

# 導電式原子力顯微鏡在 IC 製程及故障分析之應用

## Applications of Conductive Atomic Force Microscopy on IC Fabrication and Leaky Contact Analysis

莊榮祥、李仲、吳兆奇、黎聰德、姚東騰

Jung-Hsiang Chuang, Jon C. Lee, Chao-Chi Wu, Tsung-Te Li, Tung-Teng Yao

目前在工業界導電式原子力顯微鏡已經廣泛地被應用在薄膜和氧化層的電性量測上，本文章已經成功地將此技術應用在半導體上接觸點 (contact) 的檢視，可藉由電流成像 (current mapping) 和  $I/V$  量測的功能可以輕易辨識異常的接觸點，並且了解其電流路徑，可提供隨後故障分析的判斷。

Conductive atomic force microscopy (C-AFM) is a popular technique for the electrical characterization of dielectric film and gate oxide integrity. In this article, C-AFM has been successfully applied to fault identification in contact level and the discrimination of various contact types. Faulty contacts can be easily isolated by current mapping of C-AFM, in addition, it also can provide  $I/V$  curve for failure root cause judgment.

### 一、前言

1986 年 Binnig 等人發明了原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM)，利用微小探針在試片表面進行掃描。原子力顯微鏡具有高解析的能力，一般橫向解析度大約為 2 nm 或更小，而縱向解析度可達 0.1 nm。其優點為樣品不需要經過特別處理，且可在各種環境下操作。在材料的物理特性上 AFM 不僅是表面形貌分析儀器，還可以利用探針與試片表面的交互作用來量測試片表面的摩擦係數

與黏度係數。利用適當的探針與相關的感測系統，掃描式探針顯微鏡便可應用薄膜表面的電性量測。

在電性量測功能上，目前掃描式探針顯微鏡可區分為定性及定量兩種。定性量測有四種，分別為電場式顯微鏡 (electric field microscope, EFM)、表面電位式顯微鏡 (surface potential microscope, SP)、掃描式電容顯微鏡 (scanning capacitance microscope, SCM) 以及掃描式延伸電阻顯微鏡 (scanning spreading resistance microscope, SSRM)，而定定量量測則為導電式原子力顯微鏡 (conductive atomic

force microscope, C-AFM)。

掃描式探針顯微鏡 (AFM) 通常是應用在試片表面量測，直到 1993 年 Murell 才開始將它應用在氧化薄膜的檢視與量測<sup>(1)</sup>。1996 年，掃描的過程中除了表面影像以外同時也可取得對應矽氧化薄膜 (SiO<sub>2</sub>) 的穿隧電流的成像 (FN tunneling current mapping) 和崩潰電壓的分布成像<sup>(2)</sup>，由於 C-AFM 擁有奈米 (nm) 的空間解析度，使得近年來它已廣泛地被應用成為量測介電層的崩潰電壓的最佳工具<sup>(3-5)</sup>。

由於 C-AFM 的電流感測靈敏度極佳 (為 10–15 A)，常應用於電性極差或厚度為奈米尺度的絕緣性樣品，如半導體、DLC 薄膜、導電性高分子 (conductive polymer) 氧化物 (oxides) 及鐵電材料 (ferro-electric materials)。圖 1 為導電式原子力顯微鏡在矽氧化薄膜 (SiO<sub>2</sub>) 的檢測應用，從圖中可知隨著負偏壓的增加，出現的瑕疵亮點就越多，可藉由此方法來判斷薄膜的均勻性或介電層的崩潰電壓。

隨著半導體工業的快速發展，積體電路的尺寸也日益愈小，有關 IC 故障分析也愈見困難。雖然目前有許多故障分析和缺陷定位的儀器，例如 EMMI (emission microscope)、TIVA (thermal induce voltage alteration)、IR-OBIRCH (IR-optical beam induce resistance change)，但隨後的物性分析 (PFA) 常無法找到真正故障的根源 (導致 IC 故障的真正原因)，可能是因為缺陷無法在掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) / 穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscope, TEM) 被觀察到，或者只是電性上微漏電流難以利用定位的儀器定出真正故障位置。

近年來有關在接觸點 (contact) 層的檢測一般常用在電子束或離子束下的電壓對比 (voltage contrast, VC) 方式來辨識異常的接觸點<sup>(6)</sup>，VC 主要是利用接觸點表面所激發出的二次電子量來做對比辨識，所激發出的二次電子量是跟其試片表面結構 (和其位能) 有關，如果接觸點是接地則其激發的二次電子量便會大於接到閘極的接觸點 (此時接觸點是懸浮的)。這種 VC 技術可以用來辨識接觸點是否呈開路 (open) 或漏電流<sup>(7)</sup>，但是對於微漏或高阻值的接觸點較難以辨識出，並且無法提供更進一步的資料以助於釐清缺陷的形成原因。

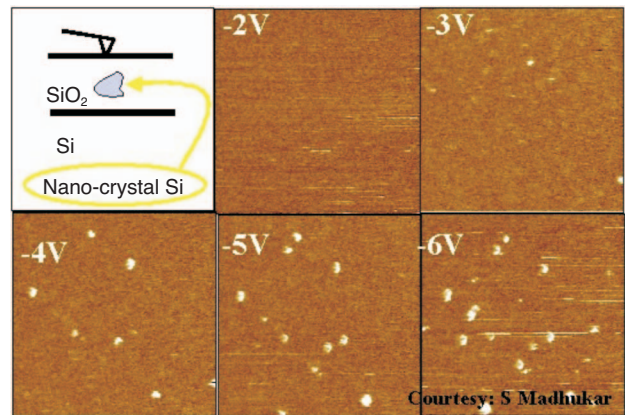


圖 1. 導電式原子力顯微鏡測得隨著負偏壓的增加，出現的瑕疵亮點就越多，某些瑕疵出現在小的負偏壓，而某些亮點的出現是隨著負偏壓的增加而增加的，其成因與瑕疵點的大小有關或瑕疵點與上表面的距離大小有關。(感謝 Digital Instruments 的應用工程師提供)

AFM 的壓電掃描裝置在空間解析可達奈米 (nm) 程度，所以 AFM 的探針可以輕易且精確地量測次微米以下的結構，並且可提供高解析度的電流成像 (current mapping) 和直接地量測任何位置，而這些資料將有助於產品故障分析的判斷。本篇文章將詳盡地描述如何應用 C-AFM 在接觸點的檢視，以及利用上述的電流成像和  $I/V$  量測來幫助產品的故障分析。

## 二、實驗步驟

### 1. AFM 的原理

原子力顯微鏡主要是由懸臂 (cantilever) 與其末端上之探針 (tip)，光感測器，壓電掃描偵測裝置，回饋控制系統以及電腦影像編輯所組成。原子力顯微鏡基本原理是根據 Lennard-Jones pair-potential energy function 所描述原子之間的位能與原子之間距離的關係，依據探針與樣品之間淨作用力可分為三種作用模式：非接觸式 (non-contact mode)、接觸式 (contact mode) 和輕敲式 (tapping mode)。

AFM 主要是利用探針的針尖在試片表面來回掃描時，探針與試片表面之間作用力 (即凡得瓦力相吸或相斥的作用力) 使得探針懸臂產生彎曲偏

移，將一微小之雷射光束聚焦於懸臂尖端，懸臂上鍍有高反射率金屬薄膜，雷射光反射至位移敏感的感光二極體 (position sensitive photo-diode, PSPD)。偵測懸臂的偏移，再透過軟體運算並分析而轉換成試片表面的形貌。

本實驗是使用 DI-3100 (Digital Instruments) 的導電式原子力顯微鏡 (C-AFM)，此機種輸出電壓可達  $-12-12$  伏特；電流的偵測範圍為  $1\text{ pA}-1\text{ }\mu\text{A}$ 。當 AFM 探針在試片表面來回掃描時，試片和探針間可以施加適當的電壓，電流從探針穿越試片到試片載台 (stage)，再經過低雜訊的電流放大器，將其穿越電流轉換成影像。在探針的掃描過程中，可以同時取得試片表面的形貌 (topography) 和穿越電流的成像 (current mapping)，並且探針還可以精確地直接量測異常位置的穿越電流，如圖 2 所示。

## 2. 探針的選用

探針的材料一般是由矽或氮矽化合物所組成，其針尖半徑約在  $5-40\text{ nm}$  左右，懸臂長度約  $100$  至  $250\text{ }\mu\text{m}$ ，在導電式原子力顯微鏡 (C-AFM) 的使用上，探針必須鍍上一層導電性良好的金屬薄膜，例如 Pt/Ir、Co/Cr 或鑽石膜導電性探針 (conductive diamond coated tip, CDT)。

對於影像和  $I/V$  曲線的取得，實驗中探針的選擇和試片的準備處理是相當重要因素，由於一般的接觸點材料大部分是由鎢所組成，其硬度較高，所以探針最好選擇鑽石膜導電性探針 (CDT) 以避免探針的掃描過程中，導電層被磨耗掉，造成量測阻

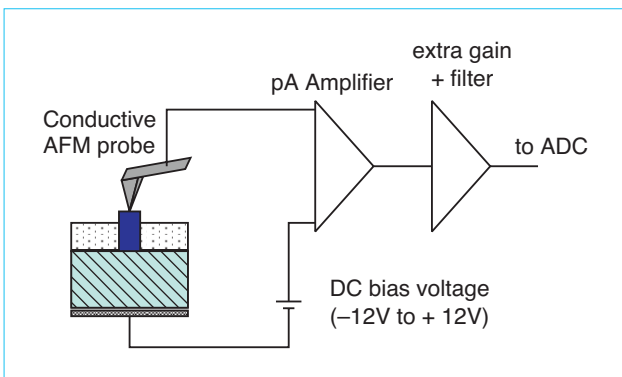


圖 2. 導電式原子力顯微鏡的結構示意圖及工作電流流向。

值增加。本實驗所使用 CDT 探針針尖半徑為  $100-200\text{ nm}$ ；阻值為  $0.003-0.005\text{ W}\cdot\text{cm}$ 。為了降低試片與試片載台間的阻值，需要將試片背面的氧化層研磨掉，並且以銀膠將試片固定在試片台上。

## 3. 試片的準備

本實驗所有試片都是使用  $0.13\text{ }\mu\text{m}$  CMOS 製程的 6T SRAM，每個位元是由 6 個電晶體和 10 個接觸點所組成 (其中包含 2 個共用的位元線 (bit-line) 接觸點，1 個  $V_{ss}$  接觸點和 1 個  $V_{dd}$  接觸點)。一般的記憶體產品都可經由測試機台來確認故障位元的位址，但測試結果卻無法將精確地將故障的位置縮小至 1 個電晶體或 1 個接觸點。這類的案子試片往往還需要研磨至接觸點層，然後再藉由 VC 或 C-AFM 的功能來辨識出異常的接觸點或閘極 (gate)。

## 三、實驗結果

### 範例 1：接觸點高阻值

有一批晶片經過測試後，在記憶體部分出現大量的雙位元和單一位元失效 (twin bits and single bit fail)，並且工廠的製程檢驗參數顯示接觸點的阻值有偏高的現象，根據上述的資料，此位元的故障可能與接觸點的製程相關，於是將試片表面直接研磨至接觸點層，然後進行 C-AFM 分析。

當探針在試片上掃描時，試片被施予  $-2\text{ V}$  的偏壓，試片表面的形貌影像和對應的電流成像同時被記錄取得。電流成像可依其穿越的電流大小，以深淺的顏色表示。圖 3 中其電流成像顯現 3 種不同

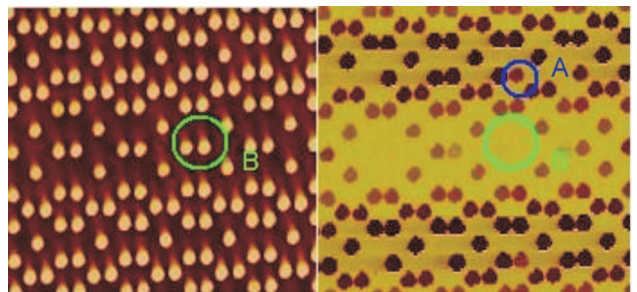


圖 3. 試片經由 C-AFM 掃描後所取得的形貌及其對應的電流成像。

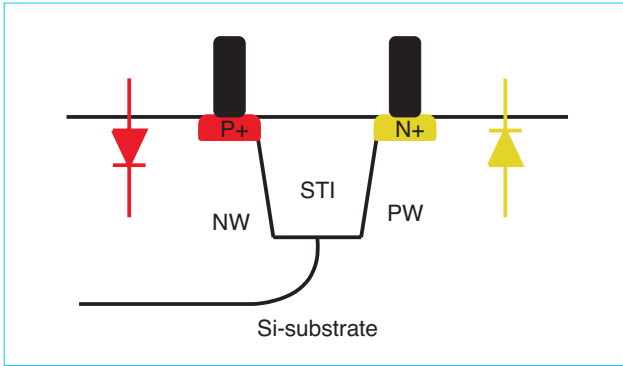


圖 4. 接觸點的橫截面結構及其等效電路。

種類的接觸點，顏色較深的接觸點為 P+/NW 接觸點；中間顏色為 poly 接觸點；顏色較淺的則為 N+/PW 接觸點。不同顏色代表不同的穿越電流 (由探針到試片)，顏色愈深表示其電流愈大；顏色愈淺則反之。圖 4 為的橫截面結構。P+ 接觸點的結構為 P+/NW/Si-substrate。矽基材 (Si-substrate) 可視為一個電阻，並不會影響 P+/NW 接觸點的二極體特性。因此，當試片被施予  $-2\text{ V}$  的偏壓時，P+/NW 接觸點處於順向的二極體，穿越的電流會較大，在電流成像上會呈現較深的顏色；反之，N+ 接觸點則處於逆向偏壓，穿越的電流是屬於崩潰電流，所以電流會較小，在電流成像上會呈現較淺的顏色。如果試片被施予正偏壓時，其電流成像影像則會相反。poly 接觸點的穿越電流則是閘極對氧化層的穿遂電流 (tunneling current)，電流的大小則依閘極的氧化層厚度和品質而定。

圖 3 電流成像顯示接觸點 A 比正常的 P+ 接觸點顏色淺，由此可知接觸點 A 對 Si 基材的穿越電流較低，阻值較高。經由探針直接量測接觸點 A 的  $I/V$  值，電壓從  $-3\text{ V}$  到  $3\text{ V}$ 。圖 5 為對應的  $I/V$  曲線顯示出接觸點 A 在電壓  $-2\text{ V}$  時，其電流比正常的 P+ 接觸點較低。另外，在 C-AFM 的形貌影像上接觸點 B 卻在電流成像中消失，其結果代表接觸點 B 沒有任何穿越電流，經由  $I/V$  量測後證明其接觸點對 Si 基材確實沒有任何流通電流。

隨後藉由穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscope, TEM) 的橫截面結構分析，發現在接觸點和接合面 (junction) 之間有層異常的介面，如圖 6 所示。而這層異常的介面會導致接觸點

和接合面間的阻值過較高 (類似接觸點 A)，嚴重時將導致接觸點開路 (open，類似接觸點 B)。經由化學成分分析儀器 (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) 的成分分析，發現異常的介面層中含有 F 的元素，此外來的異物可能是蝕刻製程後，清潔步驟所殘留的。

## 範例 2：接觸點漏電

這個例子是 SRAM 中的鄰近的位元同時發生故障，而故障的位址是經由測試機台的測試結果得知，依據 SRAM 的結構特性以及運作原理，位元間共用的接觸點 (或金屬間接點 (via)) 最有可能的故障位置。所以試片便直接的研磨至金屬間接點和接

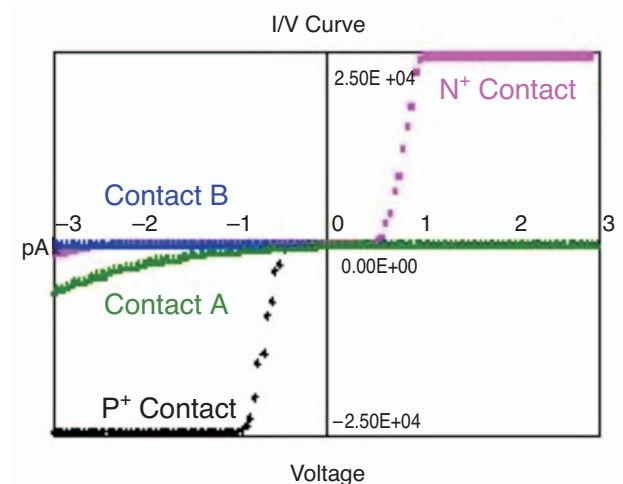


圖 5. 各種類型接觸點的  $I/V$  曲線。在  $-2\text{ V}$  偏壓時接觸點 A 的穿越電流比正常的 P+ 接觸點較低，接觸點 B 則沒有任何穿越電流。

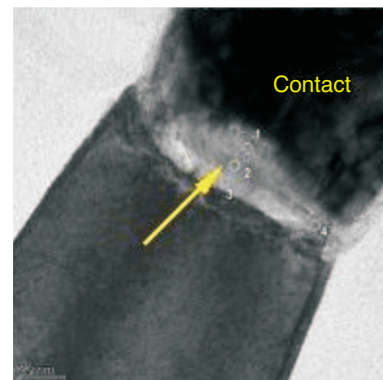


圖 6. 接觸點 B 的 TEM 橫截面影像。

觸點層，利用做 VC 的特性檢查共用的貫穿孔和接觸點，但是卻沒有發現任何異常的 VC 影像，並且經過掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 的橫切面結構觀察，也沒有發現任何的缺陷，所以試片便送往 C-AFM 作金屬間接觸點和接觸點的檢查。

由於故障的位置在 AFM 的光學系統下是難以辨識，所以試片在從事 AFM 掃描前，必須先使用聚焦式離子束 (focus ion beam, FIB) 或雷射光 (laser beam) 在試片表面做記號，以便在 AFM 的光學系統下得以確認需掃描的範圍。C-AFM 的操作參數與上述範例 1 完全相同。當探針開始掃描時，試片被施予 -2 V 的偏壓，試片表面的形貌和穿越電流成像可以同時被取得，從圖 7 的電流成像中可以清楚地辨識出其共用的接觸點中有一個顯得較深色，其意寓接觸點對 Si 基材的穿越電流較大。換言之，此接觸點和接合面的介面可能有漏電之虞，為驗證上述的推論和了解其漏電的路徑，針對異常接觸點的 I/V 量測是有其必要。圖 8 為位元間共用接觸點的 I/V 量測，圖中異常的接觸點呈現直線狀，與正常的二極體曲線截然不同。根據電流成像和 I/V 曲線的量測結果，故障接觸點的漏電程度應該是非常嚴重。

針對故障的接觸點從事 TEM 橫截面的結構分析。圖 9 的 TEM 影像顯示出在接觸點底部的矽化物 (cobalt silicide,  $\text{CoSi}_2$ ) 下方有晶格疊差 (crystal defect)，其深度應該已經穿越 N+ 接合面的深度造成嚴重漏電，破壞二極體特性 (N+/PW/Si-substrate)，使得 I/V 曲線呈現線性。由於位元的接

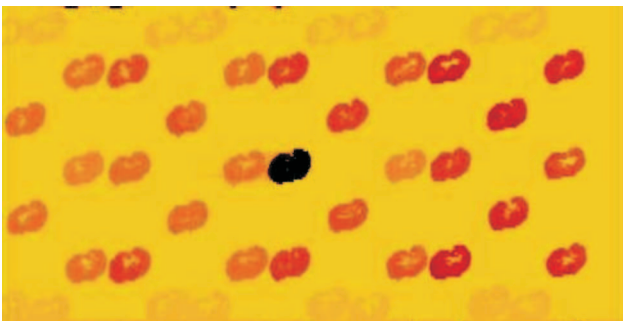


圖 7. 試片經由 C-AFM 掃描後在故障位元附近所得電流成像。

觸點嚴重的漏電，使得位元線無法維持正常電壓，在測試時故障的位元總是保持在「0」造成共用此接觸點的兩個位元失效。

### 範例 3：閘極與接觸點短路

這個範例最能顯示出 C-AFM 在接觸點層檢測的獨特性及其發展性，以及如何藉由 I/V 的量測結果，更進一步了解異常接觸點與鄰近的接觸點之間的相互關係，增進隨後物性的故障分析 (PFA) 的成功率。

這是個記憶體中單一位元失效的例子，經由測試機台的測試結果得知，其失效位元的位址。在

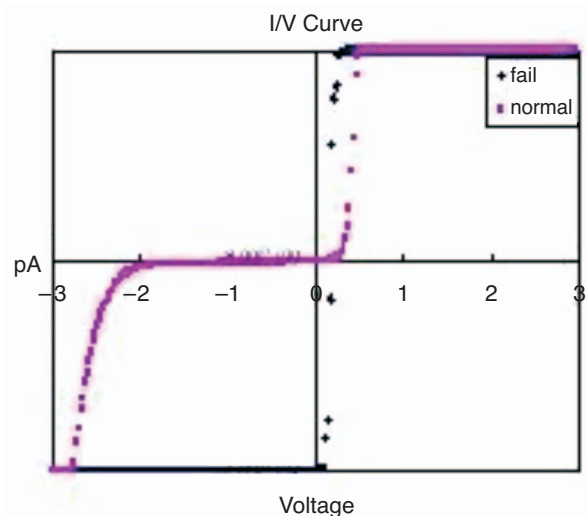


圖 8. 位元間共用接觸點的 I/V 曲線，故障接觸點的 I/V 曲線呈現線性狀 (藍色)，相同類型的正常接觸點則呈現二極體特性 (粉紅色)。

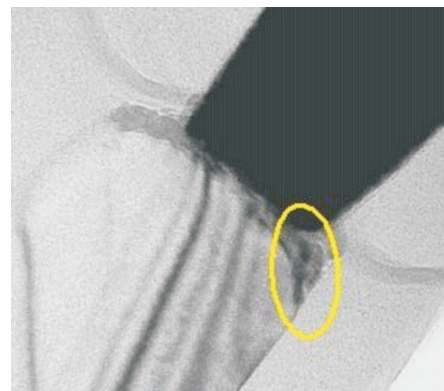


圖 9. 故障接觸點的 TEM 橫截面影像。

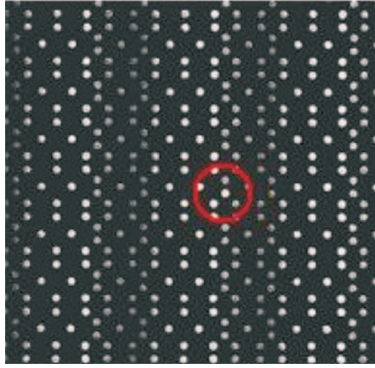


圖 10. 異常的接觸點的掃描式電子顯微鏡 (SEM) VC 影像。



圖 11. 試片偏壓 1 V 時，經由 C-AFM 掃描後在故障位元附近所取得電流成像。

SEM 的 VC 觀察時，發現閘極的接觸點呈明亮狀 (好的接觸點應呈現灰色)，如圖 10 所示，由此判斷此閘極有漏電之虞。由於這個閘極在 SRAM 結構中是屬於雙閘極 (dual gate)，橫跨 PMOS 和 NMOS，由於 SEM 的 VC 的影像無法提供漏電的形態或路徑 (哪個電晶體 (MOS) 在漏電)。

圖 11 為試片在 C-AFM 中偏壓 1 V 時的電流成像，其影像顯示出閘極的接觸點與 N+ 接觸點有相同的顏色，即使是調整其穿越電流的呈像色階，兩個接觸點也一樣呈現相同的顏色。此結果意謂兩個接觸點在偏壓 1 V 時，有著相同的穿越電流。進一步藉由接觸點的 I/V 量測，了解該接觸點的漏電路徑，從接觸點的 I/V 曲線，發現閘極的接觸點與 N+ 接觸點會呈現相同的 I/V 曲線，如圖 12 所示。在正偏壓時閘極的穿越電流呈現 N+/PW 的順向電

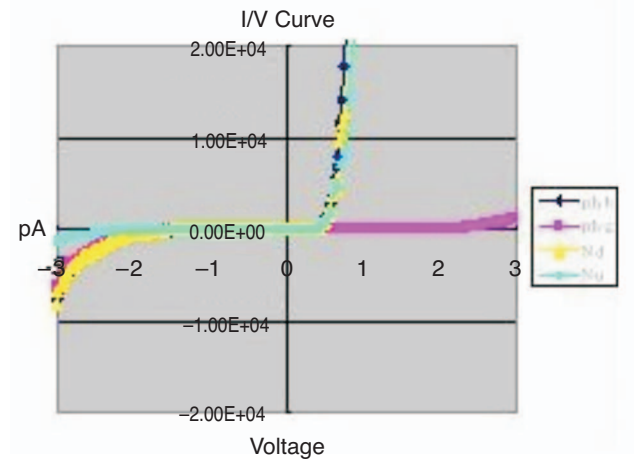


圖 12. 位元間共用接觸點的 I/V 曲線，異常的閘極接觸點 I/V 曲線 (藍色) 與鄰近的 N+ 接觸點相同 (黃色)，其他為對應的正常接觸點曲線，N+ 接觸點為淡藍色，閘極接觸點為淡藍色粉紅色。



圖 13. 異常的接觸點與閘極的 TEM 橫截面影像。

流，和 N+ 接觸點一樣；在負偏壓時 N+ 接觸點的穿越電流應該呈現 N+/PW 的逆向電流，但此 N+ 接觸點卻和閘極的穿遂氧化層的電流一樣。這也意謂兩個接觸點可能短路 (short)。由於這兩個接觸點距離較遠不容易產生直接短路，除非有大的異物，否則最有可能形成短路的位置應該在閘極與 N+ 接觸點間。

針對故障的 N+ 接觸點與垂直閘極的方向作 TEM 的橫截面結構分析，圖 13 的 TEM 影像顯示出接觸點和閘極之間有多晶矽 (poly) 殘留，造成接觸點和閘極短路。

## 四、結論

近年來，導電式原子力顯微鏡 (C-AFM) 已經被廣泛的應用在閘極的氧化層和金屬間的介電層品質檢驗，在本文中已經詳盡的描述在奈米世代半導體中異常接觸點定位的能力，在金屬間接點或金屬層同樣也有此定位功能 (本文未記載)。C-AFM 除了穿越電流成像對接觸點阻值的敏感度較優於掃描式電子顯微鏡 (SEM) 的 VC 影像外，又能提供  $I/V$  量測，我們可以藉由接觸點的  $I/V$  量測。進而了解接觸點的漏電路徑以及接觸點之間的關係，這些資料有助後續的物性故障分析 (PFA)。另外 C-AFM 可以重覆地在試片表面來回掃描，但在 SEM 試片表面的介電層容易因 SEM 的電子造成充電 (charge)，當電子束一再地掃描試片表面，則會影響 VC 的偵測敏感度及其結果。

根據上述的實驗結果，C-AFM 可以有效地定位出高阻值或漏電接觸點。當 VC 無法發現缺陷時，C-AFM 則是用來辨識微小缺陷的另外最佳選擇。未來將會廣泛地被應用在半導體的接觸點或金屬間接點層的檢測和故障分析。

## 參考文獻

1. M. P. Murell, M. E. Welland, S. J. O'Shea, T. M. H. Wong, J. R. Barnes, A. W. Mckinnon, M. Heyns, and S. Verhaverbeke, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 786 (1993).
2. T. G. Ruskell, R. K. Workman, D. Chen, D. Sarid, S. Dahl, and S. Gilbert, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 93 (1996).
3. S. A. Landau, N. Junghans, P.-A. Weiβ, B. O. Kolbesen, A. Olbrich, G. Schindler, W. Hartner, F. Hintermaier, C. Dehm, and C. Mazure, *Appl. Surf. Sci.*, **157**, 387 (2000).
4. M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich, and B. Ebersberger, *J. Appl. Phys.*, **91**, 2071 (2002).
5. S. Kremmer, S. Peißl, C. Teichert, and F. Kuchar, *Proceedings of the international Symposium for Testing and Failure Analysis*, 473 (2002).
6. J. C. Lee and J. H. Chuang, "Investigation of sensitivity

improvement on passive voltage contrast for defect isolation", in *Proc. ESREF* (2002).

7. *Microelectronic Failure Analysis: Desk Reference*, 3rd ed., ASM International, 153 (1993).

- 
- 莊榮祥先生為國立台灣大學材料所碩士，現任台灣積體電路公司副理。
  - 李仲先生為國立交通大學光電所碩士，現任台灣積體電路公司部經理。
  - 吳兆奇先生為國立清華大學光電所碩士，現任台灣積體電路公司資深工程師。
  - 黎聰德先生為國立交通大學材料所碩士，現任台灣積體電路公司資深工程師。
  - 姚東騰先生為國立中山大學電機系學士，現任台灣積體電路公司資深工程師。
  - Jung-Hsiang Chuang received his M.S. in materials science engineering from National Taiwan University. He is currently a section manager at Taiwan Semiconductor Manufacturing Company.
  - Jon C. Lee received his M.S. degree in electrooptics engineering from National Chiao-Tung University. He is currently a department manager at Taiwan Semiconductor Manufacturing Company.
  - Chao-Chi Wu received his M.S. materials engineering from National Tsing-Hua University. He is currently a senior engineer at Taiwan Semiconductor Manufacturing Company.
  - Tsung-Te Li received his M.S. degree in materials engineering from National Chiao-Tung University. He is currently a senior engineer at Taiwan Semiconductor Manufacturing Company.
  - Tung-Teng Yao received his B.S. in electrical engineering from National Sun Yat-Sen University. He is currently a senior engineer at Taiwan Semiconductor Manufacturing Company.