

電性掃描探針顯微鏡

*陳志遠 **張茂男 ***潘扶民

國家實驗研究院國家奈米元件實驗室

材料分析/高頻技術組 *助理研究員 **副研究員

***國際合作執行長兼材料分析/高頻技術組 組長

摘要

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）為分析微小區域電性特性的重要工具之一，藉由導電探針直接於試片上進行掃描，可以獲得奈米區域的載子濃度分布、界面缺陷、鐵電材料極化現象、漏電流行為等相關訊息。本文介紹電性掃描探針顯微鏡的基本架構、原理，以及國家奈米元件實驗室目前的研究成果。

關鍵詞

電性掃描探針顯微鏡(Electric Scanning Probe Microscope)；掃描電容顯微鏡(Scanning Capacitance Microscope, SCM)；掃描電流顯微鏡(Conductive Atomic Force Microscope, C-AFM)；二維載子濃度分布(2-D Carrier Concentration Distribution)；漏電流(Leakage Current)

前言

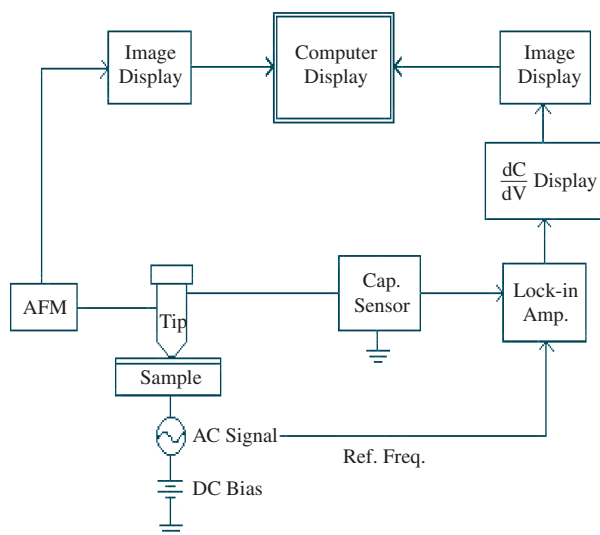
掃描探針顯微鏡(Scanning Probe Microscope, SPM)分析技術可說是近年來發展極為快速的一項表面分析技術，自從1982年G. Binnig和H. Rohrer發明掃描穿隧顯微鏡(Scanning Tunneling Microscope, STM)，二十年來，掃描探針分析技術已成功地應用在表

面形貌、光學、電學、聲波、近場熱力及電化學等各個領域。其中，電性掃描探針顯微鏡在半導體上的應用更隨著元件尺寸縮小而更顯其重要性。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、掃描展阻顯微鏡 (Scanning Spreading Resistance Microscope, SSRM)與掃描電流顯微鏡 (Conductive Atomic Force Microscope, 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。本文將針對掃描電容顯微鏡及掃描電流顯微鏡的基本架構、原理及相關應用與研究做一基本的介紹。

掃描電容顯微鏡

1985年美國普林斯頓RCA實驗室



▲圖一 SCM的量測架構示意圖

的J. R. Matey與J. Blanc首度建立了掃描電容顯微鏡的雛形，並將之應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廣泛的注意。掃描電容顯微鏡的研究方向，目前仍以矽基材的二維載子濃度分析為主，搭配二次離子質譜分析技術(Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS)，可以得到半定量的二維載子濃度分布。除此之外，掃描電容顯微鏡在III-V族化合物材料、鐵電性材料的極化特性、閘極氧化層的失效分析上，也已有顯著的研究成果發表。

一、基本量測架構與原理

圖一為掃描電容顯微鏡的量測架構示意圖，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，一般掃描探針顯微鏡皆採用光束偏折法(Optical Deflection Measurement Method)偵測樣品表面微觀形貌的變化。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，經由量測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。

掃描電容顯微鏡的量測原理可說是傳統電容－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。如圖二，當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尖端所加的偏壓，就相當於MOS元件的閘極電壓，所偵測到的訊號為探針和樣品表面間的電容訊號變化量(ΔC)與引起該變化的電壓(ΔV)比值，也就是電容－電壓曲線的斜率(dC/dV)。而這個斜率變化則可能代表著(1)載子濃度，(2)介電層本身性質，(3)介電層厚度，(4)極化的差異。除此之外，掃描探針顯微鏡的系統參數、環境因素及金屬探針所使用的鍍膜材料，也會影響其微分電容訊號，探針的鍍膜材料即類似MOS的閘極材料，材料功函數的差異

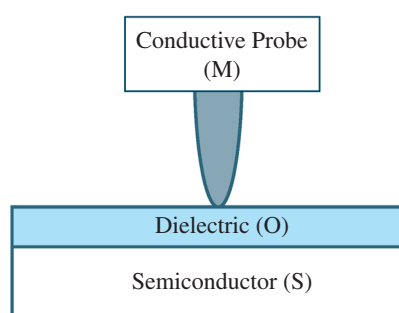
將造成電容－電壓曲線的偏移。這都是在分析時需要考慮的重要因素。

二、應用實例

以下將介紹四種掃描電容顯微鏡的相關應用：(1)二維載子濃度分布量測。(2)超微量鐵污染引致缺陷分析。(3)III-V族氮化物材料之分析應用。(4)鐵電性材料極化特性分析。

(1)二維載子濃度分布量測

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，時至今日，金氧半場效電晶體(MOSFET)的自由載子二維濃度分布，仍是掃描電容顯微鏡最為人熟知的一項用途。圖三為兩個不同通道長度的MOSFET元件結構，可以很清楚的分辨出紫色所代表的N型區域及紅色所代表的P型區域（詳見目錄頁彩色圖片），並量測出實際有效的通道長度(Effective Channel Length)。有些研究報告中會搭配二次



▲圖二 導電探針端與矽晶片表面接觸所形成的微小MOS結構

離子質譜分析技術，得到半定量的二維載子濃度分布。以二次離子質譜分析技術和掃描電容顯微鏡搭配比較時，需要特別注意的一點是，二次離子質譜分析技術所得到的為元素分布，而掃描電容顯微鏡為電性上的自由載子濃度分布，因此在考慮PN界面時，二次離子質譜術定義的冶金界面 ($N_a=N_d$, Metallurgical Junction)和掃描電

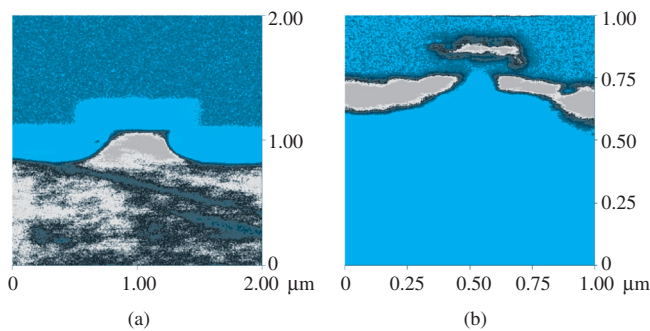
容顯微鏡所量測到的電性界面 ($dC/dV=0$, Electrical Junction)是有不同意義的；另外，探針鍍膜材料的不同，也會影響到量測時電性界面的位置。因此在做二維載子濃度量測分析時，PN相對濃度梯度、橫截面試片表面處理狀況及探針鍍膜材料等都是需要考慮的因素。

(2)超微量鐵污染引致缺陷分析

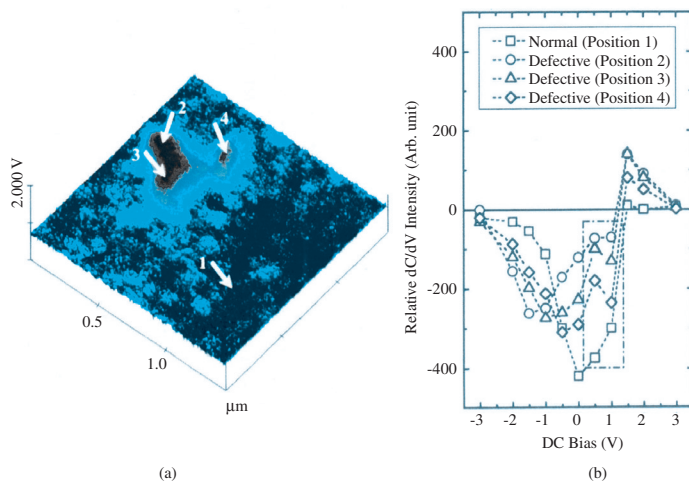
此一研究為超微量金屬污染引致缺陷分析計畫中的一環，其目的在利用掃描電容顯微鏡進行鐵污染引致矽晶圓缺陷分析。由於鐵污染造成後續氧化製程所形成的薄氧化層產生界面缺陷，MOS電容結構的電容－電壓曲線將因此類界面缺陷而產生扭曲變形，其影響大小與缺陷密度有關，因此比較缺陷集中區域與其他區域的微分電容影像對比，即可看出缺陷的分布狀態，再藉著一系列微分電容影像的分析，即可探究試片表面各區產生界面缺陷的嚴重程度。圖四為對不同缺陷區域分析後的結果，在三個缺陷位置上，除了發現界面陷阱(Interface Traps)的存在之外，少數載子的訊號也相當明顯。此一研究結果證明了掃描電容顯微鏡應用於微區污染分析的可行性。除此之外，掃描電容顯微鏡在失效分析上的研究也已經有相關的論文發表，此處即不再贅述。

(3)III-V族氮化物材料之分析應用

除了在矽基板材料的研究外，掃描電容顯微鏡在化合物半導體材料



▲圖三 兩個不同通道長度的MOS結構掃描微分電容訊號分析，長通道為PMOS，短通道為NMOS



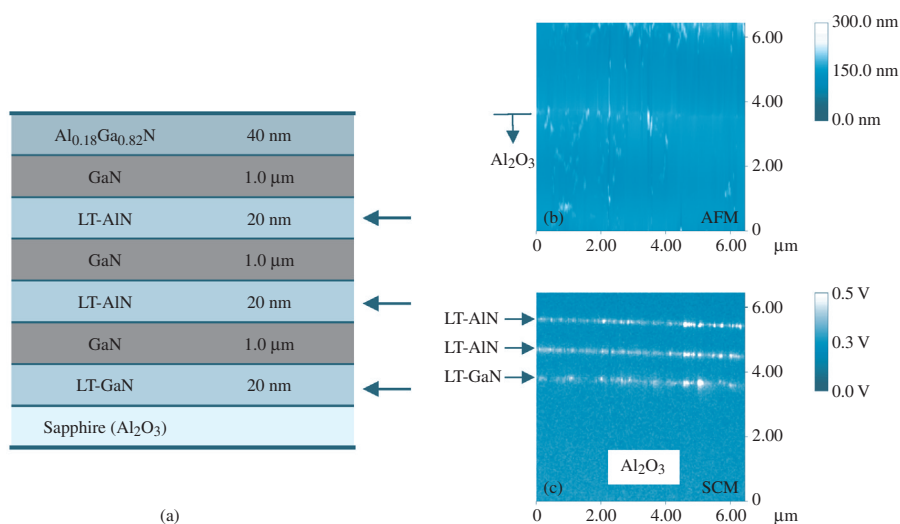
▲圖四 (a)標示2、3與4為缺陷區的不同位置，(b)將圖(a)中各區在不同直流偏壓下的微分電容訊號以圖示展現所得結果，可以看到界面缺陷的作用與少數載子的訊號

(Compound Semiconductors)上的應用也有相當多的研究報告。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，其與主要的氮化鎵晶格間仍有高達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。最常見的做法為採用緩衝層(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，緩衝層的電性狀態對某些元件而言是很重要的。圖五為一氮化物磊晶片緩衝層結構示意圖，以及試片表面形貌影像及其掃描微分

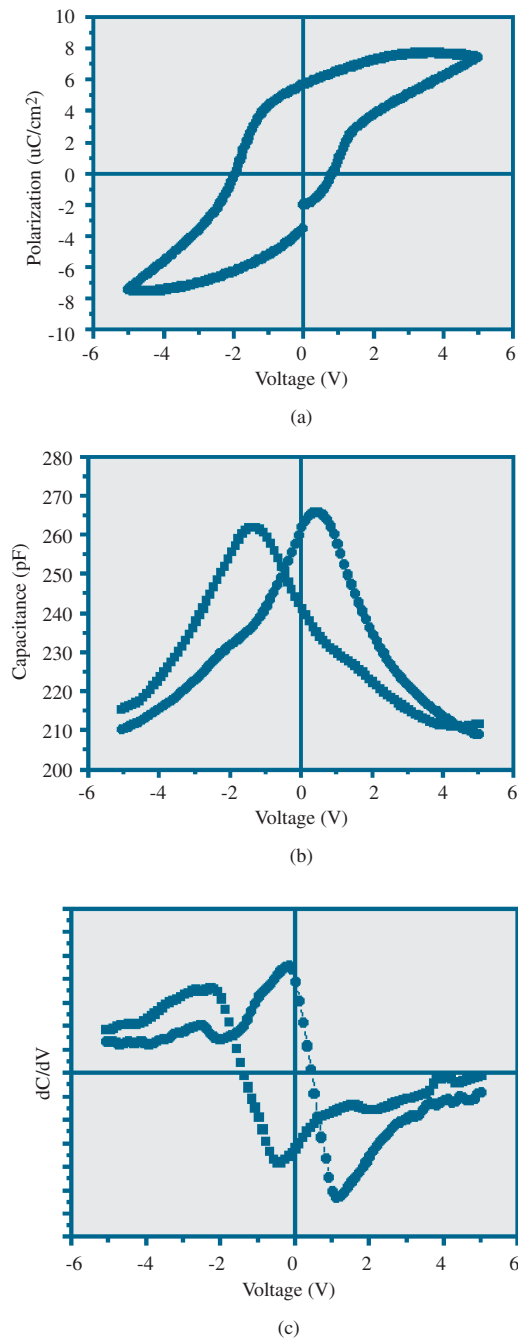
電容影像。在表面形貌影像中可以清楚看見氧化鋁基板與磊晶層的界面，在微分電容影像中則可以清楚看出低溫氮化物磊晶層相對應的所在位置，微分電容訊號的分析結果顯示各低溫磊晶層的電性狀態為N型，此一結果也與後續的化學特性分析所得結論相符。

(4)鐵電性材料極化特性分析

鐵電性材料的高介電常數及鐵滯現象，使其成為下一代動態記憶體及非揮發性記憶體元件的重要替代性材料之一，其鐵滯現象一直都是研究者有興趣的研究課題。掃描電容顯微鏡可以觀察到奈米尺寸的極化現象，對於研究鐵電材料的微區極化現象有



▲圖五 (a)為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。(b)為試片表面形貌影像，可清楚看見氧化鋁基板與磊晶層的界面，(c)為相對應的微分電容影像，圖中可看到各個磊晶層的分布位置，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



▲圖六 (a)為鐵電性薄膜鉍酸鋇鉍SBT巨觀下的極化－電壓曲線，(b)為極化－電壓曲線經微分得到的電容－電壓曲線，再一次微分則可得到微分電容－電壓曲線(c)

非常大的助益。圖六(a)為巨觀下的鐵電材料極化－電壓(P-V)曲線，對極化－電壓曲線微分即可得到圖六(b)之電容－電壓曲線，再對電容－電壓曲線微分即可得到圖六(c)之微分電容－電壓(dC/dV-V)曲線關係圖，因此我們知道在0伏特的操作偏壓時，鐵電域(Ferroelectric Domain)方向為正180度可以得到正的微分電容值，而負的微分電容值則表示負180度的鐵電域方向，利用這樣的差異，當我們在鐵電性材料上的大小不同區域分別施加正負10伏特直流偏壓，將使不同區域內之鐵電域方向呈現正負180度的差異，在0伏特的直流操作電壓及適當大小的交流偏壓下，可以發現在大區域跟小區域呈現了不同的微分電容影像。圖七為鉍酸鋇鉍($\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, SBT)鐵電性薄膜的表面形貌影像及對應的微分電容影像，中心白色區域與外圍黑色區域分別表示不同鐵電域方向的區域，除此之外，也可以發現不同晶粒大小有不同的極化現象。利用掃描電容顯微鏡將有機會分析同一晶粒內不同鐵電域的極化現象，對於研究鐵電性材料的極化現象是一個很有用的分析工具。

掃描電流顯微鏡

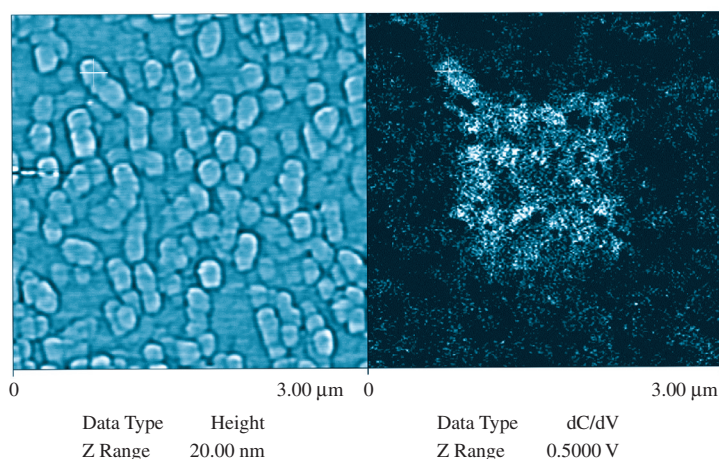
除了電容訊號的分析，微區電流訊號的偵測也是微區電性分析上極重要的一環，和掃描電容顯微鏡一樣，掃描電流顯微鏡也是架構在原子力掃

描顯微鏡系統上面，因此可以同步得到試片表面形貌及電流分布影像，這對微區電容訊號及電流訊號的分析是相當重要的。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的特性；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(I-V)量測技術，兩者除了可以提供二維電性影像資訊之外，還可以針對特定點進行電性曲線分析，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、原理與應用實例。

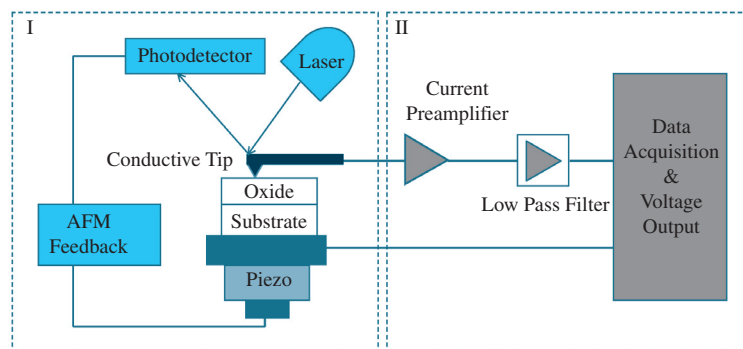
一、基本量測架構與原理

圖八為掃描電流

顯微鏡的架構示意圖，掃描電流顯微鏡主要由兩個系統所構成，區塊 I 為原子力掃描顯微鏡系統，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的回饋電路。區塊 II 則為電流訊號擷取量測系統，因為量測面積



▲圖七 試片表面形貌影像與其對應的掃描微分電容影像，在微分電容影像中明顯的顏色對比表示不同的極化現象

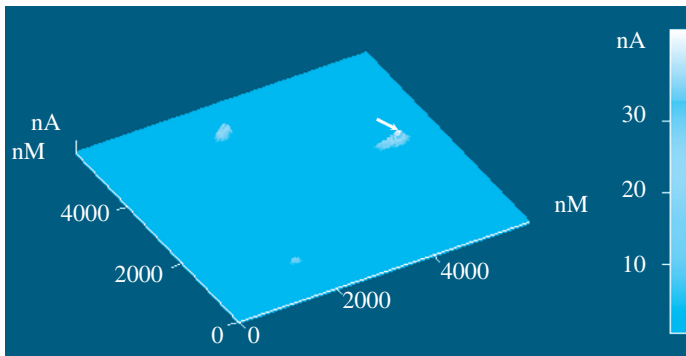


▲圖八 掃描電流顯微鏡架構示意圖，區塊I與II分別代表原子力顯微鏡系統與電流訊號擷取量測系統

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的干擾，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。

掃描電流顯微鏡利用奈米尺寸的導電探針和試片接觸形成一個MOS或MS結構，和掃描電容顯微鏡一樣，導電探針材質也會影響實際掃描的結果。目前採用的導電探針包括高濃度硼摻雜的鑽石探針、矽探針鍍以鉑鈦(Pt/Ir)合金、氮化鈦(TiN)膜、金膜及鈷鉻(Co/Cr)合金，由於不同材質的探針有不同的功函數，在分析上必須特別注意。



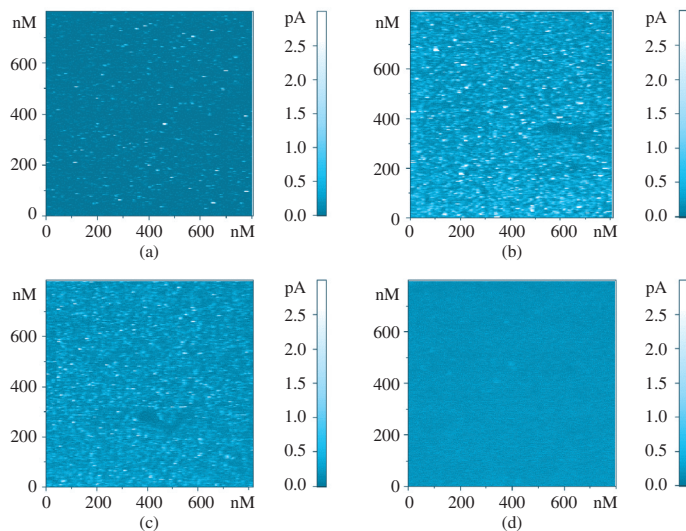
▲圖九 超薄氧化層缺陷區的漏電流影像，漏電流較大的區域為缺陷分布區

二、應用實例

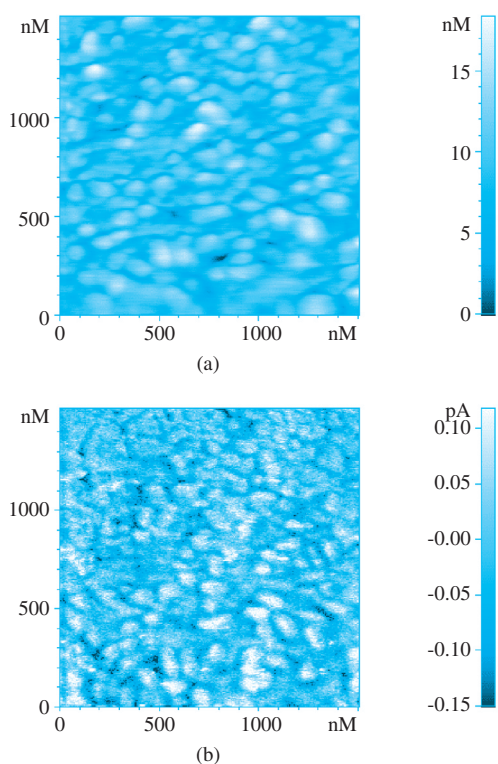
目前掃描電流顯微鏡的應用多在閘極介電層失效分析，除此之外，在III-V化合物半導體上也有一些特殊的應用，對於微區域的缺陷分析而言，是相當具潛力的分析工具。以下將介紹掃描電流顯微鏡在三種不同材料的應用實例。

(1)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，實驗結果如圖九所示（詳見目錄頁彩色圖片），圖中清楚顯示三個分布與強度都不同的漏電流區域，驗證了微量鐵污染造成的氧化層劣化行為。

(2)圖十為在氧氣氛圍下利用有機



▲圖十 二氧化鉛漏電流影像圖，圖(a)為As-deposited，圖(b)(c)(d)為經過 600°C 、 750°C 及 1000°C 30秒的退火處理。漏電流有隨退火溫度上升先變大再變小的趨勢



▲圖十一 鈮酸鋇鈦鐵電性薄膜表面形貌及其漏電流影像

金屬氣相沉積法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 沉積二氧化鈦 (HfO_2) 薄膜，在經過不同溫度退火後的漏電流影像圖，隨著退火溫度的升高，漏電流明顯變大，這是因為薄膜再結晶導致晶粒變大，漏電流因而增加。當退火溫度上升至1000度，漏電流反而變小，這是因為在二氧化鈦跟矽界面成長了一層二氧化矽薄膜，導致漏電流下降，此一趨勢和穿透式電子顯微鏡的分析結果相吻合。利用掃描電流顯微鏡可以得到奈米微區的電流影像圖，對於分析微區

電性有很大的幫助。

(3)圖十一為鈮酸鋇鈦鐵電性薄膜在操作偏壓3伏特時的表面影像及其對應的電流影像圖，圖中可以清楚發現漏電流較大的位置幾乎都和大顆晶粒的晶界相吻合，而在晶粒內部及小顆晶粒晶界上則有較小的漏電流，推測可能和電流經過的路徑有關，大顆晶粒晶界有較短的電流路徑，因此有較大的漏電流。

除了上述應用實例之外，掃描電流顯微鏡在化合物半導體及其他材料的應用上，也有大量的論文提出，證明了它在電性分析上的適應性及重要性。

結語

本文中介紹了掃描電容顯微鏡及掃描電流顯微鏡兩種電性掃描分析儀器，對微小電容變化極為敏感的掃描電容顯微鏡，已普遍應用在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、III-V族氮化物及鐵電性薄膜材料等領域，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，但現在已成功地用在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。

隨著元件尺寸不斷的微縮，微小區域的電性將影響整個元件的特性，

為了有效的改善元件特性及製程參數，分析範圍縮小到奈米尺寸將是必然的趨勢。電性掃描探針顯微鏡提供了奈米區域的微小電容及電流訊號，對於研究材料電性特性具有極大的潛力。目前，掃描電性探針顯微鏡技術已發展出極佳的量測分析潛力，其研究與改良已日益受到重視，在相關研究人員不斷努力下，未來將會有更多的應用報告與研究成果陸續發表。

致謝

在化合物半導體的相關研究工作上，要特別感謝中央大學電機所蔡振瀛教授提供品質穩定且良好的氮化鎵磊晶片，以及在實驗工作上的大力協助。此外，也要感謝國家奈米元件實驗室副研究員簡昭欣博士、助理研究員呂正傑及楊明瑞先生提供鐵電性材料(SBT)薄膜及高介電材料薄膜二氧化鈣(HfO_2)之掃描電容影像、掃描電流影像及相關材料特性資料。

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, 「掃描電容顯微鏡在微量鐵污染對薄氧化層影響之研究」, *毫微米通訊*, 8卷3期, p. 12-17 (2001)。
8. 張茂男, 陳志遠, 潘扶民, 「掃描電容顯微鏡分析技術及其在矽晶圓表面分析之應用」, *科儀新知*, 22卷5期, p. 67-75 (2001)。
9. 張茂男, 陳志遠, 潘扶民, 「電性掃描探針顯微鏡簡介」, *科儀新知*, 24卷3期, p. 27-39 (2002)。
10. M. N. Chang, C. Y. Chen, F. M. Pan, T. Y. Chang, and T. F. Lei, *Electrochemical and Solid-State Letters* 5, G69 (2002).
11. V. Raineri and S. Lombardo, *J. Vac. Sci. Technol.*, B, 18, 545 (2000).
12. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, S. D. Stiring, C. C. Williams, and H. Smith, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 18, 549 (2000).
13. R. C. Barrett and C. F. Quate, *J. Appl. Phys.* 70, 2725 (1991).
14. 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).
15. C. K. Kim, I. T. Yoon, Y. Kuk, and H. Lim, *Appl. Phys. Lett.* 78, 613 (2001).
16. A. A. Istratov, H. Hieslmair, and E. R. Weber, *Appl. Phys. A* 69, 13 (1999).
17. Digital Instrument Inc. Support Note No. 224 Rev. D, 224-5 (1999).
18. Filippo Giannazzo and Francesco Priolo, *Appl. Phys. Lett.*, 76, 2565 (2000).
19. Filippo Giannazzo, Francesco Priolo, Vito Raineri, and Vittorio Privitera, *Appl. Phys. Lett.*, 78, 598 (2001).
20. S. J. O' Shea, R. M. Atta, M. P. Murrell, and M. E. Welland, *J. Vac. Sci. Technol.*, B, 13, 1945 (1995).
21. M. Muraoka and W. Arnold, *JSME International Journal*, A44, 396 (2001).
22. A. Olbrich, B. Ebersberger, and C. Boit, *Appl. Phys. Lett.*, 73, 3114 (1998).
23. M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich, and B. Ebersberger, *Proc. IRPS.*, 156 (2001).
24. H. J. Wen and R. Ludeke, *J. Vac. Sci. Technol.*, B, 15, 1080 (1997).
25. M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich, and B. Ebersberger, *J. Appl. Phys.* 91, 2071 (2002).