

量測/鑑定五時機精準判定

善用表面分析尋找製程缺陷

● 張齊如

半導體生產過程中，難免會產生污染，常見的微粒異物很容易被光學或電子顯微鏡檢測出，然而有一類異常污染卻是無法被發現的，例如表面氧化或微蝕的殘留污染，近數奈米如幾個原子層的厚度，相較於原本固體材料又是不同的性質，使用一般光學或電子顯微鏡觀察根本無法鑑別，這樣的污染層可能導致後續的鍍膜脫層，封裝的打線或植球脫球，甚至影響電性的阻值偏高、或電性不良等異常失效的現象。這些肉眼或顯微鏡看不到的異物需要藉由表面分析的儀器尋找解答。

本文將介紹表面分析原理並分享如何利用表面分析工具，找出半導體製程缺陷。

何謂表面分析？

生產製造的研發初期，也許會產生極小、極薄的奈米等級異物，要探究其來自於哪一道製程所產生的，甚至是最後封裝測試組裝才發現可能在製作RDL、UBM等製程有氧化或污染造成電性的異常、阻值偏高(或開路)、短路或漏電等現象。這些異常的隱形缺陷，都必

須藉由表面分析工具才能鑑定出來。

為何需要在超高真空環境中進行表面分析？

探勘火星、月球時，因為低氣壓、無重力與游離輻射等因素影響，使執行探測儀時，相較於在空氣中的運作困難，比如要偵測星球表面的形貌、表層的物質成分，或者底層各種物質成分深度的分布等等，都必須採用不同類型的探測儀器擷取不同的訊號強度、時間、深度來分析鑑定。

同樣地，絕大多數的表面分析儀器，也必須如同在太空的真空低壓環境中運作，那是為了避免空氣中的微粒吸附在樣品表面而造成干擾，進而造成結果的誤判問題。根據氣體平均自由徑的理論：

$$\lambda(\text{平均自由徑, cm}) = 5E-3 / P(\text{壓力, torr})$$

平均自由徑的長度與壓力是成反比的關係，若當真空壓力在 $1.0E-6$ torr時，平均自由徑會達50公尺，也就是在一個高真空(HV)密閉腔體中，一個氣體分子在尚未碰撞到其他分子前，就已碰到腔壁而停止，不至於降落在樣品表面。另外根據氣體動力學理論，在氣壓 $1.0E-6$ torr的密閉

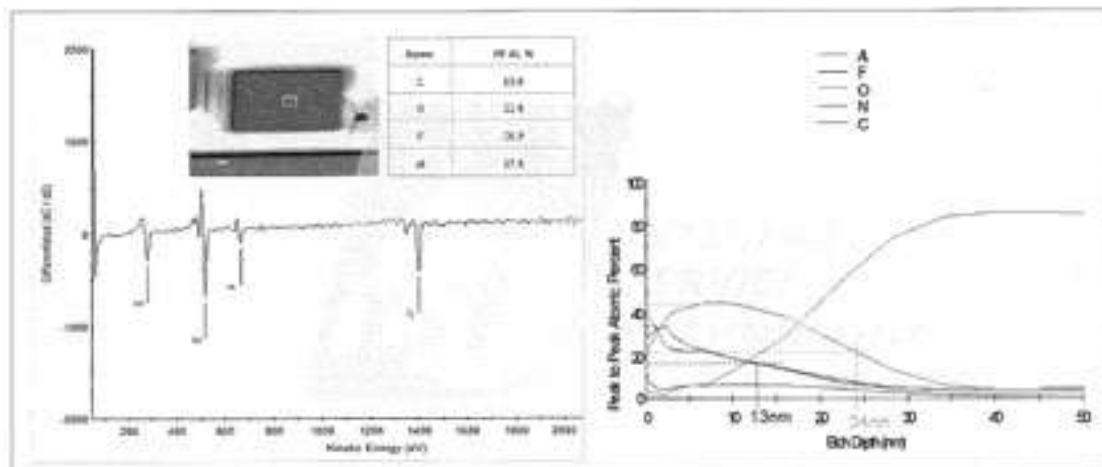


圖1 歐傑電子能譜分析IC鋁墊表面殘留成分與氧化層厚度的縱深分析

空間內，約5秒即可在樣品表面包覆一層原子，而在 $1.0E-9$ torr的壓力時卻需2小時才會形成一原子層。

因此，在表面分析儀器的壓力值最少都會在 $1.0E-9$ torr或更低的超高真空(UHV)狀態，主要是能在進行長時間擷取表面訊號時，降低氣體分子落到樣品表面的機率，因此為了維持分析腔體內超高真空，減少釋氣(Outgassing)產生的方式，就要盡可能縮小樣品體積，能夠將待測樣品的尺寸製作得愈小愈好。更重要的一點是，必須保持樣品的表面不會在裁切或傳送的過程中受到污染。

五大表面分析工具使用時機

觀察表面高低起伏形貌/尺寸量測

在一般材料分析應用中比較熟知的掃描式電子顯微鏡(SEM)，主要是觀察表面的高低起伏形貌或尺寸量測，藉由電子掃描樣品表面擷取二次電子的訊號來成像，也可搭配X光能量分散光譜(EDS)探測器鑑別表面的元素成分。

氧化/腐蝕或污染之奈米薄膜鑑定

然而，由於此SEM所蒐集的是來自於表面以下數百奈米深度的特性X光訊號，反倒是在最表面的幾個原子層數奈米的厚度污染卻是很難被偵測到的。因此，有材料分析實驗室如宜特就建議，需靠最常用來檢測奈米薄膜的工具—歐傑電子能譜(Auger Electron Spectroscopy, AES)與X光電子能譜(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)，甚至透過搭配氫離子濺蝕的縱深分析技術，即可進行氧化或腐蝕層的厚度分析。

圖1為典型AES分析IC鋁墊(Al Pad)表面定性分析的結果，左圖能譜顯示表面偵測到殘留的元素有C、O、F和Al；右圖是縱深(Depth Profile)分析的結果，可觀察各個元素含量隨著深度分布的情形，亦可提供估計氧化層或表層F成分污染的厚度，分別為24與13nm，這是由於鋁墊在開窗(Opening)製程使用乾蝕刻 CF_4 氣體，或是存放時間過久所導致的氧化腐蝕殘留，此為影響後續

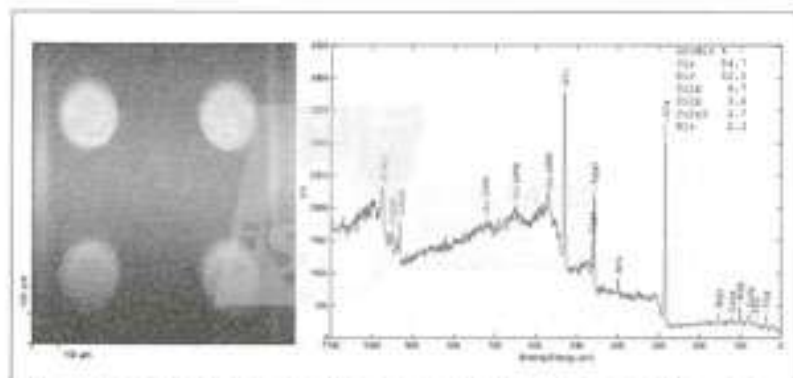


圖2 X光電子能譜分析UBM製程PI表面的成分，除了主要的C、O外，還有Ti、Si等金屬殘留。

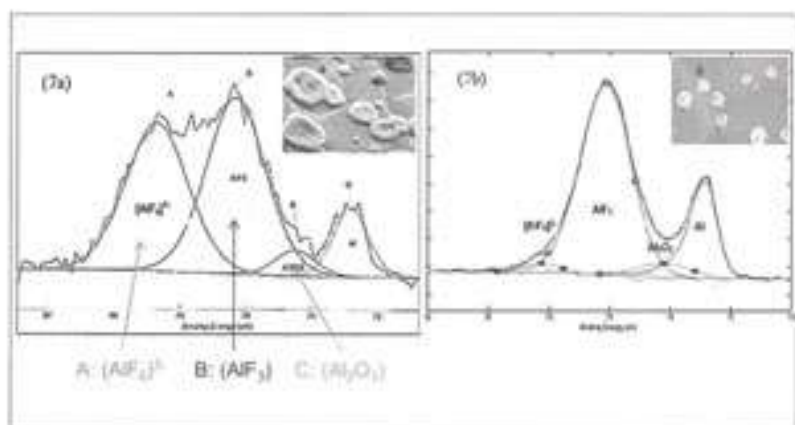


圖3 X光電子能譜分析IC鋁墊上腐蝕殘留物的化學鍵結態有三種，分別為 $(AlF_3)_n$ 、 AlF_2 與 Al_2O_3 。

封裝打線接合品質重要的參考指標。此外，針對先進3D封裝製程的TSV導通孔，在蝕刻製程後側壁的殘留，或是銅柱(Copper Pillar)製程表面氧化的分析，均可藉由AES的微電子束進行孔壁內或Bump直徑在數十微米以下的表面殘留分析。不過因為使用的激發源是電子，對於非導體材料進行分析的時候會發生表面充電(Charging Effects)的現象，干擾數據訊號的擷取，不如一般進行SEM量測時，可在樣品表面鍍一層金屬導電，導致無法分析絕緣樣品為其最大缺點。

待測樣品非導電/大於十微米以上表面檢測

對於樣品大於十微米以上的表面另可採用XPS進行表面分析，其激發源為X光，能分析範圍區域較大，通常在30微米以上，比如IC鋁墊、PCB的金墊、金手指、封裝用錫球、焊點均可使用。另外在非導電的樣品表面，XPS亦為較佳的分析工具，如IC鋁墊周圍的絕緣護層 SiN_x 、PCB銅線路外的絕緣綠漆，或在RDL/UBM製程線路外的PI或PBO絕緣層等，圖2即為在PI層上觀察到蝕刻後微量的Ti金屬殘留，此會導致Bump漏電的問題，因此而成為在UBM製程觀察的重要指標。

由於XPS是觀察電子束縛能(Binding Energy)的一種分析技術，可藉由高分辨化學位移(Cheical Shift)分析判斷化學鍵結的型態，如圖3為鋁墊蝕刻製程後表面生成橢圓形的污染物，經過能譜化學位移擬合(Curve Fitting)分析的結果，顯示束縛能分別為78.7eV的 $[AlF_3]_n$ 、76.3eV的 AlF_2 與74.5eV的微量 Al_2O_3 ，這三種化學態共存的污染物。諸如此類蝕刻製程的生成物分析外，關於一些陶瓷薄膜材料的製程研究，亦可利用此擬合分析技術，進行化學態鍵結比例的分析，以供後續製程調配改良的參考依據。

黃光/蝕刻製程等高分子有機化合物定性分析

另外一種靈敏度更高的表面分析是「飛行時間式」二次離子質譜(TOF-SIMS)分析儀，主要是用「離子源」作靜態(Static)的表面成分分析，不同於一般

磁偏式(Magnetic Sector)SIMS或XPS作動態(Dynamic)縱深的定量分析應用，因其一次離子源是採用非連續性的脈衝式設計，使得在轟擊樣品表面作用的表面能與電荷量能夠相對減少，另外再加以適當的電荷補償後，適合絕緣有機材料的分析。

因此若當待測樣品由前文中提及的AES或XPS定性分析之結果為C、N、O這類元素時，在製程中又可能涉及高分子有機材料，此時如果需要了解是哪一種有機化合物，即可透過TOF-SIMS的質譜分析來進行鑑定。比如在黃光、蝕刻製程或清洗後的缺陷污染，通常伴隨著有機溶劑或光阻等殘留，就非常適合使用TOF-SIMS來進行分析。

基於上述關於表面污染的定性成分分析技術外，其它像是數個奈米厚度的超薄膜，亦可借助的表面分析儀器如原子力顯微鏡(AFM)、X光繞射的X光全反射(XRR)分析技術，進一步獲取樣品奈米表面形貌、粗糙度，或是厚度等的資訊。

樣品尺寸/供鑑別異物及樣品圖形分析範圍

當遇到形貌、外觀、顏色甚至電性等各式各樣的異常現象，該如何選擇正確的分析工具，或是該從哪一個方式著手？由於每種儀器能承載的樣品空間不固定且能分析的範圍也都相異，如圖4所示，可以更清楚了解如何根據污染物的預估深度、尺寸以及希望觀察的濃度大小及分析流程圖。圖4假設目前發現的異物污染無法用一般顯微鏡觀察到，

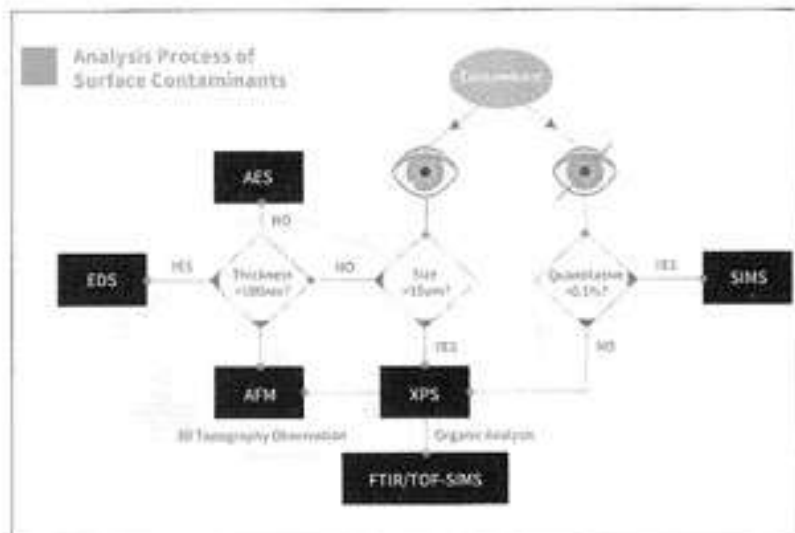
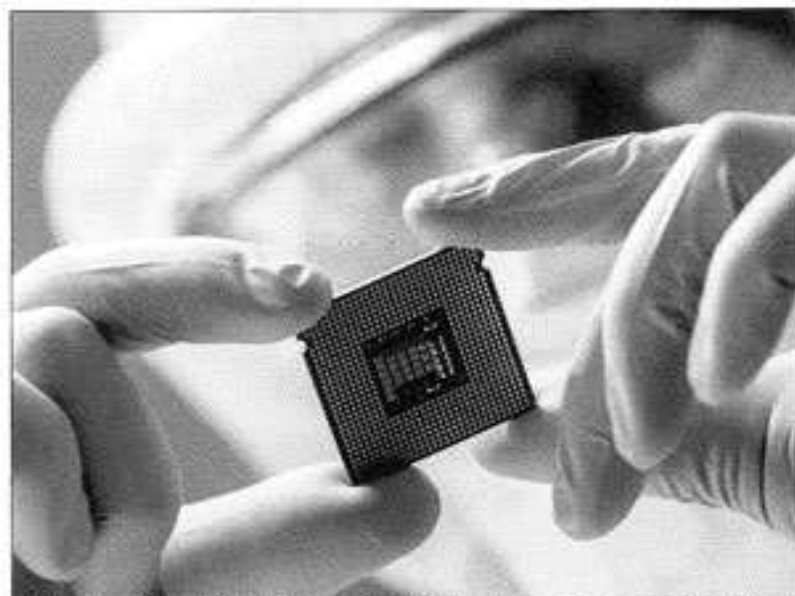


圖4 表面污染分析儀器的選擇準則



半導體生產過程產生的污染物，有時需透過表面分析工具才能檢測出來

僅能確定一區有異常變色的狀況，即可以先行使用XPS分析；若結果是C、N、O這三個元素，極可能為有機污染；進一步要分析是何種有機物，就可以走到最底下的FTIR或TOF-SIMS分析來做鑑定。●

(本文作者為宜特科技材料分析工程處資深技術經理)