

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

應用在 Ku 波段之氮化鎵族化合物半導體之高功率電子元件
製作及其高頻特性量測分析

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2215-E-009-036-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

執行單位：國立交通大學材料科學與工程學系

計畫主持人：張翼

計畫參與人員：張翼、徐金鈺、呂宗育、彭怡瑄

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 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、空氣橋

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 氮化鎵異質界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 0.4 μm 的無摻雜離子 AlGaIn/GaN Power HEMT 元件，其截止頻率為 10GHz，其最大振盪頻率 24GHz。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；應用乾濕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 0.4 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。也完成電鍍製作空氣橋之製程，可有效增加氮化鎵 HEMT 元件之輸出功率。本計畫亦將持續由今年之直流及高頻特性的量測，將磊晶參數，製程條件及元件結構設計最佳化，以發展出工作頻率更高，輸出功率更大之功率電晶體。

(二) 計畫英文摘要。

Keywords : microwave communication、 GaN、 HEMT、 high frequency、 MOCVD、 base station、 Ohmic Contact、 T-gate、 air bridge、 ICP

Abstract:

Based on the previous project, the Compound Semiconductor Device Lab (CSD Lab in NCTU) will develop the key component fabrication techniques for next-generation (3G, 4G or higher) base-station. The GaN-based pseudomorphic high electron mobility transistor (HEMT) will be developed. 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 cm⁻¹) for GaN and the strong piezoelectric effect make AlGaIn/GaN based heterostructure very good candidates for high power, high frequency electronic devices. In this year, the un-doped AlGaIn/GaN power HEMT with 0.4 μ m gate length has been developed. The f_T and f_{MAX} are 10 and 24GHz, 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. 0.4 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) to protect the devices against dust and moisture. Airbridge technology has also been developed to increase the output power. The MOCVD growth parameters, process parameters and the device structure will be further optimized by the feedback data from the DC and RF measurement of the 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，使得高頻元件製作在台灣漸獲重視。過去，台灣未積極致力於高頻元件及模型化技術之研究，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導地位。由於無線通訊之需求日亦嚴苛，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、磷化銻、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，但高頻元件及模型化技術研發仍有待開發。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，希望能為國內無線微波產業身先事卒，提供學術研究及研發之另一管道，以促進國內在無線通訊產業之發展，進而提昇國內之競爭力。

研究目的：

無線通訊微波元件除要求其高頻特性外，亦希望能提昇其輸出功率。而砷化鎵能隙 1.34eV，在某些高功率輸出要求無法滿足需求，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、高溫操作及高功率輸出，國內外各大研究團隊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開發，連製程方面都和砷化鎵有所不同，尤其是氮化鎵化學穩定性高，使得蝕刻成為一大困難，加上電子束直寫技術應用在元件時，無法有效減少閘極線寬，均為一大挑戰。

研究方法：

在這次的研究當中，我們使用 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)成長簡單之 HEMT(High Electron Mobility Transistor)結構，在氮化鎵(sapphire)基板上先成長 3 μm GaN，接著是 30nm 之 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ， $x\sim 0.25$ ，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，即所謂之 2 維電子氣(2-Dimension Electron Gas)，以增加元件之電子遷移率。此磊晶結構之電子遷移率(mobility)= $582\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，載子濃度(sheet carrier concentration)= $7.8\times 10^{12}/\text{cm}^2$ 。

在元件製作過程之前，先用丙酮 ACE、異丙醇 IPA 清洗晶片 5min，再利用 HCl:H₂O(1:10)去除晶片表面之氧化層。絕緣製程是利用電子蒸鍍系統鍍上鎳(Ni)，作為誘導電耦極電漿蝕刻(Induced Coupled Plasma)之阻擋層，在晶片蝕刻出主動區之區域，如所示。再使用 AZ-5124E 光阻反轉特性，作出 undercut 結構光阻，蒸鍍 Ti/Al/Ni/Au(30/150/30/200nm)。Ti/Al/Ni/Au 多層金屬經 850 快速退火(RTA)40sec 後，形成元件之歐姆接觸(ohmic contact)。接著分別塗佈 PMMA/Copolymer 電子束直寫系統用光阻，利用兩種光阻之感光性不同，經電子束直寫系統曝光，MIBK/IPA(1:9)顯影後，形成 T 型光阻。再經電子束蒸鍍系統蒸鍍 Ni/Au(30/200nm)，經浸泡丙酮洗去光阻，形成 T 型閘極。最後，利用電漿輔助化學氣相沈積系統(PECVD)，在元件表面沈積 100nm 之 Si₃N₄，以保護元件避免異物及受潮。之後，藉由反應性離子蝕刻機(RIE)CF₄/O₂，60mTorr、50W 將金屬接觸點打開。

空氣橋之製作：如圖二所示，底層為元件之結構，因最上層為 Si₃N₄。首先旋佈第一層光阻 AB1，再利用電子束蒸鍍系統蒸鍍 Ti/Au/Ti 作為之後電鍍之導電層(Seed Metal)。接著旋佈第二層光阻 AB2，以限制空氣橋電鍍時的圖形，之後以 0.3ASD 之電流

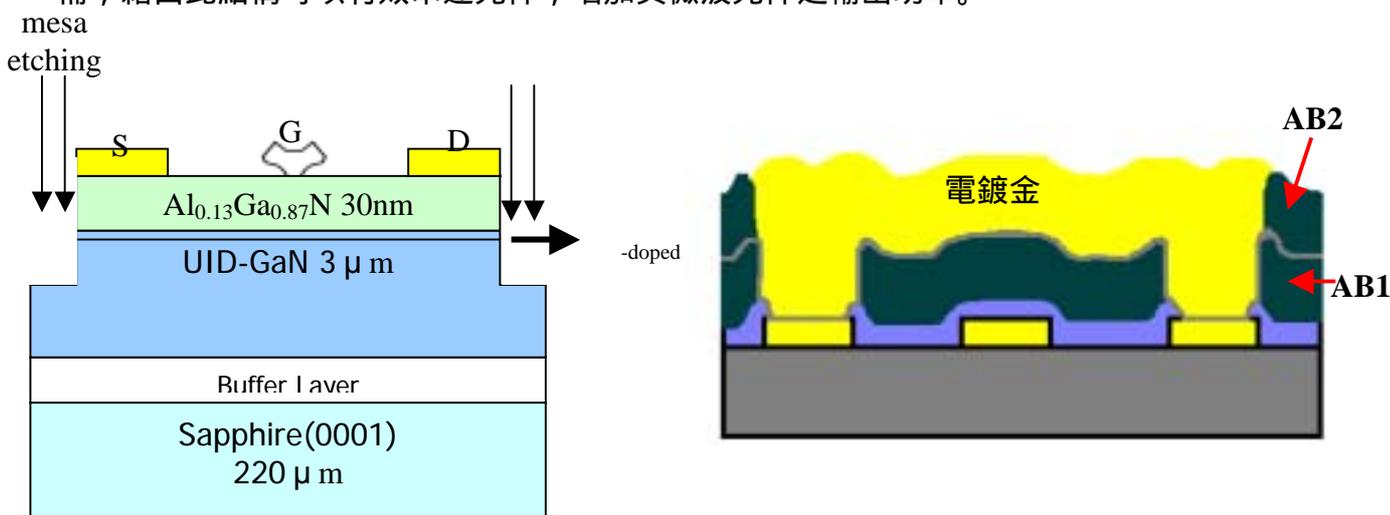
在表面電鍍金。完成電鍍後，分別去以 ACE 和 HF 去除光阻及導電層，即完成最終之空氣橋結構。

結果與討論：

此次元件之閘極是首次利用電子束直寫技術在氮化鎵高電子遷移率電晶體上製作次微米級閘極，如圖三所示，目前已能將閘極線寬縮短到 $0.4 \mu\text{m}$ 。由於氮化鎵對電子束之反射特性較強，使得曝光線寬較大，但相信利用光阻厚度及曝光量之調變，應還能將有效線寬往下縮小。圖四為其歐姆接觸特性，在經過 850 快速退火 40 秒後，可得到最低接觸電阻 $9.956 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$ 。

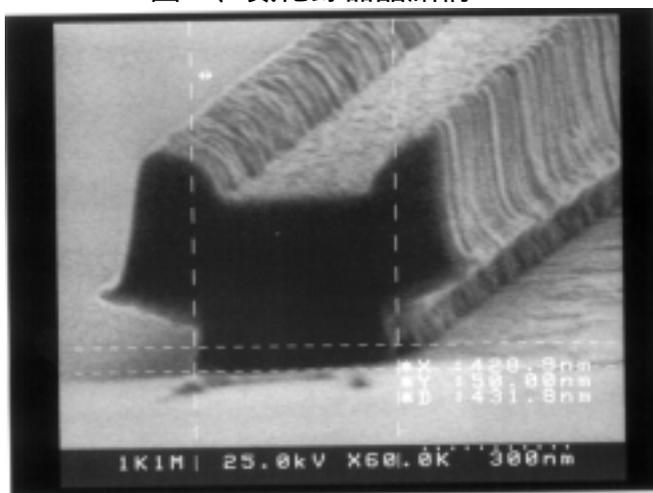
圖五為氮化鎵高電子遷移率電晶體之直流特性 $I_d\text{-}V_d$ 。此元件之 pinch-off voltage 約為 -2.5 伏特，飽和電流值約 175mA/mm，而 G_m 在 $V_d=5$ 伏特時，最大值約為 30.8mS/mm。圖六為其高頻特性，其中 h_{21} 代表電流增益(dB)，而 MaxGain(dB) 代表功率增益，兩條直線分別和增益值等於零之直線交於 10GHz 及 24GHz，分別代表其截止頻率 f_T ，及最大振盪頻率 f_{MAX} ，這是目前為止國內第一次成功製作出氮化鎵微波元件之高頻特性，相信在接下來的計劃中，可由今年之經驗及分析，有效將磊晶條件及製程最佳化。

圖七及圖八均為空氣橋之電子顯微鏡照片(SEM)，目前已完成空氣橋之製程及設備，藉由此結構可以有效串連元件，增加其微波元件之輸出功率。

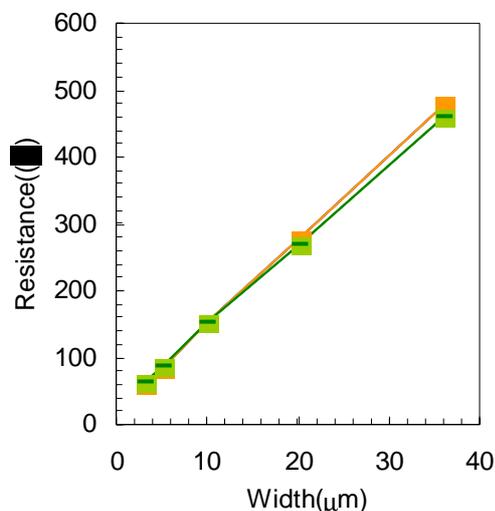


圖一、氮化鎵磊晶結構

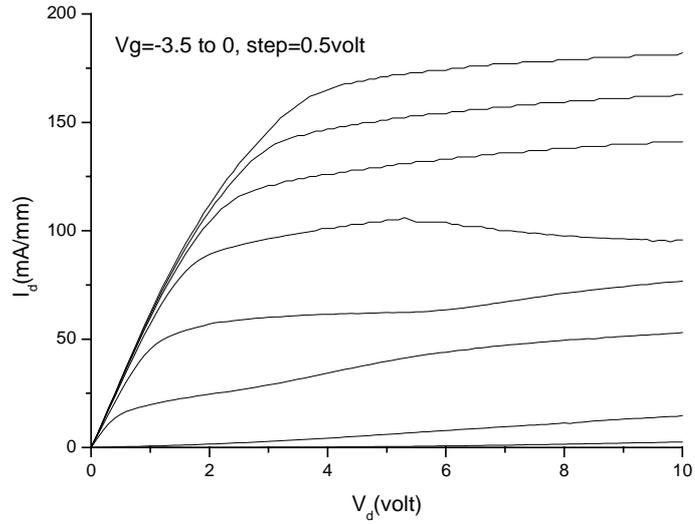
圖二、空氣橋製程示意圖



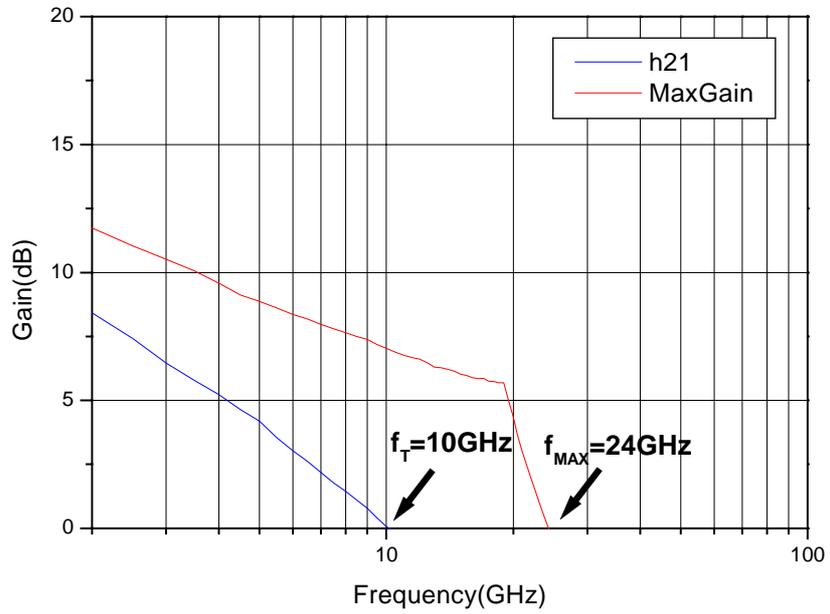
圖三、 $0.4 \mu\text{m}$ 閘極 SEM



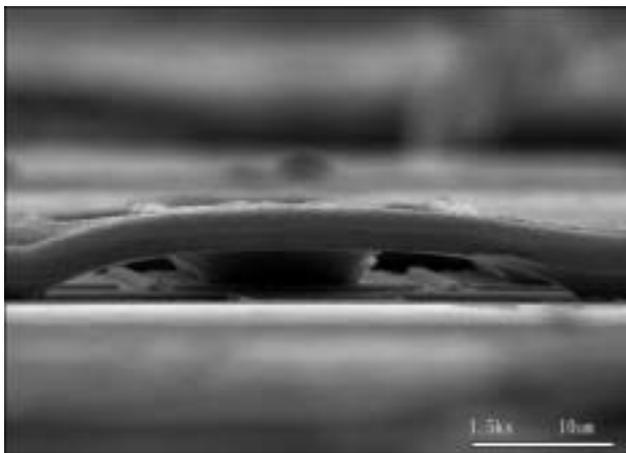
圖四、歐姆接觸特性



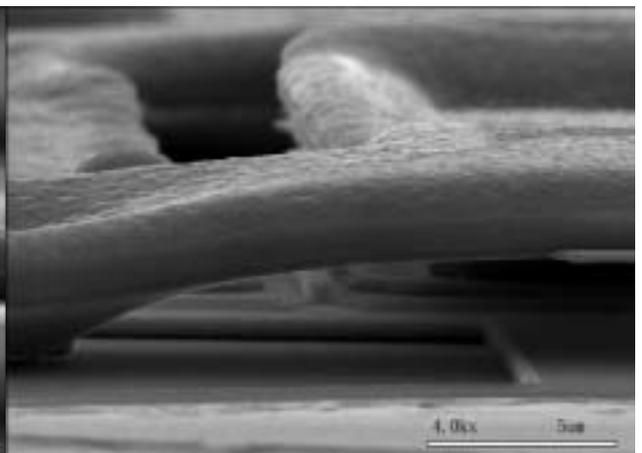
圖五、 I_d - V_d of GaN HEMT



圖六、High frequency characteristics of GaN HEMT



圖七、空氣橋結構 SEM



圖八、空氣橋結構 SEM

參考資料：

- [1] C.-T. Lee and H.-W. Kao, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2364 (2000)
- [2] Z. Z. Bandic, P. M. Bridger, E. C. Piquette, Q. Chen, M. A. Khan, A. O. Orlov, G. L. Snider, M. S. Shur, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 1266 (1998)
- [3] Jin-Yu Shiu, Rwei-Chain Huang, Cheng Shih Lee, Edward-Yi Chang, Chao-Yi Fang, Yao-Lin Huang, Jian-Sheng Huang, Proceedings of International Electron Devices and Materials Symposium 2002, P.295 發表期刊
- [4] Jin-Yu Shiu, Rwei-Chain Huang, Yun-Ji Wu, Edward-Yi Chang, Chao-Yi Fang, Proceedings of International Electron Devices and Materials Symposium 2002, P.291 發表期刊
- [5] Jewon Lee, Hyun Cho, David C. Hays, Cammy R. Abernathy, Stephen J. Pearton, Randy J. Shul, G. Allen Vawter, and J. Han, *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol4, no. 3, May/June 1998
- [6] L. C. Zhang, S. K. Cheung, C. L. Liang, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 445 (1987)

計劃自評：

此次為第一次發表之氮化鎵電子元件具有高頻特性之成果，雖然 $f_{MAX}(24\text{GHz})$ 不如國外團隊 ($>100\text{GHz}$)，但由於此批晶片之磊晶條件尚未最佳化，無論電子遷移率及電子載子濃度均不高，但已有相當之基礎，更可證明元件之製程之正確性。在此基礎下，相信在接下來的計劃當中可以繼續改進磊晶之參數，以有效增加元件之電流密度及高頻特性。另外，已成功發展空氣橋之製程，將來可運用在氮化鎵高功率電晶片上，有效增加元件之輸出密度。