

國防科技學術合作研究計畫成果報告

高頻高功率氮化鎵微波元件技術研究

計畫編號：96-2623-7-009-014-D

執行期間：96年01月01日至96年12月31日

計畫主持人：張翼

執行單位：國立交通大學材料科學與工程學系(所)

中華民國97年1月20日

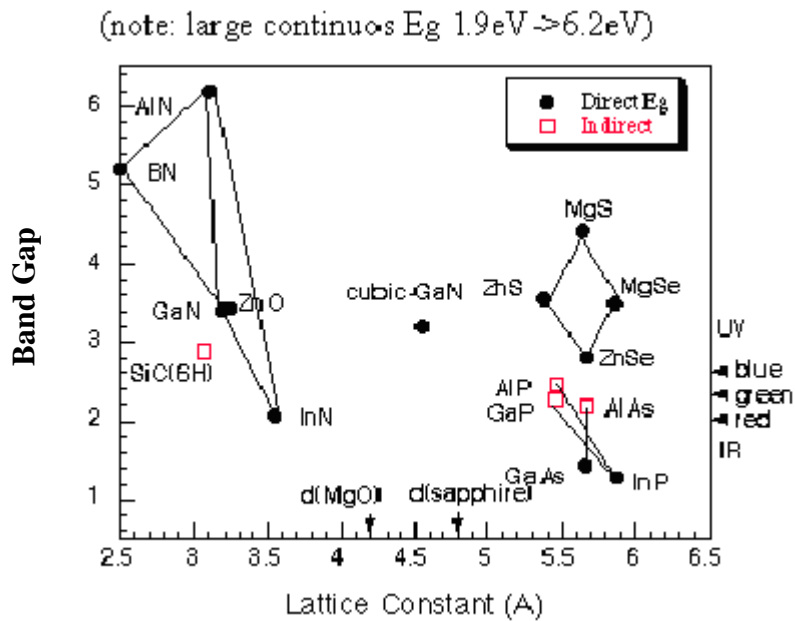
目錄

| | |
|------|----|
| 簡介 | 3 |
| 計畫摘要 | 6 |
| 計畫進度 | 8 |
| 執行成果 | 9 |
| 結論 | 13 |
| 文獻 | 14 |

簡介

隨著高功率元件的快速發展，使用高功率固態電子元件放大器取代原本放大器，以減少系統體積，降低複雜度並提高可靠度成爲雷達系統發展的方向。而此元件必須具備諸如超高功率、高效率、高線性度等特性。氮化鎵族的半導體擁有許多吸引人的電子材料特性，如寬能隙(3.45eV)、高崩潰電場($5 \times 10^6 \text{V cm}^{-1}$)、異質界面 AlGaN/GaN 調變參雜 (Modulation Doping) 可達到高電子移動率 ($1500 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$) 和極高的 Peak drift velocity ($3 \times 10^7 \text{cm S}^{-1}$)，這些特性可以滿足高功率高頻元件之需求。

由於 Nitrides 的 III-V 族化合物半導體都具有直接能隙，且範圍可由 0.9eV (InN) 到 6.2eV (AlN)。所以，經由能帶工程可以得到相當大範圍的能隙變化，這使得元件設計的彈性大爲增加，利用 GaN 異質結構元件作爲電子的應用上。這方面已經有相當多的研究，其中的翹楚首推美國 Cree 公司的 Mishra 所領軍的團隊，在 GaN HEMT 的研究擁有相當豐碩及領先的成果^{i,ii,iii,iv,v,vi,vii}。因此氮化鎵在此方面的應用，深受世人重視。



圖一 常見化合物半導體的能隙與晶格

氮化鎵的寬能隙及其它特性使它電子應用方面皆深具潛力，表一簡明的表示這些優越的特性對元件應用的影響。

表一 GaN 在高頻應用之優越特性

| | |
|---|--|
| 寬能隙 (Wide Bandgap) GaN (烏采結構) ~3.45 eV GaN (閃鋅結構) ~3.26 eV | - 不易因元件過熱而失效 - 耐高電流及高電壓 - 可在高溫環境操作 |
| 高崩潰電場 (High Breakdown voltage) ~5*10 ⁶ V/cm | - 可增加元件功率密度 - 可有較短的 gate length |
| 導熱係數(σ _T) GaN (烏采結構) ~1.3W/cm°C | - Duty cycle 和封裝密度與導熱性成正比 (對高頻, 高功率元件而言) |
| 飽和漂移速率(V _{sat}) GaN (烏采結構) ~2.7*10 ⁷ cm/sec | - 具有更佳高頻特性 ^{viii} |
| 介電常數(K) GaN (烏采結構) ~9.5 | - 低 K 值, 載子生命週期短, 可有提高操作頻率 |

由上表中可看出，由於 GaN 優越的材料特性，使得其在高頻功率元件的應用上有極大的潛力。其寬能隙的特性，使元件能夠在高溫下正常運作，讓元件能在較惡劣的高溫環境中還能運作，並意味著其為高功率元件的最佳選擇。在高頻元件的應用方面，根據 Baliga's Figure of Merit 的評估：

$$M_{f,BHF} \equiv \mu \cdot E_C^2 \cdot V_G^{1/2} / 2V_B^{1.5}$$

比較 GaN 與 Si 的 M_{fJ} 比值是 100、與 GaAs 的比值是 10，表示 GaN 比另二者適用於高頻功率元件。

表二：不同材料基本物理特性比較

| 特性比較 \ 材料別 | Ga | | Si | Ga |
|--------------------------|-----|----|----|-----|
| | Si | As | C | N |
| M_{f BHF} | 1.0 | 10 | ~1 | ~10 |

氮化鎵發展上目前遇到的最大問題，為獲得高品質之材料。由於缺乏氮化鎵單晶可供磊晶，目前所進行之研究皆為成長於其他單晶上。氮化鎵以兩種比較穩定的結晶型式存在，一是六方晶系烏采 (Wurtzite) 結構、另一是立方晶系閃鋅結構 (Cubic/Zincblend)。烏采結構是長在 Sapphire 或 6H/4H SiC 上，而閃鋅結構是長在極性立方材料上(如 GaAs)，目前全世界大都以烏采結構(Wurtzite)的藍寶石單晶(Al_2O_3)為基材，最近也有以 SiC 為基材者(如美國 Cree)。磊晶生長方式，有 MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)，MBE (Molecular Beam Epitaxy) 的薄膜磊晶技術與 HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 的厚膜成長技術。MOCVD 有著大量生產之優點與已在藍光 LED 市場獲得驗證。MBE 擁有準確界面控制的能力。HVPE 則可以成長出極高品質之氮化鎵磊晶。目前對於哪種技術或數種技術結合能夠成長出符合高功率高電子遷移率電晶體所需之磊晶片，目前尚無定論。

至於磊晶結構之研究，目前主要的研究方向以改變不同材料組成磊晶結構提升元件特性。現在氮化鎵微波元件有三種改良結構被提出，一為插入 AlN 於 AlGaN/GaN 之間，即 AlGaN/AlN/GaN 高電子遷移率電晶體(HEMT)，二為使用 InGaN 當作通道之 HEMT，三為使用 InAlN Schottky layer 之 HEMT。三種結構都利用 HEMT 結構的量子井而使電子侷限於量子井中，形成二維電子氣(2 dimensional electron gas, 2DEG)，此數結構 $\text{mobility} > 1300 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，工作頻段可輕易 $> 10 \text{GHz}$ 。此外，此三種 HEMT 結構的量子井結構由於更大之 conduction band discontinuity 與更強烈的壓電效應，可獲得比一般 AlGaN/GaN HEMT 結構更高之載子濃度(sheet carrier concentration)，加上極高的電子飽和傳輸速度，故可以有極高的飽和電流值

計畫摘要

氮化鎵磊晶成長並無晶格匹配的基材，僅能選用 SiC 及 sapphire 作為磊晶成長的基板，其晶格不匹配分別高達 4%及 16%，如此大的晶格不匹配會造成大量的差排 (dislocation)，而劣化磊晶品質。幸而 SiC、sapphire 及 GaN 均為六方晶結構(hexagonal)，運用緩衝層(buffer layer)的成長，可使差排互相結合減少其密度，有效提昇磊晶品質。以兩種基板而言，高品質的高頻高功率氮化鎵微波元件皆已被實現，目前主要的研究方向轉而以改變磊晶結構提升元件特性。現在氮化鎵微波元件有三種改良結構被提出，一為插入 AlN 於 AlGaIn/GaN 之間，即 AlGaIn/AlN/GaN 高電子遷移率電晶體(HEMT)，二為使用 InGaIn 當作通道之 HEMT，三為使用 InAlN Schottky layer 之 HEMT。三種結構都利用 HEMT 結構的量子井而使電子侷限於量子井中，形成二維電子氣(2 dimensional electron gas, 2DEG)， $\text{mobility} > 1300 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，工作頻段可輕易 $> 10 \text{GHz}$ 。此外，此三種 HEMT 結構的量子井結構由於更大之 conduction band discontinuity 與更強烈的壓電效應，可獲得比一般 AlGaIn/GaN HEMT 結構更高之載子濃度(sheet carrier concentration)，加上極高的電子飽和傳輸速度，故可以有極高的飽和電流值。本計劃主要運用有機金屬氣相沈積(MOCVD)成長 buffer GaN 以求得較佳之 buffer layer 平整度，接著使用分子束磊晶(MBE)成長 AlGaIn/AlN/GaN 之磊晶結構以取得較佳之量子井介面平整度，運用兩種成長方式之優點成長高品質之磊晶。並以製程方式增加元件的崩潰電壓及輸出功率，以製作出操作在 3GHz，Power density 為 6W/mm 的氮化鎵高功率放大器。

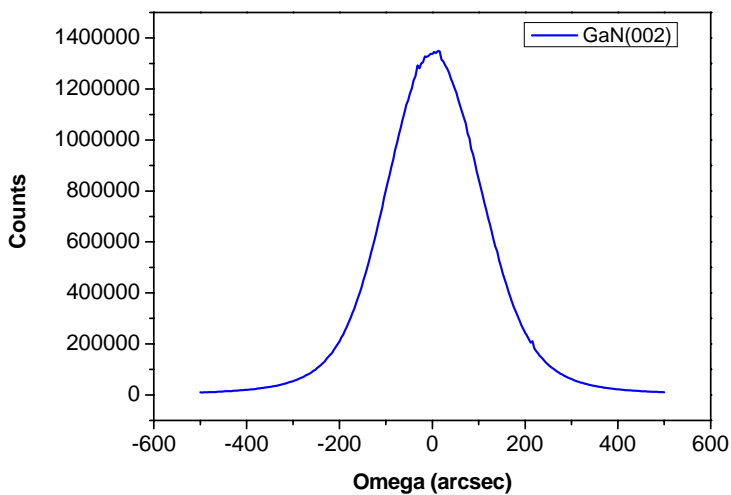
In the epitaxial growth of GaN, due to the lack of lattice matched substrate. The epilayer can only be grown on the SiC or sapphire, which has large lattice mismatch of 4% and 16% respectively. This value of mismatch will introduce dislocation in the GaN film and degraded the quality. However, using optimized buffer layer growth, dislocation density can be effectively reduced. For both substrates, high frequency, high power microwave devices has been realized. The research now turned to epilayer structure engineering to further improve the performance. Three approaches have been proposed, including insertion of AlN layer between AlGaIn/GaN, InGaIn channel HEMT and InAlN schottky layer HEMT. These structures use quantum wells to confine the electrons within 2DEG. Furthermore, higher sheet carrier concentration compared to the standard AlGaIn/GaN HEMT is possible because of the larger conduction band discontinuity and stronger piezoelectric effect. Thus results in higher saturation current. This proposal uses MOCVD to grow buffer GaN on sapphire, and MBE for sequential AlGaIn/AlN/GaN epitaxial layer growth. Breakdown voltage and output power density will be optimized by process parameter and structure design. A power HEMT with output power density of 6W/mm operating at 3GHz will be demonstrated.

執行成果

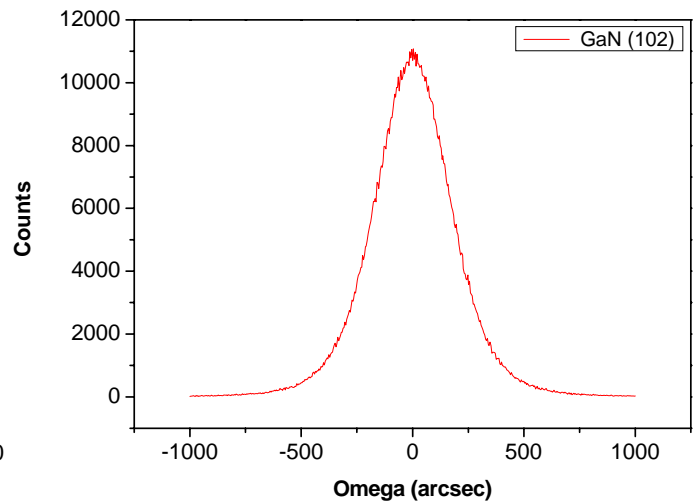
1. 氮化鎵成長與材料分析

氮化鎵重要之成長參數為五三比與成長溫度。已知成長 Ga-face 之氮化鎵需要在三族偏高之氣氛下成長，但是過多之三族會導致氮缺少產生空孔，使得氮化鎵因為缺陷變成 n 型半導體。磊晶品質將使用高解析度 X 光繞射儀作雙晶 X 光繞射(DCXRD)，由量測氮化鎵 rocking curve 之半高寬作初步判斷，良好氮化鎵磊晶半高寬應落在 200~300arcsec 之內。另外將配合 Photoluminescence 量測，由最強之 emission(DoX)半高寬與 yellow band 作進一步的判斷。電極將製作於氮化鎵上以進行霍爾量測。由於氮化鎵為寬能隙半導體材料，電極無法使用傳統鈦球(在氮化鎵上為蕭基接點)。將會利用電子槍蒸鍍機蒸鍍 Ti/Al/Ni/Au 並高溫退火處理形成歐姆接點。量測出氮化鎵電子遷移率與背景摻雜濃度。

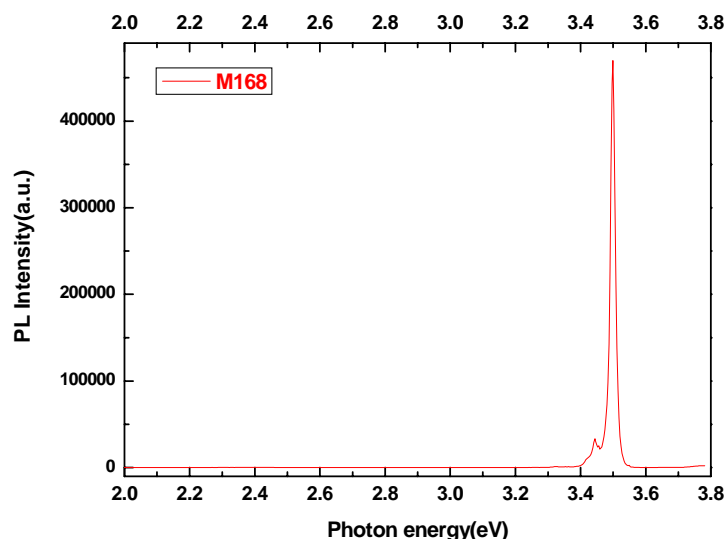
下圖二為成長所得之氮化鎵晶片 X 光繞射圖。氮化鎵(002)面半高寬為 260arcsec，(102)面半高寬為 605arcsec。PL 顯示能隙大小為 3.46eV，且沒有出現與缺陷有關之 yellow band (圖三)。霍爾量測電子遷移率為 210 cm²/V-s，載子濃度為 7.3 E+16 cm⁻³



圖二(a) 氮化鎵(002)面 X 光繞射圖



圖二(b) 氮化鎵(102)面 X 光繞射圖



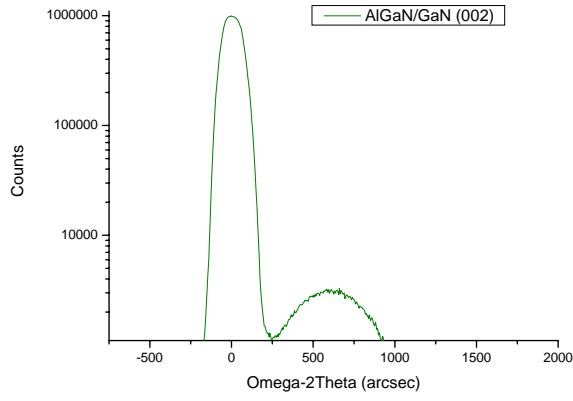
圖三 PL 光譜圖

2. 氮化鎵/氮化鋁鎵界面成長與特性量測

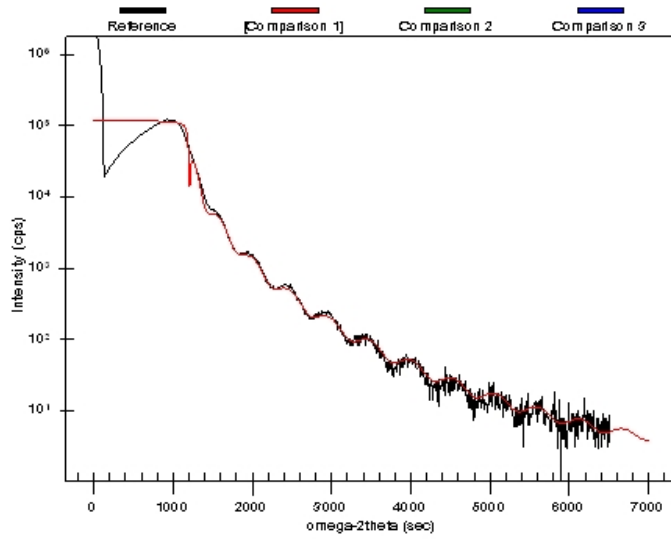
對於氮化鎵高電子遷移率電晶體而言，最重要的地方為傳輸電子之二維電子井。不但需要高濃度之載子濃度，更需要有足夠之電子遷移率才能提高元件之操作頻率與輸出功率。為了減低電子被散射之機率，除了高品質的氮化鎵外，更需要有平整且均勻之氮化鎵/氮化鋁鎵界面。在這裡我們將使用分子束磊晶之優勢，即良好之介面控制，試圖提高電子遷移率。

在完成氮化鎵/氮化鋁鎵磊晶結構後，首先會使用高解析度 X 光繞射儀作雙晶 X 光繞射(DCXRD)之 Ω -scan 再度確認氮化鎵磊晶品質，並將做 Omega-2Theta scan 藉由氮化鎵與氮化鋁鎵個別繞射出來之訊號間距計算鋁含量。若有必要會更進一步使用偏軸高解析度 X 光繞射(HRXRD)做出磊晶片之倒空間晶格圖(Reciprocal Space Map)計算氮化鋁鎵之 a 軸與 c 軸長度，並確認氮化鋁鎵是否有 relax。原子力顯微鏡也會被使用來判斷表面之粗糙度。在確定磊晶片物理特性合乎標準後，將同樣製作電極進行霍爾量測評估晶片品質。

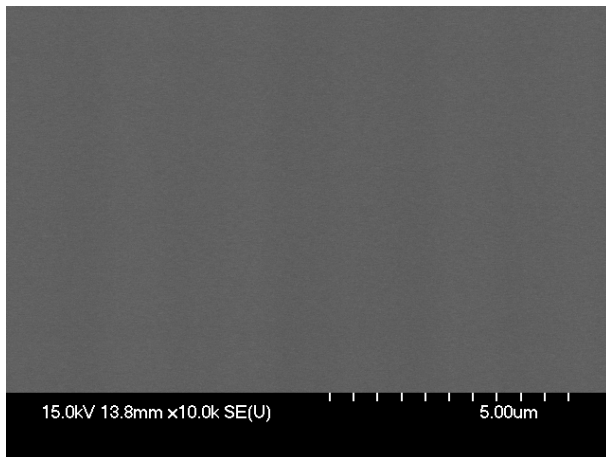
成長之 AlGaIn/GaN 結構藉由高解析度 X 光繞射儀進行 omega-2theta scan 可觀察到明顯之 AlGaIn 繞射訊號，計算得到之 Al 含量為 30%(圖四)。同時利用 XRR(X-ray Reflectivity)由實際量測結果與程式模擬比較，氮化鋁鎵厚度為 29nm(圖五)。SEM 與 AFM 驗證表面的平坦度為 0.744nm(圖六(e)(f))。試片製備後由穿透式電子顯微鏡進行分析(圖七)，AlGaIn 厚度為 30nm，AlGaIn 與 GaN 之間界面明顯且清晰。霍爾量測電子遷移率為 $1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，2DEG 載子濃度為 $1\text{E}+13 \text{ cm}^{-2}$ 。



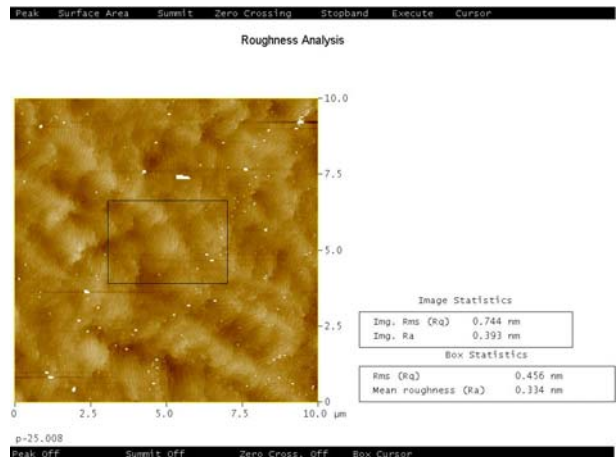
圖四 氮化鋁鎵/氮化鎵 Omega-2Theta scan X 光繞射圖



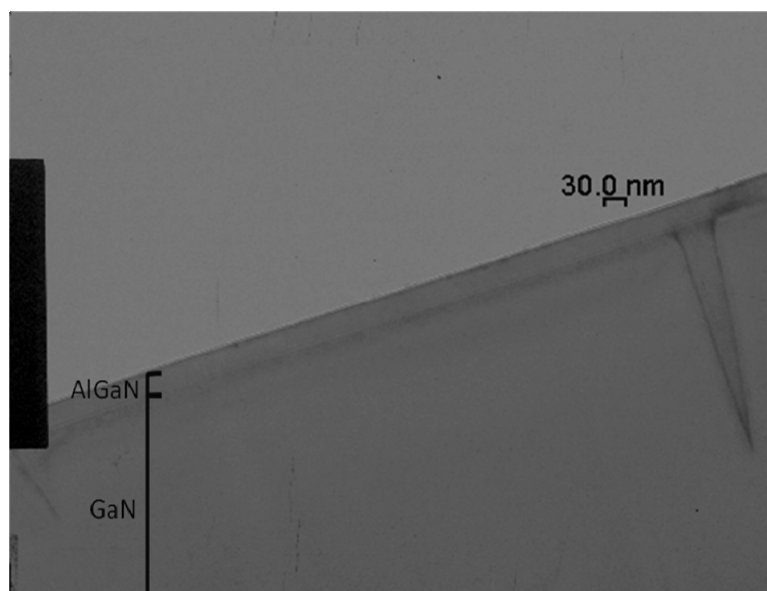
圖五 XRR 量測及模擬 AlGaIn 厚度圖



圖六(a) 氮化鋁鎵 SEM 表面影像



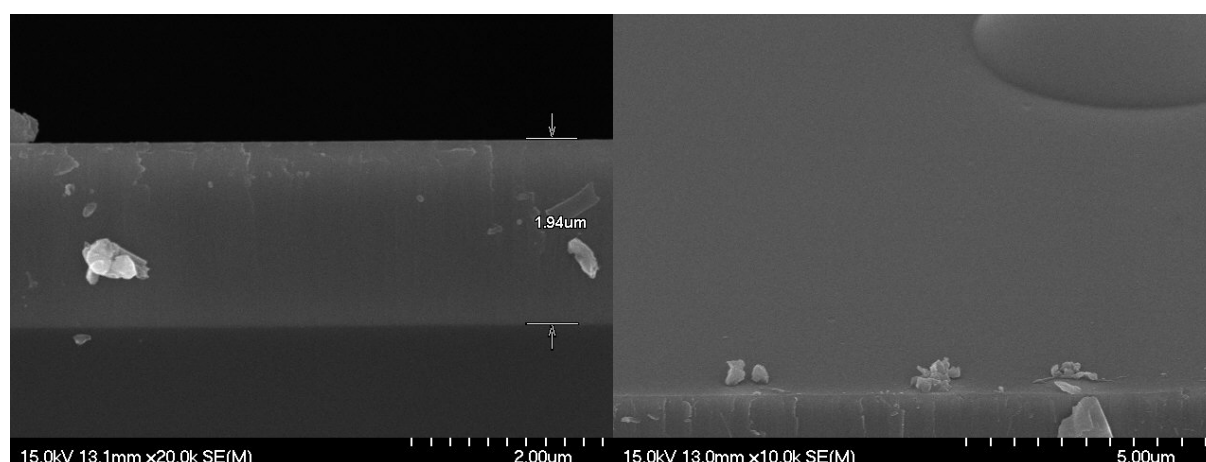
圖六(b) 氮化鋁鎵 AFM 表面分析



圖七 氮化鋁鎵/氮化鎵界面 TEM 影像

3. 氮化鎵/氮化鋁/氮化鋁鎵界面成長

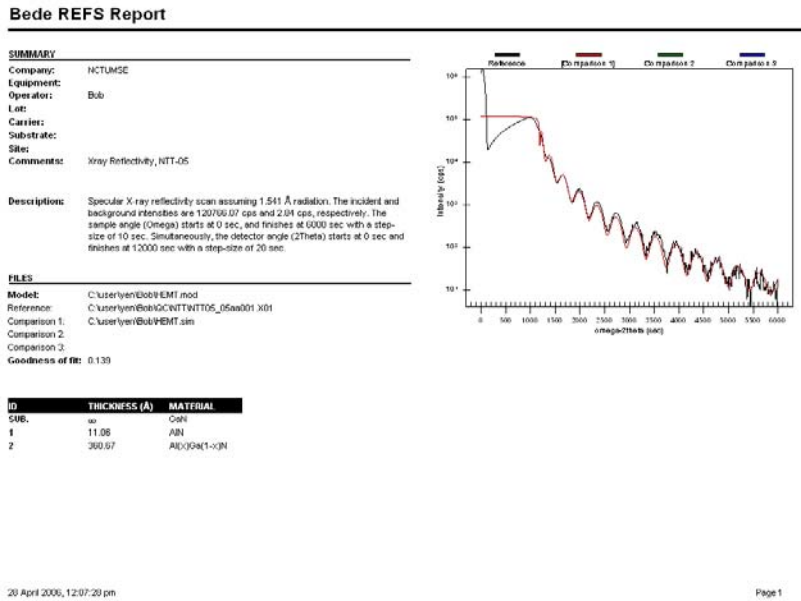
在完成氮化鎵/氮化鋁鎵磊晶結構成長後，將在氮化鎵/氮化鋁鎵之間插入一層 1nm 之氮化鋁，此層之成長及品質極為重要，將使用研究所得之成核層最佳化條件為基準來調整。評估方式以氮化鎵/氮化鋁/氮化鋁鎵結構霍爾量測結果，其電子遷移率必須優於之前成長之氮化鎵/氮化鋁鎵結構。我們也將製作不同條件穿透式電子顯微鏡剖面試片，以電子顯微鏡觀察氮化鋁鎵/氮化鋁界面厚度與粗糙度。



圖八 氮化鋁鎵/氮化鋁/氮化鎵表面與斷面 SEM 影像

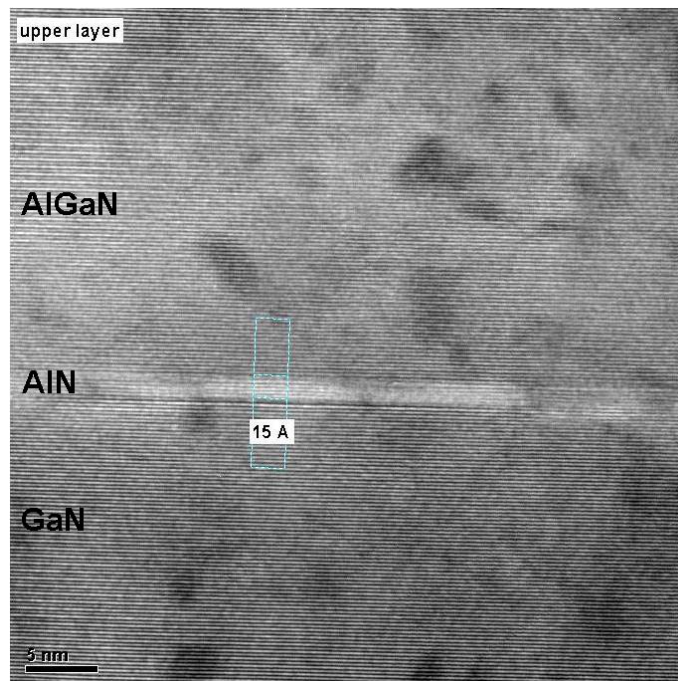
由掃描式電子顯微鏡觀察成長後之試片表面與斷面可得知磊晶層總厚度為 $1.94 \mu\text{m}$ ，表面除了因為在 Ga-rich 條件成長導致之表面金屬液滴凝結外非常平整。利用鹽酸溶解表面殘留鎵金屬後，以 XRR

分析各層厚度如下圖九。AlN 厚度為 1.1nm，其上為 36nm 之 AlGaN。



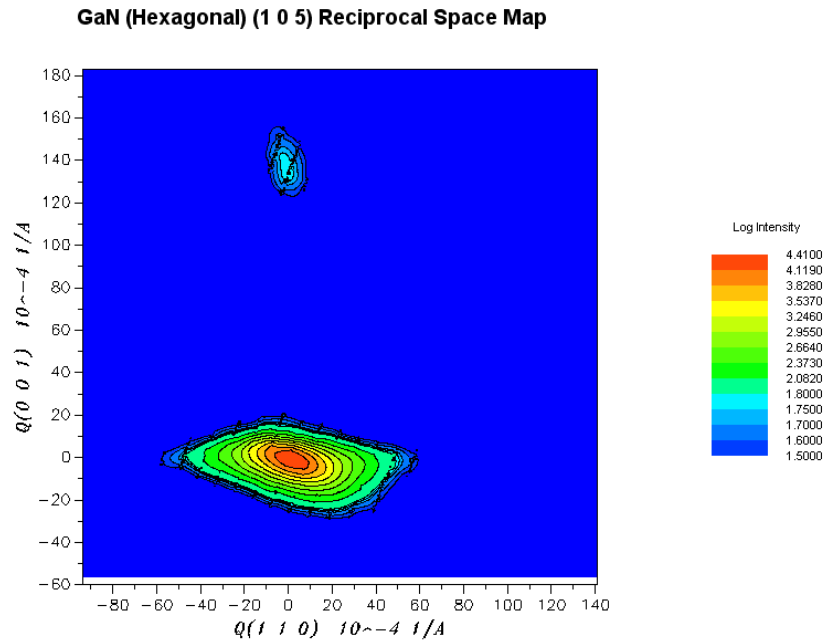
圖九 XRR 量測及模擬 AlGaN/AlN/GaN 厚度圖

AlGaN/AlN 界面品質與厚度則使用穿透式電子顯微鏡確認，由下圖十高解析度穿透式電子顯微鏡影像圖可發現，AlN 上下界面皆清晰可分辨，厚度為 1.5nm。



圖十 AlGaN/AlN/GaN 結構 HR-TEM 影像圖

為了量測 AlGaN 或 AlN 是否會因晶格不匹配應力累積導致晶格 relax 而降低壓電效應與晶體品質，我們利用 Reciprocal space map (RSM)量測 AlGaN 與 GaN 之晶格常數，結果顯示兩層 a 軸皆具相同長度，證明 AlGaN 是 fully strained。

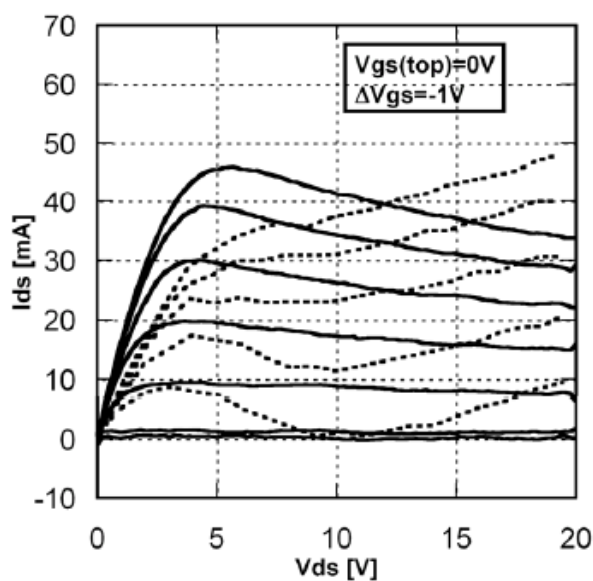


圖十一 AlGaIn/AlN/GaN 結構 Reciprocal Space Map (RSM)

此一結構霍爾量測電子遷移率為 $1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，2DEG 載子濃度為 $1.3\text{E}+13 \text{ cm}^{-2}$ 。藉由插入 AlN，載子濃度有有效的提高。

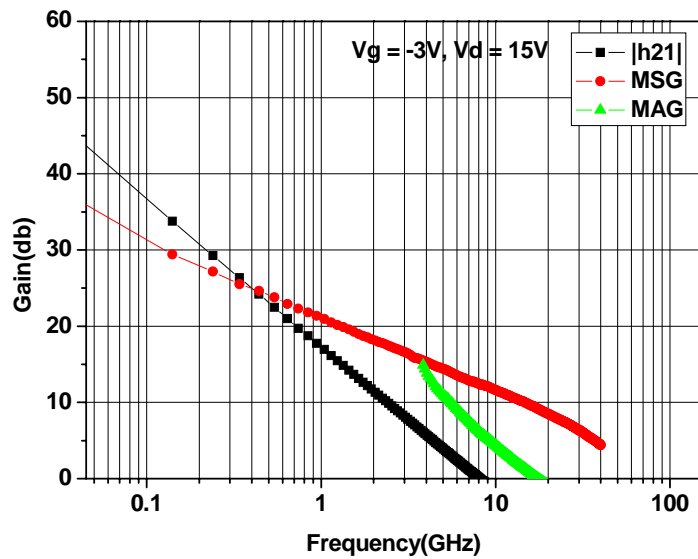
4. 氮化鎵/氮化鋁/氮化鋁鎵 HEMT 製作量測

在元件磊晶成長完成後，在無塵室經過絕緣蝕刻、歐姆接觸、閘極金屬沈積、鈍化層沈積、空氣橋，完成元件製程制作，並以 Aglient 4157 分析其直流特性。元件大小： $L_g = 2\mu\text{m}$ 、 $W_g = 100\mu\text{m}$ ， $L_{SD} = 10\mu\text{m}$ ，其飽和電流及電導值分別為 $450\text{mA}/\text{mm}$ 及 $130\text{mS}/\text{mm}$ ，崩潰電壓 $> 70\text{V}$ 。



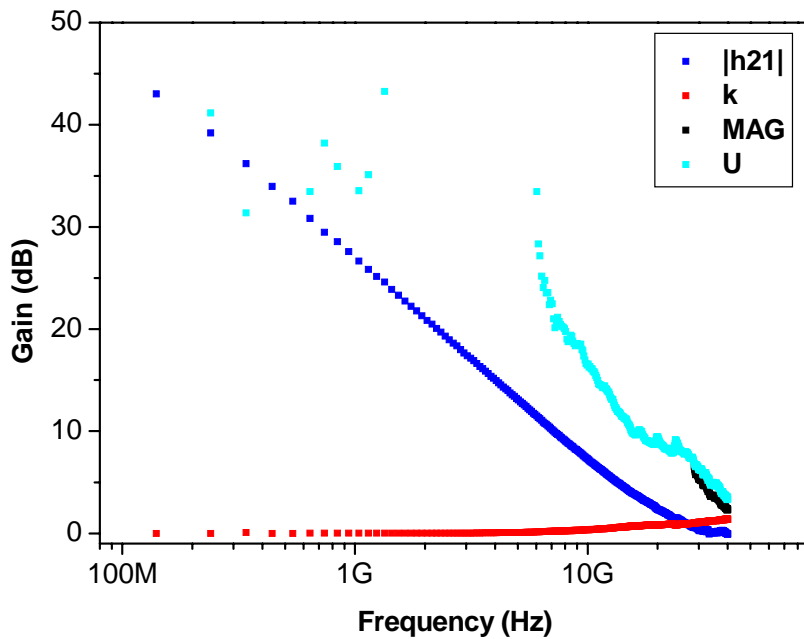
圖十二 AlGaIn/AlN/GaN HEMTs 直流特性

爲了評估元件於高頻下的特性，我們以向量網路分析儀分析元件 0.4~40GHz 的 S 參數，並由此換算其電流增益 $|h_{21}|$ 及功率增益 MAG，求得其截止頻率及最大振盪頻率分別爲 8GHz 及 17GHz，如下圖十三所示。



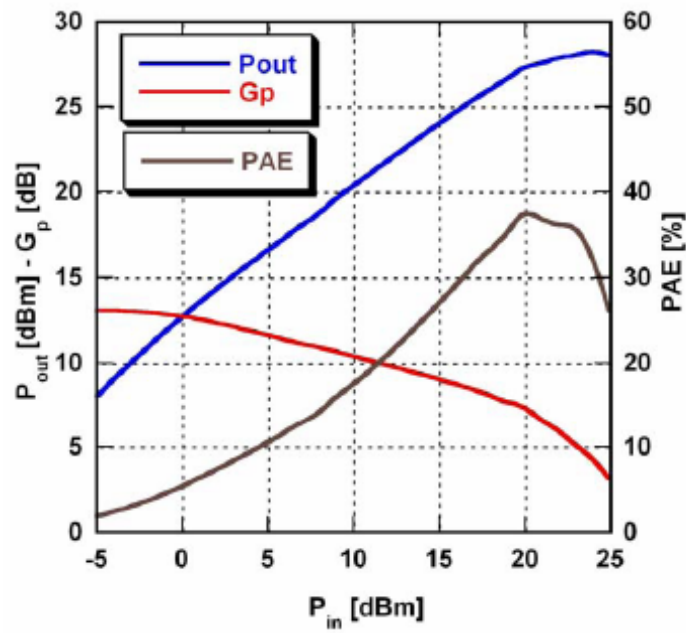
圖十三 AlGaIn/AlN/GaN HEMTs 高頻小訊號特性

當元件的閘極線寬縮小至 $L_g = 0.7\mu\text{m}$ 、 $W_g = 100\mu\text{m}$ ， $L_{SD} = 5\mu\text{m}$ 時，元件的飽和電流及電導值分別提高至 850mA/mm 及 200mS/mm，其截止頻率及最大振盪頻率亦可有效提高至 33GHz 及 57GHz，如下圖十四所示。



圖十四 AlGaIn/AlN/GaN HEMTs 高頻小訊號特性

除了以向量網路分析儀分析元件的小訊號特性外，並以主動式 load-pull 量測系統分析其於 3GHz 下的功率特性，在 $V_g = -4V$ ， $V_d = 50V$ 下，其最大功率可達 6W/mm，增益為 13db，PAE = 37%。



圖十五 AlGaIn/AlN/GaN HEMTs 高頻大訊號功率特性

結論

目前已完成

1. 氮化鎵成長與材料分析

1. 以高解析度 X 光繞射儀配合 Photoluminescence 決定氮化鎵品質
2. 氮化鎵磊晶霍爾量測

2. 氮化鎵/氮化鋁鎵界面成長與特性量測

1. 成長出 AlGaN/GaN 結構
2. 利用高解析度 X 光繞射儀，SEM，AFM 與 TEM 分析磊晶結構與界面品質
3. AlGaN/GaN HEMT 結構電子遷移率為 $1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，2DEG 載子濃度為 $1\text{E}+13 \text{ cm}^{-2}$ 。

3. 氮化鎵/氮化鋁/氮化鋁鎵界面成長

1. 成長氮化鎵/氮化鋁/氮化鋁鎵結構，並以霍爾量測與氮化鎵/氮化鋁鎵結構比較
2. 電子遷移率為 $1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，2DEG 載子濃度為 $1.3\text{E}+13 \text{ cm}^{-2}$
3. 運用 TEM 分析，最佳化磊晶結構

4. 氮化鎵/氮化鋁/氮化鋁鎵 HEMT 製作量測

1. 氮化鎵/氮化鋁/氮化鋁鎵 HEMT 元件之製作
2. 截止頻率及最大振盪頻率分別為 33GHz 及 57GHz
3. 元件高頻功率密度 6W/mm

ⁱ “High breakdown GaN HEMT with overlapping gate structure”,Zhang, N.-Q.; Keller, S.; Parish, G.; Heikman, S.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K.,IEEE Electron Device Letters , Volume: 21 Issue: 9 , Sept. 2000.,Page(s): 421 -423

ⁱⁱ “Broadband GaAs MESFET and GaN HEMT resistive feedback power amplifiers”,Karthikeyan Krishnamurthy; Ramakrishna Vetury; Keller, S.; Mishra, U.; Rodwell, M.J.W.; Long, S.I.,Solid-State Circuits, IEEE Journal of , Volume: 35 Issue: 9 , Sept. 2000 ,Page(s): 1285 -1292

ⁱⁱⁱ “AlGaIn/GaN HEMTs and HBTs for microwave power” ,Mishra, U.K.; Vetury, R.; McCarthy, L.; Smorchkova, Y.; Keller, S.; Xing, H.; Zhang, N.; Speck, J.S.; York, R.; DenBaars, S.; Wu, Y.-F.; Parikh, P.; Chavarkar, P. ,Device Research Conference, 2000. Conference Digest. 58th DRC , 2000 ,Page(s): 35 -36

^{iv} “A 3-10 GHz LCR-matched power amplifier using flip-chip mounted AlGaIn/GaN HEMTs”, Xu, J.J.; Keller, S.; Parish, G.; Heikman, S.; Mishra, U.K.; York, R.A.,Microwave Symposium Digest. 2000 IEEE MTT-S International , Volume: 2 , 2000,Page(s): 959 -962 vol.2.

^v “High Al-content AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrates with very high power performance”, Wu, Y.-F.; Kopolnek, D.; Ibbetson, J.; Zhang, N.-Q.; Parikh, P.; Keller, B.P.; Mishra, U.K. Electron Devices Meeting, 1999. IEDM Technical Digest. International , 1999, Page(s): 925 -927

^{vi} “GaN HEMTs grown on sapphire substrates for microwave power amplification”,Wu, Y.-F.; Thibeault, B.J.; Xu, J.J.; York, R.A.; Keller, S.; Keller, B.P.; Mishra, U.K. ,Device Research Conference Digest, 1999 57th Annual , 1999 ,Page(s): 50 -51

^{vii} “3-watt AlGaIn-GaN HEMTs on sapphire substrates with thermal management by flip-chip bonding”, Wu, Y.-F.; Thibeault, B.J.; Keller, B.P.; Keller, S.; Denbaars, S.P.; Mishra, U.K. ,Device Research Conference Digest, 1998. 56th Annual , 1998 ,Page(s): 118 -119

^{viii} M. S. Shur *et. al.*,”GaN and related materials for high power applications”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 483, pp. 15-26(1998).