



逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

銻砷化銦鎵/砷化鎵 摻雜通道式場效電晶體之研製

作者：林銘源 洪健雄

系級：電子四甲

學號：D9465588 D9465824

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： 97 學年度 第 1 學期



摘要

本專題首次提出用分子束磊晶(MBE)系統成長 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ 異質接面的摻雜通道式場效電晶體(DCFET)。其界面品質在 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ 摻雜通道式場效電晶體(DCFET)的量子井(QW)獲得明顯的改善，藉由引入類似表面活性劑的銻原子成長在有參雜矽的砷化銦鎵通道層上，並利用穿透式電子顯微鏡(TEM)來觀察界面平整度之改變。其中改善的元件特性包括最大外值轉導($g_{m, \max}$)(161.5 mS/mm)、最大汲源極飽和電流密度($I_{DSS, \max}$)(230 mA/mm)、閘極電壓振幅(GVS)(1.65V)、截止頻率(f_T)(12.5GHz)以及最大振盪頻率(f_{\max})(25 GHz)，以上參數在閘極尺寸為 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 且溫度在300 K時所量測，另外本專題也顯示熱穩定臨界係數($\partial V_{th}/\partial T$)(-0.7 mV/K)。

關鍵字： InGaAsSb/GaAs、摻雜通道式場效電晶體(DCFET)、銻原子

目 次

摘要-----	1
圖、表目錄 -----	3
第一章 元件簡介-----	4
1.1 研究動機 -----	4
1.2 DCFET 介紹及演進-----	8
第二章 元件成長及製程 -----	10
第三章 量測結果與討論-----	13
3.1 SIMS 量測-----	13
3.2 TEM 測量分析-----	14
3.3 閘汲極絕緣特性分析-----	17
3.4 I-V 特性分析-----	19
3.5 臨界電壓-----	21
3.6 高頻微波特性-----	23
第四章 結論-----	25
參考文獻-----	38

圖、表目錄

圖 1 化合物半導體材料的能帶間隙和晶格常數的對應圖-----	26
圖 2 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ DCFET的橫切面圖-----	27
圖 3.1 二次離子質譜密度與界面深度圖-----	28
圖 3.2-1 TEM 圖-----	29
圖3.2-2 銻原子摻入前後TEM影像圖-----	30
圖 3.3-1 300 K 到 360 K-----	31
圖 3.3-2 360 K 到 450 K-----	32
圖 3.4-1 銻砷化銦鎵通道高速電晶體的汲極電流密度與汲極對源極電壓的關係圖 -----	33
圖 3.4-2 300K 到 450K 銻砷化銦鎵通道高速電晶體的汲極電流密度、轉導值與閘極 電壓的關係圖-----	34
圖 3.5-1 $g_{m, max}$ 和 V_{th} 在 300K到 450K、 $V_{DS} = 3$ V對溫度的曲線圖-----	35
圖 3.6-1 HP 8510B 網路分析儀-----	36
圖 3.6-2 高頻微波特性圖-----	37

第一章 元件簡介

1.1 研究動機

近年來由於行動通訊的需求量大增使得在高頻元件HEMT、HBT有著顯著的發展。在HEMT方面，從以前的GaAs基板上AlGaAs/GaAsHMET及AlGaAs/InGaAs的pseudomorphic HEMT (PHEMT)到最近InP基板上InAlAs/InGaAs的lattice match HEMT (LMHEMT)不論是在直流的轉導以及在高頻特性 f_T (Current Gain Cut-off Frequency)和 f_{max} (Maximum Oscillation of Frequency)上皆有很好的特性，所以我們研究砷。由於砷元素先天上的物理限制，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、抗輻射性差等因素，使其在極高頻應用上受到相當大的阻礙。然而近年來，無線高頻通訊的產品發展迅速，使得屬於化學元素週期表中III-V族化合物半導體的砷化鎵 (GaAs) 得以脫穎而出。砷化鎵有以下的優點:

- (1) 高工作頻率：一般通訊頻率在1GHz以上時不能用矽，主要使用砷化鎵。
- (2) 低噪音：砷化鎵噪音比矽小，可以提供最佳的靈敏度、更好的線性表現、更小的失真度與更大的動態範圍。
- (3) 抗天然輻射：砷化鎵比矽更不會受到自然輻射的干擾，不易產生錯誤訊號，產品穩定度高，特別是在用於衛星通訊時暴露於太空中所產生的輻射問題。

- (4) 操作溫度適用範圍高：砷化鎵適用溫度範圍最高可達 200 度，不易因高頻產生熱能而影響產品的功能與穩定度。
- (5) 半絕緣體：砷化鎵的半絕緣特性可以將元件之間的訊號損失減至最低。
- (6) 能源使用率佳：砷化鎵晶片使用電源的效率比矽優越，電池的使用壽命可以更加延長。

GaAs 化合物所製做之半導體元件，由於其電子遷移速度為矽元素的五倍，且具有功率高、耗電量小及不失真的特性，因此在高頻元件的製造上，遠比矽元素合適，故近來高頻無線(IC)元件的生產，多採用砷化鎵的技術模式。

Table. 1 砷化鎵與矽的元件特性比較

項目	GaAs 砷化鎵	Si 矽
最大頻率	2GHz - 300 GHz	1GHz 以下
最高操作溫度	120°C	120°C
高頻應用	較少雜訊干擾	雜訊高
功率消耗	低	高
元件大小	小	大

所以已經廣泛地應用在高頻率、高效能、高增益、低雜訊的電晶體上。砷化鎵技術元件主要有 3 種製程技術，為求在高頻區域應用時提高運作效率，砷化鎵技術

的發展由早期的 MESFET(Metal Semiconductor FET 金屬半導體場效電晶體)，逐漸移轉至 HEMT(The High Electron Mobility Transistor 高電子移動率電晶體/Pseudomorphic HEMT 分化銾銻應變式高電子移動率電晶體)，及 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor 異質接面雙載子電晶體)。其中 HBT 為 Bipolar 架構，其三極(即射極、基極及集極)係以垂直分式排列；相對上，MESFET 及 HEMT/pHEMT 則採類似 CMOS 架構(省電，集積度大，成本低，適合基頻數位處理部份)的水平方式排列。由於 bipolar 結構僅需單一電壓來源即可，因此 Die size 較小，對於線寬的要求較低，目前 HBT 的製程以 2um 為主流，相對上 pHEMT 則要求線寬縮小到約 0.15um。以下則為該三種技術的比較分析：

Table. 2

項目	HBT	HEMT、pHEMT	MESFET
光罩數目	14 道	10-11 道	10-12 道
晶粒平均 製造成本	US\$ 0.33 元	US\$ 0.65 元	US\$ 0.76 元
元件尺寸 (平方公釐)	1	1.97	3.03
單位原件成本 (USD)	\$0.33	\$0.65	\$0.76
良率	高	中	中
頻率範圍	<18GHz	<100GHz	<18GHz
市場	成長	成長	穩定
元件大小	小	中	大
產品應用	功率大、線性、 混合訊號產品	低雜訊、高頻產品	一般或低階產品、市場 成熟
1995-2000 年 (f)市佔率	6% →25%	16% →35%	54% →31%

資料來源：WIN Semiconductor Corp., June, 2000

而 III-V 的電晶體大致可以分為兩大類：第一類為異質接面雙載子電晶體(HBT)，

另一類為(異質結構)場效電晶體(FET)。而 FET 又可分為下列幾種：

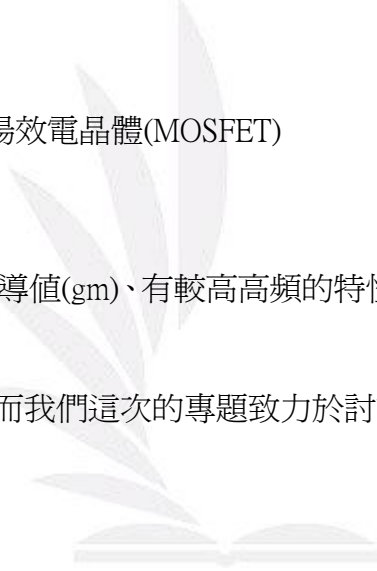
(1)金屬-半導體場效電晶體(MESFET)

(2)高電子移動率電晶體(HEMT)

(3)摻雜通道式場效電晶體(DCFET)

(4)金屬-氧化物-半導體場效電晶體(MOSFET)

由於 HEMT 有較高的轉導值(gm)、有較高高頻的特性以及低雜訊使得在通訊以及軍事上有優異的表現。而我們這次的專題致力於討論 DCFET 的改良與相關特性。



1.2 DCFET 介紹及演進

在近幾年以微量氮化合物結構形成的氮砷化銦鎵(InGaAsN)已被廣泛的研究，由於在氮砷化銦鎵與砷化鎵的異質結構界面具有高的傳導帶不連續能階，即在異質結構接面上可形成較深的量子井，使元件處於高溫的操作下，接面上對導電載子的侷限能力得以增加，使載子不會輕易的跳脫出量子井形成漏電流而降低了元件特性。

氮砷化銦鎵可以成長於晶格匹配之砷化鎵基板上，亦可使用於通訊元件 1.3 微米的長波長雷射上。除此之外將氮砷化銦鎵(InGaAsN)使用於異質界面雙極性電晶體上也証實與砷化鎵材料相比較可以有效地減少其元件的導通電壓。雖然氮原子的摻雜可以減少能隙但卻會伴隨著粗劣的磊晶品質。對於電子元件的應用上，氮的加入便會嚴重的降低載子的傳輸能力，而且在光電元件上的應用為了改善光特性，必須利用退火來減少缺陷或非輻射雜質。因此，使用微量氮化合物的元件特性無法進一步突破。

近來某些團隊已經致力於將銻原子當成類似表面活性劑的功能，並使用於砷化鎵(GaAs)及銻氮砷化銦鎵(InGaAsNSb)的量子井雷射上以期能改善結晶品質及抑制長晶時的三維成長。在長波長雷射元件中摻雜入銻原子不僅可以改善元件的臨界電流密度亦可以有效的降低能隙並造成紅移現象的增加，讓雷射元件可以操作於更長波長的通訊波段。然而，對於電子元件的應用方面操作速度是一項很重要的特性指標，有鑑於此，本文提出全世界第一個以分子束磊晶法(MBE)成長銻砷化銦鎵(InGaAsSb)為通道的高電子移動率電晶體(HEMT)，一方面摒除了氮元素的摻雜會造成元件內載子移動速度嚴重下降的缺點，一方面又摻雜銻元素可以更增加砷化鎵的結晶品質。

藉由加入銻後可以同時改善元件通道接面磊晶品質、載子傳輸特性和通道內的載子侷限能力。與傳統的砷化銦鎵通道的元件比較，本論文摻雜銻的銻砷化銦鎵通道的元件可以獲得較優異的載子移動率以期元件可以在更高的速度下操作，並同時具有較高的汲極電流密度、轉導值(即放大率)、閘極電壓擺幅(元件所施加的電壓範圍)、和高頻操作等特性。因此我們在第二章將先說明元件製程的參數，第三章進而討論元件的特性，最後在第四章下結論。

第二章 元件成長及製程

$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ 結構的成長，是使用SSMBE(solid-source MBE) system。在整個過程中，砷必須持續控制在 1×10^{-6} Torr的真空狀態中，只有這一狀態，適用於銦與銻。經由真空計的量測， 1.5×10^{-7} Torr的過量銻，在製作通道層的期間，銻的裝置溫度要控制在 530°C 。 InGaAsSb 與 GaAs 在製程時的溫度，需要分別放置在 510°C and 600°C 。

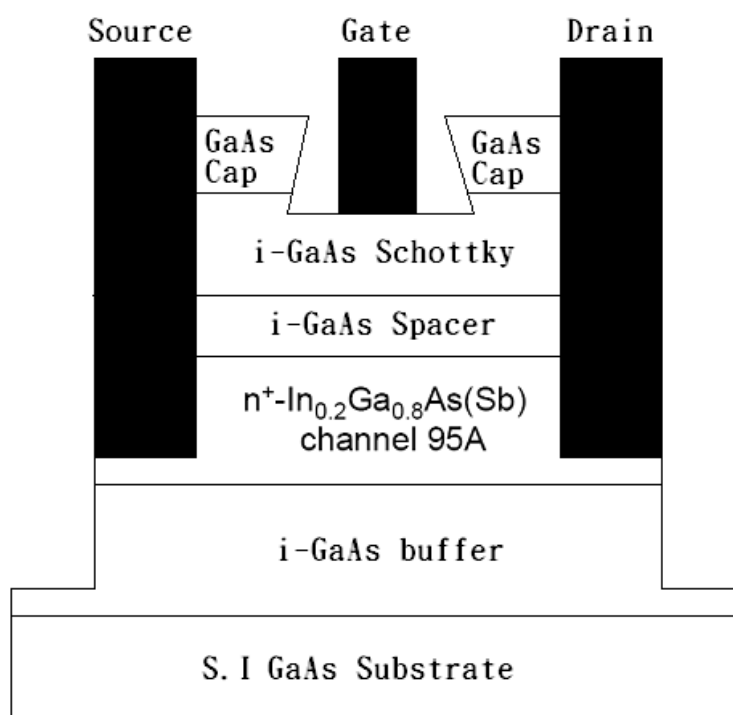


圖 2 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ DCFET的橫切面圖

圖 2 為 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ DCFET的橫切面圖。以 $0.4\text{-}\mu\text{m}$ GaAs緩衝層在晶格(100)的方向成長在GaAs基層，接著在緩衝層上，成長厚度為 9.5-nm以及為砷摻雜

($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}$ 通道層，在通道層之上長成 4-nm未摻雜的GaAs隔離層，之後在隔離層之上成長厚度為 35-nm未摻雜的GaAs蕭基層，最後再成長厚度為 20-nm以及砷摻雜($7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)的GaAs覆蓋層。

使用霍爾量測方法來量測 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ DCFET在磁場 5000 G 下的二維電子雲濃度以及電子移動率。在 300K時測量的結果，二維電子雲濃度為 $3.82 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ，電子移動率為 **2674** $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

這裡證明了， $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ 具有較高的傳輸性能，可由Table.3 觀察出與其他未摻雜銻之結構的論文相比較。

Table.3

Reference	This work	Ref. [16]	Ref. [17]	Ref. [18]
Channel		$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$		$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$
Materials	$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}$	$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	LR-DCFET
		$\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$		DCFET
μ	2674	1565		1250
($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)		1810	2200	1152
		1180		

我們發現移動率的改變是由於本論文有摻雜銻在通道層所影響，其原理會在後面討論。

元件製程時到光刻及熱退火(RTA)的技術，在緩衝層使用平面蝕刻可以減少閘極漏電流，而GaAs覆蓋層可以使用 $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 所混合的溶液來進行濕蝕刻。

AuGeNi的合金可以做成源極、汲極的歐姆接觸，進而把Au蒸發可以降低接觸電阻。Au可以沉積在蕭特基層上形成閘極，而本元件在尺寸 $1.2 \times 200 \mu\text{m}^2$ 汲源極間隔 $7 \mu\text{m}$ 。



第三章 量測結果與討論

3.1 SIMS 量測

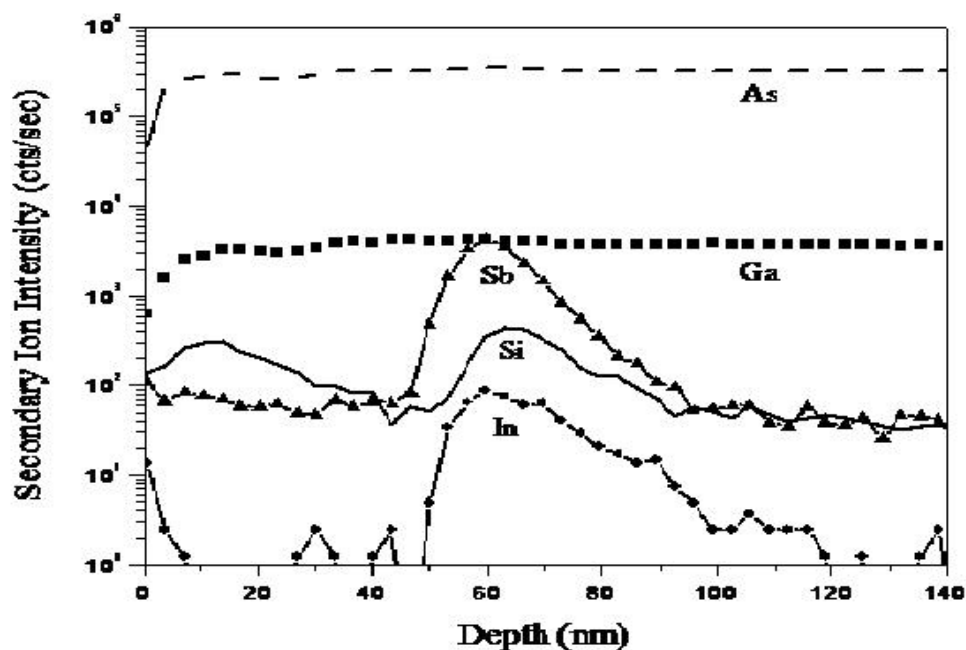


圖 3.1 二次離子質譜密度與界面深度圖

如何得知銻原子是否有在我們的元件裡，因此我們使用儀器來做量測，圖 3.1 為銻砷化銦鎵通道高電子移動率電晶體結構二次離子質譜 (SIMS) 密度與界面深度的作圖。由圖可知因為銻砷化銦鎵通道大約在距離元件表面下 59 奈米處，當元件在成長的時候砷及鎵離子都保持在穩定值，但是在 60 奈米深的地方，銦和銻離子卻明顯的增加到最大值。所以由 SIMS 的表現可以証實銻原子在通道層成

長時有摻雜入通道。而且銻原子的微量摻入砷化鎵薄膜可以使銻原子扮演類似活化劑的功能以改善結晶的品質。

儘管很多學術關於銻原子的研究已經成功用於雷射元件來改善界面品質、降低能隙來改善元件特性。我們更進一步使用 SdH (Shubnikov-de Hass)量測法來做進一步的觀察。自從 SdH 成爲一個可以很精確的得到細節的工具，因此可以得到在二維電子雲裡的載子傳輸特性。

3.2 TEM 測量分析

原理:利用電子槍發散通過陽極之後，隨即爲聚焦鏡所凝聚，在通過物鏡後於樣品的位置形成一極爲微小的聚焦電子束點。物鏡上方的掃描線圈藉由外加控制電壓所產生的磁場，去改變通過的電子束的偏折方向。連結此掃描控制電壓訊號至映像管，則螢幕上的掃描訊號會與樣品上聚焦電子束同步。電子打到樣品時會產生散射電子，二次電子或 X 光螢光等訊號。這些訊號分別由各種不同的偵測器偵測，若以偵測器所得訊號大小爲每一掃描點的亮度值，則可於螢幕上真時(real time)的看到樣品影像。

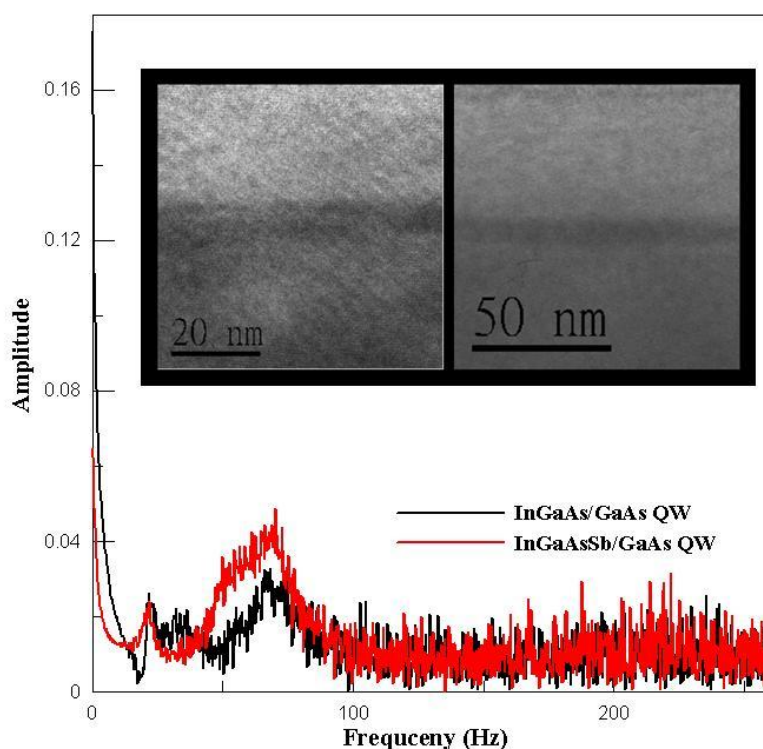


圖 3.2-1 TEM 圖

圖 3.2-1 中得到在 InGaAsSb/GaAs 和 InGaAs/GaAs 量子井頻率，在第一個峰值頻率很明顯的沒有差別，表示在兩界面結構沒多大差別。在第二個峰值頻率就可以很明顯的看出 InGaAsSb/GaAs 接面頻率大於 InGaAs/GaAs 的頻率，因此我們可以了解，在此處多出了 Sb 的因素，因此可以判定有 Sb 的摻入。因此 SdH 和霍爾量測可以互相證明結果。

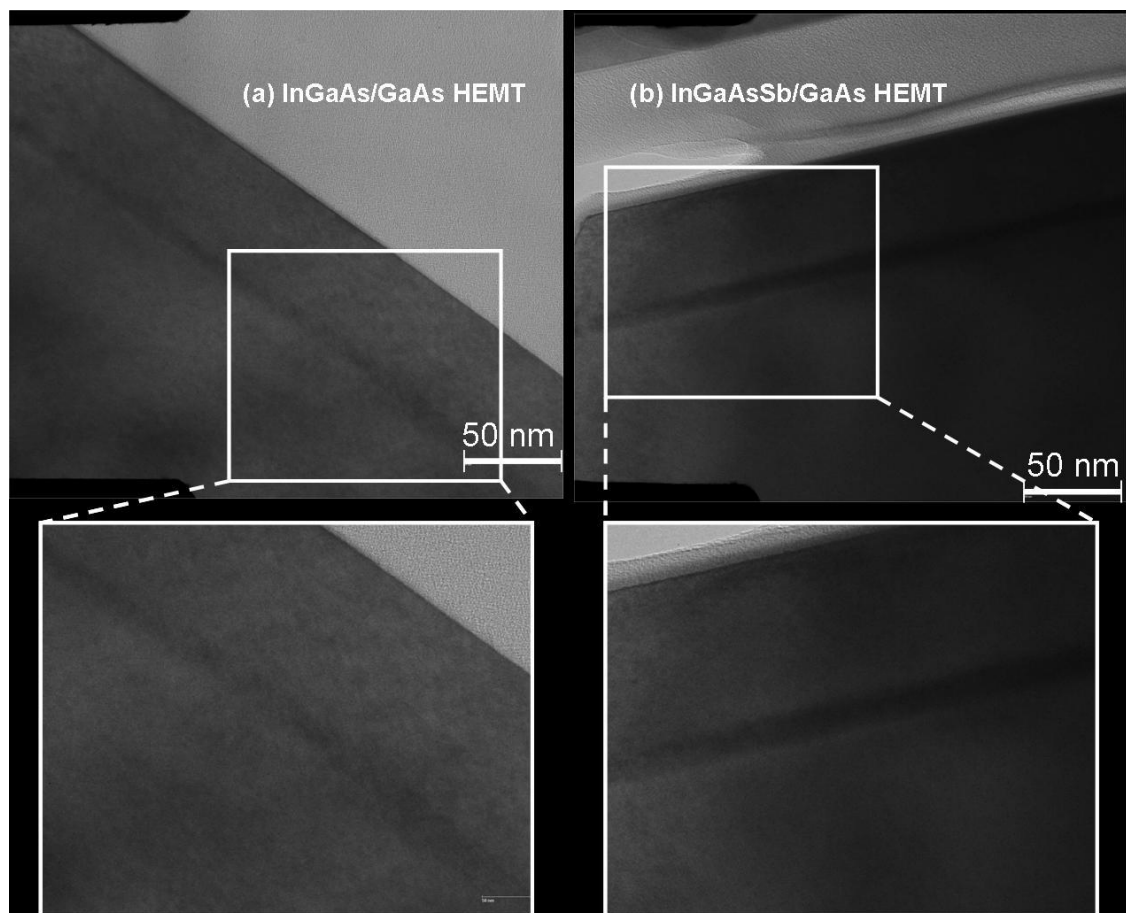


圖3.2-2 銻原子摻入前後TEM影像圖

圖3.2-2 銻原子摻入前後TEM影像圖分別為砷化銦鎵通道及銻砷化銦鎵通道高電子移動率電晶體的高解析電子顯微鏡影像。在銻砷化銦鎵通道高電子移動率電晶體元件中，其隔離層與通道和通道與緩衝層的介面都可以發現比傳統的砷化銦鎵通道HEMT的介面來得平坦與均勻。所以由解析電子顯微鏡影像也清楚的證明了在加入銻原子後可以改善磊晶的品質。

3.3 閘汲極絕緣特性分析

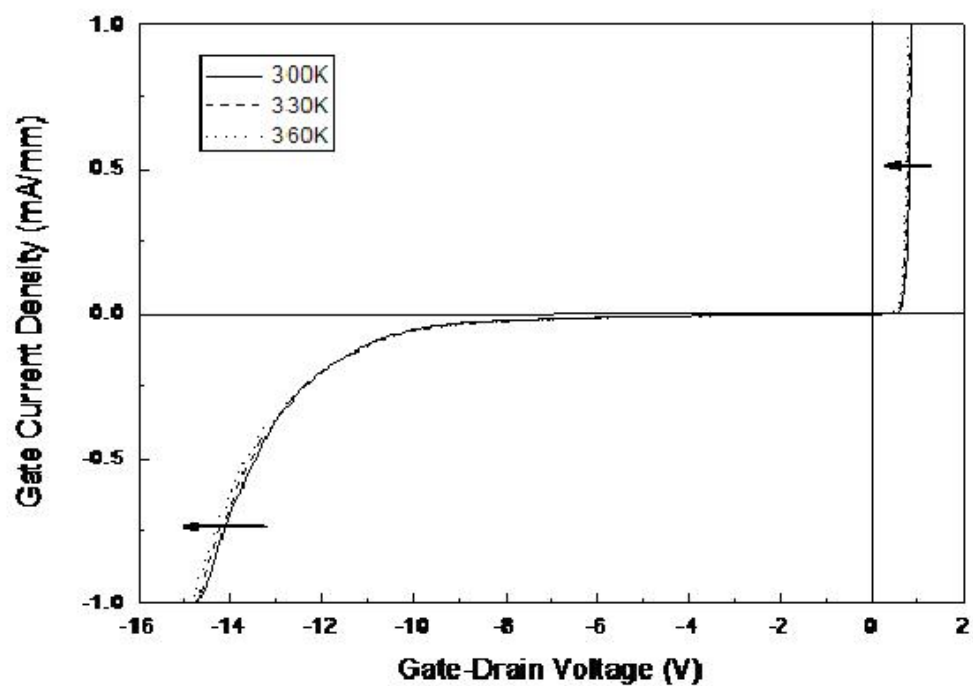


圖 3.3-1 300 K 到 360 K

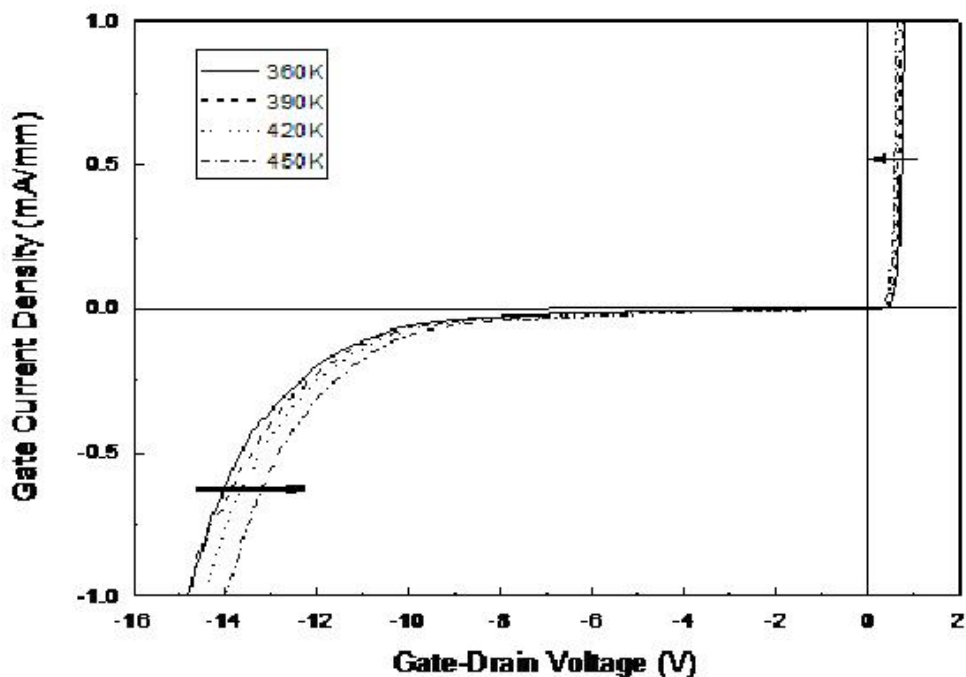


圖 3.3-2 360 K 到 450 K

在圖 3.3-1 及圖 3.3-2 顯示 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ DCFET在不同溫度下的閘汲極電流電壓特性曲線。圖 3.3-1 為閘極電流密度達到 1 mA/mm時，在溫度 300 K到 360 K時的崩潰電壓變化。圖 3.3-2 為閘極電流密度達到 1 mA/mm時，在溫度 360 K到 450 K時的崩潰電壓變化。經量測我們可以發現以 360K為分界出現極端的改變，在溫度 300 K到 360 K時崩潰電壓增加，是由於散射機制隨溫度增加而增強，使得電子的傳輸特性下降，因此也降低了閘極的電流密度。而在溫度 360 K到 450 K

時，觀察到崩潰電壓降低，是由於此時散射機制已被其他機制所蓋過，導致散射機制減弱，因此載子的穿隧能力增強加上能隙下降少了屏蔽，導致崩潰電壓下降。

3.4 I-V 特性分析

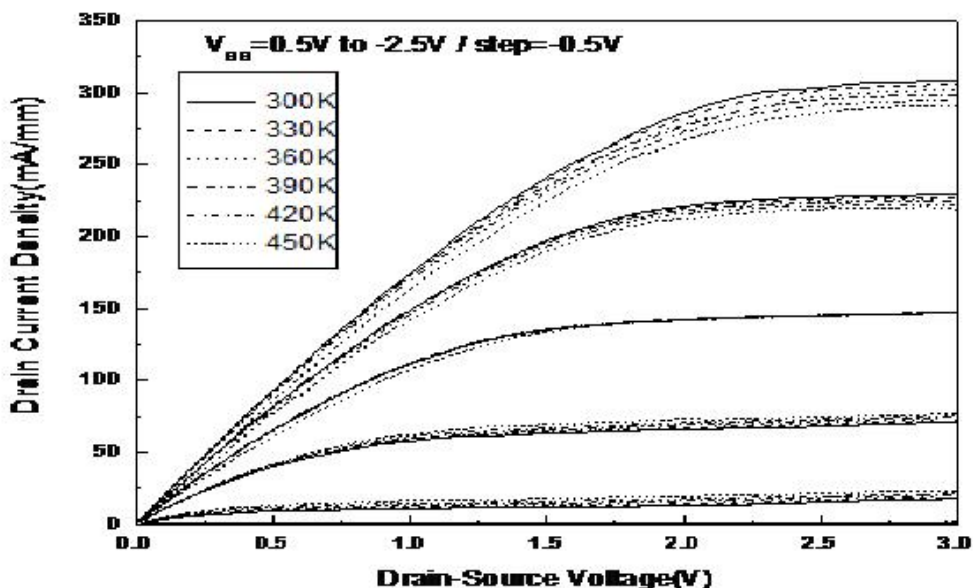


圖 3.4-1 銻砷化銦鎵通道高速電晶體的汲極電流密度與汲極對源極電壓的關係圖

在圖 3.4-1 為 In_{0.2}Ga_{0.8}AsSb/GaAs DCFET 從 300K 到 450K 時的電流電壓特性曲線，由圖可以觀察到在不同溫度下都有良好的夾止特性，造成此特性是由於

$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ 的結構界面增大傳導帶，減少電子注入閘極，因此在高電場下的降低基板漏電流及良好的夾止特性。

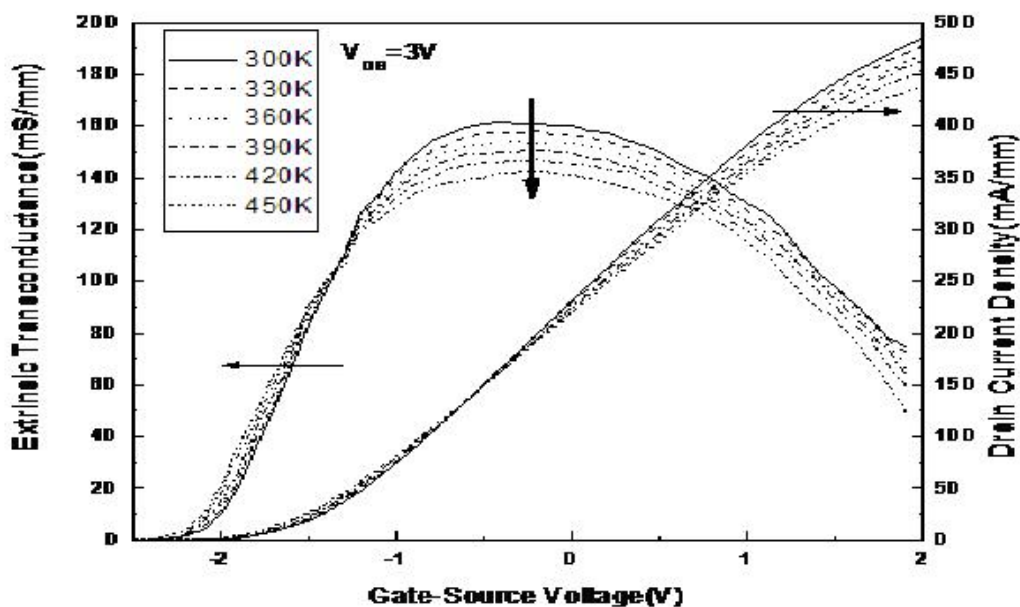


圖 3.4-2 300K 到 450K 銻砷化銦鎵通道高速電晶體的汲極電流密度

、轉導值與閘極電壓的關係圖

圖 3.4-2 顯示隨著溫度的改變， g_m 及 I_{DS} 的變化。GVS，定義為 g_m 最大值向下 10% 所得到電壓可操作範圍，即閘極可以操作電壓的擺幅，本論文得到為 1.65V，雖比一般 HEMT 還好(1.45V)，但是低於通道為 V 型摻雜的 HEMT(1.75V)，因此本專題也可以朝後者發展。

3.5 臨界電壓

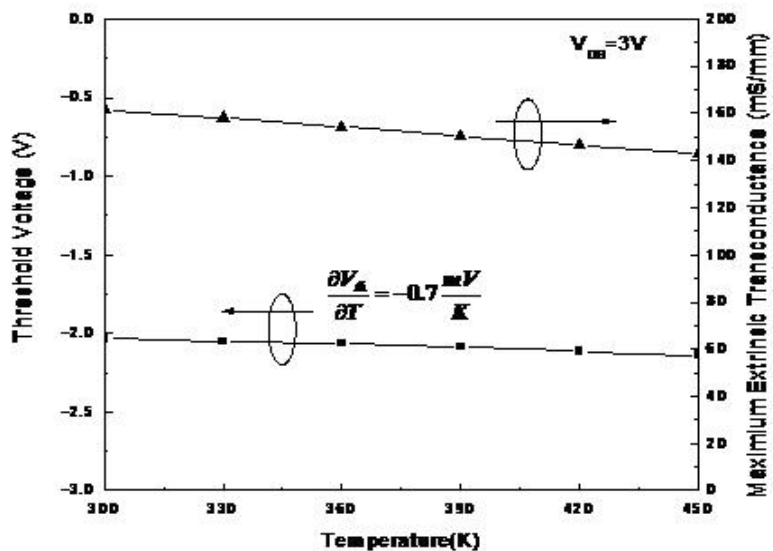


圖 3.5 $g_{m, max}$ 和 V_{th} 在 300K到 450K、 $V_{DS} = 3$ V對溫度的曲線圖

圖 3.5 顯示 $g_{m, max}$ 和 V_{th} 在 300K到 450K、 $V_{DS} = 3$ V對溫度的曲線圖。圖中 V_{th} 從 300K到 450K只有 0.105 V的變化，因此熱臨界係數($\partial V_{th}/\partial T$)為-0.7 mV/K，我們用此跟不同篇的論文相比較，在Table.4 中本論文得到相當好的係數，而改善的原因為通道摻雜銻使得不連續能隙改善通道載子限制能力。

Table. 4

References	Material	I_{DSS} (mA/mm)	$g_{m, max}$ (mS/mm)	$\partial V_{th}/\partial T$ (mV/K)
This work	GaAs/InGaAsSb DCFET	230	161.5	-0.7
Ref. [14]	GaAs/InGaAsNSb HEMT	87.5	109	-0.807
Ref. [20]	AlGaAs/InGaAsN As-grown HEMT	220	56	--
	RTA 700°C HEMT	290	64	--
Ref. [21]	AlGaAs/InGaAs Uniform channel HFET	112	102	-1
	V-shape channel HFET	201	112	-0.82
Ref. [22]	InGaP/InGaAs PDDCHFET	100	162.2	-1.81
Ref. [23]	InGaP/InGaAs device A	390	208	-1.139
	device B	400	158	-1.418

3.6 高頻微波特性

由於利用 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ 量子井結構來改善傳導帶的不連續能帶，進而使得通道載子限制能力變好，加上許多改善因素，使得元件可以操作在更高的頻率上。圖 3.6-1 為使用機台HP 8510B 網路分析儀配合外接探針，量測在元件 300 K、 $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$ 、 $V_{GS} = -1.5 \text{ V}$ 時的最高操作頻率範圍(12.5 GHz ~ 25 GHz)以及截止頻率(0.5 GHz~ 20 GHz)，顯示在圖 3.6-2 中。



圖 3.6-1 HP 8510B 網路分析儀

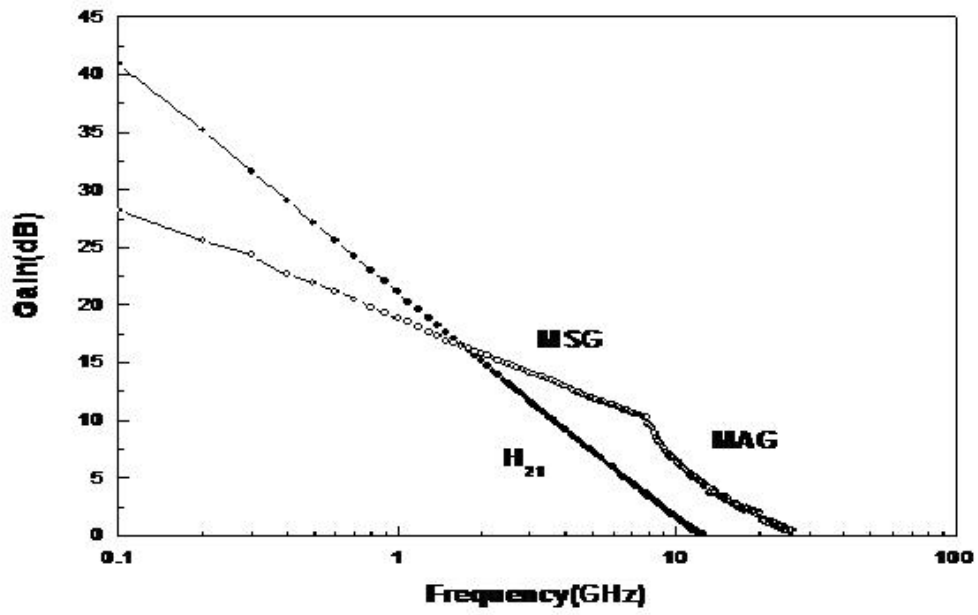


圖 3.6-2 高頻微波特性圖

第四章 結論

新製程 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ DCFET，於通道層中加入了稀薄的銻，成功的研究出有利的結果。於通道層中加入了類似界面活性劑的銻原子，有效的改進了 $\text{InGaAsSb}/\text{GaAs}$ 的表面的晶體品質以及電子傳輸率。另外， $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}$ 通道層中摻入稀薄的銻，減少了能帶的高度，使得載子的傳輸更好，也改善了通道層載子的限制力。

在觀察時，使用了不同的技術來測量，包含了 SIMS 以及 TEM，都證明可以改進晶體的性質。因此，運用這些儀器，觀察出高增益以及對於溫度的穩定性，成功的研究 $\text{InGaAsSb}/\text{GaAs}$ 。

最後感謝老師的教導和學長們的幫助，雖然沒有機會去操作儀器，但經過資料分析、專題討論、文書處理讓我對專題有測底的了解，以及在成大實驗室裡對機台的講解，讓我對實驗數據的量測有了基本的概念，最後感謝各組同學的幫助和討論結果，使得對專題中的問題得到解答。

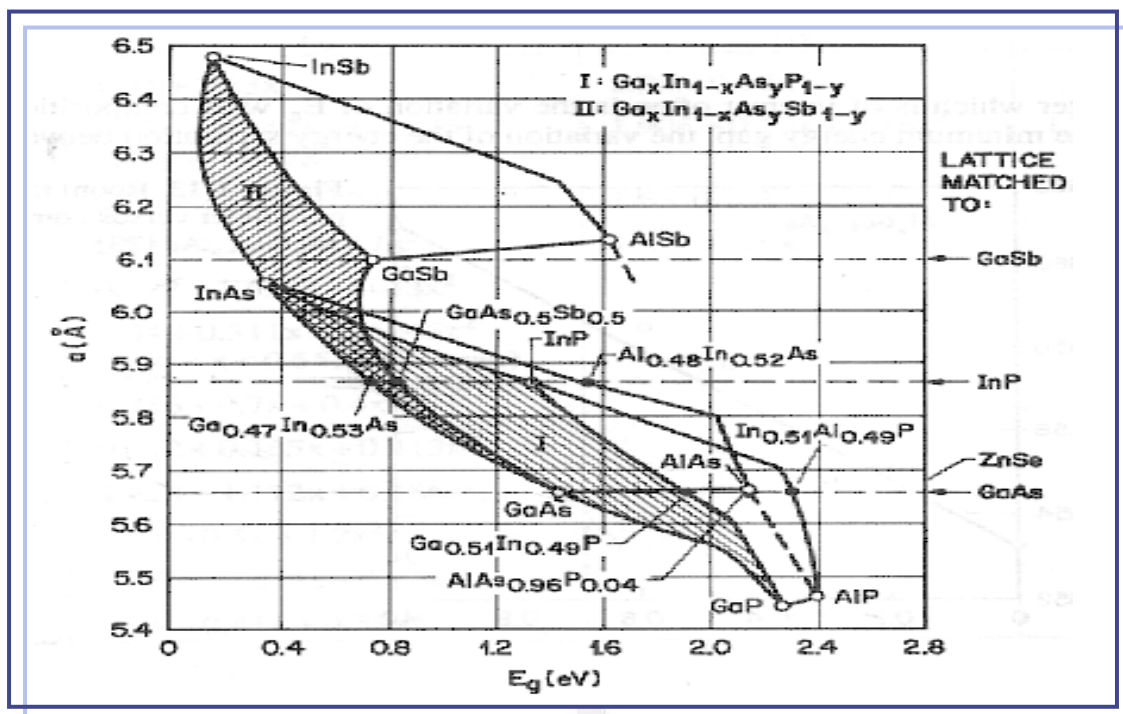


圖 1 化合物半導體材料的能帶間隙和晶格常數的對應圖

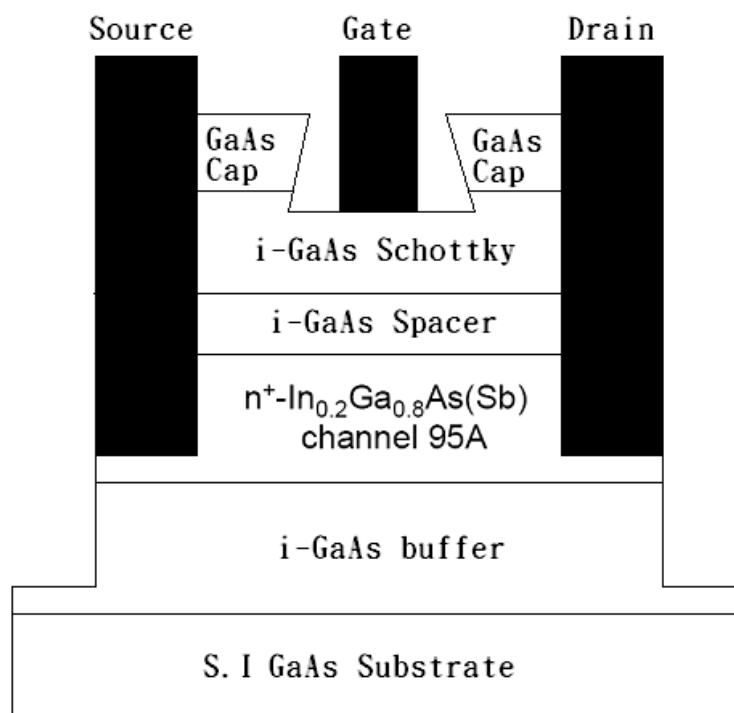


圖 2 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{AsSb}/\text{GaAs}$ DCFET的橫切面圖

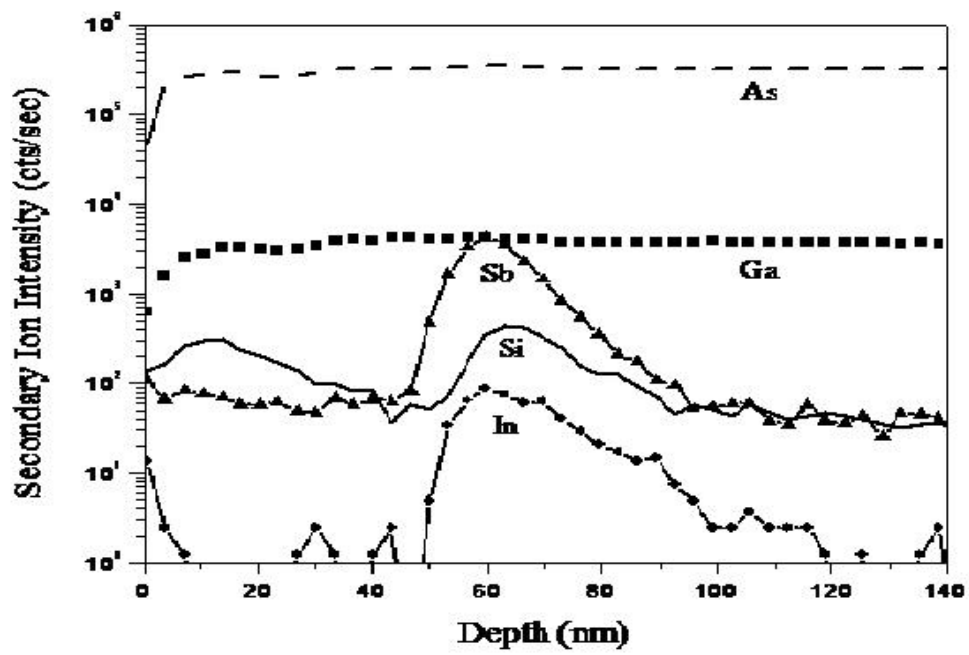


圖 3.1 二次離子質譜密度與界面深度圖

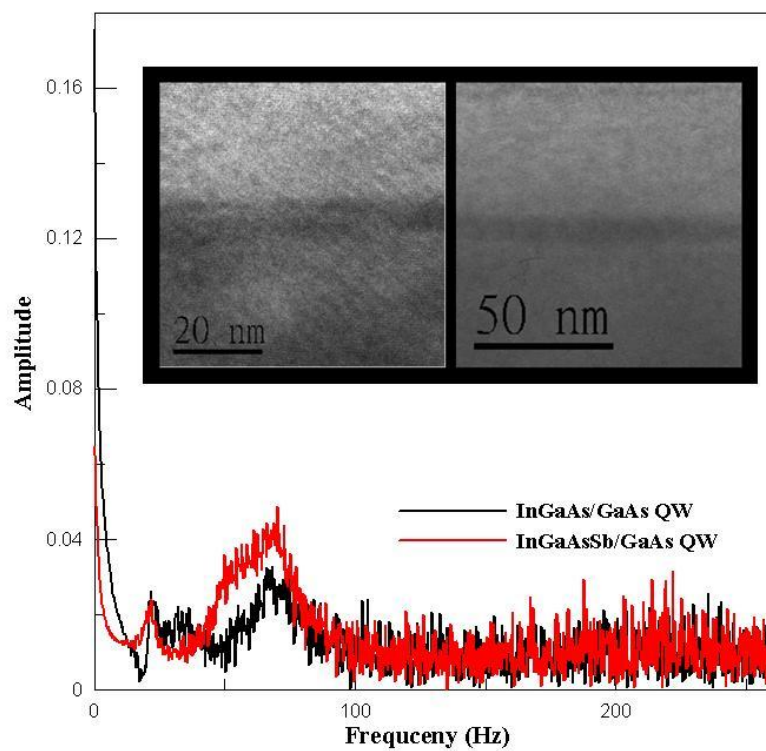


圖 3.2-1 TEM 圖

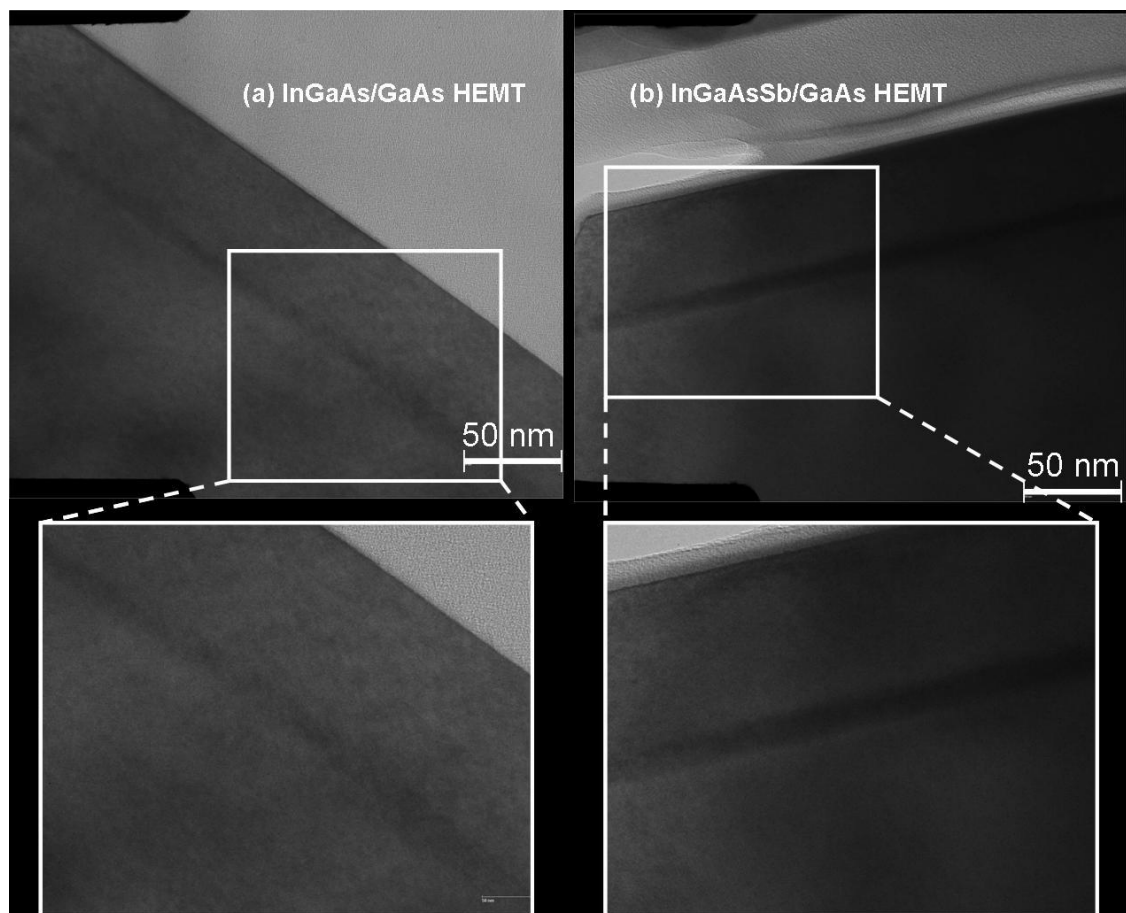


圖3.2-2 銻原子摻入前後TEM影像圖

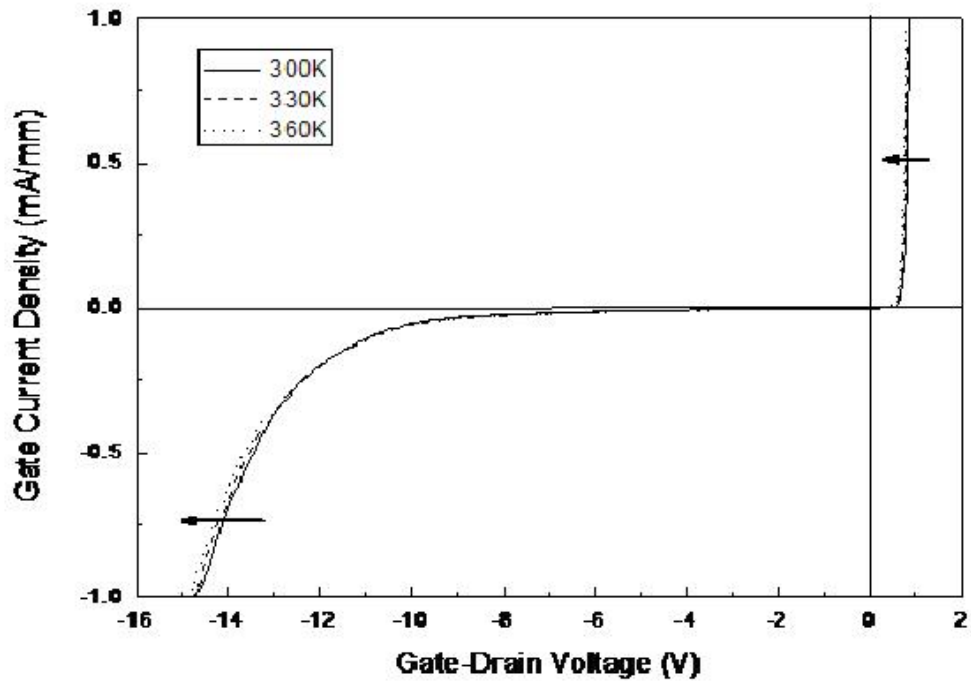


圖 3.3-1 300 K 到 360 K



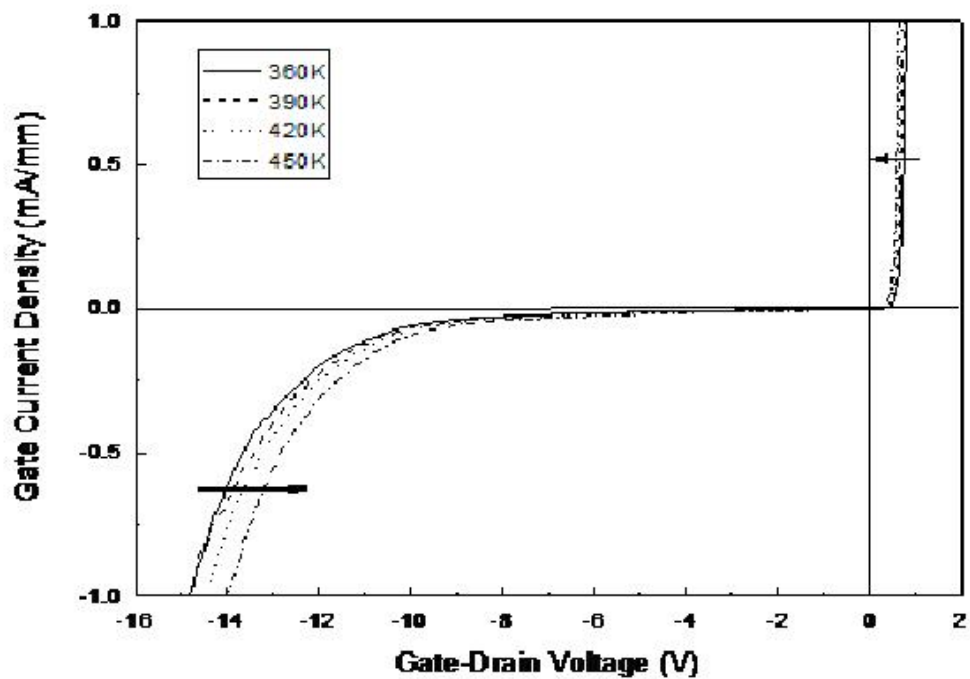


圖 3.3-2 360 K 到 450 K



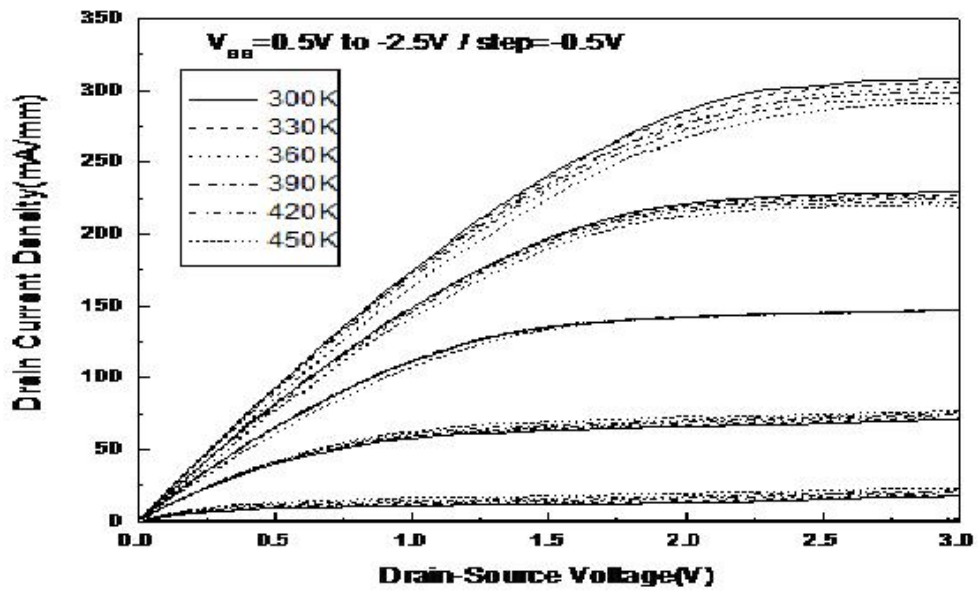


圖 3.4-1 銻砷化銮鎵通道高速電晶體的汲極電流密度與汲極對源極電壓的關係圖



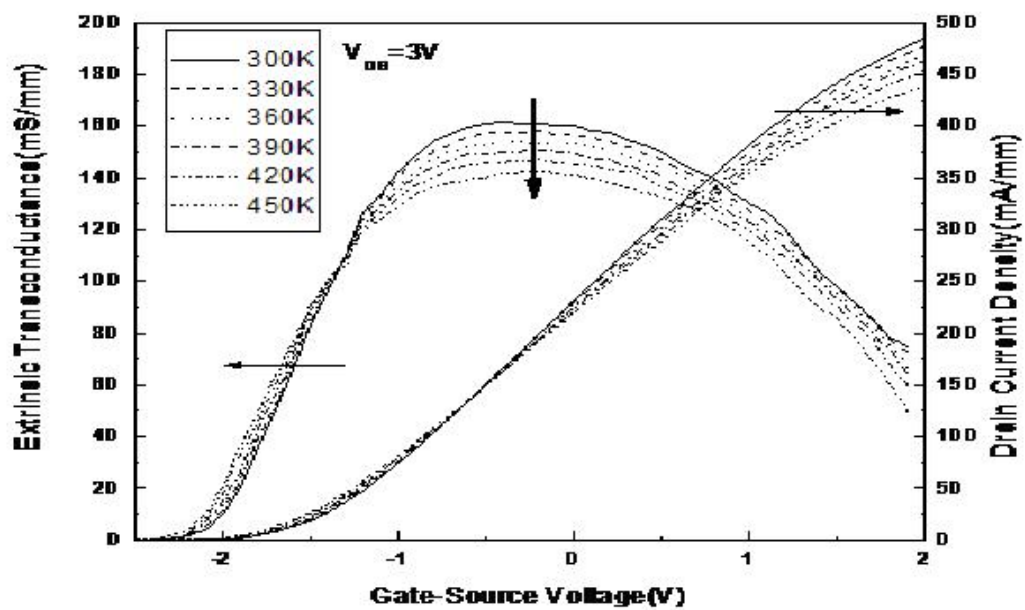


圖 3.4-2 300K 到 450K 銻砷化銮鎵通道高速電晶體的汲極電流密度、轉導值與閘極電壓的關係圖

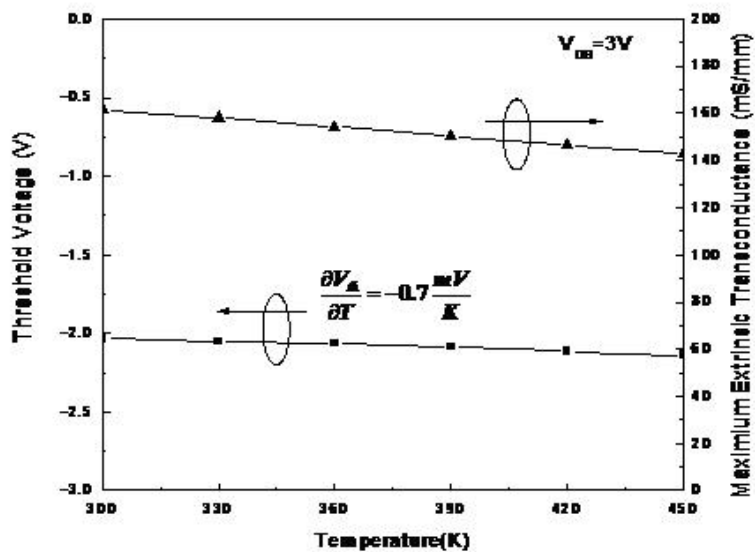


圖 3.5-1 $g_{m,max}$ 和 V_{th} 在 300K到 450K、 $V_{DS} = 3 V$ 對溫度的曲線圖





圖 3.6-1 HP 8510B 網路分析儀



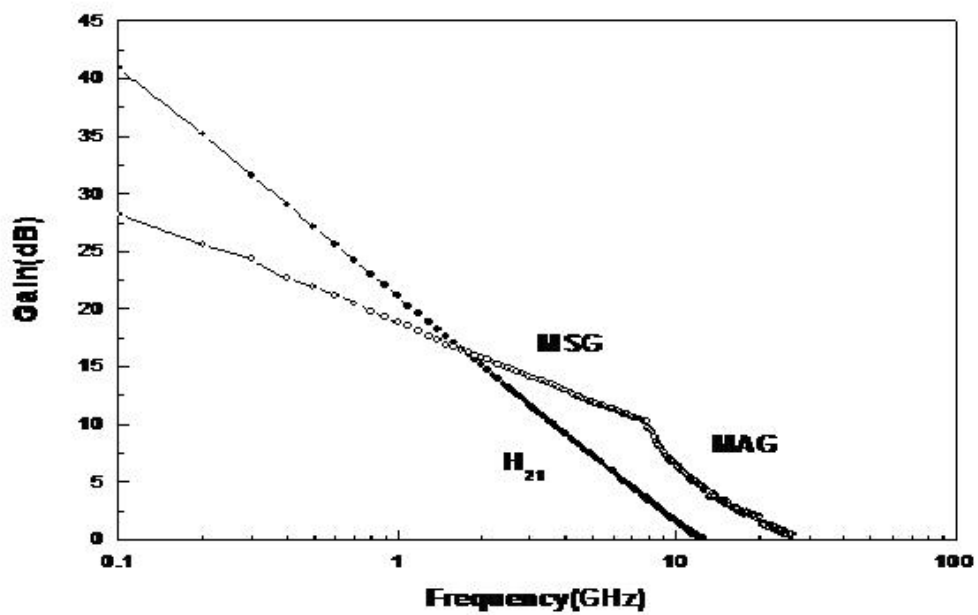


圖 3.6-2 高頻微波特性圖

參考文獻：

1. Choulis S A, Hosea T J C, Ghosh S, Klar P J and Hofmann M 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1026
2. Shan W, Walukiewicz W, Ager III J W, Haller E E, Geisz J F, Friedman D J Olson J M and Kurtz S R 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1121
3. Kim K and Zunger A. 2001 *Phys Rev Lett.* **86** 2609
4. Ptak A J, Johnston SW , Kurtz S, Friedman D J and Metzger W K 2003 *J. Cryst. Growth.* **251** 392
5. Geisz J F, Friedman D J, Olson J M, Kurtz S R and Keyes B M 1998 *J. Cryst. Growth.* **195** 401
6. Wang J S, Kovsh A R, Hsiao R S, Chen L P, Chen J F, Lay T S and Chi J Y 2004 *J Cryst Growth* **262** 84
7. Kovsh A R, Wang J S, Wei L, Shiao R S, Chi J Y and Volovik B V 2002 *J Vac Sci & Technol B* **20** 1158
8. Hsiao R S, Wang J S, Lin K F, Wei L, Liu H Y, Liang C Y, Lai C M, Kovsh A R, Maleev N A, Chi J Y and Chen J F 2004 *Jpn J Appl Phys* **43** L1555

9. Shimizu H, Kumada K, Uchiyama S and Kasukawa A 2000 *Electron. Lett.* **36** 1379
10. Yang X, Jurkovic M J, Heroux J B and Wang W I 1999 *Electron. Lett.* **35** 1082
11. Yang X, Jurkovic M J, Heroux J B and Wang W I 1999 *Appl. Phys. Lett.* **76** 179
12. Yang X, Heroux J B, Mei L F and Wang W I 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 4068
13. Ha W, Gambin V, Wistey M, Bank S, Yuen H, Kim S and Harris J.S 2002 *Electron. Lett.* **38** 277
14. Su K H, Hsu W C, Lee C S, Hu P J, Hsiao R S, Chen J F and Chi T W 2007 *Jpn.J. Appl. Phys.* **46** 2344
15. Shimizu H, Kumada K, Uchiyama S and Kasukawa A 2001 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **7** 355
16. Chan Y J and Yang M T 1995 *IEEE Trans. Electron Devices* **42** 1745
17. Lour W S, Liu W C, Tasi J H, Laih L W and Chen H R 1996 *Superlat. Microstruct.* **20** 15
18. Chiu H C, Chien F T, Yang S C, Kuo C W, Chan Y J 2000 *Electron. Lett.* **36** 1320
19. Su K H, Hsu W C, Lee C S, Wu T Y, Wu Y H, Chang L, Hsiao R S, Chen J F and

Chi T W 2007 *IEEE Electron Device Lett.* **28** 96

20. Su Y K, Chen W C, Hsu S H, Wu J D, Chang S J, Chuang R W and Chen W R
2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 3372

21. Su K H, Hsu W C, Hu P J, Chen Y J, Lee C S, Lin Y S and Wu C L 2007
J.Korean Phys. Soc. **50** 1878

22. Chuang H M, Cheng S Y, Chun-Yuan Chen, Liao X D, Liu R C and Liu W C
2003 *IEEE Trans. Electron Device* **50** 1717

23. Lai P H, Fu S I, Tsai Y Y, Yen C H, Chuang H M, Cheng S Y and Liu WC 2006
IEEE Trans. on Device and Materials Reliability **6** 52

