

軟X光光電子能譜顯微術的過去與未來——從TLS到TPS

莊子弘、魏德新

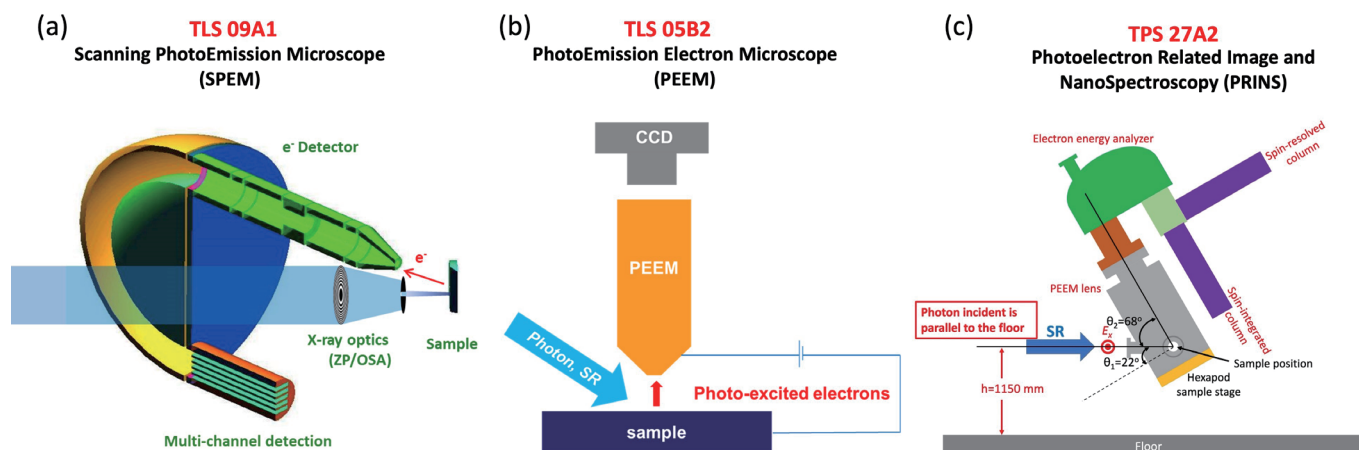
國家同步輻射研究中心 奈米科學小組

X光在1895年首次被世界認識而成為一種新型態的光源，其絕佳的物質穿透力使之成為當時解析物體內部結構的有效手段。可惜當時的X光光源和X光光學技術都還不成熟，無法將X光投影成像進一步推展到X光顯微術。1947年同步輻射加速器的發明打破了這一局面。隨著電子儲存環設計的改進，同步輻射連續光譜中的X光強度遠高於由X光射線管所能夠產生的強度。隨後，一種名叫費涅爾波帶片(Fresnel zone plate)的繞射光學裝置被證明能夠以類似於光學顯微鏡中藉由凸透鏡聚焦可見光的方式來聚焦X光[1]。這便開啟了使用以波帶片為基礎的X光顯微術。X光顯微鏡中另一個值得注意的發展是與電子透鏡有關。由於在導電表面照射電磁波會產生光電子，科學家們設計並組裝了一組電子透鏡和二維電子偵測器，用來同時記錄光電子的強度和位置[2]。由於光電子發射強度是光子能量和光子偏振的函數，因此使用同步輻射X光為光源所記錄的二維影像可以直接嵌入能譜訊息。此種使用能譜特徵作為影像對比的顯微術，稱為能譜顯微術。

在台灣，X光顯微術的推動始於1986年，然而第一張X光顯微鏡影像則還多等上幾年。在TLS啟用兩年後的1995年，中央研究院物理研究所的胡宇光博士成功地使用全像式光電子顯微鏡(PEEM)在偏轉磁鐵光束線TLS 04B1和TLS 20A1上記錄到了台灣首張X光顯微影像[3]。此後，國家同步輻射研究中心(當時為行政院同步輻射研究中心籌

建處)在TLS 09A1和TLS 05B2光束線上分別建造了兩座固定式的軟X光顯微術實驗站，分別是採用波帶片聚焦的掃描式光電子顯微鏡(SPEM)[4]，以及利用電子透鏡成像的全像式光電子顯微鏡(PEEM)[5]，如圖一(a)與(b)，這兩座顯微術實驗站在過去二十多年皆發展得相當成功，並在台灣培育出一定的用戶群。

接下來的重大進展發生於2017年，當時我們開始在台灣光子源(TPS)建造光束線和顯微術實驗站，而TPS是位於TLS旁邊具有低發射度的3 GeV儲存環。為了滿足顯微術的需求，陳建德院士領導的團隊開發了主動式光學鏡平面光柵單色器(AMPGM)，使得使用AMPGM的光束線能夠在聚焦光點大小不變的前提下，同時提供更寬廣的軟X光能量範圍及極佳的能譜分辨率。在顯微實驗站方面，我們的規劃是要能兼顧TLS現有的科學研究及面對未來新穎科學議題的挑戰。因此，建置TPS 27A2光電子影像與奈米能譜實驗站(PRINS)的概念即是要能夠將TLS 09A1 SPEM和TLS 05B2 PEEM的核心能力轉移至TPS，例如利用X光吸收頻譜(XAS)、X光磁圓二色性(XMCD)與X光光電子能譜(XPS)成像和微區XAS與XPS分析等，以便將現有的科學議題和用戶群從TLS轉移到TPS。PRINS實驗站還將具有額外的新功能，例如動量空間顯微術、微區角解析光電子能譜(ARPES)和自旋解析顯微術等，將引進分析電子結構以及自旋結構之能力。



圖一 從 TLS 到 TPS 的軟 X 光光電子顯微系統 (a) TLS 09A1 掃描式光電子顯微系統 (SPEM)、(b) TLS 05B2 全像式光電子顯微系統 (PEEM) 和 (c) TPS 27A2 光電子影像與奈米能譜系統 (PRINS)。

TPS 27A2 的 PRINS 實驗站之核心是一個最先進的光電子動量顯微系統 (由德商 SPECS GmbH 製造的 KREIOS 150 MM 系統)，它結合了最先進的 PEEM 透鏡、半球形電子能量分析儀和影像式自旋濾鏡。此系統於 2021 年底運抵國家同步輻射研究中心，並於 2022 年第一季安裝完成、開始進行離線測試。此顯微系統的配置如圖一 (c) 所示，入射光束將以 22 度的斜角入射到樣品表面，腔體上傾的目的是將由橢圓偏振聚頻磁鐵 (EPU) 產生之同步輻射光束的水平偏振方向 (Ex) 與樣品表面的純平面方向對齊，此水平偏振方向擁有較寬的光子能量範圍。樣品座是一個擁有六個自由度的操控平臺，用於將樣品表面以及需量測的位置對齊至顯微鏡的光學軸上；此外可以使用液態氦或液態氮進行低溫量測。先進的 PEEM 透鏡可以收集從樣品表面發射角度高達正負 90 度的光電子，並在實空間成像和動量空間成像之間切換。接著光電子經由半球形能量分析儀後，選定動能下的實 (動量) 空間影像可以直接投影到下方二維電子偵測器 (spin-integrated column) 記錄其空間強度分佈，或者透過在電子束路徑中插入一塊鈹 (001) 單晶，利用其低能量電子散射擁有自旋依賴的特性，將散射後自旋解析的影像投影至另一個二維電子偵測器上 (spin-resolved column)。

結合上述能力，TPS 27A2 實驗站將不只結合 TLS 兩座軟 X 光光電子顯微術之核心功能並同時引進新穎動量空間顯微術，而成為一個具有空間、動量、能量、元素和自旋解析的強大光電子能譜顯微系統。這個多功能系統可以對新穎量子材料，如二維層狀過渡金屬硫化物 (TMD) 和拓撲絕緣體等研究主題在同一量測平台中進行完整的研究。

參考文獻：

1. A. Baez, Nature **186**, 958 (1960).
2. E. Bauer, J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom. **185**, 314 (2012) and references therein.
3. Y. Hwu, C. Y. Tung, J. Y. Pieh, S. D. Lee, P. AlmCras, F. Gozzo, H. Berger, G. Margaritondo, G. De Stasio, D. Mercanti, M. T. Ciotti, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A **361**, 349 (1995).
4. C. H. Ko, R. Klauer, D. H. Wei, H. H. Chan, T. J. Chuang, J. Synchrotron Rad. **5**, 299 (1998).
5. D. H. Wei, Y. J. Hsu, R. Klauer, I. H. Hong, G. C. Yin, T. J. Chuang, Surf. Rev. Lett. **10(4)**, 617 (2003).

用戶資訊

1. 實驗計畫申請

2023-2 期實驗計畫申請目前審核中

2023 年第二期 (2023 年 7 - 12 月) 實驗計畫申請目前正陸續進行初複審中，核定的光束線排程後續將於 6 月初公告於用戶入口網首頁。

2024-1 期實驗申請預告

2024 年第一期 (2024 年 1 - 6 月) 光束線使用預計 2023 年 7 月初開放申請，截止日期為 2023 年 8 月 15 日 (二)，歡迎計畫主持人踴躍上網 (<http://tpsportal.nsrrc.org.tw/>) 提出計畫申請 (新用戶須先完成註冊)。

2. 近期開放光束線如下

- TPS 31A1 Projection X-ray Microscopy (奈米 X 光顯微術)
- TPS 39A1 Nanometer Angle-resolved Photoemission Spectroscopy (奈米角解析光電子能譜)

會議/課程

- 第二十七屆生物物理研討會 (5 月 17 - 19 日) – 午餐論壇
- X 光吸收光譜暑期訓練營 (7 月 4、5 日)
- 全場式紅外光譜影像顯微鏡訓練課程 (7 月 11、12 日)
- 蛋白質結晶學訓練課程 (共兩梯次) (7 月 17 - 21 日; 7 月 24 - 28 日)
- 第十二屆 X 光暑期學校 (7 月 18 - 21 日)
- 台灣奈米生醫學會年會暨國際研討會 (7 月 21、22 日) – 同步輻射生醫論壇
- 國家同步輻射研究中心 2023 年薄膜 X 光散射訓練課程 (7 月 26、27 日)
- 112 年度先進光源暑期科學實習 (7 月 31 日至 8 月 30 日)
- 2023 同步輻射 TPS 21A-X 光奈米繞射訓練課程 (8 月)
- 第二十九屆用戶年會暨研討會 (10 月 24 - 26 日)