

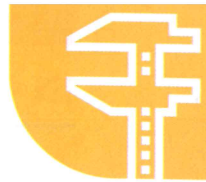
# 高階晶片異常點無所遁形 C-AFM一針見內鬼

從電性量測中發現晶片故障亮點，逐層觀察到底層仍抓不到異常？即使在電子顯微鏡（SEM）影像中偵測到異常電壓對比（VC）時，也無法得知異常點是發生在P接面還是N接面？本文為電性異常四大模式（開路、短路、漏電和高阻值）快速判讀大解析。

文／許雅婷

**在**人工智慧（AI）、高效能運算（HPC）和行動通訊的快速發展下，為了滿足對晶片高效能、低功耗和更小尺寸的需求，製程技術正飛速演進，並逼近物理極限。隨著晶片以3D封裝技術不





## 延伸閱讀

斷堆疊層數，故障分析的複雜度也與日俱增。

面對高度微縮的晶片，有時必須靈活運用多種故障分析機台，方能找出失效點。舉例而言，當晶片出現故障，以電性故障分析（Electrical Failure Analysis；EFA）發現明顯的亮點，但後續利用電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope；SEM）一路觀察到底層，卻仍看不到異常，這種情況常讓研發工程師們陷入窘境。

這正是導電式原子力顯微鏡（Conductive Atomic Force Microscopy；C-AFM）發揮作用的時候。擁有20年歷史的C-AFM量測技術，因為它有描繪出樣品表面形貌（Topography）及量測電流的特性，所以不論是在後段金屬繞線端製程（Back-end）的通孔（via）層次，或是前段電晶體端製程（Front-end）的接觸點層次，都可透過C-AFM於一支導電探針擷取電流，大範圍的掃描搜索區域快速找到異常點。本文將帶您一同深入了解C-AFM的機台操作原理和數據判讀方式，探究其強大而厲害的功能。

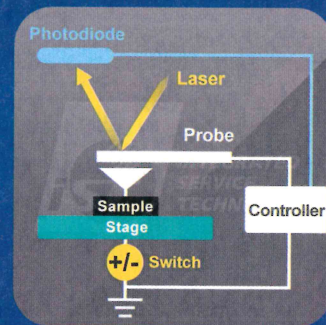
### 速讀C-AFM的原理與應用

說到C-AFM，就必須先提起它的前身—掃描穿隧顯微鏡（Scanning Tunneling Microscope；STM），STM是由兩位瑞士蘇黎世IBM實驗室的科學家Gerd Binnig和Heinrich Rohrer所發明，他們在探針與樣品間的微小空隙，利用量子穿隧效應產生的微小電流去探測物質表面的形貌，此項重大發明榮獲1986年的諾貝爾物理學獎。

同年Gerd Binnig、Calvin Quate和Christoph Gerber改用探針的原子與樣品表面原子之間的凡得

### 速讀導電式原子力顯微鏡（C-AFM）

C-AFM與AFM原理類似，皆是利用探針針尖與樣品表面原子之間的作用力，呈現樣品表面形貌。但不同之處在於，C-AFM在掃描樣品時，能同步施加偏壓（Bias），再由探針擷取電流得到電流圖（Current map），經過判讀即可發現樣品異常點。



瓦力（Van der Waals' force），使懸臂樑產生微細位移，來描繪出樣品的表面樣貌，為原子力顯微鏡（Atomic Force Microscope；AFM）。而C-AFM即為其中的一項應用延伸。

### C-AFM的妙用和應用時機

大部分的情形下，SEM是找尋亮點位置首要的絕佳利器。我們可利用SEM層層觀察試片的金屬線和閘極架構是否異常，也可以在通孔/接觸點（Via/Contact）層次搭配SEM內建的VC（Voltage Contrast，即電壓對比）效果來判斷晶片是否開路（Open）或漏電（Leakage）。但SEM缺乏定量的電性量測電流功能，所以即使偵測到異常VC亮起時，也無法精確得知異常點是往P接面（P-junction）還是N接面（N-junction）故障。



▲ 圖一：最左邊的黑白圖為 (a) SEM顯示圖；右邊兩張圖為 (b) C-AFM電流圖，可從亮黑或亮白點中，判讀出樣品電性狀態。(source：宜特科技)

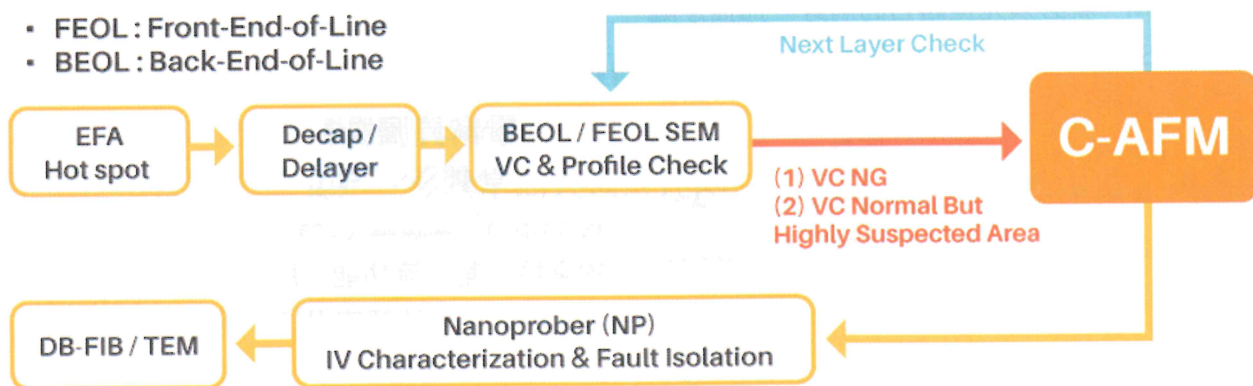
從宜特電性故障分析實驗室的經驗發現，因為NMOS本身架構的關係，閘極 (gate) 對N接面的漏電往往更難從SEM的VC中發現到異常，如圖一 (a) SEM圖。然而C-AFM利用樣品載台從試片晶背施加偏壓，由導電探針接收電流，並大範圍掃描，即可檢測此範圍有無異常，並可快速得知異常位置的電性是往P接面、N接面，還是從基極 (Bulk) 漏電或開路故障，猶如檢測新冠病毒的快篩試劑。

若要更精準的PCR核酸檢驗，則可進一步使用奈

米探針電性量測 (Nano Prober)，對故障點精確定位後再進行材料分析，如雙束聚焦離子束 (Dual-Beam FIB；DB-FIB) 或是穿透式電子顯微鏡 (Transmission Electron Microscopy；TEM) 切片分析。這些電性的數據亦可幫助後續材料分析時進行比對和判讀，找出異常點的真因。

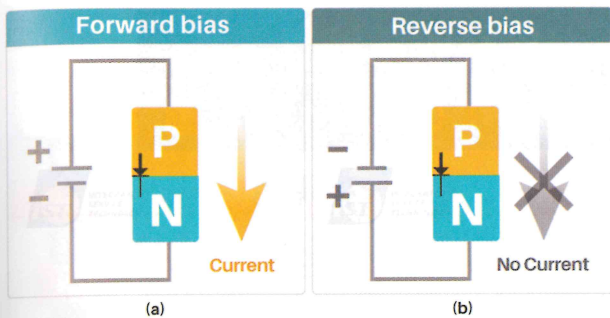
### 快速解讀C-AFM的數據

解讀C-AFM的數據並不難，只要瞭解PN二極體 (PN Diode) 的偏壓特性就可以了。當施加正電



▲ 圖二：C-AFM在故障分析流程中的最佳量測時機 (source：宜特科技)



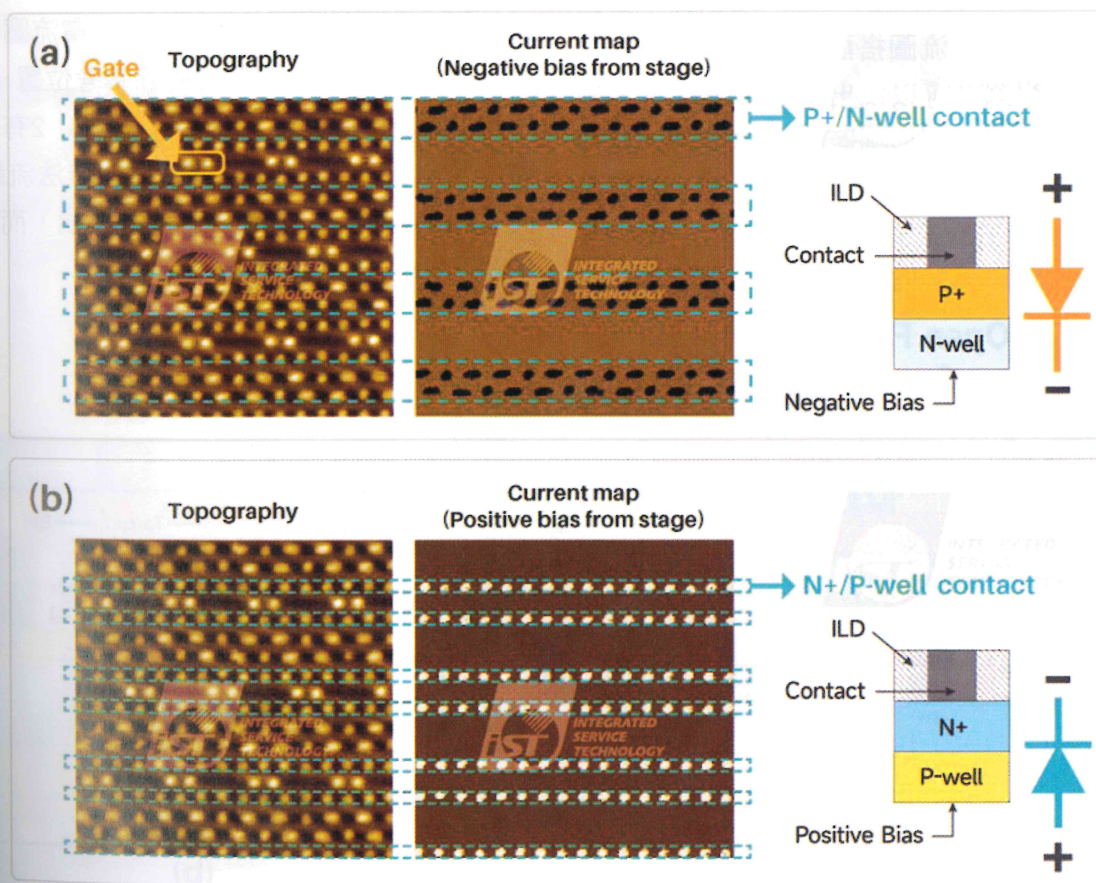


▲ 圖三：(a) 順向偏壓示意圖；(b) 逆向偏壓示意圖  
(source: 宜特科技)

壓在P區，施加負電壓於N區時，電流可以由P區流到N區，此電壓狀態定義為順向偏壓，如圖三(a)；反之，當施加負電壓於P區，施加正電壓

在N區，則為逆向偏壓，此情況下並無電流通過此PN接面，如圖三(b)。

根據機台操作定義，從試片晶背施加負偏壓，探針在掃描中能擷取到電流的位置，在電流圖呈現黑色訊號；反之，從試片晶背施加正偏壓，則在電流圖呈現白色訊號。從電流範例圖(圖四)看出，當給試片負偏壓時，P接面的接觸點亮起黑色(圖四(a))；而當給試片正偏壓時，N接面的接觸點則亮起白色(圖四(b))。宜特電性分析實驗室亦從豐富C-AFM實際判讀經驗中，整理出C-AFM數據判讀表(表一)。



▲ 圖四：(a) 從試片晶背施加負偏壓，P接面接觸點亮起(黑色)；(b) 從試片晶背施加正偏壓，N接面接觸點亮起(白色)。(source: 宜特科技)



由樣品載台給偏壓，探針收電流		
結構	偏壓條件	C-AFM 電流圖
P-junction	負偏壓	亮黑色
N-junction	正偏壓	亮白色
Bulk	正 & 負偏壓	黑白都亮
Gate	正 & 負偏壓	無訊號

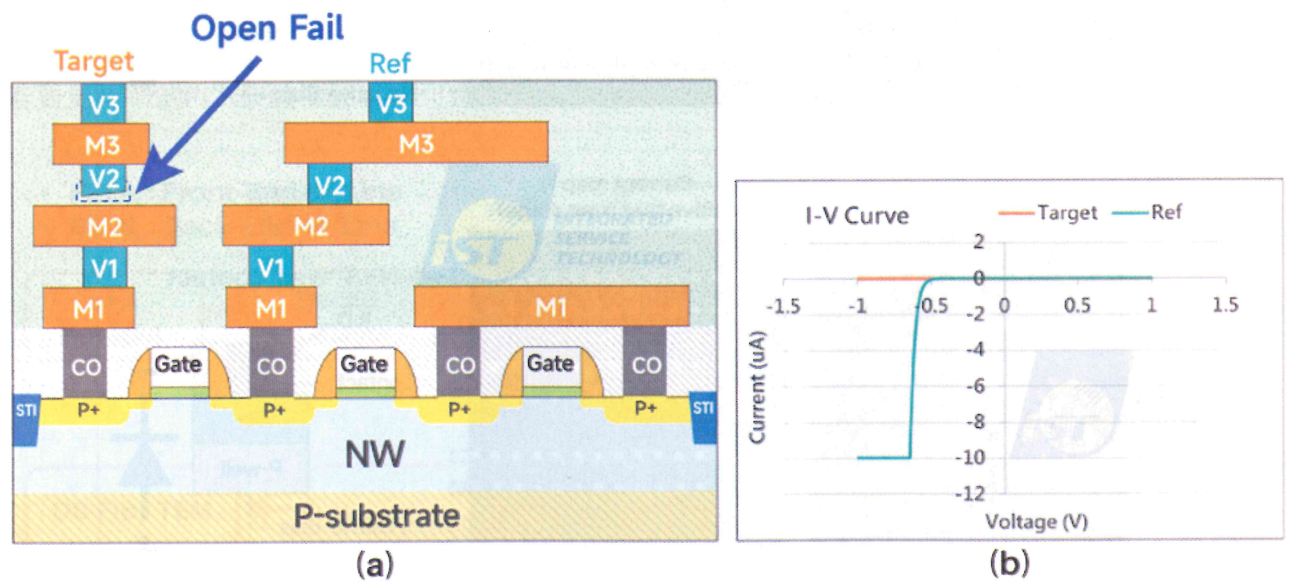
▲ 表一：藉由設定條件，可快速解讀C-AFM數據代表的意義。(source：宜特科技)

### C-AFM四大案例分享

從C-AFM異常的電流圖搭配IV曲線（電流對電壓之曲線）量測，可以找出開路（Open）、短路（Short）、漏電（Leakage），甚至是高阻值（High Resistance）的故障模式，此四種模式說明如下：

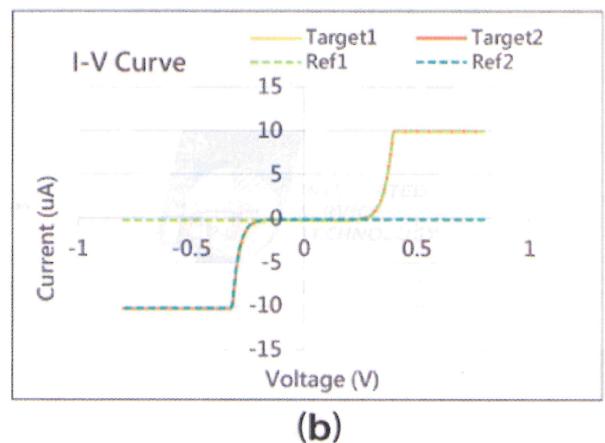
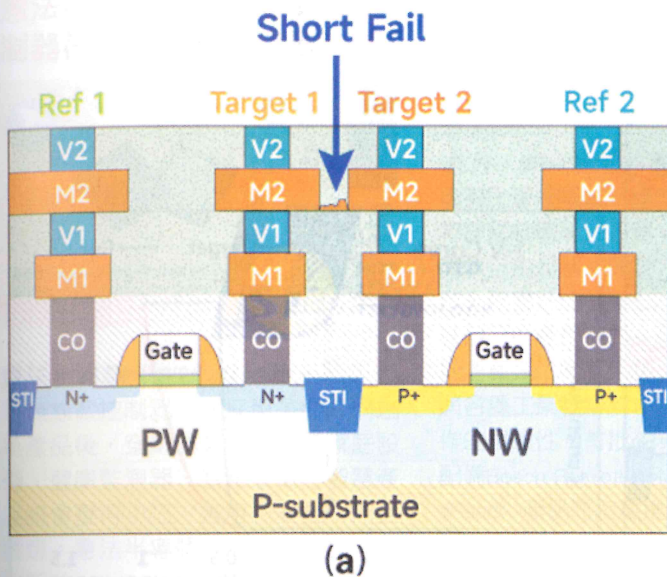
#### 開路（Open）模式

正常PMOS的P界面是負偏壓導通，電流圖會亮黑色，IV曲線如圖五（b）的綠線參考位置（Ref）所示；因為目標位置（Target）的Via 2有開路故障（Open Fail）的情形，導致電流無法流經PN界面；C-AFM在Via 3的電流圖則無訊號，而IV曲線如圖五（b）的橘線Target所示。



▲ 圖五：(a) 製程開路故障示意圖；(b) C-AFM的I-V曲線結果。(source：宜特科技)



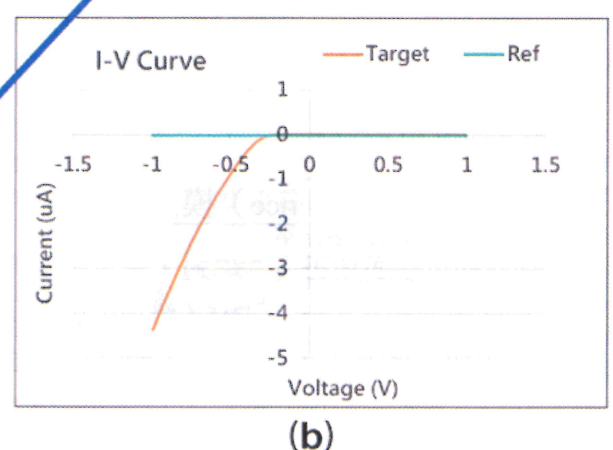
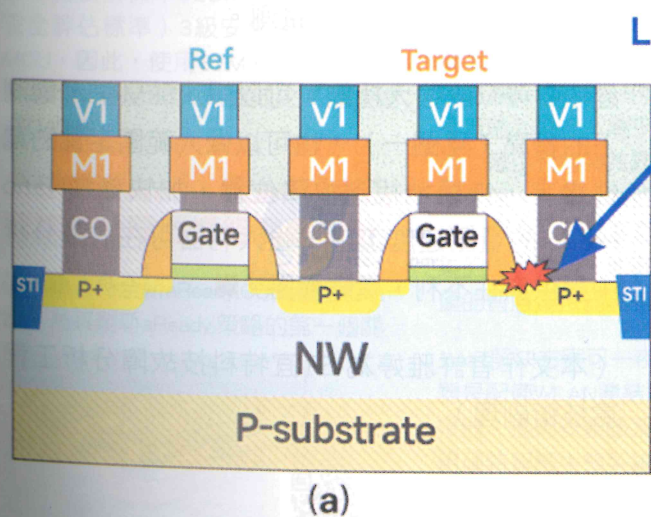


▲ 圖六：(a) 製程短路故障示意圖；(b) C-AFM的I-V曲線結果。(source：宜特科技)

### 短路 (Short) 模式

正常PMOS的P接面是負偏壓導通，電流圖會亮黑色，IV曲線如圖六(b)的Ref 2(深綠色虛線)所示；正常NMOS的N接面是正偏壓導通，電流圖會亮白色，IV曲線如圖六(b)的Ref 1(淺綠色

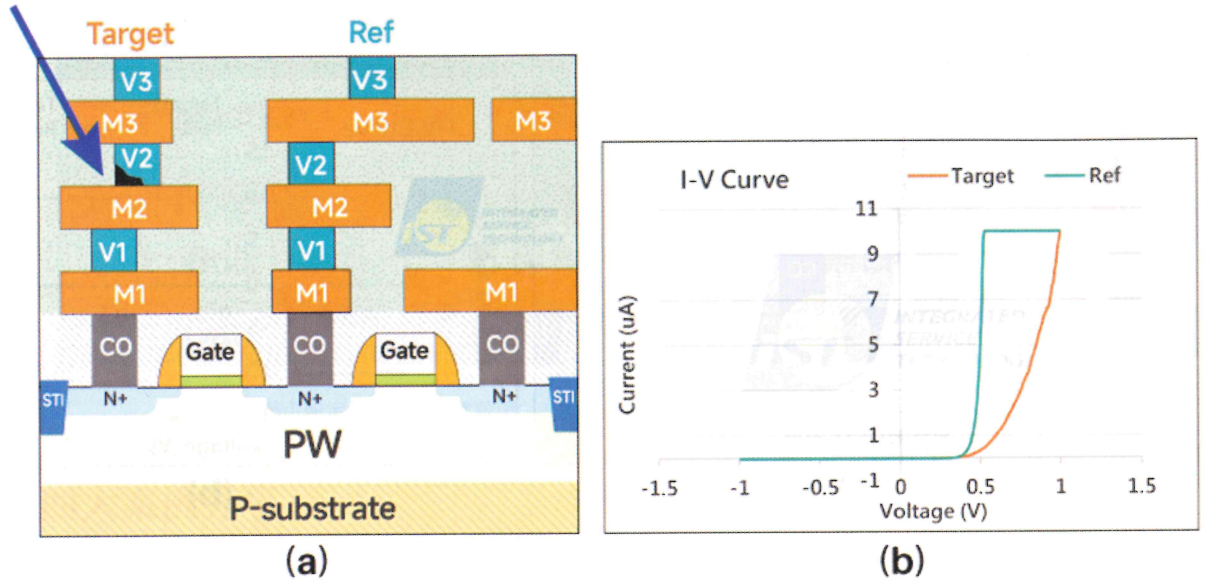
虛線)所示。圖六(a)的Target 1和Target 2在Metal 2之間有短路故障情形，導致在Via 2的IV量測皆收到P接面和N接面的訊號，IV曲線如圖六(b)的橘色和黃色線，並重疊在一起，且Via 2的電流圖同時收到亮黑和亮白的訊號。



▲ 圖七：(a) 製程開極漏電故障示意圖；(b) C-AFM的I-V曲線結果 (source：宜特科技)



## High Resistance Fail



▲ 圖七：(a) 製程高阻抗故障示意圖；(b) C-AFM的I-V曲線結果。(source：宜特科技)

### 漏電 (Leakage) 模式

正常的閘極 (Gate) 在C-AFM下不會偵測到訊號，如圖七 (b) 的Ref (綠線) 所示。圖七 (a) 中異常亮點所在的閘極 (Target Gate) 因對P接面漏電，導致閘極上方的Via 1在C-AFM的電流圖可以看到亮黑色，而IV曲線則明顯量測到有閘極漏電 (Gate Leakage) 的狀況，如圖七 (b) 橘線目標位置 (Target) 所示。

### 高阻抗 (High Resistance) 模式

正常NMOS的N接面是正偏壓導通，電流圖會亮白色，IV曲線如圖八 (b) 的Ref (綠線) 所示。圖八 (a) 中異常點所在區 (Target) 的Via 2不完全連接到Metal 2，在Via 3的C-AFM電流圖會看到比Ref還要淡的白色，且其IV曲線 (見橘線)

呈現高阻值特性 (圖八 (b))。若故障點的阻抗值相較於參考點的阻抗值，兩者若差異不大，在current map上的顏色對比會比較不明顯，除了使用C-AFM的IV曲線量測驗證，也可以使用Nano Prober進行更精準的電性量測。

經由C-AFM的強大功能，可以解決SEM在VC觀測下的盲點 (見圖一)，也可以做大範圍定量的電性鑑定，快速地找到故障位置，加快後續Nano Prober的量測速度，這一強大利器可在故障分析中提供無往不利，屢戰屢勝。■

(本文作者許雅婷為iST宜特科技故障分析工程處技術副理)