



# 逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

## 具有 $\Gamma$ 型閘極結構氮化鋁鎵/氮化鎵 高電子移動率電晶體之研製

作者：廖于豪、楊肇能、廖珮玟、陳伊婷、紀明儀

系級：電子工程學系四年級

學號：D9572338、D9535932、D9572181、D9530421、D9572724

開課老師：李景松

課程名稱：化合物半導體

開課系所：電子工程學系

開課學年：98 學年度 第一 學期



## 中文摘要

本實驗係研製一 $\Gamma$ 閘極製程技術於一氮化鋁鎵/氮化鎵異質結構場效體，以同時獲致有效縮短閘極長度、表面鈍化處理與形成一場極板結構之優異特性。在閘極窗口為 $1.2\ \mu\text{m}$  氮化鋁鎵蕭特基接觸層上沉積氮化矽鈍化層厚，並形成一 $\Gamma$ 閘極結構有效縮短閘極長度為 $0.6\ \mu\text{m}$  及一長度為 $0.6\ \mu\text{m}$  之場極板結構，該氮化矽厚度分別為 $15\ \text{nm}$ 、 $30\ \text{nm}$ 、以及 $45\ \text{nm}$  對於元件特性之影響亦被完整探討。

使用傳統閘極與具有在不同氮化矽厚度( $15\ \text{nm}$ 、 $30\ \text{nm}$ 、及 $45\ \text{nm}$ )之 $\Gamma$ 閘極之氮化鋁鎵/氮化鎵異質結構場效體之直流和微波特性分別為:飽和電流密度 $ID_{ss0}$  ( $306.3\ \text{mA/mm}$ 、 $348.9\ \text{mA/mm}$ 、 $363.8\ \text{mA/mm}$ 、及  $364.2\ \text{mA/mm}$ )、最大轉導值 $gm_{max}$  ( $76\ \text{mS/mm}$ 、 $86\ \text{mS/mm}$ 、 $93\ \text{mS/mm}$ 、及 $93.6\ \text{mS/mm}$ )、夾止電壓 $V_{pinch-off}$  ( $-4.5\ \text{V}$ 、 $-4.65\ \text{V}$ 、 $-4.7\ \text{V}$ 、及 $-4.71\ \text{V}$ )、電流增益截止頻率 $f_T$  ( $10.1\ \text{GHz}$ 、 $12\ \text{GHz}$ 、 $13.1\ \text{GHz}$ 及 $13.4\ \text{GHz}$ )、最大震盪頻率 $f_{max}$  ( $12\ \text{GHz}$ 、 $15.3\ \text{GHz}$ 、 $16.2\ \text{GHz}$  及 $16.5\ \text{GHz}$ )、最小雜訊 $NF_{min}$  ( $2.8\ \text{dB}$ 、 $2.2\ \text{dB}$ 、 $1.9\ \text{dB}$  及 $1.8\ \text{dB}$ )，最大輸出功率 $P_{out}$  ( $23.7\ \text{dBm}$ 、 $29.9\ \text{dBm}$ 、 $29.5\ \text{dBm}$  及 $29.2\ \text{dBm}$ )。實驗結果顯示，使用 $\Gamma$ 閘極結構之氮化鋁鎵/氮化鎵異質結構場效體可有效改善電流密度、元件線性度及輸出功率等優異特性，較厚之氮化矽鈍化層厚度有利於高頻與高功率輸出特性之改善，而較薄之氮化矽鈍化層厚度有利

具有 $\Gamma$ 型閘極結構氮化鋁鎵/氮化鎵高電子移動率電晶體之研製

於低漏電流與高功率效率(P.A.E.)特性之改善。

關鍵字： 氮化矽鈰化層， $\Gamma$  閘極，表面缺陷



## 目次

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 中文摘要.....                   | 1  |
| 第一章 序論.....                 | 5  |
| 第二章 元件結構與製程步驟.....          | 10 |
| 2-1 元件架構.....               | 10 |
| 2-2 製造過程.....               | 11 |
| 2-2-1 樣品定向.....             | 13 |
| 2-2-2 高台絕緣.....             | 13 |
| 2-2-3 源極和汲極歐姆接觸.....        | 15 |
| 2-2-4 閘極蕭特基接觸.....          | 16 |
| 2-2-5 $\Gamma$ 閘極蕭特基接觸..... | 16 |
| 第三章 結果和討論.....              | 18 |
| 3-1 DC 特性.....              | 18 |
| 3-1-1 電流-電壓特性.....          | 18 |
| 3-1-2 轉移特性.....             | 21 |
| 3-1-3 崩潰電壓.....             | 23 |
| 3-1-4 閘極漏電流.....            | 25 |
| 3-1-5 輸出電導.....             | 27 |
| 3-2 與溫度有關的DC特性.....         | 28 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 3-2-1 電流-電壓特性..... | 28 |
| 3-2-2 轉換特性.....    | 31 |
| 3-2-3 崩潰電壓.....    | 35 |
| 3-3 微波特性.....      | 36 |
| 3-4 功率特性.....      | 39 |
| 3-5 雜訊特性.....      | 44 |
| 3-6 低頻雜訊特性.....    | 46 |
| 第四章 結論.....        | 48 |
| 參考文獻.....          | 49 |



# 第一章 序論

在最近十年，GaN 和它的合金化合物氮化銦，氮化鋁為我們帶來許多的研究題目和應用，例如功率電子，微波電子，壓電的傳感器，雷射二極體(LD)和發白光的二極體(LED)。這些獨一無二的特性使 III-氮化合物半導體被應用在一些傳統化合物或矽半導體沒辦法被使用的特定方面。化學惰性讓 III-氮化物元件能在高溫和高壓環境內正常工作，而且具有較堅固的物理性質也對於晶圓和花費的成本是一個極大的優勢。圖 1-1 顯示能帶隙與各種化合物半導體中對晶格常數的比較。氮化銦，氮化鎵和氮化鋁的能隙是 0.8 eV， 3.2 eV 和 6.2 eV, 其範圍是在可見光和紫外光。圖 1-2 顯示電壓和自然極化對 2DEG 的濃度的影響，對 2DEG[4]的主要的影響是極化作用。實際上，由於電壓和自然極化作用，在沒有摻雜情況下可以獲得高的片載子濃度。在氮化鋁鎵/氮化鎵界面由於晶格不匹配產生較大的應力。晶格不匹配在雙軸壓力和應力產生壓電極化作用  $P_z$  [5]-[6]。表 1-1 顯示 FET 或 HFET 不同的化合物半導體包括矽，砷化鎵，磷化銦，碳化矽 和氮化鎵基材的比較，HFET 在氮化鎵的基材上證明有較好的電子速度和

二維電子氣濃度。由於有較寬的能帶隙，較高的電子濃度和飽和速度，最重要的是氮化鎵基底場效電晶體較適合應用在微波功率電子和直流功率電子。III-V 族元件容易被閘極表面的狀況影響。當閘極的面積縮小時，粒子和污染物會容易損壞一個元件。鈍化層能保護在操作、處理和資料的量測期間所損害的元件。通常被用的鈍化材料是  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 。在這個作業中，使用 PECVD 來成長氮化矽鈍化層而添加的前驅物為  $\text{SiH}_4$ ， $\text{NH}_3$ ，Ar 和  $\text{N}_2$  [9]-[10]。

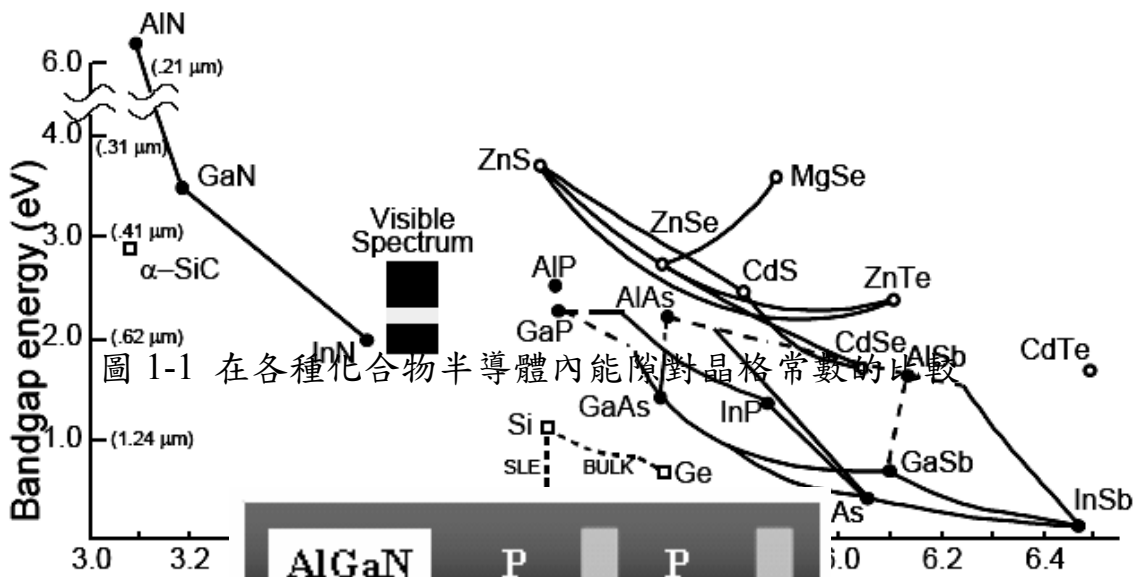


圖 1-1 在各種化合物半導體內能隙對晶格常數的比較

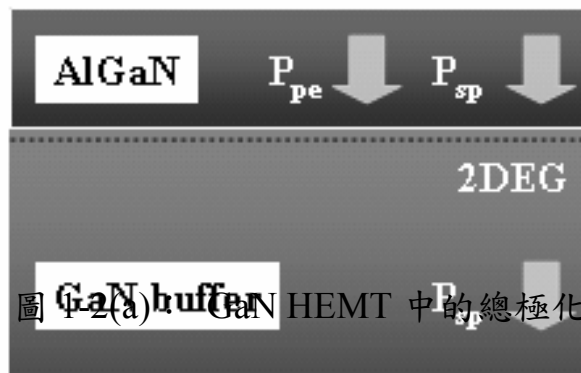


圖 1-2(a) GaN HEMT 中的總極化

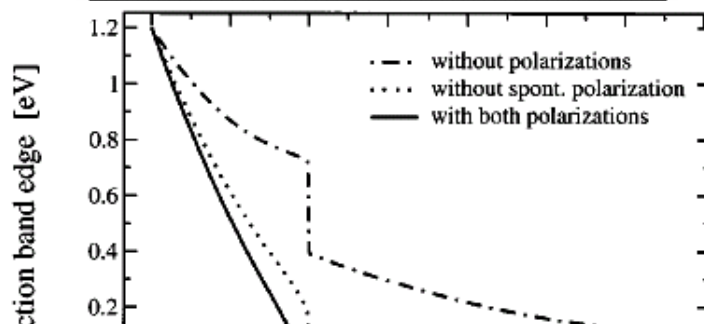


圖 1-2(b) 這些極化如何影響 AlGaIn/GaN HEMT 內 2DEG 的濃度

|                                | Si     | GaAs               | InP                | 4H-SiC          | GaN                  |
|--------------------------------|--------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| $E_g(\text{eV})$               | 1.11   | 1.42               | 1.35               | 3.26            | 3.2                  |
| $\mu_e(\text{cm}^2\text{-Vs})$ | 1300   | 4500               | 8500               | 700             | 1500                 |
| $V_{sat}(\text{cm/s})$         | $10^7$ | $10^7$             | $10^7$             | $2 \times 10^7$ | $2 \times 10^7$      |
| $V_{peak}(\text{cm/s})$        | N/A    | $2.1 \times 10^7$  | $2.3 \times 10^7$  | N/A             | $2.7 \times 10^7$    |
| $2_{DEG}(\text{cm}^{-2})$      | N/A    | $4 \times 10^{12}$ | $5 \times 10^{12}$ | N/A             | $1.2 \times 10^{13}$ |
| $\epsilon_r$                   | 11.8   | 12.8               | 12.5               | 10              | 9                    |

表1-1 比較各種化合物半導體的FETs

近年來，很多報告提出了所謂的電場工程學，經由這過程的修改可降低最大電場。場極板是簡單且有效的方法來減少電場峰值和增加元件[11]-[15]崩潰電壓的一種有效方法。不過，這項技術將同時產生許多寄生電容和一個更複雜的過程。另外，一些報告已經證實透過光學微影處理可使Γ閘極的長度為1μm，並且使功率明顯的提升。然而，1μmΓ型閘極技術的過程也是非常複雜，這些過程包括兩次光學微影，另外介電層的沉積和蝕刻對形成1μmΓ閘極是必要的。在這項研究過程中，很多報告證明這項技術較傳統T型閘極形成次微米Γ閘極容易並且能改進元件崩潰電壓和功率特性。與1μm閘極的Γ閘



極的技術比較中，次微米過程算是比較簡單，只使用一次 E-beam 微影過程來形成在 GaN HEMT 上的  $\Gamma$  閘極。 $\Gamma$  閘極的過程幾乎類似傳統 T 閘極，因此額外的寄生電容  $C_{gs}$  和  $C_{gd}$  增加較不明顯。所以，這項  $\Gamma$  型閘極的技術能保持原先元件高頻性能並且同時改進崩潰電壓的優點。因此，III-氮化物 化合物半導體在未來有很大的機會成為光電應用的替補材料。

在第二章，我們將描述元件的製造過程與架構包括高台隔離，源極和汲極金屬化，閘極金屬化和使用  $\Gamma$  閘極縮短閘極長度的過程。

在第三章中，我們描述實驗結果和討論，包括直流特性，和直流特性的敏感度， $f_T$  和  $f_{max}$ ，功率特性和雜訊特性(不同的  $Si_3N_4$  的傳統閘極和  $\Gamma$  型閘極)

最後，我們在第四章為這篇論文做一個結論。

## 第二章 元件結構與製程步驟

### 2-1 元件結構

在這實驗當中，AlGa<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 高電子遷移率電晶體(HEMTs)是以低壓有機金屬化學氣相沉積來成長。藍寶石(0001)定向在(c-表面)被用來作基層。在 GaN 薄膜的發展之前，藍寶石在氫氣環境中被加熱到 1100°C 來移除表面的髒汙。磊晶層是由 30nm 的 GaN 成核層組成，一個 2 μm 的未摻雜 GaN 層，一個 30nm 的未摻雜 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N 層。霍爾量測顯示在室溫中片載子濃度為  $1.37 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  和電子移動率為  $1200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。圖 2-1 和圖 2-2 說明 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN HEMT 的剖面圖(傳統閘極和 Γ 型閘極)。

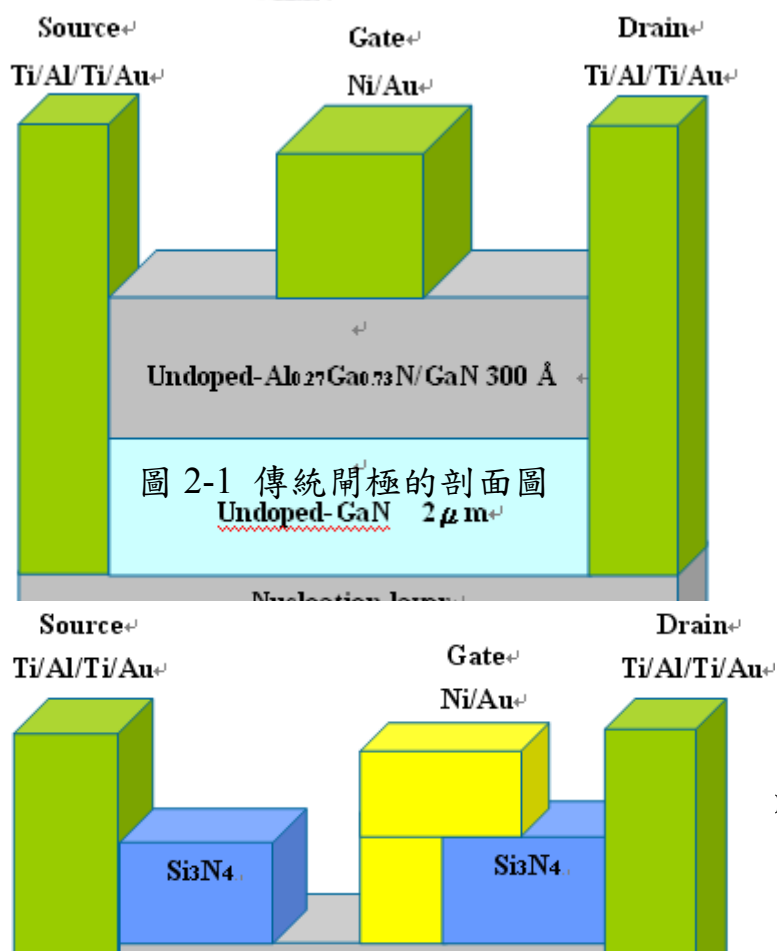


圖 2-2 Γ 型閘極的剖面圖

## 2-2 製造過程

為了形成圖案，我們使用標準微影和移除技術。為了保持晶圓的乾淨，晶圓必須先泡在丙酮並且在超音波震動下清洗，然後用 D.I water 沖洗，並且在每個步驟前用氮氣槍吹乾。圖 2-3 和圖 2-4 顯示在 AlGaIn/GaN HEMTs 的製造過程中的 4 個主要的步驟。

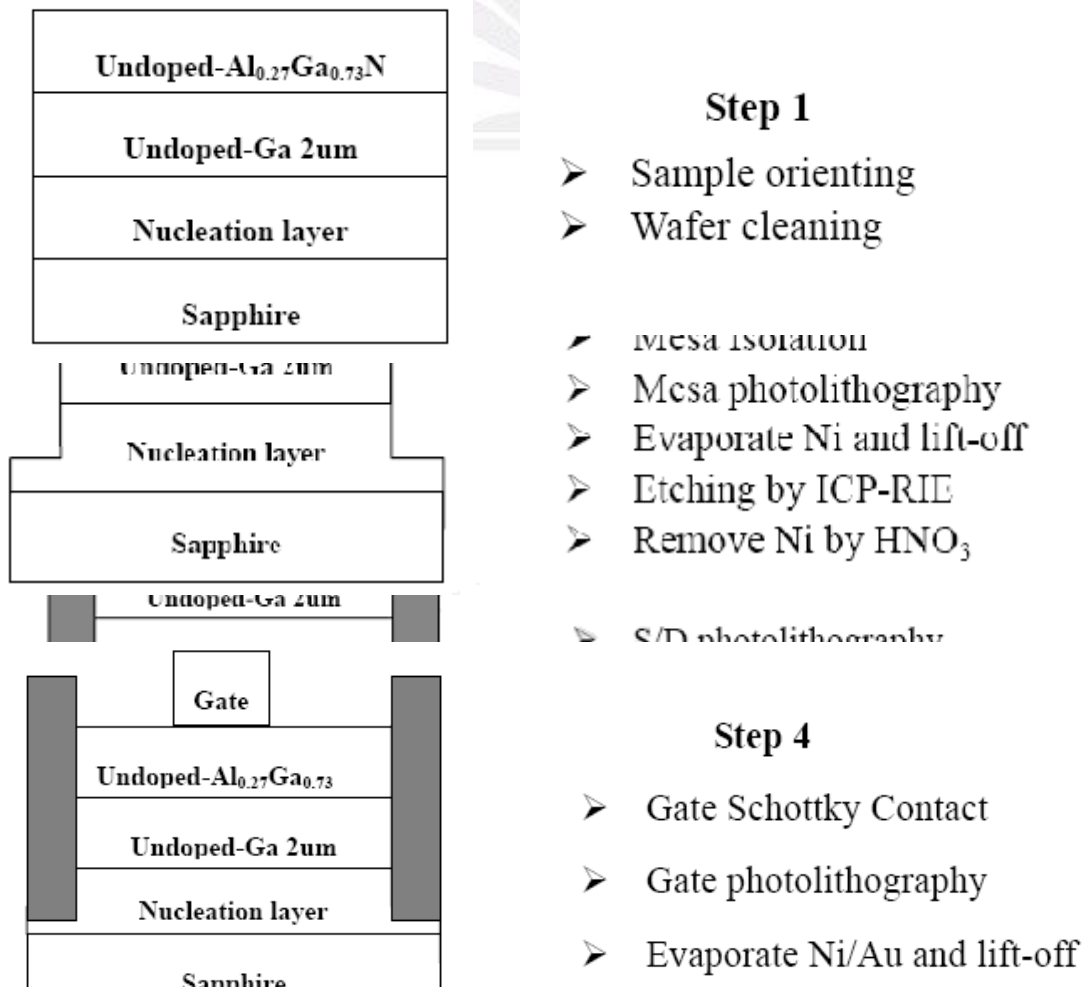
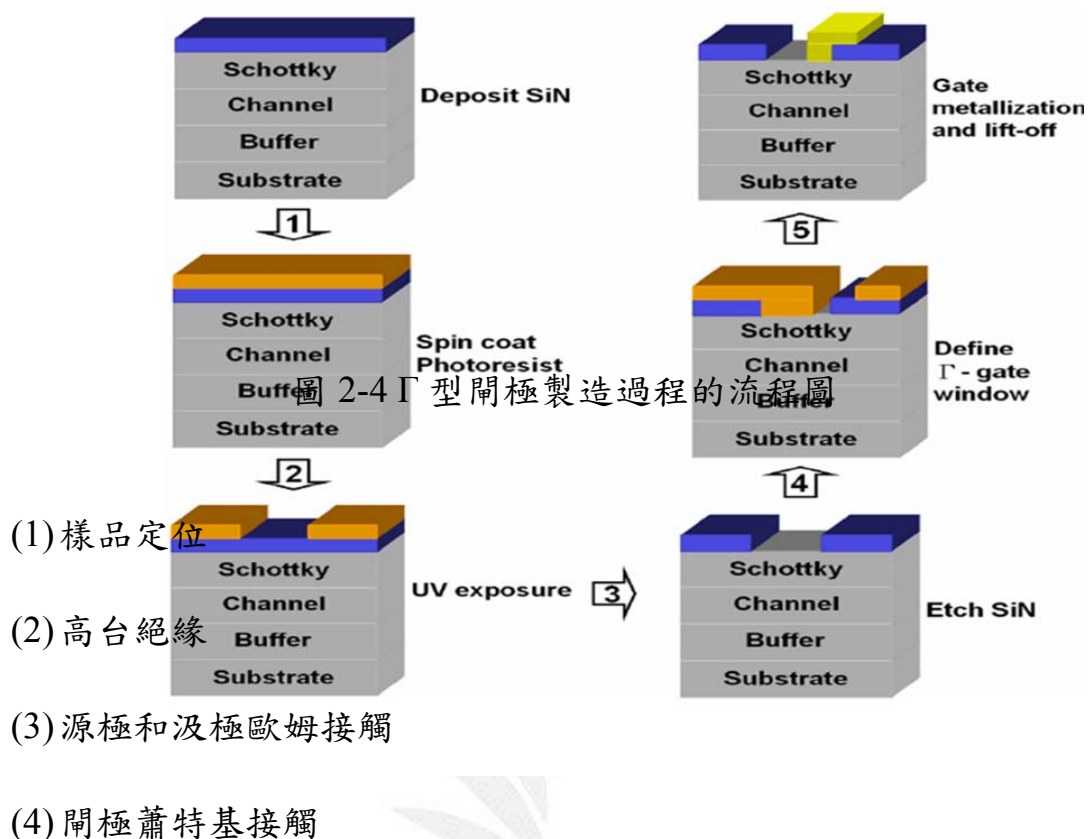


圖 2-3 Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N/GaN HEMT 的製造過程



### 2-2-1 樣品定位

閘極方向必須平行橢圓形主軸去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。

### 2-2-2 高台絕緣

高台絕緣的目的是用來降低漏電流，已獲得更好的夾止特性。首

先，樣品先浸泡在丙酮中接著以超音波震動清洗然後使用D.I. water 移除殘餘的丙酮。在這，我們使用鹽酸(HCL)消除表面氧化物。清除以後，樣品被正光阻旋塗覆蓋，且旋轉的比率和時間被控制在12秒7500rpm和25秒8500rpm。軟烤在90°C 爐內進行30分鐘。然後樣品以接觸光罩校準器(OAI 模型3HR /IR)曝光14秒來確定高台絕緣光阻圖案且使樣品浸入顯影劑15秒。我們用熱蒸鍍Ni來當高台蝕刻光罩。Ni的厚度大約100nm。使用丙酮移除光阻接著我們利用感應耦合電漿蝕刻機(ICP-RIE)和Ar/Cl<sub>2</sub>電漿蝕刻反應來確定高台區域。我們使用的蝕刻參數是Cl<sub>2</sub> 30sccm，Ar 10sccm，ICP 功率700 W，RIE 功率120 W和儀器內部壓力為3mTorr蝕刻60秒。蝕刻比大約是410 nm/minute。下一步，Ni的硬式光罩透過HNO<sub>3</sub>被完全除去。高台絕緣主要步驟如下：

1. 去水烘烤
2. 塗底
3. 旋塗
4. 軟烤(預先曝光烘烤)
5. 曝光
6. 顯影
7. 蒸鍍
8. 移除

9. 蝕刻

10. 移除Ni

### 2-2-3源極和閘極歐姆接觸

我們用把晶圓泡在丙酮中並用超音波振動清洗然後利用鹽酸去除表面氧化層。晶圓被AZ1400光阻覆蓋並且在90°C下烘烤30分鐘。之後，使用標準微影技術形成圖案。欲鍍的金屬和烏舟必須在超音波震動中分別用丙酮和鹽酸震5分鐘，並用D.I. water 沖洗且用高純淨氮氣槍吹乾淨。我們用Ti/Al/Au合金形成良好的歐姆接觸[16]-[18]。厚度約為Ti (10nm)/Al (100nm)/Au (100nm)。由於Ti (10nm)/Al (100nm)層具有較低的功函數，且Ti/Al/Au合金在退火之後將在金屬和半導體介面重新形成。此外，Au (100nm)這層能防止表面形成的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>往外擴散。透過快速加熱退火(RTA)我們利用的退火溫度和時間參數為60秒900°C。元件的源極-閘極距離為 7μm。高台隔絕的主要步驟如下：

1. 去水烘烤
2. 塗底
3. 旋塗
4. 軟烤(預先曝光烘烤)
5. 曝光
6. 顯影

7. 蒸鍍
8. 移除
9. 退火

### 2-2-4 閘極蕭特基接觸

在形成理想歐姆接觸之後，我們選擇Ni/Au當我們的蕭特基接觸金屬。Ni有高的功函數，以便能增加蕭特基位障高度來抑制漏電流已獲得更高的崩潰電壓。在我們的實驗中，樣品被正光阻(AZ1400)旋塗，且較薄的光阻厚度旋轉比率和時間被控制在12秒8000 rpm和35秒10000 rpm。然後樣品以接觸光罩校準器(OAI 模型3HR /IR)曝光14秒來定義閘極圖案，接著顯影15秒。之後，我們對Ni/Au 場極板用加熱沉澱，厚度為Ni(100nm)/Au (50nm)。最後用丙酮移除光阻即完成GaN/AlGaN/GaN HEMTs。在我們閘極圖案中，元件分別有2條1.2 $\mu\text{m}$ 長和100 $\mu\text{m}$ 寬的閘極細線。

### 2-2-5 $\Gamma$ 型閘極蕭特基接觸

在形成理想的源極和汲極歐姆接觸後，我們透過PECVD沉積 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 作為鈍化層。在鈍化後，在洞被形成使用微影和用BOE蝕刻。最後，在覆蓋光阻後，我們用一些變化定義圖案。在深紫外光曝光後，我們使用蒸氣器在空間中充滿Au然後移除。 $\Gamma$ 形狀閘極形成。圖2-4簡略說明研究元件的 $\Gamma$ 閘極過程的順序。在我們的閘極圖案中，元件

個別有 2 條  $0.6\mu\text{m}$  長度和  $100\mu\text{m}$  寬度的閘極細線。

## 第三章 結果和討論

### 3-1 DC 特性

我們的閘極元件尺寸為  $1.2\times 100\mu\text{m}^2$  and  $0.6\times 100\mu\text{m}^2$  (傳統閘極和Γ型閘極)。而且元件的源極到汲極距離是  $7\mu\text{m}$ 。全部元件的 DC 特性都是透過在 300K 使用一台半導體參數分析器量測出。

#### 3-1-1 電流-電壓特性

圖 3-1 顯示在室溫(300K)我們的典型共源極-汲極電流密度( $I_{\text{DS}}$ )對汲極-源極電壓( $V_{\text{DS}}$ )特性。閘極的尺寸分別是  $1.2\times 100\mu\text{m}^2$  和  $0.6\times 100\mu\text{m}^2$ 。閘極被加偏壓於 0 伏到 5 伏在 -1 伏特這個階段，且汲極-源極被加偏壓於 0 伏到 20 伏。我們可以發現電流密度因為Γ型閘極處理而增加。圖 3-2 顯示汲極對源極  $BV_{\text{S}}(V_{\text{BD(DS)})$  定義傳統閘極和Γ型閘極分別在  $V_{\text{DS}}=-5\text{V}$  和  $I_{\text{D}}=1\text{mA}/\text{mm}$  為 27V 和 33V。



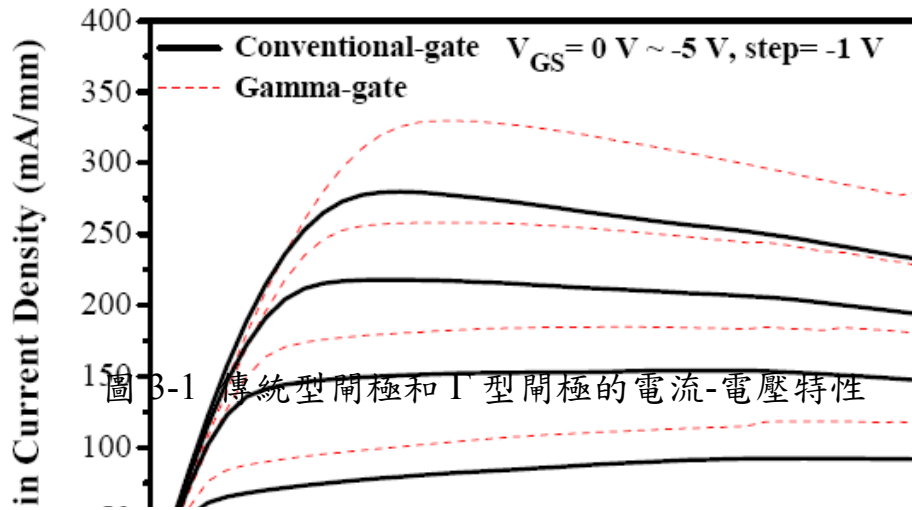


圖 3-1 傳統型閘極和 Γ 型閘極的電流-電壓特性

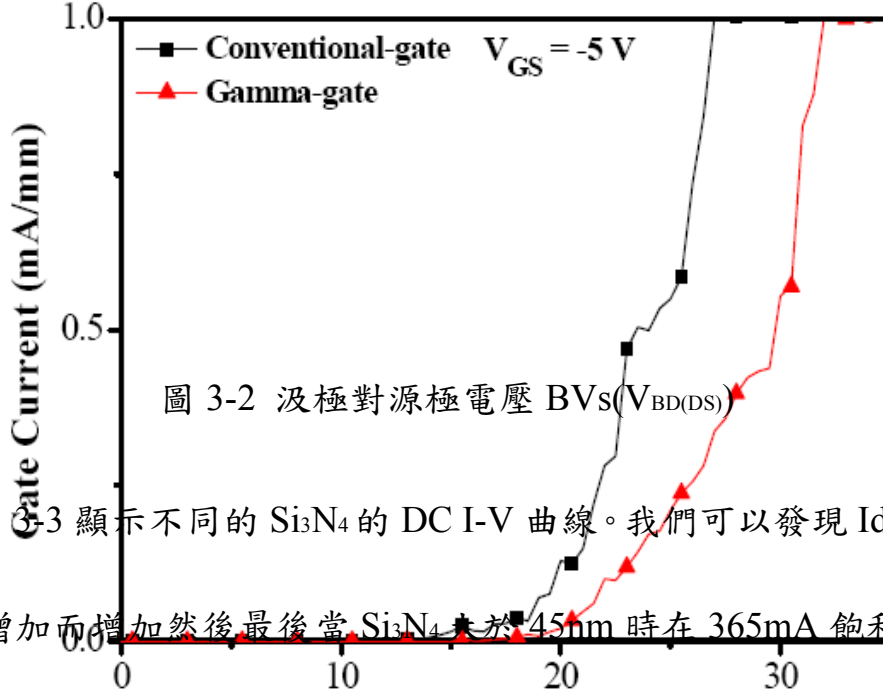


圖 3-2 汲極對源極電壓  $BV_S(V_{BD(DS)})$

圖 3-3 顯示不同的  $Si_3N_4$  的 DC I-V 曲線。我們可以發現  $I_{DSS}$  隨著  $Si_3N_4$  增加而增加然後最後當  $Si_3N_4$  大於 45nm 時在 365mA 飽和。圖

3-4 顯示汲極對源極  $BV_S(V_{BD(DS)})$  定義不同的  $Si_3N_4$  在  $V_{DS} = -5V$  和

$I_D = 1mA/mm$  為 31V, 33V 和 33.1V。由於好的閘極品質好的夾止特性

被完成為了全部兩個元件。扭結電壓比 5.5V 小為全部兩個元件顯示

歐姆接觸的好特性。自我加熱作用可以在較高的  $V_{DS}$  和  $I_{DS}$  區被發現，

那是因為藍寶石底層[19][20]的低熱導率。

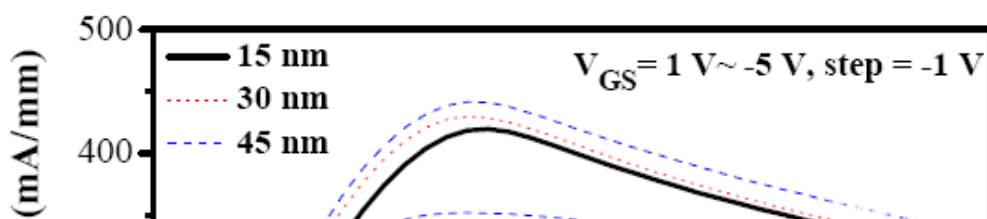
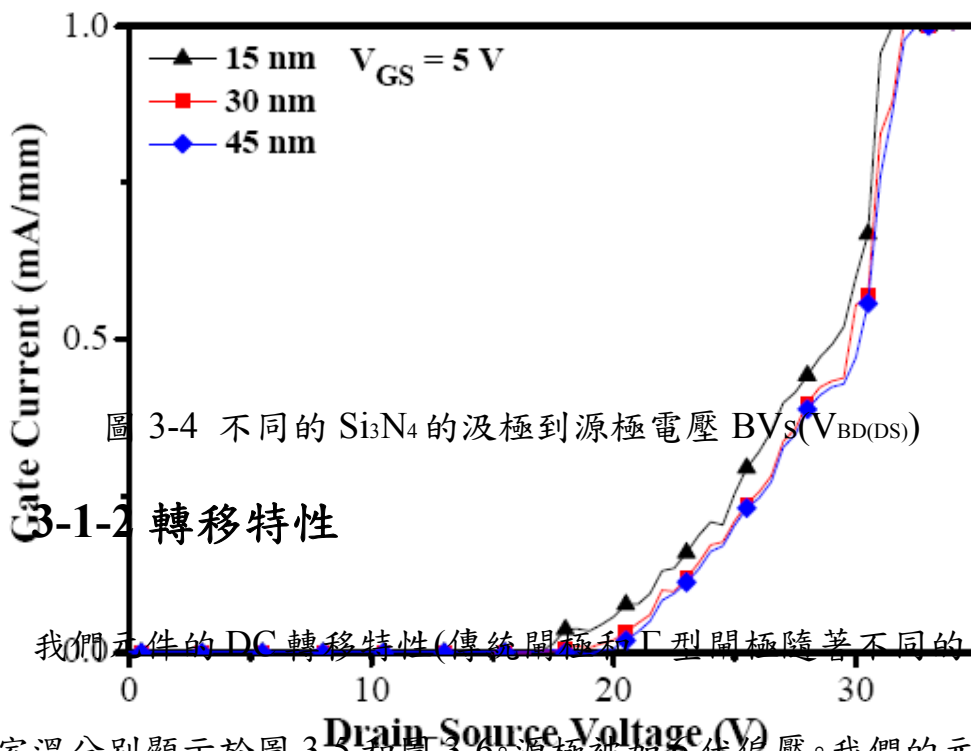


圖 3-3 不同的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的電流-電壓特性



我們元件的 DC 轉移特性(傳統閘極和 Γ 型閘極隨著不同的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 在室溫分別顯示於圖 3-5 和圖 3-6。源極被加 6 伏偏壓。我們的元件(傳

統閘極和 Γ 型閘極)的比較， $I_{DSS0}$  從 306.3 mA/mm 提高到 363.8 mA/mm；最大的外質轉移電導( $g_{m,max}$ )從 76mS/mm 明顯的提高到 93mS/mm， $g_m$  的偏差，最大( $\Delta g_{m,max}$ )約比 22.4%更好；透過定義夾止電壓( $V_{pinch-off}$ )作為  $\sqrt{I_{DS}}$  插入的閘極偏壓截距， $V_{pinch-off}$  從 -4.5V 到 -4.7V， $V_{pinch-off}$  ( $\Delta V_{pinch-off}$ )的偏差比約 4.4%更糟。因此， $I_{DSS0}$  和  $g_m$ ，

透過Γ型閘極有最大有效的改善。比較我們的元件(不同的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)，I<sub>DS0</sub>從348.9mA/mm 提高到364.6mA/mm；最大的外質轉移電導(g<sub>m,max</sub>)可以從86mS/mm 到93.6mS/mm 看到明顯的提高，g<sub>m</sub>的偏差，最大(Δg<sub>m,max</sub>)比約10%更好。

表3-1 顯示我們的元件的在室溫下分別的DC特性(傳統型閘極和Γ型閘極)。

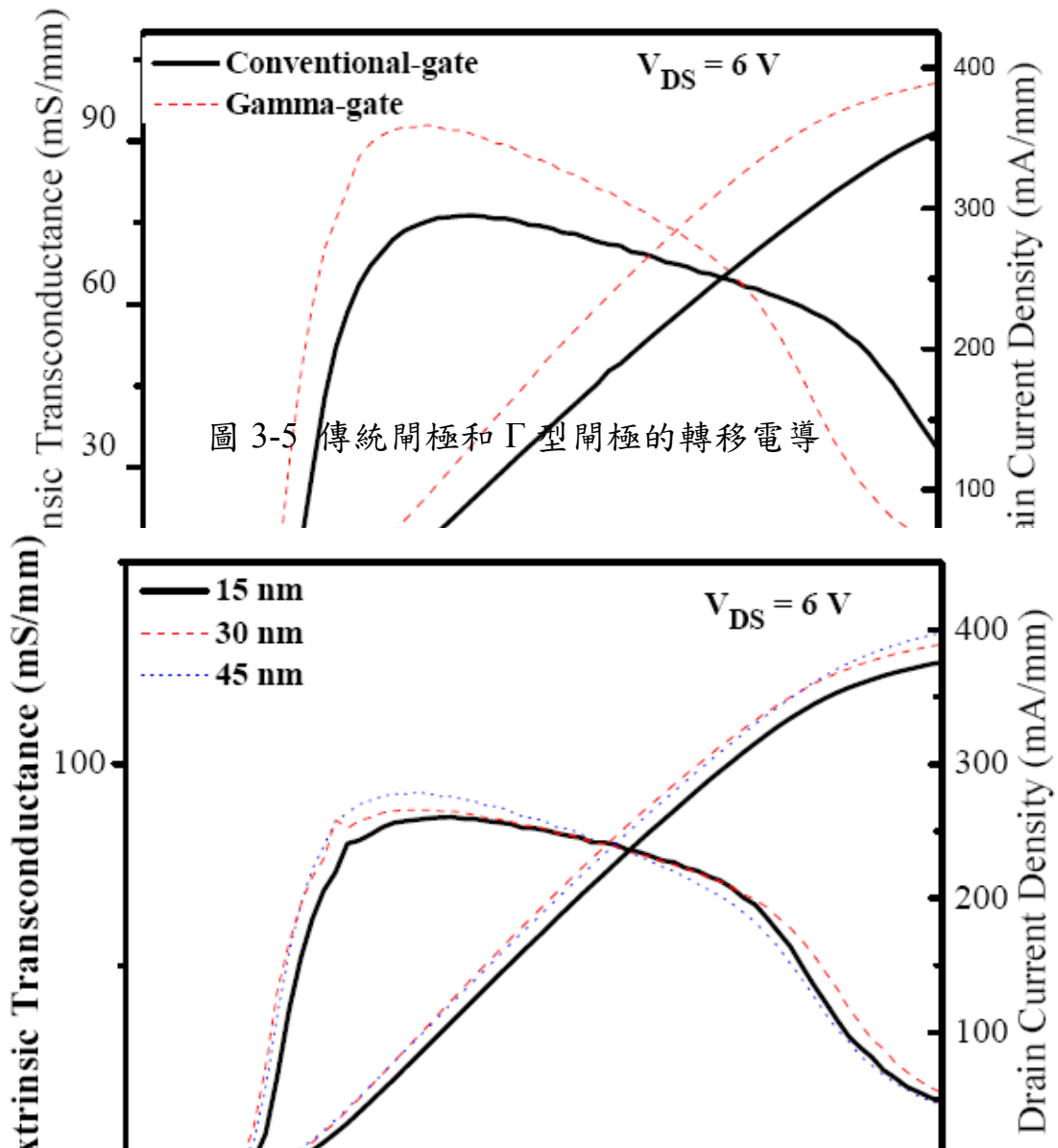


圖 3-6 不同的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的轉移電導

|                            | conventional-gate | 150Å  | 300Å  | 450Å  |
|----------------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| I <sub>DSS0</sub> (mA/mm)  | 306.3             | 348.9 | 363.8 | 364.6 |
| g <sub>m,max</sub> (mS/mm) | 表 3-7 DC 特性的概要    |       | 93    | 93.6  |
| V <sub>pinch-off</sub> (V) | -4.5              | -4.65 | -4.7  | -4.71 |

3-1-3 崩潰電壓

圖 3-7 顯示在室溫下兩端點關閉狀態閘極-汲極電流-電壓性(傳統閘極和 Γ 型閘極)。閘極-汲極逆崩潰電壓(BV<sub>GD</sub>)被定義為閘極到汲極電壓在閘極電流密度達到 1mA/mm。插入圖顯示直線上升的順向導通特性。我們的元件在室溫下 BV<sub>GD</sub> 的值為-108V(-125V)和導通電壓為 0.86V(1.1V)。

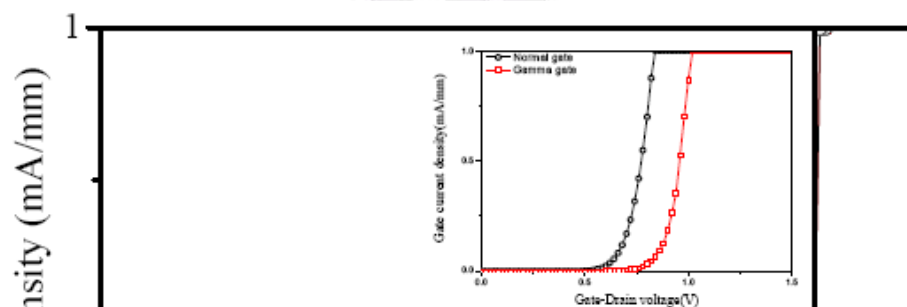


圖 3-7 傳統閘極和 Γ 型閘極的兩個終點崩潰電壓

圖 3-8 顯示 BV<sub>GD</sub> 和不同的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的導通電壓。BV<sub>GD</sub> 的值為 -125.7V, -125.5V 和 -125V, 且我們的元件(150Å, 300Å 和 450Å)在室溫導通電壓為 1.12V, 1.11V 和 1.1V。比較我們的元件(傳統閘極和 Γ 型閘極),

BV<sub>GD</sub> 從 -108V 提高到 -125V, 且導通電壓從 0.86V 提高為 1.1V。典型崩潰特性發生於場效電晶體裡, 那是在閘極緩衝器下依賴電場分佈的

區域。圖 3-9 顯示傳統閘極和 Γ 型閘極的模擬電場。[21]-[22]

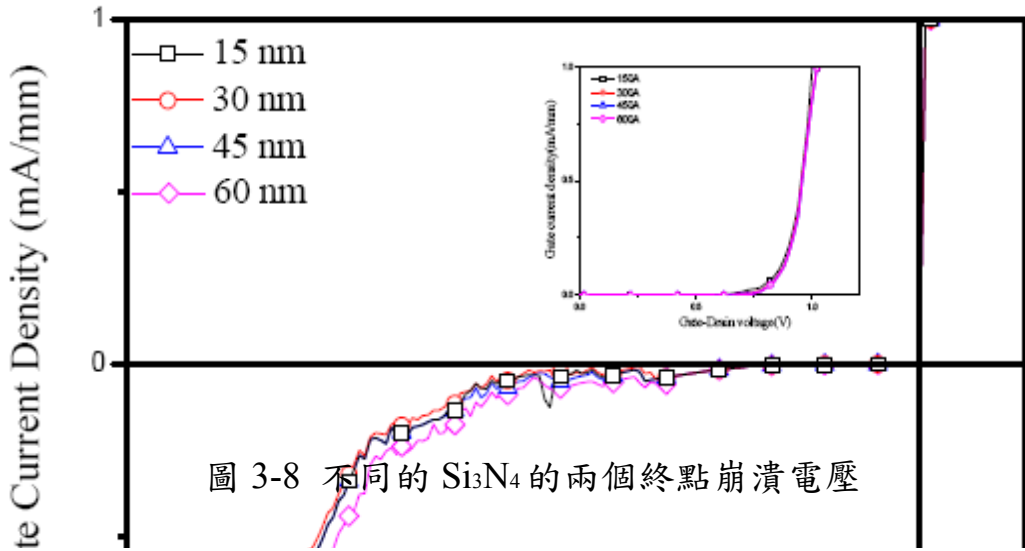


圖 3-8 不同的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的兩個終點崩潰電壓

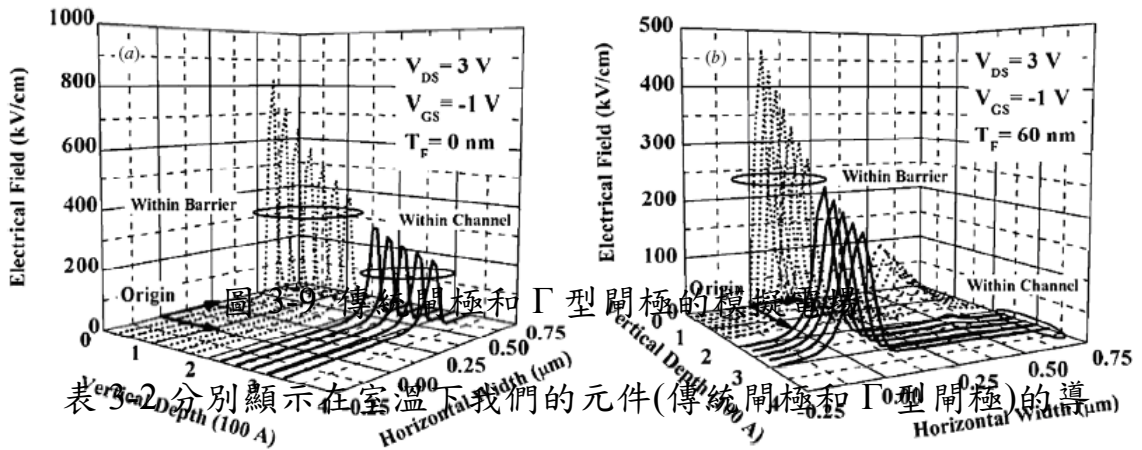


圖 3-9 傳統閘極和 Γ 型閘極的模擬電場

通和崩潰電壓。

|                          | conventional-gate | 150Å   | 300Å   | 450Å |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|------|
| BV <sub>GD</sub> (V)     | -108              | -125.7 | -125.5 | -125 |
| V <sub>turn-on</sub> (V) | 0.86              | 1.12   | 1.11   | 1.1  |

表 3-2 崩潰電壓的概要

### 3-1-4 閘極漏電流

圖 3-10 顯示導通狀態閘極電流密度(I<sub>G</sub>) v.s.閘極源極電壓(V<sub>GS</sub>)對於傳統閘極和 Γ 型閘極。汲極電壓在 1V 的階段從 6V 到 10V, 且閘

極漏電流分別為-0.15uA/mm 和-0.12uA/mm。圖 3-11 顯示導通狀態閘極電流密度(I<sub>G</sub>) v.s.閘極源極電壓(V<sub>GS</sub>)對於不同的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。汲極電壓為 7V, 且閘極漏電流分別為-0.117μA/mm, -0.118μA/mm, -0.12 μA/mm。

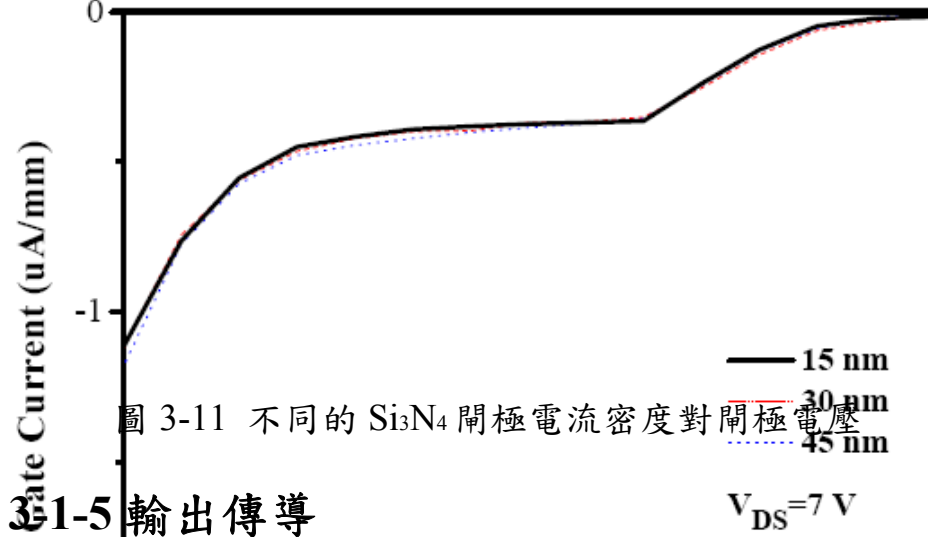
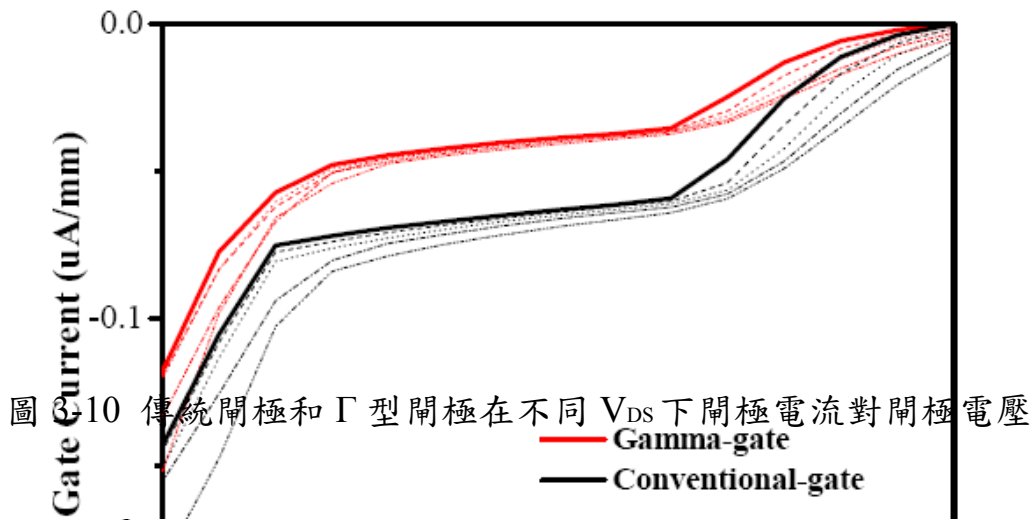


圖 3-12 和圖 3-13 顯示外質轉移電導的特性。輸出傳導和傳統

閘極和 Γ 型閘極的電壓增益  $G_{v0}$  定義為電壓增益可以被描述成：

$$Av = g_m \cdot r_o = \frac{g_m}{g_d} \quad (3-1)$$

在  $V_{DS} = 10\text{ V}$  測量的樣品被用表格 3-3 顯示。從表 3-3，傳統閘極的輸出傳導值較低於Γ型閘極是因為降低表面陷阱和縮小閘極長度。因此，高輸出阻抗，低輸出傳導和高電壓增益可以在Γ型閘極中達到。因此，在飽和區較低的輸出傳導能提供高輸出阻抗，那有利於電壓增益表現和減少負載效應。

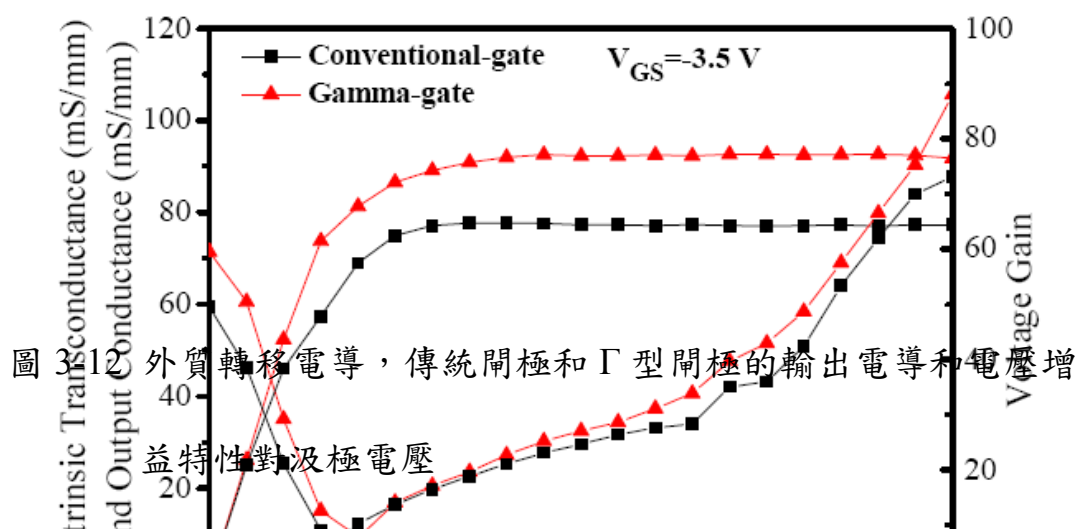


圖 3-12 外質轉移電導，傳統閘極和Γ型閘極的輸出電導和電壓增益特性對汲極電壓

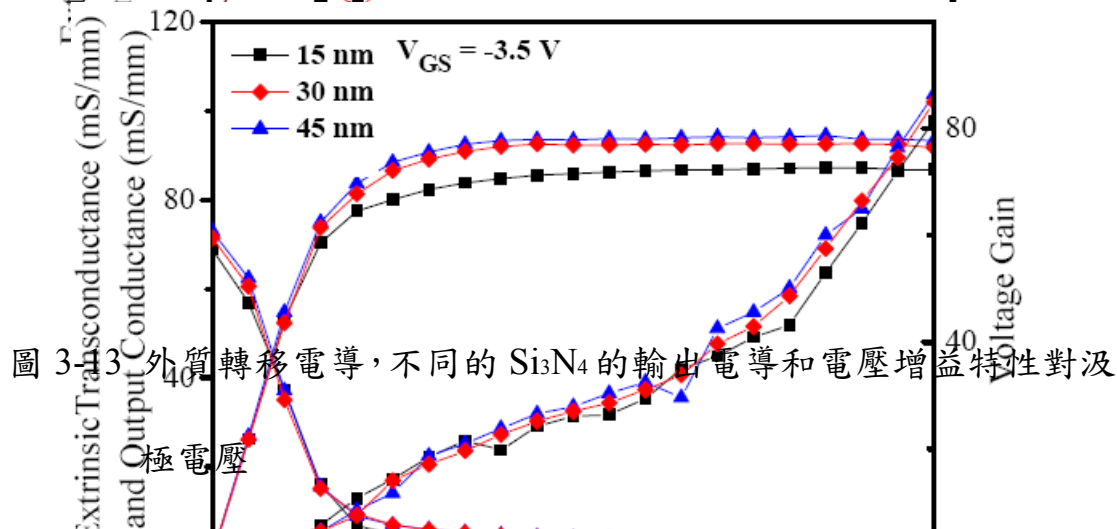


圖 3-13 外質轉移電導，不同的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的輸出電導和電壓增益特性對汲極電壓

|               | conventional-gate | 150Å | 300Å  | 450Å |
|---------------|-------------------|------|-------|------|
| $g_m$ (mS/mm) | 78                | 86.4 | 92.3  | 93.5 |
| $g_a$ (mS/mm) | 1.1               | 1.05 | 1.04  | 1.04 |
| $A_v$         | 71                | 82.2 | 88.75 | 89.9 |

表 3-3：在  $V_{DS}=2.5V$  我們研究的元件  $g_m, g_d$ , 和電壓增益

### 3-2 與溫度有關的 DC 特性

#### 3-2-1 電流電壓特性

圖 3-14 到圖 3-18 分別顯示從 300K 到 450K 我們元件的典型的共源極汲極電流密度對汲極-源極電壓特性。閘極在 -1V 的階段被加偏壓 1V 到 -5V，且汲極-源極被加偏壓從 0V 到 20V。汲極電流密度被觀察到隨著溫度增加而增加，這主要是由於在高溫下從有效載子到載子降低的電子移動率和晶格散射機制。圖 3-14 到圖 3-17 在各種溫度下表現極好的夾止特性，因為高電阻率和  $2\mu m$  非摻雜 GaN 緩衝層寬帶隙降低電子注射進緩衝層和有效地壓抑底層漏電流。

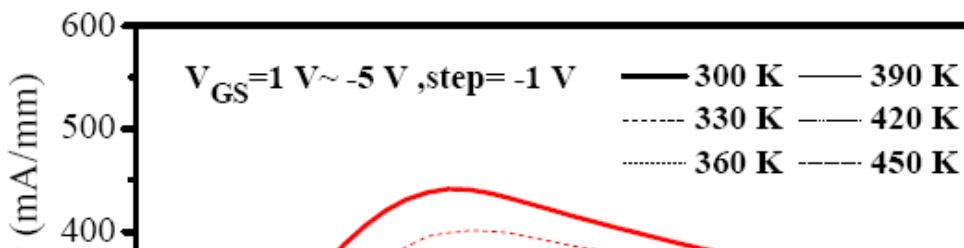
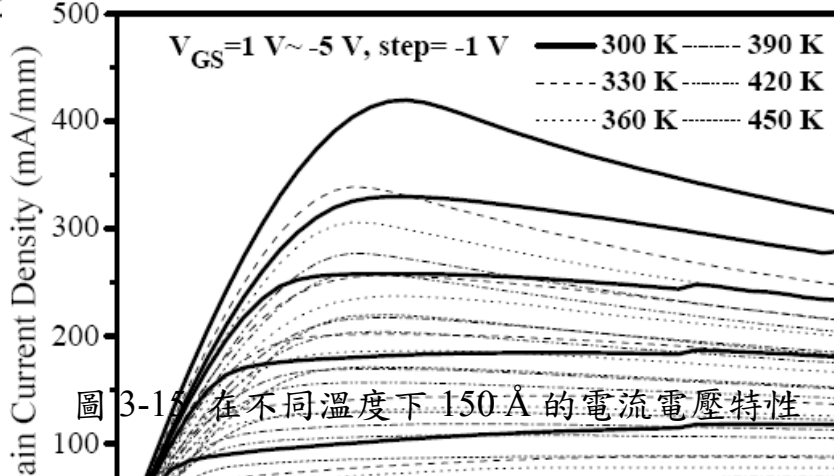
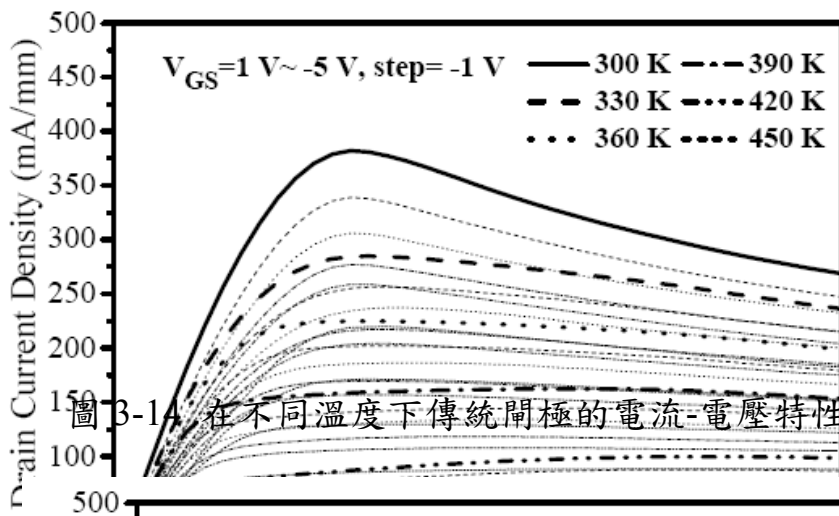




圖 3-16 在不同的溫度下 300 Å 的電流-電壓特性

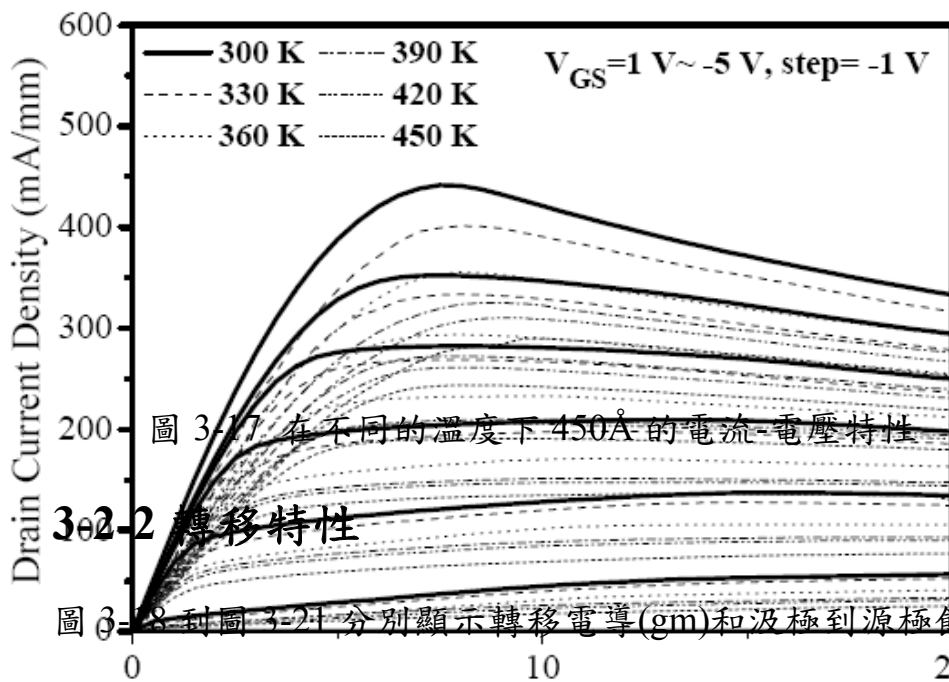


圖 3-17 在不同的溫度下 450 Å 的電流-電壓特性

轉移特性

圖 3-18 到圖 3-21 分別顯示轉移電導 ( $g_m$ ) 和汲極到源極飽合電流

密度 ( $I_{DSS}$ ) 特性當從 300K 到 450K 閘極到源極偏壓 ( $V_{GS}$ ) 的函數。汲極被加偏壓在 6V。因為汲極電流密度的減少，最大外質轉移電導的數值隨著溫度增加而減少。圖 3-22 和圖 3-23 顯示在較高溫下最大外質轉移電導和汲極電流密度減少。圖 3-24 說明當周圍的溫度的函數從 300K 到 450K 在  $V_{DS}=6V$  下  $V_{th}$  特性。在表 3-4 中，最大 Γ 型閘極的汲極電流密度的易變比率是比較小的。從表 3-4，在較高溫下 Γ 型閘極的臨限電壓是穩定的，因為硫鈍化有更高的蕭特基障礙高度，在

通道內有好的閘極控制能力控制。

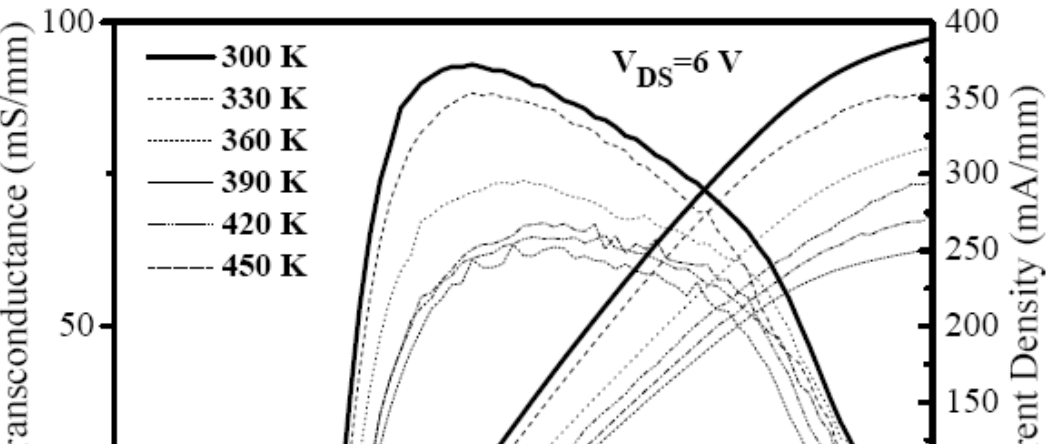
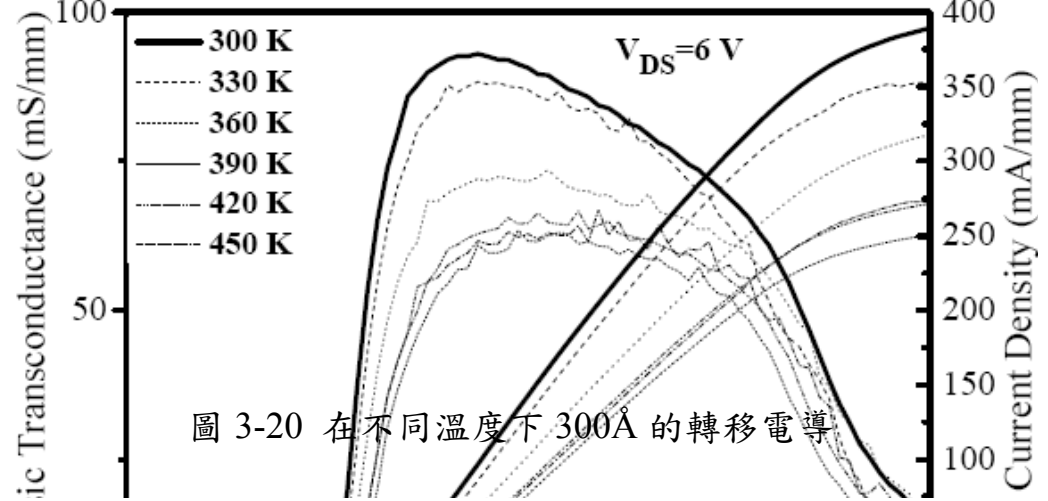
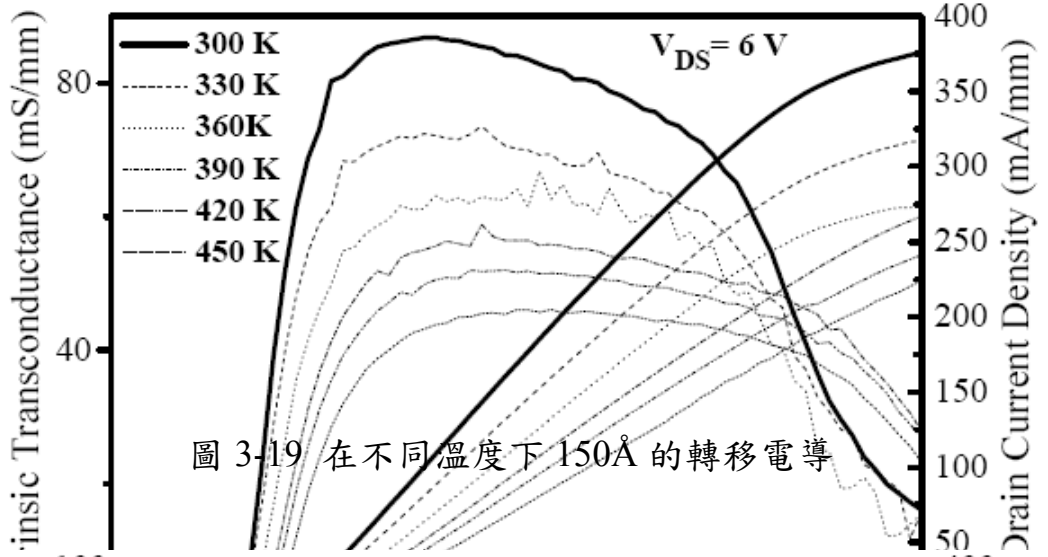
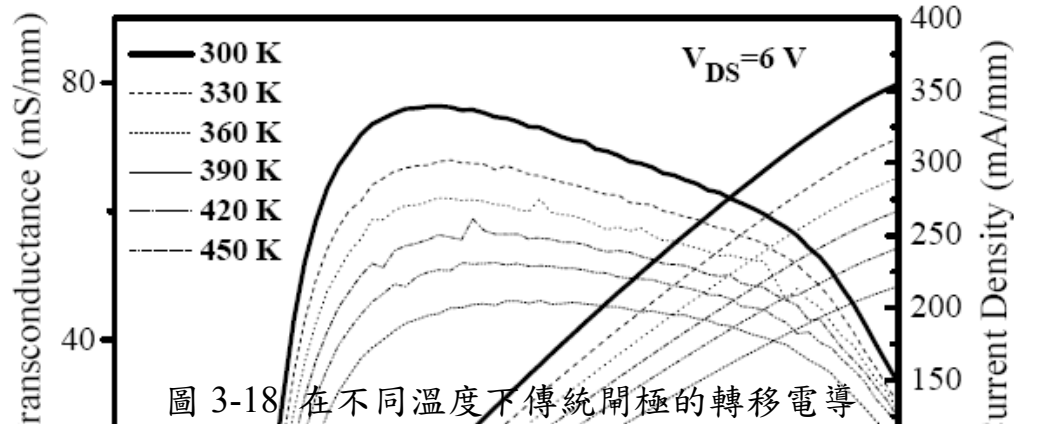


圖 3-21 在不同溫度下 450Å 的轉移電導

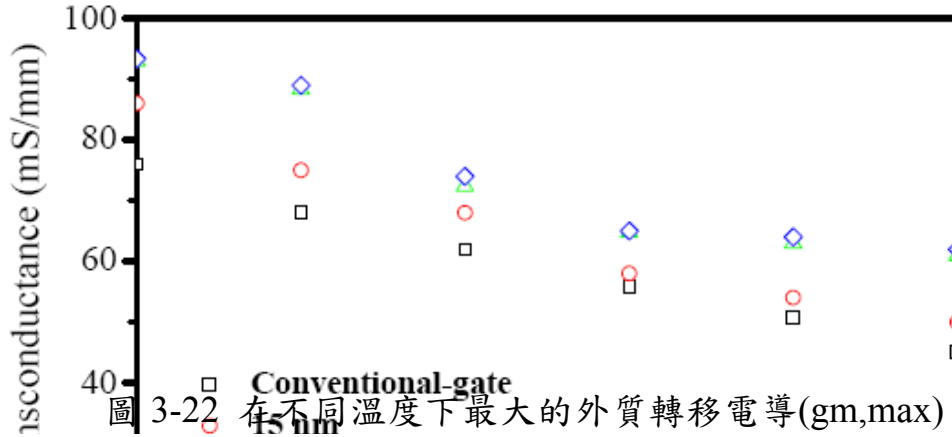


圖 3-22 在不同溫度下最大的外質轉移電導(gm,max)

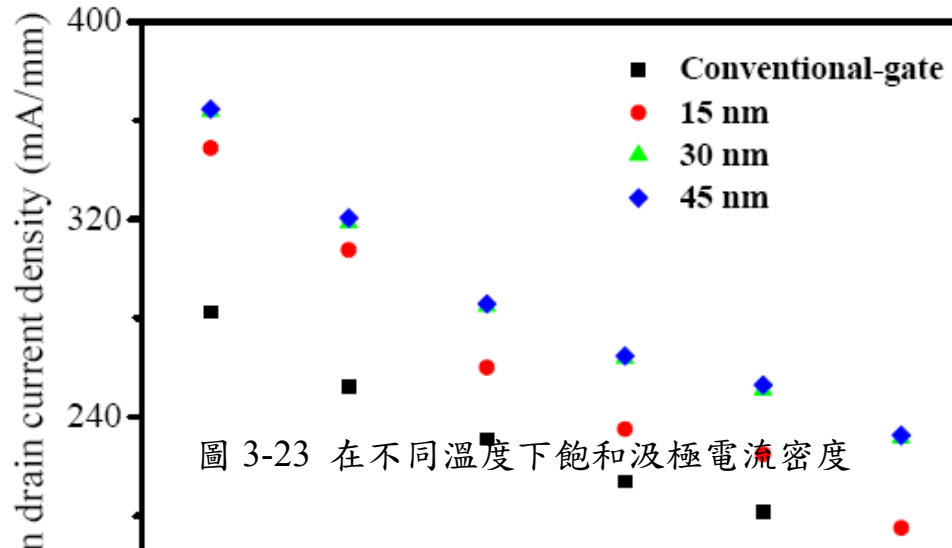


圖 3-23 在不同溫度下飽和汲極電流密度

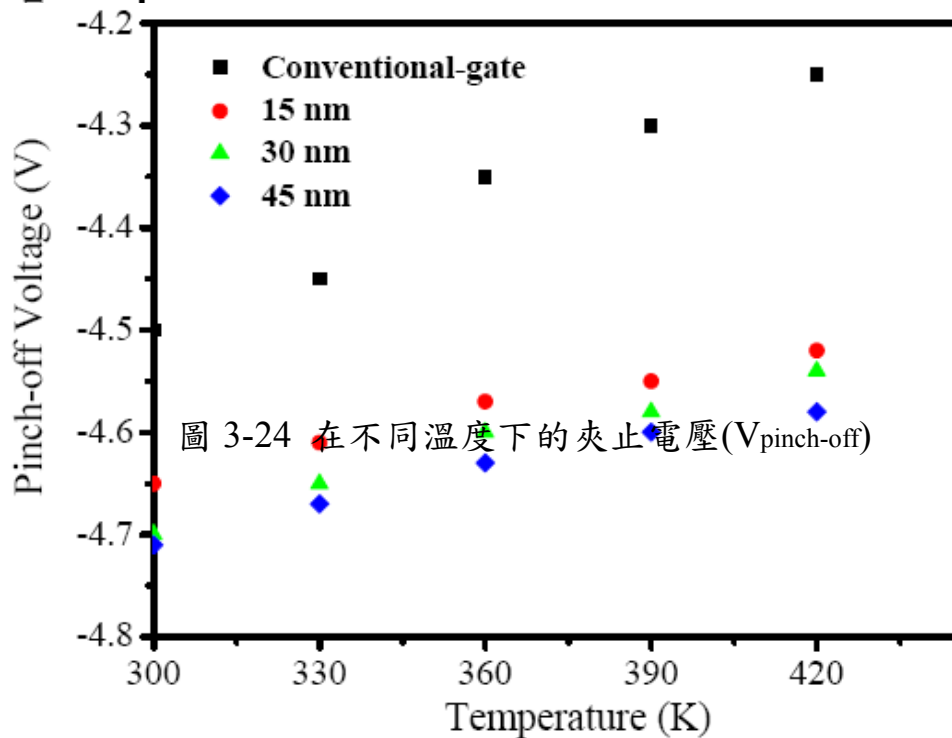


圖 3-24 在不同溫度下的夾止電壓(V<sub>pinch-off</sub>)

具

|                | conventional-gate |      | 150Å   |      | 300Å  |      | 450Å   |      |
|----------------|-------------------|------|--------|------|-------|------|--------|------|
| Temperature(K) | 300K              | 450K | 300K   | 450K | 300K  | 300K | 450K   | 450K |
| $I_{D,max}$    | -39.8%            |      | -44.1% |      | -36%  |      | -36%   |      |
| $g_{m,max}$    | -40%              |      | -40%   |      | -34%  |      | -33.6% |      |
| $V_{th}$       | -6.67%            |      | -3.3%  |      | -3.4% |      | -3.4%  |      |

表 3-4  $I_{D,max}$ ,  $g_{m,max}$ , 和  $V_{th}$  從 300K 到 450K 的變化

### 3-2-3 崩潰電壓

圖 3-25 和圖 3-26 分別顯示從 300K 到 450K 兩個終端閘極-汲極崩潰電壓的溫度特性。插入圖顯示在導通特性前放大倍率。閘極漏電流的增加部份是由於穿隧機制和部分對於降低的能帶。它也由於載子濃度增加導致較低的崩潰電壓。

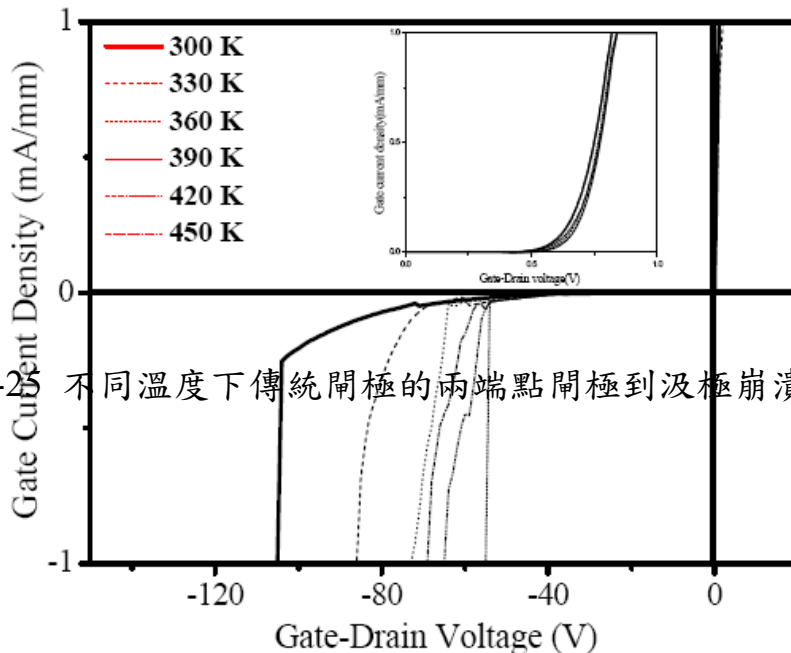


圖 3-25 不同溫度下傳統閘極的兩端點閘極到汲極崩潰電壓

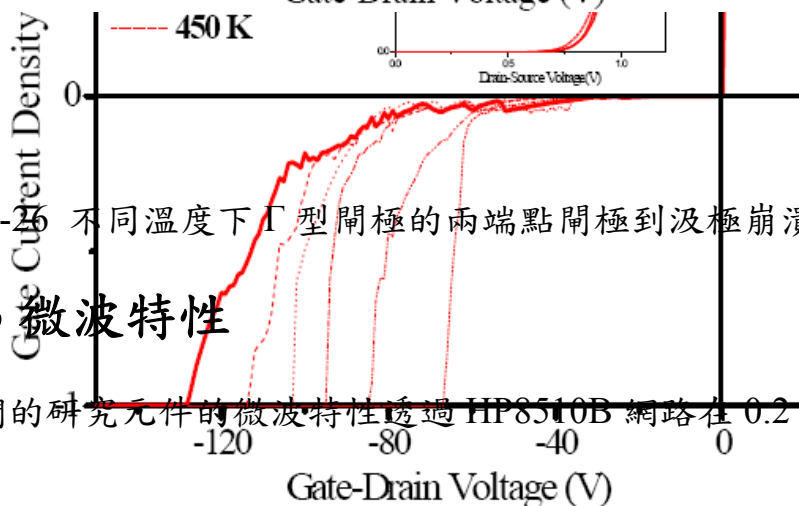


圖 3-26 不同溫度下 T 型閘極的兩端點閘極到汲極崩潰電壓

### 3-3 微波特性

我們的研究元件的微波特性透過 HP8510B 網路在 0.2 到 50GHz

頻率範圍連接藉由 cascade 探針來量測。晶圓上標準完全消除結合寄生的使用。商業模擬像是 HP Eesof Touchstone 被用來分析 S-參數。

S-參數矩陣可以被轉成 H-參數矩陣。電晶體的 S-參數量測可能短路增益( $H_{21}$ )和元件的最大有效的功率增益(MAG)被決定步驟如

[23]-[26]：

$$|H_{21}| = \frac{-2S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{22}) + S_{12} \cdot S_{21}} \quad (3-2)$$

和

$$MAG = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \cdot (K - \sqrt{K^2 - 1}) \quad (3-3)$$

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}|}{2 \cdot |S_{12} \cdot S_{21}|} \quad (3-4)$$

截止頻率  $f_T$  可以從 0dB 下短路電流增益  $H_{21}$  的插入中獲得。 $f_{max}$  也可從最大有效的功率增益(MAG)的插入中被獲得。從方程式 3-3，我們可以知道如果 k 值比單位小，MAG 是沒有意義的。因此，當 k 等於單位時，我們能為 MAG 獲得的值在此頻率下被定義為最大穩定功率增益(MSG)。然而，最大穩定功率增益(MSG)可以被決定遵循以下方程式：

$$MSG = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \quad (3-5)$$

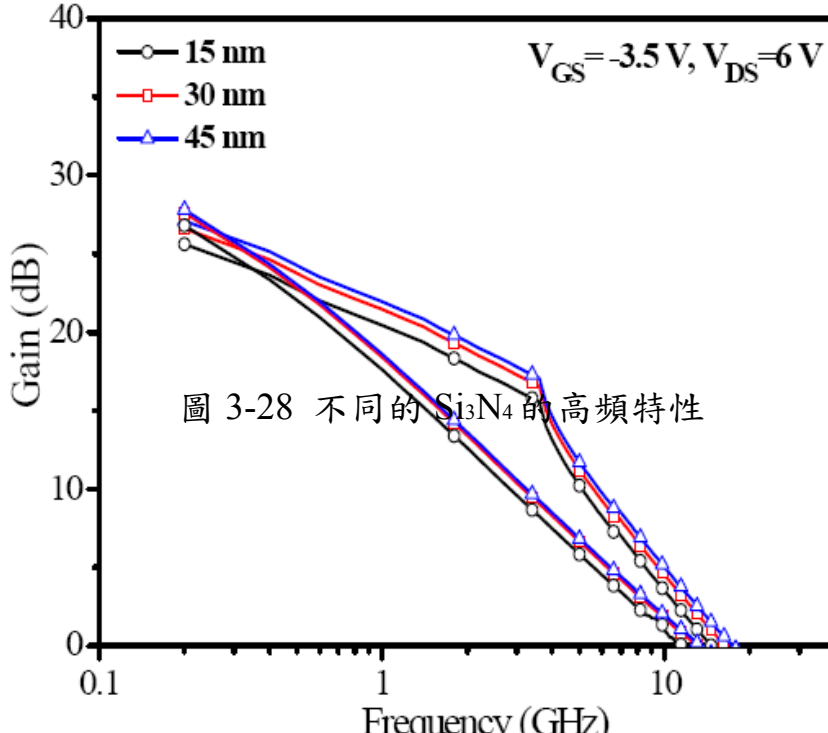
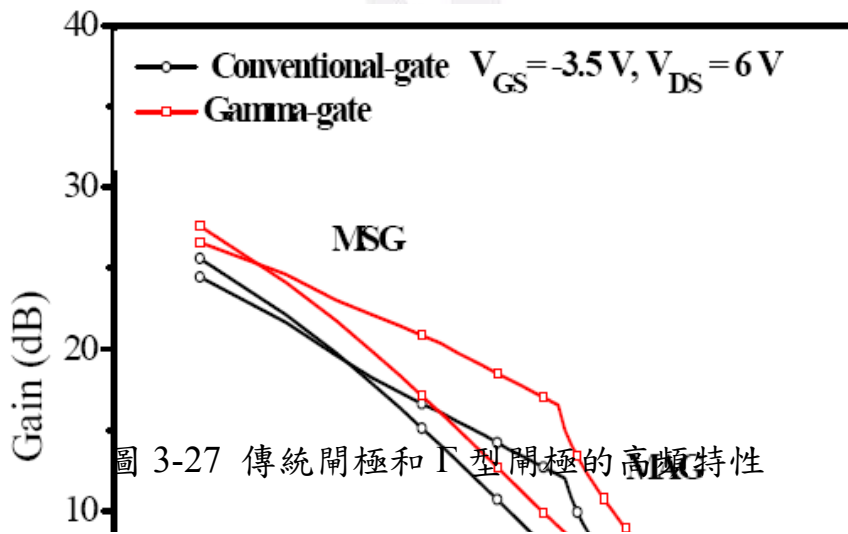
然而， $f_T$  和  $f_{max}$  可以被決定遵循以下方程式：

$$f_T \approx \frac{g_m}{2\pi(C_{GS} + C_{GD})} \quad (3-6)$$

和

$$f_{max} \approx \frac{f_T}{2[G_0(R_G + R_S) + 2\pi C_{GD}]^{1/2}} \quad (3-7)$$

根據資料轉換 S-參數測量我們得到  $H_{21}$ ，MAG 和 MSG 並顯示於圖 3-27 和圖 3-28。我們的元件的偏壓條件為  $V_{DS}=6V$  和  $V_{GS}=-3.5V$ 。我們得到傳統閘極和 Γ 型閘極  $f_T$  和  $f_{max}$  為 10.1(12)GHz 和 12(15.3), 13.1(16.2), 13.7(16.8)GHz。



|           | conventional-gate | 150Å | 300Å | 450Å |
|-----------|-------------------|------|------|------|
| $f_T$     | 10.1              | 12   | 13.1 | 13.7 |
| $f_{max}$ | 12                | 15.3 | 16.2 | 16.8 |

表 3-5  $f_T$  和  $f_{max}$  [27] 的所有數值

### 3-4 功率特性

功率增加的效率(P.A.E.)被定義為：

$$\eta_{dd} = \frac{P_{out} - P_m}{P_{DC}} \times 100\% \quad (3-8)$$

我們可以推測這是輸入 DC 功率轉換成輸出 AC 功率的比率。功率增加效率證實元件的效率為一台功率變流器，把 DC 能量改變成微波 RF 能量。用簡單的功率檢驗組織量測。源極和負載阻抗匹配有著兩個雙倍調諧被充分運用，且 band-pass 過濾器透過功率檢波器被混合用來確保在基本頻率下正確功率的讀取。元件被加偏壓在 Class AB 接近夾止操作下。

圖 3-29 顯示輸出功率( $P_{out}$ )，聯合增益(GA)和功率增加效率(P.A.E)在  $V_{GS}=-3.5V$  偏壓下輸入功率的函數和在 2.4GHz 下  $V_{DS}=6V$  傳統型閘極。元件表現 16.9dBm 的輸出功率和聯合功率增加效率為 23.7%，且線性功率增益為 11.1dB。

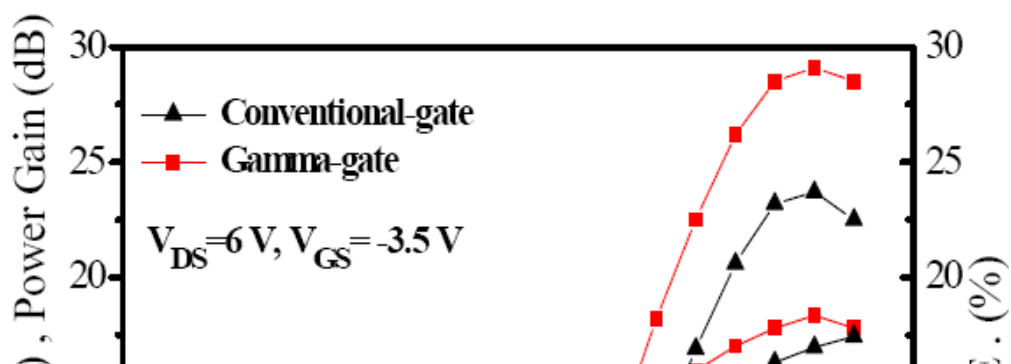


圖 3-29 輸出功率，功率增益和功率增加效率(P.A.E)特性對傳統閘極和Γ型閘極在 24GHz 下輸出功率

圖 3-30 顯示輸出功率( $P_{out}$ )，聯合增益( $G_A$ )和功率增加效率(P.A.E)在  $V_{GS}=-2V$  偏壓下輸入功率的函數和在 5.8GHz 下  $V_{DS}=6V$  傳統型閘極。元件表現 14.8dBm 的輸出功率和聯合功率增加效率為 6.7%，且線性功率增益為 5.2dB。

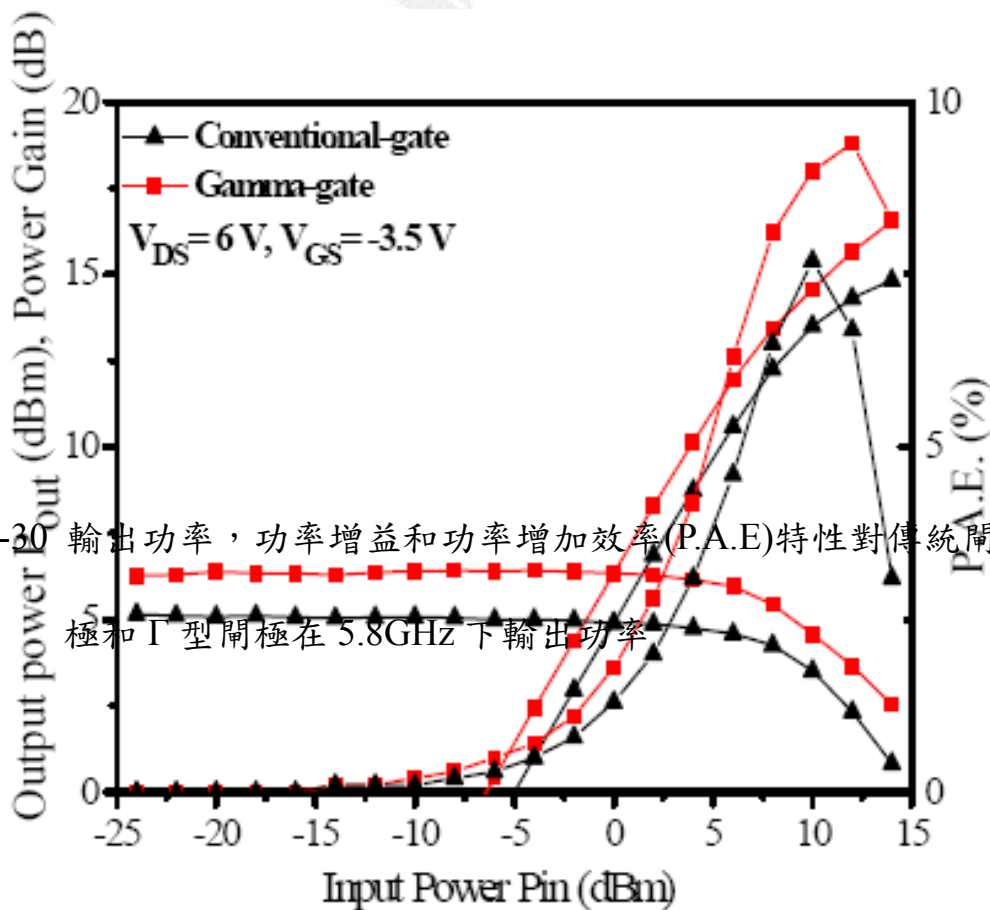


圖 3-30 輸出功率，功率增益和功率增加效率(P.A.E)特性對傳統閘極和Γ型閘極在 5.8GHz 下輸出功率



圖 3-31 顯示輸出功率( $P_{out}$ )，聯合增益(GA)和功率增加效率(P.A.E)在

$V_{GS}=-2V$  偏壓下輸入功率的函數和在 2.4GHz 下  $V_{DS}=6V$  不同的

$Si_3N_4$ 。元件表現 19dBm, 18.4dBm 和 18.1dBm 的輸出功率。聯合功率

增加效率為 29.9%, 29.5% 和 29.2%。且線性功率增益在 150 Å 為

14.5dB, 300 Å 為 13.6 dB 和 450 Å 為 13.3 dB。

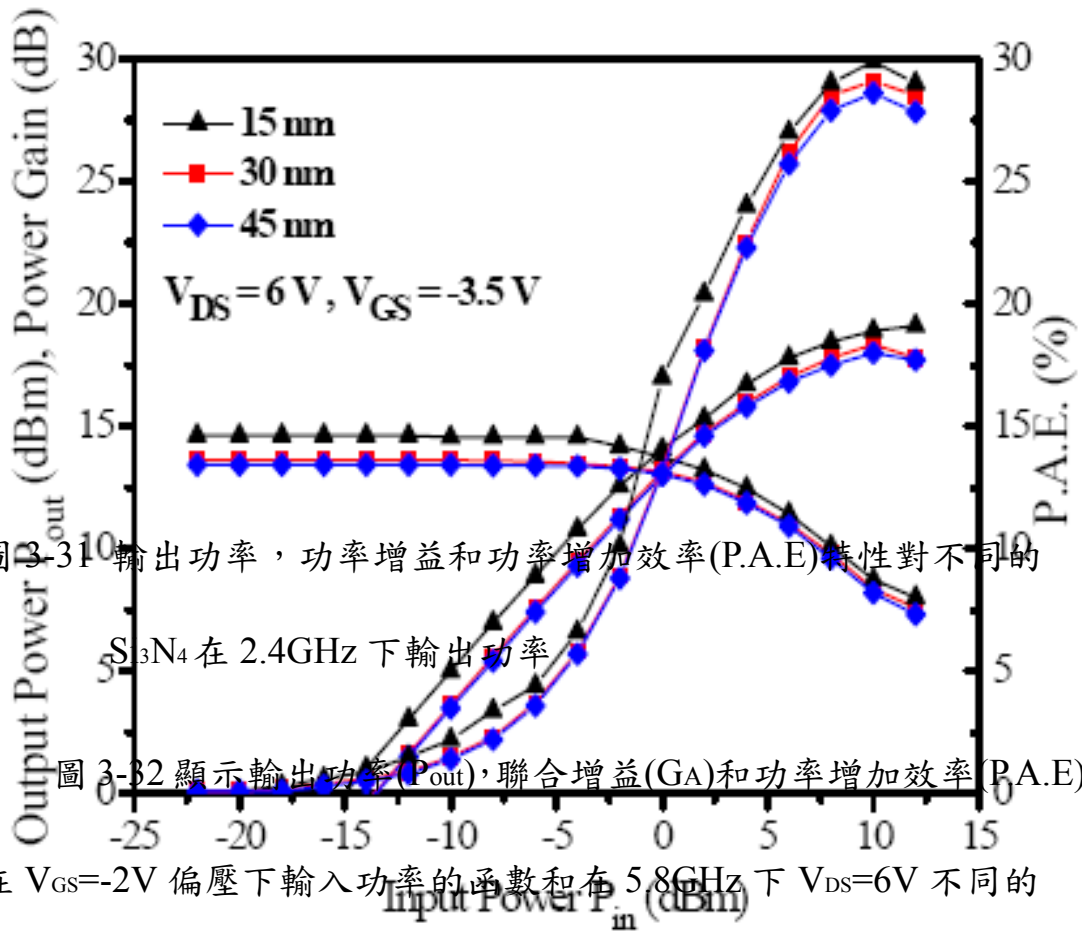


圖 3-31 輸出功率，功率增益和功率增加效率(P.A.E)特性對不同的

$Si_3N_4$  在 2.4GHz 下輸出功率

圖 3-32 顯示輸出功率( $P_{out}$ )，聯合增益(GA)和功率增加效率(P.A.E)

在  $V_{GS}=-2V$  偏壓下輸入功率的函數和在 5.8GHz 下  $V_{DS}=6V$  不同的

$Si_3N_4$ 。元件表現 16.8dBm, 16.5dBm 和 16.3dBm 的輸出功率。聯合功

率增加效率為 9.7%, 9.5% 和 9.4%。且線性功率增益在 150 Å 為 6.7dB,

300 Å 為 6.3dB 和 450 Å 為 6.1 dB。

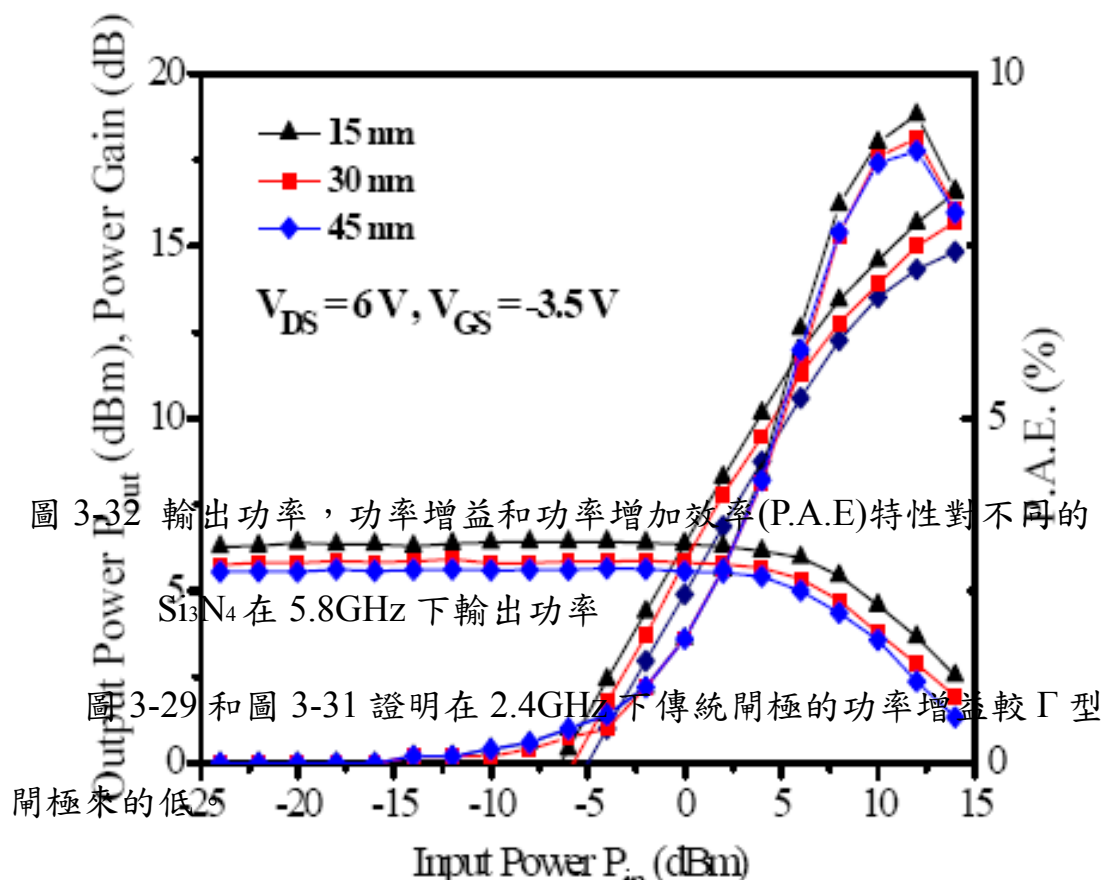


圖 3-32 輸出功率，功率增益和功率增加效率(P.A.E)特性對不同的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  在 5.8GHz 下輸出功率

圖 3-29 和圖 3-31 證明在 2.4GHz 下傳統閘極的功率增益較 Γ 型閘極來的低

表 3-6 顯示我們的元件(傳統閘極和 Γ 型閘極)在 2.4GHz 和

5.8GHz 下的比較。

為了獲得高功率，減少閘極漏電流和增加崩潰電壓是需要的。我們擔心功率特性隨著崩潰電壓減少而減少，但是相對的元件偏壓在  $V_{DS}=6V$ 。

|        |                 | conventional-gate | 150Å | 300Å | 450Å |
|--------|-----------------|-------------------|------|------|------|
| 2.4GHz | P.A.E(%)        | 23.7              | 29.9 | 29.5 | 29.2 |
|        | Out-Power (dBm) | 16.9              | 19   | 18.4 | 18.1 |
|        | Power Gain      | 11.1              | 14.5 | 13.6 | 13.3 |
| 5.8GHz | P.A.E(%)        | 6.7               | 9.7  | 9.5  | 9.4  |
|        | Out-Power (dBm) | 14.8              | 16.8 | 16.8 | 16.3 |
|        | Power Gain      | 5.2               | 6.7  | 6.3  | 6.1  |

### 3-5 雜訊特性

圖 3-33 和圖 3-34 顯示最小雜訊數字(NFmin)和相關的增益依照我們的元件(傳統閘極和 Γ 型閘極)的頻率。透過 HP8970B 雜訊數值測量出雜訊情況超出 1 到 6GHz 的頻率範圍。最小雜訊數字(NFmin)可以隨著以下方程式被近似為：

$$NF_{min} = 101 \log \left\{ 1 + \frac{k_F \cdot f}{f_T} [g_{mi} (R_g + R_s)]^{0.5} \right\} dB \quad (3-9)$$

$k_F$  是 Fukui 常數，一個經驗的適合因素， $I_{opt}$  是最佳的汲極電流

最小雜訊操作點；且  $E_c$  是理想的  $v$ - $E$  關係的關鍵領域。

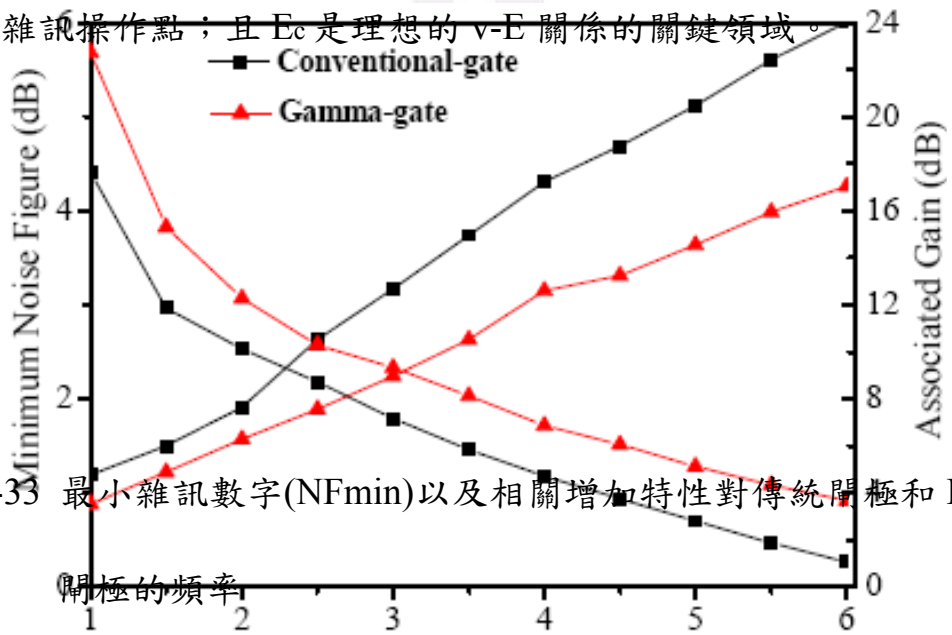


圖 3-33 最小雜訊數字(NFmin)以及相關增加特性對傳統閘極和 Γ 型

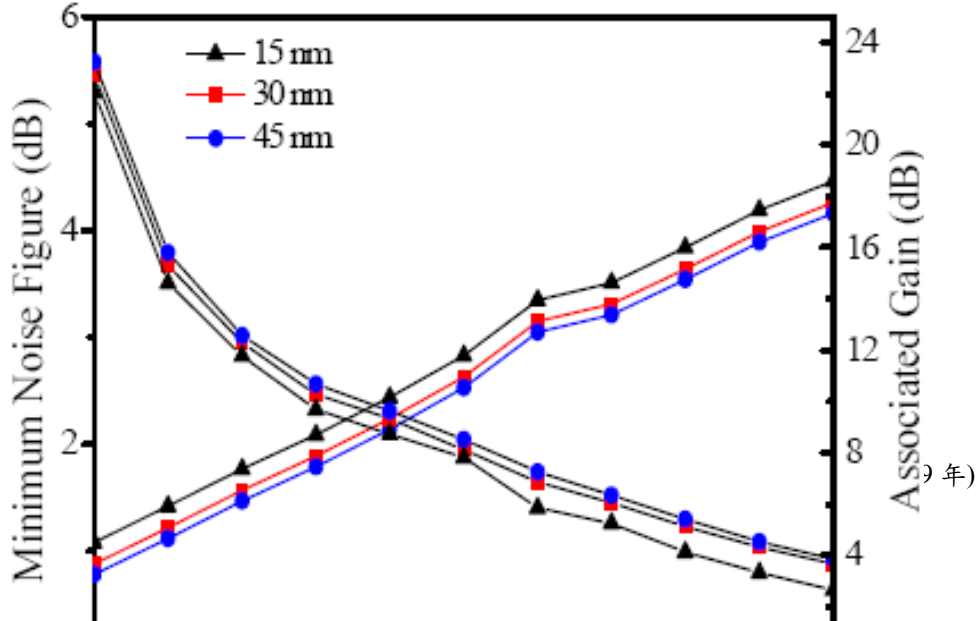


圖 3-34 最小雜訊數字(NFmin)以及相關增加特性對不同的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的  
頻率

表 3-7 顯示我們的元件在 2.4GHz 和 5.8GHz 下的比較。

|        | conventional-gate | 150Å | 300Å | 450Å |
|--------|-------------------|------|------|------|
| 2.4GHz | 2.8               | 2.2  | 1.9  | 1.8  |
| 5.8GHz | 5.7               | 4.2  | 4    | 3.92 |

表 3-7 雜訊特性的概要

### 3-6 低頻雜訊特性

低頻雜訊的水平是決定微波應用元件潛能的一個重要參數。低頻雜訊量測法被製造來說明介於未來不定的雜訊和各種處理方法之間的關係；量測系統對半導體表面是敏感的。汲極雜訊電壓透過(Agilent 35670A)被放大且輸出藉由 1Hz~100KHz 的頻率範圍被供給到(BTA 9812B)光譜分析儀。各種元件被用在低頻雜訊量測偏壓為  $V_{ds}=3V$  與相關的 100mA/mm 的  $I_{ds}$ ，像元件的串聯電阻強烈支配低頻雜訊。因此，相同  $I_{ds}$  偏壓點的使用對不定的雜訊特性，各種預處理的貢獻是很重要的。如圖 3-35 和圖 3-36 所示，Γ 型閘極比標準處理樣本有較多的低雜訊限度，建議 Γ 型閘極處理改善表面影響。

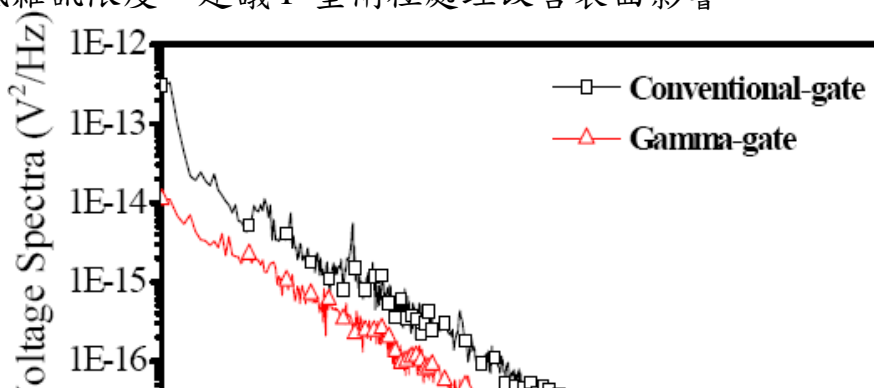


圖 3-35 傳統閘極和Γ型閘極的 1/f 雜訊的比較

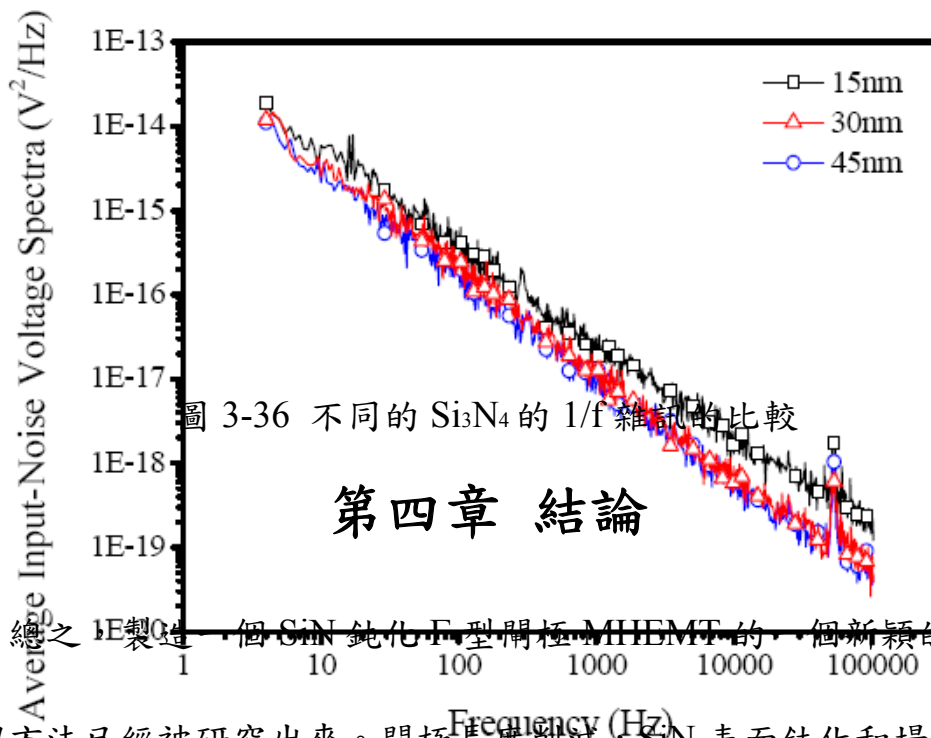


圖 3-36 不同的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 1/f 雜訊的比較

總之，製造一個 SiN 鈍化 Γ 型閘極 MHEMT 的一個新穎的裝置處理方法已經被研究出來。閘極長度削減，SiN 表面鈍化和場極板架

構可以在同一時間內被達成和改善元件性能。目前的轉移曝光方法可以容易被應用於先進的高精密處理元件。關鍵方法是沉積閘極金屬穿過一階段於 AlGa<sub>N</sub> 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 之間底切來獲得一個減少 0.6μm 閘極長度隨著從 1.2μm 閘極窗額外的 0.6μm 場極板。閘極-金屬長度的影響、場極板長度和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 厚度在 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 高電子遷移率電晶體 (HEMTs)

上的性能也被研究。

$\Gamma$ 型閘極技術可以增加關閉狀態和導通狀態崩潰特性；然而， $\Gamma$ 型閘極 GaN HEMT 元件可以在較高的  $V_{ds}$  下被操作來展現更好的輸出功率。

除了電流密度外，汲極到源極和閘極到汲極的崩潰電壓，元件線性，單位電流增益和電壓增益頻率也被改善，作為和那些沒有場極板的  $1.2\mu\text{m}$  閘極元件相比。

### 參考文獻

- [1] W. Saito, M. Kuraguchi, Y. Takada, K. Tsuda, I. Omura, and T. Ogura, “High Breakdown Voltage Undoped AlGa<sub>N</sub>-Ga<sub>N</sub> Power HEMT on Sapphire Substrate and Its Demonstration for DC-DC Converter Application”, IEEE Trans. Electron Device, vol. 51, pp. 1913-1917, Nov. 2004.
- [2] B. S. Kang, S. Kim, F. Ren, J. W. Johnson, R. J. Therrien, P. Rajagopal, J. C. Roberts, E. L. Piner, K. J. Linthicum, S. N. G. Chu, K. Baik, B. P. Gila, C. R. Abernathy, and S.J. Pearton, “Pressure-induced changes in the conductivity of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high-electron

mobility-transistor membranes”, Applied Physics Letters, vol. 85, pp.2962-2964, 2004.

[3] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y. F. Wu, “AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs—An Overview of device operation and applications”, IEEE, vol. 90, no. 6, June 2002.

[4] F. Sacconi, A. Di Carlo, P. Lugli, and H. Morkoc, “Spontaneous and piezoelectric polarization effects on the output characteristics of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterojunction modulation doped FETs”, IEEE Trans. Electron Device, vol. 48, pp. 450-457, Mar.2001.

[5] P. M. Asdeck, E. T. Yu, S. S. Lau, G. J. Sullivan, J. Van Hove and J. Redwing, “piezoelectric charge densities in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFETs”, Electron. Lett.,33 1230(1997).

[6] E. T. Yu, G. J. Sullivan, P. M. Asbeck, C. D. Wang, D. Qiao, and S, S, Lau, “Measurement of piezoelectrically induced charge in Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub> heterostructure field effect transistors”, Apply. Phys. Lett. 71, 2794(1997)

[7] N. Hara, K. Makiyama, T. Takahashi, K. Sawada, T. Arai, T. Ohki, et al., “Highly Uniform InAlAs–InGaAs HEMT Technology for High-Speed Optical Communication System ICs,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, vol. 16, no.3, pp. 370-375, Aug. 2003.

- [8] J. W. Johnson, E. L. Piner, A. Vescan, R. Therrien, P. Rajagopal, J. C. Roberts, J. D. Brown, S. Singhal, and K. J. Linthicum, “12 W/mm AlGaN–GaN HFETs on Silicon Substrates”, IEEE Electron Device Letters, vol. 25, pp. 459-461, Jul. 2004.
- [9] H. Ishikawa, K. Yamamoto, T. Egawa, T. Soga, T. Jimbo, and M. Umeno, “Thermal stability of GaN on (111) Si substrate,” J. Cryst. Growth, pp. 189-190, 1998.
- [10] Woo-Suk SUL, Sam-Dong KIM, Hyung-Moo PARK and Jin-Koo RHEE “Electrical Characteristics of the 0.1 μm Gate Length PHEMT with Low-Dielectric-Constant Benzo-Cyclo-Butene Passivations” Jpn. J. Appl. Phys. vol. 42 p. 7189 2003
- [11] 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.
- [12] Kamal Tabatabaie-Alavi, Senior Member, IEEE, Dale M. Shaw, and Paul J. “Duval Evolution of T-Shaped Gate Lithography for Compound Semiconductors Field-Effect Transistors. “IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol. 16, no. 3, p. 365 August 2003
- [13] H. R. Chen, M. K. Hsu, S. Y. Chiu, W. T. Chen, G. H. Chen, Y. C.



Chang, and W. S. Lour, Member, IEEE, “InGaP/InGaAs Pseudomorphic Heterodoped ChannelFETs With a Field Plate and a Reduced Gate Length by Splitting Gate Metal”, IEEE Electron Device Lett, 27 p. 12 , 2006

[14] G.M. Metzger, senior member, IEEE, J. F. Bass, T. T. Lee, Member, IEEE “A Dielectric-Defined Process for the Formation of T-Gate Field-Effect Transistors”, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1 p. 3 1991

[15] K. S. Lee, Y. S. Kim, K. T. Lee, and Y. H. Jeong “Process for 20 nm T gate on Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As/ In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs epilayer using two-step lithography and zigzag foot” , JVST B 24, p. 4 2006

[16] J. Chen, D. G. Ivey, J. Bardwell, Y. Liu, H. Tang, and J. B. Webb, “Microstructural analysis of Ti/Al/Ti/Au ohmic contact to n-AlGa<sub>0.25</sub>N/GaN,” J. Vac. Sci. Technol., vol. 20, no. 3, pp. 1004-1010, 2002.

[17] D. F. Wang, F. Shiwei, C. Lu, A. Motayed, M. Jah, S. N. Mohammad, K. A. Jones, and L. S. Riba, “Low-resistance Ti/Al/Ti/Au multilayer ohmic contact to n-GaN,” J. Appl. Phys., vol. 89, no. 11, pp. 6214-6217, June 2001.

[18] N. Chaturvedi, U. Zeimer, J. Wurfl and G. Trankle, “Mechanism of

ohmic contact formation in AlGaN/GaN high electron mobility transistors” *Semiconductor Science and technology*, vol. 21, pp. 175-179, Jan. 2006.

[19] J. Kuzmik, P. Javorka, A. Alam, M. Marso, M. Heuken, et al., “Investigation of self-heating effects in AlGaN-GaN HEMTs,” *Proc. EDMO*, pp. 21-26, 2001.

[20] R. Gaska, A. Osinsky, J. W. Yang, and M. S. Shur, “Self-Heating in High-Power AlGaN-GaN HFET’s,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 89-91, 1998.

[21] W. S. Lour, W. L. Chang, Y. M. Shih, and W. C. Liu, “New self-aligned T-gate InGaP/GaAs field-effect transistors grown by LP-MOCVD,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, no. 6, pp. 304–306, Jun. 1999.

[22] S. W. Tan, W. T. Chen, M. Y. Chu, and W. S. Lour, “Sub-0.5- $\mu\text{m}$  gate doped-channel field-effect transistors with HEMT-like channel using thermally reflowed photoresist and spin-on glass,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 167–171, Feb. 2004

[23] P. Cova, R. Menozzi, D. Lacey, Y. Baeyens and F. Fantini, “High performance electron devices for microwave and optoelectronic

applications,” EDMO, IEEE 1995 Workshop, 1995

[24] K. Kiziloglu, H. Ming, D. S. Harvey, R. D. Widman, C. E. Hooper, P. B. Janke, J. J. Brown, L. D. Nguyen, D. P. Docter and S. R. Burkhart, “High-performance AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMTs for K and Ka-band applications,” Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, vol. 2, p. 13, 1999.

[25] J. C. Huang, W. C. Hsu, C. S. Lee, D. H. Huang, and Y. C. Yang, “High-Power Density and High-Gain  $\delta$ -Doped In<sub>0.425</sub>Al<sub>0.575</sub>As/In<sub>0.425</sub>Ga<sub>0.575</sub>As Low-Voltage for Operation,” J. of the Electrochemical Soc., vol. 154, pp. 185-190, 2007.

[26] M. Miyashita, N. Yoshida, Y. Kojima, T. Kitano, N. Higashisaka, J. Nakagawa, T. Takagi and M. Otsubo, “An AlGaAs/InGaAs pseudomorphic HEMT modulator driver IC with low power dissipation for 10-Gb/s optical transmission systems”, Microwave Theory and Techniques, vol. 45, p. 1058, 1997.

[27] A. T. Ping, M. A. Khan, Q. Chen, J. W. Yang, and I. Adesjda, “Dependence of DC and RF characteristics on gate length for high current AlGaN/GaN HFETs,” Electronics Lett., vol. 33, no. 12, pp. 1081-1083, 1997.

