

逢甲大學學生報告 ePaper

具有氧化鋁/二氧化鈦鈍化層氮化銦鋁/氮化鋁/
氮化鎵 Γ -閘極結構金屬-氧化物-半導體
場效異質結構電晶體研製
 Al_2O_3 -Dielectric InAlN/AlN/GaN Γ -Gate
MOS-HFETs With Composite $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$
Passivation Oxides

作者：簡于勝、鄭致棕

系級：電子四甲

學號：D0545152、D0545238

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：108 學年度 第 1 學期



中文摘要

本專題分別使用超音波噴霧熱裂解沉積法/RF 濺鍍形成的具有複合氧化鋁/二氧化鈦鈍化氧化物的新型氧化鋁-電介質氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵 Γ -閘極金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體 (MOSHFET)，本專題亦使用場板結構，分散汲極電場，因而提升元件崩潰特性，以及使用高 k 值閘極介電層改善閘極絕緣能力並達到鈍化表面缺陷的效果，以提升元件工作性能。 Γ -閘極包括在氧化鋁電介質上的 1 微米長的有源閘極和複合氧化鋁/二氧化鈦氧化物上的 1 微米長的場板。

目前的 Γ -閘極金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體具有優異的導通/截止電流比(I_{on}/I_{off}) 8.2×10^{10} ，次臨界擺幅 102.3 mV/dec，最大外部跨導 ($g_{m,max}$) 210.1 mS/mm，最大汲極-源極飽和電流密度 ($I_{DS,max}$) 為 868.3 mA/mm，雙端斷態閘極-汲極崩潰電壓 (BV_{GD}) 為 -311.2V，三端汲極-源極崩潰電壓(BV_{DS})為 237V 在 $V_{GS} = -10V$ 時，2.4 GHz 時的功率附加效率為 39.9 %。為提供相關特性比較，本專題同時研製具有傳統蕭特基閘極平面結構、具有氧化鋁閘極介電層閘極結構、具有二氧化鈦閘極介電層閘極結構、具有場板-氧化鋁-二氧化鈦閘極介電層閘極結構以及具有場板-二氧化鈦-氧化鋁閘極介電層閘極結構之氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵金屬高電子遷移率電晶體，

具有氧化鋁/二氧化鈦鈍化層氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵 Γ -閘極結構金屬-氧化物-半導體場效異質結構電晶體研製

所獲致之直流特性分別為：最大飽和電流密度 $I_{DS,max}$ (544.2 mA/mm、815.7 mA/mm、868.3 mA/mm)，無閘極偏壓飽和電流密度 I_{DSS0} (291.1 mA/mm、256.3 mA/mm、670.4 mA/mm)，最大外質轉導 $g_{m,max}$ (221.2 mS/mm、194.7 mS/mm、210.1 mS/mm)，閘極漏電流 I_g (1.4×10^{-2} mA/mm、 4.1×10^{-3} 、 5.1×10^{-9} mA/mm)，閘極-汲極兩端崩潰電壓 BV_{GD} (-126 V、-143.5 V、-311.1 V)。目前的設計顯示出卓越的直流/射頻元件性能，適用於高功率射頻電路應用。

實驗結果顯示，本專題所研製具有場極板-二氧化鈦-氧化鋁閘極介電層結構之氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵高電子遷移率電晶體，能有效改善元件直流特性，以及具有場極板提升元件的高壓特性。

關鍵字：場板、二氧化鈦、氧化鋁、超音波霧化熱裂解、氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵

Abstract

The thesis investigates field-plate- Al_2O_3 - TiO_2 -dielectric InAlN/ AlN / GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors(MOS-HEMTs) with planar structure by using the ultrasonic spray pyrolysis deposition (USPD) and sputter technique to deposit oxide layer. Due to the enhanced gate control, the DC characteristic of device has been effectively improved. Depositing the high-k aluminum dioxide and titanium dioxide as a gate-dielectric layer, the gate leakage reduced by gate insulation and surface passivation. The Γ -gate includes a 1- μm long active gate on the Al_2O_3 dielectric and a 1- μm long field-plate on the composite $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ oxides. The present Γ -Gate MOS-HEMT has demonstrated excellent on/off current ratio(I_{on}/I_{off}) 8.2×10^{10} , subthreshold swing of 102.3 mV/dec, maximum extrinsic transconductance of ($g_{m,max}$) of 210.1 mS/mm, maximum drain-source saturation current density ($I_{DS,max}$) of 868.3 mA/mm, two-terminal offstate gate-drain breakdown voltage (BV_{GD}) of -311.2 V, three-terminal drain-source breakdown voltage (BV_{DS}) of 237 V at $V_{GS} = -10\text{V}$, and power-added efficiency of 39.9% at 2.4 GHz.

Providing the comparison of the characteristics, In this thesis, schottky-HEMT, Al_2O_3 -MOS-HEMT, TiO_2 -MOS-HEMT, FP- Al_2O_3 - TiO_2 -MOS-HEMT, and FP- TiO_2 - Al_2O_3 -MOS-HEMT MOS Fin-HEMT have been achieved, including maximum drain-source saturation current density ($I_{DS,max}$) of 544.2 mA/mm, 810.4 mA/mm, 815.7 mA/mm, 858.2 mA/mm, and 868.3 mA/mm, drain-source current density at $V_{GS} = 0\text{V}$ (I_{DSS0}) of 291.1mA/mm, 331.3 mA/mm, 256.3mA/mm, 650.3 mA/mm, and 670.4 mA/mm, maximum extrinsic transconductance ($g_{m,max}$) of 212.2 mS/mm,

194.7 mS/mm and 210.1 mS/mm, gate leakage current (I_g) at $V_{GS} = -10V$ of sample A to sample C were 1.4×10^{-2} mA/mm, 4.1×10^{-3} mA/mm and 5.1×10^{-9} mA/mm, two-terminal off-state gate-drain breakdown voltage (BV_{GD}) of 126 V, -143.5 V and -311.1 V, respectively, at 300 K. The present design has shown superior DC/RF device performance. It is suitable for high-power RF circuit applications.

From the experiment results, the superior performance of FP-TiO₂Al₂O₃ metal-oxide-semiconductor HEMTs (MOS-HEMT) can be effectively improve DC characteristics by sputter and USPD technique, and the field plate structure not only decrease leakage current but increase breakdown voltage of device.

Keyword : aluminum dioxide, field plate, InAlN/AlN/GaN, TiO₂,
Ultrasonic spray pyrolysis deposition

目次

摘要	1
Abstract	3
表格目錄	7
圖形目錄	8
第1章 序論	11
第2章 氮化鎵鋁/氮化鋁/氮化鎵(InAlN/AlN/GaN)異質結構	13
2-1 氮化鎵鋁/氮化鋁/氮化鎵(InAlN/AlN/GaN)異質結構	13
2-2 場版結構	14
第3章 元件結構設計與元件製程	16
3-1 元件結構	16
3-2-1 高臺絕緣	16
3-2-2 源極和汲極的歐姆接觸	17
3-2-3 閘極蕭特基接觸	19
3-3 超音波噴霧熱裂解沉積(USPD)	20
3-4 濺鍍	20
第4章 結果與討論	21
4-1 材料分析	21
4-1-1 穿透式電子顯微鏡(TEM)	21

4-1-2 能量色散 X 射線光譜(EDS)	22
4-2 電容-電壓特性	22
4-2-1 遲滯現象	23
4-2-2 表面狀態密度 (D_{it})	24
4-3 轉換特性	25
4-4 低頻雜訊特性	26
4-5-1 雙端崩潰電壓特性	27
4-5-2 三端截止崩潰電壓特性	27
4-6-1 與溫度相關的輸出特性	29
4-6-2 與溫度相關的崩潰特性	30
4-7-1 功率特性	31
4-7-2 高頻雜訊特性	32
第5章 結論	34
參考	36
圖形	39

表格目錄

表 2-1 基板的比較-----	14
表 4-1 氧化物厚度-----	21
表 4-2 氧化物結構-----	22
表 4-3 所有樣品的電容特性-----	23
表 4-4 所有樣品的遲滯特性-----	24
表 4-5 所有樣品的 D_{it} -V 特性-----	24
表 4-6 轉換特性總結-----	26
表 4-7 樣品 A-C 的 DC 特性-----	28
表 4-8 傳統 HEMT(樣品 A)300K-450K 與溫度相關的 DC 特性-----	29
表 4-9 TiO_2 -MOS-HEMT(樣品 B) 300K-450K 與溫度相關的 DC 特性-- -----	29
表 4-10 TiO_2 - Al_2O_3 - MOS-HEMT (樣品 C) 300K-450K 與溫度相關的 DC 特性-----	30
表 4-11 傳統 HEMT(樣品 A) 300K-450K 與溫度相關的崩潰特性----	30
表 4-12 TiO_2 -MOS-HEMT (樣品 B) 300K-450K 與溫度相關的崩潰特 性-----	31
表 4-13 TiO_2 - Al_2O_3 -MOS-HEMT (樣品 C) 300K-450K 與溫度相關的崩 潰特性-----	31

表 4-14 所有樣本的功率特性-----32

表 4-15 所有樣品的雜訊特性-----33

圖形目錄

圖 2-1 各種二元半導體的能帶和晶格常數的比較-----39

圖 2-2 InAlN/AlN/GaN 異質結構能帶圖-----39

圖 3-1 傳統 HEMT 的蕭特基閘極， Al_2O_3 和 TiO_2 MOS 結構的 InAlN / AlN / GaN 截面圖-----40

圖 3-2 Al_2O_3 和 TiO_2 MOS HEMT 的 InAlN / AlN / GaN 的橫截面圖--41

圖 3-3 具有場板結構 Al_2O_3 和 TiO_2 MOS HEMT 的 InAlN / AlN / GaN 的橫截面圖-----41

圖 3-4 超音波噴霧熱裂解技術示意圖-----42

圖 4-1 TiO_2 薄膜的 TEM 分析-----43

圖 4-2 $\text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜的 TEM 分析-----44

圖 4-3 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 場板結構的 TEM 分析-----45

圖 4-4 Al_2O_3 薄膜的能量色散 X 射線光譜 (EDS) -----46

圖 4-5 TiO_2 薄膜的能量色散 X 射線光譜 (EDS) -----46

圖 4-6 蕭特基二極體的電容-電壓特性-----47

圖 4-7 Al_2O_3 MOS 二極體的電容-電壓特性-----47

圖 4-8 TiO ₂ MOS 二極體的電容-電壓特性-----	48
圖 4-9 1 MHz 時金屬-半導體 (M-S) 蕭特基二極體的遲滯現象-----	48
圖 4-10 1 MHz 時 TiO ₂ -MOS 二極體的遲滯現象-----	49
圖 4-11 1 MHz 時 Al ₂ O ₃ - TiO ₂ -MOS 二極體的遲滯現象-----	49
圖 4-12 TiO ₂ MOS 二極體的電容-電壓特性-----	50
圖 4-13 Al ₂ O ₃ -TiO ₂ MOS 二極體的電容-電壓特性-----	51
圖 4-14 TiO ₂ MOS 二極體的 D _{it} -V 特性-----	51
圖 4-15 Al ₂ O ₃ -TiO ₂ MOS 二極體的 D _{it} -V 特性計算-----	51
圖 4-16 比較樣品 A-C 的 1 / f 光譜-----	52
圖 4-17 室溫下蕭特基閘極和 MOS-HEMT 的外部轉導 (g _m) 和汲極漏電流 (I _{DS}) 和相關 I _{GS} 特徵-----	52
圖 4-18 室溫下 TiO ₂ -MOS-HEMT 的外部轉導(g _m)和汲極漏電流(I _{DS})和相關 I _{GS} 特徵-----	53
圖 4-19 室溫下 FP-TiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MOS-HEMT 的外部轉導 (g _m) 和漏極漏電流 (I _{DS}) 和相關 I _{GS} 特徵-----	53
圖 4-20 樣品 ABC 的截止狀態閘極-汲極崩潰電壓(BV _{GD})特性-----	54
圖 4-21 所有樣品的導通(V _{ON})特性-----	54
圖 4-22 樣品 A 的三端截止崩潰電壓(BV _{off})特性-----	55
圖 4-23 樣品 B 的三端截止崩潰電壓(BV _{off})特性-----	55

圖 4-24 樣品 C 的三端截止崩潰電壓(BV_{off})特性-----	56
圖 4-25 傳統 HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K-----	56
圖 4-26 TiO_2 -MOS-HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K-----	57
圖 4-27 FP- TiO_2 - Al_2O_3 -MOS HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K-----	57
圖 4-28 傳統 HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K-----	58
圖 4-29 TiO_2 -MOS-HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K-----	58
圖 4-30 FP- TiO_2 - Al_2O_3 -MOS HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K-----	59
圖 4-31 傳統 HEMT, TiO_2 -MOS-HEMT 和 FP- TiO_2 - Al_2O_3 -MOS HEMT 在 2.4 GHz 時的功率附加效率 (P.A.E.)，輸出功率 (P_{out})，相關增益 (G_a) 特性-----	59
圖 4-32 最小雜訊係數(NF_{min})和相關增益(G_a)特性與所有樣品頻率的關係-----	60

第一章

序論

使用 GaN 的異質結構場效電晶體有幾個很優越的特性，第一個是很大的崩潰電壓 ($\sim 5\text{MV/cm}$)，第二個是寬能隙 (3.4 電子伏特)，最後一個是高電子移動率 ($\sim 1500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)，這些優點對於高功率電路應用是很有幫助的。二維電子雲可以藉由壓電極化效應和自發極化效应在 AlGaN / GaN 異質界面內被誘導出來。插入薄的 AlN 間隔層以減少合金散射並改善載子限制和運輸特性。本篇已用 InAlN 阻擋層取代 AlGaN 阻擋層應用於異質結構場效電晶體的設計，將 InAlN 阻擋層的 In 含量調變到 18%，可使 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ 與氮化鎵通道晶格匹配且比氮化鋁鎵具有更大的能隙，能提供更高的二維電子雲濃度，降低閘極漏電流、改善界面、獲得增強的電流密度這三件事情可以同時被達成。而金屬-氧化-半導體閘極結構已被研究用來改善閘極絕緣、減少有效氧化層厚度以及提供表面鈍化，現在有很多種氧化物形成技術，包括電子束蒸鍍、原子層沉積、濺鍍、化學氣相沉積、以及過氧化氫氧化。這項工作呈現一種新型 Al_2O_3 -介電質閘極 $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N} / \text{AlN} / \text{GaN}$ MOS-HFET 與複合 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2$ 鈍化氧化物分別使用 USPD / RF 濺鍍形成。該閘極結構包括 $1\text{-}\mu\text{m}$ 長的有源閘極在寬能隙 Al_2O_3 電介質和 $1.5\mu\text{m}$ 長的場板 (FP) 在複合 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2$ 氧化物上形成。

$\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ 阻擋層表面的有效鈍化通過使用超音波噴霧熱裂解沉積 (USPD) 技術生長 Al_2O_3 來實現，高 k 值及寬能隙的 Al_2O_3 閘極介電質有利於改善通道調變和閘極絕緣，可有效的減少電流穿隧。此外，複合 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 氧化物在場板下面可以減少在閘極-汲極漏電流，同時也減少寄生電容。傳統的蕭特基閘極異質結構場效電晶體和由 RF 濺鍍形成的二氧化鈦介電質 MOS-HFET 被製造在相同的外延結構上。各種 C-V 測量、TEM、能量分散的消除、X 射線光譜 (EDS)，低頻雜訊譜和 Hooge 係數 (α_H) 已經進行了調查材料和界面屬性。

第 2 章

氮化鎵鋁/氮化鋁/氮化鎵(InAlN/AlN/GaN)

異質結構

2-1 氮化鎵鋁/氮化鋁/氮化鎵(InAlN/AlN/GaN)異質結構

晶格匹配的 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ 異質結構的阻擋層厚度($<10\text{ nm}$)導致了更高的電荷密度，由於它的極化強度高於傳統的氮化鋁鎵/氮化鎵(AlGaN/GaN)異質結構，能為III族氮化物HEMT提供了更好的電特性。當異質結構沿極性方向生長時，量子井將位於氮化鎵鋁/氮化鎵(InAlN/GaN)界面處並且導致氮化物基板的異質結構中有更強的壓電極化和自發極化場。即使在該結構中沒有其他摻雜，它也將在氮化鎵鋁/氮化鎵(InAlN/GaN)界面處形成二維電子雲(2DEG)。氮化鎵鋁(InAlN)能隙比氮化鋁鎵(AlGaN)障壁寬，以抑制閘極漏電流，能導致更好的電晶體特性並使閘極蕭特基能障高度更高。

當今金屬有機物化學氣相沉積(MOCVD)方法和分子束磊晶(MBE)方法是最常見的磊晶製程，用於在不同的基板上生長高質量的氮化鎵(GaN)薄膜，例如：矽(Si)基板、藍寶石基板和碳化矽(SiC)基板。對於在基板上生長的氮化鎵(GaN)存在一些問題，不僅存在大

的晶格不匹配，而且存在磊晶層和基板之間的熱相容性。表 2-1 顯示了基板材料的熱膨脹係數和導熱係數與氮化鎵(GaN)的比較。

表 2-1 基板的比較

特性	矽	藍寶石	氮化鎵	碳化矽
熱電導 (W/cm-K)	1.5	0.5	5.6	3.5
熱膨脹係數 ($10^{-6}/K$)	2.6	7.5	5.6	4.2
晶格不匹配 (%)	-17	-15	-	3.5
晶格成本	非常便宜	便宜	昂貴	昂貴

晶格不匹配會導致元件出問題，例如薄膜中較差散熱的自加熱和結構性錯位的電流崩潰。藍寶石基板有低成本和高品質等優點。但在高功率運作時元件導熱性差 (0.5 W/cm-K)，元件過熱而導致特性降低。碳化矽(SiC)具有高導熱率 (3.5 W/cm-K)，較低的晶格不匹配，並具有良好的散熱和崩潰特性。由於高成本和小面積，使得製造碳化矽(SiC)元件的複雜性和成本增加。為了改善散熱效率並降低晶圓成本，使用矽基板來抑制和避免對氮化鎵基板 HEMT 的自熱效應。

2-2 場板結構

基於 HEMT 結構的場板結構元件具有更好的關閉狀態性能，具有極低的關閉狀態電流 (I_{off}) 和良好的崩潰特性。由於場板可以分散汲極和閘極的高電場，此外，場板也能減少閘極漏電流。認為元件特性的改善將有利於高功率和高溫。

第三章

元件結構設計與元件製程

3-1 元件結構

為了製造樣品，氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵異質結構場效應電晶體 (HEMT) 用於在 3 英寸矽基板上成長的金屬有機化學氣相沉積 (MOCVD)。結構層由矽基底、成核層、氮化鎵層 1000 nm、氮化鋁 1nm 和 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ 9 nm 組成。元件結構如圖 3-1 至圖 3-3。

3-2-1 高臺絕緣

高臺絕緣的目的是為了減少漏電流，以得到更好的夾擠特性。首先，用超聲波振動將浸入丙酮中的樣品清洗 5 分鐘，然後用去離子水 (D.I.) 去除樣品上殘留的丙酮，接著使用純鹽酸 (HCl) 消除表面氧化物和表面損傷，在樣品清潔之後，將芯片塗覆正性光刻膠 (FH6400L) 並在旋轉器中旋轉。為了獲得均勻的光刻膠膜，旋轉器的旋轉速率和旋轉時間被控制在 8000rpm 12 秒 和 8500rpm 25 秒，使光刻膠均勻地分佈在樣品上。在 90°C 下在烘箱中進行軟烤 30 分鐘，接著使用接觸式光罩對準曝光儀 (OAI MODEL 3HR /IR) 將樣品曝光 25 秒以定義檯面隔離的光阻模型，然後浸入光阻顯影劑中 35 秒。將鎳 (Ni) 沉積到 100nm 以代替光阻顯影劑，並使用熱蒸鍍器完成光罩，通過使用感應耦合式電漿反應離體離子蝕刻器 (ICP-RIE) 和 Ar / Cl_2 等來

具有氧化鋁/二氧化鈦鈍化層氮化鎢鋁/氮化鋁/氮化鎳 Γ-閘極結構金屬-氧化物-半導體場效異質結構電晶體研製

定義蝕刻區域。在以下條件發生蝕刻反應，Cl 為 230sccm，Ar 為 10sccm。

ICP 的功率為 700W，RIE 的功率為 120W，在 3mTorr 的腔室壓力下施加蝕刻 100 秒，蝕刻速率為 480nm / min，蝕刻參數為 480nm / min。在蝕刻後，我們使用硝酸（HNO₃）去除 Ni 硬光罩。高臺絕緣的主要步驟如下：

- 樣品清理
- 旋轉塗佈
- 軟烤
- 曝光
- 顯影
- 蒸鍍
- 掀離
- 濕式蝕刻
- 去除鎳

3-2-2 源極和汲極的歐姆接觸

和 3-2-2 的高臺絕緣一樣，經過樣品清理後，並在旋轉器中旋轉，旋轉器的旋轉速率和旋轉時間控制在 8000rpm 下旋轉 12 秒和 9000rpm 25 秒，以使光刻膠均勻地分佈在樣品上。接著在 90°C 下的烘箱中進行軟烤 30 分鐘。之後，源極和汲極模型已由標準光刻法定

義。在蒸鍍之前，使用丙酮和鹽酸（HCl）在超聲波振動器中清潔金屬和鎢舟 10 分鐘。接著用去離子水(D.I.)和高純度的氮氣沖洗了金屬和鎢船。由於鈦/鋁層具有較低的功函數，因此我們選擇鈦/鋁/金作為歐姆接觸的源極和汲極，鈦/鋁/金的厚度分別為 10nm / 100nm / 50nm。退火後，在金屬和半導體界面之間形成鋁/鈦/氮合金，金(50nm)層可以防止鋁向外擴散，在電極表面形成氧化鋁(Al_2O_3)。我們通過快速熱退火系統（RTA）（ULVAC MILA-5000）在 900°C 下將樣品退火 30 秒以形成鈦/鋁/金合金。我們定義源極和汲極之間的距離為 10 μ m。

源極 - 汲極歐姆接觸形成的主要步驟如下：

- 樣品清理
- 旋轉塗佈
- 軟烤
- 曝光
- 顯影
- 蒸鍍
- 掀離
- 退火

3-2-3 閘極蕭特基接觸

沉積理想的歐姆接觸電極之後，我們採用鎳（100nm）/金（50nm）形成蕭特基接觸作為閘極。再和剛剛歐姆接觸一樣的樣品清理、旋轉塗佈、軟烤、曝光、顯影之後通過熱蒸鍍沉積鎳（100nm）/ Au（50nm）在樣品上形成蕭特基閘極作為閘極。由於鎳本身俱有高金屬功能，因此可以增加蕭特基勢障高度以抑制漏電流並獲得更高的崩潰電壓，金具有良好的導電性，可以成為降低接觸電阻的優異材料。在熱蒸鍍之後，我們使用丙酮掀離光阻顯影劑，主要完成了傳統的蕭特基閘極氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵 HEMT。在我們的閘極模型中，器件具有雙閘極指狀物，長度為 $2\mu\text{m}$ ，寬度為 $100\mu\text{m}$ 。閘極蕭特基接觸的主要步驟如下：

- 樣品清理
- 旋轉塗佈
- 軟烤
- 曝光
- 顯影
- 硬烤
- 蒸發
- 掀離

這次研究元件的圖示，包含傳統異質結構場效應電晶體(HFET)之蕭特基閘極結構(樣品 A)、 TiO_2 金屬-氧化物-半導體異質結構場效應電晶體(MOS-HFET)之閘極介電層(樣品 B)、具有氧化鋁(Al_2O_3)/二氧化鈦(TiO_2) 鈍化氧化層的氧化鋁(Al_2O_3) 金屬-氧化物-半導體異質結構場效應電晶體(MOS-HFET)之 Γ -閘極介電層(樣品 C)。

3-3 超音波噴霧熱裂解沉積(USPD)

為了構成 Al_2O_3 氧化物膜，存在著許多構成氧化物層的方法，例如電漿輔助化學氣相沉積 (PECVD)、濺射、原子層沉積 (ALD) 和超音波噴霧熱裂解沉積 (USPD) 技術。總而言之，USPD 技術是一種優越的技術。該技術基於由超音波噴霧溶液加熱的基板載氣的表面。圖 3-4 表示 USPD 技術示意圖。

3-4 濺射

為了製備具有扇形結構的二氧化鈦氧化物膜，我們利用濺射在樣品上形成氧化物。首先，我們使用純度為 99.95% 的二氧化鈦，並且由超聲霧化溶液加熱的基板載氣。

第四章

結果與討論

4-1 材料分析

在這項工作中，我們使用 USPD 和射頻濺鍍技術製成 Al_2O_3 和 TiO_2 氧化層。在本章中，我們透過透射電子顯微鏡 (TEM) 和能量色散 X 射線光譜學 (EDS) 的結果簡要介紹介電質組成、表面粗糙度、MOS 氧化層厚度。

4-1-1 穿透式電子顯微鏡(TEM)

穿透式電子顯微鏡 (TEM) 是一種顯微技術，其中電子束透過樣品以形成圖像，樣品通常是厚度小於 100 奈米的超薄切面，當光束透過樣品時，由電子與樣品的相互作用形成圖像，由於電子的德布羅意波長較小，TEM 能夠以比光學顯微鏡高得多的分辨率成像。因此，研究了氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵層上氧化鋁薄膜、二氧化鈦薄膜、氧化鋁/ 二氧化鈦薄膜、和場板結構的結構，觀察了橫截面穿透式電子顯微鏡 (TEM) 圖像。樣品如圖 4-1 至圖 4-3 所示，總結在表 4-1 中。

表 4-1 氧化物厚度

材料	Al_2O_3	TiO_2	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$
氧化物厚度 (nm)	~10	~10	~5/~5

4-1-2 能量色散 X 射線光譜(EDS)

能量色散 X 射線光譜 (EDS) 是一種用於樣品的元素分析或化學表徵的分析技術。它依賴於特定 X 射線激發源和樣品的相互作用，表示主要是由於其基本原理，例如：每個元件具有特定的原子結構、只允許一組特定的電磁發射譜峰。元件的 EDS 測量結果如圖 4-4 和圖 4-5 所示。結果總結在表 4-2 中。

表 4-2 氧化物結構

Al ₂ O ₃ 氧化物	元素	O	Al	O/Al
	原子 (%)	59.2	40.8	145.1
TiO ₂ 氧化物	元素	O	Ti	O/Ti
	原子 (%)	23.9	76.1	31.4

4-2 電容-電壓特性

金屬半導體 (MS) 蕭特基 HEMT 和金屬氧化物半導體 (MOS) HEMT Al₂O₃-MOS-HEMT 和 TiO₂-MOS-HEMT 如圖 4-6 至圖 4-8 所示。我們使用 -6 V 至 3.5 V 的閘極電壓和 1 MHz 的頻率進行 C-V 測量。為了計算 MOS 二極體的介電常數 (k)，電容公式如下：

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

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

其中 ϵ_0 是真空介電常數= 8.854×10^{-12} F/m，K 為金屬介電常數，A 是蕭特基接觸面積 $1000 \mu\text{m}^2$ ， d_{ox} 是 Al_2O_3 (TiO_2)-MOS HEMT 的氧化層厚度 10nm。 C_{total} 是累積電容，分別是 86.8pF，93.7pF。 C_{HEMT} 是金屬-半導體蕭特基二極體電容 155.9 pF， C_{ox} 是氧化層電容。表 4-3 顯示了所有樣品的電容特性。根據參數，氧化鋁(Al_2O_3)的 C_{ox} 為 195.8pF，氧化鋁(Al_2O_3)的介電常數 (k) 為 9.24，結果對應於氧化鋁(Al_2O_3)介電常數 9.1 至 10.1 的範圍。 TiO_2 的 C_{ox} 為 234.8pF， TiO_2 的介電常數 (k) 為 132.7，結果對應於 TiO_2 介電常數 86 至 173 的範圍。

表 4-3 所有樣品的電容特性

樣品	蕭特基	Al_2O_3	TiO_2	Al_2O_3 - TiO_2
C_{total} (pF)	155.9	86.8	93.7	114.9
C_{ox} (pF)	-	195.8	234.8	436.9
k	-	9.24	132.7	

4-2-1 遲滯現象

圖 4-9 至圖 4-11 顯示了所有器件的遲滯現象，包括金屬-半導體蕭特基二極體， TiO_2 -MOS 二極體和 Al_2O_3 - TiO_2 MOS 二極體。C-V 量測操作在頻率 1MHz 且閘極偏壓介於 0V 至 -6V 之間。遲滯特性如

表 4-4 所示，結果清楚地顯示 USPD 沉積的 Al₂O₃ 介電質可以有效地改善缺陷密度。

表 4-4 所有樣品的遲滯特性

樣品	蕭特基	TiO ₂	Al ₂ O ₃ -TiO ₂
ΔV (V)	0.36	0.22	0.11

4-2-2 表面狀態密度 (D_{it})

電容-電壓 (C-V) 特性的高低頻方法如圖 4-12 至圖 4-15 所示 (Al₂O₃) (TiO₂) 金屬氧化物半導體 (MOS) 二極體。計算表面態密度 (D_{it}) 公式可表示為：

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

q 是基本電荷，C_{ox} 是氧化層電容，C_{LF} 是 10KHz 的低頻電容，C_{HF} 是 1MHz 的高頻電容。表 4-5 顯示了所有樣品的 D_{it}-V 特性。結果顯示通過 USPD 沉積的 Al₂O₃ 介電質可以有效地改善表面狀態密度。

表 4-5 所有樣品的 D_{it}-V 特性

樣品	TiO ₂	Al ₂ O ₃ -TiO ₂
D _{it} (cm ⁻² eV ⁻¹)	9.23×10 ¹¹	2.2×10 ¹¹

4-3 轉換特性

元件的直流轉換特性，外部轉導 (g_m) 是在汲極-源極偏壓 (V_{DS}) 在 7 V 傳統 HEMT (樣品 A)，8 V TiO_2 -MOS-HEMT (樣品 B)，10 V FP- TiO_2 - Al_2O_3 -MOS-HEMT (樣品 C) 在室溫下，在表 4-6 和圖 4-16 至圖 4-18 所示。

樣品 A 至樣品 C 的比較，最大外部轉導 ($g_{m,max}$) 為 221.2 mS/mm，194.7 mS/mm，和 210.1 mS/mm。由於沉積高 k 氧化物作為介電質並增加了閘極與通道之間的有效調變距離。閘極電壓擺幅 GVS，定義為 ($g_{m,max}$) 值下降 10% 的位置樣品 A 至樣品 C 的 GVS 值確定為 0.5V，2.5V，和 1.8V。由於抑制了閘極漏電流，MOS-HEMT 具有更大的 GVS。次臨界擺幅 (SS) 為一個典型的參數，用來描述閘極控制的能力，分別為 125.2 mV/dec，117.5 mV/dec，和 102.3 mV/dec。 I_{DSS0} 分別為 427.78 mA/mm，256.3 mA/mm，670.3 mA/mm，顯示 MOS-HEMT 在 USPD 沉積後改善了表面狀態密度和鈍化懸浮鍵進而改善了電流。臨界電壓 V_{th} ，定義為 $\sqrt{I_{DS}}$ 和閘極偏壓相交的截距。樣品 A 與樣品 C 的 V_{th} 值分別為 -4.2，-3.7 和 -4.6V。另一方面，開/關電流比 (I_{on}/I_{off}) 被確定為 1.7×10^5 ， 6.35×10^5 和 8.2×10^{10} 。

表 4-6 轉換特性總結

樣品	A	B	C
I_{DSS0} (mA/mm)	427.78	256.3	670.3
$g_{m,max}$ (mS/mm)	221.2	194.7	210.1
GVS (V)	0.5	2.5	1.8
V_{th} (V)	-4.2	-3.7	-4.6
SS(mV/decade)	125.2	117.5	102.3
I_{on}/I_{off} ratio	1.7×10^5	6.35×10^5	8.2×10^{10}

4-4 低頻雜訊特性

低頻雜訊在微波裝置應用中是很重要的數據。進行了低頻雜訊測量，以進一步雜訊與各種之間的關係，測量方案對半導體表面敏感。通過 (Agilent 35670A) 放大汲極雜訊電壓，並將輸出饋送到頻率範圍為 1Hz~10 KHz 的 (BTA 9812B) 頻譜分析儀。偏壓條件是樣品 $V_{DS}=3V$ ($I_{DS}-V_D$ 特性的線性區域) 和 I_{DS} 為 100mA/mm。圖 4-19 顯示了所有樣品的低頻雜訊特性。這表明 MOS-HEMT 具有比傳統 HEMT 更低的雜訊，因為使用 USPD 技術降低了表面特性。不同半導體材料和結構中的雜訊通常以 Hooge 係數 α_H 為特徵。該等式可表示為：

$$\alpha_H = \frac{S_I(f)}{I^2} \cdot f \cdot N \quad (4)$$

$$N = \frac{L^2}{Rq\mu} \quad (5)$$

其中 $S_I(f)$ 是電流的光譜密度， I 是流經元件的電流， f 是頻率， N 是元件中自由載子的總數。其中 L 是汲極至源極的間隔， R 是通道的電阻， μ 是電子移動率。的 Hooge 係數分別為樣品 A 為 7.7×10^{-5} ，樣品 B 為 4.9×10^{-7} ，樣品 C 為 9.7×10^{-8} 。

4-5-1 雙端崩潰電壓特性

所有元件的雙端截止閘極-汲極崩潰電壓 (BV_{GD})，導通電壓 (V_{on}) 和漏電流密度特性，包括傳統的 HEMT (樣品 A) 和 MOS-HEMT (樣品 B) 在室溫時如圖 4-20 所示。 BV_{GD} 和 V_{on} 定義為閘極電流 I_{GD} 達到 $1\text{mA}/\text{mm}$ 的電壓，如圖 4-21 所示。樣品 A 至樣品 C 的 BV_{GD}/V_{on} 值分別為 $-126\text{ V}/3.39\text{ V}$ ， $-143.5\text{ V}/3.86\text{ V}$ 和 $-311.1\text{ V}/7.74\text{ V}$ 。樣品 A 至樣品 C 的漏電流密度值為 $1.4 \times 10^{-2}\text{mA}/\text{mm}$ ， $4.1 \times 10^{-3}\text{mA}/\text{mm}$ 和 $5.1 \times 10^{-9}\text{mA}/\text{mm}$ 。與樣品 A 相比，結果顯示，USPD 沉積氧化鋁 (Al_2O_3) 氧化物層可以提高 BV_{GD} 和 V_{on} ，從而抑制閘極漏電流，降低閘極與汲極之間的電場。此外，漏電流降低了一萬倍，也可以表示閘極氧化層中的陷阱被鈍化。

4-5-2 三端崩潰導通電壓特性

圖 4-22 至圖 4-24 表示了傳統 HEMT (樣品 A)，MOS-HEMT (樣品 B)，具有場板的 MOS-HEMT 的三端導通崩潰電壓 (BV_{on}) (樣品 C)。

包括樣品 A 至樣品 C 的元件的比較， BV_{on} 分別確定為 83V, 141.5V 和 237V，由於 USPD 的閘極氧化物可以有效地抑制漏電流和通道的碰撞游離，因此 MOS-HEMT 的 BV_{off} 特性可以得到增強。如表 4-7 所示，總結了傳統 HEMT 和 MOS-HEMT 在室溫下的 DC 特性。

表 4-7 樣品 A-C 的 DC 特性

樣品	A	B	C
$I_{D,max}$ (mA/mm)	544.2 ($V_G = 2\text{ V}$)	815.7 ($V_G = 5\text{ V}$)	868.3 ($V_G = 5\text{ V}$)
I_{DSS0} (mA/mm)	427.78	256.3	670.3
$g_{m,max}$ (mS/mm)	221.2	194.7	210.1
GVS (V)	0.5	2.5	1.8
V_{th} (V)	- 4.2	- 3.7	- 4.6
I_{on}/I_{off}	1.7×10^5	6.35×10^5	8.2×10^{10}
BV_{GD} (V)	- 126	- 143.5	- 311.1
I_g (mA/mm)	1.4×10^{-3}	4.1×10^{-3}	5.1×10^{-9}
V_{on} (V)	3.39	3.86	7.74
BV_{off} (V)	83	141.5	237

4-6-1 與溫度相關的輸出特性

元件(樣品 A)的汲極-源極電流密度(I_{DS})與汲極-源極電壓(V_{DS})特性從 300K 加熱到 450 K，每 50 K 測量一次。汲極-源極的偏壓為 0 V 到 15 V，樣品 A 的閘極電壓偏壓為 3 V，樣品 B 和樣品 C 的閘極電壓偏壓為 3V 如圖 4-25、圖 4-26 和圖 4-27 所示。

結果證明，汲極電流密度隨著溫度的升高而降低，由於載子散射降低了電子遷移率，並且在高溫下濃度略有增加。表 4-8 至表 4-10 分別顯示樣品 A 至樣品 C 300K 至 450K 的 $I_{D, max}$ 。

表 4-8 傳統 HEMT(樣品 A)300K-450K 與溫度相關的 DC 特性

樣品 A	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
$I_{D,max}$ (mA/mm)	546.6	464.7	407.3	353.9	26.9%

表 4-9 TiO₂-MOS-HEMT(樣品 B) 300K-450K 溫度相關的 DC 特性

樣品 B	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
$I_{D,max}$ (mA/mm)	813.9	792.6	694.9	578	28.9%

表 4-10 TiO₂-Al₂O₃- MOS-HEMT (樣品 C) 300K-450K

與溫度相關的 DC 特性

樣品 C	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
$I_{D,max}$ (mA/mm)	868	738.7	650	565.5	34.8%

4-6-2 與溫度相關的崩潰特性

圖 4-28 至圖 4-30 顯示了樣品 A 至樣品 C 從 300 K 到 450 K 的崩潰特性。汲極-源極電壓偏壓為 7V，對於樣品 A，閘極電壓偏壓從 2V 到 -6V。由於溫度升高導致汲極電流密度衰減，我們觀察到崩潰電壓隨著溫度升高而降低。表 4-11 至表 4-13 分別表示了樣品 A 至樣品 C 的崩潰電壓，溫度範圍為 300K 至 450K。

表 4-11 傳統 HEMT(樣品 A) 300K-450K 與溫度相關的崩潰特性

樣品 A	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
BV_{GD} (V)	- 127	- 113.5	- 104.5	- 96.5	24.1%
BV_{DS} (V)	83.4	69.1	61.8	50.3	26.9%

表 4-12 TiO₂-MOS-HEMT (樣品 B) 300K-450K 與溫度相關的崩潰

特性

樣品 B	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
BV _{GD} (V)	- 143.5	- 136.5	- 125	- 110	23.3%
BV _{DS} (V)	141.5	132.5	121.2	108.3	23.5%

表 4-13 TiO₂-Al₂O₃-MOS-HEMT (樣品 C) 300K-450K 與溫度相關的

崩潰特性

樣品 C	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
BV _{GD} (V)	- 311.1	- 292.1	- 266.9	- 252	18.9%
BV _{DS} (V)	237.6	233.1	222.1	212.3	10.6%

4-7-1 功率特性

輸出功率 (P_{out}) 和功率附加效率 (P.A.E.) 可表示為

$$P_{out} = \frac{1}{8} (I_{max})(BV_{gd} - V_{knee}) \quad (6)$$

$$P.A.E = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \times 100\% \quad (7)$$

其中 BV_{GD} 是閘極-汲極崩潰電壓, V_{knee} 是拐點電壓, P_{DC} 是直流電源,

由測試裝置執行的簡單功率測量，優化了源極和負載阻抗兩個雙調諧器，以及一個功率檢測器集成的帶通濾波器，以確保在基頻上的正確功率讀數，對於樣本 A 操作，性能接近於夾止。

圖 4-31 顯示了輸出功率 (P_{out}) 和功率附加效率 (P.A.E.) 與輸入功率的函數關係，樣品 A 的偏壓為 $V_{GS} = -1.5\text{ V}$ ， $V_{DS} = 5\text{ V}$ ，對於樣品 B， $V_{GS} = -1.5\text{ V}$ ， $V_{DS} = 6\text{ V}$ ，對於樣品 C， $V_{GS} = -1\text{ V}$ ， $V_{DS} = 10\text{ V}$ 。如表 4-14 所示，所有元件均以 2.4 GHz 運行。

表 4-14 所有樣本的功率特性

2.4 GHz	樣品 A	樣品 B	樣品 C
P.A.E(%)	16.5	23.9	39.9
P_{out} (dBm)	6.8	9.85	16.5
G_a (dB)	18.4	21.9	23.2

在氧化物沉積之後獲得 P_{out} 性能的改善，這可歸因於更高的 BV_{GD} ， $I_{DS,max}$ ，因此，結果證明 P. A. E. 在同一 Pin 時更好。

4-7-2 高頻雜訊特性

傳統 HEMT 和 MOS-HEMT 的雜訊性能是使用 HP 8970B 雜訊係數計在 1 至 6 GHz 的頻率範圍內測得的。最小雜訊係數 (NF_{min}) 可近似為以下 Fukui 方程：

$$NF_{min} = 10 \log \left\{ 1 + \frac{k_F \cdot f}{f_T} [g_{mi}(R_G + R_S)]^{0.5} \right\} dB \quad (8)$$

$$k_F = 3.38 \left[\frac{I_{DS}}{(L_g \cdot g_m)} \right]^{0.5} \quad (9)$$

其中 k_F 是 Fukui 常數是實驗擬合因子， I_{DS} 是汲極-源極電流，此為測量雜訊性能， g_m 是轉導值， L_g 是閘極長度。

圖 4-32 顯示了傳統 HEMT 和 MOS-HEMT 的最小雜訊係數(NF_{min})與相關增益 (G_a) 特性的關係。所有元件閘極大小為 $2 \times 100 \mu m^2$ ，源極-汲極距離為 $10 \mu m$ 。樣品 A 的偏壓條件為 $V_{DS} = 7V$ ， $V_{GS} = -1V$ ，樣品 B-C 的 $V_{DS} = 7V$ ， $V_{GS} = -2V$ 。

表 4-15 顯示了樣品 A-C 的 2.4 GHz 和 6 GHz 的最小雜訊係數 (NF_{min}) 和相關增益 (G_a) 的值。因為氧化層可以減少表面缺陷，所以 MOS-HEMT 具有較低的最小雜訊係數 (NF_{min}) 和較高的相關增益 (G_a)。

表 4-15 所有樣品 A-C 的雜訊特性。

樣品		A	B	C
NF_{min} (dB)	2.4 GHz	5.2	4.4	3.1
	6 GHz	9.5	8.9	7.6
G_a (dB)	2.4 GHz	5.6	7.8	17.1
	6 GHz	2.1	4.2	9.8

第 5 章

結論

在本論文中，使用超音波噴霧熱裂解沉積法 (USPD)和射頻濺鍍的高介電常數氧化鋁(Al_2O_3)和二氧化鈦(TiO_2)及具有場板的閘極氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵($\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$)HEMT，可以改善直流、射頻特性和提高元件特性。具有場板結構的 MOS-HEMT 顯示出高崩潰的特性，場板不僅降低了漏電流而且增加了元件的崩潰電壓。傳統型 HEMT、MOS-HEMT 和具有場板 MOS-HEMT 的最大汲極電流密度 ($I_{DS,max}$)，最大外部轉導 ($g_{m,max}$) 和雙端關閉狀態閘極-汲極崩潰電壓 (BV_{GD}) 為 544.2 / 815.7 / 863.8 mA / mm、212.2 / 190.4 / 210.1 mS / mm、- 126 / - 143.5 / - 311.1 V。

利用穿透式電子顯微鏡(TEM photos)、能量色散 X 射線光譜(EDS)、電容-電壓 (C-V) 量測、低頻雜訊光譜(1/f spectra)和虎克係數(Hooge's coefficient) 研究元件全面的特性。本設計中實現增強閘極絕緣、有效表面鈍化和減小閘極-汲極峰值電場。閘極 MOS-HFET 表現出優異的開關電流比 $\frac{I_{on}}{I_{off}}$: 8.2×10^{10} ，次臨限擺幅 SS: 102.3mV/dec，最大汲極電流密度 $I_{DS,max}$: 868.3mA/mm，閘極-汲極/汲極-源極崩潰電壓 BV_{GD}/BV_{DS} : - 311.5/237 V，以及功率附加效率 P.A.E.在 2.4 GHz 和 300 K 時為 39.9%。因此氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵

具有氧化鋁/二氧化鈦鈍化層氮化鎵鋁/氮化鋁/氮化鎵 Γ -閘極結構金屬-氧化物-半導體場效異質結構電晶體研製

(InAlN/AlN/GaN) MOS-HEMT 結構採用 USPD 和濺鍍高介電常數

(high-k)材料氧化鋁(Al_2O_3)和二氧化鈦(TiO_2)，適用於高功率或電源開

關 MMIC 應用。

參考文獻

- [1] S. Heikman *et al.*, “Polarization effects in AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN heterostructures,” *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 12, pp. 10114–10118, Jun. 2003.
- [2] R. A. Beach and T. C. McGill, “Piezoelectric fields in nitride devices,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 17, no. 4, pp. 1753–1756, Jul./Aug. 1999.
- [3] A. Teke *et al.*, “The effect of AlN interlayer thicknesses on scattering processes in lattice-matched AlInN/GaN two-dimensional electron gas heterostructures,” *New J. Phys.*, vol. 11, Jun. 2009, Art. no. 063031.
- [4] D. S. Lee, X. Gao, S. Guo, and T. Palacios, “InAlN/GaN HEMTs with AlGaIn back barriers,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 32, no. 5, pp. 617–619, May 2011.
- [5] M. Alomari *et al.*, “InAlN/GaN MOSHEMT with self-aligned thermally generated oxide recess,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 30, no. 11, pp. 1131–1133, Nov. 2009.
- [6] K. Ćirić *et al.*, “InAlN/GaN metal-oxide-semiconductor high electron mobility transistor with Al₂O₃ insulating films grown by metal organic chemical vapor deposition using Ar and NH₃ carrier gases,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 27, no. 1, pp. 218–222, Jan./Feb. 2009.
- [7] F. Medjdoub *et al.*, “Can InAlN/GaN be an alternative to high power/high temperature AlGaIn/GaN devices?” in *IEDM Tech. Dig.*, 2006, pp. 1–4.
- [8] C.-S. Lee, W.-C. Hsu, H.-Y. Liu, and Y.-C. Chen, “Al₂O₃-dielectric In_{0.18}Al_{0.82}N/AlN/GaN/Si metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with backside substrate metal-trench structure,” *IEEE J. Electron Devices Soc.*, vol. 6, pp. 68–73, Dec. 2017.
- [9] C.-S. Lee, W.-C. Hsu, H.-Y. Liu, and B.-J. Chiang, “Ti_{0.5}Al_{0.5}O₂-dielectric AlGaIn/GaN/Si metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors by using non-vacuum ultrasonic spray pyrolysis deposition,” *ECS J. Solid-State Sci. Technol.*, vol. 5, no. 12, pp. Q284–Q288, Dec. 2016.
- [10] C.-S. Lee *et al.*, “Investigations of TiO₂-AlGaIn/GaN/Si-passivated HFETs and MOS-HFETs using ultrasonic spray

- pyrolysis deposition,” *IEEE Trans. Electron. Devices*, vol. 62, no. 5, pp. 1460–1466, May 2015.
- [11] B.-Y. Chou *et al.*, “Investigations of AlGaIn/GaN MOS-HEMT with Al₂O₃ deposition by ultrasonic spray pyrolysis method,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2015.
- [12] B.-Y. Chou *et al.*, “Al₂O₃-passivated AlGaIn/GaN HEMTs by using non-vacuum ultrasonic spray pyrolysis deposition technique,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 35, no. 9, pp. 903–905, Sep. 2014.
- [13] S. Yagi *et al.*, “High breakdown voltage AlGaIn/GaN MIS-HEMT with SiN and TiO₂ gate insulator,” *Solid-State Electron.*, vol. 50, no. 6, pp. 1057–1061, Jun. 2006.
- [14] C. S. Lee *et al.*, “High breakdown voltage AlGaIn/GaN MIS-HEMT with SiN and TiO₂ gate insulator,” *Semicon. Sci. Technol.*, vol. 27, pp. 1–7, Apr. 2012.
- [15] C. Y. Tsai, T. L. Wu, and A. Chin, “High-performance GaN MOSFET with high- κ LaAlO₃/ SiO₂ gate dielectric,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 33, no. 1, pp. 35–37, Jan. 2012.
- [16] T. Huang, X. Zhu, K. M. Wong, and K. M. Lau, “Low-leakage-current AlN/GaN MOSHFETs using Al₂O₃ for increased 2DEG,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 33, no. 2, pp. 212–214, Feb. 2012.
- [17] P. D. Ye, B. Yang, K. K. Ng, and J. Bude, “GaN metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistor with atomic layer deposited Al₂O₃ as gate dielectric,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 6, pp. 1–3, Jan. 2005.
- [18] P. Kordoš *et al.*, “RF performance of InAlN/GaN HFETs and MOSHFETs with $f_T \times L_G$ up to 21 GHz $\cdot \mu\text{m}$,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 31, no. 3, pp. 180–182, Mar. 2010.
- [19] H.-Y. Liu *et al.*, “Investigation of temperature-dependent characteristics of AlGaIn/GaN MOS-HEMT by using hydrogen peroxide oxidation technique,” *IEEE Trans. Electron Device*, vol. 61, no. 8, pp. 2760–2766, Aug. 2014.
- [20] C.-S. Lee *et al.*, “Investigations of novel Γ -gate MOS-HEMTs by ozone water oxidation and shifted exposure techniques,” *IEEE Trans. Electron Device*, vol. 58, no. 9, pp. 2981–2989, Sep. 2011.
- [21] X. C. Tao, “InAlN/AlN/GaN MOS-HEMT with a field-plate design”. M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Feng Chia Univ.,

Taichung, Taiwan, Jun. 2018.

- [22] F. Husna *et al.*, “High-temperature performance of AlGaIn/GaN MOSHEMT with SiO₂ gate insulator fabricated on Si (111) sub- strate,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 59, no. 9, pp. 2424–2429, Sep. 2012.
- [23] Z. H. Liu *et al.*, “Improved two-dimensional electron gas transport characteristics in AlGaIn/GaN metal-insulator-semiconductor high electron mobility transistor with atomic layer-deposited Al₂O₃ as gate insulator,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no. 22, pp. 1–3, Nov. 2009.
- [24] S. Latrach *et al.*, “Trap states analysis in AlGaIn/AlN/GaN and InAlN/AlN/GaN high electron mobility transistors,” *Current Appl. Phys.*, vol. 17, pp. 1601–1608, Sep. 2017.
- [25] G. Dutta, S. Turuvekere, N. Karumuri, N. DasGupta, and A. DasGupta, “Positive shift in threshold voltage for reactive-ion-sputtered Al₂O₃/AlInN/GaN MIS-HEMT,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 35, no. 11, pp. 1085–1087, Nov. 2014.
- [26] G. Dingemans and W. M. M. Kessels, “Status and prospects of Al₂O₃- based surface passivation schemes for silicon solar cells,” *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 30, no. 4, pp. 1–27, Jul. 2012.
- [27] W. L. Liu, Y. L. Chen, A. A. Balandin, and K. L. Wang, “Capacitance-voltage spectroscopy of trapping states in GaN/AlGaIn heterostructure field-effect transistors,” *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, vol. 1, no. 2, pp. 258–263, Aug. 2006.
- [28] D. Gregušová, R. Stoklas, K. Čičo, T. Lalinský, and P. Kordoš, “AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with 4 nm thick Al₂O₃ gate oxide,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 8, pp. 947–951, Aug. 2007.
- [29] F. N. Hooge, T. G. M. Kleinpenning, and L. K. J. Vandamme, “Experimental studies on 1/f noise,” *Rep. Progr. Phys.*, vol. 44, no. 5, pp. 479–532, 1981.
- [30] C. Kayis *et al.*, “Low-frequency noise measurements of AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with HfAlO gate dielectric,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 31, no. 9, pp. 1041–1043, Sep. 2010.

圖形

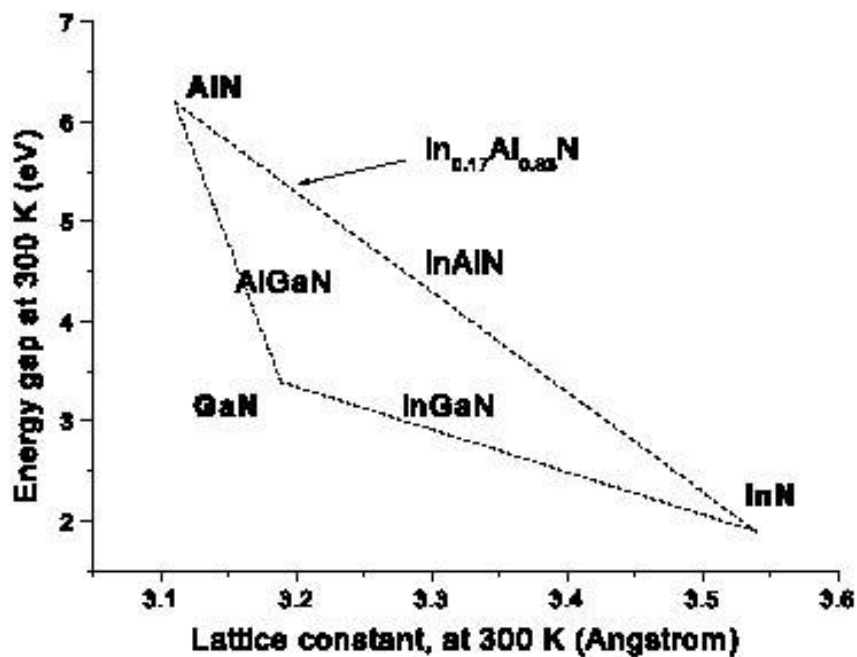


圖 2-1 各種二元半導體的能帶和晶格常數的比較

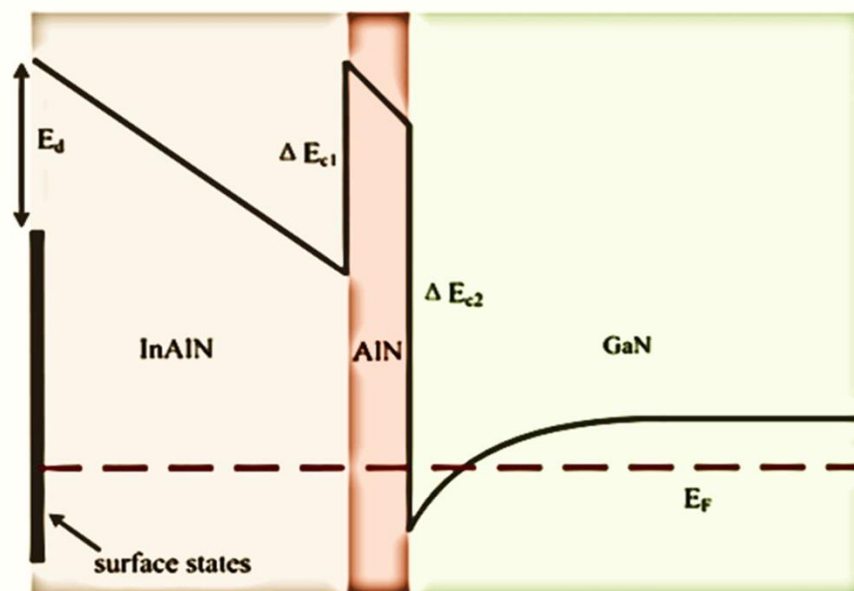


圖 2-2 InAlN/AlN/GaN 異質結構能帶圖

具有氧化鋁/二氧化鈦鈍化層氮化鎵鋁/氮化鋁/氮化鎵 Γ -閘極結構金屬-氧化物-半導體場效異質結構電晶體研製

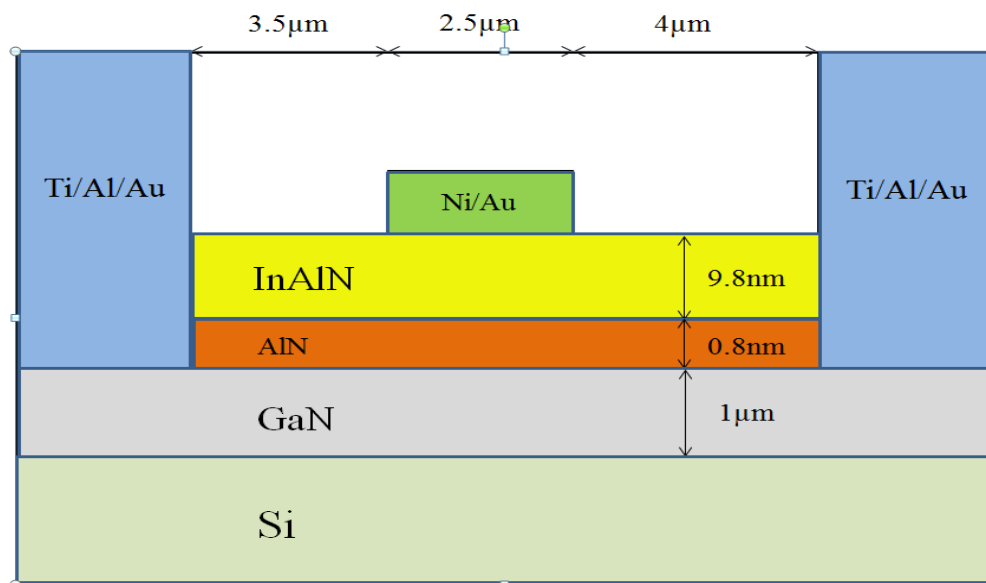


圖 3-1 傳統 HEMT 的蕭特基閘極結構的 InAlN / AlN / GaN 截面圖

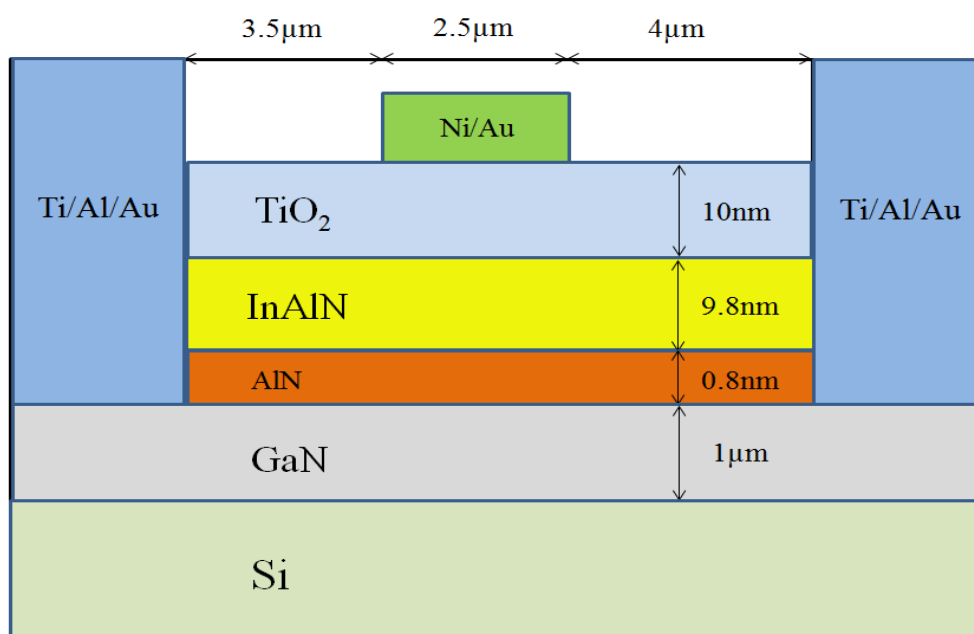


圖 3-2 TiO₂ MOS HEMT 的 InAlN / AlN / GaN 的橫截面圖

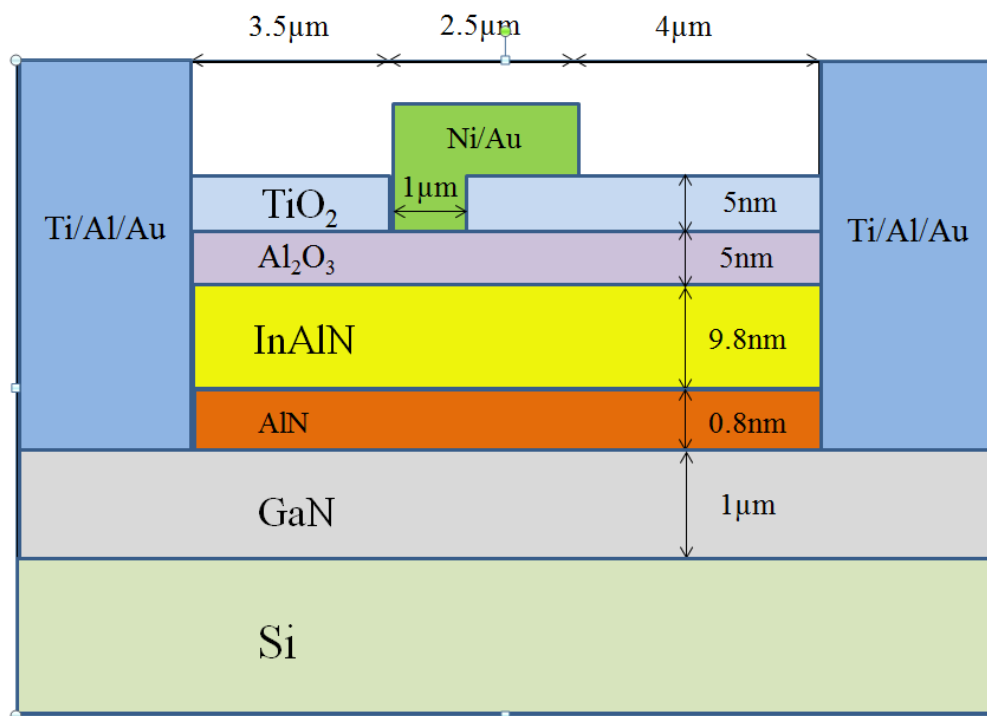


圖 3-3 具有場板結構 Al₂O₃ 和 TiO₂MOS HEMT 的 InAlN / AlN / GaN 的橫截面圖

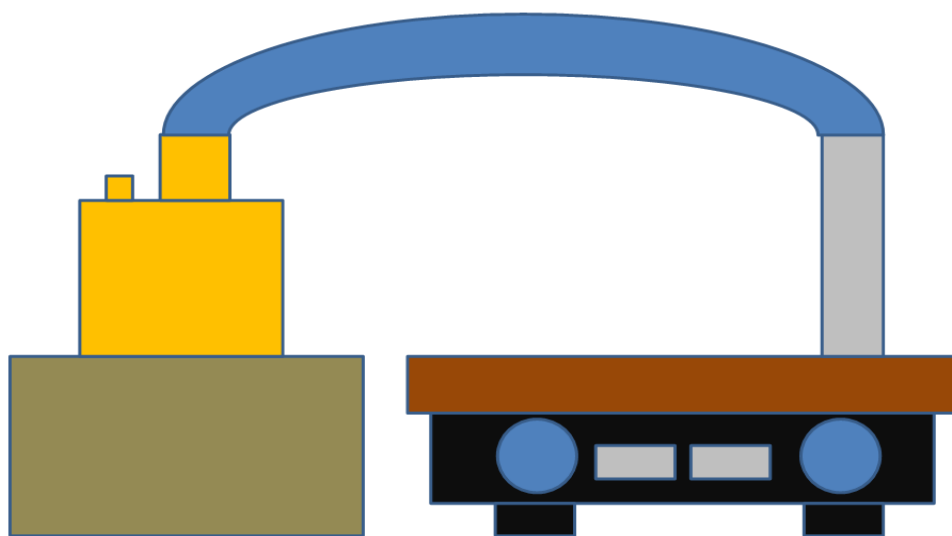
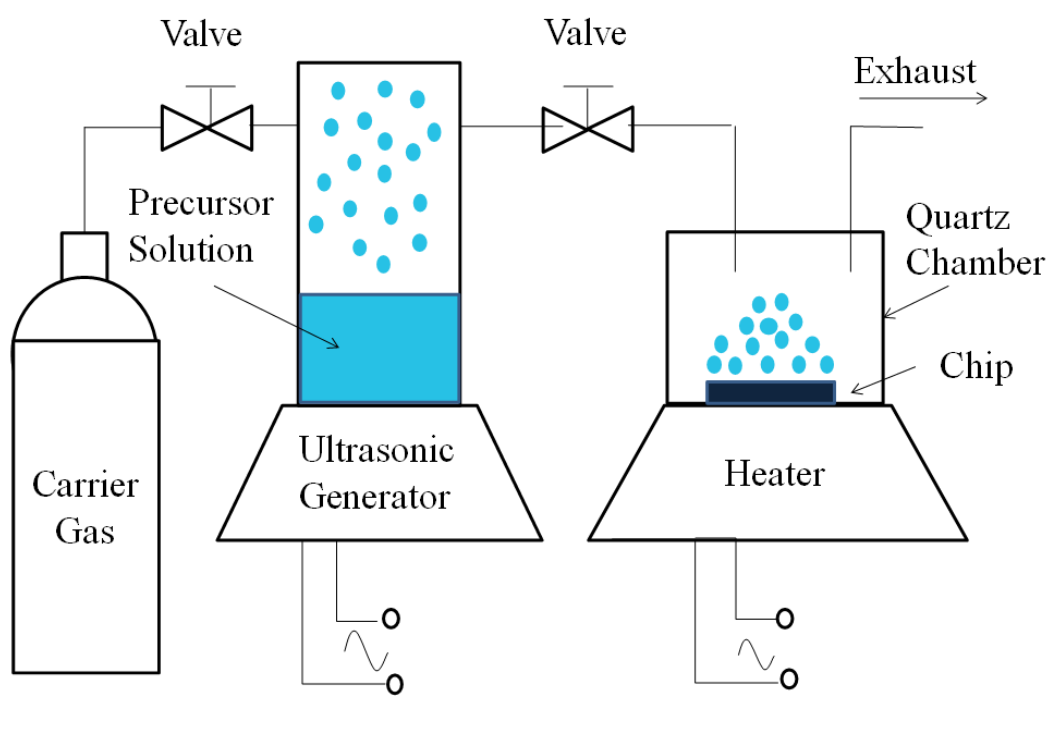


圖 3-4 超音波噴霧熱裂解技術示意

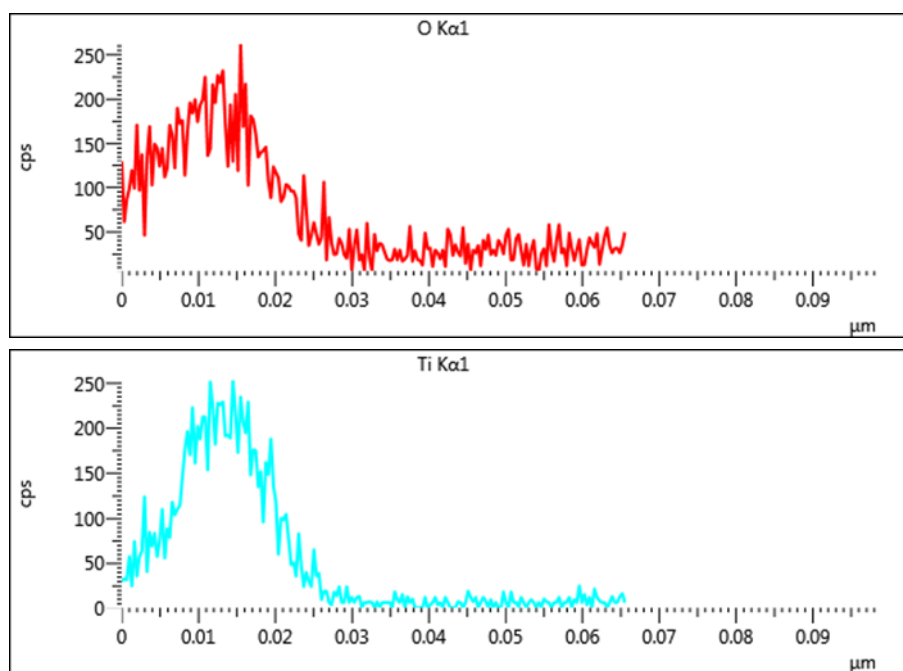
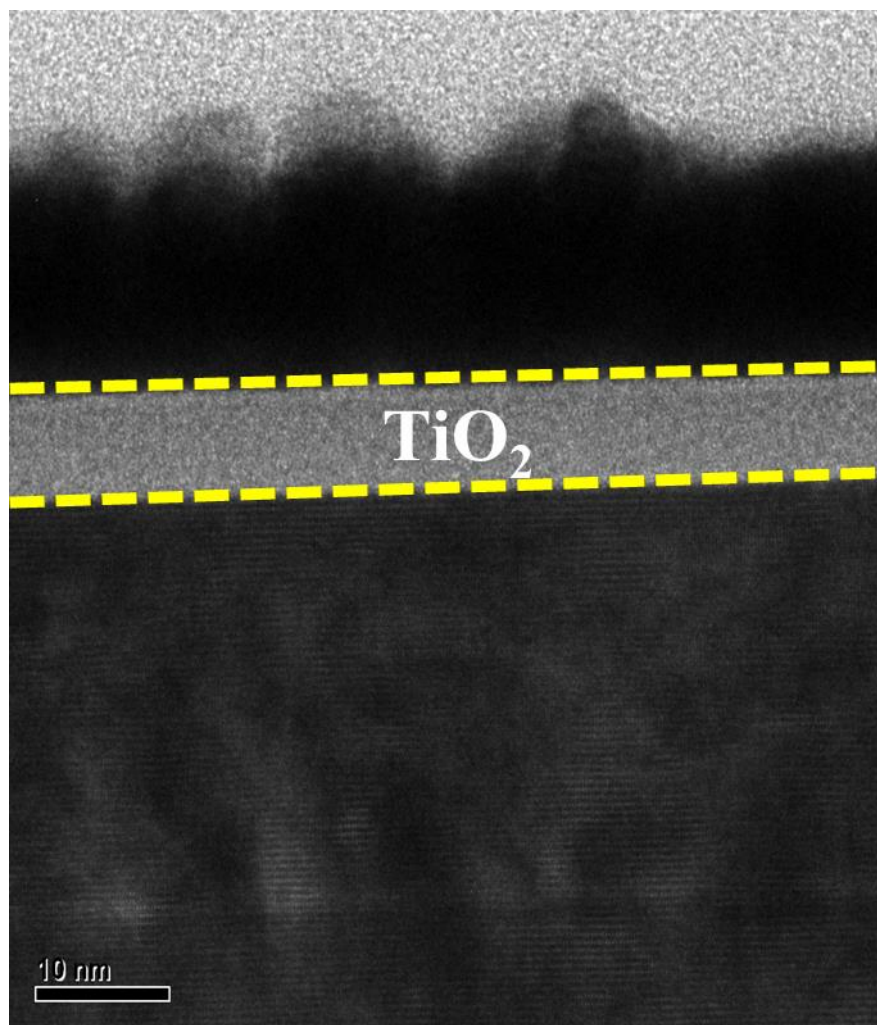


圖 4-1 TiO_2 薄膜的 TEM 分析

具有氧化鋁/二氧化鈦鈍化層氮化鋁/氮化鋁/氮化鎵 Γ -閘極結構金屬-氧化物-半導體場效異質結構電晶體研製

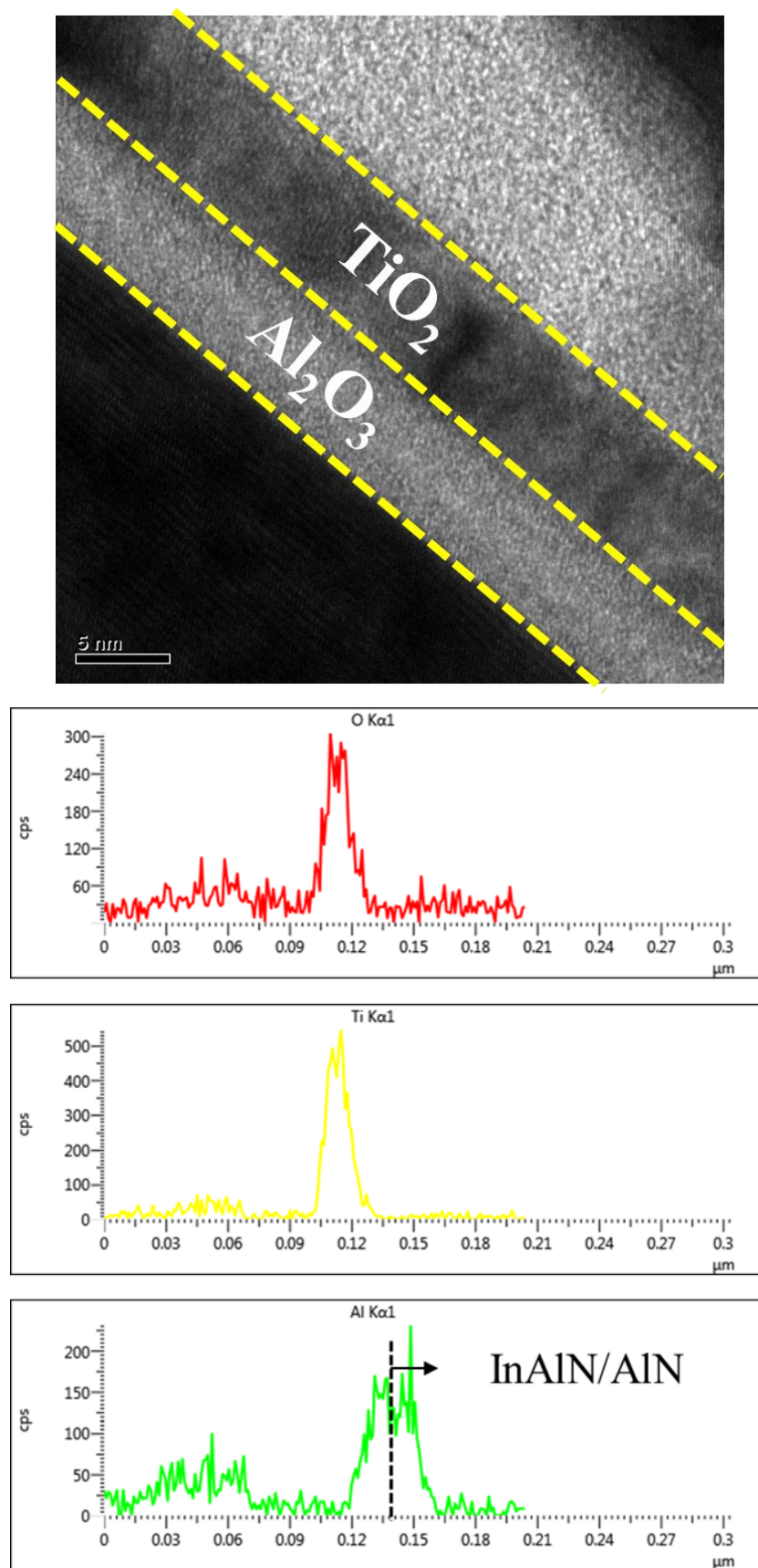


圖 4-2 Al_2O_3 - TiO_2 薄膜的 TEM 分析

具有氧化鋁/二氧化鈦鈍化層氮化鎳鋁/氮化鋁/氮化鎳 Γ -閘極結構金屬-氧化物-半導體場效異質結構電晶體研製

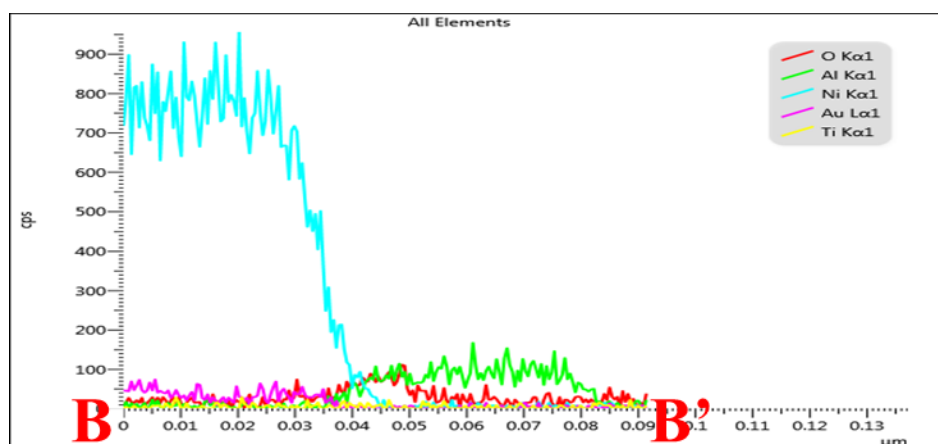
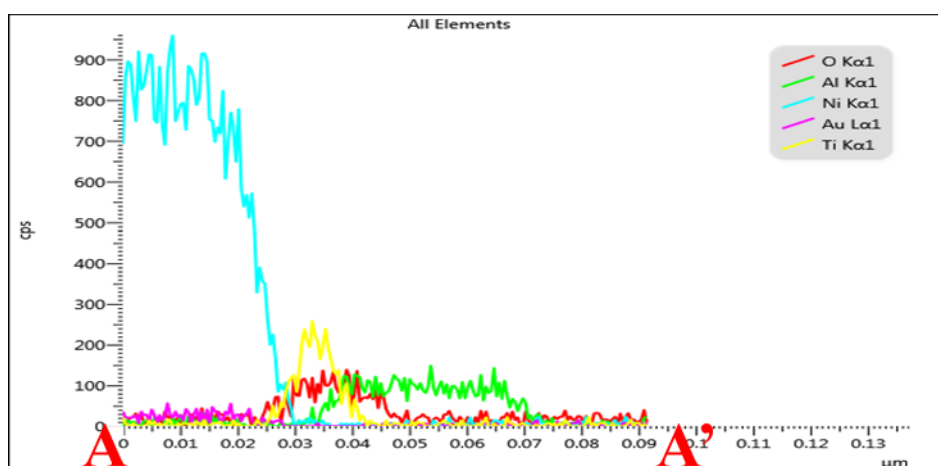
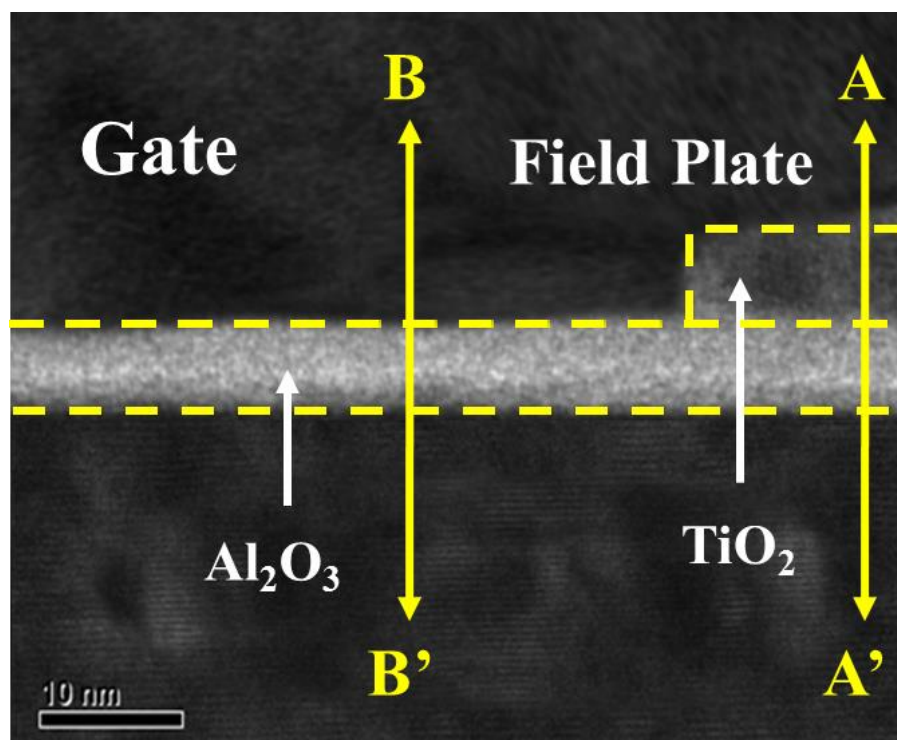


圖 4-3 Al_2O_3 - TiO_2 場板結構的 TEM 分析

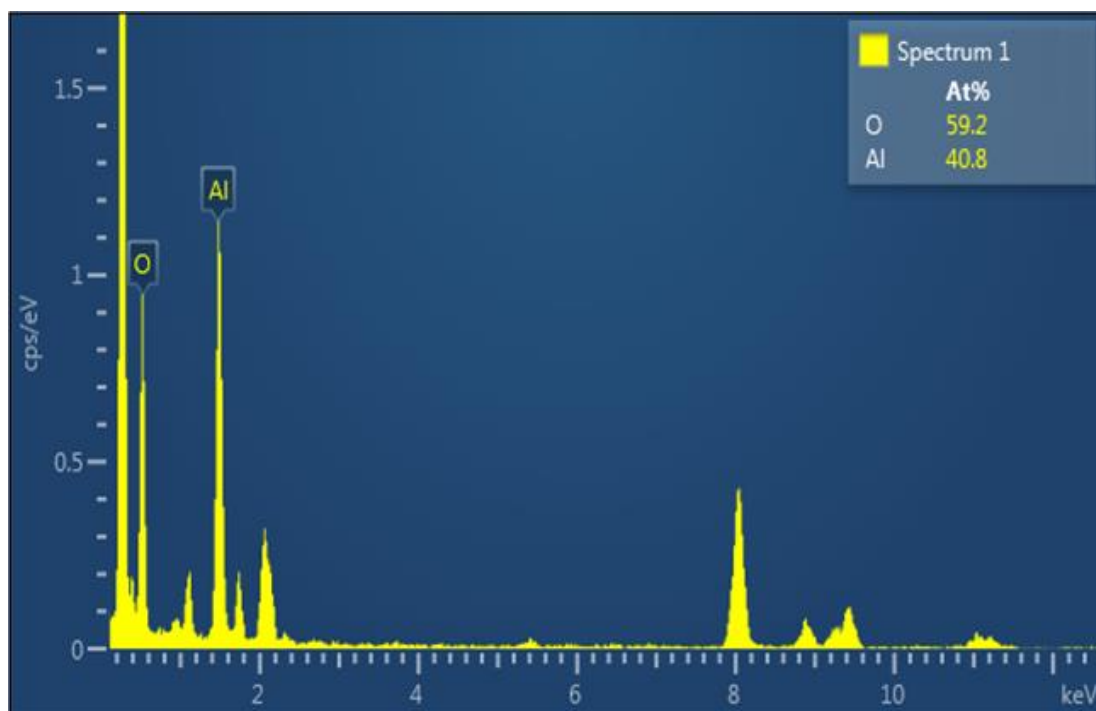


圖 4-4 Al₂O₃ 薄膜的能量色散 X 射線光譜 (EDS)

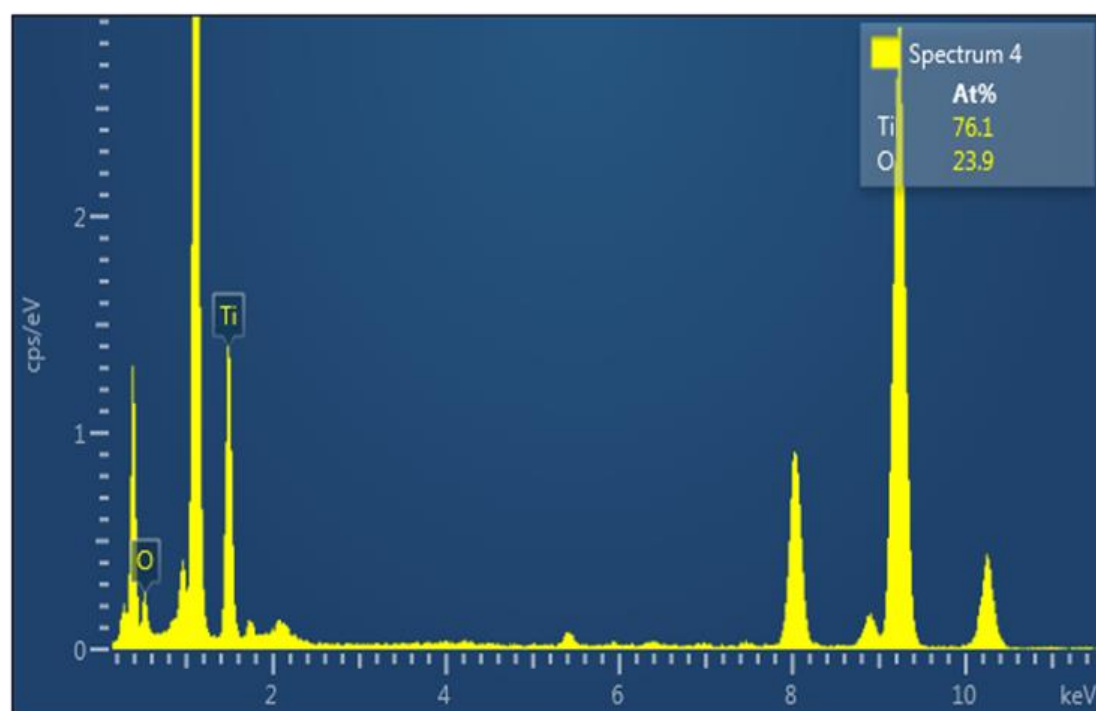


圖 4-5 TiO₂ 薄膜的能量色散 X 射線光譜 (EDS)

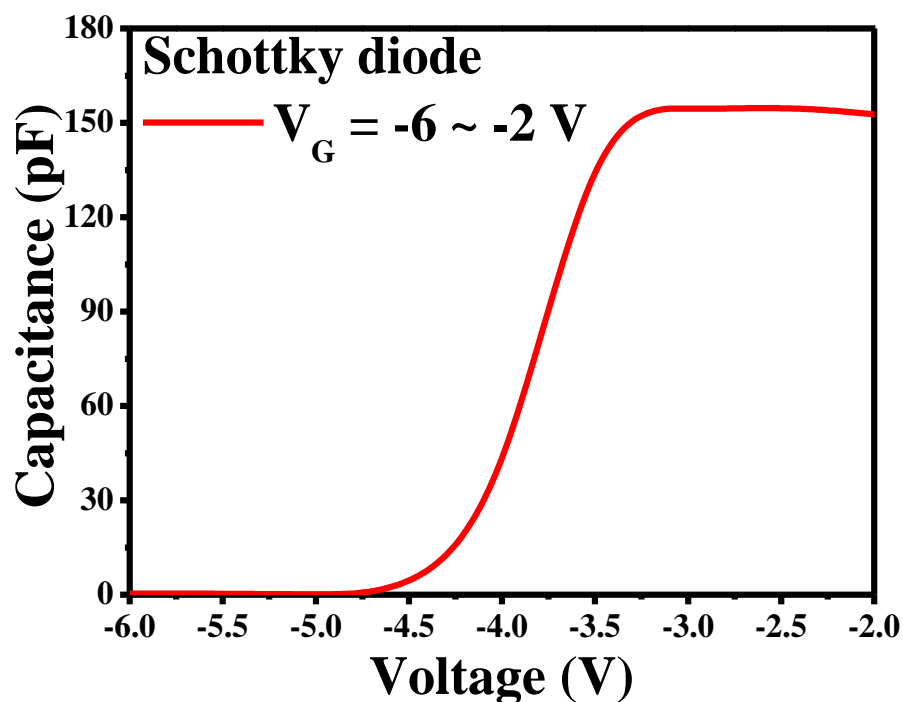


圖 4-6 蕭特基二極體的電容-電壓特性

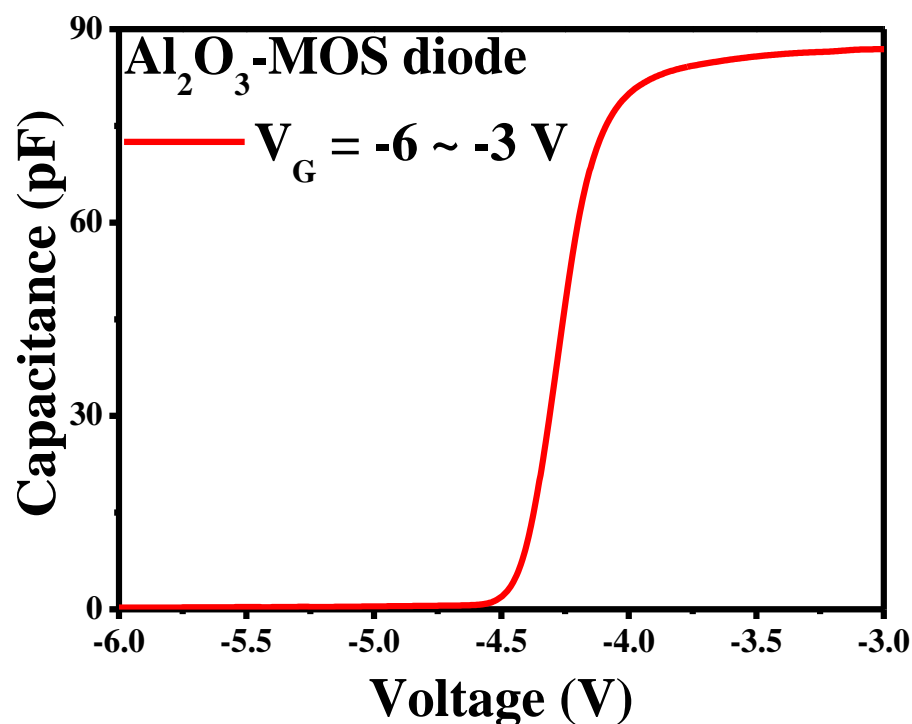


圖 4-7 Al₂O₃ MOS 二極體的電容-電壓特性

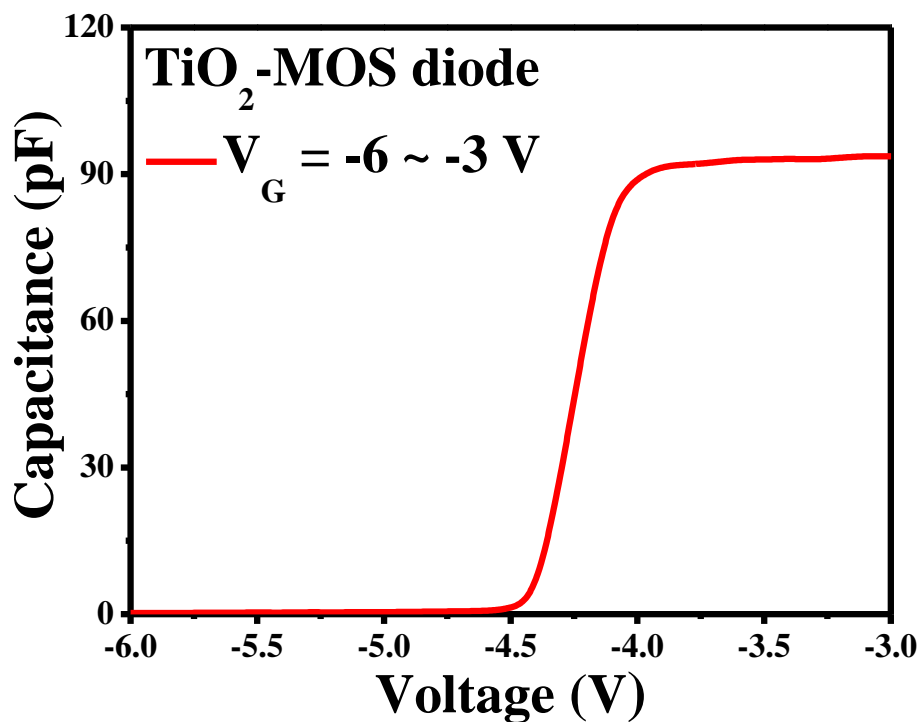


圖 4-8 TiO₂ MOS 二極體的電容-電壓特性

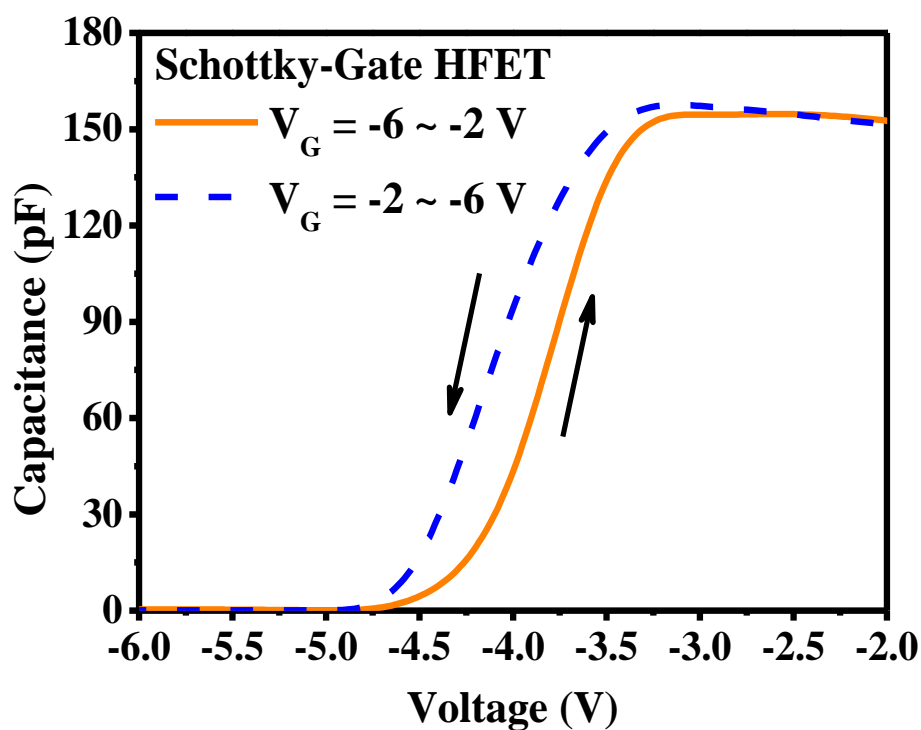


圖 4-9 1MHz 時金屬 -半導體 (M-S) 蕭特基二極體的遲滯現象

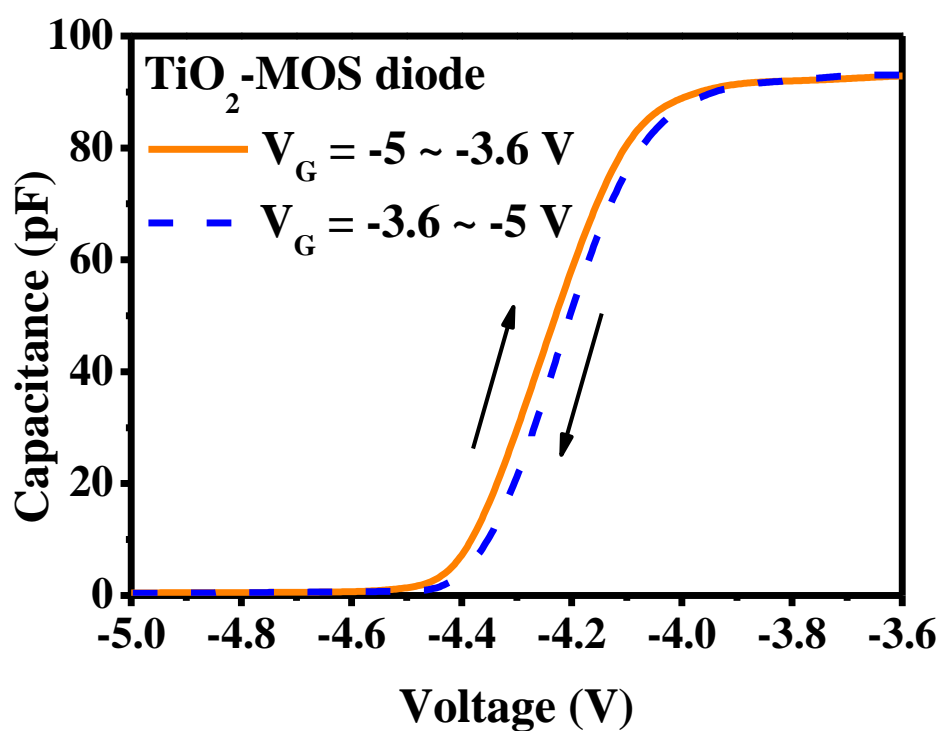


圖 4-10 1MHz 時 TiO₂-MOS 二極體的遲滯現象

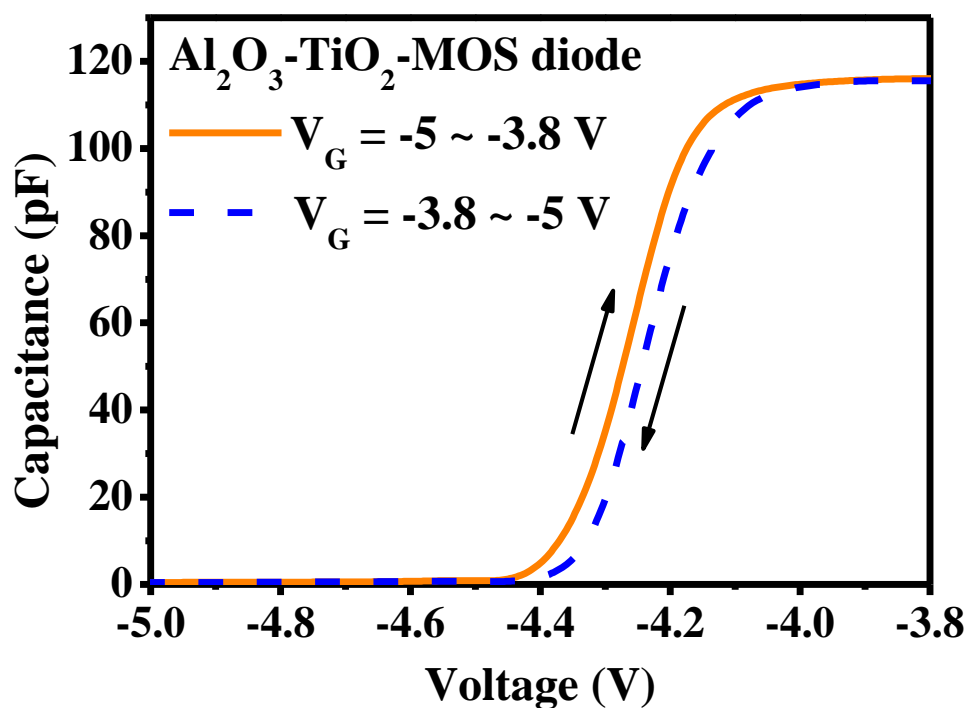


圖 4-11 1MHz 時 Al₂O₃-TiO₂-MOS 二極體的遲滯現象

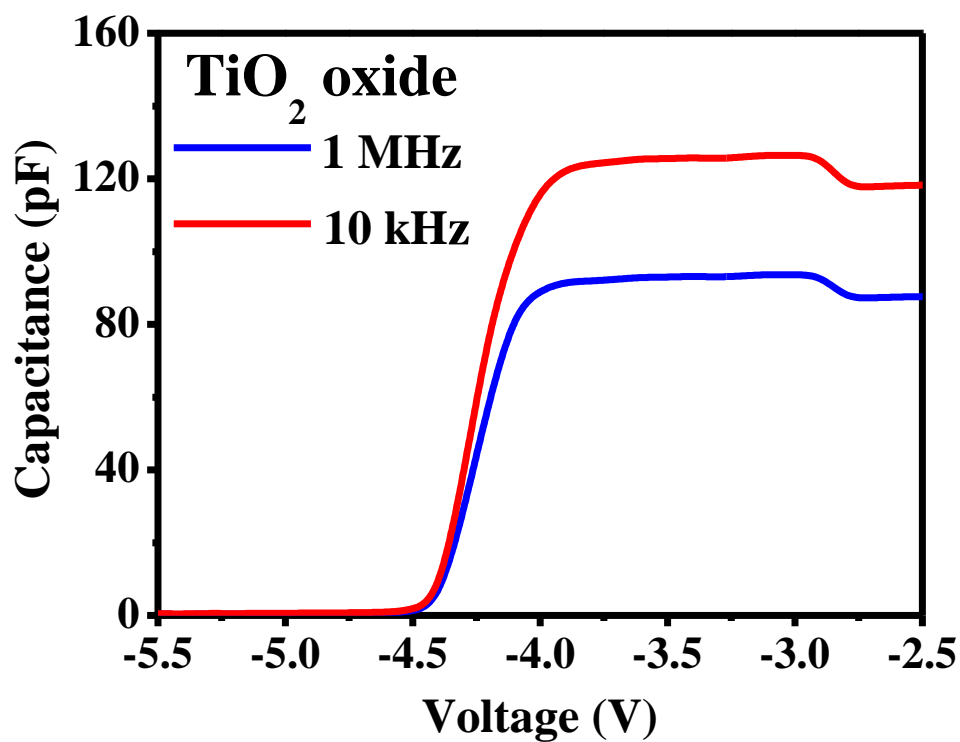


圖 4-12 TiO_2 MOS 二極體的電容 -電壓特性

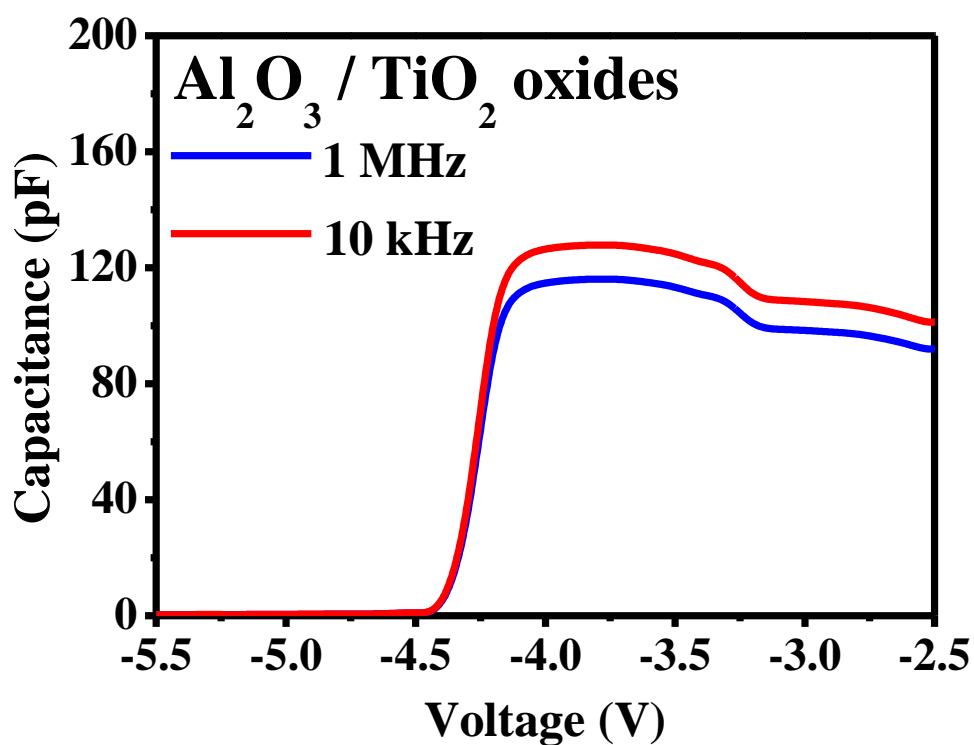


圖 4-13 Al_2O_3 - TiO_2 MOS 二極體的電容 -電壓特性

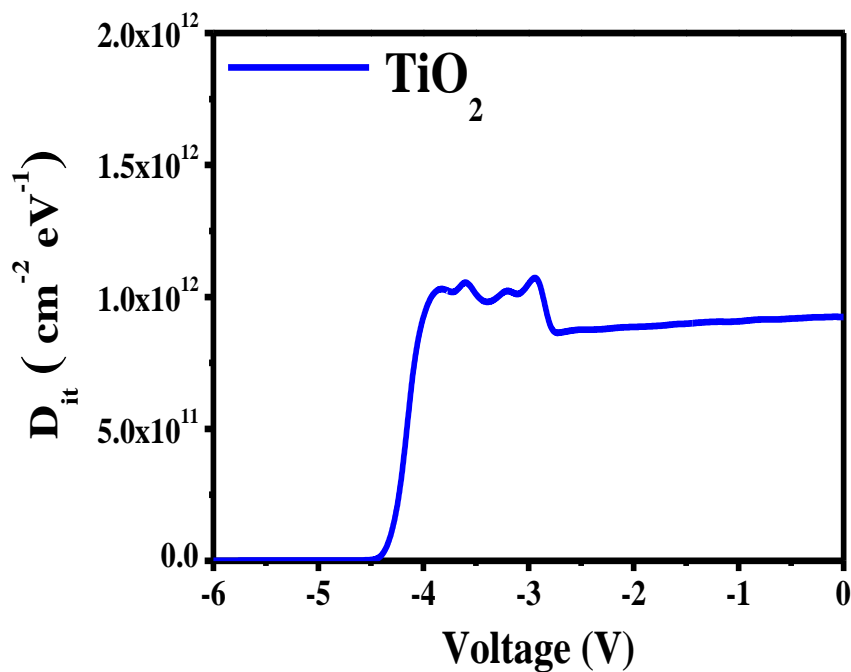


圖 4-14 TiO_2 MOS 二極體的 D_{it} -V 特性

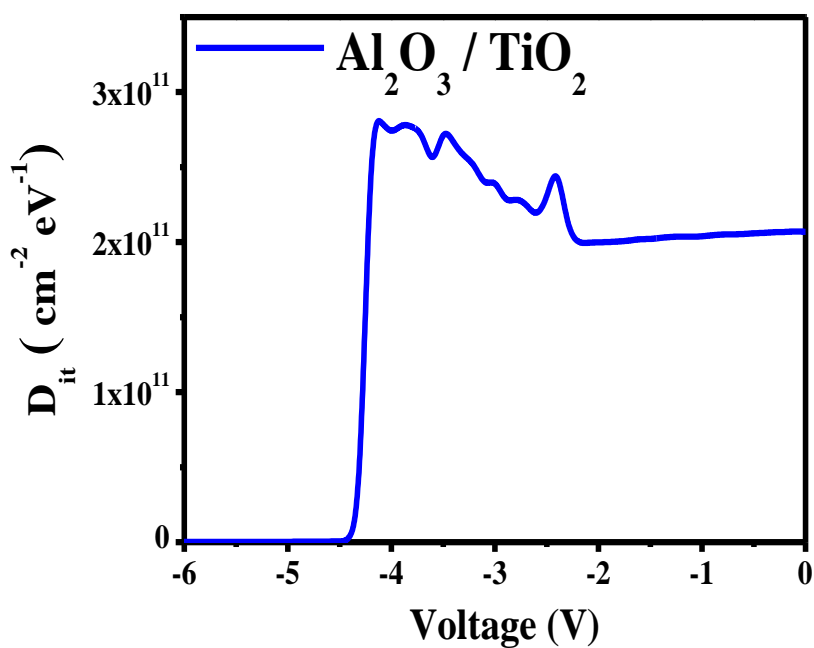


圖 4-15 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ MOS 二極體的 D_{it} -V 特性計算

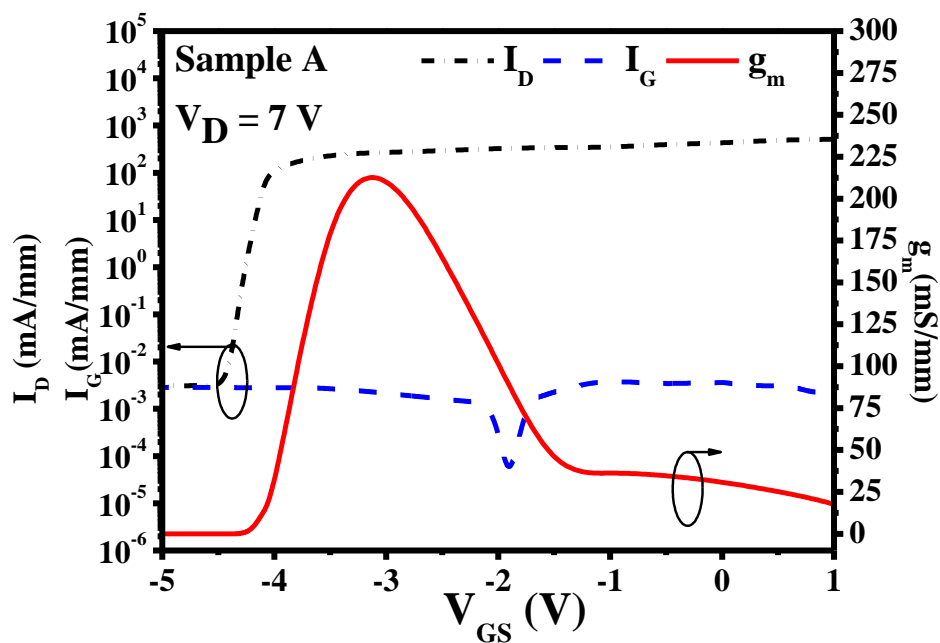


圖 4-16 室溫下蕭特基閘極和 MOS-HEMT 的外部轉導 (g_m) 和汲極漏電流 (I_{DS}) 和相關 I_{GS} 特徵

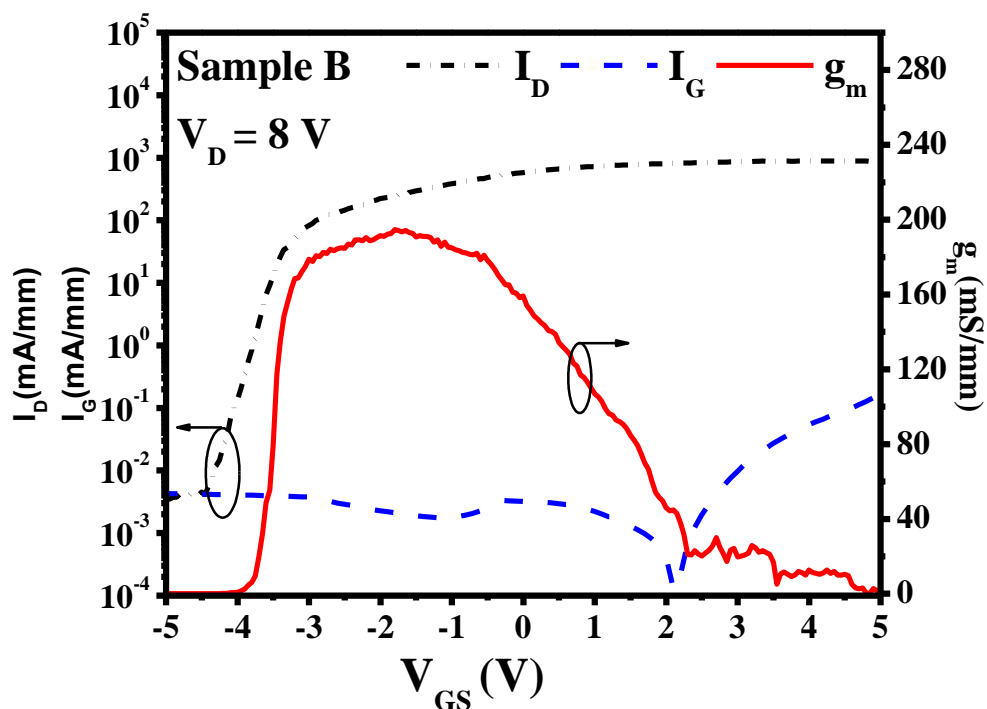


圖 4-17 室溫下 TiO_2 -MOS-HEMT 的外部轉導 (g_m) 和汲極漏電流 (I_{DS}) 和相關 I_{GS} 特徵

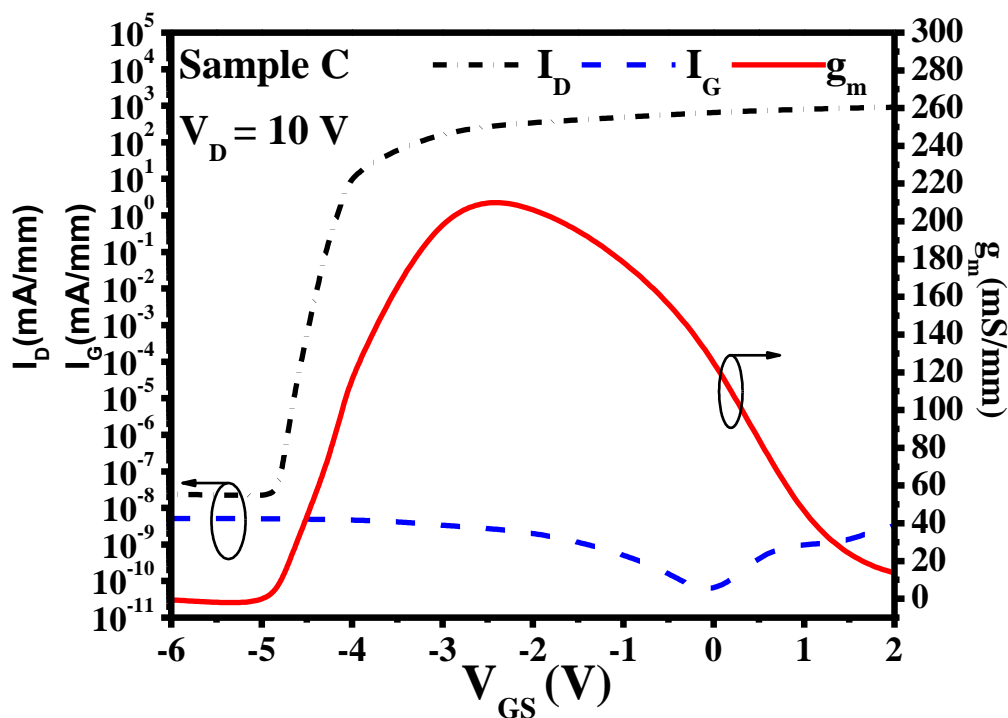


圖 4-18 室溫下 FP-Al₂O₃-TiO₂-MOS-HEMT 的外部轉導 (g_m) 和汲極漏電流 (I_{DS}) 和相關 I_{GS} 特徵

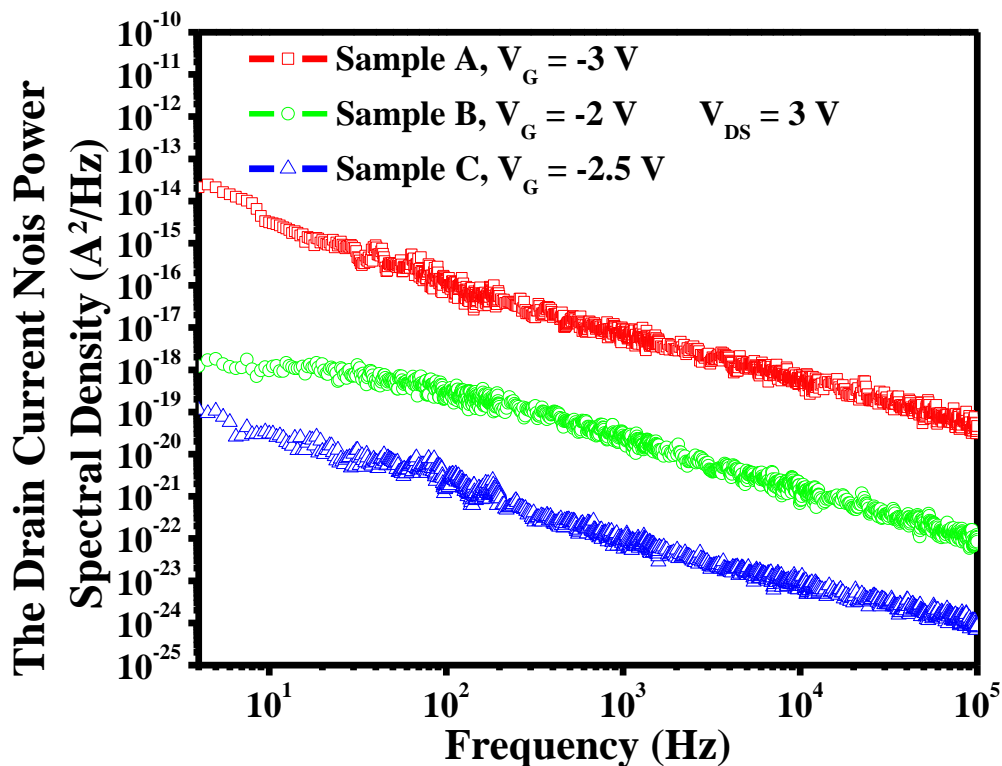


圖 4-19 比較樣品 A-C 的 $1/f$ 光譜

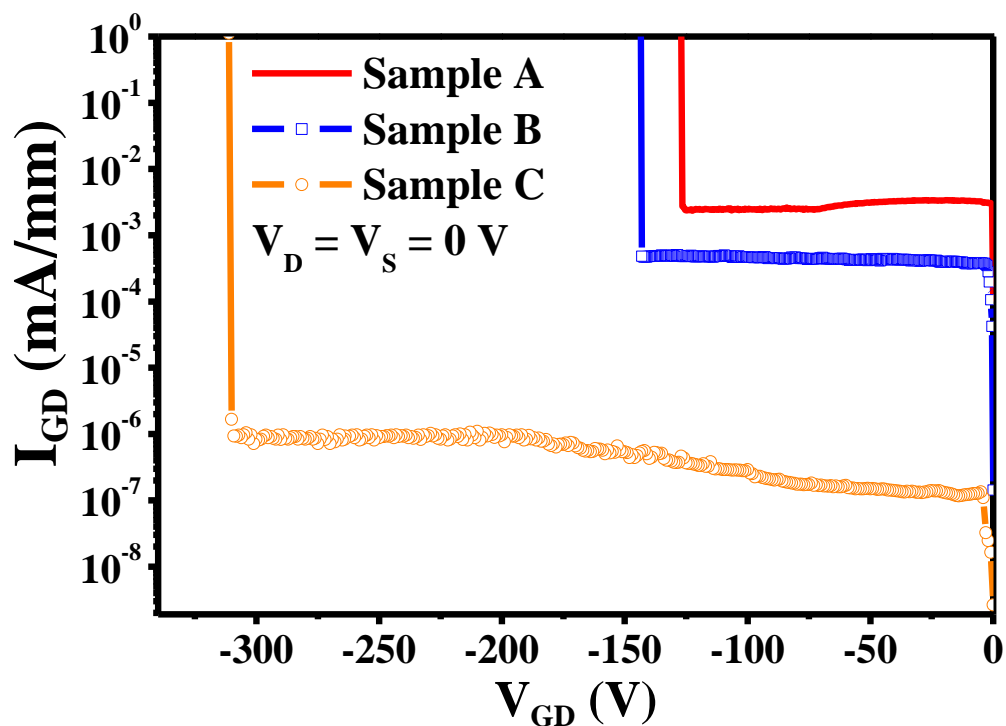


圖 4-20 樣品 ABC 的截止狀態閘極-汲極崩潰電壓(BV_{GD})特性

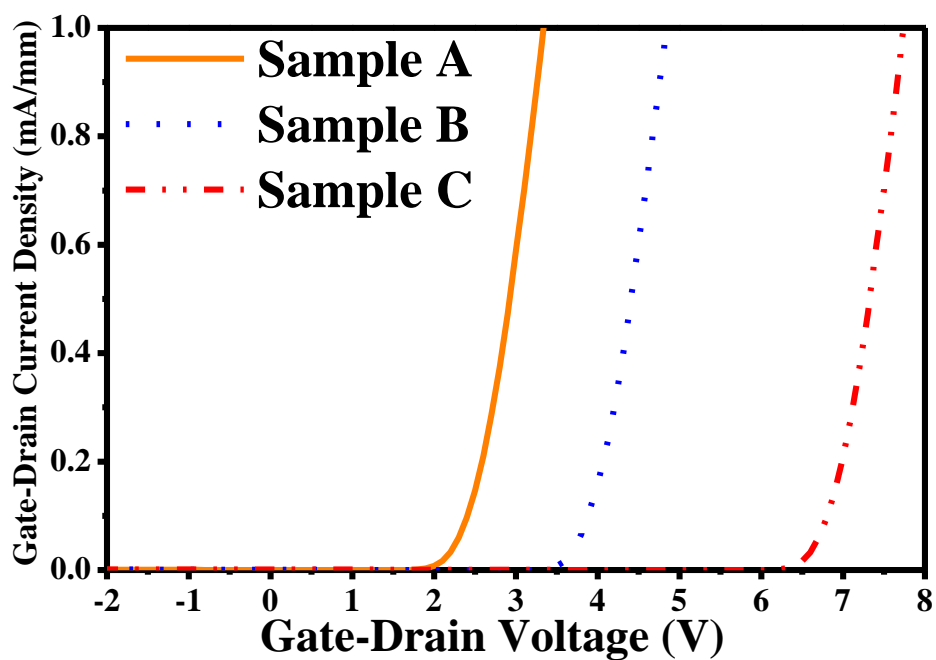


圖 4-21 所有樣品的導通(V_{ON})特性

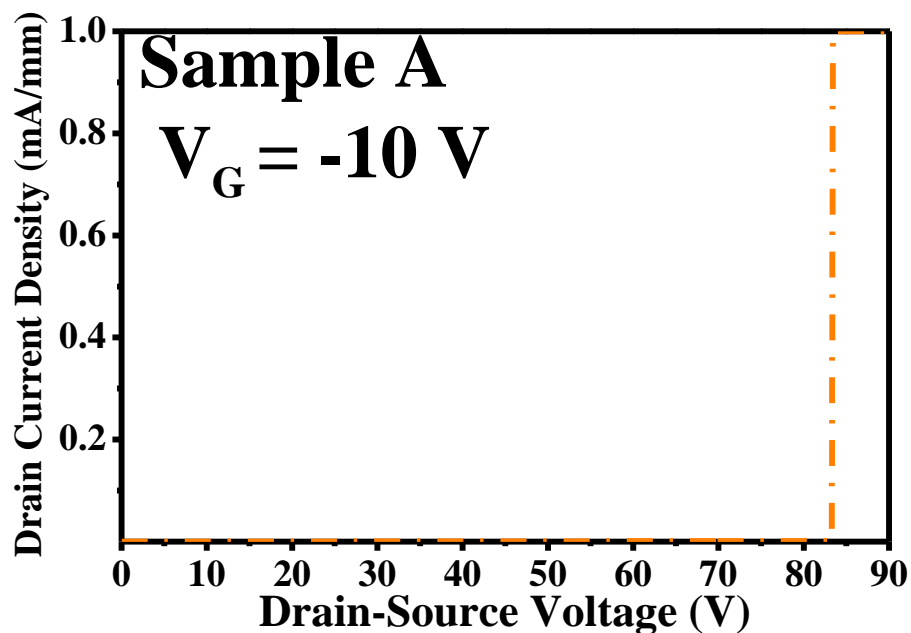


圖 4-22 樣品 A 的三端導通崩潰電壓(BV_{on})特性

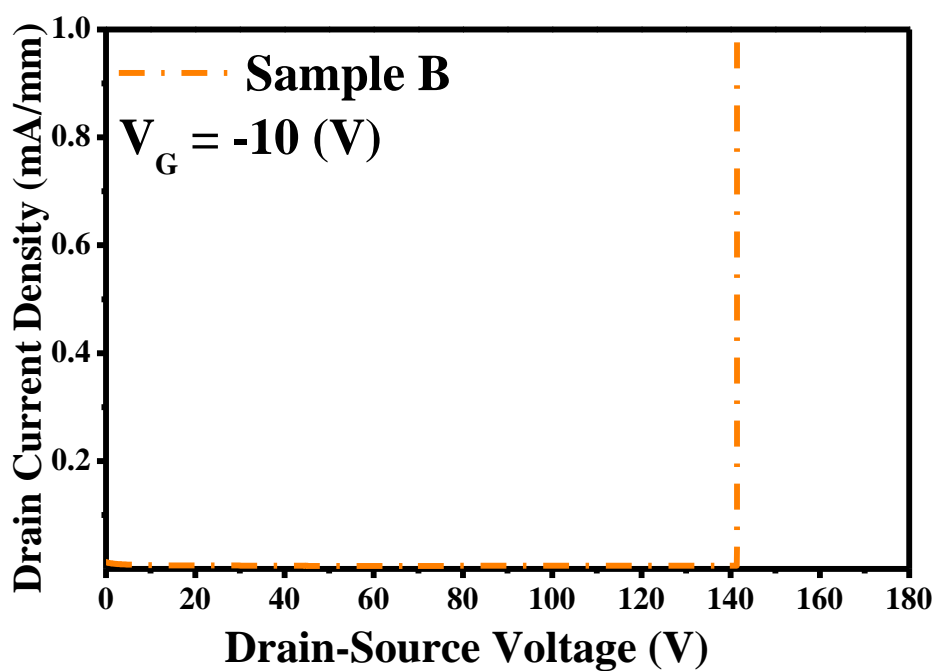


圖 4-23 樣品 B 的三端導通崩潰電壓(BV_{on})特性

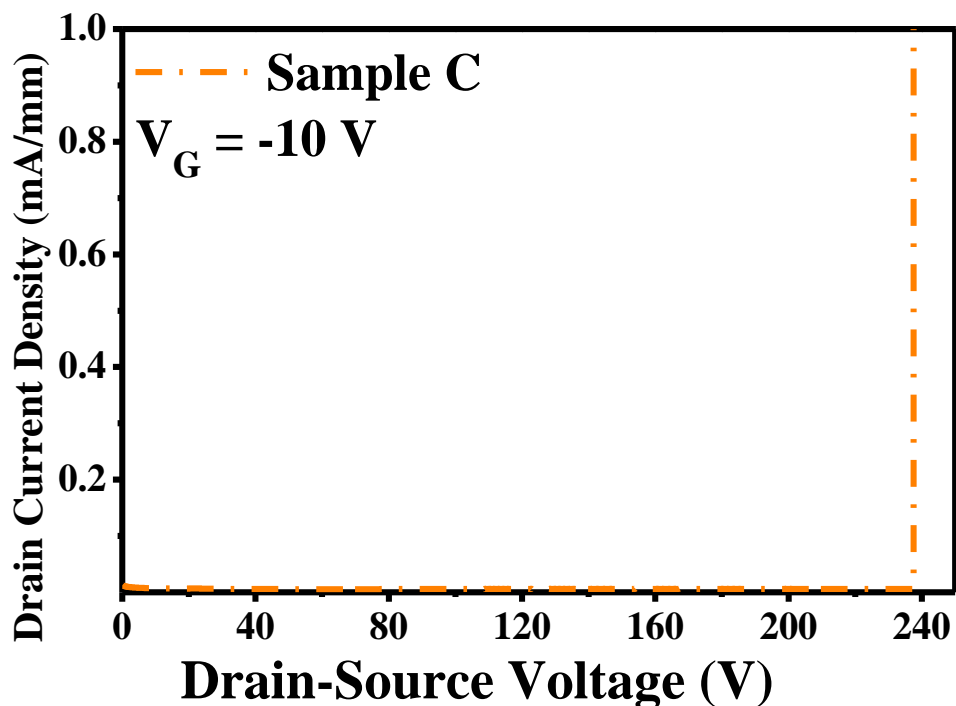


圖 4-24 樣品 C 的三端導通崩潰電壓(BV_{on})特性

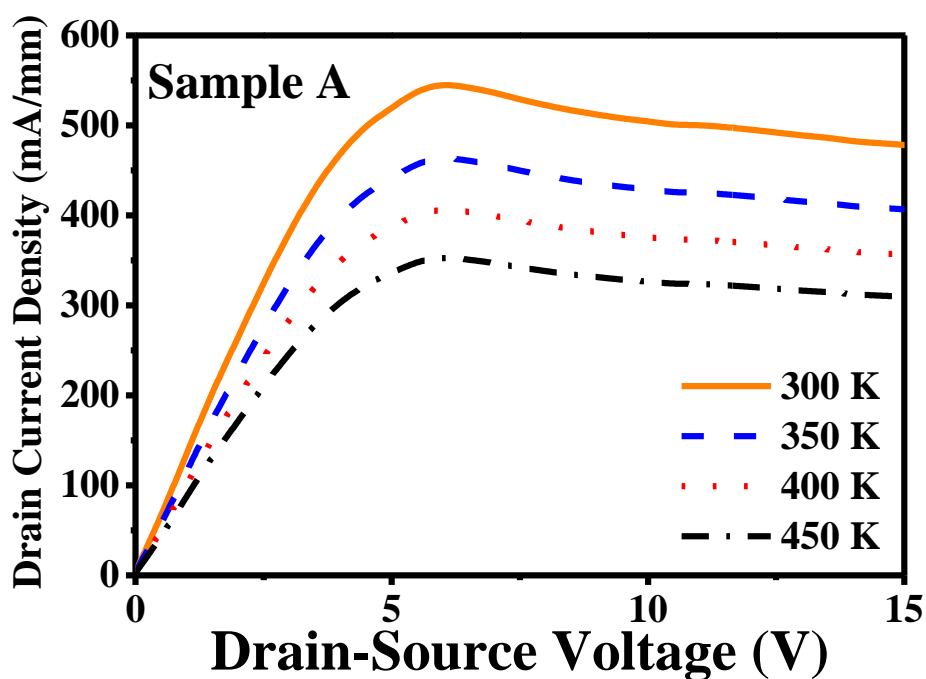


圖 4-25 傳統 HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K

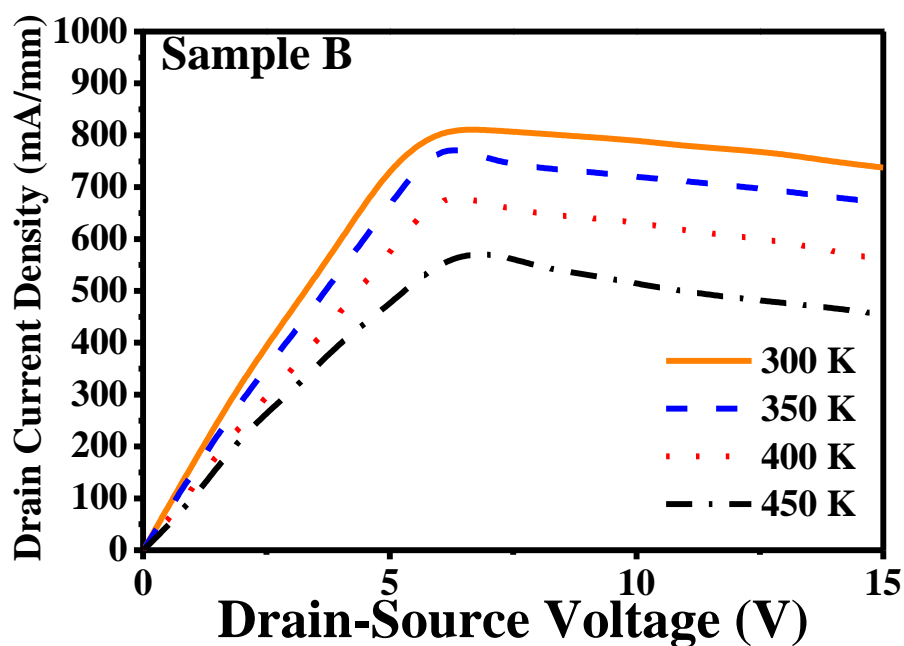


圖 4-26 TiO_2 -MOS-HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K

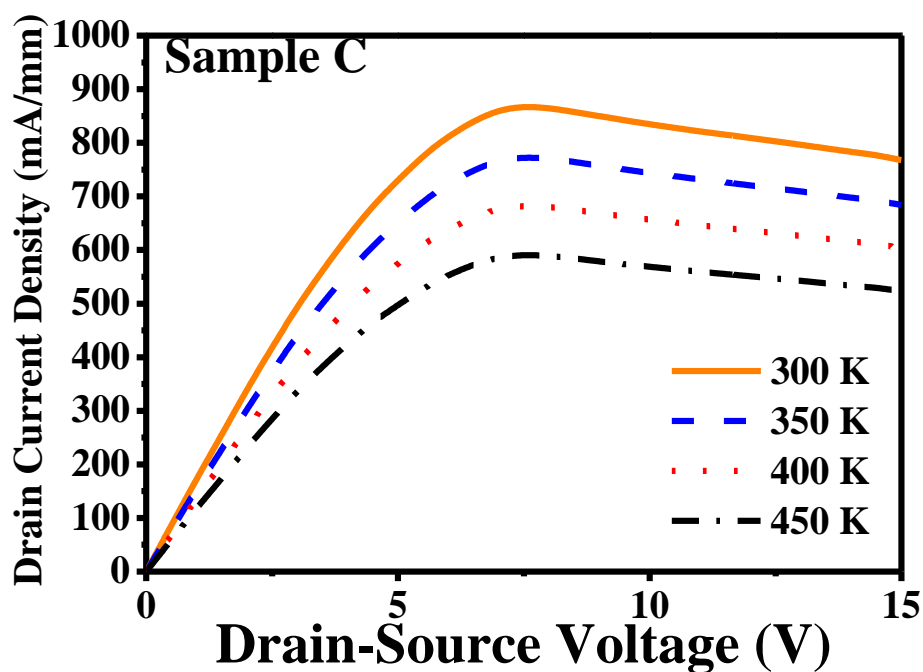


圖 4-27 FP- TiO_2 - Al_2O_3 -MOS HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K

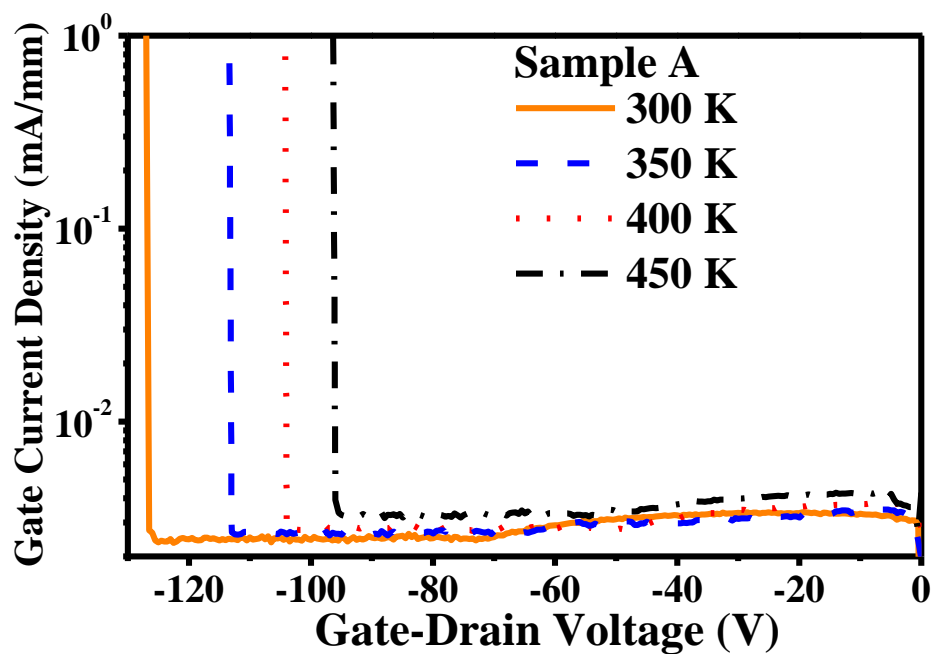


圖 4-28 傳統 HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K

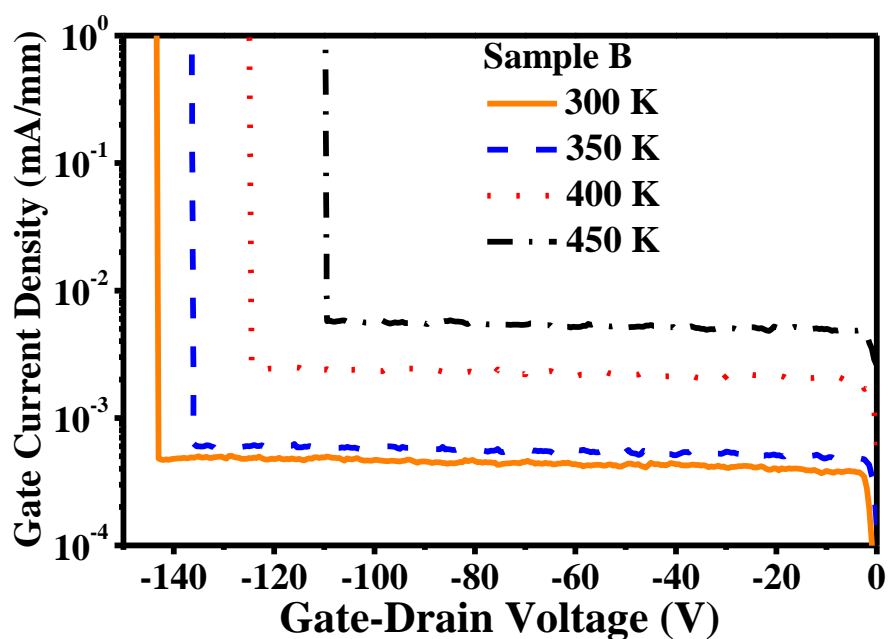


圖 4-29 TiO_2 -MOS-HEMT 與溫度相關的直流特性，300K 到 450K

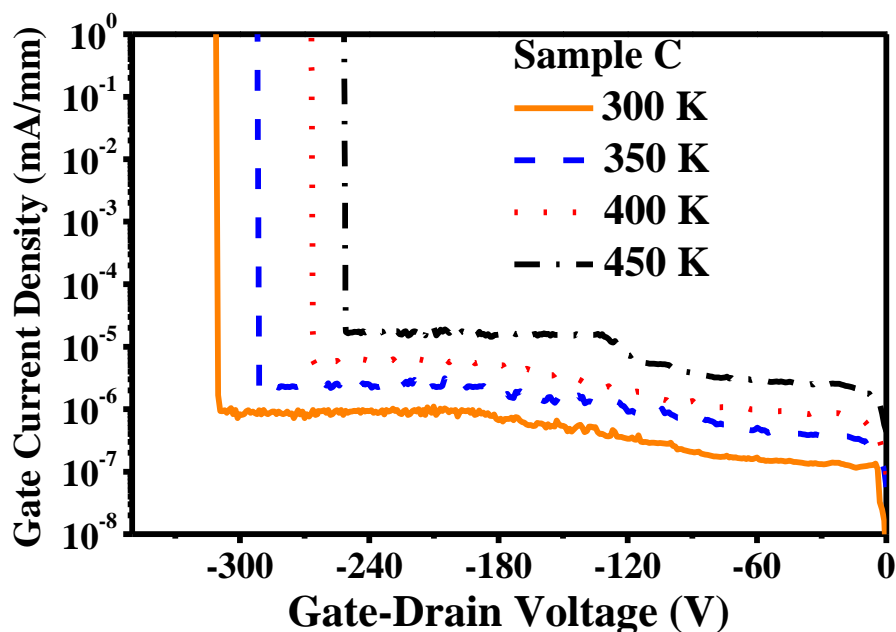


圖 4-30 FP- TiO_2 - Al_2O_3 -MOS HEMT 與溫度相關的直流特性，從 300K 到 450K

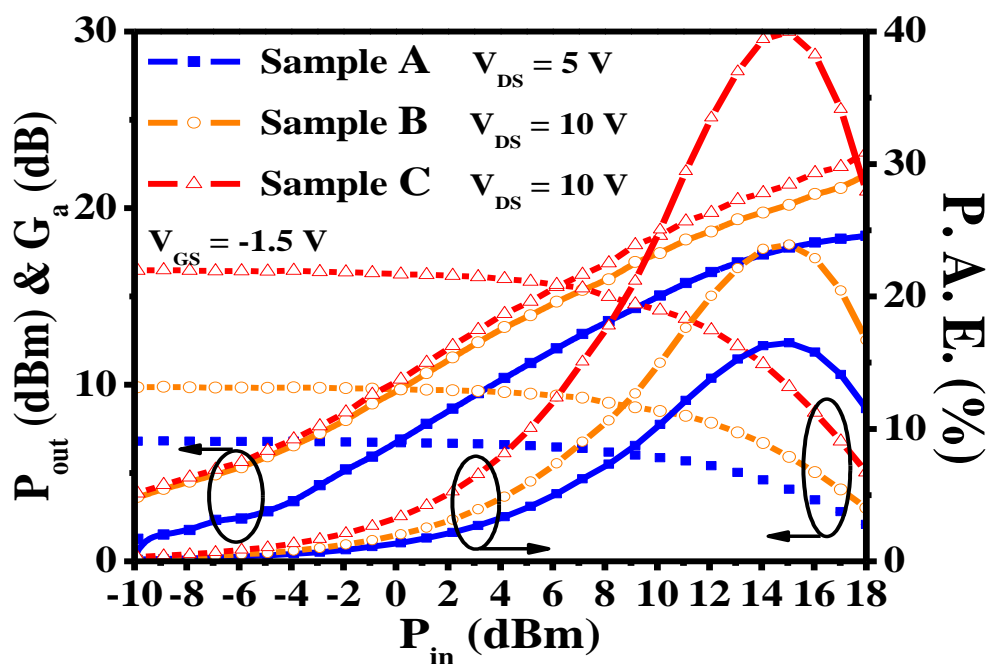


圖 4-31 傳統 HEMT， TiO_2 -MOS-HEMT 和 FP- TiO_2 - Al_2O_3 -MOS HEMT 在 2.4 GHz 時的功率附加效率、輸出功率和相關增益特性

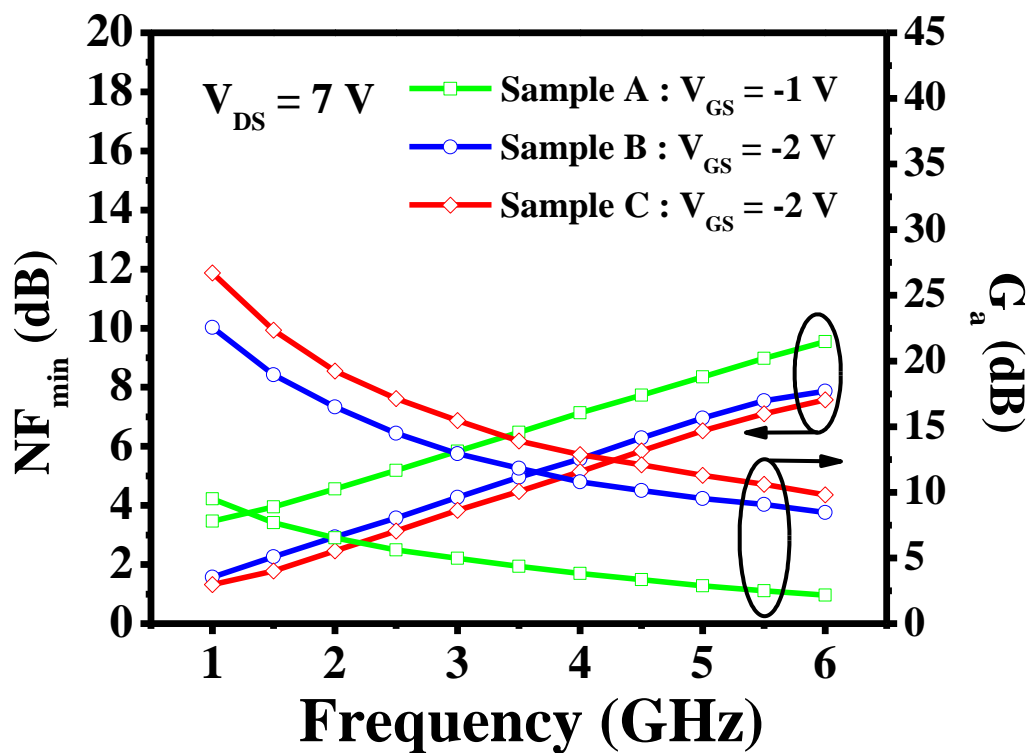


圖 4-32 最小雜訊係數(NF_{min})和相關增益(G_a)特性

與所有樣品頻率的關係