

加速器中的極化和空間結構光源

鍾廷翊博士

國家同步輻射研究中心磁鐵小組

前言

同步輻射是電子被加速至接近光速後，在外加磁場中受勞侖茲力作用而改變運動方向，所產生具相對論效應的電磁輻射。時間壓縮使其形成連續光譜，空間集中則帶來高亮度特性，以上提到的同步輻射光源特性可由建構加速器的轉彎磁鐵來獲得。如果要進一步提升亮度，則利用電磁波同調原理，於儲存環中安裝具正負磁極週期排列的插件磁鐵，可使亮度提高約五個數量級，成為現代加速器的重要光源。高純度線極化光可明確定義電場振盪方向，有助於分析電子軌道對稱性；左右旋圓極化光在磁性材料中因為吸收係數的差異而造成的二色相性現象，廣泛應用於研究電子自旋與軌道磁矩結構。為滿足多樣化實驗需求，能產生不同極化態的橢圓極化聚頻磁鐵 (Elliptically Polarized Undulator, EPU)，因而成為關鍵元件。此外，電子在 EPU 磁場中運動時會形成特殊能量分布，產生具軌道角動量的空間結構光，此特性近年已獲實驗驗證，相關應用亦逐步發展中。

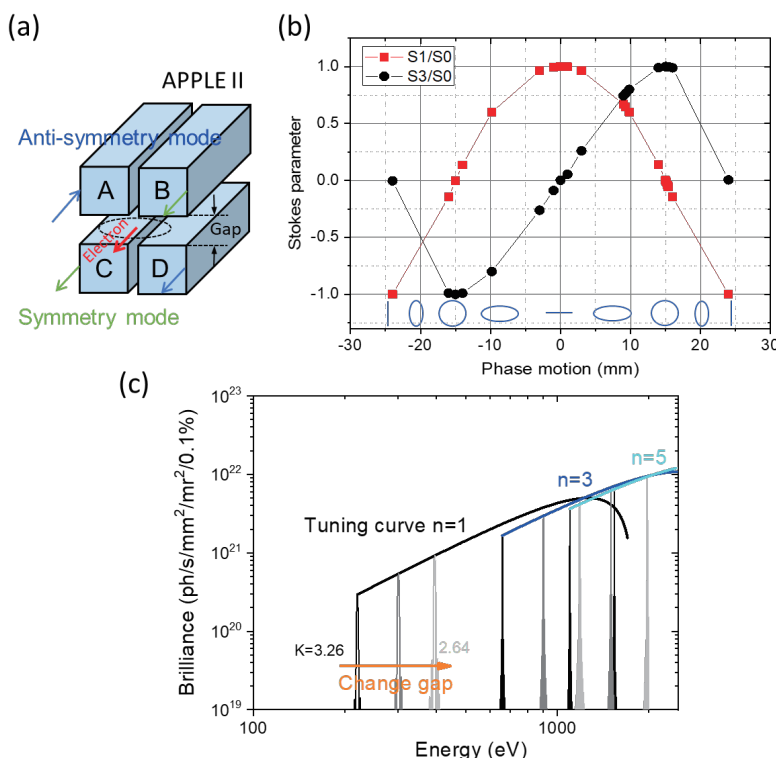
極化光能譜

如圖一 (a) 所示，EPU 由四列 Halbach 結構永久磁石組成。電子束行經磁石邊緣，而非一般插件磁鐵的中央位置。其磁場透過四列磁石的相對位移調控，主要有兩種模式：(一) 在 Anti-Symmetry Mode (ASM) 下，一組對角磁列固定，另一組反向移動，可產生不同旋轉角的線極化光；(二) 在 Symmetry Mode (SM) 下，磁列同向移動，使極化由水平線極化經橢圓極化轉為垂直線極化，過程中可達到完全圓極化。如圖一 (b) 所示，當磁列 B、C 同向前或後移時，分別產生左旋或右旋圓極化光，其 Stokes 參數 S_3 為 +1 或 -1。由於同調相干效應，EPU 光譜呈現離散的多階諧波，僅在諧波能量處有明顯光通量，如圖一 (c) 所示。若需改變輸出能量，須調整磁極間隙 (gap) 以改變磁場強度，進而移動諧波位置，達到能譜掃描。各階諧波峰值隨間隙變化形成調整曲線 (tuning curve)，代表在不同能量範圍內可獲得的光通量。

空間結構光特性

EPU 透過四列磁石的相對運動，在空間中產生水平與垂直磁場。於 SM 模式下，當兩磁場相位差固定為四分之一週期時，同向位移僅改變磁場強度。當四列磁石完全對齊時，僅存在垂直磁場。電子束做水平震盪，產生水平線極化光，功率密度呈水平方向分布；當對角磁列移動至半週期位置時，僅有水平磁場。電子束做垂直振盪，形成垂直線極化光，功率密度呈垂直分布。

當磁列位置介於兩者之間時，水平與垂直磁場同時存在；在圓極化條件下，兩磁場強度相等，電子束作螺旋運動。此時從基頻至高階諧波的功率密度呈圓對稱分布，如圖二所示。分析高階諧波 ($n \geq 2$) 的波前空間相位分布，相位具有 $n-1$ 的週期性。以上提到的兩種 EPU 圓極化光特性，符



圖一 (a) EPU 的磁列結構示意圖。四列磁石以 A 至 D 標示，電子束行走於真空腔中 (以橢圓虛線示意)。(b) EPU 光源的極化特性，操作在 SM 模式下，光源極化特徵以 stokes parameters 表示。(c) EPU 能譜特性，第一、第三至第五諧波分別以 $n=1$ 、3 至 5 表示。

合高斯光學裡 Laguerre Gaussian beam 的特徵，即代表 EPU 圓極化模式操作下，高階諧波具有光的軌道角動量特性。而對於 EPU 產生的線極化光，則具有 Hermite Gaussian beam 的特徵。

橢圓極化聚頻磁鐵建造技術

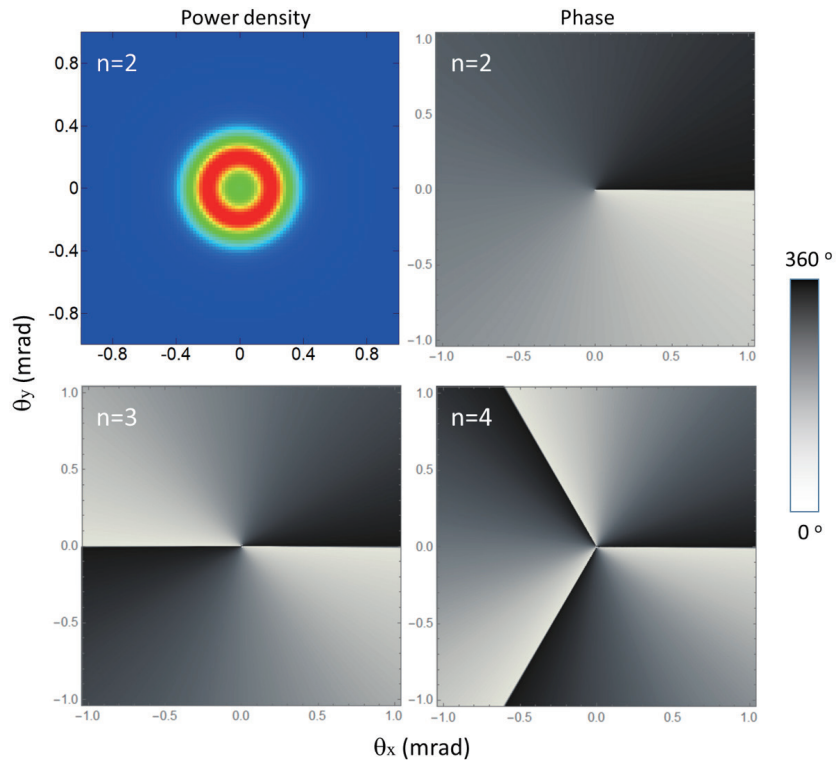
EPU 運轉須兼顧兩項目標：提升輻射強度且不影響儲存環電子束。為獲得高強度，磁場需具純週期性，使各發光點產生建設性干涉；均方根相位誤差與光譜強度密切相關，必須降至最低。同時，電子束離開磁鐵時的出射角與位置應與入射條件一致，因此需控制磁場一次與二次積分值。我們建立優化邏輯，依據單顆磁石量測與機械精度預測整體磁場，並以模擬退火法尋找最佳排列，磁石結構如圖三 (a) 所示。以安裝於 TPS 的 EPU66 為例，隨機排列時相位誤差達 30 度，最佳化後降至 4.1 度，並改善電子軌跡；再透過次毫米級的位置調校，最終降至 3.1 度，如圖三 (b) 所示。機械設計亦須抑制重力與磁力造成的形變。EPU66 在最小間隙下承受超過 50 kN 磁力，優化材料和機械結構後，間隙變化可控制至 ±3 微米；實際組裝修配後約 ±20 微米，貢獻的相位誤差約 3.4 度。至今，國輻中心已自行設計、建造、安裝和成功運轉 6 台 EPU 於台灣光子源 [1]，如圖三 (c) 所示。

結論

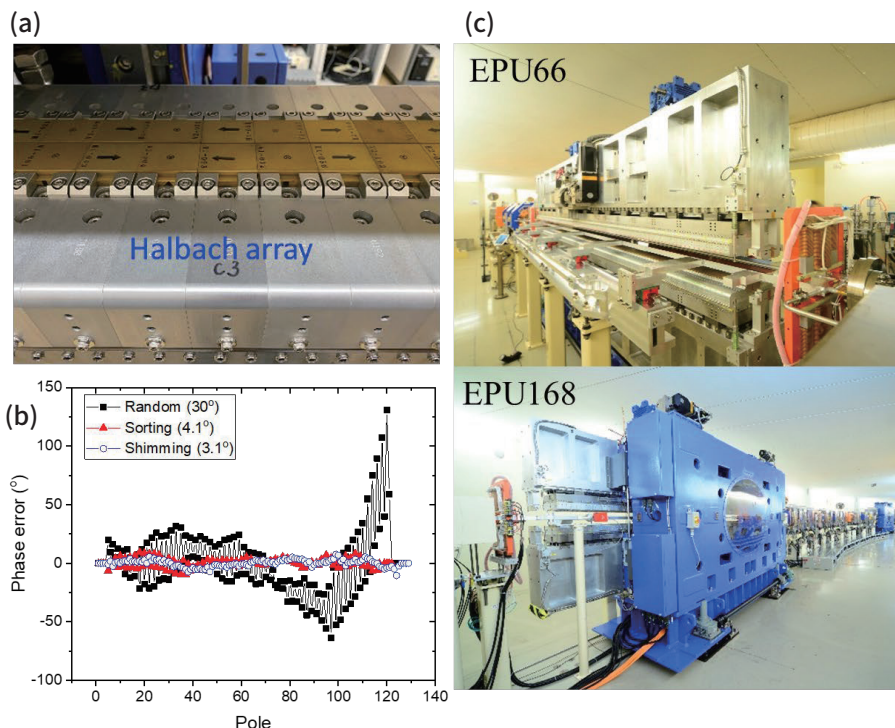
以電子加速器產生的同步輻射光已在全球被廣泛應用。其中，EPU 能提供多種極化形式與空間結構的光，在許多研究領域中扮演重要且不可或缺的角色。國輻中心經過多年的努力與經驗累積，已完成多台 EPU 的設計、建造、磁場量測與校正，以及安裝與運轉，提供高亮度的光源於不同光束線，如軟 X 光奈米顯微術 (TPS 27A)、軟 X 光吸收光譜 (TPS 35A)、奈米角解析光電子能譜 (TPS 39A)、軟 X 光散射 (TPS 41A)、次微米軟 X 光能譜 (TPS 45A) 等。我們透過持續的設計優化與技術經驗的累積，讓用戶得以獲得更高品質的 EPU 與光源。

參考文獻：

1. T.-Y. Chung *et al.*, *J. Instrum.* **19**, P03004 (2024).



圖二 EPU 圓極化模式操作下，高階諧波 ($n = 2, 3, 4$) 波前相位分布。



圖三 (a) EPU 磁石的 Halbach 結構照片。(b) 隨機磁石排列和磁場優化後的 EPU 相位誤差分布。(c) 安裝於台灣光子源的 EPU66 和 EPU168 照片。