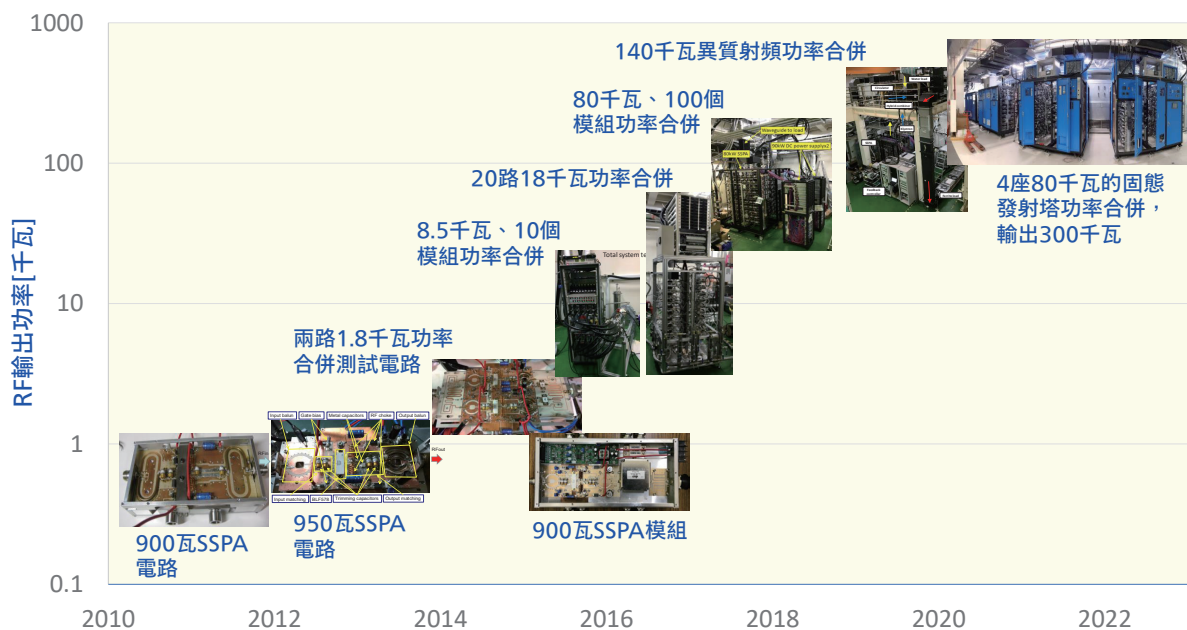


# 固態射頻技術之開發與應用

劉宗凱博士

國家同步輻射研究中心高頻小組



圖一 國輻中心發展固態射頻技術的歷程。

固態射頻技術是現今粒子加速器高功率射頻功率源的發展趨勢，它利用了低功率的固態功率放大器 (Solid State Power Amplifier, SSPA) 模組，以輸出最高約 1 千瓦的射頻功率，再藉由功率合併，結合生成達數百千瓦的高功率輸出，可替代傳統的真空管設備。其中一個好處是不需要使用高電壓設備，僅需使用數十伏特的直流電壓來驅動晶體。此外，因總功率輸出是由多個模組堆疊所組成，即使在少數模組故障的情況下，固態功率源仍能保持穩定輸出，防止系統當機，提供系統更高的可靠度。

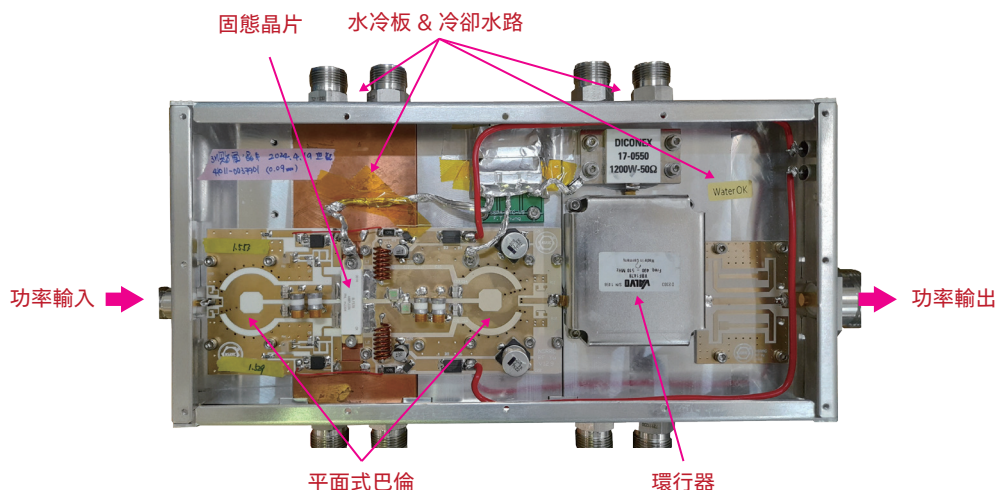
目前許多加速器設施的射頻功率源，都改以固態射頻技術的方式實現。圖一為本中心發展固態射頻技術的歷程。自 2011 年以來，國輻中心高頻小組持續針對固態射頻技術進行自主研發，從 900 瓦的固態模組電路板原型、平面式巴倫，並持續提高模組的效能、改善冷卻及缺陷，到 2014 年進行功率合併器的開發。2016 至 2019 年陸續於高頻實驗室完成 8.5 千瓦、18 千瓦與 80 千瓦的功率合併。最終，在 2021 年成功建置 500 MHz、300 千瓦高功率固態射頻發射機，並應用在加速台灣光子源電子束流的高頻系統上。

目前國輻中心開發的固態放大器模組，採用 LDMOS 電晶體的晶片 BLF578，選取適當的阻抗匹配電路與偏壓電

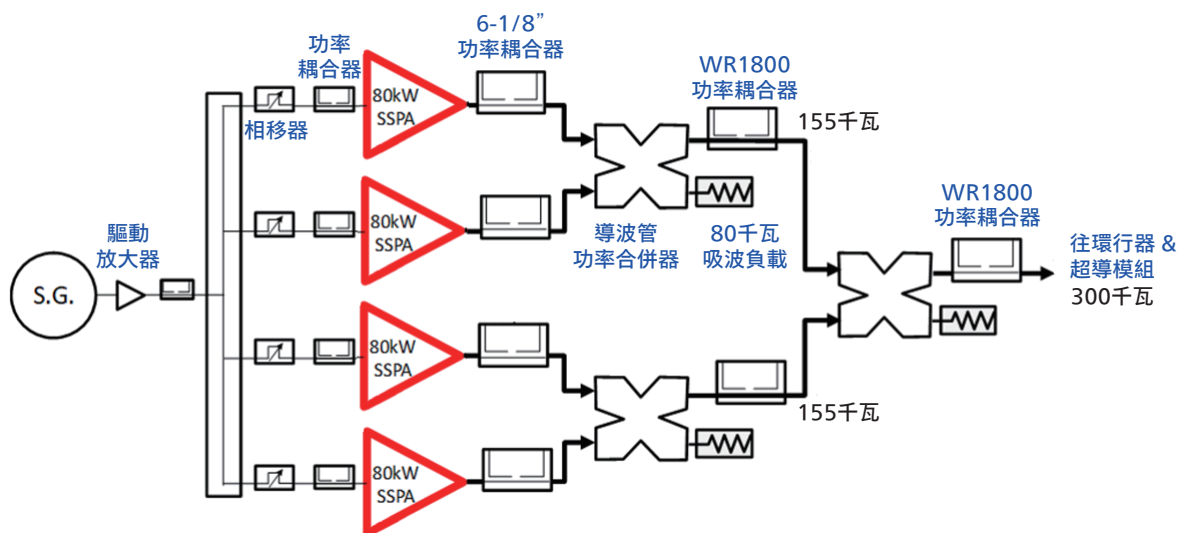
路，並透過平面式巴倫和接觸式水冷板實現高功率的輸出。為了保護晶片免於反射功率的損傷，在每個固態電路板的輸出端加上環行器和吸波負載，如圖二。以此固態功率放大器模組為基礎，再經由功率合併的方式，則能以固態射頻技術實現 300 千瓦射頻功率輸出的目標。

由國輻中心自主設計、建造的 300 千瓦固態射頻發射機，可穩定提供台灣光子源目前 500 毫安培的電流運轉所需之 250 千瓦射頻功率，圖三則為此固態射頻發射機的架構圖。此系統由 4 座 80 千瓦的固態發射塔所組成，藉由兩階段的功率合併，最高可輸出 320 千瓦的輸出功率。每座固態發射塔包含了 100 個固態放大器模組、多組各式不同類型的功率合併器與分配器、兩套 96 千瓦的直流電源供應器，以及控制、功率量測與冷卻等周邊支援設備。

此 300 千瓦固態射頻發射機自 2023 年 8 月開始以 250 千瓦的輸出功率，於台灣光子源用戶時段運轉約 5 個半月，此期間總共損壞了 9 個模組，且在此用戶時段內，並沒有發生因固態發射機所造成的當機事件。這也顯示了當少量模組損壞時，不會影響到系統運轉的特性，這對於提升系統的可靠度相當有助益。



圖二 國輻中心開發的固態模組內部架構與照片。



圖三 300 千瓦功率合併的架構圖。

在系統的穩定性方面，原有的速調管型射頻發射機，其所需的高壓是由 86 組 800 伏特之 DC 電源模組，藉由不斷的開關切換所產生。這樣的機制，在現有的切換頻率設定下會導致約 7 kHz 的高頻雜訊，造成輸出的射頻功率中也包含此 7 kHz 的雜訊，進而藉由加速場影響到電子束軌道的穩定性。而在固態射頻發射機中，因為不須使用高壓，所以也無此高頻的雜訊，對於電子束軌道的穩定度也有較佳的表現。在節能方面，固態射頻技術也有一定的優勢，以目前約

250 千瓦的射頻輸出，如選擇適當的直流操作電壓，此固態射頻發射機的整體用電效率可達到 50%，略高於原有速調管型射頻發射機在相同輸出功率下的用電效率。

未來我們將持續就固態射頻技術進行研發，目標在於改善整體的用電效率與散熱機制、降低模組故障的機率等，以期達成高可靠度、高用電效率的射頻功率源。

