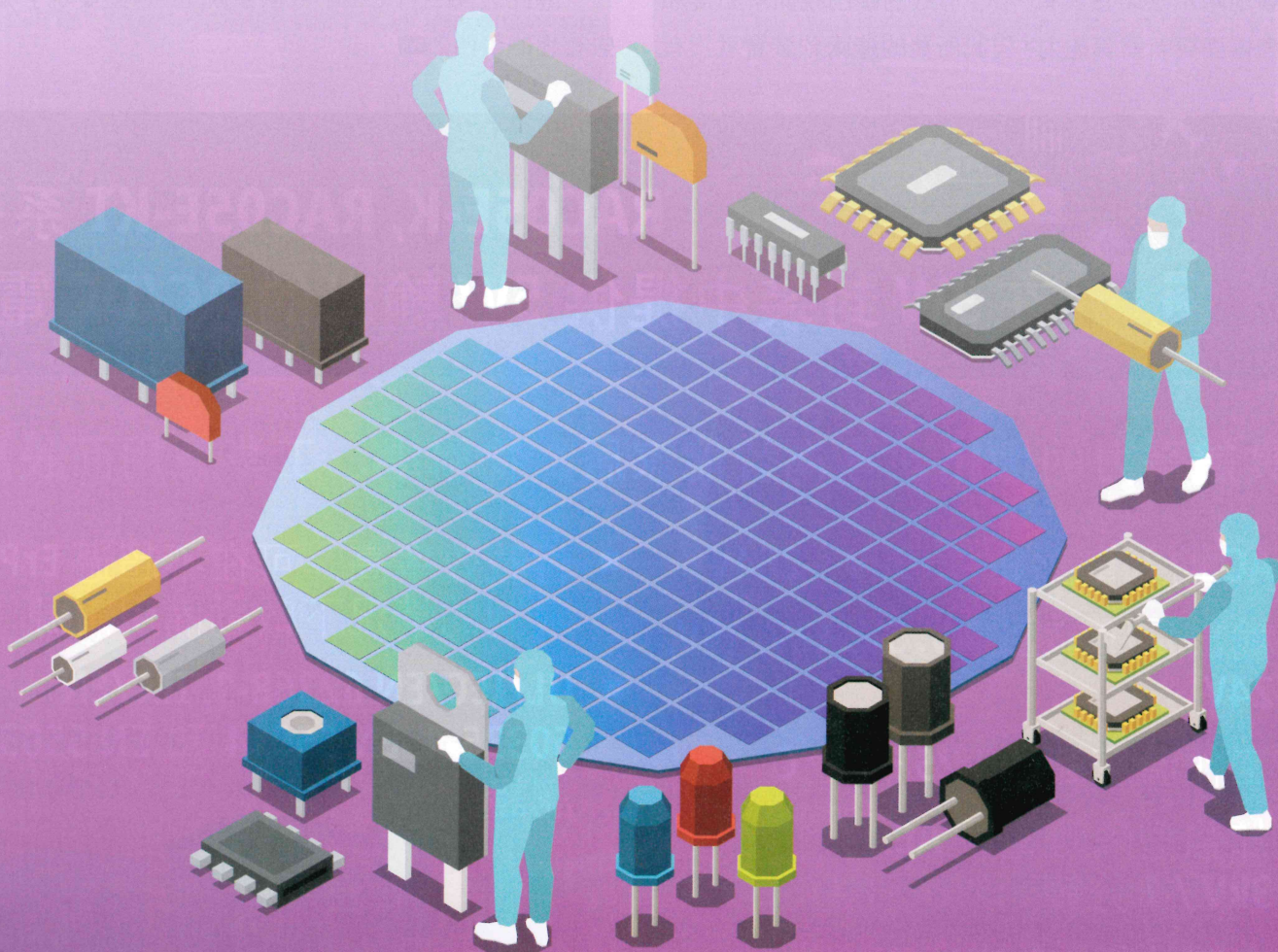


● 封面特寫

材料分析層層把關 先進製程設備零缺陷

半導體生產良率的瓶頸居然發生在製程設備，如何透過材料分析，改善缺陷？

作者：張齊如，宜特科技材料分析工程處資深技術經理



2022年開始，台積電(TSMC)、英特爾(Intel)、三星(Samsung)等半導體大廠的先進製程大戰如火如荼地展開，重砸資本支出在各項先進製程設備，如極紫外光(Extreme Ultraviolet; EUV)微影設備需求大增；若要在這場大戰奪得先鋒，關鍵在於產品良率(yield)是否能快速提升。

影響產品良率的因素非常多，本文作者將透過本身在宜特科技(Integrated Service Technology; iST)實驗室的相關經驗，聚焦於「先進製程設備的缺陷如何影響良率」，以及「如何透過材料分析改善缺陷」。

製程設備如何影響IC半導體生產良率？

半導體積體電路(IC)製程隨

著成本及技術的演進，晶圓尺寸很快地從四吋、六吋、八吋來到穩定的十二吋，而對於有效的IC晶粒(chip)數，「良率」(yield)一直是非常重要的關鍵指標。

因此，半導體製程上所使用的製程設備(如黃光、蝕刻、清洗、鍍膜、甚至承載與傳送機具…等)，在重複的製作過程中，其真空腔體及內部零件也同時在經歷蝕刻(或鍍膜)，而累積一段時間後，將

會導致腔體汙染，或產生副產物掉落至晶片上影響良率。所以製程設備必須定期做清潔預防性維護(preventive maintenance; PM)或更換零件。

此外，元件線路尺寸也隨著「摩爾定律」(Moore's Law)不斷地縮小至數奈米，更無法容忍製程設備所產生的副產物(或汙染)，因此，除了需要提高PM的頻率外，相關設備零件也必須不斷地

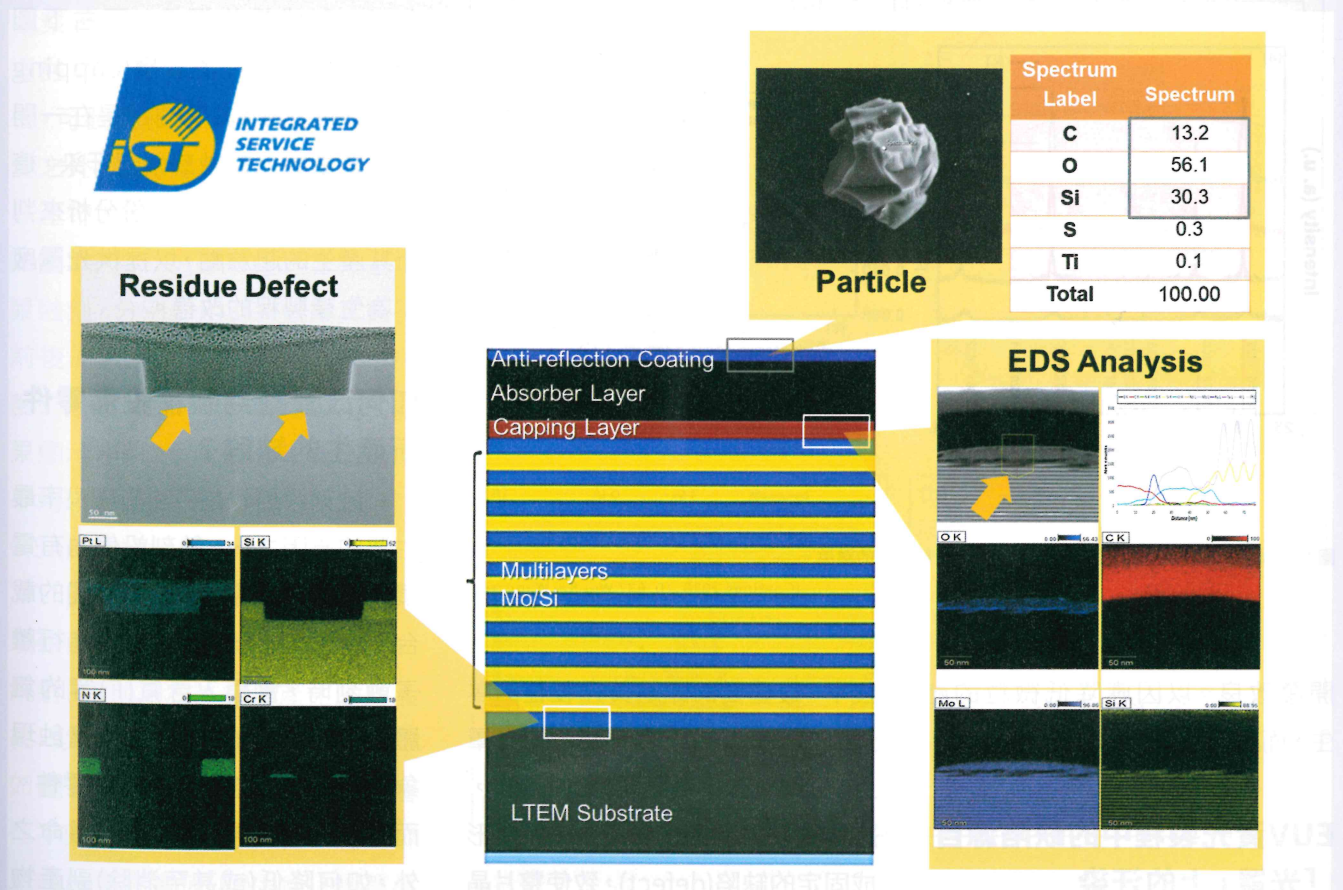


圖1：光罩上污染或缺陷的斷面EDS成份分析。

封面特寫

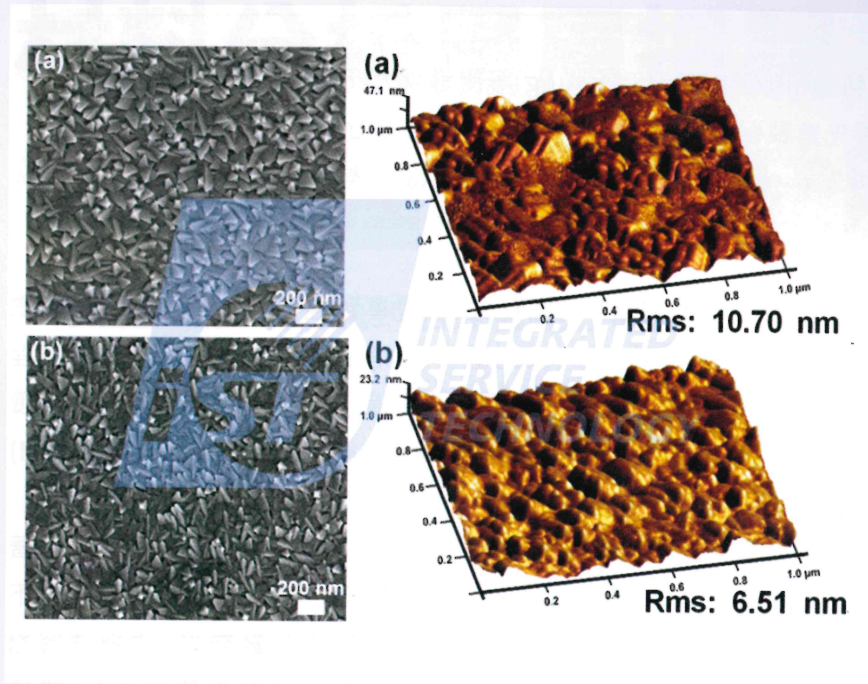


圖2：分別使用SEM與AFM觀察 Y_2O_3 鍍層在蝕刻前(a)與後(b)之表面形貌及粗糙度的差異。

(Coatings 2020, 10, 637 Wei-Kai Wang, etc)

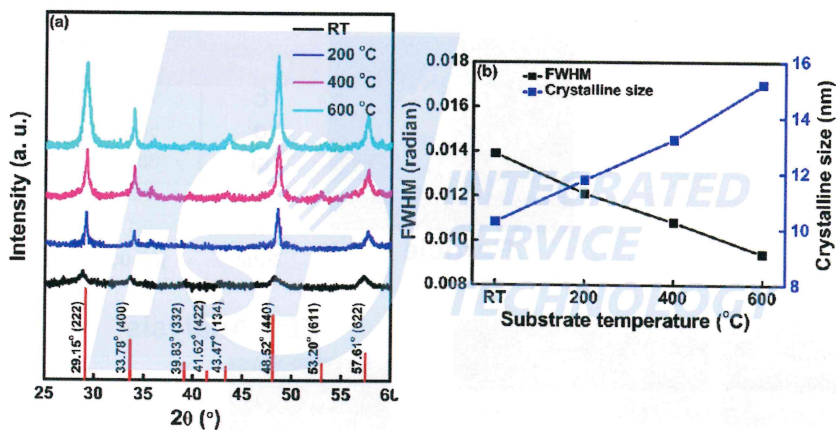


圖3：分析 Y_2O_3 鍍層在不同溫度上的結晶性與晶粒尺寸的關係。

(Coatings 2020, 10, 637 Wei-Kai Wang, etc)

開發改良。以因應降低微粒的產生，而達到良率的提升。

EUV黃光製程中的缺陷源自「光罩」上的汙染

目前影響奈米級先進製程生產

良率，最重要的即是黃光製程的曝光設備。EUV曝光機所使用的光罩上，若有一微小的顆粒(particle)，將導致整片晶圓上的所有晶片都形成固定的缺陷(defect)，致使整片晶圓良率直接歸「零」，對於此狀況，

晶圓製造過程中絕對是零容忍。

因此，探究這汙染異物如何在製作光罩時產生，就必須分析‘particle’或‘defect’產生的源頭；最直接的方式就是透過宜特科技材料分析實驗室的雙束聚焦離子束(Dual beam FIB)斷面觀察(cross-section)，或是透過穿透式電子顯微鏡(Transmission electron microscope; TEM)來觀察更小的‘defect’。

如圖1中所示三種不同的缺陷來源，右上圖的‘particle’「能量色散X射線光譜」(Energy-dispersive X-ray spectroscopy; EDS)分析結果為掉落在最表面抗反射層(Anti-reflection coating)上含有元素C、O、Si成份的汙染；而右下圖的缺陷則是落在覆蓋層(capping layer)的位置。左下圖卻是在一開始光罩基材上的蝕刻殘留汙染，這些都可透過斷面EDS成份分析來判斷其產生的起源點，以提供光罩廠作為生產製程的改善。

如何改善蝕刻製程設備零件所產生的缺陷？

蝕刻設備也是目前影響良率最主要的原因之一。蝕刻設備內有電漿產生器的電極板、承載晶圓的載台、真空腔壁及管路等，在進行離子蝕刻時，會通入含氟(F)等的氣體，將對腔體內的零件產生腐蝕現象，因此必須定期更換腔體零件。而在要求延長零件的使用壽命之外，如何降低(或甚至消除)副產物的產生也是重要的課題。

1. 透過分析工具，確認真空腔體、零件表面護層之平坦緻密度

早期大部份的腔體零件一般使用 SiO_2 、 Al_2O_3 作為表面保護層，然而，其與含氟(F)基的氣體反應卻會產生微粒、副產物等，且抗腐蝕效果不佳。後來的研究發現，氧化鈮(Y_2O_3)材料可以大幅地改善，但仍無法完全有效地解決微粒問題；近年來研究相關的護層新材料，如 Y_2O_3 表面氟化處理、三氟化鈮(YF_3)、氟氧化鈮(YOF)等，藉由嘗試不同的含氟基鈮化物材料，進行蝕刻的耐久性測試。

此類的研究在表面護層的特性要求包括孔隙率、粗糙平坦度的分析，可使用宜特驗證分析實驗室的SEM或是原子力顯微鏡(AFM)來觀察表面的形貌與粗糙度。在經過蝕刻設備的腐蝕與可靠度測試後，可觀察表面形貌與粗糙度的改變之外，還可藉由分析表面是否有副產物的形成，比較前後的差異。如圖2中為 Y_2O_3 鍍層經過含氟基電漿蝕刻，分別使用SEM觀察其蝕刻前後的表面形貌與AFM分析粗糙度的差異。由AFM分析粗糙度的結果顯示，可以很明顯看到在蝕刻後平均粗糙度(Rms)從10.7nm降到6.5nm。

另外在鍍層的開發研究中，可以藉由宜特驗證分析實驗室的X光繞射(XRD)分析其鍍層產生的結晶相，以及與晶粒尺寸大小的關係。如圖3(a)是用XRD分析 Y_2O_3 鍍層在不同溫度的結晶性，另外藉由繞射峰的半高寬值(FWHM)，計算晶粒尺寸得到圖3(b)的統計趨勢，可

以看出晶粒尺寸是隨著基板溫度升高而變大，有助於提供鍍膜速率與品質的控制。

2. 透過XPS分析成分變化，判斷護層抗腐蝕與否

至於針對表層數十奈米深度的成分變化，可藉由宜特驗證分析實驗室的X光光電子能譜儀(XPS/ESCA)分析其縱深及鍵結，以判斷此表面形成的副產物之厚度及化學態，進而判斷該材料是否具備抗腐蝕特性。如圖4為(a) Al_2O_3 以及(b) Y_2O_3 這兩種不同鍍層在含氟基電漿蝕刻後表面XPS縱深分析的結果。

果，明顯地可以看到 Y_2O_3 的表面F含量變多，有形成一層較厚的氟化副產物。

另外，也可以藉由高解析的宜特驗證分析實驗室X光光電子能譜儀(XPS/ESCA)，來更精確地分析這層副產物鍵結的化學態，如圖5分別是解析(a)鍍層 Al_2O_3 的Al2p能譜與(b)鍍層 Y_2O_3 的Y3d能譜的鍵結化學態，顯示在含氟電漿蝕刻後的表面確實分別形成Al-F、Al-O與Y-F、Y-O的化學鍵結，在 Y_2O_3 表層所含的Y-F鍵結量(紅色虛線下的面積)明顯是比Y-O的(綠色虛線下的面積)多，也說明了其氟化比是高於 Al_2O_3 的。

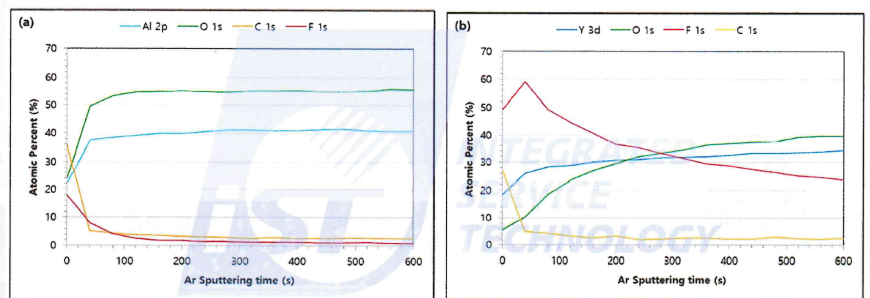


圖4： Al_2O_3 與 Y_2O_3 YOF二種鍍層在含氟基電漿蝕刻後表面XPS縱深分析的結果。

(Coatings 2020, 10, 1023 Seungjun Lee, etc)

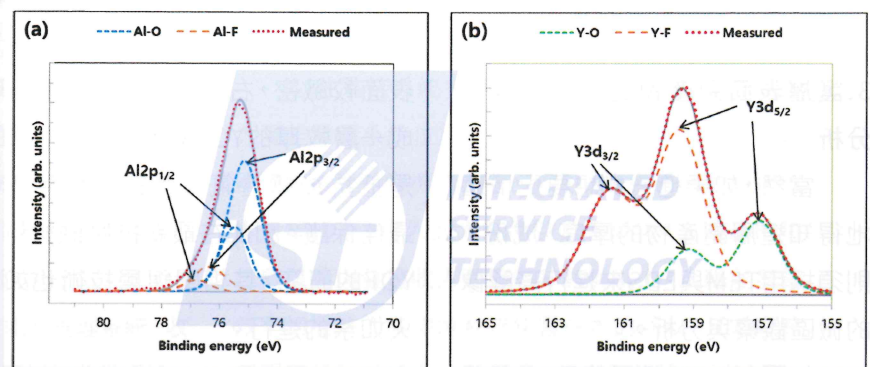


圖5：高解析XPS分析鍍層 Al_2O_3 (a)與 Y_2O_3 (b)在含氟電漿蝕刻後其表面Al2p與Y3d的鍵結化學態。

(Coatings 2020, 10, 1023 Seungjun Lee, etc)

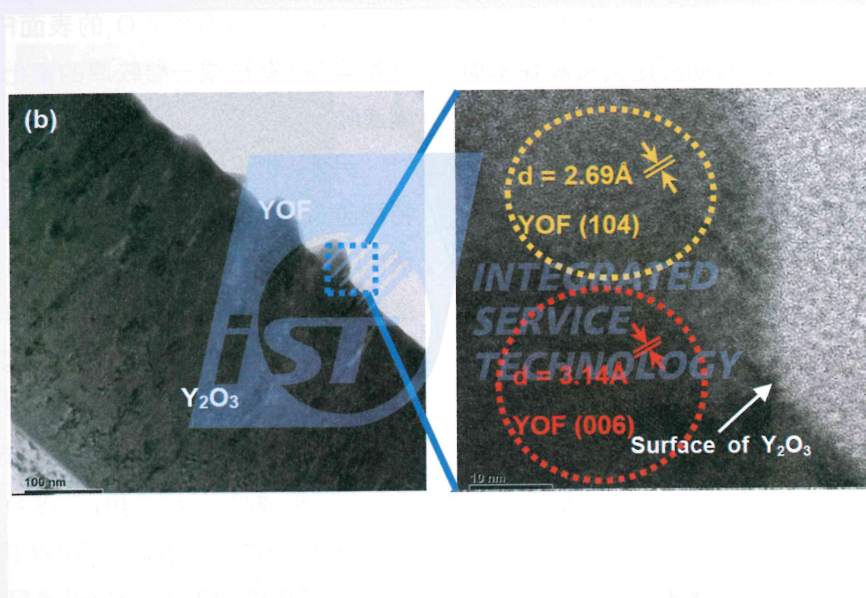


圖6：鍍層 Y_2O_3 使用 SF_6 電漿表面處理後的樣品斷面TEM觀察。

(Coatings 2020, 10, 637 Wei-Kai Wang, etc)

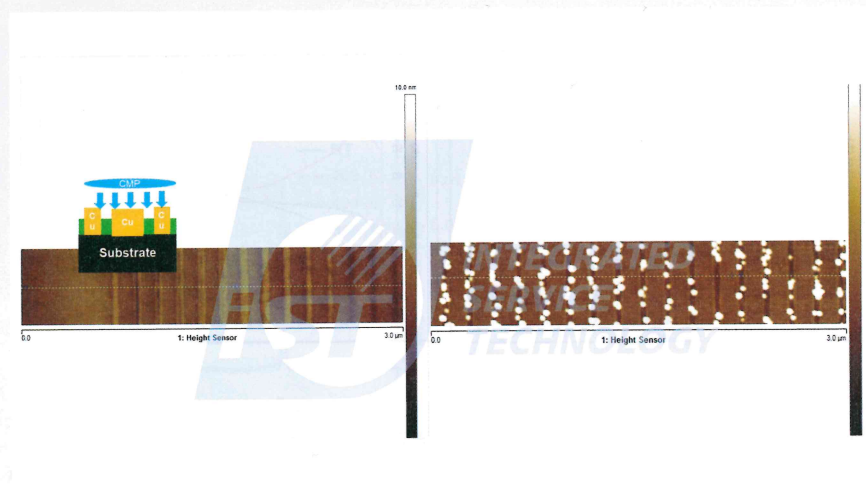


圖7：金屬銅線路在CMP研磨前(左)與後(右)的AFM分析結果比較。

3. 護層表面副產物之厚度與成份分析

當然，如果進一步想要更精確地得知這層副產物的厚度、成份，則須採用TEM與EDS來進行高解像的微區觀察與分析。

如圖6為 Y_2O_3 鍍層使用 SF_6 電漿表面處理後的斷面TEM微區觀察，左圖可看出在用 SF_6 電漿處理過的

表面較緻密，右圖可看到在表層形成一層較厚的YOF層，推論這層會是抵抗後續含氟電漿蝕刻作用的最佳保護。因此在最新抗腐蝕材料YOF的研究，其相關鍍層技術也如火如荼的進行。

藉由AFM，CMP製程缺陷一覽無遺

此外，在後段製程設備中的化學機械研磨(CMP)也會影響產品良率。當金屬與介電層厚度尺寸更小、線路密集度更高時，CMP研磨蝕刻容易不均，進而形成殘留物，發生電路漏電等異常現象。

因此在CMP階段，需特別關注殘留或微粒產生。一般在CMP製程前後，可以藉由AFM來分析蝕刻變化或殘留痕跡等，作為後續改善的參考依據。如圖7為密集的銅線路在經過CMP製程後，使用AFM量測分析研磨前後的變化，除了進行蝕刻率的分析外，亦可觀察到研磨產生的微粒殘留現象，這些都是提供CMP製程參數調整的重要指標。

綜觀以上各種不同製程階段所需要的設備，均有相對應的材料分析工具可供解答，目的都是為了尋求最合適、最耐用的材料，促使先進製程設備達到零缺陷。

關於上述大型設備零件的研究試樣(coupon)，通常都需要裁切成10~20mm左右較小的尺寸，方能送進真空分析設備(如SEM、DB-FIB)進行觀察分析。iST宜特材料分析實驗室針對尺寸為6吋以下如光罩的試樣，均可直接進行DB-FIB的檢測、斷面、採樣與成份分析；此外，透過外部合作廠商，iST宜特材料分析實驗室也可提供大腔體SEM分析服務，提供承載12吋的零件無需額外破片，即可直接檢測，並同步進行EDS分析。EDN

更多「宜特小學堂」
技術專題文章：
[https://www.istgroup.com/
tw/tech-articles/](https://www.istgroup.com/tw/tech-articles/)

