

# 從光子到影像：TPS 27A1掃描穿透X光顯微術

許紘璋博士

國家同步輻射研究中心奈米科學小組

在我們探索微觀世界的旅程中，顯微術不只是我們的窗口，更是揭露物質秘密的金鑰。隨著科技的飛躍發展，人類已能深入原子乃至電子的層次，這全賴於顯微技術的突破。從傳統的光學顯微鏡為我們揭開細胞和微生物世界的神秘面紗，到當我們的探索觸角伸展至更細微的尺度，穿透式電子顯微鏡 (TEM) 和掃描穿隧顯微鏡 (STM)，成了顯微界中解析度之冠的尖兵。

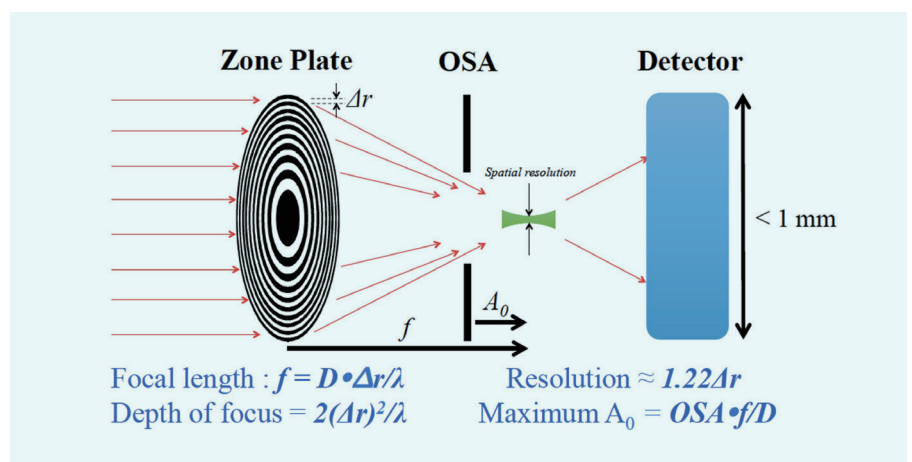
TEM 和 STM 開啟了一扇通往原子尺度新世界的大門，其極高的空間解析度讓材料的細微結構一覽無遺，進而加速了微觀研究領域的發展。儘管如此，若想深入理解材料的化學及物理特性，僅憑高解析度的影像來觀察其微觀行為和外觀仍顯不足。因此，X 光能譜學即扮演關鍵的角色。

X 光能譜學，如 X 光吸收光譜 (XAS)、X 光光電子能譜 (XPS) 等技術，為一門歷史悠久的研究技術，它使我們能夠了解材料的化學鍵結及電子結構。然而，由於傳統 XAS 和 XPS 技術的光斑較大，約在數十到數百微米，因此只能測量樣品的「平均」能譜，未能觸及微觀層面的細節。這一限制可以通過將能譜學與顯微技術結合起來的能譜顯微術 (Spectromicroscopy) 得到克服。透過顯微技術的高空間解析力與能譜學的化學分析能力以研究微觀尺度上的化學與電子結構，進而瞭解待測物之行為原理與反應機制。

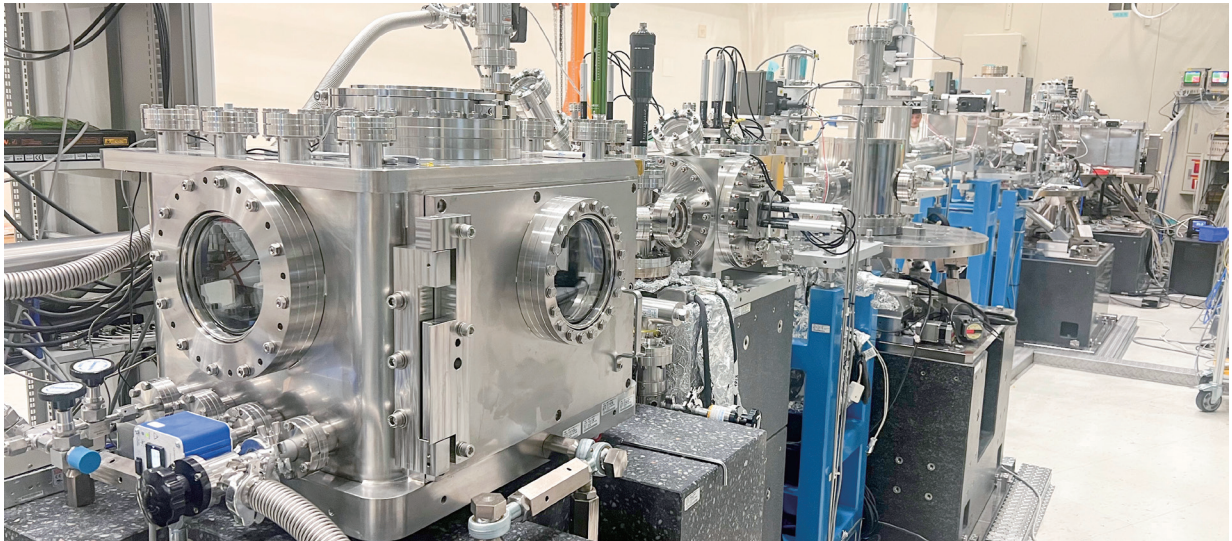
在眾多軟 X 光能譜顯微技術中，掃描穿透 X 光顯微鏡 (Scanning Transmission X-ray Microscopy, STXM) 是一個突出的存在。STXM 不僅能提供細膩的高解析度影像與能譜資訊，用以理解材料的微觀化學組成和電子結構資訊，更關鍵的是，由於其光進 (photon-in) 光出 (photon-out) 的特性，使其量測效率、實驗環境控制與臨場實驗設計等都有相當大的突破。這使得 STXM 成為探索微觀世界最重要，且具高產出的能譜顯微技術之一。

STXM 的工作原理與掃描透射電子顯微鏡 (STEM) 十分相近，它們都透過「透鏡」聚焦光子或電子於樣品之上。STXM 使用波帶片 (Fresnel Zone Plate, FZP) 作為透鏡，而 STEM 則是使用電子磁透鏡，其空間解析度由透鏡聚焦程度決定。為了讓光子或電子能夠穿透，樣品必須足夠薄，使得穿透後的光子或電子可以被樣品後方的探測器捕捉，進而獲得每個掃描點的訊號強度。但由於 STXM 使用軟 X 光為光源，因此材料厚度一般約在數百奈米的範圍為佳。

取得穿過樣品的光子訊號後，再透過對樣品進行細密的二維掃描，我們可以蒐集到點對點的訊號，並將這些訊號綜合起來形成一張二維的強度分佈影像。圖一為常見的 STXM 顯微鏡架構圖。STXM 的主要探測訊號為穿透樣品之後的光子強度。根據比爾定律，我們可以藉此計算出吸收度與被測物的密度、厚度以及質量吸收係數之間的關係。結合同步輻射光子能量可調的特性，從而獲取 XAS 的能譜資訊。因此，STXM 也可以被視為一種 XAS 顯微鏡。由於 FZP 的特性，繞射效率與工作距離皆與解析度成反向關係，因此目前常見的 STXM 空間解析度約為 30 奈米，實際上可以更小，但這是在繞射效率與工作距離等多重考量所選定的解析力。如圖一公式所示，工作距離與聚焦長度成正比，然而聚焦長度卻與解析度成反比。以  $D = 300 \mu\text{m}$ ， $PE = 155 \text{ eV}$ ， $\Delta r = 25 \text{ nm}$ ，OSA 寬度為  $50 \mu\text{m}$  為例 ( $\lambda(\text{nm}) = 1240/PE(\text{eV})$ )，



圖一 掃描穿透顯微鏡系統架構圖，其中  $f$  表示焦距、 $D$  表示 ZP 直徑、 $\Delta r$  表示 ZP 最外圈寬度、 $\lambda$  表示波長、OSA 表示 OSA 孔徑、 $A_0$  為工作距離。



圖二 TPS 27A1 光束線與 STXM 實驗站照片。

根據下圖公式可以算出其焦距為  $937.5 \mu\text{m}$ ，而最大工作距離（樣品到 OSA 的距離）為  $156.25 \mu\text{m}$ ，這是非常短的距離，實務上若使用更小  $\Delta r$  的 ZP 將可能無法實際操作，或是發生樣品與 OSA 撞擊的可能性。此外 ZP 的聚焦深度 (Depth of focus, DOF) 為  $4(\Delta r)^2/\lambda$ ，與  $(\Delta r)^2$  成正比，因此選用越高解析度的 ZP 其聚焦深度也越淺。

由於 STXM 的主要探測信號是光子，這使得 STXM 可以不必在超高真空環境中運作，同時樣品的導電性良好與否對實驗的影響也大大降低。這一特性讓 STXM 成為了一個非常靈活多變的實驗工具，從軟物質如有機材料、高分子聚合物、細胞、氣懸膠，到金屬奈米粒子、礦物切片、鋰電池以及半導體材料等，皆可在 STXM 下進行分析，應用的材料系統更加廣泛。

STXM 的易用性和非超高真空操作特性，使其成為進行各類臨場實驗的理想選擇。透過設計特製的臨場實驗裝置，如電化學實驗槽和溫度氣體控制實驗槽等，研究者能夠在接近實際應用條件下探索能源材料和催化系統等的行為。這不僅符合當下最新的科研趨勢，更為材料科學領域帶來了新穎的研究視角。

在台灣光子源 TPS 27A1 光束線上，我們與淡江大學彭維鋒教授團隊密切合作，成功建立了一套全新的 STXM 系統。隨著該光束線與實驗的完工和試車，我們期待它將為科

學研究領域貢獻新的突破。這套 STXM 系統的建立不僅凸顯了跨學科合作的力量，也為未來的創新探索提供了廣闊的平台。我們滿懷期待，這套系統將在材料科學、生物醫學、能源技術等關鍵領域中發揮其獨到的作用，為科學進步開拓新的道路。TPS 27A1 光束線與 STXM 實驗站現正進行試車中，預計於 2024 下半年起逐步開放部分用戶時段申請。

TPS 27A1	規格
光源	EPU 66
分光儀	AM-PGM
能量範圍	90 - 3000 eV (線偏振) 150 - 1000 eV (圓偏振)
能量解析力	5000 to 25000
光通量	STXM: $1 \times 10^{13}$ ph/s
空間解析度	STXM: 30 nm (25 nm FZP)

### 參考文獻：

1. K. T. Arul, H. W. Chang, H. W. Shiu, C. L. Dong, W. F. Pong, J. Phys. D **54**, 343001 (2021).
2. H. W. Shiu, T. H. Chuang, C. M. Cheng, C. H. Chen, Y. J. Hsu, D. H. Wei, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **266**, 147363 (2023).