



逢甲大學學生報告 ePaper

具閘極披覆層處理銻摻入稀釋型通道 砷化銻鎵/砷化鎵異質結構場效電晶體之研製

作者：蕭郁蘋、余曉惠

系級：電子四甲

學號：D9572604、D9572222

開課老師：李景松

課程名稱：化合物半導體元件

開課系所：電子系

開課學年：98 學年度 第一 學期



中文摘要

在本文中，成功地利用「分子束磊晶法」製作出砷化銻鎵銻的通道，應用在高電子移動率電晶體。在成長砷化銻鎵/砷化鎵量子井的過程中，我們摻入銻當成是一種類似活化劑的作用，其優點是可以降低三向成長、能夠有效地增加通道載子侷限能力以及改善成長砷化銻鎵/砷化鎵薄膜之間的介面品質。因此，砷化銻鎵銻通道可以提升載子的傳輸能力以及對於元件的效能有很大的幫助。

本文探討研製砷化銻鎵銻/砷化鎵元件中製作兩種不同材料的閘極披覆層，其一為氮化矽披覆層(SiN_x passivation)，另一為與硫化銨 $((\text{NH}_4)_2\text{S}_x)$ 溶液反應之硫化披覆層。在室溫下，閘極尺寸為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，無披覆層、氮化矽披覆層及硫化披覆層三種樣本的最大異質轉導值($g_{m,\text{max}}$)為 183 (205/221) mS/mm，電流驅動能力(I_{dss})為 174 (190/205) mA/mm，兩端點崩潰電壓(BV_{GD})為 7.2(8.8/13.1)V，電源功率輸出效率(PAE)為 13 (21.4/30.4) %。

由實驗結果可知，使用閘極披覆層有好的高頻應用以及低雜訊特性。此外，使用硫化披覆層之砷化銻鎵銻/砷化鎵高電子移動率電晶體元件可得到最小輸出轉導、最高增益、最好線性度以及最大崩潰電壓，進而得到最好的功率特性。因此，擁有硫化披覆層的砷化銻鎵銻/砷化鎵高電子移動率電晶體相當適合應用於高線性度及高功率的微波積體電路方面。

關鍵字：表面缺陷、砷化銻鎵銻、硫化披覆層、氮化矽披覆層、閘極披覆

目次

第一章	序論.....	1
第二章	假晶性高電子移動率電晶體的磊晶成長與工作理.....	3
	2-1 典型的假晶性高電子移動率電晶體.....	3
	2-2 假晶性高電子移動率電晶體磊晶層設計.....	3
	2-2-1 覆蓋層.....	4
	2-2-2 蕭特基層.....	4
	2-2-3 間隔層.....	4
	2-2-4 銻摻雜的假晶性砷化銦鎵通道層.....	5
	2-2-5 緩衝層.....	6
	2-3 二維電子雲.....	6
第三章	元件結構與製程步驟.....	9
	3-1 元件結構.....	9
	3-2 製程步驟.....	10
	3-2-1 樣本定位.....	12
	3-2-2 高台絕緣.....	12
	3-2-3 源極與汲極的金屬化.....	12
	3-2-4 閘極蕭特基接觸.....	13
	3-2-5 氮化矽覆蓋層的結構(樣本 B).....	14
	3-2-6 硫化批覆層的結構(樣本 C).....	14
第四章	實驗結果與討論.....	15
	4-1 霍爾量測.....	15
	4-2 300K 時 DC 特性.....	15
	4-2-1 電流-電壓特性.....	16
	4-2-2 外部轉導特性.....	18
	4-2-3 兩端點崩潰電壓特性.....	22
	4-2-4 輸出電導特性.....	23
	4-3 射頻特性.....	26
	4-4 功率特性.....	28
	4-5 失真與線性度.....	30
	4-6 雜訊特性.....	33
	4-7 低頻雜訊特性.....	35
	4-8 溫度變化特性.....	36
第五章	總論.....	42
	參考資料.....	43

第一章 序論

近代由於金屬有機化學氣相沉積(MOCVD)系統與分子束磊晶(MBE)材料成長系統的迅速發展，促使許多關於異質接面結構的研究邁進一大步。這是由於她們能精確地控制厚度、摻雜層的雜質能均勻分布等等。

高電子移動率電晶體能達到高功率、高頻率、低雜訊和低失真等特性，所以被廣泛地應用在單晶微波積體電路(MMIC) [1]-[5]。

砷化鎵/砷化銦鎵異質接面高電子移動率電晶體(GaAs/InGaAs HEMT)在高速微波元件與數位電路應用被廣泛研究 [6]-[7]。與以矽為基底的場效電晶體相較下，GaAs/InGaAs HEMT 擁有較高的速度以及較好的驅動能力。

然而 GaAs/InGaAs HEMT 卻有兩個缺點，其一為 ΔE_c 較小，另一為砷化銦鎵層的厚度需要控制在一定的範圍內，厚於此限度則晶格不匹配，即造成錯排等缺陷 [8]。

如我們所知，由 MBE 成長的 1.3 μm InGaAsNSb/GaAs 多量子井長波長雷射二極體以銻當成活化劑的作用來改善接面品質 [9]-[11]，在成長 GaAs/InGaAs 量子井的過程中摻入銻，使其降低三向成長與改善異質結構量子井的接面品質。換句話說，在光電元件中摻入銻不僅能改善臨界電流密度 [12]-[16]，還能有效地降低能隙 [17]。

我們使用銻摻入稀釋型通道的 HEMT 時，銻作為活化劑來改善通道接面品質 [18]，且不需要任何外加的結構設計即能得到窄能隙的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ [19]-[22]。

對使用於電子電路與光電電路中的化合物半導體元件而言，表面存在有不同種類的缺陷，而這將使元件性能大幅衰減。此外，以典型閘極掘入蝕刻而成的外質表面陷捕了部份電子，造成源極與閘極間的空乏層寬度增加 [23]-[24]。為了改善這惱人的問題，表面批覆層成為製造高性能電子與光電元件時重要的一環 [25]-[27]。當閘極製程完成後，使用 PECVD 來沉積氮化矽的批覆層；另一方面，使用硫化銨製作的硫化批覆層可以降低表面狀態密度，以及形成一個井然有序的

批覆表面 [28]，這是由於她有鈍化表面懸鍵的能力 [29]。

適當地形成閘極空乏層能使其擁有控制元件參數的優點。使用批覆層是個有效的方法來大大地降低 GaAs 表面複合機制 [30]。

我們將在第二章介紹 InGaAsSb/GaAs PHEMT 的工作原理及結構層的設計。第三章詳細地說明製作元件的過程。第四章則討論各個樣本的元件特性。最後將在第五章作個總結。



第二章 PHEMTs 磊晶成長與工作原理

2-1 典型的 PHEMTs

近年來 HEMTs 因為有以下幾項之優點所以備受矚目：

1. 高電子移動率。
2. 低消耗。
3. 高單位電流增益頻率(f_T)。
4. 高崩潰電壓與高功率特性。

在等級一到四的比較之下，HEMTs 明顯地優於其他積體電路，例如金屬-半導體場效應電晶體(MESFET)、雙極性接面電晶體(BJT)。其他特性列於表 2-1。

	GaAs			Silicon	
	HEMT	MESFET	HBT	CMOS	BJT
Speed	1	3	2	4	4
Lithography requirements	2	3	1	4	1
Processing complexity	2	1	4	3	4
Material problems	4	3	4	1	2
Power-delay product	1	2	4	1	4

表 2-1 元件的排序關係。

2-2 HEMT 磊晶層設計

使電子與施體分離是 HEMT 成功運作的關鍵。二維電子雲受限於三角井中使電子具有量子化能量，因為位勢障的寬度小於德布羅依波長。典型的 InGaAsSb/GaAs HEMT 的結構是由 n^+ GaAs 覆蓋層，GaAs 蕭特基層，InGaAs 通道層以及 GaAs 緩衝層所構成。

我們的結構由以下所組成：(a) n^+ GaAs 覆蓋層 (b) 未摻雜 GaAs 蕭特基層 (c) 載子提供層 (d) 未摻雜 GaAs 間隔層 (e) 未摻雜 InGaAsSb 通道層 (f)

未摻雜 GaAs 緩衝層。

2-2-1 覆蓋層

典型的 GaAs 覆蓋層摻雜大約 $10^{18}/\text{cm}^3$ 的砷，而這將提供 HEMT 一個很好的歐姆接觸。覆蓋層中很高的摻雜濃度與厚度的乘積可以下降元件中源極的電阻值，並且保護蕭特基層免於表面氧化與空乏。若覆蓋層沒有完全的凹槽蝕刻，則會導致並聯的效應。

2-2-2 蕭特基層

蕭特基層的能隙通常比通道寬。由於 InGaAs/GaAs 異質接面有很大的傳導帶不連續，所以電子從 GaAs 擴散到 InGaAs 形成二維電子雲，導致較高的面電荷密度且改善載子的侷限能力。一個較薄的 GaAs 蕭特基層使閘極金屬與通道間的距離較小，能有效地提升轉導值但也犧牲了崩潰電壓。

2-2-3 間隔層

間隔層間隔了二維電子雲與解離施體，下降了由施體原子所造成的庫倫散射以及增加電子的移動率。間隔層的厚度對電晶體的性能有很重要的影響，較薄的間隔層能增加 InGaAs 通道內的面電荷密度，而較厚的間隔層則會增加電子移動率，但二維電子雲的形成效率則會下降。典型的間隔層厚度為 20Å~50Å。

2-2-4 銻摻雜的假晶性砷化銦鎵通道層

我們以 InGaAsSb 做為二維電子雲通道的材料來改善 HEMT 的性能。從圖 2-1 中可以看出能帶與晶格常數的關係。InGaAsSb 通道層與 GaAs 之間存有晶格不匹配的問題，如圖 2-2 所示，為了使兩者的晶格常數能匹配，InGaAsSb 通道層必須被壓縮。InGaAs 與 GaAs 之間的晶格不匹配會隨著臨界厚度而改變，如圖 2-3 所示。在 HEMT 中使用 InGaAsSb 層的優點包括：增加電子傳輸能力、改善載子在量子井通道中的侷限能力，以及提升電子移動率 [34]-[35]。

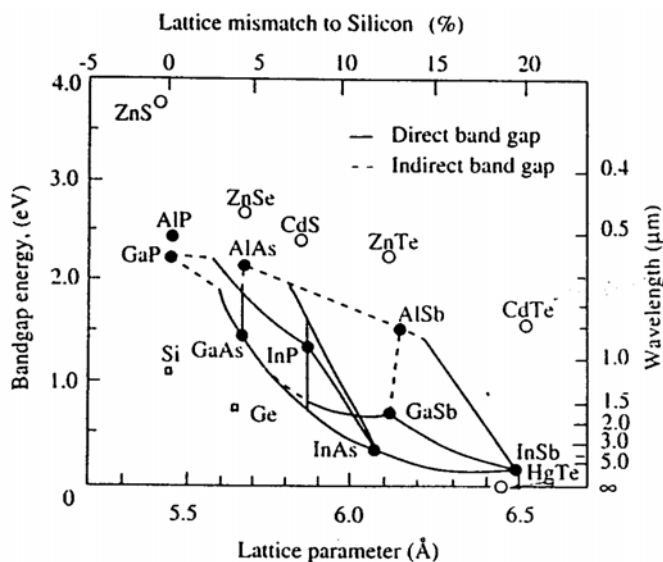


圖 2-1 III-V 族化合物的能帶與晶格常數關係圖

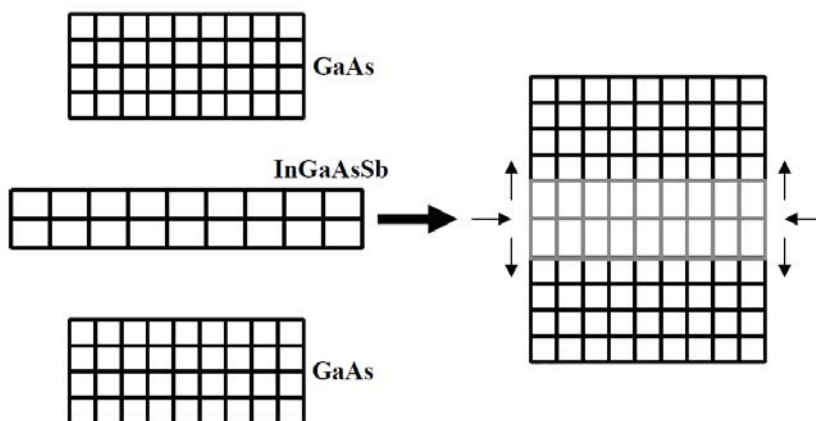


圖 2-2 PHEMT 結構的晶格排列

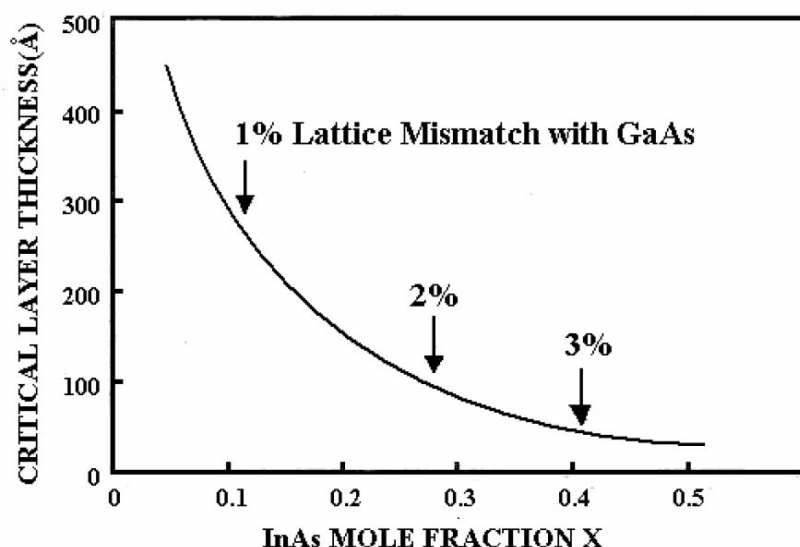


圖 2-3 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的臨界厚度與 InAs 莫耳數的關係圖

2-2-5 緩衝層

為了提高絕緣通道特性與消除在基板上造成的電性影響，許多人致力於研究緩衝層。雖然典型的 GaAs 緩衝層擁有高阻值，但使用品質較差的基底時，絕緣特性將不如預期。汲極-源極的電場會使電子注入緩衝層。高阻值與寬能帶的 AlGaAs 是個理想的緩衝層材料，但其元件性能嚴重地受成長係數影響，這主要是因為較難得到品質良好的接面，而使通道中的電子移動率下降。改善這個問題的方法是插入 GaAs 薄層在粗糙的 AlGaAs 層中以增加雜質數目，並且提供下一層 AlGaAs 長晶層一個平滑的表面，這樣能阻絕來自基板因缺陷和雜質產生的電性影響，並且有精確的夾止特性和微波功率特性。

2-3 二維電子雲

在異質介面中，電子會從較高的摻雜層轉移到較低的未摻雜通道層。因為電子被表面位勢限制在 X-Y 平面上移動，而被量子化成為不連續的次能帶，如此被限制在二維平面上的移動，稱之為二維電子雲(2DEG)。而 2DEG 被侷限在三角井中以及電子能帶的量子化，是由於位勢井小於德布羅依的波長。

在圖 2-4(a)中說明了假晶性結構中的自洽電位和 2DEG。薛丁格方程式與帕松方程式可推導出 2DEG 的濃度(n_s)。

$$n_s = \sum_i \frac{m^*KT}{\pi\hbar} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_f - E_i}{KT} \right) \right] |\Phi_i|^2 \quad (2-1)$$

其中，K = 波茲曼常數

T = 絕對溫度

m^* = 電子有效質量

$2\pi\hbar$ = 普朗克常數

而薛丁格方程式可推導出次能帶(E_i)為

$$E_i = \left(\frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left(\frac{3}{2} \pi q E_s \right)^{2/3} \left(i + \frac{3}{4} \right)^{2/3} \quad (2-2)$$

在圖 2-4(b)中，我們可以在 InGaAs 通道中找到最低的三個次能帶與 ϵ_5 ，以及在 GaAs 中找到 ϵ_4 和 ϵ_6 。能量被分散於 InGaAs 量子井的次能帶中，而超過百分之九十九的電子在最低的三個次能帶中，造成二維電子雲濃度區域化分布。

載子脫離了 GaAs 層的解離雜質原子至 InGaAs 量子井中，離子雜質散射的影響會下降，使電子移動率上升，而使元件擁有較高的操作速度。

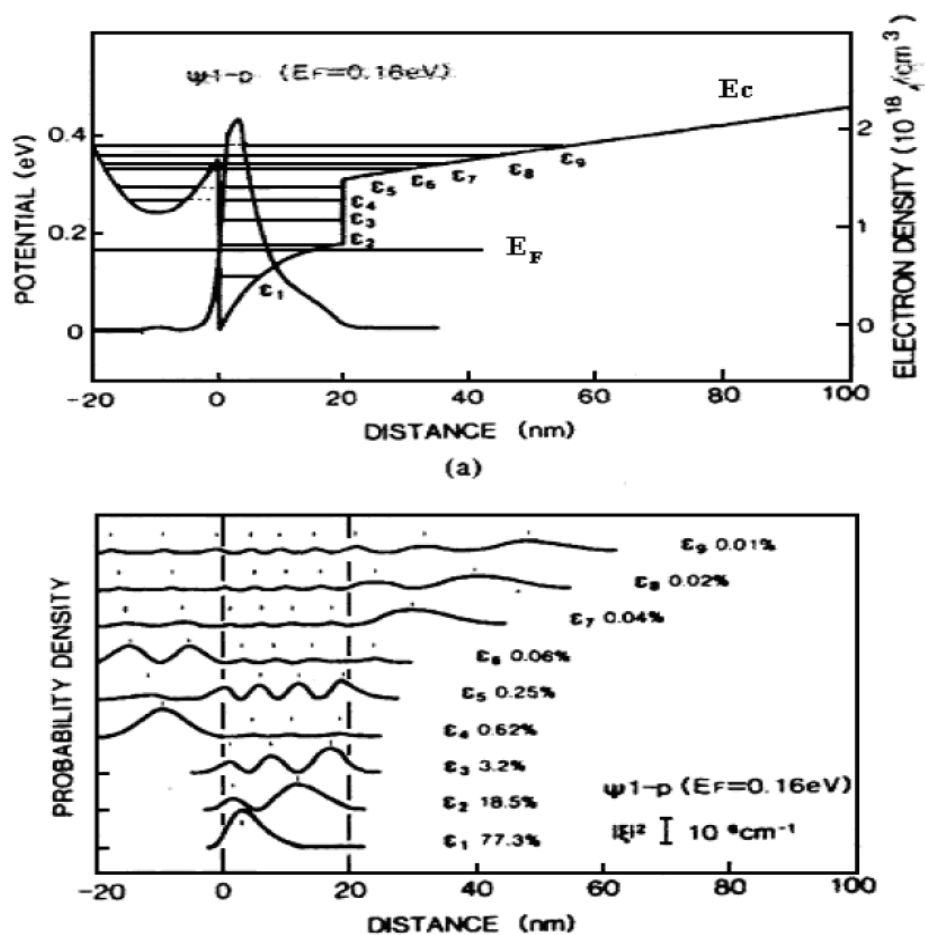


圖 2-4 (a) 傳導帶(E_c)與 2DEG 濃度的剖面圖 (ϵ_i 為第 i 個次能帶)

(b) 電子在次能帶的機率密度

第三章 元件結構與製程步驟

3-1 元件結構

我們以固態源分子束磊晶系統來製作出 GaAs/In_{0.2}Ga_{0.8}AsSb PHEMT 的磊晶，圖 3-1 為樣本 A，圖 3-2 是批覆層為氮化矽的樣本 B，而圖 3-3 是硫化批覆層的樣本 C。

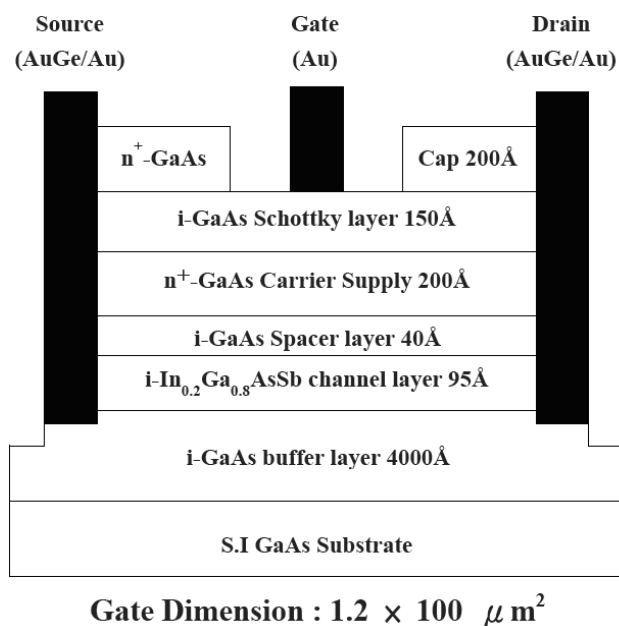


圖 3-1 樣本 A 的結構圖

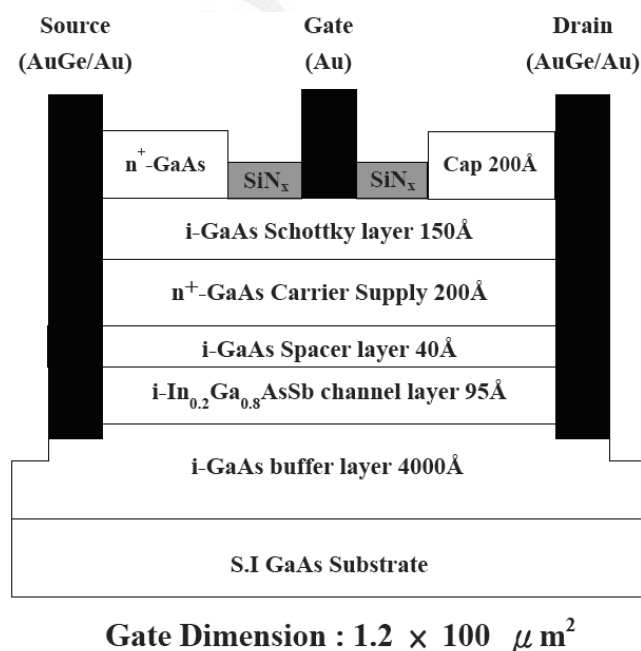
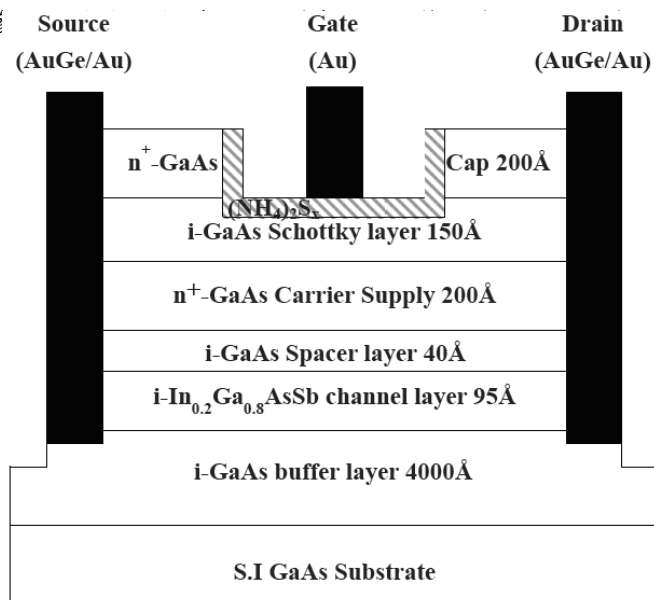


圖 3-2 樣本 B 的結構圖



Gate Dimension : $1.2 \times 100 \mu\text{m}^2$

圖 3-3 樣本 C 的結構圖

磊晶結構中含有：0.4 μm 的 GaAs 緩衝層在 (100) 方向半絕緣 GaAs 基底上、9.5-nm 的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}$ 通道、4-nm 的未摻雜 GaAs 隔絕層、20-nm N 型的 GaAs 載子提供層 ($n=5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)、15-nm 未摻雜的 GaAs 蕭特基層，最後為 20-nm 矽摻雜 ($7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) GaAs 覆蓋層。

移開覆蓋層之後覆蓋上批覆層，在此研究中，我們比較了沒有批覆層的樣本 A、氮化矽批覆層的樣本 B，以及硫化批覆層的樣本 C。

3-2 製程步驟

為了建立製程圖案樣本，所以使用標準的微影與掀離 (lift-off) 技術。而為了保持晶圓的純度，則必須在每個製程步驟之前用丙酮加入超音波震動器清洗，再利用去離子水清洗晶圓片，並且使用高純度的氮氣吹乾以維持晶圓片的清潔。而如圖 3-4 所示的元件製程步驟，有以下四個階段：

1. 樣本定位 (Sample Orienting)
2. 高台絕緣 (Mesa Isolation)
3. 源極與汲極金屬化 (Source and Drain Metallization)
4. 閘極蕭特基接觸 (Gate Schottky Contact Formation)

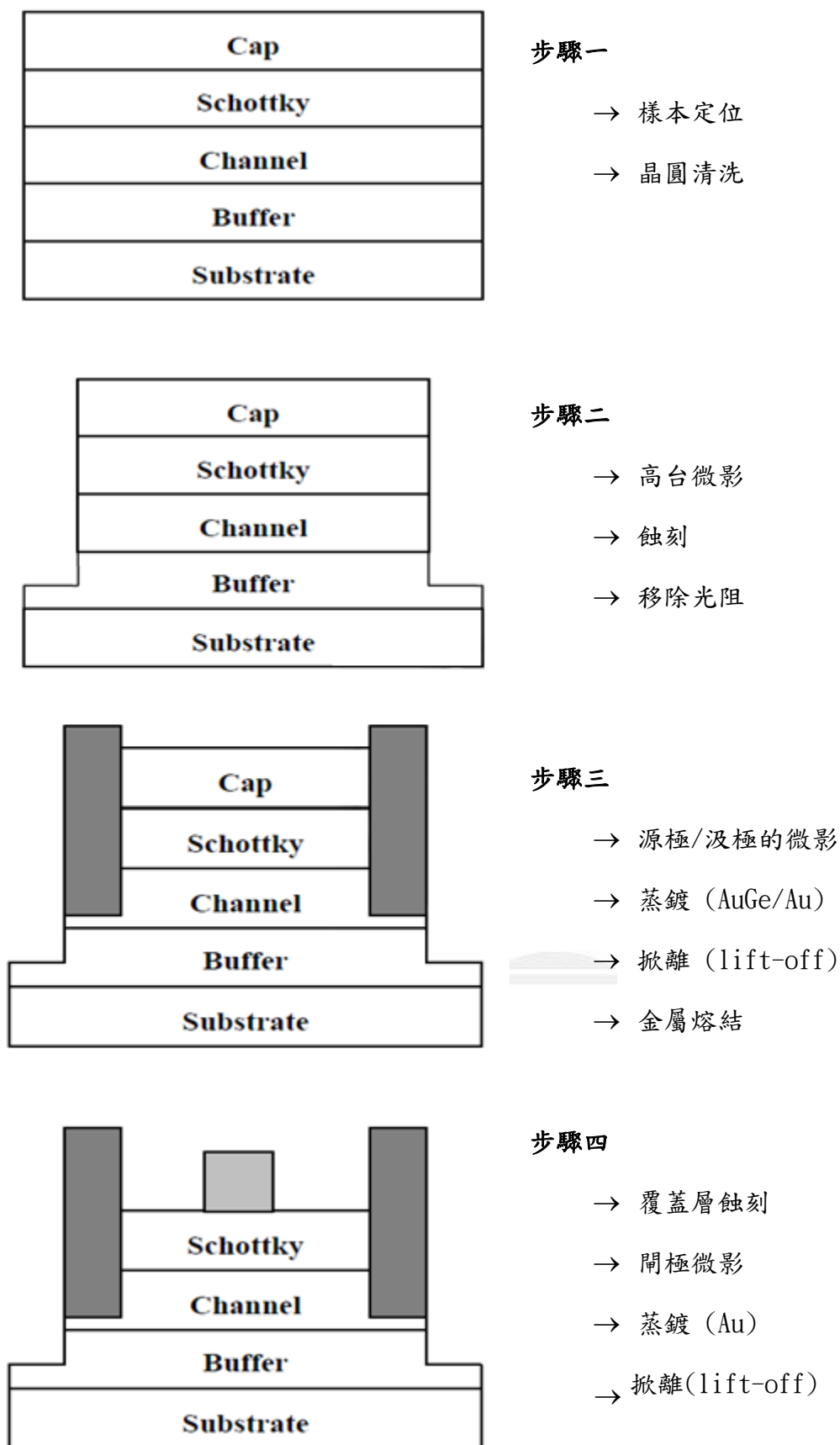


圖 3-4 元件製程步驟圖解

3-2-1 樣本定位

閘極方向必須平行橢圓形主軸來防止移除製程時產生開路現象。這也是為什麼選擇閘極為 (100) 方向，並且在高台蝕刻選用 (011) 方向。

3-2-2 高台絕緣

高台絕緣的目的在於減少漏電流產生。若是能減少漏電流量，元件便可以得到較好的夾止特性。在晶圓上覆蓋均勻 AZ1400 光阻，把高台圖案微影至樣本上，再利用化學濕蝕刻。在 GaAs 與 InGaAs 各層中蝕刻溶液 $H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O = 1 : 1 : 30$ 。必須確保元件高台蝕刻至緩衝層或基底層，為了有準確的蝕刻速率，利用 α 波探測蝕刻時間與深度間的關係。而高台蝕刻的主要步驟如下：

1. 烘烤
2. 塗底
3. 上光阻，旋轉使覆蓋光阻均勻
4. 軟烤（曝光前烘烤）
5. 曝光
6. 顯影
7. 硬烤
8. 蝕刻
9. 移除光阻

3-2-3 源極和汲極金屬化

利用丙酮加入超音波震盪器中清洗晶圓並用氨水溶液（ $NH_4OH : H_2O = 1 :$
1) 去移除氧化層表面。晶圓被 AZ1400 光阻覆蓋均勻在九十度下三十分鐘，之後則是利用標準的微影製程定義出汲極和源極的圖形。蒸鍍的金屬與覆蓋板必須用丙酮和鹽酸在超音速震盪器中清洗二十分鐘後，用去離子水洗滌並用高純度氮

氣吹乾。在源極和汲極的連接金屬是利用合金 Au/Ge/Ni 在事先蒸鍍的 Au 上，為了就是減少連接的電阻值。掀離步驟是為了讓圖案和樣本間在快速熱退火中有好的熔結，使其有好的歐姆接觸特性。而主要源極和汲極金屬化步驟如下：

1. 烘烤
2. 塗底
3. 上光阻，旋轉使覆蓋光阻均勻
4. 軟烤（曝光前烘烤）
5. 曝光
6. 顯影
7. 蒸鍍
8. 掀離
9. 合金連接
10. 退火

3-2-4 閘極蕭特基接觸

利用丙酮加入超音波震盪器中清洗晶圓並用氨水溶液（ $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1$ ）去移除氧化層表面。在閘極金屬蒸鍍前，必須利用蝕刻技術先移除覆蓋層，我們用濕式化學蝕刻（蝕刻液為 $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:30$ ）來製作閘極窗口。若是沒有完全蝕刻乾淨，則會有並聯效應產生。因為我們能夠應用源極與汲極為閘極光罩，所以並不需要運用到光學微影製程。

之後再利用 Au 蒸鍍在 GaAs 層上，形成蕭特基接觸。在掀離步驟後，HEMT 元件算是完成，而閘極蕭特基接觸主要步驟與源極和汲極金屬化步驟大致相同，只是少了合金連接和退火的步驟：

1. 烘烤
2. 塗底

3. 上光阻，旋轉使覆蓋光阻均勻
4. 軟烤（曝光前烘烤）
5. 曝光
6. 顯影
7. 蒸鍍
8. 掀離

3-2-5 氮化矽披覆層的結構（樣本 B）

在移除覆蓋層後，為了得到高品質的氮化矽，所以我們在三百度時使用電漿化學氣相沉積法(PECVD)來沉積 10nm 的氮化矽表面披覆層。我們使用氫氟酸(HF)蝕刻掉氮化矽，而得到微影在樣本上的圖案，然後鍍上鎳跟金來形成蕭特基接觸。掀離過程後，披覆層即將完成。

3-2-6 硫化披覆層的結構（樣本 C）

在三十度時，將樣本 A 迅速浸入硫質量分率為百分之五的硫化銨溶液中，浸泡十分鐘後再取出。使用丙酮和去離子水洗滌再以高純度氮氣吹乾。經過這些程序，GaAs 表面與歐姆接觸的金屬表面都非常地乾淨，沒有硫化物的殘留。

第四章 實驗結果與討論

在這個章節中，我們將討論硫化與氮化矽披覆層(鍍金) InGaAsSb/GaAs PHENT 的元件特性。為了避免混淆，我們為這些樣本命名為：樣本 A (InGaAsSb/GaAs HENT)、樣本 B (氮化矽披覆層)以及樣本 C (硫化披覆層)。

4-1 霍爾量測

為了研究材料的特性，霍爾量測被廣泛地採用。若遵循以下的條件，就能得到精確的量測數據：

- (1) 接觸點在樣本的邊緣。
- (2) 接觸點盡可能地小。
- (3) 樣本的厚度要均勻。
- (4) 四個接觸點互相導通，不能有絕緣點。

最後，我們在每個磊晶層中截取出長條狀的樣本作霍爾量測，可以得到霍爾移動率以及載子濃度。根據霍爾量測的數據，我們可以檢驗成長結構的參數。在 300K，磁場 5000G 之下，樣本的霍爾量測可以被完成，並能清楚得看出二維電子雲濃度和電子移動率的特性。

在室溫下(300K)，霍爾量測的結果指出：平面載子的濃度為 $3.13 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 、電子移動率為 $2951 \text{cm}^2/\text{V-s}$ 。

4-2 300K 時的直流特性

每個樣本的閘極面積為 $1.2 \times 100 \mu\text{m}^2$ ，源極到汲極的距離為 $7 \mu\text{m}$ ，且皆以 KEITHLEY4200 量測。

4-2-1 電流電壓特性

圖 4-1、4-2 以及 4-3 分別表示在室溫下樣本 A、樣本 B 以及樣本 C 典型共源極的汲極電流密度(I_{DS})，和汲極-源極電壓(V_{DS})的關係。我們觀察閘極-源極電壓(V_{GS})為 0.5V 到 -1.5V，且每下降 0.5V 便作一次量測。圖 4-4 中則比較了三個樣本的數據，且我們可以很明顯地看出樣本 B 和樣本 C 有較好的夾止特性。樣本 C 有最佳的特性，因為硫化批覆層降低了蕭特基層的表面陷捕，如此調變了空乏區深度也增加了有效通道寬度，所以元件的有效載子密度便被提升了。

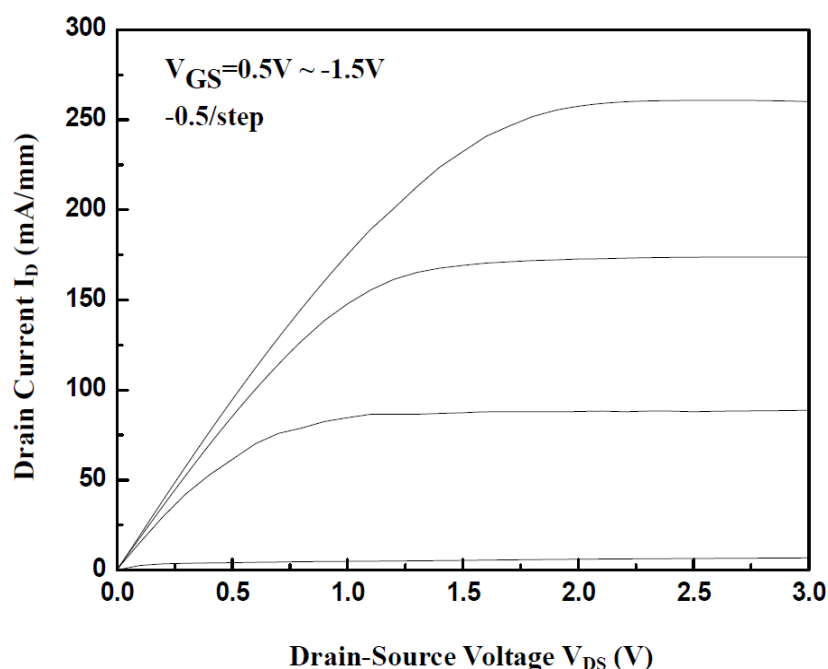


圖 4-1 300K 時，樣本 A 的電流電壓特性曲線圖

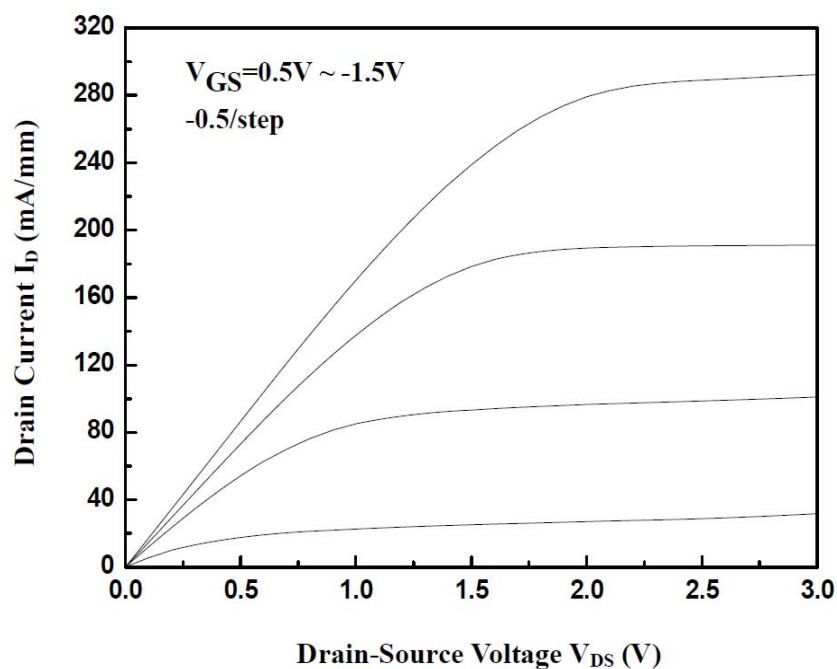


圖 4-2 300K 時，樣本 B 的電流電壓特性曲線圖

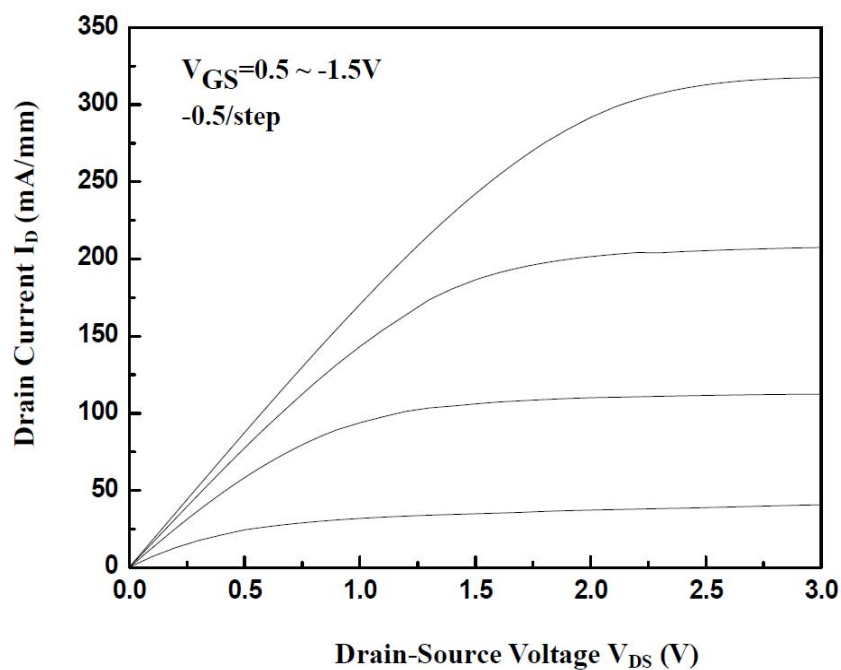


圖 4-3 300K 時，樣本 C 的電流電壓特性曲線圖

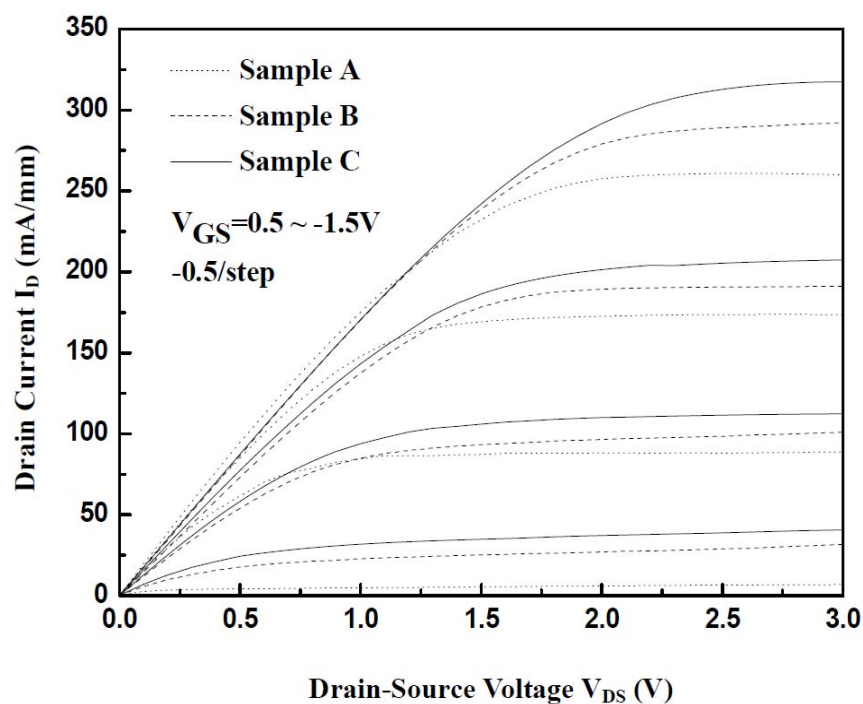


圖 4-4 300K 時，三個樣本的電流電壓特性比較圖

4-2-2 外部轉導特性

圖 4-5、4-6 以及 4-7 中分別顯示，樣本 A、樣本 B 以及樣本 C 在 $V_{DS}=3V$ 時，外部傳導(g_m)以及飽合汲極電流(I_{DS})兩者對 V_{GS} 的關係，而圖 4-8 則將三圖綜合起來做比較。

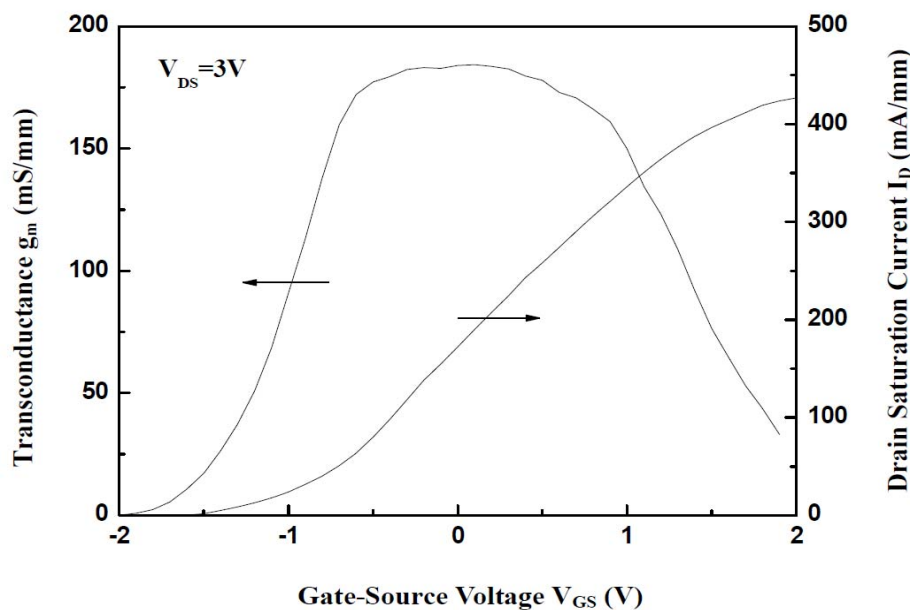


圖 4-5 300K, $V_{DS}=3V$ 時, 樣本 A 的外部傳導以及飽合汲極電流。

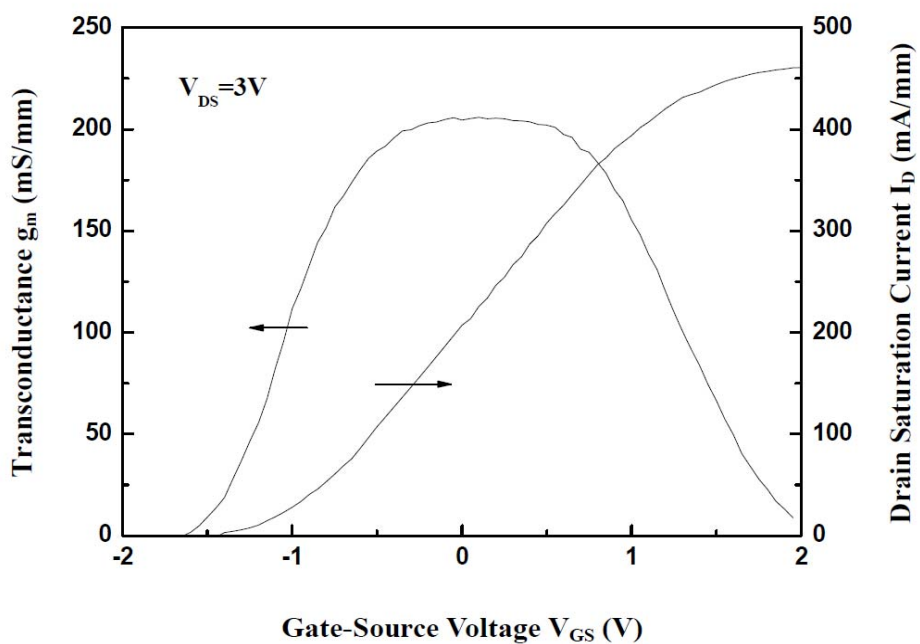


圖 4-6 300K, $V_{DS}=3V$ 時, 樣本 B 的外部傳導以及飽合汲極電流。

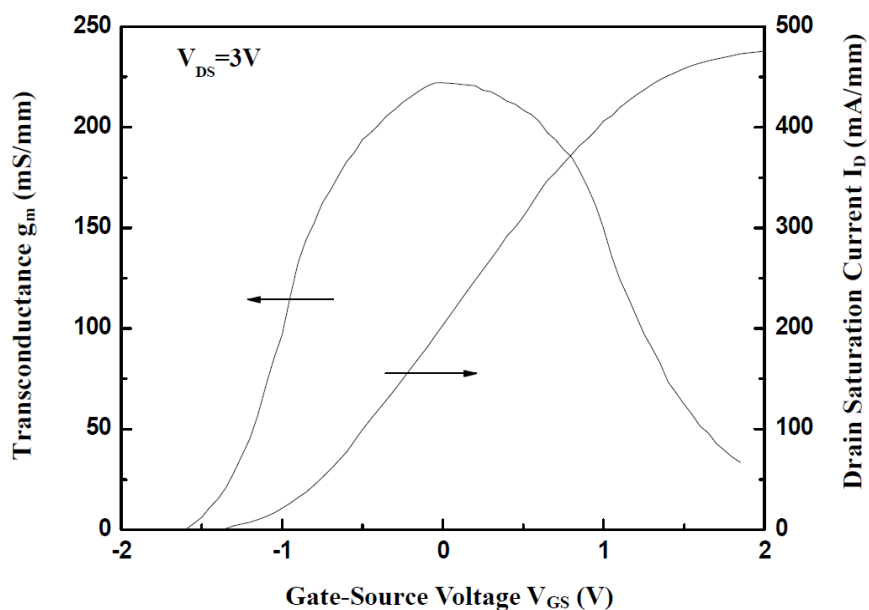


圖 4-7 300K, $V_{DS}=3V$ 時, 樣本 C 的外部傳導以及飽合汲極電流。

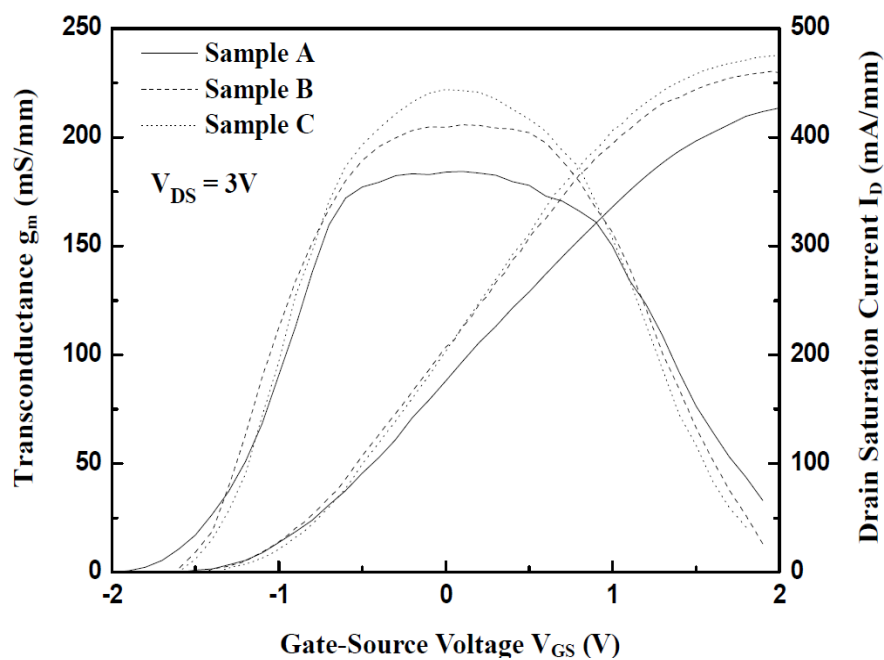


圖 4-8 300K, $V_{DS}=3V$ 時, 三個樣本的外部傳導以及飽合汲極電流比較圖。

	Sample A	Sample B	Sample C
I_{dss} (mA/mm)	174	190	205
$I_{d,max}$ (mA/mm)	427	459.4	475.6
$g_{m,max}$ (mS/mm)	183	205	221
GVS (V)	1.482	1.28	1.105
V_{th} (V)	-1.55	-1.42	-1.36

表 4-1 三個樣本的 g_m , I_{DS} , V_{th} 以及 GVS 。

表 4-1 中顯示飽合汲極-源極電流(I_{dss})和最大飽和汲極電流($I_{d,max}$)。我們可以很明顯地看出樣本 B 和樣本 C 的 g_m 值大於樣本 A 。因為表面狀態的下降，樣本 B 和樣本 C 有較高的電流密度。

此外，我們以最大外值轉導下降百分之十的值定義閘極電壓擺動(GVS)和線性 I_{DS} 操作區。圖 4-9 顯示了外質轉導與汲極電流密度的關係。顯而易見地，當 $V_{DS}=3V$ 時，沒有 g_m 峰值的樣本 B 和樣本 C 比樣本 A 還要平坦，所以 GVS 以及線性 I_{DS} 操作區域較樣本 A 佳。三個樣本所對應的線性 I_{DS} 工作區分別為 237.3、253.5、240.2 mA/mm 。

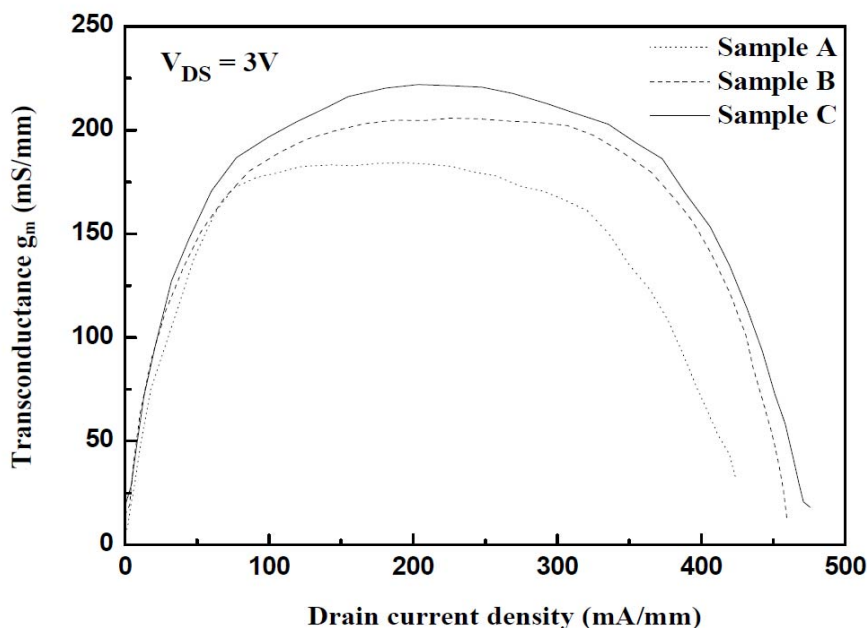


圖 4-9 300K 時，外部轉導與汲極電流密度的關係圖

臨界電壓的公式如下：

$$V_{th} = \frac{\phi_B}{q} - \frac{\Delta E_C}{q} - \frac{n_{2DEG}(d + \Delta d)}{\epsilon} \quad (4-1)$$

其中 Φ_B 是閘極蕭基特障礙高度， ΔE_C 是蕭特基層與 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ 通道間的傳導帶不連續，而 $(d+\Delta d)$ 是閘極與 2DEG 濃度之間的有效距離。表 4-1 中列出了各個樣本的臨界電壓，很明顯地，樣本 A 的臨界電壓比樣本 B 和樣本 C 小。樣本 B 有較大的空乏區，氮化矽披覆層抑制了位於蕭特基層與通道層介面處的二維電子雲濃度。

4-2-3 兩端點崩潰電壓特性

圖 4-10 中可看到，在室溫下三個樣本的两端閘極-汲極崩潰電壓(BV_{GD}) 和順偏導通電壓(V_{on}) 的關係。我們定義兩端崩潰電壓為

$$\frac{I_G}{w} = 1 \text{ mA/mm} \text{ 時的 } V_{GD} \text{。}$$

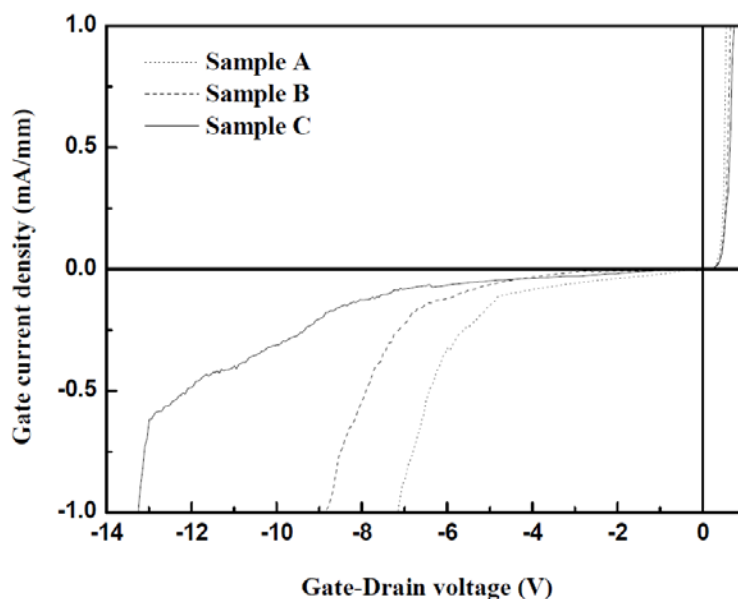


圖 4-10 300K 時，三個樣本的崩潰電壓

表 4-2 中，樣本 B 和樣本 C 的閘極-汲極崩潰電壓優於樣本 A，是因為擁有較高的蕭特基障礙高度。由於崩潰電壓與蕭特基障礙高度和表面漏電流有關，所以具有硫化銨批覆層的樣本可以明顯地改善崩潰特性。

	Sample A	Sample B	Sample C
$BV_{GD}(V)$	7.2	8.8	13.1

表 4-2 三個樣本的兩端特性

4-2-4 輸出電導特性

圖 4-11、4-12 以及 4-13 表示三個樣本的外質轉導、輸出電導以及電壓增益與汲極電壓的關係。本質電壓增益的公式被定義如下：

$$A_v = g_m \cdot r_o = \frac{g_m}{g_d} \quad (4-2)$$

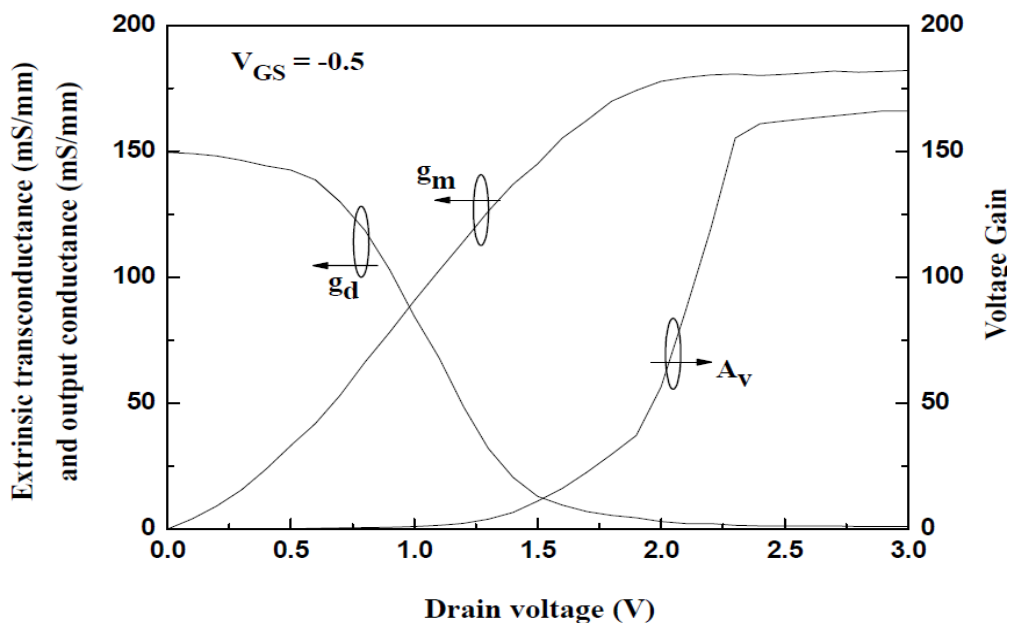


圖 4-11 樣本 A 的 g_m 、 g_d 以及 A_v 與汲極電壓的關係。

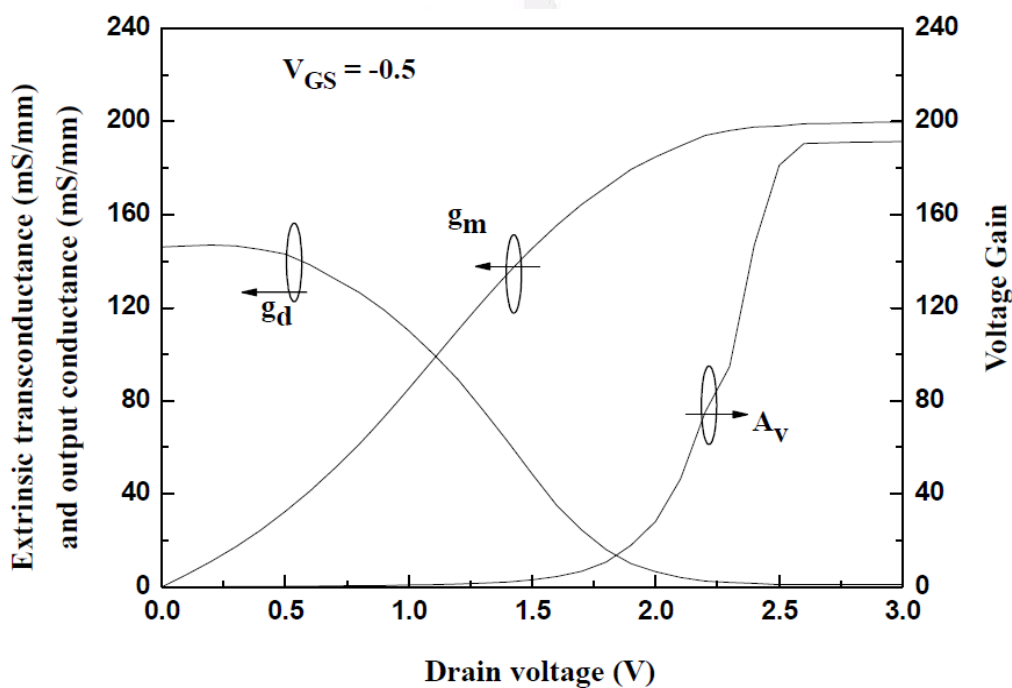


圖 4-12 樣本 B 的 g_m 、 g_d 以及 A_v 與汲極電壓的關係。

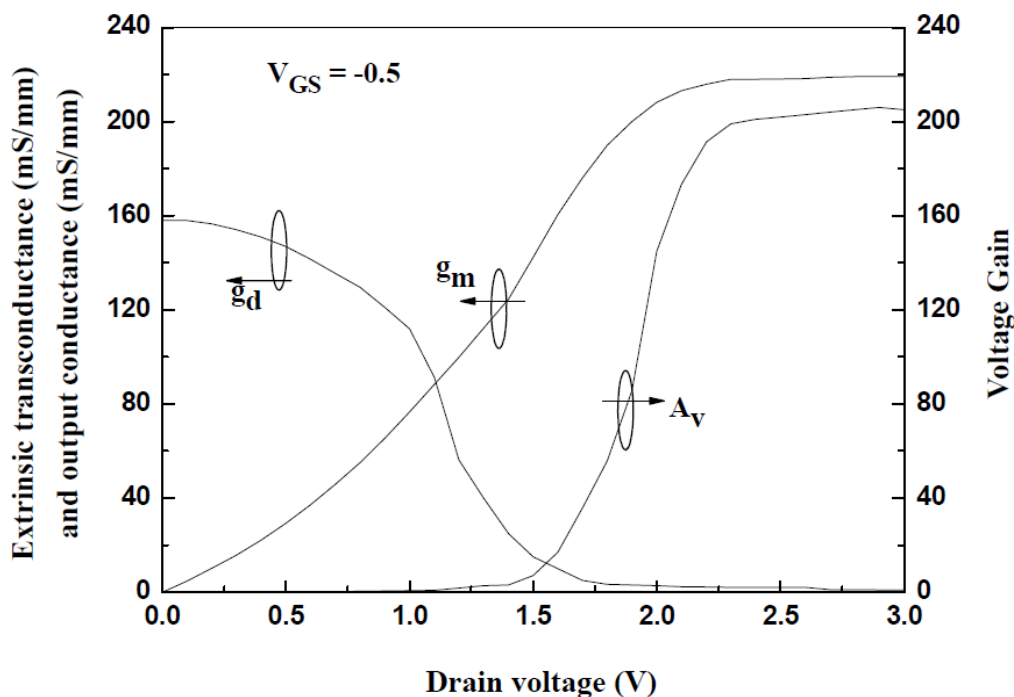


圖 4-13 樣本 C 的 g_m 、 g_d 以及 A_v 與汲極電壓的關係。

在表 4-3 中為三個樣本在 $V_{DS}=3V$ 時量測的結果。因為表面陷阱減少，樣本 B 和樣本 C 的外部電導小於樣本 A，而樣本 C 擁有高的輸出阻抗，故能達到低的輸出電導以及高的電壓增益。在飽和區中，較低的輸出電導導致較高的輸出阻抗，此為一優點，能使電壓增益上升以及降低了負載效應。

	Sample A	Sample B	Sample C
g_m (mS/mm)	182	199.76	219.06
g_d (mS/mm)	1.15	1.1	1.03
A_v	158.26	181.6	212.68

表 4-3 $V_{DS}=3V$ 時，三個樣本的 g_m 、 g_d 以及 A_v 。

4-3 射頻特性

在頻率範圍 0.2 到 50GHz 內，我們使用 HP8510B 網路來量測微波特性。每個樣本的閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ ，源極到汲極的距離為 $7 \mu\text{m}$ 。我們將探棒直接下在晶片上量測，可以避免寄生鍵結的影響。藉由 0dB 時的短路電流增益 H_{21} ，利用內插法可得到截止頻率 f_T ， f_{max} 也可對最大有效增益(MAG)作內插法而得，因此 f_T 和 f_{max} 可用以下方程式表示：

$$f_T \approx \frac{g_m}{2\pi(C_{GS} + C_{GD})} \quad (4-3)$$

$$f_{\text{max}} \approx \frac{f_T}{2\pi[G_0(R_G + R_S) + 2\pi C_{GD}]^{1/2}} \quad (4-4)$$

圖 4-14、4-15 以及 4-16 中分別表示三種樣本的電流增益、截止頻率(f_T) 以及最大震盪頻率(f_{max})。

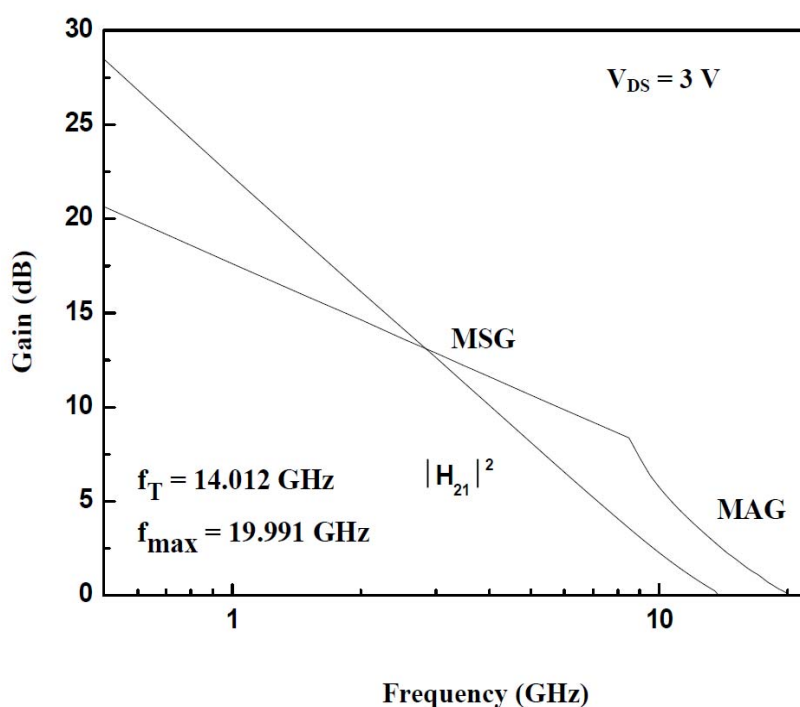


圖 4-14 $V_{DS}=3V$ ，閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，樣本 A 的 RF 特性。

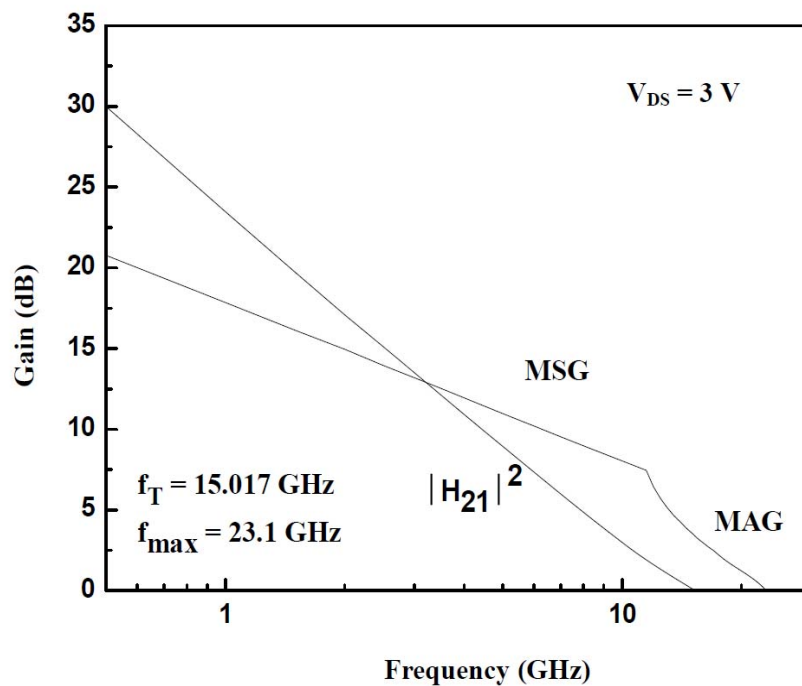


圖 4-15 $V_{DS}=3V$ ，閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu m^2$ 時，樣本 B 的 RF 特性。

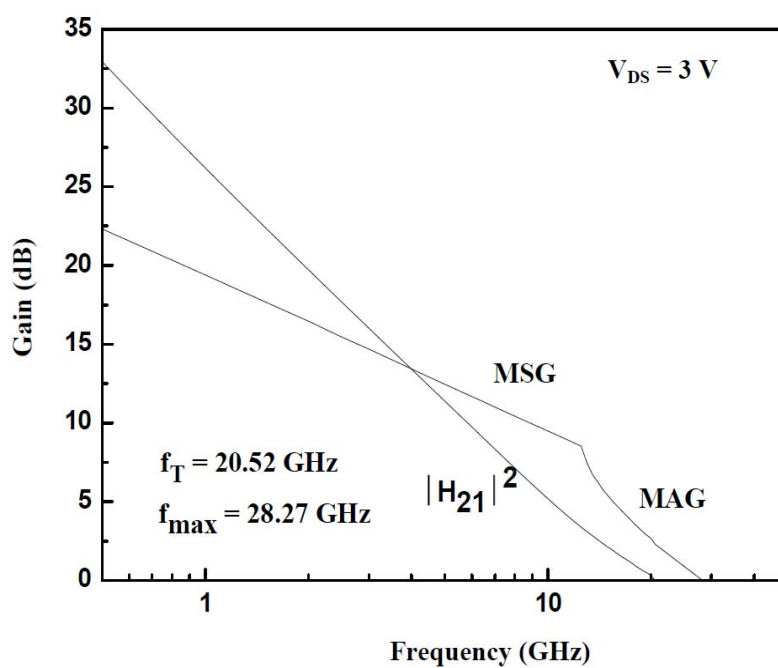


圖 4-16 $V_{DS}=3V$ ，閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu m^2$ 時，樣本 C 的 RF 特性。

在表 4-4 中概述了在 $V_{DS}=3V$ 時的 f_T 和 f_{max} 。因為有硫化銨批覆層，樣

本 C 擁有較高的 f_T 和 f_{max} ，如此一來，表面鍵結以及相關聯的電容將被降低。

	Sample A	Sample B	Sample C
f_T (GHz)	14.012	15.01	20.52
f_{max} (GHz)	19.991	23.1	28.27

表 4-4 閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，三個樣本的 f_T 和 f_{max} 。

4-4 功率特性

輸入直流功率與輸出交流功率成一比例，使用樣本功率測試系統來作量測，其中源極與負載阻抗必需與兩對針腳吻合，並且以帶通濾波器結合功率檢測器來得到基本的高頻特性。電源功率輸出效率(PAE)的式子如下：

$$\eta_{add} = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \times 100\% \quad (4-5)$$

在 2.4GHz 下，功率特性藉由微波的負載拉移被量測。圖 4-17、4-18 以及 4-19 顯示，三個樣本在閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時的輸出功率、功率增益，以及 PAE 與輸入功率的關係，而表 4-5 中則概述了三個樣本在 $V_{DS}=3V$ 時 PAE、輸出功率以及功率增益。在此表中，我們可以發現樣本 C 的三種特性都是最佳的，這是由於它擁有最高的崩潰電壓。

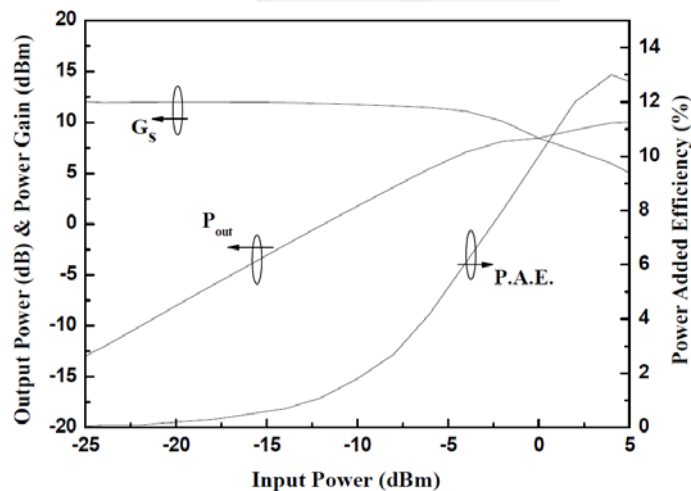


圖 4-17 在 2.4GHz 時，樣本 A 的輸出功率、功率增益，以及 PAE 和輸入電壓的關係。

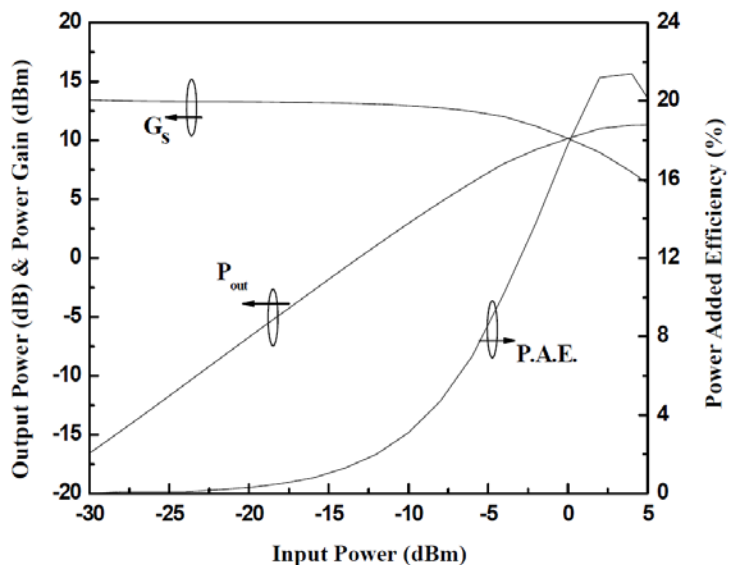


圖 4-18 在 2.4GHz 時，樣本 B 的輸出功率、功率增益，以及 PAE 和輸入電壓的關係。

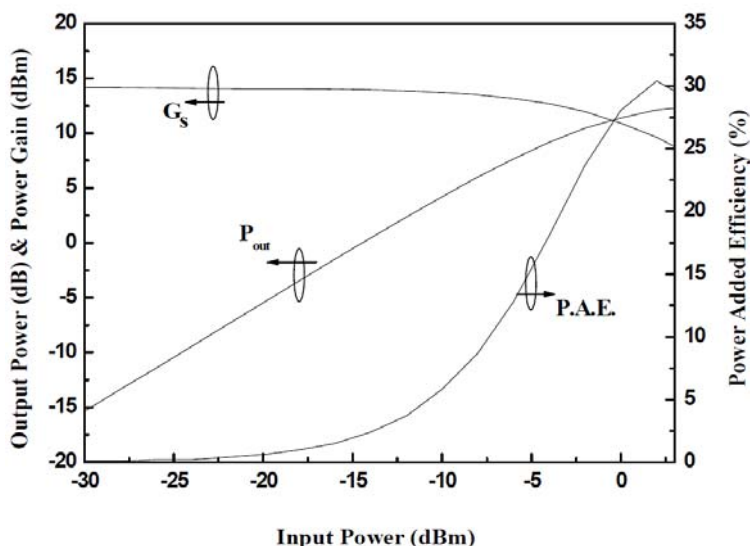


圖 4-19 在 2.4GHz 時，樣本 C 的輸出功率、功率增益，以及 PAE 和輸入電壓的關係。

	Sample A	Sample B	Sample C
P.A.E. (%)	13	21.4	30.4
Associated output power (dBm)	10.05	11.4	12.5
Associated power gain (dB)	11.9	13.32	14.67

表 4-5 在 2.4GHz 時，三個樣本的功率特性。

4-5 失真與線性度

運用複合式操作頻率來增加傳輸能力的多通道傳輸，是常用於現代無線通訊中典型的例子。然而，當系統的操作頻率超過兩個，且彼此鄰近時，即會造成互調失真。在無線電收發機中，非線性的元件即會造成非線性的失真。元件非線性的影響包括增益的壓縮以及互調失真[37]。

放大器中有兩個頻率分別為 f_1 , f_2 的入射信號，其輸出將會由 dc , f_1 , f_2 , $2f_1$, $2f_2$, $3f_1$, $3f_2$, $f_1 \pm f_2$, $2f_1 \pm f_2$ 和 $2f_2 \pm f_1$ 所構成。 $2f_1$, $2f_2$ 和 $3f_1$, $3f_2$ 分別為第二及第三諧波， $f_1 \pm f_2$ 為二階交互調變項(f_1 與 f_2 的係數總和為 2)， $2f_1 \pm f_2$ 和 $2f_2 \pm f_1$ 為三階交互調變項(f_1 與 f_2 的係數總和為 3)。圖 4-20 為輸入與輸出的頻譜。假設 f_1 與 f_2 之間的差異很小， $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ 會出現在 f_1 與 f_2 附近，而對 f_1 與 f_2 原本的信號造成干擾 [38]。

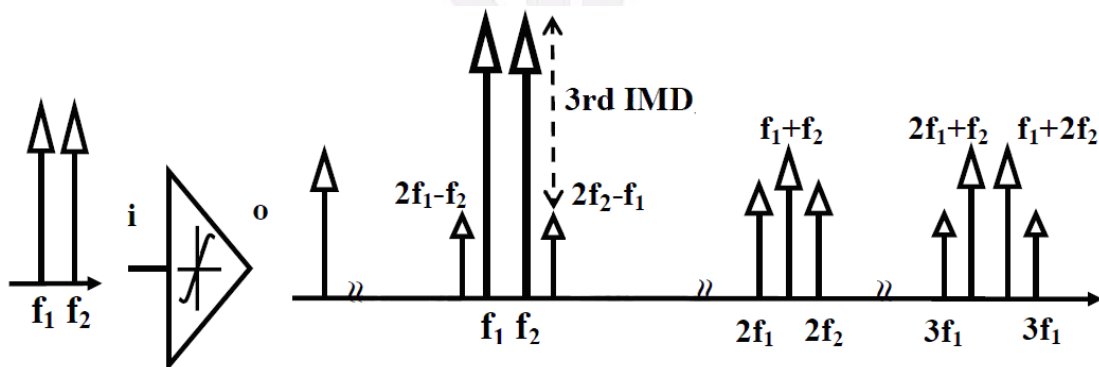


圖 4-20 三階失真時雙通道的輸入與輸出頻譜。

“三階截斷點 IP3 ”是個常用來量測三階互調失真的技術。如圖 4-21 所示，當輸入功率逐漸上升時，基頻信號(f_1)與三階互調信號($2f_1 - f_2$)會交於一點，此點即為三階截斷點，對應於水平軸上稱為輸入三階截斷點(IIP3) ，而對應至垂直軸上則稱之為輸出三階截斷點 (OIP3) [37]-[39] 。

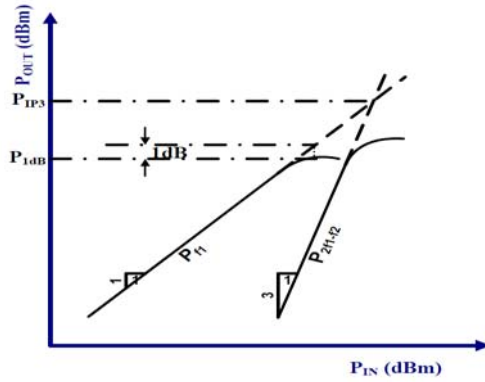


圖 4-21 截斷點的示意圖

另一個用來定義放大器線性度的參數為 IMD3 (三階互調失真)：

$$IMD_{3(dBc)} = P_{2f_1-f_2} - P_{f_1} \quad (4-6)$$

其中 $P_{2f_1-f_2}$ 頻率在 $2f_1-f_2$ 時的輸出功率， P_{f_1} 頻率在 f_1 時的輸出功率。

三階截斷點典型的值為 10 到 12dBm，而增益壓縮點在 1dB 之上：

$$\begin{aligned} OIP_{3(dBm)} &\approx P_{1dB(dBm)} + 10 \text{ dBm} \\ &= P_{f_1(dBm)} + \frac{1}{2} IMD_{3(dBc)} \end{aligned} \quad (4-7)$$

圖 4-22、4-23 以及 4-24 展現了在 2.4GHz 下，三個樣本的 OIP 和 IMD3 的特性，其中，數值由式子(4-6)和(4-7)所定義。

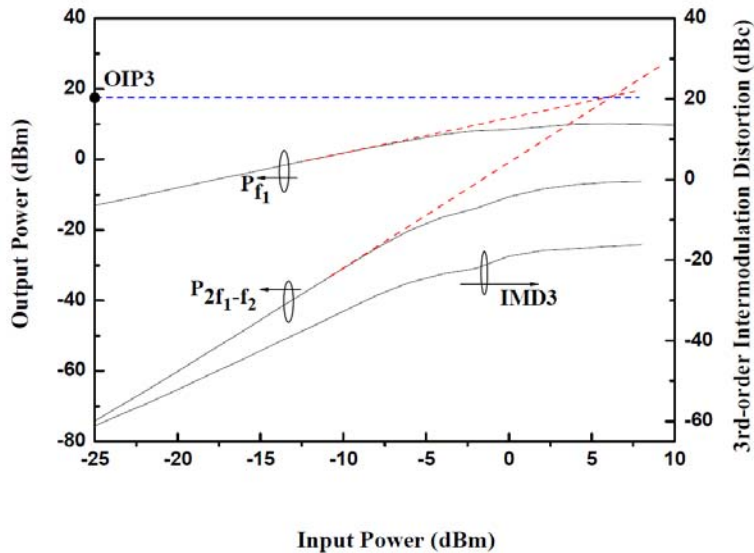


圖 4-22 300K 時，樣本 A 的輸出功率、三階截斷點以及 IMD3 對輸入功率的特性曲線圖。

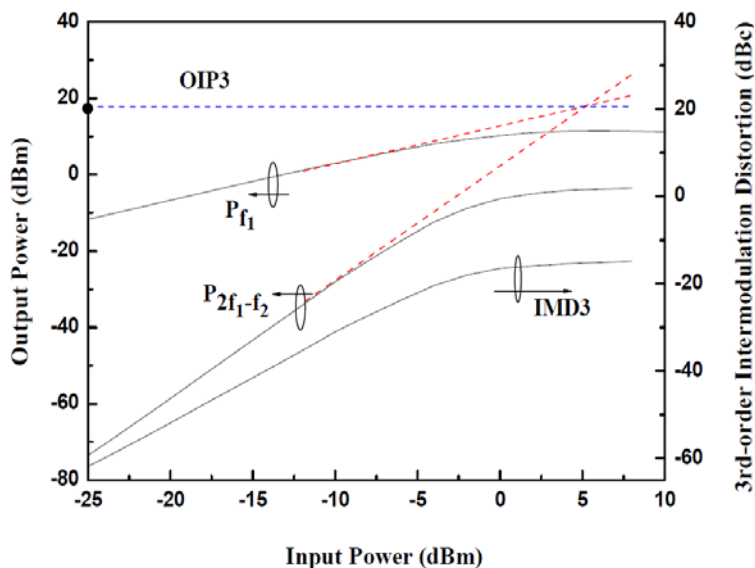


圖 4-23 300K 時，樣本 B 的輸出功率、三階截斷點以及 IMD3 對輸入功率的特性曲線圖。

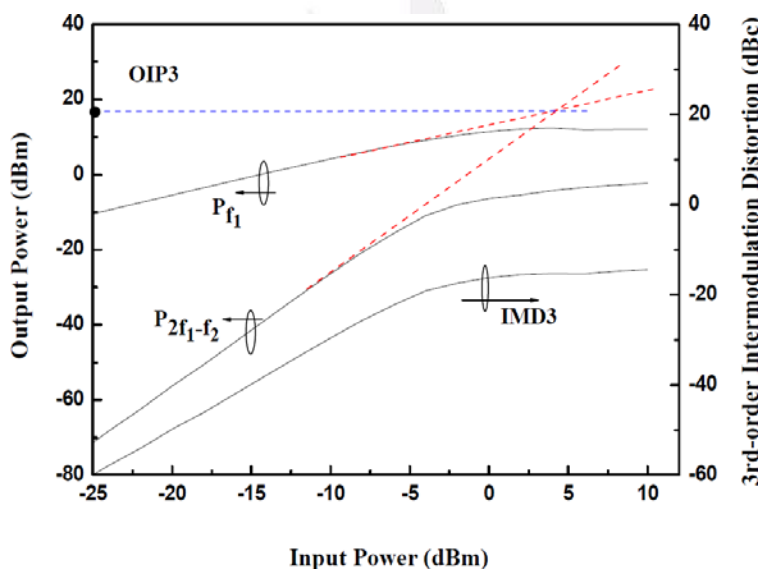


圖 4-24 300K 時，樣本 C 的輸出功率、三階截斷點以及 IMD3 對輸入功率的特性曲線圖。

表 4-6 中顯示各個樣本的 OIP3 與 IMD3 的數值，式子(4-6)與(4-7)可看出 OIP3、IMD3 與功率的關係。樣本 C 由於表面陷捕的減少，所以擁有較佳的 OIP3 和 IMD3 值，因此元件的失真與線性度都能得到明顯地改善。

	Sample A	Sample B	Sample C
OIP3 (dBm)	17.366	17.608	17.8
IMD3 (dBm)	-61.36	-62.6	-60.13

表 4-6 2.4GHz 時，各個樣本的 OIP3 值與 IMD3 值。

4-6 雜訊特性

圖 4-25、4-26 以及 4-27 中顯示，三個樣本在閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時的最小雜訊指數 (NF_{\min}) 和電路增益對頻率的關係圖。在 1 到 8GHz 時，我們使用 HP8970B 量測雜訊的特性。

轉導值會影響雜訊，當轉導值上升時雜訊會下降。然而，在最理想的偏壓條件下，表面陷捕的下降會導致較大的汲極電流以及較高的轉導值，進而改善雜訊特性。

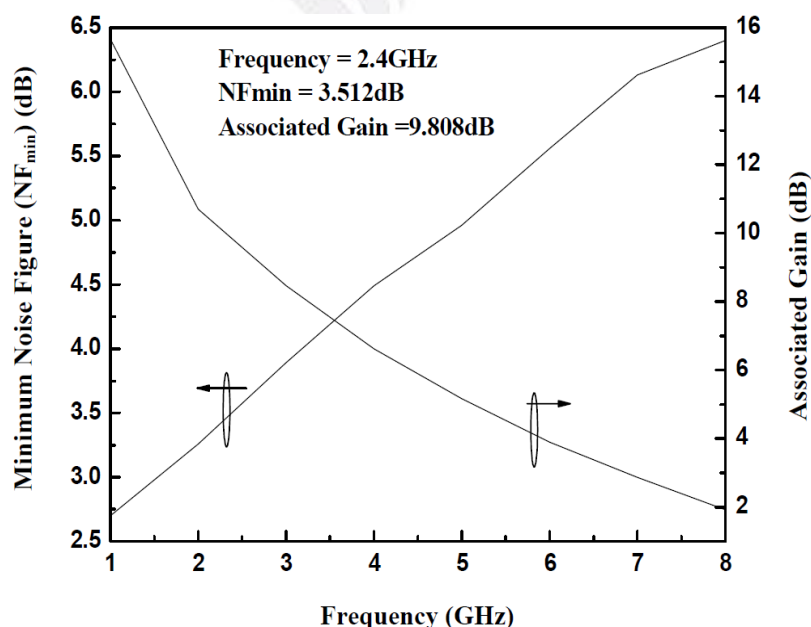


圖 4-25 樣本 A 的最低雜訊指數和電路增益對頻率的關係圖。

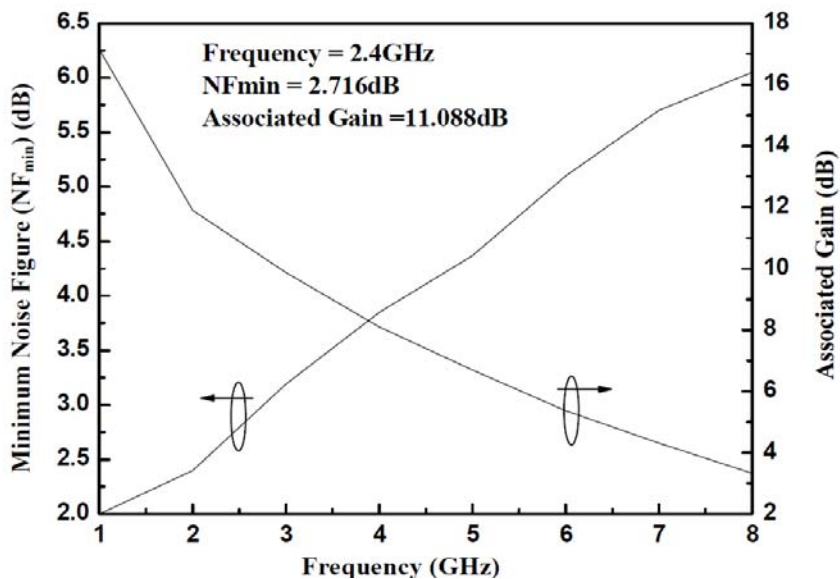


圖 4-26 樣本 B 的最低雜訊指數和電路增益對頻率的關係圖。

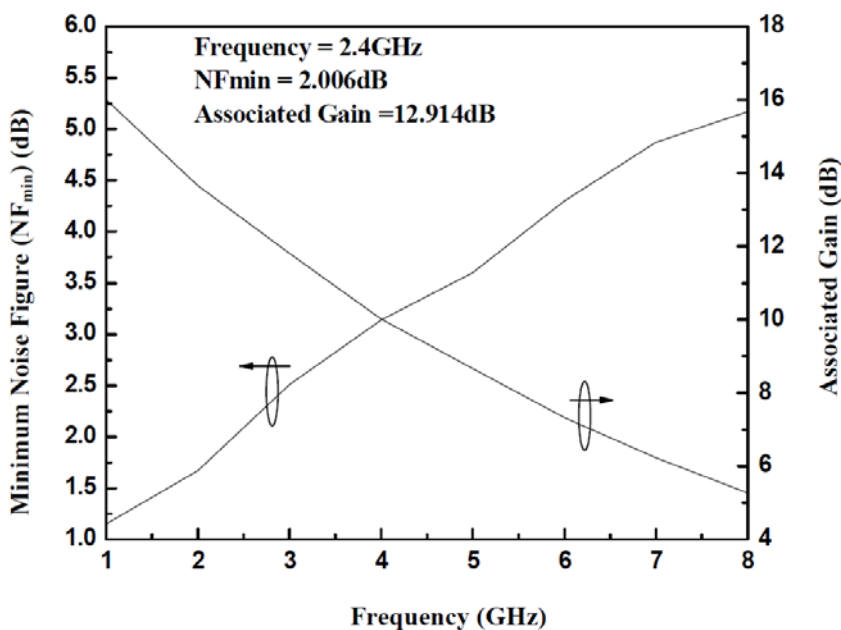


圖 4-27 樣本 C 的最低雜訊指數和電路增益對頻率的關係圖。

最小雜訊指數(NF_{min})的方程式如下：

$$NF_{min} \approx 1 + 2\pi f K C_{gs} \sqrt{\frac{R_s + R_g}{g_m}} \quad (4-8)$$

表 4-7 中展現了各個樣本在 2.4GHz 時的最小雜訊指數以及電路增益。因為披覆層可降低表面陷捕，所以樣本 B 以及樣本 C 有較高的轉導，對應至式子(4-8) 可得知：擁有最高轉導值的樣本 C，雜訊指數相對最小。

	Sample A	Sample B	Sample C
NFmin (dB)	3.51	2.72	2
Associated gain (dB)	9.81	11.1	12.91

表 4-7 各個樣本在 2.4GHz 時的最小雜訊指數以及電路增益。

4-7 低頻雜訊特性

在微波應用中，低頻雜訊是定義元件位勢的一個重要的參數。低頻雜訊量測是用來進一步地說明閃爍雜訊與各種狀況之間的關係，而此量測對半導體表面十分敏感。我們以 Agilent 35670A 來放大汲極雜訊電壓，輸出端再以 BTA9812B 分析頻率範圍 1Hz 到 100KHz 之間的頻譜。在低頻雜訊量測時，我們將偏壓設定在 $V_{DS}=3V$ 、 $I_{DS}=100mA/mm$ ，如同主載低頻雜訊的一連串電阻，所以同一個 I_{DS} 偏壓點對於各種處理狀態前的低頻雜訊特性而言充分地重要。從圖 4-28 中我們可看到樣本 B 與樣本 C 有著相似的 $1/f$ 頻譜雜訊，因為有披覆層的存在，使其改善了表面效應，進而擁有較一般標準樣本低的雜訊。

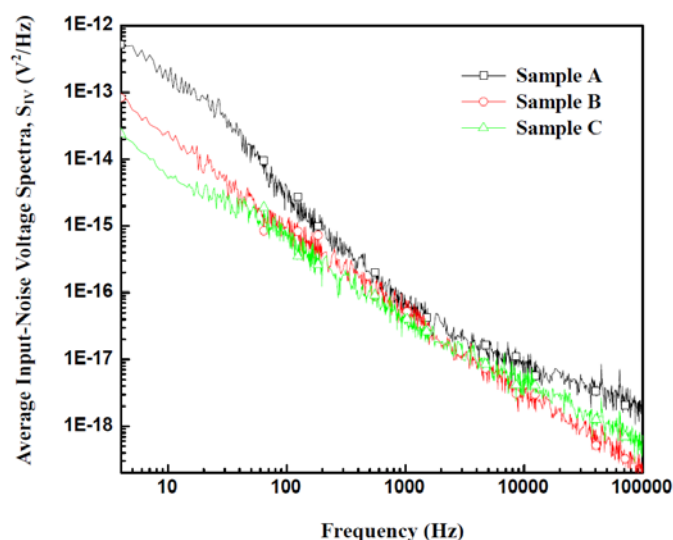


圖 4-28 三個樣本的 $1/f$ 雜訊比較圖。

4-8 溫度變化特性

在 300K 以及 450K 時，我們量測每個樣本的外質轉導和崩潰電壓。

〈A〉外質轉導特性

圖 4-29、4-30、4-31 顯示，在 $V_{DS}=3V$ 時，不同溫度下三個樣本的外質轉導與飽和汲極電流對 V_{GS} 的關係。溫度上升時，外質轉導的最大值會下降，這是因為汲極電流密度下降 [40]。圖 4-32 和圖 4-33 中分別顯示外質轉導與汲極電流密度對溫度的關係，而圖 4-34 則描述了在 $V_{DS}=3V$ 時三個樣本的臨限電壓對溫度的關係。

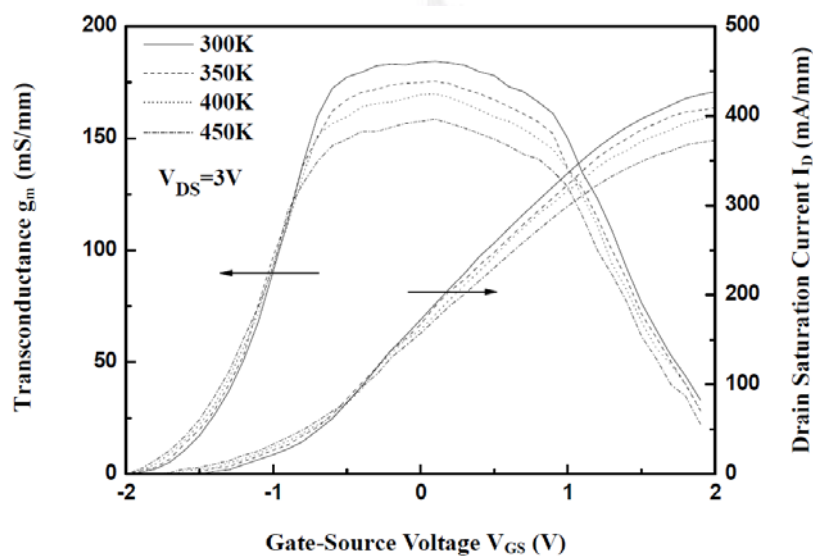


圖 4-29 300K 到 450K 時，樣本 A 的外質轉導和飽和汲極電流密度對 V_{GS} 的關係圖。

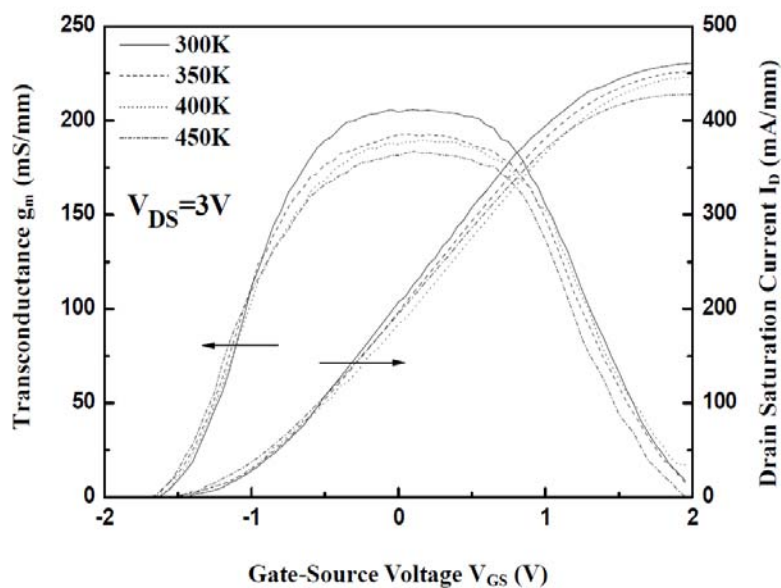


圖 4-30 300K 到 450K 時，樣本 B 的外質轉導和飽和汲極電流密度對 V_{GS} 的關係圖。

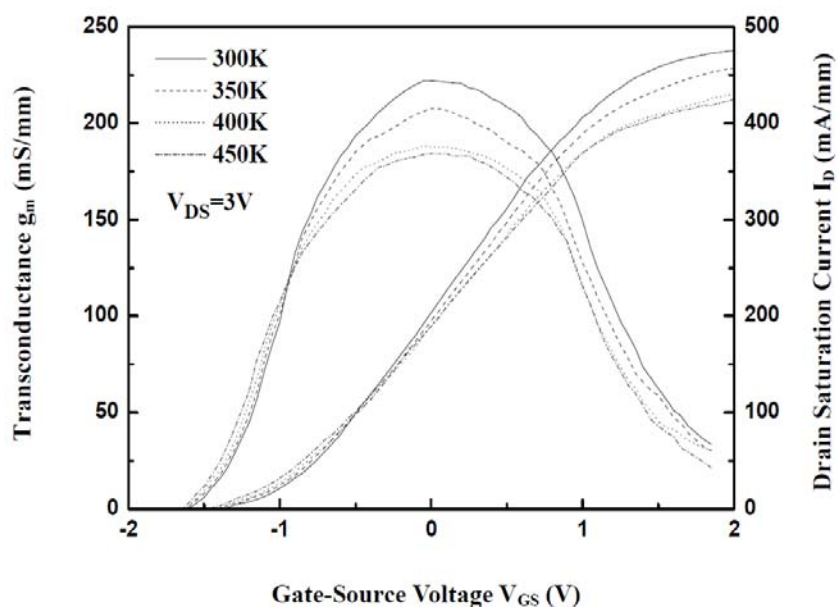


圖 4-29 300K 到 450K 時，樣本 C 的外質轉導和飽和汲極電流密度對 V_{GS} 的關係圖。

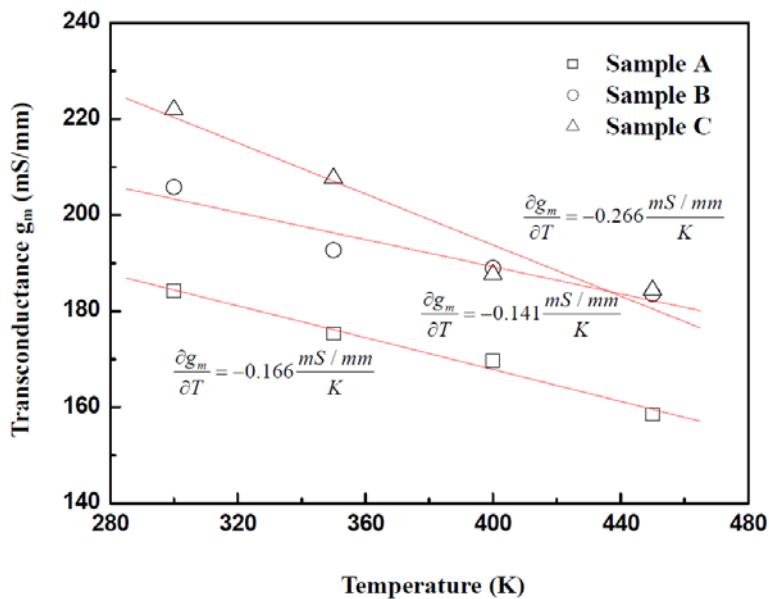


圖 4-32 各個樣本的外質轉導對溫度的關係。

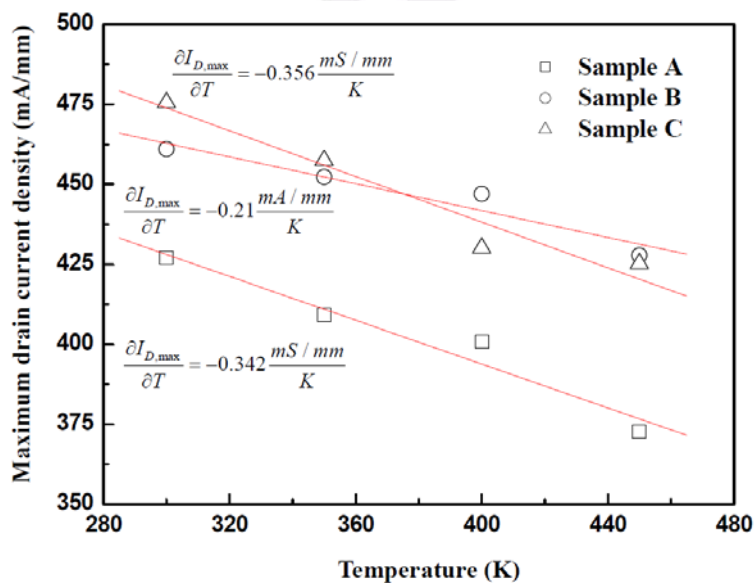


圖 4-33 各個樣本的最大汲極電流密度對溫度的關係。

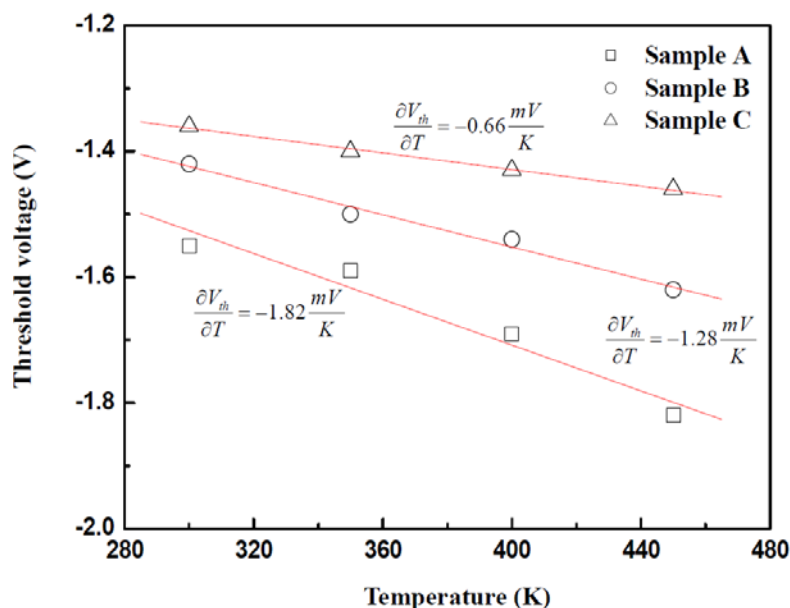


圖 4-34 各個樣本的臨限電壓對溫度的關係。

從表 4-8 中我們可以看出樣本 B 最大汲極電流密度的比值比較小；而樣本 C 的臨界電壓對溫度較不敏感，這是由於硫化批覆層有較高的蕭特基障礙高度，而使其有良好的閘極控制能力。

	Sample A		Sample B		Sample C	
	300K	450K	300K	450K	300K	450K
$I_{D,max}$	-10.58%		-7.2%		-10.59%	
$g_{m,max}$	-13.4%		-10.4%		-16.6%	
V_{th}	-17.4%		-14.1%		-7.35%	

表 4-8 300K 到 450K 之間，各個樣本的 $I_{D,max}$ ， $g_{m,max}$ 以及 V_{th} 。

〈B〉兩端崩潰電壓特性

圖 4-35、4-36 以及 4-37 中顯示三個樣本的兩端閘極-汲極崩潰電壓對溫度的關係。溫度上升時，漏電流會跟著變大，進而造成崩潰電壓的下降。三個樣本相較之下，因為樣本 B 與樣本 C 有良好的蕭特基特性和載子侷限能力，使得逆

偏閘極漏電流較小，因此樣本 B 與樣本 C 的崩潰電壓在溫度上升時不會改變地如樣本 A 那麼劇烈。

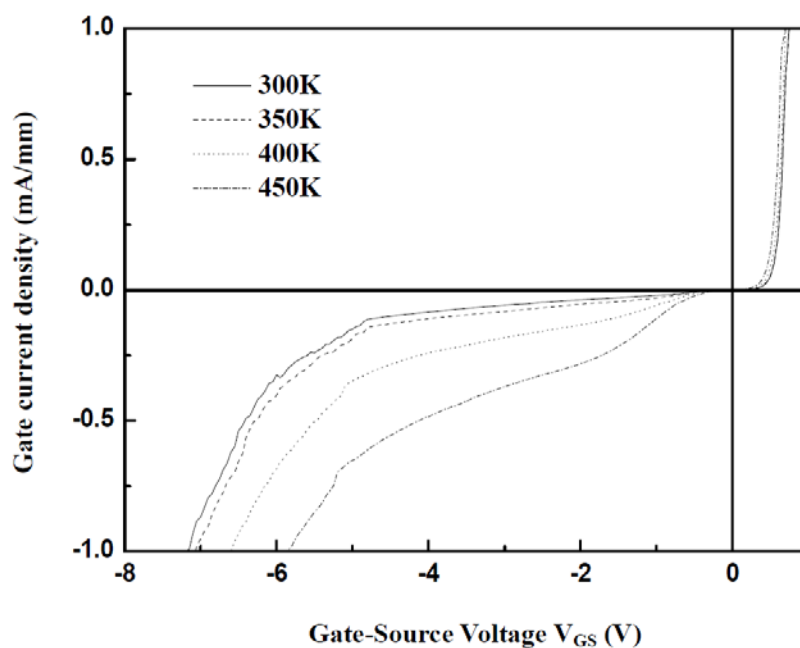


圖 4-35 300K 到 450K 之間樣本 A 的兩端崩潰電壓與 V_{GS} 的關係圖。

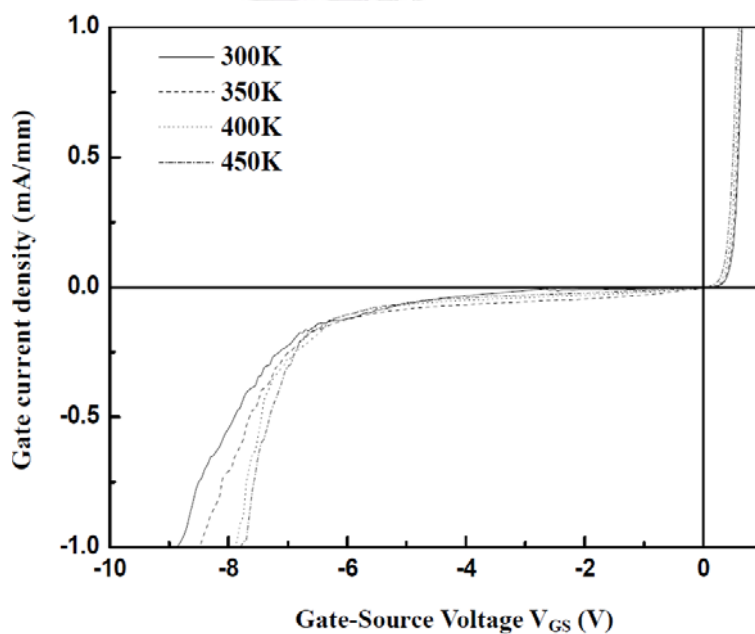


圖 4-36 300K 到 450K 之間樣本 B 的兩端崩潰電壓與 V_{GS} 的關係圖。

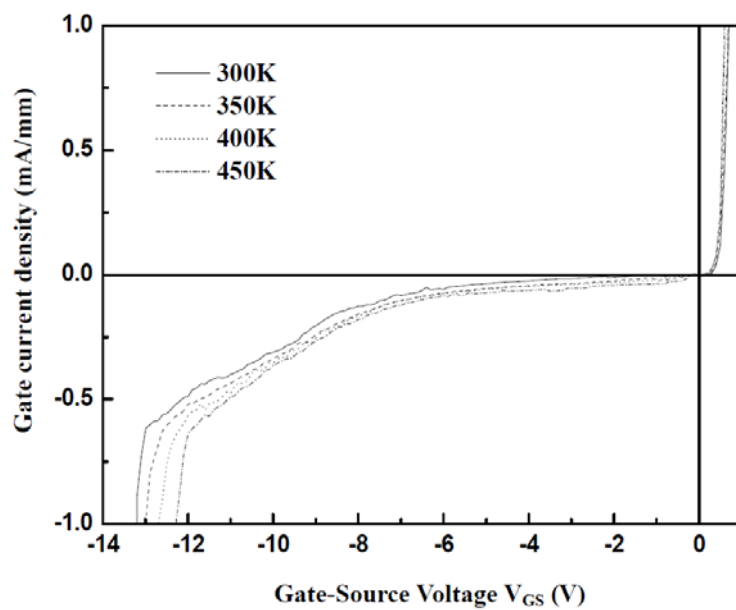


圖 4-35 300K 到 450K 之間樣本 C 的兩端崩潰電壓與 V_{GS} 的關係圖。



第五章 總論

在這個論題中，稀釋型通道砷化銦鎵/砷化鎵高電子移動率電晶體有無批覆層之研製相當成功。摻入類活化劑的銻原子於 InGaAs 通道中，以得到較優的元件性能。

硫化銨批覆層的元件擁有最好的特性： 221 mS/mm 的 $g_{m, \max}$ ， 205 mA/mm 的 I_{DSS} ， 12.5 dBm 的 P_{out} ， 14.67 dB 的功率增益， 30.4% 的 P.A.E. 以及 -13.3 V 的 BV_{GD} ， 20.52 GHz 的 f_{T} ， 28.27 GHz 的 f_{max} 。因此，擁有硫化銨批覆層的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ HEMT 適合應用在高增益和高功率的單晶微波積體電路。

在未來，我們將深入地去探討為什麼在加入類活化劑後能有效地改善結晶品質，例如利用原子力顯微鏡分析材料 (InGaAsN , InGaAsNSb , InGaAs , InGaAsSb) 的品質。

為了改善元件性能，有一些建議如下：

1. 降低閘極長度來改善元件性能。
2. 將銻加入其他的材料中，並且試著提升通道內銻原子的含量。
3. 將銻加入高銦含量的 MHEMT。

參 考 文 獻

- [1] G.M.Metze, J.F.Bass, T.T.Lee, A.B.Cornfield, J.L.Singer, H.L.hung, H.C.Huang, and K.P.Pande, "High-gain, V-band, low-noise MMIC amplifiers using pseudomorphic MODFETs," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.11, p.24, 1990.
- [2] M.Kao, P.M.Smith, P.Ho, P.Chao, K.H.G.Duh, A.A.Jabra, and J.M.Ballingall, "Very high power-added efficiency and low-noise 0.15- μ m gate length pseudomorphic HEMT's," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.10, p.580, 1989.
- [3] A.Ketterson, J.W.Se, M.Tong, K.Numila, D.Ballegeer, S.M.Kang, K.Y.Cheng, and I.Adesida, "A 10-GHz bandwidth pseudomorphic GaAs/InGaAs/AlGaAs MODFET-based OEIC receiver," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.39, p.2676, 1992.
- [4] C.S.Wu, C.K.Pao, W.Yau, H.Kanber, M.Hu, S.X.Bar, A.Kurdoghlian, Z.Bardai, D.Bosch, C.Seashore, and M.Gawronski, "Pseudomorphic HEMT manufacturing technology for multifunctional Ka-band MMIC applications," *IEEE Microwave Theory and Tech.*, vol.43, p.257, 1995.
- [5] S.E.Rosenbaum, B.K.Kormanyos, L.M.Jellian, M.Matloubian, A.S.Brown, L.E.Larson, L.D.Nguyen, M.A.Thompson, L.P.B.Katehi, and G.M.Rebeiz, "155-and 213-GHz AlInAs/GaInAs/InP HEMT MMIC oscillators," *IEEE Microwave Theory and Tech.*, vol.43, p.927, 1995.
- [6] R.Dingle, H.L.Stormer, A.C.Gossard, and W.Wiegmann, "Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices," *Appl. Phys. Lett.*, vol.33, p.665, 1978.
- [7] W.C.Hsu, C.L.Wu, M.S.Tsai, C.Y.Chang, W.C.Liu, and H.M.Shieh, "Characterization of high performance inverted delta-modulation-doped (IDMD) GaAs/InGaAs pseudomorphic heterostructure FET's," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.42, p.804, 1995.
- [8] F.Ali and A.Gupta, "HEMTs and HBTs; devices, fabrication, and circuits," Artech House, Boston London, 1991.
- [9] X.Yang "InGaAsNSb \tilde{O} GaAs quantum wells for 1.55 μ m lasers grown by molecular-beam epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol.78, p.26

- 2001.
- [10] J.S.Harris, Jr., S.R.Bank, M.A.Wistey and H.B.Yuen "GaInNAs(Sb) long wavelength communications lasers," *IEE Proc.-Optoelectron.*, vol.15, p.407, 2004.
- [11] Harris, J.S., Jr.," GaInNAs long wavelength lasers : progress and challenges", *Semicond. Sci. Technol.*, vol.6, p.880, 2002.
- [12] H.Shimizu, K.Kumada, S.Uchiyama and A.Kasukawa, "1.2 μ m range GaInAs SOW lasers using Sb as surfactant", *Electron. Lett.*, vol.36, pp.1379-1381, (2000).
- [13] X.Yang, M.J.Jurkovic, J.B.Heroux and W.I.Wang,"Low threshold InGaAsN/GaAs single quantum well lasers grown by molecular beam epitaxy using Sb surfactant",*Electron. Lett.*, vol.35, pp.1082-1083, (1999).
- [14] X.Yang, M.J.Jurkovic, J.B.Heroux, and W.I.Wang, "Molecular beam epitaxial growth of InGaAsN:Sb/GaAs quantum wells for long-wavelength semiconductor lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol.75, pp.178-180, (1999).
- [15] X.Yang, J.B.Heroux, L.F.Mei, and W.I.Wang, "InGaAsNSb \tilde{O} GaAs quantum wells for 1.55 μ m lasers grown by molecular-beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.*, vol.78, pp.4068-4070, (2001).
- [16] W.Ha, V.Gambin, M.Wistey, S.Bank, H.Yuen, S.Kim and J.S. Harris, Jr.,"Long wavelength GaInNAsSb/Ga NAsSb multiple quantum well lasers", *Electron. Lett.*, vol.38, pp.277-278, (2002).
- [17] Hitoshi Shimizu, Kouji Kumada, Seiji Uchiyama, Member, IEEE, and Akihiko Kasukawa,"High-Performance CW 1.26 μ m GaInNAsSb-SQW Ridge Lasers", *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron*, vol.7, pp.355-364, (2001).
- [18] Wonill Ha, Vincent Gambin, Seth Bank, Mark Wistey, HomanYuen, Seongsin Kim, and James S. Harris, Jr., *Fellow*, "Long-wavelength

- GaInNAs(Sb) lasers on GaAs”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.38, p.1260, 2002.
- [19] James S.Harris,Jr.“The opportunities, successes and challenges for GaInNAsSb”, *J.Cryst.Growth* , vol.278, p.3, 2005.
- [20] Li, L.H., Sallet, V., Patriarche, G., Largeau, L., Bouchoule, S., Merghem, K., Travers, L., and Harmand, J.C. “1.5 mm laser on GaAs with GaInNAsSb quinary quantum well”, *Electron. Lett.*, vol.39, p.519, 2003.
- [21] Harmand, J.C., Ungaro, G. , Largeau, L. , and LeRoux, G. “Comparison of nitrogen incorporation in molecular-beam epitaxy of GaAsN, GaInAsN, and GaAsSbN”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.77, p.2482, 2000.
- [22] Y.Dong, X.M.Ding, X.Y.Hou, Y.Li, and X.B.Li, “Sulfur passivation of GaAs metal-semiconductor field-effect transistor”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.77, p.3839, (2000).
- [23] P.H.Lai, C.W.Chen, C.I.Kao, S.I.Fu, Y.Y.Tsai,C.W.Hung,C.H.Yen, H.M.Chuang, S.Y.Cheng, and W.C.Liu,“Influences of Sulfur Passivation on Temperature-Dependent Characteristics of an AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT ”, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.53, issue 1 pp.1-8, (2006).
- [24] N.Okamoto, N.Hara, and H.Tanaka,“ Surface Passivation of InGaP/InGaAs/GaAs Pseudomorphic HEMTs with Ultrathin GaS Film”,*IEEE Trans. Electron Devices*, vol.47, issue 12,pp.2284-2289, (2000).
- [25] K.Remashan and K.N.Bhat , “ Stable Gallium Arsenide MIS Capacitors and MIS Field Effect Transistors by $(\text{NH}_4)_2 \text{Sx}$ Treatment and Hydrogenation Using Plasma Deposited Silicon Nitride Gate Insulator”,*IEEE Trans. Electron Devices*, vol.49, issue 3, pp.343-353 (2002).
- [26] Ke-Hua Su, Wei-Chou Hsu, Ching-Sung Lee, Tsung-Yeh Wu,

- Yue-Han Wu, Li Chang, Ru-Shang Hsiao, Jenn-Fang Chen, and Tung-Wei Chi, "A Novel Dilute Antimony Channel $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ HEMT", *IEEE Electron Device Letters*, vol.28, no.2, pp.96-99, (2007).
- [27] M.R.Ravi, A.DasGupta, and N.DasGupta, "Effect of Sulfur Passivation and Polyimide Capping on InGaAs-InP PIN Photodetectors", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.50, issue 2, pp.532-534 (2003).
- [28] H.Oigawa, J.Fan, Y.Nannichi, H.Sugahara, and M.Oshima, "Universal Passivation Effect of $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ Treatment on the Surface of III-V Compound Semiconductors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.30, pp.322-325 (1991).
- [29] X.Zhang, A.Z.Li, C.Lin, Y.L.Zheng, G.Y.Xu, M.Qi, and Y.G.Zhang, "The effects of $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ passivation treatments on the dark current-voltage characteristics of InGaAsSb PIN detectors", *J.Crystal Growth*, vol.251, pp.782-786 (2003).
- [30] J.Fan, Y.Kurata, and Y.Nannichi, "Marked Reduction of the Surface/Interface States of GaAs by $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ Treatment", *Jpn.J.Appl.Phys.*, vol.28, pp.2255-2257 (1989).
- [31] B. Vinter, "Subband and Charge Control in a Two-Dimensional Electron Gas Field-Effect Transistor," *Appl. Phys. Lett.*, vol.44, p.307(1984).
- [32] Karmalkar and G. Ramesh, "A Simple Yet Comprehensive Unified Physical Model of the 2D Electron Gas in Delta-Doped and Uniformly Doped High Electron Mobility Transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.47, p.11 (2000).
- [33] Y. Ando and T. Itoh, "Accurate Modeling for Parasitic Source Resistance in Two-Dimensional Electron Gas Field-Effect Transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.36, p.1036 (1989).

- [34] M. Feng, D. R. Scherrer, P. J. Apostolakis, and J. W. Kruse, "Temperature Dependent Study of the Microwave Performance of 0.25 μ m Gate GaAs MESFETs and GaAs Pseudomorphic HEMTs", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.43, p.852 (1996).
- [35] R.E.Anholt and S.E.Swirhum, "Experimental investigation of the temperature dependence of GaAs FET equivalent circuits", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.39, p.2029 (1992).
- [36] C.S.Lee, Y.J.Chen, W.C.Hsu, K.H.Su, J.C.Huang, D.H.Huang, and C.L.Wu, "High-temperature threshold characteristics of a symmetrically graded InAlAs/In_xGa_{1-x}As/GaAs metamorphic high electron mobility transistor." *Appl. Phys. Lett.*, 88, 223506 (2006).
- [37] Behzad Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice-Hall, 1998, chap.2
- [38] Tri T. Ha, *Solid-State Microwave Amplifier Design*, John Wiley and Sons, 1991, chap.6
- [39] Robert J. Weber, *Introduction to Microwave Circuits : Radio Frequency and Design Applications*, the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001.
- [40] W.C.Liu, W.L.Chang, W.S.Lour, S.Y.Cheng, Y.H.Shie, J.Y.Chen, W.C.Wang, H.J.Pan, "Temperature-dependent investigation of a high-breakdown voltage and low-leakage current In_{0.49}Ga_{0.51}As/In_{0.51}Ga_{0.85}As pseudomorphic HEMT," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.20, p.274,1998.