

逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵

通道摻雜式異質結構場效電晶體

Investigation on Double δ -doped

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Doped-Channel

Heterostructure Field-Effect Transistors

作者： 吳育勳 周伯昇

系級： 電子四甲 電子四乙

學號： D9266554 D9267228

開課老師： 李景松 老師

課程名稱： 化合物半導體元件

開課系所： 電子工程系

開課學年： 九十五學年度 第一學期



摘要

本論文研究研製以「金屬有機化學氣相沉積」方式成長具有雙載子供應層之砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵通道摻雜式異質結構場效電晶體，並藉由 V 型通道結構與雙重 δ -摻雜載子供應層等設計，以改善元件的載子侷限能力、電子傳輸特性、元件增益、電流驅動能力以及閘極偏壓擺幅等特性。

相較於傳統調變式摻雜異質結構場效電晶體，通道摻雜式場效電晶體具有較佳載子侷限能力與元件增益線性度的優點；而 δ -摻雜之假晶式高電子移動率電晶體，由於使用未摻雜的通道結構設計來消除通道中的雜質散射效應，所以將有較高的外部轉導增益值。

因此，本論文試著結合通道摻雜式異質結構場效電晶體高增益線性度的優點，並藉由雙重 δ -摻雜載子供應層的設計來提升載子濃度、增加電流密度之特性表現。特別是利用對稱型漸變通道摻雜式結構，改變砷化銦鎵通道中的銦成分之線性漸變方式(0.15 $\rightarrow$ 0.2 $\rightarrow$ 0.15)，進而獲得 V 型的傳導帶分布，使電子遠離砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵界面，降低庫倫散射效應，並增加載子侷限力，將有效改善閘極偏壓擺幅與電子傳輸能力等特性；另外，本論文在閘極金屬與主動通道層間插入一寬能隙做為摻雜層的設計，以改善元件的崩潰特性。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

實驗結果顯示，相較於傳統通道摻雜式場效電晶體，此元件設計擁有較高的載子移動率、較高的外部轉導值及較高的截止頻率；而相較於 δ -摻雜高電子移動率電晶體，此設計亦擁有較好的線性度、較大的閘極偏壓擺幅及較大的輸出功率。最後，本論文亦探討該砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵異質結構場效電晶體之溫度變化特性與高頻等特性比較。



關鍵字：通道摻雜、 δ -摻雜載子供應層、對稱型漸變結構

目錄

摘要	-1-
目錄	-3-
第一章 序論	01
第二章 磊晶成長系統介紹與元件製程步驟	05
2-1 磊晶成長系統介紹	05
2-1-1 金屬有機氣相沉積(MOCVD)系統介紹	05
2-1-2 分子束磊晶(MBE)系統介紹	09
2-2 元件製程步驟	11
2-2-1 樣本定位	12
2-2-2 高台絕緣	12
2-2-3 源極(Source)和汲極(Drain)金屬化	13
2-2-4 閘極蕭基接觸	14
第三章 高速電晶體工作原理	16
3-1 高電子移動率電晶體工作原理	16
3-2 假晶性高電子移動率電晶體與通道摻雜式場效電晶體 之比較	22

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

3-2-1 假晶性高電子移動率電晶體之優缺點·····	22
3-2-2 通道摻雜式場效電晶體之優缺點·····	22
3-2-3 雙 δ -摻雜通道摻雜式異質結構 場效電晶體優點·····	23
第四章 砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵異質場效電晶體元件結構	24
4-1 元件結構·····	24
4-2 霍爾量測·····	29
第五章 實驗結果與討論·····	31
5-1 在 300 K 的直流特性·····	31
5-1-1 電流-電壓特性·····	31
5-1-2 外部轉導值特性·····	33
5-1-3 兩端崩潰電壓特性·····	37
5-1-4 輸出傳導性·····	39
5-2 射頻特性·····	42
5-3 功率特性·····	45
5-4 雜訊特性·····	48
5-5 與溫度相關的特性·····	50

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

5-5-1 外部轉導值特性	50
5-5-2 兩端點崩潰電壓特性.....	55
5-5-3 射頻(RF)特性.....	57
第六章 結論.....	60
參考資料.....	62



第一章 序論

半導體工業發展至今，矽(Si)是使用最普遍的半導體材料，因為矽元素在地表的含量豐富易於提煉，且其氧化物(SiO_2)具有優異的絕緣特性，所以很適合作為電子元件的基礎材料。但是隨著需求演進，矽元素諸多的物理限制，包括電子移動率低、頻率操作範圍小、無法耐高溫操作、高頻操作有大雜訊且不易解決、元件輸出功率與效能低、抗輻射性差…等問題，使得在極高頻的應用上不易有所突破。

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，促使許多關於半導體材料與異質接面結構的研究邁進一大步，這是由於它們能讓摻雜層的雜質均勻分佈且能精確的控制磊晶厚度。對單晶微波積體電路(MMIC)應用而言，能達到高功率、高頻率、低雜訊和低失真[1~5]等特性。到目前為止，對於異質結構場效電晶體的元件設計者而言，最主要的追求目標是要達到高速、高電流驅動能力和高崩潰的特性[6~10]。

在過去幾年裡，調變摻雜式場效電晶體由於 n 型的砷化鋁鎵/砷化鎵晶格匹配，對高速與高頻微波元件應用的影響引起廣泛的討論。自從 1986 年假晶性異質結構場效電晶體的快速發展以來，產生了許多改變。而其中之一的改善是改變砷化鋁鎵/砷化鎵異質結構場效電晶

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

體的晶格匹配。將原本的砷化鎵改為砷化銦鎵當作二維電子氣通道的材料。而它的優點是利用一個薄的砷化銦鎵層當作假晶性通道層。如此一來，將可以改善三個特性：

- (1) 可以增加在砷化銦鎵通道的電子傳輸速度。
- (2) 改善量子井通道裡的載子侷限能力。
- (3) 因為砷化鋁鎵/砷化銦鎵的異質接面會有較大的不連續傳導帶，所以會讓電子遷移率增加。

然而，砷化鋁鎵與砷化銦鎵之間的晶格並不匹配，所以砷化銦鎵層必須控制的很薄，使晶格不匹配的問題可以改善，成為一個假晶性材料。從前，砷化銦鎵層的厚度往往超過臨界厚度而造成晶格的位移，為了維持晶格匹配而把銦的摻雜計量提高使臨界厚度下降。所以當注入高含量的銦時，砷化銦鎵層的厚度就必須設計的更薄。當我們提高銦的計量時有包含以下幾點好處：

- (1) 高電子移動率。
- (2) 高載子侷限能力。
- (3) 高電流密度。
- (4) 高轉導值。
- (5) 高單位電流增益頻率。
- (6) 低源極電阻值。

對於假晶性砷化銦鎵高電子移動率電晶體操作在毫米波段方面的性能上[11~13]，儘管有相當多的研究。然而，p 型的高電子移動率電晶體當作微波功率元件時，會被相對低的二維電子氣裡內片載子密度和低汲極崩潰電壓所限制。這是因為在閘極金屬與通道間具有相當高的載子供應層。

近來以砷化鎵為基底的異質結構實驗證明，通道摻雜式異質結構場效電晶體可以避免許多高電子移動率電晶體原先固有的缺點[14~18]。特別是異質結構場效電晶體能達到較大的崩潰電壓和較大的閘極偏壓擺幅。造成這個結果的原因是當施體遠離閘極界面之後，將使通道層成為 n 型的重摻雜，如此一來通道摻雜說明了通道摻雜式異質結構場效電晶體具有較寬的閘極偏壓操作範圍，因此對於汲極到源極的電流(I_{DS})與閘極到源極的電壓(V_{GS})就具有高的線性度[19~20]。但是，通道摻雜式結構證明在通道內會發生雜質散射效應，它在微波特性上會造成較差的電子移動率。

在這專題裡，為了改善元件增益線性度與微波特性，我們製造一個雙 δ -摻雜對稱通道摻雜式異質結構場效電晶體，與傳統通道摻雜式異質結構場效電晶體及假晶性高電子移動率電晶體比較，我們期盼通道裡的輕摻雜層可以減少雜質散射與增強閘極偏壓擺幅。並且利用對稱型通道設計[21~22]，將電子限制在 V 型能帶裡，藉以增加電子傳

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

輸。這是由於電子被限制在通道裡的高速區域。所以 V 型通道摻雜可以證明利用雙 δ -摻雜對稱型通道摻雜式異質結構場效電晶體能夠改善元件增益的線性度與射頻特性。

當使用雙 δ -摻雜載子供應層時，可以獲得更高的二維電子氣。因為這樣，將比使用單一載子供應層更能獲得更高的片載子濃度。從這個設計，我們可以期盼改善電流驅動能力和輸出功率特性。

接著我們在第二章裡介紹金屬有機氣相沉積(MOCVD)系統與分子束磊晶(MBE)系統。並詳細的介紹元件製程的步驟；第三章討論假晶性高電子移動率電晶體的工作原理，並且比較假晶性高電子移動率電晶體與通道摻雜式場效電晶體之優缺點；第四章則介紹這次所研究的三種元件的結構與簡介，並且報告利用霍爾量測所得的資料；在第五章中討論這次研究的元件特性並且研究此元件與溫度相關的特性。最後，第六章裡將會為這份專題做一個總結。

第二章 磊晶成長系統介紹與元件製程步驟

金屬有機氣相沉積(MOCVD)系統與分子束磊晶(MBE)系統，是目前最廣泛使用的磊晶技術。金屬有機氣相沉積系統最主要的優點是能達到高生產量與一次成長多晶圓的特性；而分子束磊晶系統則可以精準的控制厚度及磊晶區域以及摻雜層的雜質能均勻分佈。在這一章裡，將會介紹金屬有機化學氣相沉積系統與分子束磊晶系統，以及此元件製程的步驟。

2-1 磊晶成長系統介紹

2-1-1 金屬有機氣相沉積(MOCVD)系統介紹

隨著半導體元件發展，各式各樣的元件如:光發射器 LED、光感測器 PIN、APD 以及各種高速電晶體，例如：FET、HEMT、HBT 等，對材料的品質要求與材料種類愈來愈多。於是 GaAs，InP，InGaAs，InGaP，InGaAsP，II-V 之 ZnS 等材料逐漸被開發使用。另外元件結構愈趨複雜、雜質及純度控制要求提高、厚度控制愈來愈薄和尺寸愈來愈小，如：Quantum well，Quantum wire，Quantum dot ...。MOCVD 製程能符合上述要求，因此被廣泛應用。以下我們將對 MOCVD 作詳細的介紹：

MOCVD 系統：

- (1) 原料部分：氫化物氣體均裝入高壓鋼瓶，經壓力調整器降壓後，由流量控制器設定流量，流入反應腔。有機金屬幾乎是以液態存於鋼瓶中，由溫度及載送氣體(H_2)精密控制適量送入反應腔。
- (2) 氣體處理部份：含開關、控制閥、流量計、排放管等。將所有原料在量上作精密控制，送入反應腔或排放管，對晶膜之組成濃度，厚度達到所需求之規格。
- (3) 反應腔部份：反應腔有垂直式、煙囪式、水平式及桶狀式等。內有石墨材質之載物架放置基板，生產面積及均勻性是其規格要求。
- (4) 電力及控制部分：反應腔為冷管式，用 RF 感應加熱，溫度由熱電偶控制可電腦化。

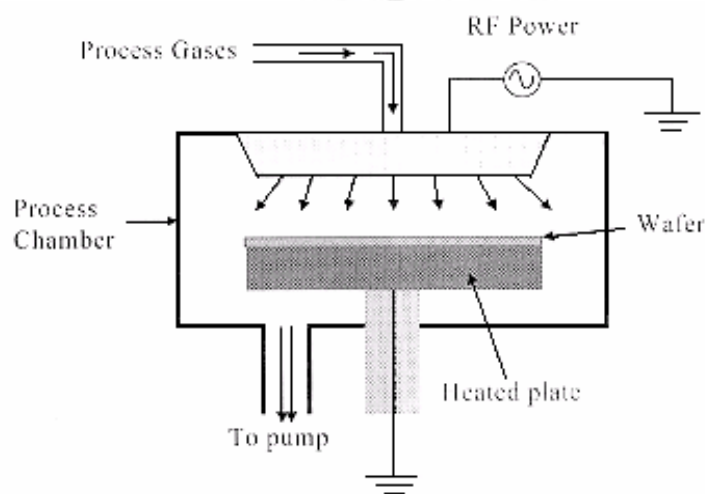


圖 2-1 MOCVD 成長腔

➤ MOCVD 生長過程

生長過程是將反應原料由氣相擴散或對流穿過邊界層(Boundary layer)達到基板表面。若基板表面反應速率夠快，生長速率由反應物到達基板表面之量決定，增加反應物濃度就增加生長速率。生長速率由反應物濃度決定時，對生長溫度不敏感，當反應物濃度在基板表面增加到超過基板反應速率，則生長速度由基板表面反應速率決定，生長溫度決定生長速率。

➤ MOCVD 系統優點及應用

MOCVD 是目前商用上最受歡迎的磊晶方法，因為：

- (1) 有機金屬原料有多重選擇，且純度、來源、價格、穩定度及處理方便性都較 Halid CVD 為佳。
- (2) 不需高真空，系統價格低，維修容易。
- (3) 不需要溶劑(與 LPE 比較)。
- (4) 磊晶膜表面平滑，多重結構生長控制容易，摻雜易控制。
- (5) 可量產。

MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)又稱 OMCV 或 MOVPE 或 OMVPE。MO(Metal-Organic)或 OM(Organo-metallics)在化學上 MO 係指金屬連接一個氧、硫、氮或磷原子，再轉接一個或多個碳原子；而 OM 則是將金屬原子直接接上一個或多個碳原子。

MOCVD 使用有機金屬原料之蒸氣內所含的無機成分來生長薄膜的一種氣相沉積技術。有機金屬原料中之有機部份(含碳部分)決定其蒸氣壓之大小，分解難易和分解產物等，在 MOCVD 流行之前，最常用的生長 GaAs 技術為鹵化物氣相沉積法(Halide CVD) 其使用鎵元素為鎵原料，使用三氯化砷(AsCl_3)或砷化元素為砷化原料。為了使非氣態的鎵能由原料區進入生長區，將鹽酸蒸氣($\text{HCl}_{(g)}$)與鎵反應產生氣態的氯化鎵(GaCl)以便傳送主生長區，再與砷反應，即得 GaAs film，Halid CVD 仍有下列缺點：

- (1) 至少須二個高溫區，溫度控制不易。
- (2) 反應釋放熱反應，故需用熱管式系統. 反應腔石英管之腐蝕污染不易防止。
- (3) 反應式均是可逆反應，故生長參數之控制相當困難，任一參數之改變，均可導致蝕刻而非成長。
- (4) 不允許大量載運氣體，因會將 HCl 吹至沉積區 (HCl 為酸性會蝕刻)導致蝕刻, 若蝕刻速率>沉積速率。則成長轉成蝕刻，Halid CVD 是接近平衡點之放熱反應，成長參數需嚴格控制，而 MOCVD 則可離開平衡點甚遠之吸熱反應，可去除上述缺點。

2-1-2 分子束磊晶(MBE)系統介紹

分子束磊晶是一種高精度的單晶薄膜生長技術，對於半導體製程技術是相當重要的一項發展，在 1970 年代初期，由貝爾實驗室的 John Arthor 及華裔的卓以和博士共同發展出來的，不但可成長高品質且高純度的磊晶層，對於量子井(Quantum Well)、單原子層摻雜(δ -doping)及超晶格(Superlattice)等薄層結構，提供所需的準確厚度與摻雜濃度控制，對於異質接面的成長控制也是之前磊晶法無法比擬的，因此成為微波元件磊晶的主流技術之一。

➤ MBE 系統

- (1) 原料部分：典型的有 Al、As、Be (P 型摻雜)及 Ga、In、Si (N 型摻雜)面對基板做為元素源，元素源的爐口有快門控制開關，蒸鍍的速率由爐管的溫度所控制。因為成長時會有高溫，所以必須藉由水或異丙醇循環以冷卻爐管。
- (2) 磊晶成長速度：典型成長 InGaAs、AlGaAs、GaAs 磊晶層速度為 0.5~1 $\mu\text{m/h}$ 之間，過多的 As 通量並不影響磊晶速度。一般而言，As 對 Ga 的比例必須維持在 20 左右，以避免形成 Ga 過多的表面。
- (3) 分子束通量監視器與基板加熱器：每一次成長前，每個元素源的通道會由基板背面的分子束通量監視器測量。在材料成

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

長前，基板會先經由基板加熱器加熱到接近 600°C 。另外為了使磊晶薄膜的化學組成及厚度均勻，基板的承載座必須以垂直基板表面的方面不斷的旋轉，通常基板的承載座會以大約 7.5rpm 的速度旋轉。

- (4) 反應式高能電子繞射儀：反應式高能電子繞射儀利用能量為 5~50keV 的電子束入射試片表面以偵測試片表面的原子結構，藉以得知試片的磊晶情形與清潔度。
- (5) 質譜儀：質譜儀用來偵測異質氣體量如 H_2O 、 O_2 、 CO 及 N_2 ，是在可忍受的範圍內。

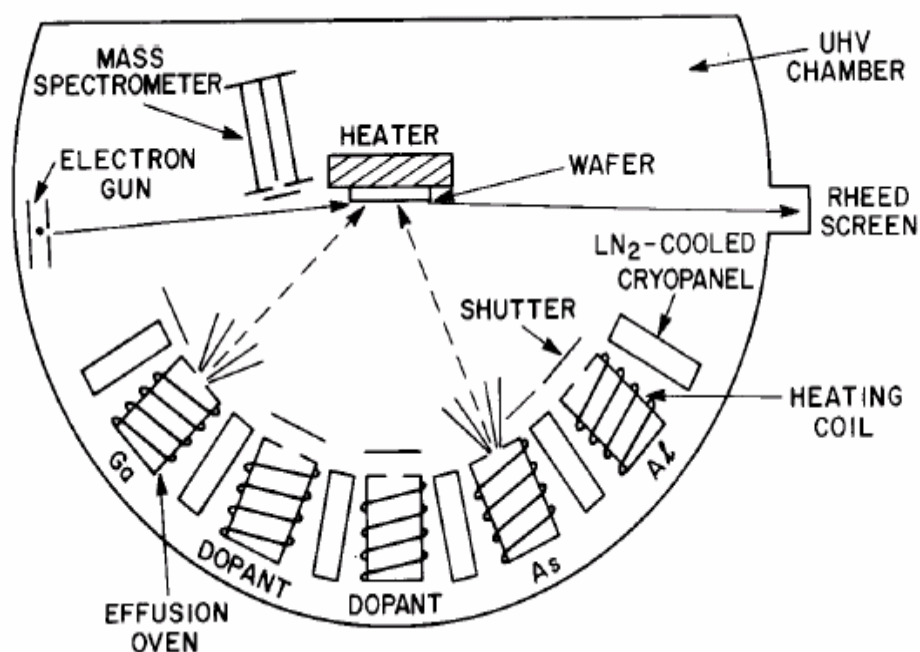


圖 2-2 分子束磊晶系統示意圖

➤ MBE 生長過程

先將待成長的晶片放置在一個超高真空($\sim 10^{-10}$ mmHg)的反應室中，所需成長的材料則放在反應室一端的爐管中。當爐溫升至一定溫度時，爐中的材料會以原子束或分子束的形式蒸發出來，此時基板也被加熱至一適當的溫度。當分子束射至基板時，就會與基板表面的原子結合而形成磊晶。磊晶成長的速率完全由單位時間內射到基板表面的分子數目決定，這可以很容易的由裝置成長材料爐管的爐溫所控制，一般成長的速率約為一秒鐘成長 0.1 層至 3 層原子。由於速度慢，所以可以很精確的控制磊晶層的厚度。每個爐管的前端有一快門控制開關，決定磊晶層的起始點和終止點，控制這些開關的順序就可以得到多層的磊晶結構。

分子束磊晶技術的發明將半導體元件帶入一個嶄新的領域。過去元件的大小用微米 (10^{-6} m) 計算，以分子束磊晶系統作出來的元件大小則可用埃 (10^{-10} m) 來計算，我們甚至可以準確到用原子的層數來計算磊晶的厚度。當這些磊晶層薄到約 100 Å 時，傳統分析電子運動的方式已不再適用，而必須考慮到量子效應。

2-2 元件製程步驟

為了建立製程圖案樣本，所以使用標準的微影與移除技術。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

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

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 2-3 所示的元件製程有以下四個步驟：

- (1) 樣本定位 (Sample Orienting)。
- (2) 高台絕緣 (Mesa Isolation)。
- (3) 源極和汲極金屬化 (Source And Drain Metallization)。
- (4) 閘極蕭基接觸 (Gate Schottky Contact Formation)。

2-2-1 樣本定位

閘極的方向必須平行於橢圓形主軸去防止移除製程時所產生的開路現象。這也是為什麼我們要選擇閘極為(100)方向，並且在高台蝕刻選用(011)方向的原因。

2-2-2 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，元件可以得到較好的夾止特性。在晶圓片上覆蓋均勻 AZ1400 光阻，把高台圖案微影至樣本上，再利用化學濕蝕刻。在 GaAs, AlGaAs 和 InGaAs 各層中蝕刻溶液 $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 30$ 。

接著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 γ 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：

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

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

2-2-3 源極(Source)和汲極(Drain)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 ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:1$) 去移除氧化層表面。晶圓被 AZ1400 光阻覆蓋均勻後在 90 度下 30 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 20 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。移除步驟是為了讓圖案和樣本間在快速熱退火中有好的熔解，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：

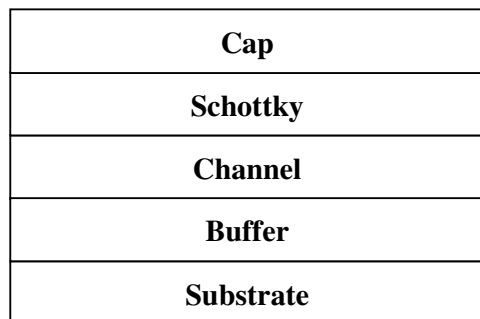
雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

- (1) 烘烤。
- (2) 上光阻, 旋轉使覆蓋光阻均勻。
- (3) 軟烤(曝光前烘烤)。
- (4) 曝光。
- (5) 顯影。
- (6) 移除。
- (7) 蒸鍍。
- (8) 合金連接。

2-2-4 閘極蕭基接觸

在閘極金屬蒸鍍前，必須利用蝕科技術先移除覆蓋層。若是沒有完全移除乾淨，則會有並聯效應產生。運用源極和汲極為閘極光罩，所以並不需要運用到光學微影製程。再利用 Au 蒸鍍在 AlGaAs 上，形成蕭基接觸。在移除步驟後，場效電晶體元件算是完成。而閘極蕭基接觸主要步驟與源極和汲極金屬化步驟大致相同，只是少了合金連接的步驟。

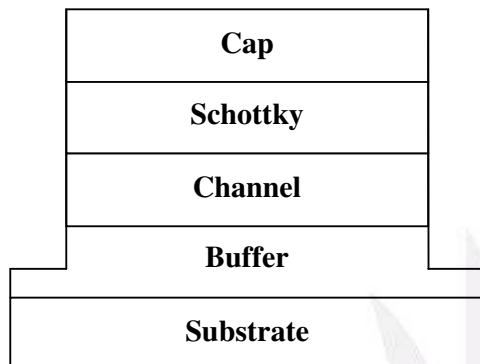
雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體



步驟一

→ 樣本定位

→ 晶片清洗

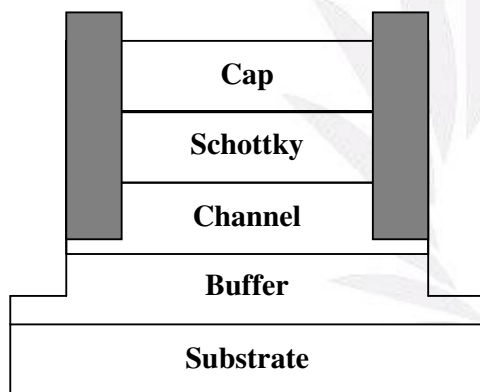


步驟二

→ 高台微影

→ 蝕刻

→ 移除光阻



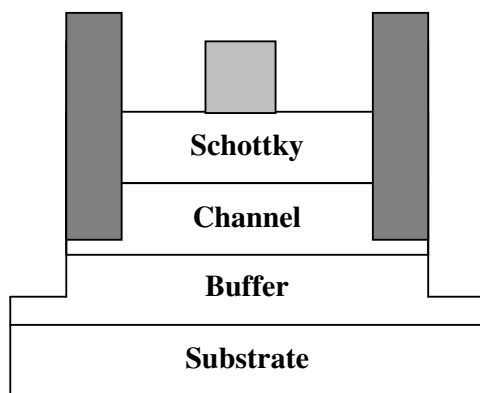
步驟三

→ 源極/汲極微影

→ 蒸鍍(AuGeNi/Au)

→ 移除

→ 金屬熔結



步驟四

→ 覆蓋層蝕刻

→ 閘極微影

→ 蒸鍍(Au)

→ 移除

圖 2-3 元件製程步驟圖解

第三章 高速電晶體工作原理

3-1 高電子移動率電晶體工作原理

高電子移動率電晶體(HEMT)和雙極性異質接面電晶體(HBT)是 III-V 族化合物半導體近代較成熟的元件，元件的操作主要仰賴異質接面。元件中異質接面因有不同的組成成分及能隙產生，例如：GaAs/AlGaAs 或 InGaAs/InP。目前這些新發展的元件在微波和高速數位積體電路中比單一接面元件提供更好的電位特性。在 HEMT 中設計磊晶層結構是為了讓自由電子在通道中自己由施體離子中分開，進而改善基座的性能，遠比典型的 MESFETs 來的好。

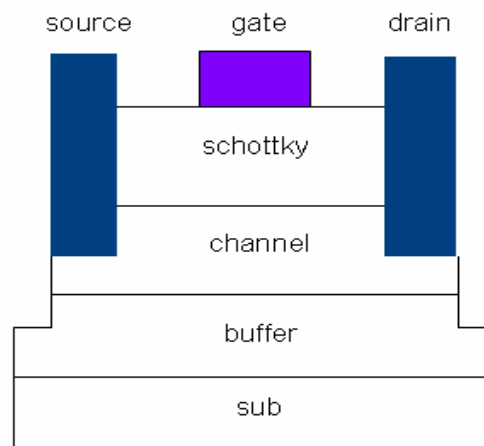


圖 3-1 基本 HEMT 幾何結構圖

由圖 3-2 可看出電子速度在高純度砷化鎵比在高濃度摻雜的砷化鎵快。溫度若降到 77K，不論在高純度砷化鎵或高濃度的砷化鎵，電子速度都比 300K 快。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

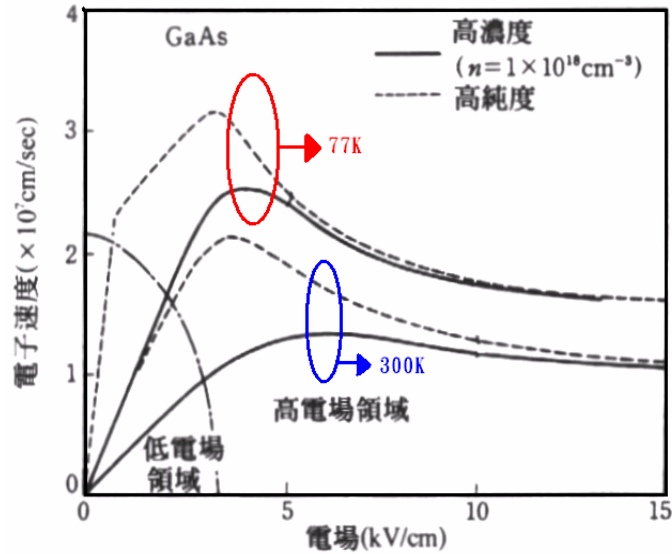


圖 3-2 砷化鎵中電子速度與電場及溫度的關係圖

高純度砷化鎵中的電子在半導體中的電子遷移率主要受兩種散射所影響：

(1) 極性聲子散射 (Polar Optical Phonon)

80K 以上，晶格熱擾動嚴重，此時雜質散射也比較不明顯。

因此溫度電子遷移率主要受到晶格熱擾動引起的極性聲子散射所影響。

(2) 雜質散射 (Ionized Impurity)

40K 以下，自由電子受施體雜質中，正離子的靜電引力牽引嚴重，此效應為「雜質散射」。

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT \quad (2.1)$$

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

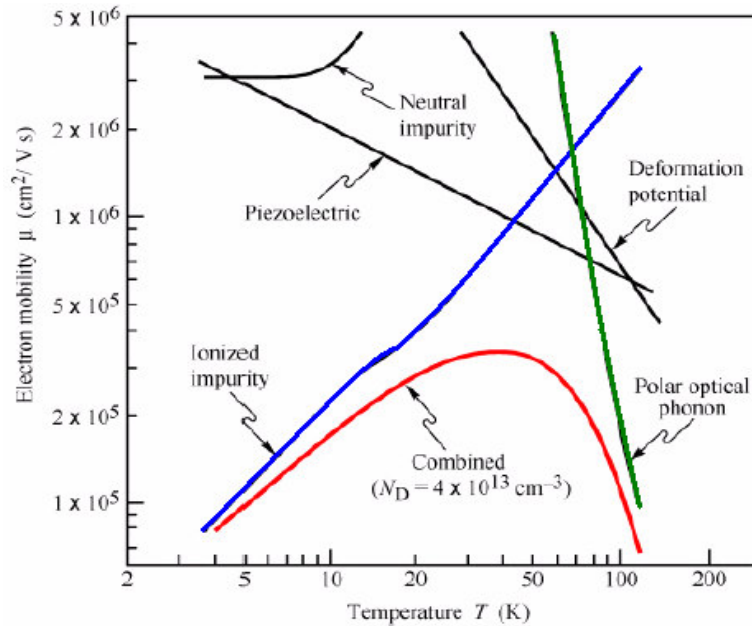


圖 3-3 高純度砷化鎵電子移動度與溫度及
各項散射因素對其的影響

藉由增大電子與解離施體雜質之間的間隔，雜質散射的效應還可以被進一步地降低。陡峭異質接面的位能井之中的電子是與施體原子分離的，但是他們仍然非常接近，因而可能還是會受制於庫倫吸引力。我們可以在摻雜的 AlGaAs 與無摻雜的 GaAs 之間置放一層薄且未摻雜的 AlGaAs 隔離層。圖 3-4 顯示這個結構的能帶圖。增大載子與解離施體之間的間隔會使電子遷移率進一步上升，這是因為雜質散射降低(庫倫交互作用變低)。這種漸變異質接面的一項缺點乃是位能井之中的電子密度會有比陡峭接面來得小的傾向。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

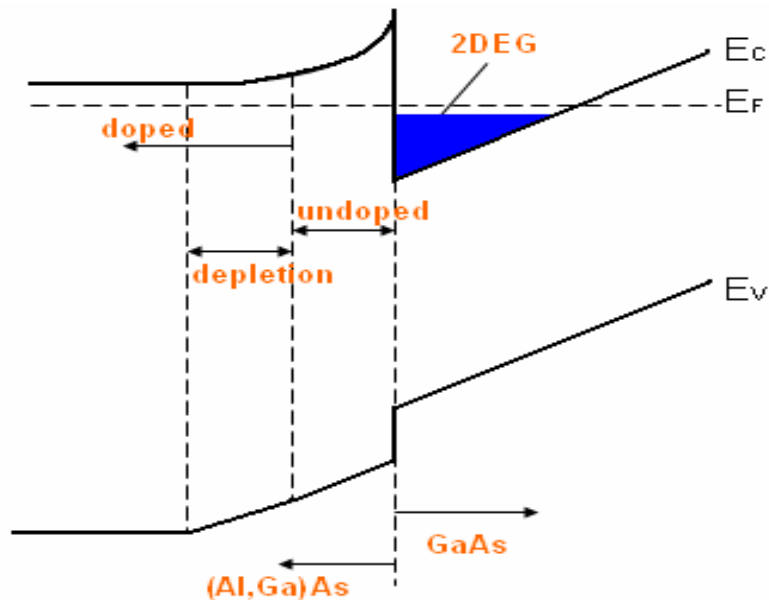


圖 3-4 N 型 AlGaAs-未摻雜 AlGaAs-未摻雜 GaAs

異質接面傳導帶邊緣

在 1981 年，典型 AlGaAs/GaAs 高電子移動率電晶體能提高速度，高增益及在微波元件有出色的功率特性。自從 1986 年，假晶性結構 HEMT 發展的非常迅速。其中利用 InGaAs 材料代替 GaAs 為二維電子氣通道層能提高 HEMT 以 AlGaAs/GaAs 為結構的特性。這個薄層 InGaAs 就像假晶性通道，能比 GaAs 層有更高的載子侷限能力，及在 AlGaAs/InGaAs 異質接面中有優良的傳導特性，此異質接面允許較高片狀電荷密度。因此，比典型以 AlGaAs/GaAs 為結構的 HEMT 有較高的電流密度和轉導值。

因為在 InGaAs 通道層與 AlGaAs 之間晶格不匹配，圖 3-6，所以 InGaAs 層必須控制的很薄，以至於晶格不匹配的問題可以改善，成

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

為一個必要的假晶性電子自由位移的材料。從前 InGaAs 層的厚度往往超過臨界厚度而造成晶格的位移，當為了維持晶格匹配把銦的摻雜計量提高會使臨界厚度下降，所以當注入高含量的銦時 InGaAs 層的厚度就必須設計的更薄。當提高銦的計量時有以下幾點好處：

- (1) 高電子移動率。
- (2) 高載子侷限力。
- (3) 高電流密度。
- (4) 高轉導值。
- (5) 高單位電流增益頻率。
- (6) 低源極電阻值。

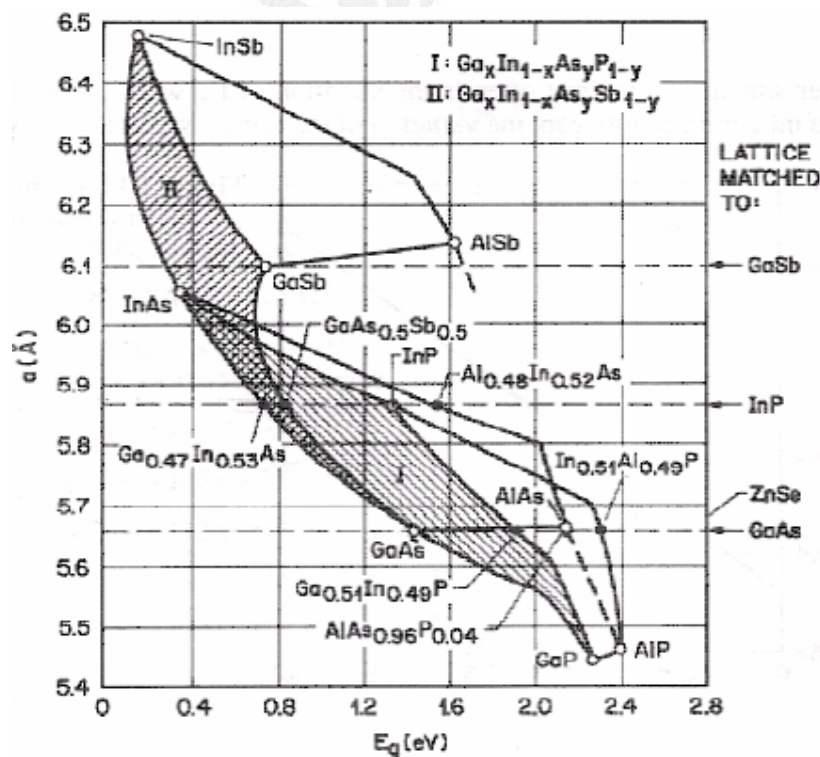


圖 3-5 III-V 族材料能帶對晶格常數匹配圖

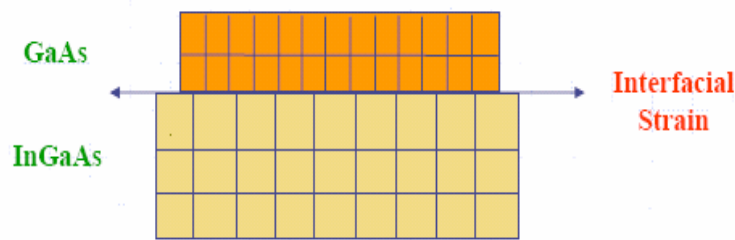


圖 3-6 假晶性結構

許多研究都在改進緩衝層特性，以提高絕緣通道特性和消除在基板上造成的電性影響。典型未摻雜 GaAs 緩衝層電子會藉由 Drain(汲極)和 Source(源極)電場注入緩衝層，所以不能提供好的絕緣特性。但是具有較高電阻係數和較大能隙的 AlGaAs 可以預測會是一個較理想的緩衝層材料。另外，元件的性能與磊晶參數有密切的關係，介面品質不好造成電子移動率下降，這也是為什麼通道層難獲得較好介面品質的主要原因。其中要改善這個問題是插入 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 磊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。

3-2 假晶性高電子移動率電晶體與通道摻雜式 場效電晶體之比較

3-2-1 假晶性高電子移動率電晶體之優缺點

優點：

- (1) 避免雜質散射效應。
- (2) 高電子傳輸能力。
- (3) 高微波特性。

缺點：

- (1) 元件線性度差。
- (2) 低崩潰電壓。
- (3) 低功率特性。

3-2-2 通道摻雜式場效電晶體之優缺點

優點：

- (1) 通道載子濃度高。
- (2) 元件線性度高。
- (3) 高崩潰電壓。
- (4) 高輸出功率。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

缺點：

- (1) 有雜質散射效應。
- (2) 電子移動率差。
- (3) 低微波特性。

3-2-3 雙 δ -摻雜通道摻雜式異質結構場效電晶體優點

優點：

- (1) 減低雜質散射效應的影響。
 - (2) 改善元件線性度。
 - (3) 增強電子傳輸能力。
 - (4) 增強電流驅動能力。
 - (5) 改善微波特性。
 - (6) 改善功率特性。
- 

第四章 砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵異質場 效電晶體元件結構

在這一章裡，將介紹利用低壓金屬有機化學氣相沉積系統在(100)方向的半絕緣砷化鎵基座成長的三種研究元件結構。而三甲基銦(TMIn)、三甲基鎵(TMGa)、三甲基鋁(TMAI)與砷化氫(AsH_3)分別當作銦、鎵、鋁、砷的來源。最後我們也會介紹霍爾量測的結果。

4-1 元件結構

圖 4-1 是樣本 A (通道摻雜式異質結構場效電晶體)的結構橫向切面圖。最底層為半絕緣體的砷化鎵基座，而它的上層是厚度 1000 Å 的砷化鎵緩衝層，接下來是厚度是 1500 Å 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 緩衝層；再上一層是厚度為 150 Å 的 $n^+ \text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 通道層 ($n^+ = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)；然後是厚度為 1200 Å 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 蕭基層；最後是厚度為 600 Å 的 $n^+ \text{-GaAs}$ 覆蓋層 ($n^+ = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)。

圖 4-1 是樣本 B (假晶性高電子移動率電晶體)的結構橫向切面圖。最底層為半絕緣體的砷化鎵基座；而它的上層是厚度 1000 Å 的砷化鎵緩衝層，接下來是厚度是 1500 Å 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 緩衝層；之後在 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 緩衝層的上層嵌入一層很薄的 δ -摻雜 $\delta(n^+) = (1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$ ；之後是厚度為 50 Å 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 隔離層；再上一層是厚度為 150 Å 的未摻雜 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 通道層；之後是厚度為 50 Å 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

隔離層；然後在未摻雜 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 通道層的上部再嵌入一層很薄的 δ -摻雜 $\delta(n^+) = (3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$ ；之後是厚度為 $1200 \text{ \AA}$ 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 蕭基層；最後是厚度為 $600 \text{ \AA}$ 的 $n^+\text{-GaAs}$ 覆蓋層 ($n^+ = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)。

圖 4-3 是樣本 C (雙 δ -摻雜 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 通道摻雜式異質結構場效電晶體)的結構橫向切面圖。最底層為半絕緣體的砷化鎵基座；而它的上層是厚度 $1000 \text{ \AA}$ 的砷化鎵緩衝層；接下來是厚度是 $1500 \text{ \AA}$ 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 緩衝層；之後在 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 緩衝層的上部嵌入一層很薄的 δ -摻雜 $\delta(n^+) = (0.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$ ；之後是厚度為 $50 \text{ \AA}$ 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 隔離層；再上一層是厚度為 $150 \text{ \AA}$ 的 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 通道層 ($n = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)；之後是厚度為 $50 \text{ \AA}$ 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 隔離層；然後在 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 通道層的上部再嵌入一層很薄的 δ -摻雜 $\delta(n^+) = (2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$ ；之後是厚度為 $1200 \text{ \AA}$ 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 蕭基層；最後是厚度為 $600 \text{ \AA}$ 的 $n^+\text{-GaAs}$ 覆蓋層 ($n^+ = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)。

樣本 C 就是我們所研究的雙 δ -摻雜 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 通道摻雜式異質結構場效電晶體。而樣本 A 和樣本 B 是用來與樣本 C 做比較的，在這個結構裡的對稱漸變式的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 裡的通道中間的銦含量最高為 ($x=0.2$)，之後越往兩側的方向銦含量就呈線性的減少，直到銦含量為 0.15 。另外，與單 δ -摻雜載子供應層相比，雙 δ -摻雜載子供應層比較能夠增加在砷化銦鎵通道裡的載子濃度。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

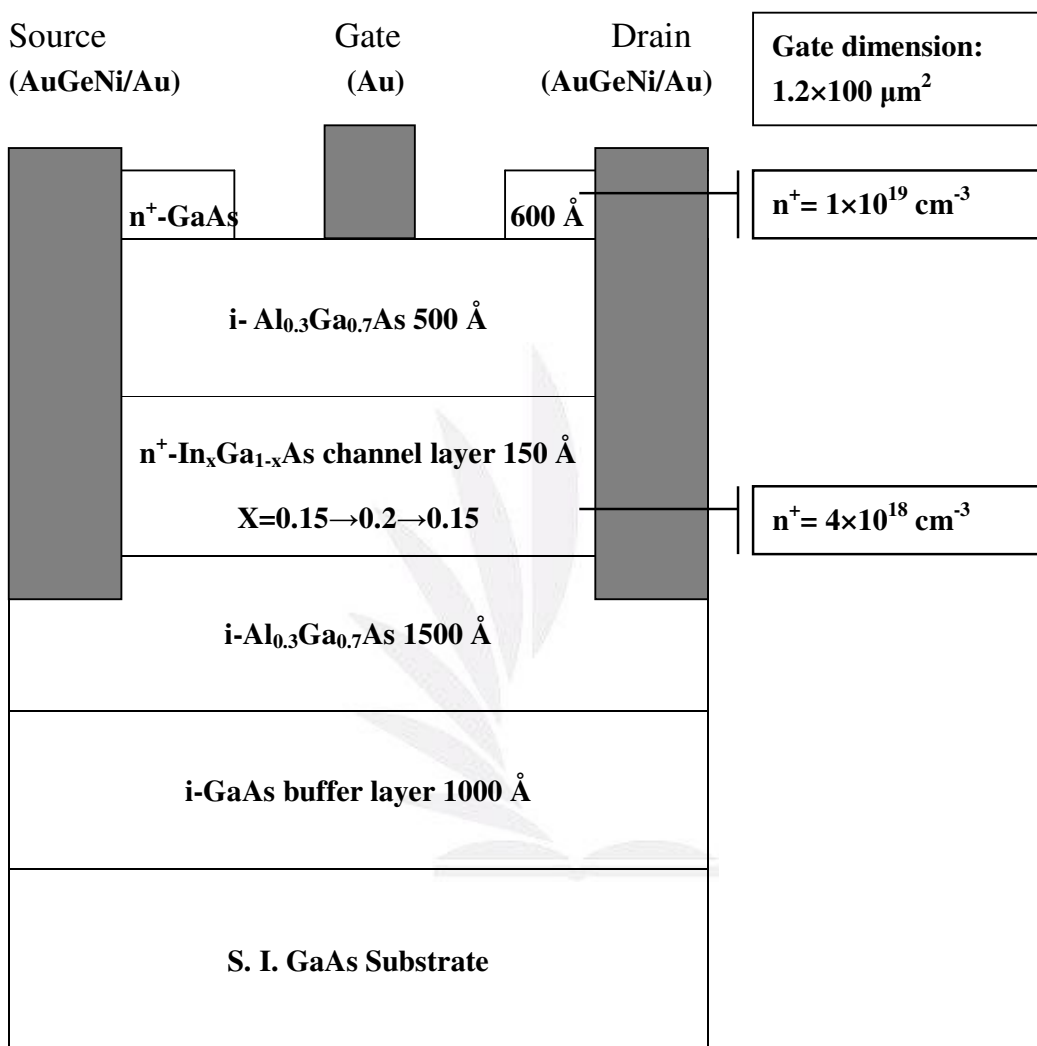


圖 4-1 樣本 A 的結構橫向切面圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

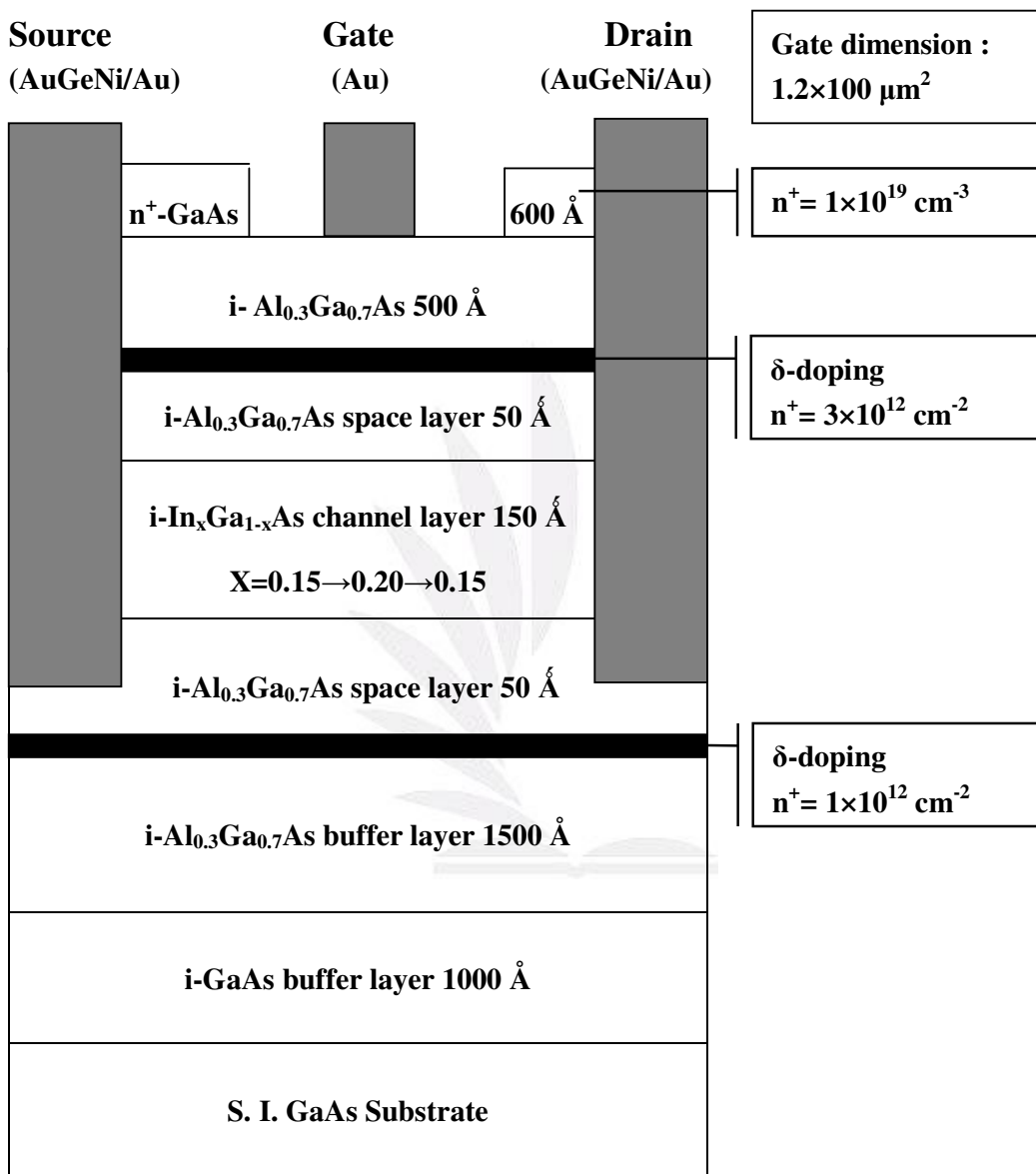


圖 4-2 樣本 B 的結構橫向切面圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

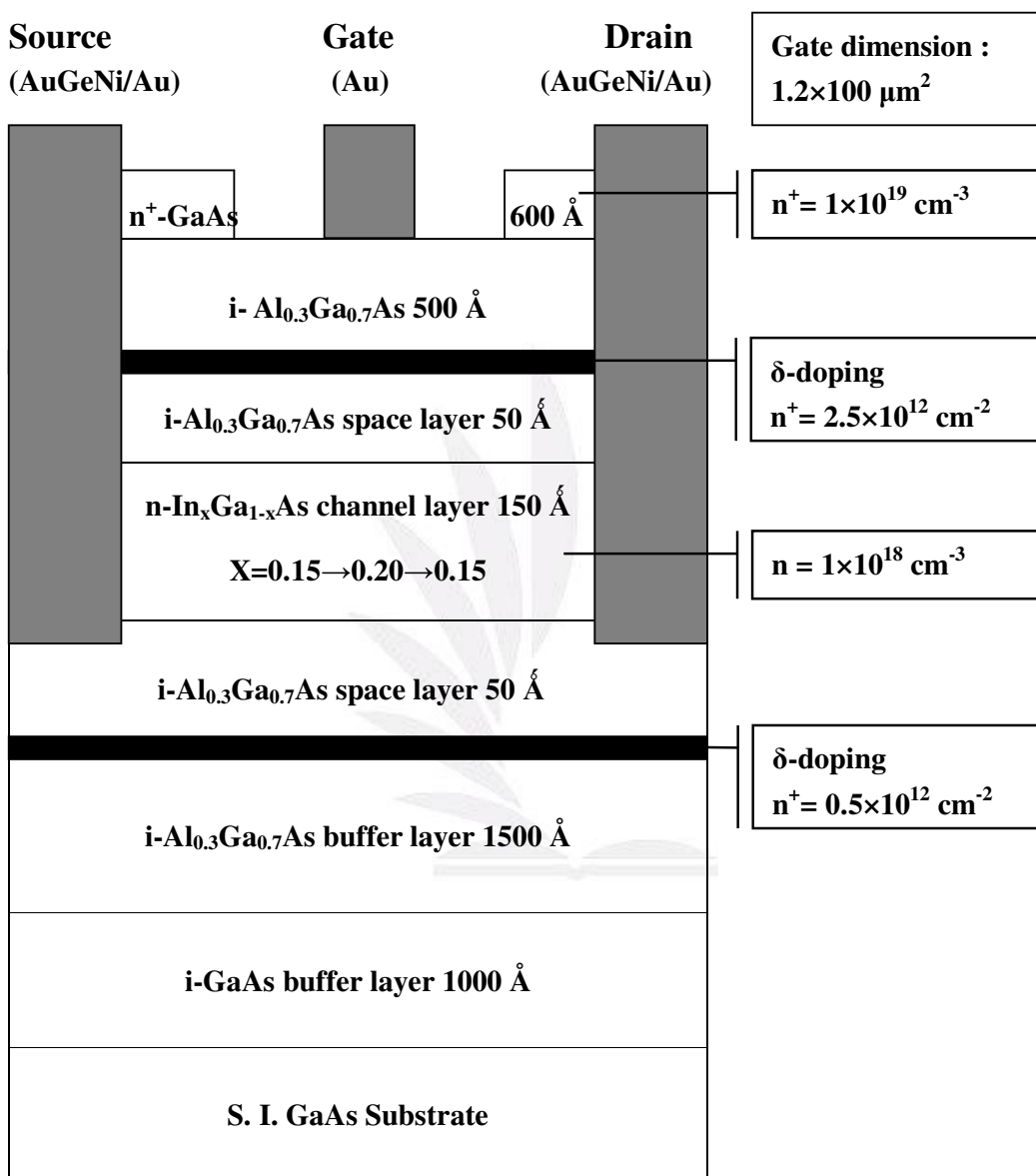


圖 4-3 樣本 C 的結構橫向切面圖

4-2 霍爾量測

為了做霍爾量測，我們從每個磊晶層內取一塊樣本來量測。然後經過量測就能得到霍爾移動率與載子濃度。而經由霍爾量測所得的數據，還能夠檢查磊晶成長結構的參數有沒有偏差太多，霍爾量測也能觀察到樣本在磁場 5000G 下，溫度 300 K 與 77 K 的二維電子氣濃度與電子移動率的特性：

	Sample A		Sample B		Sample C	
Temperature	300K	77K	300K	77K	300K	77K
$\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	2804	14380	4675	21757	3850	18000
$n_s(\text{cm}^{-2})\times 10^{12}$	3.91	3.67	3.1	2.55	3.41	3.01
$\mu \times n_s (1/\text{V}\cdot\text{s}) \times 10^{16}$	1.10	5.27	1.44	5.55	1.31	5.42

表 4-1 霍爾量測數據

表 4-1 列出樣本 A、樣本 B、樣本 C，各別的二維電子氣載子濃度與電子移動率。與假晶性高電子移動率電晶體相比，典型的通道摻雜式結構具有低電子移動率與高片電荷密度等特性。造成這種結果是因為摻雜的砷化銦鎵通道裡的雜質散射的因故，因此雜質散射在摻雜半導體裡扮演極重要的角色。但是通道裡的具有高片電荷密度，因此可以在通道裡觀察到很高的載子濃度。另一方面，假晶性高電子移動

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

率電晶體所呈現出來的高電子移動率，是因為通道裡的雜質散射效應消除的因故。所以，樣本 C 為了增強通道裡的載子濃度，不但利用微量摻雜的 n 型砷化銦鎵通道，還使用雙 δ -摻雜的載子供應層來加強。

根據這些結果，電子移動率與片電荷濃度之成果與飽和汲極電流以及外部轉導值相對稱。由於這些結果，我們期盼樣本 C 能改善樣本 A 與樣本 B 的不良特性。



第五章 實驗結果與討論

在這一章裡，將會量測 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 異質結構場效電晶體的特性。之後會討論元件特性，包括直流特性、射頻特性、功率特性、雜訊特性以及溫度變化特性。

5-1 在 300 K 的直流特性

對所有的元件來說，閘極的面積都為 $1.2 \times 100 \mu\text{m}^2$ 。而源極到汲極的距離為 $10 \mu\text{m}$ 。之後所有元件的測量是使用 KEITHLEY4200 所完成的。

5-1-1 電流-電壓特性

圖 5-1、5-2、5-3 各代表在室溫下樣本 A、樣本 B、樣本 C 的汲極電流密度相對於汲極-源極電壓的特性。顯然地，從所研究的元件能發現好的夾止與飽和特性。由於 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 位障層的高電阻率與高能隙，所以能夠大大地減少電子進入緩衝層以及能抑制基座的漏電流，而擁有優越的載子侷限能力與夾止特性。

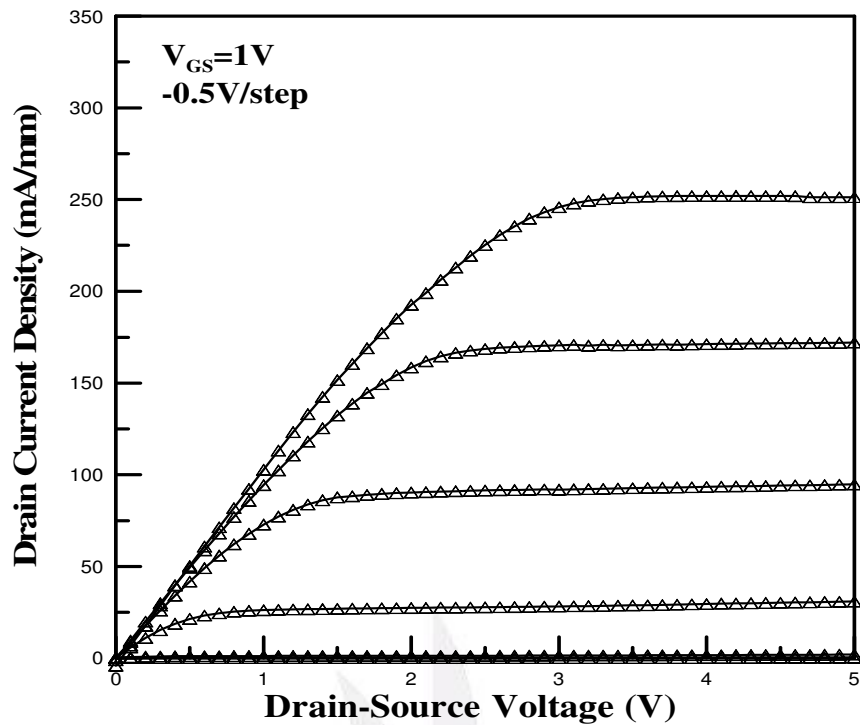


圖 5-1 樣本 A 在 300K 時，電流-電壓特性圖

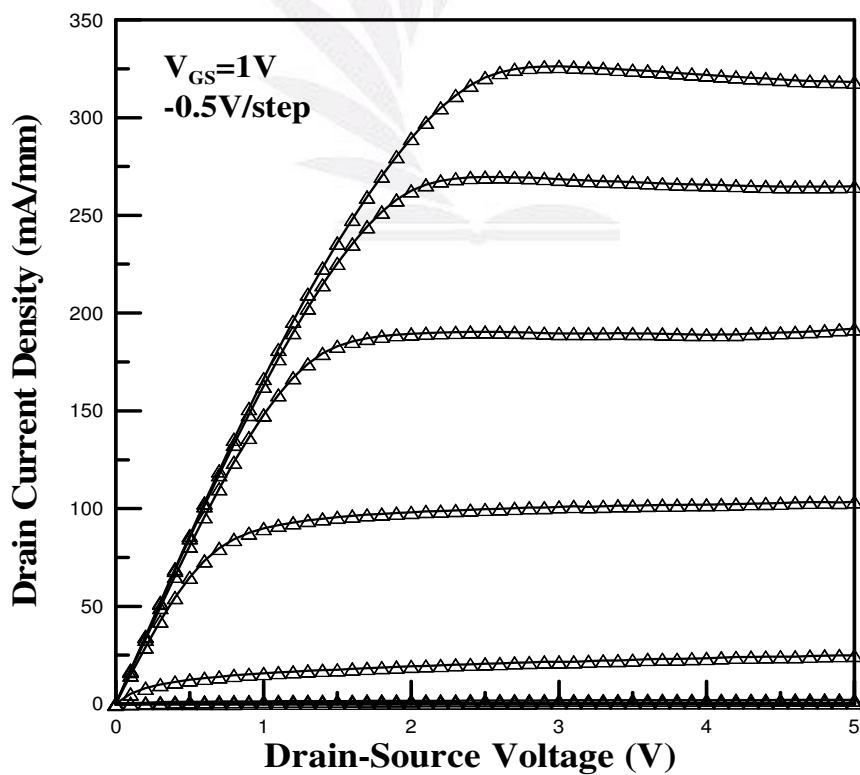


圖 5-2 樣本 B 在 300K 時，電流-電壓特性圖

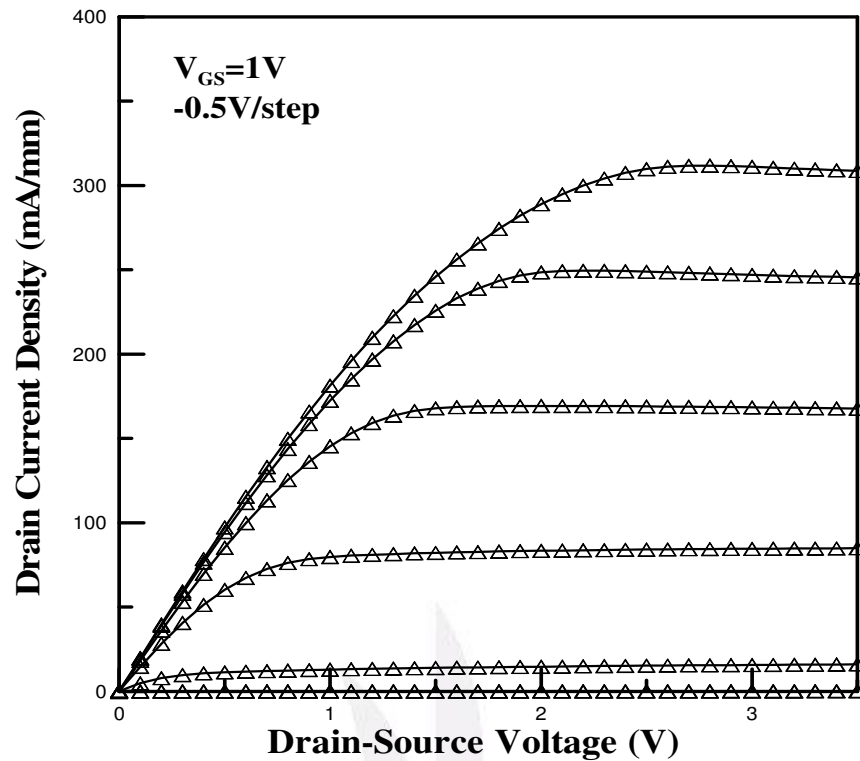


圖 5-3 樣本 C 在 300K 時，電流-電壓特性圖

5-1-2 外部轉導值特性

圖 5-4、5-5、5-6 各表示樣本 A、樣本 B、樣本 C 在 $V_{DS}=3V$ 下，所量測到的閘極到源極電壓是以外部轉導值(g_m)與飽和汲極電流密度(I_{DS})為函數所得到的。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

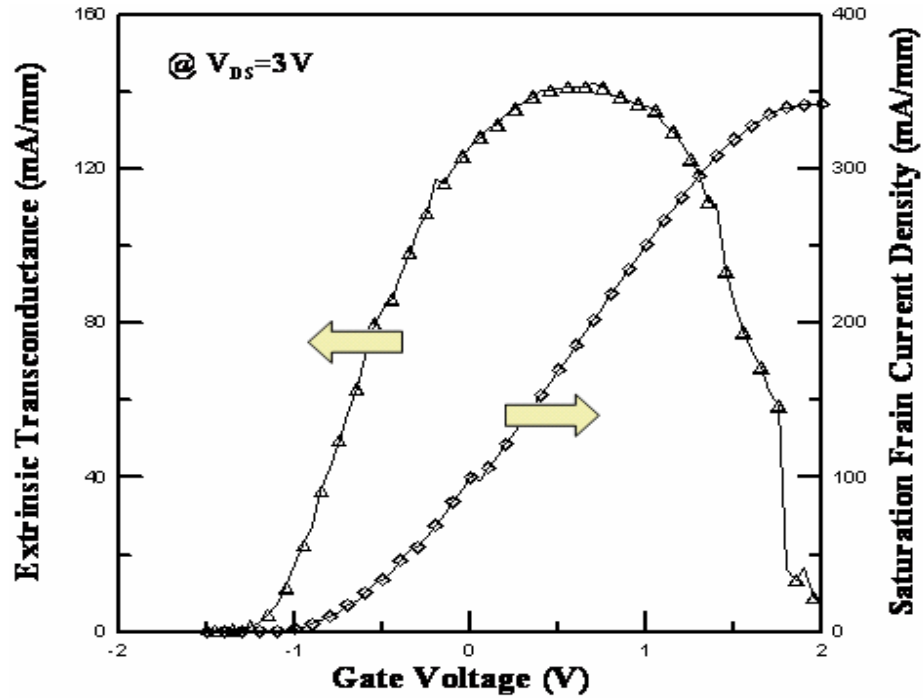


圖 5-4 樣本 A 在 $V_{DS}=3 V$ 下外部轉導值與飽和汲極電流密度的曲線圖

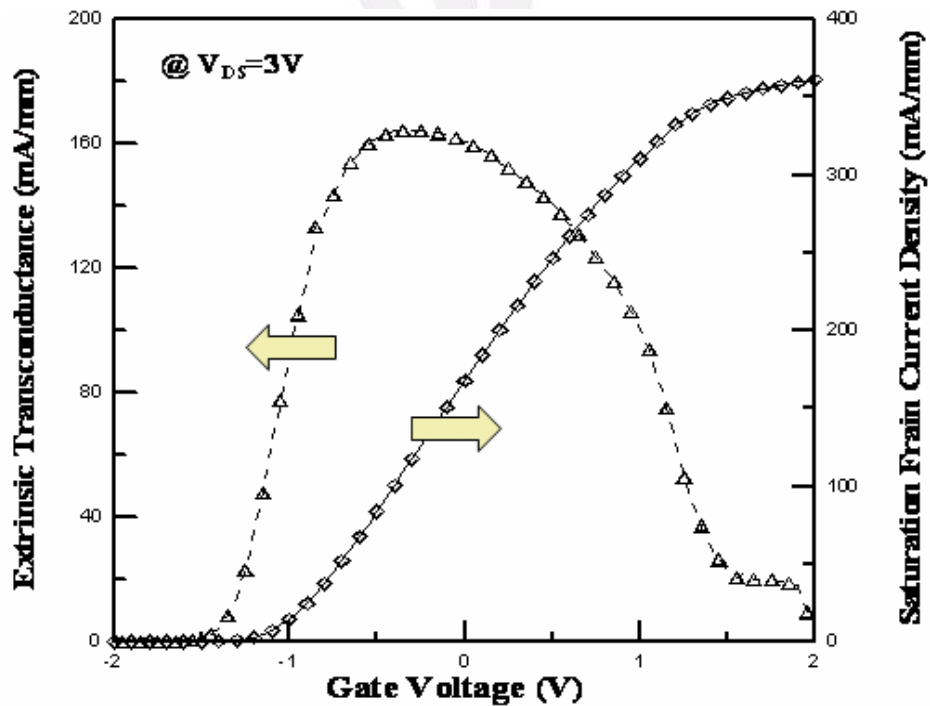


圖 5-5 樣本 B 在 $V_{DS}=3 V$ 下外部轉導值與飽和汲極電流密度的曲線圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

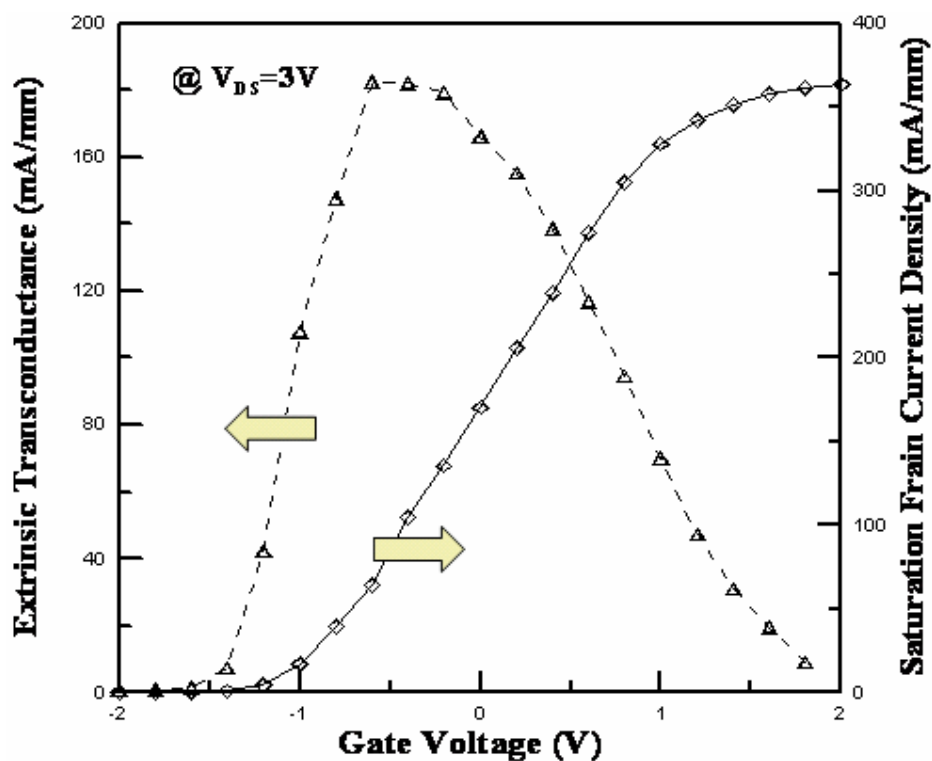


圖 5-6 樣本 C 在 $V_{DS}=3$ V 下外部轉導值與飽和汲極電流密度的曲線圖

在表 5-1 裡，能觀察到樣本 B 的 g_m 值大於樣本 A 以及樣本 C。

那是因為樣本 B 減少了雜質散射效應與增加在砷化銦鎵通道裡的電子傳輸，所以 g_m 值才會比較大。

	Sample A	Sample B	Sample C
I_{dss} (mA/mm)	99.9	193.6	167.9
$I_{d,max}$ (mA/mm)	342	363	360
$g_{m,max}$ (mS/mm)	140	182	164
V_{th} (V)	-1.05	-1.36	-1.30
GVS(V)	1.25	0.75	1.07

表 5-1 三種元件的 g_m 、 I_{DS} 、 V_{th} 以及 GVS

而表 5-1 裡也列出了汲極到源極的飽和電流密度(I_{dss})與最大飽和汲極電流密度($I_{d,max}$)。而樣本 B 與樣本 C 因為使用雙 δ -摻雜載子供應層導致通道裡的大量電子增加，所以它們擁有較大的電流密度。此外，汲極飽和電流與外部轉導值可以以下的式子表示：

$$I_{DS} = \frac{\epsilon\mu W}{2L(d + \Delta d)} (V_G - V_{off})^2 = \frac{q^2 W (d + \Delta d)}{2L\epsilon} \mu n_s^2 \quad (5.1)$$

與

$$g_m = \frac{\partial V_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{\epsilon\mu_s W}{(d + \Delta d)L} (V_G - V_{off}) = \frac{W}{L} q\mu n_s \quad (5.2)$$

式子裡的 Δd 是隔離層與通道層交界表面的有效二維電子氣位置。 d 是閘極到隔離層與通道層交界表面的距離；至於 ϵ 是介電常數。明顯地，與霍爾量測資料相比，樣本 B 擁有較高的 $g_{m,max}$ 與 $I_{d,max}$ 。

我們能藉由算出閘極偏壓並假設 $\sqrt{I_D}$ 為零，而估計臨限電壓的值。這是因為當輸出傳導值很小滿足臨限電壓並且當汲極飽和電壓固定時汲極電流密度與方程式(5.3)將一致，如下所示：

$$\sqrt{I_D} \propto \beta(V_{GS} - V_{th}) \quad (5.3)$$

從表 5-1 中可以發現到樣本 A 呈現出較低的臨限電壓，這是因為通道摻雜在通道裡的載子侷限能力比另兩種樣本好的緣故。另一方面，在下層的 δ -摻雜載子供應層會造成電子射入基底，因而增加漏電流。

此外，在這裡我們定義閘極偏壓擺幅與 I_{DS} 的操作區域為最大外部轉導值下降 10% 的範圍。圖 5-7 為三種樣本的外部轉導值與汲極電流密度的特性比較圖。顯然地，通道摻雜式結構表現出較大的閘極電壓擺幅(GVS)與較好的線性度。這是因為在通道裡載子均勻分佈的原因。當操作電壓固定為 $V_{DS}=3\text{ V}$ 時，樣本 A、樣本 B、樣本 C 相對應的線性 I_{DS} 操作範圍分別是 175、152、170 mA/mm。

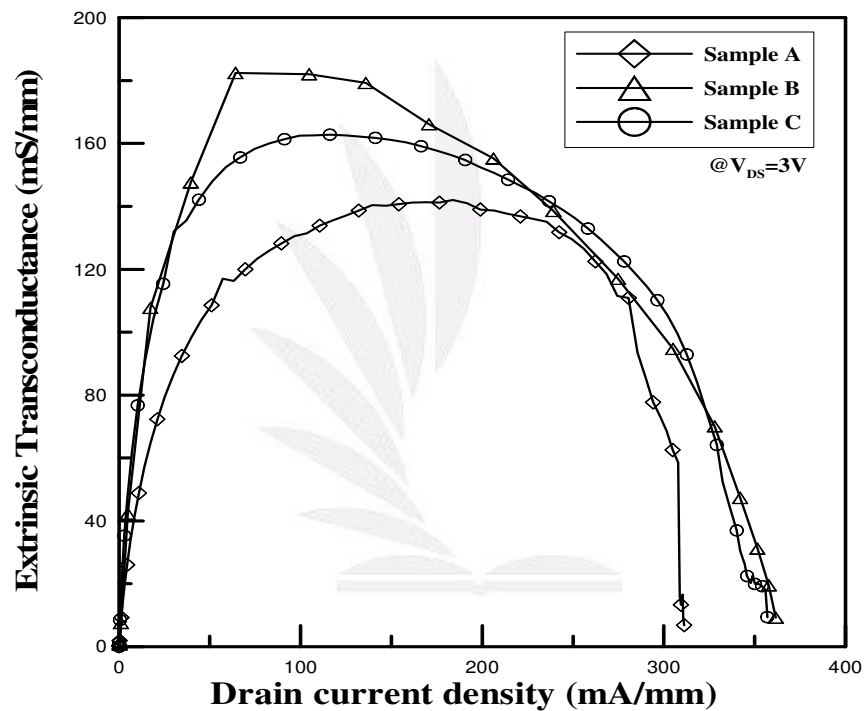


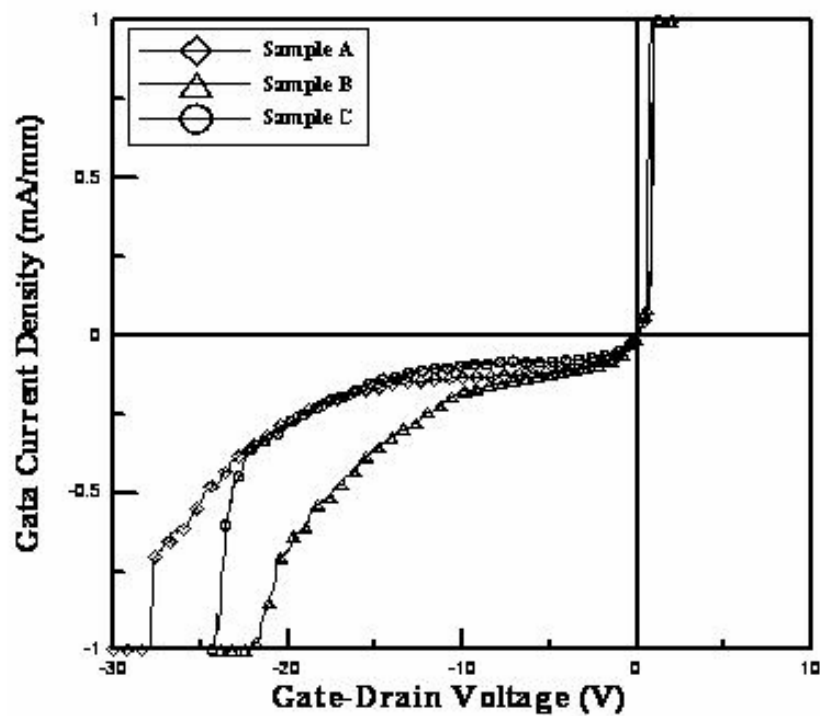
圖 5-7 為三種樣本的外部轉導值與汲極電流密度的特性曲線圖

5-1-3 兩端崩潰電壓特性

圖 5-8 表示三種樣本在室溫下的兩端閘極-汲極崩潰電壓(BV_{GD})與順向導通電壓(V_{on})特性。當閘極電流與閘極寬度(I_G/W)值到達 1 mA/mm 時，定義閘極-汲極電壓為兩端崩潰電壓。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

(a)



(b)

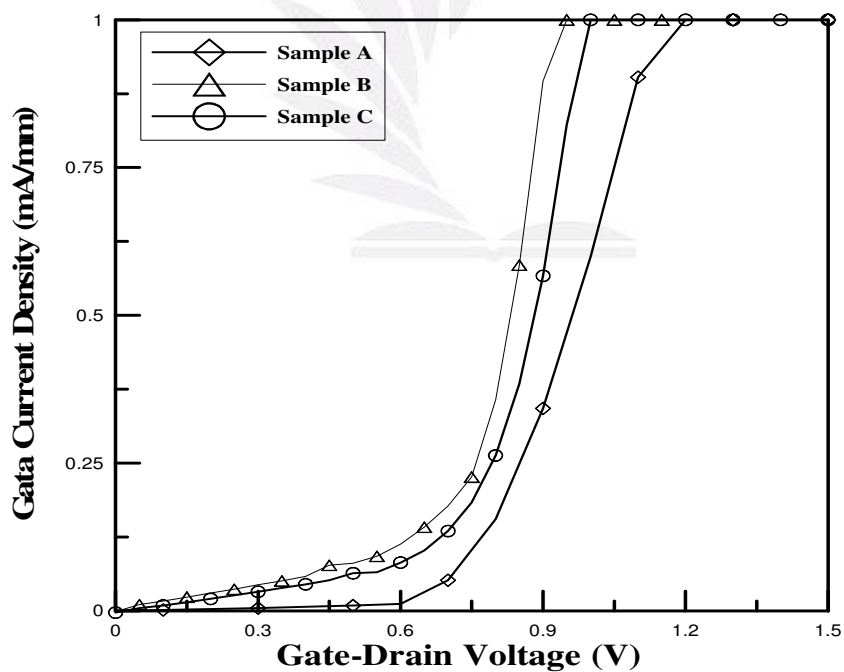


圖 5-8 在 300k 下，三種樣本的(a)兩端點崩潰電壓與(b)導通電壓的特性比較圖

	Sample A	Sample B	Sample C
BV_{GD} (V)	27.9	22	24.3
Turn-on (V)	1.2	0.95	1.0

表 5-2 三種樣本的兩端特性

表 5-2 中可以發現樣本 A 有較高的閘極-汲極崩潰電壓與順向導通電壓，這是因為在通道與閘極金屬間的摻雜通道沒有載子供應層的因故。而從閘極漏電流形成兩個主要問題：

- (1) 電子入射經由熱電子場發射效應(Thermionic-Field Emission)。
- (2) 穿隧機制穿過蕭基閘極位障。

對於樣本 B 與 C 而言，上層的 δ -摻雜載子供應層可能造成蕭基位障降低，而導致電子更容易從閘極穿透到通道，因此讓閘極漏電流上升。

5-1-4 輸出傳導性

圖 5-9、5-10、5-11 各表示每一種樣本的外部轉導值、輸出傳導值與電壓增益特性。而本質電壓增益可以以下式表示：

$$A_v = g_m \cdot r_o = \frac{g_m}{g_d} \quad (5.4)$$

	Sample A	Sample B	Sample C
g_m (mS/mm)	139	176	159
g_d (mS/mm)	0.76	1.12	0.9
A_v	181	159	176

表 5-3 三種元件的 g_m 、 g_d 與電壓增益

而從表 5-3 得知，樣本 A 與樣本 C 在 $V_{DS}=4$ V 時具有較低的輸出傳導值，這可歸咎於因為使用通道摻雜式結構而產生的雜質散射效應。以此方式也造成高輸出阻抗、低輸出傳導值和高電壓增益。此外，在飽和區具有低輸出傳導值可以提供較高的輸出阻抗，有利於電壓增益特性與減輕負載效應。

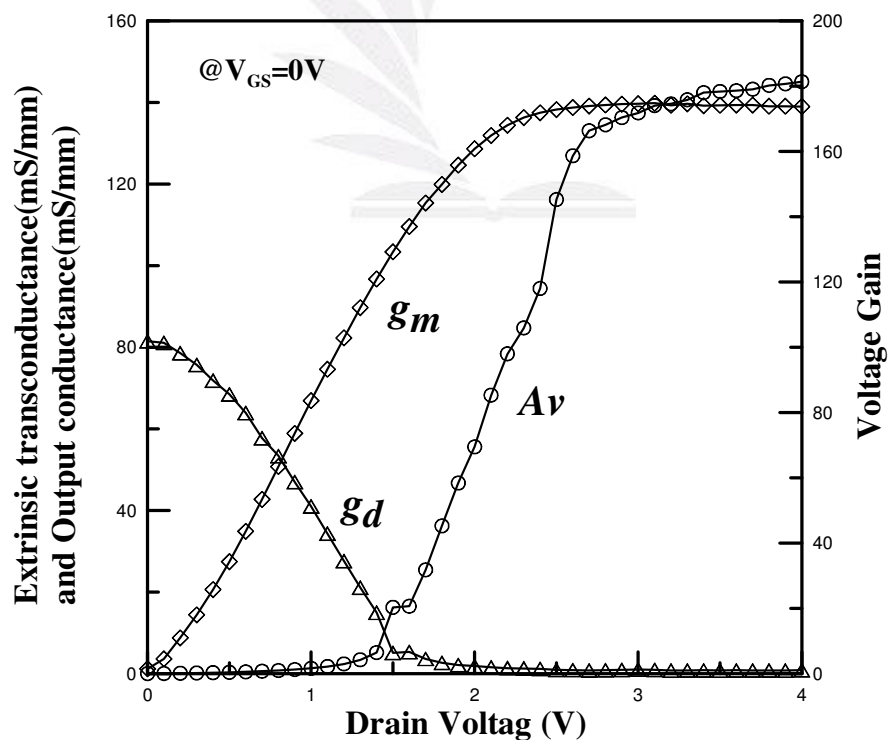


圖 5-9 樣本 A 的外部轉導值、輸出傳導值與電壓增益特性的曲線圖

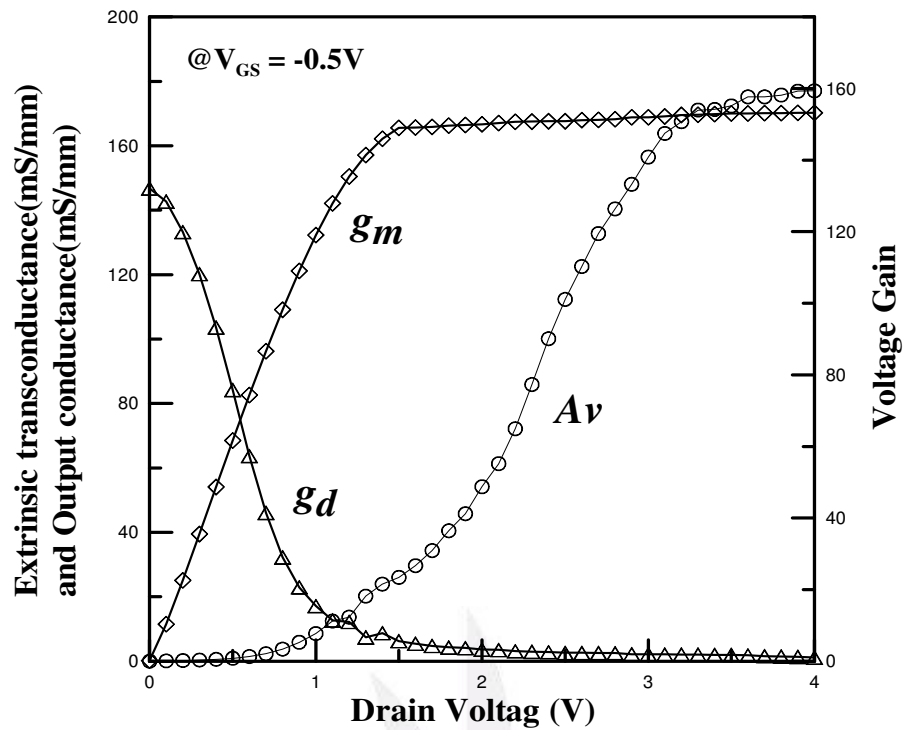


圖 5-10 樣本 B 的外部轉導值、輸出傳導值與電壓增益特性的曲線圖

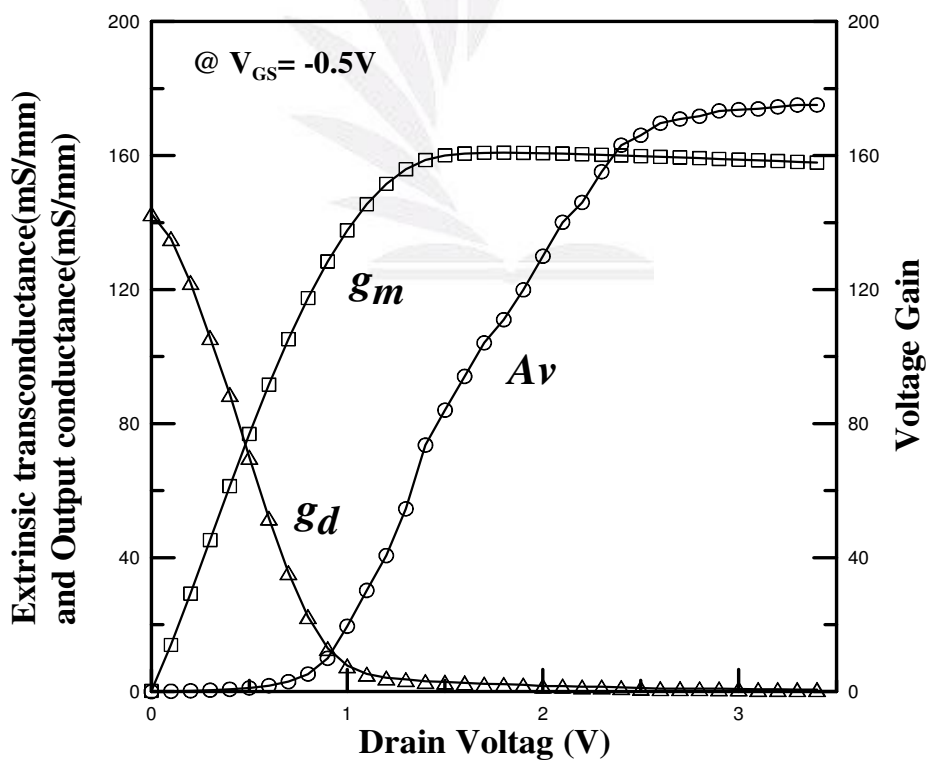


圖 5-11 樣本 C 的外部轉導值、輸出傳導值與電壓增益特性的曲線圖

5-2 射頻特性

此專題所研究的元件的微波特性的量測是由 HP8510B 所測量，而頻率範圍是 0.2 到 20 GHz。對三種元件來說，閘極的面積都是 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ ，以及源極到汲極的距離都是 $7 \mu\text{m}$ 。而商業用的模擬軟體如 HP Eesof Touchstone 是利用來分析 S 參數的。量測此元件的電晶體 S 參數可利用短電路增益(H_{21})與最大有效增益(MAG)來決定如下：

$$|H_{21}| = \frac{-2S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12} \cdot S_{21}} \quad (5.5)$$

與

$$MAG = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \cdot (k - \sqrt{k^2 - 1}) \quad (5.6)$$

其中的 k 如下表示

$$k = \frac{1 - |S_{21}|^2 - |S_{22}|^2 + |S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}|}{2 \cdot |S_{12} \cdot S_{21}|} \quad (5.7)$$

從方程式(5.6)能得知，如果 k 值小於 1，那麼 MAG 將會變成無意義。此外，如果 k 值等於 1，那麼所觀察到的 MAG 將變成最大穩定功率增益(MSG)。而最大穩定功率增益可以如下表示：

$$MSG = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \quad (5.8)$$

而夾止頻率 f_T 可以在 0dB 時所觀察的短電路電流增益 H_{21} 得知。

$f_{\max}$ 可以從 MAG 觀察到。此外， f_T 與 $f_{\max}$ 可以如下列表示：

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

$$f_T \approx \frac{g_m}{2\pi(C_{GS} + C_{GD})} \quad (5.9)$$

與

$$f_{\max} \approx \frac{f_T}{2[G_0(R_G + R_S) + 2\pi C_{GD}]^{1/2}} \quad (5.10)$$

	Sample A	Sample B	Sample C
Gate bias(V)	0	-0.5	-0.5
f_T (GHz)	13.3	21.5	17.1
$f_{\max}$ (GHz)	30	43	34.5

表 5-4 當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，三種元件的 f_T 與 $f_{\max}$.

圖 5-12、5-13 和 5-14 各表示三種樣本的電流增益、夾止頻率(f_T)與最大震盪頻率($f_{\max}$)。表 5-4 總括在 $V_{DS}=3 \text{ V}$ 下，三種元件的 f_T 與 $f_{\max}$ 值。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

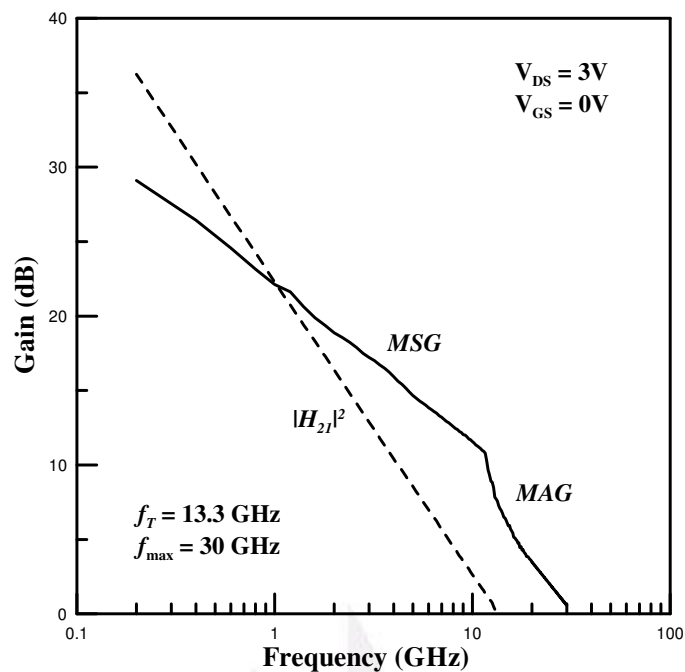


圖 5-12 樣本 A 的電流增益、夾止頻率(f_T)與最大震盪頻率(f_{max})的特性

曲線圖

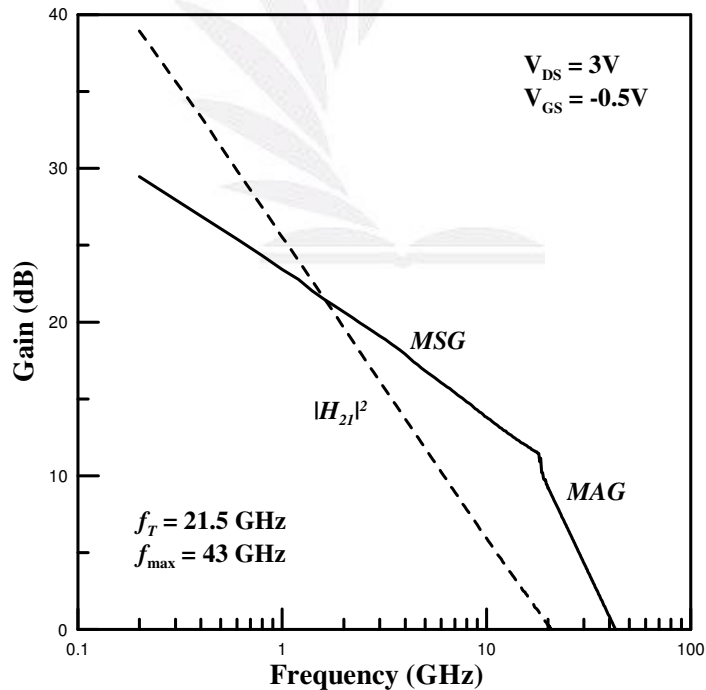


圖 5-13 樣本 B 的電流增益、夾止頻率(f_T)與最大震盪頻率(f_{max})的特性

曲線圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

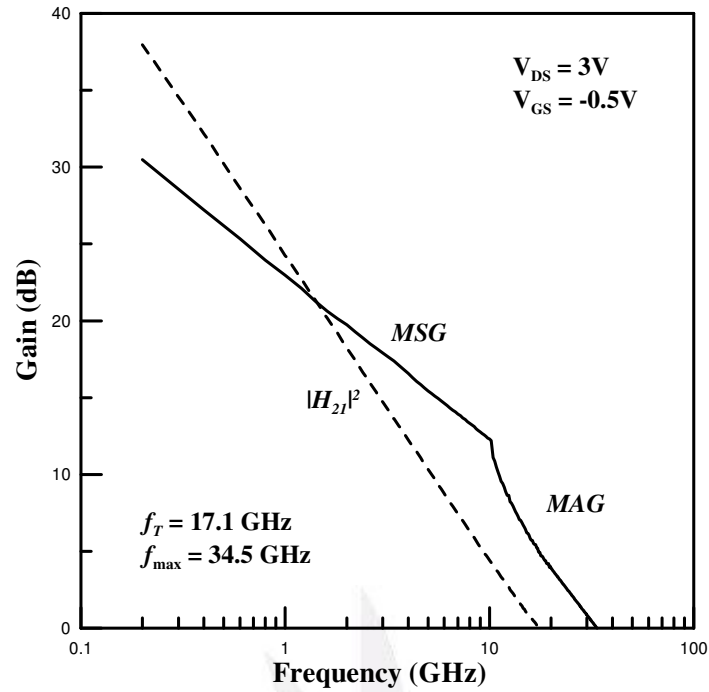


圖 5-14 樣本 C 的電流增益、夾止頻率(f_T)與最大震盪頻率(f_{max})的特性

曲線圖

5-3 功率特性

下式是功率增加效能(P.A.E)：

$$\eta_{add} = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \times 100\% \quad (5.11)$$

上式可以假設為輸入直流功率轉變為輸出交流功率的比值。而量

測晶圓功率是在 2.4GHz 下。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

	Sample A	Sample B	Sample C
Gate bias(V)	-0.2	-0.5	-0.4
Output power(dBm)	13.29	12.49	12.75
Power gain(dB)	17.11	16.82	17.05
P.A.E (%)	49.03	44.1	48.84

表 5-5 2.4GHz 下，三種元件的功率特性

圖 5-15、5-16 與 5-17 各表示當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時所研究的三種元件的輸出功率、功率增益和功率增加效能(P.A.E)與輸入功率相對比的圖形。而表 5-5 總括三種樣本在 $V_{\text{DS}}=3\text{ V}$ 時，所有輸出功率、功率增益和功率增加效能的數值。

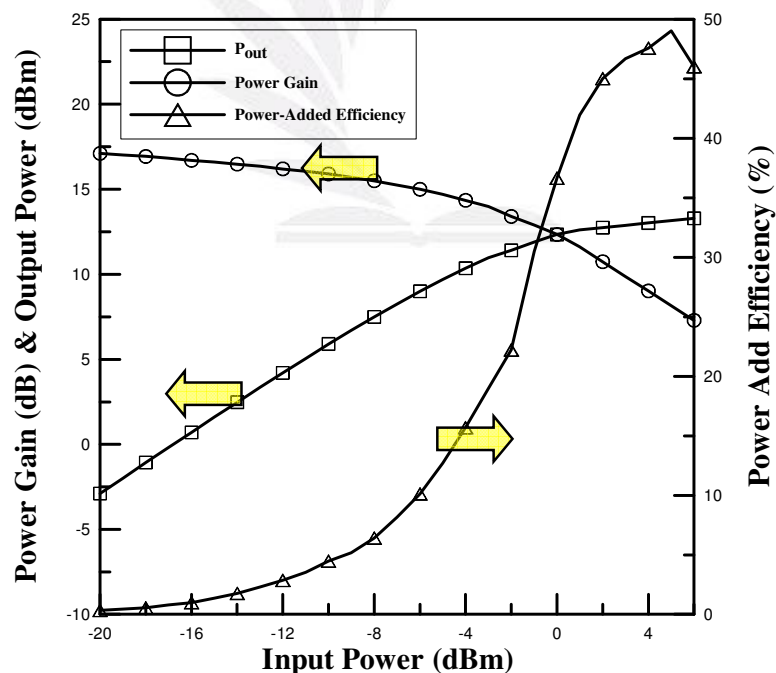


圖 5-15 當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，樣本 A 的輸出功率、功率增

益和功率增加效能(P.A.E)與輸入功率相對比的特性曲線圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

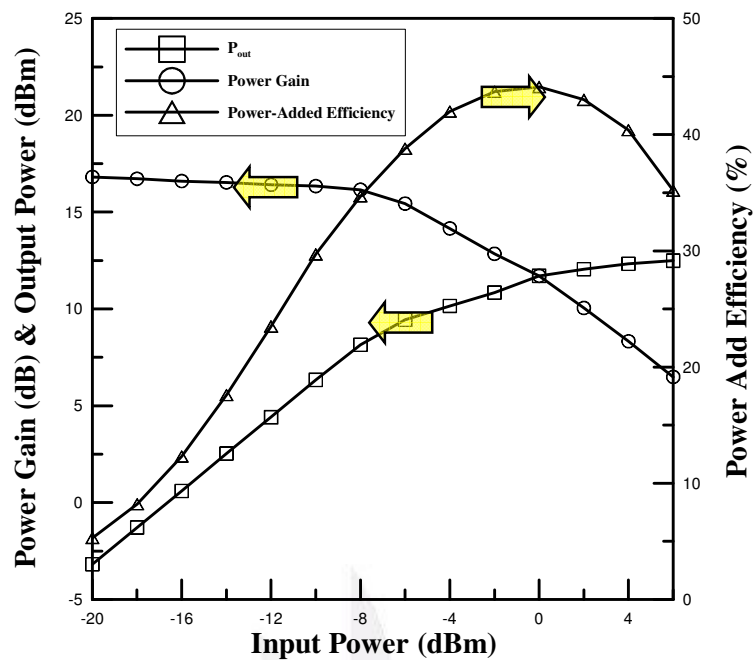


圖 5-16 當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu m^2$ 時，樣本 B 的輸出功率、功率增益和功率增加效能(P.A.E)與輸入功率相對比的特性曲線圖

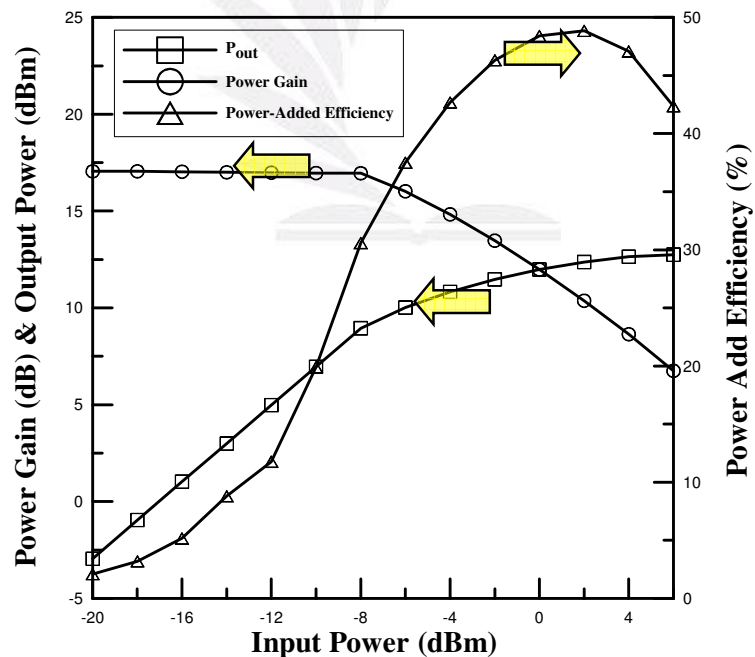


圖 5-17 當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu m^2$ 時，樣本 C 的輸出功率、功率增益和功率增加效能(P.A.E)與輸入功率相對比的特性曲線圖

5-4 雜訊特性

圖 5-18、5-19 與 5-20 各表示當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，所研究的三種元件的最小雜訊值數值($\text{NF}_{\min}$)和相關增益與頻率相對比的圖形。而雜訊特性的測量是藉由 HP8970B 雜訊數值儀表在 1.2 到 7.2GHz 的頻率範圍下所量測的。

高的汲極電流會因為產生雜質散射效應而導致產生雜訊。因此雜訊可以藉由電流的降低而減少。然而，減少電流會降低傳導值。而較低的傳導值會伴隨著增益降低而增加雜訊值。因此，就有一個最大限度的偏壓條件來達到最低雜訊特性。而最小雜訊數值($\text{NF}_{\min}$)的方程式如下：

$$\text{NFmin} \approx 1 + 2\pi f K C_{gs} \sqrt{\frac{R_s + R_g}{g_m}} \quad (5.12)$$

	Sample A	Sample B	Sample C
Gate bias(V)	-0.2	-0.5	-0.45
$\text{NF}_{\min}$ (dB)	1.33	1.2	1.25
Associated gain(dB)	13.75	18.74	15.62

表 5-6 在 2.4GHz 下，三種元件的雜訊特性

表 5-6 列出最小雜訊數值($\text{NF}_{\min}$)與相關增益與頻率相比照的值。從方程式(12)得知，由於較高的 g_m 值，所以樣本 B 與 C 具有比樣本 A 低的 $\text{NF}_{\min}$ 值。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

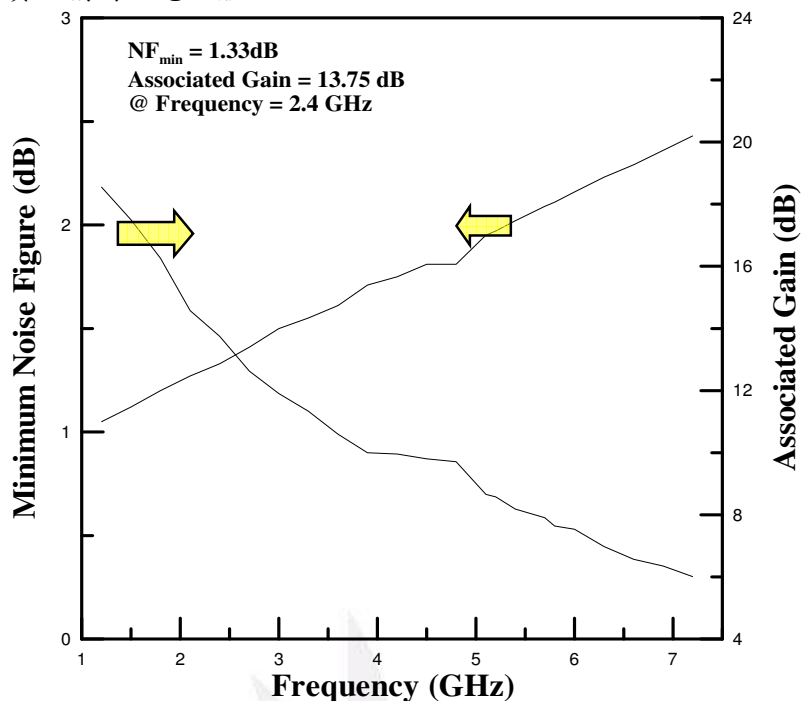


圖 5-18 當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，樣本 A 的最小雜訊值數值

(NF_{min})和相關增益與頻率相對比的圖形

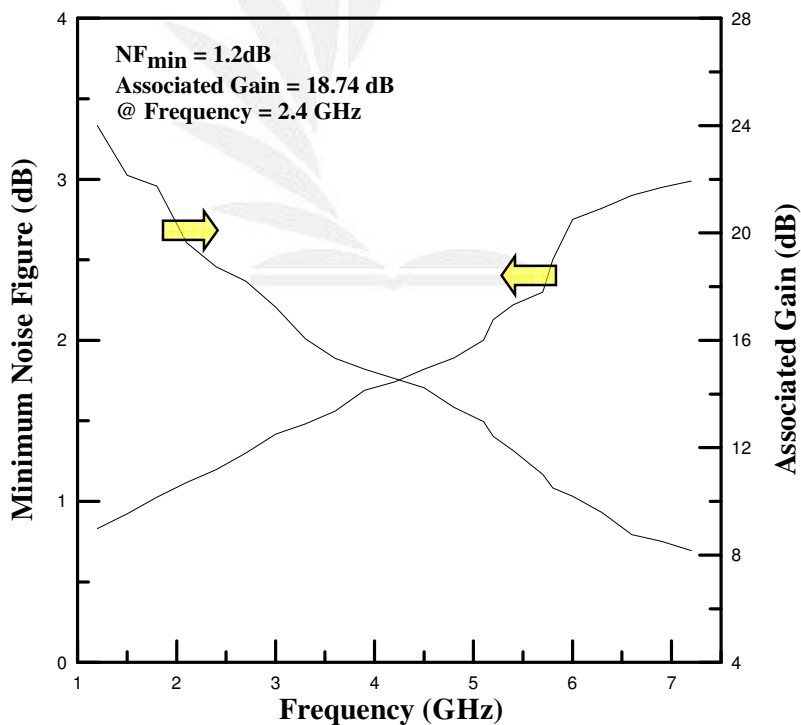


圖 5-19 當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，樣本 B 的最小雜訊值數值

(NF_{min})和相關增益與頻率相對比的圖形

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

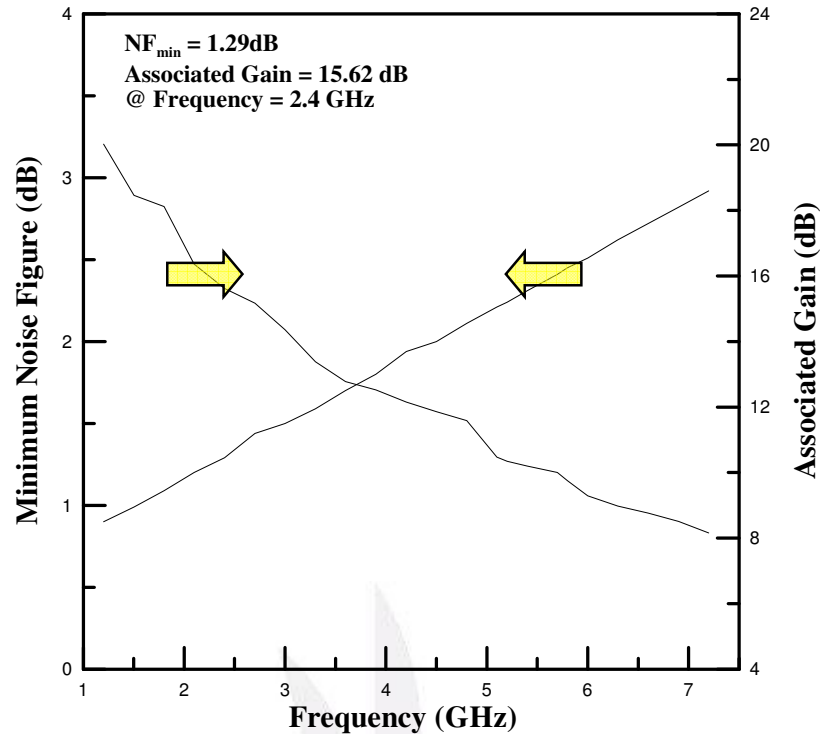


圖 5-20 當閘極面積為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 時，樣本 C 的最小雜訊值數值

($\text{NF}_{\min}$)和相關增益與頻率相對比的圖形

5-5 與溫度相關的特性

5-5-1 外部轉導值特性

圖 5-21、5-22 與 5-23 各顯示三種樣本在 $V_{\text{DS}}=3 \text{ V}$ ，且改變溫度的情況下，以外部轉導值與飽和汲極電流密度和閘極到源極電壓相比較的特性曲線圖。從中可以發現，當溫度上升時，最大外部轉導值會下降，這是因為汲極電流密度下降的原因。圖 5-24 可以發現當溫度變高時，最大外部轉導值一定會下降。而圖 5-25 顯示出散射機制與溫度的關係。兩種最主要的散射機制是雜質散射與聲子晶格散射。

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

由於砷化銦鎵通道層沒有摻雜，因此當電子在此區域移動時並沒有雜質散射效應發生。因此，假晶性高電子移動率電晶體是被聲子晶格散射機制所控制。另外，它亦容易因溫度改變而影響。然而，假晶性高電子移動率的通道摻雜式結構是十分重要的設計，它在通道層採用重摻雜來取代未摻雜。因此，通道摻雜式元件變成是被雜質散射所牽制。這也意謂減少了溫度變化所引起的影響。另一方面，通道摻雜式結構改善了在高溫時的電子移動率。

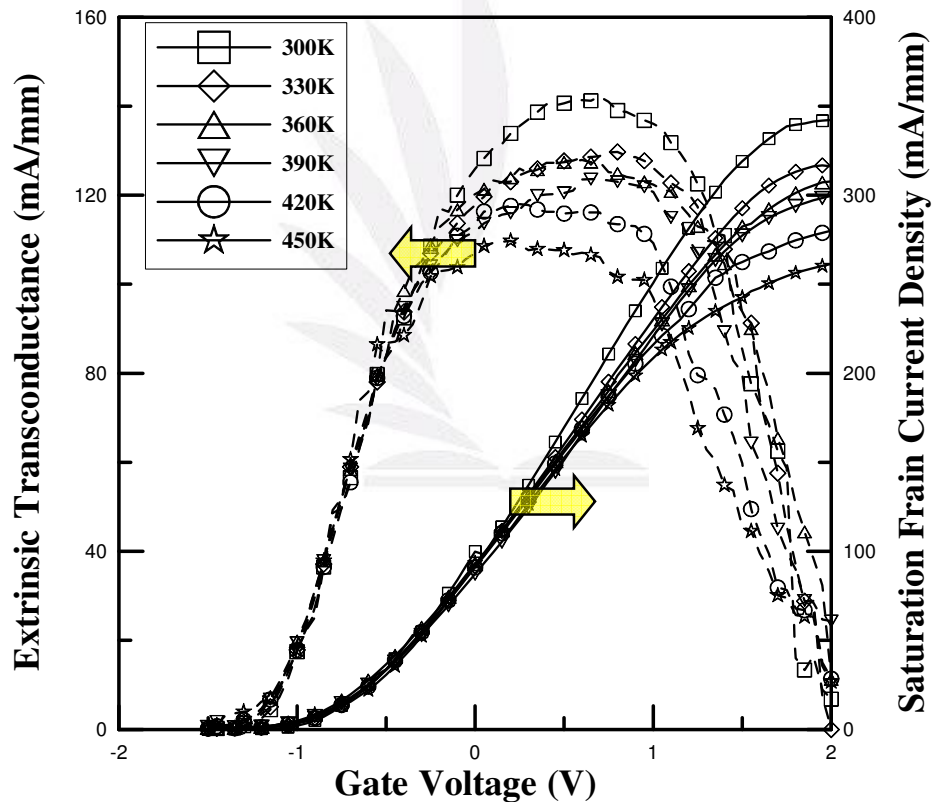


圖 5-21 樣本 A 在 $V_{DS}=3$ V，且溫度從 300K 到 450K 下，以外圍轉導值與飽和汲極電流密度和閘極到源極電壓相比較的特性曲線圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

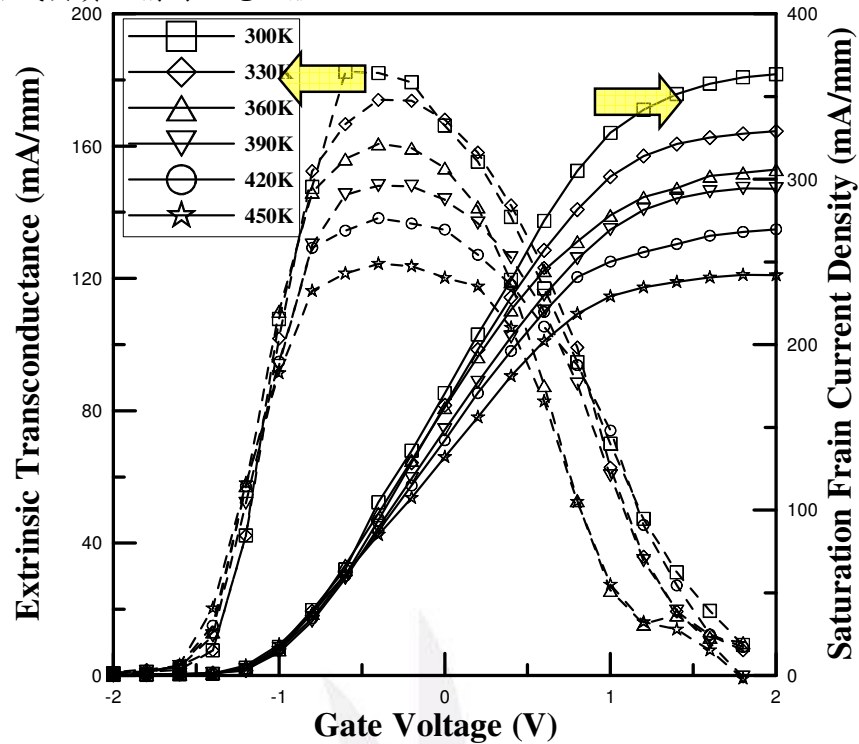


圖 5-22 樣本 B 在 $V_{DS} = 3$ V，且溫度從 300K 到 450K 下，以外部轉導

值與飽和汲極電流密度和閘極到源極電壓相比較的特性曲線圖

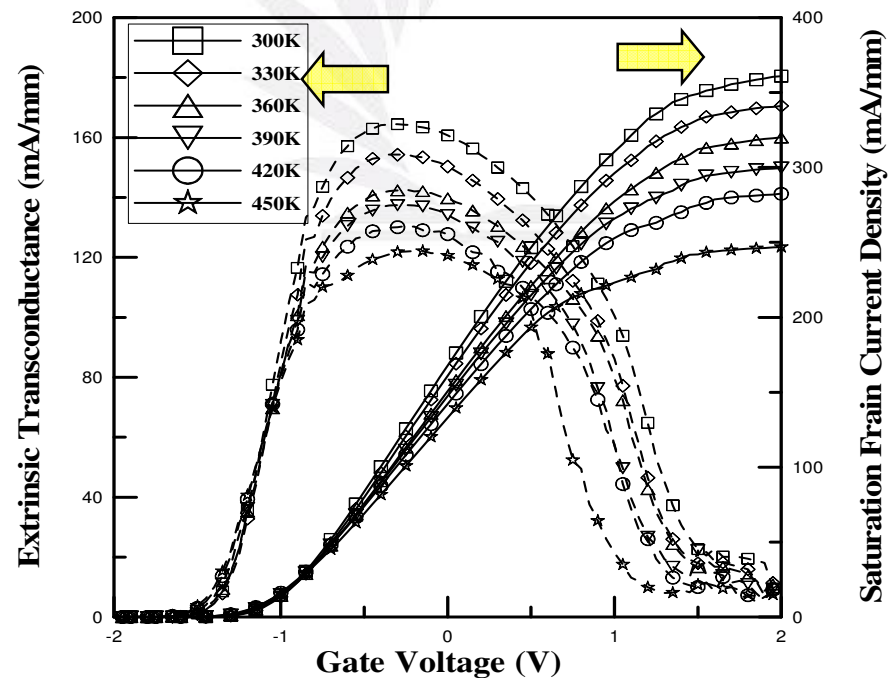


圖 5-23 樣本 C 在 $V_{DS} = 3$ V，且溫度從 300K 到 450K 下，以外部轉導

值與飽和汲極電流密度和閘極到源極電壓相比較的特性曲線圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

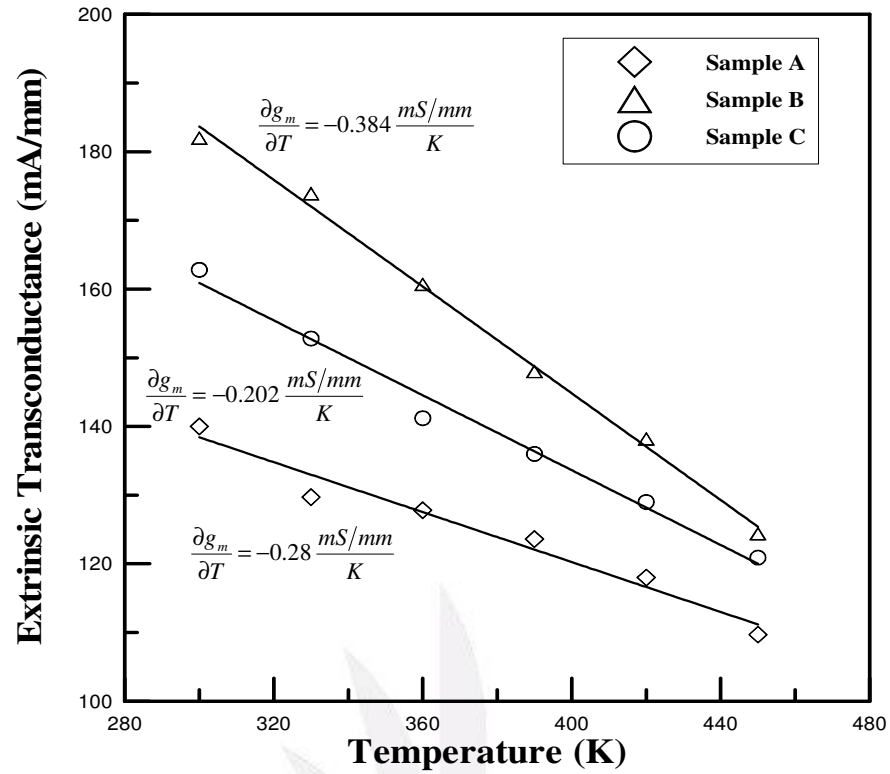


圖 5-24 三種樣本的外部轉導值與溫度的關係圖

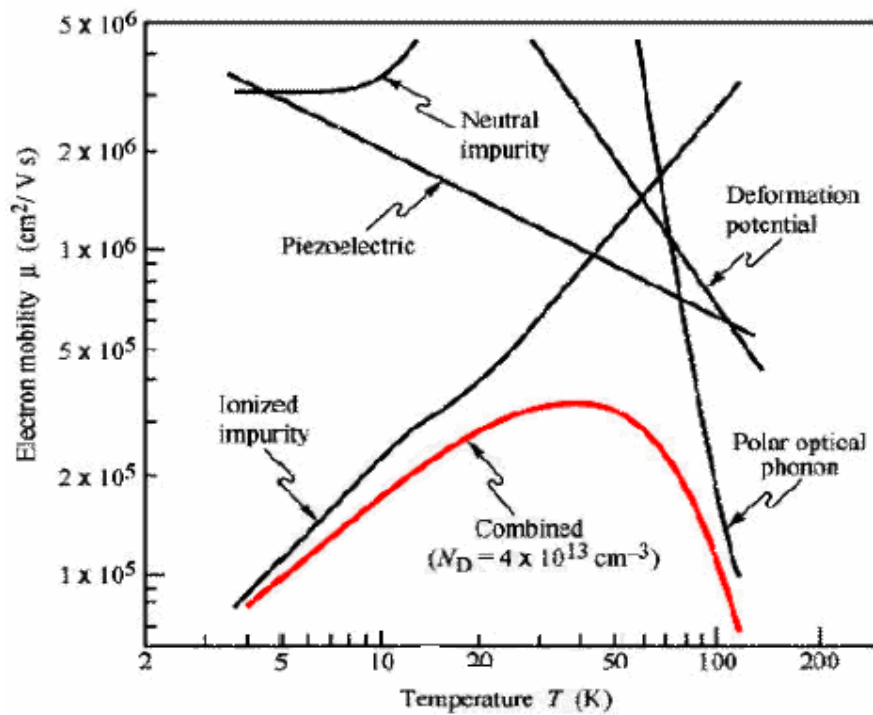


圖 5-25 散射機制與溫度關係圖

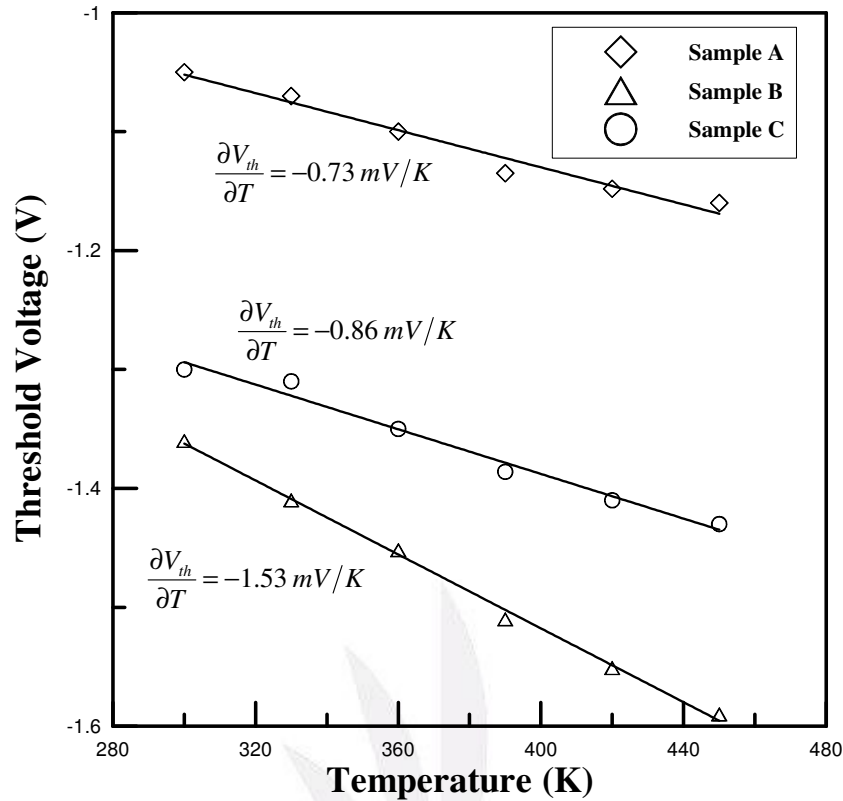


圖 5-26 三種樣本的臨限電壓與溫度的關係圖

圖 5-26 所示是在 $V_{DS}=3V$ 時，三種樣本的臨限電壓與溫度從 300K 到 450K 的關係圖。而臨限電壓可由 $(I_{DSS})^{1/2}$ vs. V_{GS} 的斜率推斷。而三種元件在 300K 到 450K 的臨限電壓改變量各為 -0.11、-0.23 與 -0.13V，而 $V_{th}(\partial V_{th}/\partial T)$ 的熱係數各為 -0.73、-1.53 與 -0.86 mV/K

從表 5-7 可知，在高溫時，樣本 A 與 C 呈現較低的臨限電壓改變量。這歸咎於通道摻雜式結構具有較佳的載子侷限能力的因故。另一方面，在下層的 δ -摻雜載子供應層可能會造成電子射入緩衝層與增加漏電流。所以，樣本 A 與 C 適合應用在數位方面，其中臨限電壓的控制佔了很大的因素。

	Sample A		Sample B		Sample C	
Temperature(K)	300K	450K	300K	450K	300K	450K
ID.max	-23%		-34%		-31.4%	
Gm.max	-22%		-31.6%		-25.6%	
BVGD	-15.8%		-22.7%		-19.7%	

表 5-7 顯示三種樣本從 300K 到 450K， $I_{D,max}$ 、 $g_{m,max}$ 與 BV_{GD}

的變化值

5-5-2 兩端點崩潰電壓特性

圖 5-27、5-28 與 5-29 所示，各為三種樣本當溫度變化時的兩端點閘極-汲極崩潰電壓特性曲線圖。而其中逆向閘極漏電流的增加，一部分是因為穿遂機制；而另一方面是因為能隙的減少。此外，高載子侷限能力會導致低崩潰電壓。從表 5-7 發現，樣本 A 與 C 呈現較低的崩潰電壓下降，這是因為它們具有較佳的載子侷限能力的原因。

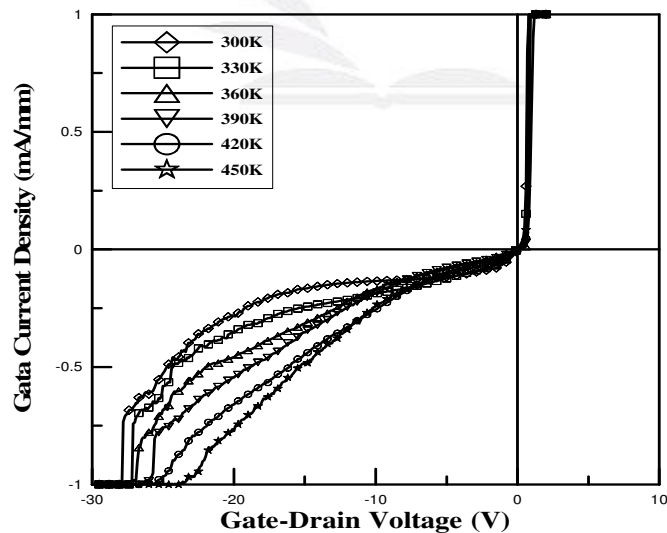


圖 5-27 為樣本 A 當溫度 300K 到 450K 時，兩端點閘極-汲極崩潰
電壓特性曲線圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

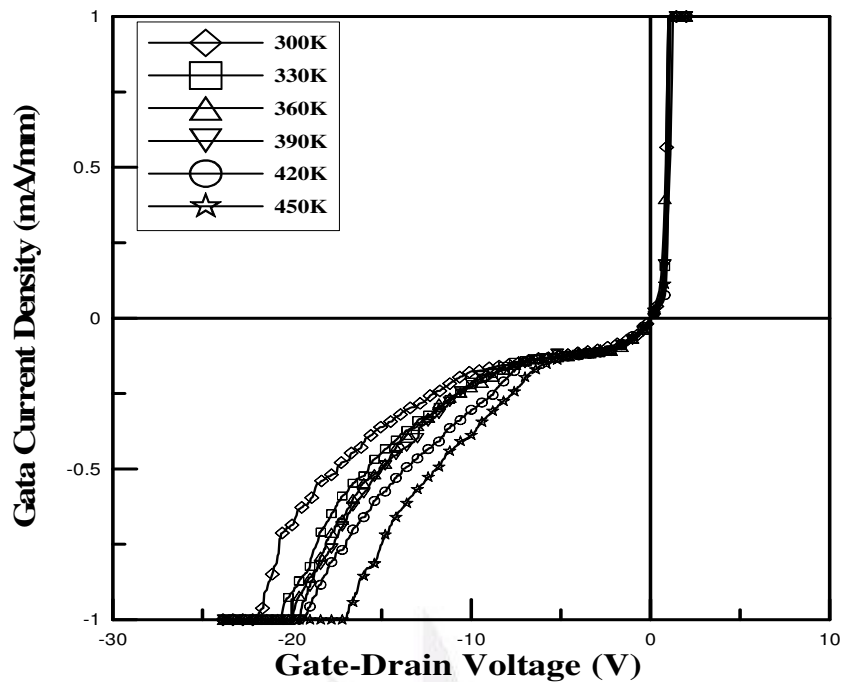


圖 5-28 為樣本 B 當溫度 300K 到 450K 時，兩端點閘極-汲極崩潰

電壓特性曲線圖

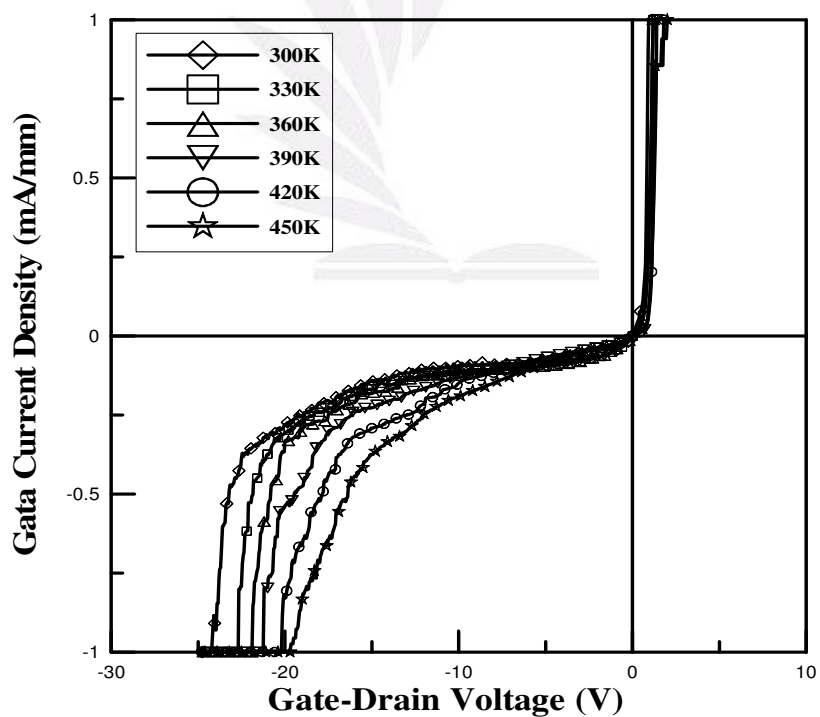


圖 5-29 為樣本 C 當溫度 300K 到 450K 時，兩端點閘極-汲極崩潰

電壓特性曲線圖

5-5-3 射頻(RF)特性

圖 5-30、5-31 與 5-32 所示，各為三種元件當溫度從 300K 到 420K 時的射頻特性曲線圖。圖 5-33 與 5-34 為當溫度從 300K 到 440K 時，三種元件的微波特性曲線圖。從中可以明顯地觀察到，當溫度上升時， f_T 與 f_{max} 會下降，這是因為當高溫時，電子傳輸能力會下降的緣故。而三種元件的 $f_T (\partial f_T / \partial T)$ 的熱係數各為 -4.17、-24.17 與 -8.33 Hz/K。至於三種元件的 $f_{max} (\partial f_{max} / \partial T)$ 的熱係數各為 -22.5、-75 與 -37.5 Hz/K。此外，樣本 A 與樣本 C 因為是通道摻雜式結構，所以當溫度變化時，較不會有太大的影響。

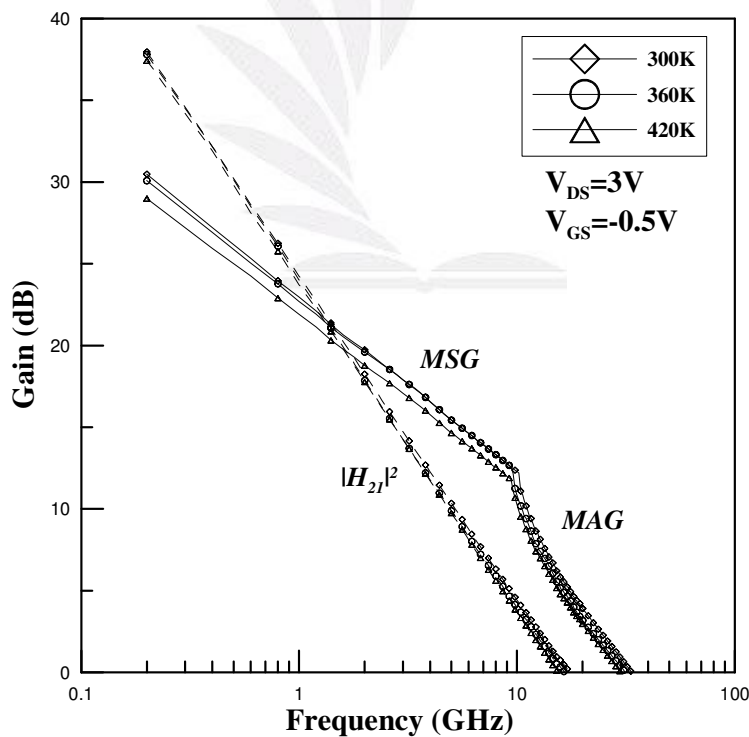


圖 5-30 為樣本 A 當溫度從 300K 到 420K 時的射頻特性曲線圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

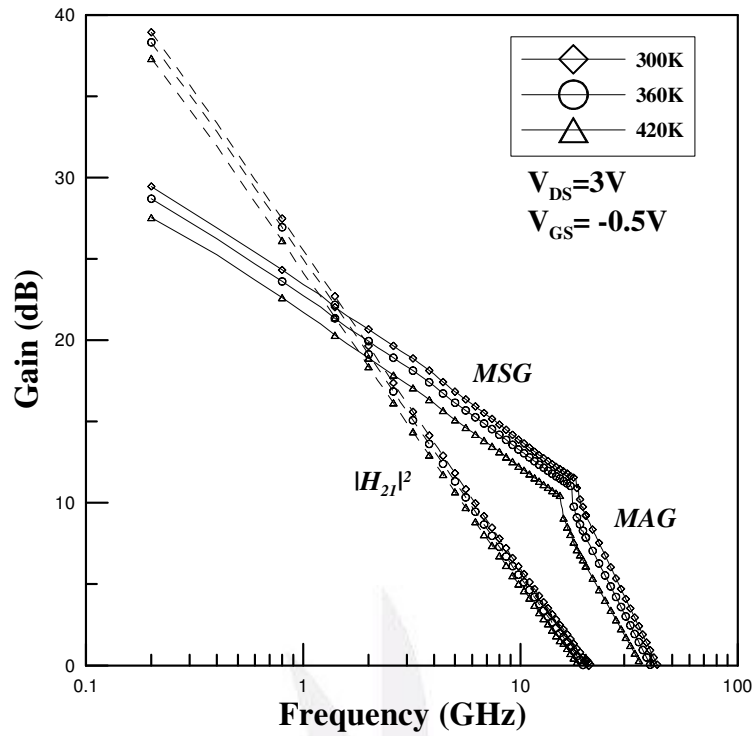


圖 5-31 為樣本 B 當溫度從 300K 到 420K 時的射頻特性曲線圖

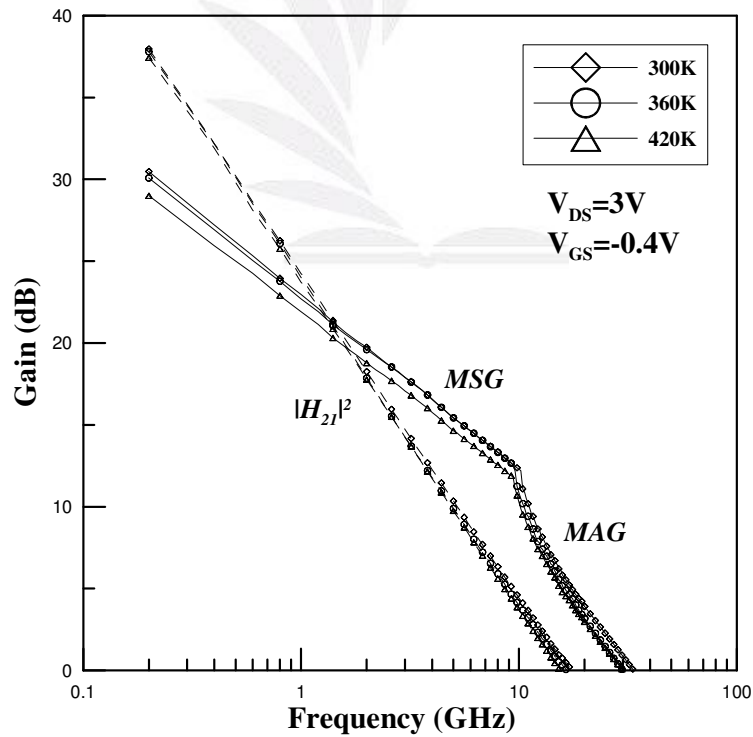
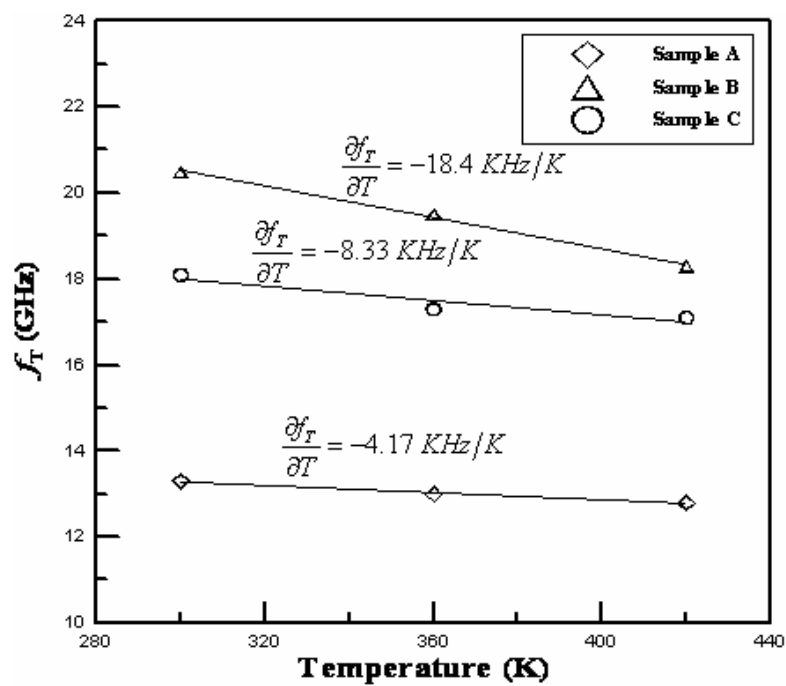


圖 5-32 為樣本 C 當溫度從 300K 到 420K 時的射頻特性曲線圖

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

(a)



(b)

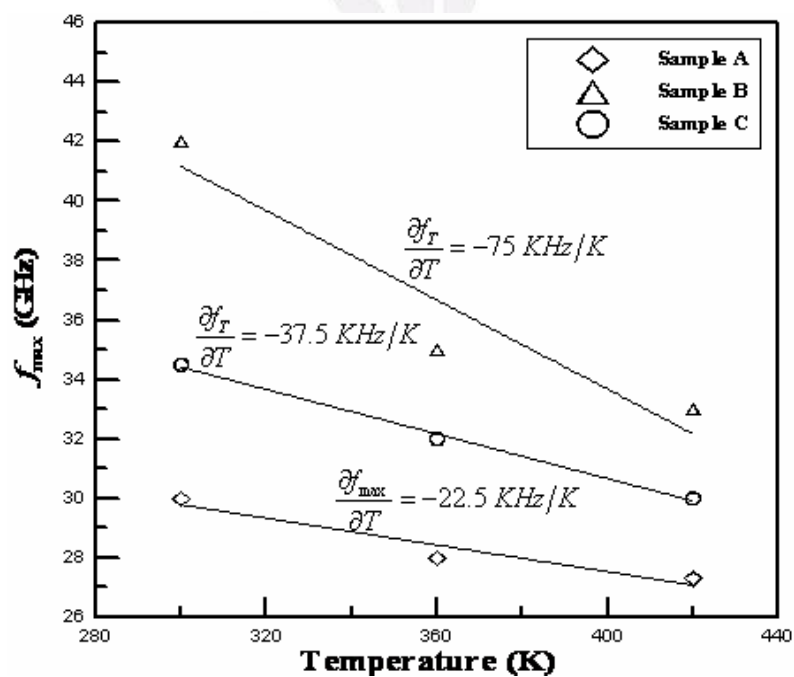


圖 5-33 當溫度從 300K 到 440K 時，三種元件的微波特性曲線圖

(a) f_T (b) f_{max}

第六章 結論

在這專題裡，成功的製造出雙 δ -摻雜通道摻雜式異質結構場效電晶體（樣本 C）。並且將此元件與其他兩種元件的比較。藉著利用對稱型通道摻雜式結構所形成的 V 型能帶，我們獲得樣本 C 的一些數據。它具有很高的閘極偏壓擺幅 1.07 V，線性度 170 mA/mm，崩潰電壓 22 V，導通電壓 1 V，電壓增益 176 mS/mm，還有較低的輸出傳導值 0.9 mS/mm。而樣本 C 與樣本 B 比較，樣本 C 改善了輸出功率特性與提升熱穩定度。

另一方面，樣本 C 改善了通道裡的雜質散射效應，因為它降低了通道裡的摻雜濃度，而改利用雙 δ -摻雜載子供應層提供大量載子。樣本 C 與樣本 A 能達到高 g_m :164 mS/mm、 I_{DS} :360mA/mm、 f_T :17.1GHz， f_{max} :34.5GHz 和 NF_{min} :1.25。

此外，我們研究的雙 δ -摻雜 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/In_xGa_{1-x}As/GaAs$ 通道摻雜式異質結構場效電晶體適用於對於線性特性要求很高的元件與高功率電位應用包括高效率微波功率放大器。

最後，未來在改善元件特性上，有一些問題建議如下：

- (1) 為了能夠達到更好的元件特性，在通道與載子供應層裡摻雜適當的摻雜濃度。
- (2) 利用自我對準的 T 型閘極場效電晶體來減少閘極電阻與改善射頻特性。
- (3) 利用 air-bridge 技術來減少側壁效應。
- (4) 分析元件的一致性與可靠性。
- (5) 試著利用其他的擁有高功函數的合金(如 Ni Ti Pt)，來當蕭基閘極材料。



參考資料

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Ketterson, J. W. Seo, M. Tong, K. Nummila, 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, "Pseudomprphic 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] D. R. Greenberg, J. A. D. Alamo, J. P. Harbison, L. T. Florez, "A pseudomorphic AlGaAs/n+-InGaAs metal-insulator-doped channel FET for broad-band, large-signal applications," IEEE Electron Device Lett., vol. 12, p. 436, 1991.
- [7] W. C. Hsu, H. M. Shied, C. L. Wu, and T. S. Wu, "A high performance symmetric double δ -doped GaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic HFET,s grown by MOCVD," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 41, p. 456, 1994.

- [8] L. W. Laih, W. S. Lour, J. H. Tsai, W. C. Liu, C. Z. Wu, K. B. Thei, and R. C. Liu, "Characteristics of metal-insulator-semiconductor (MIS) like In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs doped-channel structure," Solid-State Electron., vol. 39, p. 15, 1995.
- [9] C. Z. Wu, L. W. Laih, and W. C. Liu, "study of InGaAs/GaAs metal-insulator-semiconductor-like heterostructure field-effect transistor," Solid-State Electron., vol. 39, p. 791, 1996.
- [10] W. S. Lour, W. L. Chang, W. C. Liu, Y. H. Shie, H. J. Pan, J. Y. Chen, and W. C. Wang, "Application of selective removal of mesa sidewalls for high-breakdown and high-linearity Ga_{0.51}In_{0.49}P/In_{0.15}Ga_{0.85}As pseudomorphic transistors," Appl. Phy. Lett., vol. 74, p. 2155, 1999.
- [11] J. C. Huang, M. Zaitlin, W. Hoke, M. Adlerstein, P. Lyman, P. Saledas, G. Jackson, E. Tong, and G. Flynn, "A high-gain, low-noise 1/2- μ m pulse-doped pseudomorphic HEMT," IEEE Electron Device Lett., vol. 10, p. 511, 1989.
- [12] L. F. Lester, M. Y. Kao, P. Ho, D. W. Ferguson, R. P. Smith, P. M. Smith, J. M. Ballingall, "High-efficiency 0.25- μ m gate-length pseudomorphic power heterostructure FETs at millimeter-wave frequencies," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 36, p. 2616, 1989.
- [13] K. H. Duh, P. C. Chao, P. M. Smith, L. F. Lester, B. R. Lee, J. M. Ballingall, and M. Y. Kao, "High-performance Ka-band and V-band HEMT low-noise amplifiers," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 36, p. 1598, 1988.
- [14] M. Kuster, A. Kohl, V. Sommer, R. Muller, and K. Heime; "Optimized double heterojunction pseudomorphic InP/In_xGa_{1-x}As/InP (0.64 $\leq$ x $\leq$ 0.82) p-MODFETs and the role of strain in their design," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 40, p. 2164, 1993.
- [15] B. Kim, R. J. Matyi, M. Wurtele, K. Bradshaw, M. A. Khatibazadeh,

雙 δ -摻雜砷化鋁鎵/砷化銦鎵/砷化鎵
通道摻雜式異質結構場效電晶體

- and H. Q. Tserng, "Millimeter-wave power operation of an AlGaAs/InGaAs/GaAs quantum well MISFET," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 36, p. 2236, 1989.
- [16] P. P. Ruden, M. Shur, A. I. Akinwande, D. E. Grider, and J. Beak, "AlGaAs/InGaAs/GaAs quantum well doped channel heterosturcture field effect transistors," IEEE Trans. Electron Device, vol. 37. p. 2171, 1990.
- [17] M. T. Yang and Y. J. Chan, "AlGaAs/In_xGa_{1-x}As (0<x<0.25) doped-channel FET's," submitted for publication.
- [18] Y. J. Chan, M. T. Yang T. J. Yeh, and J. I. Chyi, "High uniformity of AlGaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As doped-channel structures grown by MBE on 3 GaAs substrates," J. Electronic Materials, vol. 23, p. 675, 1994.
- [19] C. L. Chen, F. W. Smith, B. J. Clifton, L. J. Mohoney, M. J. Manfra, and A. R. Kalawa, "High-power-density GaAs MISFET's with a low-temperature-grown epitaxial layer as the insulator," IEEE Electron Device Lett., vol. 12, p. 306, 1991.
- [20] H. Hida, A. Okamoto, H. Toyoshima, and. K. Ohata, "As investigation of i-AlGaAs/n-GaAs doped-channel MIS-like FET's. (DMT's)-Properties and performance potentialities,". IEEE Trans. Electron Devices,. vol. 34, p. 1448, 1987.
- [21] L. W. Lai, S. Y. Cheng, W. C. Wang, P. H. Lin, J. Y. Chen, W. C. Liu, and W. Lin, "high-performance InGaP/InGaAs/GaAs step-compositioned doped channel field-effect transistor (SCDCFET)," Electron. Lett., vol. 33, (1) p. 98, 1997.
- [22] J. C. Liou, and K. M. Lau, " Temperature dependence and persistent conductivity of GaAs MESFET,s with superlattice Buffers," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 35, p. 14, 1988.