

三維原子探針簡介

Three-Dimensional Atom Probe

顏鴻威

Hung-Wei Yen

三維原子探針是當代唯一能夠提供三維度影像以及定量化學成分鑑定的原子級材料分析技術。它已經被應用在冶金、電子、半導體、光電、能源、地質、以及生醫研究等諸多科技領域。本文主要提供了原子探針的歷史與原理，期待能供讀者對三維原子探針的基礎認識。

Three-Dimensional Atom Probe (3DAP) is the only materials characterization technology offering capabilities for both three-dimensional image and chemical composition measurement at the atomic scale. It has been applied to many scientific and technological fields, including metallurgy, electronics, semiconductor, optoelectronics, energy, geology, and biomedical researches. The current article provides an introduction to history and principle of atom probe. It is expected to give readers basic understanding in 3D atom probe.

一、原子探針歷史

1955 年 10 月 11 日 Kenwar Bahadur 與 Erwin W. Muller 於美國賓州大學首次以場離子顯微鏡 (field ion microscope, FIM) 擷取到氣體離子影像⁽³⁾，此後約 50 年間，科學家們一步步地從 FIM 的基礎走向三維原子探針的廣泛應用。回到 1935 年，Muller 首先構思了一種新型態的顯微鏡⁽⁴⁾，乃直接於真空系統中一端放置材料針尖，而另一端放置螢光板，而當針尖端與螢光板存在一電位差 (V) 時，其針尖的半徑 (r) 將對針尖電場 (F) 有放大效應：

$$E = \frac{V}{kr}$$

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負電位，在約 1

μm 半徑的針尖就可以獲得約 1 V/nm 的電場，成為場發射技術的重要突破。直到 1951 年，Muller 才首次發表了完整的 FIM 論文⁽⁵⁾，將針尖端施加正偏壓並於真空中導入氣體，附著於針尖的氣體分子或原子，受到偏壓帶走其電子而離子化成為帶正電離子，正電離子與正電之針尖相斥，便沿電場飛射擊中螢光板，該氣體稱為成像氣體 (image gas)，針尖表面的原子排列結構便能由成像氣體投射形成。到了 1955 年，Muller 團隊降低了針尖溫度以避免原子熱擾動，並選用氦氣 (He) 為成像氣體，由氦離子投射出鎢針尖表面的原子構造與排列，圖 1 為鎢針尖試樣於 FIM 所收集的影像，其中每一個小亮點，即代表一個 He 離子的影像訊號，同時夾帶著針尖表面晶面與原子排列的訊息。1955 年 10 月 11 日 Bahadur 與 Müller 的實驗成為原子影像 (atomic image) 歷史上重要的一刻⁽³⁾。此外，Müller

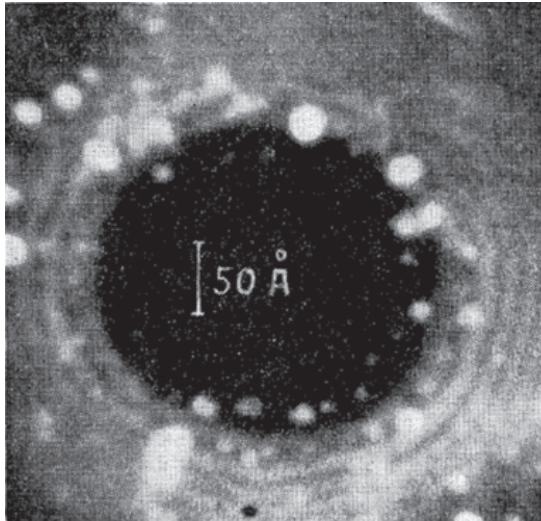


圖 1. 場離子顯微鏡中鎢針尖之氮離子投射影像，此為人類第一張原子級影像⁽³⁾。

在 1953 年論文中也同時發表了針尖的鎢原子也被電場扯出 (tear-off) 材料表面⁽⁶⁾，此即為原子探針原理中的場蒸發 (field evaporation) 現象。

原子探針 (atom probe, AP) 可說是一部能夠以質譜儀設備分析原子種類的場離子顯微鏡，而第一部原子探針場離子顯微鏡 (atom-probe field ion microscope) 始於 1967 年 Muller、Panitz 以及 McLane 的設計⁽⁷⁾。原子探針最主要於螢光板中央整合了入口光圈 (entrance aperture)，以利質譜儀透過飛時 (time-of-flight, TOF) 測距來解析元素離子之質荷比。雖然得以獲得單原子偵測的質譜儀，但當時光圈的設計卻大幅限制了原子探針質譜儀的偵測效率。隨後原子探針的發展便專注在偵測效率的提升，其中包含光圈的移除以及單原子偵測技術，最具代表性者為 1973 年 John A. Panitz 所發表的 10-cm Atom Probe⁽⁸⁾，此時原子針尖技術已經不但能夠以單場蒸發脈衝來量測材料表面的荷質譜，並也能夠獲得材料表面原子分布的二維影像。值得注意的是，在原子探針技術的發展中，我國中央研究院鄭天佐院士做出許多重要貢獻，並於 1975 年開始經營賓州大學的場發射實驗室。在儀器發展上，鄭院士 1980 年開創的雷射原子探針⁽⁹⁾，解決了 Müller 電壓脈衝原子探針的缺陷，解析度較當時電壓脈衝原子探針提高了 1000 倍，同時首次可進行離子能

量分析，並能夠分析半導體與絕緣體等重要材料。

在 Panitz 的啟發下，最早的三維原子探針概念由 Michael K. Miller 提出，他也在 1986 年發展了第一部三維原子探針⁽¹⁰⁾，然而當時所採用的偵測器未竟優化，故實驗結果有所侷限。1988 年牛津大學的 Alfred Cerezo 以及 George D.W. Smith 等人正式發表了第一部 Position-Sensitive Atom Probe (PoSAP)⁽¹¹⁾，其最大特色為其單原子偵測器為一對的 microchannel plates 以及 wedge-and-strip 的正電極，此偵測器能夠分析撞擊離子的偵測器上之 (X, Y) 座標。隨後法國盧昂大學的 Didier Blavette 等人在 1993 年終於發展了第一部 Tomographic Atom Probe (TAP)⁽¹²⁾，實現了三維影像重構的目標，但由於實驗的困難度，原子探針技術一直未被廣泛應用。直到西元 2003 年，Tom E. Kelly 導入近域電極 (local electrode) 於原子探針中，使該領域有了重大的改變⁽¹²⁾。近域電極的裝設位置相當靠近針尖，且其光圈孔徑角度較大，故近域電極原子探針 (local electrode atom probe, LEA) 具有較高偵測效率與頻率，並且能在較低的高電壓產生高密度的高電場來抽離針尖表面原子。於是，近域電極原子探針被廣泛用來研究金屬材料，而近域電極原子探針的基本架構 (如圖 2) 也被固定下來成為今日的三維原子探針。電壓脈衝一般僅能對金屬材料進行場蒸發，而 2005 年雷射脈衝被整合於近域電極原子探針系統中，並使得非導體材料的三維原子探針實驗得以實現，更加大幅拓展了三維原子探針的應用。

二、原子探針原理與結構

原子探針與場離子顯微鏡於原理上的重大差異在於場蒸發 (field evaporation) 之物理機制。以下物理模型乃 Muller 於場蒸發理論之初所建立，近代學者亦同時考慮量子物理建立新模型，本文仍以 Müller 之傳統模型來介紹場蒸發現象使讀者較容易理解⁽¹³⁾。如圖 3(a) 所示，在無電場作用下，將材料表面的原子游離為帶 n 價正電之離子所需能量為 (Q_0)：

$$Q_0 = \Lambda + \sum_i^n I_i - n\phi_e$$

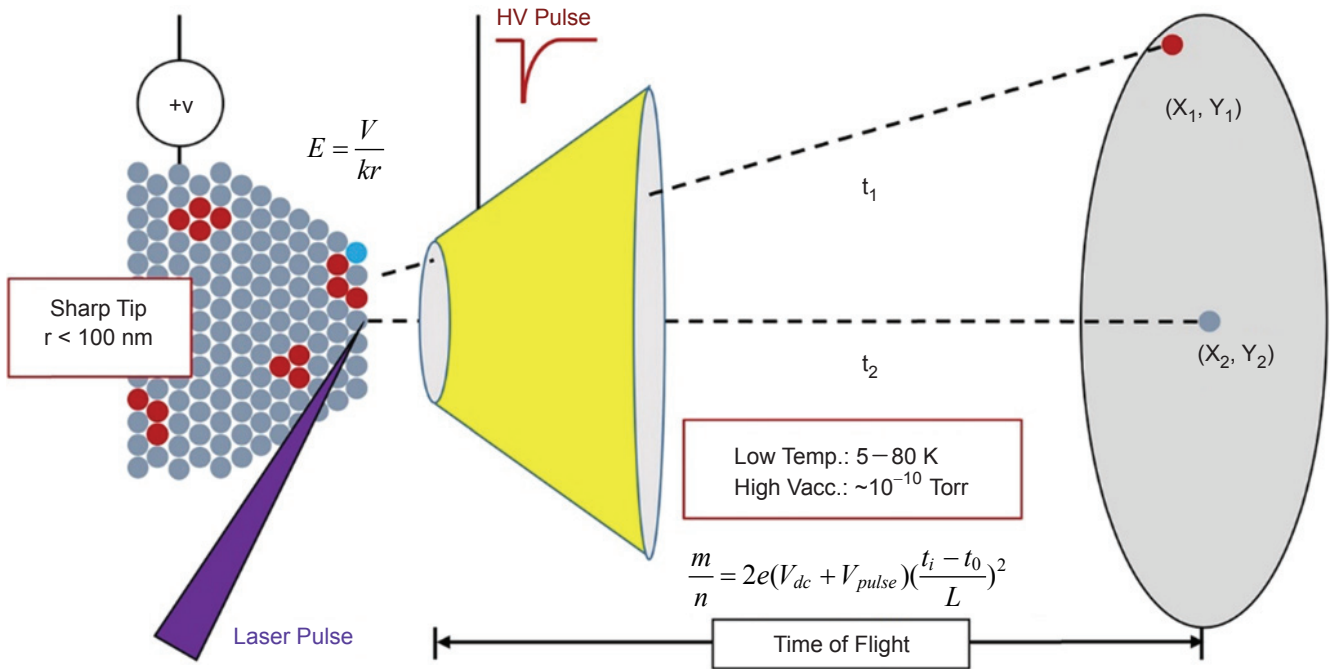


圖 2. 近代三維原子探針之設備基本架構，由左而右依序為針尖試樣、近域電極以及偵測器，而針尖可由近域電極給予電壓脈衝或者由飛秒雷射給予雷射脈衝。

其中 I_i 為單價離子化所需之能量，而 ϕ_e 為電子功函數。若在電場 (F) 作用下，則游離該表面原子所需克服的能障可以表示為：

$$Q(F) = Q_0 - \sqrt{\frac{n^3 e^3 F}{4\pi\epsilon_0}}$$

其中 ϵ_0 為真空中之介電常數， e 為電子電量。當能障為零 ($Q(F) = 0$) 時，可以定義得到一個材料的特徵參數稱為蒸發場 (F_{evap} , evaporation field)：

$$F_{\text{evap}} = \frac{4\pi\epsilon_0}{n^3 e^3} Q_0^2$$

因此，若以熱激發之模型來描述場蒸發，則由 Maxwell-Boltzmann 方程式以及 Arrhenius 定律可推得場蒸發速率 (Φ_{evap}) 之關係為

$$\Phi_{\text{evap}} = \nu_0 \exp\left(-\frac{Q(F)}{k_B T}\right)$$

其中 ν_0 為原子之熱擾動頻率。換言之，如果要達到固定的場蒸發速率，則所需電場與溫度關係可表示為：

$$\frac{F}{F_{\text{evap}}} = \left(1 + \frac{k_B T}{Q_0} \ln \frac{\Phi_{\text{evap}}}{\nu_0}\right)^2$$

最後考慮針尖場放大效應，則固定的場蒸發速率下所需電場與溫度關係可簡化為一線性關係：

$$V = a + bT。$$

所以，如圖 2(b) 所示，如果要使蒸發速率瞬間達到目標值，可以瞬間提供一個電壓脈衝或者溫度脈衝。故在原子探針中，若提供電壓脈衝則稱為 voltage mode，若以雷射提供溫度脈衝則稱為 laser mode。而在脈衝之間，則假設材料表面原子將一層一層依序被場蒸發游離。

近代原子探針之簡易構造如圖 2 所示。首先其工作環境必須是超高真空 ($\sim 10^{-10}$ torr)，以此避免場蒸發之離子碰撞氣體分子而產生雜訊，而針尖溫

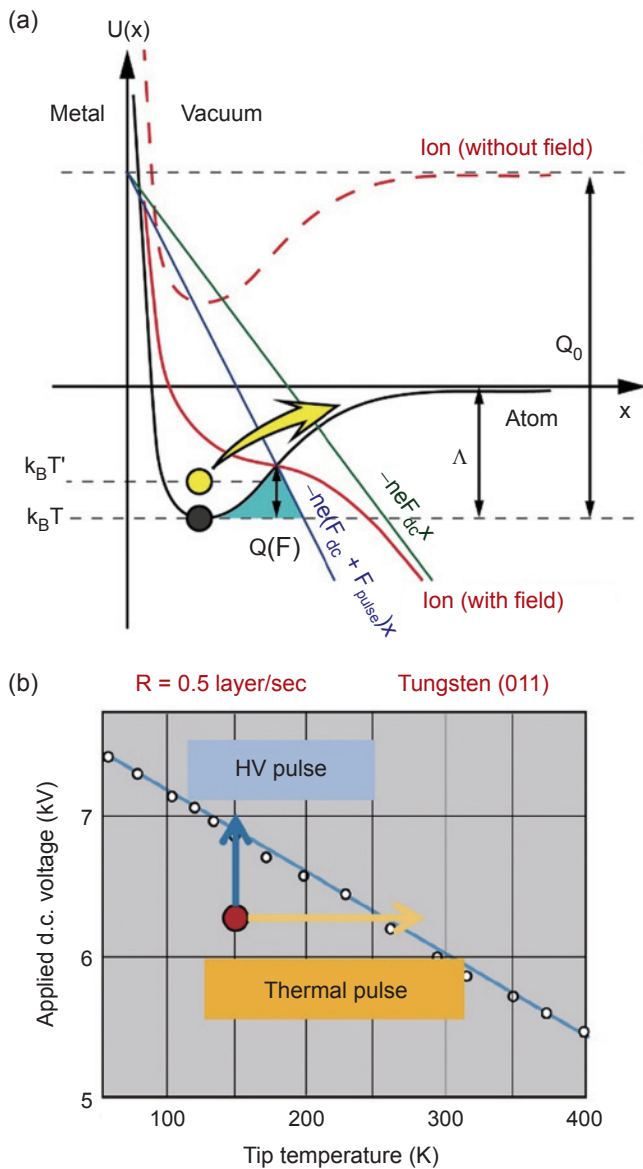


圖 3. (a) 場蒸發理論之物理模型以及 (b) 固定場蒸發速率下，電壓與溫度之線性關係。

度必須達 80 K 以下，以此壓制材料表面原子的擾動，且試樣針尖半徑須小於 100 奈米。針尖前端置有一個近域電極 (local electrode)，能夠給予計數的負偏壓脈衝，而近域電極的中心有一孔洞做為入口光圈，與過去的 PoSAP 相比，近域電極一方面相當靠近針尖，且其光圈孔徑角度較大，故能在較低的高電壓下抽離針尖表面原子，近域電極也限制了原子探針的偵測效率，簡言之，並非所有蒸發的離子都會通過近域電極，目前 CAMECA 公司所生產

的最新型 LEAP 5000-XS 之偵測效率可達約 80%。此近域電極的設計對原子探針的發展相當重要，故此類型原子探針又稱為近域電極原子探針。原子探針運作時，針尖端會被施以正偏壓 (V_{dc})，待負偏壓脈衝或者雷射脈衝施加的一瞬間，表面原子被場蒸發後通過近域電極並擊中偵測器，每一個脈衝間幾乎只有單層原子層被場蒸發，而隨著實驗進行，針尖半徑會越來越粗，所以 V_{dc} 必須隨之逐漸增大以維持蒸發速率。脈衝與偵測器之間的時間差能夠獲得離子的飛行時間，並分析得到離子之質荷比；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；而每一個脈衝間的順序則在重構中用來估算原子的深度 (z)。因此，近域電極原子探針經重構後之數據能夠同時擁有原子級解析度、元素偵測效率以及三維影像三大顯微分析訴求。

三、三維重構 (Tomographic Reconstruction)

原子探針的重構程序雖然相當直觀，首先仍須先了解圖 4 之幾何關係。其中我們假設離子自材料表面是以直線投射至偵測器，故只要已知投射的放大率 (M)，那麼偵測器所得之 (X, Y) 座標便能夠透過以下關係直接建立出原子 (離子) 在材料表面的座標位置 (x, y)：

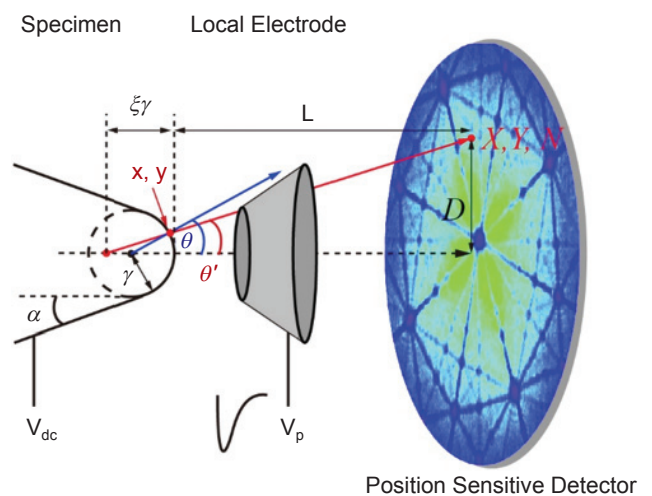


圖 4. 原子探針之離子投射路徑與重構幾何關係。

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

不過，離子的投射中心並非針尖曲率中心，一般投射中心落於更深處，故投射放大率 (M) 必須由以下關係求得：

$$M = \frac{\xi r}{L + \xi r} \sim \frac{\xi r}{l}$$

其中 L 為針尖至偵測器之距離， r 為針尖曲率半徑， ξ 則稱為影像壓縮因子 (image compression factor)，影像壓縮因子可由投射角計算為

$$\xi = \frac{\theta'}{\theta} \quad \text{且} \quad \theta' = \arctan \frac{D}{L}$$

其中 θ' 為真實投射角，而 θ 為針尖球面法向量投射角。一般而言，影像壓縮因子介於 1–2 間。Baptiste 等人提出利用偵測器上的晶體方向角訊息校正影像壓縮因子，使得重構以後的數據能夠同時具有原子尺度的空間解析度，同時晶體方向與晶面方向的角空間解析度也得到解決方法^(14, 15)。

原子的深度方向座標 (z_i) 則以原子層擊中偵測器的順序 (i) 來計算。首先，場蒸散之離子總體積 (V_{evap}) 可由每個離子的體積來加總：

$$V_{evap} = \sum_i^n \Omega_i = n_{evap} \Omega$$

其中為平均原子體積，而 n_{evap} 為場蒸散之總離子數量。然而，原子針尖因為近域電極使得偵測效率 (η) 有限，實際上所偵測之離子總數為 $n_d = \eta n_{evap}$ 。另一方面場蒸散之離子總體積 (V_{evap}) 亦可由分析體積隨深度變化之函數 ($w_v(z)dz$) 的積分來求得

$$V_{evap} = \int_0^z w_v(z) dz$$

結合以上關係可得

$$dz_i = dz = \frac{\Omega}{\eta w_v(z)}$$

而不同的重構模型技術中，主要的差異來自於處理 $w(x)$ 的方法。常用的方法為 Bas 等人所建立， $w_v(z)$ 可以表示為：

$$W_v(z) = S_a = \frac{S_D}{M^2}$$

其中 S_a 為分析之表面積，而 S_D 為偵測器尺寸面積。如果進一步考慮針尖場放大效應：

$$F = \frac{V}{kr}$$

則可以得到

$$dz_i = \frac{\Omega L^2 k^2 F^2}{\eta S_D \xi^2 V^2}$$

如果已知針尖之原始半徑，那麼便能利用起始場蒸發之電壓估算 kF 之數值，隨之能夠以線性關係估算針尖半徑隨電壓之變化。而原子於針尖的深度座標即可定義為

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

其中增加正射影之修正項：

$$dz' = r_i - \sqrt{r_i^2 - (x^2 + y^2)}$$

由以上三維重構的關係式可知，針尖半徑以及影像壓縮因子的估算非常重要，這些參數的估算錯誤將造成重構的三維影像扭曲變形。其中針尖半徑可以透過其他電子顯微鏡影像來拍攝擷取，而影像壓縮因子可以利用偵測器上的晶體方向角訊息來校正。不過，高合金材料或者非晶材料並不會在偵測器上留下晶體訊息，故其數據重構相當具挑戰性。

針尖原子離開晶體並以離子投射至偵測器的過程與路徑並非完全均勻，沿部分晶體方向的投射會在偵測器上留下密度較低的區域，被稱為極點 (crystallography pole)。這些極點雖然離子密度較不均勻，卻可以用來校正重構時的角空間與長度空間，此外，沿著這些極點的方向可以找到材

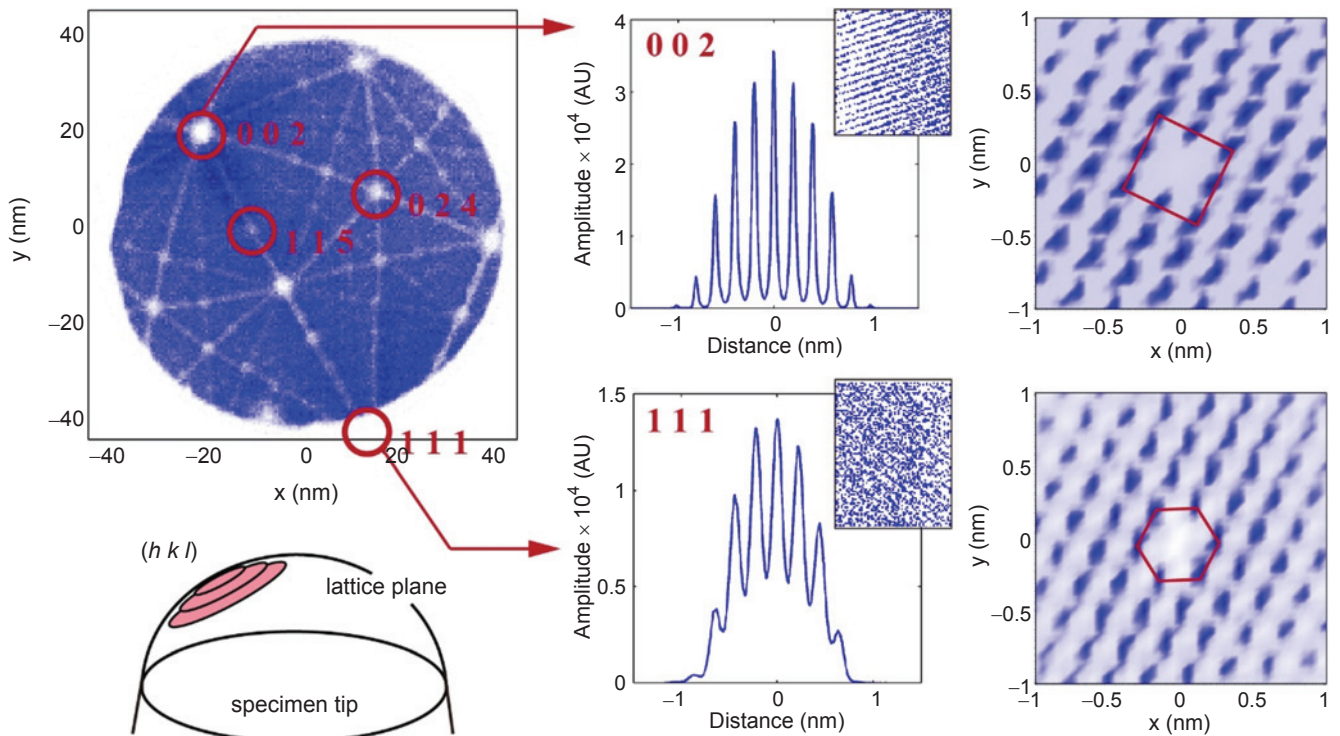


圖 5. 重構後 (0 0 2) 與 (1 1 1) 極點方向之縱向 SDM 以及橫向 SDM。

料中的晶面訊息。圖 5 為成功重構後的數據⁽¹⁶⁾，沿著各極點方向可以觀測到晶面，利用空間分佈圖 (spatial distribution map, SDM) 的計算可以得到晶面間距與相鄰原子排列關係，也肯定了原子探針技術的解析度與重構正確性。然而，因為場蒸發機制與投射變異度的關係，原子探針的縱向解析度 (depth resolution) 會較橫向解析 (lateral resolution) 度優異。

四、原子針尖質譜儀

由上述可知，原子探針之質譜儀乃透過飛時測距來計算。如圖 2 所示，當近域電極給予電壓脈衝或光源給予雷射脈衝之時間為 t_i ，而離子命中偵測器的時間為 t ，假設離子待電荷量為 n ，其質量為 m ，則質荷比可以計算為

$$\frac{m}{n} = 2e(V_{dc} + V_{pulse}) \left(\frac{t - t_i}{L} \right)$$

其中 L 為飛行距離，即試樣針尖到偵測器之距離，另外，當使用雷射模式時，則 V_{pulse} 為零。

圖 6(a) 為鎳基合金材料之原子探針 (LEAP 5000-XS) 之質荷譜，其解析度已經相當高。如果偵測器再加裝反射器 (reflectron) 來延長離子飛行的距離，便能夠提高質荷譜之解析度。圖 6(b) 為鎳基合金材料之含反射器原子探針之質荷譜，其峰寬明顯較窄，顯示其解析力較優異。不過，反射器的裝設將會降低原子探針之總體偵測效率，目前 CAMECA 公司所生產加裝反射器的 LEAP 5000-XR 之偵測效率可達約 50%。此外，即使加裝反射器仍然有些離子沒有辦法區分，例如 Figure 6(a) 與 6(b) 中的 $^{27}\text{Al}^{+1}$ 、 $^{54}\text{Fe}^{+2}$ 、 $^{54}\text{Cr}^{+2}$ 三者則無法區分。如果材料中僅存在其中一種元素，判定時可利用各元素之同位素含量比例做為參考來標定，但如果存在一種以上，疊峰的部分只能以一種最主要的離子來標定，所以當呈現元素分布時，便會造成誤差。不過，當進行區域成分定量時，仍可透過各元素之同位素比例交叉比對分析 (isotope deconvolution) 來定量。

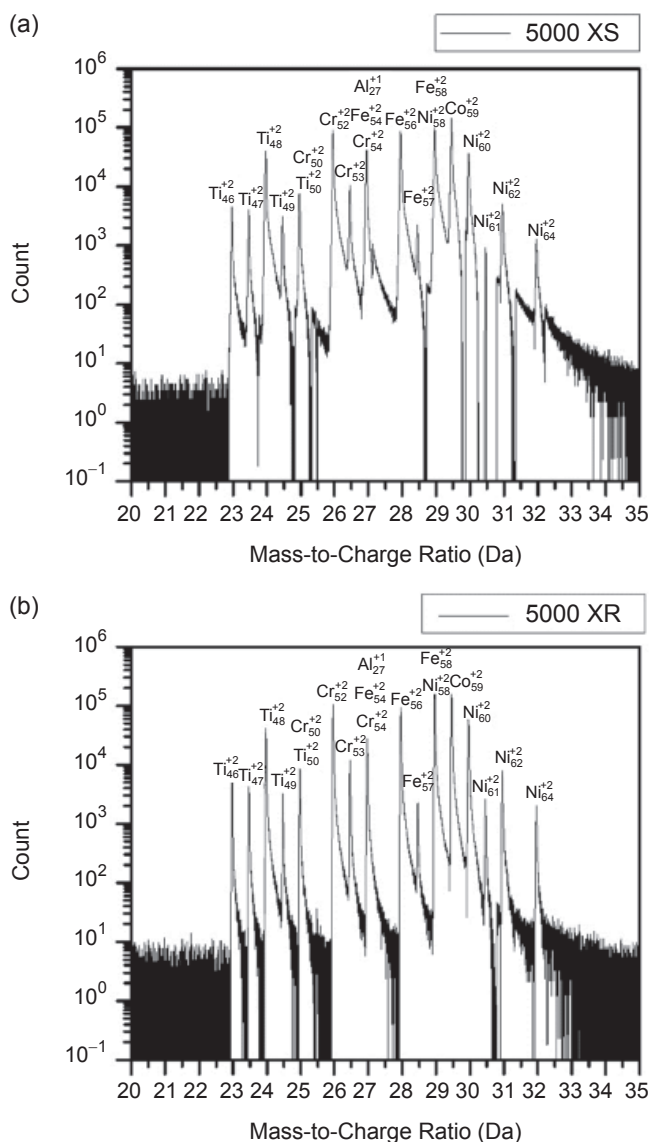


圖 6. 鎳基合金之原子探針荷質譜：(a) 取自 LEAP 5000-XS 以及 (b) 取自 LEAP 5000-XR。

五、試片製作

三維原子探針針尖的品質決定了實驗數據品質，一般而言，三維原子探針針尖試樣必須符合以下需求：

- (1) 針尖半徑小於 100 奈米。
- (2) 針尖形狀必須對稱，避免形成橢圓。
- (3) 針尖之椎角 (shape angle) 不能太大。
- (4) 柱身須避免微裂縫出現。

(5) 針尖附近 100 微米內不得出現其他針尖或微針尖。

近十年三維原子探針的大量應用與試片製作技術息息相關，其中最重要的就是聚焦離子束 (focused ion beam, FIB) 的運用。如圖 7(a)–(e) 所示，初始可以針對目標分析區域，以鉑 (Pt)、鎳 (Ni) 或者其他材料鍍上保護層，接著深切出一個 60° 楔形長條 (即正三角形長條)，其寬度約 1–2 微米，而長度可控制在 15–20 微米左右，然後先切斷一端進行鍍接，切斷另一端後將長條取出，接著將長條等分鍍接至微針尖上，確保鍍接完美牢靠後，以環狀減薄法 (annular milling) 將針尖半徑減至 50–100 nm 左右，最後再以較低的電壓進行針尖清潔的動作。針尖清潔有助於清除鎵 (Ga) 離子所造成的損傷層，不過，如果進行過久，將使針尖逐漸變粗。就筆者的經驗來說，大約 4 小時能夠準備 6 個原子針尖試樣。在過去僅有電壓脈衝模式的時代，因為僅能研究金屬材料，許多研究團隊以電解拋光法製備針尖試樣。如圖 7(f) 所示，將一極小的鉑金屬環接於陽極，而利用環與拋光液之表面張力使液體附著於環面，將裁切好的分析材料接於陰極，以脈衝的方式給予適當電位，並同時於光學顯微鏡下仔細觀察，材料將漸漸形成針尖，此方法在 4 小時內能夠準備 10 個以上的原子針尖試樣。

以聚焦離子束技術製作試片有許多優勢，一方面可以研究的材料範圍較廣，同時容易控制尺寸而針尖表面也較平順。此外，在聚焦離子束下可以選擇特定的微小區域進行試片製備，能夠針對材料異質界面或者晶界等進行三維原子探針的分析。

六、三維原子探針於先進高強度鋼之應用

三維原子探針的應用已經非常廣，除了金屬⁽¹⁷⁾、陶瓷⁽¹⁸⁾、半導體⁽¹⁹⁾等材料領域外，近幾年甚至也使用在能源⁽²⁰⁾、地質⁽²¹⁾與生物醫學^(22, 23)等領域，筆者本身長期研究鋼鐵材料，故於本文分享兩個先進鋼鐵材料之研究案例。

雙晶變形誘導塑性鋼 (twinning-induced plasticity steel, TWIP steel) 有優異加工硬化行為，

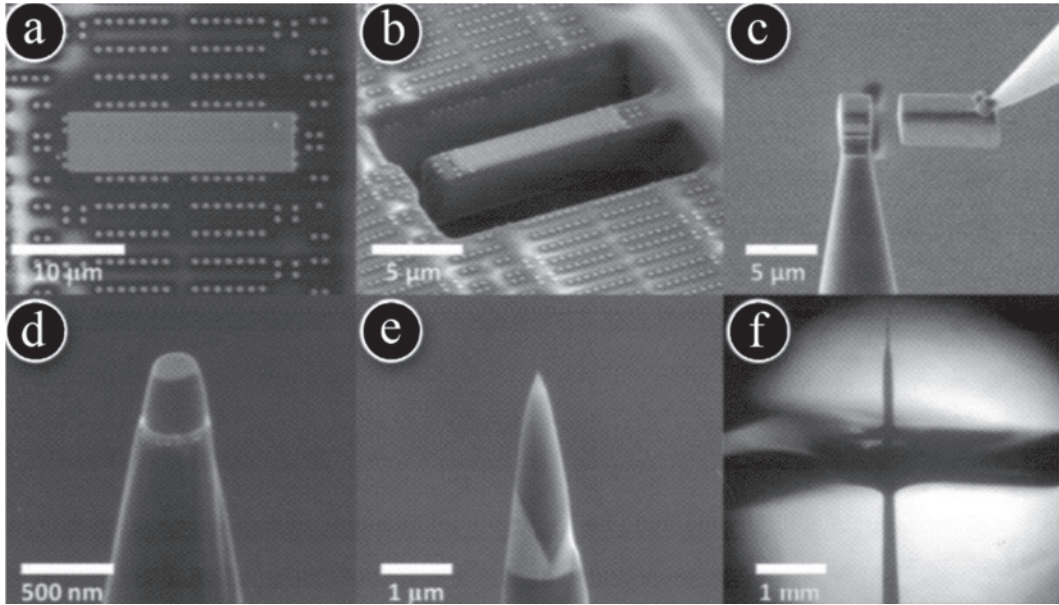


圖 7. 原子探針之針尖試片製作 (a)–(e) 聚焦離子束之步驟流程以及 (f) 電解拋光法⁽²⁾。

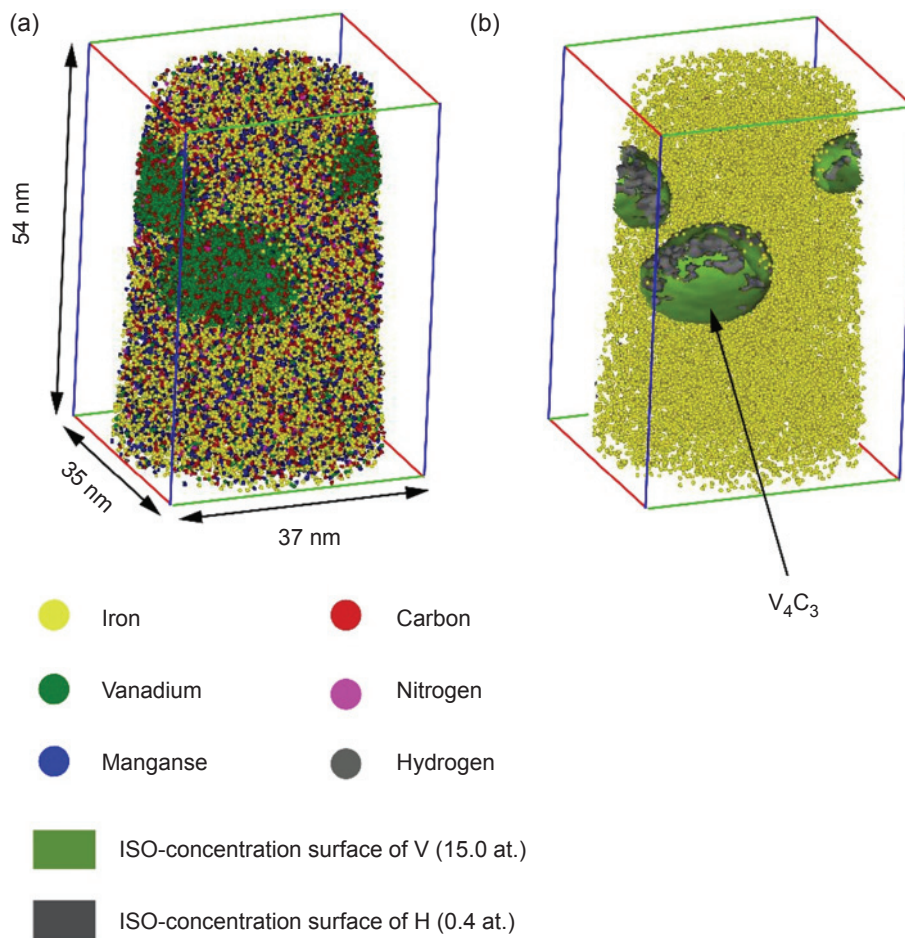


圖 8. Fe-22Mn-0.6C-0.87V (in wt.%) 合金之三維原子探針分析 (a) 三維原子分布以及 (b) 鈦與氫之等濃度表面分布。

是一種同時具有超高強度以及高延展性的沃斯田鐵系先進高強度鋼。然而，如果雙晶變形誘導塑性鋼在成形以後受到氫攻擊滲入，將會產生嚴重延遲破壞，因而嚴重影響其應用價值。利用奈米尺寸 V_4C_3 碳化物的析出控制，雙晶變形誘導塑性鋼段可以具有更高的降伏強度，同時能夠改善其延遲破壞行為⁽²⁴⁾。圖 8 為 Fe-22Mn-0.6C-0.87V (in wt.%) 之 TWIP 鋼連續充氫 24 小時，再靜置 24 小時以後之三維原子探針分析結果。圖 8(a) 為三維元素分布圖，其中可以發現有三個體積空間叢聚較多的釩原子與碳原子，與穿透式電子顯微鏡分析結果比對後，應為 V_4C_3 碳化物。如果進一步分析氫原子之分布，於圖 8(b) 中可以發現有較高的氫濃度集中於碳化物與沃斯田鐵的界面，此結果說明了 V_4C_3 碳化物對於 TWIP 鋼延遲破壞行為的改善機制。另外需要注意的是，在三維原子探針中雖然可以量測到氫的濃度，但是並非所有的氫都來自於材料內部，真空腔體中微量的氫會附著於針尖再以成像氣體的角色飛向偵測器，使得氫之定量分析失準。儘管如此，三維原子探針仍為顯微技術或奈米分析技術中，極少數能對氫原子分布進行分析與成像之技

術。

圖 9(a) 為軸承鋼中之三維元素分布圖，圖 9(b) 與 9(c) 顯示富碳區奈米片層結構，其片層厚度大約僅有 10 奈米，與穿透式電子顯微鏡分析結果比對後，應為 ϵ 碳化物。由於三維原子探針能夠完整呈現材料三維形貌，所以我們可以直接觀察到碳化物片層本身存在空孔區，此乃因片層間之合併行為所致。圖 9(d) 為 ROI 1 區域長軸方向之成分變化曲線，碳化物本身富集碳並不意外，不過，從成分曲線中可以直接發現其他合金成分如鋁、錳、矽以及鉻都有微弱的富集現象，此奈米尺度的微弱富集現象於其他顯微鏡顯微分析技術中並不容易量測，然而三維原子探針於此研究題目標展現其優勢。

七、結論

三維原子探針能對各種材料與物質的分析鑑定同時提供 (1) 原子級解析度、(2) 元素偵測效率、(3) 三維影像，儘管如此，三維原子探針已經被定位為介於穿透式電子顯微鏡 (transmission electron

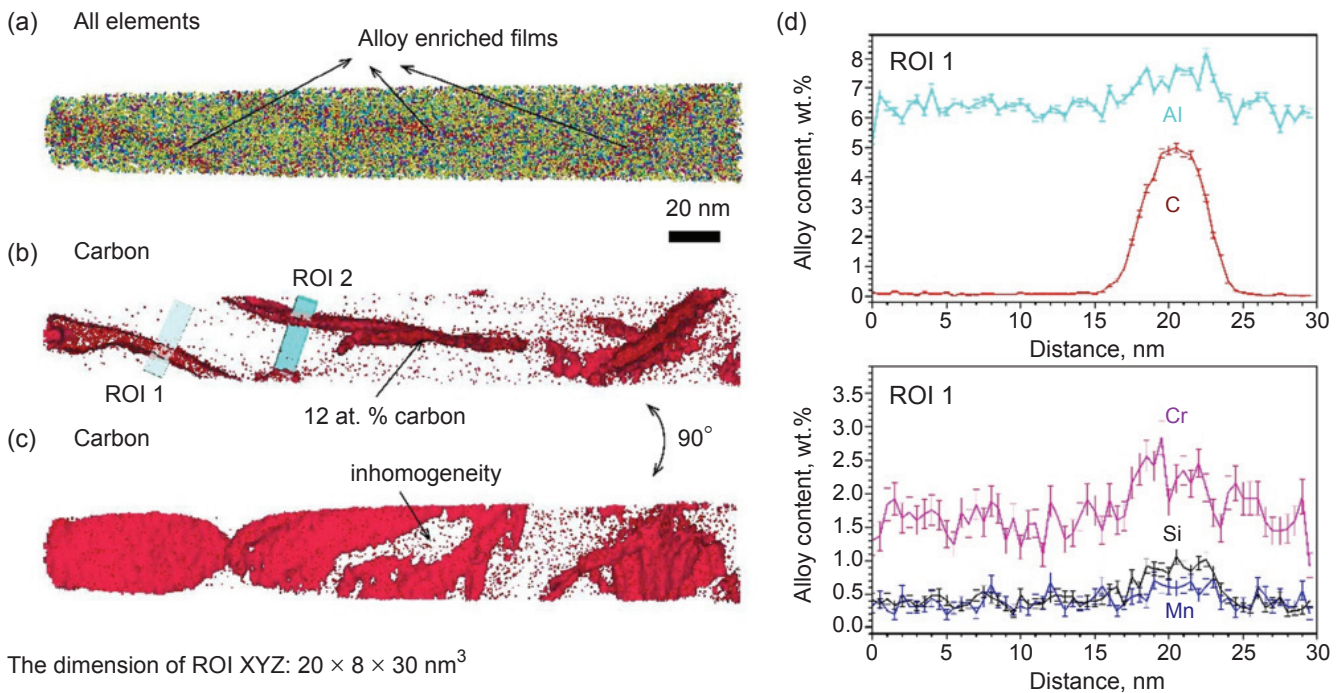


圖 9. 先進軸承鋼之三維原子探針分析 (a) 三維原子分布、(b)–(c) 各角度下的 C 等濃度表面分布以及 (d) ROI 1 的碳化物片層之成分線掃描曲線。

表 1.

二次離子質譜儀 (SIMS)、穿透式電子顯微鏡 (TEM)、區域電極原子探針 (LEAP) 之性能比較表。

	SIMS	TEM	LEAP
3D Volume Imaging	No	Yes, but with limitations	Yes
Spatial resolution (compositional)	50 nm laterally 2 nm depth	0.2 nm laterally 5 nm depth	0.4 nm laterally 0.2 nm depth
Image resolution	NA	< 0.1 nm	0.2 nm
Sensitivity	< 1 ppm ($< 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$)	~1000 ppm ($5 \times 10^4 \text{ nm}^{-3}$)	~20 ppm (10^3 nm^{-3})
Planar specimens	Yes	Yes	Yes

microscope, TEM) 與二次離子質譜儀 (secondary ion mass spectrometry, SIMS) 的顯微鏡與顯微分析技術，如表 1 所示，區域電極原子探針的影像空間解析度上不如穿透式電子顯微鏡，但是在成分分析的空間解析度與成分靈敏度都優於穿透式電子顯微鏡相關技術。此外，二次離子質譜儀雖然擁有相當高的成分偵測靈敏度，但是其一維縱深空間解析度僅有約 2 奈米。因此，雖然台灣目前各研究單位均無法建置三維原子探針技術，不過，原子探針在未來材料與物質研究中必將佔有舉足輕重的地位。

參考文獻

1. R.P. Feynman, I There's plenty of room at the bottom, Feynman and computation. 63, (1999).
- 2.
3. E.W. Müller, K. Bahadur, *Field Ionization of Gases at a Metal Surface and the Resolution of the Field Ion Microscope*, Physical Review, **102**, 624 (1956).
4. E.W. Muller, Experiments of the theory of electron emission under the influence of high field strength, *Physikalische Zeitschrift*, **37**, 838 (1936).
5. E.W. Muller, DAS FELDIENENMIKROSKOP, *Zeitschrift Fur Physik*, **131**, 136 (1951).
6. E.W. Muller, IMAGE FORMATION OF INDIVIDUAL ATOMS AND MOLECULES IN THE FIELD EMISSION MICROSCOPE, *J. Appl. Phys.*, **24**, 1414 (1953).
7. E.W. Muller, J.A. Panitz, S.B. McLane, *ATOM-PROBE FIELD ION MICROSCOPE*, *Rev. Sci. Instrum.*, **39**, 83(1968).
8. J.A. Panitz., 10 CM ATOM PROBE, *Rev. Sci. Instrum.*, **44**, 1034(1973).
9. G.L. Kellogg and T.T. Tsong, PULSED-LASER ATOM-PROBE FIELD-ION MICROSCOPY, *J. Appl. Phys.*, **51**, 1184(1980).
10. M.K. Miller, *Atom Probe Tomography - Analysis at Atomic Level*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (2000).
11. A. Cerezo, T.J. Godfrey, and G.D.W. Smith, DEVELOPMENT AND INITIAL APPLICATIONS OF A POSITION-SENSITIVE ATOM PROBE, *Journal De Physique*, **49**, 25(1988).
12. D. Blavette, A. Bostel, J.M. Sarrau, and B. Deconihout, A. Menand. AN ATOM-PROBE FOR 3-DIMENSIONAL TOMOGRAPHY, *Nature*, **363**, 432(1993).
13. B. Gault, M.P. Moody, J.M. Cairney, and S.P. Ringer, *Atom Probe Microscopy*, Springer, New York (2012).
14. B. Gault, F. de Geuser, L.T. Stephenson, M.P. Moody, B.C. Muddle, and S.P. Ringer, Estimation of the Reconstruction Parameters for Atom Probe Tomography, *Microscopy and Microanalysis*, **14**, 296(2008).
15. B. Gault, M.P. Moody, F. de Geuser, G. Tsafnat, A. La Fontaine, L.T. Stephenson, D. Haley, and S.P. Ringer, Advances in the calibration of atom probe tomographic reconstruction, *J. Appl. Phys.*, 105 (2009).
16. M.P. Moody, B. Gault, L.T. Stephenson, D. Haley, and S.P. Ringer, Qualification of the tomographic reconstruction in atom probe by advanced spatial distribution map techniques, *Ultramicroscopy*, **109**, 815(2009).
17. H.-W. Yen, S.W. Ooi, M. Eizadjou, A. Breen, C.-Y. Huang, H.K.D.H.B. Bhadeshia, and S.P. Ringer, Role of stress-assisted martensite in the design of strong ultrafine-grained duplex steels, *Acta Materialia*, **82**, 100 (2015).
18. W.K. Yeoh, X.Y. Cui, B. Gault, K.S.B. De Silva, X. Xu, H.W. Liu, H.W. Yen, D. Wong, P. Bao, D.J. Larson, I. Martin, W.X. Li, R.K. Zheng, X.L. Wang, S.X. Dou, and S.P. Ringer, On the roles of graphene oxide doping for enhanced supercurrent in MgB₂ based superconductors, *Nanoscale*, **6**, 6166 (2014).
19. K. Thompson, P.L. Flaitz, P. Ronsheim, D.J. Larson, and T.F. Kelly, Imaging of Arsenic Cottrell Atmospheres Around Silicon Defects by Three-Dimensional Atom Probe Tomography, *Science*, **317**, 1370 (2007) .
20. A. Devaraj, M. Gu, R. Colby, P. Yan, C.M. Wang, J.M. Zheng, J. Xiao, A. Genc, and J.G. Zhang, I. Belharouak, D. Wang, K. Amine, S. Thevuthasan. Visualizing nanoscale 3D compositional fluctuation of lithium in advanced lithium-ion battery cathodes, *Nature Communications*, **6**, 8014 (2015).
21. J.W. Valley, A.J. Cavosie, T. Ushikubo, D.A. Reinhard, D.F. Lawrence, D.J. Larson, P.H. Clifton, T.F. Kelly, S.A. Wilde, D.E.

- Moser, and M.J. Spicuzza, Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography, *Nature Geosci*, **7**, 219 (2014).
22. L.M. Gordon and D. Joester, Nanoscale chemical tomography of buried organic-inorganic interfaces in the chiton tooth, *Nature*, **469**, 194 (2011).
23. A. La Fontaine, A. Zavgorniy, H. Liu, R. Zheng, M. Swain, and J. Cairney, Atomic-scale compositional mapping reveals Mg-rich amorphous calcium phosphate in human dental enamel, *Science Advances*, **2** (2016).
24. H.-W. Yen, M. Huang, C.P. Scott, and J.-R. Yang, Interactions between deformation-induced defects and carbides in a vanadium-containing TWIP steel, *Scripta Materialia*, **66**, 1018 (2012).



顏鴻威先生為國立台灣大學材料科學與工程學系博士，現任國立台灣大學材料科學與工程學系助理教授。

Hung-wei Yen received his Ph.D. in department of Materials Science & Engineering, National Taiwan University. He is currently an assistant professor in department of Materials Science & Engineering, National Taiwan University.