掃描並偵測局部區域的表面電容變化,現已經成為量測二維載子濃度分佈的有力工具之一,其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。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。在半導體元件製程中,通常藉由離子布植搭配適當的熱處理製程以獲得所需的自由載子濃度分布輪廓,由於自由載子濃度的分布隨摻雜(dopant)與熱處理方式而有明顯的改變,一般常利用二次離子質譜儀(secondary ion mass spectroscope, SIMS)測量摻雜輪廓(dopant profile),此法雖為破壞性的量測技術且僅能獲得一維(1D)縱深的摻雜輪廓,但在傳統大尺寸的電子元件,熱處理後摻雜元素橫向分布的改變對於元件特性上的影響相對較小,因此只要能充分掌握摻雜的深度及接面的特性,即能有效掌握元件特性。隨著半導體製程技術進入深次微米或奈米階段,閘極長度(gate length)變得越來越窄,汲極(drain)與源極(source)區域之摻雜元素橫向擴散所引起的通道長度(channel length)縮短對元件特性有十分明顯的影響,直接觀察製程條件對等效通道長度的影響便是一項有趣的課題。此外,淺接面(shallow junction)元件結構的出現,濃度範圍 $10^{15} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的摻雜雜質分布在縱向與橫向約100奈米的範圍內,導致元件特性分析工作面臨一項新的挑戰-量測淺接面結構的載子濃度分布輪廓。所以,除了在製程上加強離子佈植的精確性與熱處理製程的穩定性之外,摻雜雜質活化後,元件結構內自由載子濃度分布輪廓的量測也是一項非常重要的工作,掃描電容顯微術正可滿足上項需求。以下將簡述掃描電容顯微鏡的基本量測架構、原理、應用實例、試片製備與相關的研究課題,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,在此不再贅述。

1. 基本量測架構與原理

本實驗室所使用的掃描電容顯微鏡如圖1所示,採用矽探針鍍上鉑/銻(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MOS結構,若試片為三五族化合物半導體材料,則導電探針與試片表面就形成金半(metal-semiconductor)接觸型態。而金屬鍍膜的材質通常要有良好的導電性與耐磨性,由於探

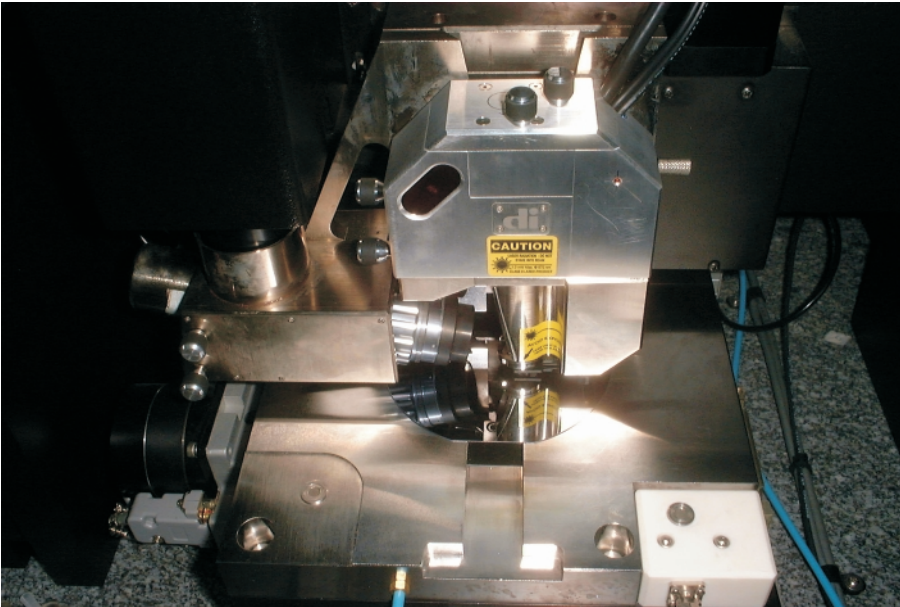


圖 1. 掃描電容顯微鏡 (此為 DI 公司的 D5000 型掃描探針顯微鏡機台)。

針會在樣品表面不斷的來回掃描，金屬鍍膜材料的耐磨損能力，便成為影響探針穩定度的重要因素。圖 2 為量測架構示意圖，電容訊號的感測擷取系統主要包括探針、超高頻共振電容偵測器及電容計算電子系統等部分。電容計算電子系統主要的功能是提供交、直流偏壓，並且將電容偵測器得到的訊號解析出來，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，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。此外，掃描電容顯微鏡也以接觸式原子力顯微鏡的模式同步提供表面形貌的資訊，本實驗室之掃描探針顯微鏡採用光束偏折法 (optical deflection measurement method) 偵測樣品表面微觀形貌的變化，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後，微小的簧片偏移與力場的變化還是能被偵測到。

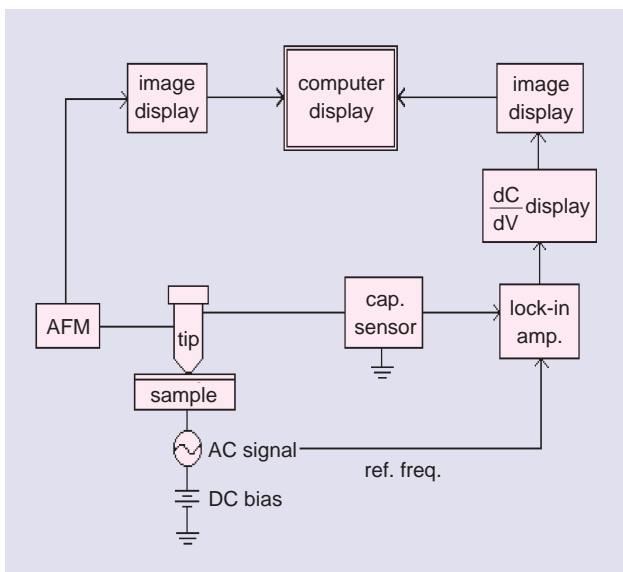


圖 2. SCM 量測架構示意圖。

掃描電容顯微鏡試片的製備，依待測面的位置可分為平面試片與橫截面試片，前者幾乎沒有任何製備上的困難，後者的困難度則依試片材質而定。圖 3 為橫截面試片製備流程圖，首先將試片對貼並使接著劑固化，接著以鑽石切割機將整組試片切割成數個薄片，然後進行橫截面的研磨拋光與清洗。至於橫截面平坦化的方法，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。

最後，以銀膠或碳膠將研磨拋光後的橫截面試片固定於金屬片上即可。下探針時應避免探針未能接觸或猛烈撞擊樣品表面，在適當的接觸下，選擇正確的操作偏壓點，改變交流偏壓的振幅及鎖頻放大器的相位角可得到最佳的微分電容訊號，同時亦可得到相對應區域的表面微觀形貌。

2. 應用實例

以下介紹四項掃描電容顯微鏡相關的應用：

(1) MOS 結構等效通道長度量測。這是掃描電容顯微鏡的基本應用之一，與此一領域相關的研究或技術報告也最多。(2) 超微量鐵污染引致缺陷分析。應用掃描電容顯微鏡觀察超微量金屬污染引致矽晶圓缺陷分布並加以鑑定分析，此一特殊應用係由國家奈米元件實驗室 (NDL) 首先提出並於國際會議中發表。(3) 低能佈植之硼離子活化行為觀察。利

用掃描電容顯微鏡觀察低能量佈植之硼離子的活化及擴散狀況與熱處理條件之間的微妙關係。(4) 三五族氮化物材料之分析應用。以掃描電容顯微鏡觀察低溫氮化鎵磊晶層的電性狀態。

(1) MOS 結構等效通道長度量測

長久以來，研究人員透過電容 - 電壓量測來推估載子濃度，偵測微分電容訊號的掃描電容顯微鏡，自然成為解決此一問題的直接手段。自 1995 年起許多研究人員相繼投入掃描電容顯微鏡的研究領域，研究與技術報告也大量出爐，至今金氧半場效電晶體的自由載子二維濃度分布仍是掃描電容顯微鏡最為人所熟知的一項用途，而離子佈植與其後續的熱處理過程則是影響自由載子二維濃度分布之主要原因。實際上，試片表面平坦度是影響 SCM 測量結果的一項重要因素，有效的研磨拋光技術與

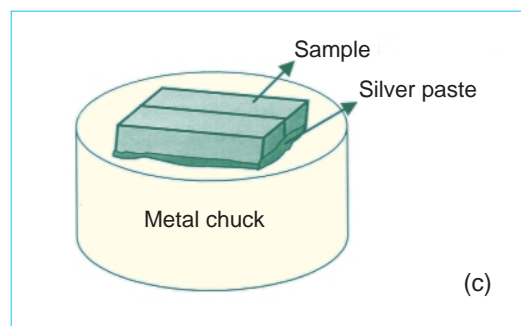
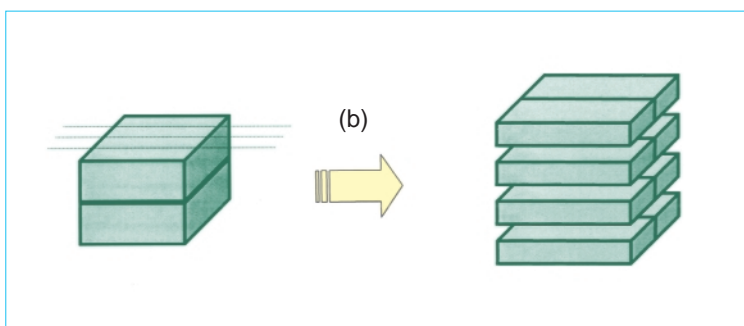
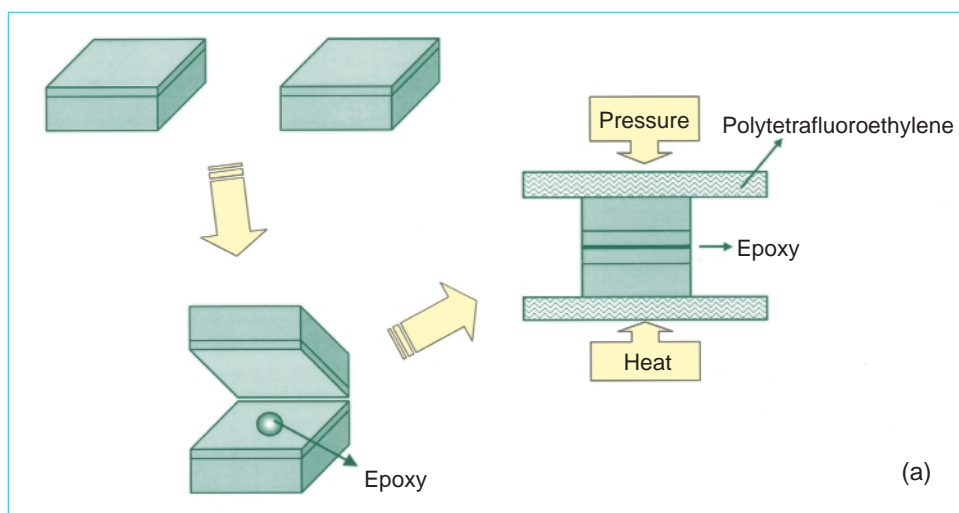


圖 3. SCM 橫截面試片製備流程示意圖：(a) 對貼試片並使接著劑固化，(b) 以鑽石切割機將整組試片切割成薄片，(c) 以銀膠或碳膠將研磨拋光後的橫截面試片固定於金屬片上。

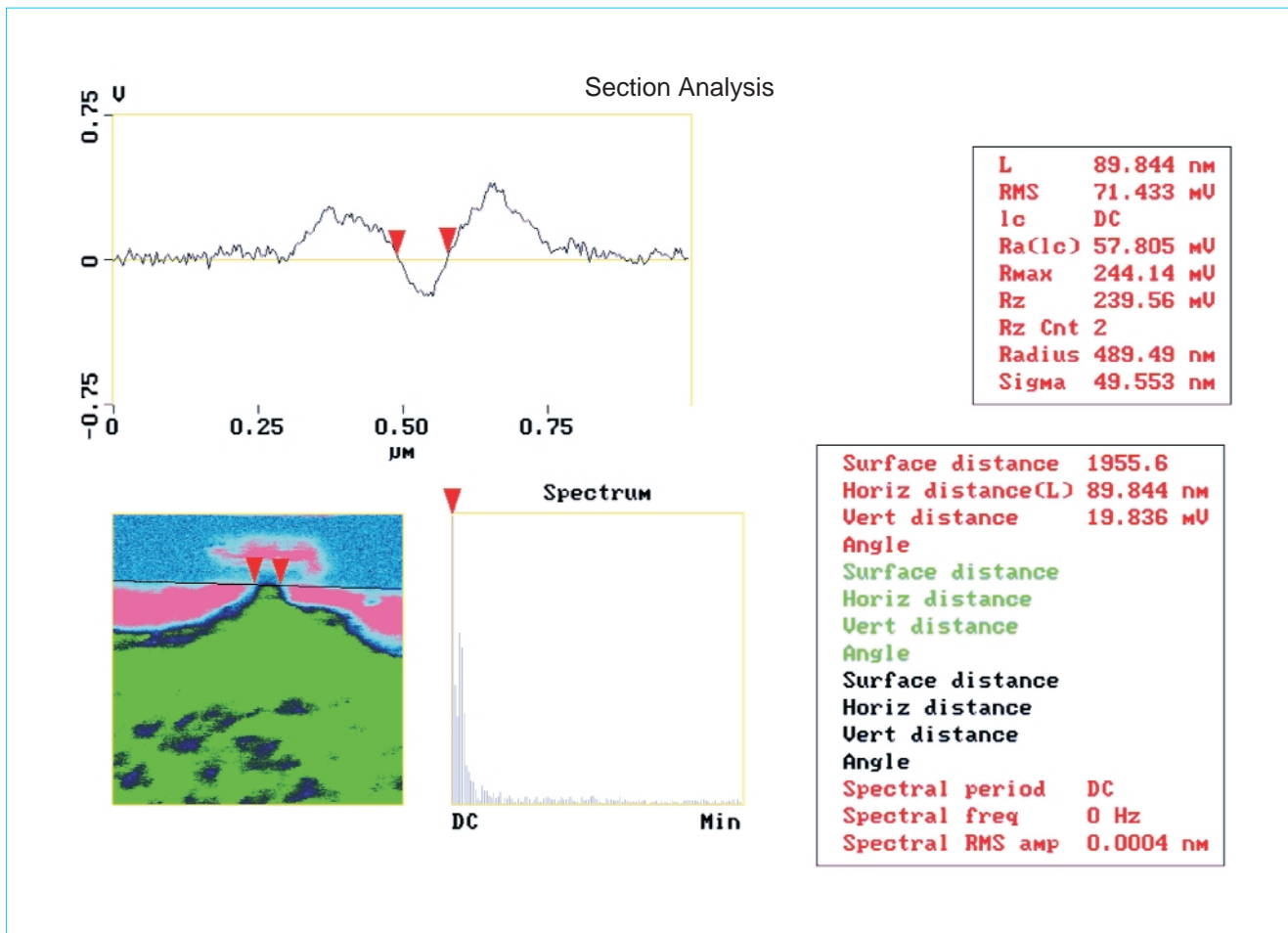


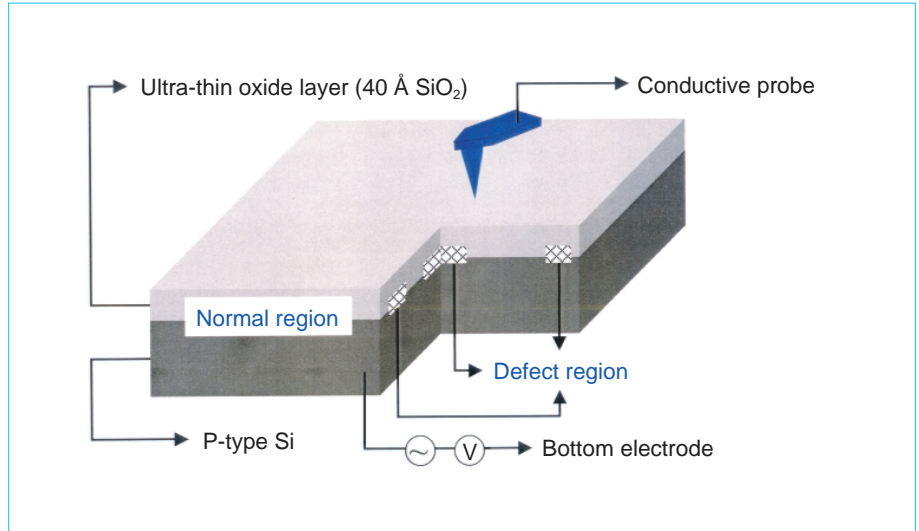
圖 4. *N* 型多晶矽閘極長度為 0.35 微米之 MOS 結構的掃描微分電容訊號分析，氧化層厚度為 0.1 微米，紅色部分為 *N* 型區域，等效通道長度約為 89 奈米。

潔淨技術通常可以達到量測上的要求，無論如何，現在我們都已克服上述問題，並能利用此一技術分析試片中 *N* 型區域與 *P* 型區域的分布範圍，亦即可以觀察到製程條件對閘極下方載子通道的影響。圖 4 所示為一個典型的例子，其閘極長度為 0.35 微米，微分電容影像顯示出等效通道長度約 89 奈米，這是掃描電容顯微鏡在 MOS 元件結構的傳統應用；至於圖中各個區域中載子濃度的詳細分布情形，則不易由此影像對比直接判斷，主要是因為不同直流偏壓下的微分電容訊號會隨著載子濃度變化而有不同程度的響應，換句話說，微分電容訊號通常不是單純的隨著載子濃度增加而減少，仍要視所設定的直流偏壓點而定。欲更進一步掌握影像對比與載子濃度的確切關係，則要以特定的導電探針對特定材料進行分析校正實驗。

(2) 超微量鐵污染引致缺陷分析

此一研究為超微量金屬污染引致缺陷分析計畫中的一環，其目的在利用掃描電容顯微鏡進行鐵污染引致矽晶圓缺陷分析，初步的研究結果已在 2001 年的國際會議 (AVS 48th International Symposium/IUVSTA 15th International Vacuum Congress/11th International Congress on Solid Surfaces, 地點：舊金山) 上正式發表。由於鐵污染造成後續氧化製程所形成的薄氧化層產生界面缺陷，MOS 結構的電容 - 電壓曲線將因此類界面缺陷而導致產生扭曲變形，其影響大小與缺陷密度有關，因此比較缺陷集中區與其他區域的微分電容影像對比，即可看出缺陷的分布狀態，再藉著一系列微分電容影像的分析，即可探究試片各區產生界面缺陷的嚴重程度，實驗架構示意圖如圖 5 所示。事

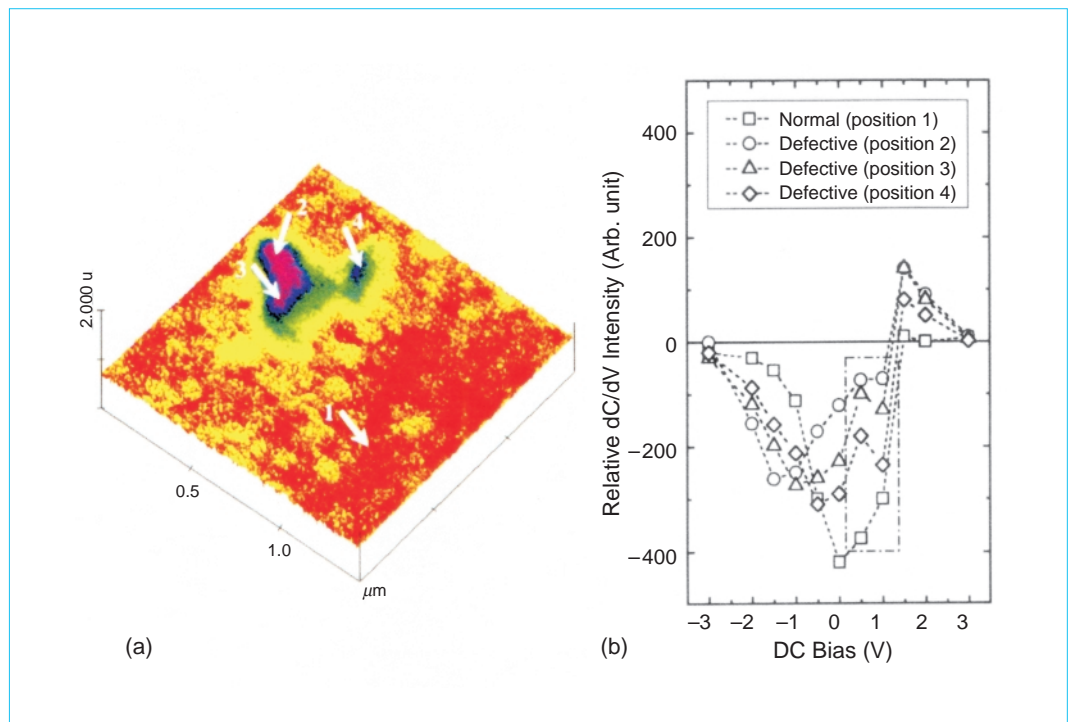
圖 5.
超微量鐵污染引致缺陷分析實驗架構示意圖。



實上，微分電容影像的對比在本質上是與直流偏壓點相關的，其所反應的訊息也因直流偏壓點而異，選擇不同的直流偏壓操作點可以得到一連串的微分電容影像，而這一連串的微分電容影像對比則可反應出不同缺陷區域的相對關係與不同的缺陷訊息。圖 6 為對不同缺陷區域分析後的結果，在三個缺陷位置 (圖 6(a) 的 2、3 與 4) 上，除了發現界面陷阱 (interface traps) 的存在之外，少數載子的訊號也相當明顯，經過簡單的計算，推估缺陷區的少數載子

生命期在 11.2 微秒以下，如此短的少數載子生命期也同時顯示在矽晶圓表面附近有高效率的產生 - 複合中心存在。先前的研究報告指出，鐵原子在矽晶圓中可增加少數載子濃度並形成高效率的產生 - 複合中心 (即形成 deep-level traps)，進而造成少數載子生命期縮短的影響，很顯然地在熱氧化過程中，鐵原子自矽晶圓表面擴散進入矽晶本體中，聚集於表面附近而造成這些影響，此一結果也與理論預測及模擬結果相吻合。

圖 6.
(a) 標示 2、3 與 4 為缺陷區的不同位置，(b) 將圖 (a) 中各區在不同直流偏壓下的微分電容訊號作圖，由所得的結果可以看到界面缺陷的作用與少數載子的訊號。



(3) 低能佈植之硼離子活化行為觀察

離子佈植為半導體產業的標準摻雜製程技術，其優點已有許多專刊介紹，在此不再贅述。利用低能量離子佈植可在薄區域內植入高濃度的摻雜元素，而形成淺接面結構。隨著元件尺寸快速微縮的發展趨勢，摻雜元素與自由載子濃度分布輪廓及其橫向分布情形的掌握已愈顯重要。對淺接面試片而言，由於摻雜元素的有效縱深分布通常都在 0.1 微米的範圍內，從橫截面分析摻雜元素的擴散行為或載子濃度的分布都相當困難，即使已有研究報告指出採用低角度斜面拋光的試片製備方式可以概略看出載子濃度分布情形，但考慮時間、再現性與量測誤差等因素，確有必要針對超淺接面試片發展出一

套有效而快速的二維載子濃度分析技術。離子佈植及其後續的熱處理製程是影響摻雜元素分布與活化情形的主要因素，當然也就影響了自由載子的濃度分布。針對低能量硼離子佈植形成的淺接面試片(摻雜元素的有效分布區域在晶片表面下 0.1 微米的範圍內)，以掃描電容顯微鏡的平面微分電容影像及其截面訊號輪廓，可直接分析自由載子濃度的橫向分布狀態，圖 7 (a) 至 (c) 的截面微分電容訊號為在 850 °C，分別經 10 秒、30 秒與 50 秒快速熱退火處理的試片；圖 7(d) 至 (f) 的截面微分電容訊號則為 1050 °C，分別經 10 秒、30 秒與 50 秒快速熱退火處理的試片。由試片 (a) 至 (c) 可看出一隨著退火時間增加而逐漸增寬的隆起平帶，此區域為

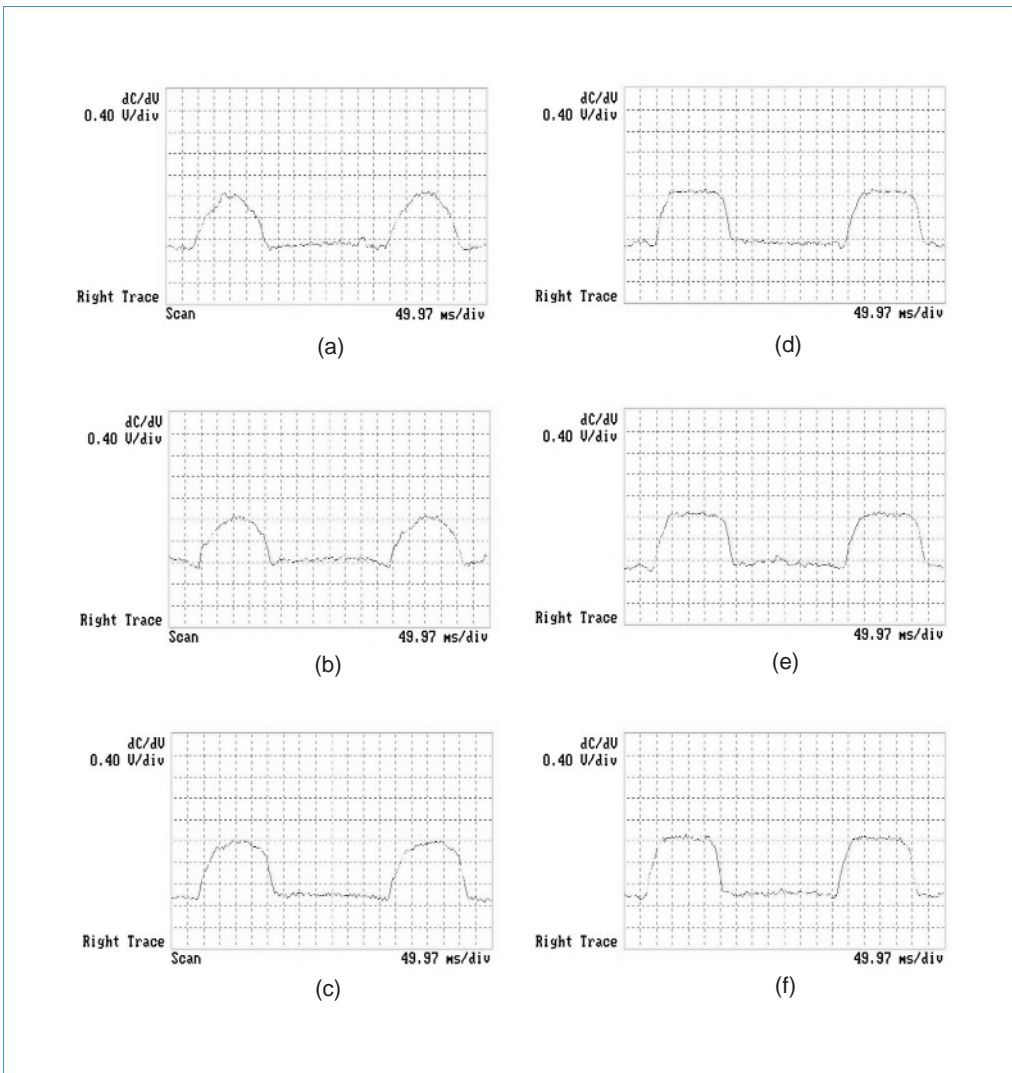


圖 7.
(a) 至 (c) 的截面微分電容訊號為試片在 850 °C，分別經 10 秒、30 秒、與 50 秒快速熱退火處理的結果；(d) 至 (f) 的截面微分電容訊號則為 1050 °C，分別經 10 秒、30 秒、與 50 秒快速熱退火處理的結果，圖中隆起的區域為硼離子佈植區。

$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$	40 nm	
GaN	1.0 μm	
LT-AlN	20 nm	←
GaN	1.0 μm	
LT-AlN	20 nm	←
GaN	1.0 μm	
LT-GaN	20 nm	←
Sapphire (Al_2O_3)		

圖 8. 氮化物磊晶片緩衝層結構示意圖，由下到上分別有一層低溫氮化鎵與兩層低溫氮化鋁，厚度皆為 20 奈米。

硼離子佈植區，微分電容訊號的變化情形可表現出摻雜元素被活化的程度，亦即已活化雜質的濃度分布。在退火溫度為 850 °C 時，試片 (a) 至 (c) 佈植區平帶的逐漸增寬，可見隨著退火時間增加，植入的雜質由佈植區中央開始逐漸被活化完成；伴隨著硼離子明顯的輻射增強擴散，平面微分電容訊號皆已包含雜質橫向擴散後的影響。試片 (d) 至 (f) 由於退火溫度相當高，退火溫度愈高晶格回復速度愈快且愈完全，橫向擴散路徑迅速消失，植入的硼離子也同時被迅速活化，以致於接面過渡區的載子濃度分布情形沒有明顯變化，所以彼此間的微分電容訊號亦無明顯差異。

(4) 三五族氮化物材料之分析應用

化合物半導體 (compound semiconductors) 材料因其直接能隙 (direct bandgap)，所以具良好的發光特性，可應用於光電元件上；而此系列材料的高電子遷移率也使其成為高速電子元件材料的要角，如發光二極體 (LED)、半導體雷射與微波通訊等產品，目前受到普遍利用的三五族化合物半導體材料便是一例。在三五族化合物半導體材料中，氮化鎵 (GaN) 因為可以應用於藍色發光二極體，所以備受矚目。氮化鎵材料通常成長在一個晶格失配 (lattice

mismatch) 的基板上，以最常見的氧化鋁 (Al_2O_3) 基板而言，其與主要的氮化鎵磊晶層之間仍有高達 13.8% 的晶格失配程度，因此常導致兩者的材料界面特性極差，進而直接影響了氮化鎵磊晶片的品質。最常見的做法採用緩衝層 (buffer layers) 以降低應力，通常在氧化鋁基板與氮化鎵磊晶層之間先成長低溫氮化鎵 (LT-GaN) 或低溫氮化鋁 (LT-AlN) 薄膜緩衝層，此法可適用於有機金屬化學氣相沉積 (MOCVD) 與分子束磊晶 (MBE) 兩種磊晶成長方式。緩衝層的電性狀態對某些元件而言是很重要的，要量測低溫氮化鎵或低溫氮化鋁薄膜的電性狀態，首先要克服試片製備的問題。圖 8 為一低溫氮化物緩衝層試片的結構示意圖，圖中標示出兩層厚度為 20 奈米的低溫氮化鋁與一層厚度為 20 奈米的低溫氮化鎵磊晶層，後者緊鄰氧化鋁基板。圖 9(a) 與 (b) 分別為其表面形貌與掃描微分電容影像，在圖 9(a) 中並無法分辨各磊晶層所在的位置，僅可看出氧化鋁基板與磊晶層的界面，其位置與圖 9(b) 的低溫氮化鎵磊晶層相對應；圖 9(b) 中則可明顯看出各磊晶層的分布位置，與圖 8 的結構示意圖相符。此外，微分電容訊號的分析結果顯示各低溫磊晶層的電性狀態為 *N* 型，此一結果也與後續的化學特性分析所得結論相符。

三、掃描電流顯微鏡

除了閘極長度的緊縮之外，電子元件製程尺寸的微縮還包括閘極介電層的薄化，因此超薄閘極氧化層的製作已在近幾年開始受到重視。基於元件可靠度與穩定性等考量，超薄氧化層在結構與電性上的均一性是一項重要的要求，特別是氧化層的厚度，即使只有幾個埃 (\AA , 0.1 奈米) 的變化都可能導致崩潰強度有明顯的差異，亦即有更嚴重的閘極漏電流問題，氧化層愈薄此一現象就愈顯著，而漏電流的增加將更導致氧化層快速退化。長久以來研究人員利用傳統電性分析法以瞭解氧化層的性質及其對元件特性的影響，如電流 - 電壓與電容 - 電壓曲線分析，然而對於分析薄氧化層上較易產生電性崩潰的位置，這些傳統分析方法已無法滿足微觀量測上的需求。為了解決上述問題，電性掃描探針顯

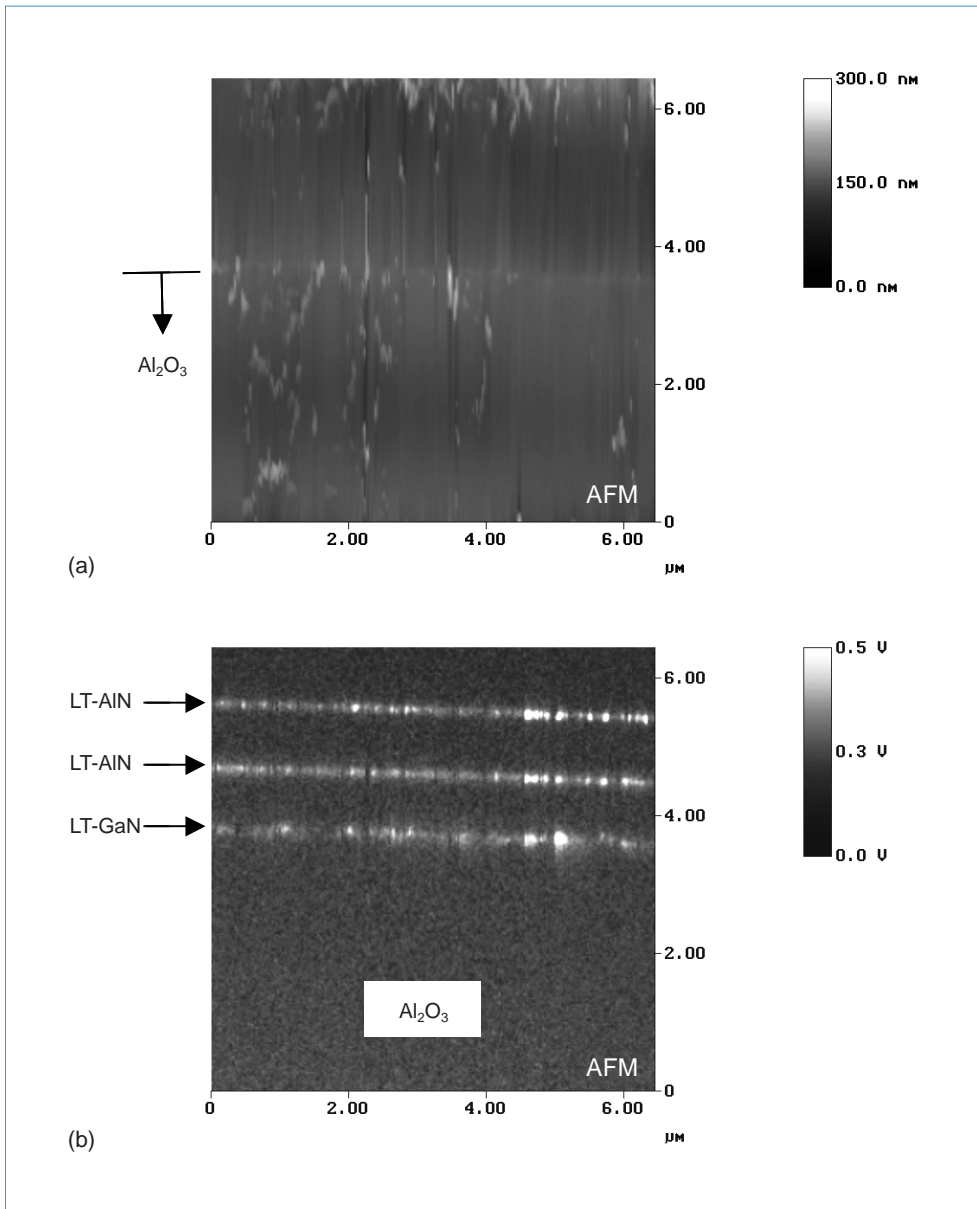


圖 9.
 (a) 與 (b) 分別為圖 8 試片的表面形貌影像與其對應的掃描微分電容影像，圖 (a) 中可清楚看見氧化鋁基板與磊晶層的界面，與圖 (b) 的低溫氮化鎵磊晶層所在位置相對應，圖 (b) 中可看到各磊晶層的分布位置，微分電容訊號的分析結果顯示各低溫磊晶層的電性狀態為 *N* 型。

微鏡因而誕生，包括掃描穿隧顯微鏡、掃描電流顯微鏡以及上節提過的掃描電容顯微鏡等都能夠符合要求，但因掃描穿隧顯微鏡需要額外的超高真空設備，並不適合於快速而頻繁的分析需求，系統維護上的難度也較高；掃描電容顯微鏡則因探針尖的雜散電容效應使得其橫向空間解析能力低於掃描電流顯微鏡。除了微觀分析的優點之外，直接在氧化層表面進行分析，還可以排除閘極電極製程因素在分析上所引起的困擾，使研究人員將注意力集中在氧化層本身及其與矽基材的界面問題上。自 1995 年

開始，陸續有研究報告提出如何利用掃描電流顯微鏡觀察超薄氧化層之特性；在 1998 年西班牙的研究人員 M. Porti 等人正式以掃描電流顯微鏡對超薄氧化層進行奈米尺度的電性分析；最近掃描電流顯微鏡更因高靈敏度的商品問世而備受矚目。如果把掃描電容顯微鏡當成奈米級的電容 - 電壓量測技術，那掃描電流顯微鏡則可視為奈米級的電流 - 電壓量測技術，兩者除了可以提供二維電性影像資訊之外，還可以針對特定点進行電性曲線分析，堪稱電性掃描探針顯微鏡的兩大要角。以下將簡述掃描

電流顯微鏡的基本量測架構、原理、應用實例與相關的研究課題，期使讀者對這一項新的量測分析技術有更進一步的認識。

1. 基本量測架構與原理

掃描電流顯微鏡為掃描探針系統在電性上的分析量測應用，顧名思義，其所測量的電性訊號為電流。本實驗室所使用的掃描電流顯微鏡，如圖 10 所示，其導電探針及試片的接觸模式也與掃描電容顯微鏡雷同，包括高濃度硼摻雜的鑽石探針、矽探針鍍以鈦鉍合金、金膜與鈷鉻合金膜等都是，前兩者由於耐磨性佳，特別適用於此項量測用途。此外，由於掃描電流顯微鏡也是利用原子力顯微鏡的架構擴充而成，因此，它也具備了原子力顯微鏡的基本架構與功能。一般而言，在試片製備上不需花費太大功夫，只要注意試片表面的潔淨即可。圖 11 為掃描電流顯微鏡的架構示意圖，掃描電流顯微鏡主要由兩個系統構成，區塊 I 為原子力顯微鏡系統，這部分的主要目的在做試片表面形貌的掃描，它包含了雷射光源產生器、反射雷射光源接收器、探針、載台、掃描元件及原子力顯微鏡回饋電路。其力學感測原理已於上節說明過；掃描元件一般採用壓電陶瓷材料，製造出相當小巧的三度空間掃描元件。由於具備原子力顯微鏡的功能，使我們可以在擷取表面微區電流訊號時，同步得到試片的表面形貌。如同掃描電容顯微鏡，表面形貌對於電流訊號也有決定性的影響。因此在擷取電流訊號的同時，同步取得表面形貌的對應資訊，對分析工作而言是十分重要的。區塊 II 則為電流訊號擷取量

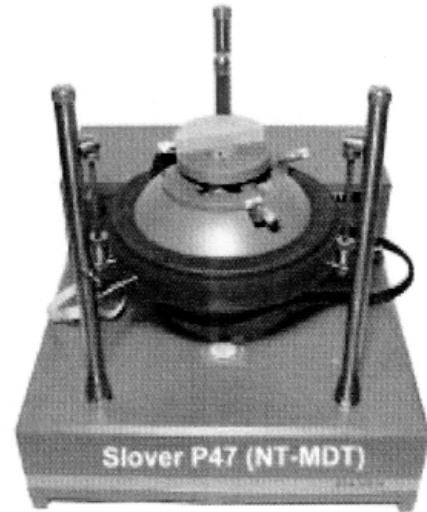
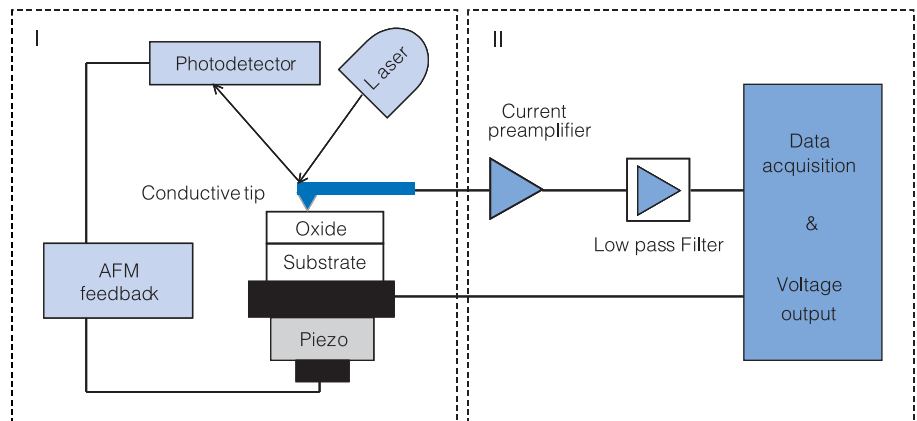


圖 10. 掃描電流顯微鏡 (此為 NT-MDT 公司的 Solver P47 型掃描探針顯微鏡機台)。

測系統，因為量測面積從傳統電流 - 電壓量測儀器 10^{-4} 平方公分減少至 10^{-12} 平方公分，電流擷取量測的靈敏度必須提高，甚至要達到 10^{-15} 安培的等級，在這樣嚴格的要求下，如何避免環境及系統本身的雜訊干擾，成了機台設計上的重要考量。在區塊 II 的單元包括了電源供應器、訊號放大器、低頻濾波器及訊號輸出系統。

量測閘極氧化層的電流 - 電壓關係可以瞭解到閘極氧化層的電性特性，除可作為對超薄閘極氧化層特性的研究外，也可以由電流 - 電壓曲線對製程條件做一檢測。當導電探針接觸試片氧化層表面，整個量測系統形成一個簡易而微小的 MOS 結構 (如圖 12)，經由在試片背面所加的直流偏壓，可以

圖 11. 掃描電流顯微鏡架構示意圖，區塊 I 與 II 分別代表原子力顯微鏡系統與電流訊號擷取量測系統。



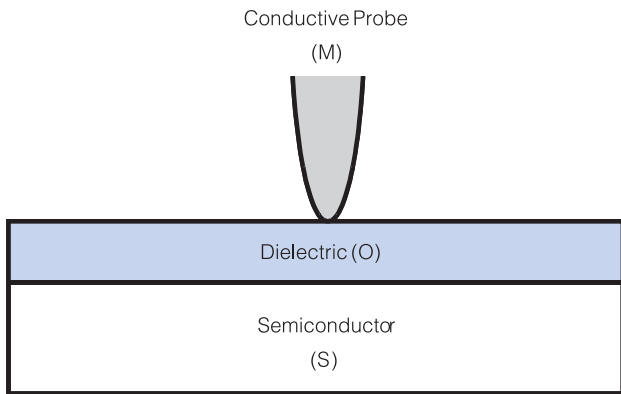


圖 12. 導電探針與試片表面接觸構成微小的 MOS 結構。

在導電探針端偵測到電流訊號。但應避免在探針端施加太大的負偏壓，主要原因是可避免探針引致氧化 (tip induced oxidation) 效應，此一效應會導致氧化層厚度變化，因而產生錯誤的分析結果；另一重要原因是此一架構可以將通過探針的電流限制在 10^{-11} 安培以內，如此可避免探針尖與薄氧化層在高電壓時遭到嚴重損傷。掃描電流顯微鏡可以做二維的掃描，其掃描範圍視掃描壓電陶瓷而定，最大可達一萬平方微米，掃描面解析度則視掃描探針曲率半徑而定，最小可達一百平方奈米，除了可以分析極微小區域的氧化層電流特性外，也可以對大範圍區域做一巨觀的均勻性檢測，也因為接觸面積的縮小，無形中增加了對微小缺陷的觀測能力。除了二維掃描外，將探針固定在試片上的一點做定點電壓掃描量測，進而獲得定點電流 - 電壓曲線特性，這也是掃描電流顯微鏡電性量測上的重要功能之一。以薄氧化層的 F-N (Fowler-Nordheim) 穿隧電流而言，其漏電流與施加偏壓之關係式如下：

$$J \propto \frac{V_{ox}^2}{\Phi_{t_{ox}}^2} \exp\left[-A \frac{t_{ox}}{V_{ox}} \Phi^{3/2}\right]$$

其中 V_{ox} 為跨在氧化層上的偏壓， t_{ox} 為氧化層的厚度， A 為與等效質量有關的常數， Φ 為穿隧載子所面對的能障。當我們改變外加偏壓，將可得到電流 - 電壓曲線圖 (如圖 13)，藉由電流 - 電壓的關係，我們可以研究氧化層的電性特性，其對氧化層厚度變化的靈敏度也可以達到 \AA 等級。

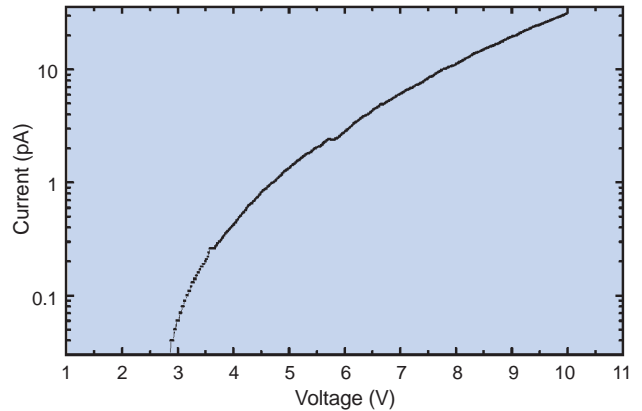


圖 13. 定點測得的薄氧化層電流 - 電壓關係圖。

2. 應用實例

以下介紹結合掃描電流顯微鏡與掃描電容顯微鏡分析超微量鐵污染引致缺陷的研究應用，本節將針對該項應用在掃描電流顯微鏡的部分舉例說明。由鐵污染所引起的薄氧化層界面缺陷將導致薄氧化層抗崩潰強度下降，其影響大小與缺陷密度有關，當以一個固定的外加偏壓掃描薄氧化層表面，由其表面的微小電流訊號即可偵測出薄氧化層的「弱點」所在，再藉著定點電流 - 電壓曲線圖的分析，即可探究氧化層各區受界面缺陷的影響程度。實驗結果如圖 14 所示，圖中清楚顯示出三個分布與強度都不同的漏電流區域，針對其中一個漏電流位置進行定點分析，可以得到如圖 15(a) 的結果，圖中在 -2 V 以上產生的大電流可能與聚集在界面附近的鐵原子有關。事實上，圖 15(a) 的結果中還包含兩項訊息，其一為負微分電阻 (negative differential resistance, NDR) 現象，如圖 15(b) 所示，此一現象係由於氧化層中捕獲缺陷輔助穿隧行為而造成；其

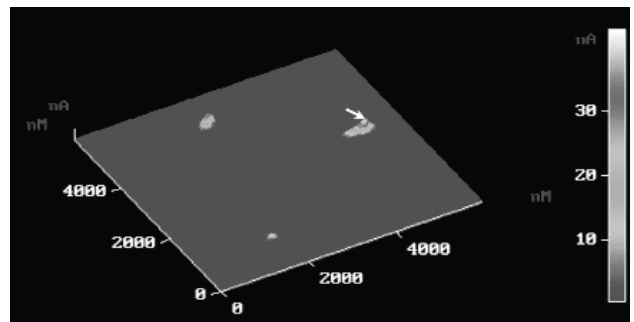


圖 14. 超薄氧化層缺陷區的漏電流影像，圖中白色箭號所指處為圖 15 之分析點位置。

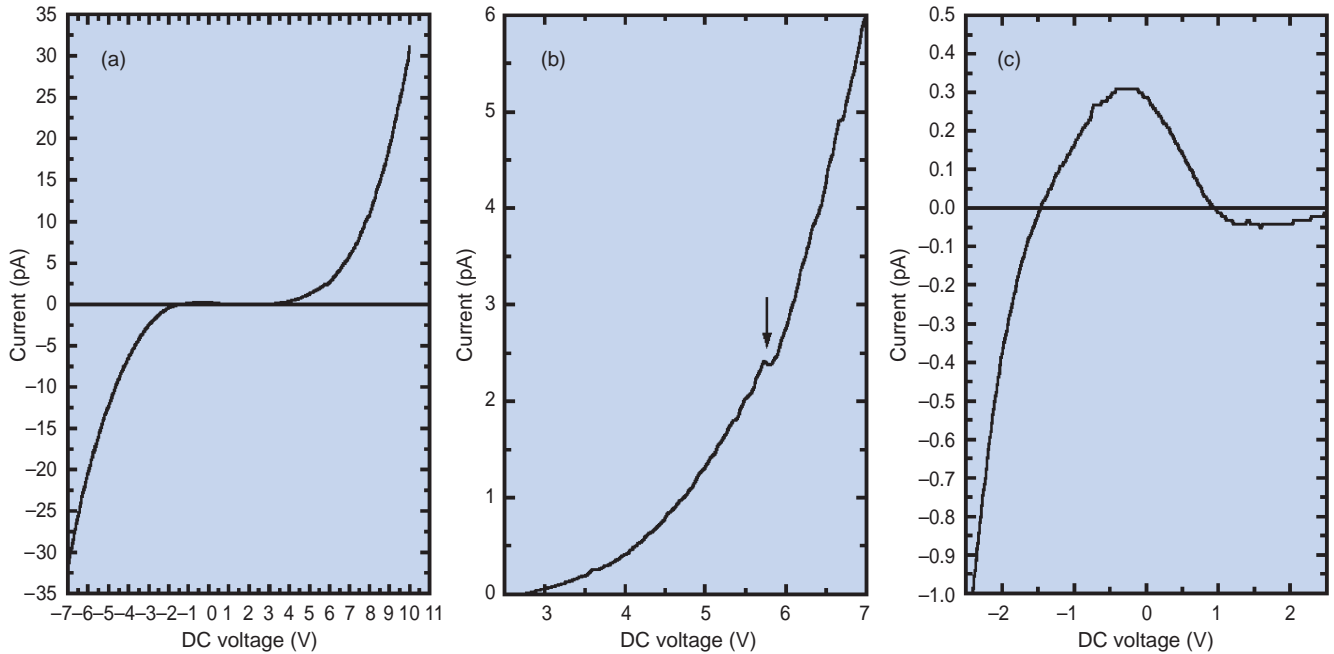


圖 15. (a) 圖 14 缺陷區的電流 - 電壓曲線圖；(b) 負微分電阻現象；(c) 低電場漏電流現象。

二為低電場的漏電流現象，如圖 15(c) 所示，界面處的電洞與電子捕獲缺陷與此現象有關，而且電子捕獲缺陷的影響大於電洞捕獲缺陷。上述研究結果已在今年固態元件與材料的國際會議 (2002 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM 2002)，地點：名古屋) 上發表。

四、結語

本文簡要的介紹了電性掃描探針顯微鏡技術的基本原理、系統架構、試片製備及相關應用。對微小電容變化極為敏感的掃描電容顯微鏡已普遍應用於各種表面電性分析工作，包括矽基元件結構的載子分布、超微量鐵污染引致缺陷分析、低能離子佈植與摻雜元素活化行為以及三五族氮化物材料等領域，增加定位功能後的掃描電容顯微鏡將成為下一代半導體材料表面分析的一大利器。具備高定位性與高靈敏度的掃描電流顯微鏡雖問世不久，但現在已成功地用於漏電流量測的工作與漏電流機制的研究上，頗受學界與業界的青睞，隨著各種超薄介電層研發腳步的前進，掃描電流顯微鏡的重要性也必將與日俱增。

因應奈米科技的蓬勃發展與相關分析需求的增加，電性掃描探針顯微鏡技術已展現出極佳的量測分析潛力，其研究與改良亦日益受到重視，本文中關於此一技術的研究應用只是一個開端，相信在相關研究人員的不斷努力下，未來將會有更多的應用報告與研究成果陸續發表。

誌謝

對於淺接面量測應用的研究工作能夠順利進行，要感謝國立清華大學工科所梁正宏教授與其碩士班研究生鄧德華先生 (現任職於統寶光電股份有限公司) 在研究工作上的通力合作。此外，在化合物半導體的相關研究工作上，則要特別感謝國立中央大學電機所綦振瀛教授與其博士班研究生卓昌正先生 (現任職於工研院光電所) 提供品質穩定且良好的氮化鎵磊晶片與在實驗工作上的大力協助。

參考文獻

1. J. R. Matey and J. Blanc, *J. Appl. Phys.*, **57**, 1437 (1985).
2. C. D. Bugg and P. J. King, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **21**, 147 (1988).

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. 張茂男, 陳志遠, 張子云, 潘扶民, 毫微米通訊, **8** (3), 12 (2001).
8. 張茂男, 陳志遠, 潘扶民, 科儀新知, **22** (5), 67 (2001).
9. M. N. Chang, C. Y. Chen, F. M. Pan, T. Y. Chang, and T. F. Lei, *Electrochemical and Solid-State Letters*, **5**, G69 (2002).
10. V. Raineri and S. Lombardo, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B**, **18**, 545 (2000).
11. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, S. D. Stiring, C. C. Williams, and H. Smith, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B**, **18**, 549 (2000).
12. R. C. Barrett and C. F. Quate, *J. Appl. Phys.*, **70**, 2725 (1991).
13. 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).
14. C. K. Kim, I. T. Yoon, Y. Kuk, and H. Lim, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 613 (2001).
15. A. A. Istratov, H. Hieslmair, and E. R. Weber, *Appl. Phys.*, **A**, **69**, 13 (1999).
16. *Digital Instrument Inc. Support Note No. 224 Rev. D*, 224-5 (1999).
17. Filippo Giannazzo and Francesco Priolo, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2565 (2000).
18. Filippo Giannazzo, Francesco Priolo, Vito Raineri, and Vittorio Privitera, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 598 (2001).
19. S. J. O'Shea, R. M. Atta, M. P. Murrell, and M. E. Welland, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B**, **13**, 1945 (1995).
20. M. Muraoka and W. Arnold, *JSME International Journal*, **A**, **44**, 396 (2001).
21. A. Olbrich, B. Ebersberger, and C. Boit, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3114 (1998).
22. M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich, and B. Ebersberger, *Proc. IRPS.*, 156 (2001).
23. H. J. Wen and R. Ludeke, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B**, **15**, 1080 (1997).
24. M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich, and B. Ebersberger, *J. Appl. Phys.*, **91**, 2071 (2002).
25. H. Watanabe, T. Baba, and M. Ichikawa, *J. Appl. Phys.*, **85**, 6704 (1999).

張茂男先生為國立中央大學電機研究所博士，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研究所碩士，現任國家奈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，現任國家奈米元件實驗室研究員兼副主任。

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

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

Fu-Ming Pan received his Ph.D. in physical chemistry from the University of California, Irvine, USA. He is currently the vice president in National Nano Device Laboratories.