

逢甲大學學生報告 ePaper

氮化鋁鎵/氮化鋁/氮化鎵金屬-氧化物-半導體異質結構  
場效電晶體之光電特性研究

Photoelectric characteristics of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Dielectric  
 $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  MOS-HFETs

作者：柯建宏、莊英敏、張晉榮、陳東昇、廖宜璉

系級：電子四甲

學號：D0589092、D0442601、D0545773、D0790680、D0789720

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



## 摘要

本專題旨在藉由超音波霧化熱裂解法研製具有氧化鋁閘極介電層之氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵金屬-氧化物-半導體結構異質結構場效電晶體，使用高 k 值閘極介電層改善閘極絕緣能力與獲致鈍化表面缺陷效果，以提升元件工作性能以及提升元件崩潰特性。

為提供相關特性比較，本研究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結構之氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵金屬異質結構場效電晶體，所獲致之直流特性分別為：最大汲極-源極電流密度  $I_{DS,max}$  (544.2 mA/mm、810.4 mA/mm)，無閘極偏壓飽和電流密度  $I_{DSS0}$  (291.1 mA/mm、331.3 mA/mm)，最大外質轉導  $g_{m,max}$  (221.2 mS/mm、180.4 mS/mm)，閘極漏電流  $I_g$  ( $1.4 \times 10^{-2}$  mA/mm、 $1.1 \times 10^{-6}$  mA/mm)，閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓  $BV_{GD}$  (-126 V、-185.5 V)，功率轉換效益 P.A.E. (16.5%、26.3% V)。實驗結果顯示本研究所研製具有氧化鋁閘極介電層之氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵金屬-氧化物-半導體結構異質結構場效電晶體，能有效改善元件直流特性，以及具有高 k 值閘極介電層改善閘極絕緣能力與獲致鈍化表面缺陷效果可提升元件的崩潰特性，此外，本篇專題亦有使用紫外線檢測技術研究光電特性。

關鍵字：超音波霧化熱裂解、氧化鋁、氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵、紫外線檢測

## Abstract

Ultraviolet (UV) detection and electrical characteristics of In<sub>0.17</sub>Al<sub>0.83</sub>N/AlN/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors (MOS-HFETs) with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate-dielectric and passivation formed by using ultrasonic spray pyrolysis deposition (USPD) are studied with respect to a conventional Schottky-gate HFET. Due to the enhanced gate control, the DC characteristic of device has been effectively improved. Depositing the high-k aluminum dioxide as a gate-dielectric layer, the gate leakage reduced by gate insulation and surface passivation.

Providing the comparison of the characteristics, In this thesis, Schottky-HFET, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MOS-HFET, have been achieved, including maximum drain-source saturation current density ( $I_{DS, \max}$ ) of 544.2 mA/mm, 810.4 mA/mm, , drain-source current density at  $V_{GS} = 0$  V ( $I_{DSS0}$ ) of 291.1 mA/mm, 331.3 mA/mm, maximum extrinsic transconductance ( $g_{m, \max}$ ) of 212.2 mS/mm, 180.4 mS/mm, gate leakage current ( $I_g$ ) at  $V_{GS} = -10$  V of sample A and sample B were  $1.4 \times 10^{-2}$  mA/mm,  $1.1 \times 10^{-6}$  mA/mm, two-terminal off-state gate-drain breakdown voltage ( $BV_{GD}$ ) of -126 V, -185.5 V, and power-added efficiency (P.A.E.) of 16.5%, 26.3% at 2.4 GHz, respectively, at 300 K.

From the experiment results, the superior performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal-oxide-semiconductor HFETs (MOS-HFET) can be effectively improve DC characteristics by USPD technique, not only decrease leakage current but increase breakdown voltage of device.

Keywords: USPD, Aluminium oxide, InAlN/AlN/GaN, Ultraviolet detection

## 目錄

目錄.....	3
圖片目錄.....	5
表格目錄.....	9
第一章 介紹.....	10
第二章 InAlN/AlN/GaN 異質結構.....	14
2-1 InAlN/AlN/GaN 異質結構.....	14
第三章 元件結構和製造程序 .....	16
3-1 元件結構.....	16
3-1-1 高臺絕緣.....	16
3-1-2 源極和汲極歐姆接觸.....	17
3-1-3 閘極蕭特基接觸.....	18
3-2 超音波霧化熱裂解 (USPD) .....	19
第四章 實驗結果與討論.....	20
4-1 材料分析.....	20
4-1-1 X 射線光電子能譜儀 (XPS) .....	20
4-1-2 穿透式電子顯微鏡 (TEM) .....	21
4-1-3 X 射線能量散佈分析儀 (EDS) .....	21
4-2 室溫下的直流特性.....	22
4-2-1 電流－電壓特性.....	22
4-2-2 轉換特性.....	22
4-2-3 閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓 (BV <sub>GD</sub> ) 特性.....	23
4-2-4 三端關閉狀態崩潰電壓 (BV <sub>off</sub> ) 特性.....	23
4-3 直流變溫特性.....	25
4-3-1 輸出變溫特性.....	25
4-3-2 崩潰電壓變溫特性.....	26

4-4 電容－電壓特性.....	27
4-4-1 遲滯現象.....	28
4-4-2 界面狀態密度 (D <sub>it</sub> ) .....	28
4-5 微波特性.....	29
4-5-1 截止頻率 (f <sub>T</sub> ) 以及 最大震盪頻率 (f <sub>max</sub> ) 特性 .....	29
4-5-2 功率特性.....	31
4-5-3 高頻雜訊特性.....	32
4-5-4 低頻雜訊特性.....	33
4-5-5 脈衝模式之特性.....	33
4-6 光響應特性.....	34
第五章 結論.....	37
參考文獻.....	38

## 圖片目錄

圖 2-1 氮化鎵異質結構場效電晶體結構的極化效應.....	43
圖 3-1 蕭特基閘極異質結構場效電晶體以及氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體結構之橫截面圖 .....	43
圖 3-2 樣本 A 之製程 .....	44
圖 3-3 樣本 B 之製程.....	45
圖 3-4 超音波霧化熱裂解技術示意圖 .....	46
圖 4-1 氧化鋁薄膜之 TEM 分析 .....	47
圖 4-2 氧化鋁薄膜之 EDS 分析 .....	48
圖 4-3 AFM 量測系統之結構 .....	48
圖 4-4 氧化鋁薄膜之 AFM 二維分析 .....	49
圖 4-5 氧化鋁薄膜之 AFM 三維分析 .....	49
圖 4-6 室溫下蕭特基-閘極異質結構場效電晶體之電流-電壓特性 ...	50
圖 4-7 室溫下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之電流-電壓特性 .....	50
圖 4-8 室溫下蕭特基-閘極之外質轉導與汲極漏電流.....	51
圖 4-9 室溫下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之外質轉導與汲極漏電流.....	51
圖 4-10 樣本 A 與樣本 B 之臨界電壓 ( $V_{th}$ ) 特性 .....	52
圖 4-11 樣本 A 之閘極-汲極雙端關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{GD}$ ) 特性	52
圖 4-12 樣本 B 之閘極-汲極雙端關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{GD}$ ) 特性	53
圖 4-13 樣本 A 之汲極-源極三端關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{off}$ ) 特性.	53
圖 4-14 樣本 B 之汲極-源極三端關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{off}$ ) 特性.	54

圖 4-15 300 K 到 450 K 之傳統異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性.....	54
圖 4-16 300 K 到 450 K 之氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性 .....	55
圖 4-17 300 K 到 450 K 之傳統異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性.....	55
圖 4-18 300 K 到 450 K 之氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性 .....	56
圖 4-19 300 K 到 450 K 之傳統異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性.....	56
圖 4-20 300 K 到 450 K 之氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性 .....	57
圖 4-21 傳統異質結構場效電晶體之電容-電壓特性.....	57
圖 4-22 氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之電容-電壓特性.....	58
圖 4-23 1 MHz 下金屬-半導體 (M-S) 蕭特基異質結構場效電晶體之遲滯特性.....	58
圖 4-24 1 MHz 下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之遲滯特性.....	59
圖 4-25 氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之電容-電壓特性.....	59
圖 4-26 氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之界面狀態密度-電壓特性 .....	60
圖 4-27 傳統異質結構場效電晶體之截止頻率 ( $f_T$ ) 與最大振盪頻率 ( $f_{max}$ ) 特性.....	60
圖 4-28 氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之截止頻率 ( $f_T$ ) 與最大振盪頻率 ( $f_{max}$ ) 特性 .....	61

圖 4-29 2.4 GHz 下傳統與氧化鋁金屬-氧化物-半導體的異質結構場效電晶體之功率附加效率 (P. A. E.)、輸出功率 (P <sub>out</sub> ) 和相關增益 (G <sub>a</sub> ) 特性 .....	61
圖 4-30 傳統與氧化鋁金屬-氧化物-半導體的異質結構場效電晶體的最小雜訊係數 (NF <sub>min</sub> ) 與相關增益 (G <sub>a</sub> ) 對頻率之特性 .....	62
圖 4-31 傳統與氧化鋁金屬-氧化物-半導體的異質結構場效電晶體之低頻雜訊特性.....	62
圖 4-32 傳統異質結構場效電晶體之直流與脈衝特性 .....	63
圖 4-33 金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之直流與脈衝特性.....	63
圖 4-34 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性.....	64
圖 4-35 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性.....	64
圖 4-36 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性.....	65
圖 4-37 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性.....	65
圖 4-38 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性.....	66
圖 4-39 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性.....	66
圖 4-40 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性.....	67
圖 4-41 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性.....	67



圖 4-42 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構 場效電晶體之電流-電壓特性 .....	68
圖 4-43 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構 場效電晶體之電流-電壓特性 .....	68
圖 4-44 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構 場效電晶體之電流-電壓特性 .....	69
圖 4-45 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構 場效電晶體之電流-電壓特性 .....	69
圖 4-46 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構 場效電晶體之電流-電壓特性 .....	70
圖 4-47 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構 場效電晶體之電流-電壓特性 .....	70
圖 4-48 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構 場效電晶體之電流-電壓特性 .....	71
圖 4-49 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構 場效電晶體之電流-電壓特性 .....	71

## 表格目錄

表 1-1 半導體材料特性的比較 .....	10
表 1-2 不同介電材料的比較 .....	12
表 1-3 不同氧化層的沉積方法比較 .....	13
表 2-1 氮化鎵與其他基板的比較 .....	15
表 4-1 氧化物的厚度 .....	20
表 4-2 氧化物厚度的比較 .....	21
表 4-3 由 AFM 所測量的表面粗糙度 .....	21
表 4-4 總結了樣本 A 與 B 的直流特性 .....	24
表 4-5 樣本 A 從 300 K 到 450 K 的直流變溫特性 .....	25
表 4-6 樣本 B 從 300 K 到 450 K 的直流變溫特性 .....	25
表 4-7 樣本 A 從 300 K 到 450 K 的崩潰電壓變溫特性 .....	26
表 4-8 樣本 B 從 300 K 到 450 K 的崩潰電壓變溫特性 .....	26
表 4-9 樣本 A 與樣本 B 的電容特性 .....	27
表 4-10 樣本 A 與樣本 B 的遲滯特性比較 .....	28
表 4-11 樣本 B 的遲滯特性 .....	29
表 4-12 樣本 A 與樣本 B 的截止頻率 ( $f_T$ ) 與最大振盪頻率 ( $f_{max}$ ) 比較 .....	30
表 4-13 2.4 GHz 環境下的功率特性 .....	31
表 4-14 樣本 A 與樣本 B 的雜訊特性數值 .....	32
表 4-15 樣本 A 與樣本 B 的電流崩潰特性 .....	34
表 4-16 採用光源的波長及功率 .....	34
表 4-17 樣本 A 在不同光源下的直流特性 .....	35
表 4-18 樣本 B 在不同光源下的直流特性 .....	36

# 第一章

## 介紹

氮化鎵 (GaN) 基板具有許多優異的性能，例如有著較大的崩潰電場、寬能隙和極化場形成的高遷移率，而氮化鎵 (GaN) 基板成長的異質結構場效電晶體 (HFET) 因其高崩潰、高功率微波與高頻率的應用受到廣泛的關注 [1][2][3]。在下列表 1-1 列出主要的半導體參數。

表 1-1 半導體材料特性的比較

特性	氮化鎵 (GaN)	砷化鎵 (GaAs)	矽 (Si)	磷化銦 (InP)	碳化矽 (SiC)
電子遷移率 (cm <sup>2</sup> /V-s)	1500	6000	1500	5400	700
能隙 (eV)	3.4	1.43	1.12	1.34	3.2
熱傳導係數 (W/Kcm) @300K	1.3	0.54	1.5	0.67	1.3
崩潰電場 (MV/cm)	5	0.6	0.3	0.45	3.5

為了提升性能，氮化物基板的異質結構場效電晶體結合許多不同的能障和通道設計 [4]，最常見的設計是有著壓電極化與自發極化產生二維電子雲 (2DEG) 的氮化鋁鎵/氮化鎵異質結構，在氮化鋁鎵/氮化鎵界面之間製造薄的氮化鋁 (AlN) 間隔層可以有效的改善載子密度和二維電子雲的晶格散射 [5]以提供更好的載子特性。

把氮化鋁鎵 (AlGa<sub>N</sub>) 阻擋層替換成氮化銦鋁 (InAlN) 阻擋層[6]可使異質結構場效電晶體的性能更加提升，且利用氮化銦鋁阻擋層可以調節 In 含量來使異質結構的晶格匹配。當氮化銦鋁的銦含量為 18%時 [7]，氮化銦鋁可以與氮化鎵晶格匹配，並提供比氮化鋁鎵 (AlGa<sub>N</sub>) 更高的載子密度。另一方面，在氮化銦鋁/氮化鎵異質結構中插入的薄氮化鋁間隔層能改善晶格散射，從而使極化場增強並使結構有更高的遷移率和載子密度。

由於抑制閘極漏電流和電場可以使崩潰電壓特性將在相同偏壓下提升。因此，需要沉積高介電常數 (高 K) 的材料以減少穿隧電流 (tunneling currents)。而且，這是最有效的方法來降低漏電流以使元件保持電特性。現在許多介電材料已經被廣泛研究，包括氧化鎂 [8]、氧化鋁 [9]、氧化矽 [10]、氧化鈦 [11]、氧化釧 [12] 和氧化鋁 [13]這些作為閘極的介電質。在下列表 1-2 [14]顯示材料的介電常數和能隙大小。

表 1-2 不同介電材料的比較

材料	氧化鈦 (HfO <sub>2</sub> )	氧化鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	氧化鈦 (TiO <sub>2</sub> )	氧化釷 (La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	氧化矽 (SiO <sub>2</sub> )
介電常數	16~30	9.5~12	86~173	25~30	3.8~3.9
能帶間隙 (eV)	4.5~6	8.8	3.05	6	9
傳導帶偏移 (eV)	1.5	2.8	~0	1.5	3.15

有很多不同的方法可以用來沉積氧化層薄膜，包括等電漿化學氣相沉積 (PECVD) [15]、有機金屬化學氣相沉積 (MOCVD) [16]、原子層沉積[17]和濺鍍[18]，但是上述的方法都需要在真空的環境下和複雜的製程才能完成。

在本篇專題中，利用超音波霧化熱裂解法 (USPD) [19]沉積高 K 的氧化鋁 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 介電質。氧化鋁 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 具有高於 9 的高介電常數和 9eV 左右的寬能隙 [20] [21] [22]。超音波霧化熱裂解法技術具有以下幾個優點，包括可在非真空的環境下進行沉積、高氧化物的生長速率和較安全的製程。下列表 1-3 顯示了不同薄膜沉積的優缺點。

表 1-3 不同氧化層的沉積方法比較

	優點	缺點
電漿化學 氣相沉積 (PECVD)	高沉積速率	電漿可能會損壞薄膜
有機金屬 化學氣相沉積 (MOCVD)	1. 優秀的階梯覆蓋率 2. 可立即沉積氧化層	1. 高製程成本 2. 高真空環境
原子層沉積 (ALD)	1. 優秀的階梯覆蓋率 2. 沉積厚度可控制	1. 高製程成本 2. 低沉積速率 3. 高真空環境
濺鍍 (sputtering)	1. 良好的階梯覆蓋率 2. 均勻性佳	1. 靶材昂貴 2. 沉積材料受限於靶材
超音波霧化 熱裂解法 (USPD)	1. 無須高真空環境 2. 高沉積速率 3. 廣泛的材料選擇	1. 需要化學前驅物 2. 前驅物可能蝕刻表面

## 第二章

### InAlN/AlN/GaN 異質結構

#### 2-1 InAlN/AlN/GaN 異質結構

晶格匹配的 In<sub>0.18</sub>Al<sub>0.82</sub>N/AlN/GaN 異質結構具有高於傳統氮化鋁鎵/氮化鎵異質結構 [23] [24] [25] 的極化強度，所以在阻擋層厚度 < 10nm 時具有更高的電荷密度，藉此提升 III-氮化物異質結構場效電晶體的電特性。因為當異質結構沿極性方向生長時，量子阱將位於氮化鋁鎵/氮化鎵介面處並且導致氮化物系列的異質結構有更強的壓電和自發極化場，即使在該結構中沒其他參雜 [26]，它還是會在氮化鋁鎵/氮化鎵介面形成二維電子 (2DEG)。圖 2-1 顯示壓電與自發極化效應如何帶來二維電子雲 (2DEG)。氮化鋁鎵 (InAlN) 能隙比氮化鋁鎵 (AlGaN) 能隙寬，因此可以更有效的抑制閘極漏電流，可以獲得有更好的電晶體性能和獲得更高的閘極蕭特基能障高度。

現今有機金屬化學氣相沉積 (MOCVD) 法和分子束磊晶 (MBE) [27] 法是最常見用於在不同的基板上成長高質量氮化鎵 (GaN) 薄膜的磊晶系統，例如：矽基板 [28]、藍寶石基板 [29] 和碳化矽 (SiC) 基板 [30]。在基板上生長氮化鎵 (GaN) 會有一些問題，不僅有大量的晶格不匹配還有外延層和基板之間的熱相容性。表 2-1 顯示氮化鎵與其他基板材料的熱膨脹係數和導熱係數比較。

表 2-1 氮化鎵與其他基板的比較

特性	矽 (Si)	藍寶石 (Sapphire )	氮化鎵 (GaN)	碳化矽 (SiC)
導熱係數 (W/cm-K)	1.5	0.5	5.6	3.5
熱膨脹係數 (10 <sup>-6</sup> /K)	2.6	7.5	5.6	4.2
晶格不匹配 (%)	-17	-15	-	3.5
成本	較低	低	高	高

晶格不匹配會導致元件出現一些問題，例如薄膜中散熱較差所產生的自熱效應以及結構錯位導致的電流崩潰，而藍寶石基板具有低成本和高品質的優點。但是另一方面，在高功率模式下運作時，藍寶石基板因為導熱性差 (0.5 W/cm-K) [31] 所以會導致自加熱效應和性能降低。而碳化矽基板 (SiC) 具有高導熱率 (3.5 W/cm-K)、較低的晶格不匹配，並且具有更好的散熱和崩潰特性。但由於高成本和小尺寸的缺點，導致以碳化矽 (SiC) 製成的元件複雜性和成本增加。因此，我們可以替換基板來避免氮化鎵 (GaN) 基板異質結構場效電晶體的自加熱效應 [32]。為了改善散熱並降低晶元成本，我們在本專題中利用矽 (Si) 基底作為基板 [33] 來製造元件。



## 第三章

### 元件結構和製造程序

#### 3-1 元件結構

為了製造樣本，氮化鋁鎵/氮化鋁/氮化鎵異質結構場效電晶體 (HFET) 使用有機金屬化學氣相沉積法 (MOCVD) 在 3 英寸矽基板上生長。其結構包含 矽基板、成核層，1000 奈米的 GaN 層，1 奈米的 AlN 和 9 奈米的 In<sub>0.18</sub>Al<sub>0.82</sub>N。元件結構如圖 3-1 所示。

##### 3-1-1 高臺絕緣

高臺絕緣的目的是為了減少漏電流以獲得更佳的夾止特性。首先，用超聲波振動清洗浸入丙酮中的樣本五分鐘，同時清洗樣本表面的油污，然後使用去離子水去除樣本上殘留的丙酮。接下來，使用純鹽酸 (HCl) 去除表面氧化物和表面損傷。樣本清洗完畢後，將晶元放在旋轉台 (FH6400L) 上旋轉塗佈正光阻。

接著進行軟烘烤，在 90°C 的烘箱中烘烤 30 分鐘後，使用光罩接觸校準儀 (OAI 模型 3HR / IR) 曝光 25 秒來定義樣本高臺絕緣的光阻圖形，並浸入顯影劑 35 秒。我們使用蒸鍍機沉積鎳 (Ni) 100 nm 來替換光阻做為光罩。在此之後，使用丙酮來執行剝離程序去除光阻，再使用感應耦合電漿體反應離子蝕刻機 (ICP-RIE) 加入氫氣/氯氣等離子體蝕刻來定義表面區域。我們用的蝕刻參數分別為氯氣為 230 sccm 和氫氣為 10 sccm。ICP 的功率為 700 瓦，RIE 的功率為 120 瓦，腔室施加 3 毫托 (mTorr) 的壓力並以 480 奈米/分鐘的蝕刻速率。蝕刻製程結束後，我們使用硝酸 (HNO<sub>3</sub>) 清除鎳硬殼。

高臺絕緣的主要步驟如下：

1. 樣本清潔
2. 旋轉塗佈
3. 軟烘烤（預曝光烘烤）
4. 曝光
5. 顯影
6. 蒸鍍
7. 掀離
8. 乾蝕刻
9. 鏤移除

### 3-1-2 源極和汲極歐姆接觸

首先，將樣本浸入丙酮（C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O）中並以超聲波振動清洗五分鐘，同時使用丙酮清洗樣本表面的油汙，接著使用去離子水清除樣本上殘留的丙酮。樣本清洗後，將晶元放在旋轉儀中旋轉並在表層塗佈正光阻

（FH6400L）。為了獲得均勻的光阻膜，旋轉儀的旋轉速度和旋轉時間先以每分鐘 8000 轉的速度，持續 12 秒，再以每分鐘 9000 轉的速度，持續 25 秒，使光阻均勻分佈在樣本上。然後實施軟烘烤，在 90°C 烤箱中烘烤 30 分鐘，最後使用標準光蝕刻定義源極和汲極的圖形。在蒸鍍前，我們使用丙酮和鹽酸（HCl）以超聲波震動清洗金屬和鎢舟 10 分鐘。接下來，以去離子水沖洗同時使用高純度的氮氣烘乾金屬和鎢舟。因為鈦/鋁層有較低的功函數，所以我們選擇鈦/鋁/金作為源極和汲極中歐姆接觸的金屬，鈦/鋁/金的厚度分別為 10 奈米/100 奈米/ 50 奈米。在快速熱退火之後，金屬和半導體界面中形成鋁/鈦/氮合金，而金層可以防止鋁向外擴散並在電極表面上形成氧化鋁。我們通過快速熱退火系統（RTA）

(ULVACMILA-5000) 在 900°C 下對樣本退火 30 秒以形成鈦/鋁/金合金，並使源極和汲極的間距為 10 微米。

源極—汲極歐姆接觸的主要步驟如下：

1. 樣本清潔
2. 旋轉塗佈
3. 軟烘烤（預曝光烘烤）
4. 曝光
5. 顯影
6. 蒸鍍
7. 掀離
8. 退火

### 3-1-3 閘極蕭特基接觸

在沉積理想的歐姆接觸電極之後，我們採用鎳（100 nm）/金（50 nm）合金作為閘極蕭特基接觸。首先，我們使用丙酮清洗樣本，然後利用去離子水去除殘留溶液。樣本清洗後，將晶元放進旋轉儀中旋轉並在表層塗佈正光阻（FH6400L）。為了獲得均勻的光阻膜，旋轉儀的旋轉速度和旋轉時間先以每分鐘 8000 轉，持續 12 秒，再以每分鐘 9000 轉，持續 25 秒，使光阻得以均勻分佈在樣本上。然後實施軟烘烤，在 90°C 烤箱中進行烘烤 30 分鐘。在此之後，使用標準光蝕刻來定義閘極的圖形。之後，我們以熱蒸鍍法在樣本上沉積了鎳（100 nm）/金（50 nm）來形成蕭特基閘極。由於 Ni 本身就具有高金屬功函數，因此可以增加蕭特基能障高度來抑制漏電流，並獲得更高的崩潰電壓。金具有良好的導電性，是降低接觸電阻的優良材料。在熱蒸鍍製程後，我們使用丙酮去掀離光阻，至

此傳統的蕭特基閘極氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵異質結構場效電晶體已經大致完成。

蕭特基接觸的主要步驟如下：

1. 樣本清潔
2. 旋轉塗佈
3. 軟烘烤（預曝光烘烤）
4. 曝光
5. 顯影
6. 硬烘烤
7. 蒸鍍
8. 掀離

我們將蕭特基閘極異質結構場效電晶體定義為樣本 A，氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體為樣本 B，樣本 A 與樣本 B 的元件製程過程如圖 3-2、圖 3-3 所示。

### 3-2 超音波霧化熱裂解法（USPD）

為了形成氧化鋁氧化物膜，有許多方法可以形成氧化層，例如電漿化學氣相沉積（PECVD）、濺鍍、原子層沉積（ALD）和超音波霧化熱裂解法（USPD）技術。整體而言，超音波霧化熱裂解法技術是一種優越的技術。這項技術是由載流氣體將超音波霧化產物傳輸並附著在基板表面，最後加熱乾燥形成。圖 3-4 為超音波霧化熱裂解法技術示意圖。

## 第四章

### 實驗結果與討論

#### 4-1 材料分析

在這次的工作中，我們使用超音波霧化熱裂解法 (USPD) 技術來沉積氧化鋁氧化層。在這個章節中，我們將會透過穿透式電子顯微鏡 (TEM)、X 射線能量散步分析儀 (EDS) 和原子力顯微鏡 (AFM) 來簡短介紹關於介電值成分、表面粗糙度以及氧化層厚度。

##### 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，透過電子束穿過樣本以形成圖像。當光束穿過樣本時，由電子與樣本的相互作用形成圖像。由於電子具有較小的德布羅伊波長，穿透式電子顯微鏡能夠以比光學顯微鏡更高的分辨率成像。因此，可很好的觀察出氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵的氧化鋁薄膜和結構的橫截面穿透式電子顯微鏡 (TEM) 圖像，圖像如圖 4-1 所示，實驗結果也總結在表 4-1 當中。

表 4-1 氧化物的厚度

材質	氧化鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
氧化物厚度 (nm)	~10

### 4-1-2 X 射線能量散佈分析儀 (EDS)

X 射線能量散佈分析儀 (EDS) 是一種用於顯示樣本的元素分析或化學表現的技術。主要藉由電子束所激發的特徵 X 光和樣本的相互作用來分析。主要是由於每個元件具有獨特的原子結構，因此有相對應的一組電磁信號發射波譜。元件的 X 射線能量散佈分析儀測量結果如圖 4-2 所示，實驗結果也總結在表表 4-2 當中。

表 4-2 氧化物厚度的比較

氧化鋁氧化層	元素	氧 (O)	鋁 (Al)	氧/鋁 (O/Al)
	原子 (%)	59.2	40.8	145.1

### 4-1-3 原子力顯微鏡 (AFM)

原子力顯微鏡 (AFM) 是一種非常高分辨率的掃描式探針顯微鏡。原子力顯微鏡測量系統的結構如圖 4-3 所示。原子力顯微鏡是藉由探針沿著樣本表面移動以測量表面粗糙度。其中氧化鋁最佳的表面平整度為 10 奈米，如圖 4-4 至圖 4-5 所示。表面粗糙度如表 4-3 所示。

表 4-3 由 AFM 所測量的表面粗糙度

	均方根厚度 (S <sub>q</sub> ) (nm)	平均厚度 (S <sub>a</sub> ) (nm)
氧化鋁氧化層	1.7078	0.800875

## 4-2 室溫下的直流特性

元件的閘極長度 ( $L_g$ ) 為 2 微米，閘極寬度 ( $W_g$ ) 為 100 微米，源極和汲極間的長度 ( $L_{SD}$ ) 為 10 微米，並透過半導體參數分析儀 (Keithley 4200) 在室溫下測量晶圓上的特性。

### 4-2-1 電流－電壓特性

圖 4-6、圖 4-7 分別為傳統型異質結構場效電晶體 (樣本 A)、氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體 (樣本 B) 的典型汲極-源極的電流 ( $I_{DS}$ ) 對電壓 ( $V_{DS}$ ) 特性。其中樣本 A 的閘極偏壓 ( $V_G$ ) 為 3 V 至 -7 V，樣本 B 至樣本 E 為 5 V 至 -6 V，每一階段為 -1 V，所有元件的汲極-源極偏壓均為 0 V 至 15 V。

樣本 A 在閘極偏壓為 3 V 時的最大汲極-源極電流密度 ( $I_{DS,max}$ ) 為 544.2 mA/mm，樣本 B 在閘極偏壓為 5 V 時為 810.4 mA/mm。結果顯示出金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體藉由超音波霧化熱裂解法技術沉積介電質的電流密度提升 48.9%，此種方法可以改善表面狀態密度並降低汲極-源極電阻來提升載子密度。

### 4-2-2 轉換特性

樣本 A 與樣本 B 的室溫直流轉換特性如圖 4-8、圖 4-9 所示，其中樣本 A 的汲極-源極電壓 ( $V_{DS}$ ) 為 7 V，樣本 B 為 10 V。

樣本 A 的最大外質轉導 ( $g_{m,max}$ ) 為 221.2 mS/mm。而由於沉積高 K 的氧化層作為介電質提升了閘極到通道的有效調變距離之關係，樣本 B 為 180.4 mS/mm。閘極電壓擺幅 (GVS) 定義為可用的閘極偏壓範圍，其中相應的轉導值不低於最大轉導值的 90%。樣本 A 的閘極電壓擺幅為 0.5 V，



樣本 B 為 2.4 V。由於抑制了閘極漏電流，金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體具有更大的閘極電壓擺幅。樣本 A 的無閘極偏壓飽和電流密度 ( $I_{DSS0}$ ) 為 331.3 mA/mm，樣本 B 為 427.78 mA/mm，顯示出金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體經過超音波霧化熱裂解法沉積介電質成功改善了表面狀態並鈍化懸浮鍵以提升電流。樣本 A 的臨界電壓 ( $V_{th}$ ) 為 -4.2 V，樣本 B 為臨界電壓 ( $V_{th}$ ) -5.1 V，如圖 4-10 所示。另一方面，樣本 A 的開/關電流比 ( $I_{on}/I_{off}$ ) 為  $1.7 \times 10^5$ ，樣本 B 為  $5.54 \times 10^9$ 。

#### 4-2-3 閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{GD}$ ) 特性

樣本 A 和樣本 B 的所有元件關閉狀態之閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{GD}$ ) 和漏電流密度，皆顯示於圖 4-11、圖 4-12。閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓定義為閘極電流 ( $I_{GD}$ ) 達到 1mA/mm 時的電壓，且呈現於圖 4-38。樣本 A 的閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓/開啟電壓值分別為 -126 V/3.39 V，樣本 B 分別為 -185.5 V / 4.84 V，而樣本 A 的漏電流密度為  $1.4 \times 10^{-2}$  mA/mm，樣本 B 的漏電流密度為  $1.1 \times 10^{-6}$  mA/mm。結果表明，與樣本 A 相比，超音波霧化熱裂解法沉積的氧化鋁氧化物層可以抑制閘極漏電流，從而提高閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓和開啟電壓的電壓值，並降低閘極與汲極之間的電場。此外，樣本 B 之漏電流比樣本 A 低一萬倍，表示出閘極氧化層中陷阱成功鈍化。

#### 4-2-4 三端關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{off}$ ) 特性

圖 4-13 至圖 4-14 顯示了樣本 A 與樣本 B 的三端關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{off}$ ) 特性。三端關閉狀態崩潰電壓定義為當閘極為夾止 (pinch-off) 電壓 (-10 V) 時，且關閉狀態的汲極漏電流增加至 1 mA/mm 時的電壓。

樣本 A 的元件之三端關閉狀態崩潰電壓的值為 83 V，樣本 B 為 162 V。由於超音波霧化熱裂解法所沉積的閘極氧化物可以有效地抑制漏電流和通道層之衝擊游離效應，因此金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體的三端關閉狀態崩潰電壓特性可以得到提升。如表 4-4 所示，總結了樣本 A 與樣本 B 在室溫下的直流 (DC) 特性。

表 4-4 總結了樣本 A 與 B 的直流特性

樣本	A	B
$I_{D,max}$ (mA/mm)	544.2 ( $V_G = 2$ V)	810.4 ( $V_G = 5$ V)
$I_{DSS0}$ (mA/mm)	427.78	331.3
$g_{m,max}$ (mS/mm)	221.2	180.4
GVS (V)	0.5	2.4
$V_{th}$ (V)	-4.2	-5.1
$I_{on}/I_{off}$	$1.7 \times 10^5$	$5.54 \times 10^8$
$BV_{GD}$ (V)	-126	-185.5
$I_g$ (mA/mm)	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-6}$
$V_{on}$ (V)	3.39	4.84
$BV_{off}$ (V)	83	162

## 4-3 直流變溫特性

### 4-3-1 輸出變溫特性

圖 4-15、圖 4-16 顯示樣本 A 和樣本 B，從 300K 加熱到 450K 的環境中的汲極-源極的電流密度 ( $I_{DS}$ ) 對電壓 ( $V_{DS}$ ) 特性，每一階段上升 50K。汲極-源極偏壓設置為從 0 V 到 15 V、樣本 A 到 B 的閘極偏壓設置為 3 V 的汲極-源極的電流 ( $I_{DS}$ ) 對電壓 ( $V_{DS}$ ) 之變溫特性。其中樣本 A 的閘極偏壓 ( $V_G$ ) 為 3 V 至 -7 V，樣本 B 為 5 V 至 -6 V，每一階段為 -1 V，所有元件的汲極-源極偏壓均為 0 V 至 15 V。

結果表明，汲極電流密度隨著溫度的升高而降低，這是因為強大的載子散射使電子遷移率降低所導致的。表 4-5、表 4-6 分別顯示樣本 A 與樣本 B 從 300 K 至 450 K 的最大汲極電流密度 ( $I_{D,max}$ )。

表 4-5 樣本 A 從 300 K 到 450 K 的直流變溫特性。

樣本 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 4-6 樣本 B 從 300 K 到 450 K 的直流變溫特性

樣本 B	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
$I_{D,max}$	810.5	760.9	710.1	648.7	19.5%

(mA/mm )					
-------------	--	--	--	--	--

#### 4-3-2 崩潰電壓變溫特性

圖 4-17 和圖 4-20 顯示了樣本 A 和樣本 B 從 300 K 到 450 K 的崩潰特性。汲極-源極偏壓設置為 7 V。樣本 A 和樣本 B 之間極偏壓設置為從 2 V 到 -6 V。我們觀察到，溫度升高將會使崩潰電壓降低，是因為隨著溫度的升高會導致汲極電流密度衰減。表 4-7、表 4-8 分別顯示了樣本 A 至樣本 B 的崩潰電壓，溫度範圍為 300 K 至 450 K。

表 4-7 樣本 A 從 300 K 到 450 K 的崩潰電壓變溫特性

樣本 A	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
BV <sub>GD</sub> (V)	-127	-113.5	-104.5	-96.5	24.1%
BV <sub>DS</sub> (V)	83.4	69.1	61.8	50.3	26.9%

表 4-8 樣本 B 從 300 K 到 450 K 的崩潰電壓變溫特性

樣本 B	300 K	350 K	400 K	450K	特性變化
BV <sub>GD</sub> (V)	-158.5	-147.5	-144.5	-134	15.4%

Photoelectric characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Dielectric In<sub>0.17</sub>Al<sub>0.83</sub>N/AlN/GaN MOS-HFETs

<b>BV<sub>DS</sub></b> <b>(V)</b>	162.2	152.9	135.2	123.4	23.9%
--------------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------

#### 4-4 電容－電壓特性

電容-電壓特性可以顯示出元件之材料特性。樣本 A 與樣本 B 的電容-電壓特性如圖 4-21、圖 4-22 所示。我們使用 -6 V 至 3.5 V 的閘極電壓和 1 MHz 的頻率進行測量。為了計算金屬-氧化物-半導體異質結構的介電常數 (k)，電容方程式如下：

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

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

其中真空介電常數為  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m。蕭特基接觸面積 (A) 為  $1000 \mu\text{m}^2$ 。氧化層厚度 ( $d_{ox}$ ) 對於氧化鋁之金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體為 10nm。樣本 A 的金屬-半導體蕭特基異質結構電容 ( $C_{HFET}$ ) 為 155.9 pF。樣本 B 的金屬-氧化物-半導體的總電容 ( $C_{total}$ ) 為 86.8 pF，而樣本 B 的氧化層電容 ( $C_{ox}$ ) 為 195.8 pF，介電常數 (k) 為 9.24。表 4-9 顯示了樣本 A 與樣本 B 的電容特性。

表 4-9 樣本 A 與樣本 B 的電容特性

樣本	A	B
電容 (pF)	155.9	86.8
$C_{ox}$ (pF)	—	195.8
介電常數	—	9.24

#### 4-4-1 遲滯現象

圖 4-23、圖 4-24 為樣本 A 以及樣本 B 的遲滯特性，在閘極偏壓 -6 v 至 0 v，以及 0 v 至 -6 v 在 1 MHz 下量測。表 4-10 為遲滯特性的數值，結果明確地顯示以超音波霧化熱裂解法製作的氧化鋁介電質可以有效的改善界面陷阱密度。

表 4-10 樣本 A 與樣本 B 的遲滯特性比較

樣本	蕭特基	氧化鋁
$\Delta V$ (V)	0.36	0.23

#### 4-4-2 界面狀態密度 ( $D_{it}$ )

圖 4-25 為樣本 B 的高/低頻電容-電壓 (C-V) 特性，界面狀態密度 ( $D_{it}$ ) 的公式可表示為：

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

其中 q 代表的是基本電荷 (elementary charge)， $C_{ox}$  為氧化層電容， $C_{LF}$  為 10 KHz 的低頻電容， $C_{HF}$  為 1 MHz 的高頻電容，結果顯示在圖 4-26 以及表 4-11，說明以超音波霧化熱裂解法製作的氧化鋁介電質能夠有效的改善界面陷阱密度。

表 4-11 樣本 B 的遲滯特性

樣本	氧化鋁(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
D <sub>it</sub> (cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup> )	2.6×10 <sup>11</sup>

## 4-5 微波特性

### 4-5-1 截止頻率 (f<sub>T</sub>) 以及最大震盪頻率 (f<sub>max</sub>) 特性

樣本 A 與樣本 B 之微波特性都是在 0.2 GHz 到 50 GHz 以向量網絡分析儀 (HP-8510B) 在晶圓上量測，元件的閘極尺寸為 2 × 100 μm<sup>2</sup>，汲極-源極間距為 10 微米。電晶體量測到的 S 參數可以計算出短路電流增益(H<sub>21</sub>) 以及最大功率增益 (MAG)：

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

與

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

且

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

當 k 等於 1 時，MAG 被定義成最大穩定功率增益 (MSG)。因此最大穩定功率增益 (MSG) 可表示為下列公式：

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



單位電流增益截止頻率 ( $f_T$ ) 為短路電流增益 ( $H_{21}$ ) 在 0 dB 時的頻率，最大振盪頻率 ( $f_{max}$ ) 為最大功率增益 (MAG) 在 0 dB 時的頻率。單位電流增益截止頻率 ( $f_T$ ) 與最大振盪頻率 ( $f_{max}$ ) 以下列公式表示：

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

與

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

其中  $C_{GS}$  為閘極-源極電容， $C_{GD}$  為閘極-汲極電容，藉由公式可以觀察到更高的轉導值 ( $g_m$ ) 會有更好的截止頻率 ( $f_T$ ) 和最大震盪頻率 ( $f_{max}$ )。圖 4-27、圖 4-28 顯示了樣本 A 與樣本 B 的截止頻率 ( $f_T$ ) 與最大振盪頻率 ( $f_{max}$ )。樣本 A 的偏壓條件為  $V_{DS} = 5$  V， $V_{GS} = -1.2$  V，樣本 B 的偏壓條件為  $V_{DS} = 10$  V， $V_{GS} = -2.3$  V。結果也顯示在表 4-12 當中。

表 4-12 樣本 A 與樣本 B 的截止頻率 ( $f_T$ ) 與最大振盪頻率 ( $f_{max}$ ) 比較

樣本	A	B
$f_T$ (GHz)	1.7	2.3
$f_{max}$ (GHz)	2.0	3.7

因為元件表面懸浮鍵以及相對電容減少，所以可從數值中看出以超音波霧化熱裂解法研製的金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體能夠獲得更高的截止頻率與最大震盪頻率。

#### 4-5-2 功率特性

輸出功率 ( $P_{out}$ ) 以及附加功率效率 (P. A. E.) 的公式表示為:

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

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

其中  $BV_{GD}$  為閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓,  $V_{knee}$  為膝點電壓,  $P_{DC}$  為直流消耗功率。射頻能量的直流變化量視為元件電源轉換器的附加功率效率 (P. A. E.)。圖 4-29 顯示了輸出功率 ( $P_{out}$ ) 以及功率附加效率 (P. A. E.) 對輸入功率的函數, 其中樣本 A 的偏壓條件為  $V_{GS} = -1.5$  V,  $V_{DS} = 5$  V, 樣本 B 的偏壓條件為  $V_{GS} = -1.5$  V,  $V_{DS} = 5.5$  V。表 4-13 為在 2.4 GHz 環境下的功率特性。

表 4-13 2.4 GHz 環境下的功率特性

2.4 GHz	樣本 A	樣本 B
P. A. E. (%)	16.5	26.3
$P_{out}$ (dBm)	6.8	10.8
$G_a$ (dB)	18.4	24.5

由於氧化層的沉積使閘極-汲極關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{GD}$ ) 與最大汲極-源極電流密度 ( $I_{DS,max}$ ) 的提高, 進一步提升輸出功率 ( $P_{out}$ ), 因此在同一輸入功率 ( $P_{in}$ ) 下, 會有更好的功率附加效率 (P. A. E.)。

### 4-5-3 高頻雜訊特性

本次實驗透過雜訊係數儀器（HP8970B）量測樣本 A 與樣本 B 在頻率 1 GHz 到 6 GHz 之下的雜訊表現，最小雜訊（NF<sub>min</sub>）可近似成下列公式：

$$NF_{min} = 10 \log \left\{ 1 + \frac{k_F \cdot f}{f_T} [g_{mi}(R_G + R_S)]^{0.5} \right\} dB \quad (12)$$

且

$$k_F = 3.38 \left[ \frac{I_{DS}}{(L_g \cdot g_m)} \right]^{0.5} \quad (13)$$

k<sub>F</sub> 為 Fukui 常數，是一個經驗公式，I<sub>DS</sub> 為量測時的汲極-源極電流，g<sub>m</sub> 為轉導值，L<sub>g</sub> 為閘極長度。圖 4-30 顯示出樣本 A 與樣本 B 的最小雜訊（NF<sub>min</sub>）與相關增益（G<sub>a</sub>）特性，元件的閘極尺寸為 2 × 100 μm<sup>2</sup>，源極到汲極的長度為 10 μm，樣本 A 的偏壓條件為 V<sub>DS</sub> = 7 V，V<sub>GS</sub> = -1 V，樣本 B 的偏壓條件為 V<sub>DS</sub> = 7 V，V<sub>GS</sub> = -2 V。表 4-14 顯示元件在 2.4 GHz 以及 6 GHz 之下最小雜訊（NF<sub>min</sub>）與相關增益（G<sub>a</sub>）的數值。由於樣本 B 的氧化層可以減少元件的表面陷阱密度，所以具有較低的最小雜訊（NF<sub>min</sub>）和較高的相關增益（G<sub>a</sub>）。

表 4-14 樣本 A 與樣本 B 的雜訊特性數值

樣本		A	B
NF <sub>min</sub> (dB)	2.4 GHz	5.2	3.6
	6 GHz	9.5	7.9
	2.4 GHz	5.6	14.5

<b>G<sub>a</sub></b> <b>(dB)</b>	<b>6 GHz</b>	2.1	8.5
-------------------------------------	--------------	-----	-----

#### 4-5-4 低頻雜訊特性

低頻雜訊為一重要參數，它決定了元件在微波應用上的性能。低頻雜訊量測可以進一步闡明閃爍雜訊與各式製程處理間的關係，且量測時對於半導體表面非常敏感。

汲極端雜訊藉由 Agilent 35670A 放大，且輸出端使用頻譜分析儀 (BTA 9812B) 在 1Hz~10KHz 下進行分析。樣本操作在偏壓環境  $V_{DS} = 3\text{ V}$  且  $I_{DS} = 100\text{ mA/mm}$  之環境中。圖 4-31 顯示元件的低頻雜訊特性。可看出藉由超音波霧化熱裂解法技術減少表面效應，因此樣本 B 比樣本 A 有更低的雜訊水平。不同半導體材料及結構中的雜訊，通常由虎克係數 (Hooge's coefficient)  $\alpha_H$  決定其特性，其公式如下：

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

且

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

$S_I(f)$  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， $L$  為汲極到源極的間距， $R$  為通道電阻， $\mu$  為遷移率。樣本 A 之虎克係數為  $7.7 \times 10^{-5}$ ，樣本 B 之虎克係數為  $1.1 \times 10^{-7}$ 。

#### 4-5-5 脈衝模式之特性

圖 4-32、圖 4-33 顯示樣本之直流及脈衝模式特性。此脈衝寬度為 10 微秒且工作週期為 0.1%。崩潰電流偏差的公式表示為：

$$\Delta CC = \frac{I_{DC} - I_{pulse}}{I_{DC}} \times 100\% \quad (16)$$

表 4-15 顯示樣本 A 與樣本 B 之崩潰電流偏差。結果顯示，樣本 B 能夠減少閘極兩側表面的崩潰電流偏差。

表 4-15 樣本 A 與樣本 B 的電流崩潰特性

樣本	A	B
$\Delta CC$ (%) @ $V_{GS} = 0$ V	90.4	9.1

## 4-6 光響應特性

使用三族-氮化物為基板，成功製造出高亮度藍光、綠光的二極體、紫光雷射二極體以及高功率異質結構場效電晶體 (HFETs)。此外，紫外光檢測器也有從其他團隊的實驗報告中指出其可用性，因此得以實現光導體、蕭特基光電偵測器、p-i-n 光電二極體及光電異質結構場效電晶體 (HFETs)。這些元件在應用上會對可見光敏感並對弱紫外光高度敏感。

此專題中，我們利用可見光到紫外光的範圍去檢測樣本 A、樣本 B。表 4-16 顯示我們採用光源的波長及功率。圖 4-34 到圖 4-41 及表 4-17 顯示樣本 A 在不同光源下的直流特性。圖 4-42 到圖 4-49 及表 4-18 顯示樣本 B 在不同光源下的直流特性。

表 4-16 採用光源的波長及功率

光源	波長 (nm)	功率 ( $\mu$ W)
紅	700	4.1
黃	580	20.3

綠	550	23
藍	470	52.3
紫	420	14.1
UV1	350	10.4
UV2	300	1.9
UV3	250	1.1

表 4-17 樣本 A 在不同光源下的直流特性

樣本 A						
光源	I <sub>DS,max</sub> (mA/mm)	V <sub>TH</sub> (V)	ΔV <sub>TH</sub>   (V)	g <sub>m,max</sub> (mS/mm)	I <sub>ph</sub> (mA/mm)	R (A/mW)
不 照 光	546.6	-3.6	-	221.2	-	-
紅	552.4	-3.9	0.3	221.2	66.36	1.35
黃	576.8	-3.91	0.31	221.4	68.63	0.28
綠	577.2	-3.93	0.33	221.5	73.09	0.25
藍	606.2	-4	0.4	222.8	83.12	0.115
紫	618.0	-4.8	0.8	224.0	179.2	0.43

UV1	673.6	-4.9	1.3	227.3	295.49	0.66
UV2	716.3	-5.3	1.7	226.1	384.37	0.83
UV3	706.9	-5.2	1.6	224.1	358.56	6.39

表 4-18 樣本 B 在不同光源下的直流特性

樣本 B						
光源	I <sub>DS,max</sub> (mA/mm)	V <sub>TH</sub> (V)	ΔV <sub>TH</sub>   (V)	g <sub>m,max</sub> (mS/mm)	I <sub>ph</sub> (mA/mm)	R (A/mW)
不 照 光	810.5	-5.1	-	180.4	-	-
紅	816.3	-5.5	0.4	181.2	72.48	1.99
黃	840.7	-5.7	0.6	181.7	109.02	0.41
綠	841.1	-5.9	0.8	181.9	145.52	0.37
藍	870.1	-6	0.9	182.3	164.07	0.17
紫	881.9	-6.4	1.3	187.3	243.49	0.64
UV1	937.5	-6.6	1.5	190.6	285.9	0.9
UV2	979.9	-6.8	1.7	191.5	325.55	5.15

UV3	972.8	-7	1.9	188.1	357.39	8.82
-----	-------	----	-----	-------	--------	------

## 第五章

### 結論

在此專題中，使用超音波霧化熱裂解法沉積高介電常數的氧化鋁與傳統異質結構場效電晶體相比能夠大幅的增進直流及射頻特性。由於使用超音波霧化熱裂解法技術的金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體較傳統異質結構場效電晶體擁有較高的介電品質及較低的界面密度。本篇使用超音波霧化熱裂解法沉積改善了元件的性能。

傳統異質結構場效電晶體和氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體的最大汲極-源極電流密度 ( $I_{DS,max}$ )、最大外質轉導 ( $g_{m,max}$ ) 和閘極-汲極雙端關閉狀態崩潰電壓 ( $BV_{GD}$ ) 之值分別為 544.2 / 810.4 mA/mm、212.2 / 180.4 mS/mm 和 -126 / -158.5 V。本專題利用超音波霧化熱裂解法沉積高 k 的氧化鋁材料在氮化銦鋁/氮化鋁/氮化鎵金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體上適合應用在高功率元件上。



## 參考文獻

- [1] Y.-F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, N. X. Nguyen, M. Le, C. Nguyen and T. J. Jenkins, “Short Channel AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 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.
- [2] W. Lu, S. Member, V. Kumar, E. L. Piner, and I. Adesida, “DC, RF, and Microwave Noise Performance of AlGa<sub>N</sub>–Ga<sub>N</sub> Field Effect Transistors Dependence of Aluminum Concentration,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 50, pp. 1069–1074, Apr. 2003.
- [3] V. Kumar, W. Lu, R. Schwindt, A. Kuliev, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan, and Ilesanmi Adesida, “AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs on SiC With  $f_T$  of Over 120 GHz,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 23, pp. 455–457, Aug. 2002.
- [4] J. Kuzmik, “Power electronics on InAlN/(In)Ga<sub>N</sub>: Prospect for a record performance,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 510–512, Nov. 2001.
- [5] Teke, S. Gökden, R. Tülek, J. H. Leach, Q. Fan, J. Xie, Ü. Özgür, H. Morkoç, S. B. Lisesivdin, and E. Özbay, “The effect of AlN interlayer thicknesses on scattering processes in lattice-matched AlInN/Ga<sub>N</sub> two-dimensional electron gas heterostructures,” *New J. Phys.* Vol. 11, pp. 063031, Jun. 2009.
- [6] F. Medjdoub, J.-F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin, M. A. Py, D. Ducatteau, C. Gaquiere, N. Grandjean, and E. Kohn, “Can InAlN/Ga<sub>N</sub> be an alternative to high power/high temperature AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> devices?” in *IEDM Tech. Dig.*, 2006, pp. 1–4.
- [7] R. Butte, J.-F. Carlin, E. Feltin, M. Gonschorek, S. Nicolay, G. Christmann, D. Simeonov, A. Castiglia, J. Dorsaz, H. J. Buehlmann, S. Christopoulos, H. von Högersthal, A. J. D. Grundy, M. Mosca, C. Piquier, M. A. Py, F. Demangeot, J. Frandon, P. G. Lagoudakis, J. J. Baumberg, and N. Grandjean,

- “Current status of AlInN layers latticematched to GaN for photonics and electronics,” *J. Phys. D, Appl. Phys.*, vol. 40, no. 20, pp. 6328–6344, Oct. 2007.
- [8] 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 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> passivation on AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 9, pp. 1661-1663, Mar. 2002
- [9] C. S. Lee, Y. H. Liao, B. Y. Chou, H. Y. Liu, and W. C. Hsu, “Composite HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-dielectric AlGaAs/InGaAs MOS-HEMTs by using RF sputtering/ozonewater oxidation,” *SuperlatticesMicrostruct.*, vol.72, pp.194-203, Mar. 2014.
- [10]P. Kordos, G. Heidelberger, J. Bernát, A. Fox, M. Marso, and H. Lüth, “High-power SiO<sub>2</sub>/AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, pp. 143501-3, Sep. 2005.
- [11]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<sub>2</sub> gate insulator,” *Solid-State Electron.*, vol. 50, pp. 1057–1061, Apr. 2006.
- [12]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 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Dielectric Structures," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol.3, no. 8, pp.N115-N119, Aug. 2014.
- [13]P. Kordos, D. Gregusova, R. Stoklas, S. Gazi, and J. Novak, “Transport properties of AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of different thickness,” *Solid-State Electron.*, vol. 52, no. 6, pp. 973-979, Jun. 2008.
- [14]J.J. Senkevich and S.B. Desu, “Poly (tetra-fluoro-p-xylylene), a low

- dielectric constant chemical vapor polymerized polymer”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.72, pp.258, 1998.
- [15] S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa, T. Jimbo, and M. Umeno, “Investigations of SiO<sub>2</sub>/n-GaN and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-GaN insulator-semiconductor interfaces with low interface state density,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 6, pp. 809-811, Aug. 1998.
- [16] P. Kordos, D. Gregusova, R. Stoklas, S. Gazi, and J. Novak, “Transport properties of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of different thickness,” *Solid-State Electron.*, vol. 52, no. 6, pp. 973-979, Jun. 2008.
- [17] C. Liu, E. F. Chor, and L. S. Tan, “Enhanced device performance of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs using HfO<sub>2</sub> high-k dielectric for surface passivation and gate oxide,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 5, pp. 522–527, 2007.
- [18] L. Pang, Y. Lian, D. S. Kim, J. H. Lee, and K. Kim, “AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MOSHEMT With High-Quality Gate–SiO<sub>2</sub> Achieved by Room-Temperature Radio Frequency Magnetron Sputtering,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 59, no. 10, pp. 2650–2655, Oct. 2012.
- [19] 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, “TiO<sub>2</sub>-Dielectric AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/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.
- [20] Q. Zhou et al., “Schottky source/drain Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/InAlN/GaN MIS-HEMT with steep sub-threshold swing and high ON/OFF current ratio,” in *Int. Electron Devices Meeting (IEDM) Tech. Dig.*, Dec. 2011, pp. 777–780.
- [21] J. W. Chung, O. I. Saadat, J. M. Tirado, X. Gao, S. Guo, and T. Palacios, “Gate-recessed InAlN/GaN HEMTs on SiC substrate with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> passivation,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 30, no. 9, pp. 904–906, Sep.

2009.

- [22]H. Wang et al., “Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> passivated InAlN/GaN HEMTs on SiC substrate with record current density and transconductance,” *Phys. Status Solidi C*, vol. 7, no. 10, pp. 2440–2444, Oct. 2010.
- [23]J. Kuzmik, “Power electronics on InAlN/(In)GaN: Prospect for a record performance,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 510–512, Nov. 2001.
- [24]R. Wang, P. Saunier, X. Xing, C. Lian, X. Gao, S. Guo, G. Snider, P. Fay, D. Jena, and H. Xing, “Gate-recessed enhancement-mode InAlN/AlN/GaN HEMTs with 1.9 A/mm drain current density and 800 mS/mm transconductance,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 31, no. 12, pp. 1383–1385, Dec. 2010.
- [25]R. Wang, P. Saunier, Y. Tang, T. Fang, X. Gao, S. Guo, G. Snider, P. Fay, D. Jena, and H. Xing, “Enhancement-mode InAlN/AlN/GaN HEMTs with 10–12 A/mm leakage current and 10<sup>12</sup> on/off current ratio,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 32, no. 3, pp. 309–311, Mar. 2011.
- [26]S. Ganguly et al., “Polarization effects on gate leakage in InAlN/AlN/GaN high-electron-mobility transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 25, pp. 253519-1–253519-5, Dec. 2012.
- [27]M. Miyoshi, S. Fujita, and T. Egawa, “Nearly lattice-matched InAlN/AlGaIn two-dimensional electron gas heterostructures grown by metalorganic chemical vapor deposition,” *Appl. Phys. Exp.*, vol. 8, no. 2, pp. 021001-1–021001-3, Jan. 2015
- [28]C.-W. Tsou, C.-Y. Lin, Y.-W. Lian, and S. S. H. Hsu, “101-GHz InAlN/GaN HEMTs on silicon with high Johnson’s figure-of-merit,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 8, pp. 2675–2678, Aug. 2015.
- [29]F. Lecourt, N. Ketteniss, H. Behmenburg, N. Defrance, V. Hoel, M. Eickelkamp, A. Vescan, C. Giesen, M. Heuken, and J. De Jaeger,

- “InAlN/GaN HEMTs on sapphire substrate with 2.9-W/mm output power density at 18 GHz,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 32, no. 11, pp. 1537–1539, Nov. 2011.
- [30]H. Wang, J.W. Chung, X. Gao, S. Guo and T. Palacios, “High performance InAlN/GaN HEMTs on SiC substrate,” *CS MANTECH Dig.*, pp: 185-188, 2010
- [31]R. Gaska, A. Osinsky, J. W. Yang, and M. S. Shur, “Self-Heating in High-Power AlGa<sub>N</sub>-Ga<sub>N</sub> HEMT’s,” vol. 19, no. 3, pp. 89-91, Mar. 1998.
- [32]M. Hiroki, K. Kumakura, Y. Kobayashi, T. Akasaka, T. Makimoto, and H. Yamamoto, “Suppression of self-heating effect in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors by substrate-transfer technology using hBN”, *Applied Physics Letters*, vol. 105, pp. 193509-1, 2014.
- [33]H. C. Chiu, C. W. Yang, H. C. Wang, H. L. Kao, N. C. Chen, F. T. Chien, and M. C. Kan, “High Performance Micromachined GaN on Si HEMT with BacksideDiamondlike-Carbon/Titanium Heat Dissipation Layer” *Appl. Phys. Express*, 8(1),011001 (2015).
- [34]Y.-W. Jo, D.-H. Son, C.-H. Won, K.-S. Im, J. H. Seo, I. M. Kang, and J.-H. Lee, “AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> FinFET with extremely broad transconductance by sidewall wet etch,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 36, no. 10, pp. 1008–1010, Oct. 2015.
- [35]D. S. Lee, H. Wang, A. Hsu, M. Azize, O. Laboutin, Y. Cao, J. W. Johnson, E. Beam, A. Ketterson, M. L. Schuette, P. Saunier, and T. Palacios, “Nanowire channel InAlN/GaN HEMTs with high linearity of gm and fT ,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 34, no. 8, pp. 969–971, Jun. 2013.

圖片

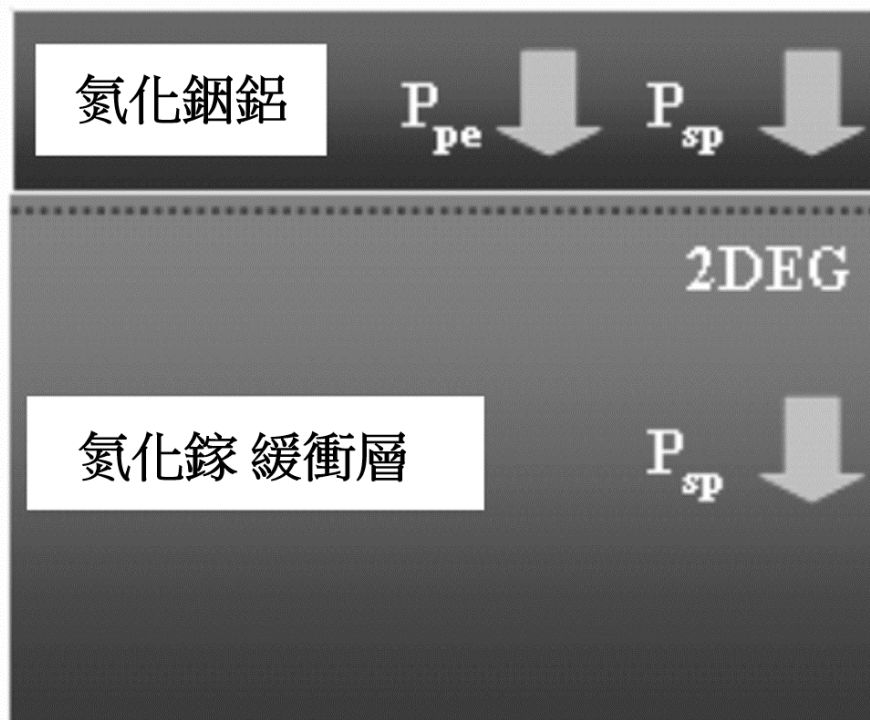


圖 2-1 氮化鎵異質結構場效電晶體結構的極化效應

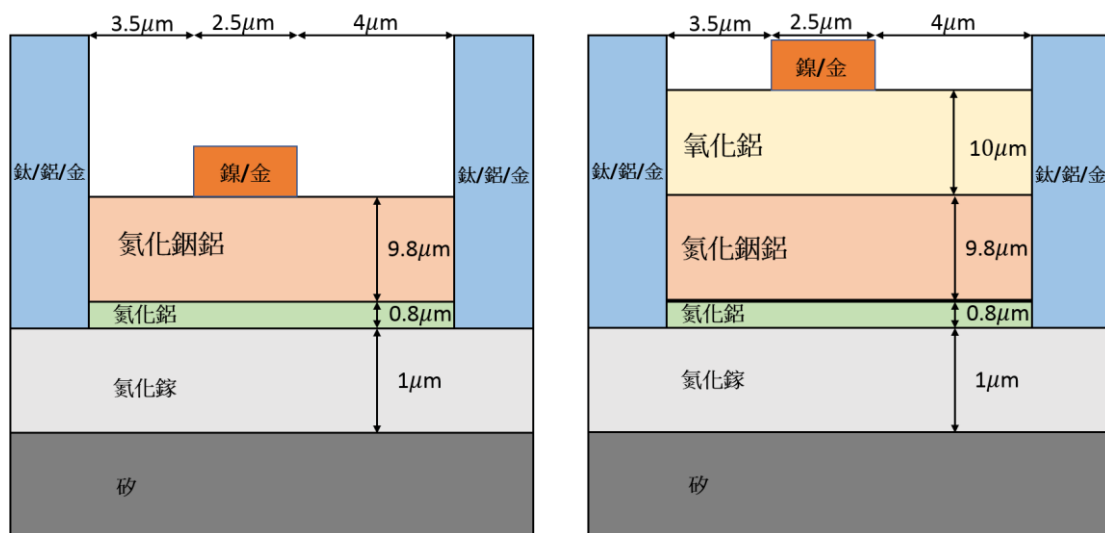
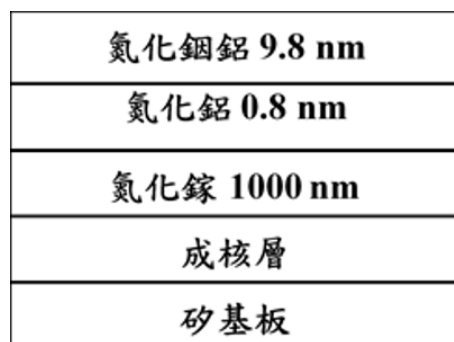
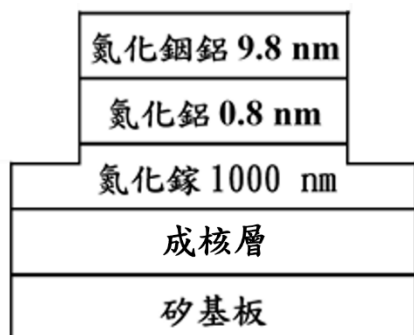


圖 3-1 蕭特基閘極異質結構場效電晶體以及氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體結構之橫截面圖



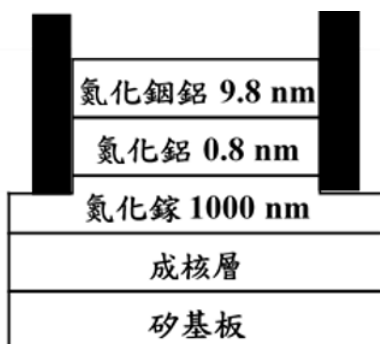
### 步驟 1

- 樣本定向
- 晶圓清潔



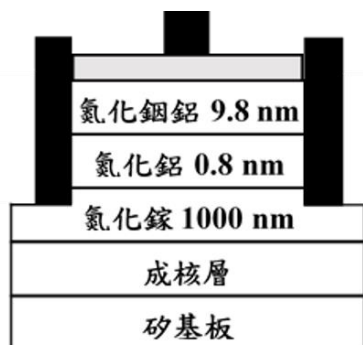
### 步驟 2

- 高臺絕緣
- 高臺蝕刻
- 蒸鍍鎳和掀離
- 利用 ICP-RIE 乾蝕刻
- 利用硝酸移除鎳



### 步驟 3

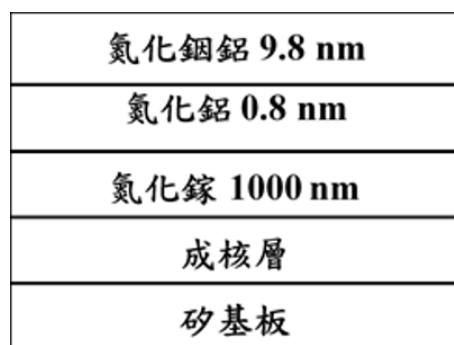
- 源極/汲極蝕刻
- 蒸鍍鈦/鎳/金和掀離
- 利用 RTA 退火
- 源極/汲極歐姆接觸



### 步驟 4

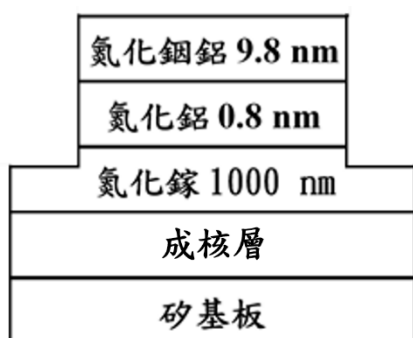
- 閘極蝕刻
- 蒸鍍鎳/金和掀離
- 閘極蕭特基接觸

圖 3-2 樣本 A 之製程



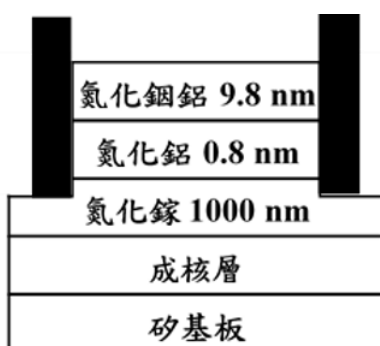
### 步驟 1

- 樣本定向
- 晶圓清潔



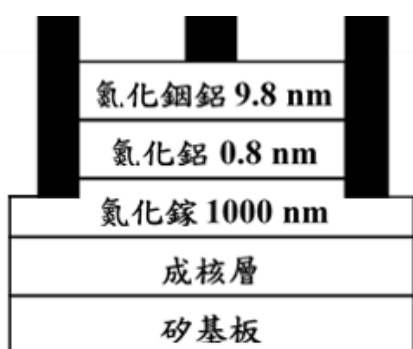
### 步驟 2

- 高臺絕緣
- 高臺蝕刻
- 蒸鍍鎳和掀離
- 利用 ICP-RIE 乾蝕刻
- 利用硝酸移除鎳



### 步驟 3

- 源極/汲極蝕刻
- 蒸鍍鈦/鎳/金和掀離
- 利用 RTA 退火
- 源極/汲極歐姆接觸



### 步驟 4

- 利用 USPD 沉積氧化鋁
- 閘極蝕刻
- 蒸鍍鎳/金和掀離
- 閘極蕭特基接觸

圖 3-3 樣本 B 之製程



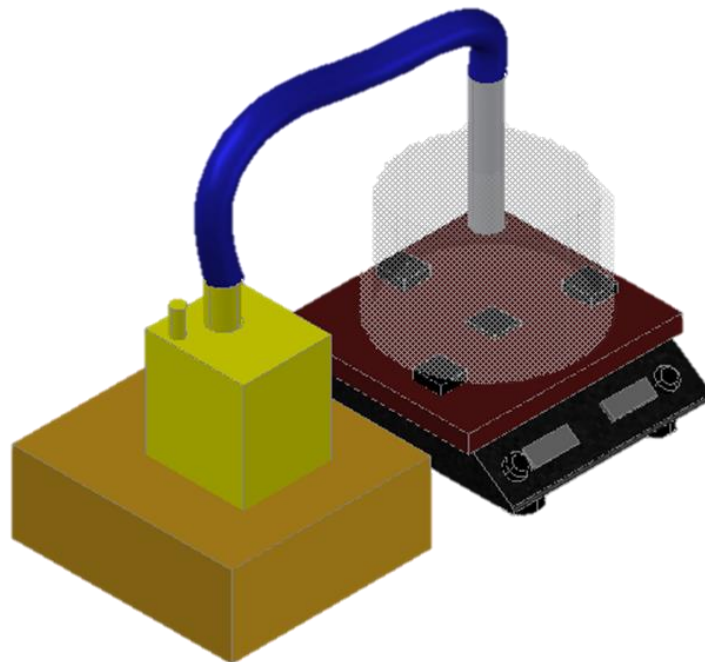
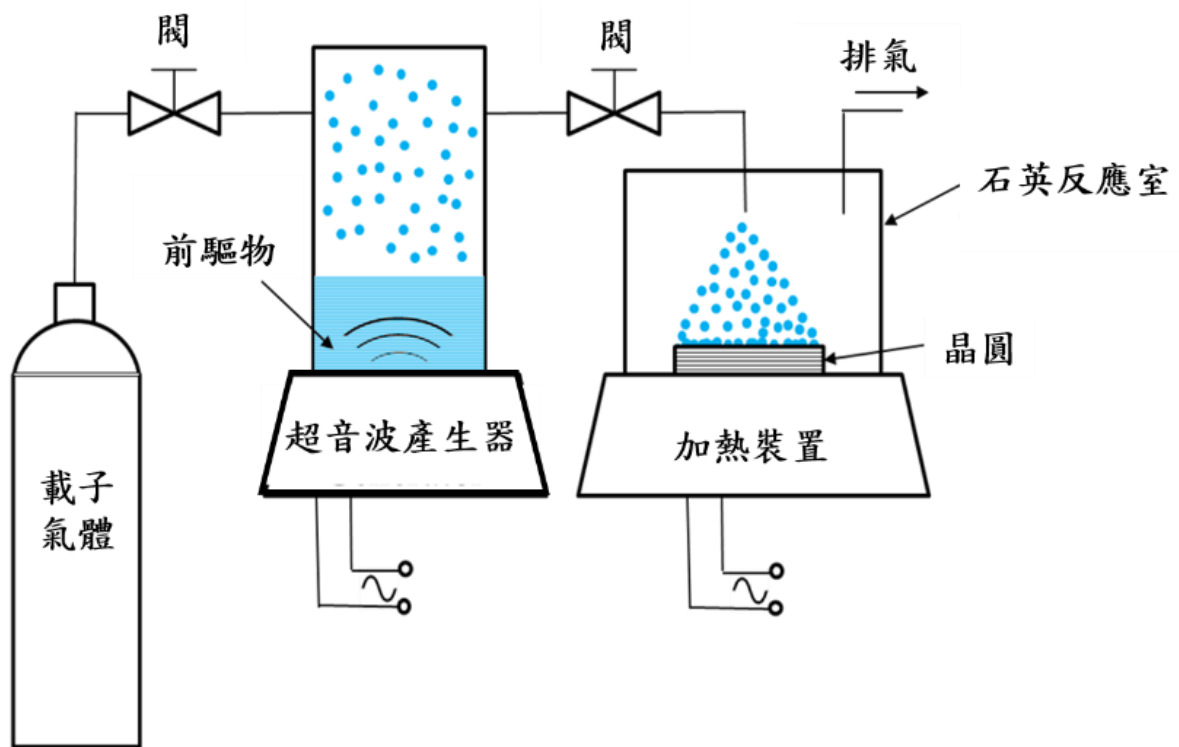


圖 3-4 超音波霧化熱裂解技術示意圖

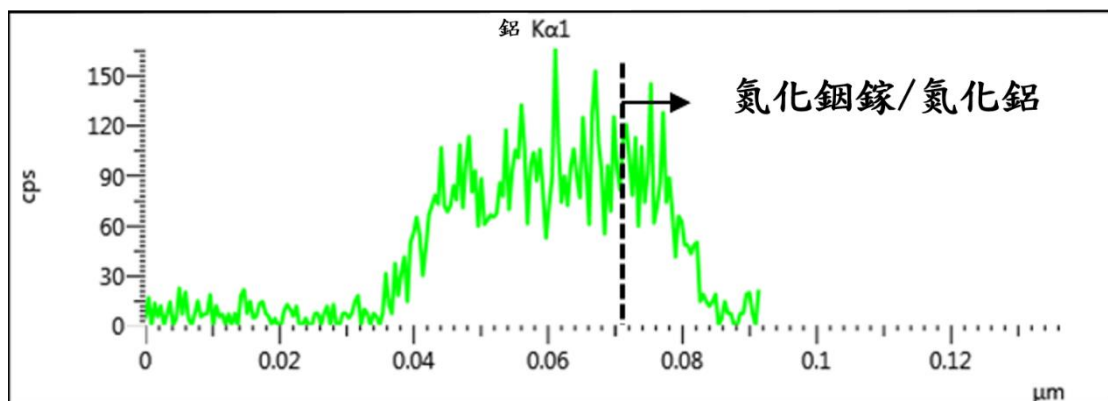
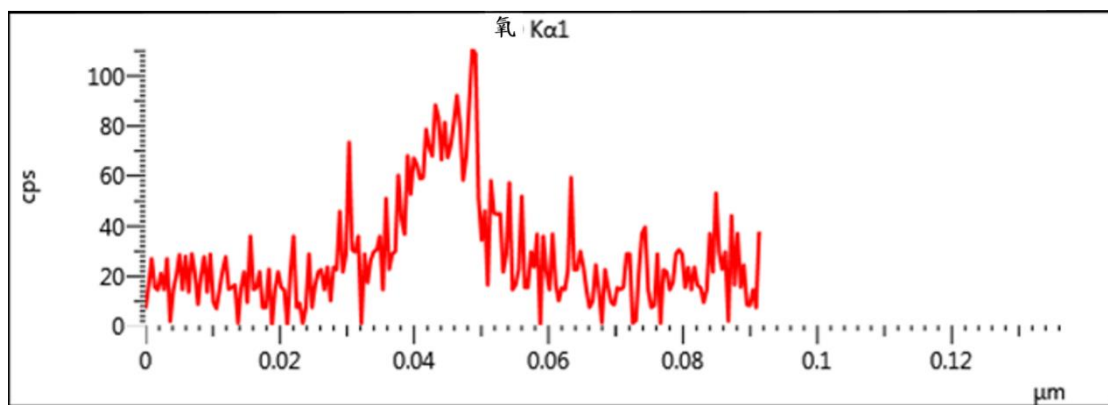
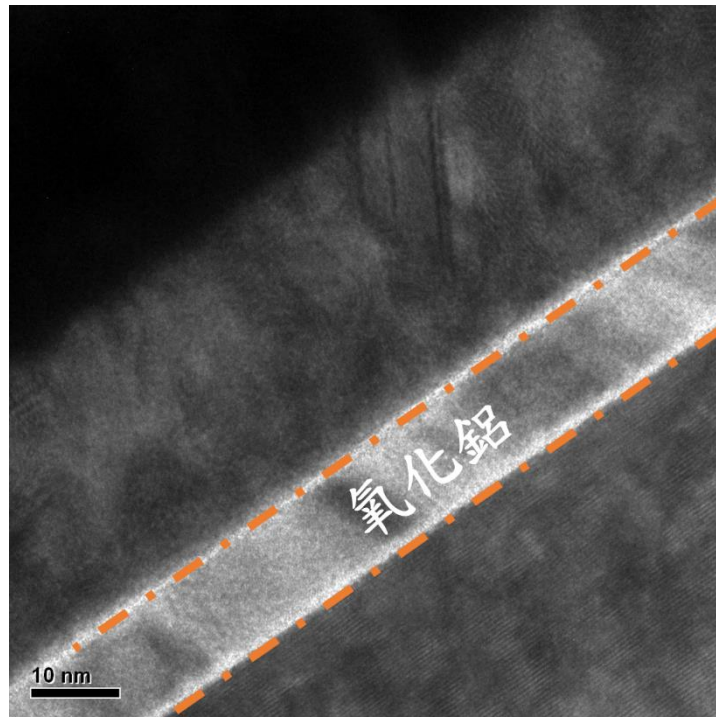


圖 4-1 氧化鋁薄膜之 TEM 分析

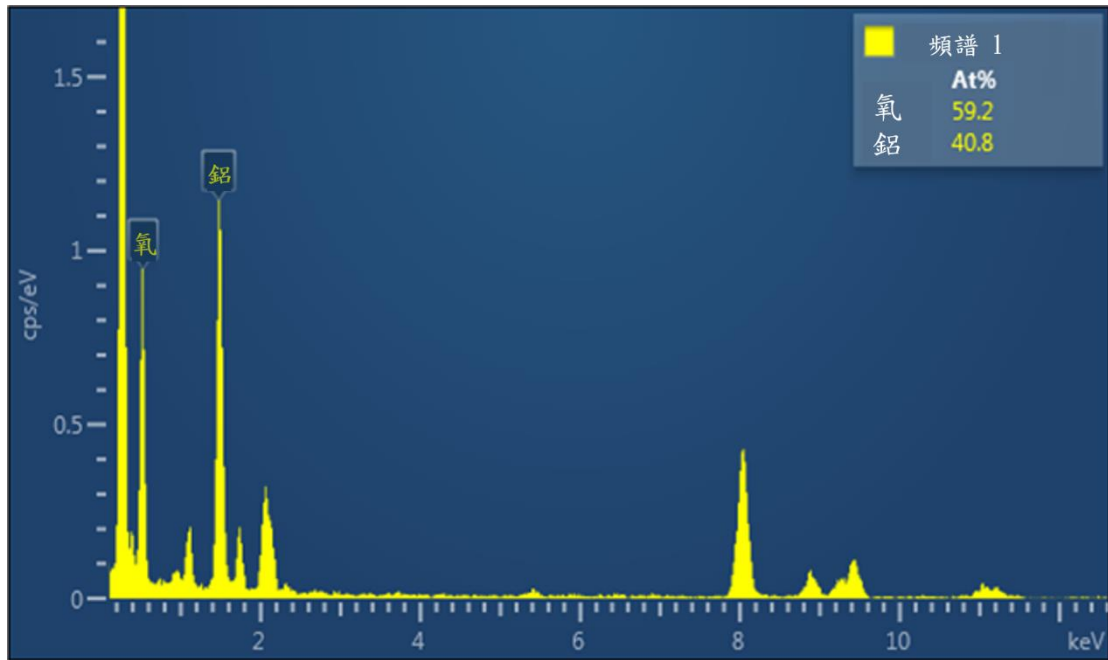


圖 4-2 氧化鋁薄膜之 EDS 分析

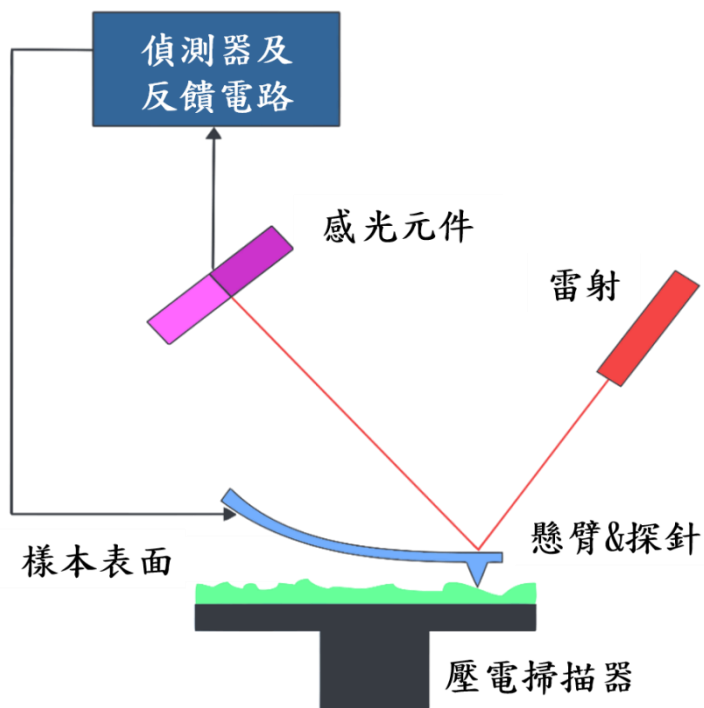


圖 4-3 AFM 量測系統之結構

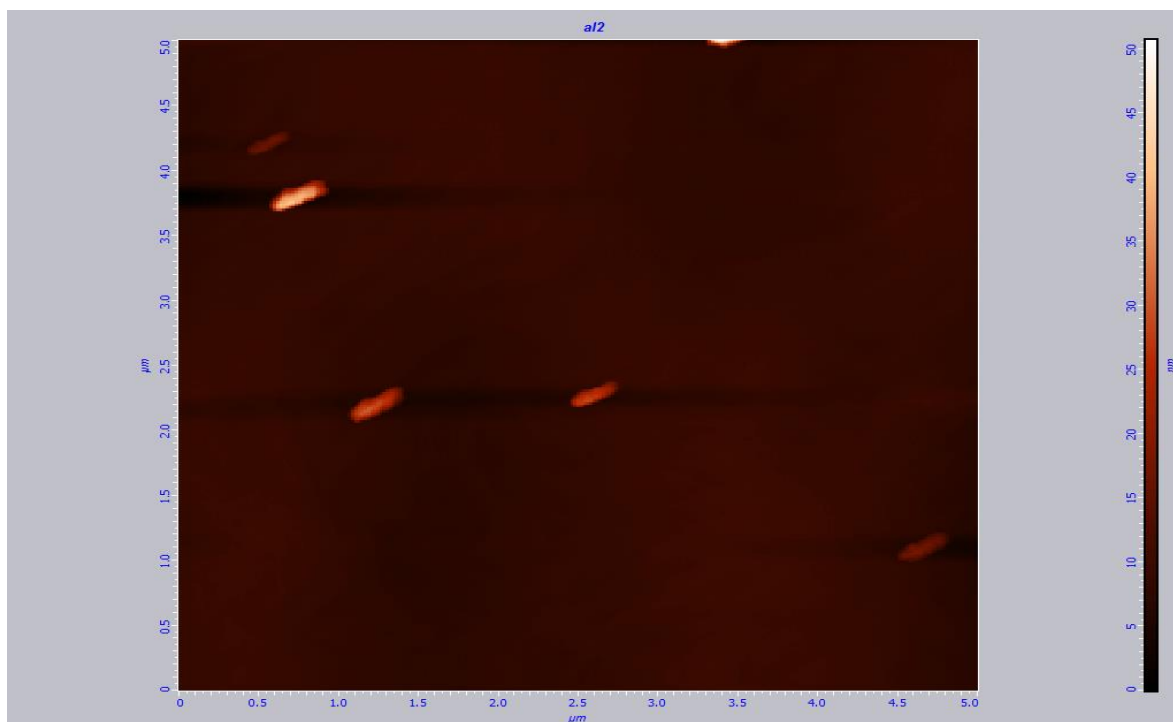


圖 4-4 氧化鋁薄膜之 AFM 二維分析

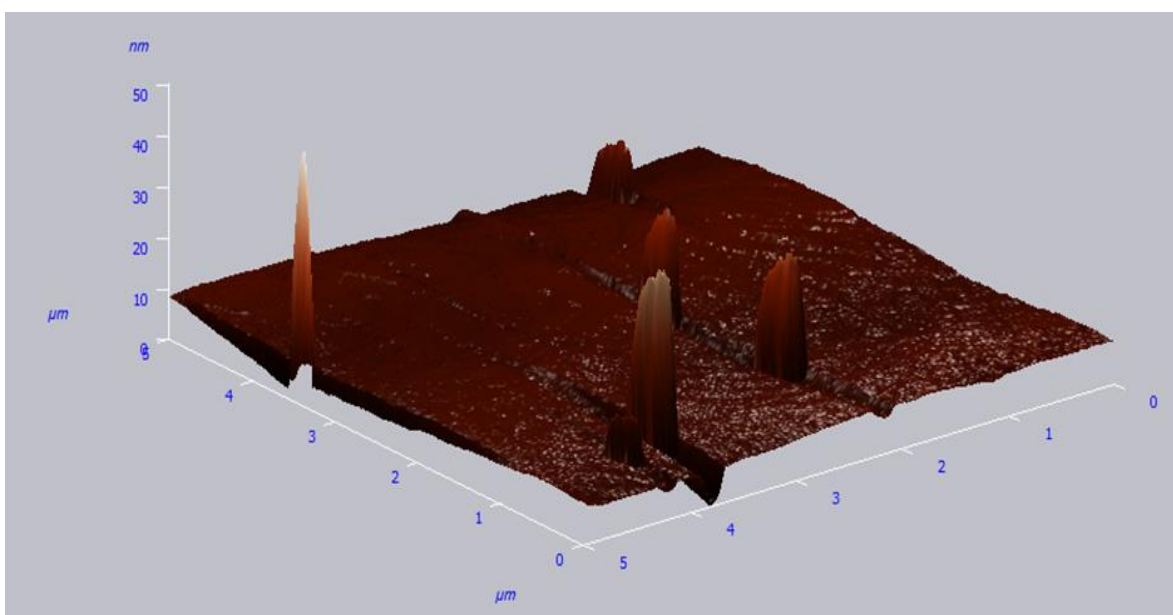


圖 4-5 氧化鋁薄膜之 AFM 三維分析

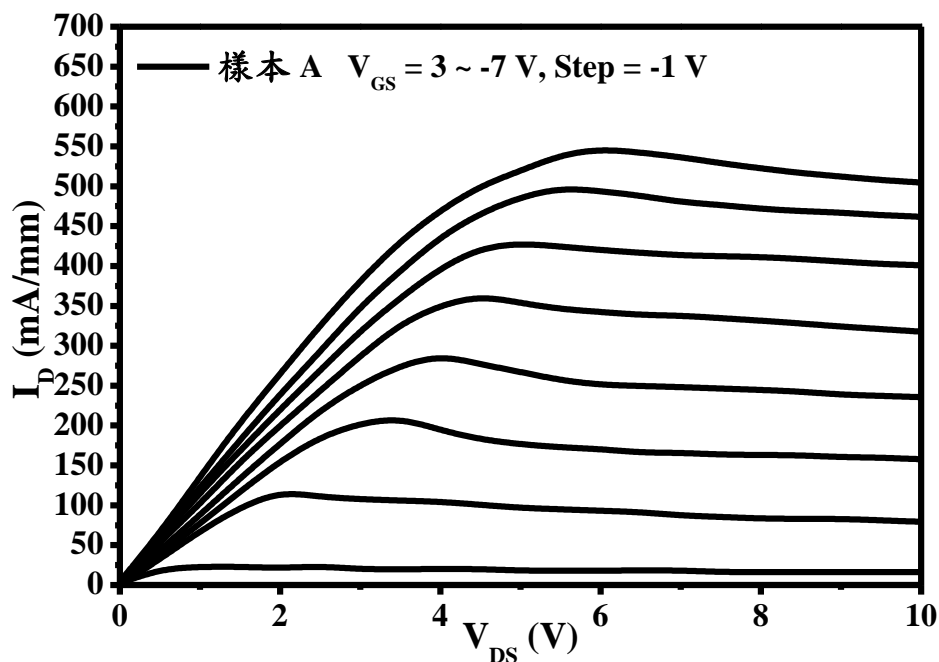


圖 4-6 室溫下蕭特基-閘極異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

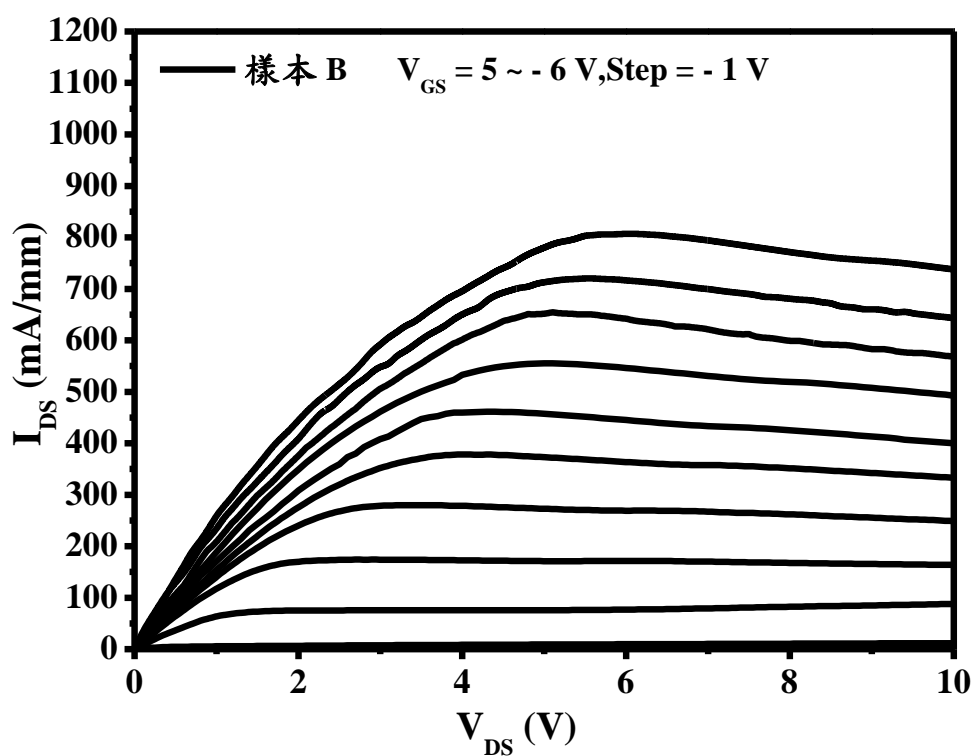


圖 4-7 室溫下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

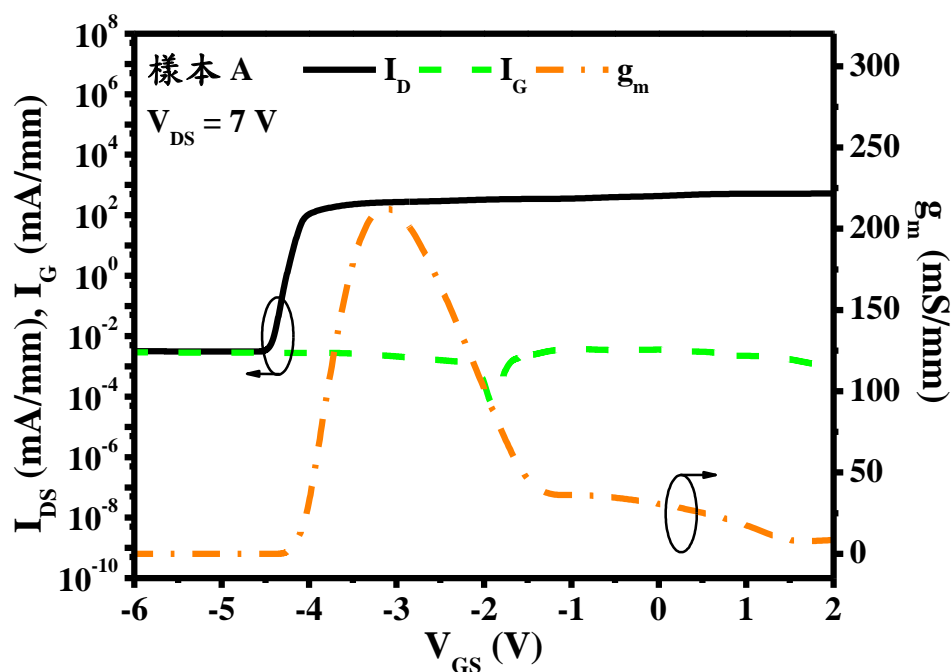


圖 4-8 室溫下蕭特基-閘極之外質轉導與汲極漏電流

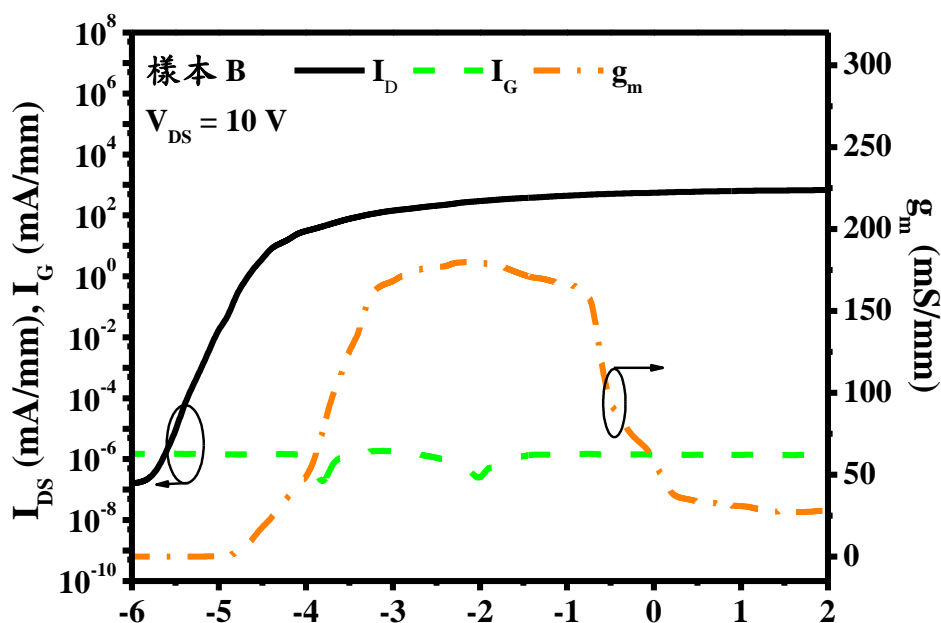


圖 4-9 室溫下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之外質轉導與汲極漏電流

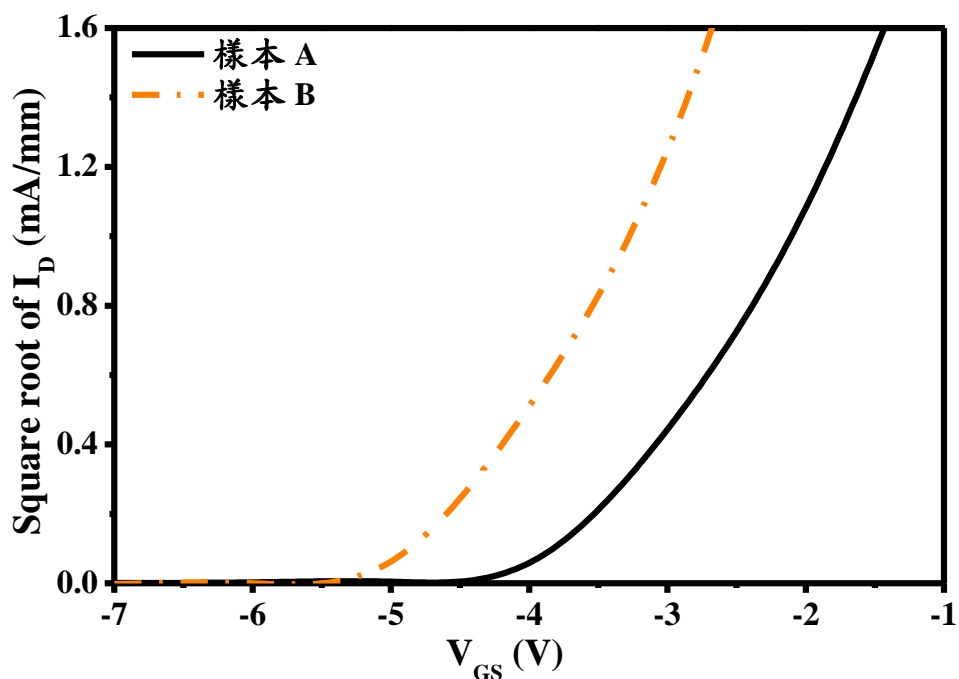


圖 4-10 樣本 A 與樣本 B 之臨界電壓( $V_{th}$ )特性

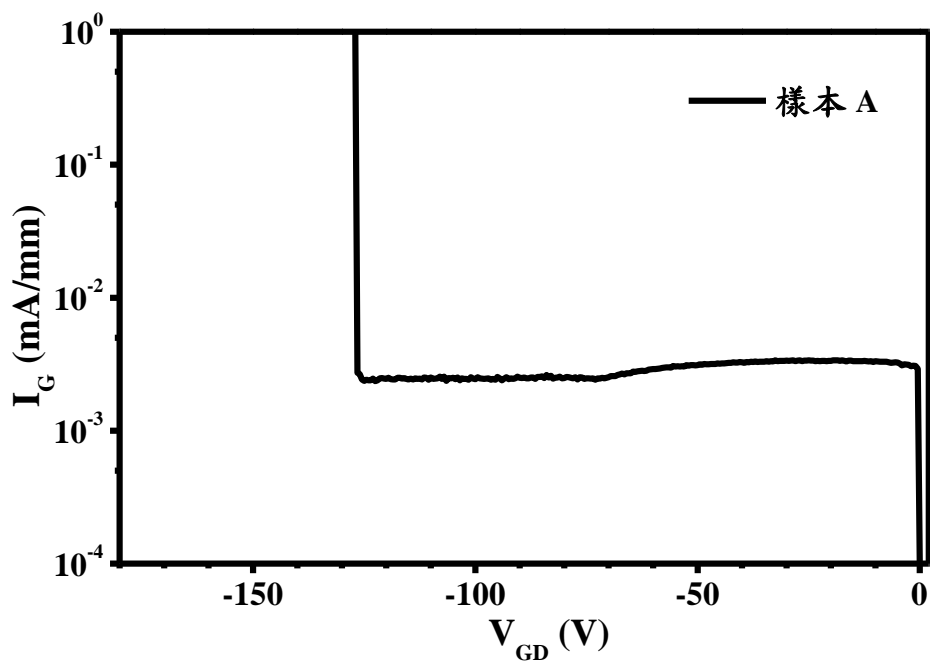


圖 4-11 樣本 A 之閘極-汲極雙端關閉狀態崩潰電壓( $BV_{GD}$ )特性

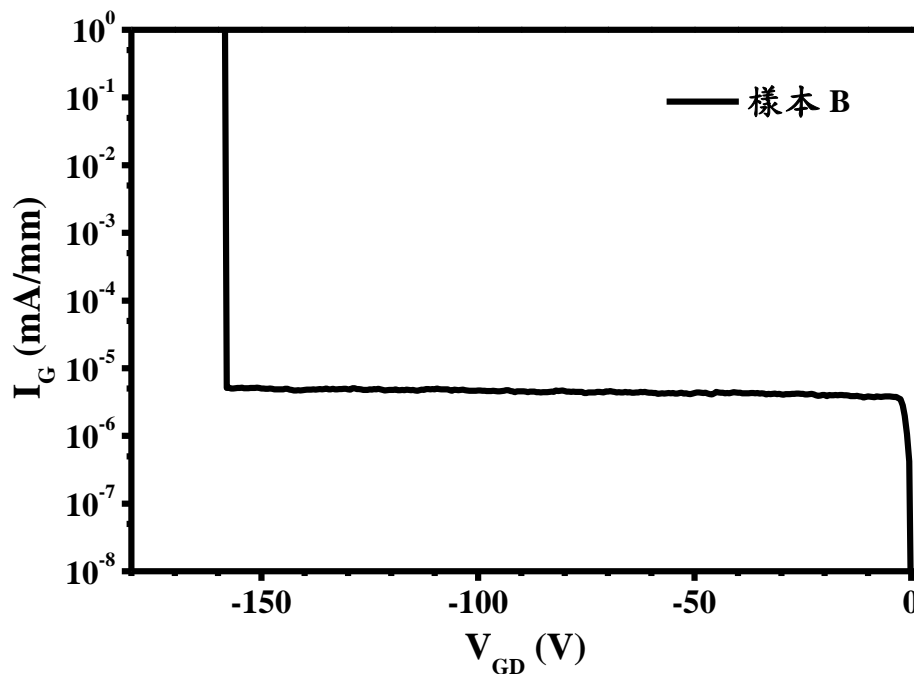


圖 4-12 樣本 B 之閘極-汲極雙端關閉狀態崩潰電壓( $BV_{GD}$ )特性

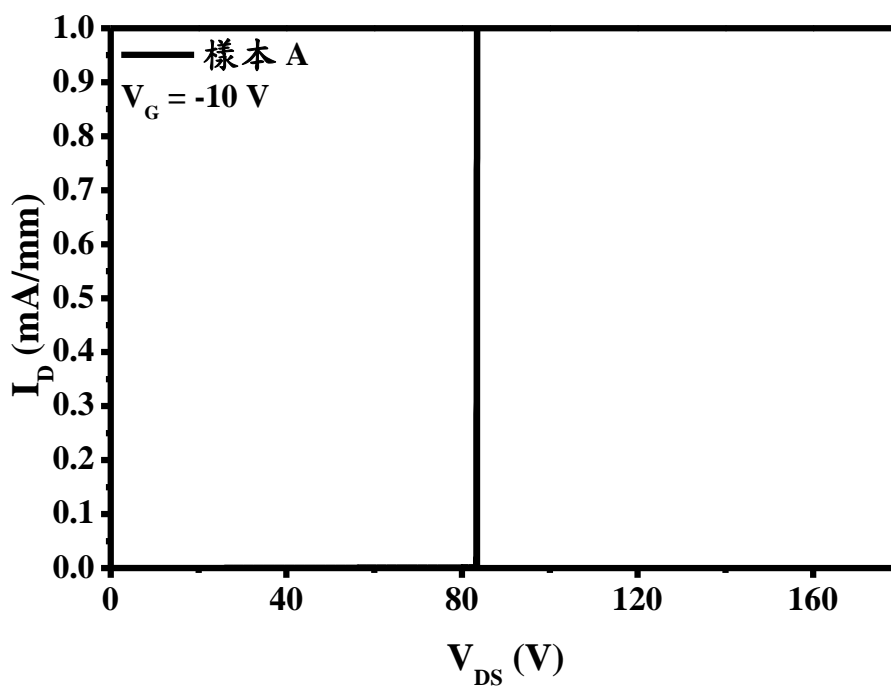


圖 4-13 樣本 A 之汲極-源極三端關閉狀態崩潰電壓( $BV_{off}$ )特性



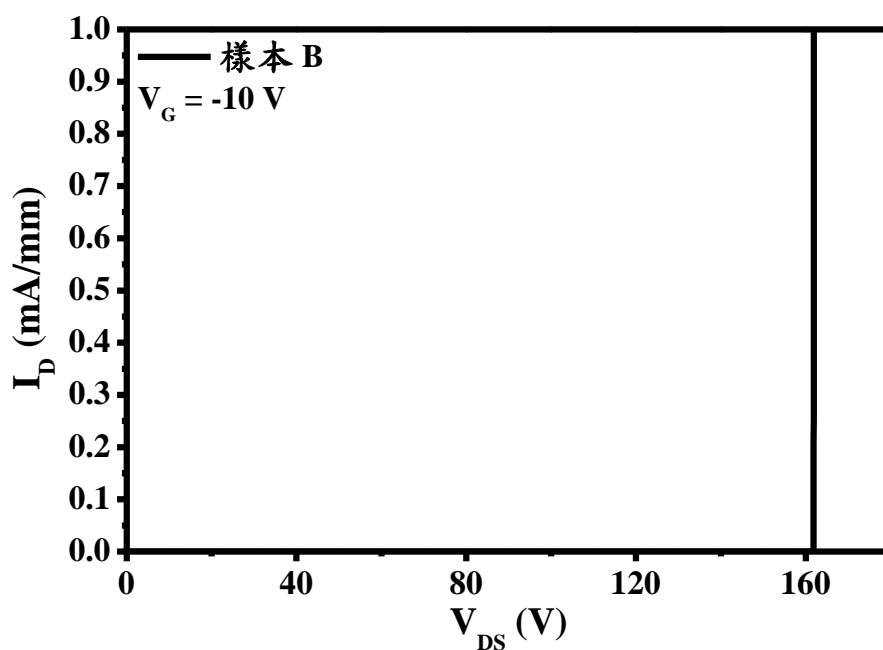


圖 4-14 樣本 B 之汲極-源極三端關閉狀態崩潰電壓( $BV_{off}$ )特性

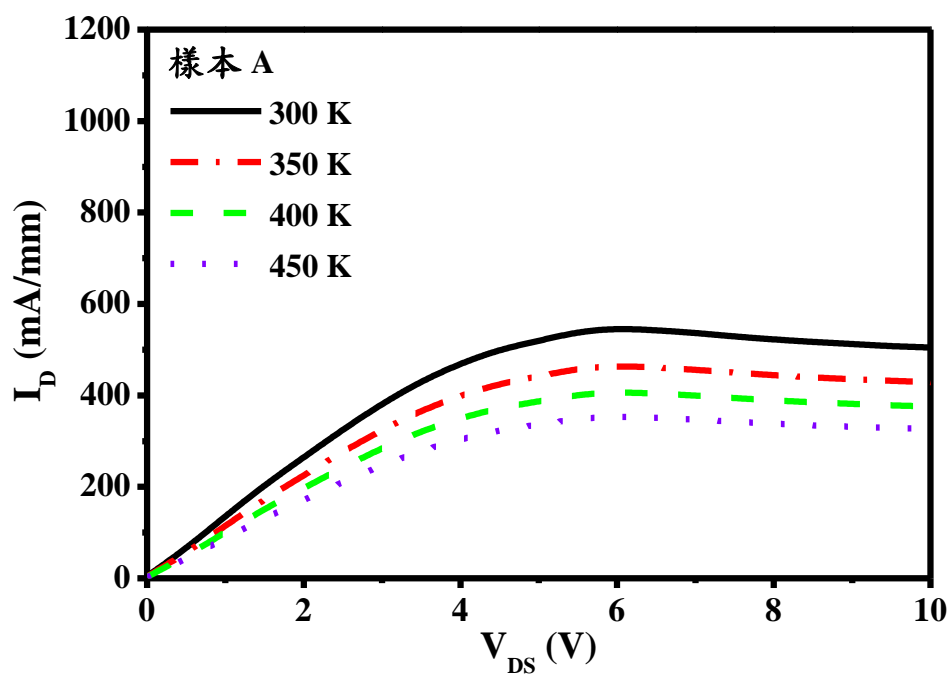


圖 4-15 300 K 到 450 K 之傳統異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性

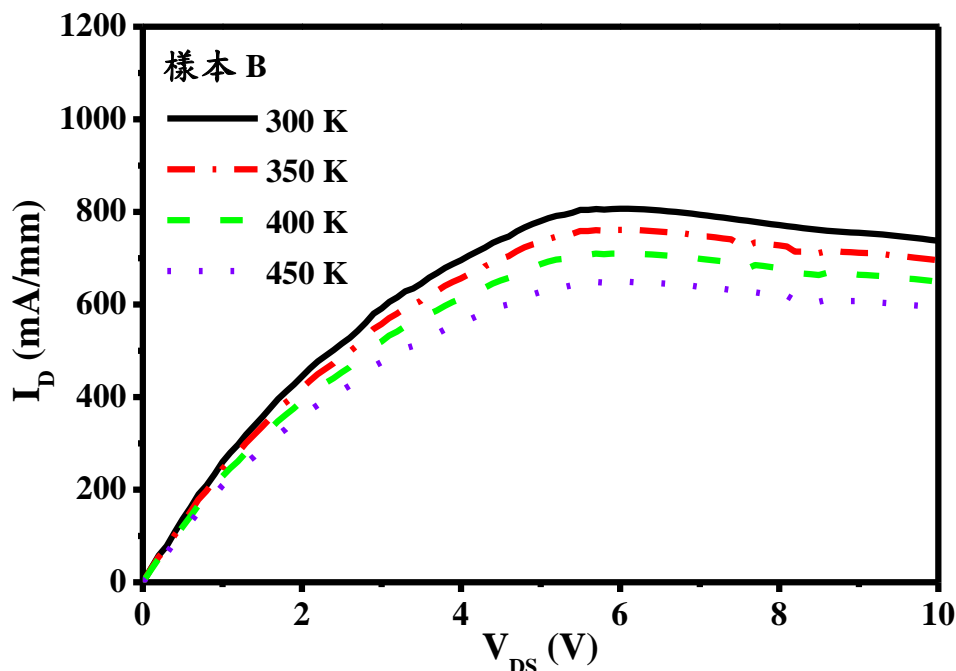


圖 4-16 300 K 到 450 K 之氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性

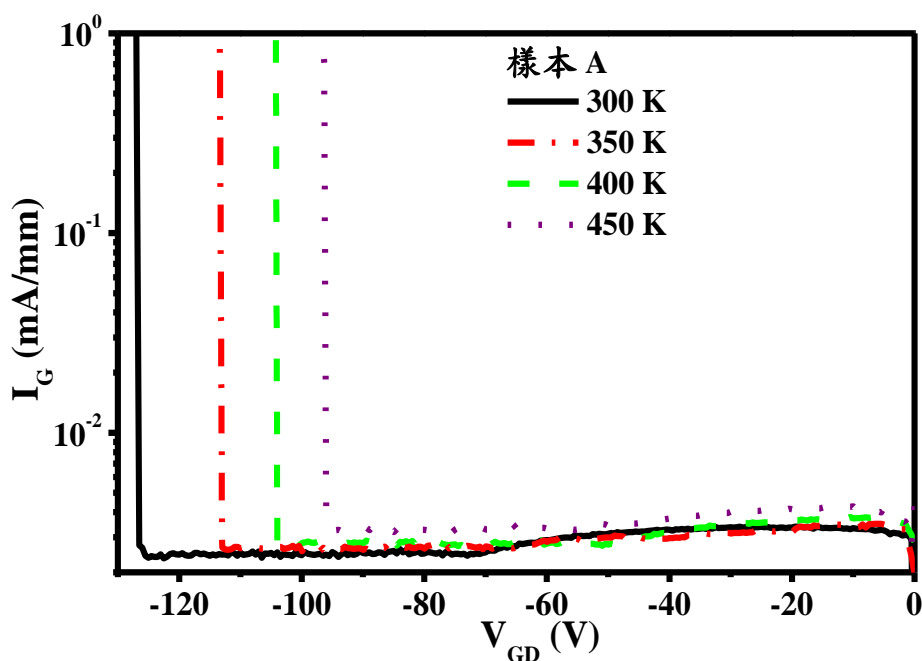


圖 4-17 300 K 到 450 K 之傳統異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性

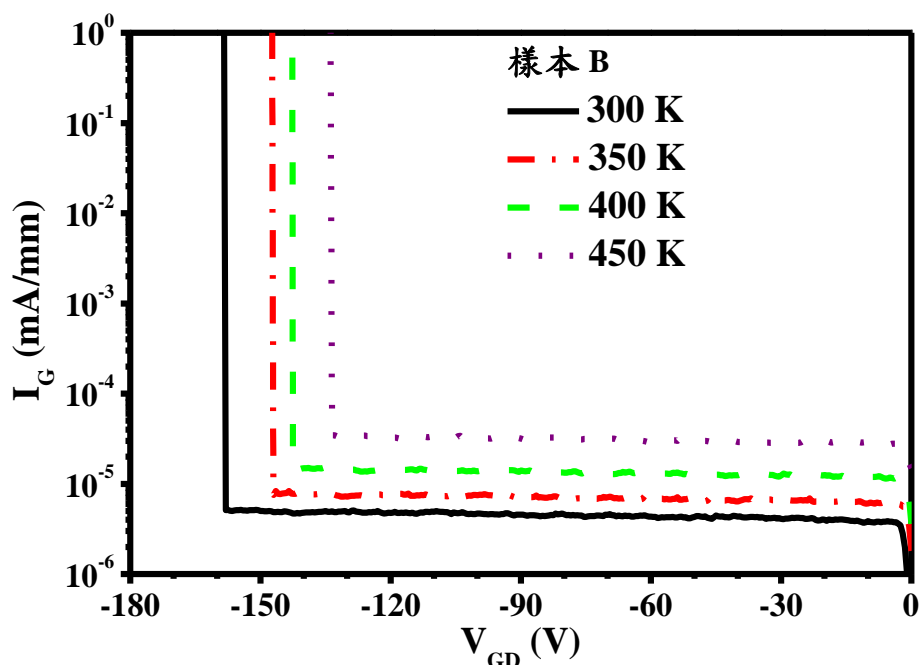


圖 4-18 300 K 到 450 K 之氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性

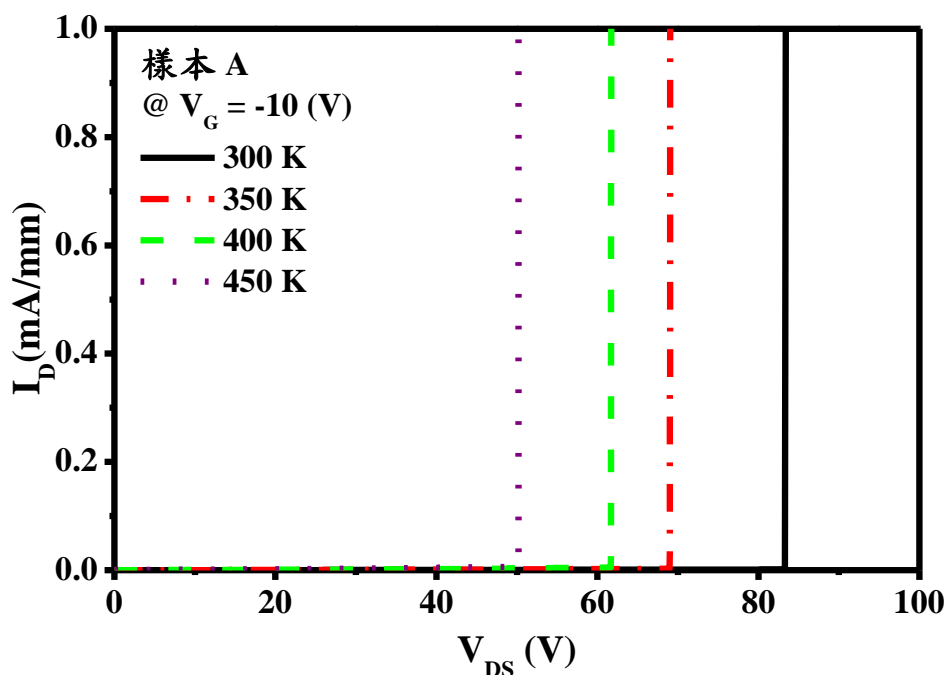


圖 4-19 300 K 到 450 K 之傳統異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性

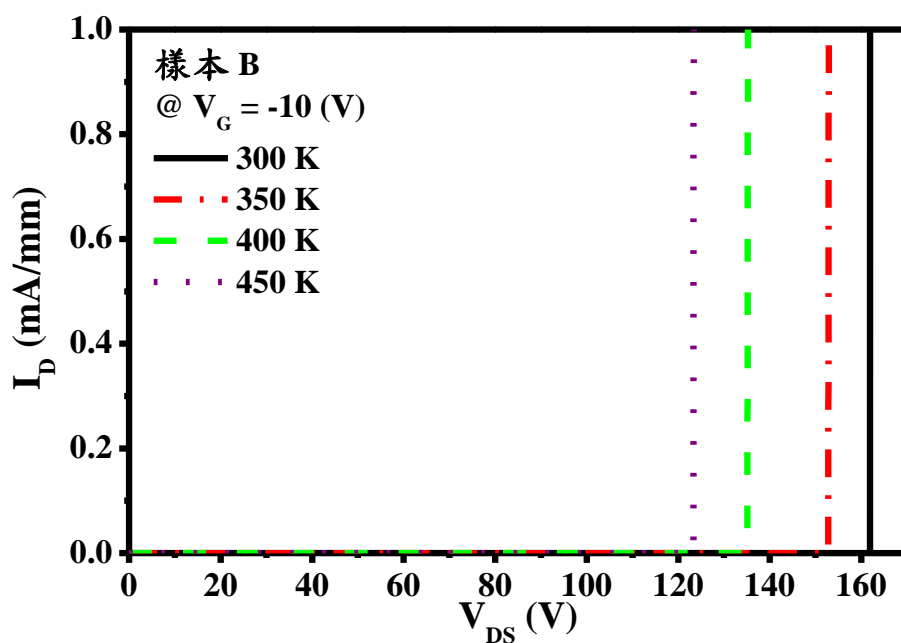


圖 4-20 300 K 到 450 K 之氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體的直流溫度依賴特性

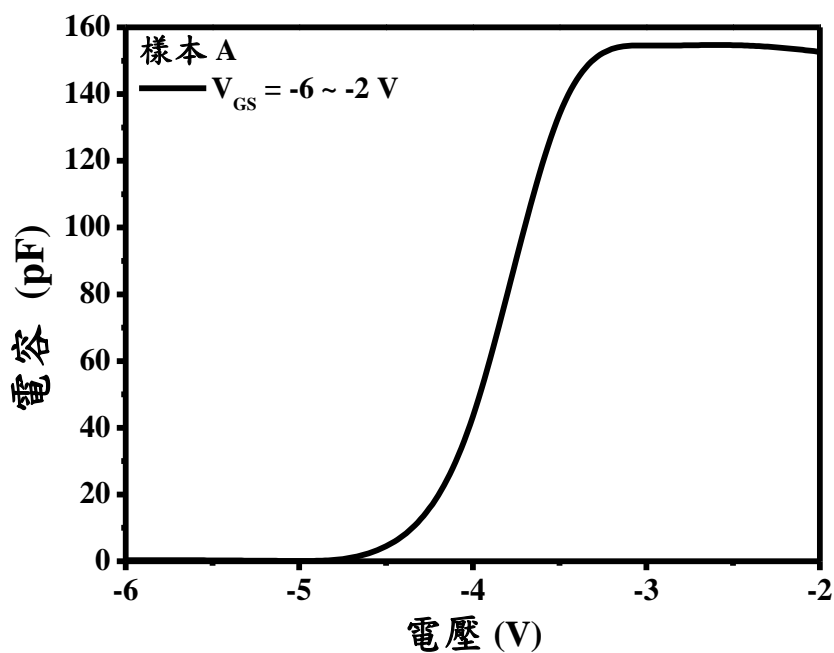


圖 4-21 傳統異質結構場效電晶體之電容-電壓特性

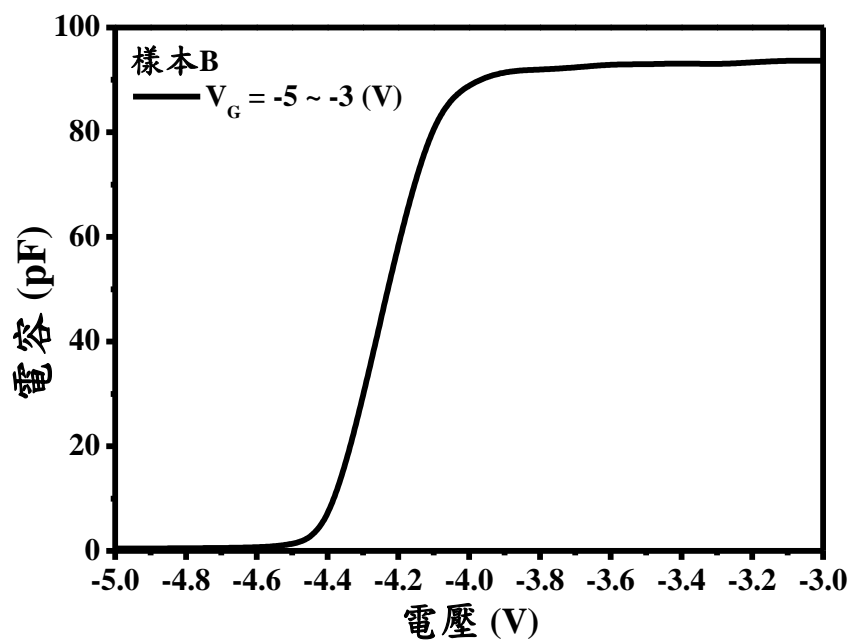


圖 4-22 氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之電容-電壓特性

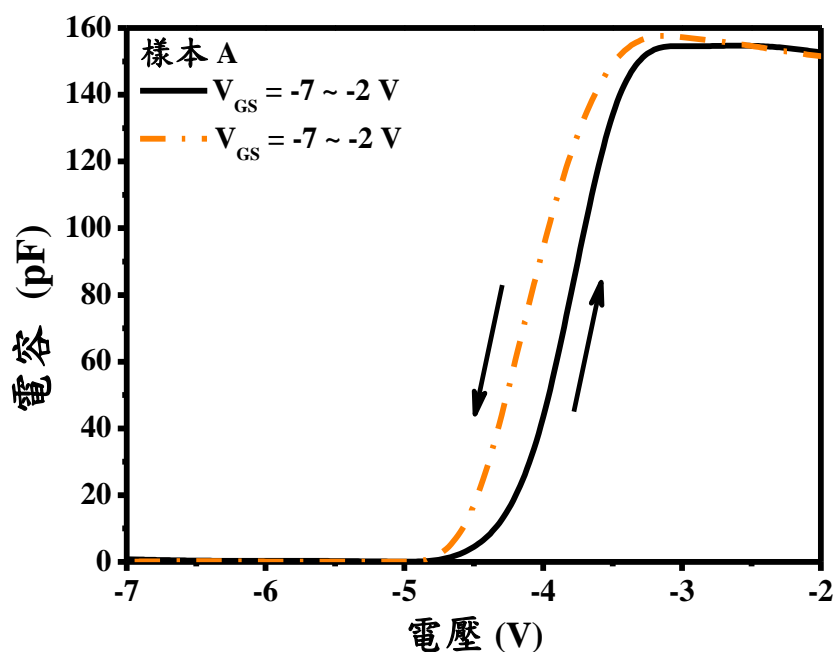


圖 4-23 1 MHz 下金屬-半導體(M-S)蕭特基異質結構場效電晶體之  
遲滯特性

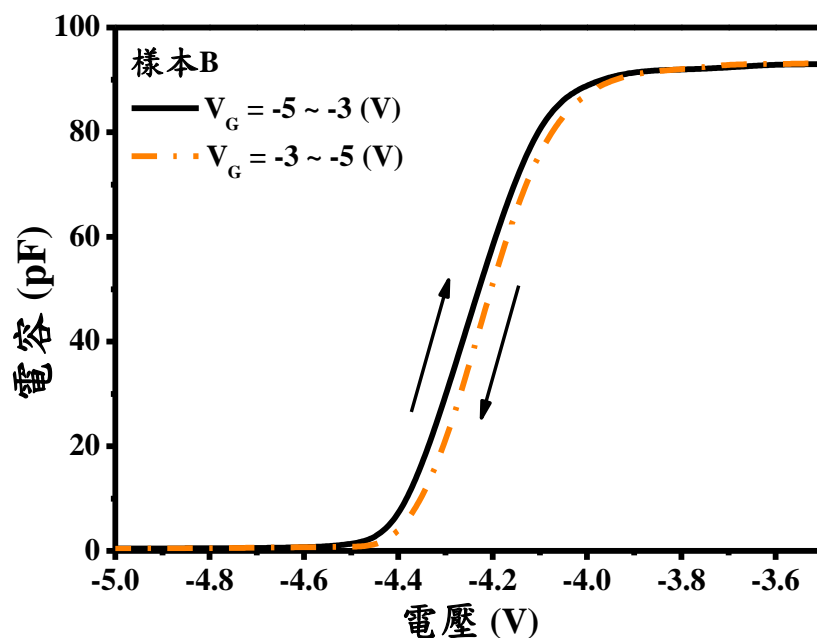


圖 4-24 1 MHz 下氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之遲滯特性

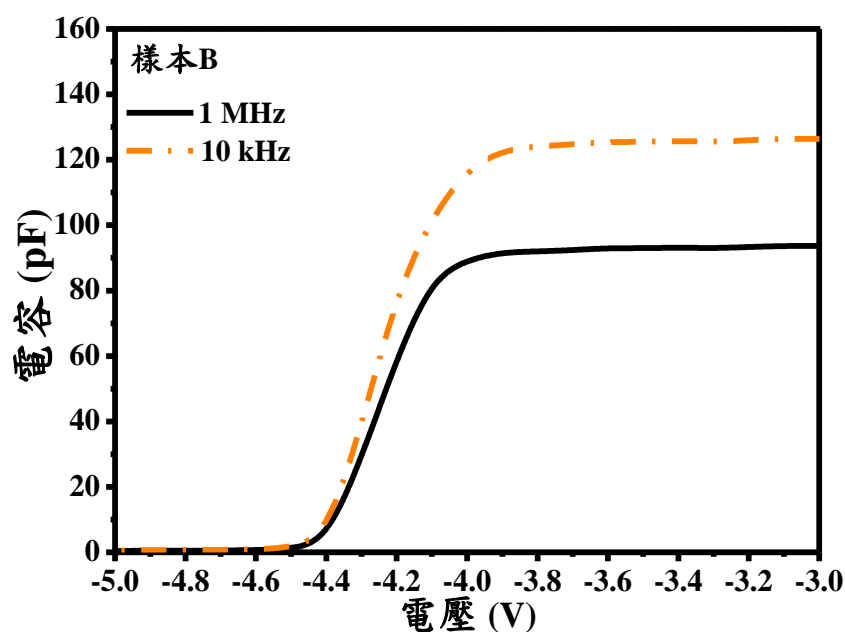


圖 4-25 氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之電容-電壓特性

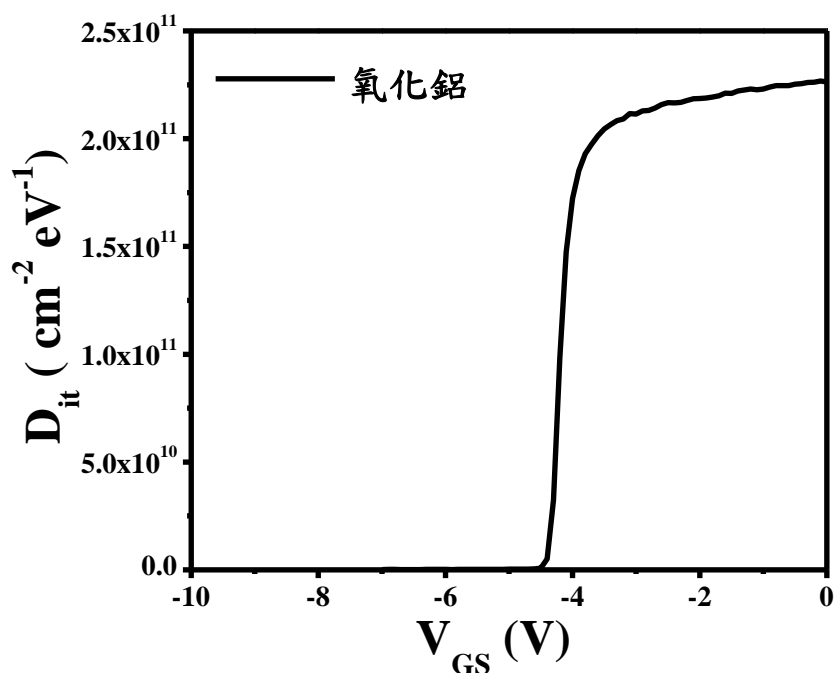


圖 4-26 氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之  
界面狀態密度-電壓特性

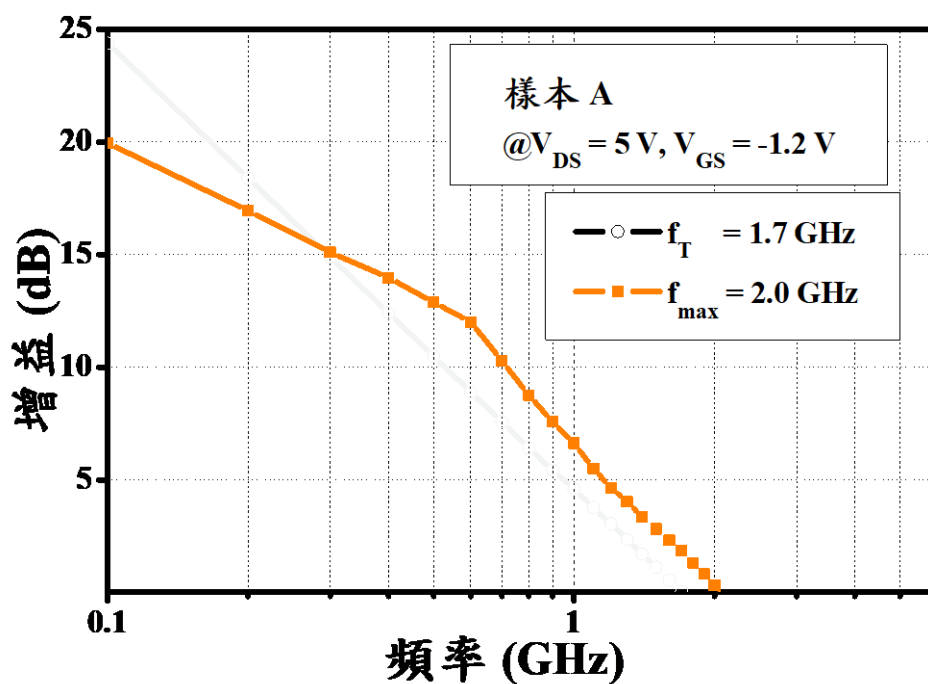


圖 4-27 傳統異質結構場效電晶體之截止頻率( $f_T$ )與最大振盪頻率( $f_{max}$ )特性

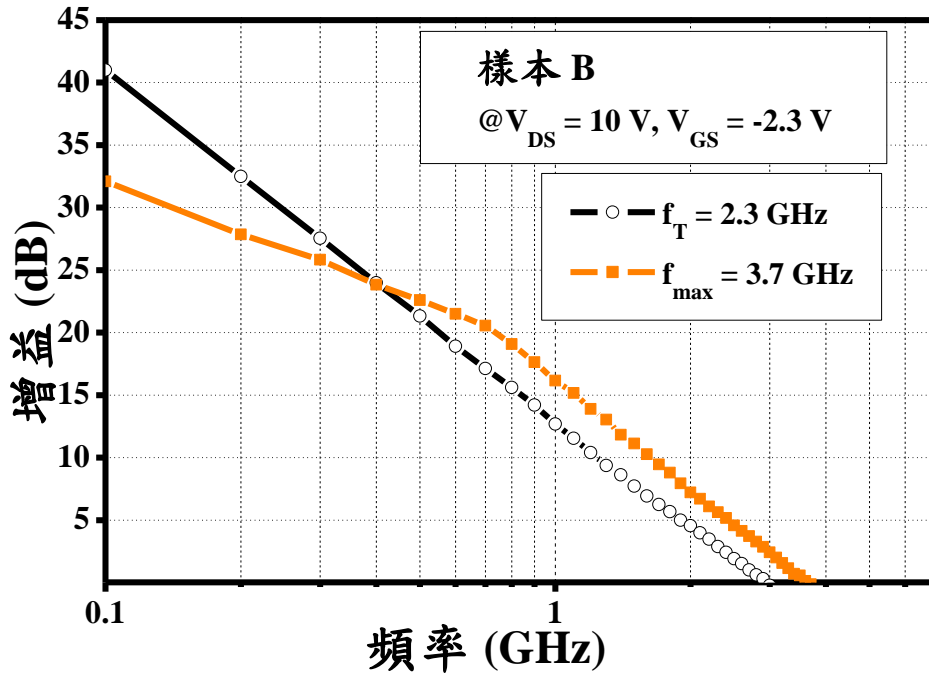


圖 4-28 氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之截止頻率( $f_T$ )與最大振盪頻率( $f_{max}$ )特性

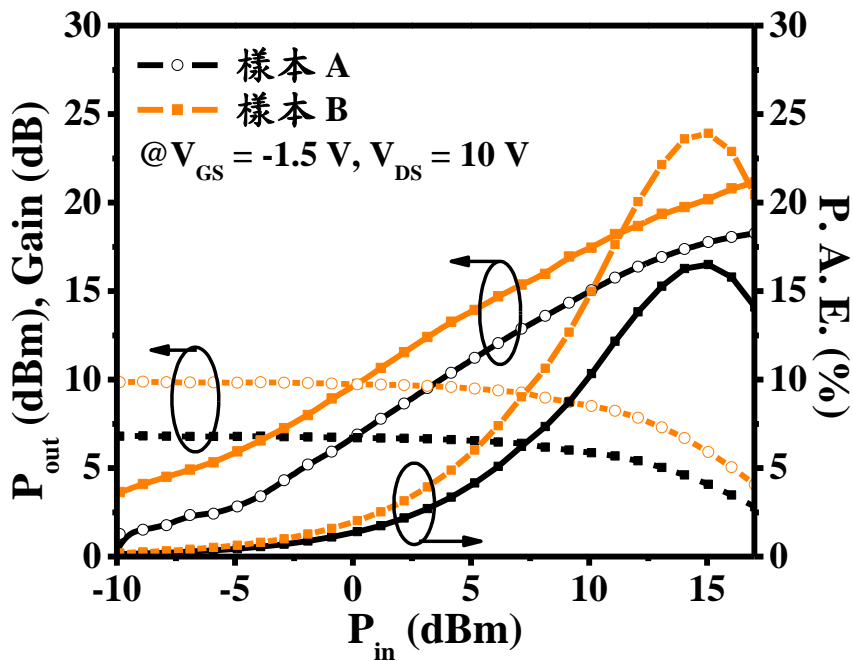


圖 4-29 2.4 GHz 下傳統異質結構場效電晶體與氧化鋁金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之功率附加效率(P. A. E.)、輸出功率( $P_{out}$ )和相關增益( $G_a$ )特性



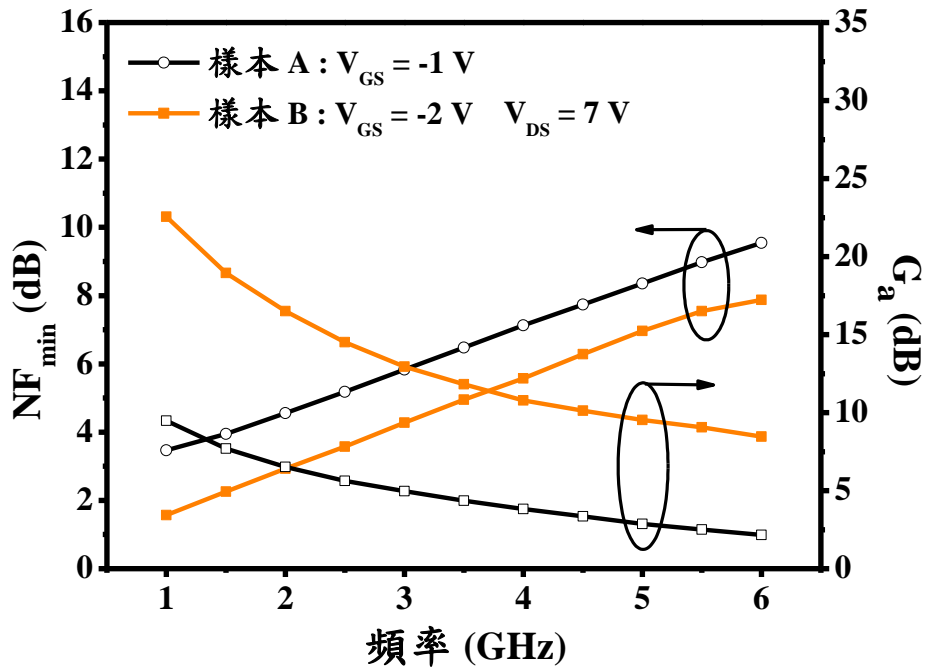


圖 4-30 樣本 A 與樣本 B 的最小雜訊係數( $NF_{min}$ )與相關增益( $G_a$ )對頻率之特性

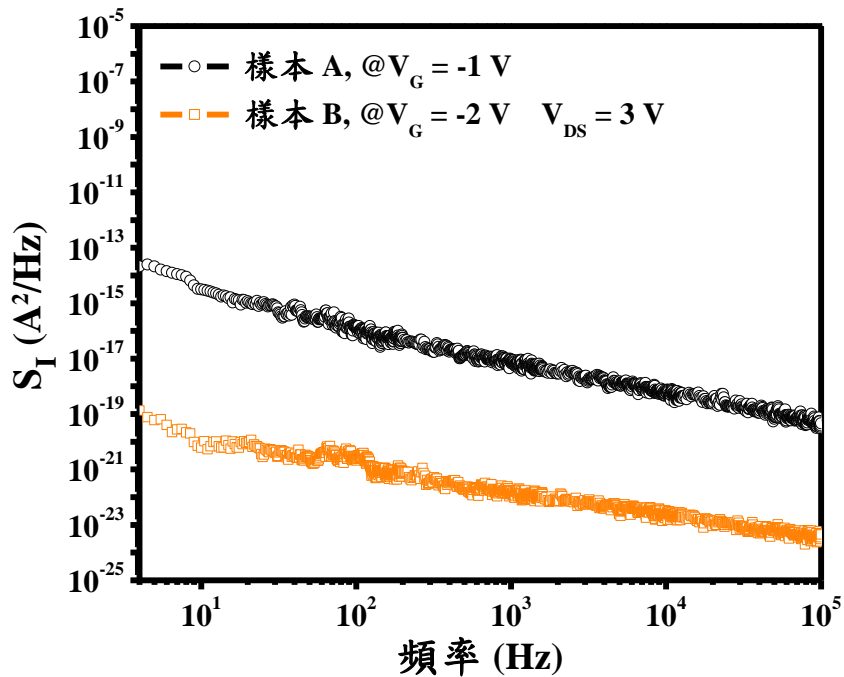


圖 4-31 樣本 A 與樣本 B 之低頻雜訊特性

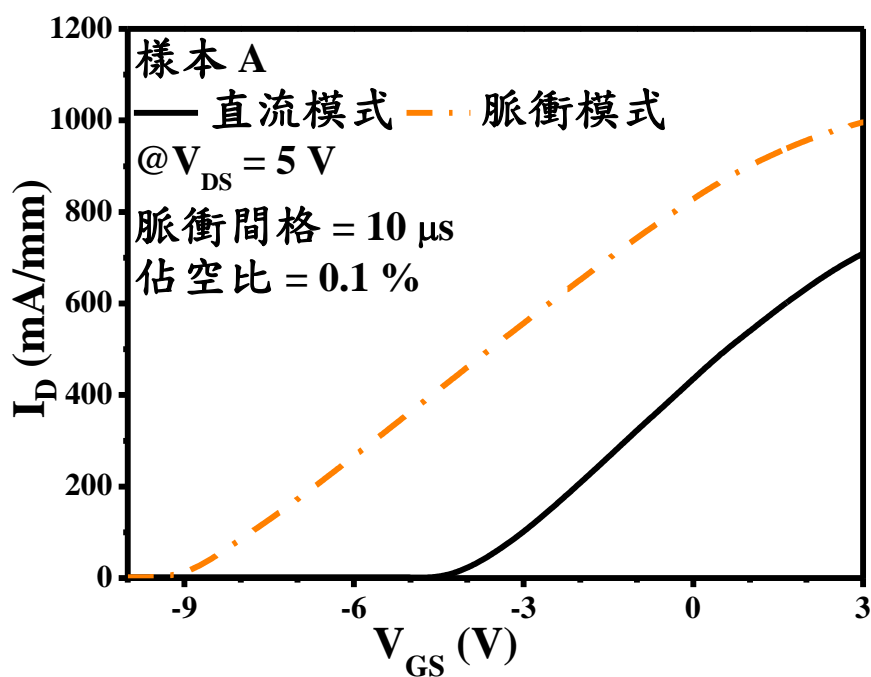


圖 4-32 傳統異質結構場效電晶體之直流與脈衝特性

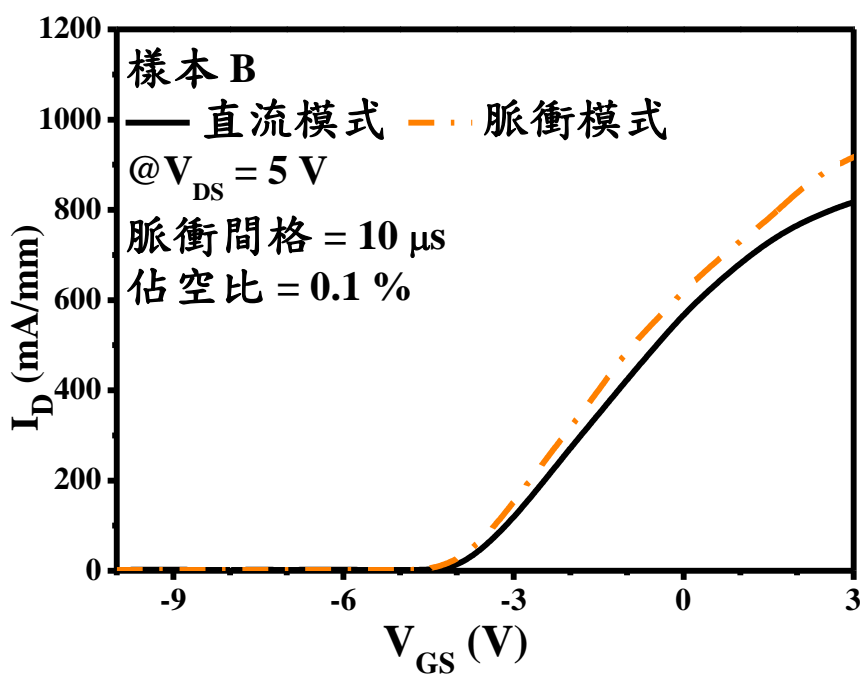


圖 4-33 金屬-氧化物-半導體異質結構場效電晶體之直流與脈衝特性

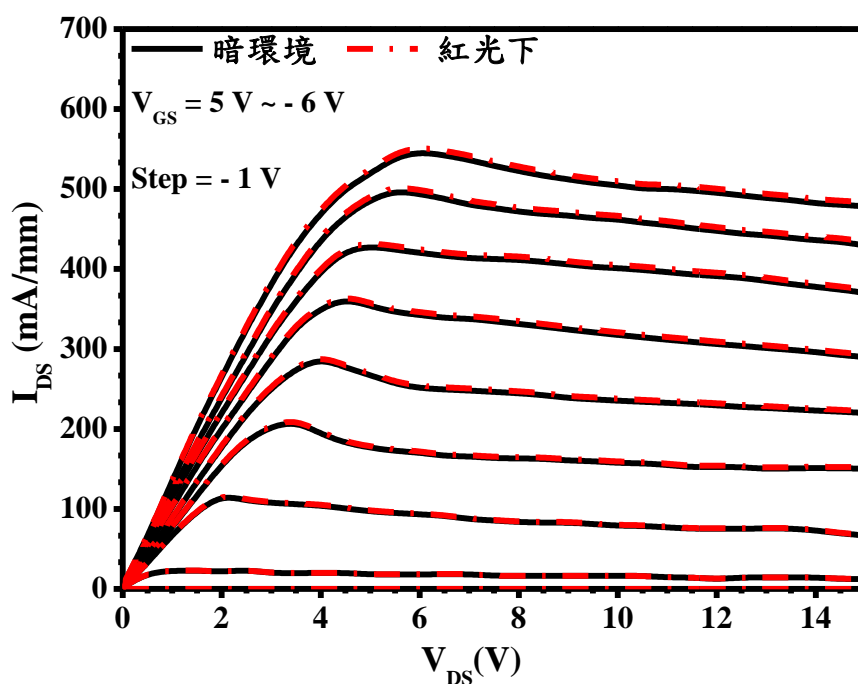


圖 4-34 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

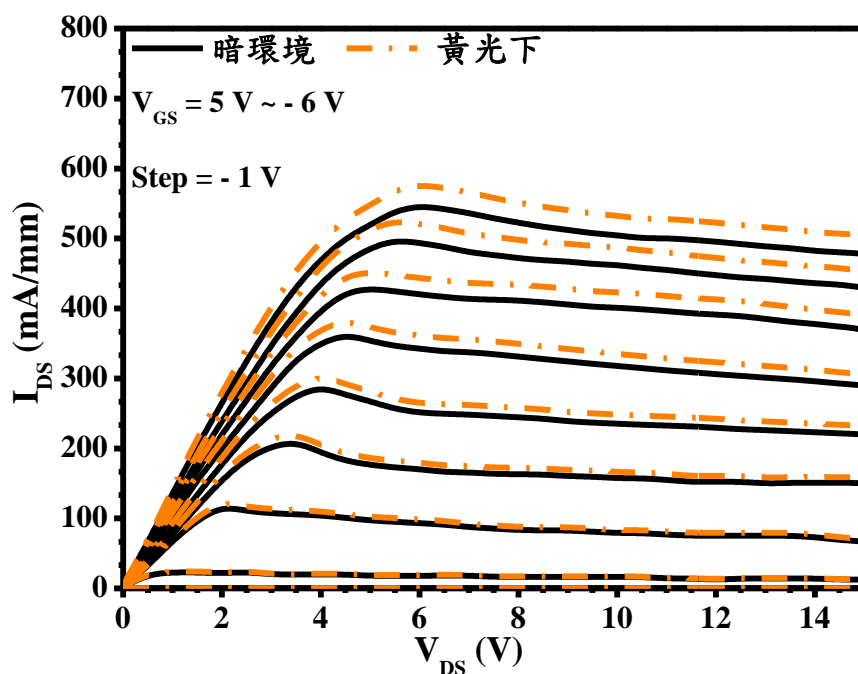


圖 4-35 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

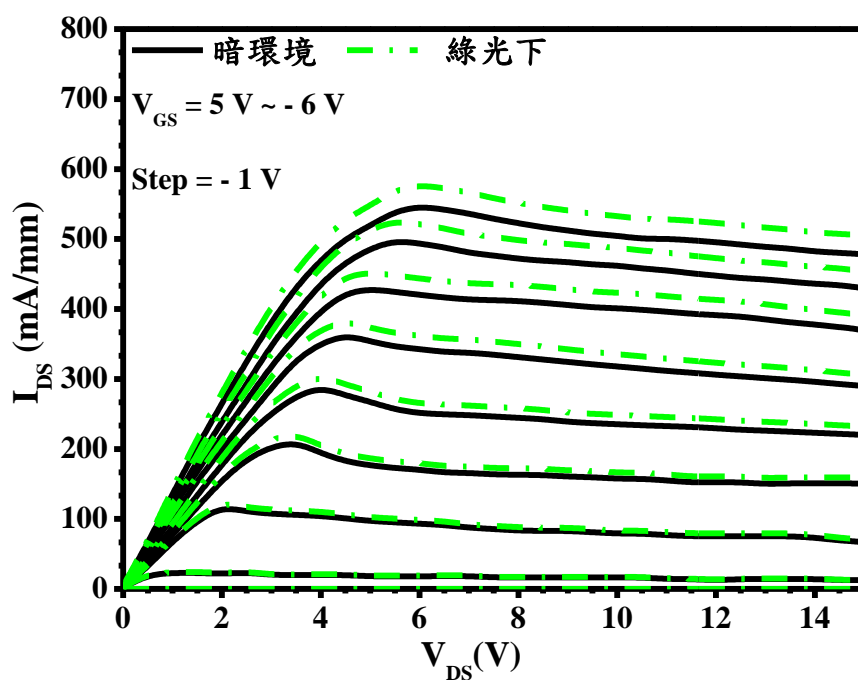


圖 4-36 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

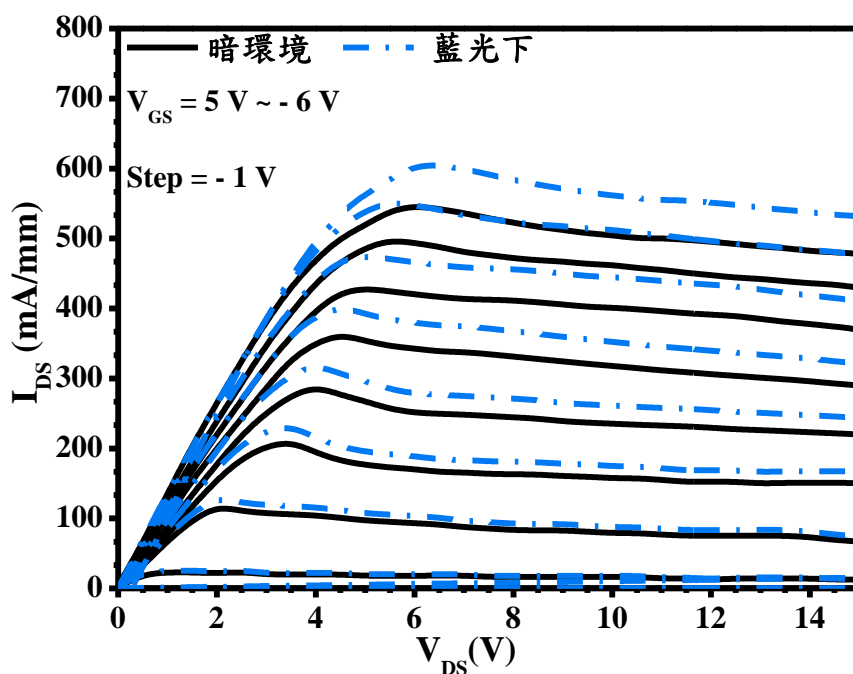


圖 4-37 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

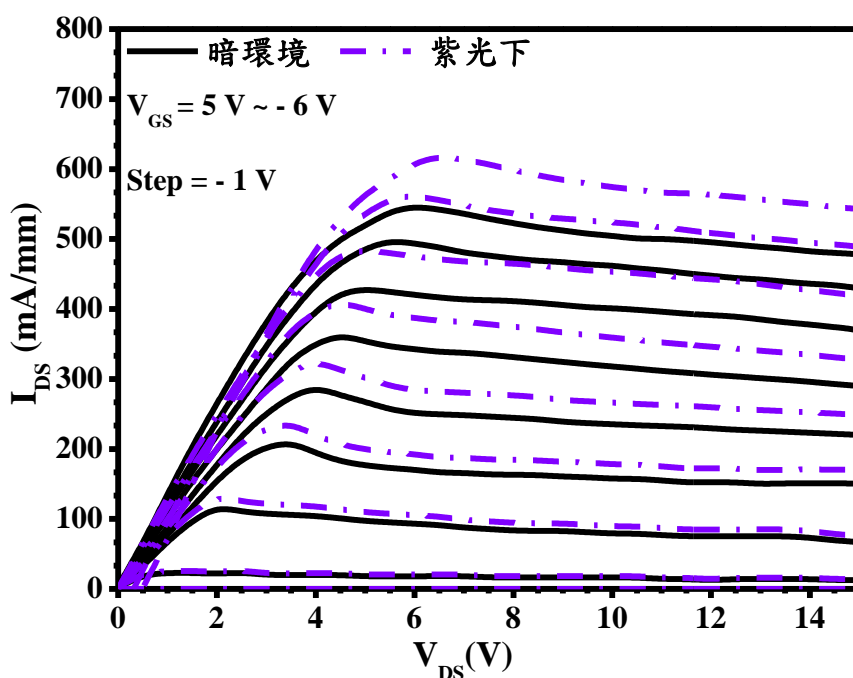


圖 4-38 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

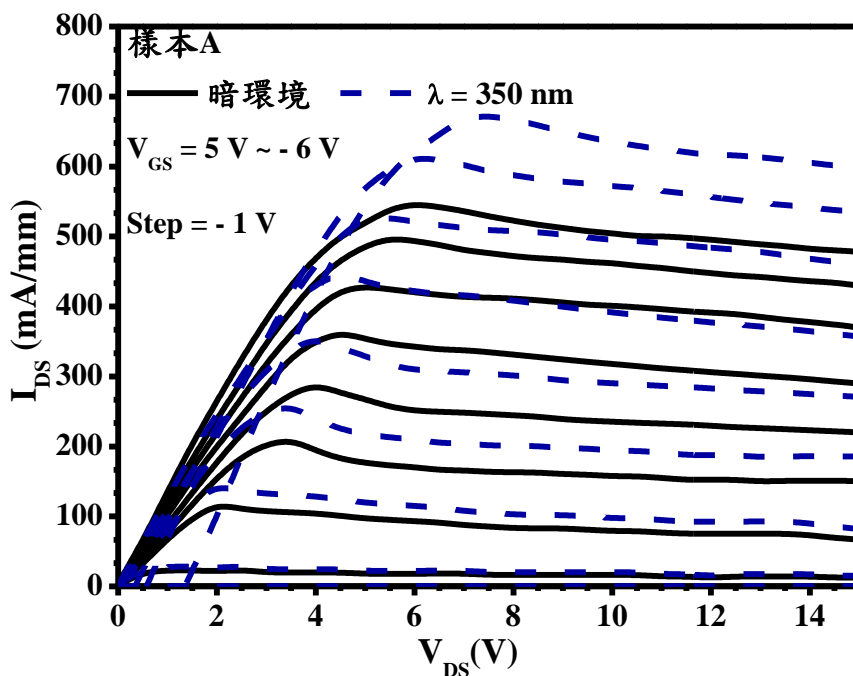


圖 4-39 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

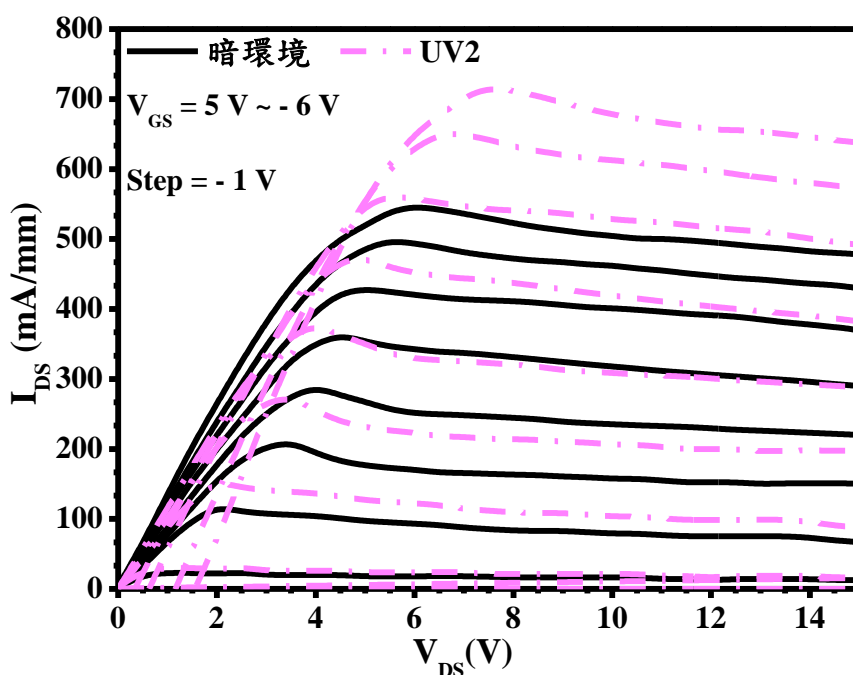


圖 4-40 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

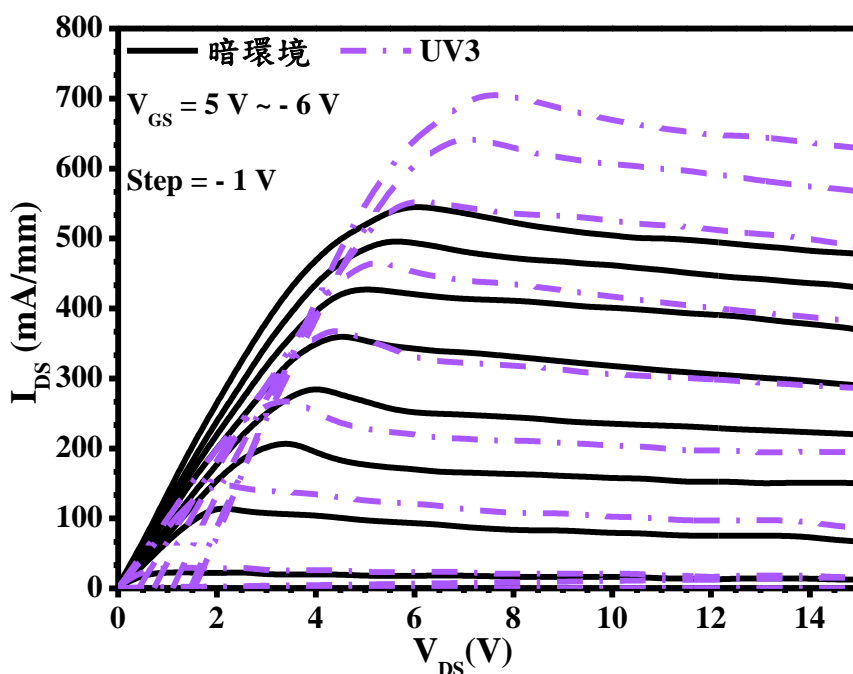


圖 4-41 照光與暗環境製程下傳統異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

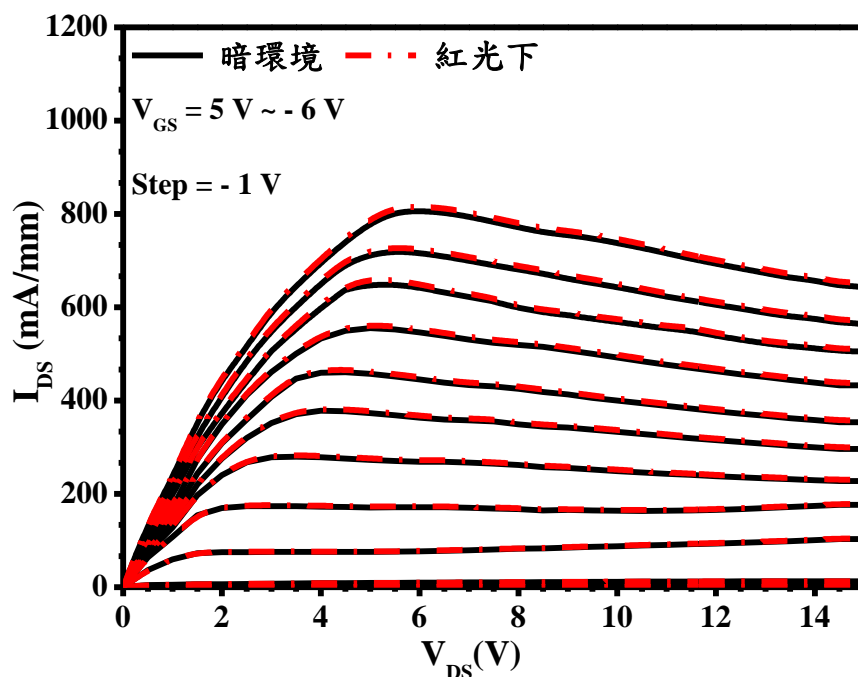


圖 4-42 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

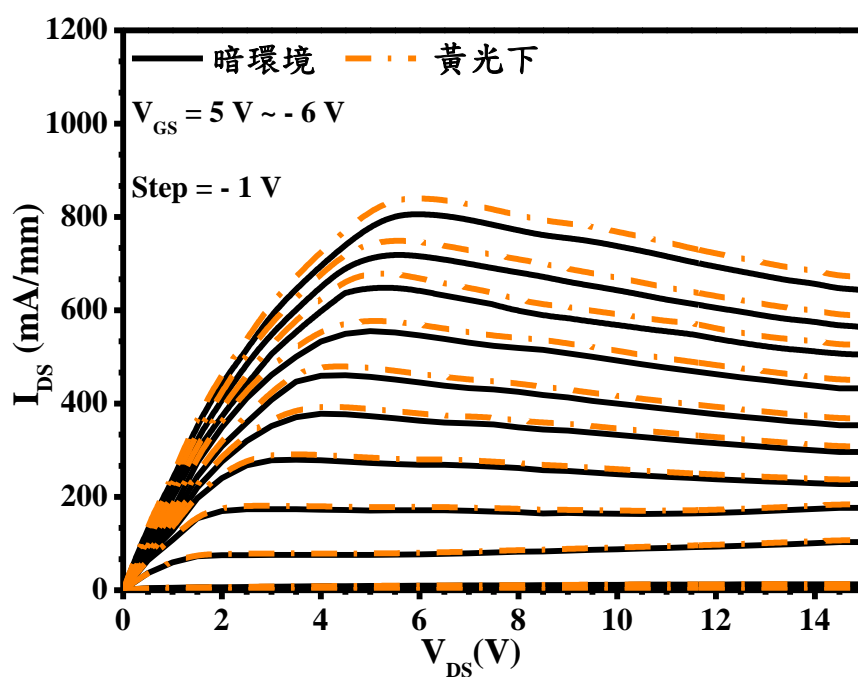


圖 4-43 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

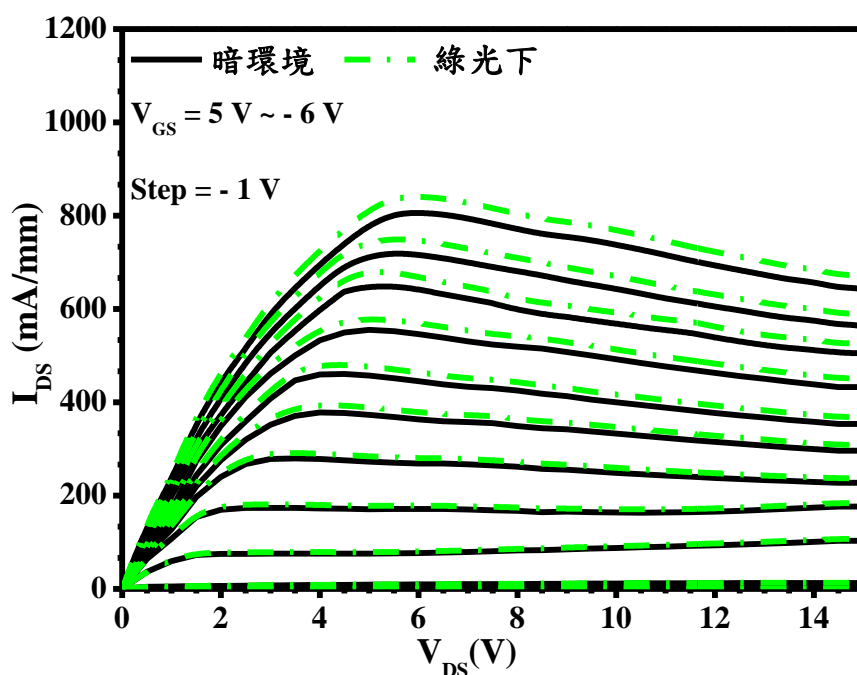


圖 4-44 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

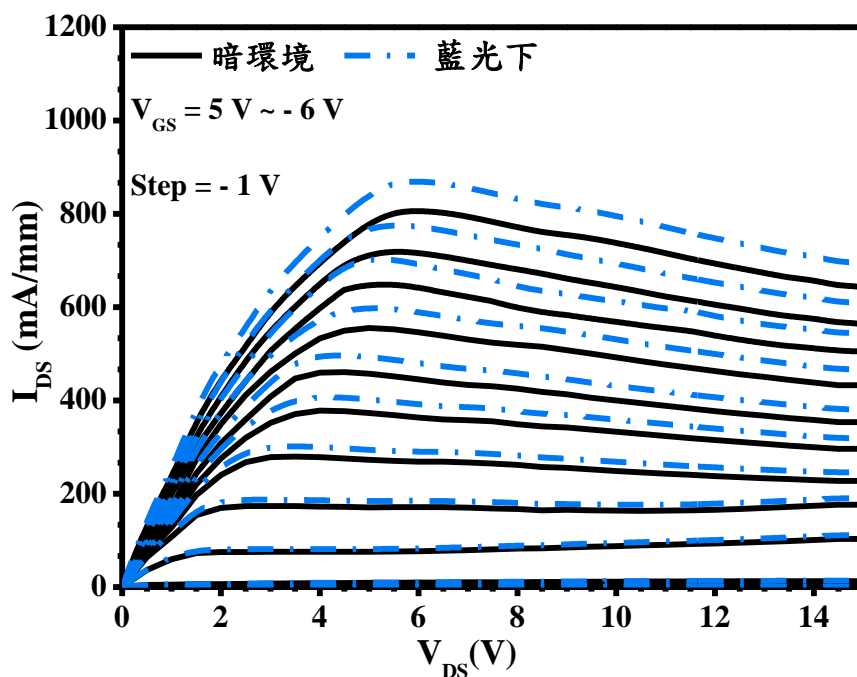


圖 4-45 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體之電流-電壓特性



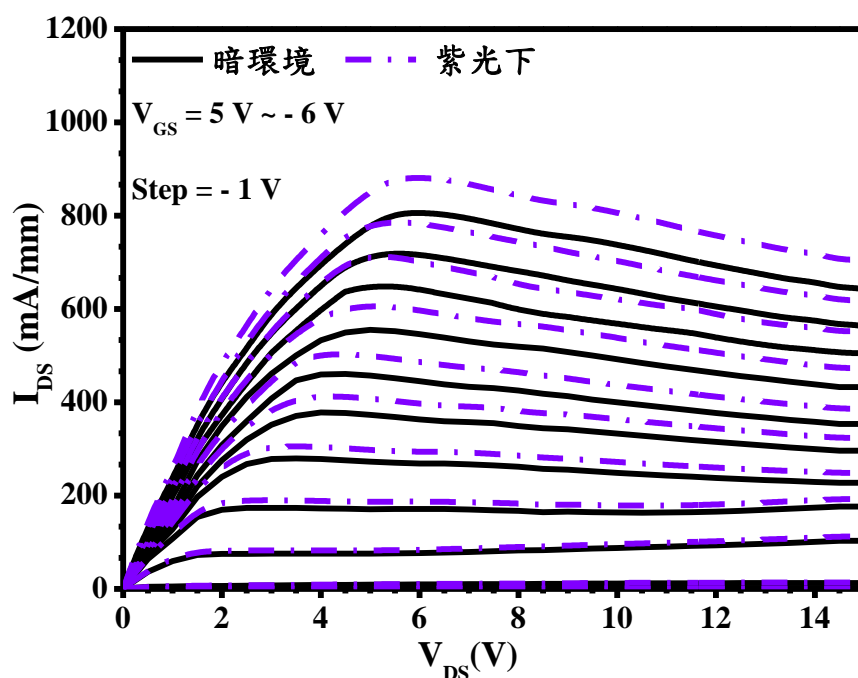


圖 4-46 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

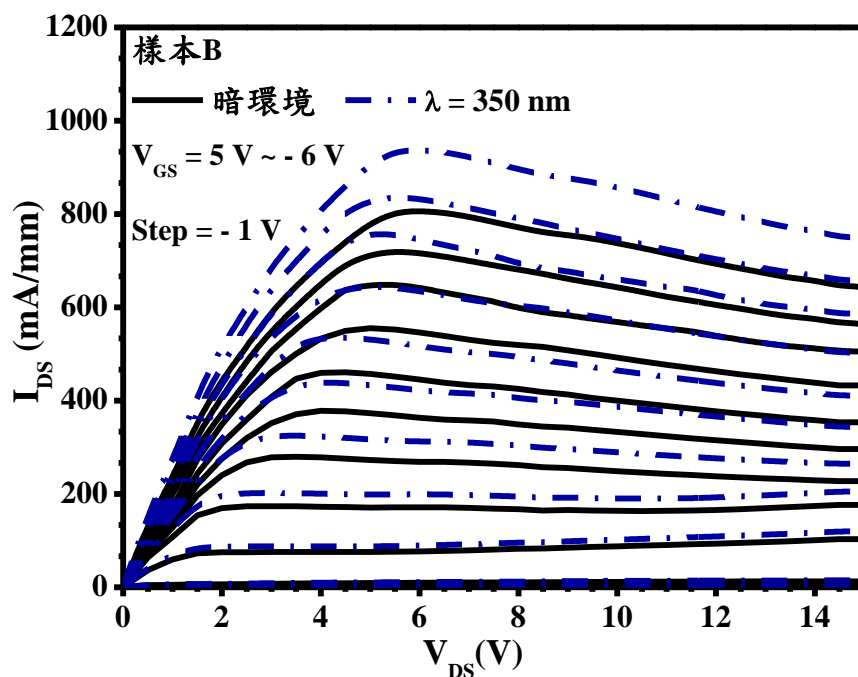


圖 4-47 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

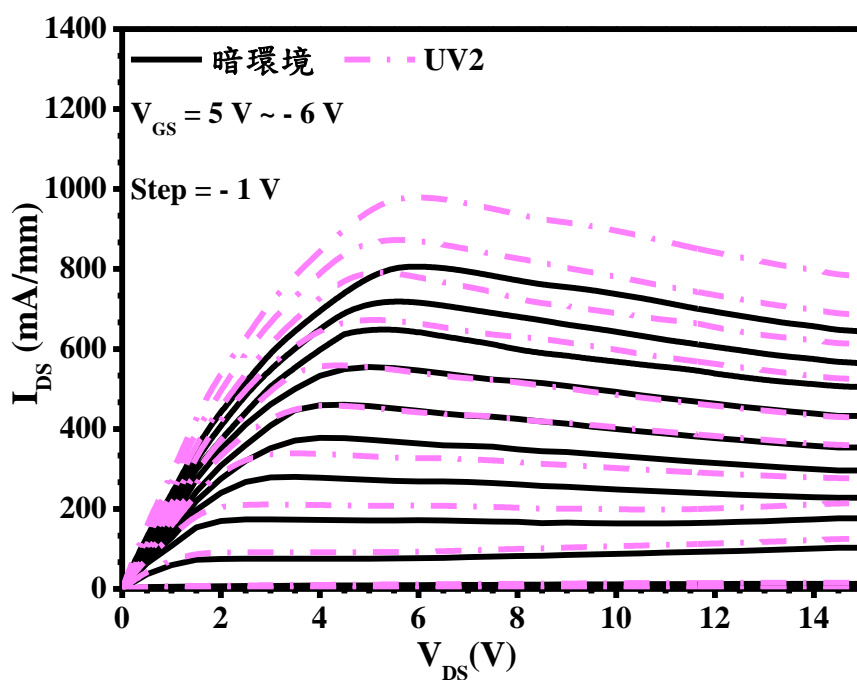


圖 4-48 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體之電流-電壓特性

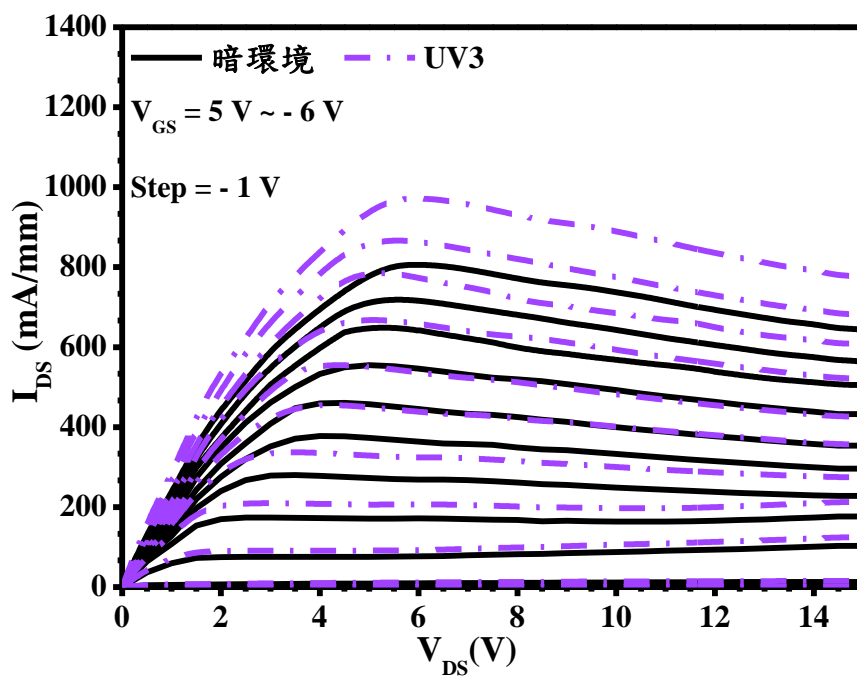


圖 4-49 照光與暗環境製程下氧化鋁金屬-氧化物-半導體  
異質結構場效電晶體之電流-電壓特性