

三維原子探針技術

APT 簡介



元析科技
AtomSolve.com



Image Courtesy:
Atom Probe Tomography,
Wiley Analytical Science (2012)

元析科技股份有限公司

AtomSolve Technology Corporation

TN00251003T0002

1 APT 技術介紹

三維原子探針 (Atom probe tomography, APT) 技術的前身是場離子顯微鏡 (Field ion microscope, FIM)。如圖1所示，在 FIM 中，金屬樣品被加工成極細的針尖形狀，在腔體內充入氣體，例如 He, H₂ 等，再對樣品附加上電壓，電壓在極細的針尖上形成超強的電場，而吸附在樣品表面的氣體原子被離子化後，便會飛向右側的探測器熒幕。氣體離子轟擊熒幕所形成的圖案，可以反映出原針尖樣品表面的原子排布和晶體軸向的資訊。這一技術由 Erwin Müller 教授及其合作者發明，FIM 技術也被認為是世界上第一種可以實現原子級解析度的成像技術。

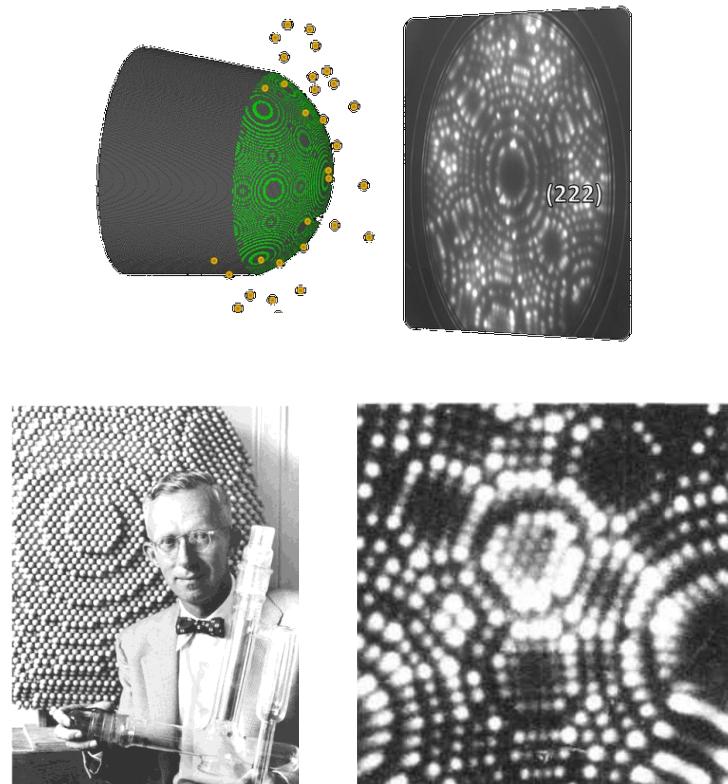


Figure 1: E. Müller 教授以及他所發明的 FIM 技術原理 [1, 2]。

圖2展示的是現代 APT 技術的原理。與 FIM 不同的是，APT 技術中不再使用氣體離子化的方式來成像，而是直接通過對樣品施加高電壓，使得樣品表面的原子直接被電場從樣品表面擊出，然後通過飛行時間質譜儀 (Time of flight mass spectrometer, TOF-MS) 來測量這些被擊出的原子離子的質量-電荷比 (mass-to-charge ratio, m/z)，從而識別出這些原子離子的元素種類。由於 APT 技術可以同時獲取每個原子的位置和元素資訊，因此可以重建出樣品的三維原子結構圖，並且具有極高的空間解析度 (亞納米級) 和化學靈敏度 (可檢測 0.1% 級別的元素)。這使得 APT 技術成為材料科學、納米技術、半導體技術等領域中研究材料微觀結構和組成的強大工具。

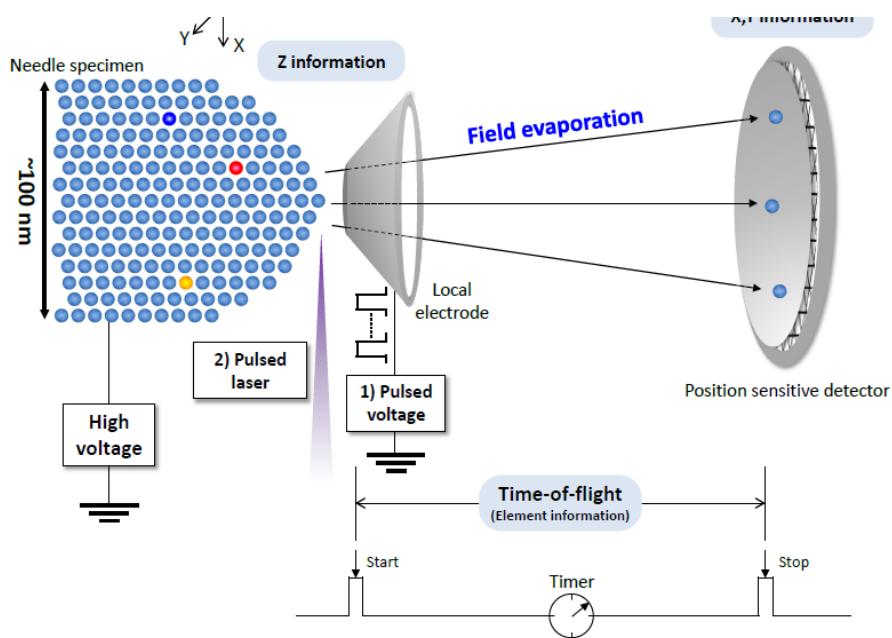


Figure 2: 現代 APT 技術原理 [3]。

圖3展示的是使用聚焦離子束 (Focused ion beam, FIB) 技術製備 APT 分析所需的針尖樣品的過程。首先，在樣品表面沉積一層保護層 (通常是鉑 Pt 或碳 C)，以防止在後續的離子束加工過程中損壞樣品表面。然後，使用高能離子束對樣品進行粗加工，將樣品切割成一個小塊，並且將其提升到一個微小的針尖形狀。接著，使用低能離子束對針尖進行精細加工，以獲得所需的針尖半徑 (通常在 50-100nm 之間)。最後，將製備好的針尖樣品安裝到 APT 儀器中進行分析。FIB 技術可以精確地控制針尖的形狀和尺寸，從而確保 APT 分析的準確性和可靠性。

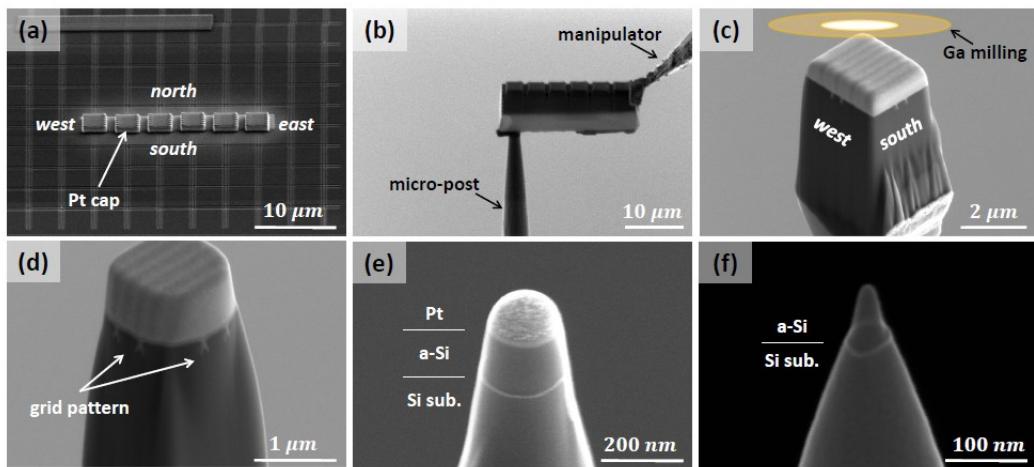


Figure 3: 使用 FIB 製備 APT 分析所需的針尖樣品 [4]。

2 APT 技術在半導體元件的應用

使用鐳射輔助電廠蒸發之後，APT 技術便可以應用在金屬材料以外的半導體材料與元件上。以下展示幾個示例，展示半導體使用在電晶體 transistor、互連 interconnect、離子注入摻雜元素分佈、閘極 gate dielectrics 多層結構分析等。

圖4展示的是 n-MOSFET 與 p-MOSFET 通道摻雜原子分佈與統計分析的結果圖。上半部是三維原子分佈圖，揭示了 B (硼)、P (磷) 與 As (砷) 等摻雜元素的分佈。例如，閘極多晶矽中，n-MOSFET 中的 P 呈現晶界偏析，而 p-MOSFET 中的 B 則均勻分佈。下半部是摻雜統計分佈圖，對 n-MOSFET：有 SDE 時（黑實點）摻雜數量顯著增加，且分佈範圍變寬，表示摻雜波動更大；對 p-MOSFET：有 SDE 時（紅實點）摻雜數量減少，且分佈範圍變窄，表示摻雜波動更小 [5]。

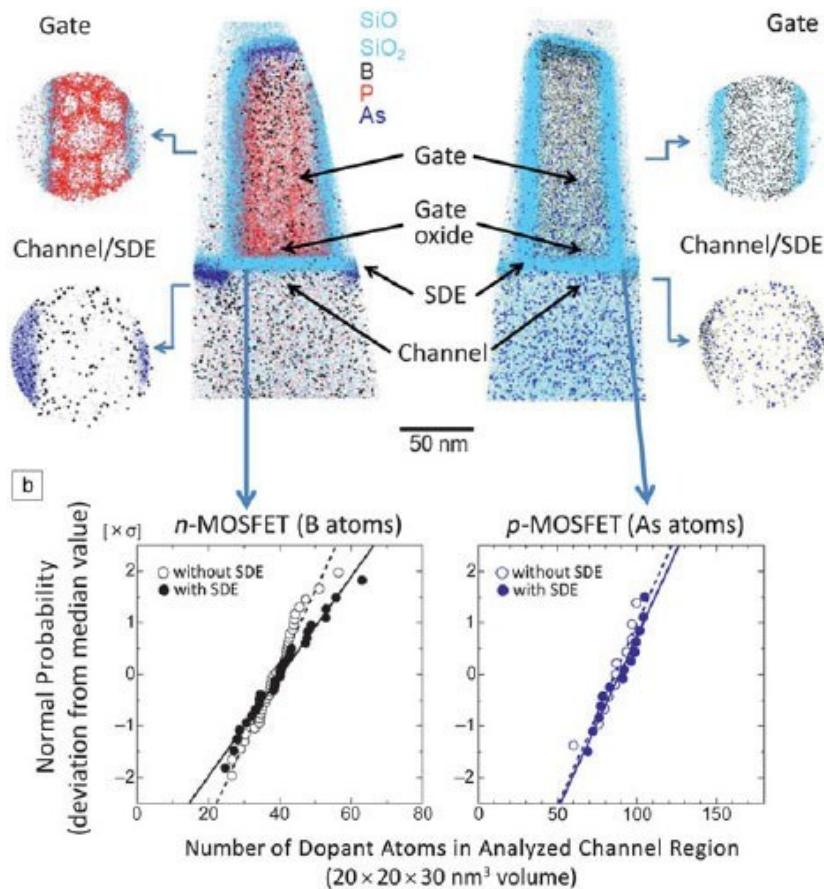


Figure 4: APT 技術應用於電晶體結構與元素分佈的分析 [5]。

圖5展示的是應用於 10nm 節點以下的銅互連結構中，不同阻擋層設計對銅向外擴散的影響的分析。最右側，當阻擋層為 Co 時，銅擴散深度約為 50-60nm，而且主要是通過 Co 的晶界向下穿透；當阻擋層為 Co(W) 時，銅擴散深度僅為 3-4nm，而且主要是在晶界的孔隙處，這是因為 W 對於 Co 的晶界起到了很好的潤濕包裹作用，填充了 Co 的晶界；當阻擋層為 Co(W) 並且在 Cu 中摻入了 Mn 元素以後，Mn 在 Cu 裡面會快速擴散到達界面處，填補孔隙，從而進一步減少了 Cu 的擴散 [6]。

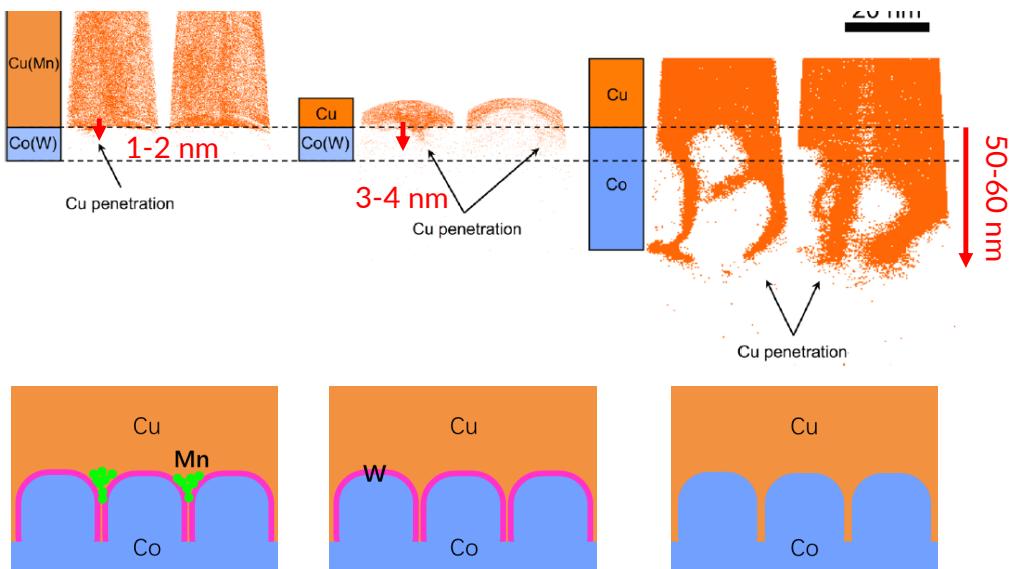


Figure 5: APT 技術應用於晶片內互連銅元素擴散路徑與深度分析 [6]。

圖6展示的是經過納米小孔注入的Ge離子在Si襯底中的分佈，其中納米小孔的直徑為10nm。離子注入進入晶體後，會與晶體原子發生散射，檢測出其分佈範圍與濃度對於摻雜技術的改進有很大幫助。我們可以看出，離子注入後，經過APT技術分析，可以看到Ge離子在Si中的分佈範圍大約在20nm以內，且在深度方向上呈現出高斯分佈的特性[4]。重疊的彩虹色圖是2D contour分佈圖，可以更清楚地看到Ge離子在Si中的濃度分佈情況。而虛線圖則是通過SRIM軟體模擬得到的離子分佈情況，與APT實驗結果有較好的一致性。

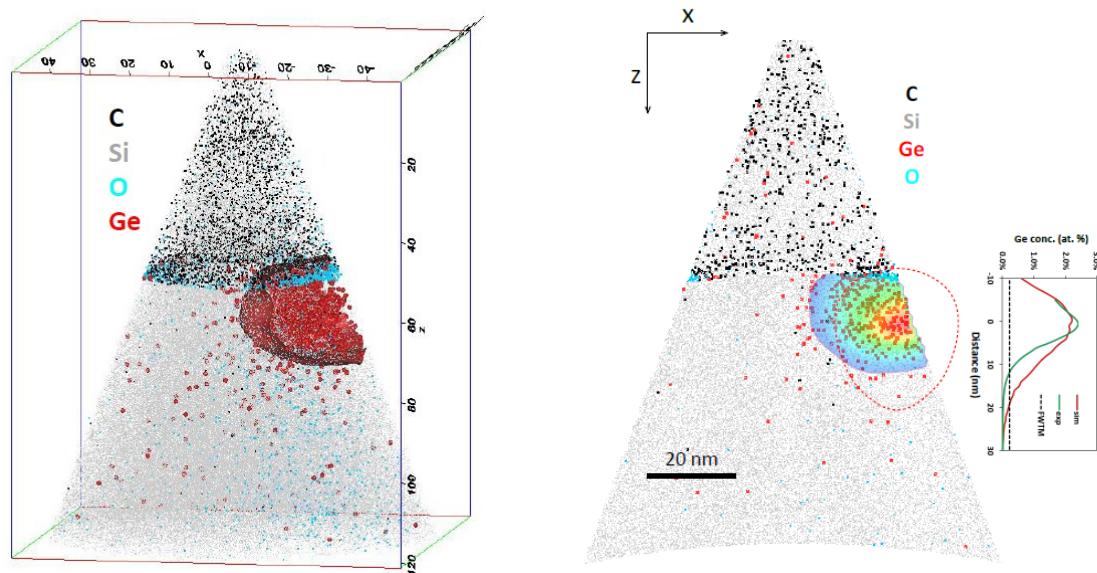


Figure 6: APT 技術應用於離子注入納米小孔後範圍分析，右圖為 2D contour 分佈圖 [4]。

圖7展示的是多層介電層材料的TEM與APT分析結果。可以看出APT技術可以很好地解析多層膜結構，儘管可能存在局部放大(local magnification)效應假象。右側則是多層結構的三種元素

分佈 1D concentration 濃度圖。而下方則是針尖樣品分析結果全圖，我們使用的是截面提取針尖樣品的方式，而檢測的長度超過 700nm。

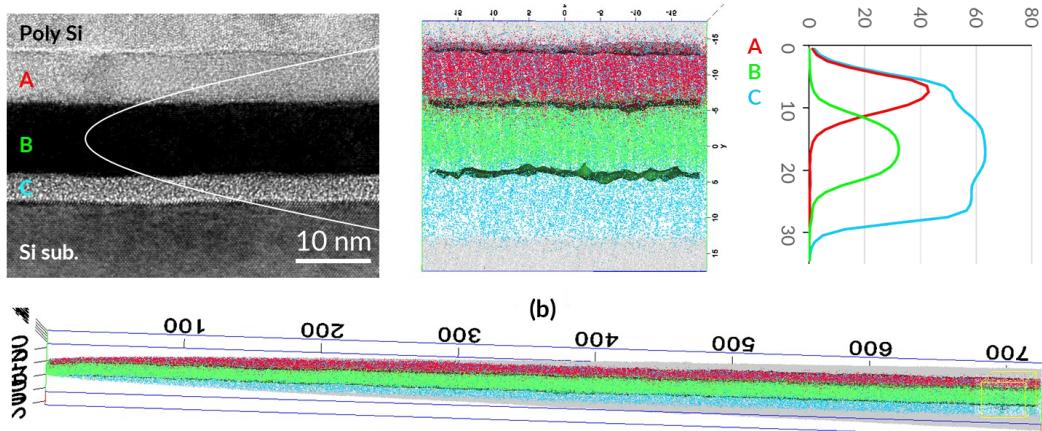


Figure 7: APT 技術應用於 Gate dielectrics 多層結構分析，右圖為 1D concentration profile，資料為未發表數據。

3 APT 技術在金屬材料的應用

圖8展示的是 APT 技術用於評估壓力容器模型合金中銅團簇化與硬化的關係，不同時效時間後 Fe-Cu 合金中銅原子的分佈。可以看出，隨著時效時間的增加，銅原子逐漸從均勻分佈轉變為形成納米級的銅團簇，這些團簇的形成與合金的硬化密切相關 [7]。APT 技術可能是直觀觀測納米團簇的尺寸、形狀和成分的最有效的技術。

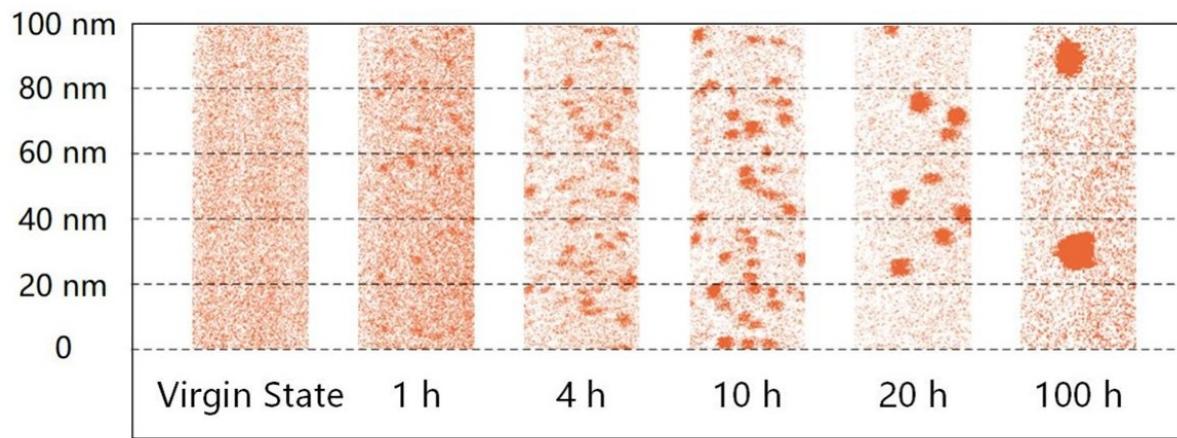


Figure 8: APT 用於評估壓力容器模型合金中銅團簇化與硬化的關係，不同時效時間後 Fe-Cu 合金中銅原子的分佈 [7]。

圖9展示的是 APT 技術用於分析 NbSn 超導線材中的晶界偏析。圖中紅色和藍墨色分別為 Cu 和 Ti。右圖顯示的是晶界中 Cu 原子的分佈，上下等濃度面為 1.5% [8]。可以看出，Cu 與 Ti 原子

在晶界處有明顯的偏析現象。因此，通過 APT 技術分析晶界偏析，有助於理解和優化超導材料的微觀結構，從而提升其性能。

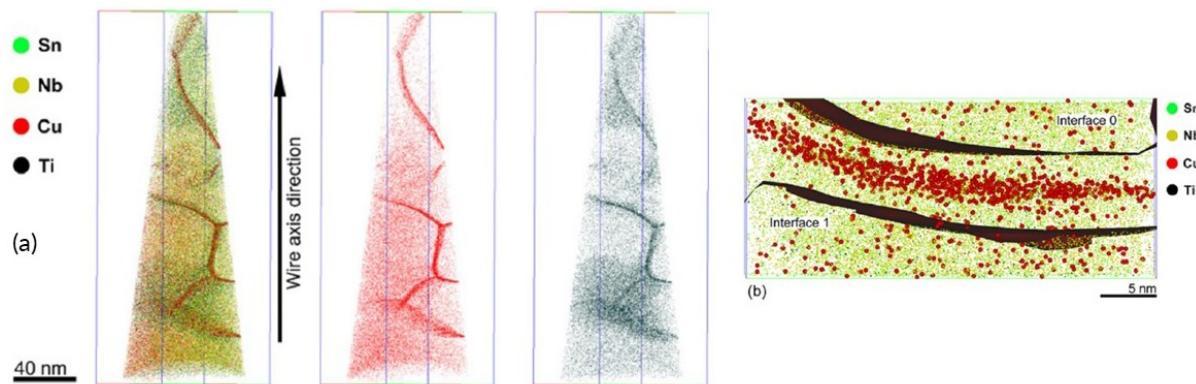


Figure 9: APT 用於分析 NbSn 超導線材中的晶界偏析：紅色和藍墨色分別為 Cu 和 Ti。右圖顯示的是晶界中 Cu 原子的分佈，上下等濃度面為 1.5% [8]。

圖10展示的是 APT 技術用於研究抗輻射的高熵合金 high entropy alloy (HEA)。圖中顯示了在不同元素的分佈情況。可以看出，隨著輻射劑量的增加，某些元素如 Cr 和 V 在材料中形成了納米級的富集區，而其他元素如 Fe 和 Ni 則保持較為均勻的分佈 [9]。這些微觀結構的變化對 HEA 的機械性能和抗輻射性能有重要影響。APT 技術提供了對 HEA 中元素分佈和相互作用的深入理解，有助於設計更優秀的抗輻射材料。

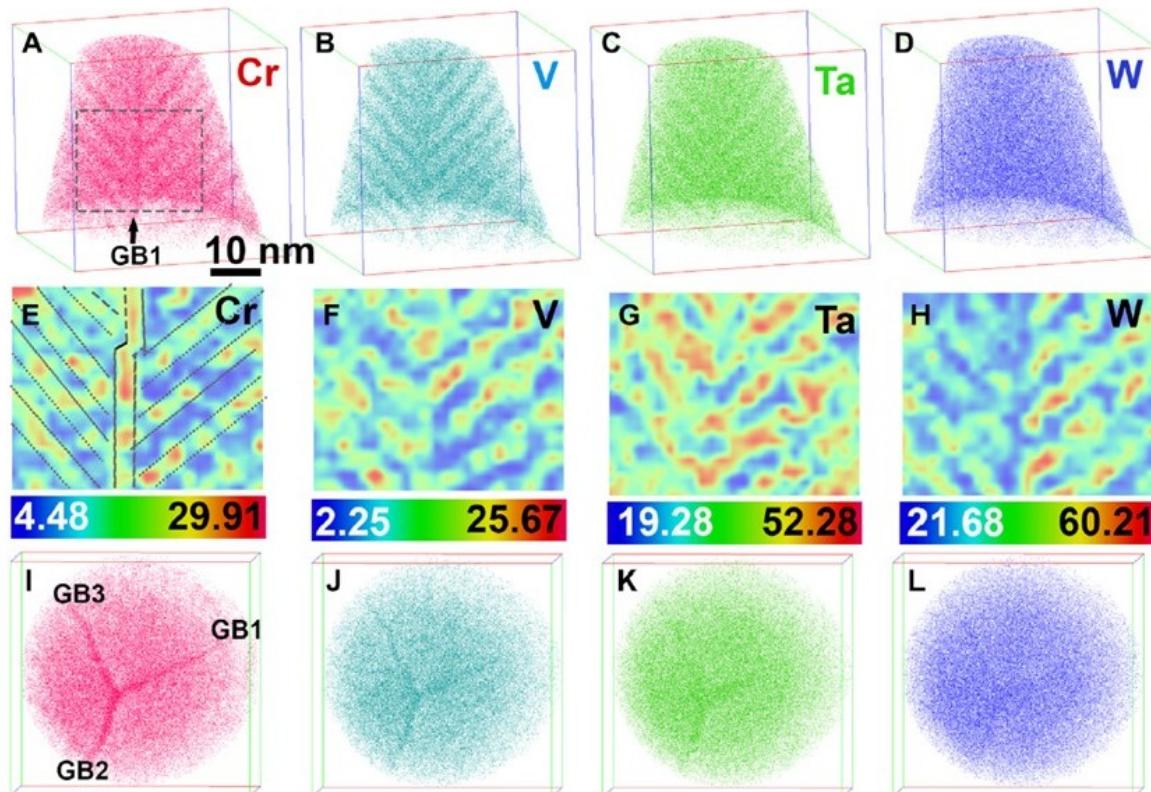


Figure 10: APT 用於抗輻射的高熵合金 high entropy alloy 的研究 [9]。



References

- [1] IFES. *Erwin Müller: the Father of the Atom-Probe*. [Online; accessed 2025-10-07]. URL: <https://www.fieldemission.org/article.php?id=history>.
- [2] Baptiste Gault **and others**. *Atom probe microscopy*. volume 160. Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] Yasuo Shimizu **and others**. “Elemental distribution analysis of semiconductor nanostructures with atom probe tomography”. in *Journal of the Vacuum Society of Japan*: 56.9 (2013), **page** 340.
- [4] Y Tu **and others**. “Atom probe tomographic assessment of the distribution of germanium atoms implanted in a silicon matrix through nano-apertures”. in *Nanotechnology*: 28.38 (2017), **page** 385301.
- [5] David J Larson **and others**. “Atom probe tomography of nanoscale electronic materials”. in *Mrs Bulletin*: 41.1 (2016), **pages** 30–34.
- [6] K Shima **and others**. “Role of W and Mn for reliable 1X nanometer-node ultra-large-scale integration Cu interconnects proved by atom probe tomography”. in *Applied Physics Letters*: 105.13 (2014).
- [7] Wenqing Jia **and others**. “Magnetic Indicator for Evaluating Cu Clustering and Hardening Effect in RPV Model Alloy”. in *Metals*: 14.9 (2024), **page** 973.
- [8] MJR Sandim **and others**. “Grain boundary segregation in a bronze-route Nb3Sn superconducting wire studied by atom probe tomography”. in *Superconductor Science and Technology*: 26.5 (2013), **page** 055008.
- [9] Osman El-Atwani **and others**. “Outstanding radiation resistance of tungsten-based high-entropy alloys”. in *Science advances*: 5.3 (2019), eaav2002.

聯繫方式

T.J. Fang, 業務經理
Email: tjfang@gmail.com
Email: tjfang@post.harvard.edu
Tel: +886.932.186.234
元析科技股份有限公司
地址: 台南市仁德區義林路 256 巷 168 號
Web: <https://www.atomsolve.com>

聲明

此教程中的內容為公開資訊，請自由將本報告轉發給您的同仁。

其它技術

- **椭偏儀 Spectroscopic Ellipsometry**

<https://www.atomsolve.com/detailed-introductions/se-details>

- **聚焦離子束掃描電鏡 FIB-SEM**

<https://www.atomsolve.com/detailed-introductions/fib>

- **3D 建模與仿真 3D modeling and simulation**

<https://www.atomsolve.com/detailed-introductions/3drendering>

- **電感耦合電漿體質譜法 ICP-MS**

<https://www.atomsolve.com/detailed-introductions/icpms-details>

- **穿透式電子顯微鏡 Transmission electron microscope**

<https://www.atomsolve.com/detailed-introductions/tem-details>