

# 氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體 (AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT)之突波可靠度提升研究-(I) 藉由覆晶於高散熱氮化鋁基板(II) 串聯具有二維電子氣結構之氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器(AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 2DEG Varactor)

田主業<sup>1,3</sup>、張連璧<sup>1</sup>、桂平宇<sup>2</sup>、Atanu Das<sup>1</sup>、  
鄭南宏<sup>4</sup>、陳永芳<sup>4</sup>、林瑞明<sup>5</sup>、邱顯欽<sup>5</sup>

<sup>1</sup>長庚大學工學院綠色科技研究中心

<sup>2</sup>國防大學理工學院電機電子系

<sup>3</sup>國防大學理工學院電機國科所

<sup>4</sup>中央大學通信工程學系

<sup>5</sup>長庚大學電子工程學系

## 前言：

氮化鋁鎵/氮化鎵(AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>)的高電子遷移率電晶體(HEMT)在功率元件的應用中已展現其優異的特性。然而，元件應用時熱效應造成的特性降低，與突波襲擊耐受度的良窳，卻深深影響功率元件應用時之可靠度。經由本研究得知，高電子遷移率電晶體覆晶於氮化鋁散熱性子基板之後，除電流電壓(IV)特性可提升外，在靜電突波進襲下，於元件內電子通道所產生之熱，能可有效的經由電晶體表面之金屬電極，連接而傳導至覆晶子基板散熱，無須經過數十倍厚度之基底，進而增加元件之熱穩定性及可靠度。此外，進一步在覆晶型高電子遷移率電晶體閘級前串聯一氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器，因壓變電容器允許低壓訊號通過，抵擋瞬間變化之高壓突波；從而降低突波進襲應力，可進一步有效確保覆晶型高電子遷移率電晶體之特性不變，提升元件對靜電突波的耐受度。所以，具二維電子氣之金屬-半導體-金屬結構之氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器(AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MSM-2DEG Varactor)串聯於覆晶型氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體(AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT)閘極可有效提高對於靜電突波進襲之熱穩定性及耐受度，從而提升元件之可靠度。

## 一、簡介

氮化鋁鎵/氮化鎵(AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>)的高電子遷移率電晶體(HEMT)在高頻率和高功率的應用中

已顯示出優異的特性表現。然而，其一個關鍵的技術挑戰-即熱效應與高壓突波應力對元件特性之穩定性及可靠度影響卻深深影響著此類型功率元件應用上進一步的成功經驗。因此，在此領域範疇裏仍然有必要找出可有效解決這些影響功率元件可靠度問題的適用方案。氮化鋁鎵/氮化鎵的高電子遷移率電晶體(HEMT)已證明透過使用較高散熱係數的熱導電材料作為基底[1]或用雷射剝離(lift off)置換原基板的方法[2]來達到有效提升功率元件熱管理的效益。此外，考量元件製程之成本效益及提高以氮化鎵材料為基底之功率元件其高性能表現，覆晶技術應用的最佳化設計以改善其功率元件之熱管理效益相關研究亦被提出探討[3]。藉由覆晶技術中，可以提供之高散熱效率子基板的優勢，可效降低熱效應在元件中所造成特性衰減之缺點。

此外，為了保護電子設備對於來自自然或人為所造成的有意電磁干擾(IEMI)威脅，其中各種不同型式之圖波包括雷擊脈衝(LEMP)，電磁脈衝(HEMP)，靜電放電(ESD)等，一些非線性的電路保護元件如氣體放電管(GDT)，金屬氧化物變阻器(MOV)，以及瞬態電壓抑制器(TVS)二極體的組合使用，是目前系統上(System Level)最常用的傳統電路保護方式[4]-[6]。不同型式的突波進襲電子設備，會導致不同之電流和電壓特型圖形呈現，而這些突波波形結合起來所產生的瞬時功率總和，將導致元件裝置產生高熱與高壓，並且在某些情況下，誘導熱融化或是高壓擊穿等故障。因此理論上覆晶技術將可以有效解決散熱問題，但是對於突波防治部分卻是少有人探討，因此將於本研究與以討論。

另外，相較於前述提及之系統級突波保護元件，具有二維電子氣之金屬-半導體-金屬結構之氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器(AlGaIn/GaN MSM-2DEG Varactor)，無疑是一種元件級與化合物半導體相容之突波保護元件，目前已經驗證其具有穩定之可變電容轉換特性[7]-[8]，可應用於低損耗大功率之射頻開關元件[9]。壓變電容器的阻抗因應壓變電容器輸入偏壓不同而造成之元件電容值變化而有所不同。當輸入偏壓小於壓變電容器的轉變電壓(transition Voltage,  $V_t$ )時，可得壓變電容器電容為最大電容值( $C_{max}$ )，此時元件特性進入低阻抗區域，有利於一般正常信號的傳輸；然而，當輸入偏壓大於壓變電容器的轉變電壓(transition Voltage,  $V_t$ )時，壓變電容器電容為最小電容值( $C_{min}$ )，此時壓變電容器元件特性進入高阻抗區域，進入了突波之阻斷與隔絕區。

## 二、實驗設計

### (一) 氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體覆晶於氮化鋁子基板之可靠度研究：

在本次研究中，我們分別應用以高散熱係數之氮化鋁子基板覆晶技術，以及高電子遷移率電晶體(HEMT)閘級串聯具有二維電子氣之金屬-半導體-金屬結構之氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器方式與氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體(HEMT)進行整合，驗證此整合性功率元件對於靜電突波進襲下的元件可靠度。

首先，單就覆晶散熱技術之應用突波防治方面研究，一氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體以覆晶方式整合於具有氮化鋁子基板(如圖 1 所示)，當覆晶型高電子遷移率電晶體(FC-HEMT)處於一高電壓之靜電突波進襲下，此類型之氮化鋁覆晶子基板會提供一良好之散熱機制，使得通道熱聚積得以迅速排除，此外其金屬-絕緣體-金屬(MIM)電容也可提供路徑以釋放靜電應力。

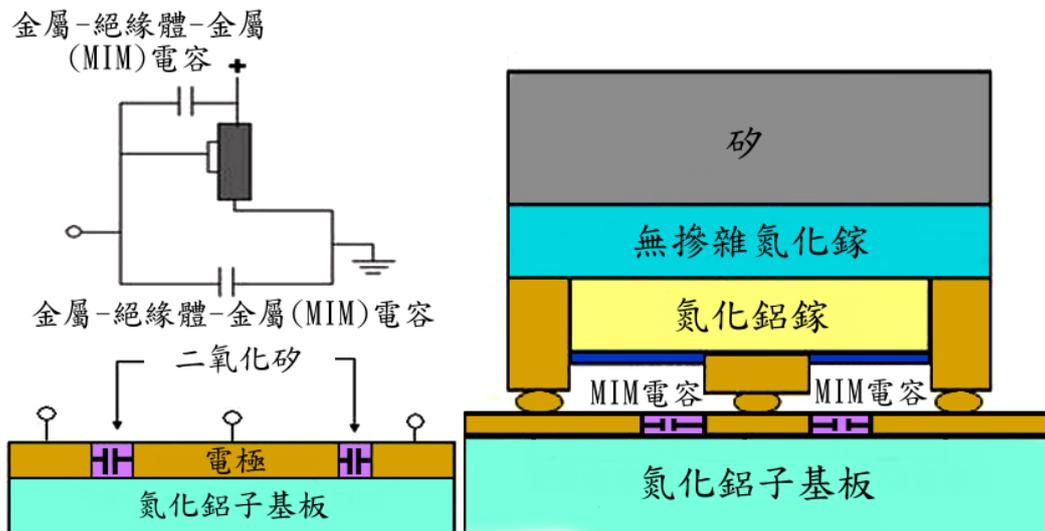


圖 1：化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體覆晶於金屬-絕緣體-金屬結構之氮化鋁子基板示意圖

圖 1 中氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體(HEMT)結構由有機金屬化學氣相沉積法(MOCVD)於矽基板上所磊晶，氮化鋁鎵層厚25奈米，氮化鎵層厚2微米，高電子遷移率電晶體閘極為鎳/金之蕭基接觸電極，汲極與源極為鈦/鋁/鎳/金之歐姆接觸電極，元件表面沉積氮化矽保護層厚約120奈米，此外，閘極電極寬度為1毫米，閘極長度1.2微米，閘極源極間距2微米，閘極汲極間距3微米。在氮化鋁子基板製程方面，預先將二氧化矽沉積於氮化鋁子基板上，以1000°C進行回火10分鐘，再以黃光微影方式定義電極區域，並以反應式離子蝕刻(RIE)進行蝕刻後，鍍上鈦/金電極，用快速熱退火(RTA)以400°C、30秒將子基板電極進行回火作業。待上述高電子遷移率電晶體(HEMT)及氮化鋁子基板分別製作完成，即用打線機於高電子遷移率電晶體電極上打上金球，以覆晶機將元件與子基板進行覆晶結合作業即完成。

在靜電耐受度測試中，我們使用了靜電槍(KeyTek MiniZap MZ-15/EC)分別對高電子遷移率電晶體之汲極與閘極執行靜電電擊測試，靜電測試等效電路如圖 2 (a)所示。在靜電(ESD)測試規範中，即使在相同的施加電壓(ex.8000伏特)，實際的靜電(MIL-STD-883人體模型，HBM)峰值電流是靜電槍輸出的1/5倍(IEC 61000-4-2)，如圖 2 (b)所示。為測試覆晶型高電子遷移率電晶體(flip-chip HEMT)的靜電(ESD)耐受度特性，參照報告[10]、[11]所提出之電路構聯方式如下：(a)如圖 2 (c)所示，正脈波靜電由高電子遷移率電晶體汲極輸入，閘極浮接而源極接地，以測試靜電遞增輸入下元件二維電子氣通道結構之靜電耐受度。(b)如圖 2 (d)所示，正脈波靜電由高電子遷移率電晶體源極輸入，閘極接地而汲極浮接，以測試靜電遞增輸入下閘極與源極間之蕭基二極體結構之靜電耐受度。同時，元件故障判據依據分別以汲極電流( $I_{ds}$ )不受閘極電壓( $V_{gs}$ )控制，閘極漏電流( $I_{gs}$ )大於10微安培的值為準，稱為絕對漏電流的方法[12]。元件在靜電電極前後的直流電性量測以Agilent B1500A進行之。

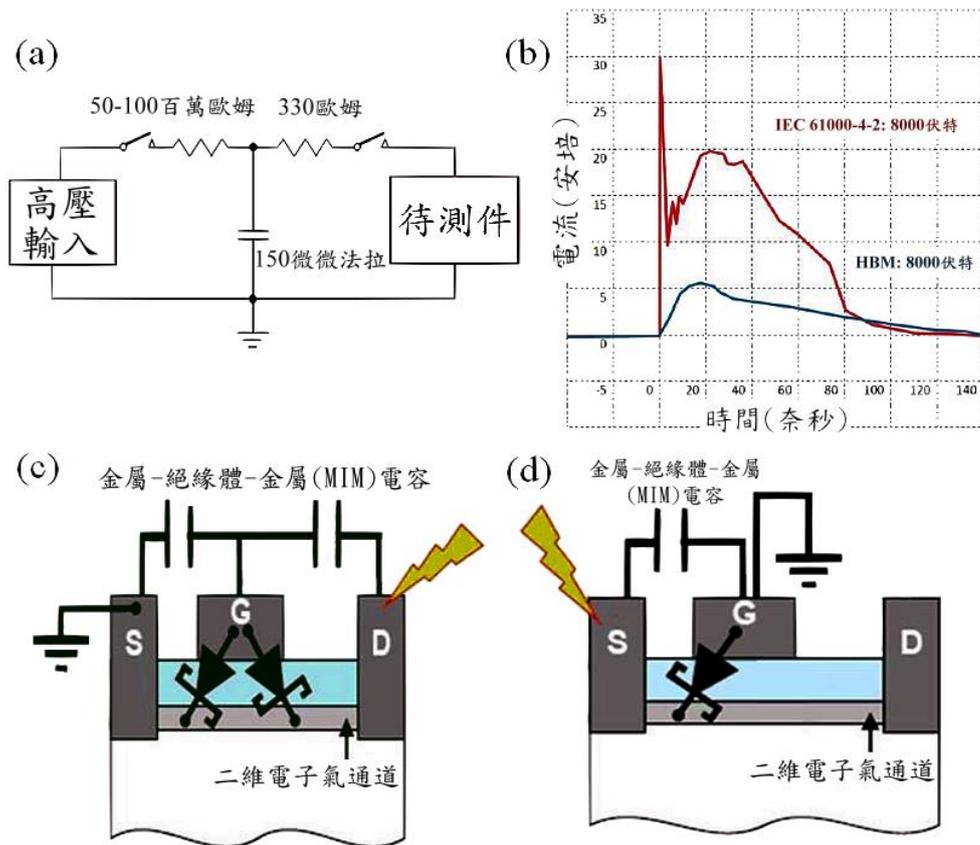


圖 2：(a)靜電槍(ESD)符合IEC 61000-4-2(HBM)的0.7~1奈秒上升時間要求的等效電路。(b)在8000伏特的靜電電壓，MIL-STD-883 (HBM)和IEC 61000-4-2的峰值電流分別為5.33安培和30安培。(c)ESD應力由汲極-源極到二維電子氣通道示意圖。(d)靜電(ESD)應力由源極-閘極到蕭基二極體示意圖。

**(二) 具二維電子氣之金屬-半導體-金屬結構之氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器(AIGaN/GaN MSM-2DEG Varactor) 串聯於覆晶型氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體(AIGaN/GaN HEMT)閘極之可靠度提升研究：**

製作氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器(AIGaN/GaN MSM-2DEG Varactor)與氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體(AIGaN/GaN HEMT)，採用氮化物高電子遷移率電晶體之標準製程[7]，因此，所提出之MSM-2DEG壓變電容器與高電子遷移率電晶體(HEMT)相同製程確保了元件之相容性與整合性。同時，壓變電容器電極採鎳/金蕭基接觸製做，本報告採用之接觸面基為153600平方微米(接觸面基與電容之相關細節可參酌本研究團隊先前的報告[8])。經由HP4285A精密LCR測試儀對MSM-2DEG壓變電容器所進行之電容-電壓(C-V)特性量測得知，最大電容值(Cmax)與最小電容值(Cmin)分別為137微微法拉與1.5微微法拉，電容比(Cmax/Cmin)為91.33。壓變電容器以及高電子遷移率電晶體(HEMT)分別以打線機於元件電極上打植金球顆粒作為連接突塊，再利用覆晶機進行元件校對後，各別將元件覆晶於氮化鋁散熱子基板上，成為一俱二維電子氣之金屬-半導體-金屬結構之氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器(AIGaN/GaN MSM-2DEG Varactor)串聯於覆晶型氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體(AIGaN/GaN HEMT)之整合性元件(如圖 3 所示)。

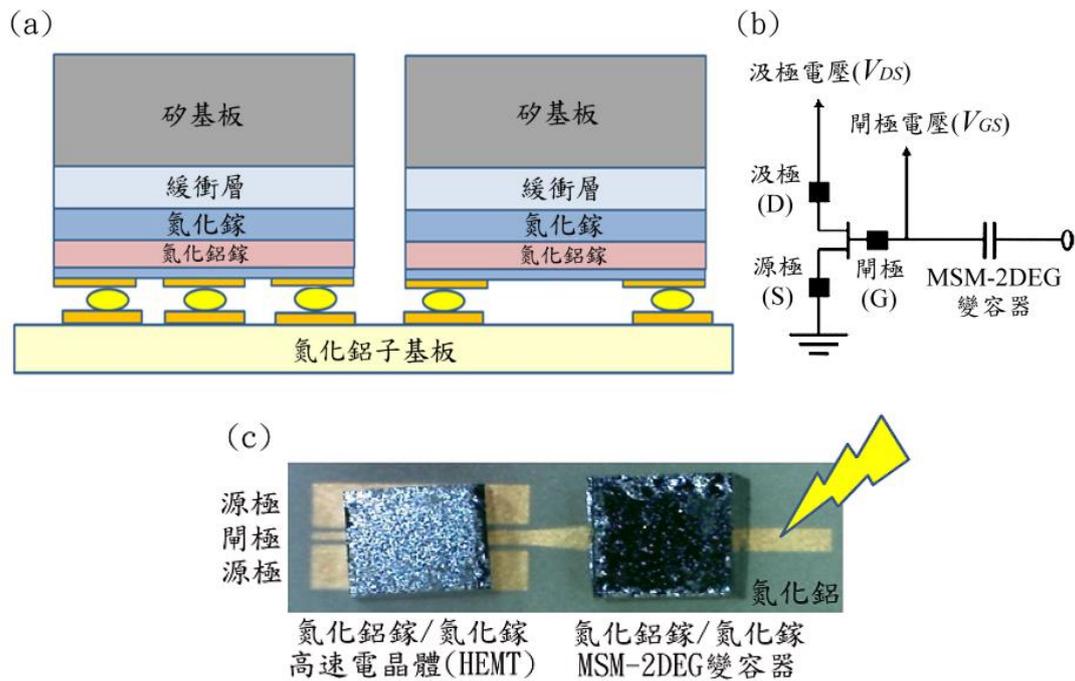


圖 3：(a)氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器高電子遷移率電晶體(HEMT)覆晶於氮化鋁子基板示意圖。(b)等效電路圖。(c)元件覆晶完成俯視圖。

在此整合性元件之靜電耐受度測試中，我們使用了靜電槍(KeyTek MiniZap MZ-15/EC)對氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器之一端執行靜電(ESD)電擊測試，直到高電子遷移率電晶體(HEMT)閘極損毀而無法控制元件 $I_{ds}$ 為止，此乃驗證壓變電容器對高電子遷移率電晶體(HEMT)閘極之靜電保護能力。本研究相關測試規範及元件特性量測儀具與前項(一)實驗相同。

### 三、結果與討論

#### (一) 氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體覆晶於氮化鋁子基板之可靠度研究：

如圖 4 所示，本批元件乃是閘極寬 2 微米之樣品，在直流特性測量中，可以觀察到覆晶型高電子遷移率電晶體(FC-HEMT)相較於無覆晶之高電子遷移率電晶體(FC free-HEMT)，在汲極電流-汲極電壓( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ )、汲極電流-閘極電壓( $I_{ds}$ - $V_{gs}$ )和轉導-閘極電壓( $g_m$ - $V_{gs}$ )等特性上分別顯示了 44%，30%，和 85% 的改善能力(如圖 4)。這些結果顯示，覆晶型高電子遷移率電晶體(FC-HEMT)如 Das 等研究[3]資料，明顯具有改進元件大電流下之熱效應。此外，有無覆晶的高電子遷移率電晶體在閘極電流( $I_g = 150$  毫安培/毫米)條件下，有著相同或類似的導通電壓-1.15 伏特，說明覆晶技術對元件整體串聯電阻之增加上，影響不大。

在靜電耐受度的測試中，所採用之元件乃是閘極寬 1 微米之樣品，我們採用靜電應力分別施加於電晶體結構內之二維電子氣(2DEG)通道，和閘極-源極間蕭基二極體界面，用以評估有無覆晶型氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體之差異。在圖 5 (a)中，我們發現對於無覆晶之高電子遷移率電晶體之汲極，當所加的靜電應力超過 100 伏特時，由於熱堆積，可以開始看到類似回火現象之發生，造成大電流時之汲極電流( $I_{ds}$ )有上升之趨勢；當注入靜電應力達到 800 伏特時，其二維電子氣通道(2DEG)隨即損毀，汲極電流( $I_{ds}$ )不再受控制而打開。而不同靜電注入故障現象卻在圖 5 (b)中被發現；由結果得知，其靜電注入應力在 100-900 伏特範圍之間，汲

極電流( $I_{ds}$ )相較於無覆晶元件之汲極電流較為穩定，幾乎沒有變化，因為氮化鋁覆晶子基板提供良好之散熱機制，沒有任何熱回火現象；此外，子基板上之金屬-絕緣體-金屬(MIM)電容結構(較無覆晶條件增加約3微微法拉)，可提供外來之靜電旁路路徑，因此也提高了靜電應力之耐受度到1000伏特；也就是說，覆晶型高電子遷移率電晶體內的二維電子氣通道所增加25%的靜電耐受度。由以上結果得知，覆晶技術的應用，使高電子遷移率電晶體可降低元件熱效應外，亦同時提升直流特性及靜電耐受度上之表現。

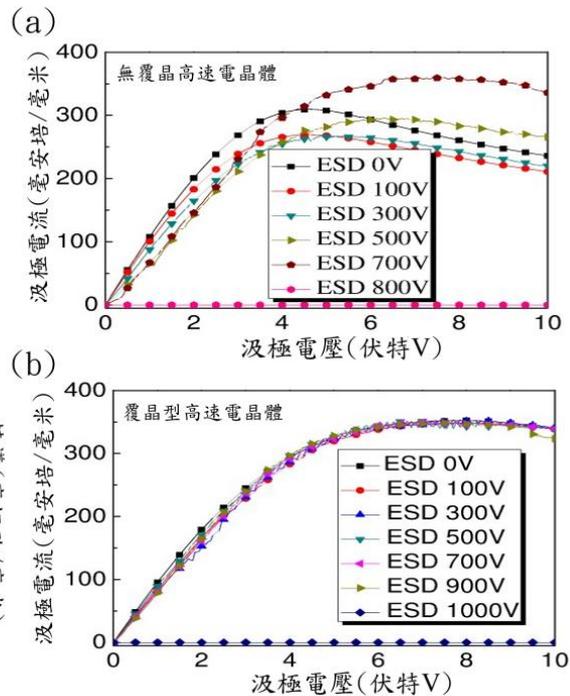
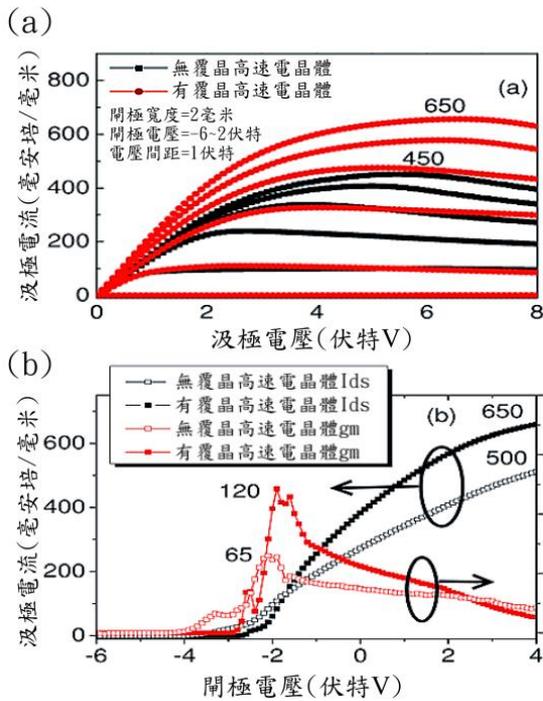


圖 4：有無覆晶型高電子遷移率電晶體(HEMT)之 (a)汲極電流-汲極電壓( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ )特性圖。(b)汲極電流-開極電壓( $I_{ds}$ - $V_{gs}$ )及轉導-開極電壓( $g_m$ - $V_{gs}$ )特性圖 (開極寬度=2毫米)。

圖 5：(a)無覆晶高電子遷移率電晶體 (b) 有覆晶高電子遷移率電晶體 於靜電應力下之汲極電流-汲極電壓( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ )特性圖 (開極寬度=1毫米)。

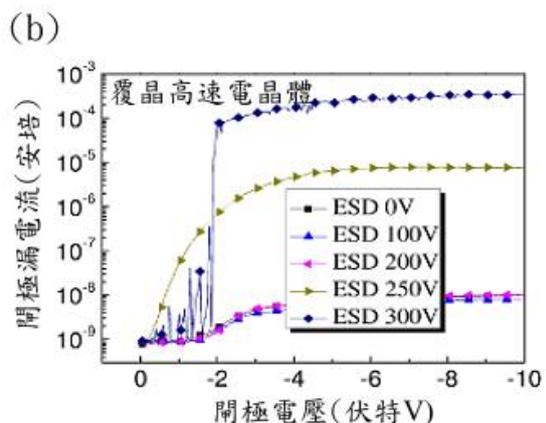
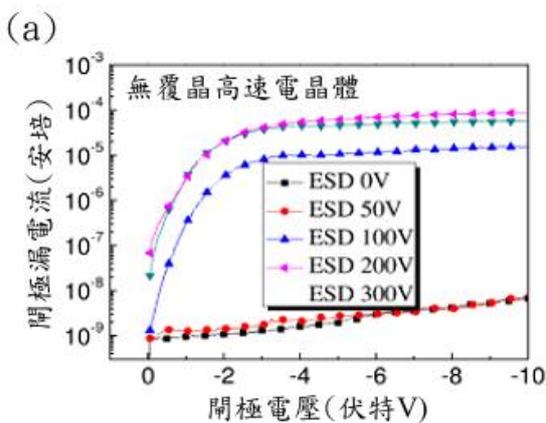


圖 6：(a)無覆晶高電子遷移率電晶體 (b)有覆晶高電子遷移率電晶體 於靜電應力下之開極漏電流-開極電壓( $I_{gs}$ - $V_{gs}$ )特性圖 (開極寬度=2毫米)。

圖 6 (a)所示，無覆晶之高電子遷移率電晶體閘極當外加靜電應力達100伏特以上時，其閘極漏電流即達失效判定之標準(大於 $10^{-5}$ 安培，如圖 6 (a))，與此相同標準下，覆晶型高電子遷移率電晶體閘極需達靜電應力250伏特以上才失效(如圖 6 (b))。有鑒於上述覆晶型高電子遷移率電晶體閘極與源極間之蕭基二極體接面結構其靜電耐受度增加了150%，可知亦受益於氮化鋁覆晶子基板所形成之靜電旁路而能有效洩放其能量。

## (二) 具二維電子氣之氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器，串聯於覆晶型氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體閘極上之可靠度提升研究：

在MSM-2DEG壓變電容器串聯覆晶型高電子遷移率電晶體(HEMT)閘極之靜電耐受度測試中，電路連接構型上以源極接地、汲極浮接及閘極正脈波靜電輸入為主。因負脈波靜電會關閉高電子遷移率電晶體(HEMT)通道致使無法運作，故此處不予討論，另外，有關元件覆晶效益已於前述(一)項研究討論中證明，此處將聚焦覆晶型高電子遷移率電晶體(FC-HEMT)閘極串聯壓變電容器對靜電突波防護之提升探討。

如圖 7 所示，於靜電應力1100伏特以下輸入時，覆晶高電子遷移率電晶體之閘極漏電流依舊小於0.5毫安培。當外部輸入之靜電應力分別為1300伏特與1500伏特時，閘極漏電流提升至13毫安培與28毫安培。就測試結果得知，壓變電容器串聯高電子遷移率電晶體閘極所構成之整合性元件，在外部靜電應力1100伏特以下輸入時，其元件特性不變，然當外部靜電應力輸入高於1100伏特，其壓變電容器已不足以抵擋並吸收其突波進襲能量，導致高電子遷移率電晶體閘極之蕭基二極體接面受損，漏電流增大且無法再度關閉元件中二維電子氣通道，致使元件失效。另一方面，由前述(一)項研究及本項研究結果相比較，有串聯MSM-2DEG壓變電容器的覆晶型高電子遷移率電晶體，其閘極蕭基二極體對靜電突波的耐受度相較於沒串聯壓變電容器的相同元件高出了4倍左右。就MSM-2DEG壓變電容器而言，在一般的操作下僅為一大電容(最大電容值 $C_{max}=137$ 微微法拉)，可讓一般信號通過，然而，對大電壓而言，MSM-2DEG壓變電容器視為一小電容(最小電容值 $C_{min}=1.5$ 微微法拉)，具有高阻抗可阻擋高電壓靜電脈波通過，即可達成提升後端元件閘極蕭基二極體之突波耐受度的目的，增加高電子遷移率電晶體之可靠度。

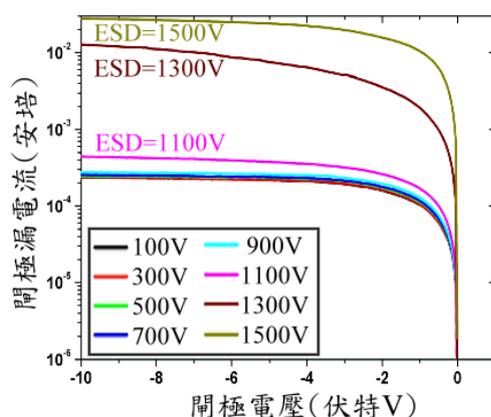


圖 7：MSM-2DEG壓變電容器串聯覆晶型高電子遷移率電晶體(HEMT)之靜電耐受度測試閘極漏電流-閘極電壓( $I_{gs}$ - $V_{gs}$ )特性圖。

由靜電應力對MSM-2DEG壓變電容器串聯覆晶型高電子遷移率電晶體(HEMT)閘極相關的汲極電流-汲極電壓( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ )特性圖(如圖 8 所示)可以得知，當外部靜電應力輸入閘極為1100伏

特時，高電子遷移率電晶體之汲極電流輸出變化不大且實際上可以忽略。與此相反的，當外部靜電應力輸入閘極達1500伏特時，元件之汲極電流-汲極電壓( $I_{ds}-V_{ds}$ )特性就有明顯的變化。這最主要的影響事發生在電晶體閘極之蕭基二極體受突波襲擊所導致的退化，致使其無法夾止(pinch-off)二維電子氣通道，造成無法控制及調變高電子遷移率電晶體之輸出特性而失效。事實上，在靜電應力達1100伏特以上且閘極電壓於-2伏特  $\leq$  閘極電壓  $\leq$  1伏特範圍內時，汲極電流-汲極電壓( $I_{ds}-V_{ds}$ )特性稍有差異外，最大的直流電流-電壓特性差異發生在閘極電壓於-6伏特  $\leq$  閘極電壓  $\leq$  -3伏特範圍時，相關汲極電流輸出特性幾乎呈現重疊狀態而隨汲極電壓( $V_{ds}$ )增加而線性遞增，不再以飽和電流狀態輸出。這說明元件內部已不再能維持足夠的電場以空乏主動區來夾止(pinch-off)二維電子氣通道。關於靜電突波所造成元件受損失效的機制，將失效元件置於光學顯微鏡下檢查後發現，高電子遷移率電晶體閘極金屬線因靜電所產升之高熱而熔毀是一種可能的解釋 [13]。

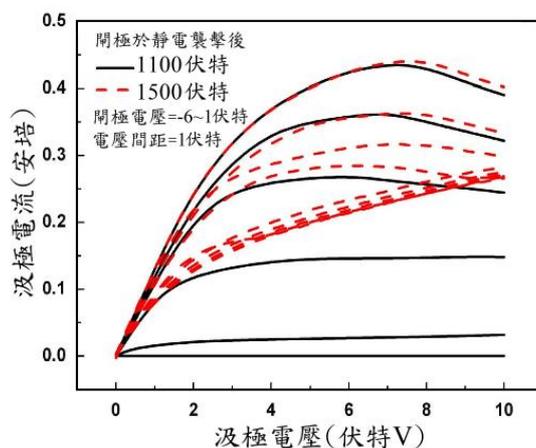


圖 8：於閘極遭受靜電襲擊後，具MSM-2DEG壓變電容器串聯之覆晶型高電子遷移率電晶體 (HEMT)的汲極電流-汲極電壓( $I_{ds}-V_{ds}$ )特性圖

但是值得繼續研究的是，氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器，於靜電電壓襲擊之下，因壓變電容器阻擋從而降低突波進襲應力，如何將其被阻擋之電荷進一步洩放，將有助於氮化鋁鎵/氮化鎵(AlGaIn/GaN)高電子遷移率電晶體(HEMT)的應用可靠度。

#### 四、結論

氮化鋁鎵/氮化鎵(AlGaIn/GaN)的高電子遷移率電晶體(HEMT)在功率元件的應用中已展現其優異的特性。然而，有關元件應用時熱效應的降低與因應突波襲擊耐受度的提高卻深深影響功率元件之可靠度。由本研究可知，高電子遷移率電晶體應用高散熱係數之氮化鋁子基板覆晶技術可初步在直流特性測量中，分別於汲極電流-汲極電壓( $I_{ds}-V_{ds}$ )，汲極電流-閘極電壓( $I_{ds}-V_{gs}$ )與轉導-閘極電壓( $g_m-V_{gs}$ )等特性上提供了44，30，和85%的改善能力，同時，其元件汲極至源極以及閘極至源極的靜電(ESD)突波耐受度分別增加25%與150%。證明覆晶技術對降低元件熱效應與增進突波耐受度之實效。另外，進一步在覆晶型高電子遷移率電晶體閘級前串聯一氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器，於靜電(ESD)襲擊電壓1100伏特以下時，因壓變電容器阻擋從而降低突波進襲應力，使覆晶型高電子遷移率電晶體閘極漏電流仍低於0.5毫安培以下，有效確保元件特性不變外，更相較於沒串聯壓變電容器的相同元件，其閘極的靜電耐受度高出約4倍。所以，應用具二維電子氣之金屬-半導體-金屬結構之氮化鋁鎵/氮化鎵壓變電容器

(AlGaN/GaN MSM-2DEG Varactor) 串聯於覆晶型氮化鋁鎵/氮化鎵高電子遷移率電晶體 (AlGaN/GaN HEMT) 閘極，將可提高對於突波進襲之熱穩定性及突波耐受度，從而提升元件之可靠度，且更因壓變電容器與高電子遷移率電晶體具有相同製程，降低製程成本與提高電路的整合性。

## 參考文獻

- [1] J. T. Felbinger, M. V. S. Chandra, Y. J. Sun, L. F. Eastman, J. Wasserbauer, F. Faili, D. Babic, D. Francis, and F. Ejeckam, "Comparison of GaN HEMTs on diamond and SiC substrates," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 948-950, Nov. 2007.
- [2] J. Das, W. Ruythooren, R. Vandersmissen, J. Derluyn, M. Germain, and G. Borghs, "Substrate removal of AlGaN/GaN HEMTs using laser liftoff," *Phys. Status solidi (c)*, vol. 2, pp. 2655-2658, May 2005.
- [3] J. Das, H. Oprins, H. F. Ji, A. Sarua, W. Ruythooren, J. Derluyn, M. Kuball, M. Germain, and G. Borghs, "Improved thermal performance of AlGaN/GaN HEMTs by an optimized flip-chip design," *IEEE Trans. Electron Device*, vol. 53, no. 11, pp. 2696-2702, Nov. 2006.
- [4] J. Ribič, J. Pihler and J. Voršič, "Overvoltage Protection Using a Gas Discharge Arrester Within the MATLAB Program Tool," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 4, pp. 2199-2206, Oct. 2007.
- [5] A. Haddad, R. T. Waters, D. M. German and Z. Abdul-Malek, "'Current disparity in multi-column surge arresters'," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* Vol. 152, No. 6, pp. 945-951, Jul. 2005.
- [6] IEEE Guide for the Application of Component Surge-Protective Devices for Use in Low-Voltage [Equal to or Less than 1000 V (ac) or 1200 V (dc)] Circuits, IEEE Standard C62.42TM, 2005.
- [7] M. Marso, M. Wolter, P. Javorka, A. Fox, and P. Kordoš, "AlGaN/GaN varactor diode for integration in HEMT circuits," *Electro. Lett.* vol. 37, no. 24, pp. 1476-1478, Nov. 2001.
- [8] Y. C. Ferng, L. B. Chang, A. Das, C. Y. Chen, and C. C. Lin, "Effective Treatment on AlGaN/GaN MSM-2DEG Varactor with (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S/P<sub>2</sub>S<sub>5</sub> Solution," *Electrochem. Solid-State Lett.* vol. 13, no. 10, pp. H350-H353, 2010.
- [9] H. Rao and G. Bosman, "Device reliability study of AlGaN/GaN high electron mobility transistors under high gate and channel electric fields via low frequency noise spectroscopy," *Microelectronics Reliab.*, vol. 50, pp. 1528-1531, Jul. 2010.
- [10] Tazzoli, F. Danesin, E. Zanoni, and G. Meneghesso, "ESD robustness of AlGaN/GaN HEMT devices," in 29th EOS/ESD Symp., pp. 264 - 272, Sept. 2007.
- [11] H. Rao and G. Bosman, "Device reliability study of AlGaN/GaN high electron mobility transistors under high gate and channel electric fields via low frequency noise spectroscopy," *Microelectronics Reliab.*, vol. 50, pp. 1528 - 1531, Aug. 2010.
- [12] Y. S. Lin, Y. W. Lain, and S. S. H. Hsu, "AlGaN/GaN HEMTs with low leakage current and high on/off current ratio," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 31, no. 2, pp. 102 - 104, Feb. 2010.
- [13] Tazzoli, F. Danesin, E. Zanoni, and G. Meneghesso, "ESD robustness of AlGaN/GaN HEMT devices," in 29th EOS/ESD Symp., pp. 264-272, Sep. 2007.