

自動量測精準分析先進製程參數

TEM量測助2nm製程不卡關

◎ 楊宗勳

當半導體製程逐漸縮小至3奈米(nm)甚至2nm節點(Node)，精準量測每個關鍵參數，並以大數據(Big Data)技術優化生產方法，對於改善製程良率至關重要。但傳統手動量測方法效率低、誤差大，成本又高。因此，唯有透過自動量測，才能快、狠、準取得正確參數，持續產出大量的奈米尺度元件數據，例如：薄膜厚度(Film Thickness)、CD值(Critical Dimensions)、電晶體結構(Transistor Structure)、表面形貌(Morphology)、摻雜濃度(Doping Concentration)與缺陷(Defect)分析，以提高產量並從中挖掘出創新商機。

那該如何透過量測統計晶粒(Grain)和奈米顆粒(Nano Particles)的大小、形狀及分布，或算出各膜層的厚度或寬度呢？本文將呈現宜特材料分析實驗室，如何透過穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscopy, TEM)，搭配自動量測軟體實際應用的三大案例。

解決以往人工誤差FinFET和GAAFET量測不失真

隨著5G、人工智慧(AI)、元宇宙快速崛起，發展低功耗、小尺寸、異質整合及

超高運算速度的晶片架構技術，已成為全球半導體製造業者最重要的決勝關鍵。

現今主流使用的鱗式場效電晶體(Fin Field-Effect Transistor, FinFET)是以類似魚鱗的叉狀3D設計，避開當初因製程縮小至20奈米以下，閘極長度變短衍生出的漏電等問題。而針對「閘極長度(Gate Length)」，或稱「製程線寬」，也就是電晶體中的源極(Source)到汲極(Drain)距離的精準掌握，以及對於鱗式矽晶形狀的控制度，都是影響電晶體效能的最重要因素之一。

以往傳統手動的方式，在TEM影像上量測閘極長度時，過程中容易因人為誤判，導致數據失真。為了有效降低人為計算所造成的錯誤，廠商如宜特材料分析實驗室以TEM搭配影像自動量測軟體，其步驟如圖1。處理一張照片只需數分鐘，即可將分析樣品的量測寬度轉換成數據圖，如圖2所示。這類分析的結果，不僅可呈現各層的單一數值，更能以統計學的方法，針對多根FinFET的鱗型線寬加以比較分析。

不過，當製程繼續向下微縮至3奈米，甚至推進至2奈米時，FinFET開始面臨漏

電等物理極限。因此，全新架構的「環繞式閘極場效電晶體(Gate-All-Around FET, GAAFET)」應運而生。GAAFET結構分為第一代奈米線型(Nanowire, NW)和第二代奈米片型(Nanosheet, NS)兩種形態。而GAAFET的晶片架構和FinFET不同之處，包括一開始需要以磊晶(Epitaxy, Epi)的方式，將矽層(Si)與矽鍍層(SiGe)堆疊成奈米片磊晶(Nanosheet Stack Epitaxy)，SiGe做為「犧牲層」(Sacrificial SiGe)在後續的「通道釋放」(Channel Release)時，利用蝕刻把SiGe吃光來獲得一層一層的奈米線或奈米片，然後再以閘極金屬(High-k)來包覆奈米片(線)，如圖3(a)所示。因此，對於量測GAA SiGe以及Si的薄層，不但要精準量測各層的膜厚，更重要的是針對SiGe形狀的控制。

面對上述需求，新的影像自動軟體有三大功能：

1. 可一次同時針對多個層次進行量測，並可設置達上百條量測線段。
2. 量測線段間距可配合客戶需求進行調整，如圖3(b)所示，針對SiGe/Si各層量測可設置不同間距。
3. 可立即性提供客戶量測數據，以往若是手動的方式量測，可能需花費長達一小時，透過軟體協助，可縮短至數分鐘內。

如圖3(b)所示，此影像自動軟體，因為可精準抓取到SiGe/Si各層的邊界，讓客戶可知SiGe層蝕刻後各點剩餘的厚度，並可調整其不同厚度的蝕刻參數。因此能精準掌握蝕刻後的閘極金屬形狀，進而得到均勻(Uniformity)、穩定性均佳的環繞式閘極結構，這亦是影響電晶體效能的最重要因素之一。

自動量測軟體可快速取得奈米顆粒尺寸/分布分析

100nm以下的奈米顆粒，主要應用在催化劑、感應器、電極、甚至在油漆塗料中。材料分析實驗室藉由TEM搭配影像自動量測軟體，透過軟體協助可精確快速的量測出奈米顆粒的大小與形狀，再以影像處理之後的統計數據分析圖，分析奈米顆

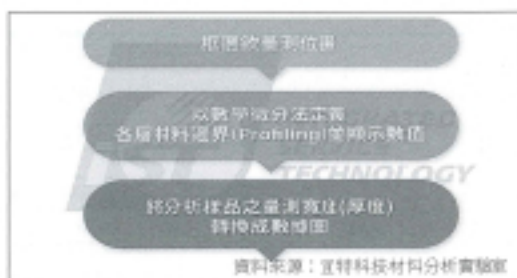


圖1 此影像自動量測軟體技術主要分成三個步驟

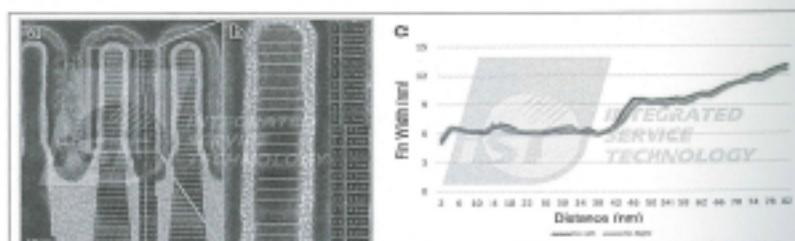


圖2 FinFET TEM影像自動量測軟體顯示結果。(a)先框選出FinFET中欲量測的位置；從(b)可知，每隔2nm軟體就能抓取到Si Fin邊界；(c)針對多根FinFET的鑄型線寬統計資料

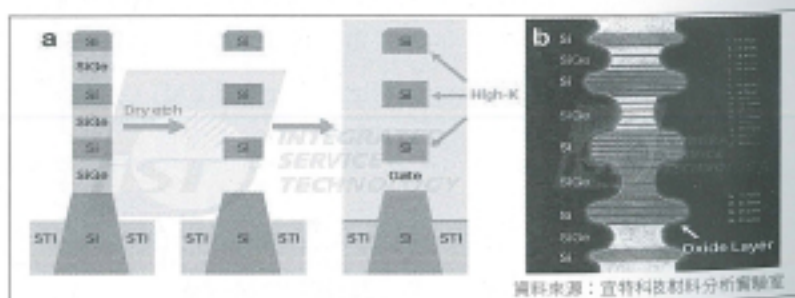


圖3 GAAFET製程簡易示意圖。圖3(a)GAAFET製程流程圖；圖3(b)GAAFET STEM影像使用自動量測軟體顯示結果，軟體可抓取到SiGe以及Si各層的邊界，量測線段間距也可客製化進行調整

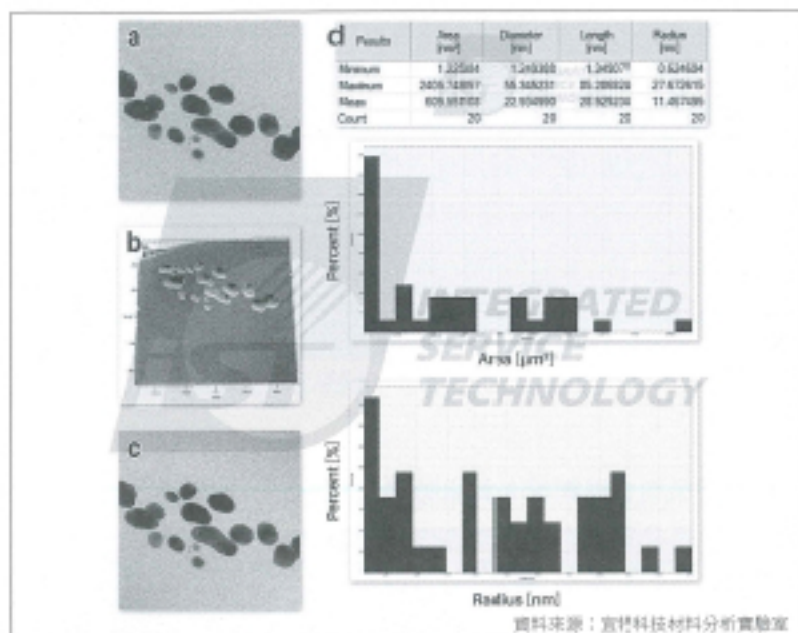


圖4 奈米顆粒TEM影像自動量測軟體顯示結果。(a)為奈米顆粒TEM影像；從(b)可知軟體模擬3D形貌輪廓圖模型；(c)軟體利用形貌輪廓圖，經過影像辨識後的奈米顆粒影像；(d)為奈米顆粒影像處理之後的統計數據分析圖

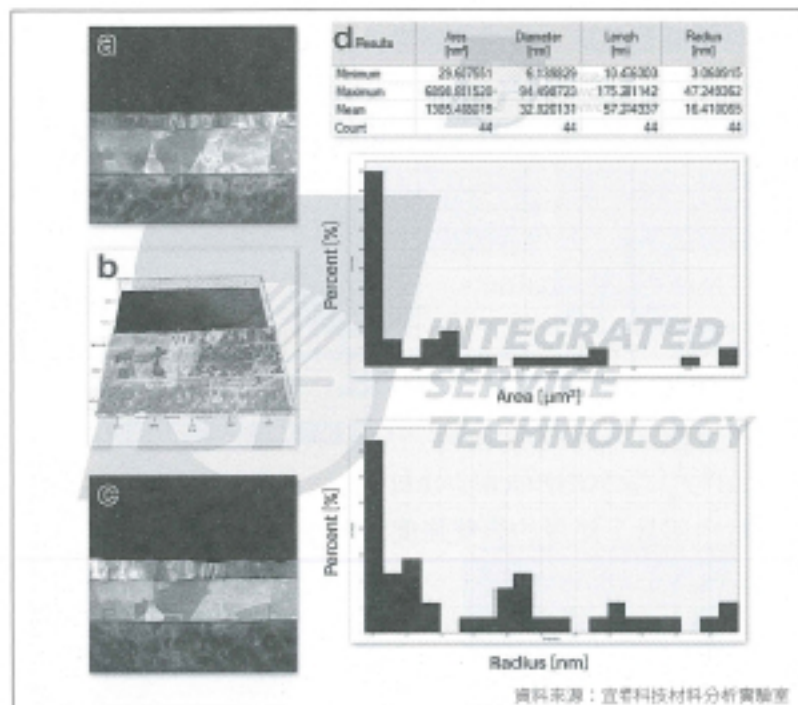


圖5 UBM的Cu/Ti層次STEM影像自動量測軟體顯示結果。(a)為UBM晶粒STEM影像；從(b)可知軟體模擬3D形貌輪廓圖模型；(c)軟體利用形貌輪廓圖經過影像辨識後的晶粒影像；(d)為晶粒影像處理之後的統計數據分析圖

粒大小及分布，並可同時得到多種在研發材料上所需的數值，如奈米面積、半徑、顆粒平均值、周長等等，如圖4(d)，作為奈米材料研發的參考，縮短研發時間。

清楚辨識出晶粒尺寸量測/分布

單位面積中晶粒的數量與晶粒的尺寸有關，晶粒的大小對材料的硬度、拉伸強度、韌性、塑性等機械性質都有決定性的影響，因此，若能精準的量測材料晶粒的尺寸大小，即可預先評估其材料性能。以球下金屬層(Under bump metallurgy, UBM)的銅/鈦(Cu/Ti)層次為例，廠商如宜特材料分析實驗室以TEM搭配影像自動量測軟體，可以清楚的從Cu晶界對比中分辨出晶粒的形狀與大小，如下圖5所示。

並且，可針對大量的晶粒做出精準的統計結果，同時得到多種在研發材料上所需的數值，如晶粒的面積、半徑、顆粒平均值、周長等等，如下圖5(b)所示。其相關數值影響UBM的電性、硬度、擴散、熱遷移等因素，協助客戶在世代推新的情況下，更加快速開發產品。

(本文作者為宜特科技TEM分析工程部資深工程師)

參考資料

- [1] 電子元件的靈魂—先進電晶體技術與發展趨勢，劉致為教授
- [2] K.S. Lee., et al. "Inner Spacer Engineering to Improve Mechanical Stability in Channel-Release Process of Nanosheet FETs." June 2021; Electronics 10(12):1395.
- [3] Loubet, N., et al. "Stacked nanosheet gate-all-around transistor to enable scaling beyond FinFET." VLSI Technology, 2017 Symposium on. IEEE, 2017.