

利用非真空噴霧式化學氣相沉積法製作具有 δ -摻雜通道之 β -氧化鎵金屬—氧化物—半導體場效應電晶體

Fabrication of β -Ga₂O₃ Metal-oxide-semiconductor Field-effect Transistors with δ -doped Channel via Non-vacuum Mist Chemical Vapor Deposition

洪皓君、劉漢胤、許渭州

Hao-Chun Hung, Han-Yin Liu, Wei-Chou Hsu

本研究利用非真空製程的噴霧式化學氣相沉積 (mist chemical vapor deposition, Mist-CVD) 技術，於 c 面藍寶石基板上異質磊晶生長單晶 β -氧化鎵 (β -Ga₂O₃)，並首次導入錫 (Sn) δ 摻雜技術製作金氧半場效應電晶體 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)。所製備之 Sn δ 摻雜 β -Ga₂O₃ MOSFET 展現優異性能，包括最大汲極電流 2.38 mA/mm、閾值電壓 -8.1 V、次臨界擺幅 394.5 mV/dec、特徵導通電阻 1.49 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、關態崩潰電壓 1270 V，並具備功率性能指標 (power figure of merit, PFOM) 1.08 MW/cm²。透過 X 光繞射 (X-ray diffractometer, XRD)、二次離子質譜儀 (secondary ion mass spectrometer, SIMS)、電壓—電容分析 (capacitance-voltage, C-V) 與電性分析證實，本研究不僅實現了高品質 Sn δ 摻雜層之異質磊晶結構，亦展示噴霧式 CVD 於高功率 β -Ga₂O₃ 元件開發之潛力。

This study demonstrates, for the first time, the successful integration of tin (Sn) δ -doping into the channel layer of β -Ga₂O₃ metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) using a non-vacuum mist chemical vapor deposition (Mist CVD) technique. The fabricated Sn δ -doped β -Ga₂O₃ MOSFET exhibited excellent characteristics, including a maximum drain current of 2.38 mA/mm, a threshold voltage of -8.1 V, a subthreshold swing of 394.5 mV/dec, a specific on-resistance of 1.49 $\Omega\cdot\text{cm}^2$, and an off-state breakdown voltage of 1270 V, corresponding to a power figure of merit (PFOM) of 1.08 MW/cm². Comprehensive material and electrical analyses, including XRD, SIMS, and CV measurements, confirm the successful realization of a high-quality δ -doped heteroepitaxial structure. These results highlight the potential of Mist CVD as a cost-effective and scalable method for developing high-performance β -Ga₂O₃ power devices.

一、研究背景介紹

噴霧熱解 (spray pyrolysis) 是一種經濟又實惠的製備方法。與溶膠－凝膠法類似，其具有前驅物為水溶液的特性且不需要在真空環境下進行操作，透過利用金屬鹽類 (硝酸鹽、醋酸鹽、氯化物) 溶解於溶劑 (如水與有機溶液) 調製而成。在準備好前驅物溶液後，即透過霧化裝置形成微小霧滴，並透過載流氣體輸送至基板表面。理想情況下，微小霧滴在快要到加熱的基板前會經過的蒸散溶劑、縮小、聚合、裂解為氣相態的過程，並於加熱的基板表面進行化學氣相沉積金屬氧化物或其他化合物的固態薄膜，最終抽風設備將副產物排出，由於這個過程也牽涉到化學氣相沉積，因此這個技術也被稱作噴霧式化學氣相沉積。

其中根據霧化裝置又能分為三種，分別是氣動式霧化裝置、靜電式霧化裝置以及超音波霧化裝置。本研究所採用的是超音波霧化裝置，裝置示意圖如圖 1，利用超音波震盪器 (2.4 MHz)，以水與 PP 膜作為介質，將超音波傳遞至震盪腔體中的前驅物溶液，此時在液體表面將會受到劇烈震動產生具有孔洞的微氣泡，最終因氣泡內外壓力差而導致氣泡破裂產生衝擊波並形成細小霧滴，如圖 2。

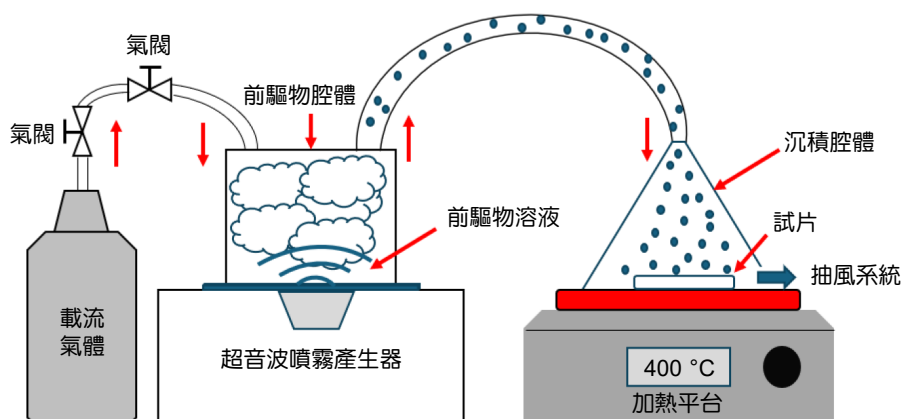


圖 1. 超音波霧化裝置示意圖。

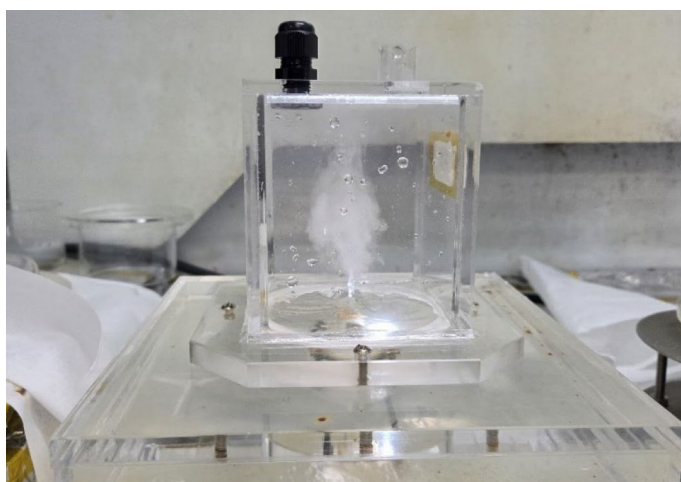


圖 2. 透過超音波震盪器形成的小霧滴示意圖。

目前已經有許多研究團隊開始探討使用噴霧式化學氣相沉積法磊晶成長氧化鎵，其中日本的 FLOSFIA 公司也使用這個方法成長氧化鎵磊晶膜，並開始有相關的商品。氧化鎵 (Ga_2O_3) 作為第四代功率半導體，具有相當多的同素異形體，其中 β 相的氧化鎵具有以下幾個優點：(1) 可以使用熔融法大量生產高品質及大尺寸的 β -氧化鎵基板⁽¹⁾；(2) β -氧化鎵具有超寬能隙 (4.5–4.9 eV) 使其具有約 8 MV/cm 的高臨界電場⁽²⁾，使其功率性能指標達到 Si 的 3000 倍，也是 GaN 與 SiC 的數倍；(3) 具有相對成熟的磊晶及元件製造技術。

近期的文獻表示，無論是在同質磊晶還是異質磊晶基板上， β -氧化鎵電晶體最常見的摻雜技術為均勻的原位摻雜^(3, 4)。為了實現高輸出電流及低特徵導通電阻，在通道層使用更高的摻雜濃度與較厚的通道層厚度將導致閾值電負移和次臨界擺幅劣化。與均勻原位摻雜相比， δ 摻雜所形成的位能井結構能夠提供高電子濃度極高電子移動率的效果，且電子的分布集中於位能井附近，從而降低漏電流的生成，提高元件的崩潰電壓⁽⁵⁾。

目前已經有利用 δ 摻雜技術實現氧化鎵功率元件，如 Krishnamoorthy 等人⁽⁶⁾ 利用電漿輔助分子束磊晶法在鐵摻雜的氧化鎵基板上製備了矽 δ 摻雜的 MOSFET 元件。這個元件具有多層矽 δ 摻雜歐姆接觸 (Ohmic contact) 和溝槽閘極設計，表現出 $2.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的高電子濃度、 $4.3 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$ 的低接觸電阻率和 236 mA/mm 的高輸出電流。但開關電流比僅有 10^3 左右，崩潰電壓也僅達到 51 V。Xia 等人⁽⁷⁾ 同樣採用分子束磊晶法在鐵摻雜的氧化鎵基板上製作了單層矽 δ 摻雜 MOSFET 元件。包括使用再生長的歐姆接觸，用於進一步降低特徵接觸電阻。這樣的 MOSFET 元件表現出 $9.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的電子密度、 $0.1 \Omega\text{-mm}$ 的優異接觸電阻、140 mA/mm 的輸出電流、閾值電壓約為 -3.5 V、開/關電流比為 10^5 以及 170 V 崩潰電壓。在 Xia 等人的研究基礎上，Joishi 等人⁽⁸⁾ 增加了場板，並使用相對較低的電漿功率進行溝槽結構蝕刻製程。他們採用 600 °C 的真空退火來避免額外的元件損壞，這使得崩潰電壓增加到 300 V，功率性能指標達到 118 MW/cm²。

然而，前面提到的 δ 摻雜元件都是在同質磊晶基板上進行研究的。由於氧化鎵在功率元件應用中面臨了包括基板成本高和熱管理問題的挑戰，因此異質磊晶研究仍然是必要的。 β -氧化鎵的磊晶生長可以透過多種磊晶技術實現，例如分子束磊晶⁽⁹⁾、金屬有機化學氣相沉積⁽¹⁰⁾、鹵化物氣相磊晶⁽¹¹⁾ 和噴霧式化學氣相沉積⁽¹²⁾。與基於昂貴真空設備的分子束磊晶、金屬有機化學氣相沉積及鹵化物氣相磊晶等方法相比，噴霧式化學氣相沉積具有非真空性質，設備成本低、製程時間較短、前驅物溶液可調性高等獨特優勢，成為材料研究的一種有用的方法。Xu 等人⁽¹⁴⁾ 是第一個利用噴霧式化學氣相沉積製備 β -氧化鎵異質磊晶 MOSFET 的團隊。該團隊採用氮化鎵緩衝層在藍寶石基板上使晶格失配度降低為 4.7%，獲得了優異的元件特性^(13, 14)，並證明了非真空製程的可能性。然而，該團隊採用原位摻雜技術，導致元件的閾值電壓值較負。

在本研究中，我們首次使用非真空的噴霧式化學氣相沉積技術，在 c 面藍寶石上異質磊晶生長單晶 β -氧化鎵，同時採用了錫 δ 摻雜技術，展示了空乏型 MOSFET。最終，本實驗所完成的 β -氧化鎵 MOSFET 經錫 δ 摻雜其輸出電流為 2.38 mA/mm、閾值電壓為 -8.1 V、次臨界擺幅為 394.5 mV/dec，崩潰電壓超過 1200 V。

二、材料成長與元件製作

圖 3 為本研究製備的錫 δ 摻雜 β -氧化鎵 MOSFET 的結構示意圖。利用噴霧式化學氣相沉積技術達成在 c 面藍寶石基板上異質磊晶生長 β -氧化鎵、錫 δ 摻雜層和氧化鋁介電層薄膜⁽¹⁵⁾。

1. 將 0.02 M 乙醯丙酮鎂溶於含 1% 鹽酸的去離子水中，得到前驅物溶液，以製備未摻雜一氧化鎂緩衝層和蓋層。
2. 將 0.02 M 四氯化錫五水合物溶於含有 1% 鹽酸 和 3% 過氧化氫的去離子水中，製成前驅物溶液，用於製備錫 δ 摻雜層。
3. 將 0.025 M 乙醯丙酮鋁溶於甲醇中，以作為氧化鋁介電層的前驅物溶液。

3 μm 2 μm 10 μm

鈦/金 鎳/金 鈦/金

50 nm 628 μm

氧化鋁 (介電層)

50 nm

未摻雜 β -氧化鎵 (蓋層)

150 nm

未摻雜 β -氧化鎵 (緩衝層)

C-藍寶石基板

錫 δ -摻雜

在噴霧式化學氣相沉積法的磊晶生長過程中，首先將基板加熱到 700 °C。啟動振盪器將未摻雜－氧化鎵前驅物溶液霧化，以氮氣作為載流氣體，流速為 4.5 L/min 的推進至磊晶腔體。在生長約 150 nm 厚的未摻雜－氧化鎵緩衝層後，關閉未摻雜－氧化鎵源。接下來啟動錫 δ 摻雜溶液的振盪器對前驅物溶液進行霧化，同樣以氮氣為載流氣體，流速為 4.5 L/min。將基板暴露在錫 δ 摻雜的霧氣中 80 秒。隨後，關閉錫 δ 摻雜源，重新開啟未摻雜－氧化鎵源，生長 50 nm 厚的未摻雜－氧化鎵覆蓋層。最後讓基板自然冷卻至室溫，完成磊晶生長過程。磊晶時序圖如圖 4 所示。

26 科儀新知 244 期 114.9

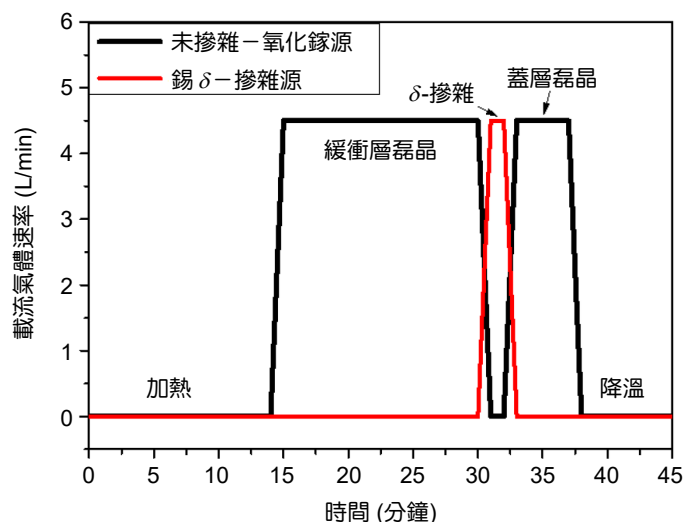


圖 4. 未摻雜-氧化鎵和錫 δ 摻雜層的磊晶生長時序圖。

本研究將透過 X 光繞射獲得了未摻雜 β -氧化鎵和錫 δ 摻雜 β -氧化鎵的結晶狀態。透過二次離子質譜儀分析並確認了錫摻雜的分佈。以及進一步利用電容-電壓量測驗證載子分佈。在本研究中使用 Agilent 4156B 半導體參數分析儀進行電性測試，並使用 B1505A 分析儀測量崩潰特性。

三、結果與討論

圖 5(a) 顯示了使用噴霧式化學氣相沉積法在 700°C 下生長的未摻雜-氧化鎵緩衝層和具有未摻雜-氧化鎵蓋層/錫 δ 摻雜層/未摻雜-氧化鎵緩衝層的完整磊晶結構所獲得的 XRD 圖案。兩個樣品均在 2θ 約 18.9° 、 38.4° 、 59.1° 處出現明顯的 $(\bar{2}01)$ 、 $(\bar{4}02)$ 、 $(\bar{6}03)$ 繞射峰，根據 JCPDF 卡號 01-087-1901⁽¹⁶⁾ 可知，這兩個樣品的結晶相均可判定為 β 相氧化鎵的單晶結構。如圖 5(b) 和圖 5(c) 所示，兩層磊晶膜之 $(\bar{2}01)$ 峰的搖擺曲線 (Rocking curve) 全峰半高寬 (FWHM) 分別為 0.87° 和 0.64° 。與其他磊晶技術相比，採用噴霧式化學氣相沉積磊晶生長的單晶 β -氧化鎵薄膜也表現出了優異的結晶品質⁽¹⁷⁻¹⁹⁾。

圖 6 是透過二次離子質譜儀分析獲得的鎵與錫的分佈。在距 β -氧化鎵蓋層表面約 52 nm 處可見錫的最高峰，其全峰半高寬約為 20 nm。擴散距離呈現非對稱高斯分佈，這是由於錫摻雜與蓋層磊晶均在高溫下進行所致。然而，二次離子質譜儀結果顯示，錫的分佈仍呈現高斯分佈。未來我們計劃調整蓋層磊晶和 δ 摻雜過程中的溫度來抑制錫的擴散。然而，在錫 δ 摻雜 β -氧化鎵同質磊晶薄膜的生長中未發現錫的表面偏析效應⁽²⁰⁾。由於在局部和高濃度摻雜方面的成功，因此 δ 摻雜在噴霧式化學氣相沉積技術中被認為是可行的。

圖 7 顯示了電容-電壓 (C-V) 曲線，其中插圖顯示了深度與載子濃度的關係曲線。金-氧-半元件是在二次離子質譜儀分析的相同磊晶結構上製作的。此元件具有厚度約 50 nm 的氧化鋁介電層，分別以鎳/金和鈦/金作為陽極和陰極。電容-電壓測量的頻率為 1 MHz。電容-電壓曲線顯示載子累增從 -20 V 開始，在 0 V 之後急劇增加，這可能是由於較薄的通道使閘極金屬更容易空乏通道。為了得到深度與載子濃度分佈的圖，我們參考了

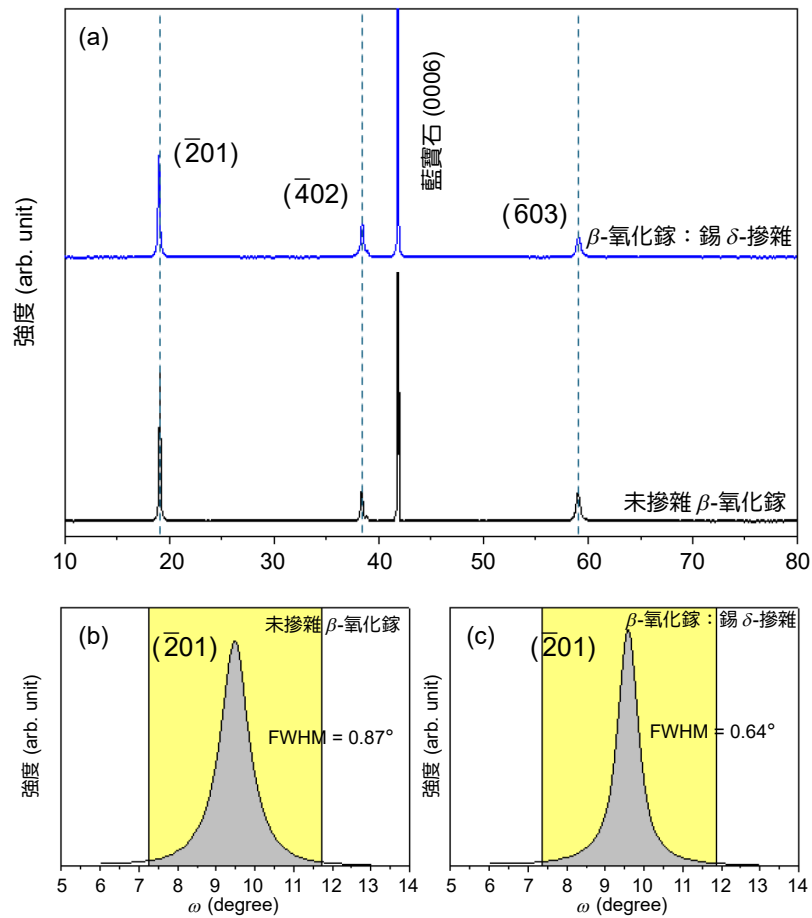


圖 5. (a) 未摻雜-氧化鎵和錫 δ 摻雜氧化鎵薄膜的 X 光繞射圖案。(b) 未摻雜-氧化鎵和 (c) 錫 δ 摻雜氧化鎵的 $(\bar{2}01)$ 之搖擺曲線全峰半高寬。

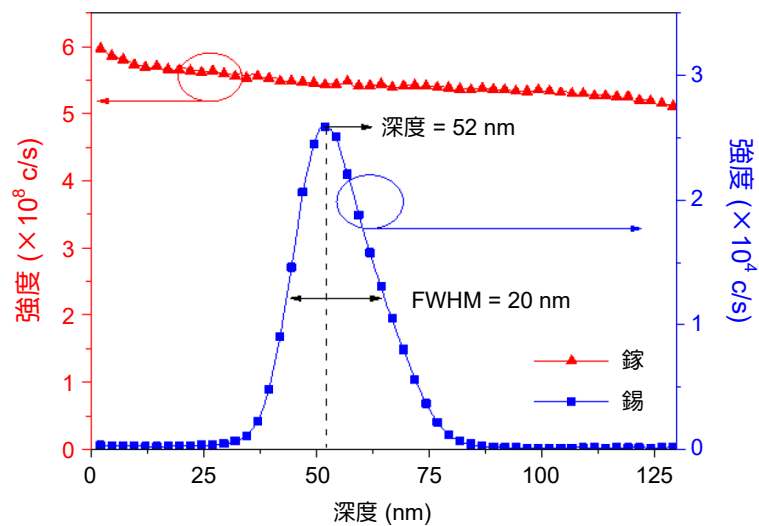


圖 6. 使用噴霧式化學氣相沉積在 700°C 下生長的 β -氧化鎵蓋層／錫 δ 摻雜層／ β -氧化鎵緩衝層所獲得的錫的二次離子質譜縱深分析。

(21)，使用了公式 (1)：

$$n(W) = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 \left(\frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dV} \right)} \quad (1)$$

其中， n 表示電子濃度， W 表示空乏區深度， q 表示電子電荷量， ϵ_s 表示相對介電常數， ϵ_0 表示真空介電常數， A 表示電極面積。利用公式 (1) 可以得到電子濃度與電容的關係。

$$W = \frac{\epsilon_s\epsilon_0 A}{c} \quad (2)$$

利用公式 (2) 可以得到空乏區深度和電容的關係。最後，結合兩個公式，我們可以繪製深度與載子濃度的曲線。在圖 7 的插圖中，觀察到載子濃度最高的區域距離表面約 97.8 nm。扣除 50 nm 介電層後，此深度與二次離子質譜儀之分析結果大致相符。其中，載子濃度最高約為 $2.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，隨著與表面距離的增加而急劇下降，證明了 δ 摻雜元件的預期特性。

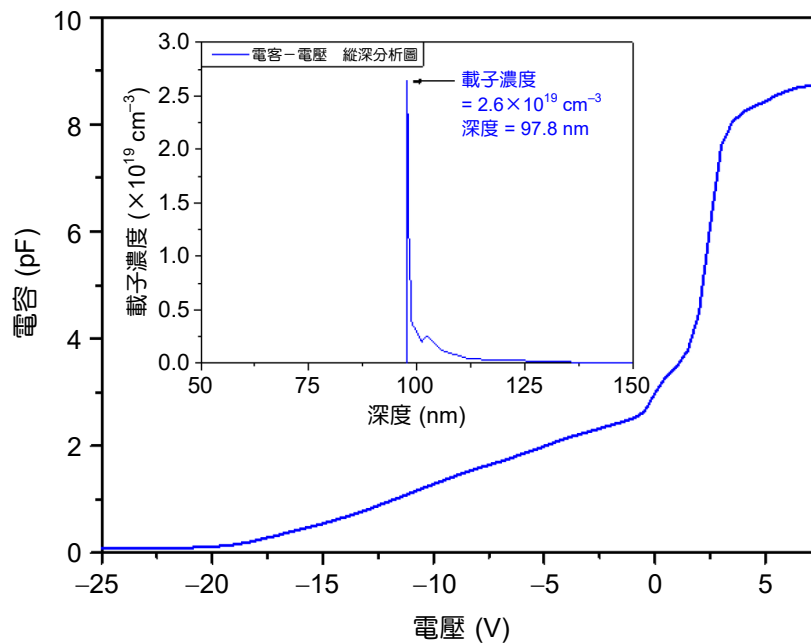


圖 7. 金-氧-半元件結構的電容-電壓曲線和深度與載子濃度分佈圖 (插圖)。

圖 8(a) 顯示了錫 δ 摻雜 β -氧化鋁 MOSFET 的汲極電流-汲極電壓輸出特性，參數設定為閘極電壓設定為 -20 至 12 V (間距為 2 V) 和汲極電壓壓設定為 0 至 20 V (間距為 0.1 V)。在低汲極偏壓下，元件觀察到很少的蕭特基偏移 (Schottky offset) 特性，呈現了成功的

歐姆接觸，這表明源／汲極後退火的成功。表現出的電性之最大汲極輸出電流（閘極偏壓為 12 V 時），為 2.38 mA/mm，低的特徵導通電阻 ($R_{on, sp}$)，為 $1.49 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。其中特徵導通電阻使用公式 (3) 計算：

$$R_{on, sp} = R_{on} \times W_G \times L_{SD} \quad (3)$$

錫 δ 摻雜 β -氧化鎵 MOSFET 的汲極電流－閘極電壓轉移特性如圖 8(b) 所示，其中汲極電壓保持在 20 V，閘極電壓設定從 -12 V 掃描至 12 V（間格為 0.1 V）。實驗結果表明，其開關電流為 1.95×10^8 ，次臨界擺幅為 394.5 mV/dec，閾值電壓為 -8.1 V。

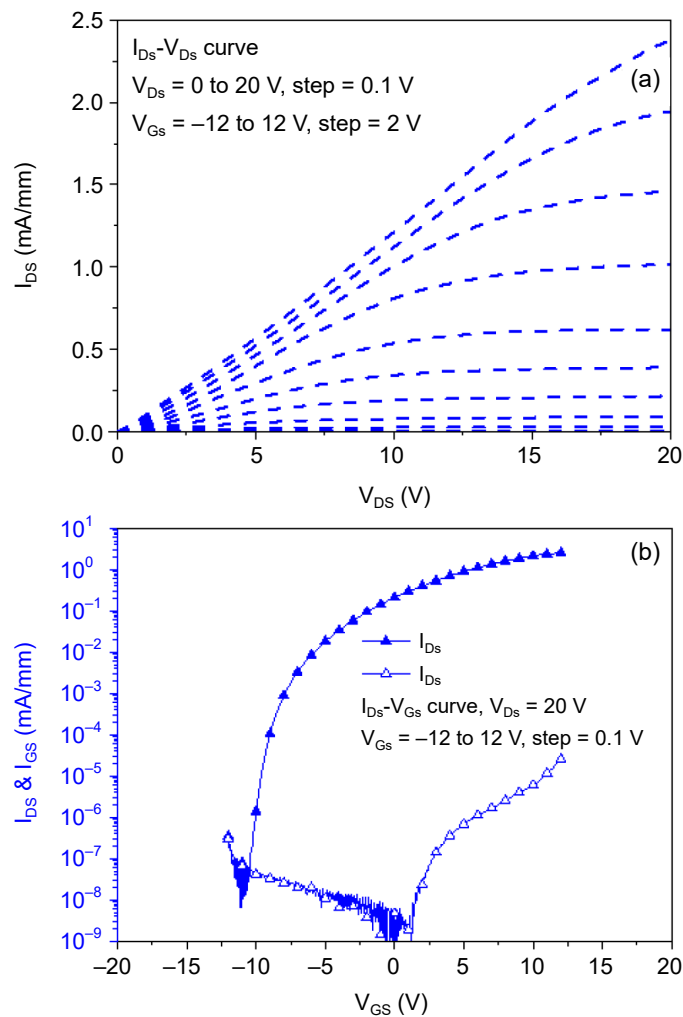


圖 8. 本文所提出的氧化鎵 MOSFET 的電性。(a) 汲極電流－汲極電壓輸出特性。(b) 汲極電流－閘極電壓傳輸特性。

為了探討目前錫 δ 摻雜 β -氧化鎵基板的特性，我們也使用霍爾測量系統分析了載子濃度以及其霍爾遷移率。根據霍爾測量結果，該基板之載子濃度為 $4.34 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，霍爾遷移率為 $4.07 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，該載子濃度與電容－電壓縱深分析所獲得之數值接近。

此外，我們分析了錫 δ 摻雜 β -氧化鋁 MOSFET 的關態崩潰電壓，如圖 9 所示，實現了 1270 V 的崩潰電壓。其中的功率性能指標為 1.08 MW/cm^2 ，功率性能指標為公式 (4) 計算得出：

$$PFOM = \frac{V_{br}^2}{R_{on, sp}} \quad (4)$$

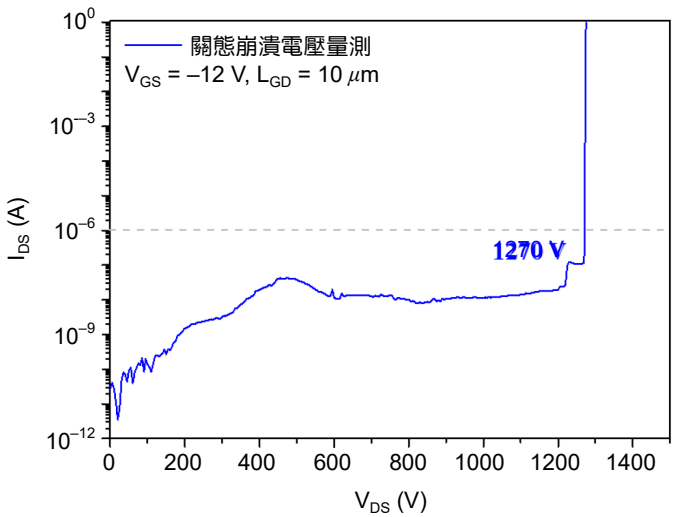


圖 9. 關態崩潰電壓分析。

表 1 總結了本研究提出的錫 δ 摻雜 β -氧化鋁 MOSFET 的實驗結果與最近文獻進行比較。Jeong 等人利用鹵化物氣相沉積技術進行 β -氧化鋁薄膜的異質磊晶生長。除了矽摻雜外，他們還採用低能四氟化碳電漿注入氟離子來增強薄膜的導電性⁽²²⁾。Xu 等人採用噴霧式化學氣相沉積和氮化鋁緩衝層製作氧化鋁 MOSFET⁽¹⁴⁾。Ngo 等人成功利用金屬有機化學氣相沉積技術和正矽酸乙酯 (TEOS) 進行原位矽摻雜，實現了高達 $3.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的載子濃度

表 1. 本文所提出的 Sn δ 摻雜 β -Ga₂O₃ MOSFET 以及最近文獻中電性進行比較。

方法	閾值電壓 (V)	最大汲極電流 (mA/mm)	開關電流比 (A/A)	特徵導通電阻 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	崩潰電壓 (V)	文獻
脈衝雷射沉積	-3.8	0.0025	1.2×10^5	38	85	(25)
金屬有機化學氣相沉積	-0.4	0.14	$\sim 10^6$	13.8	650	(24)
金屬有機化學氣相沉積	-8.1	0.044	$\sim 10^4$	N/A	487	(23)
氟電漿 鹵化物氣相沉積	-17.7	0.095	$\sim 10^6$	82.53	155	(22)
氮化鋁緩衝層噴霧式化學氣相沉積	-14.0	0.12	10^5	N/A	1220	(14)
錫 δ -摻雜噴霧式化學氣相沉積	-8.1	2.38	1.95×10^8	1.49	1270	本文

(23)。Lu 等人在 c 面藍寶石上蝕刻金屬有機化學氣相沉積技術生長的 β -氧化鎵通道。表 1 中的參考元件為蝕刻之前的元件(24)。Khandelwal 等人採用脈衝雷射沉積技術和閘極溝槽蝕刻在藍寶石上成功製作了空乏型和增強型 β -氧化鎵 MOSFET。他們透過結合空乏型和增強型裝置實現了 NMOS 積體電路(25)。可以觀察到，在相似的閾值電壓下，本研究採用噴霧式化學氣相沉積製備的 Sn δ 摻雜 β -氧化鎵 MOSFET 表現出最高的汲極電流和最佳的開關電流比。此外，它還顯示出特徵導通電阻的優勢。本研究提出的元件具有優異的電性，證實了使用噴霧式化學氣相沉積技術可以實現高品質的單晶 β -氧化鎵和錫 δ 摻雜層。

四、結論

我們首次成功展示了基於噴霧式化學氣相沉積生長的錫 δ 摻雜 β -氧化鎵的磊晶基板。並透過利用半導體製程技術將該基板轉化為高性能 MOSFET 元件。利用 X 光繞射儀、二次離子質譜儀、電壓－電容分析和電性分析來確認晶體的品質、錫 δ 摻雜的狀況。所製備的 β -氧化鎵 MOSFET 經錫 δ 摻雜 80 秒表現出優異的性能，其中閾值電壓為 -8.1 V ，最大汲極電流為 2.38 mA/mm ，次臨界擺幅為 394.5 mV/dec ，特徵導通電阻為 $1.49\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，關態崩潰電壓為 1270 V ，且功率性能指標為 1.08 MW/cm^2 ，推測我們所提出的錫 δ 摻雜 β -氧化鎵 金氧半場效電晶體有潛力促進 β -氧化鎵功率元件的應用。

參考文獻

1. A. Karjalainen, I. Makkonen, J. Etula, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, and F. Tuomisto, *Applied Physics Letters*, **118** (7), (2021).
2. and Y. S. Rim, *Materials Today Physics*, **27**, (2022).
3. J. H. Park, R. McClintock, A. Jaud, A. Dehzangi, and M. Razeghi, *Applied Physics Express*, **12** (9), (2019).
4. A. Hernandez, M. M. Islam, P. Saddatkia, C. Coddling, P. Dulal, S. Agarwal, A. Janover, S. Novak, M. B. Huang, T. Dang, M. Snure, and F. A. Selim, *Results in Physics*, **25**, (2021).
5. E. F. Schubert, *Journal of Vacuum Science & Technology a-Vacuum Surfaces and Films*, **8** (3), 2980 (1990).
6. S. Krishnamoorthy, Z. B. Xia, S. Bajaj, M. Brenner, and S. Rajan, *Applied Physics Express*, **10** (5), (2017).
7. Z. B. Xia, C. Joishi, S. Krishnamoorthy, S. Bajaj, Y. W. Zhang, M. Brenner, S. Lodha, and S. Rajan, *IEEE Electron Device Letters*, **39** (4), 568 (2018).
8. C. Joishi, Z. B. Xia, J. S. Jamison, S. H. Sohel, R. C. Myers, S. Lodha, and S. Rajan, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **67** (11), 4813 (2020).
9. P. Mazzolini, A. Falkenstein, C. Wouters, R. Schewski, T. Markut, Z. Galazka, M. Martin, M. Albrecht, and O. Bierwagen, *APL Materials*, **8** (1), (2020).
10. D. Gogova, G. Wagner, M. Baldini, M. Schmidbauer, K. Irmischer, R. Schewski, Z. Galazka, M. Albrecht, and R. Fornari, *Journal of Crystal Growth*, **401**, 665 (2014).
11. T. Oshima, and Y. Oshima, *Applied Physics Express*, **15** (7), (2022).
12. H. Nishinaka, T. Nagaoka, Y. Kajita, and M. Yoshimoto, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **128**, (2021).
13. M. M. Muhammed, M. Peres, Y. Yamashita, Y. Morishima, S. Sato, N. Franco, K. Lorenz, A. Kuramata, and I. S. Roqan, *Applied Physics Letters*, **105** (4), (2014).
14. Y. Xu, C. F. Zhang, P. R. Yan, Z. Li, Z. Q. Feng, Y. C. Zhang, D. Z. Chen, W. D. Zhu, Q. Feng, S. R. Xu, J. C. Zhang, and Y. Hao, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **69** (3), 1196 (2022).
15. H. C. Hung, H. C. Chang, F. Y. Chang, H. Y. Liu, and W. C. Hsu, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **71** (3) 1913 (2024).
16. R. H. Horng, D. S. Wu, P. L. Liu, A. Sood, F. G. Tarntair, Y. H. Chen, S. J. Pratap, and C. L. Hsiao, *Materials Today Advances*, **16**, (2022).
17. Z. Wu, Y. F. Wang, Y. H. Song, S. H. Fu, W. Z. Cui, C. Gao, D. Y. Xia, Y. R. Han, B. S. Li, A. D. Shen, and Y. C. Liu, *Journal of Alloys and Compounds*, **1005**, 176156, (2024).

18. C. Wang, S. W. Li, W. H. Fan, Y. C. Zhang, X. Y. Zhang, R. R. Guo, H. J. Lin, S. Y. Lien, and W. Z. Zhu, *Ceramics International*, **47** (21), 29748 (2021).
19. V. Patil, B. T. Lee, and S. H. Jeong, *Journal of Alloys and Compounds*, 894, (2022).
20. K. Sasaki, S. Yamakoshi, and A. Kuramata, "Gallium oxide: materials properties, crystal growth, and devices," Springer Series in Materials Science, 293. Springer, Cham, pp. 123-140. (2020).
21. Y. Jia, K. Zeng, J. S. Wallace, J. A. Gardella, and U. Singisetti, *Applied Physics Letters*, **106** (10), (2015).
22. Y. J. Jeong, J. Y. Yang, C. H. Lee, R. Park, G. Lee, R. B. K. Chung, and G. Yoo, *Applied Surface Science*, **558**, (2021).
23. S. Ngo, C. H. Lu, F. G. Tarntair, S. T. Chung, T. L. Wu, and R. H. Horng, *Discover Nano*, **18** (1), (2023).
24. C. H. Lu, F. G. Tarntair, Y. C. Kao, N. Tumilty, J. M. Shieh, S. H. Hsu, C. L. Hsiao, and R. H. Horng, *Discover Nano*, **18** (1), (2023).
25. V. Khandelwal, S. Yuvaraja, G. I. M. Garcia, C. J. Wang, Y. Lu, F. AlQatari, and X. H. Li, *Applied Physics Letters*, **122** (14), (2023).

作者簡介

洪皓君先生現為國立成功大學微電子所博士生。

Hao-Chun Hung is currently a Ph.D. student at the Institute of Microelectronics of National Cheng Kung University.

劉漢胤先生為國立成功大學微電子所博士，現為國立中山大學電機系副教授。

Han-Yin Liu received his Ph.D. at the Institute of Microelectronics from National Cheng Kung University. He is currently an Associate Professor in the Department of Electrical Engineering at National Sun Yat-Sen University.

許渭州先生為國立成功大電機所博士，現為國立成功大學智慧半導體及永續製造學院副院長。

Wei-Chou Hsu received his Ph.D. in Electrical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Vice Dean in the Academy of Innovative Semiconductor and Sustainable Manufacturing at National Cheng Kung University.