

柔X光的終極挑戰：熱情

TPS 32A 建造團隊
國家同步輻射研究中心 實驗設施組

全世界的同步輻射設施既吃軟也吃硬，能夠把軟X光 (0.1 - 1.5 keV) 和硬X光 (>5 keV) 伺候得服服貼貼，然而對於介在軟硬之間的柔X光 (1.5 - 5 keV) 就是拿它沒轍。其實台灣光源 (TLS) 儲存環能量是世界上少有的1.5 GeV，使得臨界能量就位於柔X光範圍內，因此TLS BL16A自然成為一條得天獨厚的柔X光光束線。果不其然，去年便產出一篇Science期刊論文，柔X光的戰鬥力可見一斑。

問題與挑戰

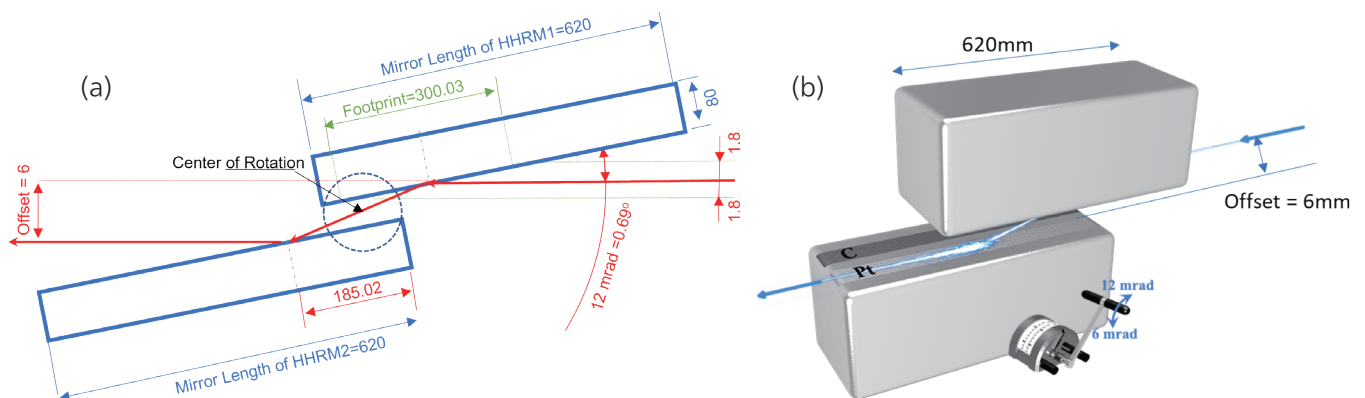
大致而言，軟X光可以使用光柵分光，比如龍光束線就分得很好，硬X光則需用雙晶體單光儀(Double-Crystal Monochromator, DCM)選光。在TLS BL16A單光儀內部選用一對矽(111)晶體，不過受限於晶體可運轉的布拉格角度極限，無法將光子能量範圍降到2 keV以下，因此無法量測半導體材料常用的矽元素(Si K-edge: 1.839 keV)，對於號稱是全球半導體產業重鎮的台灣實為一大遺憾。因此，在台灣光子源(TPS)第三期光束線建造計畫中，規劃興建一條全新的柔X光吸收光譜光束線(tender X-ray absorption spectroscopy beamline)，設計規格列於表一。TPS 32A光束線採用偏轉磁鐵做為光源，不僅擁有優良的柔X光，還多了許多不想要的軟硬X光，所有這些高密度的光子熱量易導致光學元件產生變形而嚴重影響聚焦效能以及解析度。為突破柔X光光束線的能量下限，TPS 32A單光儀除了矽(111)晶體之外，另增加銻化銻(111)晶體以使能量向下延伸到1.7 keV，但不幸的是在室溫下銻化銻(InSb)晶體熱傳導係數僅有矽(Si)晶體的九分之一，在高亮度光源照射下，熱量持續蓄積造成晶體熱變形，最終導致光束聚焦成像尺寸擴大，無法達到預期之性能。因此，如何減少光學元件的熱負載並同時維持高亮度以及高準直性，便成為設計TPS 32A時所面臨的最大挑戰。

表一 TPS 32A柔X 光吸收光譜光束線設計之性能參數值

能量範圍(銻化銻單光儀)	1.7 - 3 keV
能量範圍(矽單光儀)	2.1 - 11 keV
聚焦點光斑大小	0.85 (H) × 0.7 (V) mm ²
光通量	10 ¹² 光子/秒 @ 4 keV
能量解析度(銻化銻單光儀)	~ 3.5 × 10 ⁻⁴
能量解析度(矽單光儀)	< 2 × 10 ⁻⁴
高諧波率(3 rd /1 st)	< 10 ⁻⁴

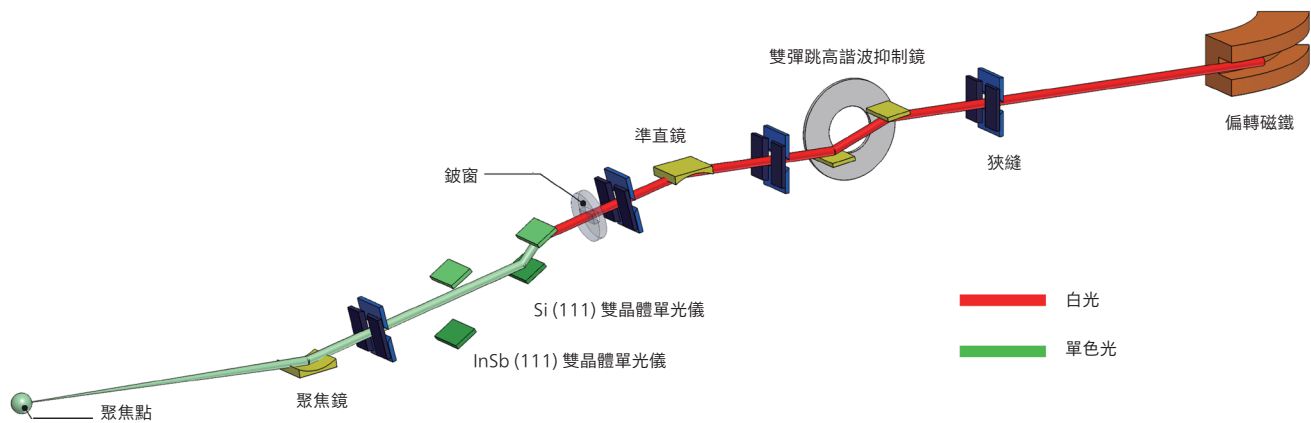
只要溫柔不要熱

軟X光產生的熱量問題較易解決，只要使用100 μm厚的鍍窗即可過濾低能量光子的熱量且兼具真空隔離的功能，此外將銻化銻(111)晶體厚度縮減為2 mm，使其散熱快一點。然後再把不要的光裁掉，我們刻意將光束線的水平接收張角拉大至2 mrad，而垂直方向則限縮至0.15 mrad，能有效減低熱量密度，同時保有光通量。但只有這樣是不夠的，因為硬X光的熱量也需去除。解決的方法為將原本一般會配置在光束線末端的高諧波抑制鏡，採雙彈跳設計(圖一)移至DCM之前，並改成水冷方式預先吸收熱量。此光



圖一 (a) 掠射角為12 mrad雙彈跳高諧波抑制鏡的概念圖。

(b) 鏡面上的碳和白金鍍膜條紋。雙彈跳的設計可使入射光與出射光保持平行，而且掠射角在6 - 12 mrad範圍內調變時，出射光與入射光的高度差(offset)可固定在6 mm。



圖二 柔X光吸收光譜光束線主要光學元件配置圖。

學鏡表面分別鍍上的碳(C)與白金(Pt)兩條鍍膜條紋，可依使用能量範圍進行水平切換，以吸收不要的硬X光所產生的熱量。值得一提的是，TPS 32A柔X光吸收光譜光束線設計共有四面光學鏡，圖二所示為主要光學元件配置。除了準直鏡及聚焦鏡均採固定掠射角(7 mrad)之外，再加上這一對水冷式雙彈跳且掠射角可調變的高諧波抑制鏡。因此TPS 32A光束線的高諧波率可抑制到遠低於0.01%，並且光通量還能穩定維持在 10^{12} 光子/秒，達到純淨且高強度的X光

吸收光譜光束線要求，超越世界上其它先進的同類型光束線的高規格條件。總之，對柔X光而言，不只是掐頭去尾取中間，對光束線上每個光學元件都要溫柔以待。

參考文獻

1. D. G. Liu, M. H. Lee, Y. J. Lu, J. F. Lee and C. L. Chen, J. Synchrotron Radiat. **28**, 1202 (2021).

標準氣導元件—大氣環境下實踐分子流的微流道

詹哲鎧

國家同步輻射研究中心 真空小組

氣導是設計一套真空系統用來衡量氣體分子流過系統所屬真空元件的重要參數，真空元件氣導的定義為該元件在穩定狀態下兩端單位壓力差的氣流通量。氣體分子的平均自由路徑(λ)定義為，平均一個粒子在碰撞其他粒子前所走的距離。真空元件內部的氣體流動方式，依據平均自由路徑及真空元件內部的特徵尺寸(L)將其區分為三種。黏滯流範圍($\lambda/L < 0.01$)：氣體分子相互發生碰撞的機率遠大於氣體分子與真空元件內壁碰撞的機率；過渡流範圍($0.01 < \lambda/L < 1$)：氣體分子相互發生碰撞的機率相當於氣體分子與真空元件內壁碰撞的機率；分子流範圍($\lambda/L > 1$)：氣體分子主要與元件內壁發生碰撞，氣體分子之間的碰撞的機率小。

在黏滯流與過渡流範圍內，氣體分子的平均自由路徑小於元件內部的特徵尺寸，氣體分子要通過真空元件會遭遇許多次分子間的碰撞，故黏滯流與過渡流內的分子氣流與壓力大小有關。反之，在分子流範圍，氣體分子的平均

自由路徑遠大於元件內部的特徵尺寸，氣體分子之間的碰撞機率甚小，氣體分子主要是與器皿內壁發生碰撞，故分子流的氣流與外在壓力無關，只與氣體的分子量、真空元件內部的幾何結構及環境溫度有關。

圖一(a)列出一些常見尺寸的真空圓管在不同氣壓下氣導的變化，從這些曲線我們可以觀察到兩個現象：第一、圓管的氣導會隨內徑的縮小而變小；第二、氣導較小的圓管具有較寬的分子流範圍，且越往氣壓高的範圍延伸。

當真空圓管的內徑縮小至微米以下的尺度，此時產生一個有趣的現象，以往氣體分子必須在真空環境下才能實踐的分子流狀態，在大氣環境下即可實現(如圖一(b)所示)。上述現象可由平均自由路徑的公式簡單解釋，以內徑一微米的圓管為例，氣體分子在圓管內的平均自由路徑只需大於一微米，在壓力小於64 mbar的環境下即可滿足分子流條件。