

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

利用雷射剝離法製作高導熱性氮化鎵微波高功率元件 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 94-2215-E-009-030-
執行期間：94年08月01日至95年10月31日
執行單位：國立交通大學材料科學與工程學系(所)

計畫主持人：張翼

計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：徐金鈺、張家達
碩士班研究生-兼任助理：林良郡、胡吟竹、唐士軒、曾文仲

報告附件：國外研究心得報告
國際合作計畫研究心得報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96 年 02 月 04 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

利用雷射剝離法製作高導熱性氮化鎳微波高功率元件

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2215-E-009-030-

執行期間：94年8月1日至95年7月31日

計畫主持人：張翼

共同主持人：

計畫參與人員：徐金鈺、張家達、林良郡、胡吟竹、唐士軒、曾文仲

成果報告類型： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學材料科學與工程所

中華民國 96年 1月 31日

(一) 計畫中文摘要。

關鍵詞：衛星通訊、微波通訊、氮化鎵、高功率、磊晶、高速電子元件、誘導耦合電漿、高頻、有機金屬化學氣相沈積、歐姆接觸、基地台、T 閘極、氧離子佈植、電漿增強化學氣相沈積、濺鍍、鈍化層

摘要：

本計畫延續上年度研究成果，主要研究下世代（3G、4G 或更高）無線通訊基地台關鍵零組件－氮化鎵高功率高電子遷移率功率電晶體（Power HEMT），以供未來數位無線通訊系統基地台使用。由於氮化鋁及氮化鎵極佳之基本材料特性如寬能隙（分別為 6.2 eV 及 3.4 eV）、且氮化鎵具有高飽和漂移速率（ 3×10^7 cm/sec）和高崩潰電場強度（ 5×10^6 V · cm⁻¹）…等等，使得氮化鋁鎵／氮化鎵異質接面極適合用在高頻高功率電子元件的製作上。今年完成閘極長度 0.6 μm 的無摻雜離子 AlGaIn/GaN Power HEMT 元件，其截止頻率為 33GHz，其最大振盪頻率 57GHz，在 3GHz 下的最大輸出功率為 5.3W/mm。以化學氣相沈積法磊晶機，製作高載子濃度、高電子遷移率之無摻雜離子 HEMT 結構；應用乾式蝕刻技術製作絕緣層。並成功將電子束直寫方式應用在氮化鎵微波元件上製作 0.6 μm 之 T 型閘極，並配合電漿增強化學氣相沈積系統（PECVD）沈積氮化矽作為保護層。此外，並研究多重氧離子佈植在製程上的應用及元性特性分析、比較電漿增強化學氣相沈積及濺鍍沈積氮化矽鈍化層對元件特性的影響，以及元件的可靠度分析。

(二) 計畫英文摘要。

Keywords : microwave communication 、 GaN 、 HEMT 、 high frequency 、 MOCVD 、 base station 、 Ohmic Contact 、 T-gate 、 ICP 、 Ion Implant 、 sputter 、 PECVD 、 passivation

Abstract:

Based on results of the previous project, the Compound Semiconductor Device Lab (CSD Lab in NCTU) will develop the key component fabrication techniques for GaN-based pseudomorphic high electron mobility transistor (HEMT) next-generation (3G, 4G or higher) base-station. The band gap energy for AlN and GaN are 6.2 eV and 3.4 eV respectively. The high saturated drift velocity(3×10^7 cm/sec) and high breakdown electric field(5×10^6 V \cdot cm⁻¹) for GaN and the strong piezoelectric effect make AlGaN/GaN based heterostructure very good candidates for high power, high frequency electronic devices. In the past year, the un-doped AlGaIn/GaN power HEMT with 0.6 μ m gate length has been developed. The f_T and f_{MAX} are 33 and 57GHz, respectively. The epitaxial structure of the device was implemented by MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) System made by Emcore in America. ICP (Induced Coupled Plasma) etching was introduced for mesa formation. 0.6 μ m sub-micro T-gate formation was fabricated on GaN HEMT microwave devices by E-beam direct-write technique and E-gun evaporation system. Si₃N₄ was deposited by PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) for device passivation. In addition, we have applied multi-energy oxygen ion implantation techniques for GaN device isolation process and investigated the pulse and RF performance. PECVD and sputter Si₃N₄ were also compared as the HEMTs passivation, and sputter Si₃N₄ passivated HEMTs performed better RF output power as 4W/mm, which was better than that of PECVD Si₃N₄ passivated devices.

前言：

由於微波及毫米波通訊之發展，無線傳輸已成為日常生活中之一部分。而隨著無線通訊之普及，對於資料傳輸要求也隨之增加，手機及網路傳輸之系統需求也日趨嚴苛。而高頻元件為無線通訊中之關鍵之零組件及技術，高頻系統性能之提升有賴於高頻元件技術之改進。過去由於台灣通訊業基礎薄弱，因此未能積極致力於高頻元件及模組技術之研究，使得台灣在此方面關鍵技術之掌握不如歐美國家，亦喪失在無線通訊產業的領先地位。由於無線通訊之需求日益嚴苛，高頻、高輸出功率、低雜訊已非傳統矽半導體所能勝任，取而代之的是一向以高速著稱之 III-V 族半導體—砷化鎵、磷化銦、氮化鎵。近年來，國內在 III-V 族半導體之發展已有很大的進展，已有不少廠商投入 III-V 族高頻元件製造。本實驗室在砷化鎵之微波元件製作及模型化已有相當之基礎，能製作砷化鎵高頻元件，其最高震盪頻率已高達 350GHz 以上。由於氮化鎵材料之物理特性在高頻高功率應用有其特殊之優越性，因此已成為通訊高功率元件之研究主流，本計劃即以材料結構為出發點，氮化鎵高溫製程為橫軸，研發氮化鎵高電子遷移率功率電晶體，以供下世代無線元件通訊使用。

研究目的：

高頻無線通訊品質，功率元件特性極為重要。而傳統砷化鎵能隙 1.34eV，製作之功率元件功率太小，在某些應用，無法滿足高功率輸出需求，如：基地台，相陣列雷達系統…等，故寬能隙半導體，如：氮化鎵、碳化矽，獲得愈來愈多的重視。尤其氮化鎵因其材料之高化學穩定性、高飽和電子遷移速率、高崩潰電壓、高載子濃度、可製作出高頻高溫操作及高功率輸出元件，因此已成為國內外高頻元件之顯學，國內外各大高頻元件研究團隊，莫不紛紛進行氮化鎵電子元件製作之研究，尤其美國已將之列入國家重點發展計劃。目前國內學術在砷化鎵高頻微波元件之製作上已趨成熟，但氮化鎵僅在光電元件上有較多的研究，電子元件方面，不僅磊晶結構成長有待發展，連製程方面都和有待研發，尤其是氮化鎵化學穩定性高，蝕刻技術即為一大難題。而高頻率高功率元件量測技術亦為一大挑戰。因此，本計畫的主要目標就是發展氮化鎵磊晶材料成長技術及克服製程上之困難，製作出氮化鎵高功率高電子遷移率功率電晶體（GaN Power HEMT）。

文獻探討：

由於氮化鎵材料化學穩定性高，無法如同傳統砷化鎵以溼式蝕刻製作元件絕緣，僅能以乾式蝕刻作為絕緣製程的選擇，在沈積閘極金屬後，閘極金屬會接觸到二維電子氣 (2DEG)，造成閘極漏電的增加，降低元件的崩潰電壓，故在此我們欲選用離子佈植作為元件絕緣製程。至今，在氮化鎵上所使用的離子佈植材料包括氫、氮、氧、氟、鎂、氫、鋅，但仍有磷/氮及氫離子佈植曾被應用在元件的製作上。在本研究所使用的氧離子有以下兩種優點：一、較原子量輕的離子具有更佳的熱穩定性。二、可使用較低的佈植能量，以減少元件表面損傷，光阻也較容易去除。

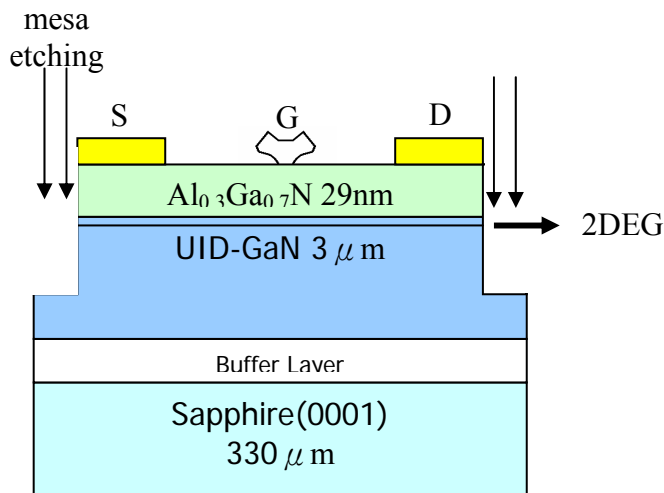
氮化鎵高電子遷移率電晶體最廣為人知的問題即是電流衰退(current slump)，最主要的問題是來自於元件中的陷阱(trap)，它的來源其中之一便是來自氮化鋁鎵(AlGaIn)的表面，故很多研究著重於如何利用表面鈍化來減少其表面態(surface state)，以增加元件在高頻下的功率輸出。至今，包括 SiO₂、p-Si₃N₄、n-Si₃N₄、Sc₂O₃、MgO、cat-CVD Si₃N₄ 均被應用在氮化鎵元件的表面鈍化，本研究則是嘗試以不同的 sputter Si₃N₄ 作為鈍化材料，並探討元件在脈衝及高頻下的元件特性。

研究方法：

在這次的研究當中，我們使用 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 異質接面磊晶成長 undoped Ga-face HEMT (High Electron Mobility Transistor) 結構。HEMT 結構基本上為在氧化鋁 (sapphire) 基板上先成長 3 μm GaN，接著再成長 29nm 之 Al_xGa_{1-x}N，x~0.3，結

構如圖一所示。因 AlGaN 之能隙大於 GaN，會在 AlGaN 及 GaN 之界面形成量子井把自由電子侷限在量子井內，即所謂之 2 維電子氣(2-Dimension Electron Gas)，以增加元件之電子遷移率以及加強閘極對電流的控制。

在元件開始製程之前，先用丙酮、異丙醇清洗晶片，再利用 HCl 去除晶片表面之氧化層。在元件彼此之間的絕緣方面，先利用微影技術以光阻當作 mask，再使用 ICP 乾式蝕刻來定義出元件的主動區域範圍，把元件之間乾式蝕刻出不導電的區域來作為元件之間的隔絕。源極(source)與汲極(drain)金屬與半導體之間的歐姆接觸(ohmic contact)則是蒸鍍 Ti/Al/Ni/Au 金屬，並利用 lift-off 技術掀起光阻去除多餘的金屬。Ti/Al/Ni/Au 多層金屬需經快速退火(RTA)，形成良好之歐姆接觸(ohmic contact)，其歐姆接觸特性，在經過 800°C 快速退火 560 秒後，可得到最低接觸電阻 $5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。在元件上極關鍵的閘極部分，係使用電子束微影系統直接用電子束直寫在 PMMA/Copolymer 雙層光組上，利用兩種光阻之感光性不同，形成 T 型的凹槽。再以電子束蒸鍍系統蒸鍍 Ni/Au(20nm/300nm)，接著利用光阻 lift-off 技術形成 T 型閘極(圖二)，如此具備有很小的閘極線寬與較低的閘極電阻，有利於元件之高頻功能。最後元件鈍化(passivation)，係利用電漿輔助化學氣相沈積系統(PECVD)，在元件表面沈積 100nm 之 Si_3N_4 ，以保護元件避免異物侵害及受潮。 Si_3N_4 上開導線孔(Nitride Via)，則藉由反應性離子蝕刻機(RIE) CF_4/O_2 完成，以連接到元件上的金屬 pad 來傳導電流。最後以空氣橋(airbridge)連結源極，以獲得更大的元件電流，且方便後續高頻小訊號及功率量測。



圖一



圖二

在元件絕緣方面除了前文所提到的 ICP 乾式蝕刻外，本次研究也同時開發多重能量的氧離子佈植，並研究 sputter Si_xN_y 鈍化層製程。多重能量的氧離子佈植係將氧離子打入氮化鎵表面約 200-300nm 的深度，把欲絕緣區域的氮化鎵晶格結構加以破壞，使電子難以傳導以達到絕緣的效果。此製程的優點在於可使得元件製程平坦化，減少金屬沈積時的斷線，以及配合單石微波積體電路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)製程。另外，並比較傳統 PECVD Si_xN_y 鈍化層及 sputter 濺鍍 Si_xN_y 鈍化層對元件特性之影響。

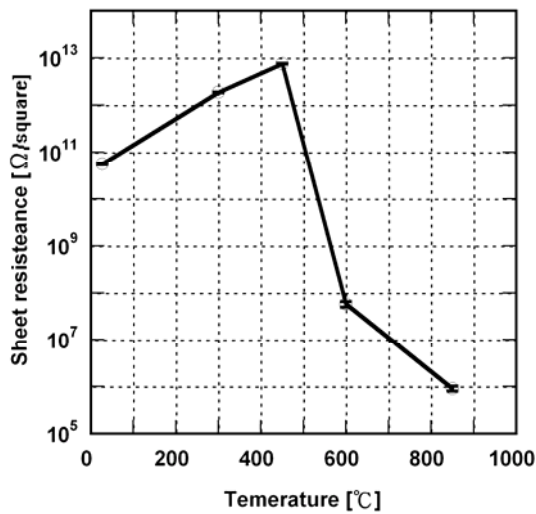
結果與討論：

此次研究所利用的磊晶晶片是非摻雜(undoped)的 Ga-face AlGaIn/GaN HEMT，磊晶晶片的電子遷移率(mobility)為 $1300 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ ；量子井中的載子濃度(sheet carrier concentration)為 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 。本次元件源極及汲極間距為 $4 \mu\text{m}$ ，閘極是利用電子束直寫技術在氮化鎵高電子遷移率電晶體晶片上製作次微米級閘極，該元件閘極線寬為 $0.6 \mu\text{m}$ 。歐姆接觸特性，在經過 850°C 快速退火 50 秒後，可得到最低接觸電阻 $5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

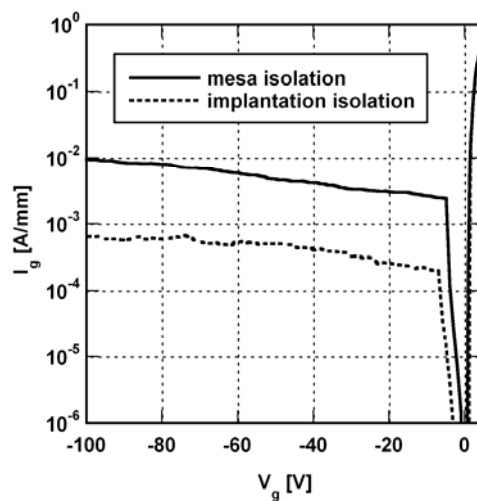
圖三為氮化鎵經過多重氧離子佈植後，其阻值對退火溫度的變化，退火時間為 1 小時。由圖可知，在經過 300°C 及 450°C 退火後，其片電阻值可達到 $10^{12} \Omega/\text{square}$ 。即使在 300°C 持

續退火 100 小時，其片電阻值仍有 $4.3 \times 10^{12} \Omega/\text{square}$ ，甚至較原本退火 1 小時為佳，由此可知多重氧離子佈植絕緣可與後續的高電子遷移率電晶體製程結合。圖四為氧離子佈植絕緣及蝕刻絕緣兩種元件閘極在逆偏壓下漏電流的比較，在逆偏壓 100 伏時，氧離子佈植之閘極漏電流明顯較傳統蝕絕緣改善，其漏電分別為 10^{-3}A/mm 及 10^{-2}A/mm 。在減低閘極漏電的同時，可減少元件的消耗功率，增加元件的崩潰電壓及可靠度。

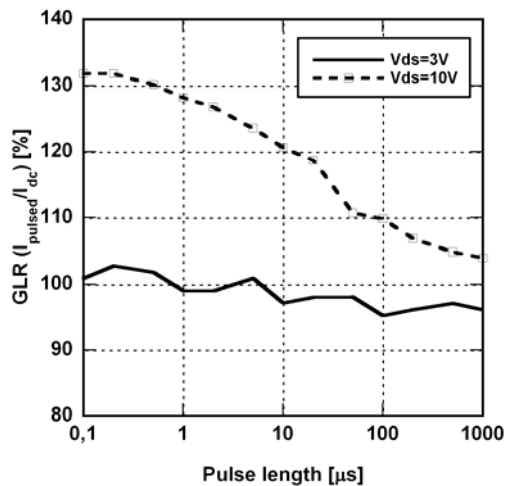
由於氮化鎵高電子遷移率電晶體最大的問題在於 trapping effect，其效率會反應在 gate-lag 及 drain lag 上，此現象是以一般直流分析所無法觀測到的，所以在本研究中便利用 Accent DiVA D225 進行多重氧離子佈植絕緣元件之脈衝量測(pulse measurement)，圖五及圖六為其分析結果。在圖五中，GRL 定義為 $I_{\text{pulse}}/I_{\text{DC}}$ ，其中 pulse 及 DC 之偏壓均為 0V，而 pulse base bias 為 -5V(pinchoff voltage)，由圖中可知，無論在 V_D 為 3V 或 10V，GRL 均大於 100%，代表此元件並無 gate-lag 之現象。圖六中，實線代表直流電流，虛線代表脈衝電流，其脈衝偏壓之 base voltage 為 $V_g = -6\text{V}$ ， $V_d = 20\text{V}$ ，由圖中可知並無明顯之 gate-lag 及 drain-lag 現象。



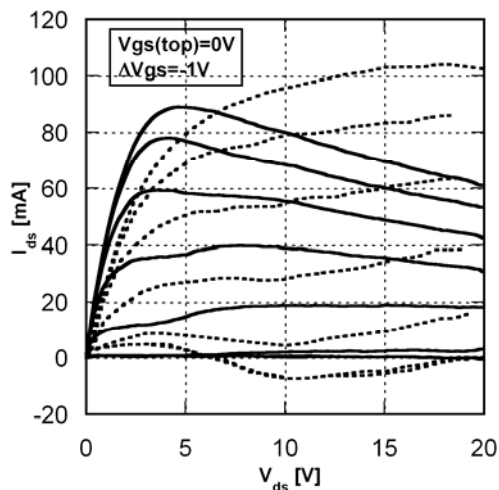
圖三



圖四

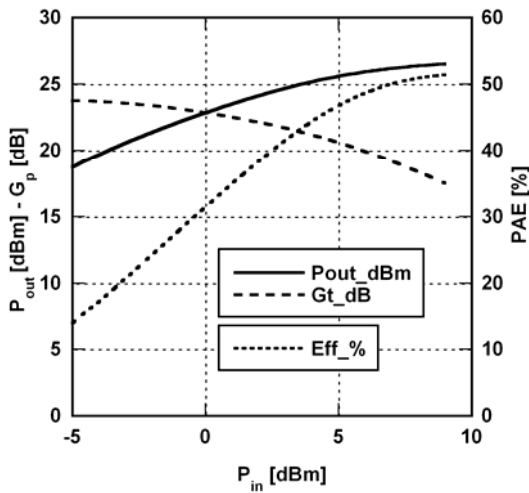


圖五

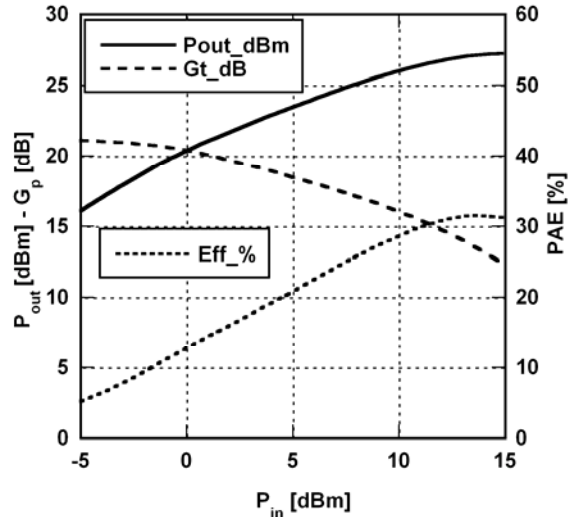


圖六

多重氧離子佈植絕緣元件之飽和電流為 833mA/mm ， G_m 值為 230mS/mm ，崩潰電壓為 90V 。由高頻小訊號分析結果，其截止頻率為 33GHz ，而最大震盪頻率為 57GHz 。圖七、八分別為 3GHz 下高功率量測結果。在 $V_D = 30\text{V}$ ， $V_G = -4\text{V}$ ，其最大功率輸出為 4.5W/mm ，效率(PAE)為 51.5% 。而在 $V_D = 40\text{V}$ ， $V_G = -4\text{V}$ 時，其最輸出功率為 5.3W/mm ，其效率為 31.5% 。

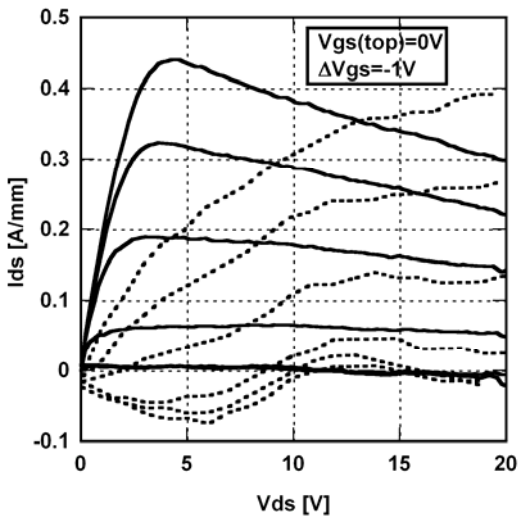


圖七

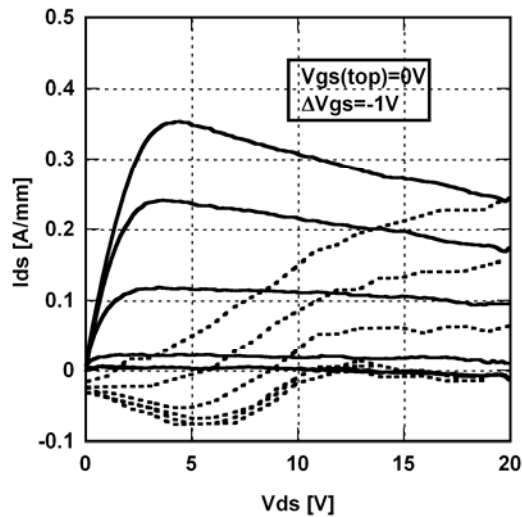


圖八

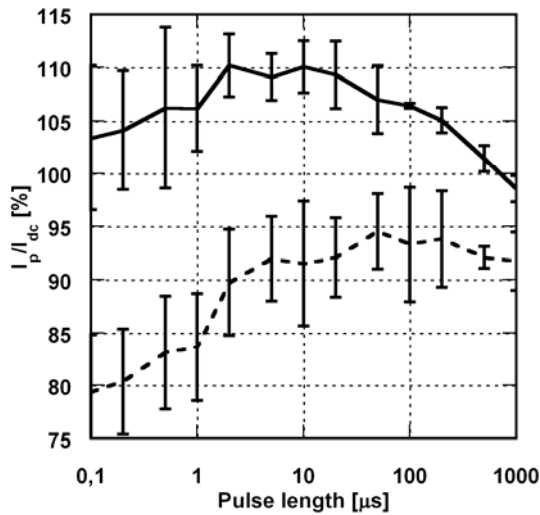
除此之外，本研究並探討利用室溫 PECVD 及濺鍍(sputter)氮化矽(Si_3N_4)作為鈍化層的影響，圖八和圖九分別為以 sputter 及 PECVD Si_3N_4 作為表面鈍化元件之 DC 及 pulse 電性比較圖。以 PECVD Si_3N_4 作為鈍化層的 pulse 電流明顯較 sputter Si_3N_4 低，代表 PECVD Si_3N_4 trapping effect 較為嚴重。圖十及圖十一為比較在不同 pulse 長度下其汲極電流的變化，在此選用的偏壓如和先前相同。由兩圖比較 sputter Si_3N_4 的 GRL 值最低為 80%，而 PECVD Si_3N_4 的 GRL 值僅 65%，代表以 PECVD Si_3N_4 作為元件鈍化層減低 gate-lag 的效果不如 sputter Si_3N_4 。而兩者在高頻小訊號分析結果上則十分相近，sputter 及 PECVD Si_3N_4 的截止頻率及最大震盪頻率分別為 3.2GHz、11GHz 和 3.1、8.5GHz。但兩者在 3GHz 下，施加相同偏壓的功率輸出則分別為 4W/mm 及 3.1W/mm，明顯 sputter Si_3N_4 的輸出功率較高，代表 sputter 較 PECVD Si_3N_4 能有效抑制 surface state，有效改善元件在高頻功率的表現。



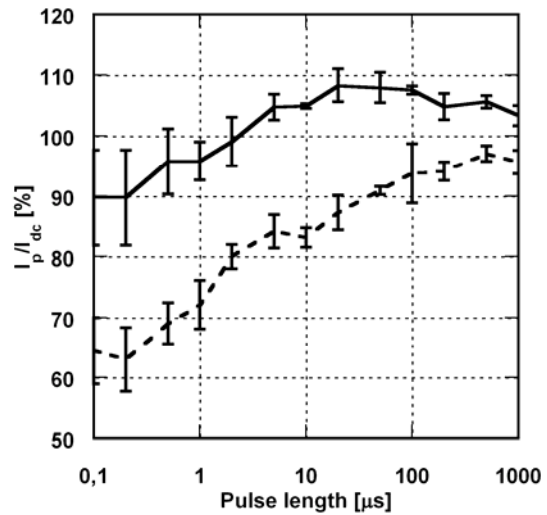
圖八



圖九

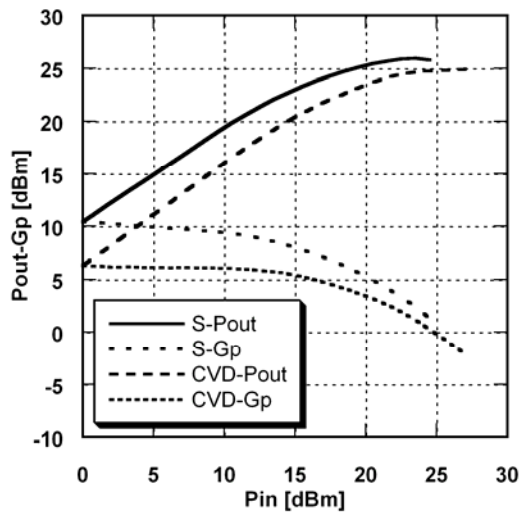


圖十

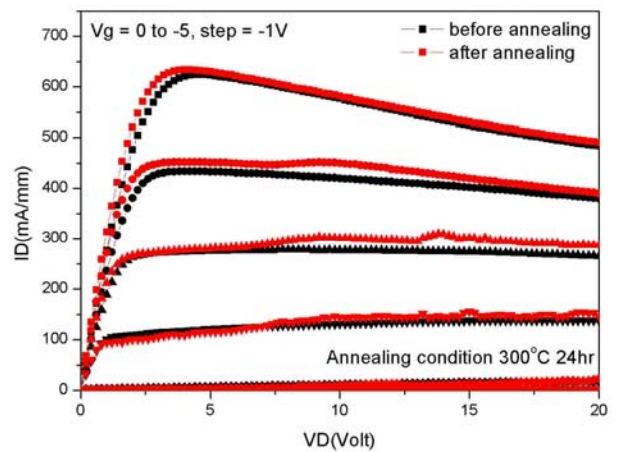


圖十一

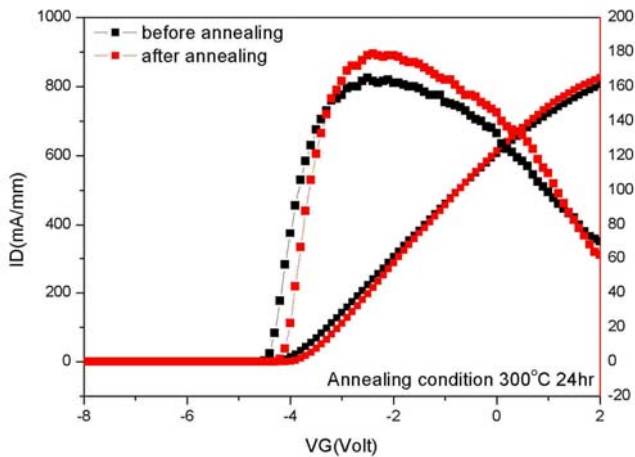
圖十三、十四、十五分別為元件完成空氣橋後，經過 300°C 24 小時退火後的 I_D-V_D 、 I_D-V_G 、 V_{BK} 圖。在經過退火後，元件之直流電性並無明顯的變化，反而在飽和電流及元件電導值(transconductance)均略有提昇，且 V_{th} 略為往正值橫移，代表 Ni 閘極金屬開始有擴散的現象產生，但並不影響電性，閘極漏電也沒有增加的趨勢，元件的崩潰電壓也沒有劣化的情況產生，代表元件經過高溫或長時間操作的可靠度佳。



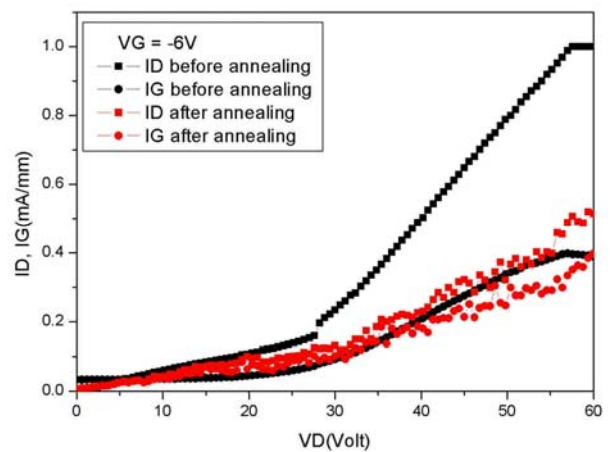
圖十二



圖十三



圖十四



圖十五

參考資料：

- 1 U. K. Mishra, P. Parikh, and Y. F. Wu, "AlGaIn/GaN HEMTs-an overview of device operation and applications," *Proceeding of the IEEE*, vol. 90, pp. 1022-1031, 2002.
- 2 S. R. Bahl, M.H. Leary, and J. A. del Alamo, "Mesa-sidewall gate leakage in InAlAs/InGaAs heterostructure field effect transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 39, no. 9, pp. 2037-2043, Sep. 1992.
- 3 S. R. Bahl, and J. A. del Alamo, "Elimination of mesa-sidewall gate leakage in InAlAs/InGaAs heterostructures by selective sidewall recessing," *IEEE Electron Device Lett.*, vol 13, no. 4, pp. 195-197, Apr. 1992.
- 4 S. C. Binari, H.B. Dietrich, G. Kelner, L.B. Rowland, K.J. Doverspike, and D. K. Wickenden, "H, He and N implant isolation of n-type GaN," *J. Appl. Phys.*, vol. 78, no. 5, PP. 3008-3011, Sep., 1995.
- 5 S. J. Pearton, C. B. Vartuli, J. C. Zolper, C. Yuan, and R. A. Stall, "Ion implantation doping and isolation of GaN," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, no. 10, pp. 1435-1437, Sep. 1995.
- 6 R. G. Wilson, C. B. Vartuli, C. R. Abernathy, S. J. Pearton and J. M. Zavada, "Implantation and redistribution of dopants and isolation species in GaN and related compounds," *Solid state Electron*, vol. 38, no. 7, pp. 1435-1437, July, 1995.
- 7 J. C. Zolper, "Ion implantation in group III-nitride semiconductors: a tool for doping and defect studies," *J. Crystal Growth*, vol. 178, no. 1-2, pp. 157-167, June, 1997.
- 8 B. Boudart, Y. Guhel, J. C. Pesant, P. Dhamelincourt, and M. A. Poisson, "Raman characterization of Ar⁺ ion-implanted GaN," *J. Ramon Spectrosc.*, vol. 33, no.4, pp. 283-286, April, 2002.
- 9 B. Boudart, Y. Guhel, J. C. Pesant, P. Dhamelincourt and M. A. Poisson, "Raman characterization of Mg⁺ ion-implanted GaN," *J. Phys. Condensed matter*, vol. 16, no.2, pp. s49-s55, Jan. 2004.
- 10 T. Oishi, N. Miura, M. Suita, T. Nanjo, Y. Abe, T. Ozeki, H. Ishikawa, T. Egawa, and T. Jimbo, "Highly resistive GaN layers formed by ion implantation of Zn along the *c* axis," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 3, pp. 1662-1666, Aug. 2003.
- 11 G. Dang, X. A. Cao, F. Ren, S. J. Pearton, J. Han, A. G. Baca, and R. J. Shul, "Oxygen implant isolation of *n*-GaIn field-effect transistor structures," *J. Vac. Sic. Technol. B*, vol.17, no. 5, pp. 2015-2018, Sep., 1999.
- 12 G. Hanington, Y. M. Hsin, Q. Z. Liu, P.M. Asbeck, S. S. Lau, M. Asif Khan, J. W. Yang, Q. Chen, "P/He ion implant isolation technology for AlGaIn/GaN HFETs," *Electronics Lett.*, vol. 34, no. 2, pp. 193-195, Jan., 1998.
- 13 M. Werquin, N. Vellas, Y. Guhel, D. Ducatteau, B. Boudart, J. C. Pesant, Z. Bougrioua, M. Germain, J. C. De Jaeger, and C. Gaquiere, "First results of AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire substrate using an argon-ion implant-isolation technology," *Microwave and Optical Technol. Lett.*, vol. 46, no. 4, Aug. 2005.
- 14 J. Kuzmík, P. Javorka, A. Alam, M. Marso, M. Heuken, and P. Kordoš, "Determination of channel temperature in AlGaIn/GaN HEMTs grown on sapphire and silicon substrates using DC characterization method," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 49, no. 8, Aug. 2002.
- 15 V. Tilak, B. Green, V. Kaper, H. Kim, T. Prunty, J. Smart, J. Shealy, and L. Eastman, "Influence of barrier thickness on the high-power performance of AlGaIn/GaN HEMTs", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 505-507, 2001
- 16 S.C. Binari, P.B. Klein, T.E. Kazior, "Trapping effects in GaN and SiC microwave FETs", *Proceedings of the IEEE.*, 2002, Vol. 90, pp. 1048-1058
- 17 Gillespie, J.K., Fitch, R.C., Sewell, J.; Dettmer, R., Via, G.D., Crespo, A., Jenkins, T.J., Luo, B., Mehandru, R., Kim, J., Ren, F., Gila, B.P., Onstine, A.H., Abernathy, C.R., Pearton, S.J., "Effects of Sc₂O₃ and MgO passivation layers on the output power of AlGaIn/GaN HEMTs", *IEEE Electron Device Lett.*, 2002, Vol. 23, 2002, pp. 505-507
- 18 Tilak, V., Green, B., Kim, H., Dimitrov, R., Smart, J., Schaff, W.J., Shealy, J.R., Eastman, L.F., "Effect of passivation on AlGaIn/GaN HEMT device performance",

Proceedings of the IEEE Twenty-Seventh International Symposium on Compound Semiconductors., 2000, pp. 357-363

- 19 W.S. Tan, P.A. Houston, P.J. Parnrook, G. Hill, R.J. Airey, "Comparison of different surface passivation dielectrics in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors", J. Phys. D, Appl. Phys., 2002, **35**, pp. 595-598
- 20 V. Desmaris, J. Eriksson, N. Rorsman, H. Zirath, "Low resistance Si/Ti/Al/Ni/Au multilayer ohmic contact to undoped AlGaIn/GaN heterostructures" Electrochem. Solid-State Lett., 2004, **7 (4)**, G72

計劃自評：

由於磊晶品質的改善，量子井載子濃度(sheet carrier concentration)與電子遷移率(mobility)都有所增益，因此在這次研究的氮化鎵電子元件直流電性方面，飽和電流 I_{dss} 均有 600mA/mm 以上， G_m 也至少有 160mS/mm 以上，已經可以穩定地製作元件。高頻電性方面， f_T 為 33GHz，而 f_{MAX} 也有 57GHz，在 3GHz 下，元件的功率輸出也可以達到 5.3W/mm，已經達到國際上研究水準的數值。綜合今年的研究結果，本實驗室在氮化鎵電子元件的製程上，已有一定的基礎以及穩定性；然而本次研究中的閘極線寬為 0.6 μ m，仍有繼續縮小的空間，希望藉由往後閘極線寬的縮小來提高飽和電流值 I_{dss} 及 G_m 值，以期提高元件在高頻下的效能。往後將繼續配合 recess 及 field plate，增進元件的高頻特性及功率輸出。

多重氧離子佈植已成功運用於氮化鎵功率電晶體的製作，即使經過 300°C 高溫退火 100 小時，其片電阻值仍大於 10¹²ohm/sq，代表其穩定性極佳，可與現有的元件製程結合，發展氮化鎵平坦化製程。利用氧離子佈植絕緣技術製作之功率元件，在頻率 3GHz 下，其功率輸出可達 5.3W/mm，已達國際研究的水準。

在經過比較 sputter 和 PECVD Si₃N₄ passivation 元件的脈衝及高頻電性後，可以證實 sputter Si₃N₄ 可更有效抑制 surface state，減少元件在高頻下的 gate-lag 效應，將元件功率由 3.1W/mm 提昇至 4W/mm。

在 300°C 退火 24 小時後，元件的飽和電流和電導值均略有上昇，而其起始電壓則往正值偏移，代表 Ni 開始往磊晶方向擴散，但並未影響閘極的漏電流，代表元件的可靠度極佳。

另外，藉由與瑞典查默斯(Chalmers)大學的國際合作計畫交流，現在已可成功在實驗室內進行氮化鎵的高頻功率量測，但由於氮化鎵的輸出功率遠大於其它元件，在量測時同時亦產生大量的熱，使得元件操作溫度上昇，而侷限元件的功率輸出，故下一階段的研究將同時著重於改善元件的散熱，包括背面基板的磨薄及封裝結構的製作，以期氮化鎵微波功率元件能發揮更高的功率效能。

赴國外研究心得報告

計畫編號	NSC 94-2215-E-009 -030 -
計畫名稱	利用雷射剝離法製作高導熱性氮化鎵微波高功率元件
出國人員姓名 服務機關及職稱	張翼，國立交通大學材料科學與工程學系
出國時間地點	2006/07/29~2006/8/7
國外研究機構	Chalmers university, Sweden

工作記要：

此次出國是與瑞典查默斯大學進行學術交流，查默斯大學位於瑞典哥登堡(Gotenberg)，為歐洲以理工著名之大學，尤其在微電子與微波工程方面在世界更是久負盛譽，其微電子無塵室(MC2 Lab)，面積龐大，設備齊全，是瑞典最大的微電子無塵室。此次交流，即是以此單位為主，接待之教授為MC2的Zirath Herbert。Dr. Zirath Herbert為MC2 lab微波電子方面的主要負責人，在歐洲頗有名氣，歐洲主要的微波會議，如European Microwave，他常受邀請為steering committee。其研究經費亦十分龐大，每年皆有300萬美金以上，下面工作人員三十餘人，領域包括材料成長、元件製作(Si及III-V based)、IC設計量測等。在台灣他與台大電機王暉教授及交大我本人皆有合作，在同時亦為Ericsson微波工程部門之顧問及負責人(瑞典大學教授可20%受顧於企業)。本實驗室主要與其合作項目為GaN HEMT及高頻flipchip package技術。雙方較大差異，在本實驗室以構裝技術製程研發為主，該實驗則在高頻IC設計較強，因此雙方各有所長，亦皆有可從對方補強之處。

此次拜訪，主要為雙方技術交流及洽談未來雙方合作事宜。拜訪期間，我舉行一場seminar “Recent progress in III-V activities at NCTU”，內容為過去一年本group在III-V微電子方面的一些成果，包含CPW Flip Chip Technology、Full Copper Metallized HBT、InAs HEMT Development、High Linearity MHEMT Devices、GaAs on Si Technology等項目，讓他們瞭解本group過去一年之研究重點之成果。

其後雙方對合作的項目做了一些討論，合作內容包含60GHz flipchip package、GaN high power HEMT、100GHz and above MHEMT MMIC development。其中交大著重在製程技術之研發，MC2則以設計為主，交大將提供100GHz之MMIC design rule(以InAs HEMT為主)，供其設計100GHz以上之MMIC設計，並為其代工製作。Flipchip technology方面因該校缺乏相關設備，因此由交大初期幫其代工，並派學生至該校指導建立flipchip之製作能力。而該校則負責幫本校製作之IC及packaged IC量測60GHz以上的low noise及power量測。

在逗留期間，本人並至MC2參觀其IC製作過程(主要為GaN HEMT)、GaN材料成長及高頻IC量測，並比較其IC layout及device layout與本校之差異性。

在GaN HEMT方面，該校在ohmic及align pattern上與本校不同，ohmic厚度較薄、align pattern則使用不同金屬層，因此在align精準度上較本校為佳。在測試方面，該校在60GHz low noise及power量測皆擁有經驗，係使用降頻器，先將相關訊號降頻再行量測，而在GaN

high power 量測，該校亦有相當經驗。

本人本次亦攜帶 GaN HEMT、low noise MMIC、power MMIC 由 MC2 成員指導並代為量測 high power 及 60GHz MMIC performance，其結果皆相當令人滿意，此次並將其量測儀器及量測方式之資料整理攜回。

在製程方面，本人與其 Fab manager 交換雙方製程的一些經驗，並實地至無塵室內參觀其製作流程，以期在 III-V 製程上雙方能精益求精，在居留期間主要在 GaN 製程及高頻測試方面，本人做了校準方面之瞭解及技術交流，相信對未來本人實驗室之研發會有相當大的幫助。

縱觀本次至查默斯大學之訪問，在 GaN HEMT、flipchip package、高頻量測方面，本人受益良多，因瑞典在微波已有深厚之基礎及工學，而該校又大量投資於這些領域，每年研究經費達 300 萬美金以上，且有專人負責製程及機器維修，因此在這些領域上該校有極佳之基礎及研究成果。而交大，因本人在材料系任教，因此在材料研究及製作創新上，為 MC2 所不足，因此雙方在專長上可說是互補，而在研究成果上則是各有千秋。在 cost performance 上，交大可說比其優秀，但以微波電子基礎、微波 IC 設計實力上，又為本校所不足，但因雙方研究皆有一定水平，因此雙方皆有極大誠意繼續合作，目前在 60GHz HEMT、100GHz 以上 MMIC 及 flipchip technology，雙方已積極合作，未來一年仍將有師生互訪及技術交流活動。(Herbert 將於 96 年來訪，本校亦將派二名學生至該校半年至一年)。本次拜訪成果豐碩，亦為未來合作奠定穩固之基礎。

赴國外研究心得報告

計畫編號	NSC 94-2215-E-009 -030 -
計畫名稱	利用雷射剝離法製作高導熱性氮化鎵微波高功率元件
出國人員姓名 服務機關及職稱	徐金鈺, 國立交通大學材料科學與工程學系
出國時間地點	2005/09/15~2006/7/31
國外研究機構	Chalmers university, Sweden

工作記要：

Abstract:

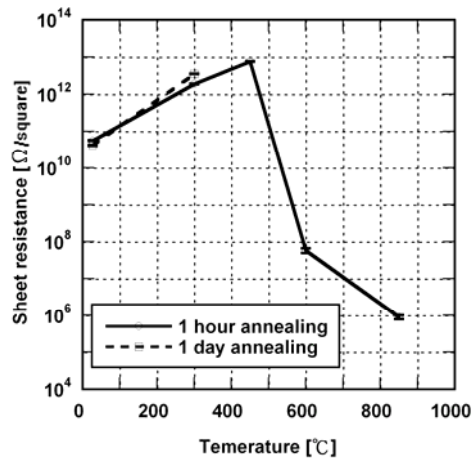
延續在台灣研究之成果，在瑞典 chalmers 大學亦主要研究下世代（3G、4G 或更高）無線通訊基地台關鍵零組件—氮化鎵高功率高電子遷移率功率電晶體（Power HEMT），以供未來數位無線通訊系統基地台使用。應用於雷達以及衛星等更高操作頻率之氮化鎵功率放大器亦在於此研究中執行。由於氮化鋁及氮化鎵極佳之基本材料特性如寬能隙（分別為 6.2 eV 及 3.4 eV）、且氮化鎵具有高飽和漂移速率（ 3×10^7 cm/sec）和高崩潰電場強度（ 5×10^6 V·cm⁻¹）…等等，使得氮化鋁鎵／氮化鎵異質接面極適合用在高頻高功率電子元件的製作上。以化學氣相沈積法磊晶機，製作高載子濃度、高電子遷移率之無摻雜離子 HEMT 結構於 sapphire 基版上；應用乾濕式蝕刻技術或離子佈質絕緣技術製作絕緣層。並成功將電子束直寫方式應用在氮化鎵微波元件上製作 0.1 μm 之 T 型閘極，並配合電漿增強化學氣相沈積系統（PECVD）或是濺鍍系統沈積氮化矽作為保護層。今年完成閘極長度 0.15 μm 的無摻雜離子 AlGaIn/GaN Power HEMT 元件，其截止頻率為 51GHz，其最大振盪頻率 105GHz。

Content:

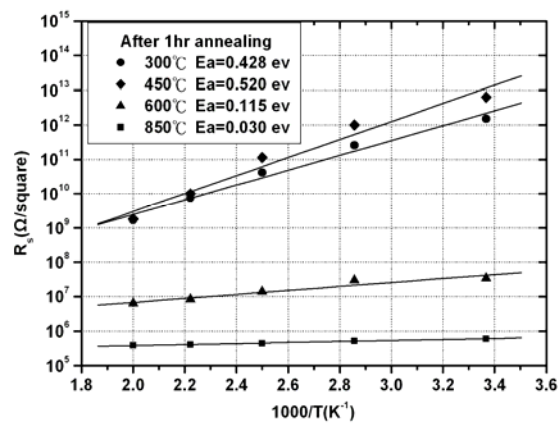
1. Oxygen Ion Implantation Isolation Planar Process for AlGaIn/GaN HEMTs

(This paper was submitted to IEEE EDL and on reviewing)

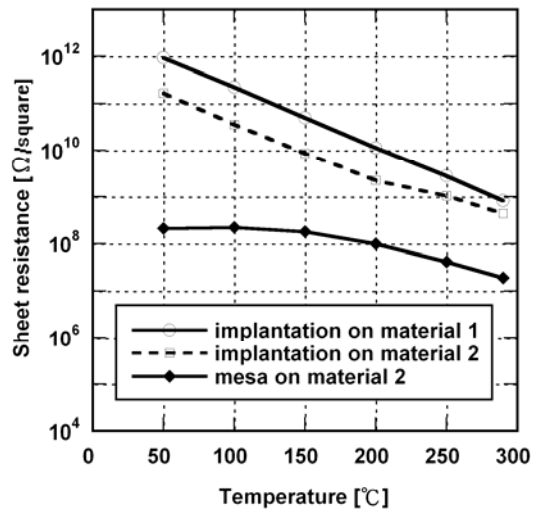
A multi-energy oxygen ion implantation isolation planar process was investigated by dc measurements on isolation test structures submitted to different annealing temperature. A thermally stable isolation sheet resistance ($>10^{12}$ Ω/square) was demonstrated. AlGaIn/GaN HEMTs were fabricated using the oxygen implantation as isolation, exhibiting (from pulsed I-V measurements) gate-lag- and drain-lag-free operation. The external cut-off frequency (f_t) and maximum frequency of oscillation (f_{max}) was 33 GHz and 57 GHz, respectively. A maximum output power density of 5.3 W/mm at $V_{gs}=-4$, $V_{ds}= 50V$ and a maximum PAE of 51.5% at $V_{gs}=-4$, $V_{ds}= 30V$ at 3GHz was demonstrated on HEMTs without field-plates on sapphire substrate.



(a)

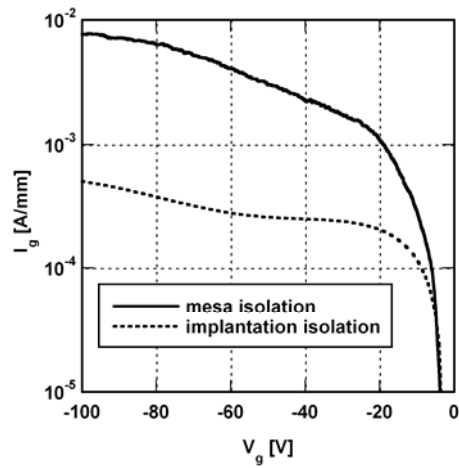


(b)

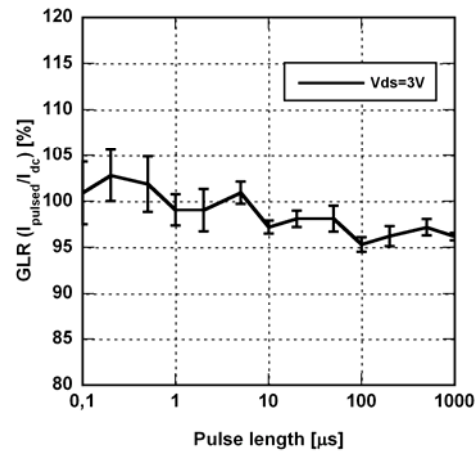


(c)

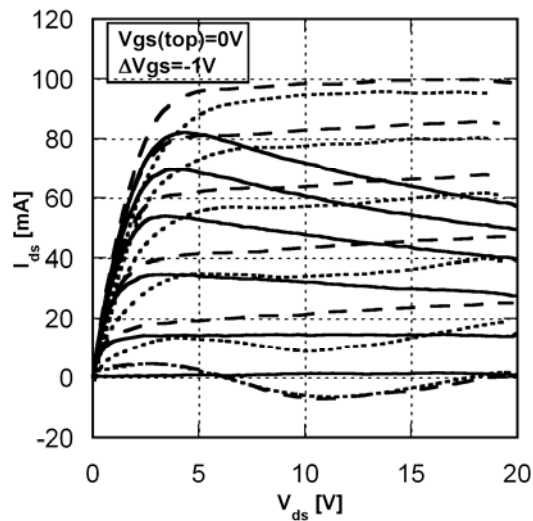
Fig. 1. (a) Sheet resistance against annealing temperature with one hour annealing time. (b) Arrhenius plot of sheet resistance against annealing temperature and showing activation energy (Ea) calculated from linear fitting curve with different annealing temperature. Both are investigated on material 1. (c) Sheet resistance against different temperature on BTS measurement.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. (a) Comparison of gate leakage current under V_{ds} of 0.1V for oxygen ion implantation and mesa isolation devices on material 2. (b) Transient characteristics of the HEMTs. Pulsing solely the gate voltage at the constant drain bias. (c) Dynamic output I-V characteristics of (V_{gs}, V_{ds}) at $(0\text{ V}, 0\text{ V})$ (dash line) and $(V_{pinch}, 20\text{ V})$ (spot line) different quiescent bias with dc I-V output characteristics.

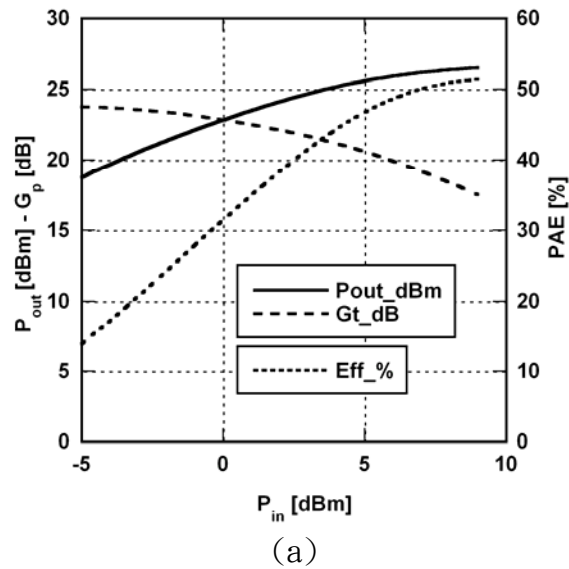
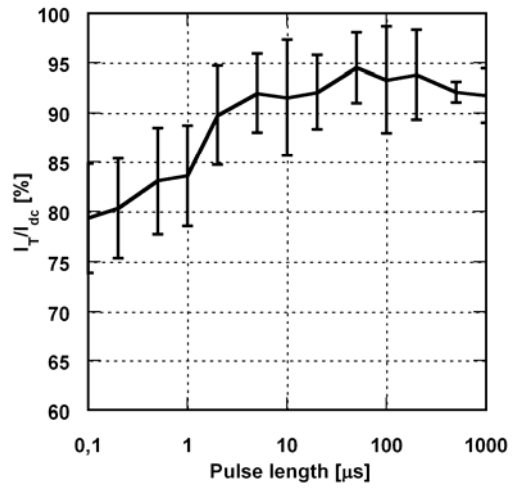


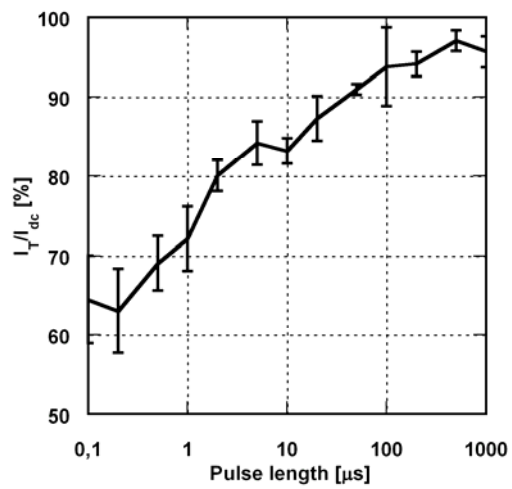
Fig. 3. Power sweep at $V_{ds}=30V$, $V_{gs}=-4V$, showing 4.5W/mm saturated out put power desity with a PAE of 51.5%.

2. DC and and microwave performance of sputtered SiN_x passivated AlGaIn/GaN HEMTs (This paper was submitted to semiconductor science and technology)

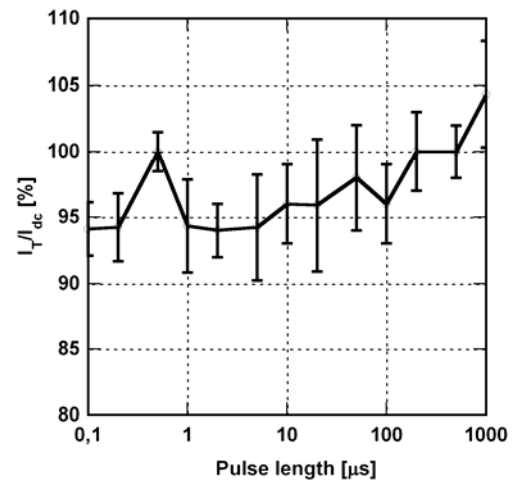
The effects of sputtered and room temperature plasma enhanced chemical vapor deposition (RT-PECVD) SiN_x passivating layer on the DC and microwave performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMTs) are studied. The DC and class B quiescent bias point pulsed I-V characteristics as well as transient measurements indicate that the sputtered SiN_x passivation is more efficient in suppressing lag-effects in AlGaIn/GaN HEMTs. Dispersion free sputtered SiN_x passivated AlGaIn/GaN HEMTs were obtained using this technique, which exhibited an extrinsic cut-off frequency (f_t) and maximum oscillation frequency (f_{max}) of 51 GHz and 100 GHz, respectively on gates of $2 \times 50 \times 0.15 \mu m$ devices. Without active cooling measurements, the maximum 6.65 W/mm output power density at $V_{gs}=-4$, $V_{ds}= 50V$ and maximum 51.3% power added efficiency at $V_{gs}=-4$, $V_{ds}= 30V$ at 3 GHz was demonstrated on gates of $2 \times 50 \times 2 \mu m$ AlGaIn/GaN HEMTs without field-plates on sapphire substrate, which represent today' s state of the art performance for this type of devices.



(a)

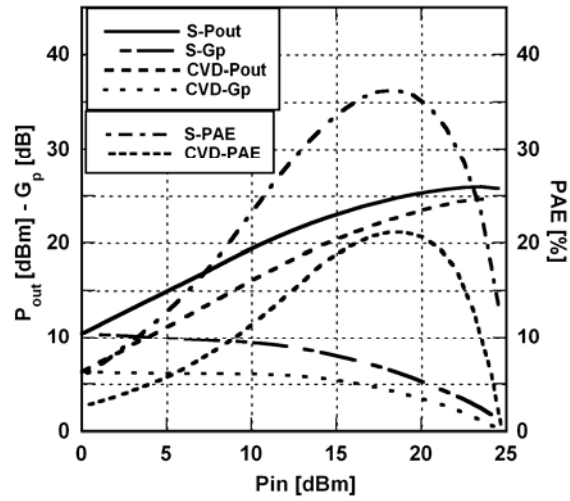


(b)

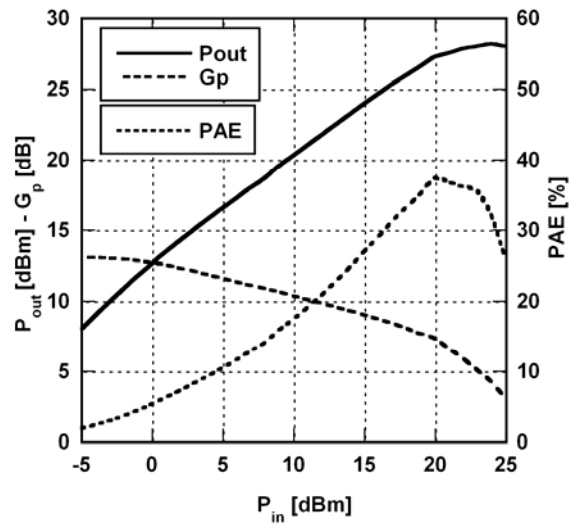


(c)

Figure 1. Transient characteristics at constant 3V drain bias of the (a) sputtered, (b) PECVD SiN_x passivated HEMTs, on material 1 and (c) sputtered SiN_x passivated HEMTs on material 2.



(a)



(b)

Figure 2. Power sweep for the HEMTs processed on the (a) sputtered (S), and PECVD (CVD) SiN_x passivated HEMTs at $V_{ds}=30\text{V}$ and $V_{gs}=-3\text{V}$ on material 1, and (b) sputtered SiN_x passivated HEMTs $V_{ds}=50\text{V}$ and $V_{gs}=-4\text{V}$ on material 2.