

超導移頻磁鐵BL01 X光光束線

宋艷芳、張劍虹、曾金榮 (光束線組)
李志甫 (研究組)

爲了提供更多X光光束線的使用時間，本中心決定於原本已經非常擁擠的儲存環中安裝特殊設計的超導移頻磁鐵(Superconducting Wavelength Shifter)，以產生高光子通量及高能量的X光光源。目前中心現有的增頻磁鐵(Wiggler 20)光束線所提供光譜的能量爲5 ~ 15 keV，可涵蓋3d元素的K-吸收緣以及5d元素的L-吸收緣能譜。新裝置的超導移頻磁鐵可提供光譜能量至33 keV以上，涵蓋達4d元素的K-吸收緣能譜，提供研究人員作更廣泛且深入的研究。

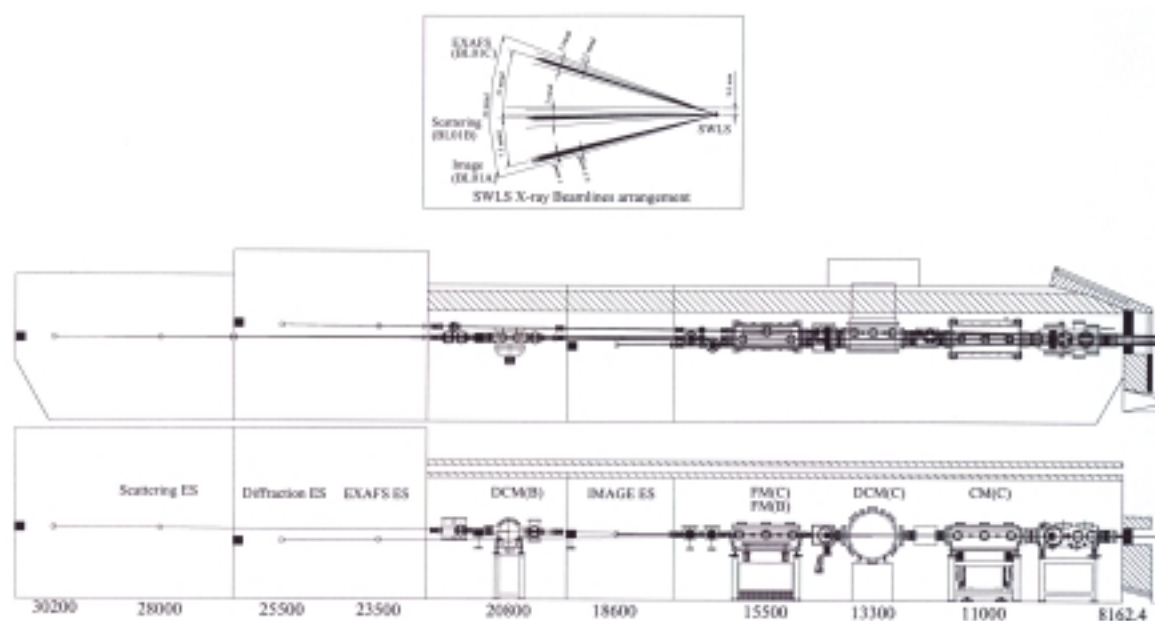
我們將利用超導移頻磁鐵的光源引出三條X光光束線^[1]，分別是BL01A、BL01B以及BL01C，如圖一所示。其中BL01A X光光束線將用於進行X光顯像(image)的實驗，先暫定爲白光光束線。將來可安裝槽切式(channel-cut)晶體以及高倍率的K-B聚焦鏡系統，進行與微米光束(micro-beam)相關的實驗，例如微斷層掃描(micro-tomography)等。BL01B X光光束線光譜的

能量範圍爲5 ~ 20 keV，可作小角度散射、X光磁散射以及X光繞射等相關的實驗。BL01C光束線光譜的能量範圍爲6 ~ 33 keV，可作X光吸收能譜與X光繞射方面的實驗。這三條光束線預計在2002年12月起陸續完成建造。

本報告將敘述這三條光束線的光學系統設計，我們採用光束循跡模擬程式SHADOW^[2]模擬光束經光學元件聚焦及分光後的情形以優化設計。對於光學元件受熱變形的分析、理論估計光子輸出通量及能量解析度的結果也將簡要說明。

設計光束線必須先瞭解光源的特性以及光束線功能的需求，茲擇要敘述如下。此X光光源是由一組插件超導移頻磁鐵產生，其設計的參數^[3]爲：

- 主要的磁極數爲1。
- 磁場最大強度(Peak Magnetic Field)爲6 Tesla。
- 磁距(Magnetic Period)爲23 cm。



圖一 超導移頻磁鐵X光光束線BL01A、BL01B及BL01C的配置圖

- 光子通量(Photon Flux)，在光子能量35 keV以下
- 為 $4 \times 10^{11} \sim 7 \times 10^{12}$ Photons/0.1%BW/mr/200mA。
- 光源亮度 (Brightness)，在光子能量35 keV以下為 $2 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{14}$ Photons/0.1%BW/mm²/mr²/200mA。
- 中央有效磁極的光源水平方向的張角可達±60 mrad，但我們只取其中央最強部分20 mrad的光作為光束線的光源。

而这三條X光光束線功能的需求分別為

BL01A:

- (1) 光譜能量範圍保持與原光源相同。
- (2) 不加任何光學元件，以免破壞光源的自然張角及同調性(coherence)。

BL01B:

- (1) 光譜能量的範圍為6 ~ 20 keV。
- (2) 能量解析度($\Delta E/E$) $\leq 5 \times 10^{-3}$ 。
- (3) 光子輸出通量 $\geq 1 \times 10^{12}$ photons/sec。
- (4) 光點最後聚焦的大小 $\leq 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (H×V)。
- (5) 高階能量(high order harmonic)光的殘留量 $\leq 10^{-4}$ 。
- (6) 聚焦後光束垂直方向的張角 $\leq 0.3 \text{ mrad}$ 。
- (7) 樣品的位置固定。

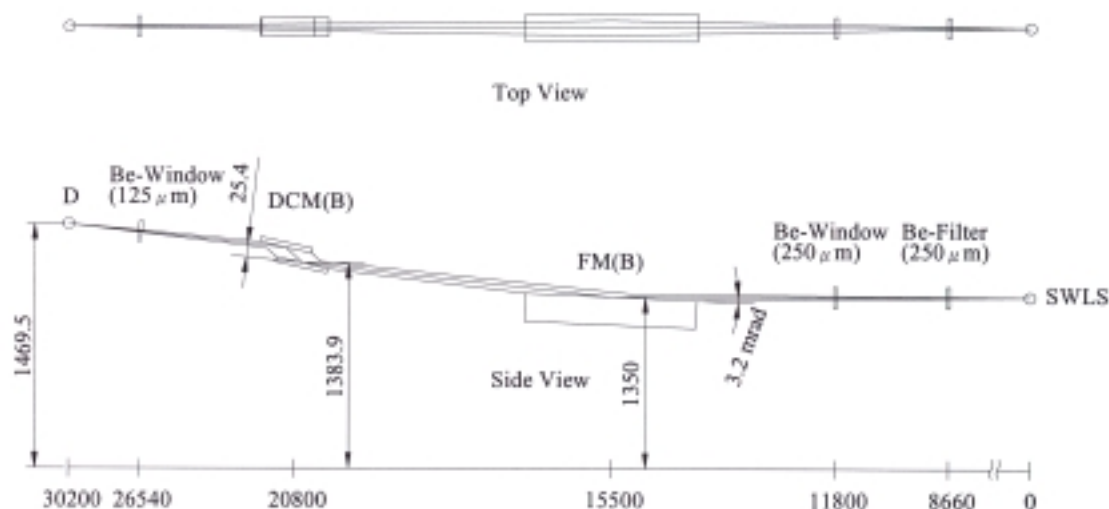
BL01C:

- (1) 光譜能量的範圍為6 ~ 33 keV。
- (2) 能量解析度($\Delta E/E$) $\leq 2 \times 10^{-4}$ 。
- (3) 光子輸出通量 $\geq 1 \times 10^{10}$ photons/sec。
- (4) 光點最後聚焦的大小 $\leq 1 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ (H×V)。
- (5) 高階能量光的殘留量 $\leq 10^{-4}$ 。
- (6) 聚焦後光束垂直方向的張角 $\leq 2 \text{ mrad}$ 。
- (7) 樣品的位置固定。

綜合上述光束線功能的需求以及三條光束線之間空間的配合，BL01A、BL01B以及BL01C光學元件的設計敘述如下：

BL01A 光束線使用超導移頻磁鐵光源水平方向最靠外側的1 mrad。目前設計為白光光束線，其實驗站位於離光源18.6 m處。

BL01B 光束線使用超導移頻磁鐵光源水平方向中央部分3 mrad，光譜能量範圍為5 ~ 20 keV。其光學元件的配置如圖二所示。主要的光學元件包括一個圓環聚焦鏡(toroidal focusing mirror)和一個非色散式雙晶分光儀(double crystal monochromator)。圓環鏡鏡面的鍍膜採用銻(Rhodium)，以3.2 mrad的掠角入射。此聚焦鏡位於距離光源15.5 m處，聚焦於離光源30.2 m處，聚焦比例(物距/像距)約為1，此位置的選定為兼顧聚焦光束的品質以及BL01C光束線光學元件的配置。為了進行能



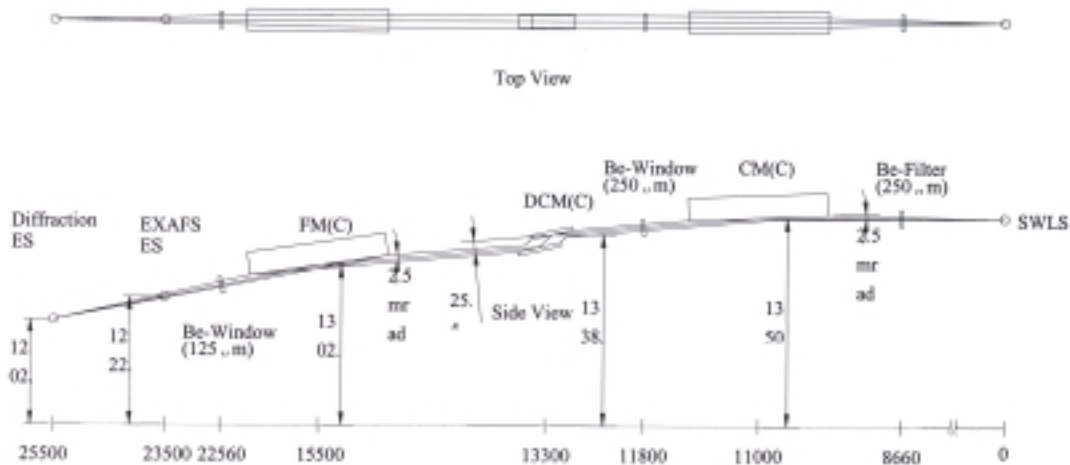
圖二 超導移頻磁鐵BL01B光束線光學元件配置圖

量快速掃描的分光條件，且維持樣品的位置固定，分光儀採用非色散式雙晶體結構，如圖二中的DCM(B)所示。雙晶分光儀的晶體採用Ge(111)以獲得較高的光子輸出通量。此分光儀位於離光源20.8 m處。圓環鏡鏡面向上，分光儀晶體位置的安排配合圓環鏡使得光的路徑為向上升高；而BL01C光束線的路徑為向下降低，如此兩條光束線實驗區的空間可作最佳的安排。經光束循跡模擬程式分析後，光束最後聚焦的大小 $\leq 1 \times 0.4 \text{ mm}^2$ (FWHM, H×V)，光的張角 $\leq 2.7 \times 0.23 \text{ mrad}^2$ (FWHM, H×V)。光束最後的輸出通量約為 3×10^{12} Photons/sec/0.1%BW/3mrad/200mA，能量解析度($\Delta E/E$)為 $6.3 \times 10^{-4} \sim 2.4 \times 10^{-3}$ 。

BL01C 光束線使用超導移頻磁鐵光源水平方向最內側的2 mrad，光譜能量範圍為6 ~ 33 keV。其光學元件的配置如圖三所示。主要的光學元件包括一個圓柱準直鏡(cylindrical collimating mirror)、一個非色散式雙晶分光儀和一個圓環聚焦鏡。準直鏡的作用是將同步輻射光的垂直張角變成近似於零，亦即變成平行光以提高能量解析力。鏡面的鍍膜採用白金(Platinum)，以2.5 mrad的掠角入射。此準直鏡位於距離光源11 m處。分光儀採用非色散式雙晶體結構，雙晶分光儀的晶體選擇Si(111)，如此可兼顧能量解析力與光子輸出通量的要求。若需要更高的能量解析力，可將晶體換成Si(311)。分光儀位於離光源

13.3 m處。為了在樣品處得到很小的聚焦光點，從分光儀出來的單色光再經過圓環鏡聚焦。此聚焦鏡鏡面的鍍膜也採用白金，以2.5 mrad的掠角入射。它位於距離光源15.5 m處，與BL01B光束線的圓環聚焦鏡共用同一個鏡箱，聚焦於離光源25.5 m處，聚焦比例(物距/像距)約為1.5。在實驗站設立X光吸收能譜以及X光繞射兩套實驗系統，以進行相關的實驗。經光束循跡模擬程式分析後，光束最後聚焦的大小 $\leq 0.9 \times 0.2 \text{ mm}^2$ (FWHM, H×V)，光的張角 $\leq 1.8 \times 0.22 \text{ mrad}^2$ (FWHM, H×V)。光束最後的輸出通量為 $7 \times 10^{10} \sim 4 \times 10^{11}$ Photons/sec/0.02%BW/2mrad/200mA，能量解析度($\Delta E/E$)為 $1.4 \times 10^{-4} \sim 2.1 \times 10^{-4}$ 。

除了光學元件位置的配置之外，光學元件因為受光束的熱量產生的變形對於光束最後的品質也有很大的影響。超導移頻磁鐵所產生的光源熱量很高，在儲存電流為500 mA時，其光束所攜帶之總熱量在中央部分水平張角20 mrad的範圍為1.1 kW。為了避免光學元件因為受高熱載的光束照射而變形，以致於影響其聚焦或分光的品質，這些光學元件需要有恰當的冷卻機制。我們先利用SHADOW程式得到同步輻射光在各光學元件上光點以及熱量的分佈情形，然後利用熱載分析程式ANSYS來分析光學元件在不同冷卻系統機制下表面溫度的變化和變形量。BL01B光束線的圓環聚焦鏡所受的熱載為33 W，我們建立一



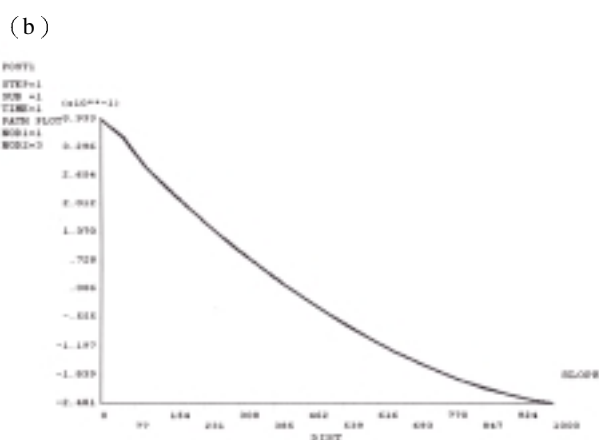
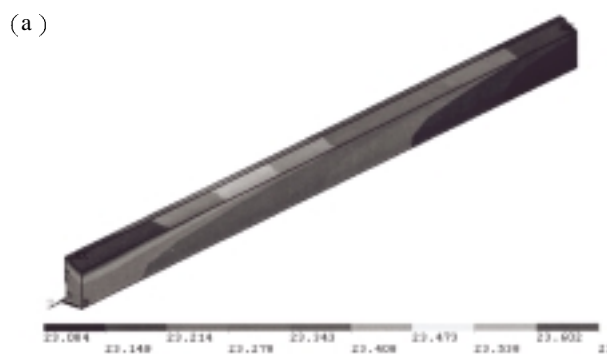
圖三 超導移頻磁鐵BL01C光束線光學元件配置圖

個熱載為60 W、以側面冷卻、水流量為2 liter/min的熱載變形分析模式，分析的結果如圖四所示。結果顯示使用選定的冷卻機制鏡面因受熱而產生的曲率變化量幾乎不會影響聚焦的品質。

在BL01B光束線雙晶體分光儀的第一面晶體的熱載為90 W，我們採用以銅製晶體底座背面挖水道通水冷卻、水流量為2 liter/min的冷卻模式，熱載變形分析結果顯示晶面上的曲率變化量會使得光束輸出通量減小2%；而對於能量解析度則沒有影響，因為對於晶體而言這曲率變化量的效應遠小於光源垂直的張角0.22 mrad。

BL01C光束線的準直鏡所受的熱載為13 W，我們採用側面冷卻、水流量為2 liter/min的冷卻方式即已足夠。

在BL01C光束線雙晶體分光儀的第一面晶體



圖四 BL01B光束線聚焦鏡鏡面的熱載變形分析，鏡面的熱載為60W，採用水流量2 liter/min、側面冷卻的模式。(a)鏡面上溫度的分布。(b)沿光進行方向鏡中心線上曲率的變化量。

的熱載為70 W，我們同樣採用以銅製晶體底座背面挖水道通水冷卻、水流量為2 liter/min的冷卻模式，熱載變形分析結果顯示晶面平均的曲率變化量會使得在高能量部分(>20 keV)光的輸出通量和能量解析度受到較大的影響。我們可以考慮更複雜的冷卻方式以減小高能量部分光束輸出通量的損失。

BL01B與 BL01C 光束線在使用較低能量的入射光時都會有混雜高階能量光源的問題，我們在這兩條光束線的實驗站樣品之前分別裝置一個表面蒸鍍材質為鈹的平面鏡，由選擇此平面鏡適當的入射角可以濾除高階能量的雜光。

超導移頻磁鐵BL01A、BL01B以及BL01C三條X光光束線的設計已完成，並且進入建造階段。目前已陸續完成各光學元件、鏡箱、分光儀、儀器控制系統、真空系統、輻射屏蔽、水電氣系統以及光束線上各組件的設計、規格制定與採購發包等工作，預計於2002年底開始陸續進行試車。

感謝光束線組同仁的努力與X光組同仁的合作協助，也謝謝黃清鄉博士以及郭錦城博士提供超導移頻磁鐵及其光源相關的資料，使得此光束線的設計能夠順利完成。

參考文獻

- [1] Y. F. Song *et al.*, "Conceptual Design Report for the Superconducting Wavelength Shifter X-ray Beamlines: BL01A, BL01B, and BL01C at SRRC, SRRC/RBM/IM/02-05 (2002).
- [2] C. Welak, G. C. Chen and F. Cerrina, Nucl. Instr. and Meth. **347**, 344 (1994).
- [3] C. S. Hwang, P. C. Chang, D. H. Chang, F. Z. Hsial and C. T. Chen, IEEE Trans. on Appl. Supercon. **10**, 503 (2000).