

# 加速器極紫外光源發展概況

## An Overview of Accelerator-based EUV Sources

劉偉強、劉宗凱、羅皓文

Wai-Keung Lau, Zong-Kai Liu, Hao-Wen Luo

近年來，半導體產業在大量生產技術上取得了顯著進步，其中穩定可靠的極紫外光微影製程 (EUVL) 技術功不可沒。目前，商用 EUVL 系統中所使用的光源主要是利用二氧化碳雷射驅動錫電漿 (LPP) 產生 13.5 奈米波長的極紫外光，雖然其在滿足晶片量產需求上發揮了重要作用，但同時也面臨著如鏡片污染等技術挑戰。為進一步提升 EUVL 製程速度，增加光源功率是其中一個重要的方向。本文介紹了加速器光源技術的發展現況並討論在 EUVL 中的應用潛力。加速器光源，特別是同步輻射和自由電子雷射 (FEL) 隨著光子科學的興起而受到重視。同步輻射是高能電子在磁場中運動時發出的電磁輻射，具有寬頻帶、高亮度和高準直性等特點，已成為許多科學研究領域的重要光源。FEL 則利用電子束在聚頻磁鐵中與電磁場的交互作用產生高強度同調輻射，具備更高的輻射功率和無污染的優勢。FEL 的實現需要一系列關鍵技術，包括低發射度電子源、磁力束團壓縮器和微波直線加速器等。這些技術的發展為 FEL 提供了高亮度相對論性電子束，成為實現高功率 EUV 光源的基礎。半導體產業對高功率 EUV 光源需求的增加，也使得它們在 EUV 波段的應用受到許多關注。本文從同步輻射及 FEL 的基本原理到技術實現進行了討論，並探討了能量回復直線加速器 (ERL) 和穩態微聚束 (SSMB) 技術在發展高功率 EUV 光源的前景。

In recent years, the semiconductor industry has achieved significant advancements in high-volume manufacturing, largely due to the stable and reliable implementation of extreme ultraviolet lithography (EUVL) technology. Current commercial EUVL systems primarily utilize laser-driven plasma (LPP) sources with a 13.5-nanometer wavelength, which are crucial for meeting the demands of high-volume wafer production. However, these systems face technical challenges, such as the increasing demand of EUV radiation power and lens contamination. This article reviews the current state of accelerator-based light source technology and its potential applications in EUVL. Accelerator-based light sources, particularly synchrotron radiation and free electron lasers (FELs), have attracted significant interest with the rise of photon science. Synchrotron radiation, emitted by high-energy electrons in a magnetic field, is characterized by a wide frequency band, high brightness, and excellent collimation, making it a vital tool in various scientific research fields. FELs, which generate high-intensity coherent radiation through the interaction of electron beams with electromagnetic wave in undulator magnetic field, offer advantages such as higher

radiation power and minimal contamination. The development of FELs requires several key technologies, including low-emittance electron sources, magnetic electron bunch compressors, and microwave linear accelerators. These technologies are critical for providing FELs with the high-brightness relativistic electron beams necessary to achieve high EUV power. As the semiconductor industry's demand for high-power EUV radiation sources grows, the application of accelerator-based technologies in the EUV spectrum has gained increasing attention. This article explores the principles of synchrotron radiation and FELs, delves into their technical implementations, and examines the potential of energy recovery linear accelerators (ERL) and steady-state micro-bunching (SSMB) technologies in the development of high-power EUV radiation sources.

## 一、前言

近年來，產業界在先進半導體的大批量量產技術上取得了顯著進步，主要原因之一是導入了穩定可靠的極紫外光微影製程 (EUV lithography, EUVL) 技術。目前商用 EUVL 系統中所使用的光源主要是利用雷射驅動電漿源 (laser-produced plasma source, LPP) 產生 13.5 奈米波長的極紫外光。他們設計的 LPP 利用二氧化碳雷射照射錫液滴 (tin droplets)，產生電漿並輻射出重複率為 50 仟赫、平均功率高達 250 瓦以上的極紫外光脈衝，供應系統後端的光學掃描子系統使用。現今 EUVL 製程進行電路圖案轉印 (patterning) 的速率已達每小時超過 200 片晶圓<sup>(1-4)</sup>。這在很大程度上滿足了晶片量產的需求。然而，在 LPP 的發光過程中產生的殘留物也造成極紫外光收集鏡的污染而影響到鏡片的壽命。經過不斷改進保護收集鏡鍍膜的方式後，鏡面反射率的劣化速率 (degradation rate；以每十億發極紫外光脈衝計算) 可以低於 0.1%，尚有改進空間<sup>(2)</sup>。若要製程中增加圖案轉印的速率，增加 EUV 光源的平均功率是重要的方向。另一方面，由於光子能量較高的原故，在 EUVL 製程中晶圓所吸收的光子數目遠少於在深紫外光微影製程 (DUV lithography, DUVL) 中以同樣的脈衝能量的準分子雷射照射下吸收的光子數。有實驗研究表明，晶圓吸收的能量不足將會造成微影的過程中出現隨機性的缺陷。據估計，為充分抑低這種隨機效應，估計在二奈米節點的製程中 EUV 光源的功率應該要有數量級的提升才能滿足需求<sup>(5)</sup>。

隨著高能粒子加速器技術的精進，同步輻射光源 (synchrotron radiation sources) 和自由電子雷射 (free electron lasers, FELs) 有了長足的發展。在同步輻射光源中，同步加速器裡的高能電子受到二極磁鐵磁場偏轉方向的情況下放出同步輻射。同步輻射基本上是一個狹義相對論 (special relativity) 現象。由於高能電子的速率接近光速，在實驗室座標看到的同步輻射能量因為相對論性像差 (relativistic aberration) 的原故而集中到一個很小的角度去。因為這個輻射角度與電子能量成反比關係，能量越高的電子其輻射發散角越小，同步輻射光的亮度就越高。科學家們進一步發明了聚頻磁鐵 (undulator) 使電子在磁場中產生多次的軌道偏轉，可以將每次偏轉所發出的同步輻射光都集中到同一個很小的角度範圍內，大幅度的提升了同步輻射的亮度。同步加速器光源和 EUVL 的早期發展有著密切的關係。EUVL 從前被稱為軟 X 光投影式微影製程 (soft x-ray projection lithography)。它是在 1986 年由 NTT 的 H. Kinoshita 首先證明它的可行性。他利用同步加速器光源進行微影製程並達到 4 微米解析度。AT&T 也在 1990 年利用同步輻射進行微影製程達到 50 奈米<sup>(6)</sup>。當然，這些利用同步加速器光源的 EUVL 製程只限於原理驗證的階段，它們的輻射功率就量產而言是遠遠不足

的。雖然如此，目前也有不少的同步加速器光源研究中心的團隊利用他們的光源設施活躍地進行 EUVL 的研究。這些研究團隊包括美國勞倫斯伯克萊國家實驗室 (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) 的先進光源 (Advanced Light Source, ALS)、日本兵庫縣立大學裡的新速霸陸光源 (New SUBARU) 及瑞士保羅謝爾研究所 (Paul Scherrer Institut, PSI) 的瑞士光源 (Swiss Light Source, SLS) 等<sup>(7-9)</sup>。其實儲存環同步輻射和 FEL 的輻射機轉是一樣的。其不同之處在於經過特別的設計電子束透過與光場交互作用產生微聚束 (microbunching)，使得整個電子束團可以集中到比輻射波長還短的範圍內一起運動並放出同調同步輻射 (coherent synchrotron radiation, CSR)，進一步增強同步輻射光的強度。由於 FEL 所產生的輻射功率極高，而且電子束在加速器中的超高真空環境內運行，輻射的過程也沒有污染物殘留，似乎是極紫外光微影製程所需要的理想光源。

本文旨在介紹加速器光源在 EUV 微影製程中的應用潛力。一開始我們將針對同步輻射及 FEL 的物理機轉作一個簡單扼要的介紹。也要對 FEL 架構的分類有一些了解。建立 FEL 所需要的技術相當多，其中最重要的可能就是產生 FEL 所需要的高亮度相對論性電子束 (high brightness relativistic electron beam) 技術。即低發射度電子源 (low emittance electron sources)、磁力束團壓縮器 (magnetic bunch compressors) 及微波直線加速器等幾項技術。我們也會介紹近日受到關注的能量回收型直線加速器 (energy recovery linac, ERL) 和穩態微聚束 (steady-state microbunching, SSMB) 技術及它們的前景。

## 二、FEL 基本原理及相關技術

### 1. 同步輻射原理及發展歷程

自從 1947 年 Herb Pollock 在奇異公司建造的 70 MeV 電子同步加速器中首次觀察到同步輻射光以來，這項技術已經歷了七十多年的發展。同步加速器最初是為研究原子核結構和基本粒子而設計的，現已成為最普遍採用的圓形軌道高能粒子加速器<sup>(10)</sup>。由於高能量電子在同步加速器中受到二極磁鐵的磁場作用偏轉方向，會放出電磁輻射 (即同步輻射)，造成粒子能量損耗。因此，同步輻射在早期被認為是對粒子加速而言是一項不利因素。然而，科學家逐漸發現，同步輻射作為光源具有許多優異的特性，例如寬頻帶特性，其頻率範圍可涵蓋紅外光到 X 光。此外，同步輻射具有高度的準直性，輻射能量可以集中在很小的角度內，因此其亮度非常高。另外，同步輻射還具備偏極化和短脈衝等特性，所以同步輻射可以作為一個很好的科學研究工具。現代的同步加速器光源設施主要是用儲存環維持電子束的能量、軌道和束流強度恆定，使同步輻射光的強度非常穩定，所以這種設施也稱為儲存環同步輻射光源 (storage ring synchrotron radiation sources)。為了要比較光源的亮度，我們定了個一致的標準，就是以某個選定的輻射頻率的 1/1000 倍作為頻寬範圍 (BW)，在此頻寬內每秒鐘發射到單位立體角內的光子數目 (單位為：個光子/s/m<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)。目前最先進的同步加速器光源的平均亮度可以高達 10<sup>22</sup> 個光子/s/m<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW，約為太陽亮度的 10<sup>12</sup> 倍。這並不意味著同步加速器光源在單位時間內輻射出的電磁波能量比太陽多，而是同步輻射的電磁波能量幾乎全部集中在非常小的角度內。由於它的輻射角與電子能量成反比，高能量同步加速器中的電子所輻射光的亮度更強。以國家同步輻射研究中心的台灣光子源 (Taiwan Photon Source, TPS) 為例，能量為 3 GeV 的電子束以 0.999999986 倍光速運行，同步輻射光的輻射角約為 0.01 度<sup>(11)</sup>。如果使電子在聚頻磁鐵的週期性磁場中作多次小角度偏轉，它所發出的

同步輻射光可以集中在很小的輻射角，某個特定的頻率範圍內達到建設性干涉而增強，進一步提升了同步輻射的亮度 (圖 1)。但在這個頻率範圍之外的同步輻射則因為不乎合這個干涉條件而沒有增強的效果或甚至減弱。電子的運動必須滿足以下的聚頻磁鐵方程：

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

其中  $\lambda$  是聚頻磁鐵輻射共振波長， $\lambda_u$  是聚頻磁鐵週期長度， $\gamma$  是電子束的洛倫茲因子， $K = eB\lambda_u / 2\pi m_e c^2$  是聚頻磁鐵常數。而  $m_e$  是電子質量、 $B_0$  是聚頻磁鐵的磁場。聚頻磁鐵輻射頻寬大約是聚頻磁鐵的週期數的倒數。

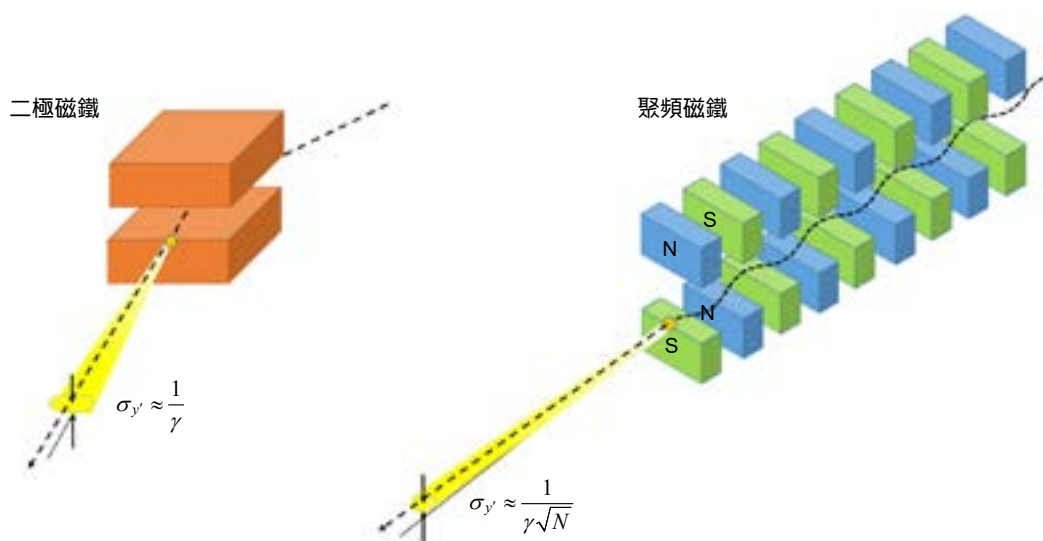


圖 1. 由二極磁鐵 (左) 及聚頻磁鐵 (右) 發出的同步輻射角比較。N 是聚頻磁鐵的週期數。

## 2. FEL基本原理

FEL 是另一種加速器光源，因為具輸出高功率同調輻射的潛力而備受關注。設想有一道足夠強的雷射，它的波長滿足聚頻磁鐵方程 (或稱為 FEL 共振條件)，並且偏極化方向與聚頻磁鐵中運行的電子束方向一致，電子束裡面的電子被雷射場加速。加速的幅度受作用時電子相對於雷射場的相位而定。因此，電子束中的電子被雷射場改變能量。由於不同能量的電子在聚頻磁鐵中擺動的幅度不同而影響通過的時間，所以在受外加雷射作用後經過一段距離後便會產生微聚束作用。聚束過的電子束就可在聚頻磁鐵輻射同調電磁波輻射了 (圖 2)。這是 1971 年，美國史坦福大學的 John Madey 所提出 FEL 的概念<sup>(12)</sup>。1976 年，他的研究團隊完成了首個原理驗證實驗，他們觀察到二氧化碳雷射在裝置中與電子束作用後的振幅增長，儘管增益極小<sup>(13)</sup>。一年後，Madey 的團隊成功的利用光學共振腔，使電子束通過聚頻磁鐵時所產生的自發輻射脈衝在腔內來回反射，配合高重複率的電子束不斷與光脈衝作用，使它的振幅不斷提高至飽和狀態。這是世界上第一個振盪器架構的紅外線 FEL<sup>(14)</sup>。



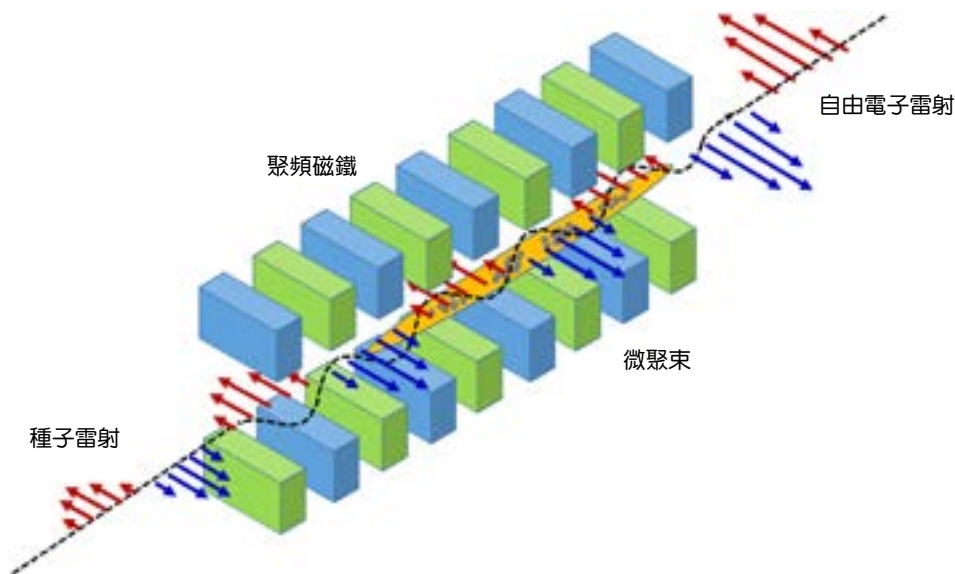


圖 2. FEL 中電子束與雷射在聚頻磁鐵內的交互作用。

FEL 的潛力不僅限於紅外線波段，Madey 在 1971 年的論文中指出，這種電子束和光場的作用機制在紫外光和 X 光波長範圍內也能產生同調輻射。然而，要達成紫外光和 X 光 FEL 的目標面臨到許多挑戰。首先，若採用振盪器架構，需有一個低損耗的光學共振腔，在腔內來回反射的光脈衝才能獲得有效增益。但在 200 奈米波長以下，光學鏡的反射率很低，因此振盪器架構的 FEL 無法推廣到波長在極紫外光之下的波段。若無有效的光學共振腔提供反饋，就必須要考慮放大器架構。首先，放大器需要一個與 FEL 輸出同頻的輸入訊號，即種子雷射 (seed laser)。另外，電子束必須在一次通過聚頻磁鐵時獲得足夠高的增益，最好達到作用飽和。所以這樣的 FEL 必須是一個高增益的裝置。一個 EUV 或 X 光的高增益 FEL 對電子束的品質要求非常嚴格。電子束的發射度至少要小於所發出的光波波長，能散分佈一般要求也要在千分之一左右。而且，電子束的峰值電流要高達數百乃至數千安培。不過，EUV 到 X 光波段的種子雷射不易取得。在考慮沒有種子雷射的情況下，美國加州大學洛杉磯分校教授 Claudio Pellegrini 首先提出了自我放大自發輻射 FEL (self-amplified spontaneous emission, SASE) 的構想<sup>(15)</sup>。SASE 並不依賴種子雷射來啟動 FEL 的放大過程，而是利用電子束在聚頻磁鐵中運動時產生的自發輻射作為初始輻射，與電子束相互作用，逐漸增強並形成高強度的輻射。但由於初始的自發輻射功率比較低，要放大到作用飽和的程度則需要較長的聚頻磁鐵。而且，SASE 不像以外部雷射作為初始輻射的 FEL 放大器，初始的自發輻射有一定程度的隨機性，它的輸出只能達到部分同調 (partial coherence)。配合適當的種子雷射，FEL 放大器原理上卻是可以達到全同調 (full coherence) 的。為解決 EUV 及 X 光波段沒有種子雷射的問題，美國布魯克黑文國家實驗室 (Brookhaven National Laboratory) 華人科學家余理華 (Li Hua Yu) 博士首先提出高增益諧波生成 FEL (high gain harmonic generation free electron laser, HGHG FEL) 的概念，改進了 FEL 的同調性<sup>(16-17)</sup>。HGHG FEL 利用頻率為 FEL 輸出頻率的次諧波種子雷射在第一個稱為調制器 (modulator) 的聚頻磁鐵中對電子束進行能量調制，並且用數個二極磁鐵組成的電子光學彎道 (chicane) 將能量調制的電子束轉變為密度調制的電子束。經過密度調制後的電子束進入第二個稱為輻射器 (radiator) 的聚頻磁鐵使

微群聚過的電子束放出同調的諧波輻射，並在諧波放大的過程中產生強烈的同調輻射。由於使用了次諧波種子雷射 (可以是一般現存的雷射)，HGHG FEL 可以精確控制雷射的波長，與 SASE FEL 相比，HGHG FEL 產生的雷射具有更高的時間同調性和空間同調性。HGHG FEL 的輸出雜訊相對較低，因為它依賴於種子雷射而不是自發輻射 (圖 3)。

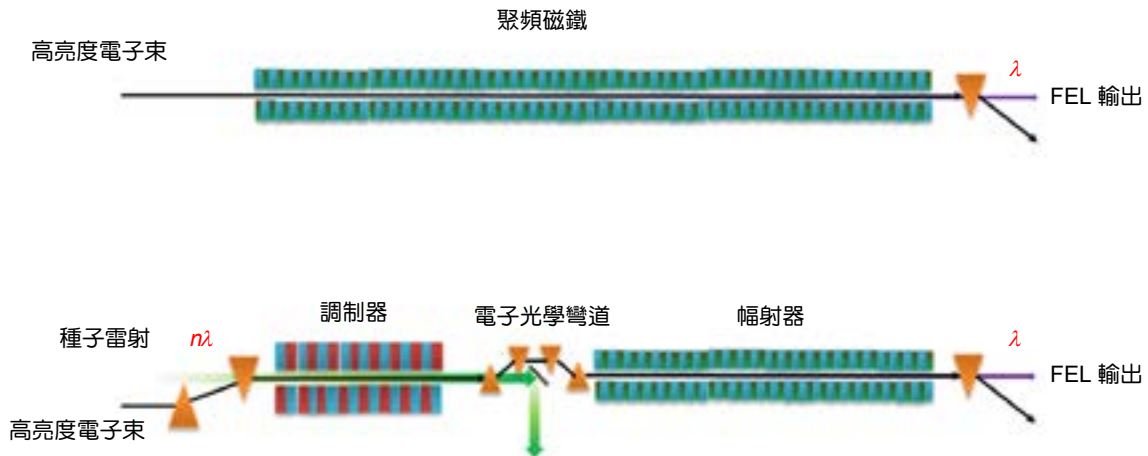


圖 3. 自我放大自發輻射 (SASE) 自由電子雷射 (上) 與高增益諧波生成 (HGHG) 自由電子雷射 (下) 示意圖。

### 3. 高亮度電子束技術

要建立高增益的 FEL 系統，高亮度高能電子束技術是它的核心。而這項技術主要是包括低發射度電子源、先進直線加速器、磁場束團壓縮器以及束流動力學的精準控制。FEL 的增益與作用效率和電子束的發射度、能散和電荷密度有密切的關聯。發射度在這裡是指橫向發射度，它是束團中每個電子的橫向位置與方向的統計量，單位是  $\text{m}$ 。一般來說，高增益 FEL 要求的發射度必須小於 FEL 輻射波長。因為加速器元件和聚頻磁鐵的束流動力學性質與電子的能量有敏感關係，電子束的能散越低越好，最好能夠在電子束能量的千分之一以下。高增益 FEL 採用的電子源主要是以光陰極電子槍 (photocathode electron gun) 為主。目標是產有足夠電荷量的低能散、低發射度電子束。光陰極電子槍是用激光照射光陰極材料，激發電子從陰極表面放出，並用高電場在短距離內加速到較接近光速以克服空間電荷效應 (space charge effects)。建立高電場可以由高功率微波或高直流電壓達成，各有優缺點。光陰極微波電子槍常用於高束團電荷、低重複率操作，而高重複率操作則會使用光陰極的直流或特高頻 (very high frequency, VHF) 電子槍<sup>(18-20)</sup>。圖 4 是由國家同步輻射研究中心所研發的 2998 MHz 光陰極微波電子槍系統<sup>(21)</sup>。可以產生能量達 60 MeV、電荷量為 250 pC、能量歸一化橫向發射度約為 3 mm-mrad 的電子束團。目前該系統用於驅動一部兆赫茲 (Tera-hertz, THz) 超輻射 FEL (圖 5)，於 2024 年底開始提供給科學用戶試用<sup>(22)</sup>。磁束團壓縮器是另一項重要技術。它通常是利用一段直線加速器結構對束團中不同位置的電子作不同程度的加速，產生能量與位置的相干性 (energy-time correlation)，讓不同能量的電子在磁場裝置中軌道的長度不同去壓縮電子束的縱向長度，從而增加電子束的峰值電流，這對提高 FEL 的增益至關重要。但是啁啾直線加速器 (chirper linac) 作用後的電子束含有非線性的相干性，在設計

磁場束團壓縮器的同時必須要考慮到電子束在光束線中的非線性束流動力學。在電子束橫向運動方面，也要考慮不要使束團的發射度線型受到如同束流匹配、同調同步輻射、縱向空間電荷等因素影響。因此，要設計一個有效的磁束團壓縮器，加上配合各種束流診斷的工具是一個非常複雜的過程。直線加速器利用微波電磁場對電子束進行加速，在系統中主要的作用是将電子束的能量加速到能夠滿足 FEL 的共振條件的能量。以 X 光 FEL 為例，電子束的能量約需要 10 GeV 左右，以每米約 25 MeV 的加速梯度估算，總長約 400 公尺。因此，有效率的加速結構對設備的造價影響很大。微波頻率越高的加速結構的加速梯度越高，但結構的機械尺寸和安裝時的準直要求也相對較高。另外電子束經過加速結構所激發的尾場 (wake field) 的影響也必須納入評估。傳統的常溫無氧銅材料的等梯度行波加速器結構對低重複率的 FEL 而言非常合適，但若考慮高重複率操作則應該使用超導直線加速器 (superconducting rf linac, SRF linac)。SRF linac 利用超導技術降低加速腔的能量損失，從而提高加速效率和降低運行成本。



圖 4. 由國家同步輻射研究中心所研發的 2998 MHz 光陰極微波電子槍系統。



圖 5. 國家同步輻射研究中心光陰極微波電子槍系統驅動的兆赫茲超輻射自由電子雷射。



## 4. FEL發展概況

國際間大約有近 20 座正在運行的 FEL 用戶設施<sup>(23)</sup>。這些設施中大約有一半提供的輻射波長在 EUV 到 X 光範圍內。其餘的主要是在紅外 (infrared, IR) 或太赫茲 (terahertz, THz) 的波長範圍內工作。由於波長在 200 nm 以下沒有高反率的鏡片，EUV 到 X 光範圍內通常考慮使用高增益 FEL 概念。例如：SASE 和 HGHG。在 2000 年，德國電子同步加速器實驗室 (Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY) 團隊首先成功的建成了 EUV 範圍內的第一個 SASE FEL。該設施現在正在運行兩條 FEL 光束線 (即 FLASH1 和 FLASH2)，為用戶提供從 90 nm 到 4 nm 可調的基本波長的 10–200 fs 輻射。DESY 的 FLASH 是由 1.3 GHz 超導射頻直線加速器系統驅動，該系統可實現高重複率操作，達到仟瓦等級的平均功率。未來將為升級為外部種子雷射 (external seeding) 注入提高 FEL 的效能<sup>(24)</sup>。義大利 Elettra-Sincrotrone Trieste 的 FERMI 是單通全同調 EUV HGHG FEL 用戶設施，它的輻射波長覆蓋 100 至 4 nm 的波長範圍 (即 FERMI-I 光束線為 100–20 nm，FERMI-II 光束線為 20–4 nm)。FERMI FEL 在 2010 年觀察到第一道光<sup>(25)</sup>。中國大連的 DCLS (Dalian Coherent Light Source) 設施波長範圍於 50–150 nm，自 2019 年以來一直為用戶服務。它由 300 MeV 正常傳導 S 波段直線加速器和兩條 FEL 束線組成。第一條光束線 (FEL-1) 以高達 100  $\mu$ J 的脈衝能量提供皮秒 (picosecond) 級的 FEL 輻射。第二條光束線 (FEL-2) 通過偏振控制提供飛秒 (femtosecond) 的輻射，目前已順利運轉<sup>(26)</sup>。以上都是在 EUV 至軟 X 光範圍的設施，硬 X 光方面，在 2009 年，SLAC 國家加速器實驗室成功建造了第一個硬 X 射線 SASE FEL - LCLS，光子能量範圍在 280 eV 至 11.2 keV 內<sup>(27)</sup>。SACLA 是 RIKEN Harima 研究所的 XFEL 緊湊型用戶設施在 2011 年成功測試，可提供 4.0–20 keV 的能量範圍的光子<sup>(28)</sup>。隨後其他使用常溫直線加速器技術的設施如 SwissFEL 和 Pohang XFEL 亦陸續建成<sup>(29-31)</sup>。在德國的歐洲超導體直線加速器驅動的硬 X 射線 FEL 已在 2017 年出光<sup>(32)</sup>，向科學用戶提供 MHz 重複率的高亮度光束。另一個超導體直線加速器驅動的硬 X 射線 FEL，LCLS-II 亦在 SLAC 國家加速器實驗室興建完成<sup>(33)</sup>。另外，中國上海光源類似的設施亦在興建之中<sup>(34)</sup>。

## 三、高平均功率 EUV FEL

### 1. 能量回收型直線加速器

能量回收型直線加速器 (ERL) 是一種較為節能的 FEL 之驅動器。使用傳統直線加速器的 FEL，當電子發出所需的光後，剩餘具有高能量的電子則直接由束流收集器 (beam dump) 吸收，在束流收集器一定的冷卻能力與材料活化的限制下，電子束團的平均電流無法太高。而在 ERL 中，這些已發出光的高能量電子，可透過一系列磁鐵的導引後再回到直線加速器的起點，再藉由相位的差異使電子看見減速場而減速至入射的能量後再進入束流收集器，其過程中直線加速器的加速能量可獲得回收。另外，由於進入束流收集器的電子能量可大幅降低，所以在相同的收集器活化條件與冷卻能力下，電子束團的重複頻率與平均束團電流可以獲得大幅提升，因此可以輸出更高的 FEL 平均功率。故 ERL FEL，相當適合做為高功率的 EUV 光源。

在 ERL 中通常包含了以下幾個重要的子系統：光電陰極直流電子槍、注射器、直線加速器、束流收集器以及由一系列磁鐵組成之再循環迴圈 (recirculation loop)。由於直線加速器所需的高加速梯度，若採用連續波模式運轉，需採用超導射頻模組作為加速用的共振腔，讓



共振腔表面熱損耗夠小。如要讓超導模組的熱損降至可接受的範圍內，通常會使其工作在 2K 的低溫，以提升超導模組的品質因子。如要作為 FEL (即高功率 EUV 光源)，則還會需要聚頻磁鐵。圖 6 則為用於 FEL 的 ERL 之架構，以及部分系統之照片示意圖。

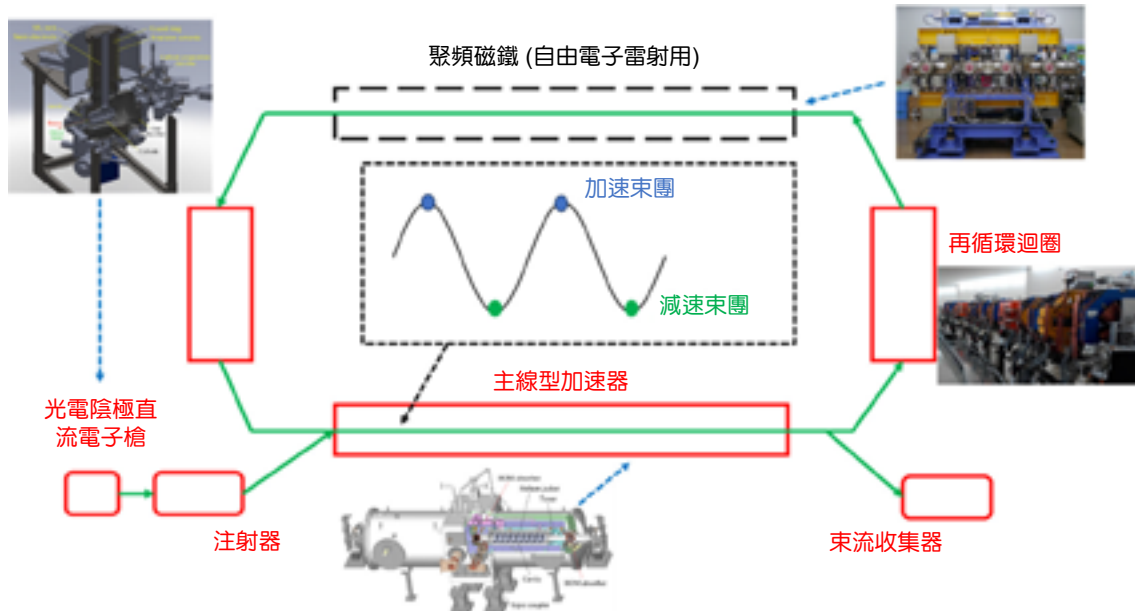


圖 6. 用於高功率 FEL 的 ERL 之架構。

## 2. ERL FEL

目前，位於日本的高能加速器研究機構 (KEK) 已針對使用 ERL 的高功率 EUV 光源進行設計與研發<sup>(34)</sup>，此設計的架構圖、設計參數簡述如下：此系統總長度約 150 至 200 m，其中聚頻磁鐵長度約 100 m。由光電陰極直流電子槍生成 60 pC 的電子團，以 162.5 MHz 束團重複頻率在超導注射器中加速至約 11 MeV，再經由超導主注射器加速至 800 MeV。以能量回收模式運轉下，可提供約 10 mA 的平均電流，並產生功率大於 10 kW、波長為 13.5 nm 的 FEL 輻射。根據 KEK 的模擬結果，在出口端，即聚頻磁鐵長度為 100 m 處，該設計下優化後每團電子產生的脈衝能量約為 110  $\mu$ J、以 10 mA 的平均電流、162.5 MHz 的束團重複頻率換算，其 EUV FEL 之平均功率為 17.8 kW，而在功率頻譜中波長 13.5 nm 的 FEL 頻寬則小於 0.1 nm。在 KEK 的研究中也分析了建造此設備的經費與運轉費用，若以每 1 kW 的 FEL 功率估計，每年電費估計為美金 400 萬 (約為每 1 kW EUV 功率需 0.7 MW 的電力功率損耗)，設施的建造成本以 10 kW 的 FEL 估計約為 4 億美金，對比雷射電漿型的 EUV 光源，250 W 的建造成本與每年運轉經費各粗估為美金 2000 萬與 1500 萬，若以線性方式換算考慮相同的 FEL 功率下，ERL 的 EUV 光源不管在建造上或是運轉上的費用，都比雷射電漿型的要少。

前述的 ERL 型的 EUV 光源皆處於模擬、設計階段，尚未經過實驗的驗證。而 KEK 目前已有建置完成、較小型的 compact ERL (cERL) 設施<sup>(35)</sup>，故現階段 KEK 的相關人員初步使用 cERL 進行 EUV 光源的原理驗證<sup>(36, 37)</sup>。cERL 的架構與 EUV 光源之原理驗證介紹如下。在 cERL 中注射段與主直線加速器所使用的超導射頻模組，是主要核心元件之一。注射段的超導模組中包含了三組 1.3 GHz 雙腔型超導共振腔，每組雙腔共振腔可提供約 6.8 MV/m 的

加速梯度，透過此超導模組，可將電子束團能量由 500 keV 提升至 5 MeV。主直線加速器段的超導模組則是兩組 1.3 GHz 九腔型超導共振腔所組成，在 15 MV/m 的加速梯度需求下，為滿足夠低的表面損耗，其品質因子需大於  $10^{10}$ ，故需使用 2K 低溫系統。而在大電流的運轉需求下，需要降低共振腔的高次模組抗以降低射束的不穩定性，故在模組兩端裝設有高次模吸收器。在驅動超導射頻模組的射頻功率部分，則分別使用了 1.3 GHz 的 8 kW 固態放大器 (用於聚束器)、25 kW (用於注射段的超導模組) 以及 300 kW 的速調管 (用於主直線加速器的超導模組)。在射頻控制方面則使用  $\mu$ TCA 背板、FPGA 技術的數位式 IQ 控制系統，透過此控制系統，主直線加速器加速場強之振幅與相位可控制在 0.01% (rms) 與 0.01 度 (rms) 之內。

以下則為用於驗證 EUV 光源的 cERL 之架構與參數。電子能量在主直線加速器中由 5 MeV 加速至 17.5 MeV，設計之束團重複頻率為 81.25 MHz，平均電流為 1 mA。同時也使用了兩座 3 m 長，磁場週期為 24 mm 的相位可調式聚頻磁鐵，以產生波長為 10–20  $\mu$ m 的 IR-FEL。在實驗初期並未使用連續波模式運轉，而是採用脈衝模式進行測試。由 2021 年 KEK 針對 cERL 的 IR-FEL 的初步試車結果顯示<sup>(36)</sup>，在使用機械學習調機的輔助下，此實驗已成功發出 20  $\mu$ m 的 IR-FEL，但所量測到的 FEL 脈衝能量較預期低，可能是由於空間電荷效應造成，這部份對於未來的射束控制與加速器調機將會是很重要的議題。另外，KEK 也在無 FEL、低束團電荷的條件下進行 cERL 使用較高電流的運轉測試，於 2022 年可達最大電流 0.25 mA、以及 100% 的能量回收<sup>(37)</sup>。目前使用 ERL 的 EUV FEL 構想的初步原理驗證已完成，但未來若要應用在高功率的 EUV 光源運轉上，則還需要更多研發與測試。

## 四、穩態微聚束技術

### 1. SSMB 原理

SSMB<sup>(38-40)</sup> 和 FEL 一樣利用微聚束產生縱向同調光的原理大幅提升特定光子能量的光通量，然而在 SSMB 中形成微聚束的方法和 FEL 完全不同，高增益 SASE FEL 產生微聚束的方式在本質上是一種不穩定性的機制，所以電子團只有辦法被使用一次而無法重複利用，而在 SSMB 中產生微聚束的原理其實就跟一般同步輻射光源的儲存環一樣，即由同步輻射阻尼 (synchrotron radiation damping) 和量子激發 (quantum excitation) 效應作用下達到的平衡態，只是把調製電子團縱向運動的方式由一般使用的射頻共振腔換成調製器 (modulator，是一個聚頻磁鐵) 和外加雷射<sup>(38)</sup> (圖 7)，相對於 FEL，SSMB 的目標是利用電子團在儲存環中繞行的高重複頻率和和高填充率達成高平均功率的效果，而非追求峰值功率 (FEL 的同調電子數較 SSMB 高<sup>(42)</sup>，所以峰值功率比較高)，如果使用波長 1 微米的雷射光調製電子團，微聚束間的距離為 1 微米，在理想條件下整個儲存環中都填滿微聚束時出光頻率可達 300 THz<sup>(42)</sup>，相對於傳統儲存環與基於超導直線加速器約數 MHz 至 1 GHz 的出光頻率，所以 SSMB 在時間分布上均勻很多<sup>(43)</sup>。

SSMB 利用外加雷射調製電子團，在尚未開始調製前電子團的能量分布均勻 (電子團中每個縱向位置  $z$  的動量分布一致，如圖 8 左)，外加雷射和調製器會在縱向產生弦波型的能量調製 (如圖 8 中)，接著電子團在儲存環中繞行一定距離後因不同能量的電子軌道長度的不同<sup>(44)</sup> 電子會在空間中聚集 (圖 8 中綠色箭頭) 造成電荷密度調製的效果 (如圖 8 右)，此分布雖在空間中有類似微聚束的結構，但並不是「穩態」微聚束，電子團需要經此調製非常多次直到達到前一段提到的平衡態 (見圖 9 右)。

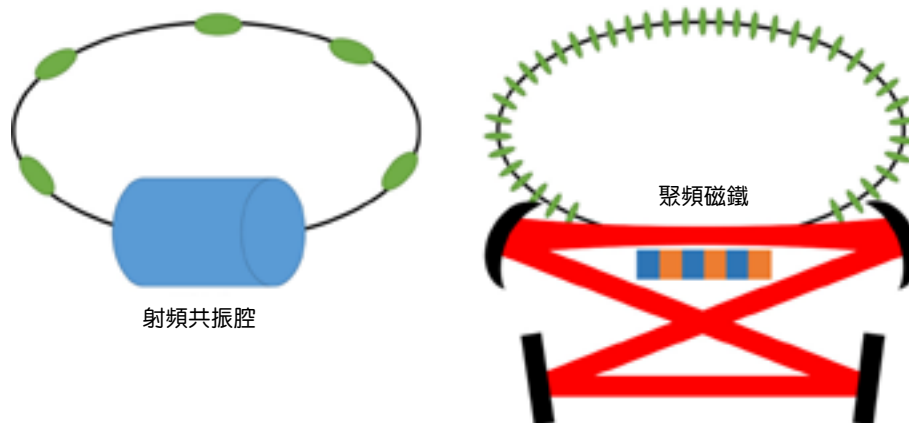


圖 7. (左) 一般同步輻射光源，(右) 穩態微聚束示意圖。

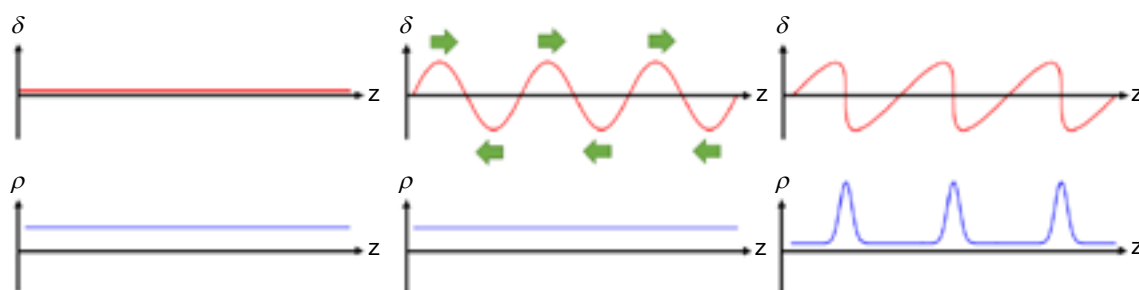


圖 8. 穩態微聚束機制中外加雷射啟動時電子團的 (上) 縱向相空間分布 (下) 縱向空間分布，其中縱向相空間分布中的  $\delta$  為部份動量差異<sup>(9)</sup>，而縱向空間分布中的  $\rho$  則是電子團密度，即縱向相空間分布對  $\delta$  積分後的結果。(左) 未受調製器調製前，(中) 經過調製產生弦波分布，(右) 再經過一段色散段後電子團分布在空間中聚集。

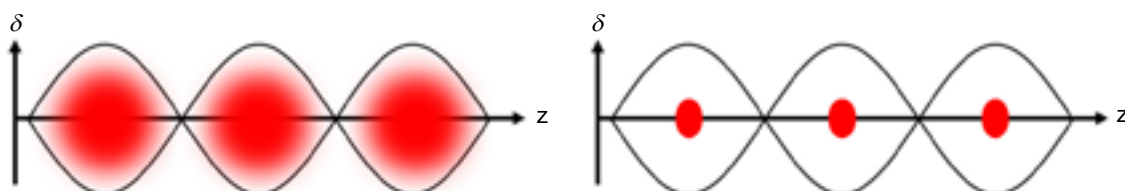


圖 9. 電子團縱向相空間分布 (左) 第二階段原理驗證實驗，(右) 第三階段原理驗證實驗。

SSMB 需要克服的問題是得在產生微聚束後進一步壓縮微聚束的束團長度，不同於高增益 SASE FEL 可以利用電子在聚頻磁鐵中輻射出的聚頻磁鐵輻射作為調製電子團的訊號源，考量到現有的雷射技術，目前 SSMB 所利用的外加雷射波長落在一微米左右，如果束團長度沒有經過再壓縮那就只能產生波長比一微米還長的同調光使應用領域大幅受限，要壓縮電子團同樣可以利用調製器和外加雷射，此時調製器的功能相當於橫向運動中四極磁鐵聚焦電子團，有數種可能的壓縮束團方案<sup>(42)</sup>，這裡介紹其中一種強聚焦 SSMB 方案 (strong focusing SSMB) (圖 10)<sup>(40, 42)</sup>，電子團在調製器中調製能量讓前面的電子能量較後面的電子低，再經過一段轉彎段(能量高的電子被磁場轉彎的角度較小導致軌跡不同產生色散)，使得能量高的

電子走較比能量低的電子短的軌跡追上前面的電子以壓縮束團長度，在這段被壓縮的範圍內安裝一台輻射器作為短波長 (短於外加雷射波長一微米) 輻射源，在離開這段壓縮段之後電子束團長度回復原本的長度，然而如果要產生高品質的縱向同調光，電子團的長度需遠小於目標波長，以 13.5 奈米的 EUV 光源為例，電子團長度需要被壓縮至 3 奈米左右。

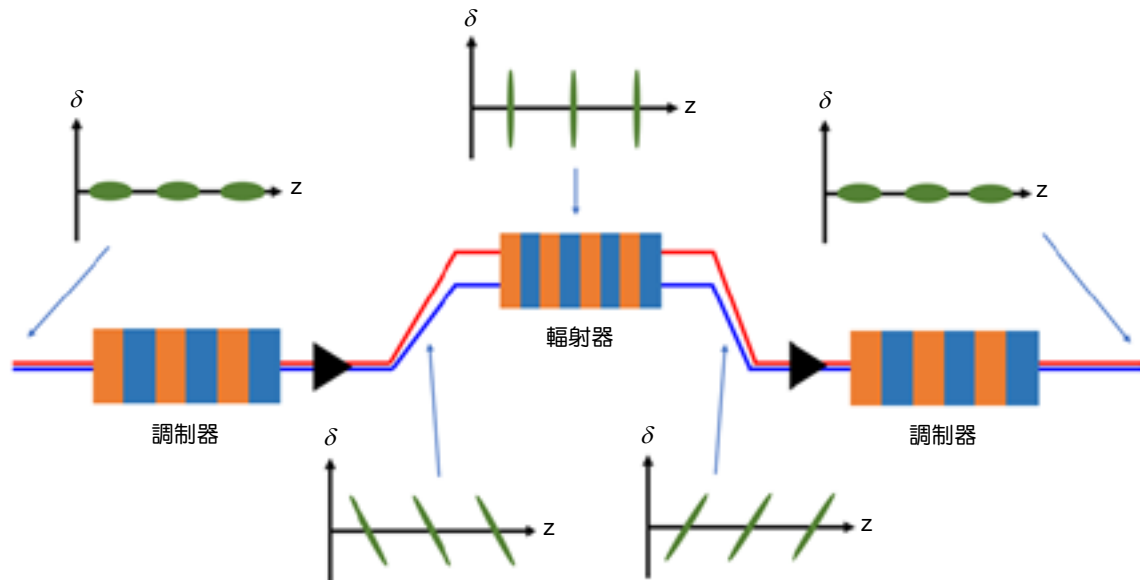


圖 10. 強聚焦式壓縮束團示意圖，紅色和藍色線段分別代表低能量與高能量的電子軌跡。

儘管 SSMB 在概念上與傳統儲存環一樣，但是要在實驗上實現卻有非常多問題需要考量與解決，由於在縱向運動上的特徵尺度從射頻 (~公尺) 換成雷射 (~微米) 時差了 5–6 個數量級，加上由於需要在縱向聚束，以往僅用在橫向運動的 Courant-Snyder 分析<sup>(44)</sup> 也需要在縱向運動中使用<sup>(39, 40, 46)</sup> 整個動力學系統的特性截然不同需要重新分析，其中有很多以前不存在或是可以忽略的效應需要考量，例如縱向量子激發效應的貢獻在傳統儲存環中是可以忽略的，但是在 SSMB 中若沒有在設計磁格時仔細降低局域動量緊湊因子則微聚束的結構就無法穩定存在<sup>(47)</sup>，另外調製器產生的弦波能量調製有很強的非線性，在最佳化磁格設計的過程中需要仔細處理，需要除了上述單粒子動力學的討論，粒子集體效應也需要更嚴格的檢視，比方說在傳統儲存環中束團距離的數量級大約落在一公尺，而 SSMB 的束團距離僅一微米，這導致以往分析時可用的許多近似無法使用，例如以往可直接在洛倫茲因子足夠大時使用的近似在針對有電阻真空腔壁的尾場分析<sup>(48)</sup> 中就無法使用，因為上述的原因許多以前推導及歸納出可以在傳統儲存環中適用的結論在 SSMB 中都需要重新檢視。

## 2. SSMB 原理驗證實驗

目前 SSMB 的研發以北京清華大學的團隊為首，在他們的規劃中原理驗證實驗有三個階段<sup>(39)</sup>，前兩個階段在德國 Metrology Light Source 進行，最後第三個階段則規劃建造一座專門為 SSMB 束設計的裝置，其設計目標為在 13.5 奈米 (2% 頻寬內) 達到 1 kW 的功率<sup>(40)</sup>。這三個階段的目標如下，在第一階段中電子團只有經歷一次外加雷射的調製，藉此觀察經調製後的類微束團結構能在儲存環中能存在多久，目前此階段已進行完畢並且其結果已發表在



期刊 *Nature* 上<sup>(49)</sup>。他們已順利觀測到電子團經歷一次雷射調製產生的微聚束所發出的同調光。第二階段中則會讓電子團與在調製器中與雷射多次作用，確認微束團可以在經歷數次調製後存在，此一階段的實驗需要利用一個高重複頻率的脈衝雷射才能達成，然而此時微束團尚未達到平衡態，在接下來的第三階段中才會達到真正的 SSMB，即由同步輻射阻尼以及量子激發效應共同作用下達到的平衡態，要達到穩態需要使電子團與雷射作用超過數個阻尼時間，除此之外，在第三階段中有數個目標需要完成，第一，為了達到高束團填充率，需要使用感應式直線加速器<sup>(39, 40)</sup> 取代傳統射頻共振腔，同時外加雷射不能使用脈衝雷射而需要使用連續波 (continuous-wave, CW) 雷射，由於調製需要的雷射電場較高，目前沒有如此高功率的 CW 雷射，需要安裝額外的增強腔體增加雷射電場<sup>(40)</sup>，這部分對雷射場的品質有很高的要求，尤其是相位的穩定性，這對雷射源和鏡子的技術，另外儲存此高場強的雷射的腔體鏡子也需要注意是否能承受雷射場造成的熱負載等。

不論在理論以及在實驗技術上看，SSMB 機制目前都存在非常多困難需要克服，不過從加速器光源發展的角度來看，SSMB 在儲存環光源中走出一條新道路，在到目前為止數十年同步輻射光源的發展中，儲存環式加速器光源的目標大致一直偏重在降低電子團的橫向發射度<sup>(44)</sup>，從早期的 FODO 磁格 (lattice) 以及後來的 double bend achromat (DBA) 磁格到現在熱門的 multi-bend achromat (MBA) 磁格<sup>(50)</sup>，從固定磁場到具有縱向梯度的偏轉磁鐵等，藉由各種磁格設計在一定程度上已經把儲存環式的橫向運動發展到極致，並且目前規劃中的同步輻射光源電子團橫向發射度也已經接近硬 X 光的繞射極限條件<sup>(51)</sup>，調整電子團縱向運動的機制是非常有挑戰性且需要研究的新興領域，受限於篇幅，本文僅在各子議題蜻蜓點水般的帶過，有興趣的讀者可參考相關文獻<sup>(39, 40)</sup>。

## 五、結論

本文綜合討論了加速器光源技術在極紫外光微影製程 (EUVL) 中的應用潛力，並簡單介紹了同步輻射和自由電子雷射 (FEL) 的基本原理及其發展現況。此外，我們也介紹了能量回收直線加速器 (ERL) 和穩態微聚束 (SSMB) 技術在發展高功率 EUV 光源中的應用前景。ERL 能有效回收電子束能量，提高平均電流和光源功率，目前已有多個研究機構展開相關設計與研發。SSMB 是一個新的概念，可以進一步提高了儲存環同步輻射光源的功率，儘管面臨嚴苛的技術挑戰，但仍具有廣闊的應用前景。

總的來說，加速器光源技術在 EUVL 中的應用潛力巨大。隨著技術的成熟進一步發展，加速器光源有望在提升 EUVL 製程速度和增加光源功率方面發揮重要作用，助力半導體產業的持續進步和發展。未來，隨著技術的不斷革新和實踐應用的推進，加速器光源技術可望在 EUVL 領域展現出它的應用價值。

## 參考文獻

1. Versolatto, Oscar O., *Plasma Sources Science and Technology*, **28** (8), (2019)
2. Patrick Naulleau, "EUV lithography", *Synchrotron Radiation News*, **32**, p.2 (2019).
3. I. Fomenkov et al., "Laser-produced plasma sources for high-volume-manufacturing EUV lithography", *Synchrotron Radiation News*, **32**, p.3 (2019).
4. D.K. Yang et al., "The development of laser-produced plasma EUV light source", *Chip* **1**, 1 (2022).
5. P.De Bisschop and E. Hendrickx, *SPIE Advanced Lithography*, 10583 (2018).

6. R. Miyakawa and P. Naulleau, *Synchrotron Radiation News*, **32**, 15 (2019).
7. I. Mochi and Yasin Ekinci, *Synchrotron Radiation News*, **32**, 22 (2019).
8. T. Watanabe and T. Harada, *Synchrotron Radiation News*, **32**, 28 (2019).
9. P. De Bisschop and E. Hendrickx, *SPIE Advanced Lithography*, 10583 (2018).
10. J.P. Blewett, *J. Synchrotron Radiation*, **5**, 135 (1998).
11. 國家同步輻射研究中心網站 <https://www.nsrcc.org.tw/chinese/acceleratorTPS.aspx>.
12. J. M. J. Madey, *Journal of Applied Physics*, **42**, 1906 (1971).
13. L.R. Elias et al., *Physical Review Letters*, **36**, 717 (1976).
14. D. A. G. Deacon et al., *Physical Review Letters*, **38**, 892 (1977).
15. R. Bonifacio et al., *Optics Communications*, **50**, 373 (1984).
16. L.H. Yu, "Generation of intense uv radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers", *Physical Review A*, **44** (8), 5178 (1991).
17. L.H. Yu et al., *Science*, **289**, 932 (2000).
18. T. Rao, D.H. Dowell, *arXiv*, 1403.7539v1 (2014).
19. K. Smolenski et al., *AIP Conference Proceedings*, **1149**, 1077 (2009).
20. F. Sannibale et al., *Physical Review Accelerators and Beams*, **15**, 103501 (2012).
21. A.P. Lee et al., "First beam test of the high brightness photo-injector at NSRRC", *Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea*, **16**, 1800 (2016).
22. M. C. Chou et al., "Experimental study of coherent THz sources driven by the NSRRC high brightness photoinjector", *9th International Particle Accelerator Conference*, 4332 (2018).
23. The World Wide Web Virtual Library: Free Electron Laser research and applications, [http://sbfel3.ucsb.edu/www/vl\\_fel.html](http://sbfel3.ucsb.edu/www/vl_fel.html).
24. [https://www.fels-of-europe.eu/fel\\_facilities/x\\_ray\\_facilities/flash/](https://www.fels-of-europe.eu/fel_facilities/x_ray_facilities/flash/); K. Honkavaara, "Status of the FLASH FEL user facility at DESY", *Proceedings of FEL2017 (2017) MOD02; FLASH2020+ CDR*, <https://bib-ubdb1.desy.de/record/434950/files/FLASH2020pCDR.pdf>.
25. L. Giannessi et al., "Status and perspectives of the FERMI FEL facility (2019)", *39th International Free Electron Laser Conference (FEL2019)*, 742 (2019).
26. W.Q. Zhang et al., "Status of Dalian Coherent Light Source", in *Proceedings of FEL2017 (2017) MOC04*; [https://accelconf.web.cern.ch/fel2017/talks/moc04\\_talk.pdf](https://accelconf.web.cern.ch/fel2017/talks/moc04_talk.pdf)
27. P. Emma et al., *Nature Photonics*, **4**, 641 (2010).
28. T. Ishikawa et al., *Nature Photonics*, **6**, 540 (2012).
29. E. Prat et al., *Nature Photonics* **14**, 748 (2020).
30. H. Kang et al., "Hard X-ray free-electron laser with femtosecond-scale timing jitter", *Nature Photonics*, **11**, 708 (2017).
31. W. Decking et al., "Status of the European XFEL", in *proceedings of IPAC 2019 (2019) TUPRB020*; M. Altarelli et al., Ed., "The European X-Ray Free-Electron Laser - Technical Design Report", DESY, Hamburg, Germany, Rep. DESY 2006-097 (2007).
32. M. Gnida, "SLAC fires up the world's most powerful X-ray laser: LCLS-II ushers in a new era of science", <https://www6.slac.stanford.edu/news/2023-09-18-slac-fires-worlds-most-powerful-x-ray-laser-lcls-ii-ushers-new-era-science>.
33. C. Feng "Status of the Shanghai soft X-ray free-electron laser", *Proc. SPIE PC12581 (conference presentation)*, X-Ray Free-Electron Lasers: Advances in Source Development and Instrumentation VI (2023) PC1258103; <https://doi.org/10.1117/12.2666203>.
34. N. Nakamura et al., *Japanese Journal of Applied Physics*, **62**, SG0809 (2023).
35. M. Akemoto et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A 877**, 197 (2018).
36. Y. Honda et al., *Review of Scientific Instruments*, **92**, 113101(2021).
37. N. Nakamura et al., "Recent Progress on EUV-FEL and its PoC using cERL", *Proc. 2022 Source Workshop*, S32 (2022).
38. D.F. Ratner and Alexander W. Chao, *Physical Review Letters*, **105**, 154801 (2010).
39. X. Deng, "Theoretical and Experimental Studies on Steady-State Microbunching", Springer Singapore, Springer Theses, 978-981-99-5800-9, (2023).
40. 唐傳祥, 鄧秀傑, "穩態微聚束加速器光源", *物理學報*, **71** (15), 152901 (2022).
41. Yi Jiao, Daniel F. Ratner, and Alexander W. Chao, *Physical Review Accelerators and Beams*, **14**, 110702 (2011).
42. A. Chao et al., "High Power Radiation Sources using the Steady-state Microbunching Mechanism", in *Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea*, TUXB01 (2016).

43. X. J. Deng, et al., *Journal of Synchrotron Radiation*, **30**, 35 (2023).
44. S. Y. Lee, "Accelerator Physics", 4th Edition, World Scientific (2019).
45. H. Wiedemann, "Particle Accelerator Physics", 4th Edition, Springer (2015).
46. X.J. Deng et al., *Physical Review Accelerators and Beams*, **24**, 094001 (2021).
47. X.J. Deng et al., *Physical Review Accelerators and Beams*, **26**, 054001 (2023).
48. J. Tang et al., "A faster algorithm to compute lowest order longitudinal and transverse resistive wall wake for non-ultrarelativistic case", in *Proceedings of IPAC2024, Nashville, Tennessee, USA* (2024) MOPG09.
49. Xiujie Deng et al., *Nature*, **590**, 576 (2021).
50. 邱茂森, "同步輻射光源之加速器磁格簡介", 國家同步輻射中心簡訊第 125 期.  
<https://www.nslrc.org.tw/chinese/publicBrief.aspx?ViewID=20230801090624674>.
51. C.G. Schroer, et al., *Journal of Synchrotron Radiation*, **25** (5), 1277 (2018).

## 作者簡介

劉偉強先生為國立清華大學物理研究所博士，現為國家同步輻射研究中心光源組研究員。

Wai-Keung Lau received his Ph.D. in Physics from National Tsing Hua University. He is currently a Research Fellow in Light Source Division at National Synchrotron Radiation Research Center.

劉宗凱先生為國立中央大學物理博士，現為國家同步輻射研究中心光源組副研究員。

Zong-Kai Liu received his Ph.D. in Physics from National Central University. He is currently an Associate Researcher in Light Source Division at National Synchrotron Radiation Research Center.

羅皓文先生為國立清華大學先進光源科技學位學程博士，現為國家同步輻射研究中心光源組助理研究員。

Hao-Wen Luo received his Ph.D. in Graduate Program for Science and Technology of Synchrotron Light Source from National Tsing Hua University. He is currently an Assistant Researcher in Light Source Division at National Synchrotron Radiation Research Center.