

6 GHz 頻段無線電解決方案：16 nm 收發器系列

近期，6 GHz 頻段被劃分用於無線通訊系統，為實現高速、低延遲應用開闢了新的可能性。ADI 推出的 16 nm 收發器系列為該頻段提供了一種高度整合的解決方案，兼具低功耗和高性能。本文將介紹 6 GHz 頻段，並討論 ADI 收發器系列所採用的零中頻架構的優勢。此外，本文並將重點介紹 16 nm 收發器系列的主要特性和在不同場景中的應用。

■作者：Howie Jing / ADI 資深經理

引言

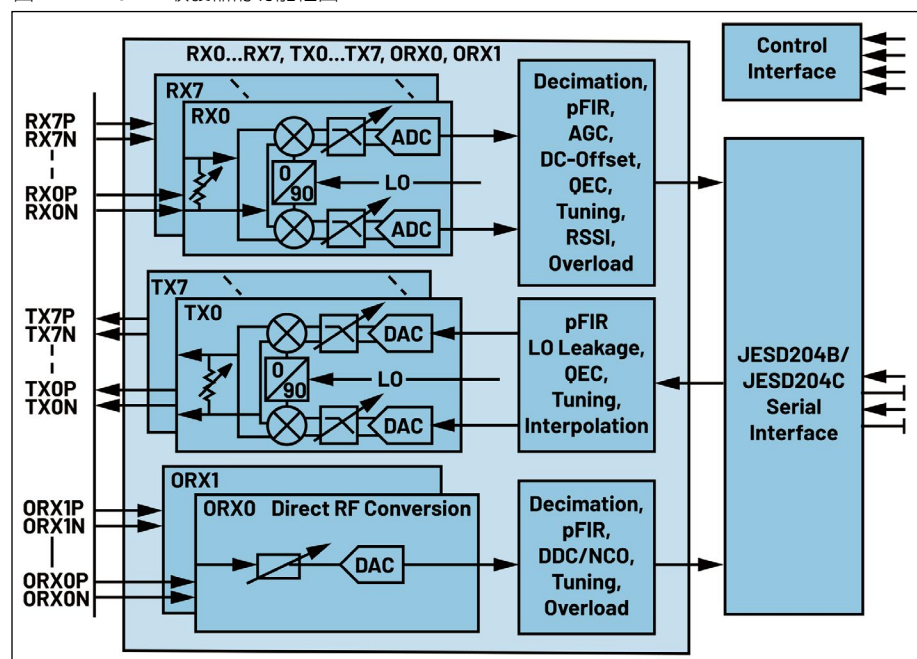
隨著無線通訊系統的不斷演進，各方也在持續探索和採用新技術和新頻譜。對於無線業的從業者而言，3GPP(第三代合作夥伴計畫) 將 6 GHz 頻段納入頻率範圍 1 (FR1) 是個令人鼓舞，但也在預料之中的好消息。透過將原來的 FR1 在低頻和高頻兩端都進行擴展，從 [450 MHz 至 6000 MHz] 擴展至 [410 MHz 至 7125 MHz]，相關產業能夠取得大量新增頻譜，為未來的成長和創新開拓了新機遇。

相較於舊版 FR1 頻段，新的 6 GHz 頻段支援更寬的頻寬：n96 為 1200 MHz (5925 MHz 至 7125 MHz)，n102 為 500 MHz (5925 MHz 至 6425 MHz)，n104 為 700 MHz (6425 MHz 至 7125 MHz)。透過提供網路能耗性能良好且傳播率優於頻率範圍 2 (FR2) 頻段的高容量頻譜，新的 6 GHz 頻段必將成為無線連接的重要資源。2020 年，美國聯邦傳

播委員會 (FCC) 將 6 GHz 頻段劃定給免授權的 Wi-Fi 使用，這使得 6 GHz 頻段在市場內極具競爭力。

本文將探討 ADI 的 16 nm 收發器系列在相關應用中的特性和優勢。ADI 16 nm 收發器是一款高度整合的元件，提供 8T8R (八個發射器和八個接收器) 和 4T4R (四個發射器和四個接收器) 兩種配置，具有多種數位前端功能，包括數位預失真 (DPD)、削峰 (CFR)、載波數位

圖 1: ADI 16 nm 收發器的功能框圖。



上變頻器和下變頻器 (CDDC 和 CDUC)，而且具有省電節能特性。

架構

如圖 1 所示，ADI 的 16 nm 收發器系列整合了八個差分發射器 (Tx0-7)、八個差分接收器 (Rx0-7) 和兩個差分觀測接收器 (ORx0-1)。可調諧頻率的範圍介於 400 MHz 至 7125 MHz 之間，以兩個射頻 (RF) 合成器作為本振 (LO)。可調諧頻寬高達 600 MHz。為了連接到基頻處理器，設計了高速 JESD204B/JESD204C 介面。

發射器

發射器採用零中頻架構，如圖 1 所示。來自數位類比轉換器 (DAC) 的同相和正交 (I/Q) 基頻訊號透過基頻低通濾波器 (LPF) 進行重構和濾波，然後透過類比調變器和 LO 進行上變頻，得到射頻輸出訊號。相較於射頻採樣轉換器，零中頻發射器提供更高的線性度和抗雜訊性能，而且功耗相對較低。

DAC 轉換函數的一般形式為 $\sin(x)/x$ ，其頻率響應並不平坦，如圖 2 所示。類比輸出在較高頻率時會出現衰減。採樣過程中會生成目標訊號的鏡像，需要將鏡像濾除。否則，鏡像會污染無線電頻譜，違反 3GPP 和 FCC 的發射要求。

因此，DAC 的最大可用輸出頻率通常為採樣時脈速率的 40%。為了使射頻採樣在 6 GHz 頻段 (最高 7.125 GHz) 有效運行，DAC 採樣

圖 2: DAC 的 SINC 回應及其鏡像。

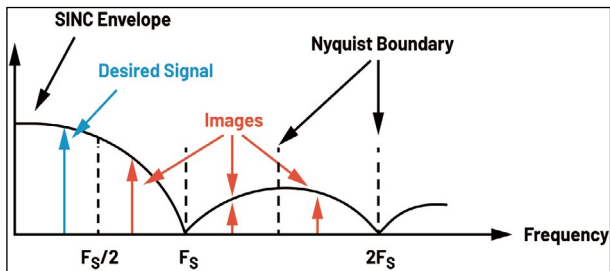
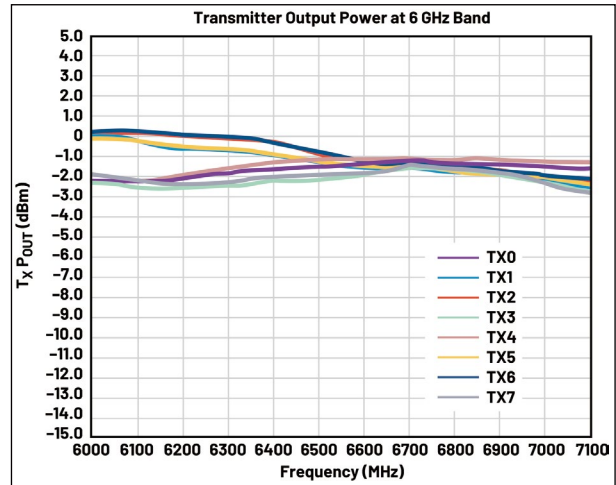


圖 3: 6 GHz 頻段下的發射器輸出功率和平坦度。



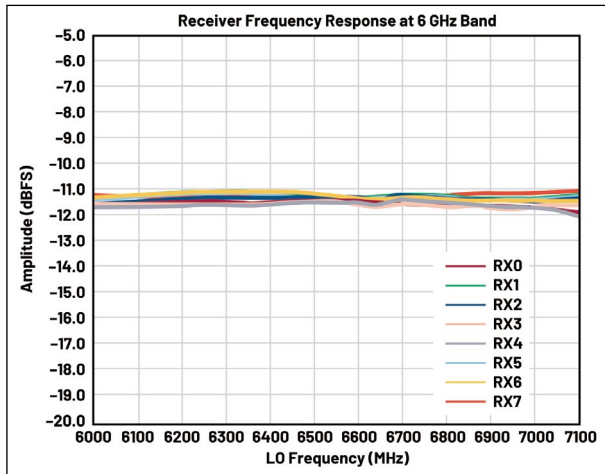
時脈必須在高於 18 GHz 的頻率運行，而這會消耗大量功率。此時，零中頻發射器的優勢非常明顯。其只需對基頻 I/Q 訊號進行數位化處理，DAC 採樣時脈就能夠降低至 3 GHz 以支援 6 GHz 頻段。由此可在整個 6 GHz 頻段實現更平坦的輸出功率 (圖 3)，並實現更低的雜訊譜密度 (NSD) 與相對較低的能耗。通常情況下，即使採用相同的製程，對於典型的單頻段應用而言，要實現同等的抗雜訊性能，射頻採樣轉換器的功耗比基頻 I/Q 轉換器高出大約 125%。

接收器

在接收器路徑上，透過使用類比解調器和 LO，對射頻輸入進行下變頻，得到基頻 I/Q 訊號。連續時間 $\Sigma\text{-}\Delta$ ADC 專門用於對基頻 I/Q 訊號進行數位化處理。該 ADC 整合了固有的抗混疊濾波功能，相較於傳統採樣技術，大幅放寬了濾波要求。在射頻輸入埠，寬頻匹配功能可在 6 GHz 頻段提供平坦的頻率響應，如圖 4 所示。

基頻放大器可以採用經典拓撲，透過使用回饋電路來提供良好的線性度和抗雜訊性能。然而，射頻採樣接收器需要在射頻頻段進行成本高昂的額外濾波。為了對 6 GHz 頻段進行採樣，射頻採樣 ADC 需要 8 GSPS 採樣時脈，

圖 4: 6 GHz 頻段下的接收器頻率響應。



以便轉換來自第二奈奎斯特區的目標訊號，因此，如果不進行強力濾波來減輕影響，就無法避免產生的訊號發生混疊。或者，可使用高於 15 GSPS 的採樣時脈來放寬抗混疊要求，但相較於零中頻的基頻 I/Q 採樣，此種方法的能耗

圖 5: 接收器雜訊譜密度。

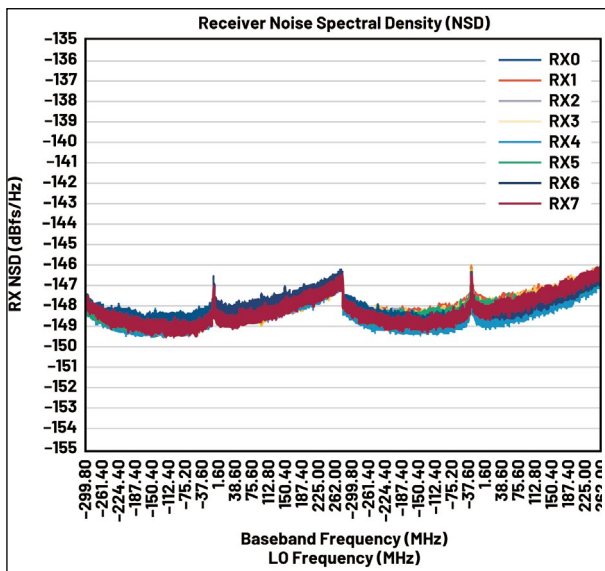


表 1: 不同採樣時脈速率下的 NSD 性能和功率

採樣時脈	可用的奈奎斯特頻寬	NSD	相較於 2949.12 MSPS 增加的相對功率
2949.12 MSPS	1274.56 MHz	-144 dBFS/Hz	0 mW
3932.16 MSPS	1766.08 MHz	-145 dBFS/Hz	235 mW
5898.24 MSPS	2749.12 MHz	-147 dBFS/Hz	365 mW
7864.32 MSPS	3732.16 MHz	-148 dBFS/Hz	780 mW

明顯更高。相較之下，零中頻的基頻 I/Q 採樣僅需 3 GSPS 左右的低 I/Q 採樣時脈便能滿足性能需求。

此外，零中頻接收器的 NSD 通常與頻段無關。如圖 5 所示，6300 MHz 和 7100 MHz 時的 NSD 幾乎相同。

觀測接收器

在此種高度整合的收發器中，兩個觀測接收器均設計為射頻採樣架構，透過適當的前端設計，為用於功率放大器 (PA) 的 DPD 環回接收器、用於發射器輸出功率的監控路徑或者用於射頻頻譜的嗅探接收器等提供性能保障。

為了支援各種應用，觀測接收器可配置為在四種採樣時脈速率下工作，進而彈性地在頻寬、NSD 性能和功率之間進行選擇。有關不同採樣時脈速率下的 NSD 性能和功率，請參見表 1。

應用

無線大規模多路輸入多路輸出 (MIMO) 系統

ADI 的 16 nm 收發器廣泛部署於 sub-6G 大規模 MIMO 系統，已有數百萬台搭載了這項技術的基地台收發台 (BTS) 設備在實際應用中投入使用，足以證明此款收發器是 sub-6G 頻譜內的可靠無線電解決方案。從 2025 年起，得益於擴展後的 3GPP FR1，此款收發器也將在 6 GHz 頻段下提供同樣卓越的性能及以下優勢。

支援寬頻寬

■ 在發射器和接收器上支援 600 MHz 暫態頻寬 (IBW)，為 PA 的數位預失真 (DPD) 支援 800 MHz 合成頻寬。

■兩個觀測接收器可用於 PA 數位預失真的回饋通道。

■具有高達 19.66 Gbps/32.44 Gbps 的 JESD204B/JESD204C 數位介面，支援寬頻寬。

減少通道間相位變化的技術

■多晶片同步 (MCS)：作為元件初始化的一部分，MCS 狀態機採用系統全域參考訊號 (SYSREF) 來重定資料轉換器時脈及數位資料路徑上的所有其他時脈，以使時脈相位與元件時脈 (DEVCLK) 同步，進而使從 JESD 介面到資料轉換器的相位保持一致。此外，MCS 狀態機會對射頻 PLL 相位進行復位，以與 DEVCLK 和 LO 分配路徑上的分配器保持一致，進而在射頻輸入和輸出埠實現整體相位對齊。

■發射器衰減引起的相位補償：訊號路徑上的增益或衰減變化是引起相位變化的另一個原因。為了減輕相位變化，針對每個發射器的衰減指數，增加了預表徵的相位補償，進而確保每當系統調整衰減時都會應用相位校正。

在收發器中融入這些技術有助於將通道初始化為更一致的啟動條件，進而降低系統天線校準的複雜性。如此透過降低射頻 PLL 對溫度的依賴性並減輕增益變化引起的相位變化，天線校準便能在操作過程中以更低的頻率運行。

功耗節省

非連續傳輸 (DTX) 模式：對於傳統的無線電單元，即使蜂巢單元裡沒有使用者，能耗也相當高。這款收發器內建 DTX 功能，可在空傳輸時間間隔 (TTI) 期間，關閉發射器資料路徑中的元件。配置了 DTX 後，當收發器檢測到“零資料”條件時，便會關閉功率放大器及其他發

射器元件。檢測到非零資料時，元件會快速啟動。在使用實際的行動網路營運商數據的場景中，這項技術將 RU 能耗降低了 30% 以上，同時不影響服務品質 (QOS)。

16 nm 收發器用於 Wi-Fi 系統的免授權 6 GHz 頻段

2020 年，美國 FCC 表決通過了允許免授權的無線局域網在 6 GHz 頻段內運行的決議。之後，Wi-Fi 聯盟為 Wi-Fi 6E 通道分配了 5925 MHz 至 7125 MHz 的頻譜³，在傳統 2.4 GHz 頻段和 5 GHz 頻段的基礎之上，多增加了 14 個額外的 80 MHz 通道或 7 個額外的 160 MHz 通道。有關 6 GHz 頻段的免授權頻段，請參見表 2。

表 2: 6 GHz 頻段的免授權 NII 頻段

U-NII 頻段	頻率範圍 (GHz)	頻寬 (MHz)
U-NII-5	5.925 至 6.425	500
U-NII-6	6.425 至 6.525	100
U-NII-7	6.525 至 6.875	350
U-NII-8	6.875 至 7.125	250

ADI 的 16 nm 收發器系列覆蓋 6 GHz 頻段，提供卓越的性能，並且可以在能耗與頻寬之間彈性權衡，亦能從前面部分討論的零中頻架構中獲益。

單一無線電晶片透過空間分集 (4 倍或 2 倍天線分集) 即可支援 1200 MHz

如前所述，此款收發器支援 600 MHz IBW，透過與兩個內部 LO 結合使用，單一晶片可覆蓋整個 1200 MHz 頻段。如圖 6 所示，對於整個 1200 MHz 頻段，收發器配置為支援四根天線 (四個通道)。LO0 用於通道 0 至 3，以覆蓋所有四個通道上的 U-NII-5 和 U-NII-6。

同樣的對於 U-NII-7 和 U-NII-8 的通道 4 至 7，LO1 將配置為 6825 MHz。兩個 600 MHz 頻段可透過高速 JESD204C 介面同時發送到基頻。配置詳情參見表 3。

低功耗解決方案透過 LO 頻率掃描即可支援 1200 MHz

6 GHz 頻段 Wi-Fi 頻譜可分成 59 個通道，

每個通道的頻寬為 20 MHz，或支援七個通道，每個通道的頻寬為 160 MHz。除了上述寬頻寬配置，收發器還可配置為窄頻寬，以降低能耗。例如，當資料速率為 245.76 MSPS 時，訊號頻寬可為 160 MHz，JESD 通道速率可低至 9.8 Gbps 運行。在 1200 MHz 頻段內，射頻 LO 頻率可以彈性配置，以覆蓋整個 6 GHz 頻段。相較於寬頻寬配置，在這種低功耗配置下，收發器

可節省 20% 的功耗。配置示例如圖 7 和表 4 所示。

圖 6: 寬頻寬配置 A——4 倍天線分集。

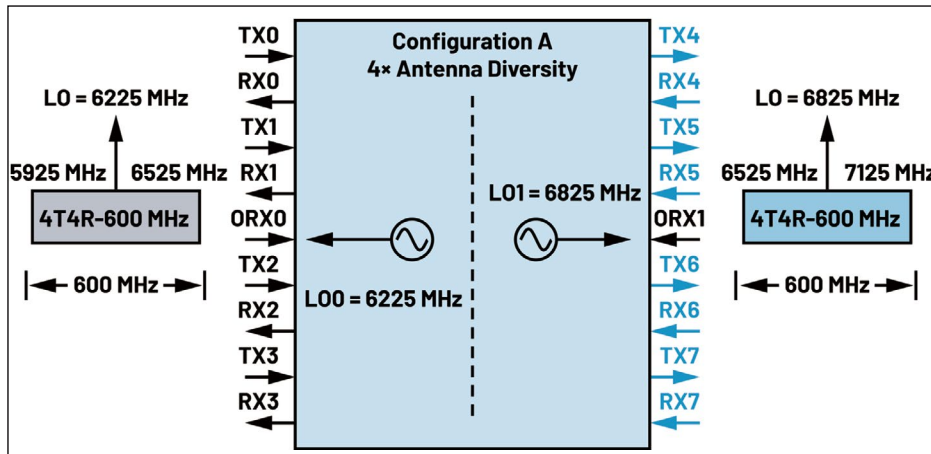


圖 7: 窄頻寬配置 B——4 倍天線分集。

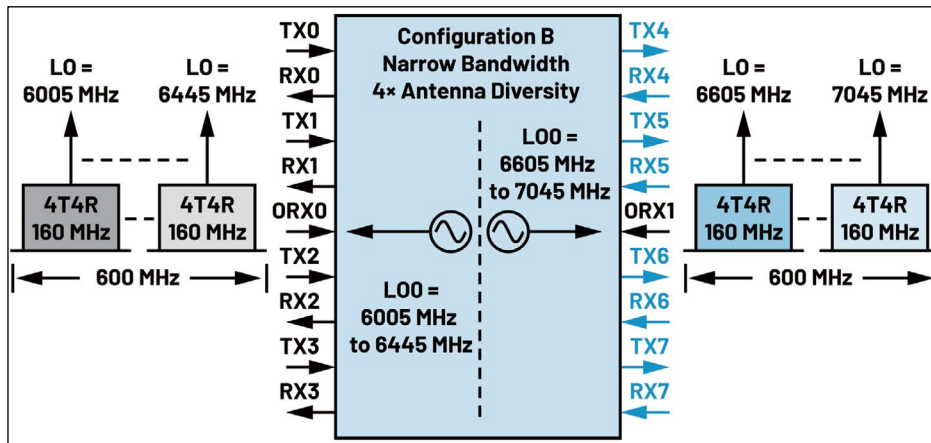


表 3: 收發器的寬頻寬配置

	天線數量	LO	IBW	資料速率	JESD	通道速率	通道數
U-NII-5/6	4	LO0 = 6225MHz	600 MHz	983.04 MSPS	JESD204C	32.44 Gbps	4
U-NII-7/8	4	LO1 = 6825MHz	600 MHz	983.04 MSPS	JESD204C	32.44 Gbps	4

表 4: 收發器的窄頻寬配置

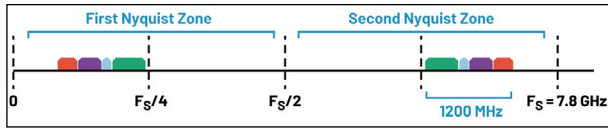
	天線數量	LO	IBW	資料速率	JESD	通道速率	通道數
U-NII-5/6	4	LO0	160 MHz	245.76 MSPS	JESD204B	9.8 Gbps	4
U-NII-7/8	4	LO1	160 MHz	245.76 MSPS	JESD204B	9.8 Gbps	4

用於頻譜掃描的寬頻觀測接收器

對於此類應用，觀測接收器可配置為 7.8 GHz，無縫覆蓋 Wi-Fi 6 GHz 頻段。圖 8 顯示了 6 GHz 頻段位於第二奈奎斯特區的高頻段範圍，相應地，在第一奈奎斯特區，透過利用接收器資料路徑上的 NCO，反轉的 6 GHz 頻譜可轉換為基頻。

在無線通訊市場中，隨著新技術和新頻譜的持續導入，營運商迫切需要經濟高效的解決方案。因此，高度整合的低功耗解

圖 8：觀測接收器上的 6 GHz 頻段頻譜。



決方案變得更加重要。ADI 的 16 nm 收發器系列在單一晶片上整合了八個通道和高性能類比前端及數位前端功能 (DPD、CFR 和 CDDC/CDUC)。零中頻架構提供低功耗收發器解決方案，並在元件中整合了省電特性 (DTX)，以便透過控制 PA 來進一步降低系統功耗。此外，得益於彈性的配置，此種架構也能夠彈性適用

於無線 BTS 和 Wi-Fi 系統等多種應用。

參考文獻

- ¹ 「均衡技術使 DAC 頻率響應平坦化」，ADI，2012 年 8 月。
- ² Brad Brannon，「無線電架構事關重大：射頻採樣與零中頻的回顧」，ADI，2021 年 12 月。
- ³ 「FCC Opens 6 GHz Band to Wi-Fi and Other Unlicensed Uses」，美國聯邦傳播委員會，2020 年 4 月。CTA

SEMICON Taiwan 2025 見證 AI 半導體產業轉型合作

全球先進製程產能至 2028 成長近 7 成 產業分工進化為跨界共創

當 AI 晶片需求引爆全球製造產能競逐，半導體產業正經歷前所未有的變革浪潮。向來被視為全球半導體風向球的 SEMICON Taiwan，今年展前報名再創新高。展會將於 9 月 8 日起以系列高峰論壇揭開序幕，並於 9 月 10 日至 12 日在台北南港展覽館盛大登場。今年適逢展會 30 週年，全面升級為「國際半導體週」，吸引來自 56 個國家、超過 1,200 家企業、逾 4,100 攤位參展，17 個國家館參與更創下歷史新高。

AI 應用需求的爆發性成長正推動全球半導體產業加速擴張。SEMI 數據指出，全球 7 奈米以下先進製程產能預計將於 2028 年達到歷史新高的 140 萬片 / 月，較 2024 年大幅成長 69%。在這波成長浪潮中，台灣憑藉從 IC 設計、晶圓製造到封裝測試的完整半導體生態系優勢，以及持續強化供應鏈韌性的產業環境，持續扮演著全球 AI 晶片供應鏈的關鍵角色。

正是基於台灣在 AI 半導體領域的技術實力與完整生態系，SEMICON Taiwan 2025 吸引 17 個國家館參展，創歷史新高，今年更首度迎來加拿大、哥斯大黎加、立陶宛、瑞典與越南等 5 個新國家館。除了國家展館規模創歷史新高，來自世界各地的國際訪團也踴躍自主到訪，包括美國、智利、非洲、西班牙及義大利等各地代表，展現台灣半導體的全球吸引力與國際合作能量。

為回應產業對技術交流與合作的需求，SEMICON Taiwan 2025 將透過多場重量級論壇與專業展區，為全球半導體生態系提供深度對話平台。「半導體先進製程科技論壇」以「AI-Driven Technologies: Powering the Next-Gen Semiconductor Era」為主題，集結台積電、ASML、Applied Materials 等全球領導廠商，深入探討 AI 驅動下的先進製程技術突破。而隨著 AI 技術深入各個應用領域，如何確保供應鏈的穩定與安全也成為產業關注焦點。此外，由數位產業署與 SEMI 共同推動的「SEMI E187 認證制度」將於 SEMICON Taiwan 2025 「半導體資安趨勢高峰論壇」正式啟動，象徵台灣正式建立國際級半導體設備資安驗證機制。SEMI E187 為全球首個由台灣主導制定的半導體設備資安標準，適用於設備產品、驗證機構與實驗室。同時，晶圓廠與業者也能快速採用通過認證的安全設備，降低網路攻擊風險，為產業奠定穩固的信任基礎。

展區方面，AI 半導體技術概念區完整展現從晶片製造、IC 設計到專用硬體的 AI 產業鏈，匯聚科技領導企業；配合產業對安全可靠供應鏈的需求，半導體資安專區展示工控資安、零信任架構等解決方案，為 AI 時代的產業發展提供全方位支援。