

台灣光子源 TPS 23A 試車成果與設施功能概要

科學研究方向：奈米半導體元件、奈米材料、低維度材料、能源材料與發光元件、奈米生醫材料與環境科學

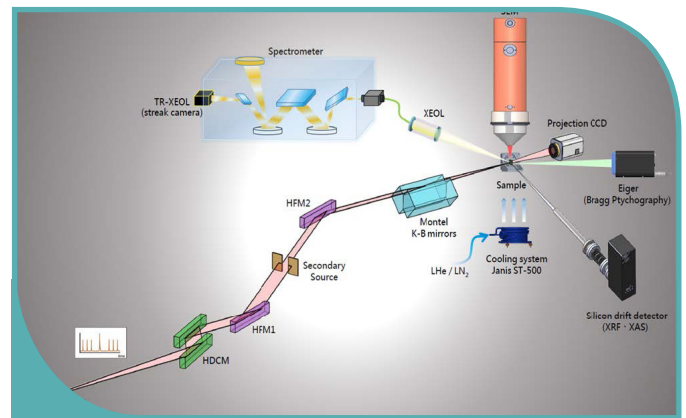
主要實驗技術：奈米 X 光螢光光譜學、奈米 X 光吸收光譜學、投射 X 光影像學、奈米 X 光繞射學、X 光致冷光光譜學、同調 X 光繞射成像學

光束線簡介

X 光奈米探測 (X-ray Nanoprobe, XNP) 光束線及其實驗設施為台灣光子源 (TPS) 第一期光束線建造計畫所規劃七條光束線之一。計畫任務為提供 40 奈米的強聚焦 X 光光束，開發新穎的 X 光實驗技術，以從事奈米半導體元件、能源材料與發光元件、奈米生醫材料與環境科學等我國積極推動的尖端科技研究。為了達成以上之目標，本光束線設計了獨步於世的聚焦光學、實驗站與實驗技術，概要說明特色如下：

- 一、最優化的光束線光學元件以保留 TPS 光源的高同調 X 光。水平雙晶體單色光器配合兩面水平聚焦鏡與高精度狹縫形成穩定之水平與垂直之對稱光源。全光束線包括實驗站處於真空環境。採用兩階段光束線聚焦 (two-stage focusing) 設計，搭配高性能超高真空 KB 聚焦鏡，實現常態性 100 奈米以下 X 光聚焦光點，目前優化後具有約 50 奈米 (垂直及水平方向相關) 之最佳空間分辨率，已達到世界上其他同類型實驗站之水準。奈米級聚焦光可用於分析非均質材料之微細結構差異分析。
- 二、採用了 Montel 鏡組，增加了較傳統 K-B 鏡組約 1.4 倍之數值孔徑，完成了世界首創以 70 公尺光束線長度而達成小於 50 奈米之聚焦目標。
- 三、提供多樣的 X 光實驗方法，包括，奈米 X 光螢光光譜學、奈米 X 光吸收光譜學、投射 X 光影像學、奈米 X 光繞射學、X 光致冷光光譜學、同調 X 光繞射成像學等實驗技術。
- 四、多樣的樣品實驗環境，包括低溫 (10 K)、臨場 (應力、電流)、臨運 (in-operando)、時間解析 (30 ps) 等。
- 五、強大的輔助實驗設施，包括內建掃描式電鏡 (SEM)、離線雷射致冷光光譜儀、離線樣品整備系統、樣品快速切換系統等。
- 六、超高精度雷射干涉儀監控奈米樣品移動平台，輔以獨立設計之超快速運動控制與數據擷取電路與分析軟體。

圖 (一) 是 TPS 23A 光束線暨實驗站示意圖。TPS IU22 聚頻磁鐵所產生的高亮度 X 光經水平雙晶體單色光器 (HDCM) 選取實驗能量後，經第一面水平聚焦鏡 (HFM1) 聚焦於高精度狹縫組藉以產生二次光源 (secondary source)，第二面水平聚焦鏡 (HFM2) 將此二次光源再次散焦成以聚頻磁鐵中心為光源焦點，形成了水平與垂直對稱之光源。Montel 鏡組將入射光聚焦至繞射極限同調的 40 奈米打在樣品上。樣品位於由雷射干涉儀監控超高速奈米級樣品移動平台。配合用戶之實驗需求，樣品可以處於低溫、臨場 (應力、電流)、臨運等實驗環境。多樣的偵測器，可同時或準臨場接收包括來自螢光、X 光制冷光、繞射、投射式影像等訊息。條紋攝影機 (streak camera) 配合同步加速器脈衝放光時序可進行最快 30 ps 時間解析力之奈米 X 光致冷光光譜學，此技術獨步於全球，為目前世界上同量級 X 光奈米探測光束線所僅有。本實驗站並且配置內建掃描式電鏡 (SEM)、離線雷射致冷光光譜儀、離線樣品整備系統、樣品快速切換系統等，作為輔助設施。



圖一 TPS 23A X 光奈米探測光束線及實驗站示意圖。

試車與實驗成果

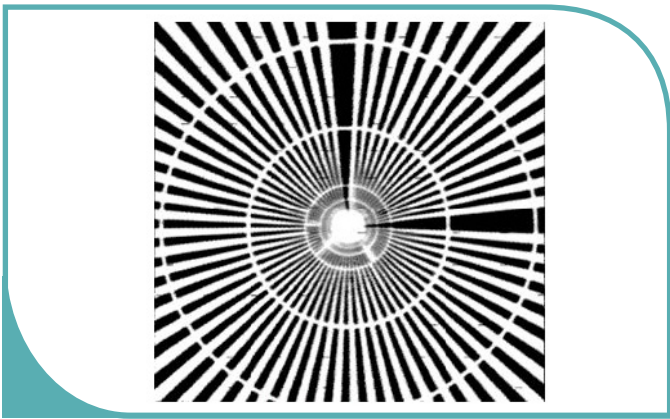
TPS 23A 光束線在 2017 年 2 月通過輻射安全竣工檢查正式通光進行試車。試車計畫依光束線、實驗站、測試實驗分階段進行。第一道單色同步輻射光於 3 月 16 日通過實驗站，完成了全線通光的目標。經過儲存環電子束運轉軌道參數校正後，聚頻磁鐵的放光頻譜達到了設計的指標，在 9.11 keV 達到 $4.7 \times 10^{14} / \text{sec} / 0.1\% \text{bw}$ 的光通量。利用 Cu K-edge XANES 光譜掃描，證實水平雙晶體單色光器 (HDCM) 的能量解析度達到設計的 1.9×10^{-4} 。

聚焦光點的大小與穩定度是本實驗站的最重要挑戰。受限於光束線僅有 70 公尺長度，為了達到小於 50 奈米的聚焦 X 光光點，我們採用了 Montel 鏡組的設計，此設計理論上可以增加約 1.4 倍數值孔徑 (numerical aperture)，使得本光束線之運轉等同於 100 公尺之世界其他光束線。這是獨步世界的設計，大膽而具挑戰性。為了達成這項任務，我們設計開發了 16 軸的鏡組調整機構、3 軸奈米級雷射定位監視系統、減振的實驗站隔絕大地的自然震動、穩定的溫控系統等。5 月達成了 150 奈米的聚焦 X 光的光點，暑期維修期間重新設計並更換了部分鏡組調整機構，有效避

開自然共振頻率，9月達成了50奈米的聚焦光點。

掃描式光束線普遍運用所謂的刀口法(knife edge)，一方面調整奈米聚焦光學元件，一方面尋找光點的位置與大小，通常要花費極長時間。TPS 23A 首創使用了波帶片(zone plates)來即時調控光學鏡組與聚焦大小及光點位置，並且可以達到即時監控光點運動的軌跡與光點大小的變化，我們設計的波帶片配合下游端的 CCD 偵檢器，具有50奈米0.5秒以上即時偵測的影像能力。

圖(二)是利用聚焦X光光點掃描了標準的圖案，內寬50奈米線已經清晰可見，實證達成了50奈米的空間解析力，並且顯示了在各向皆有相同的空間解析力。圖(二)影像的完成其實是整和了光束線穩定度、聚焦光點、掃描機構、精密定位、偵檢器、控制系統、顯像軟體等系統的完美配合之結果。



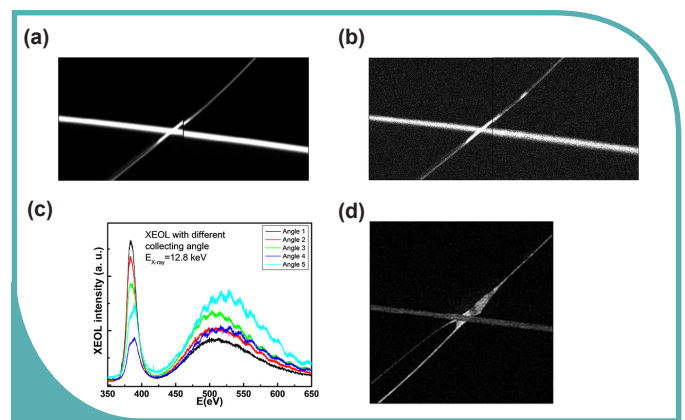
圖(二) 聚焦X光光點掃描了標準的圖案，內寬50奈米線已經清晰可見，實證達成了50奈米的空間解析力。

作為第一階段測試實驗樣品，基於幾個原因我們選擇了ZnO微米線。

- (一) ZnO 是一個重要的發光材料，深具科學與工業應用價值。
- (二) ZnO 對於 X 光照射所可能造成的輻射傷害較微。
- (三) Zn 元素之 K-edge 吸收能量 9.659 keV 位於光束線能量最佳範圍，可以進行 X 光螢光光譜學、X 光吸收光譜學等測試。
- (四) ZnO 為發光材料，發光波段大約 375 nm，發光強度高，發光生命期短 (120 ps)，適合作為 X 光致冷光光譜學 (XEOL) 之研究。
- (五) ZnO 微米線可資探討共振激發等機制，且試車團隊已在 TLS BL07A1 進行過前期實驗並已發表數篇相關論文。

圖(三)是部分的試車成果。六角柱狀的ZnO微米柱的X光螢光光譜(a)與X光致冷光光譜(b)的影像，是經由掃描樣品且同時擷取Zn K_α螢光與ZnO近能帶(NBE)冷光所畫就。比對兩者之差異解析出放光效率在微米柱之空間分布。(c)顯示了X光致冷光光譜在不同的擷取角度的似Fabry-Perot共振現象。本實驗站之SEM其實也提供了X光之外的聚焦電子源，(d)顯示了電子致冷光光譜(cathodoluminescence)的影像。

在本階段之試車中，我們亦測試了具1 ps時間解析力之條紋攝影機(streak camera)，配合TPS的脈衝放光時序，本光束線將可量測30 ps ~ 1.7 μs的X光致冷光放光機制，限於篇幅，將在未來簡訊中再詳加說明。



圖(三) ZnO 微米柱的 (a)X 光螢光光譜、(b)X 光致冷光光譜、(c) X 光致冷光光譜的類 Fabry-Perot 共振對應擷取角度、(d) 電子致冷光光譜 (cathodoluminescence) 的影像。

結論

TPS 23A 奈米探測光束線於 2018-1 期開放 30 % 光束線時間供用戶提計畫申請，目前提供的實驗技術為 100 奈米聚焦之 X 光螢光光譜學、X 光吸收光譜學、X 光致冷光光譜學，已完成了 6 組實驗，實驗課題涵蓋廣泛，包括了環境保護、空汙 PM2.5、二維材料、能源材料、半導體元件等。隨著試車的持續進展，我們期待很快將開放更多的光束線時間，密切與用戶合作進行並開發具挑戰性、尖端的研究課題。

實驗站發言人：湯茂竹博士 ((03)578-0281 #7107)
mautsu@nsrrc.org.tw

實驗站經理：林碧軒博士 ((03)578-0281 #7136)
bihsuan@nsrrc.org.tw