

次微米軟 X 光能譜實驗設施



Submicron Soft X-ray Spectroscopy Beamline

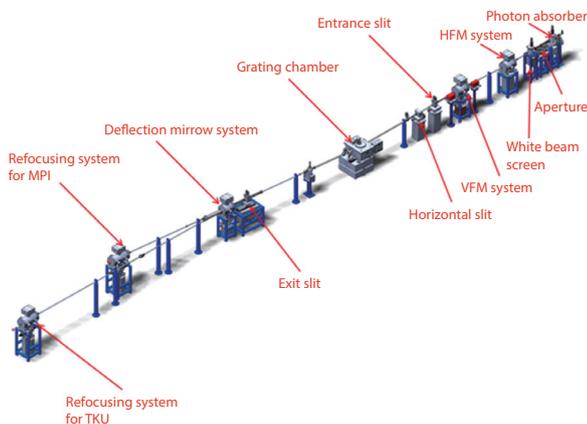
科學研究方向：探討含 3d 過渡元素及 4f 稀土元素之新穎材料的電子與磁性結構，並研究其物理特性與應用。

主要實驗技術：軟 X 光吸收光譜、軟 X 光光電子發射、軟 X 光發射和磁圓偏振二向性能譜。

概要介紹

在凝態物質中，材料的物理與化學特性受其原子排列與電子結構間相互作用的影響，隨著材料合成技術的進步，科學家可依據各種理論和化學概念，設計合成新穎的單晶樣品及以往難以合成的單晶樣品。在大多數情況下，這些新的單晶尺寸通常不會大於 20 至 150 μm ，目前也多方嘗試生成毫米大小的晶體，但晶體的均勻性通常是一個潛在的問題。為因應這逐漸變小的可探測面積，本中心於台灣光子源第一期周邊實驗設施規劃興建一座次微米光點等級的實驗設施。另外，由於物質在微米等級產生交互作用後所產出可供偵測的粒子相對少且難以探測，故高光通量亦是此實驗設施的必要條件之一。

次微米軟 X 光能譜實驗設施建造計畫為德國德勒斯登馬克斯普朗克研究所 (Max Planck Institute, MPI) Prof. L. H. Tjeng 與本中心所共同合作提出，主要內容為建設一座新穎獨特的軟 X 光光束線，其主要特性為 (1) 光點尺寸小於 1 μm x 1 μm ，和 (2) 在光源能量 700 eV 時，光子的能量分辨率優於 20 毫電子伏特。



圖一 次微米軟 X 光能譜光束線 3D 模型圖。

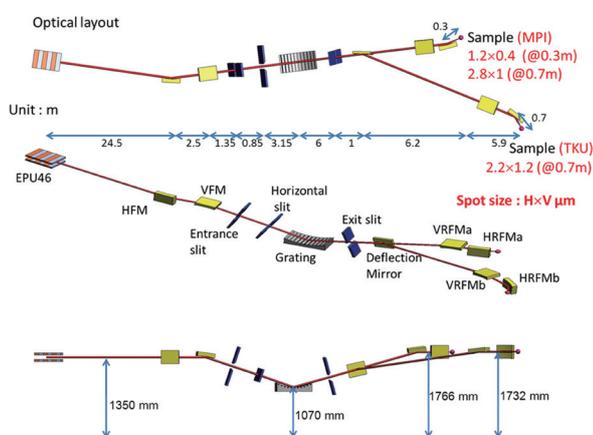
光束線設計

此實驗設施的光束線設計概念主要來自本中心前主任陳建德院士所設計之龍型光束線，其整體規劃與設計目標如下：

1. 能量涵蓋範圍：400 eV 至 1500 eV。
2. 光源輸出通量： $> 10^{15}$ photons/sec/0.1%bw。
3. 能量解析力 ($E/\Delta E$)： > 35000 (在 700 eV)。
4. 在樣品上之光通量： $> 5 \times 10^{11}$ photons/sec。
5. 在樣品上之光點大小： $< 1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ (FWHM)。

圖一為次微米軟 X 光能譜光束線 3D 模型圖，光束線建造團隊選擇 EPU46 的插件磁鐵作為次微米軟 X 光能譜光束線之光源，其長度為 3.8 公尺，操作能量範圍從 400 eV 到 1500 eV，涵蓋了大部分過渡金屬的 $L_{II,III}$ 及稀土元素的 $M_{IV,V}$ 吸收邊能量，是一座非常適合用來研究強關聯過渡金屬系統的理想光源。此光束線設計總長度約為 52 公尺長，為了簡化維護，所有的光學元件都將安裝在屏蔽牆外。圖二為次微米軟 X 光能譜光束線之基本光學元件架構圖，從 EPU46 光源中心到第一個光學元件的距離為 24.5 公尺。水平聚焦鏡 (HFM) 和垂直聚焦鏡 (VFM) 之間的距離是 2.5 公尺。在光束線設計上，光柵是整座光束線的心臟，決定了光束線的能量解析能力。因此，建造團隊選擇刻線密度為 1200 條 / 公釐的主動式光柵作為單光分光儀的主體，以滿足多數用戶所要求的能量解析力。此單光分光儀的總臂長為 10 公尺，其中入口狹縫到光柵中心的距離為 4 公尺，光柵中心到出口狹縫為 6 公尺。光柵預計安裝在一個可彎曲的支架上，藉以消除因高熱載所導致的局部凹凸形變，以維持光柵原始設計的參數，而出口狹縫的位置則採取固定式，以滿足光點大小在 700 ~ 1000 eV 的能量範圍內能保持在次微米的等級，並且在樣品處的光點位置、尺寸都能保持固定。

光學元件的形變量誤差對光點大小、光通量與能量解析力均有一定程度的影響，而造成元件產生形變量的因素，除了在製程上所造成的誤差之外，主要受制於高熱負載所造成的形變。為了減少高熱負載所導致的局部變形而降低能量解析力，因此每個光學元件皆針對不同的熱載負擔來設計不同的冷卻方式，以保持光束線初始設計的高能量解析力。在光學元件設計方面，第一個 HFM 所吸收的熱負載高達 300 瓦，根據理論模擬的結果，在 HFM 鏡子上使用內部冷却水的冷却方式，可



圖二 次微米軟 X 光能譜光束線之基本光學元件架構圖。

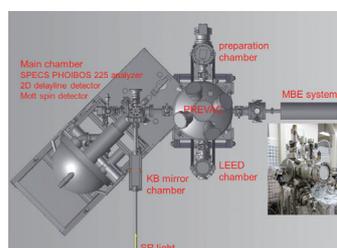
以有效降低熱負載而形成熱平衡，達到初始要求的設計值，而 VFM 則是採用側邊通冷卻水散熱的方式來進行冷卻。水平方向的光學設計採取兩階段聚焦，以符合次微米光點聚焦大小的要求，接著利用一個反射鏡將光束線分成兩個分支，每個分支搭配一組 K-B 聚焦鏡組來將光束重新聚焦投射到樣品位置。此光束線設計主要是針對 400 至 1500 eV 能量範圍內的 3d、4d 和 5d 過渡金屬及稀土元素，特別是強關聯電子系統相關的材料，以進行 X 光吸收及光電子能譜的研究。光束線設計以光源能量 700 eV 為優化目標，其光子解析力在此能量範圍將可達到 35,000。

實驗設施設計

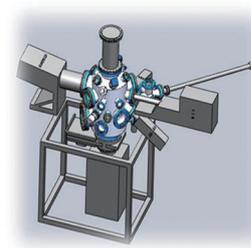
此實驗設施規劃了兩座實驗站，一座為德國 MPI 所負責的高解析光電子實驗站，致力於角解析 / 自旋解析 (angle-resolved/spin-resolved) 軟 X 光光電子能譜 (PES) 實驗，一座為淡江大學 (Tamkang University, TKU) 物理系負責的光發射實驗站，致力於偏振性相關的軟 X 光吸收光譜 (XAS) 和軟 X 光發射光譜 (XES) 實驗。

第一座光電子實驗站主要由 PHOIBOS 225 的半球形能量分析儀和四通道微莫特自旋探測器 (DLD- 莫特) 分析儀所構成，可以進行光電子能譜、角分辨光電子能譜、自旋解析光電子能譜及 X 光吸收光譜等實驗，實驗站配置圖如圖三所示。該 PHOIBOS 225 分析儀的平均半徑為 225 毫米，能量分辨率優於 7 毫電子伏特，且角分辨率小於 0.1 度，另外，實驗腔內配置一個高精度、全電動並能利用液氦或液氮冷卻的 OMICRON 5 軸樣品移動裝置。整個儀器預計安裝在獨立的花崗岩上，以減少震動並達到更好的位置重複性。此外，該實驗站亦規畫了樣品傳輸系統、分子束磊晶系統、LEED 及離子濺鍍槍等，以便能進行臨場 (in-situ) 方面的實驗。

第二座光發射實驗站主要為一光進光出的軟 X 光光發射能譜儀實驗站，可供進行光吸收、光發射、共振非彈性 X 光散射 (RIXS) 和 X 光激發能譜 (XEOL) 實驗，且此實驗站亦可提供中高磁場 (0 ~ 4 T) 及低溫 (5 K) 的樣品進行實驗，實驗站配置圖如圖四所示。此實驗站的核心設備為與美國光源設施 ALS 合作製造之可變線距光譜儀 (varied line spectrometer) 及新一代液體與氣體的實驗腔體，將有助於進行軟 X 光的液體與氣體等實驗。



圖三 MPI 實驗站設計圖。



圖四 TKU 實驗站設計圖。

結語

該實驗設施的興建動機主要是為了能對逐漸趨小的新穎材料進行光譜測量，並獲得可靠的光譜數據，從而進行分析並說明新的物理現象。高光通量的光束及光點尺寸小於 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 的優勢，將有利於進行角分辨光電子能譜 (ARPES) 和偏振性相關的 X 光吸收實驗。高能量分辨率將可提供樣品能帶結構更詳細的分析，尤其針對新的含 3d、4d 和 5d 過渡金屬成分的強關聯性研究材料。而光進光出軟 X 光發射能譜研究則能針對磁性材料、低維度 / 奈米尺度的材料、可再生能源材料、生物材料，及複雜的氫化系統解析出更清楚地電子結構特性，相信未來此實驗設施將可成為探究新穎微小材料和強關聯材料的研究利器。

※ 感謝科學研究組蔡煌銘博士提供本篇文章。

計畫主持人：德國德勒斯登馬克斯普朗克研究所
Prof. L. H. Tjeng
(tjeng@ph2.uni-koeln.de)

建造主持人：國家同步輻射研究中心 林宏基博士
(hjlin@nsrrc.org.tw)



Prof. L. H. Tjeng



林宏基博士