

原子針尖斷層影像儀之半導體元件分析應用

Applications of Atom Probe Tomography to Semiconductor Devices

顏鴻威

Hung-Wei Yen

原子針尖斷層影像儀 (atom probe tomography) 是一種 state-of-art 材料顯微分析技術，能夠解析材料或元件微觀區域的三維原子分佈，它已經被廣泛應用在材料、元件、地質、生物等物質的顯微分析，其獨特的空間解析度與成份偵測極限使它成為當代微縮、複雜、且立體化半導體元件研發所需之關鍵技術。本文提供原子針尖斷層影像儀之簡單介紹，並以實際案例展示它在半導體元件之應用，最後探討此顯微分析技術在半導體領域的挑戰與未來發展，期待提供讀者與半導體領域專家對原子針尖斷層影像儀有更清楚的輪廓與認知。

Atom probe tomography is a state-of-art technique of microscopy and microanalysis, enabling three-dimensional atom distribution of materials and devices. It has been widely applied in the fields of materials, devices, geography and biology and the characterizations of many solids. Its unique spatial resolution and chemical detection limit make atom probe become a critical characterization technique for contemporary devices which are small, complicated and three dimensional. In this article, we provide an introduction to atom probe tomography and further demonstrate some practical cases in semiconductors. Moreover, we address issues on challenges and difficulties of atom probe for applications in future semiconductor. We expect this article is able to make readers and semiconductor experts have clear understanding in atom probe.

一、原子針尖斷層影像儀

atom probe tomography (APT) 之中譯名稱為三維原子探針或原子針尖斷層影像儀，依照其設備機構也被稱為 local electrode atom probe (LEAP)，簡稱為 atom probe，它能夠提供材料中不同元素原子之三維分布，在空間上能夠達到 sub-nanometer 等級之解析度，在成份分析上能夠達到約 10 ppm 等級之偵測極限，是一種相當新穎的材料顯微分析技術⁽¹⁾。

當代 APT 之簡易機構如圖 1 所示，目標分析之材料或物質必須製作成半徑小於 100 nm 之理想針尖試樣，根據針尖場放大效應⁽²⁾，若於半徑為 R 的針尖試樣前緣施加正偏壓 V ，則針尖電場 (F) 可達 $F = V/kr$ ⁽²⁾，其中 k 為場因子常數 (field factor)，介於 2-5 之間。因此，

大約僅需數千伏特的電位差，就能夠在針尖前緣形成巨大之電場，將針尖表面原子離子化並抽離，此行為稱為場蒸發 (field evaporation)，而 APT 分析實驗即依靠此場蒸發行為來進行⁽²⁾。故針尖試樣為 APT 分析實驗之必要條件，此外，為抑制針尖表面原子之熱擾動，試樣溫度一般必須達 80 K 以下之冷凍環境，為避免蒸發之材料離子在飛行過程中受到其它氣體碰撞，腔體真空需達 10^{-10} torr 以上之高真空環境，為了控制場蒸發之次序，針尖端會被施加背景正偏壓 (V_{dc})，於區域電極 (local electrode) 施以負偏壓脈衝 (voltage pulse) 或者外加雷射脈衝 (laser pulse) 的一瞬間，表面原子瞬間發生場蒸發形成離子擊向位置敏感偵測器 (position-sensitive detector, PSD)。在控制得宜的場蒸發過程中，每一個脈衝都僅有一個原子被蒸發游離，因此，在連續高頻的脈衝下，表面原子將一個接一個且一層接一層 (atom-by-atom and layer-by-layer) 依序被場蒸發游離，而針尖半徑會越來越大，故背景電壓 V_{dc} 必須隨之逐漸增大以維持蒸發速率並持續收集離子 (原子)，一般而言，一個可靠的 APT 數據至少要有 300 萬個原子訊息，由此可知，APT 數據處理其實就是一種大數據處理。

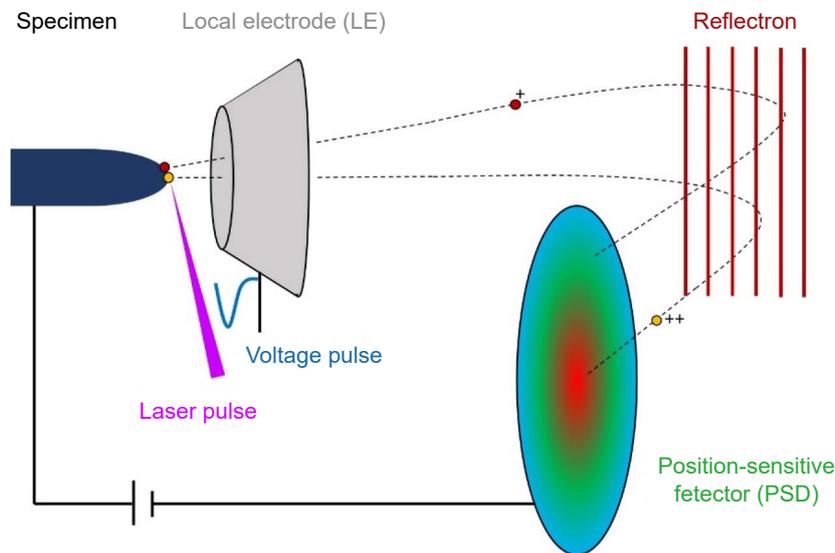


圖 1. 當代原子針尖斷層影像儀之機構示意圖。

在近代 APT 機構中，local electrode 的設計相當重要，它一方面給予計數的負偏壓脈衝，另一方面，它與針尖試樣的相對幾何關係實現了相當大的光圈孔徑，大幅提高能見區域 (field of view, FOV)，使全部蒸發之離子能夠以線性軌跡投射往偵測器，因此近代之 APT 設備又稱為 local electrode atom probe。此外，PSD 是一種整合微通道面板 (micro-channel plate, MCP) 與延時線性偵測器 (delay line detector, DLD) 之偵測系統，離子通過 MCP 後擊中 DLD 產生位置訊號，在數據中同時記錄偵測器上之 (X, Y) 座標以及飛行時間與離子次序。不過，因為其 MCP 設計無法收集所有飛抵偵測器的離子 (原子)，被 MCP 擷取的實際離子數量比例為偵測效率 (detection limit)，目前產品之最高偵測效率可達約 80%，若加裝反折器 (reflectron) 之設備雖然提高質譜解析度，由於飛行距離較長，其偵測效率降低至 50%—60%，並且會使偵測器之最後 FOV 受到限制。

APT 之優異成份分析極限來自於其質荷譜原理。偵測脈衝與偵測器之間的離子飛行時間，即所謂 time-of-flight (TOF)，由已知之離子飛行距離以及該離子場蒸發之電壓，可以

得到離子之質荷比 (m/n 或 Da)，其解析度相當高，電壓脈衝模式下質荷譜之半高寬約可達 $1/800 \text{ amu}$ 。另外，設備可以加裝反折器來延長離子飛行的距離，能夠提高質荷譜之解析度至半高寬 $1/1100 \text{ amu}$ 。更重要的是，不論是場蒸發的物理原則或偵測器特性都不存在元素選擇性，所有元素離子都能夠被偵測，只要在質荷譜解析度能力內，各種元素離子都能被解析。以目前之設備極限，即使加裝反射器仍然有些離子沒有辦法區分，例如 $^{27}\text{Al}^{+1}$ 、 $^{54}\text{Fe}^{+2}$ 、 $^{54}\text{Cr}^{+2}$ 三者之質荷比則無法被區分，如果材料中存在一種以上這類元素時，定量成份將造成誤差，而定性分佈則可以透過同位素來呈現。

APT 之斷層影像必須經由重構 (reconstruction) 才能獲得。我們視 APT 為一種點投影顯微術 (point-projection microscopy)，因此，如圖 2 所示，我們假設離子離開針尖為線性投射，而重構乃藉由簡單的反投影演算法 (inverse projection algorithm) 重構而得。偵測器所量得的 (X, Y) 座標能夠在重構中獲得原子於材料針尖之 (x, y) 座標^(3,4)：

$$x = \frac{X}{M} \quad \text{and} \quad y = \frac{Y}{M}$$

離子的投射中心並非針尖曲率中心，其投射中心一般在於針尖更深處，故投射放大率 (M) 必須由以下關係求得：

$$M = \frac{\zeta r}{L + \zeta R} \sim \frac{\zeta r}{L}$$

其中 L 為針尖至偵測器之距離， R 為針尖曲率半徑， ζ 則稱為影像壓縮因子 (image compression factor, ICF)，影像壓縮因子可由圖 2 之幾何關係計算之，ICF 介於 1–2 間，ICF = 1 時為球體投影，ICF = 2 時為晶體學之立體投影。此外，原子的深度方向座標 (z_i) 則以原子蒸發游離的順序 (i) 來計算：

$$z_i = \sum_{i=1}^{n-1} dz_i + dz'$$

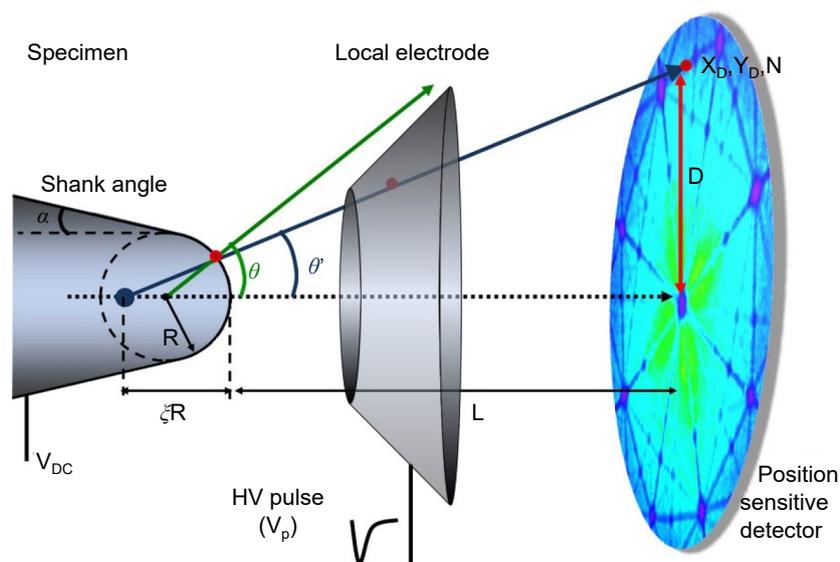


圖 2. 原子探針之離子投射路徑與重構幾何關係⁽⁷⁾。

其中 dz_i 為次序項，而 dz' 為曲率投影修正項，詳細內容可參考文獻^(5, 6)。事實上，整個重構過程所需之重要參數包含 ICF、偵測器效率、偵測器面積、場放大效應、原子體積以及飛行距離。雖然目前普遍認為 APT 之縱向空間解析度可達 0.1 nm，橫向空間解析度可達 0.2 nm，不過，重構參數可能因為場蒸發過程的不理想、針尖試樣的幾何缺陷、試樣結構的複雜度...等產生偏差與不確定性，進而造成重構扭曲與解析度下降，這也是 APT 技術未臻完美的重要議題。

在國科會支持下，我國將於 2023 年由國立臺灣大學與國研院台灣半導體研究中心共同合作建置臺灣第一部之原子針尖斷層影像儀，其型號為 LEAP 5000-XR，為同時配備電壓脈衝與 UV 雷射脈衝之高階 APT，並且增配反折器提高質譜解析度，其設備性能與特色詳列於表 1。本設備用來解析先進材料與元件之微觀三維原子分布，期待能夠帶來材料製程、結構、性能之新發現與理論，加速材料科學與元件開發之發展。

表 1. LEAP 5000-XR之設備特色與規格。

Item	Specification
Maximum Voltage Pulse Frequency	250 kHz
Mass Resolving Power	1100 FWHM
Maximum Pulsing Fraction:	< 25%
Maximum Laser Pulse Frequency	50 – 500 kHz
Laser Wavelength	355 nm
Laser Pulse Energy	0.001 pJ – 1000 pJ
Laser Spot Size	< 3 μ m
Specimen Temperature	20 – 100 K
Field of View	200 nm
Detection Efficiency	50% – 60%
Chemical Detection Limit	~5 ppm
Spatial Depth Resolution	< 0.1 nm

二、半導體元件之應用

材料與元件分析存在三個重要的突破方向，其一是超高空間解析度，目前球面像差校正掃描穿透式電子顯微鏡 (scanning transmission electron microscopy, STEM) 已經可以達到 sub-Angstrom 等級之空間解析度；其二是化學解析極限，在化學組成上一方面要能夠判別元素種類，另一方面同時追求超高偵測極限，目前二次離子質譜 (secondary ion Mass spectroscopy, SIMS) 已經可以超越 ppb 等級之偵測極限；其三是三維結構的解析，多數顯微鏡技術僅能呈現二維之影像，近年來雖然已經發展出高解析之三維影像⁽⁸⁾，經三維重構演算法運算將對空間解析度造成犧牲。圖 3 為當代各類材料分析技術在取樣尺寸與成份偵測極限之特性分布圖，我們清楚可以知道空間解析度與成份解析極限是相互窮拮的，高解析 STEM 雖然能達到 column-to-column 的 sub-Ångstrom 空間解析能力，但配合電子能量損失譜儀 (electron energy loss spectrometer, EELS) 或 X 射線能量散布分析儀 (energy dispersive X-ray spectrometer, EDS) 在成份分析之偵測極限大約在數個 at. %，而這兩種技術在不同元素

的分辨與偵測也有侷限，SIMS 雖然能夠達到極高的偵測極限，但是在空間解析度或取樣尺寸上，即使是 NanoSIM 也僅約可達 50 nm，面對複雜之材料與元件顯微結構時有所侷限。最後，若再考慮各種材料顯微分析技術之三維空間與化學成份解析能力，我們將發現傳統之顯微材料分析技術難以提供解決之道。然而，當代半導體元件不僅其尺寸極微小化，且材料組成複雜化，元件的結構也朝立體化發展，因此，APT 能夠解析材料中各種元素原子之三維分布，兼具 sub-nanometer 空間解析度與近 10 ppm 之偵測極限，目前被視為先進半導體元件最重要的材料顯微分析技術。

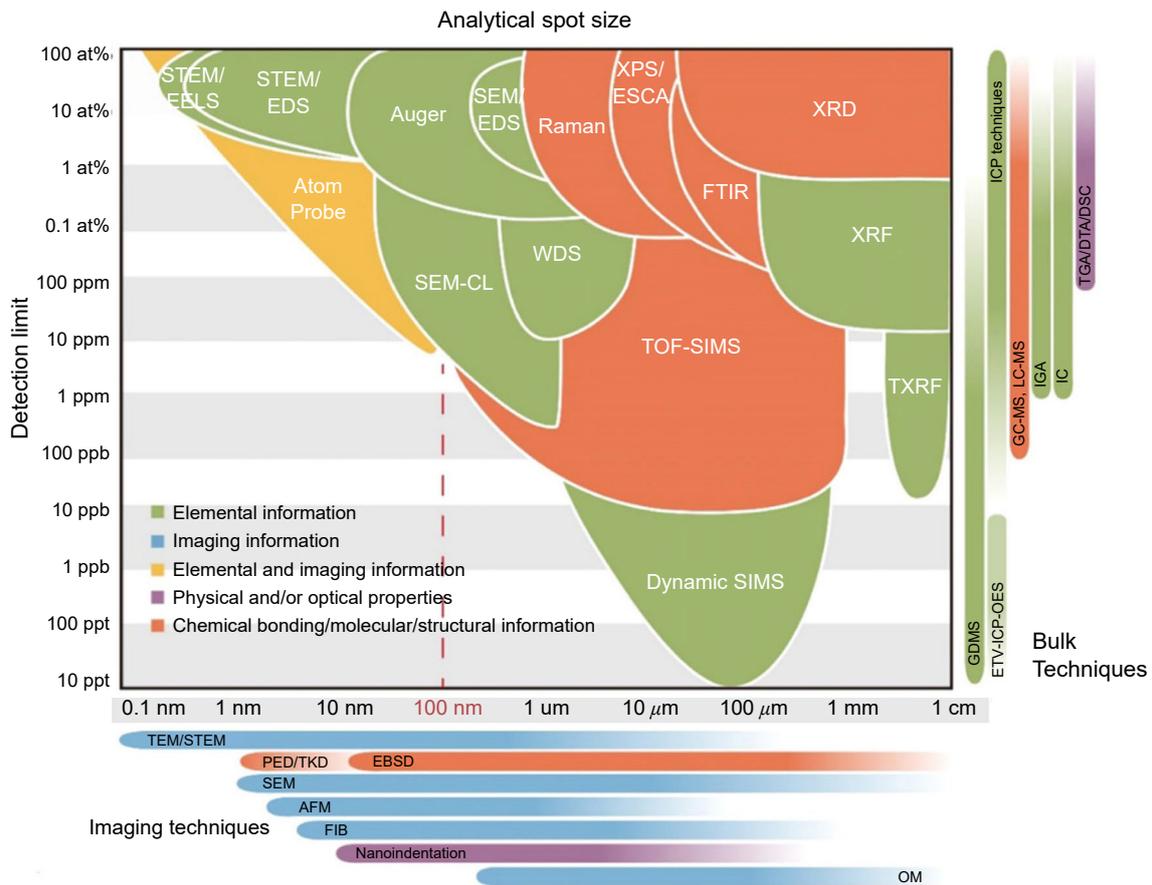


圖 3. 不同顯微分析技術之取樣尺寸 (spot size) 與成份解析極限 (detection limit) 之分佈圖⁽⁹⁾。

APT 能夠解析半導體中摻雜原子與晶體缺陷之交互作用。圖 4 為單晶 Si 經 As 離子佈植後，先後經過 600 °C 退火 30 分鐘與 1000 °C 退火 30 秒所形成之差排環，如圖 4(a) 所示，一般 TEM 影像僅能由差排周圍之應變場成像，而圖 4(b) 之 APT 重構則可以清楚呈現 As 偏聚於差排環，無差排環區域之 As 摻雜原子濃度約為 0.8 at. %，而差排環周圍偏聚之 As 濃度可達 3.7 at. %，此成果不僅展示了 APT 對於微小成份變化的敏感性與定量能力，也是人類第一次清楚地在半導體材料中發現 As 的 Cottrell 氣氛⁽¹⁰⁾。圖 5 為 N 型與 P 型多晶 Si 閘極金屬氧化物場效電晶體 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 之 APT 分析，其中 N 型 MOSFET 之多晶 Si 以 P 進行 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 離子佈植 (10 keV)，而 N 型 MOSFET 之多晶 Si 以 B 進行 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 離子佈植 (2 keV)，兩者皆於 900 °C 進行快速高溫退火。APT 分析結果呈現 P 與 B 兩種摻雜原子在擴散行為之顯著差異，如圖 5(a) 所示，

P 摻雜原子之初期擴散深度較深，並以晶界為其快速擴散通道，在較長時間退火後，多數 P 摻雜原子皆仍偏聚於 Si 晶界。相反地，如圖 5(b) 所示，B 摻雜原子僅在初期有晶界偏聚之現象，在較長時間退火後，B 摻雜原子的分布相當均勻，表示 B 摻雜原子可同時以晶界與晶體位置做為其擴散通道。此研究成果解釋了 P 與 B 兩種摻雜原子在退火製程中的行為差異，並可經由 APT 分析成果來監控退火製程以達到元件之最佳性能。

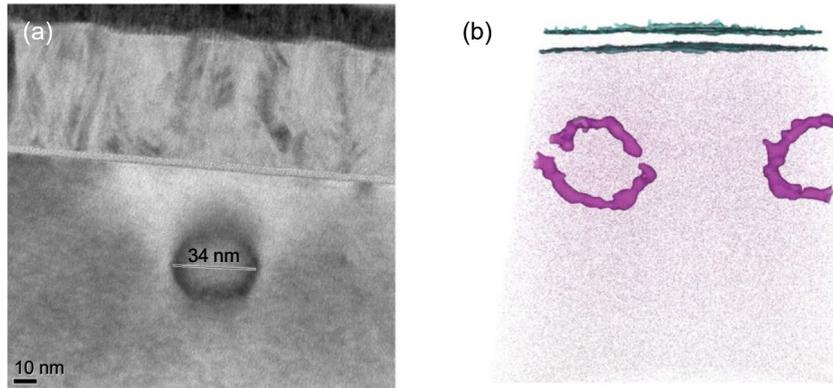


圖 4. As 摻雜之 Si 晶先後以 600 °C 退火 30 分鐘及 1000 °C 退火 30 秒所形成之差排環：(a) TEM 影像與 (b) APT 重構三維影像。Si 為灰色；O 為藍色；As 為紫色⁽¹⁰⁾。

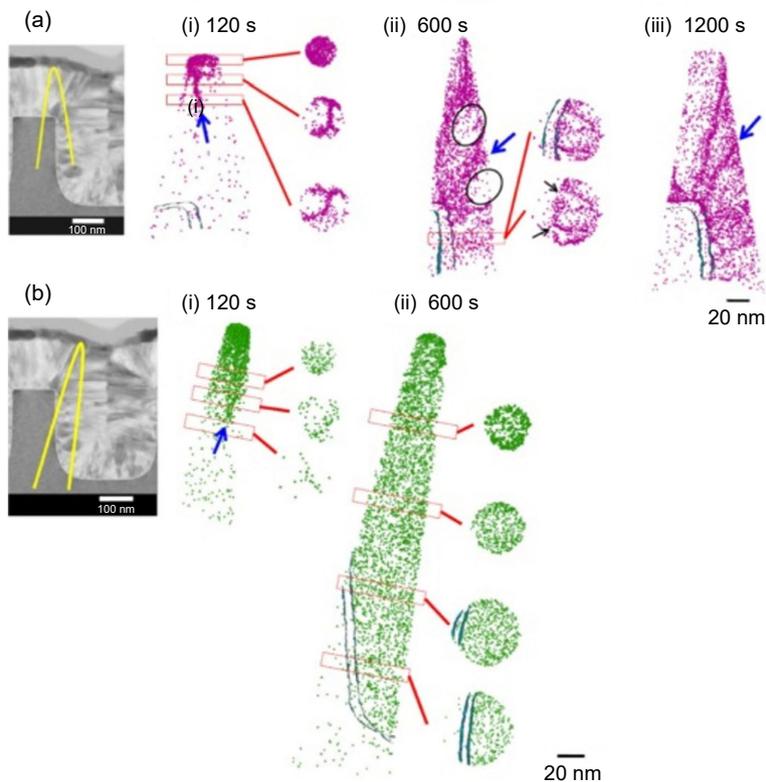


圖 5. (a) N 型與 (b) P 型多晶 Si 閘極金屬氧化物場效電晶體之 APT 分析。紫色為 P 原子分布；綠色為 B 原子分布⁽¹¹⁾。

APT 能夠解析在半導體元件複雜結構中微觀區之元素分布與濃度變化。金屬氧化物場效電晶體雖然為典型之平面型 (planar) 半導體元件，但也設計有複雜而微小的結構。圖 6 為 N 型與 P 型金屬氧化物場效電晶體之結構示意圖與 APT 分析結果⁽¹²⁾，其中 N 型之閘極 Si 摻雜 P，基板 Si 摻雜 B，並可以離子佈植設計 As 摻雜之源/汲極延伸 (source/drain extension, SDE)；P 型之閘極 Si 摻雜 B，基板 Si 摻雜 As，並可以離子佈植設計 B 之 SDE。此 MOSFET 之主要結構已經小於 100 nm，因此可以在 APT 重構中看到完整的結構。我們可以進一步將分析專注於 SDE 與基板通道的界面，如圖 6(c)–6(d) 所示，有無 SDE 設計對 N 型 MOSFET 的基板通道摻雜濃度變異有所影響，但是對於 P 型 MOSFET 的基板通道摻雜濃度則未見顯著濃度變異，此研究成果發現在有 As-SDE 設計的 N 型 MOSFET 中，經過退火後，SDE 中的 B 將擴散至基板通道，改變基板通道之 B 摻雜濃度，相反地，有 B-SDE 設計的 P 型 MOSFET 則因為 As 之擴散係數較低，因此沒有觀察到 As 摻雜濃度變異，此研究成果也解釋了有 SDE 之 N 型 MOSFET 較容易出現電性的變異。

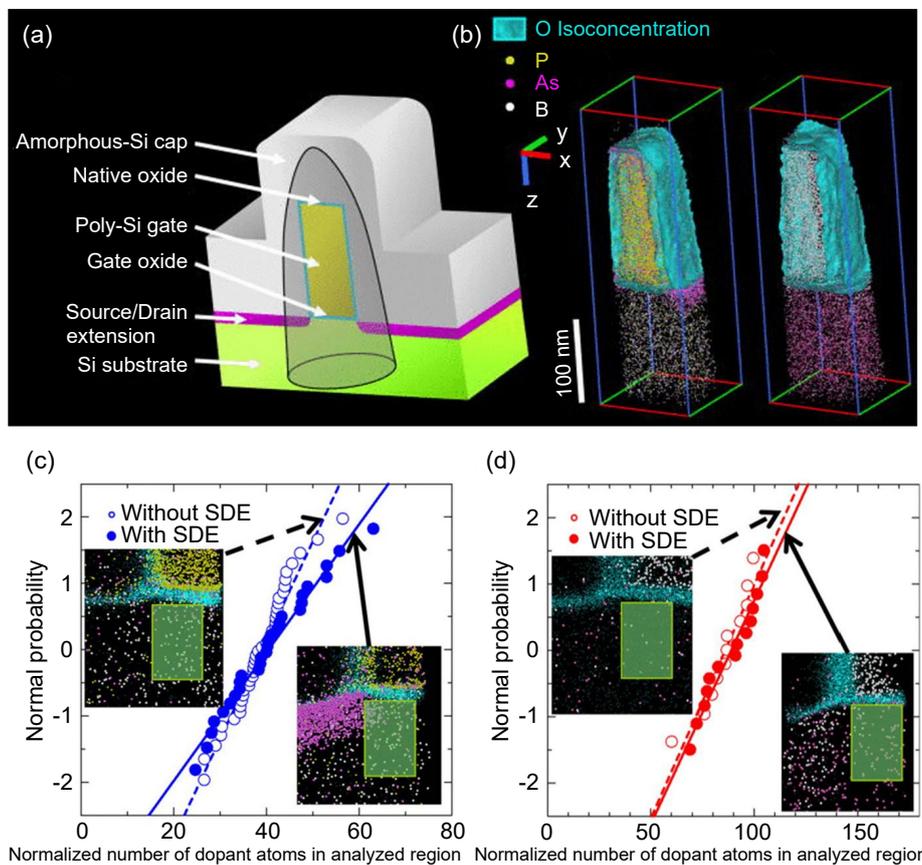


圖 6. N 型與 P 型 MOSFET 之 (a) 結構示意圖、(b) APT 數據重構、以及 (c) N 型與 (d) P 型 MOSFET 基板通道之摻雜原子常態分布圖⁽¹²⁾。

最後，APT 三維重構影像能夠實現先進半導體元件之多位向分析。鰭式場效電晶體 (fin field-effect transistor, FinFET) 即為一種立體型 (3D) 半導體元件，圖 7 為 APT 分析所呈現之鰭式場效電晶體結構與元素分佈。鰭式場效電晶體之結構相當微小、複雜、立體，在一般 TEM 或 STEM 的二維影像分析中經常會有疊影效應，然而，如圖 7 所示，先進元件之鰭式

場效電晶體結構可以完整在單一針尖試樣中完成收集，並且針對目標分析之區域與方向輸出影像與成份訊息，沿著閘條方向觀察源／汲極 (S/D) 與閘極之界面，可以發現退火後源／汲極之 As 摻雜將擴散進入閘極，APT 數據可以進一步呈現 As 濃度變化，用以監控製程效益。由此研究可以得知 APT 在先進半導體元件的材料分析扮演著非常重要的角色。

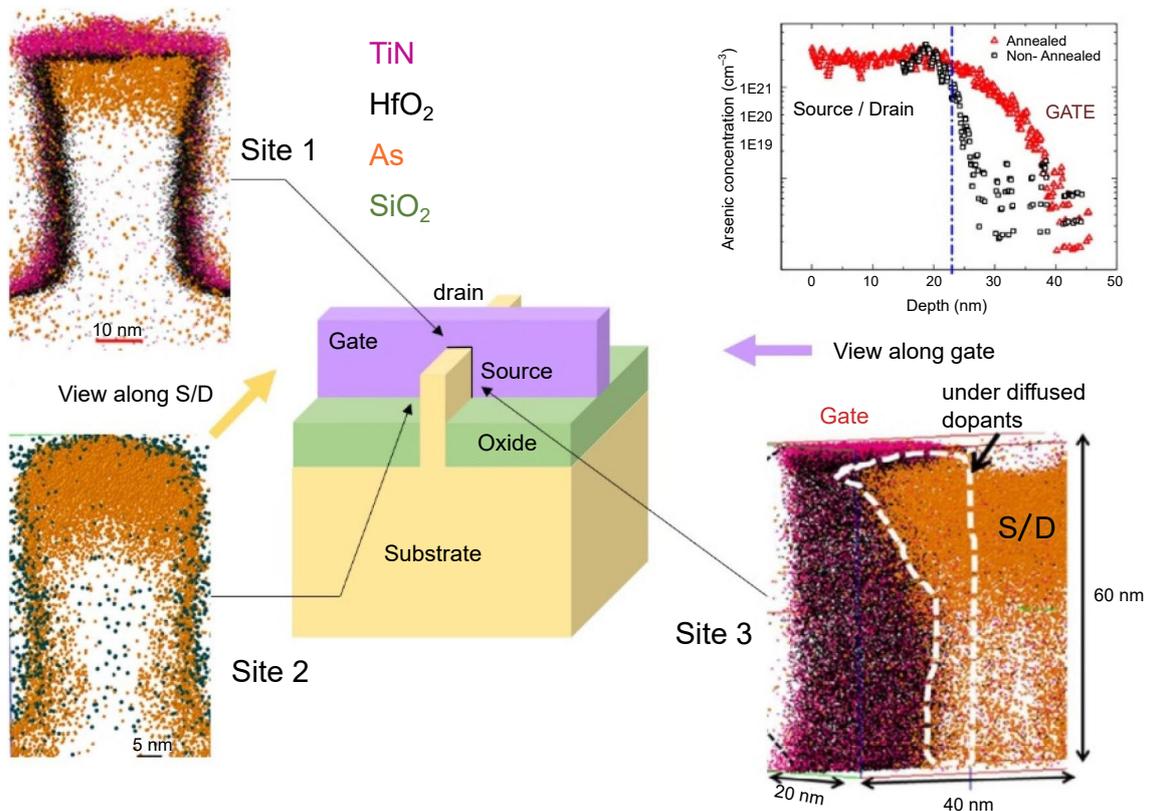


圖 7. 鳍式場效電晶體之結構示意圖與 APT 重構數據於不同位向之觀察：Site 1 為 S/D 被閘極包覆之界面、Site 2 為 S/D 被 SiO₂ 包覆之界面、與 Site 3 為 S/D 與閘極之側向界面觀察及其對應之 As 濃度變化訊息⁽¹³⁾。

三、APT 之半導體元件分析之挑戰

APT 雖然已經在當代半導體的材料分析中展現其不可取代之效能，不過，它仍然有諸多成長空間，我們將其分類為：(1) 半導體產業應用議題、(2) 化學成份定量議題以及 (3) 重構像差議題，我們於以下篇幅逐一詳述之。

在半導體產業應用上，APT 最大的問題在於分析效率⁽¹⁴⁾。在針尖試樣製備上必須使用聚焦離子束 (focus ion beam, FIB)，因此，試片製備效益相當低，最近因為有 Plasma FIB 問世，大幅提升試片製備效率。然而，針尖試樣在 atom probe 中進行有效且長期場蒸發的成功率仍有待提高，雖然 UV 雷射已經大幅優於過往之綠光雷射，未來仍可思考發展深 UV 雷射來提高實驗成功率。最後，一般 APT 數據之收集時間長達 3-5 小時，數據產生之效率相對其它顯微分析技術低，因此，縮短數據收集時間並搭配自動化實驗程序為未來 APT 設備發展之趨勢。

APT 的化學成份偵測極限取決於取樣尺寸、偵測效率、以及質譜背景雜訊，在層狀結構的縱深分析中，增加取樣尺寸確實有助於提高摻雜原子訊號，並提升偵測極限，然而，實際先進半導體元件各結構尺寸都極度微小，以 $20 \times 10 \times 10 \text{ nm}^3$ 的結構體積來說 (在 Si 晶中約 10^5 個 Si 原子)，若能偵測得單一個原子訊號，則理想偵測極限為 10 ppm ($5 \times 10^{17} \text{ \# / cm}^3$)，簡言之，元件結構尺寸將限縮 APT 分析之偵測極限，事實上，此侷限對所有材料顯微分析技術皆無法避免。背景雜訊的重要性在於離子訊號峰高的顯著性是否能夠被確實匡列 (range) 為特定元素離子，雖然 APT 能夠做到單一個原子訊號偵測，然而要產生能進行定量分析的訊號峰，可能要數百個偵測訊號⁽¹⁵⁾。偵測效率直接正比於取樣體積內的原子/離子數量，以 50% 的偵測效率來說，則有其他 50% 的原子沒有被偵測紀錄，故將影響定量分析與統計分析結果⁽¹⁶⁾，以前面所述之 $20 \times 10 \times 10 \text{ nm}^3$ 的結構體積為例，其偵測極限應下降至 20 ppm。綜合以上所述，在實際單一先進半導體元件的分析中，APT 可能難以直接提供統計性分析數據，必須經由多次取樣分析才能呈現統計特徵與意義。最後，在偵測極限的議題中，APT 一直存在其成份訊息正確性如何標定的問題，簡單層狀結構的一維深度分析可以與 SIMS 之實驗數據交互標定，一旦進入複雜的元件結構中，目前不存在能夠與其交互標定的顯微分析技術。

APT 與 SIMS 的交互標定在半導體元件的材料分析中仍然非常重要，一方面 SIMS 在取樣尺寸夠大時可以達到較高的偵測極限，另一方面半導體產業已經長期依賴 SIMS 所量測之數據。圖 8 為 Si 基半導體 B 摻雜的 APT-SIMS 交互標定的縱深濃度分析，其中可以發現摻雜濃度越高時，APT 量測所得到之損失越大，以圖 8(c) 為例，在投射範圍 (Rp) 之濃度損失可以達到 38%。以目前 APT 之基礎理論與實務經驗，認為損失之 B 離子乃形成 multiple hits，係指多個離子幾乎同時抵達偵測器，其原因可能多個離子幾乎同時被場蒸發，也有可能分子離子在游離過程中再分解，這樣的訊號雖然仍會被 microchannel plates (MCP) 記錄，但是無法被重構，因此造成訊號損失。Multiple hits 通常發生於分子離子或輕元素離子，原子若容易在針尖表面進行遷移也有較高機率發生 multiple hits，此外，雷射功率越高時，發生 multiple hits 的機率也會越高。未來面對第三代或第四代半導體時，基材的改變將需要重新建立 APT-SIMS 交互標定的分析資料庫。

APT 之幾何正確性與空間解析度仰賴重構正確性，重構之演算法最早由 Bas 等人發展出來⁽⁵⁾，接著由 Geiser 等人與 Gault 等人分別做出修正與優化^(6, 7)，在低合金量的金屬材料可以達到原子級的空間解析例。高度可靠的重構仰賴以下幾個假設 (1) 針尖前緣為理想半球形、(2) 離子線性投射以及 (3) 均勻場蒸發 (atom-by-atom and layer-by-layer)。然而，在半導體元件的異質結構中常常可以發現針尖材料的場蒸發可能違背後兩項原則，因而造成重構幾何失真或扭曲，最主要原因在於異質結構中有著材料性質的變化，然而目前設備商用軟體之重構參數並不能隨之動態變化，因此造成重構失真，我們將重構上的失真比擬為顯微鏡學中的像差。如圖 9 所示，gate-all-around (GAA) 元件有著複雜的三維異質結構，由內而外為 Si-SiO₂-HfO₂-TiN-Si，故其 APT 數據重構將產生相當大的幾何扭曲，目前設備商用軟體搭載一種 density relaxation 之校正方法^(18, 19)，雖然可以用來修正幾何扭曲，但是其物理意義與正確性標定仍待確認，事實上，目前仍有諸多重構或重構校正法被提出，因此，縮小像差以正確呈現半導體元件之微觀結構為 APT 領域的重要研究方向。

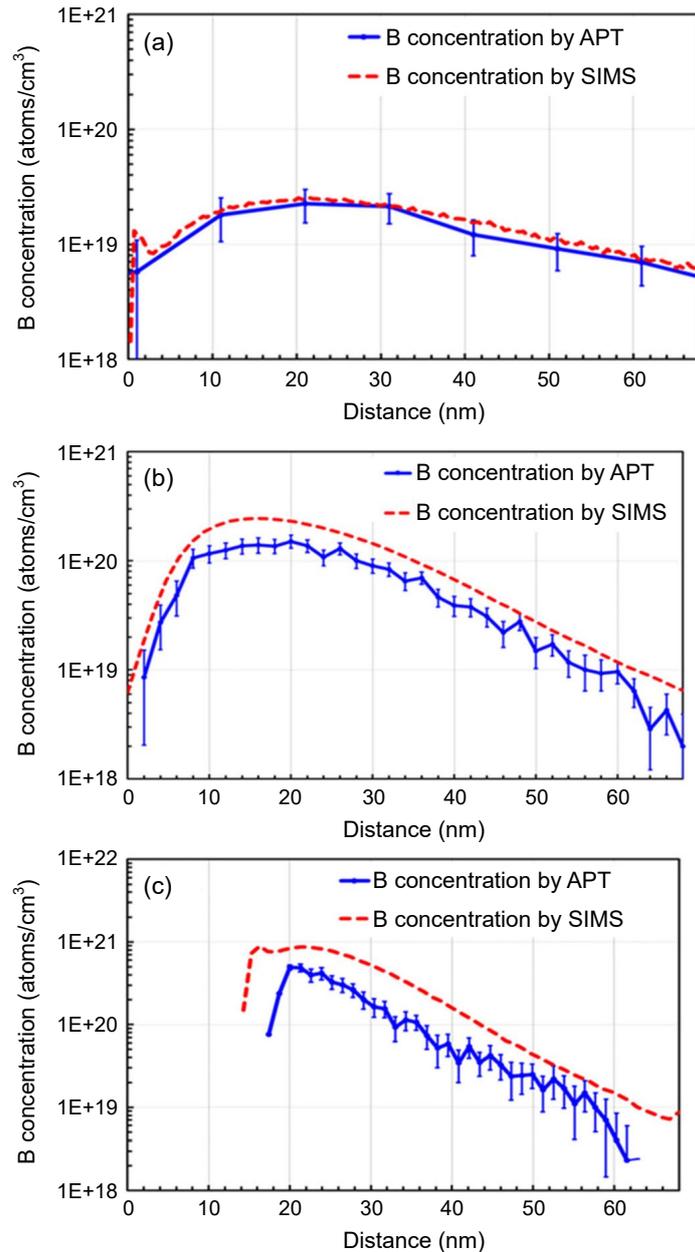


圖 8. APT 與 SIMS 之 Si 晶 B 摻雜縱深濃度交互分析比較：(a) 低度 B 摻雜濃度、(b) 中度 B 摻雜濃度、(c) 高度 B 摻雜濃度⁽¹⁷⁾。

四、結論

原子針尖斷層影像儀 (APT) 擁有獨特的解析能力應用於先進半導體元件，它能夠解析元件或材料內部三維原子分佈，其空間解析度可達 sub-nanometer 等級，而化學成份之解析極限可達 10 ppm，雖然 APT 在分析效率、化學成份定量、重構像差上都有進步與研究的空間，然而在先進半導體元件朝著微小化、複雜化、立體化發展下，APT 已經成為先進半導體產業的關鍵材料顯微分析技術。最後，即使 APT 仍被視為 state-of-art，將它與 STEM 及 SIMS 分析整合應用，仍可挑戰諸多當代元件與材料分析之極限，為科學帶來更多前瞻思維與洞見。

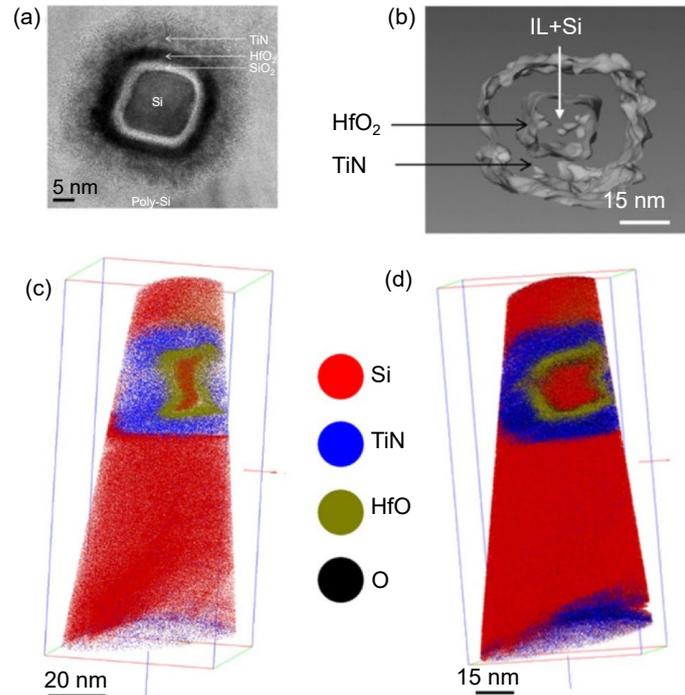


圖 9. GAA 半導體元件之 (a) TEM 截面影像、(b) 電子顯微鏡斷層影像、(c) 標準法重購之 APT 數據、(d) Density Relaxation 法校正後之重構數據⁽²⁰⁾。

誌謝

本文作者感謝國科會暨突破半導體專案計畫之經費支持，計畫編號 NSTC- 110-2119-M-002 -018 -MBK。感謝國立臺灣大學孫苡瑄與文心琪協助校稿。

參考文獻

1. 顏鴻威, 科儀新知, **209**, 29 (2016).
2. David J. Larson, Ty J. Prosa, Robert M. Ulfig, Brian P. Geiser, Thomas F. Kelly, *Local Electrode Atom Probe Tomography: A User's Guide*, New York: Springer (2013).
3. Baptiste Gault, Frederic de Geuser, Leigh T. Stephenson, Michael P. Moody, Barrington C. Muddle and Simon P. Ringer, *Microscopy and Microanalysis* **14**, 296 (2008).
4. Baptiste Gault, Michael P. Moody, Frederic de Geuser, Guy Tsafnat, Alexandre La Fontaine, Leigh T. Stephenson, Daniel Haley, and Simon P., *J. Appl. Phys.* **105**, 034913 (2009).
5. P. Bas, A. Bostel, B. Deconihout, D. Blavette, *Applied Surface Science*, **87-88**, 298 (1995).
6. BP Geiser, DJ Larson, E Oltman, S Gerstl, D Reinhard, TF Kelly and TJ Prosa, *Microscopy and Microanalysis* **15**, 292-293 (2009).
7. B.Gault, D.Haley, F.de Geuser, M. P. Moody, E. A. Marquis, D. J. Larsonad, B. P. Geiserd, *Ultramicroscopy*, **111** (6), 448 (2011).
8. Yongsoo Yang, Chien-Chun Chen, M. C. Scott, Colin Ophus, Rui Xu, Alan Pryor, Li Wu, Fan Sun, Wolfgang Theis, Jihan Zhou, Markus Eisenbach, Paul R. C. Kent, Renat F. Sabirianov, Hao Zeng, Peter Ercius and Jianwei Miao, *Nature*, **542**, 75 (2017).
9. Hung-Wei Yen, *Journal: Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, **250** (2022).
10. K. Thompson, P. L. Flaitz, P. Ronsheim, D. J. Larson, T. F. Kelly, *Science*, **317**, 1370 (2007).

11. Bin Han, Hisashi Takamizawa, Yasuo Shimizu, Koji Inoue, Yasuyoshi Nagai, Fumiko Yano, Yorinobu Kunimune, Masao Inoue, and Akio Nishida, *Applied Physics Letters*, **107**, 023506 (2015).
12. H. Takamizawa, Y. Shimizu, K. Inoue, T. Toyama, N. Okada, M. Kato, H. Uchida, F. Yano, A. Nishida, T. Mogami, and Y. Nagai, *Applied Physics Letters*, **99**, 133502 (2011).
13. A. K. Kambham, A. Kumar, M. Gilbert, W. Vandervorst, *Ultramicroscopy*, **132**, 65 (2013).
14. Alexander Devin Giddings, Sebastian Koelling, Yasuo Shimizu, Robert Estivill, Koji Inoue Wilfried, Vandervorst, Wai KongYeoha, *Scripta Materialia*, **148**, 82 (2018).
15. L. A. Currie, *Analytical Chemistry*, **40**, 586 (1968).
16. F. Danoix, G. Granicher, A. Bostel, D. Blavette, *Ultramicroscopy*, **107**, 739 (2007).
17. Wai Kong Yeoh, Shih-Wei Hung, Shih-Che Chen, Yi-Hsiang Lin, Jang Jung Lee, *Surface and Interface Analysis*, **52**, 318 (2020).
18. F. Vurpillot, D. Larson, A. Cerezo, *Surface and Interface Analysis*, Special Issue: Proceedings of the 48th International Field Emission Symposium, **36** (5-6), 552 (2004).
19. T. J. Prosa, B. P. Geiser, D. Reinhard, Y. Chen, D. J. Larson, *Microscopy and Microanalysis*, **22**, 664 (2016).
20. J. P. Barnes, A. Grenier, I. Mouton, S. Barraud, G. Audoit, J. Bogdanowicz, C. Fleischmann, D. Melkonyan, W. Vandervorst, S. Duguay, N. Rollan, F. Vurpillot, D. Blavette, *Scripta Materialia*, **148**, 91 (2018).

作者簡介

顏鴻威先生為國立臺灣大學材料科學與工程學系博士，曾任香港大學訪問學者與雪梨大學原子針尖科學家，目前擔任國立臺灣大學材料科學與工程學系教授，為我國少數同時專精電子顯微鏡、聚焦離子束顯微鏡、原子針尖斷層影像儀之材料顯微分析技術專家與學者，目前主導建置我國第一部原子針尖斷層影像儀之研究與服務平台。

Hung-Wei (Homer) Yen received his Ph.D. in the Department of Materials Science and Engineering from National Taiwan University. He had worked in the University of Hong Kong as visiting scholar and the University of Sydney as atom probe scientist. Homer Yen is currently a Professor in the Department of Materials Science and Engineering at National Taiwan University. He is a unique microscopist with focal expertise of electron microscopy, focus ion beam, and atom probe tomography. Homer is working to establish the first service and research platform of atom probe tomography.