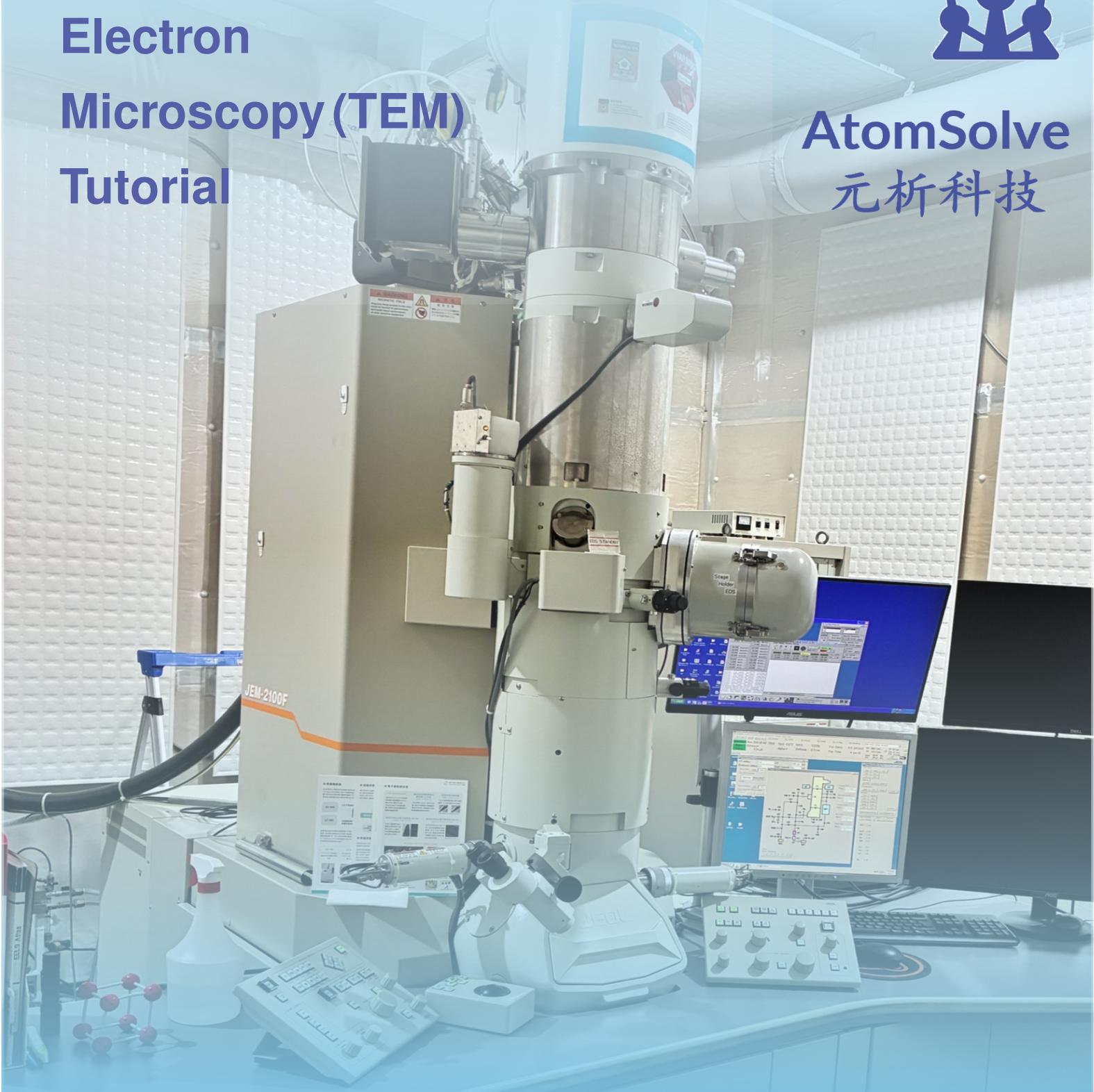




Transmission Electron Microscopy (TEM) Tutorial

AtomSolve
元析科技



TN01250806T0002

TEM 技術介紹

穿透式電子顯微鏡（Transmission Electron Microscope, TEM）是一種強大的成像技術，利用高能電子束探測材料內部結構，解析度可達奈米甚至原子等級。在 TEM 中，電子束穿透超薄樣品，與材料發生交互作用，產生清晰的影像、繞射圖樣及光譜資訊。TEM 可用於研究晶體結構、缺陷、界面以及化學組成。由於其極高的空間解析度，TEM 被廣泛應用於材料科學、奈米技術、生物學以及半導體等領域。

電磁透鏡

圖 (a) 顯示了一個薄光學透鏡，它是由兩個球面界面所構成的透明介質，透過光線折射來形成影像。本例中所示為一個凸透鏡：來自光軸上物點 O 的平行光線（光線 A）通過透鏡後折射，匯聚至焦點 F_1 ；而一條通過透鏡中心 C 的光線（光線 B）則不發生偏折，沿原方向直線前進。兩條光線在像側交於像點 I ，其像距為 $+v$ 。物距為 $-u$ ，由透鏡的中心平面量測。此構型符合薄透鏡公式：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} + \frac{1}{u}$$

其中 f 為焦距。圖中作圖說明透鏡透過折射改變光路：平行入射光匯聚成像，所得到的像為實像且倒立。

圖 (b) 則顯示了電磁透鏡（EM 透鏡），其透過螺線管所產生的磁場來聚焦電子束。在此，物點為靠近 A 的電子點源，螺線管在軸線上產生磁場，磁力線繞線圈呈環形分布。當帶電粒子（如電子）通過磁場時，會受到洛倫茲力作用，洛倫茲力的方向總是垂直於粒子的運動方向與磁場方向，從而使電子沿軸心呈螺旋狀前進。圖中展示了一條電子的螺旋軌跡，以及所有電子軌跡所形成的包絡面，最終在像點 B 匯聚。與光學透鏡不同，電磁透鏡並非透過折射率變化來折射光線，而是藉由磁場所產生的向心力，將帶電粒子的路徑彎曲至軸心，以達到聚焦效果。其聚焦作用在數學上與光學透鏡相似，同樣符合類似的透鏡公式，連結物距與像距。兩種透鏡皆透過改變射線或粒子的運動軌跡來形成影像：光學透鏡作用於光線，電磁透鏡作用於電子，但它們分別依賴於不同的物理原理——折射與洛倫茲力。

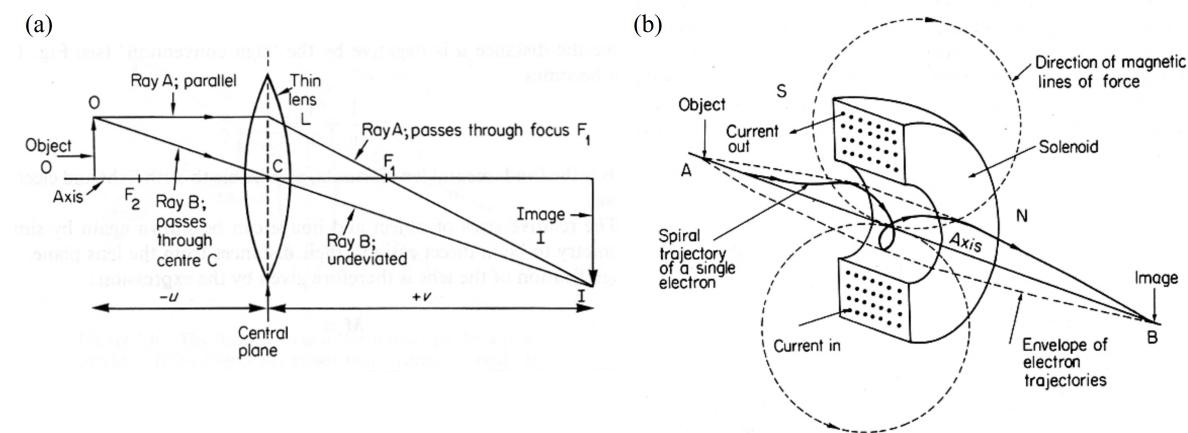


Figure 1: (a) 光學透鏡與 (b) 電磁透鏡之示意圖。

工作模式

(a) 成像模式：在成像模式下，穿透式電子顯微鏡（TEM）被設定為由物鏡形成樣品的實空間放大影像。電子束穿透樣品後，物鏡將透射與散射的電子聚焦，在其像面上形成初始影像。中間鏡進一步放大該影像，並將其傳遞至投影鏡，投影鏡再將放大的影像投射至觀察螢幕或相機上。在此模式中，中間鏡會被調整以聚焦在物鏡的像面上。此構型可用於直接觀察樣品的形貌、缺陷、界面以及厚度變化的實空間影像。

(b) 繞射模式：在繞射模式下，中間鏡被調整為聚焦於物鏡的後焦平面，也就是繞射圖樣形成的平面。此時顯微鏡並不形成實空間影像，而是將樣品晶格面所產生的繞射電子束圖樣投射出來。投影鏡會進一步放大該圖樣，方便於螢幕上觀察或記錄。此模式可提供樣品的晶體結構、晶格間距與晶體取向等資訊。透過分析繞射斑點或繞射環的位置與強度，使用者可辨識物相並判定結構細節。成像模式與繞射模式之間的切換，只需調整中間鏡的激磁條件即可。

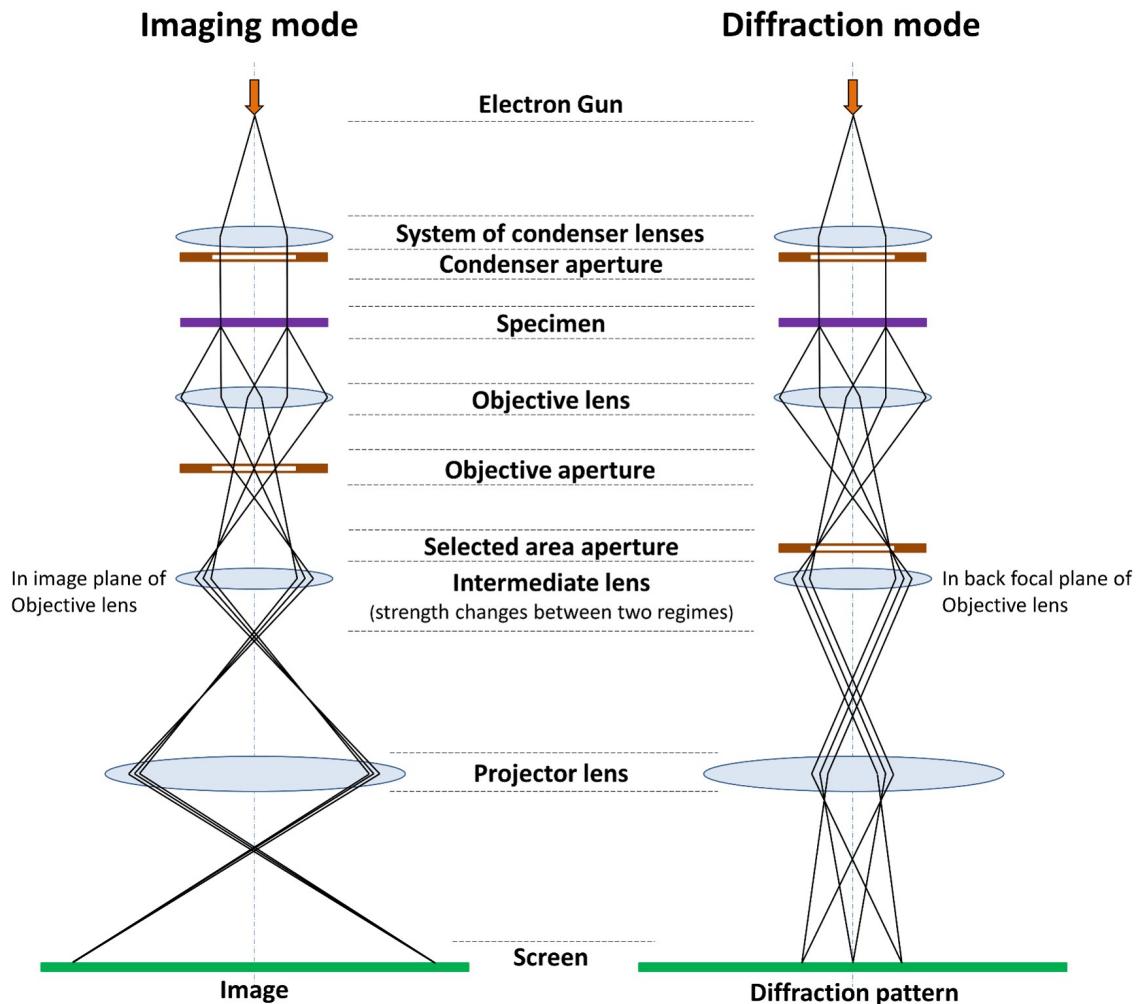


Figure 2: TEM 成像模式與繞射模式。圖片來源：Eric Kvaalen，維基百科 [1]。

繞射圖樣

本圖展示了四種不同材料的電子繞射圖樣，每張圖對應不同的晶體結構特徵，說明如下：

(a) 單晶 (Single Crystal) 此圖顯示出規則且均勻排列的亮點，代表單一晶體結構中原子週期性排列所產生的繞射斑點。繞射斑點分布規則且清晰，說明樣品具有長程有序的晶格結構。單晶的電子束繞射圖呈現出清晰且規則的點狀圖案。

(b) 多晶 (Multi-crystal) 圖中繞射斑點呈現為多個圓環狀，為多個不同取向晶粒的繞射斑點重疊所形成的環狀繞射圖樣。由於樣品由許多小晶粒構成，每個晶粒的取向不同，導致繞射斑點在空間中形成圓環。多晶的繞射圖呈圓環狀，反映出晶粒的隨機取向。

(c) 非晶態 (Amorphous) 此圖呈現出連續而模糊的繞射環，無明顯的點狀結構，說明樣品缺乏長程有序排列，原子位置不具規則性。在非晶材料中，原子的排列無週期性，電子繞射圖呈現寬廣而模糊的環狀散射，反映出短程有序的特性。

(d) 準晶 (Quasi-crystal) 根據傳統晶體學中的對稱性限制定理，晶體僅能具有二、三、四或六重旋轉對稱性，然而準晶的布拉格繞射圖樣卻顯示出其他對稱階數的清晰繞射峰，例如五重對稱性。圖中繞射斑點分布呈現出對稱但不具完全週期性的複雜圖案。準晶結構具有長程有序但不具平移週期性，其繞射圖顯示非週期且對稱的斑點分布，例如十重對稱。準晶的繞射圖既不像單晶那樣為規則點陣，也不同於多晶的圓環，而是呈現出複雜的對稱性結構。

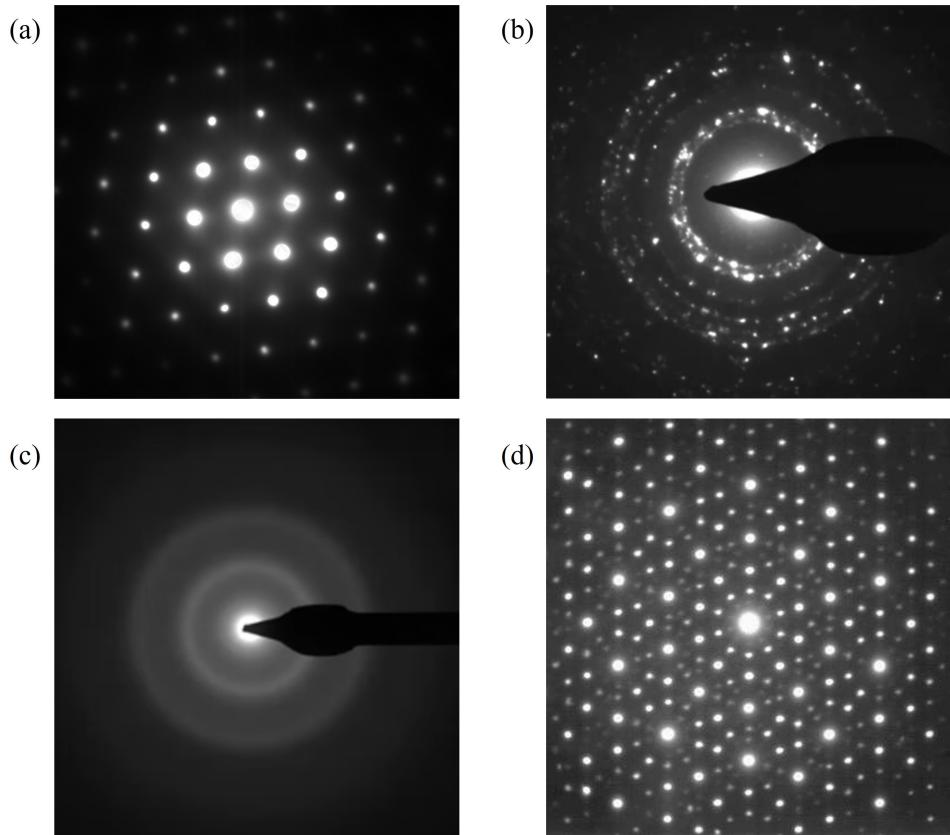


Figure 3: TEM 繞射圖樣：(a) 單晶，點陣規則且清晰；(b) 多晶，形成多個環狀斑點；(c) 非晶，繞射環模糊且無點狀結構；(d) 準晶，點狀分布複雜並具有特殊對稱性：十重對稱 [2]。

應用實例

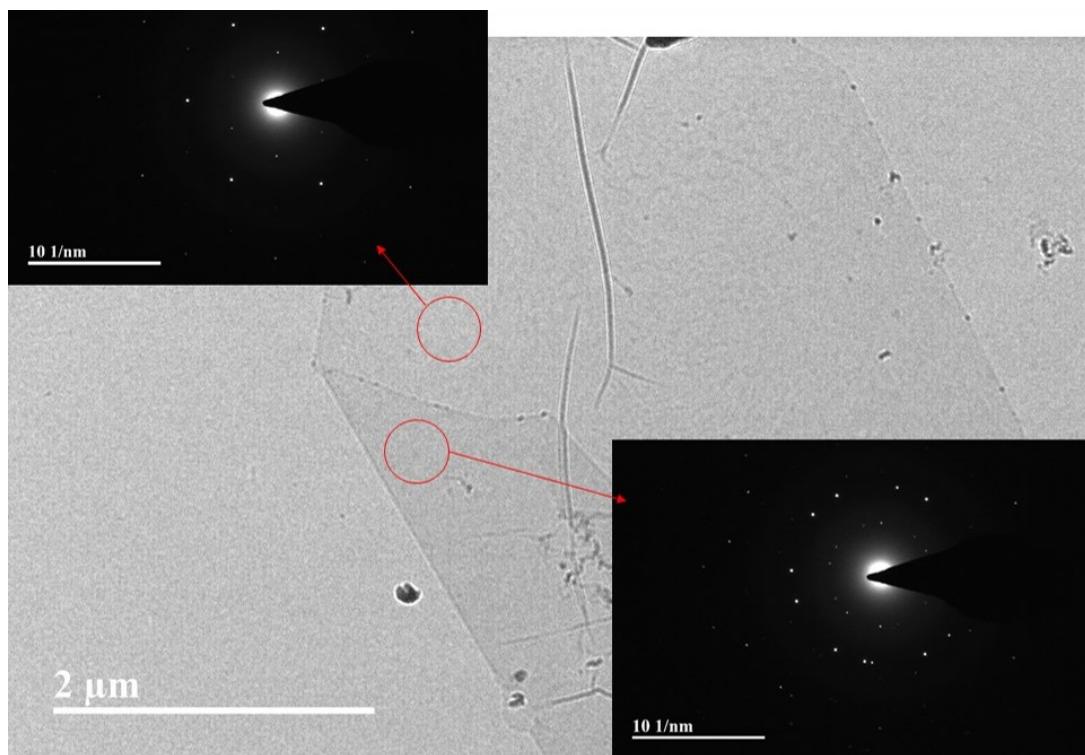


Figure 4: 超薄材料的 TEM 影像，繞射圖樣顯示出單層結構與摺疊的雙層結構。

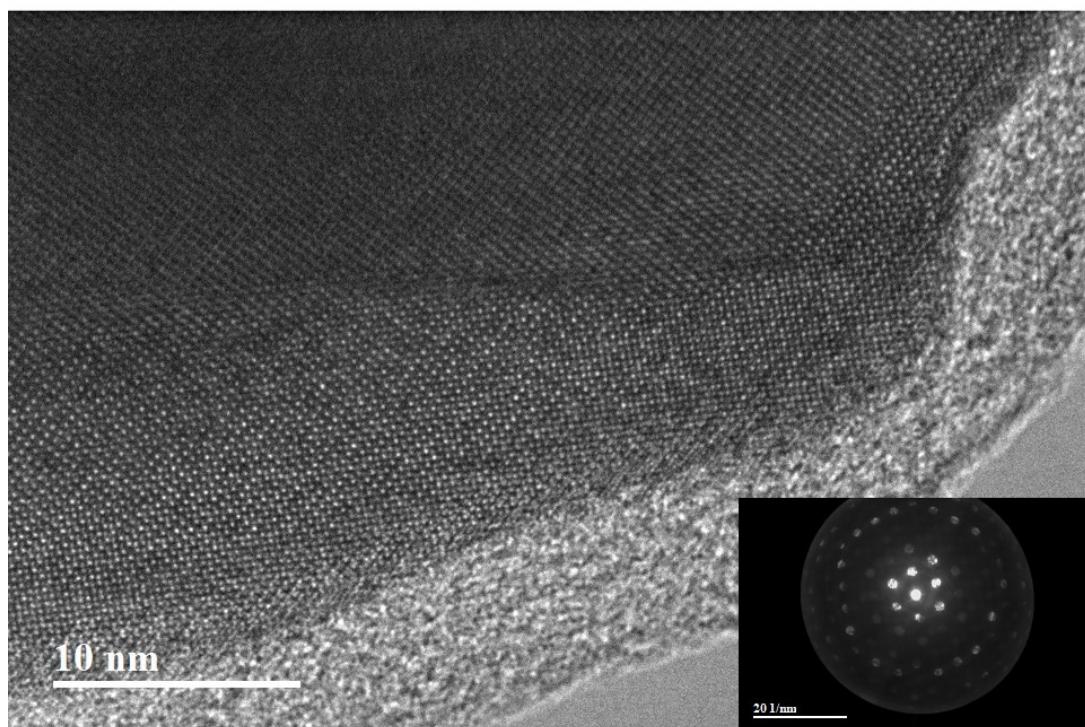


Figure 5: 奈米粒子的高解析度透射電子顯微鏡 (HRTEM) 影像，清楚顯示出原子柱結構。

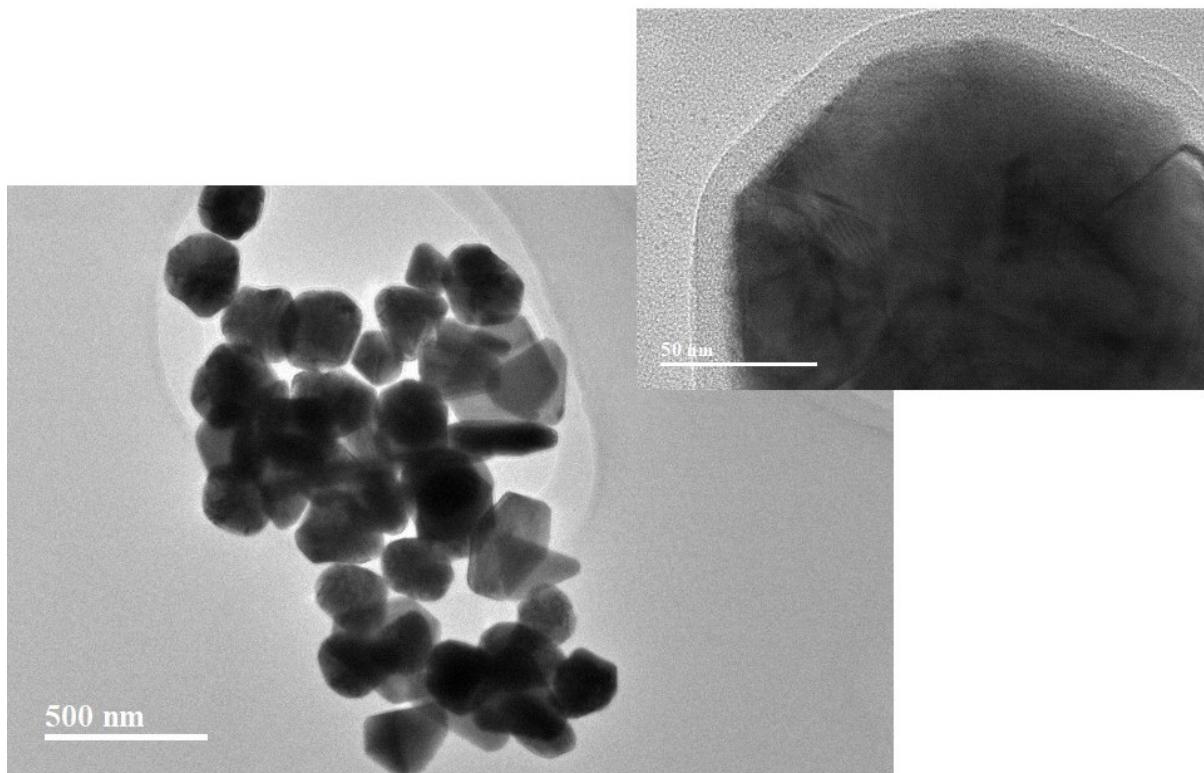


Figure 6: 帶有有機塗層之金屬奈米粒子的明場 Bright field 影像。

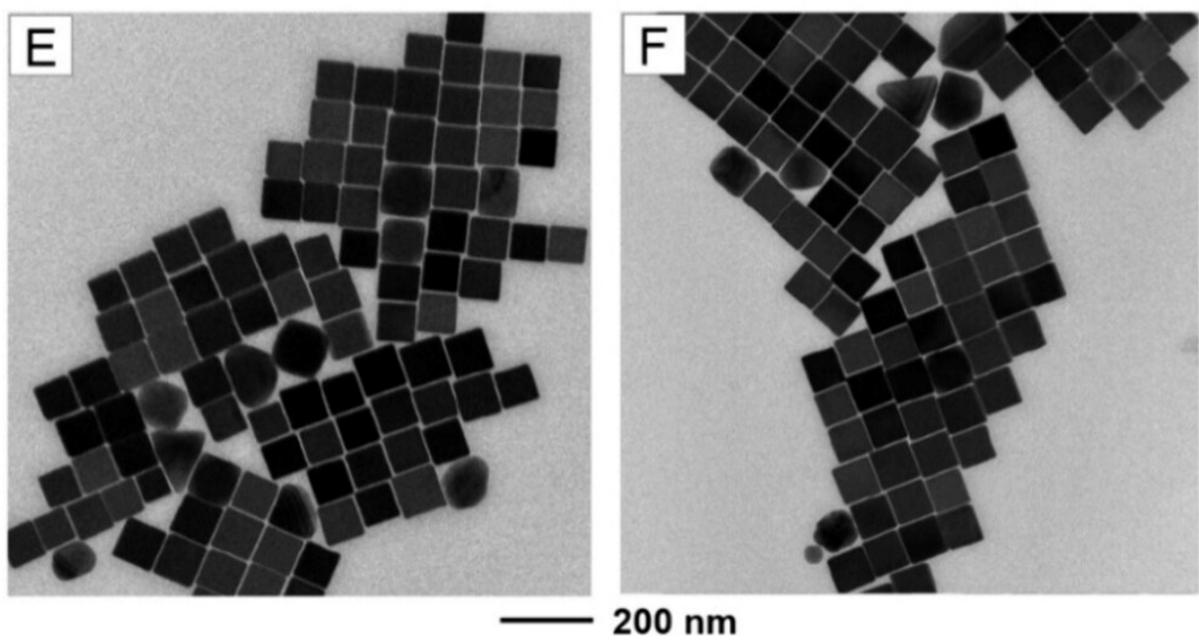


Figure 7: 金屬奈米立方體的明場 TEM 影像 [3]。

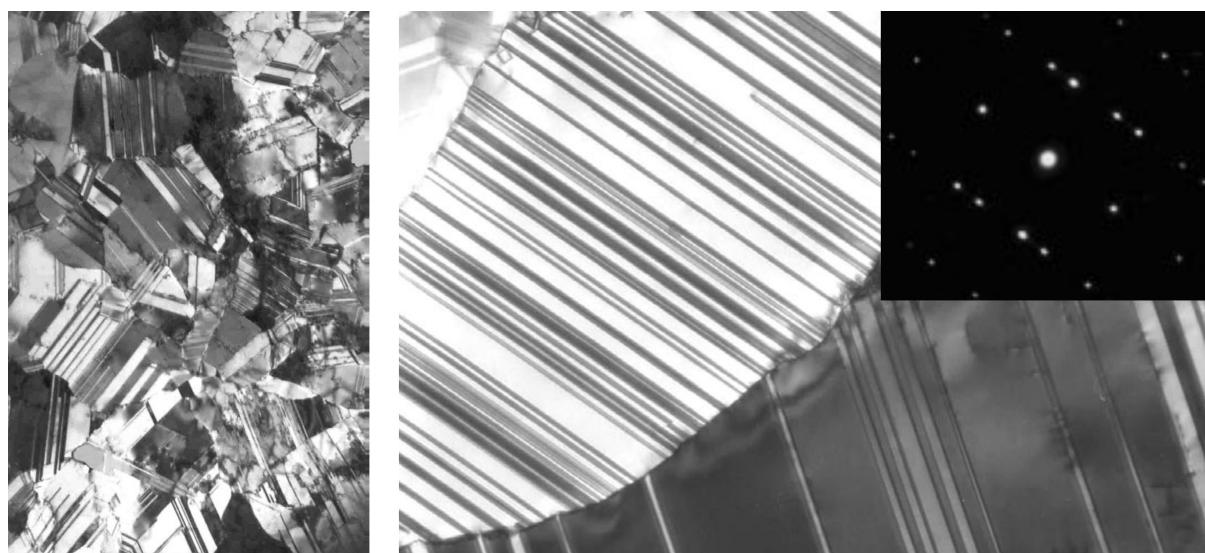


Figure 8: 奈米雙晶銅的 TEM 影像，繞射圖樣顯示雙晶結構 [4]。

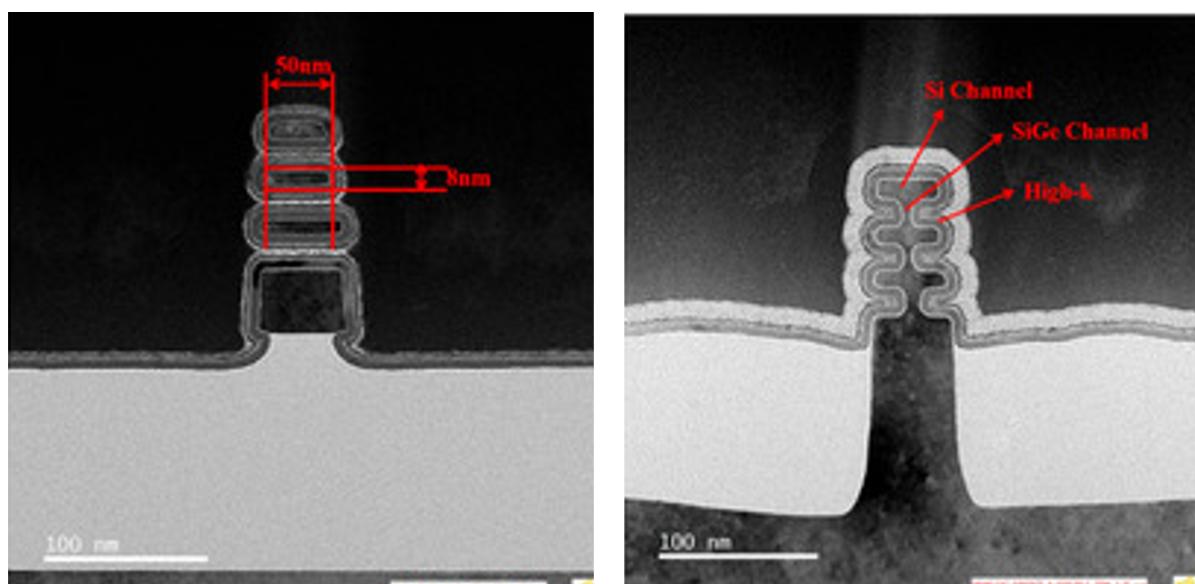


Figure 9: 半導體元件的 TEM 影像 [5]。

References

- [1] *Transmission electron microscopy*. - Wikipedia. 2003.
- [2] C Barry Carter **and** David B Williams. *Transmission electron microscopy: Diffraction, imaging, and spectrometry*. Springer, 2016.
- [3] Qijia Huang **and others**. “Seeing Is Believing: How Does the Surface of Silver Nanocubes Change during Their Growth in an Aqueous System”. **in***Nano Letters*: 25.17 (2025), **pages** 7115–7120.
- [4] Lei Lu **and others**. “Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper”. **in***Science*: 304.5669 (2004), **pages** 422–426.

- [5] Xiaohui Zhu **and others**. “Low temperature (down to 6 K) and quantum transport characteristics of stacked nanosheet transistors with a high-K/metal gate-last process”. in *Nanomaterials*: 14.11 (2024), page 916.

聯繫方式

方自仁，業務經理

Email: tifang@gmail.com

Tel: +886.932.186.234

涂遠, Ph.D., 業務技術經理

Email: ytujimmy@gmail.com

元析科技股份有限公司

地址：臺南市仁德區義林路 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 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)**

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