

逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：

金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

Research on Oxide-Dielectric GaN / AlGaN MOS-HFET

作者：李昆諺、詹信衡、邱文傑、王鈞毅、卓裕翔

系級：電子工程學系

學號：D0281261、D0281214、D0241581、D0241605、D0281333

開課老師：李景松

課程名稱：化合物半導體元件

開課系所：電子工程學系

開課學年：105 學年度 第一學期



摘要

本次專題藉由超音波霧化熱裂解沉積研製具有氧化鎂閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵/氮化鎵金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體。由於利用超音波霧化熱裂解沉積高介電常數氧化鎂當閘極介電層，因而增強閘極絕緣能力與表面鈍化效果，進而有效地降低閘極漏電流。

經由製程最佳化條件下之傳統蕭特基閘極與氧化鎂閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵/氮化鎵金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體，元件之直流特性分別為：最大飽和電流密度 $I_{DS, max}$ (500 mA/mm、681 mA/mm)，零閘極偏壓飽和電流 I_{DSS0} (289 mA/m、329 mA/mm)，最大外質轉導 $g_{m, max}$ (120 mS/mm、112 mS/mm)，閘極漏電流 I_g (6.85×10^{-3} mA/mm、 3.73×10^{-5} mA/mm)，閘極-汲極兩端崩潰電壓 BV_{GD} (-104 V、-123 V)。

因此，實驗結果顯示，藉由超音波霧化熱裂解沉積高介電常數氧化鎂閘極介電層結構之氮化鎵/氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體，成功改善元件整體之直流特性。

關鍵字：超音波物化熱裂解、氧化鎂、氮化鎵/氮化鋁鎵/氮化鎵

Abstract

The thesis investigates MgO-dielectric GaN/AlGaN/GaN metal-oxide-semiconductor high electron mobility transistors (MOS-HEMTs) by using the ultrasonic spray pyrolysis deposition (USPD) technique. Due to the enhanced gate insulation and surface passivation, the gate leakage current has been effectively reduced by depositing the high-k magnesium dioxide (MgO) as the gate dielectric layer.

Improved device performances of the studied MgO-dielectric MOS-HEMT (a referenced Schottky-gate HEMT) have been achieved, including maximum drain-source saturation current density ($I_{DS, max}$) of 681 (500) mA/mm, drain-source current density at $V_{GS} = 0$ V (I_{DSS0}) of 329 (289) mA/mm, maximum extrinsic transconductance ($g_{m, max}$) of 112 (120) mS/mm, reduced gate leakage current (I_g) at $V_{GS} = -50$ V of 3.73×10^{-5} (6.85×10^{-3}) mA/mm, and two-terminal off-state gate-drain breakdown voltage (BV_{GD}) of -123 (-104) V, respectively, at 300 K.

Consequently, superior performance of the present MOS-HEMT has been successfully achieved in this thesis. High-k MgO MOS-gate structure has been obtained by using the cost-effective USPD technique. The present MOS-HEMT device can be promisingly applied to high-frequency RFIC technologies.

Keywords: Ultrasonic spray pyrolysis deposition, magnesium dioxide, GaN/AlGaN/GaN

目 次

目次.....	3
Chapter 1 序論.....	6
Chapter 2 GaN/AlGaN/GaN 異質結構	9
Chapter 3 元件成長和實驗步驟.....	11
3-1 元件結構.....	11
3-2 製造流程.....	11
3-2-1 高台絕緣.....	12
3-2-2 歐姆接觸.....	13
3-2-3 蕭特基閘極接觸.....	14
3-2-4 閘極氧化沉積(MgO).....	15
3-3 超聲波霧化熱裂解沉積 (USPD).....	16
Chapter 4 實驗結果與討論.....	17
4-1 材料分析.....	17
4-1-1 X 射線光電子能譜儀(XPS).....	17

4-1-2 穿透式電子顯微鏡 (TEM).....	18
4-1-3 原子力顯微鏡(AFM).....	18
4-1-4 霍爾量測.....	19
4-2 室溫下的直流特性.....	19
4-2-1 USPD 優化厚度處理.....	20
4-2-2 電壓-電流特性.....	20
4-2-3 傳輸特性.....	21
4-2-4 兩端崩潰電壓及順向導通特性.....	21
4-2-5 三端關閉狀態崩潰電壓特性.....	22
4-3 變溫直流特性.....	23
4-3-1 溫度相關輸出特性.....	23
4-3-2 溫度相關轉換特性.....	23
4-3-3 溫度相關崩潰電壓和漏電流.....	25
4-4 電容電壓特性.....	26
4-4-1 遲滯現象.....	26

4-4-2 表面狀態密度(Dit).....	27
4-5 微波特性.....	27
4-5-1 f_T 和 f_{max} 的特性.....	27
4-5-2 功率特性.....	29
4-5-3 高頻雜訊特性	30
4-5-4 低頻雜訊特性.....	32
4-5-5 脈衝模式特性.....	33
Chapter 5 結論.....	34
參考資料.....	35
圖.....	42



第一章

序論

近十年來，已經證實 AlGa_N/Ga_N 高電子遷移率電晶體（HEMT 器件）具有高功率、高頻率、高溫應用，由於 AlGa_N/Ga_N 材料卓越的性能與其具有寬能隙、高崩潰電場、高電子飽和速度、高導熱性、高二維電子雲濃度等優點。因此氮化鎵高電子移動率電晶體可應用於電源開關、高電流操作和高頻率的應用。

表 1-1: HEMTs 的材料特性之比較

properties	GaN	GaAs	Si	SiC
Energy gap (eV)	3.4	1.42	1.12	3.2
Critical Breakdown Field (MV/cm)	5	0.6	0.3	3.5
Mobility (cm ² /V-s)	1500	6000	1300	600
Saturation Velocity (10 ⁷ cm/s)	3	2.1	1	2

即使在 AlGa_N/Ga_N 的高電子遷移率電晶體器件具有上述優點，但還存在一些問題，比如漏電流崩塌[4]和閘極洩漏電流[5]在高閘極偏壓，以及較高的表面狀態密度[6]，這可能嚴重地影響設備的微波特性。因此，為了改善這些問題，我們進行了製造 AlGa_N/Ga_N 的金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體的研究。

由於減小閘極氧化物厚度的結果，在相同的偏壓下，閘極漏電流和電場將會增加，以降低崩潰電壓。因此，需使用高介電常數（高 k）材

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

料，以防止穿隧電流。此外，這是最能表現出抑制漏電流，從而維持電特性之一。目前，許多種的介電材料已被廣泛使用研究，包括的 HfO_2 [7]， Al_2O_3 [8]， TiO_2 [9]， La_2O_3 [10]， SiO_2 [11]，和 MgO [12]，作為閘極電介質。材料的性能，包括介電常數和能帶間隙在表 1-2 中示出。

表 1-2:不同的介電材料比較

Materials	HfO_2	Al_2O_3	TiO_2	La_2O_3	SiO_2	MgO
Dielectric constant	20~30	9	80	25~30	3.9	6.8~9.6
Energy band gap (eV)	5.8	9	3.5	6	9	8

有幾種不同的方法來沉積氧化物薄膜，包括金屬有機化學氣相沉積 (MOCVD) [13]，電漿增強化學氣相沉積 (PECVD) [14]，原子層沉積[15]和濺射[16]。但是，上述的所有方法都需要在一個真空的系統進行多步驟的過程。

在這工作中，我們使用超音波霧化熱分解沉積 (USPD) [17]，以氧化鎂 (MgO) 的高 k 沉積閘極。 MgO 具有高的介電常數，約 6.8~9.6，和較寬的能隙，約 8eV[18]，[19]，[20]。而我們所使用的 USPD，可在操作在非真空的環境，因此成本相對較低，且薄膜成長均勻與可大面積的成長，且過程安全。表 1-3 示出的優點和缺點與不同的薄膜沉積

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

方法。

表 1-3:不同氧化沉積方法比較

	Advantages	Disadvantages
MOCVD	<ol style="list-style-type: none"> 1. Excellent step coverage 2. Deposition oxide layer just after epitaxy 	<ol style="list-style-type: none"> 1. High cost 2. High vacuum
PECVD	High deposition rate	Plasma may damage the thin film.
ALD	<ol style="list-style-type: none"> 1. Excellent step coverage 2. The thickness can be controlled 	<ol style="list-style-type: none"> 1. High cost 2. Low deposition 3. High vacuum
Sputter	<ol style="list-style-type: none"> 1. Good step coverage 2. Good uniformity 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Expensive targets 2. Deposition material is dependent on the target.
USPD	<ol style="list-style-type: none"> 1. Non-vacuum 2. High deposition rate 3. Wide material choice 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Required chemical precursor 2. Precursor may etch surface

第二章

GaN/AlGaN/GaN 異質結構

因為在 III 族氮化物的異質結構有較大的壓電和自發極化，當異質結構沿著極性方向生長，三角形量子阱在 AlGaN / GaN 的界面上。通過上述現象，可以在的 AlGaN / GaN 的界面上，形成二維電子雲

(2DEG)，即使沒有在該系統[21]中任意摻雜。偏振效應誘導二維電子雲 (2DEG) [22]，如圖 2-1 所示。AlGaN / GaN 高電子遷移率電晶體已成為高電壓、高功率運行微波頻率上具吸引力的選擇。為了抑制閘極漏電流，能導致更好的電晶體特性，所以廣泛利用了增加閘極蕭特基能障高度或能障高度。然而，通過增加 Al 濃度構成在源極和漏極接觸[23]的限制，增強閘極蕭特基能障。因為，它是增加的閘極蕭特基能障高度常見的方法。此外，GaN 覆蓋層也可以提高直流可靠性和減少漏電流崩潰，相對於它們沒有 GaN 覆蓋[24]。

常見的磊晶系統有金屬有機化學氣相沉積 (MOCVD) [25]和分子束磊晶 (MBE) [26]可以生長在不同的基板，例如高質量的 GaN 薄膜：矽[27]，藍寶石[28]，和碳化矽 (SiC) [29]。GaN 生長在基板上具有

一些問題，在磊晶層和基板之間，有較大的晶格不匹配和熱相容性。對於一些二元半導體材料的能帶間隙和晶格常數如圖 2-2 所示。問題是可能會導致薄膜中高密度和較大的張力讓結構變形。不過，氮化合

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

物本身有層良好的基板作為 GaN 薄膜磊晶。GaN 基板可以解決，不僅晶格常數匹配，而且有散熱性[30]。然而，氮化鎵不能用於較大的晶圓。使用藍寶石基板的好處，包括低成本，品質高和面積大。但是，具有較差的熱導率（0.5W/厘米·K），而產生自行發熱現象，降低了裝置高功率的特性[31]。SiC 具有較低的晶格失配與熱傳導率高（4.9瓦/厘米·K），因此具有更好的散熱性、擊穿強和晶格質量。對於高功率應用，碳化矽是一個有吸引力的材料。然而，由於較高的成本和更小的面積，SiC 帶來增加器件製造的複雜性和成本[32]。因此，在此工作中，我們選擇其中被提供有良好的熱傳導率（1.5W/厘米·K），較大面積和成本較低的矽基底。

表 2-1 顯示 Si、Sapphire、GaN、SiC、AlN 磊晶 GaN 薄膜不同型態的基板的主要特性。

表 2-1: GaN 基底之比較

Property	Si	Sapphire	GaN	SiC
Thermal conductivity (W/cm-K)	1.5	0.5	5.6	4.9
Thermal expansion coefficient ($10^{-6}/K$)	2.6	7.5	5.6	4.2
Lattice mismatch (%)	-17	-15	-	3.5
Size (inches)	12	6	2	4
Cost	Cheaper	Cheap	Expensive	Expensive

第三章

元件成長和實驗步驟

3-1 元件結構

本實驗中，AlGaIn/AlN/GaN 高電子遷移率晶體管 (HEMT) 使用金屬-有機化學氣相沉積 (MOCVD) 生長在 4-inch 的 Si 基板上。磊晶層包括一個 0.5 μm 的 AlN、AlGaIn，一個為 4 μm 的 GaN 緩衝層，100 μm 的 GaN 通道層，一個 20 μm 的 Al_{0.24}Ga_{0.76}N 阻擋層和一個 3 μm 的 GaN 覆蓋層。霍爾量測顯示了該元件在室溫下的電子移動率為 902 cm²/V-s 和片電流濃度 2.35 $\times 10^{13}$ cm⁻²。圖 3-1、圖 3-2 包括蕭特基閘極和金屬-氧化物層-半導體(MOS)元件之 AlGaIn/GaN HEMT 的結構截面圖。

3-2 製造流程

為了形成此樣品，我們使用標準的微影製程與剝離技術。而為了保持晶圓的純淨，必須在每個製造步驟之間，在超音波震盪器中用丙酮小心謹慎地清洗，再使用去離子水沖洗乾淨，並且使用高純度氮氣吹乾，以保持晶圓的清潔。圖 3-3 顯示 AlGaIn/GaN HEMTs 元件製程的主要三個步驟：

(1) 高台絕緣

(2) 汲/源極歐姆接觸

(3) 閘極蕭特基接觸

四個主要製造 MOS AlGaIn/GaN HEMTs 的過程顯示於圖 3-4：

(1) 高台絕緣

(2) 汲/源極歐姆接觸

(3) 閘極蕭特基接觸

(4) 閘極氧化沉積

3-2-1 高台絕緣

高台絕緣的主要目的在於減少漏電流的產生，因此可以獲得較好的夾止特性。首先，把樣本浸入鹽酸中，經過 5 分鐘的超聲波震動後，由去離子水清洗，接著把樣本浸入丙酮於超音波震盪器清洗 5 分鐘，然後再使用去離子水清洗剩餘的丙酮。丙酮可洗淨樣本表面的油污。這裡我們使用純鹽酸 (HCl)，以消除表面的氧化和表面損傷。在清洗完乾燥之後，塗上一層正光阻(FH6400L)，旋轉速度和時間控制在每分鐘 8000 轉，維持 12 秒；接著再進行每分鐘旋轉速度為 8500 轉，持續 25 秒。樣本在溫度為 90°C 軟烤箱內進行軟烤 30 分鐘，接著使用光罩校準器(OAI MODEL 3HR/IR)對樣本進行 25 秒鐘的曝光，來定義高台絕緣光阻圖案且把樣本侵入光阻顯影劑 35 秒。我們使用熱蒸鍍沉積厚度大約 100 nm 的 Ni 當作高台蝕刻光罩。最後使用丙酮去除

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

光阻及使用感應耦合式電漿反應離子蝕刻(ICP-RIE)產生 Ar/Cl₂ 等離子蝕刻反應來定義高台範圍。我們使用的蝕刻參數設定為 30 sccm 的 Cl₂、10 sccm 的 Ar、ICP 的功率為 700 W、RIE 的功率為 120 W 和環境壓力 3 mTorr 100 秒。蝕刻速率大約 10nm/min。蝕刻後，我們使用硝酸來去除 Ni₂ 的硬光罩。以下為高台絕緣的主要步驟：

1. 清理樣本
2. 旋轉塗佈
3. 軟烤(曝光前烘烤)
4. 曝光
5. 顯影
6. 蒸鍍
7. 掀起製成
8. 乾式蝕刻
9. 去除 Ni



3-2-2 汲源極歐姆接觸

在超音波震盪器中使用丙酮清洗晶圓及用去離子水清洗去除剩餘的丙酮，接著用鹽酸去除表面的氧化層及使用去離子水清洗剩餘的溶劑。我們晶圓上塗佈正光阻(FH6400L)，旋轉和時間分別控制在 8000rpm，維持 12 秒、8500rpm，維持 25 秒，最後在 90°C 下進行的

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

烘烤 30 分鐘。之後使用標準微影技術形成汲極和源極電極圖案。在蒸鍍前，金屬和蒸鍍用鎢舟必須用超音波震動器中分別加入丙酮和鹽酸清洗 20 分鐘和 5 分鐘後，用去離子水洗滌並用高純度氮氣吹乾。我們使用 Ti/Al/Au 合金當作歐姆接觸的金屬【33】【34】【35】，且沉積厚度 Ti(10nm)/Al(100nm)/Au(100nm)，Ti/Al 層具有低的功函數，在 Au 層可以防止形成在表面上的 Al_2O_3 鋁的向外擴散，減少接觸電阻。使用快速熱退火系統(RTA)(ULVAC MILA-5000)，退火後，Ti/Al/Au 合金可以延伸至金屬和半導體的表面之間。退火溫度和時間分別為 $900^{\circ}C$ 和 90 秒。在我們的汲源極圖案中，此元件的汲源極距離 $5\mu m$ 。

以下為汲極和源極歐姆接觸的製程步驟：

1. 清理樣本
2. 旋轉塗佈
3. 軟烤(曝光前烘烤)
4. 曝光
5. 顯影
6. 蒸鍍
7. 掀起製成
8. 退火

3-2-3 閘極蕭特基接觸

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

形成理想的歐姆接觸後，我們使用 Ni(100nm)/Au(10nm)作為閘極蕭特基接觸。Ni 可以增加蕭特基能障高度，因為它具有較高的功函數可以抑制漏電流而獲得高崩潰電壓。實驗中我們使用正光阻 (FH6400L)，旋轉速率和時間控制在 9000rpm，維持 12 秒、9500rpm，維持 35 秒。接著使用閘極光罩對樣品曝光 20 秒定義閘極圖案和浸泡在光阻顯影劑中 30 秒，最後我們使用熱蒸鍍沉積 Ni/Au，其厚度為 Ni(100nm)/Au(50nm)，用丙酮去除光阻，傳統的 AlGaIn/GaN HEMT 完成。在我們的閘極圖案中，此元件閘極長度為 $1\mu\text{m}$ 、寬度為 $100\mu\text{m}$ 。閘極蕭特基接觸的主要步驟如下：

1. 清理樣本
2. 旋轉塗佈
3. 軟烤(曝光前烘烤)
4. 曝光
5. 顯影
6. 蒸鍍
7. 掀起製成

3-2-4 閘極氧化沉積 (MgO)

氧化層的 MgO 沉積之前，其表面用丙酮清洗，然後施加去離子水除去丙酮。下述沉積於源極和汲極，利用 RTA 退火，光顯影蝕刻打開

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

閘極的窗口，樣品再透過超聲波霧化熱分解沉積技術(USPD)沉積

30nm 厚的 MgO 作為氧化過程。然後，利用標準光刻技術於漏極和源

極遮罩以限定濕式蝕刻的區域。再使用磷酸刻蝕劑[36] ($\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}=\text{1:5}$)

除去在汲極和源極中的 MgO。

3-3 超聲波霧化熱分解沉積技術 (USPD)

超聲波噴霧熱解沉積對於建構氧化層是優異的技術之一。這種超聲霧化器是根據源溶液由載氣送到加熱的基板表面的技術。超聲波霧化熱分解沉積技術 (USPD) 相對於其他氧化層沉積方法，像是電漿增強化學氣相沉積 (PECVD)，濺射和原子層沉積，具有一些優勢，例如：大面積沉積，降低設備製造成本，膜均勻性良好，和不需真空的條件下進行。圖 3-5 為超聲波噴霧熱分解沉積的示意圖。

第四章

實驗結果與討論

4-1 材料分析

在這項工作中，它通過使用超聲噴霧熱解沉積技術形成 MgO 氧化層。為了知道化學元素組成，表面粗糙度，和 MOS 氧化層的厚度，我們採用 (1) X 光光電子能譜儀(XPS)，(2)穿透式電子顯微鏡 (TEM)，(3)原子力顯微鏡 (AFM)，(4)霍爾量測。

4-1-1 X 光光電子能譜儀 (XPS)

為了分析樣品表面的結構的化學元素和鍵結結構，X 射線光電子光譜儀是一種常見的工具，圖 4-1 顯示了 XPS 測量的基本原理。X 光的輻射使光子由材料的表面被激發而跳脫，而 XPS 是表面敏感的技術，可以通過組合與從當前表面 XPS 測量交織離子槍蝕刻週期序列來獲得在 XPS 量而言樣品的深度剖面。在 XPS 光譜採集之前離子槍用於蝕刻材料一段時間。每個離子槍蝕刻循環暴露出一個新的表面和 XPS 光譜提供分析這些表面[37]的組合物的裝置。圖 4-2 和圖 4-3 顯示，MgO 的結合能信號分別為 49.8 eV 的鎂 2P 和 530.2 eV 的為氧 1s。圖 4-4 顯示了鎂，氧，鎵，氮的原子濃度。鎂 2P 和氧 1s 的原子濃度為 53.1%和 46.3%。我們還使用半定量分析，以確認濃度的比率。結果

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

顯示於表 4-1。

表 4-1: 濃度比率

Material	MgO
O/Mg	0.87

4-1-2 穿透式電子顯微鏡 (TEM)

第一個 TEM 是由 Max Knoll 和 Ernst Ruska 在 1931 年所造。穿透式電子顯微鏡 (TEM) 是電子束通過一個超薄樣品，通過時與試樣交互作用的一種顯微技術。由於電子的德布羅意波長小，TEM 比起光學顯微鏡能夠有更顯著的成像、更高的分辨率。TEM 在癌症研究，病毒學，材料科學以及污染，納米技術和半導體研究應用。因此，為了研究的 GaN/ AlGaN/ GaN 層上的 MgO 膜的結構，觀察到的樣品橫截面穿透式電子顯微鏡 (TEM) 圖像被作為圖 4-5。結果示於表 4-2 總結。

表 4-2: 氧化層厚度

Material	MgO
Oxide thickness (nm)	30

4-1-3 原子力顯微鏡 (AFM)

原子力顯微鏡 (AFM) 是一個非常高的分辨率型掃描探針顯微鏡 (SPM)，與如圖 4-6 所示一個奈米級的順序展示了分辨率。使用

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

AFM，有可能以高的分辨率來測量樣品表面的粗糙度，區分樣品是根據它的機械性能，包括硬度和粗糙度[38]。最佳平面度表面為 30nm 的氧化鎂氧化層。如在圖 4-7 和圖 4-8 所示，表面粗糙度為 1.73nm。

4-1-4 霍爾量測

採用霍爾測量可以測量半導體的許多重要特性，如流動性，片材濃度，電阻率和霍爾係數[39]。在室溫下遷移率 (μ_n) 和片濃度 (n_s)，比較非治療和 30nm 的氧化鎂氧化層的氮化鎵/AlGaN/ GaN 的 HEMT 器件。結果示於表 4-3。

表 4-3: 霍爾測量研究

Sample	Mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	Sheet Concentration (cm^{-2})	$\mu_n \times n_s$ ($\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
Non-treatment	902	2.35×10^{13}	2.12×10^{16}
30 nm MgO	872	2.77×10^{13}	2.42×10^{16}

4-2 室溫下的直流特性

所製造的設備具有柵極長度 $L_g = 1\mu\text{m}$ ，閘極寬度 W_g 的 = $100\mu\text{m}$ 。晶圓上的特點是由在室溫下使用半導體參數分析器 (Keithley 4200) 進行測定。

4-2-1USPD 優化厚度處理

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

利用 DC 直流特性來優化設備特性。如圖 4-9 和表 4-4 所示，由 USPD 量測在 MgO MOS-HEMT 的特性，分別包括 20，30，和 40nm。

表 4-4: 厚度處理優化特性

MgO	$g_{m,max}$ (mS/mm)	I_{DSS0} (mA/mm)	$I_{D,max}$ (mA/mm)
20 nm	107	317	648
30 nm	112	329	681
40 nm	104	302	604

從上述表 4-4，透過 USPD 沉積 30nm 的 MgO 有最好的元件特性。基於 HEMT 和 MOS-HEMT 的 DC，CV 和射頻性能的結果，我們使用 30nm MgO 作為氧化物層。

4-2-2 電流-電壓特性

如圖 4-10 和圖 4-11，在室溫下典型的汲極源極電流 (I_{DS}) 相對於常規的 HEMT 和 MgO 的 MOS-HEMT 的汲極源極偏壓 (V_{DS}) 特性。閘極偏壓為 4 V 至 -6V，以 -1 V 為單位，和兩個設備汲源偏壓分別為 0 至 20V。傳統的 HEMT 最大漏電流密度 ($I_{DS,max}$) 為 500mA/mm 在 $V_G=2V$ 和 MOS-HEMT 為 $V_G=4V$ ，681 毫安/毫米。結果表明，MOS-HEMT 氧化物沉積層的電流密度憑藉超聲波霧化熱分解沉積技術，這可以減少表面狀態密度和漏汲極-源極電阻引起片電流濃度的增加而增加 36.2%。

4-2-3 傳輸特性

在常溫下 HEMT and MgO MOS-HEMT 的外質轉導(g_m)作為汲源偏壓的函數是 7V，如圖 4-12 和圖 4-13。比較 HEMT 和 MOS-HEMT，最大外質轉導($g_{m,max}$)分別為 120 毫秒/毫米和 112 毫秒/毫米。由於 high k 絕緣體的插入，有效增加通道門的距離，MOS-HEMT 的最大轉導比起 HEMT 下降 6.67%。閘極電壓擺幅 (GVS) 定義為可用的閘極偏壓範圍，其中對應值的 90% 以上為最大。HEMT 和 MOS-HEMT 的 GVS 值定義為 1.6 V 和 2.2V。MOS-HEMT 具有更好的 GVS 由於抑制閘極漏電流。HEMT 和 MOS HEMT 的 I_{DSSO} : 289 mA/mm 和 329 mA/mm 由於使用 USPD 沉積 MOS HEMT 上升了 13.8%。臨界電壓的定義是閘及偏壓的 $\sqrt{I_{DS}}$ 。如圖 4-14 HEMT 和 MOS HEMT 的 V_{th} 值分別為 -2.2V 和 -4.4V。另一方面，在開/關電流比(I_{on}/I_{off})確定為 6.22×10^2 和 1.22×10^6 。

4-2-4 兩端崩潰電壓及順向導通特性

HEMT 和 MOS-HEMT 在室溫下顯示在圖 4-15 和圖 4-16，包括雙端截止閘極-汲極崩潰電壓(BV_{GD})，導通電壓(V_{on})和所有設備的漏電流密度的特徵。 BV_{GD} 和 V_{on} 被定義為在所述閘極電流 I_{GD} 達到 1 mA/mm 的電壓。漏電流限定是在閘極汲極電壓為 -50V。HEMT 和 MOS HEMT 的 BV_{GD} and V_{on} 的值分別為 104 V / 123 V 和 0.8 V / 1.7 V。HEMT 和

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

MOS-HEMT 的漏電流密度分別為 6.85×10^{-3} 和 3.73×10^{-5} mA/mm 在 $V_G = -50V$ 時。比較 HEMT 和 MOS-HEMT 結果說明使用 USPD 可以獲得較高的 BV_{GD} and V_{on} 。由於使用 USPD 插入 MgO 的氧化層可以壓抑閘極和汲極間的漏電流和電場。此外，漏電流較低也可以歸因於在閘極氧化層的陷阱減少。

4-2-5 三端關閉狀態崩潰電壓特性

依據圖 4-17 展示了正常的 HEMT 與 MOS-HEMT 的三端 off 狀態時的崩潰電壓(BV_{off})。該崩潰電壓(BV_{off})被定義在 off 狀態時汲極漏電流，當閘極電壓處於 pinch-off(-10V)時此漏電流會上升至 1mA/mm。

在所有的元件中包括正常的 HEMT 與 MOS-HEMT，他們的崩潰電壓可以被確切地定義於 97 V 和 119 V。結論上，透過 USPD 的閘極絕緣技術可以有效地抑制漏電流與減少通道層中的電離碰撞，如此便可提高 MOS-HEMT 崩潰電壓的特性。

如表 4-5 所示，此表為現有之 HEMT 與 MOS-HEMT 在室溫下的 DC 特性比較：

表 4-5: 設備的 DC 特性

sample	Conventional HEMT	MOS-HEMT
$g_{m,max}$ (mS/mm)	120	112
$I_{D,max}$ (mA/mm)	500 ($V_G = 2 V$)	681 ($V_G = 4 V$)

I_{DSS0} (mA/mm)	289	329
GVS (V)	1.6	2.2
V_{th} (V)	-2.2	-4.4
I_{on}/I_{off}	6.22×10^2	1.22×10^6
BV_{GD} (V)	104	123
I_g (mA/mm)	6.85×10^{-3}	3.73×10^{-5}
V_{on} (V)	0.8	1.7
BV_{off} (V)	96.5	119

4-3 變溫直流特性

4-3-1 溫度相關輸出特性

將我們的元件(傳統的 HEMT 與 MOS-HEMT)以溫度 300K~450K 以每 50K 為間距，測量溫度的相關性之汲-源電流密度(I_{DS})與汲-源(S)電壓(V_{DS})特性。汲-源電壓的變化為 0 V~20 V 與傳統 HEMT 閘極的電壓變化為 2V~4V(每 50 K 上升 1 V)，MOS-HEMT 閘極的電壓變化為 4V~6V(每 50 K 上升 1 V)。

此結果顯示出當溫度上升時，汲極電流密度特性的減少是因電子遷移率降低從該顯著載體產生載子散射與晶格散射機制和在高溫下使濃度稍微增加所導致的情況。

4-3-2 溫度相關傳輸特性

圖 4-20 和圖 4-21 顯示了常規 HEMT 和 MOS-HEMT 從 300K 至 450 K

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

的外質轉導特性。汲-源電壓在偏壓 7V 下，傳統的 HEMT 和 MOS HEMT 閘極電壓從偏壓 2V 到 -6 V。我們觀察到外質轉導是隨著溫度的升高而減少，由於溫度提高影響漏電流密度下降。

由表 4-6 與表 4-7 分別顯示了正常 HEMT 與 MOS-HEMT 的 I_{DSS0} 、 I_{Dmax} 和 $g_{m,max}$ 從 300K~400K 的變化。

表 4-6: 從 300K 至 450 K 的傳統 HEMT 溫度相關 DC 特性

Conventional HEMT	$I_{D,max}$ (mA/mm)	I_{DSS0} (mA/mm)	$g_{m,max}$ (mS/mm)
300 K	500	289	120
350 K	406	235	96
400 K	347	200	82
450 K	293	170	69

表 4-7: 從 300K 至 450 K 的 MOS-HEMT 溫度相關 DC 特性

MOS-HEMT	$I_{D,max}$ (mA/mm)	I_{DSS0} (mA/mm)	$g_{m,max}$ (mS/mm)
300 K	681	329	112
350 K	613	295	94.7
400 K	576	277	83.5
450 K	547	263	74.7

4-3-3 溫度相關雙端崩潰電壓特性

對於常規 HEMT 和 MOS-HEMT 從 300K 到 450k 圖 4-22 和圖 4-23 示出了閘-汲崩潰電壓 (BV_{GD})，漏電流密度 (I_g)，和導通電壓 (V_{on})

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

的特性。閘-汲崩潰電壓 (BV_{GD}) 和導通電壓 (V_{on}) 被定義 V_{GD} 作為 I_{GD} 的 1mA/mm 的大小，並且在 -50V 閘-汲電壓為限定洩漏電流的值。

表 4-8 和表 4-9 示出了分別從 300K 到 450k 傳統 HEMT 電壓特性和 MOS-HEMT 的汲閘崩潰電壓，漏電流密度及導通電壓。

結果表明，該 MOS-HEMT 可以提供更高質量的氧化物層和更好的熱穩定性。

表 4-8: 300K~450K 傳統 HEMT 的溫度依賴性

BV_{GD} , I_g 和 V_{on} 特徵

Conventional HEMT	BV_{GD} (V)	I_g (mA/mm)
300 K	104	6.85×10^{-3}
350 K	84.9	1.22×10^{-2}
400 K	72.5	3.95×10^{-2}
450 K	62.3	8.31×10^{-2}

表 4-9: 300K~450K MOS-HEMT 的溫度依賴性

BV_{GD} , I_g 和 V_{on} 特徵

MOS-HEMT	BV_{GD} (V)	I_g (mA/mm)
300 K	123.3	3.73×10^{-5}
350 K	111.4	6.44×10^{-5}
400 K	106.1	1.71×10^{-4}
450 K	98.6	3.04×10^{-4}

4-4 電容-電壓特性

電容-壓特性的測量被用來顯示材料的結構。金屬-半導體 (M-S) 的蕭特基二極體和氧化鎂 (MgO) 的金屬氧化物半導體 (M-O-S) 二極體顯示於圖 4-24。C-V 測量要在閘極電壓操作為 -6 V 到 0 V 頻率為 1MHz。為了計算的 MOS 二極體的介電常數 (k)，電容公式可以用來以下：

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{HEMT}} \quad (1)$$

$$C_{ox} = K\epsilon_0 \frac{A}{d_{ox}} \quad (2)$$

ϵ_0 是真空電容率 = 8.854×10^{-12} F/m，A 是肖特基接觸面積 = $8000 \mu\text{m}^2$ ， d_{ox} 是氧化層厚度 = 20nm， C_{total} 是 MOS 的二極體電容為 14.1 pF， C_{HEMT} 是 M-S 肖特基二極管電容 = 43.7 pF 時， C_{ox} 是氧化層電容。根據上述參數，MgO 的 C_{ox} 是 20.8 pF 和介電常數為 8.8。

4-4-1 遲滯現象

圖 4-25 和圖 4-26 顯示出，金屬-半導體 (M-S) 的蕭特基二極體和氧化鎂 (MgO) 的金屬氧化物半導體 (M-O-S) 二極體的遲滯現象。為了研究遲滯現象，測量從 0V 到 -6 V 的閘極偏壓頻率為 1MHz。金屬-半導體 (M-S) 蕭特基二極體的遲滯為 0.2 V，MgO 金屬氧化物半導體 (M-O-S) 二極體約為 0.4V。結果表明，由 USPD 沉積的 MgO

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

氧化物層可有效降低陷阱密度，並形成高品質氧化物層。

4-4-2 表面狀態密度 (D_{it})

電容-電壓 (C-V) 與 (MgO) 的金屬氧化物半導體二極體的高低頻特性示於圖 4-27。為了計算表面狀態密度 (D_{it})，公式是利用：

$$D_{it} = \frac{C_{ox}}{q} \left(\frac{\frac{C_{LF}}{C_{ox}}}{1 - \frac{C_{LF}}{C_{ox}}} - \frac{\frac{C_{HF}}{C_{ox}}}{1 - \frac{C_{HF}}{C_{ox}}} \right) \quad (3)$$

q 是基本電荷， C_{ox} 是氧化層電容， C_{LF} 是在 10KHz 的低頻電容， C_{HF} 是在 1 MHz 的高頻電容量。MOS 二極體的平均表面狀態密度被確定為 $3.86 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。結果顯示由 USPS 技術在 MgO 氧化物層可有效的降低氧化物層和 GaN 之間的表面陷阱密度。

4-5 微波特性

4-5-1 f_T 和 f_{max} 的特性

使用 HP-8510B 向量網絡連接串接探針且操作在 0.2 GHz 到 50 GHz，設備的微波特性包含 HEMT 和 MOSHEMT 都在晶圓上量測。元件的閘極尺寸為 $1 \times 100 \mu\text{m}^2$ ，源極到汲極的距離為 $5 \mu\text{m}$ 。利用商用模擬器 HP Eesof Touchstone 分析 S 參數。S 參數矩陣可被轉換為 H 參數矩陣。電晶體的 S 參數量測使的元件的短路增益(H_{21})和最大可用功率增益(MAG)能夠被表示為：

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

$$|H_{21}| = \frac{-2S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12} \cdot S_{21}} \quad (4)$$

和

$$\text{MAG} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \cdot (k - \sqrt{k^2 - 1}) \quad (5)$$

在此

$$k = \frac{1-|S_{11}|^2-|S_{22}|^2+|S_{11} \cdot S_{22}-S_{12} \cdot S_{21}|}{2 \cdot |S_{12} \cdot S_{21}|} \quad (6)$$

MAG 被定義為 $k \geq 1$ ，意味著該電路是穩定的在任何電源或負載阻抗下。在高頻率，非共鳴電晶體的增益小到足以保證 $k \geq 1$ 。在某些頻率，增益足夠舒緩以產生統一的 k-factor。在此情況下，MAG 被定義為在該頻率的最高穩定的功率增益 (MSG)。因此，最高穩定的功率增益 (MSG) 可以被確定為下面的公式：

$$\text{MSG} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \quad (7)$$

統一電流增益截止頻率可從短路電流增益在 0 分貝獲得內插值。最大振盪頻率可以從最大經過 0dB 最大可用功率增益的內插值也能夠得到。截止頻率和最大振盪頻率式可表示為：

$$f_T \approx \frac{g_m}{2\pi(C_{GS}+C_{GD})} \quad (8)$$

和

$$f_{max} \approx \frac{f_T}{2\sqrt{R_i g_d}} \quad (9)$$

C_{GS} 和 C_{GD} 是閘-源和閘-汲電容，我們可以了解到更高的轉導可以得到更高的截止頻率和最大振盪頻率。圖 4-28 示出的統一電流增益截

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

止頻率和 HEMT 和 MOS-HEMT 的最大振盪頻率。HEMT 和 MOS

HEMT 的偏壓條件為 $V_{DS}=7\text{ V}$ ， $V_{GS}=-1.5\text{ V}$ ，和 $V_{DS}=7\text{ V}$ ， $V_{GS}=-2\text{ V}$ 。

HEMT 和 MOS-HEMT 的 f_T 與 f_{max} 的值分別為 7.83GHz / 8.77 GHz 和 8.91 GHz / 10.12 GHz。結果顯示於表 4-10。

表 4-10: f_T 與 f_{max} 的特性

sample	Conventional HEMT	MOS-HEMT
f_T (GHz)	7.83	8.91
f_{max} (GHz)	8.77	10.12

由於 MOS-HEMT 使用 USPD 能減少表面電荷和相應的電容，故具有較高的 f_T 和 f_{max} 。

4-5-2 功率特性

P_{out} 和附加功率效率(P.A.E)的方程式可表示為:

$$P_{out} = \frac{1}{8} (I_{max}) (BV_{gd} - V_{knee}) \quad (10)$$

$$P.A.E = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \times 100\% \quad (11)$$

在 P_{out} 的方程式中， BV_{GD} 為閘極到汲極的崩潰電壓， V_{knee} 為膝點電壓。在 P.A.E 方程式中， P_{out} 為輸出功率， P_{in} 為 RF 輸入功率， P_{DC} 為直流功率。功率附加效率建立該裝置的效率作為功率轉換器中，RF 能量改變 DC 能量。測量用一個簡單的功率測試的執行。電源和負載阻抗匹配用兩個雙調整器進行了優化，和一個帶通濾波器與功率檢測

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

器以確保在基本頻率的正確的功率讀數。其效能接近於夾止區的 class AB 的功率放大器。

圖 4-29，圖 4-30，圖 4-31，和圖 4-32 顯示出了輸出功率和功率增加效率作為 HEMT 和 MOS-HEMT 的輸入功率與在 $V_{GS}=-1.5V$ ， $V_{DS}=7V$ 和 $V_{GS}=-2V$ ， $V_{DS}=7V$ 的。如表 4-11 和表 4-12 中所示，所有設備在 2.4GHz 和 5.8GHz 的操作。

表 4-11: 在 2.4 GHz 的功率量測值

2.4 GHz	Conventional HEMT	MOS-HEMT
P.A.E (%)	18.5	23.28
P_{out} (dBm)	12.69	17.57
G_a (dB)	11.05	12.91

表 4-12: 在 5.8 GHz 的功率量測值

5.8 GHz	Conventional HEMT	MOS-HEMT
P.A.E (%)	6.2	8.8
P_{out} (dBm)	10.24	11.05
G_a (dB)	5.43	10.71

USPS 沉積改進 P_{out} 的性能可以歸因於較高 BV_{GD} 和 I_{DS} 。結果證明在同一 P_{in} 上有更好的 P.A.E.。

4-5-3 高頻雜訊特性

使用 HP8970B 雜訊係數分析儀量測 HEMT 和 MOS-HEMT 的干擾程度，頻率範圍在 1 GHz 到 6 GHz，最小雜訊指數(NF_{min})可被表示為

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

fukui equation:

$$NF_{min} = 10 \cdot \log \left[1 + \left(\frac{f}{f_T} \right) k_F \sqrt{g_m(R_g + R_S)} \right] \text{ (dB)} \quad (12)$$

在此

$$k_F = 3.38 \sqrt{\frac{I_{DS}}{L_g g_m}} \quad (13)$$

k_F 為 fukui 常數， I_{DS} 為汲極到源極電流的雜訊量測表現， g_m 為轉導， L_g 為閘極長度。

圖 4-33 顯示了 HEMT 和 MOS-HEMT 相關增益 (G_a) 特徵和最小雜訊指數 (NF_{min})。所有設備的閘極尺寸為 $1.2 \times 100 \mu m^2$ 和源極到汲極距離為 $5 \mu m$ 。HEMT 和 MOS-HEMT 的偏壓條件分別為 $V_{DS} = 7 V$ ， $V_{GS} = -1.5 V$ ； $V_{DS} = 7 V$ ， $V_{GS} = -2 V$ 。

表 4-13 顯示了 HEMT 和 MOS-HEMT 的最小雜訊指數 (NF_{min})，相關增益的正常值為 2.4 GHz 和 5.8 GHz。結果顯示，MOS-HEMT 因為氧化物層會減少表面陷阱，所以降低最小雜訊指數 (NF_{min}) 和更高的相關增益。

表 4-13: 雜訊特性的平均值

Sample		Conventional HEMT	MOS-HEMT
NF_{min} (dB)	2.4 GHz	2.21	1.32
	5.8 GHz	4.98	4.6
G_a (dB)	2.4 GHz	8.76	9.79
	5.8 GHz	2.36	3.23

4-5-4 低頻雜訊特性

低頻雜訊對於微波元件的優勢是很重要的指數。所以低頻雜訊的量測便能進一步地闡述閃爍干擾與各處理之間的關係；其測量方法對半導體的表面非常敏感。汲極雜訊電壓經由(Agilent 35670A)放大，且輸出被送到頻率範圍為 1Hz~10KHz 的 (BTA9812B) 的頻譜分析儀。正常的 HEMT 與 MOS-HEMTIDS 偏壓條件為 $V_{DS}=3V$ (線性區)且 I_{DS} 為 100mA/mm。

圖 4-34 顯示了所有設備的低頻雜訊等特點。這顯示 MOS-HEMT 比由於通過使用 USPD 技術，以減少表面特性的傳統 HEMT 具有較低雜訊。

通常使用虎克係數(Hooge's coefficient) α_H 表示在不同的半導體材料和結構中的雜訊等級，其方程式為下列:

$$\alpha_H = \frac{S_I(f)}{I^2} \cdot f \cdot N \quad (14)$$

和

$$N = \frac{L^2}{Rq\mu} \quad (15)$$

第一式， S_I 為電流的頻譜密度， I 為流經元件的電流， f 為頻率， N 為元件中自由電子的總數。第二式， L 為汲極到源極的間距， R 為通道電阻， μ 為遷移率。傳統 HEMT 和 MOS-HEMT 的 Hooge's coefficient 分別為 8.29×10^{-4} 和 2.49×10^{-5} 。

4-5-5 脈衝模式特性

圖 4-35 和圖 4-36 為傳統 HEMT 和 MOS-HEMT 的 CW 和脈衝模式。

脈衝寬度為 $10\mu\text{s}$ 及 20% 的工作週期。我們可以用以下公式計算電流崩塌的差異：

$$\Delta CC = \frac{I_{DC} - I_{pulse}}{I_{DC}} \times 100\% \quad (15)$$

表 4-14 表示出了傳統 HEMT 與 MOS-HEMT 元件崩潰電流的差異。

由結果顯示，MOS-HEMT 能夠降低 D-S 之間的漏電流與表面陷阱。

表 4-14 ΔCC 的特性整理

Sample	Conventional HEMT	MOS-HEMT
ΔCC (%) @ $V_{GS} = 0\text{ V}$	27	14

第五章

結論

此專題中，GaN/ AlGaN/ GaN HEMT 已成功的製作和研究並通過使用 USPD 沉積高介電常數的 MgO。MOS-HEMT 的研究元件比正常的 HEMT 可以顯著改善 DC 和 RF 特性。其原因是 MOS-HEMT 通過使用 USPD 技術以減小閘極漏電流和表面狀態密度產生具有高的氧化物層的質量和低界面密度。

本實驗 MOS-HEMT 通過使用超聲噴霧熱解沉積技術具有改進元件的特性。最大漏極電流密度 ($I_{DS,max}$)，漏電流密度 (I_{DSS0})，最大外質轉導 ($g_{m,max}$) 和傳統 HEMT 的兩端子 off 狀態 G-D 崩潰電壓 (BVGD) 和 MOS-HEMT 是 500/ /681 mA/mm，289/329 mA/mm，120/112 mA/mm，104/123 V 電流增益截止頻率 (f_T)，最大振盪頻率 (f_{max}) 和傳統 HEMT 的功率附加效率 (P.A.E) 和 MOS-HEMT 為 7.83/8.91 GHZ，8.77/10.12 GHZ，和 18.5/23.28% 在 2.4GHz。本實驗的 GaN/ AlGaN/ GaN 的 MOS-HEMT 通過使用 USPD high-K 材料的 MgO 是適於高功率 MMIC 的應用程序。

參考資料

- [1] V. Kumar, W. Lu, R. Schwindt, A. Kuliev, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan, and Ilesanmi Adesida, "AlGa_N/Ga_N HEMTs on SiC With f_T of Over 120 GHz," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 23, pp. 455–457, Aug. 2002.
- [2] W. Lu, S. Member, V. Kumar, E. L. Piner, and I. Adesida, "DC, RF, and Microwave Noise Performance of AlGa_N–Ga_N Field Effect Transistors Dependence of Aluminum Concentration," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 50, pp. 1069–1074, Apr. 2003.
- [3] Y.-F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, N. X. Nguyen, M. Le, C. Nguyen and T. J. Jenkins, "Short Channel AlGa_N/Ga_N MODFET's with 50-GHz and 1.7-W/mm Output-Power at 10 GHz," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 18, no. 9, pp. 438–440, Sep. 1997.
- [4] J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, "Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, pp. 250–252, Jul. 2000.
- [5] K. Roy, S. Mukhopadhyay, and H. Mahmoodi-Meimand, "Leakage current mechanisms and leakage reduction techniques in deep-submicrometer CMOS circuits," *Proc. IEEE.*, vol. 91, no. 2, pp. 305-327, Feb. 2003.
- [6] R. Vetury, N. Q. Zhang, S. Keller, and U. K. Mishra, "The Impact of Surface States on the DC and RF Characteristics of AlGa_N/Ga_N

- HFETs,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, no. 3, pp. 560-566, Mar. 2001.
- [7] C. S. Lee, Y. H. Liao, B. Y. Chou, H. Y. Liu, and W. C. Hsu, “Composite $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -dielectric AlGaAs/InGaAs MOS-HEMTs by using RF sputtering/ozone water oxidation,” *Superlattices Microstruct.*, vol.72,pp.194-203, Mar. 2014.
- [8] H. Y. Liu, C. S. Lee, W. C. Hsu, L. Y. Tseng, B. Y. Chou, C. S. Ho, and C. L. Wu, "Investigations of AlGaIn/AlN/GaN MOS-HEMTs on Si Substrate by Ozone Water Oxidation Method," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.60, no. 7,pp.2231~2237, Jul. 2013.
- [9] S. Yagi a, M. Shimizu, M. Inada, Y. Yamamoto, G. Piao, H. Okumura, Y. Yano, N. Akutsu, and H. Ohashi, “High breakdown voltage AlGaIn/GaN MIS–HEMT with SiN and TiO_2 gate insulator,” *Solid-State Electron.*, vol. 50, pp. 1057–1061, Apr. 2006.
- [10]H. Y. Liu, C. S. Lee, F. C. Liao, W. C. Hsu, B. Y. Chou, J. H. Tsai, and H. Y. Lee, "Comparative Studies on AlGaIn/GaN MOS-HEMTs with Stacked $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ Dielectric Structures," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol.3, no. 8, pp.N115-N119, Aug. 2014.
- [11]P. Kordos, G. Heidelberger, J. Bernát, A. Fox, M. Marso, and H. Lüth, “High-power SiO_2 /AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, pp. 143501-3, Sep. 2005.
- [12]B. Luo, J. W. Johnson, J. Kim, R. M. Mehandru, F. Ren, B. P. Gila, A. H. Onstine, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, A. G. Baca, R. D. Briggs,

- R. J. Shul, C. Monier, and J. Han, "Influence of MgO and Sc₂O₃ passivation on AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 9, pp. 1661-1663, Mar. 2002
- [13] P. Kordos, D. Gregusova, R. Stoklas, S. Gazi, and J. Novak, "Transport properties of AlGa_N/Ga_N metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with Al₂O₃ of different thickness," *Solid-State Electron.*, vol. 52, no. 6, pp. 973-979, Jun. 2008.
- [14] S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa, T. Jimbo, and M. Umeno, "Investigations of SiO₂/n-GaN and Si₃N₄/n-GaN insulator-semiconductor interfaces with low interface state density," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 6, pp. 809-811, Aug. 1998.
- [15] Y. Yue, Y. Hao, J. Zhang, J. Ni, W. Mao, Q. Feng, and L. Liu, "AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT With HfO₂ Dielectric and Al₂O₃ Interfacial Passivation Layer Grown by Atomic Layer Deposition," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 29, no. 8, pp. 838-840, Aug. 2008.
- [16] L. Pang, Y. Lian, D. S. Kim, J. H. Lee, and K. Kim, "AlGa_N/Ga_N MOSHEMT With High-Quality Gate-SiO₂ Achieved by Room-Temperature Radio Frequency Magnetron Sputtering," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 59, no. 10, pp. 2650-2655, Oct. 2012.
- [17] B. Y. Chou, C. S. Lee, C. L. Yang, W. C. Hsu, H. Y. Liu, M. H. Chiang, W. C. Sun, S. Y. Wei, S. M. Yu, "TiO₂-Dielectric AlGa_N/Ga_N/Si Metal-Oxide-Semiconductor High Electron Mobility Transistors by Using Non-Vacuum Ultrasonic Spray Pyrolysis

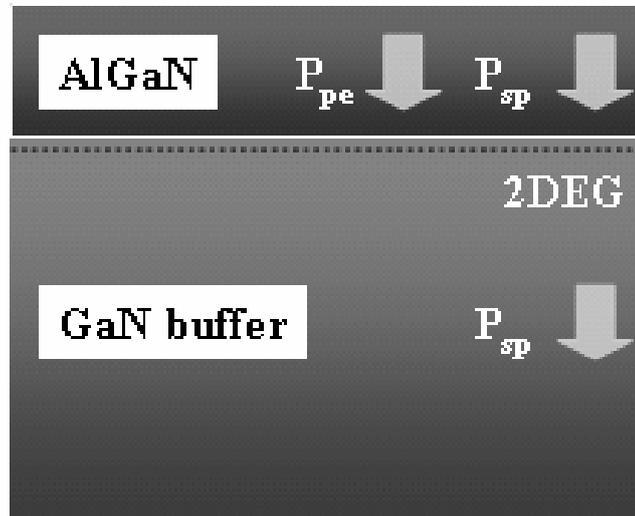
- Deposition," *IEEE Electron Devices Letters*, vol.35, no. 11, pp.1091-1094, Nov. 2014.
- [18]J. Kim, R. Mehandru, B. Luo, R. Ren, B. P. Gila, A. H. Onstine, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, and Y. Irokawa, "Characteristics of MgO/GaN gate-controlled metal-oxide-semiconductor diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 24, pp. 4555-4557, Jun. 2002.
- [19]E. A. Paisley, T. C. Shelton, S. Mita, R. Collazo, H. M. Christen, Z. Sitar, M. D. Biegalski, and J. P. Maria, "Surfactant assisted growth of MgO films on GaN," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101. no. 9. pp. 092904-1-4, Aug. 2012.
- [20]K. T. Lee, C. F. Huang, J. Gong, and C. T. Lee, "High-Performance 1- μ m GaN n-MOSFET With MgO/MgO-TiO₂ Stacked Gate Dielectrics," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 32. no. 3, pp. 306-308, Mar. 2011.
- [21]M. Gladysiewicz, R. Kudrawiec, J. Misiewicz, G. Cywinski, M. Siekacz, P. Wolny, and C. Skierbiszewski, "The surface boundary conditions in GaN/AlGaN/GaN transistor heterostructures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 23 pp. 231902-1-3, Jun. 2011
- [22]O. Ambacher J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, and L. F. Eastman, "Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaN/GaN heterostructures," *J. Appl. Phys.*, vol. 85, no. 6, pp. 3222–3233, Mar. 1999.
- [23]X. Z. Dang, R. J. Welty, D. Qiao, P. M. Asbeck, S. S. Lau, E. T. Yu, K.

- S. Boutros and J. M. Redwing, "Fabrication and characterisation of enhanced barrier AlGa_N/Ga_N HFET," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 7, pp. 602-603, Apr, 1999
- [24]P. Waltereit, S. Müller, K. Bellmann, C. Buchheim, R. Goldhahn, K. Köhler, L. Kirste, M. Baeumler, M. Dammann, W. Bronner, R. Quay, and O. Ambacher, "Impact of Ga_N cap thickness on optical, electrical, and device properties in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor structures," *J. Appl. Phys.*, vol. 106, no. 2, pp. 023535-1-7, Jul. 2009.
- [25]X. L. Wang, C. M. Wang, G. X. Hu, J. X. Wang, T. S. Chen, G. Jiao, J. P. Li, Y. P. Zeng and J. M. Li, "Improved DC and RF performance of AlGa_N/Ga_N HEMTs grown by MOCVD on sapphire substrates," *Solid-State Electronics*, vol. 49, pp. 1387–1390, Jun. 2005.
- [26]B. Luo, J. W. Johnson, B. P. Gila, A. Onstine, C. R. Abernathy, F. Ren, S. J. Pearton, A. G. Baca, A. M. Dabiran, A. M. Wowchack, P. P. Chow, "Surface passivation of AlGa_N/Ga_N HEMTs using MBE-grown MgO or Sc₂O₃," *Solid-State Electronics*, vol. 46, pp. 467–476, 2002.
- [27]D. Ducatteau, A. Minko, V. Hoël, E. Morvan, E. Delos, B. Grimbert, H. Lahreche, P. Bove, C. Gaquière, J. C. De Jaeger, and S. Delage, "Output Power Density of 5.1/mm at 18 GHz With an AlGa_N/Ga_N HEMT on Si Substrate," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 27. no. 1, pp. 7-9, Jan. 2006.
- [28]W. Saito, M. Kuraguchi, Y. Takada, K. Tsuda, I. Omura, and Tsuneo Ogura, "High breakdown voltage undoped AlGa_N-Ga_N power

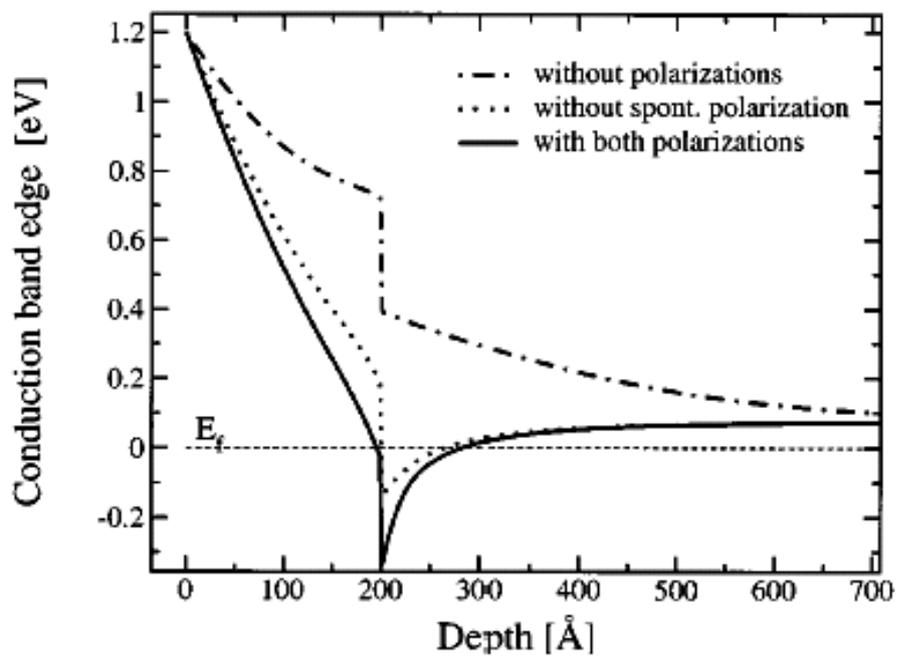
- HEMT on sapphire substrate and its demonstration for DC-DC converter application,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 51, no. 11, pp. 1913-1917, Nov, 2004
- [29]S. T. Sheppard, K. Doverspike, W. L. Pribble, S. T. Allen, J. W. Palmour, L. T. Kehias, and T. J. Jenkins, “High-Power Microwave GaN/AlGaN HEMT’s on Semi-Insulating Silicon Carbide Substrates,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, no. 4, pp. 161–163, Apr. 1999.
- [30]S. Nakamura, M. Senoh, S. I. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano, and K. Chocho, “Continuous-wave operation of InGaN/GaN/AlGaN-based laser diodes grown on GaN substrates,” *Appl. Phys. Lett.* vol. 72, no. 16, pp. 2014-2016, Apr. 1998.
- [31]R. Gaska, A. Osinsky, J. W. Yang, and M. S. Shur, “Self-Heating in High-Power AlGaIn-GaN HFET’s,” vol. 19, no. 3, pp. 89-91, Mar. 1998.
- [32]R. Behtash, H. Tobler, M. Neuburger, A. Schurr, H. Leier, Y. Cordier, E Semond, F. Natali and J. Massies, “AlGaIn/GaN HEMTs on Si(111) with 6.6 W/mm output power density,” *Electron. Lett.*, 2003.
- [33]z. x. qin, z. z. chen, y. z. tong, x. m. ding, x. d. hu, t. j. yu, g. y. zhang, “Study of Ti/Au, Ti/Al/Au, and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts to n-GaN,” *App. Phys.*, vol. 78, pp. 729–731, Apr. 2004.
- [34]Z. Z. Chen, Z. X. Qin, C. Y. Hu, X. D. Hu, T. J. Yu, Y. Z. Tong, X. M. Ding, G. Y. Zhang, “Ohmic contact formation of Ti/Al/Ni/Au to

- n-GaN by two-step annealing method,” *Mater. Sci. Eng., B*, vol. 111, pp. 36–39, Mar. 2004.
- [35][40]N. Chaturvedi, U. Zeimer, J. Wurfl and G. Trankle, “Mechanism of ohmic contact formation in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors,” *Semicond. Sci. Technol*, vol. 21, pp. 175–179, Nov. 2005.
- [36]J. Kim, B. Gila, R. Mehandru, J. W. Johnson, J. H. Shin, K. P. Lee, B. Luo, A. Onstine, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, and F. Rena, “Electrical Characterization of Ga_N Metal Oxide Semiconductor Diodes Using MgO as the Gate Oxide,” vol. 149, no. 8, pp. G482-G484, Aug. 2002.
- [37]P. J. Cumpson, “Angle-resolved XPS and AES: depth-resolution limits and a general comparison of properties of depth-profile reconstruction methods,” *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, vol. 73, no. 1, pp. 25-52, May. 1995.
- [38]E. W. Wong, P. E. Sheehan, C. M. Lieber, “Nanobeam Mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes,” *Science*, vol. 277, no. 5334, pp. 1971-1975, Sep. 1997.
- [39]Charles Kittel, “Introduction to Solid State Physics 8th Edition,” John Wiley & Son, 2005.

Figures



(a)



(b)

Figure 2-1 (a) The polarizations in GaN HEMT structure. (b) How these polarizations affect the concentration of 2DEG in AlGaN/GaN HEMT.

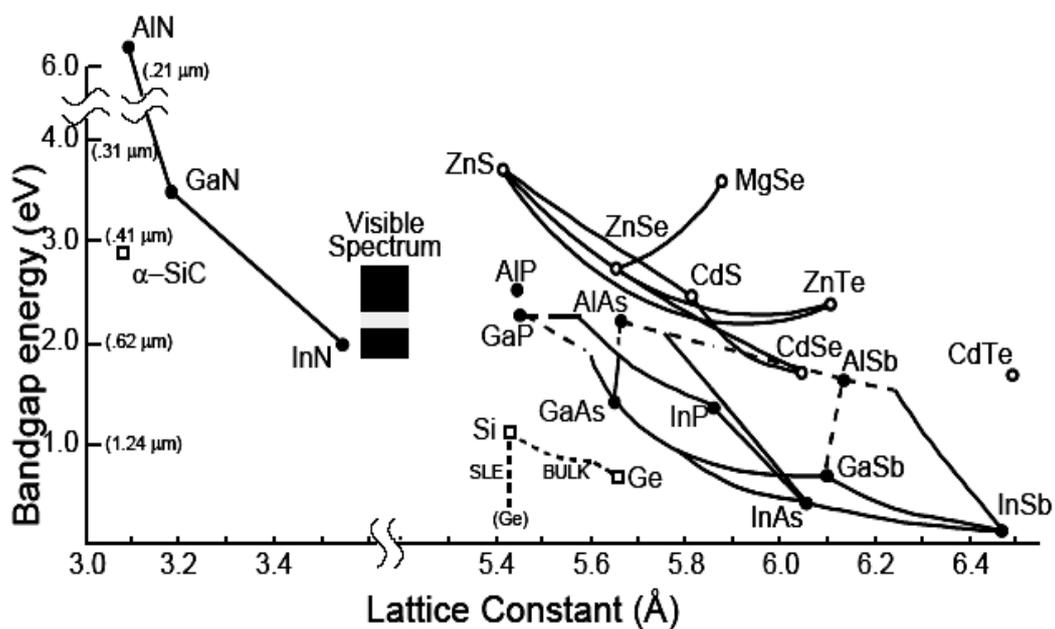
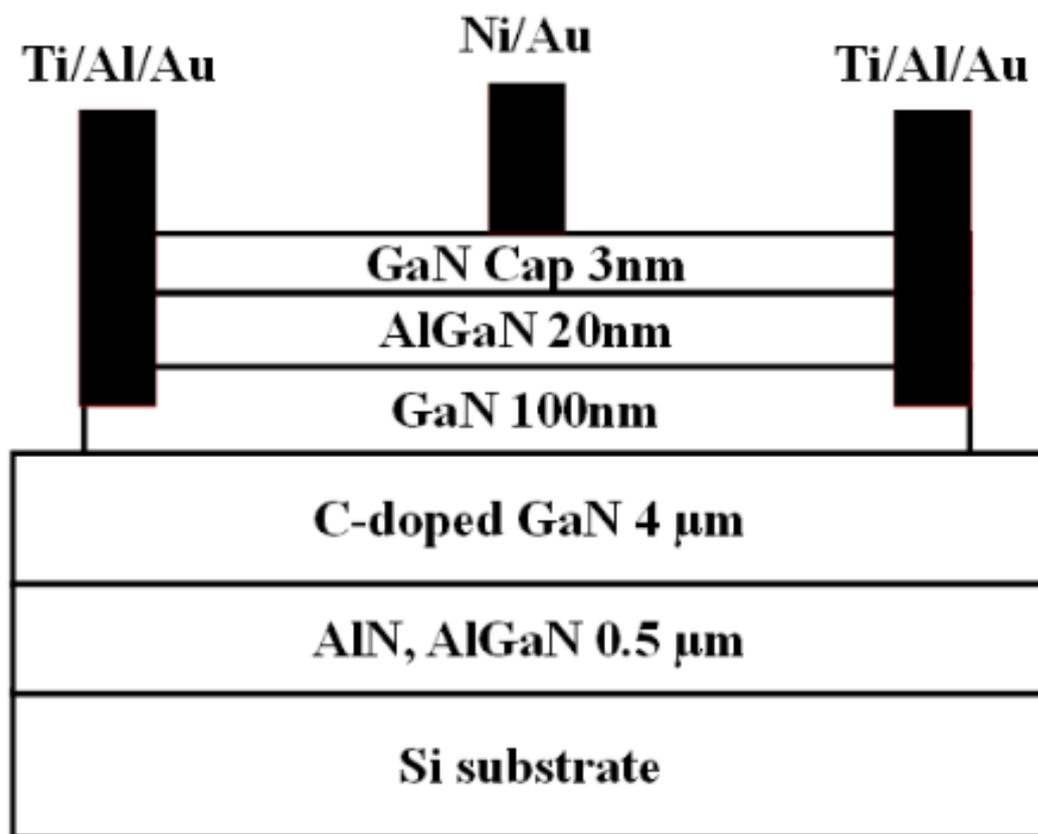


Figure 2-2 The comparisons of bandgaps energy and lattice constant of various binary semiconductors.

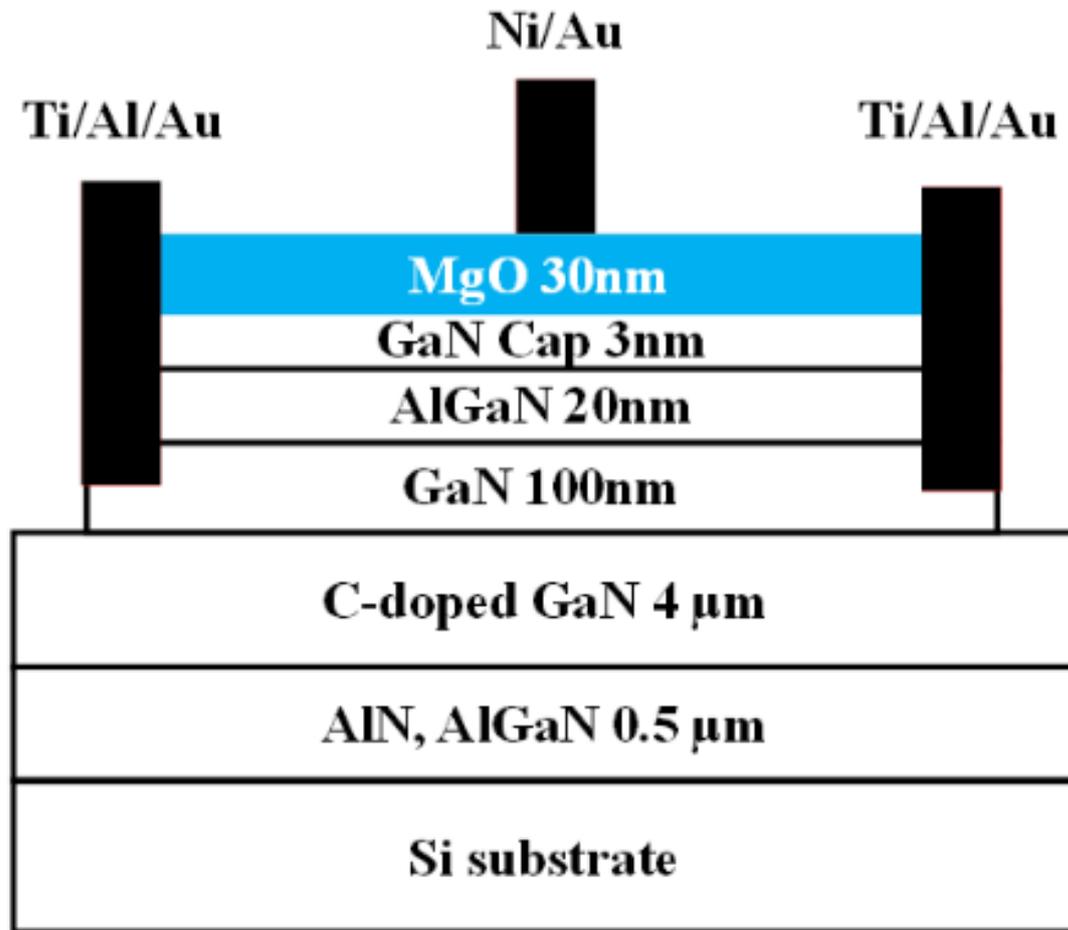
具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體



Gate Dimension: $1 \times 100 \mu\text{m}^2$

Figure 3-1 The cross-sectional GaN/ AlGaN/GaN structure of conventional HEMT.

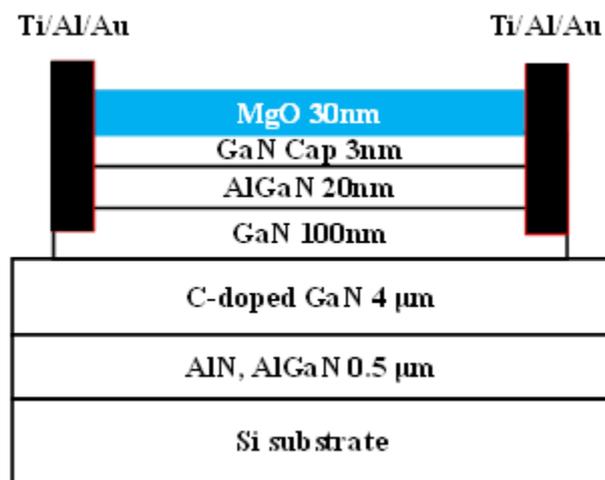
具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體



Gate Dimension: $1 \times 100 \mu\text{m}^2$

Figure 3-2 The cross-sectional GaN/ AlGaN/GaN structure of MgO MOS-HEMT.

Figure 3-3 A Conventional HEMT device of fabrication process.



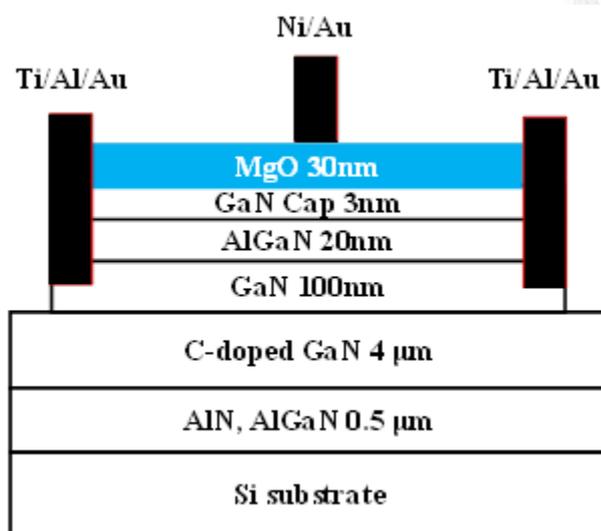
Step 1-3

Step 6

◆ Gate Oxide Deposition by USPD

◆ S/D Photolithography

◆ MgO Remove by H_3PO_4



Step 7

◆ Gate Photolithography

◆ Evaporate Ni/Au and Lift-off

◆ Gate Schottky Contact

Figure 3-4 A MOS-HEMT device of fabrication process.

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

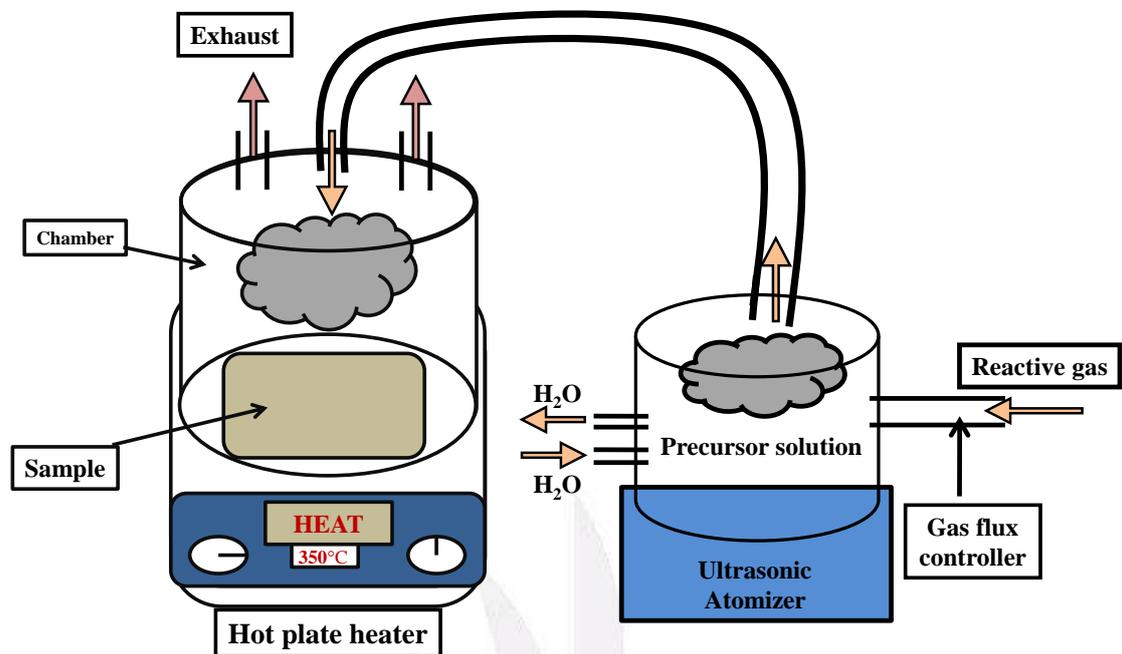


Figure 3-5 Schematic diagram of the ultrasonic spray pyrolysis technology.

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

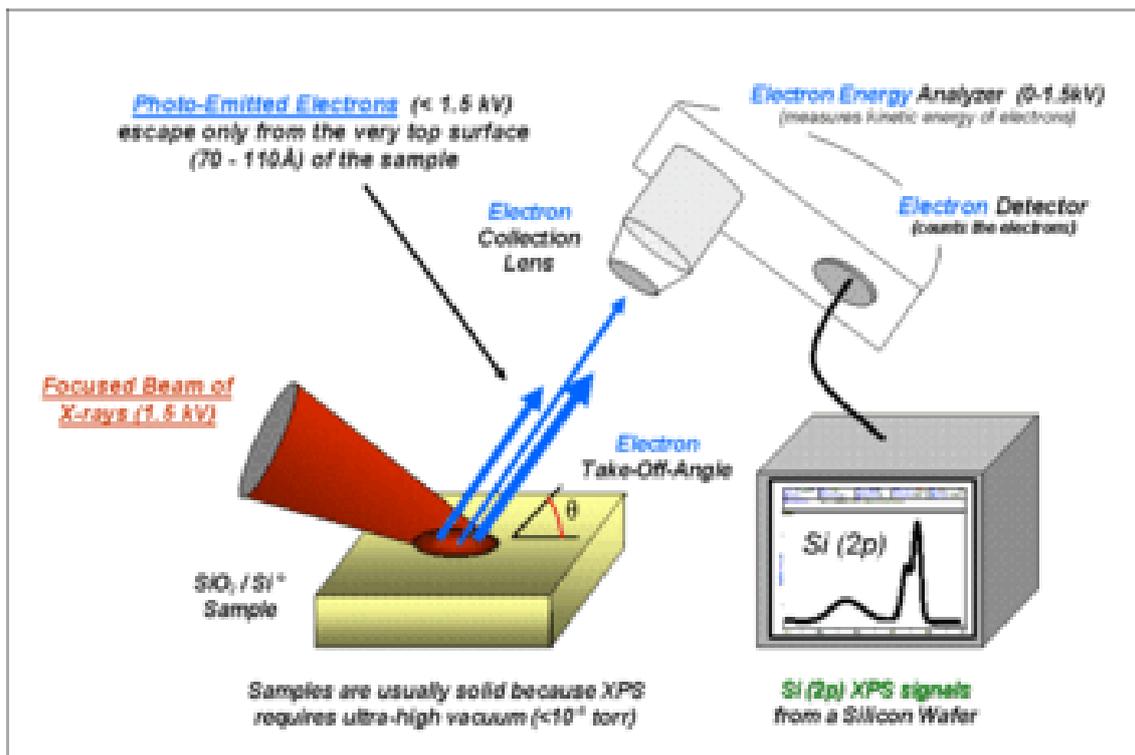


Figure 4-1 Structure of XPS measurement system.

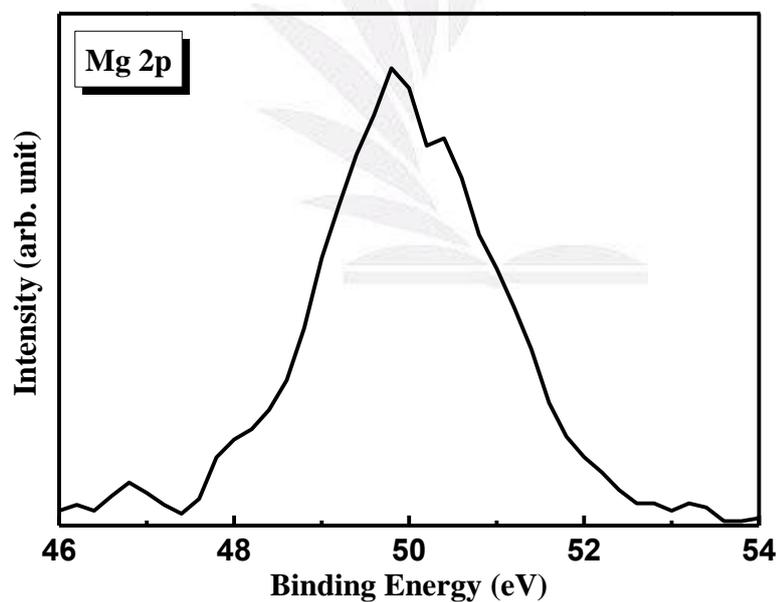


Figure 4-2 X-ray Photoelectron Spectrometer spectra of Mg.

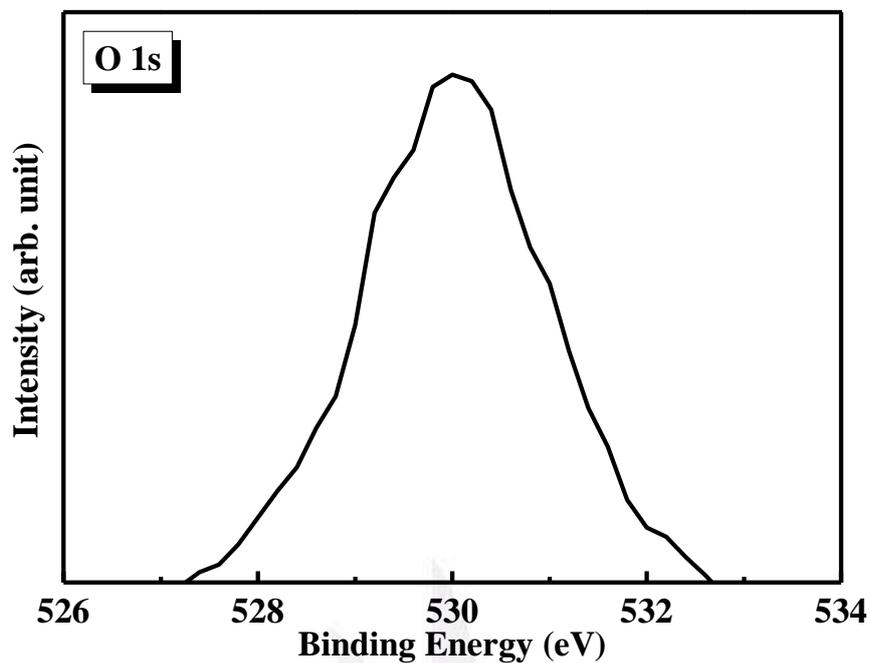


Figure 4-3 X-ray Photoelectron Spectrometer spectra of O.

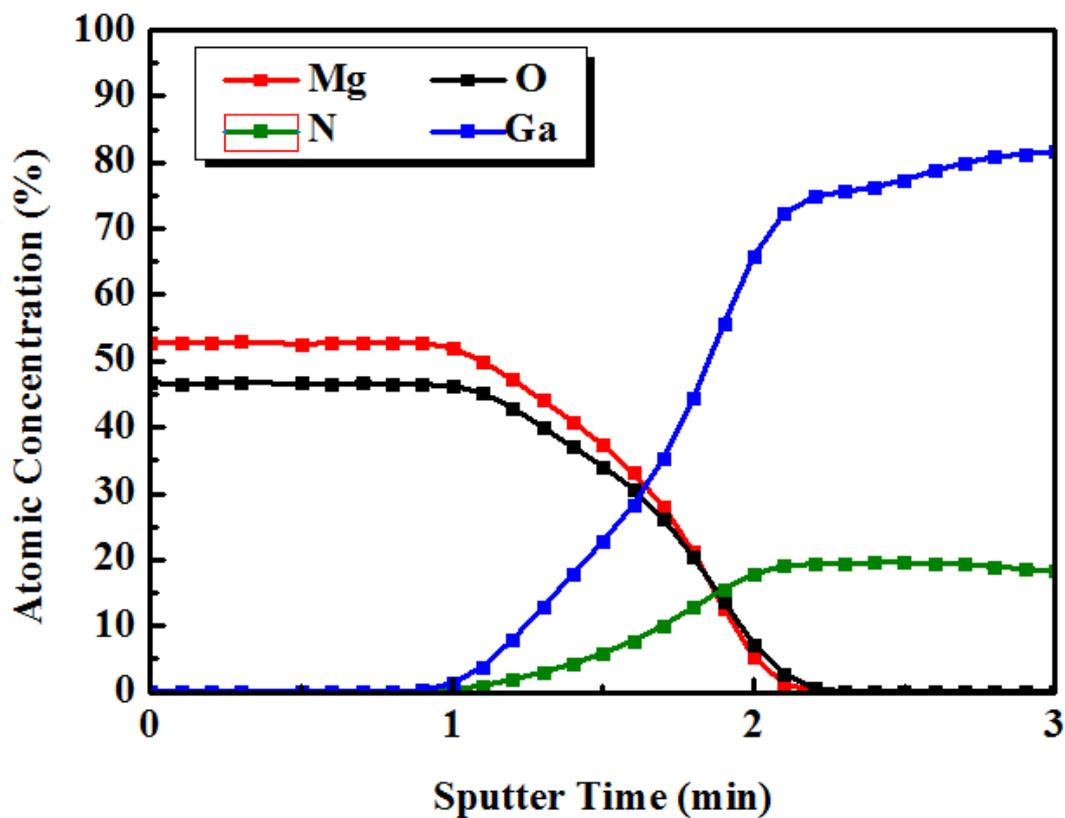


Figure 4-4 he depth profile of devices.

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

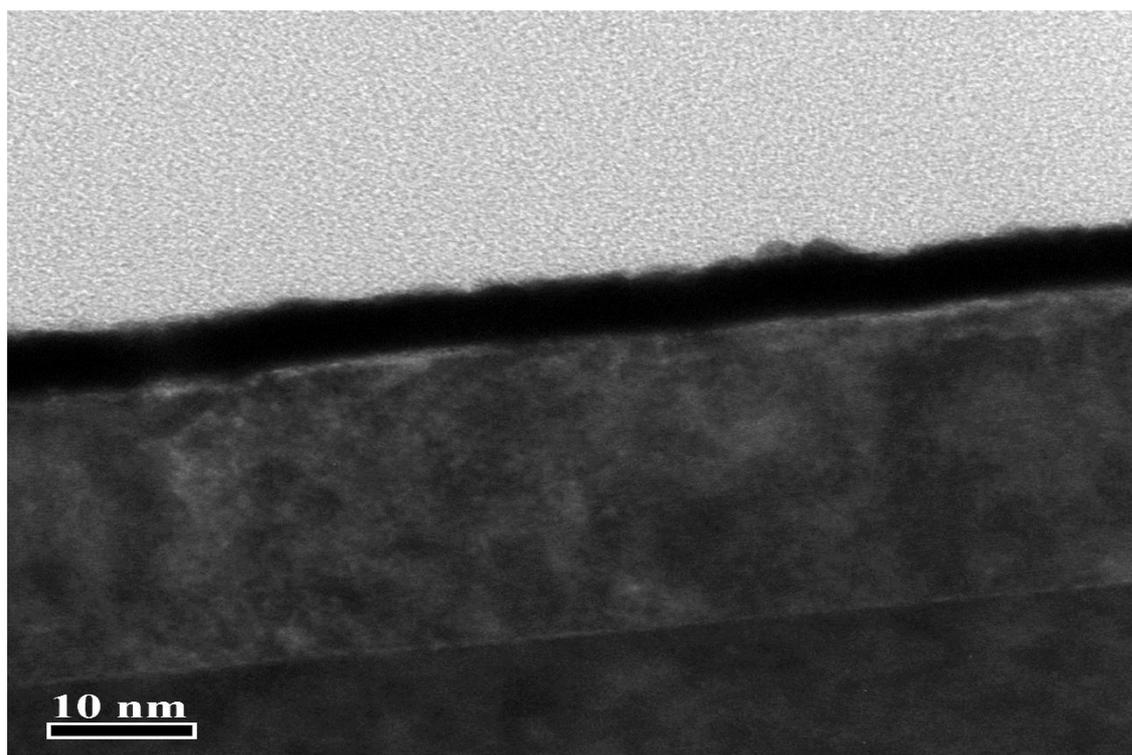


Figure 4-5 TEM analysis of MgO film.

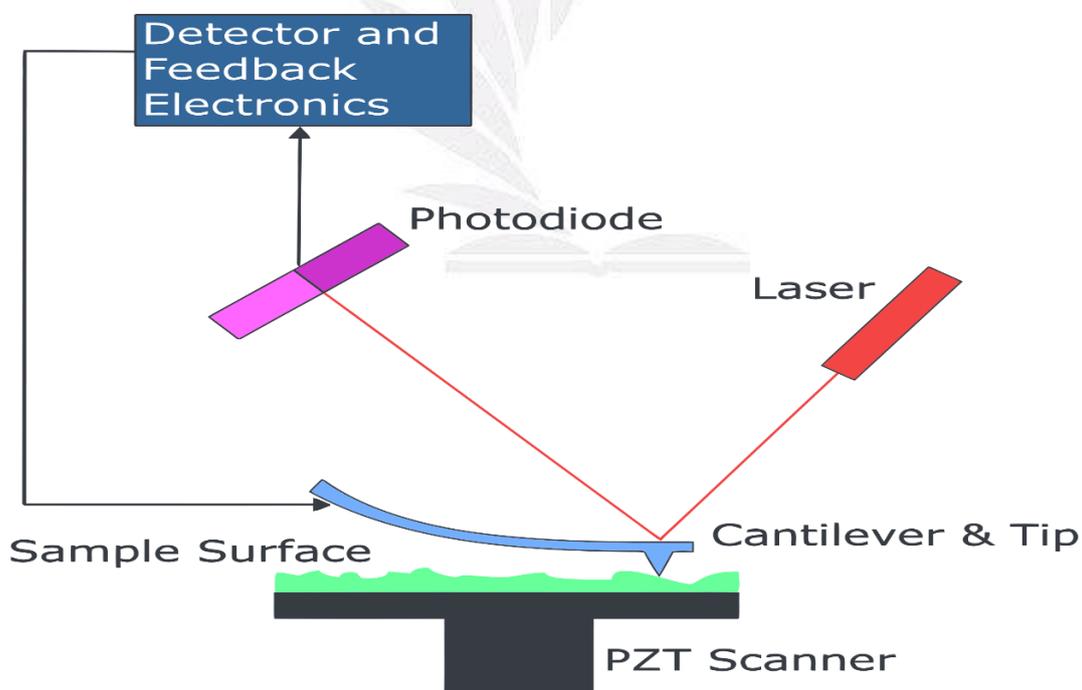


Figure 4-6 Structure of atomic force microscopy measurement system.

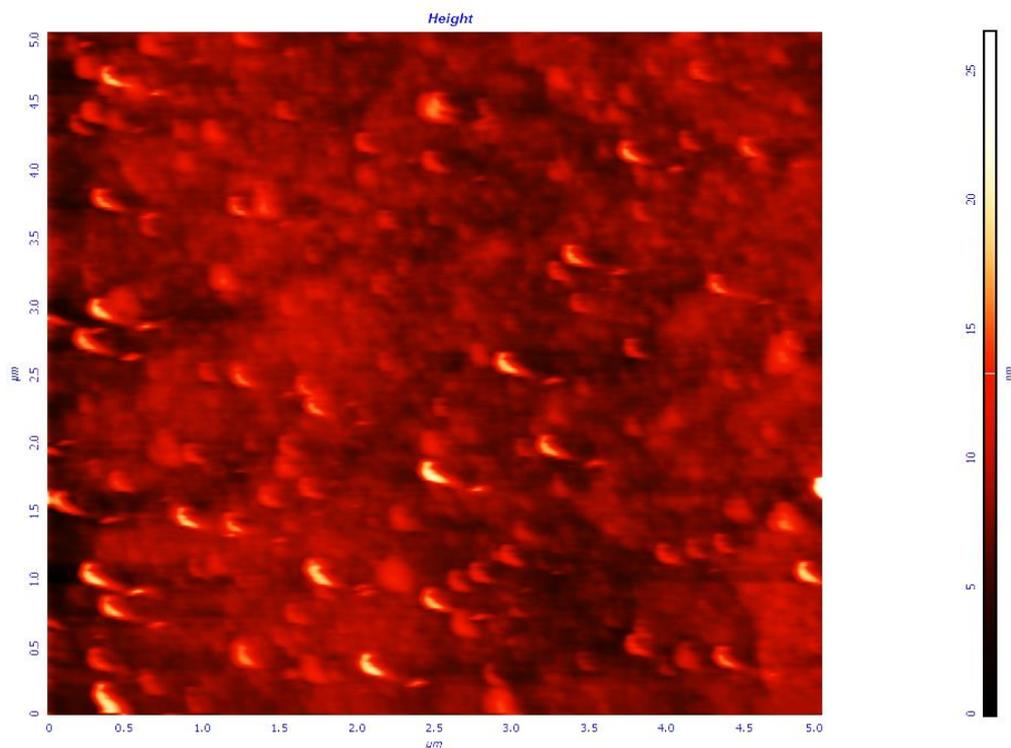


Figure 4-7 AFM analysis of two dimension MgO film.

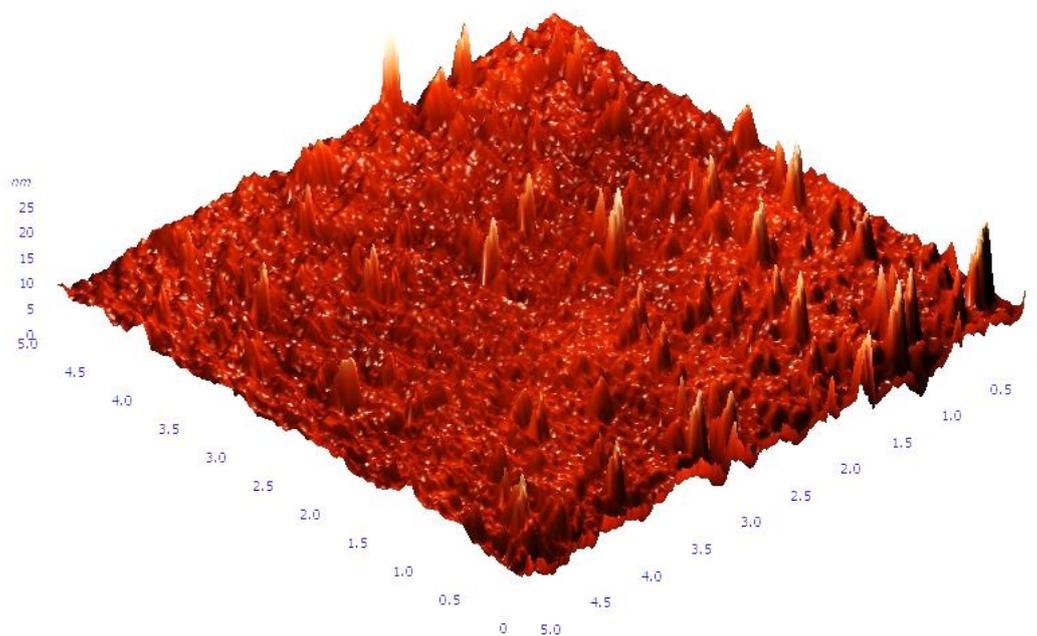


Figure 4-8 AFM analysis of three dimension MgO film.

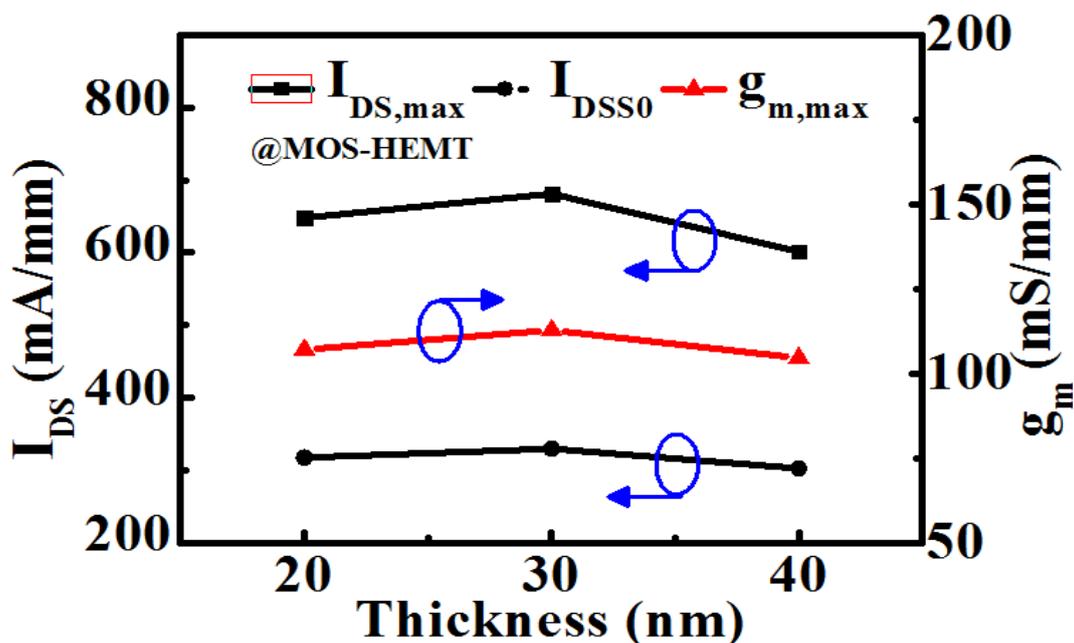


Figure 4-9 Summary of USPD treatment thickness optimization transfer characteristics for MOS-HEMT.

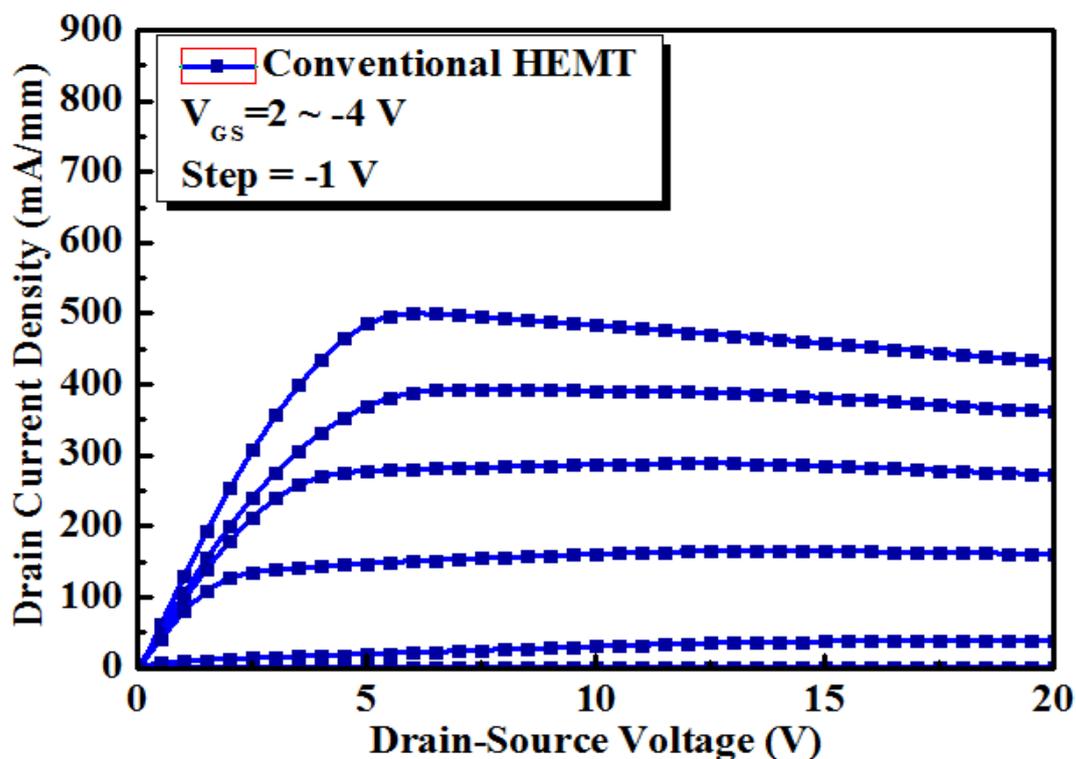


Figure 4-10 Current-Voltage characteristics of the conventional HEMT at room temperature

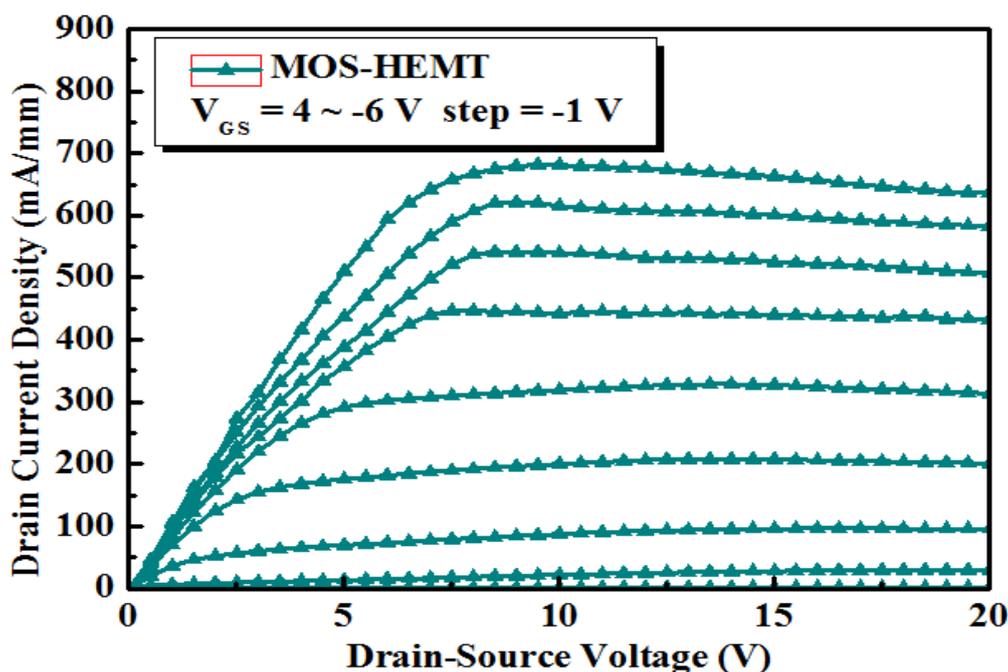


Figure 4-11 Current-Voltage characteristics of the MgO MOS-HEMT at room temperature.

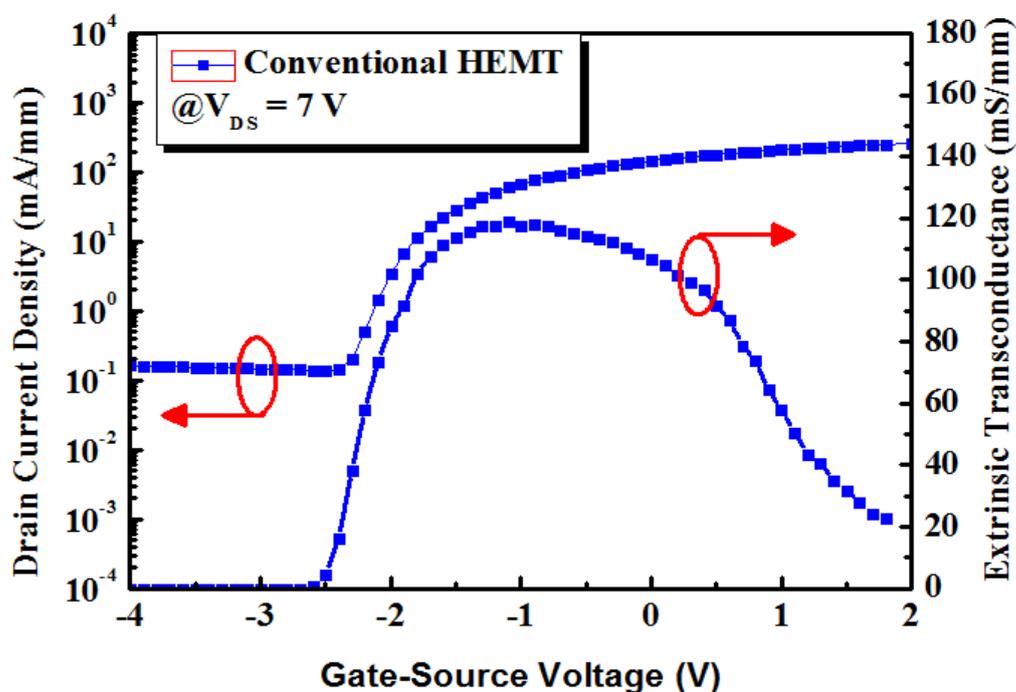


Figure 4-12 Extrinsic transconductance (g_m) and the drain leakage current (I_{DS}) of the conventional HEMT at room temperature.

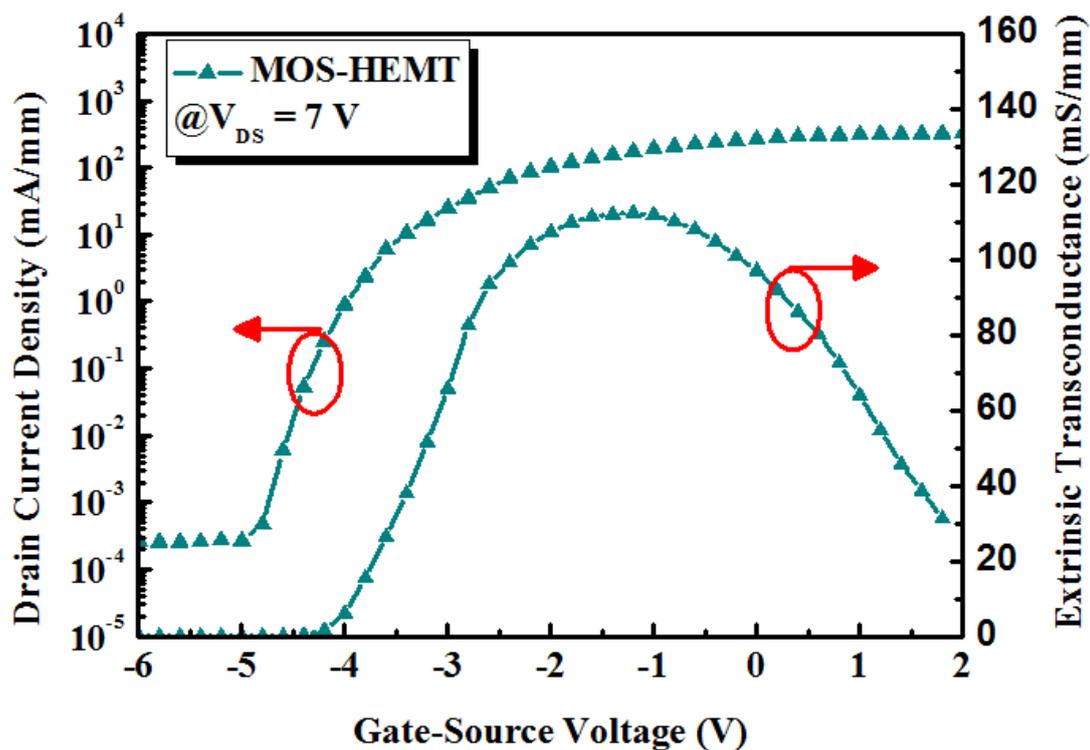


Figure 4-13 Extrinsic transconductance (g_m) and the drain leakage current (I_{DS}) of the MOS-HEMT at room temperature.

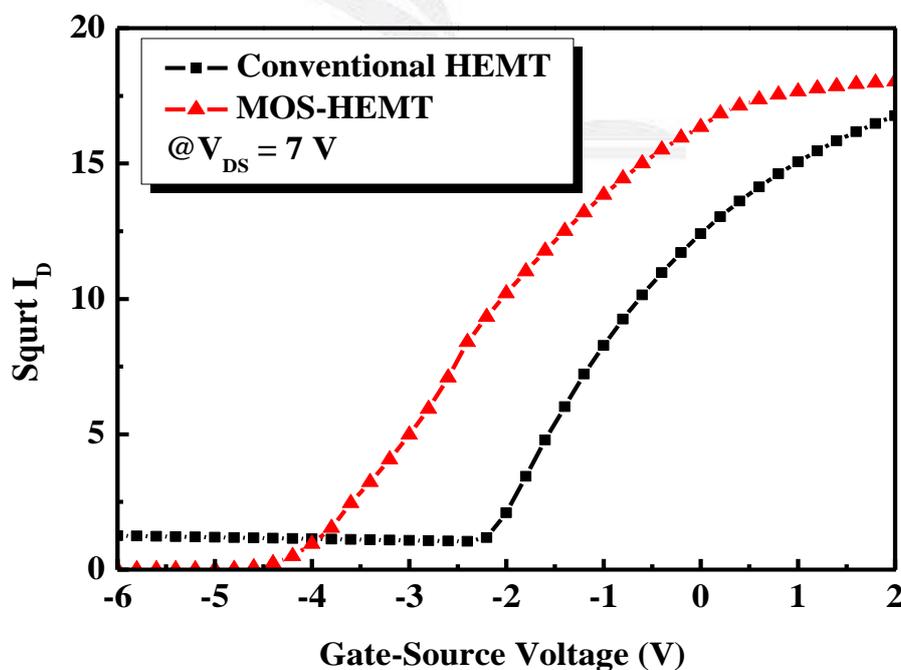


Figure 4-14 The threshold voltage (V_{th}) characteristics of all devices.

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

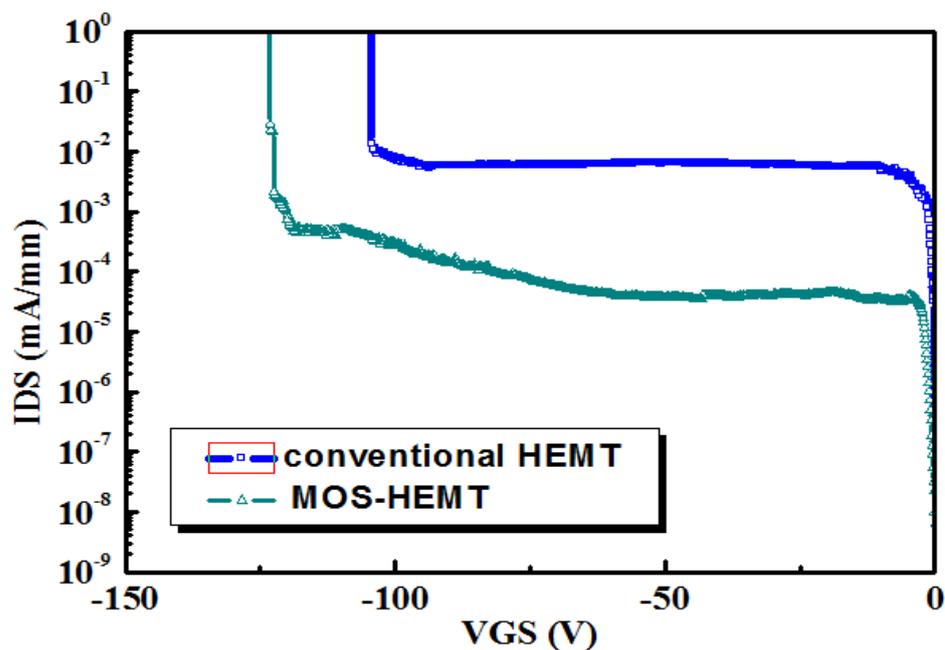


Figure 4-15 Two-terminal off state gate-drain breakdown voltage (BV_{GD}) characteristics of all devices.

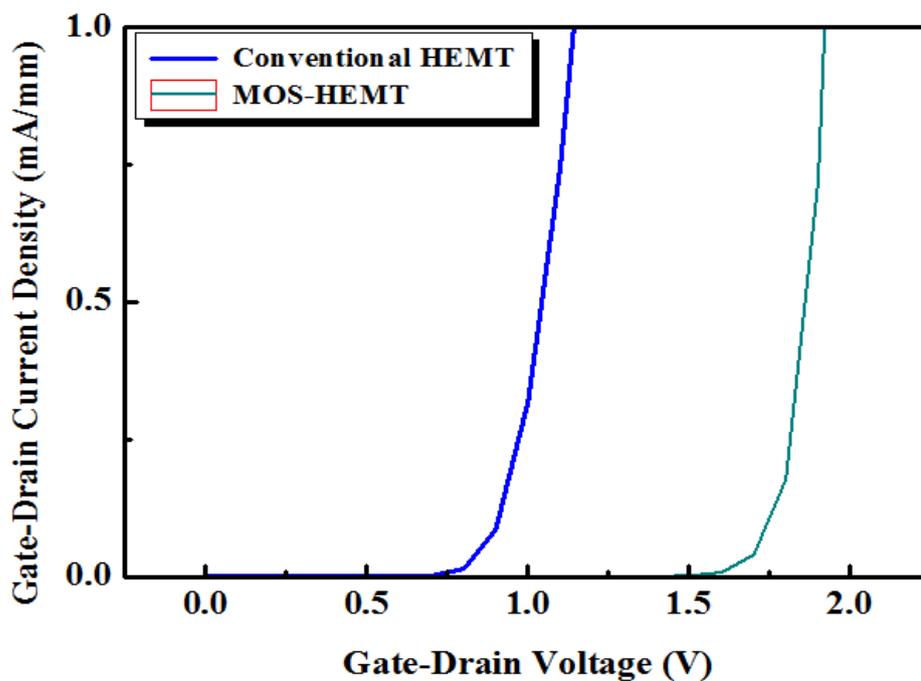


Figure 4-16 Two-terminal off state gate-drain turn-on voltage (V_{on}) characteristics of all devices.

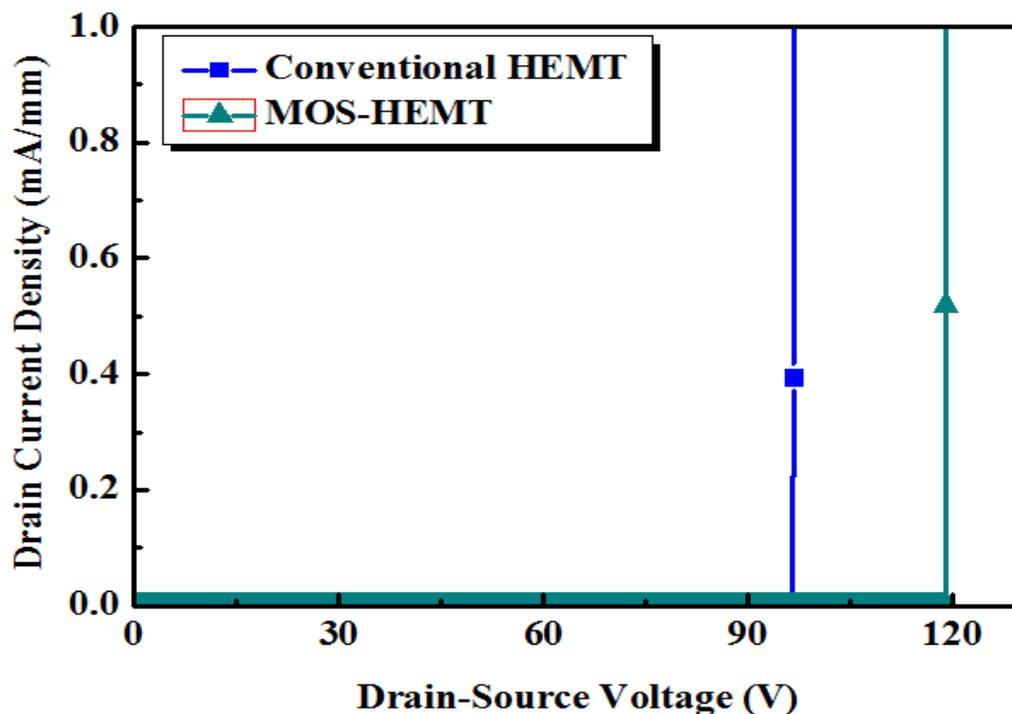


Figure 4-17 Three-terminal off-state breakdown voltage (BV_{off}) characteristics of all devices.

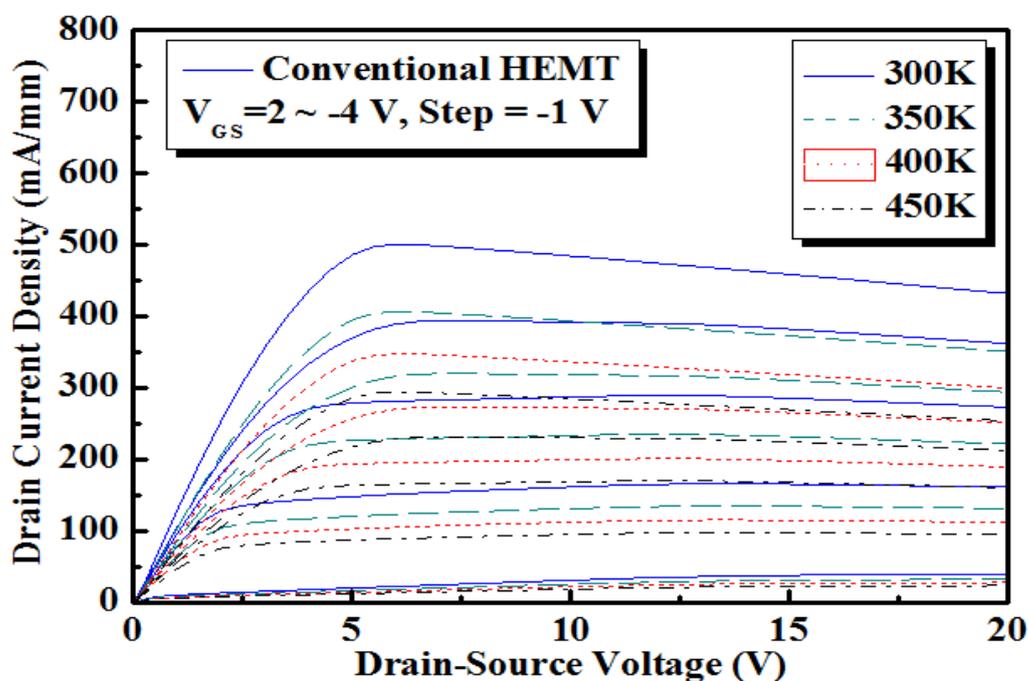


Figure 4-18 Temperature-dependent DC characteristics of the conventional HEMT from 300 K to 450 K.

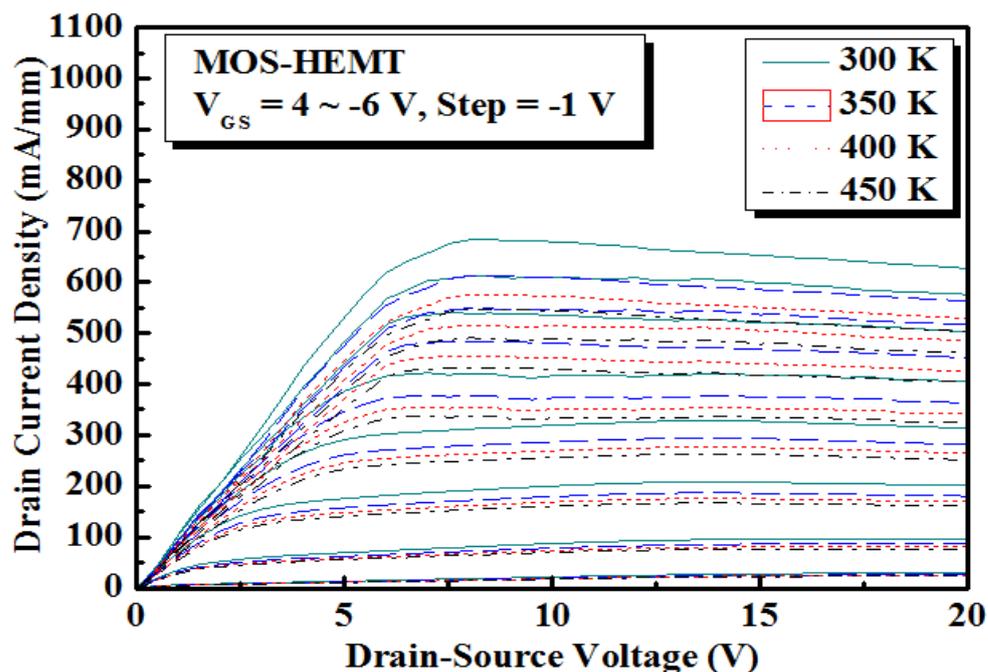


Figure 4-19 Temperature-dependent DC characteristics of the MOS-HEMT from 300 K to 450 K.

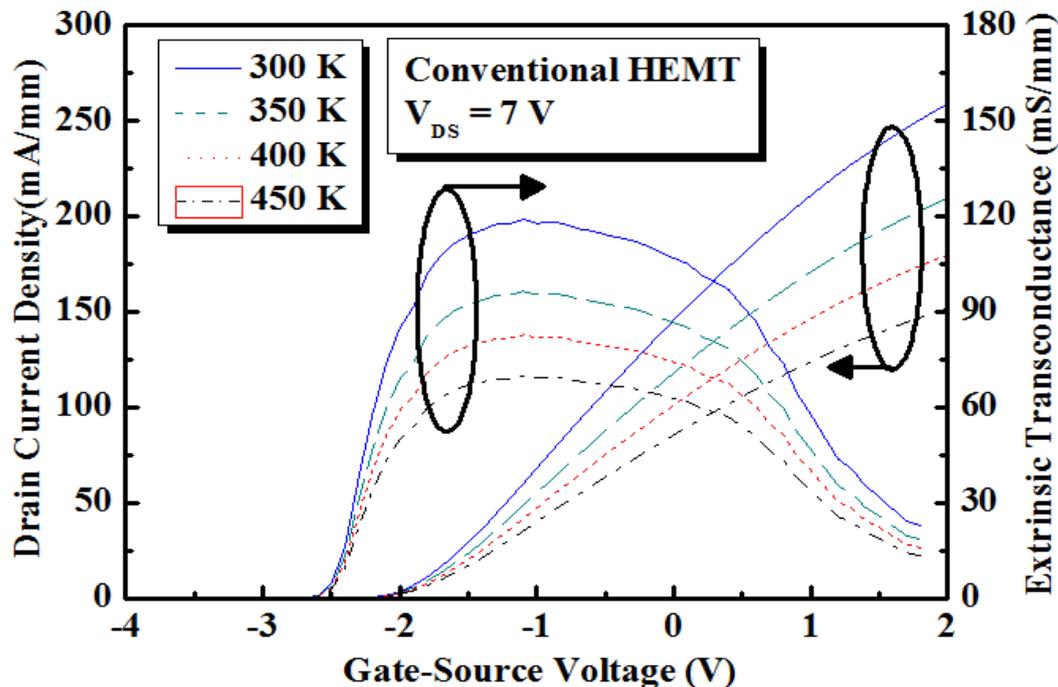
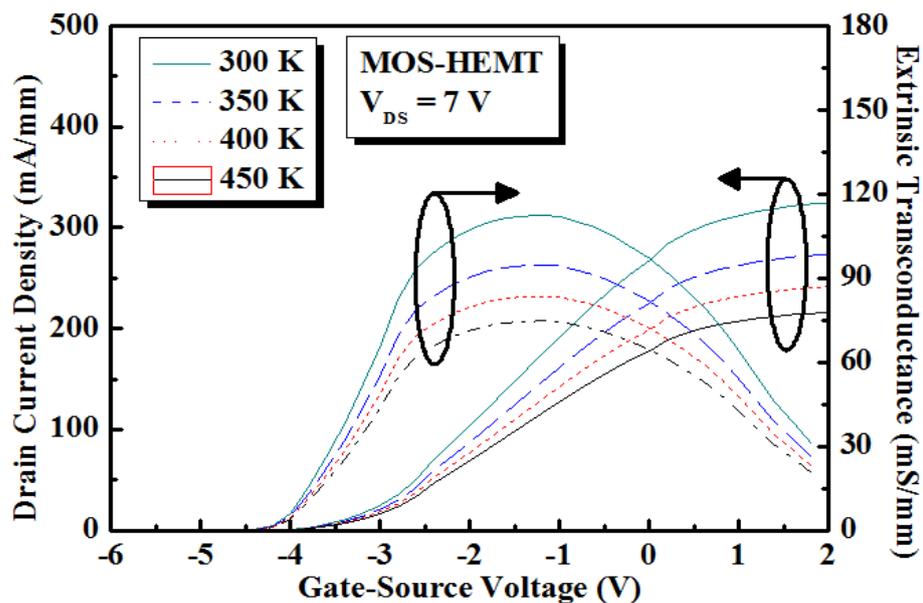


Figure 4-20 Extrinsic transconductance and saturation drain current density of the conventional HEMT from 300 K to 450 K.



Figure

4-21 Extrinsic transconductance and saturation drain current density of the MOS-HEMT from 300 K to 450 K.

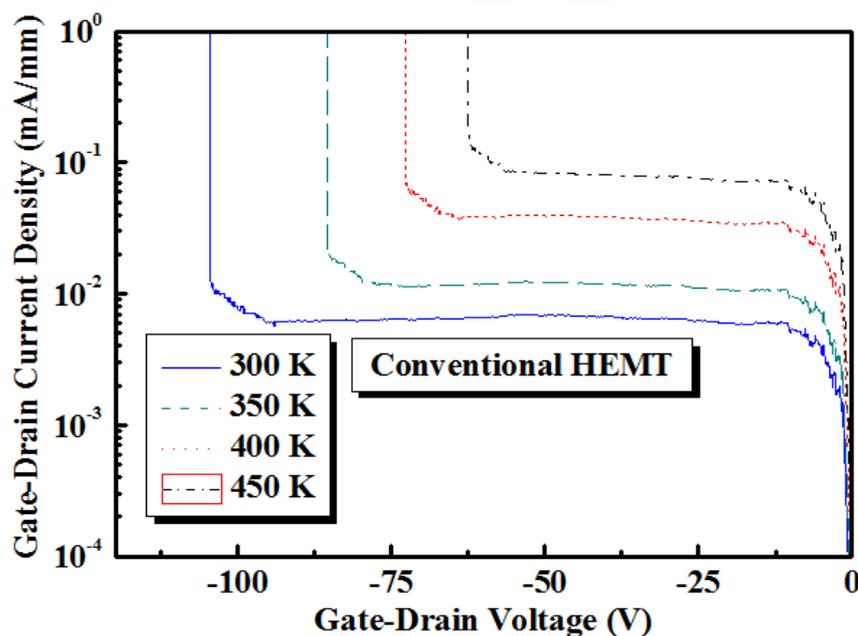


Figure 4-22 Temperature-dependent two-terminal breakdown characteristics of the conventional HEMT from 300 K to 450 K.

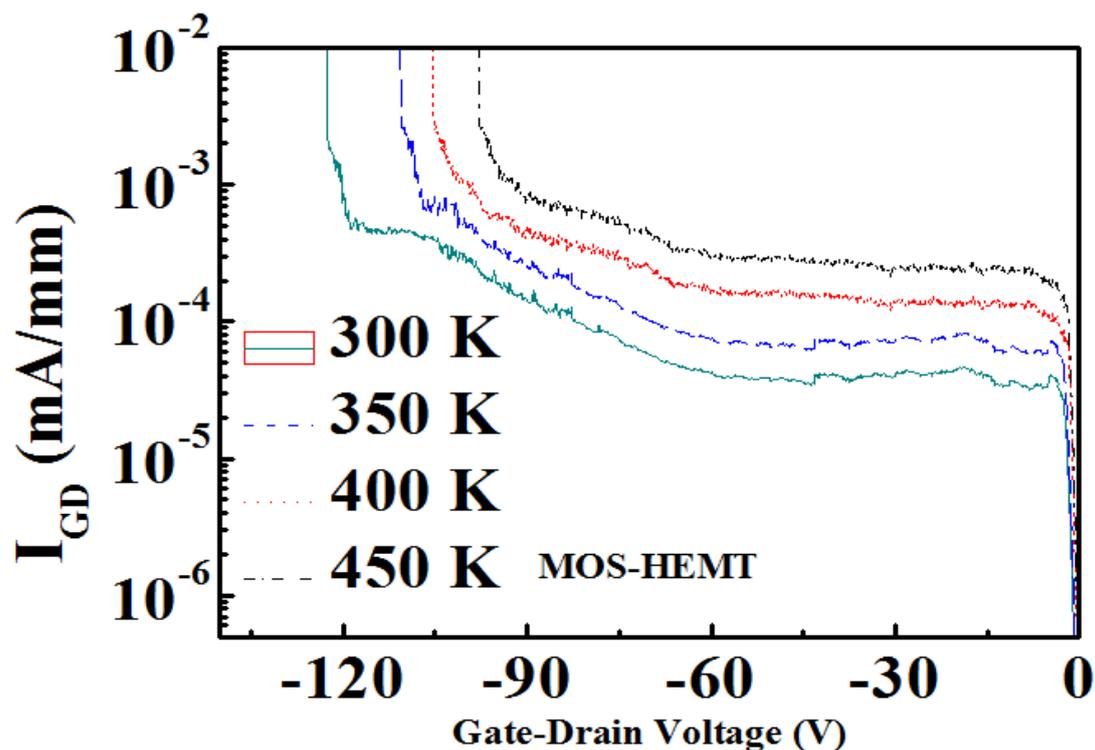


Figure 4-23 Temperature-dependent two-terminal breakdown characteristics of the MOS-HEMT from 300 K to 450 K.

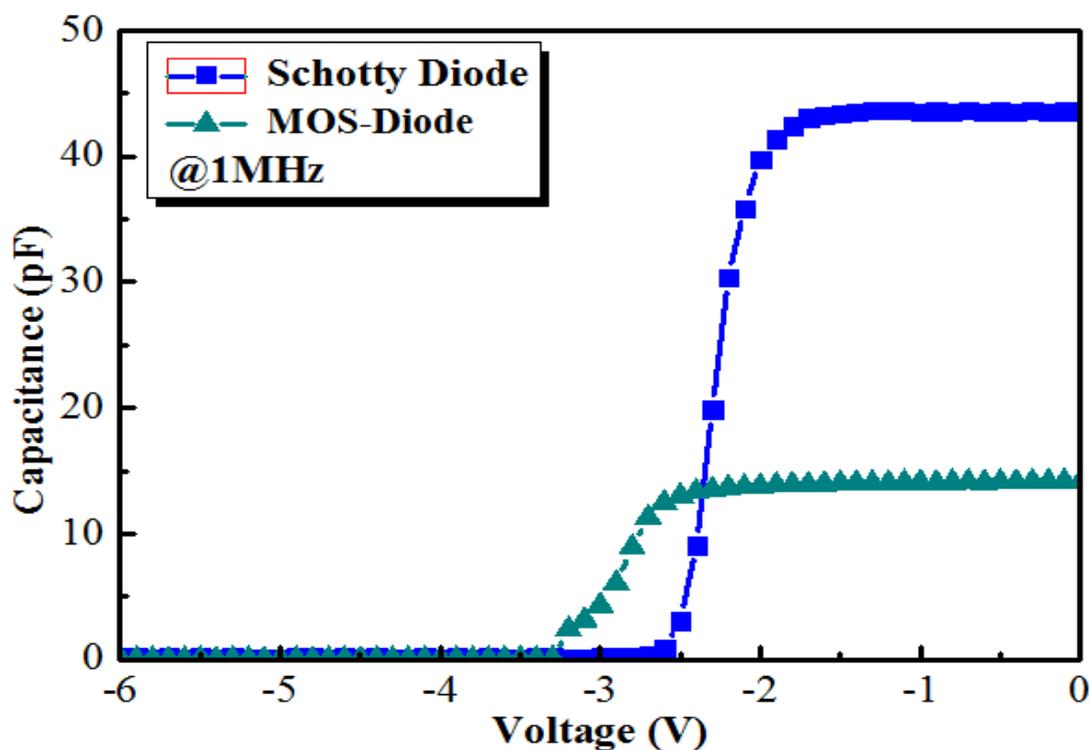


Figure 4-24 Capacitance voltage characteristics of all devices.

具有氧化物閘極介電層之氮化鎵/氮化鋁鎵：金屬-氧化物-半導體閘極結構之高電子遷移率電晶體

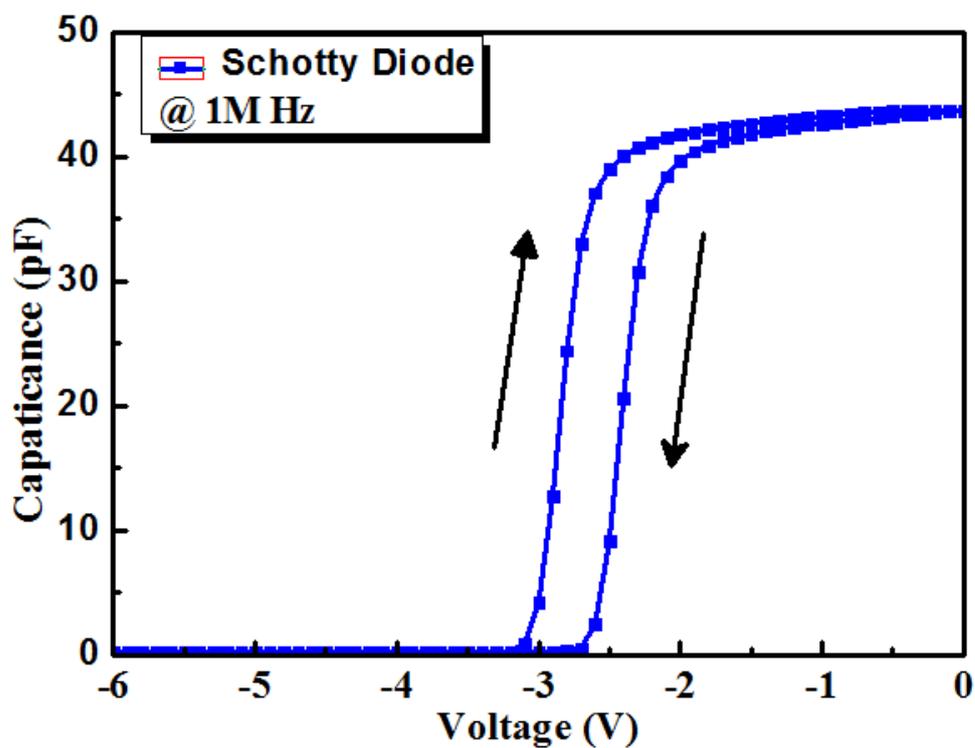


Figure 4-25 Hysteresis of metal-semiconductor (M-S) Schottky diode.

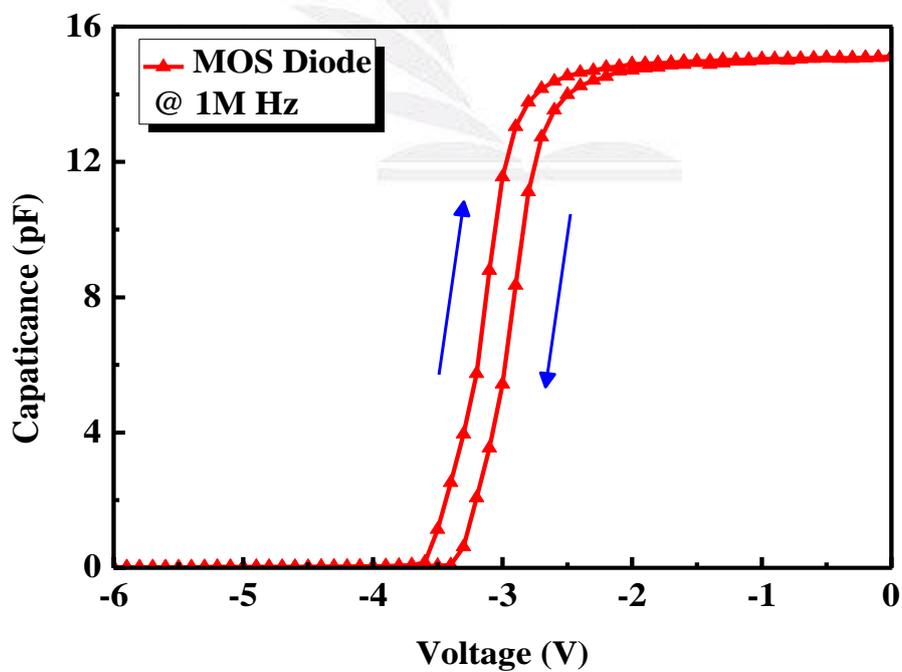


Figure 4-26 Hysteresis of metal-oxide-semiconductor (M-O-S) diode.

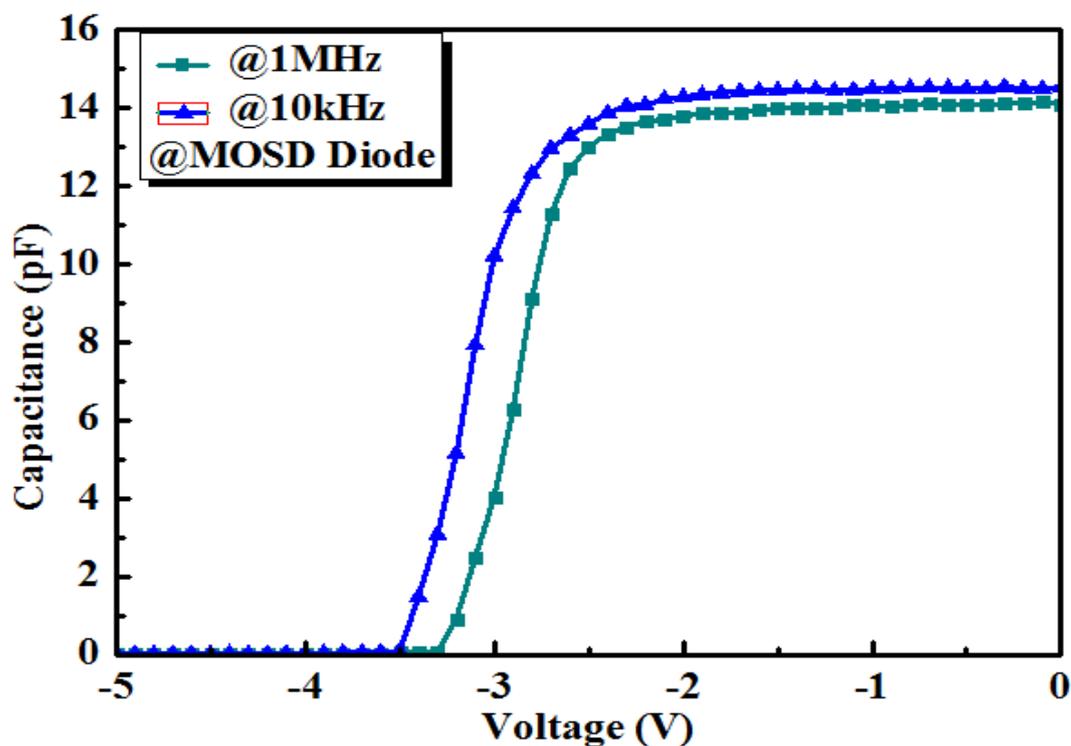


Figure 4-27 Capacitance-voltage characteristics of MOS diode, the inset shows the calculated D_{it} -V characteristics.

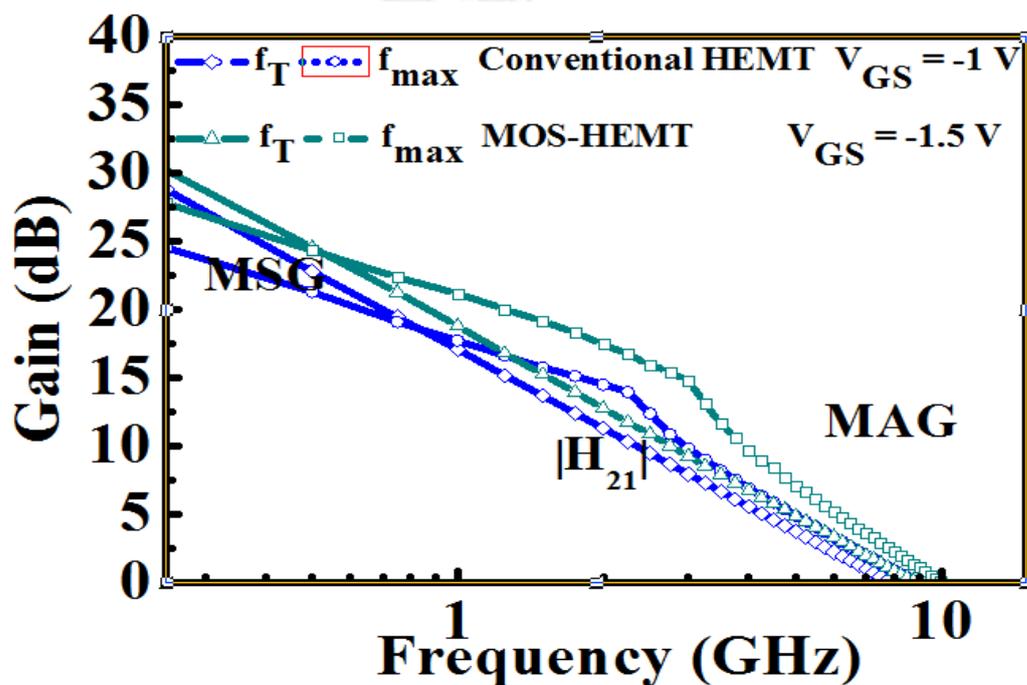


Figure 4-28 f_T and f_{max} characteristics of all devices.

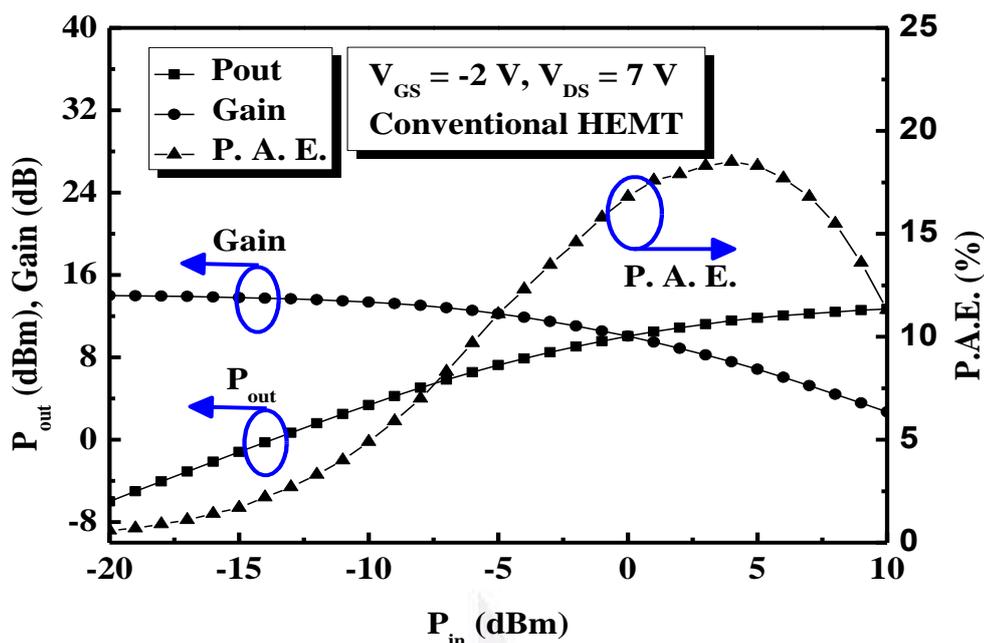


Figure 4-29 The power-added-efficiency (P. A. E.), output power (P_{out}), associated gain (G_a) characteristics at 2.4 GHz for conventional HEMT.

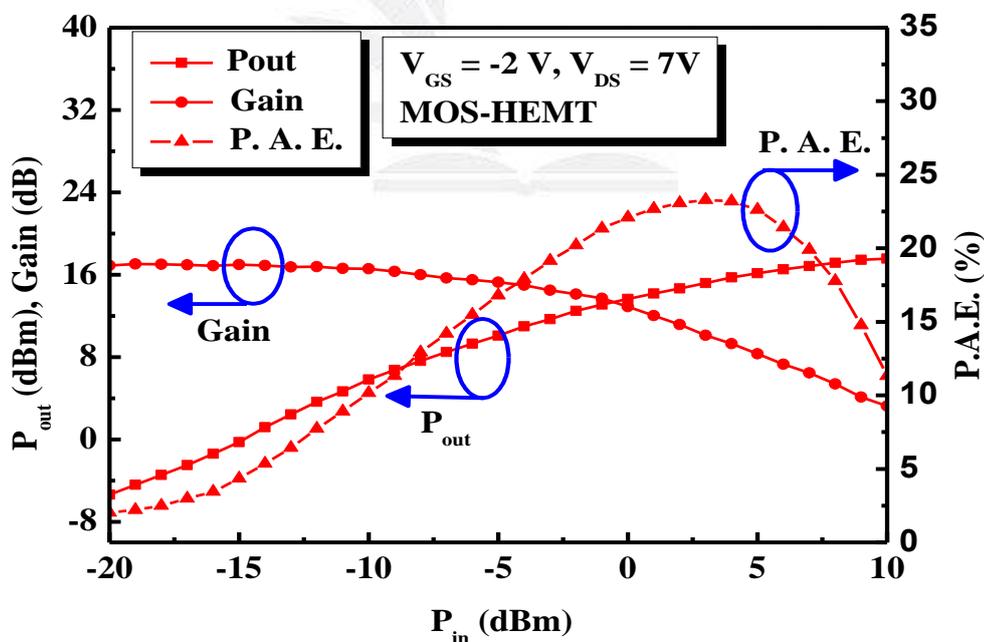


Figure 4-30 The power-added-efficiency (P. A. E.), output power (P_{out}), associated gain (G_a) characteristics at 2.4 GHz for MOS-HEMT.

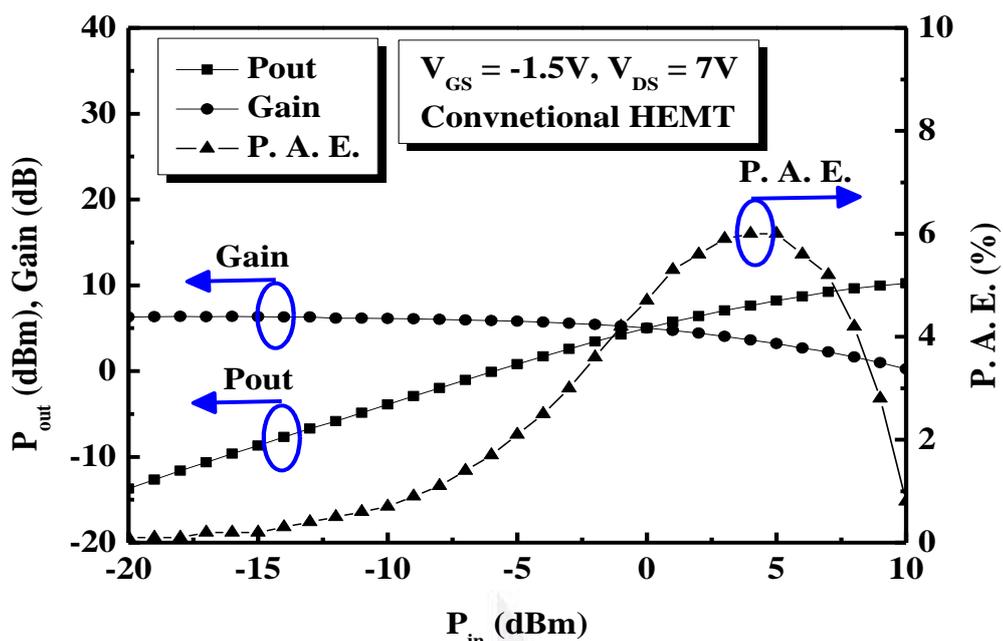


Figure 4-31 The power-added-efficiency (P. A. E.), output power (P_{out}), associated gain (G_a) characteristics at 5.8 GHz for conventional HEMT.

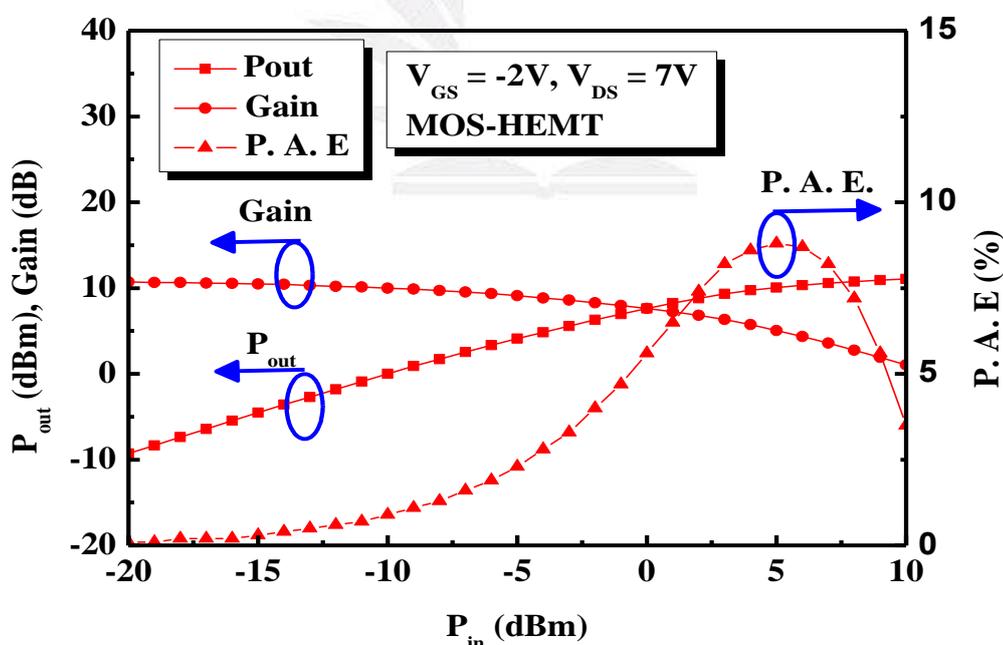


Figure 4-32 The power-added-efficiency (P. A. E.), output power (P_{out}), associated gain (G_a) characteristics at 5.8 GHz for MOS-HEMT.

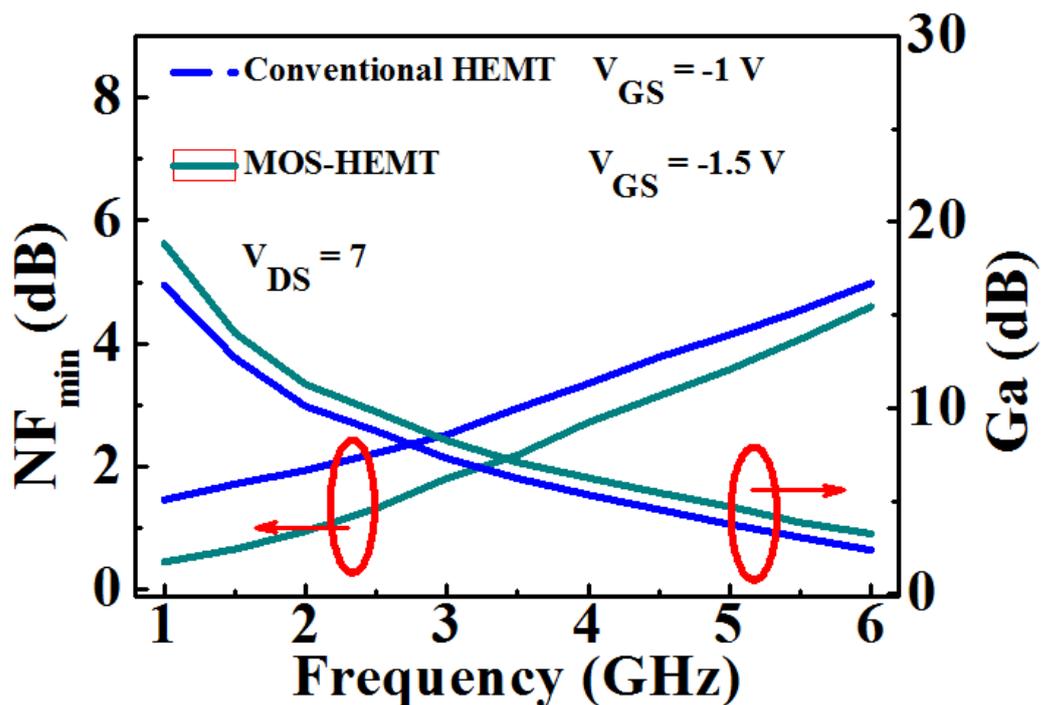


Figure 4-33 The minimum noise figure (NF_{min}) and associated gain (G_a) characteristics versus frequencies of all devices.

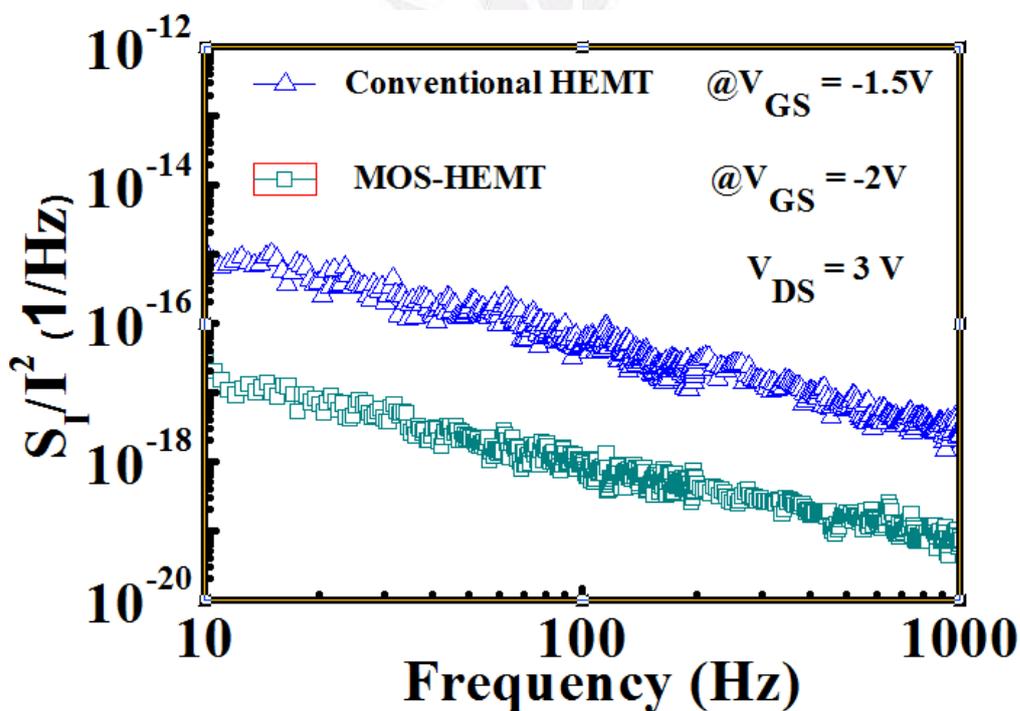


Figure 4-34 Low frequency noise characteristics versus frequency of all devices.

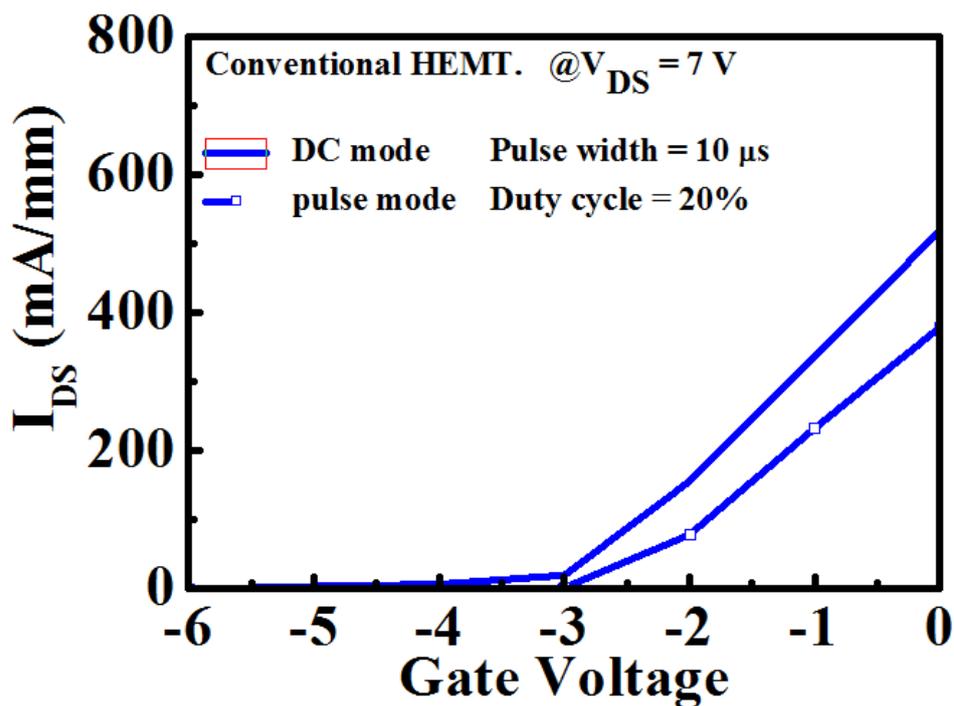


Figure 4-35 The CW and pulse characteristics of conventional HEMT.

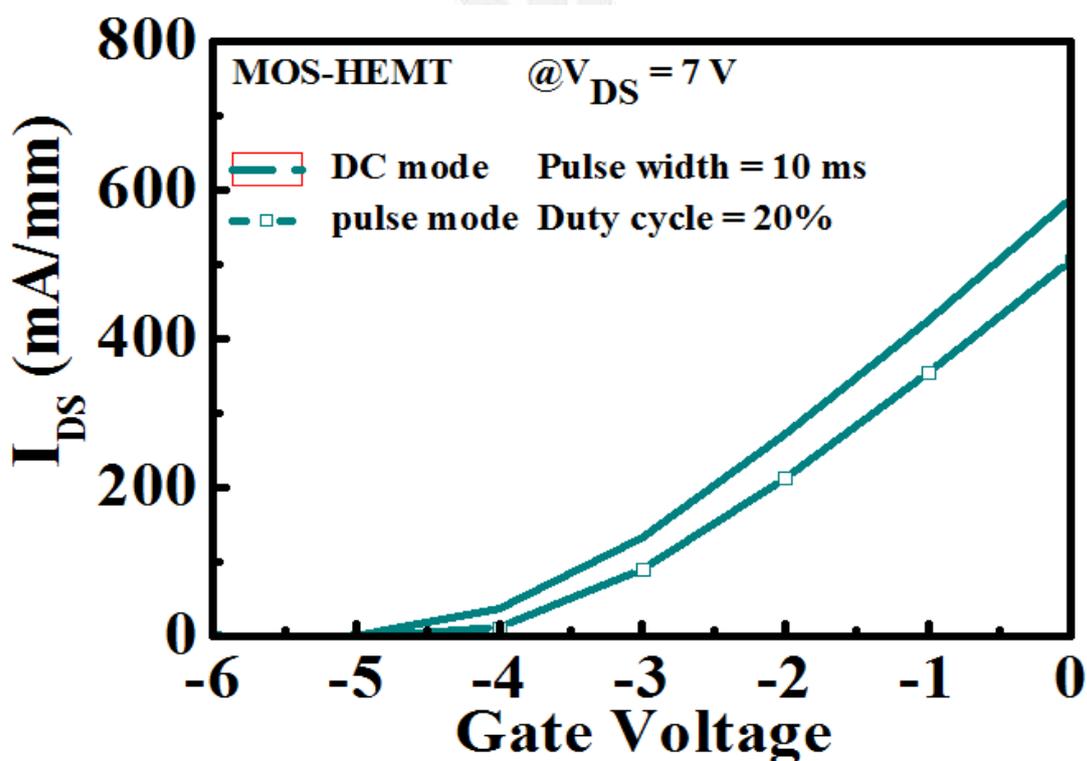


Figure 4-36 The CW and pulse characteristics of MOS-HEMT.