

高性能 ScAlN/GaN HEMT 的製作關鍵

Fabrication Keys for High Performance ScAlN/GaN HEMTs

洪茂峰

Mau-Phon Houg

ScAlN/GaN 因強烈的自發及壓電作用產生的極化效應會在介面形成高密度的 2 DEG ($> 6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)，此特性帶來良好的靜電控制能力與可強化載子侷限效果的優勢，使 ScAlN 元件展現出優於 GaAlN/GaN 的高崩潰電壓及優異的高頻性能，顯示其於下世代高功率與高頻元件應用的潛力。然在評比 ScAlN/GaN 與 GaN-基元件的 RF 表現時卻發現前者在一些特性仍遜於後者，其原因可能是前者尚未建立如後者般成熟的技術，故本文盤點了製作高性能 ScAlN/GaN HEMTs 所需的關鍵技術，並提供可呈現優秀 RF 表現的 GaN-基元件的製作細節，期有助於高性能 ScAlN 元件的製作。惟分析近期 ScAlN/GaN 元件的發展，發現其特性提升的障礙竟然是 ScAlN 本質極化作用的限制，因此本文提出製作高性能 ScAlN/GaN 元件的新思維，即善加利用極化特性並輔以電場重分布技術與發展阻抗工程技術，將其與元件結構和寄生效應等參數耦合，以之建立可於 RF 應用的高性能 ScAlN/GaN 元件，如 LNA 或 PA，等電子系統的製作。

ScAlN/GaN HEMTs exhibit strong polarization effects that induce a high-density 2DEG ($> 6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) at the heterointerface, enabling superior electrostatic control and enhanced carrier confinement. These advantages result in high breakdown voltage and excellent RF performance, demonstrating potential superiority over AlGaIn/GaN devices for next-generation high-power and high-frequency applications. However, comparative studies reveal that ScAlN/GaN devices still underperform GaN-based counterparts in certain RF characteristics, primarily due to the lack of mature technologies. In this work, key techniques for achieving high-performance ScAlN/GaN HEMTs are reviewed, alongside fabrication insights from state-of-the-art GaN-based RF devices. Despite recent progress, critical challenges remain, including relatively low μ and excessive gate leakage. These limitations are associated with the intrinsic polarization properties of ScAlN. Therefore, this study proposes a new strategies in which a co-optimization of polarization engineering, electric field management, and impedance design is required to couple device structure, polarization effects, and parasitic elements. Such an approach enables the realization of high performance ScAlN/GaN devices for RF applications, including low-noise amplifiers (LNAs) and power amplifiers (PAs).

一、高頻高功率的電子系統應用現況

隨著 AI 資料中心、車用電子、工業控制與能源管理系統對高效率電能轉換需求的快速成長，GaN 因為是寬能帶材料且具備更高的功率密度與熱傳導效率，在相同的體積下可提供更大的功率、更低的能耗並使元件小型化，尤其以之製作的側向式 AlGaIn/ GaN HEMT 藉由 field plates back-barriers 與 graded buffers 的設計可將其工作電壓提升達 650 V，並以較 Si 元件更高的電子移動率的優勢令系統可操作於數百 MHz 級頻段進行高效的切換，因此適用於伺服器的 DC-DC converter 或高功率且低損耗的消費性產品等寬廣的產品線，故快速地取代傳統 Si 元件的應用領域。

然而，近年來受惠於 AI 技術的蓬勃發展，AI 資料中心為提升能源效率需將電源架構提升到更高的 800–1.2 kV 範圍，如輝達已規劃下一代的 AI 伺服器將採用 800 V 的高壓直流 (HVDC) bus。另一方面，下世代電動車 (EV) 也為因應更長的續航能力、更快的充電速度以及更大功率輸出的需求，而規劃將 EV 電池架構從 400 V 提升到 800 V。另一方面：目前主導太空產業的推手，包括 SpaceX、歐洲衛星業者 OneWeb，以及亞馬遜的低軌衛星 (LEO) 網路等企業的積極發展也帶動了對高效能 RF 元件的需求。這類晶片必須能處理微波到毫米波的 Ku 或 Ka 頻段且進行高速資料傳輸時須具備寬頻且低延遲失真的特性，同時也要承受太空的嚴苛環境，而寬能隙的 GaN-基 HEMTs 恰具備這種特質，使其可以擔負起下世代高功率與毫米波通訊系統的重要角色備受期待。

二、GaN-基 HEMT 與 SiC 元件的性能比較

雖然 GaN-基 HEMTs 被認為在 RF 與高功率的表現可優於 Si 元件，但預期其可以主宰 EV 動力驅動的逆變器或大型 AI 資料中心的電源轉換器等高功率的應用恐怕是太樂觀了，因為在這個領域還有一個可敬的對手，即 SiC-基的元件。以目前商用功率元件的規格來看，GaN HEMTs 的耐壓能力只約 100–650 V，但 SiC MOS 卻高達 650–3300 V，難怪其可以主宰 EV 的牽引系統。兩者的差距這麼大是有多重的原因的，但最主要的還是元件結構的差異。由於商用的 GaN HEMT 功率元件大都為側向式結構電流沿元件表面流動，所以電壓阻斷是發生在橫向，若要提升耐壓程度則需增加電流漂流的長度，但此舉將犧牲晶片面積與導通效率，因此限制了其耐壓能力的提升。反觀 SiC MOSFET 為垂直式結構，電流流動方向為垂直晶片表面，故電壓阻斷是發生在垂直方向，若要提升耐壓能力只需增加膜厚即可，使其耐壓的表現遠勝於前者。另外，元件可承載電流大小也是高功率元件的重要規格，GaN 因電流受限於通道寬度，故需要較大尺寸的元件方可承載更多的電流，相較之下 SiC 只需調變膜厚即可承擔遠大於前者的電流。再者後者使用了技術相對成熟的 MOS gate，而前者只能製作金屬 Schottky gate 或 MIS gate，因此常造成 V_{th} 飄移，陷阱捕獲效應與電流崩塌 (current collapse) 等可靠性的困擾。綜合上述，目前在高功率的競爭中，SiC 已通過多種驗證標準也在應用領域占有絕對優勢，然而 GaN 則是力爭上游中。

儘管 GaN-基元件在功率的表現尚落後於 SiC，但 III-N 族半導體材料因擁有極化特性會在元件的異質介面處產生高密度的 2DEG，這是 SiC 元件沒有的特點，而且其電子 mobility 也甚大於後者，約為 $1500-2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 與 $900 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 之比，這些優勢令前者的 g_m (轉導) 甚大於後者，而 g_m 愈大表放大能力愈好，又 RF 特性的 f_T (電流增益截止頻率) 係正比

於 g_m ，顯然 GaN-基 HEMTs 在高頻與低切換損等表現會優於後者，將可在伺服器的功率供應，RF 通訊與電源快充裝置等應用攻佔一席之地。因此可以說：GaN-基元件在下世代電力電子系統中的主戰場應定位在高頻與中級電壓的系統，如資料中心的電源供應，或 LEO 寬頻系統的微波到毫米波頻段，等應用，而非 EV 或再生能源系統的數百 kW 到 MW 的超高功率等級。職是之故，本文後續的討論將就如何提升 GaN-基 HEMTs 在 RF 與微波應用的性能為主。

三、AlGaIn/GaN HEMT 現況與瓶頸

儘管 AlGaIn/GaN HEMT 在目前 RF 的應用上已有不負眾望的表現，然而隨著 6G 以及衛星通訊系統的發展需求頻率愈高，AlGaIn 元件的窘境畢現。因為 AlGaIn/GaN HEMT 的性能仍受限於 GaN 材質的不穩定，容易在表面及介面處生成缺陷，形成大量的汲極漏電流，使其在高頻或高電流切換時會產生汲極延遲 (drain-lag)，電流崩塌 (current collapse) 與嚴重的動態特性退化 (dynamic losses)，除造成工作時切換效率變差同時也造成可靠性的困擾。再者，AlGaIn/GaN HEMT 的閘極技術也是個棘手的問題，因為閘極結構的介質層在經長期重複性的切換工作，會因承受了高應力而產生閘極漏電流與 time-dependent dielectric breakdown(TDDb)，導致閘極失效或 V_{th} 飄移造成元件及系統雪崩式的損壞。這些可靠性的困擾對現行 AlGaIn/GaN HEMT 的表現都造成巨大的壓力也阻礙了 AlGaIn/GaN HEMT 擴大其應用領域的機會。而 AlGaIn/GaN HEMT 既存的表面電場熱點，閘極電場聚集，寄生效應，導致的漏電流與早發性崩潰等困擾都成為其應用於下世代高性能電子系統的障礙。尤其在 RF 實務上，PA 元件 (功率放大器) 的 f_T 與 f_{MAX} (最大震盪頻率) 通常需要高於工作頻率的 3 至 10 倍 (依經驗調整) 才能確保增益、效率與穩定性。對 AlGaIn/GaN HEMT 而言這些要求更是 mission impossible，因此各界須以新材料，新製程或新系統設計的思維來面對這些挑戰⁽¹⁾。

很幸運的，近期針對 ScAlN/GaN 的研究發現其元件特性相對於現今已成熟的 AlGaIn/GaN 有許多的優勢，如超高的極化可以產生高密度的 2DEG，較高的 g_m 使其有更高的 f_T ，並且載子侷限能力很強使它擁有較高的 BV_{DS} (源-汲極間的崩潰電壓)，另外更低的導通電阻 R_{ON} 與導通損耗，減少電路中電感與電容等零件的尺寸與使用的數量可顯著縮小模組的體積，這些令人驚豔的特點對資料中心伺服器，甚至衛星通訊系統的佈局與散熱配置都非常有利，恰可改善現今 AlGaIn/GaN HEMT 所面對的困境，也令 ScAlN/GaN HEMT 成為下世代高頻高功率電子系統的最佳選擇。

四、ScAlN/GaN HEMT 應用於 RF 的潛力

ScAlN 並非新材料其實它來自 AlN，據研究 AlN 為 wurtzite 結構且其 Al-N 鍵較短，若以 Sc^{3+} (離子半徑約 0.75 Å) 取代部份的 Al^{3+} (離子半徑約 0.535 Å) 形成 $Sc_xAl_{1-x}N$ 時，將使其與 GaN 的晶格常數失配 (lattice mismatch) 增大，因此使 ScAlN/GaN 異質介面的壓應變 (compressive strain) 變大，由於壓電特性 (piezoelectric) 與應變成正比且 ScAlN 本身的壓電係數也很高，兩者疊加的結果使介面極化不連續 (polarization discontinuity) 顯著增大，因此在 ScAlN/GaN 介面產生極化電荷 (polarization charges)，並吸引出高面密度的 2DEG (two-dimensional electron gas)，使 HEMT 的導通電阻 (R_{on}) 得以降低、飽和電流可以提升。以下

介紹 ScAlN/GaN HEMT 適於 RF 應用的一些特質⁽²⁾。

1. 相較於一般的 III-N 族材料，ScAlN 擁有特強的鐵電與壓電特性，製成鐵電 FET (FeFETs) 結構的非揮發性記憶體在高頻應用時有優良的表現，若製作 ScAlN/GaN HEMT 時能適當調控能障層的應力 (strain-controlled barrier) 將可增強其功率與 RF 方面的表現。
2. ScAlN 組成為可調，可直接磊晶於 AlGaIn/GaN HEMT 結構而不虞有晶格不匹配或生成介面缺陷的困擾。至於品質良好且完整的磊晶層結構則是元件具備高電子移動率的首要關鍵。
3. ScAlN/GaN HEMTs 因擁有強大的極化特性與優良的介面品質，使其在介面的 GaN 通道中得以產生更多且速率更高的 2DEG，由於電流密度大幅增加，依下式

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \quad (1)$$

ScAlN/GaN HEMTs 將呈現極大的 RF 轉導 g_m 。又因元件的 f_T 與 g_m 呈正相關，這些優勢都使 ScAlN/GaN HEMTs 較 AlGaIn barrier 的元件呈現了更優良的功率，切換速度與效率等表現。

4. ScAlN/GaN HEMTs 的 π PB (功率－頻寬乘積) 約為 GaN 元件的 5－7 倍，也是 SiC 元件的 8－11 倍，由於 π PB 是評估功率放大器在功率輸出與工作頻寬綜合能力的優值指標，數值愈大代表此元件的物理性能上限愈高，而在技術比較或選材評估上通常是取 π PB 愈大愈好，因此預期 ScAlN/GaN HEMTs 高頻表現將優於 AlGaIn 或 SiC，可滿足 6G 與衛星通訊等需求。
5. 另一個重要的概念則是元件的閘極長度 (Lg)：通常 Lg 愈短會令操作頻率愈高，而最先進的 AlGaIn/GaN HEMT 已可製作 50－100 nm 的 Lg，那 ScAlN 又是如何呢？據 P.Cui 的研究顯示⁽³⁾，其團隊將具有強極性的 InAlN/GaN HEMT 的 Lg 微縮到極短的 20 nm 時可將 f_T/f_{MAX} 推進到超高的 320/535 GHz，由於 ScAlN 與 InAlN 的極性表現最為相近，故被認為微縮能力應是相當，預期應會有同等優良的表現。值得一提的是 AlGaIn/GaN HEMT 若微縮其 Lg 至 100 nm 以下時會衍生強烈的短通道效應 (short-channel effects, SCE) 劣化其表現。ScAlN/GaN HEMTs 也會發生這個困擾嗎？據研究 ScAlN HEMTs 不虞會有 SCE 的困擾，因為其 Lg 即使微縮到 20 nm，強烈的極化特性仍令閘極對通道電位有良好的控制能力，甚且再將 ScAlN 能障層薄化到 5－10 nm 時還能更縮短等效的 Lg，使靜電耦合更強，也更強化閘極的控制，所以 RF 表現反而更佳。但必須注意的是：水能載舟也會覆舟，後續的討論會提及 ScAlN 強烈的極化特性在微縮過程會衍生一些寄生效應導致 f_{MAX} 的表現不如預期，所以極化作用的處理也是製作 ScAlN/GaN 元件時不容忽視的關鍵。

五、ScAlN/GaN HEMTs 性能提升的準則

一般而言，應用於 6G 的 sub-THz 通訊系統較重要的特性需有： f_T 要高於 200－300 GHz， f_{MAX} 得大於 400 GHz，功率密度至少要有 10－30 W/mm，功率附加效率 (PAE) 效率則為 50－60% 以上，而且 RF 功率放大器 (PA) 的 BV_{DS} 須達 30－70 V 的水準。這些規格對 AlGaIn/GaN HEMT 目前的技術能力造成不小的壓力，而 ScAlN/GaN HEMTs 因其較 AlGaIn

更佳的材料優勢故被期望能改善這個困境，那要如何著手才能擔起接棒的任務呢？以下整理了近期 GaN-基元件相關的研究策略，有些是 ScAlN/GaN 元件的成果，有些則是 AlGaIn/GaN 等元件的經驗，以之作為 ScAlN HEMT 研發方向的參考。

1. ScAlN/GaN HEMTs 的 BV_{DS} 提升策略

首先來看崩潰電壓， BV_{DS} 這個參數。在 RF 系統中 BV_{DS} 是個很關鍵的特性，因為 BV_{DS} 越大，功率放大器的汲極電壓可以操作的空間會更大，而因輸出功率 P_{sat} 與 V_{DS}^2 呈正相關，當然就使輸出功率隨之增大了。另外，較大的 BV_{DS} 也方便讓系統操作於可匹配最佳的負載阻抗而提升 PAE，增進系統效率。總之， BV_{DS} 越高，元件就能耐越高壓，而轉換出更強的功率，這正是達成 6G 長距離、高覆蓋率 (high EIRP) 的關鍵。由研究可知， BV_{DS} 可藉由適當設計元件的 gate 與 drain 距離 (G-D) 來達成，因為 G-D 會影響電場分佈，若 G-D 距離較短：電場將集中在很小的區域內，導致崩潰電壓較低，反之若加大 G-D 距離電場被分散則使崩潰電壓提升，但其代價就是同時增大導通電阻與元件尺寸，也就是功率元件製作時必然會遭遇 R_{on} 與 BV_{DS} 相互 trade-off 的困擾，因此製作 RF HEMT 時 G-D 須取其短，而 power HEMT 時卻又須取其長。如高功率的 ScAlN/GaN HEMTs 其 BV_{DS} 可達 1 kV 以上，但在 RF HEMTs 的 BV_{DS} 則是小於 100 V，這麼大的差距就是將功率元件的 G-D 間隔設計為 10–40 μm ，而 RF 元件的 G-D 則為 0.5–1.5 μm 即可。顯然在尺寸受限制的條件下製作可以兼具優秀的 RF 與 BV_{DS} 特性的 ScAlN/GaN HEMTs 就成為一大挑戰了。然而 GaN-基元件有望緩解這個 trade-off，因為 GaN 的臨界電場遠高於 Si 且其 2DEG 又具高遷移率與高電荷密度，使具同樣 BV_{DS} 的 GaN-基 HEMT 的 R_{on} 可以較 Si 元件更低 1–2 個數量級，這個優勢增加了 ScAlN HEMT 應用於下世代高性能電子系統的潛力。至於 ScAlN 用以改善這個 trade-off 常用的方法有：採用 field plate 讓 G-D 間的電場更均勻或提升磊晶膜品質以增加 2DEG 電荷密度與遷移率，都能有效提升元件的輸出功率。這些方法詳述如下⁽⁴⁾：

1.1 GaN 緩衝層修飾

由 AlGaIn/GaN/AlGaIn 的經驗，可知其介面量子井會形成具有電子阻斷功能的 EBLs (electron blocking layer) 有效侷限 2DEG，使其免於外溢形成漏電流或早發性崩潰等不良後果。故有研究認為使量子井更深化應有助元件 BV_{DS} 的提升，緣此有研究利用 p-type 摻雜的 GaN buffer 來提升 ScAlN/GaN HEMT 的導帶能障以之強化對介面 2DEG 的侷限，果然有效壓抑了元件的穿透漏電流 (punchthrough leakage)，將 ScAlN/GaN HEMTs 的 BV_{DS} 提升到 640–750 V。另，高品質的 GaN 緩衝層因可消除缺陷引發的崩潰，故也有研究採用了薄層的 GaN 與背障層 (back-barriers) 的組合，除可減少 trap 引致的漏電流外，另背障層也貢獻了侷限通道內的電子減少其外漏並使遷移率提升的功能，果然也將 BV_{DS} 有效提高。

1.2 元件參數與 Field Plates 的設計

有研究提出，藉由適當的元件幾何設計，如閘極金屬的高度，場板 (field plates) 與電極間隔等都可將 GaN-基元件的 BV_{DS} 提升到 kV 等級，如 Wang⁽⁵⁾ 就將 AlGaIn/GaN HEMTs 中間極金屬高度從 0.8 μm 增高到 1.6 μm ，並輔以場板的設計，結果將元件的 BV_{DS} 從 1535 V 提升至 1763 V，他們解釋：這是因為閘極金屬高度改變使端點的電場因空乏區寬度延伸重新分布而變得較為平滑，避免了早發性崩潰的可能，而且元件的 sidewall 電容也會被增大

之故。準此，若將此策略應用於 ScAlN 元件預期也應有效。另有研究則是著手於場板的改良，他們發現不論是採用單層或多層 SiN 的場板，並增大 G-D 間距 (l_{gd}) 以及製作良好的保護披覆層，如 SiN/BZN/SiN 疊層，都能消除電場分布的熱點使之更平滑，也能降低 G-D 間的漏電流使 BV_{DS} 提升。

1.3 最佳化的磊晶

有研究指出以分子束磊晶 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 成長 18% Sc 的 ScAlN/GaN 異質介面，因其為晶格匹配，故使缺陷降低了 80% 也減少了漏電流路徑，並因介面為完整陡峭 ($RMS < 1\text{ nm}$)，使得介面極化誘生的 2DEG 密度可以高達 $6 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}$ ，又因散射減少使移動率上升，HEMT 的輸出電流因而大幅增加，並將 BV_{DS} 提升到 755 V。另還發現，ScAlN/AlGaIn HEMT 的能障層厚度為 5–10 nm 時，因 ScAlN 呈現最佳的極化效果，使 HEMT 整體表現也更理想。

1.4 接觸電阻極小化

降低接觸電阻對功率傳輸的損耗也是研發的重點，Yang 的論文⁽⁶⁾ 指出：他們製作了 L_{gd} 與 L_g 各為 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 與 70 nm 的 AlN/GaN RF HEMT，發現此元件在 V_D 為 5V 時其 f_T/f_{MAX} 高達 140/301 GHz，雖然 BV_{DS} 可能會遭受 RF HEMTs 強烈場聚集 (field crowding) 的干擾，但仍有 40–80 V。分析此成果優異的原因可能是因 regrown 的歐姆接觸會將接觸電阻 R_c ，源/汲極擴散電阻 R_s/R_d 以及界面電阻 R_{int} 等不受閘極控制的電阻分量 access resistance 大幅降低，改善 g_m 所致，使 RF 表現得以提升。又因低電阻也減小了焦耳熱效應使 BV_{DS} 不致於受太大的影響。而且以 regrow 磊晶方式也可降低高 Al 含量的 ScAlN 能障層中產生游離缺陷的機會，避免了 Schottky barrier pinning 的困擾，有利於 ScAlN HEMT 於高功率的表現。

1.5 採用 High-k 保護披覆層

Cheng 研究⁽⁷⁾ 指出：採用 SiN/BZN/SiN 或是 ScAlN/ScN 等高介電常數 (high-k) 夾心疊層作為 ScAlN/GaN HEMT 元件的閘極鈍化層結構時，由於 BZN 等高介電層可降低閘極與汲極間的峰值電場，減小了 tunneling current，並可壓抑短通道效應與 G-D 漏電流，使 HEMT 元件呈現較佳的能效與耐壓表現。Cheng 還指出其 HEMT 在 L_g 為 200 nm ， L_{GD} 為 $1\text{ }\mu\text{m}$ 時，崩潰電壓從 68.9 V 被提高至 121.5 V，且元件的功率優值 (BFOM) 也達到 $62.6\text{--}87.3\text{ GW/cm}^2$ ，遠高於 GaN-基元件的表現，顯示 High-k 的保護披覆確可有效提升 ScAlN 的高功率表現。

1.6 極化效應與幾何結構的處理

Krause et al. 的論文⁽⁸⁾ 研究了 ScAlN/GaN HEMT 與 AlGaIn/GaN HEMT 兩種元件截止狀態的崩潰現象 (hard off-state breakdown)，發現其 BV_{DS} 分別為 75 V 與 95 V，前者顯然較小。其實兩者的幾何結構如 L_{gd} ， L_g 皆為 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 與 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ ，也都有雙場板可將 L_{gd} 附近的電場重分布避免熱點的發生，並設計了 AlN 中介層以強化電子侷限減少漏電流的路徑，更覆上了 SiN_x 保護披覆，但 ScAlN/GaN HEMT 的 BV_{DS} 雖有改善但僅為 75 V，Krause 認為這是因為 ScAlN 的強極化在閘極邊緣 (gate edge) 衍生了強電場，加速其更早發生崩潰之故，這正是水能載舟也可覆舟的寫照。儘管如此，製作 ScAlN/GaN HEMTs 時只要遵循前述準則，如：製造晶格匹配的 ScAlN 能障層，降低導通電阻，設計適當的保護披覆與良好的

閘極工程以處理極化效應等，都可以使 ScAlN/GaN HEMTs 因擁有高密度的 2DEG 與良好的電子移動率，使其能貢獻遠優於 AlGaIn/GaN HEMTs 的 RF 表現。

2. ScAlN/GaN HEMTs 的高頻特性提升策略

一般在研發通訊元件能力時 cutoff frequency (f_T) 與最大 oscillation frequency ($f_{\max}$) 是最被關注的兩個參數，但元件在高頻時會出現輸出功率與頻寬相互 Trade-off 的尷尬情形，故工程師會以功率－頻寬指標 π PB (Power-Bandwidth Figure of Merit) 來評估元件在高頻時維持「高輸出功率」的能力。已知 ScAlN/GaN HEMTs 因特殊的極性電荷效應可提供較大的電流密度，較高的 $f_{\max}$ 與較小的閘極電容，故有利於增大 π PB 值，理論估計其約為 AlGaIn/GaN HEMTs 的 1.45 倍，顯示高頻輸出表現會更優異，也被期待可應用於 6G 與衛星通訊等系統。文獻中有許多提升 ScAlN/GaN HEMTs 高頻特性的方法，其中最被肯定的為：改善磊晶與介面的品質，通道尺寸的微縮與寄生效應的消除等策略，以下分別詳述：

2.1 改善磊晶與介面的品質

如前述，磊晶與介面的品質的改善除有利於提升元件的耐壓特性外，對 HEMTs 的 RF 特性助益尤大。如有研究提出：在 ScAlN/GaN 介面增加一薄層，約 2 nm 的 AlN 中介層，可改善介面品質減少散射的效應，使電子移動率由 $300 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 大幅提升至 $1573 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，有效改善了 g_m 使 f_T 得以提升。另有研究提出：MOCVD 長晶時可使用較高的溫度以減低 carbon/oxygen 雜質造成的缺陷，降低 2DEG 被散射的機會，藉由 2DEG 移動率的改善來提升 $f_T/f_{\max}$ 特性。

2.2 微縮閘極尺寸及降低接觸電阻

如前述 (1.4) 所述，降低接觸電阻確可改善 HEMTs 的耐壓能力，但 Cornell 團隊的研究顯示，若以微縮閘極尺寸及降低接觸電阻並用的策略也有助於提升 RF 特性。如他們就利用次微米的閘極並以 regrown 重摻的 n^{++} -GaIn 降低 S/D 的歐姆接觸電阻，而將 $f_T/f_{\max}$ 大幅提升並使元件在 GHz 頻段操作的 PAE 呈現更佳表現^(9, 10)。

2.3 設計適當的能障層以消除應力

前述 Yang 的研究曾提出⁽⁶⁾：製作元件時將 Sc 含量控制在晶格匹配的 $\sim 15-18\%$ ，薄化 ScAlN 能障層至 3 nm，以 AlN 中介層並披覆具壓應力特性的 SiN_x 保護層以提升導帶量子井對 2DEG 的侷限能力，藉由這些策略可改善 ScAlN HEMT 的高功率表現，其實也有助於提升 RF 的表現，因為這些措施可壓抑 SCE，強化 g_m 的線性度，並將 $f_T/f_{\max}$ 提升至 140/301 GHz 的高水準。模擬甚至顯示若再增加背障層，如 AlInGaIn 與製作 local doping，以降低閘極寄生電容 (C_{gg})，甚至可將 $f_T/f_{\max}$ 推向更高的 300 GHz 以上。

2.4 基板與熱效應的處理

有研究指出：ScAlN/GaN HEMT 若使用高熱導性的基板，如 SiC，並輔以高散熱能力的介電層，如鑽石薄膜，將可維持元件工作於高頻而不虞發生自我加熱的現象，如 Nomoto 就報告了此元件可以獲得大於 4 A/mm 的輸出電流，且其 $f_T/f_{\max}$ 也高達 92.4/134.3 GHz，顯著改善元件的 RF 特性。

此外，另有報告也顯示了改善的成效，如 Chumbes⁽²¹⁾ 只單純降低了 AlGaIn/GaN 電晶體的接觸電阻 ($\sim 0.1 \Omega \cdot \text{mm}$)，就使元件傳送的功率大幅增加到 3.6 W/mm 以上，且在 94 GHz 時的 PAE 可達 24%，其表現較傳統的 AlGaIn/GaN 毫米波放大器更為優異。而 Krause et al. 則藉由改善磊晶品質以提升元件表現，更將可操作於 30 GHz 頻段的 ScAlN/GaN HEMTs 的傳送功率與效率推向 8.4 W/mm 與 48% PAE 之高，且 π PB 更高達 176.5 GHz·W/mm 的水準。綜合來看，可呈現最先進成果的 ScAlN/GaN HEMTs 其製作大都不脫上述的準則，如閘極工程，歐姆接觸與保護披覆製作等技術改善了元件的電子傳輸，功耗與寄生效應所致。

ScAlN/GaN HEMTs 與其他 GaN-基 HEMTs 的 RF 表現比較

如上述已知 ScAlN/GaN HEMT 具有優越的結構特性若再輔以優化的製程，預期表現應可超越傳統 GaN-基 HEMTs，但實情是這樣嗎？表 1 整理了近期相關元件典型 RF 特性研究的成果^(6, 9-12)。從表中可發現，ScAlN /GaN HEMT 因強烈的極化特性使其在導通電流以及輸出功率的表現較佳。但 g_m 卻無法承襲其擁有較大 I_D 的優勢而襄助增大電流增益，如 (式 2) 所示，表現與後者差異不大。

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2)$$

表 1. ScAlN/GaN HEMTs 與其他 GaN-基 HEMTs 典型 RF 表現比較。

RF 特性	ScAlN/GaN HEMT	GaN-基 HEMTs
$I_{d,max}$ (A/mm)	4.07 A/mm ($L_g = 90 \text{ nm}$, $L_{sd} = 600 \text{ nm}$)	$\sim 1.7\text{--}2.8 \text{ A/mm}$ (AlGaIn/InAlN HEMT) $\sim 2.6\text{--}2.8 \text{ A/mm}$ (InAlN/InAlGaIn HEMT)
g_m (S/mm)	0.50 S/mm ($V_{ds} = 5 \text{ V}$)	0.36–0.66 S/mm (AlGaIn/InAlN HEMT)
f_T / f_{MAX}	92.4 GHz / 134.3 GHz	f_T 達 250–450 GHz (AlGaIn/InAlN HEMTs) f_{MAX} 大於 300 GHz (最佳化設計 AlN/GaN)
BV	BV 為 78 V (當 $L_{gd} = 3.85 \mu\text{m}$) ; BV = 35.5 V (當 $L_{gd} \approx 455 \text{ nm}$) 其崩潰電場約為 0.2–0.78 MV/cm	最佳的 AlGaIn/AlN HEMTs 的崩潰電場可高於 2MV/cm，使其較同等 L_{gd} 的 ScAlN 元件擁有更大的 BV。

影響所及甚至使 RF 速度與耐壓能力落後後者。為何 ScAlN 不能憑藉其強烈的極化優勢而在 RF 的表現上全面領先呢？以下分析幾例具優異成果的 GaN-基 HEMT 研究探討其製作的關鍵：

1. 2019 年 A. Hickman 團隊發表了 AlN/GaN/AlN HEMTs 高崩潰電壓的成果，此元件的 L_{GD} 為 $04 \mu\text{m}$ 且無設計可分散電場的場板，但 BV_{DS} 卻可達 78 V，估計其 G-D 間的等效電場約 2 MV/cm。比之文獻中約當尺寸 ScAlN/GaN HEMTs，的 BV_{DS} 僅為 20–50 V，G-D 間等效電場也為較低的 1 MV/cm，顯見 Hickman 的元件耐高壓能力確遠高於他者⁽¹²⁾。探究 A. Hickman 的製程可發現幾項重要的關鍵，如 (1) Hickman 以 MBE 成長品質良好的

AlN、GaN 等磊晶膜，有效壓抑閘極與汲極導致的漏電流。(2) HEMT 結構中使用了不含 Sc 的 AlN 能障層免除了應力的困擾，也不會滋生 ScAlN 最被人詬病的「極化緩解」或由壓電相變成鐵電相的「鐵電不穩定」的可靠性問題。(3) AlN 生成的 2DEG 不像 ScAlN 那麼高，故電場分布較均勻不會聚集成熱點，降低了早發性崩潰的機會也有助 BV_{DS} 的提升。(4) S/D 區為 MBE regrowth 的 n^{++} -GaN 並以 Non-alloyed Ti/Au 作為金屬接觸，大幅降低了接觸電阻值。這些製程的改善可說是 BV_{DS} 提升的關鍵也不脫前述的準則。但另有一重點值得一提，即 Hickman et al，沒有製作 gate sidewall 的保護披覆，這一點被認為是 BV_{DS} 提升的關鍵，因為 gate sidewall 的損傷被認為是漏電流最主要的來源，也是 BV_{DS} 的最大殺手。而 Hickman 則透過元件結構設計與材料選擇的策略來消除這個難題。如：他們將閘極金屬直接鍍在 AlN 薄層上，如此就無須再以 ICP 作 gate recess 蝕刻，避免了 gate sidewalls 因高能電漿離子撞擊而受損傷。另又採用 AlN/GaN/AlN 量子井通道結構，使 GaN 通道電場垂直於 buffer 與 AlN，故電場不會在 Gate edge 或 sidewall 聚集避免了早發性崩潰的發生。但美中不足的是，gate edge 卻因極化不連續令電場較強，使耐壓能力降低。至於採用 AlN 也是一著好棋，因為其能隙值較 ScAlN 為大可承受近 2 MV/cm 的側向電場，又可以減少熱電子注入 sidewall 的機會，對 BV_{DS} 的提升大有幫助。綜合來說，Hickman 是以電場處理的方式取代困難的 sidewall 修護製程，使 BV_{DS} 提升，相較之下，ScAlN 能隙值較小，ScAlN/GaN 結構又需進行 Gate recess 蝕刻，但因 Sidewall 具高度敏感性常造成元件特性劣化的副作用，使得 ScAlN/GaN HEMT 典型的 RF 表現遜於 Hickman 的元件，顯然對於 ScAlN 材料本質的問題處理，製程設計恐需有新的思維。

2. 在提升 GaN HEMT RF 特性的研究，L. Li et al 展示了一項在 Si 基板上製作高性能 GaN HEMTs 的技術⁽⁹⁾。他們以 MOCVD 製作 InAlN/AlN/GaN 的 HEMTs 結構，因磊晶層品質良好使其 2DEG 高達 $2.27 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ，電子移動率也是優異的 $1430 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。Li 又將元件閘極長度 (Lg) 微縮至 55 nm，S-D 間隔 (L_{SD}) 為 175 nm，歐姆接觸以 MBE regrown 的 Si 摻雜 n^{++} GaN 製作，閘極則是 T 形的 Ni/Au 金屬閘，其元件結構及各相關參數詳如 (圖 1) 所示。此元件的 DC/RF 特性均甚優異，如 f_T/f_{MAX} 為 250/204 GHz，峰值轉導 $g_m = 0.66 \text{ S/mm}$ ，又 $I_{D,MAX} = 2.8 \text{ A/mm}$ ，且 $R_{ON} = 0.6 \Omega\cdot\text{mm}$ ，雖然其 RF 表現仍略遜於 SiC 元件，但已遠勝現有低於 150 GHz 的商用 GaN on Si 元件。據分析其關鍵為：(1) Li 以 MBE regrown 的 n^{++} GaN 製作 S/D 的歐姆接觸，將 Rc 大幅降至 $0.07 \Omega\text{mm}$ ，也使 2DEG 通道的 R_{SH} 減小為 $206 \Omega/\square$ ，有效降低了 gate 附近的 access resistance，並因該區域仍擁有相當濃度的 2DEG，得以保有較大的電流增益 g_m ，由 (式 2) 可看到 f_T 被大幅提升至 250 GHz 應是必然，因為 Rc 與 access resistance 的大幅減小，縮短了元件充電所需要的時間，故成為 f_T 提升的關鍵。(2) Li 以 EBL 製作 Ni (50 nm)/Au (240 nm) 的 T-gates；其為長 150 nm，頭部高 290 nm，寬 300–240 nm 的 T 形狀，由於 gates 長度縮短可減小閘極電阻 R_g 與閘極電容 C_{gs} ，此策略改善了功率增益，也將 f_{MAX} 提升至 204 GHz，這個結果對毫米波 PA 的應用非常重要。具估計此元件的 $(f_T \cdot f_{MAX})^{1/2} \approx 226 \text{ GHz}$ 應是目前 GaN-on-Si RF 元件中最佳的成果。顯然，超低的 regrown 歐姆接觸及不使用退火處理故無 alloy spiking 困擾的策略，使 2DEG 得以保持高密度也降低了 R_{sh} 等寄生效應，這個製程的突破應是 f_T 與 f_{MAX} 提升的關鍵，另微縮元件尺寸與 T-gates 結構，因減少了電子傳輸時間增強了高頻增益，也幫助了 RF 表現的提升。

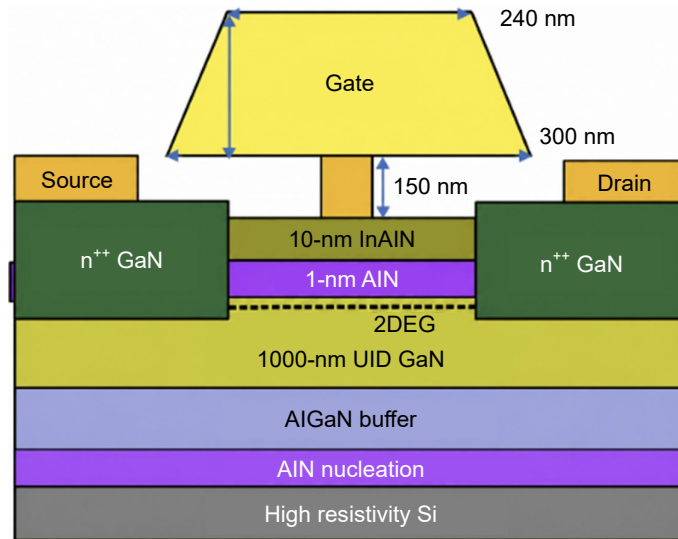


圖 1. InAlN/GaN HEMT 結構，本元件無使用 back barrier。⁽⁹⁾

惟此元件有一美中不足之處，就是其 f_{MAX}/f_T 比值僅 0.82，小於 1。一般而言元件若 f_{MAX} 大於 f_T ，即比值大於 1，表示通道電子的速度可完全轉換為有用的 RF 功率，這才具實用價值。而今 Li 元件的 f_{MAX}/f_T 小於 1，表示元件功率有耗損。據 G. Dambrine 所推導 FET 小信號等效電路中 f_{MAX} 與 f_T 的關係⁽¹³⁾，如 (式 3)，可知損耗的源頭應是來自寄生電阻 R_s 與 R_D 以及 G-D 間電容 C_{gd} 的影響，使 f_{MAX} 無法得利於本質載子的高傳播速度 f_T 而更為提升。顯然 Li 的 RF 元件仍需致力於元件寄生效應的改善。但整體而言，Li 的 GaN-基 HEMT 已有甚高的 f_T 與適當的 f_{MAX} ，且 gate 控制能力佳，雜訊參數也低，應適合 LNA 的應用。惟若要應用於功率放大器 (PA) 則仍需改善寄生效應以提升 f_{MAX} ，這將是其最主要的挑戰。Li 另由模擬發現，若無 regrown 歐姆接觸之助，則此元件的 f_T/f_{MAX} 將大降為 202/171 GHz，顯然接觸電阻的改善對 RF 特性的提升至關重要。另一應關注的重點是，此元件的 BV_{DS} 僅為 12 V，顯然元件在微縮尺寸時也不應忽略 SCE 的影響。

$$f_{MAX} \approx \frac{f_T}{\sqrt{R_G(R_S + R_D)C_{gd}}} \quad (3)$$

3. 一般在評估高頻元件特性時常著重於 f_{MAX} 與 f_T 這兩個參數的表現，而 f_T 通常表示通道電流對閘極電壓反應有多快，是元件本質速度的一個指標，至於 f_{MAX} 則為考慮所有寄生效應的損耗後元件可有效傳送功率增益的最高頻率，顯然它對外在寄生效應是很敏感的。由 (式 3) 可知 R_G 、 R_S 、 R_D 、 C_{gd} 都會影響 f_{MAX} ，而這些寄生效應都與製程相關，故優化製程應有助於其特性的提升。儘管前述 Li 以 MBE regrown 的 Si 摻雜 n^{++} GaN 作為 S/D 區的歐姆接觸改善了 R_C ，使高頻特性顯著提升，但其 f_{MAX}/f_T 比值為小於 1，顯示寄生效應仍嚴重影響著高頻響應。Yang 對此議題提出了解決的方法：他認為在 MBE 磊晶時以高濃度的 Si 進行摻雜時會衍生應力的麻煩，造成漏電流以致無法使 access resistance 更為降低，但如改為 Ge 的摻雜，因其活化程度較 Si 為高故能得到更高的電子濃度，且 Ge 在

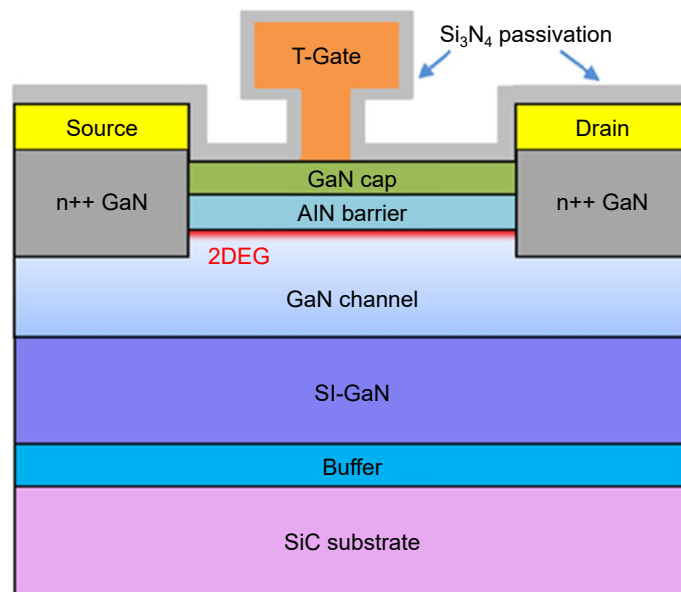


圖 2. AlN/GaN HEMT 結構，以 Ge-摻雜 n^{++} GaN 作為歐姆接觸。⁽⁶⁾

近 regrowth 的介面因應力較小故表面較平滑，缺陷也較少使電子傳輸會更理想，對降低 access resistance 更有效，因此他們在 SiC 上製作 AlN/GaN HEMTs 時遂改以重摻雜 Ge 的 GaN 為 S/D 的歐姆接觸，並將 AlN 能障層薄化至 3 nm 以強化對 2DEG 的侷限，以此策略將元件的 f_{MAX} 推進到超過 300 GHz 的水準，也得到比值大於 1 的 f_{MAX}/f_T 。他們的研究顯示了壓抑寄生效應對 RF 特性改善的重要。Yang 的元件結構 (圖 2) 與關鍵製程概述如下：AlN/GaN HEMT 製作時其 S/D 是以 MBE regrown 重摻雜 Ge 的 GaN 為歐姆接觸，由於磊晶膜品質良好使電子濃度達 $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ，故將接觸電阻 R_c 降低至 $0.09 \Omega \cdot \text{mm}$ 。量測此元件在閘極長 70 nm 時的 RF 響應，發現其 $I_{D,max}$ 為 1.54 A/mm，峰值轉導 g_m 約 0.74 S/mm， f_T/f_{MAX} 則達 140 / 301 GHz，且 off-state 的 BV_{DS} 亦為 80–120 V 之高水準表現。Yang 的元件有一個重要的成果，即 f_{MAX}/f_T 比為 2.15，這個 f_{MAX} 甚大於 f_T 的結果表示：即使元件操作於 f_T 以上時仍可傳送可用的增益，也就是說此元件不但可操作於毫米波段還可有效傳送 RF 功率，此一成果顯示了 AlN/GaN HEMT 作為毫米波功率 PA 的潛力。

分析 Yang 優異的 RF 成果可歸因於幾個因素：(1) 超高的 Ge 摻雜，高達 10^{20} cm^{-3} ，使歐姆接點具強烈的 tunneling 特質大幅降低 R_c 。(2) 薄化的 AlN 能障層有極強的靜電控制能力，除抑制了 drain-induced barrier lowering (DIBL) 避免 SCE 效應外，也能有效侷限 2DEG 使輸出電導 (output conductance) g_{ds} 減小 (即增大 R_{ds})，使輸出功率增大，這個策略的效果則以 f_{MAX} 的提升表現出來。(3) 在 HEMT 元件的特性中， g_m 可表為 (通道控制能力) / (漏電流) 之比，當 gate 控制通道的能力越好或汲極漏電流愈小都會令 g_m 愈高，但汲極漏電流與 g_{ds} 相關，將之代入 (式 3) 可以導出 f_{MAX} 正比於 $(g_m/g_{ds})^{1/2}$ 的關係。由前述 (1) 與 (2) 的分析，Yang 就是採用了超高的 Ge 摻雜將 g_m 增大再以薄化的 AlN 能障層來降低 g_{ds} ，在這雙重利基加持下果然將 f_{MAX} 推升到 301 GHz 的高水準。Yang 的研究提供了一個重要的概念：即設計 f_{MAX} 的提升時應著重改善 g_m 以及增強通道的控制能力以壓抑 g_{ds} 的影響。

前述介紹的 GaN-基 HEMTs 研究，可發現在不同能障層結構下，如 AlGaN、InAlN、AlN 等，只要適當設計製程都可改善其 RF 特性，然而這些材質各存在一些寄生效應限制著 GaN-基 HEMTs 提升特性的努力。惟若以 ScAlN 材料代之，藉其優異的極化特性能否產生

突破性的成果呢？以下介紹兩個 ScAlN HEMTs 的研究作為比較。

4. 2025 年，Nomoto et al. 成功的製作了可操作於毫米波頻帶並呈現極高電流密度的 AlScN/GaN HEMT 元件⁽¹⁰⁾。他們在 SiC 基板上以 PA-MBE 磊晶成長 2 nm 的 GaN cap，5 nm 的 $\text{Al}_{0.86}\text{Sc}_{0.14}\text{N}$ 能障層，2 nm 的 AlN spacer，1 μm 的 UID GaN 通道與 AlN 成核層 / SiC 等結構，得到 2DEG 為 $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ，且電子移動率 $494 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，顯示磊晶膜品質良好。接著製作 MBE regrown n^+ GaN 的 S/D (Si: $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)，將 Rc 降低至 $0.31 \Omega\cdot\text{mm}$ ，再經由 recess 製作了 90 nm 的超短 T-gate，再定義 Lsd 為 00 nm，並藉由縮短 access 區降低 R_{on} 以提升 Id，其元件結構如 (圖 3) 所示。這些精心設計的製程果然使該元件呈現良好的 DC/ RF 特性，如： $I_{\text{d,max}}$ 呈現了目前 AlScN HEMT 的最高紀錄， 4.07 A/mm ，另 R_{on} 為 $0.59 \Omega\cdot\text{mm}$ ， g_{m} 為 0.5 S/mm ， $f_{\text{T}}/f_{\text{MAX}}$ 則為 $92.4 / 134.3 \text{ GHz}$ ，且 BV_{DS} 也是良好的 $35-78 \text{ V}$ 。其中 f_{T} 顯示元件速度已可滿足毫米波頻帶且 RF 特性也不遜於前述 GaN-基元件。Nomoto 分析其原因為：(1) $\text{Sc}_{0.14}\text{Al}_{0.86}\text{N}$ 的組成與 GaN 晶格匹配介面缺陷少，且 $\text{Sc}_{0.14}\text{Al}_{0.86}\text{N}$ 的自發與壓電極化特性較 AlGaN 更大故可產生較高的 2DEG，雖然因散射作用限縮了 mobility，但仍產生高達 4 A/mm 的輸出電流，顯然 ScAlN 強烈的極化特性使元件呈現高電荷濃度驅動型的 HEMT。(2) 傳統 ScAlN 微縮 Lg 時須同時將厚度減薄，然而這卻令 gate 產生大量的漏電流，反觀 ScAlN 為高 κ 介質， $\kappa \approx 15$ ，即使將 $\text{Sc}_{0.14}\text{Al}_{0.86}\text{N}$ 薄化至 5 nm，仍可維持高電容有利於增加 C_{gs} ，且可支撐 90 nm 的閘極，這也是 $\text{Sc}_{0.14}\text{Al}_{0.86}\text{N}$ 材料的優勢使它得以操作於甚高 f_{T} 的原因。(3) Regrown 的歐姆接觸降低了 Rc，且縮短的 Lsd 也令 R_{on} 減小，這是 Id 甚高的主因。(4) 2 nm 的 AlN spacer 讓電子波函數遠離粗糙的界面，由於散射減少可將 g_{m} 維持在良好的 0.5 S/mm 。(5) T-gate 降低了 Rg 且縮短的 Lsd 也降低了 Rs，這些策略都有助於使 f_{MAX} 達到 134 GHz 且令 $f_{\text{MAX}} > f_{\text{T}}$ 。Nomoto 的成果首次證明了 AlScN 極化材料可以製作成兼具「超高電流密度」與「毫米波速度」的 RF 元件，也宣告了 ScAlN

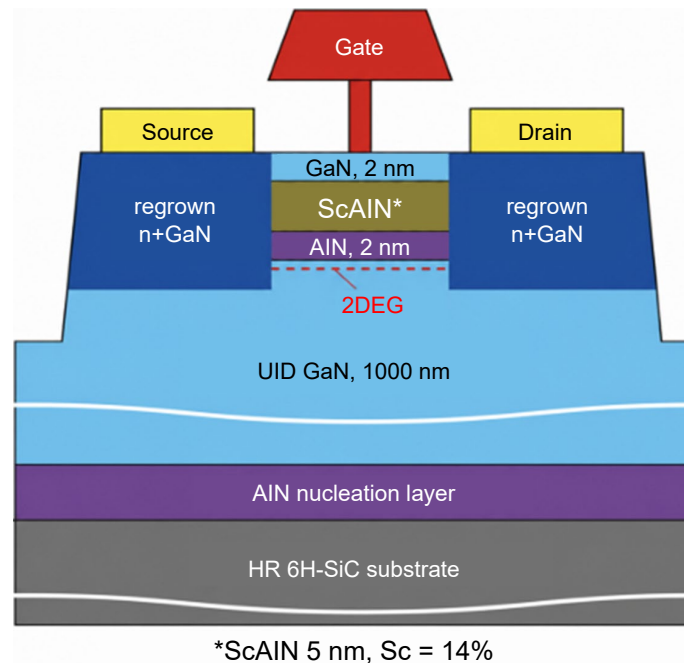


圖 3. ScAlN/GaN HEMT 結構，此元件的能障厚為 5 nm，並以 regrown 製作歐姆觸。⁽¹⁰⁾

HEMT 有潛力可取代 AlGaIn HEMT 實現 6G 與毫米波通訊的應用。

5. 儘管前述 Nomoto et al. 是利用 ScAlN 優勢的極化特性製作了良好表現的 RF 元件，但 Nguyen et al. 卻是以不同的策略，其不求取最大化的極化電荷，而是以良好的磊晶 (strain-balanced epitaxy)，微縮的 T-gates 與消除寄生效應的方法將 ScAlN/GaN HEMTs 由電流增益模式轉變為功率增益模式，使其達到 f_{MAX} 超過 f_T 的表現，此研究發表在 2024 的 IEDM 會議中⁽¹¹⁾。Nguyen 在報告中說明：所謂的 strain-balanced epitaxy 係以磊晶成長一種包含有 5 nm 的 $\text{Sc}_{0.13}\text{Al}_{0.87}\text{N}$ (其生成壓縮式應力) 的能障層與 1.5 nm 的 AlN interlayer (其生成伸張式應力) 的複合結構，此層磊晶膜因內部應力被平衡了故可消除磊晶時產生會損及電子運動或形成漏電路徑的缺陷，而且可確保 ScAlN 能障層保持有高度的極化，得以保有 $\sim 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的高密度 2DEG，這個高品質磊晶膜就是使 ScAlN/GaN HEMTs 元件達成高 RF 性能最重要的基礎。Nguyen 接著以 MBE regrown n^+ -GaN 製作 S/D 以降低 R_c 至 $0.09 \Omega \cdot \text{mm}$ ，又因無熱退火製程故減低了介面的粗糙程度。接著製作 40 nm 的 Ni/Au 金屬 T-gate，並以 ICP 蝕刻 GaN cap 與 AlScN 能障層以進行歐姆接觸區的 regrowth，由於 Regrowth 是在蝕刻區內進行，故避免了 ScAlN gate sidewall 受高能 ICP 離子損傷的困擾。其元件如 (圖 4) 所示。經量測元件特性結果為：當 L_g 從 800 nm 微縮至 40 nm 時， I_{max} 也從 1.9 A/mm 升高到 2.8 A/mm，且 g_m 也自 0.37 增加為 0.55 S/mm。甚至在 L_g 為 40 nm 時 f_{MAX}/f_T 更是達創紀錄的 321/173 GHz，比值為 1.85，表現在 f_T 達飽和時仍有功率持續供應 f_{MAX} 使其往上提升，如圖 4(b) 所示。Nguyen 利用小信號模型萃取參數來分析此一表現，發現此時元件的 $g_{m,\text{ext}}$ 為 0.4 S/mm， C_{gd} 與 R_{ds} 也各為超低的 8 fF/ μm 與 247 Ω 。據 Miller effect 指出 C_{gd} 會將輸出端汲極的信號耦合回輸入端的閘極，此一反向回饋作用會降低 f_{MAX} 以及功率增益，但 Nguyen 藉由微縮閘極的長度與 S/D 的間距並使用精密的微影技術製作 T-gate 將 G/D 重疊區縮小，大幅降低了 C_{gd} 的效應，減除了 Miller effect 的困擾，使元件的功率增益在 f_T 飽和之外的頻率仍可持續產生，呈現 $f_{\text{MAX}} > f_T$ 的表現，也確保此 ScAlN HEMTs 的毫米波 PA 可提供穩定的功率增益。

Nguyen 的 ScAlN/GaN HEMT 優異的 RF 特性可歸因於下列的製程：(1) 低 R_c 的 regrown 接觸技術：以 MBE regrown 的 n^+ -GaN 做為 S/D 的接觸，將 R_c 大幅降低至 $0.09 \Omega \cdot \text{mm}$ ，減低了導通電阻與 access 區的損耗使 f_{MAX} 可以提升，這是最關鍵的步驟。(2) 製作超短的 T-gate：以 EBL 將 T-gate 微縮至 40 nm，因 R_g 、 C_{gd} 等寄生效應被減小也使 f_{MAX} 得以提升。(3) 成長應力平衡結構將磊晶層的品質提升：成長應力平衡的 AlN 與 ScAlN 的複合結構，得到表面平滑且品質良好的磊晶膜又降低 ScAlN 能障層的厚度，使 2DEG 維持適當且移動率良好，除方便後續介質保護層的製作外，也有利提升 ScAlN HEMTs 的 RF 性能。

六、高性能 ScAlN/GaN HEMTs 的製作關鍵

由前述的探討可發現：ScAlN/GaN HEMT 的 RF 表現相較於 GaN-基 HEMT 無法呈現絕對的優勢竟然是因為 ScAlN 具有強大的極化場之故，因為極化作用雖然可產生高密度的 2DEG，但同時也增大了 C_{gs} 與 C_{gd} ，不利於提升 f_T 與 f_{MAX} 的表現。再者，高 Sc 含量的 ScAlN 磊晶膜長晶較難，品質不佳缺陷又多，甚至因介面極化太強會導致 band bending，使歐姆接觸難以優化。總之，ScAlN/GaN HEMT 是一種綜合了電性優勢和高頻劣化機制的材料系統，若欲強化其 RF 特性必須從材料源頭到製程全面考量才能畢其功。基於前人的經驗，以下幾點被認為是長晶的關鍵：

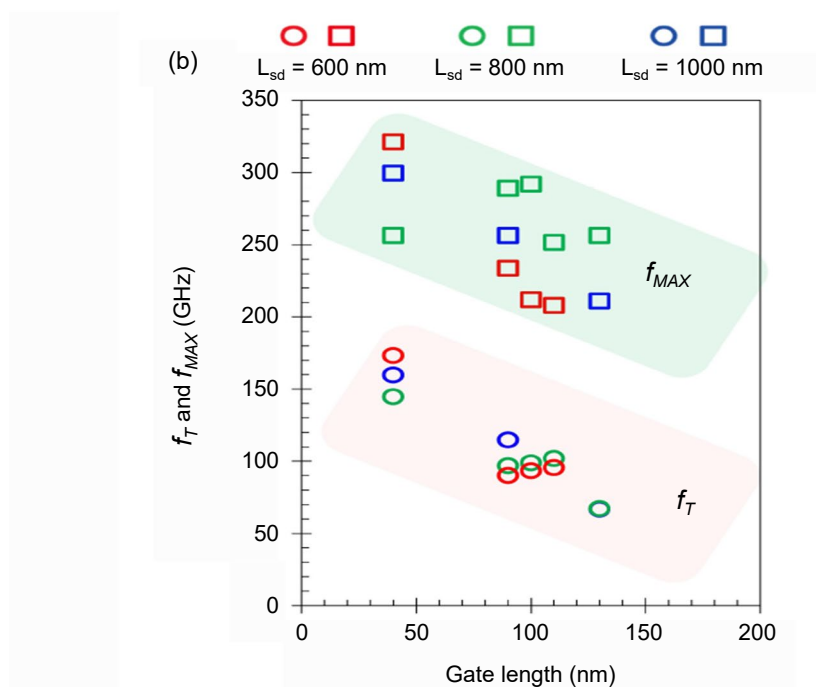
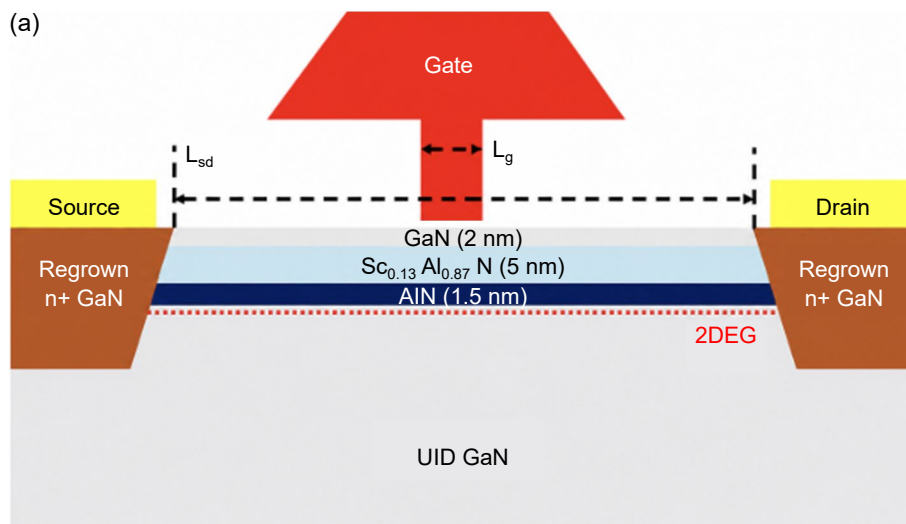


圖 4. (a) Strain-balanced ScAlN HEMT 的結構。(b) f_T 與 f_{MAX} 隨 L_g 的變化，可看到此元件在 T-gate 的 L_g 在小於 130 nm。時呈現 f_T 大於 80 GHz 且 f_{MAX} 高達 210 GHz 以上。⁽¹¹⁾

1. 高品質的 ScAlN 磊晶膜

目前 GaN-基 HEMT 的結構大都為 AlGaIn/AlN/GaN，其特性表現佳且技術已成熟，若欲以 ScAlN 取代 AlGaIn 擔任 HEMT 能障層的角色則 HEMT 的特性會有怎樣的變化呢？T. Okuda 對此作了詳細的探討⁽¹⁴⁾。他發現 ScAlN 層中 Sc 含量增加會改變 wurtzite 的結構，破壞磊晶膜結構的完整性，使 ScAlN 表面變為粗超。另外極化效應雖使 ScAlN 產生高密度的 2DEG 但因散射機率增大反而令移動率 (μ) 降低，劣化電性。進一步研究元件的表現，Okuda 發現，傳統 AlGaIn/GaN HEMTs 的 2DEG 雖較低，但因 μ 較高，故 RF 表現較好，反

觀成長了 ScAlN 能障的 HEMT 雖然有較高的 2DEG，但 RF 表現反而遜於前者，Okuda 認為原因是：ScAlN 極化的紅利被磊晶膜中的缺陷遮蔽了，使 μ 劣化且元件特性也變差。因此 Okuda 認為 ScAlN 磊晶品質對 HEMT 特性有絕對的影響，另外 HEMT 特性與 ScAlN 能障層相關的要求還有厚度，粗糙度，漏電流， μ 等多項，這些議題都與 AlScN 中 Sc 的含量有關，因此成長高品質的 ScAlN 磊晶膜的關鍵顯然就在 Sc 原子的處理。但 Sc 的處理有那些困難呢？

話說 ScAlN 的結晶相為 wurtzite，在熱力學上這是一種介穩態 (metastable)，不穩定又容易產生相分離，尤其在高 Sc 組成，如 Sc 大於 20–25% 時，結晶相會分離成 rocksalt ScN 與 wurtzite AlN 的複合結構，有時則是在 wurtzite 結晶中出現含 cubic 的內容物，這種結晶會影響 ScAlN 元件的最大極化能力，並生成大量漏電流且造成 trap-assisted tunneling 與 V_{th} dispersion 並影響 RF noise 等重要特性。甚且 Sc 的併入還會導致高密度點缺陷生成，使超薄 ScAlN 能障層 (小於 6 nm) 的 HEMT 會在 RF 的高電場操作時生成大量的 gate 漏電流並使元件的 BV_{DS} 降低，如前述 Nomoto et al. 的元件會受 G-D 間漏電流的影響使 BV_{DS} 不佳就是這個原因。因此目前 ScAlN 元件的製作大都建議以 10–18% 為限，取其可以有較佳結晶品質之故。因此成長高品質 ScAlN 磊晶膜的關鍵就在 Sc 原子的處理。下列摘錄了處理 Sc 原子的重點⁽¹⁵⁻¹⁷⁾：

- (1a) Sc adatoms (adsorbed atom) 對 ScAlN 膜的影響：在 ScAlN 成長時，若 Sc 原子過多形成 metal-rich 面時會使 Sc 傾向偏析而造成相分離，並因晶格受扭曲而產生缺陷與粗糙的表面，故一般都採 N-rich 的成長條件或以 pulsed MBE 法來激發 Sc adatoms 的活性，壓抑其偏析，使其能快速生成純相以改善結晶的品質。
- (1b) 精準控制 Sc adatoms：適當調控 V/III 比，即 N/(Sc + Al) 的流量比：如 (1a) 所述，過多的 Sc 會導致生成二次相劣化晶體品質。對此 Pulsed MBE 可以精準調控表面上 adatom 的數量，使其成長高品質的 ScAlN 晶體。另成長溫度與 原子流量的平衡也會影響磊晶表面的動力學反應與 adatom 的擴散，對於晶體維持 wurtzite 相的穩定與均勻甚為重要。惟要特別注意的是：控制 Sc adatoms 時仍須維持 N 原子流量的穩定以利 Sc 併入介穩態的 wurtzite 相。
- (1c) V/III 比為成長 ScAlN 晶體的重要參數：V/III 比，即 N / (Sc + Al)，增加可改善晶體品質使缺陷減少，反之，低 V/III 比，即 metal-rich 將造成粗糙的表面與相分離使晶體品質劣化。但最佳的 V/III 比卻與基板溫度與磊晶方式有關，原則上務必取得足夠的氮成分以穩定 wurtzite 的結晶，並允許適量的 Sc 與 Al 併入 ScAlN 晶體而仍不會造成晶相偏析。總之，精準控制 V/III 比是成長高品質 ScAlN 的不二法門，因為它會影響磊晶膜中缺陷的形成與結晶的品質，長晶時通常採用較高的 V/III 比值。

綜合言之：成長高品質 ScAlN 磊晶的關鍵為：需精準控制 N/(Sc + Al) 的比值，故在 MBE 系統中通常會採用較高的比值，亦即 N-rich 的狀況，因為表面動力學的研究顯示它可減少磊晶膜中缺陷的形成。此外介面應力的處理也很重要，因 ScAlN 具有較大的壓電係數會聚集很強的內應力導致其臨界厚度只約數個 nm，如 Sc ~ 15% 時就只有 5–8 nm，其對元件的影響就是造成閘極漏電流的增加，雖然如此但也不宜讓應力緩解，因為會使磊晶膜產生 crack 令元件在 RF 操作時雪崩式的失效，況且太薄的 ScAlN 也會使其 k 值降低，喪失其原本 high k 的優勢，導致 BV_{DS} 表現比 AlGaIn 更差，這些狀況都是 ScAlN 目前仍無法完全取代 AlGaIn 的最大瓶頸。因此欲製作高性能元件時對 ScAlN 能障層的要求需能達到下列目

標：(1) Sc 含量約介於 12–18%。(2) 厚度約 8–10 nm，但不能有緩解現象。(3) 介面粗糙度 RMS 需小於 0.5 nm。(4) 漏電流不可遜於 AlN 的水準。(5) 移動率需達 $1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上。(6) 於 RF bias 時不得有 V_{th} 調控飄移或產生操作模式變換的極化切換 (polarization switching) 現象。

另外，成長 ScAlN 的方法雖多但各都有其罩門，如：MBE (PA-MBE) 雖擅長於 Sc 量的控制且有陡峭的介面，但因成長溫度較低易生成大量的點缺陷，而 MOCVD 雖宜於量產，但 Sc precursor 的選用是其最大的挑戰，更會衍生磊晶膜形成相分離與 Sc 分布不均勻的困擾，至於 Sputtering 則是難以達成元件品質的要求，因此可說目前並無「完美」的 ScAlN 磊晶成長法。但不論採用哪種成長技術都需謹記各種技術的瓶頸對元件特性的影響，如結晶相穩定與元件的 Sc 含量及極化特性有關，臨界厚度與元件的能障層厚度有關，界面粗糙度與元件的移動率和 f_T 有關，缺陷分布與元件的漏電流以及 BV_{DS} 相關，ScAlN 的介電損 (κ loss) 則與 g_m 與漏電流等有關。

2. 介面與接點技術

如前所述，介面問題起因於 Sc 併入 AlN 的晶體會導致結晶整體性破壞，劣化晶面的平滑度使 μ 降低限制了 f_T 的提升，也增大 RF 的雜訊，故 ScAlN/GaN 的表面及介面的改善是製作高性能 HEMT 的首要關鍵，而前面我們已詳述 ScAlN 長晶的重點，遵其方法應有助於介面平整問題的改善。

但介面的議題除平整度的要求外，HEMTs 元件的接點技術也很重要，因為 GaN 與 ScAlN 都是寬能隙的材料，而寬能隙常導致高 Schottky 能障，使歐姆接觸 (ohmic contact) 製作困難，若不處以重摻雜或介面修飾將難以達到 low specific contact resistivity (ρ_s) 的要求，也會使元件因工作於高 R_{on} 而造成高損耗。對元件的影響則是：未最佳化的 source/drain (S/D) 歐姆接觸會降低 HEMT 的輸出電流，限制高頻表現 (f_T , f_{MAX})，影響元件的效率與功率承受能力。尤其 ScAlN 能障層又具有很強的極化特性與甚高的 2DEG 密度，若 R_{on} 太大對其電流的表現將非常不利。至於在 Schottky 接觸造成的困擾則是影響閘極的控制，無法抑制 gate/drain 漏電流並劣化 BV 的表現。因此介面接點技術也是製作高性能 ScAlN HEMT 的重要關鍵。而相關的處理策略有：

(a) ScAlN 元件歐姆電阻的製作：一般 HEMTs 歐姆接點的傳統製法為鍍上金屬疊層 Ti/Al/Ni/Au 然後再以 RTA 熱處理，由於這方法需要較高的退火溫度 ($\geq 800^\circ\text{C}$) 故常造成緩衝層的劣化使可靠性變差，而且因金／半介面不平整也無法使 Rc 值大幅降低，限制了功率傳輸的效率。因此近期有文獻提出結合 Recess 與 Regrown n^+ GaN 的複合技術來製作歐姆接點，由於 Recess 縮短了金屬接點到 2DEG 的穿隧 (tunneling) 距離，又配合了在 S/D 的接點區以 MBE 或 MOCVD regrow 重摻雜的 n^+ GaN (or InGaN) 磊晶膜，因 regrown 區的歐姆接觸沒有經過退火處理 (non-alloyed) 因此介面會較平整，有效降低了 effective Schottky 能障令 Rc 大幅降低，這方法倍受肯定，有研究甚至以 Ge 取代 Si 作為重摻雜 n^+ 的雜質，藉由 Ge 摻雜在 regrown 區產生的壓縮應力 (相對於 Si 摻雜的張應力) 使 regrown GaN 磊晶膜更為平整晶膜缺陷減少，使 Rc 值更為降低，元件 RF 特性更佳。另為因應製作超薄 ScAlN barriers HEMT 時由於 ScAlN 薄化衍生的表面缺陷與粗糙性會影響接點電性，有文獻提出以 Tailored patterning 法來縮短 tunneling 的路徑以降低 Rc。總之，降低 Rc 的關鍵就在：儘量提高介面處的摻雜濃度並藉由 recess 及 regrown 法來降低接點／介

面能障的影響，以提高 thermionic emission (TE) 的效率。另有研究建議：製作陡峭的介面並減小 ScAlN 與 GaN 間應力，也能降低歐姆電阻⁽¹⁸⁾。

(b) 金屬閘 / ScAlN 元件 Schottky 接觸的製作：閘極漏電流是 HEMT 操作時最棘手的問題，因為它會使閘極的 AC 信號被分流 (shunt) 而降低 g_m ，也會消耗 AC 功率而損及電流增益，限制了 f_T 的提升。而且閘極功率被消耗也會造成 f_{MAX} 變差，甚至因功率損耗大使元件發熱觸發了增益壓縮 (gain compression) 提早發生，線性 (IP3) 因而變差，顯然閘極漏電流造成的麻煩還真多。那閘極漏電流的來源是什麼呢？有研究指出其主要來自：能障層中的缺陷密度，Dit，太高造成 trap-assisted tunneling (TAT)，以及閘極端點的電場太大造成 F-N 穿隧效應 (Fowler-Nordheim tunneling)，抑或因 barrier lowering 形成 poole-frenkel emission (P-F) 等因素。據觀察金屬閘 / ScAlN HEMT 的表現。發現 ScAlN 的能障 (Φ_B) 會因極化作用而受到調整 ($\Delta\Phi_{polarization}$)，可表為 $\Phi_{B,eff} = \Phi_B - \Delta\Phi_{polarization}$ ，顯然極化作用會使 Schottky 能障 (Φ_B) 降低同時窄化能障寬度，這效應增大了電子穿隧能障層的機會，令閘極漏電流大幅增加，而且強極化會使電場聚集在閘極端點 (gate edge)，使其也成為漏電流的熱點。再加上 ScAlN 特殊的材料因素，如 Sc 的併入使晶體致生各種缺陷，也形成了 tunneling 或 shunt 的路徑，造成其漏電流硬是較 AlGaIn 增大許多，這些亂象顯示了 ScAlN 能障層正是閘極漏電流的源頭，但必須強調：ScAlN 的漏電流太大並不是其材質不夠絕緣，而是極化作用造成電場分布失控再加上結晶缺陷雪上加霜地助長了穿隧漏電流所致，所以解決的關鍵不在更換閘極金屬材料，而是需要重塑能障層的能帶與電場的分佈。就此項金屬閘 / ScAlN HEMT 挑戰的解決文獻建議的 SOP 為：(1) 表面處理：ScAlN 因表面缺陷較 AlGaIn 更多，更活性也更容易氧化，故清潔處理程序不可少，須先以低損傷方式，如稀釋的 HF 或低功率的 ICP 清潔表面後立刻進行 *in-situ* 金屬蒸鍍。(2) 選擇適當的金屬：由於 ScAlN 介面缺陷特多，故需選擇不會與 Sc 或 Al 反應的金屬以免介面形成穿隧路徑，較佳的選擇有 Ni/Au 或 Pt/Au 等。(3) 最關鍵的 gate edge 電場重分布處理：由於 ScAlN 的強極化使其側向電場甚大於垂直方向使 gate edge 成為漏電流的熱點，解決的方法有：製作 T-gate，並插入高品質的閘極介質，如 Al_2O_3 (ALD) 或 *in-situ* 的 SiN，作為表面與 Sidewall 的保護披覆，以降低介面缺陷密度 Dit，接著製作閘極場板 (field plate) 以分散側向電場。(4) 控制閘極 recess 處理：以低功率的 ICP 處理 Schottky gate 以免造成電漿離子損傷衍生大量的缺陷，劣化 Schottky 的品質。據查經由上述步驟製成的元件目前較先進的成果已可將金屬閘 / ScAlN HEMT 的閘極漏電流壓低到 $10^{-6} - 10^{-7}$ A/mm，雖已較前改善惜仍未達 pico 安培等級⁽¹⁹⁾，而且漏電流還會隨偏壓增加而放大，顯然 ScAlN 強極化特性的陰影猶揮之不去。

(c) MIS 閘 / ScAlN 元件 Schottky 接觸的製作：基於金屬閘 / ScAlN 元件對閘極漏電流的改善有限，近年來高性能 ScAlN HEMT 的研究幾乎都改採 MIS 閘的結構，希望能更有效抑制閘極漏電流，提供更穩定的 RF 操作，如 f_T 與 f_{MAX} 等。至於閘極絕緣層的材料許多文獻都選用 Al_2O_3 /SiN 以有效阻斷電子的直接穿隧，之後輔以低能量的 ICP 蝕刻，然後進行 *In-situ* 的披覆保護以避免表面氧化，有些研究更加上 Recessed gate 的製程以調節能障層的厚度。這些製程確可將閘極漏電流抑至 $10^{-7} - 10^{-9}$ A/mm，但美中不足的是 f_T 僅達 50–55 GHz， f_{MAX} 也只有 70–75 GHz⁽²⁰⁾，顯然仍次於先進的金屬閘 / ScAlN HEMT 的表現，其在金屬微縮後典型的 RF 特性為 f_T 可達 80–110 GHz， f_{MAX} 甚至大於 100 GHz 的表現。分析原因可能與 ScAlN 介電材料的厚度以及介面品質不佳有關，影響 g_m 所致，

因為 MIS 閘會衍生寄生電容，如 C_{gs} ， C_{gd} ，由 (式 2) 可知其將劣化 f_T 的表現。然值得慶幸的是：閘極漏電流， I_g ，已可改善至 $10^{-7} - 10^{-9}$ A/mm，這優異的特性提供了 MIS 閘元件更大的電壓操作窗口，因為在高 V_{gs} 操作時低 I_g 可允許較大的 RF swing，因此提升了崩潰電壓的 margin，也可提供較穩定的 DC 工作點，又因為輸出功率是正比於 V_{swing} 的平方，所以可預期也將提供更高的輸出功率以及良好的線性度，讓 MIS 閘 / ScAlN HEMT 成為實用的毫米波功率放大器。惟目前 MIS 閘 ScAlN HEMT 的研究仍有限，難以論其功過，若欲確認其 RF 表現及應用的潛力仍需面對多項的挑戰。

- (d) ScAlN HEMT 製程的 ICP 技術：介面議題的解方猶須 ICP 技術的襄助。如前述，ScAlN HEMT 的閘極漏電流可藉 MIS 閘結構降低，但 MIS 結構會衍生較大的寄生電容 C_{gs} 反使 f_T 降低，這個 tradeoff 的結果正點出了 ScAlN HEMT 製程的一個關鍵，而其鎖鑰就在 ICP 技術。話說，在 ScAlN HEMT 製程中 ICP 不只做為尺寸的控制，也有調控側壁電場與管理陷阱源頭的任務。但須注意的是 ICP 蝕刻的物理行為會受 ScAlN 的影響而改變。下述說明其影響：(1) 在 AlGaIn HEMT 製程 ICP 多半作為圖形定義，但在 ScAlN 的製程它會直接影響漏電流、 f_{MAX} 與 current collapse 等特性，因為在 sidewall 蝕刻過程 ICP 角度的控制會改變閘極端電場分布的狀況，如 ICP 損傷層的厚度會影響 TAT 漏電流，ICP 造成的表面粗糙度會成為 FN tunneling 的熱點，甚至 ICP 殘留的氯化物也會成為表面漏電流的路徑，因此 ICP 在處理 ScAlN sidewall 時若控制不當將成為 HEMT 元件漏電流的禍首。(2) 藉由 ICP 對 sidewall 側壁角度的控制可決定閘極端的電場分布，如側壁形貌為垂直狀時會使場線集中造成漏電流增加，若改以微斜角如 $70 - 80^\circ$ 時場線會分散使漏電流減少，又若處以圓角 (rounded foot) 則電場的熱點可被移除。但須注意的是 ScAlN 極化特強對側壁角度頗為超敏感，故 ICP 控制處理時需仔細小心。(3) 以 ICP 製造平滑的側壁再加上適度的 recess 形貌，將可降低 Gate-to-Drain 的邊緣波動程度使 C_{gd} 減小，使 f_{MAX} 的表現提升，這個訣竅在 ScAlN 製程中特別重要，因為如前述 ScAlN 元件的 RF 特性常受累於偏大的 C_{gd} 使其難以提升。(4) ICP 中高能的離子會在 ScAlN 表面產生 N 空缺或 Sc 相關的缺陷，這些都將形成 TAT hopping center，故抑制之道就在控制 ICP 的能量以減輕電漿造成的損傷。(5) ICP 可使側壁平滑完整覆蓋 SiN/Al₂O₃ 保護層，改善其貼合度並阻斷表面漏電路徑。(6) 不同於 AlGaIn，ScAlN 會強烈影響 ICP 的蝕刻行為，因為 ScAlN 的 ICP 反應材料為 ScCl_x，其揮發性低容易在表面殘留非揮發性的化合物使表面粗糙度增加也降低了後續的蝕刻速率，故為加速蝕刻需得更提高離子能量但這又增加了元件受損的風險。(7) ScAlN 的 ICP 製程秘訣為：ICP 宜採低功率以減少物理傷害，並採用適當的氣體。總之，在 ScAlN/GaN HEMTs 的製程中以 ICP 蝕刻閘極不只是定義其幾何形狀，也擔負著需降低 sidewall 缺陷的生成與調節閘極端電場分布的重責大任，但因 ScAlN 會影響 ICP 蝕刻的動力行為 (etch kinetics) 使其表面損傷與粗糙程度較 AlGaIn。更為惡化，由於 sidewall 的損傷會增加元件的 C_{gd} ，閘極漏電流等特性，也增大了 RF loss，使 ScAlN/GaN HEMTs 的表現劣化，這些都是應用 ICP 時須特別注意的關鍵。

3. 高性能 ScAlN/GaN HEMTs 的製作設計

如前述，ScAlN 強烈的極化特性可將 2DEG 推到極高的境界使其大於 $2 - 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ，提供元件甚大的輸出電流，這是其傲視其他材料的優勢，但這些電子並非全為「free」態，可貢獻於 f_T 的電子數其實是有限的，且強烈的 optical phonon 散射效應也會造成電子早發性

的速度飽和，甚且極化衍生的閘極電容等寄生效應，如 C_{gs} ， C_{gd} 等，也因偏高而不利於 f_T 的提升，顯然，ScAlN 強極化的優勢雖能載舟但也會覆舟，反而成為 RF 表現提升的障礙。另 ScAlN 材料又因化學特性極為不穩，合金化的接點製作容易劣化，Regrown 製作也不簡單，這些因素都令其歐姆接觸電阻偏高不下，也阻礙其可呈現高性能 HEMT 的期待。但據前述諸多研究的分析發現：接觸電阻的良窳對 ScAlN 元件 RF 表現的影響是遠大於極化的利益，所以在製作高 RF 性能的 ScAlN/GaN HEMTs 時若設計一道能「取其極化之利並去其弊」的製程就非常關鍵了，而且視 RF 應用不同，製程策略也應不同。

以低雜訊放大器 (LNA) 的製作而言，由於此 ScAlN HEMT 將應用於高速傳輸與需具備大頻寬的 5G FR2，(24.25 GHz-71 GHz)，毫米波系統以及 77–110 GHz 頻段等雷達與衛星前端的電路系統，故製作策略應為：將 ScAlN 元件推到以極化驅動的高密度與高速通道的境界將 f_T 大幅提升。但因電子的傳播行為會影響毫米波元件的 RF 表現，所以要使 ScAlN 元件的 f_T 表現優於 AlGaIn/GaN 的關鍵就在「極化工程」的設計，即藉由摻入 Sc 以增大 ScAlN 的極化作用使 2DEG 密度增加，再利用此超高極化電荷的優勢調變介面量子井使其變為更深、更陡的三角量子井，以提升通道電子的侷限能力。由 (式 1) 可看到 g_m 因 2DEG 的密度增加使分布變得更尖銳 (sharp peak)，而 g_m 極大值的出現意謂著 ScAlN 元件的 f_T 可被大幅提升。由於 f_T 表示元件可放大電流的能力，而此表現的 ScAlN HEMT 具備了高 g_m ，因而適合製作用於雷達與衛星前端電路系統的 LNA。

另就毫米波 / THz 功率放大器 (PA) 的製造，ScAlN HEMT 有個很重要的優勢，即在 f_T 達飽和後，其 f_{MAX} 仍可持續放大，由於 f_{MAX} 表示元件「可輸出功率增益」的最高頻率，故 ScAlN/GaN HEMT 這種甚高且穩定的 f_{MAX} 表現很適宜作為 5G 基地台，mmWave backhaul，衛星 uplink 與雷達發射端等尖端系統所需的 PA。又因 PA 的要求為高輸出阻抗，低 R_g 與大於 1 的 Mason's Unilateral power gain (Mason U) 使其可以提供穩定的淨功率增益，而這些要求都將影響 f_{MAX} 的表現。由前述的分析可知 ScAlN 元件 RF 特性的挑戰主要來自 C_{gd} 與 R_g 所主導的 Miller feedback 與損耗，而不是 g_m ，所以製作 ScAlN HEMT PA 的關鍵就在：讓有超高的極化特性的 ScAlN 產生高密度的 2DEG 以降低通道電阻提升 g_m 之後，再將結構優化，即利用電場重分布技術輔以阻抗工程技術，使 gate-channel 電容 (C_{gs})，gate 電阻 (R_g) 以及 feedback 電容 (C_{gd}) 等得以降低，並使場型集中於 gate-edge 使輸出阻抗 r_o 增大，並製作 T-gate 減小 R_g 以及利用 regrown contact 優化歐姆接觸與 access 區的電阻 (即 R_s 與 R_d)，由於上述製程可將造成損耗的寄生效應大致消除，則依 Mason U 係正比於 $(gain)^2 / (loss) (feedback)$ 的關係，U 值將可穩定維持在大於 1 的狀態。再由 (式 3) 可知 f_{MAX} 也將提升。前述 Nguyen 的元件就是依此策略使 f_T 飽和後， f_{MAX} 仍可持續提升，並將 f_{MAX} / f_T 推升到創紀錄的 321/ 173 GHz。惟這些方法都是針對製程考量，但已知 ScAlN 元件的 RF 特性會受其本質極化效應的限制而有天花板的極限其這缺憾是無法以製程消除的，況且 ScAlN 有些製程技術也尚未成熟，因此面對提升 ScAlN/GaN HEMTs 性能的挑戰猶須以更更新的思維來考量，如適當控制極化效應但不能犧牲元件特性等方向。

GaN-基 HEMT 另有一關鍵技術就是場板 (field plate) 的設計，其目的為分散 gate edge 的電場，降低電荷捕獲，提高耐壓能力 V_{bd} ，與改善訊號的線性度。常見的設計為 gate field plate，它的優點在於可減少電流崩潰並提升 V_{bd} ，缺點則為使 C_{gd} 增加並降低 f_T 。另一種設計則為 source field plate，其優點為可抑制電荷捕獲效應衍生的 knee walkout 現象並改善功率附加效率 (PAE)，至於最佳的方案則為。Dual field plate，它擁有較高的 PAE 與 V_{bd} 且可接受的 f_T 。當然上述各種製作方案也得面對處理 ScAlN 超強的極化特性的挑戰。

七、結論

近年來有關 ScAlN 的研究都認為其材料特性較 AlGaIn 有更多的優點，有取而代之的潛力。然而在評比兩者的 RF 表現時卻發現 ScAlN HEMT 在一些重要特性上，如 f_T 與 f_{MAX} ，仍遠遜於其他的 GaN-基元件，其原因可能是前者尚未建立如後者般成熟的技術，若改善製程應可迎頭趕上，故本文探討了現有 GaN-基元件先進 RF 表現的製作細節，並盤點製作高性能 ScAlN/GaN HEMTs 的幾點關鍵技術，如：(1) ScAlN 磊晶膜的成長。(2) 接點技術與 gate 漏電流的抑制。(3) ScAlN/GaN 元件的製作設計策略，期能助於提升 ScAlN 元件特性。惟觀察近期 ScAlN 的研究，其 HEMT 特性雖已獲得部分改善，但仍有缺憾，如元件的 mobility 偏低，gate 漏電流太大限制了 f_T 的提升，介質介面有加速型 TDDDB 的劣化。而且元件的 V_{th} 有飄移現象，這些困擾都成為 ScAlN/GaN 元件發展的隱憂。研究發現這些困擾的源頭就在 ScAlN 引以為傲的本質極化特性，它使 ScAlN/GaN HEMT 的 RF 的表現罩上一個天花板的限制，這個本質的問題令 ScAlN 元件的製作面臨了一個非製程可解決的挑戰。

考量到水能載舟也能覆舟，因此製作高性能 ScAlN HEMT 時不能只單純的更換能障層材料而應以的新思維，如善加利用極化特性，發展電場重分布技術與阻抗工程技術，將之與元件結構、寄生效應等參數耦合考量，使 ScAlN/GaN HEMT 達到以極化驅動的高密度高速通道的狀態來提升 f_T ，這個策略將適於 LNA 的製作。惟若耦合效果是使元件達到高輸出阻抗、低通道電阻的境界，且可令 Mason U 穩定維持大於 1 使得以持續產生功率增益的狀態，則將讓 f_T 由速度主導，而 f_{MAX} 則由阻抗與寄生效應主導，呈現最理想的毫米波放大器特性，這個策略則是製作 ScAlN/GaN HEMT PA 的關鍵。總之，ScAlN 具備相當的製作彈性，這是它可應用於下世代尖端高頻高性能電子系統的最大優勢。

當然 RF 應用所需的特性除 f_T 與 f_{MAX} 外還有：PAE (power added efficiency)，Pout、Gain、Linearity 與 Breakdown/reliability 等重點，但其改善策略則和 f_T 、 f_{MAX} 不同。尤其目前文獻大都認為 gate leakage、dynamic R_{ds} 與 thermal reliability 三者是 ScAlN 元件開發的瓶頸，ScAlN/GaN HEMT 欲成為毫米波 PA 的核心技術需同時滿足 f_T 大於 200 GHz， f_{MAX} 大於 300 GHz 與 PAE 大於 70% 的要求，然達成這個目標的障礙就在極化特性的處理，顯然 ScAlN 元件的研發不能只單純的視其為較強的 AlGaIn，而須嚴肅看待極化特性對其元件表現的影響。

參考資料

1. J. Wuerf et al., *Microelectronics Reliability*, **51**, 1710 (2011).
2. 洪茂峰, 科儀新知, 245期, 12月, 79 (2025).
3. Peng Cui and Yuping Zeng, *Scientific Reports*, **12**, 16683, (2022).
4. Shiming Li et al., *Nanomaterials*, **15** (24), 1882 (2025).
5. Wang et al., *Chinese Physics B*, **29** (2), 027301(2020).
6. Liuyun Yang, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **5** (9), 4786 (2023).
7. J. Cheng et al., *IEEE Electron Device Letters*, **42** (8), 1132 (2021).
8. S.Krause et al., *IEEE Electron Device Letters*, **44** (1), 17 (2023).
9. Lei Li et al., *IEEE Electron Device Letters*, **41** (5), 689 (2020).
10. K. Nomoto et al., *Applied Physics Express*, **18**, 016506 (2025).
11. Thai-Son Nguyen, K. Nomoto, Wenwen Zhao, Chandrashekhar Savant, 2024 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), December 7-11 (2024).
12. A. Hickman et al., *IEEE Electron Device Letters*, **40** (8), 1293 (2019).

13. Dambrine *et al.*, *IEEE Transactions on Microwave*, **36** (7), 1151 (1988).
14. Okuda *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **126**, 052105 (2025).
15. Casamento *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 152901 (2022).
16. Žukauskaitė *et al.*, *Acta Materialia*, **94**, 101 (2015).
17. A.Tomita *et al.*, *Scientific Reports*, **13**, 3308 (2023).
18. Isabel Streicher *et al.*, *Advanced Functional Materials*, **34** (39), (2024).
19. Jiangnan Liu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **126** (25), 253505 (2025).
20. Su, Chin-Ya *et al.*, 2024 International VLSI Symposium on Technology, Systems and Applications (VLSI TSA), April 22-25, (2024).
21. Chumbes *et al.*, *IEEE EDL* 20, **12**, 630 (1999).

作者簡介

洪茂峰先生為成大電機博士，現任職成大電機系兼任教授。

Mau-Phon Houng received his Ph.D. in EE from NCKU, Tainan, Taiwan. He is currently a Adjunct professor of Dept. of EE, NCKU.